



Modelo numérico del desempeño eléctrico y térmico de un transformador monofásico parametrizado para simulaciones, utilizando COMSOL Multiphysics.

Mateo Cardona Gómez

Informe de práctica presentado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Asesor

Andrés Felipe Colorado Granda, Doctor (PhD) en Ingeniería mecánica y aeroespacial.

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica
Medellín, Antioquia, Colombia
2024

Cita	Cardona Gómez [1]
Referencia Estilo IEEE (2020)	[1] M. Cardona Gómez, “Modelo numérico del desempeño eléctrico y térmico de un transformador monofásico parametrizado para simulaciones, utilizando COMSOL Multiphysics”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Mecánica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2024.



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

El resultado de la formación que he tenido, el apoyo que he recibido a lo largo de la vida, el acompañamiento y la fortaleza para lograr este título, se lo debo a mi madre y a mi tía. Estas dos mujeres han sido y son pilares de mi vida y fuente de soporte emocional. Por lo que, lo menos que puedo hacer es dedicarles este triunfo, que también es de ellas.

Agradecimientos

Le agradezco a mi familia por haberme apoyado en el transcurrir de este proceso, a mi madre por creer fielmente que la educación es la mejor herencia que podría darme. Agradezco a mi tía que estuvo acompañándome, dándome luz de esperanza en momentos que pensé desistir. A todos los profesores de la universidad, especialmente a quienes tuve de cerca con trabajos investigativos o quienes a lo largo de mi estancia por la universidad fueron más cercanos y lograron transmitir su conocimiento, generar inspiración y fortalecer habilidades para ser hoy en día un profesional competente y altamente capacitado. Agradezco a Rymel S.A.S por permitirme realizar el período de prácticas dentro de sus instalaciones y ofrecerme una oportunidad de crecimiento profesional y personal amplia. También, debo mencionar a esos amigos y personas cercanas que, con sus comentarios halagadores y motivadores, lograron mantener mi entusiasmo por lograr tener el título de ingeniero mecánico.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen9

Abstract 10

I. Introducción 11

II. Planteamiento del problema 14

III. Justificación..... 15

IV. Objetivos 16

 i. Objetivo general 16

 ii. Objetivos específicos..... 16

V. Marco teórico 17

 i. Inducción electromagnética..... 17

 ii. Ley de Faraday 18

 iii. Ley de Lenz 19

 iv. Ley de Lorentz 19

 v. Transformador 20

 vi. Tipos de transformadores 21

 a. Transformador monofásico: 21

 b. Transformador bifásico: 22

 c. Transformador trifásico: 22

 vii. Software COMSOL Multiphysics 22

 viii. Modelo de simulación por volúmenes finitos (FEA) 23

 a. Geometría 23

 b. Materiales 24

 c. Física 25

 d. Mallado..... 25

VI.	Metodología	25
VII.	Cronograma de actividades	26
VIII.	Presupuesto.....	28
IX.	Resultados	29
i.	Geometría	29
ii.	Materiales	32
iii.	Propiedades físicas	33
iv.	Modelo circuital	35
v.	Mallado.....	36
vi.	Estudio.....	39
vii.	Simulación.....	41
X.	Conclusiones	46
XI.	Referencias bibliográficas	47
XII.	Anexos.....	49

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características magnéticas y eléctricas de los casos del modelo.	24
Tabla 2. Densidades de corriente para los materiales conductores eléctricos.....	24
Tabla 3. Cronograma de actividades desarrolladas en el período de práctica empresarial.	26
Tabla 4. Presupuesto discriminado del proyecto.....	28
Tabla 5. Definición de parámetros geométricos en el programa COMSOL Multiphysics.	30
Tabla 6. Parámetros de materiales, software COMSOL Multiphysics a condiciones estándar de temperatura y presión.	32
Tabla 7. Variables de entrada, propiedades físicas. COMSOL Multiphysics.....	33
Tabla 8. Tabla comparativa datos de diseño contra resultados de simulación.....	45

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Matriz de capacidad de generación eléctrica de Colombia, DANE. 2018. [1]	11
Ilustración 2. Proyección anual de demanda energía eléctrica (GWh-año) – sin GCE. [1].....	12
Ilustración 3. Esquema representación de transformador monofásico.....	17
Ilustración 4. Esquema inducción electromagnética. [11]	18
Ilustración 5. Representación fuerza de Lorentz. [12]	20
Ilustración 6. a) el núcleo de forma esquemática, b) el transformador monofásico de manera esquemática.	21
Ilustración 7. Árbol de procesos, diseños de transformadores. COMSOL Multiphysics.	30
Ilustración 8. Árbol de procesos, construcción geométrica. COMSOL Multiphysics.....	31
Ilustración 9. Construcción geométrica parametrizada, COMSOL Multiphysics.	31
Ilustración 10. Listado de materiales del modelo, COMSOL Multiphysics.	33
Ilustración 11. Árbol de procesos, selección de dominios. COMSOL Multiphysics.....	33
Ilustración 12. Árbol de procesos, campos magnéticos. COMSOL Multiphysics.....	34
Ilustración 13. Configuración de propiedades físicas, Ley de Ampere. COMSOL Multiphysics.	34
Ilustración 14. Árbol de procesos, circuito eléctrico. COMSOL Multiphysics.	35
Ilustración 15. Configuración fuente de voltaje, circuito eléctrico. COMSOL Multiphysics.	36
Ilustración 16. Malla previa, proceso de mallado. COMSOL Multiphysics.....	37
Ilustración 17. Árbol de procesos, mallado. COMSOL Multiphysics.	37
Ilustración 18. Esquema del mallado, transformador monofásico, COMSOL Multiphysics.	38
Ilustración 19. Calidad de malla, COMSOL Multiphysics.	39
Ilustración 20. Árbol de procesos, estudio. COMSOL Multiphysics.....	40
Ilustración 21. Configuración dominio de la frecuencia, COMSOL Multiphysics.	41
Ilustración 22. Árbol de procesos, resultados. COMSOL Multiphysics.....	42
Ilustración 23. Configuración densidad de flujo magnético, COMSOL Multiphysics.....	42
Ilustración 24. Resultados simulaciones en bobinas y núcleo. COMSOL Multiphysics.....	43
Ilustración 25. Resultados simulaciones, en aceite. COMSOL Multiphysics.....	44
Ilustración 26. Evaluación global de valores de referencia. COMSOL Multiphysics.....	45

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

AWG	American Wire Gauge
CFD	Computational fluids dynamics
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
FEA	Finite elements analysis
FEM	Fuerza electromotriz
FES	Finite element simulation
PhD	Philosophie Doctor
UDEA	Universidad de Antioquia
UPME	Unidad de Planeación Minero-Energética

RESUMEN

El presente trabajo da cuenta del período de prácticas desarrollado en la empresa RYMEL S.A. para el semestre 2024/1. La empresa se dedica al diseño y fabricación de diferentes tipos de transformadores, de los cuales se seleccionó un transformador monofásico para realizar un modelo de simulaciones. El trabajo acá presentado da cuenta de un modelo numérico de simulaciones CFD con un diseño parametrizado, por geometría, de un transformador monofásico, que cuenta con un núcleo, dos bobinas y está en medio aceitoso, en el cual se realizarán mediciones de: voltaje, corriente y propiedades físicas. Se crea entonces, una herramienta de diseño que toma los valores de las dimensiones del núcleo, emitidas por el área de diseño eléctrico, y realiza la modelación de la parte activa del transformador. Se dejaron estandarizados los valores para los diferentes materiales de los elementos del transformador, con los que se trabaja en la empresa, para realizar futuras configuraciones diferentes que permitan tener resultados del comportamiento en las mediciones mencionadas. Se realizó la validación del modelo con el análisis comparativo referente al modelo experimental fabricado.

Palabras clave: Transformador eléctrico, simulación, COMSOL Multiphysics, modelo parametrizado.

ABSTRACT

This work reports on the professional internship period developed in the company RYMEL S.A. for the 2024/1 semester. The company is dedicated to the design and manufacture of diverse types of transformers, of which a single-phase transformer was selected to carry out a simulation model. The work presented here reports on a numerical model of CFD simulations with a parameterized design, by geometry, of a single-phase transformer, which has a core, two coils and is in an oily medium, in which measurements of: voltage, current and physical properties. A design tool is then created that takes the values of the core dimensions, issued by the electrical design area, and performs the modeling of the active part of the transformer. The values for the dissimilar materials of the transformer elements, with which the company works, were standardized, to make different future configurations that allow for behavioral results in the measurements. The validation of the model was conducted with the comparative analysis referring to the experimental model manufactured.

Keywords: Electrical transformer, simulation, COMSOL Multiphysics, parameterized model.

I. INTRODUCCIÓN

El transformador es un elemento eléctrico que permite la transformación de la tensión eléctrica para el uso o transporte de la energía. Este instrumento ha sido de gran importancia para las diferentes comunidades, debido a que ha permitido el acceso al fluido eléctrico en zonas que no tenían dicho recurso anteriormente. Estas máquinas permitieron la transformación de la energía eléctrica, para ser transportada a grandes distancias. La generación de la energía eléctrica se da a partir de tener una diferencia de potenciales eléctricos, lo cual produce un flujo o corriente, y esta es utilizada en los hogares, industria y transporte para diferentes aplicaciones como: iluminación, cocción, refrigeración, calefacción, entre otros. [2]

La generación de energía eléctrica en Colombia se da, en su mayoría, por fuentes hídricas, debido a la gran riqueza de dicho recurso en el territorio nacional, tal como se muestra en la Ilustración 1 de la matriz de capacidad de generación eléctrica. INCLUIR LA TRAYECTORIA EN VOLTAJE HASTA LLEGAR AL TRANSFORMADOR MONOFÁSICO Pero, el transporte de la energía desde los lugares de los cuales se genera, hasta las zonas de distribución del fluido eléctrico, se realiza a altos voltajes, por lo cual se requiere de una elevación de la tensión existente, la cual se hace a través de uno o varios transformadores, esta medida se implementa para disminuir las pérdidas en el transporte, las cuales son altas si se tienen grandes corrientes. Por lo anterior, es relevante el fortalecimiento de la investigación en las áreas adyacentes al diseño y fabricación de dichos elementos. [1]

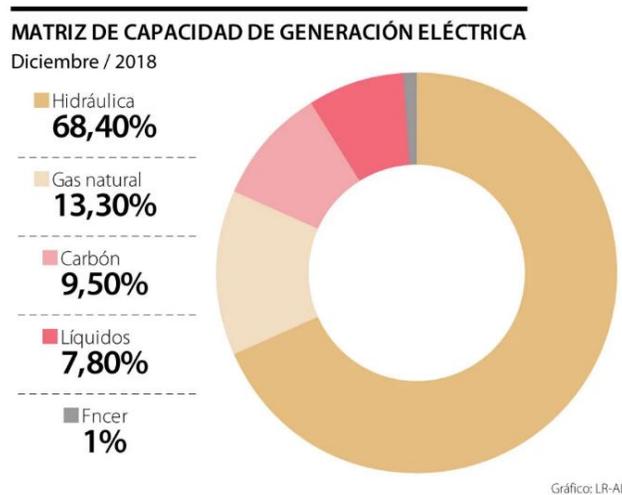


Ilustración 1. Matriz de capacidad de generación eléctrica de Colombia, DANE. 2018. [1]

El comportamiento de la demanda energética del país ha mostrado crecimiento en los últimos años, solamente mostró decrecimiento para el año 2020 y fue a costa de la contingencia por COVID 19. Sin embargo, los indicadores de la demanda de dicho recurso y las proyecciones de este para los próximos 12 años son al alza, con valores estimados entre el 3,98% y el 5,15%, lo cual equivale a un crecimiento promedio de 0,44 puntos porcentuales por año, según la UPME. [1, 4]

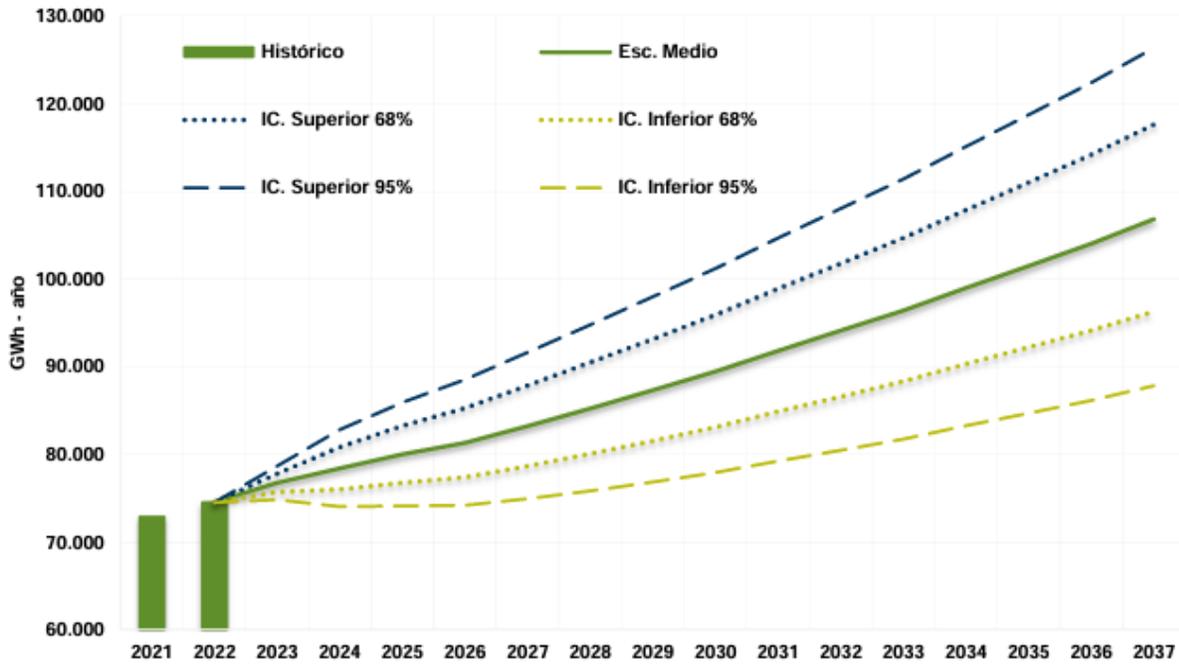


Ilustración 2. Proyección anual de demanda energía eléctrica (GWh-año) – sin GCE. [1]

La industria de los transformadores, en Colombia, no cuenta aún con grandes avances en el proceso de diseño, que involucren ejercicios de simulaciones de dinámica de fluidos computacional y fenómenos de transporte electromagnético. Las simulaciones numéricas han traído grandes avances en industrias como la aeroespacial o aeronáutica ya que se basan en principios de conservación de energía, masa y momento. Es por ello, que se plantea la posibilidad de desarrollar herramientas que permitan generar avances en el sector de los transformadores, poder realizar validaciones de los diferentes tipos de diseños de transformadores y reducir pérdidas u optimizar los diseños para que sean confiables, seguros, eficientes y lo más económico posible.

El presente trabajo presenta el desarrollo de un modelo de un transformador monofásico, el cual se sometería a un análisis por volúmenes finitos mediante COMSOL realizando simulaciones para ensayos de corto circuito y vacío, buscando tener resultados en magnitud similares a las mediciones realizadas de manera experimental en el laboratorio. Esto posibilita el desarrollo de un modelo

parametrizable de los aspectos más relevantes en el diseño de un transformador, lo que reduciría costos y tiempo para la validación de un modelo específico a futuro. [3]

La práctica empresarial se realizó en la empresa Rymel S.A.S., una empresa líder en diseño y fabricación de transformadores en América Latina, con cobertura en 14 países. La empresa ha venido teniendo grandes crecimientos en la producción, abarcando cada vez más el mercado del continente, desarrollando transformadores para las diferentes exigencias y capacidades requeridas en los territorios. De acuerdo con esto, se manejan múltiples referencias de transformadores de diferentes capacidades y tipos.

Para el presente trabajo de prácticas, el tipo de transformador que se analizará será de tipo distribución, sumergido en aceite, de núcleo enrollado, bobinas concéntricas; y se hará uso del software COMSOL Multiphysics, utilizando el módulo de multifísica, de lo cual se ahondará a lo largo del presente documento.

De manera simultánea se realizaron otros trabajos dentro de la compañía, que están asociados al área de Innovación y al área de Mantenimiento. Para resaltar dentro de estas actividades desarrolladas, se elaboró un plan de acción para el mantenimiento de la empresa, el cual fue usado para atender una auditoría externa y dar cumplimiento con unos requerimientos que tenía la empresa. Se presenta como anexo el documento mencionado.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se requiere realizar un modelo parametrizado por geometría de un transformador monofásico, que permita desarrollar simulaciones por volúmenes finitos, evaluando diferentes propiedades físicas y el comportamiento electromagnético. Este modelo parte de datos reales respecto a las propiedades termofísicas de los materiales, los diseños eléctricos de la parte activa del transformador (núcleos y bobinas) y los resultados de mediciones de laboratorio de rutina.

Se espera que los resultados modelados sean semejantes a las mediciones de laboratorio, información que reposa en los protocolos emitidos por la empresa para cada cliente.

Para futuros trabajos, se plantea el diseño de detalle de cada uno de los elementos e involucrar elementos como los aislantes y terminales, los cuales son causales de pérdidas eléctricas en el funcionamiento de la máquina y que de esto no se tiene mucha información detallada.

El desarrollo de un modelo parametrizado y ajustable a cualquier diseño de transformador monofásico de la empresa, deja ya un precedente importante en el desarrollo de herramientas computacionales para plantear mejoras en los diseños existentes y futuros de los transformadores.

III. JUSTIFICACIÓN

La industria de los transformadores ha venido teniendo inmersión en herramientas de diseño que posibiliten predecir el comportamiento de los modelos, un mejoramiento y optimización previo a la fabricación. Por esto se plantea el desarrollo de un modelo que permita realizar simulaciones multifísicas por volúmenes finitos, permitiendo validar y mejorar diseños para ser cada vez más competitivos dentro de la industria de la fabricación de transformadores. Rymel S.A.S. es una empresa con gran cobertura en el continente americano, teniendo presencia en 14 países, por lo que requiere de tecnologías y herramientas que la lleven a estar a la vanguardia de los desarrollos del mundo.

Los resultados de los cálculos que se tienen de manera analítica de los diseños de los transformadores son fiables, sin embargo, no muestran las distribuciones de los puntos más críticos a lo largo y ancho de los diferentes elementos involucrados y es por esto que se opta por involucrar herramientas que permitan visualizar este comportamiento a un nivel de detalle mayor y con ello poder controlar en la especificidad los diseños geométricos, mejorando la eficiencia de la máquina y reduciendo en la mayor cantidad posible las pérdidas asociadas al funcionamiento normal del transformador.

IV. OBJETIVOS

i. Objetivo general

Elaborar un modelo numérico de un transformador monofásico parametrizado en las dimensiones geométricas, para realizar simulaciones por CFD y evidenciar resultados de comportamientos en corrientes, voltajes, pérdidas y propiedades físicas.

ii. Objetivos específicos

- Realizar una búsqueda bibliográfica de los modelos de simulaciones por volúmenes finitos existentes, publicados por otros autores, que permitan hacer un acercamiento al diseño que se va a plantear.
- Realizar un reconocimiento del proceso de diseño de transformadores llevado a cabo dentro de la empresa, evidenciando los parámetros más relevantes para tener en cuenta en la selección y diseño en detalle de los diferentes componentes internos.
- Evidenciar el proceso de pruebas a los cuales son sometidos los transformadores, para diseñar un modelo que permita realizar comparativos con las mediciones de los modelos existentes.
- Realizar las respectivas simplificaciones del modelo para realizar simulaciones en tres dimensiones de uno de los transformadores.
- Validar experimentalmente variables como: corrientes, voltajes, temperaturas, pesos; al compararlo con resultados de laboratorio del mismo modelo y hacer los ajustes respectivos al sistema para tener un modelo con resultados aproximados.

V. MARCO TEÓRICO

Para el desarrollo de un modelo de simulaciones por volúmenes finitos sobre un transformador, se debe entender primero el funcionamiento de esta máquina desde sus principios físicos fundamentales y las propiedades asociadas a los materiales de cada uno de los elementos que la componen. Para el caso de estudio de esta práctica, se plantea el modelo de un transformador monofásico, entendido desde una estructura de un núcleo con dos bobinas, una de alta tensión y una de baja tensión, tal como se muestra en la Ilustración 3. Las bobinas también pueden ser nombradas bobina primaria y secundaria o bobina de alta tensión y de baja tensión.

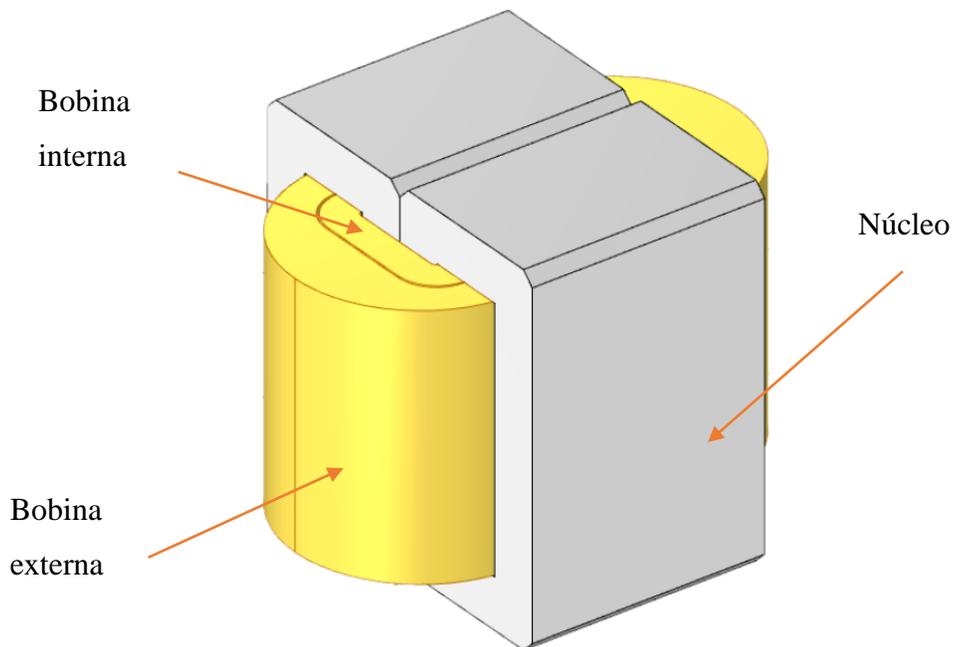


Ilustración 3. Esquema representación de transformador monofásico.

El transformador funciona bajo un principio de inducción de campos, tanto magnéticos como eléctricos, donde se genera una corriente eléctrica en el embobinado primario, el cual induce una corriente magnética en el núcleo (cumpliendo con la ley de la mano derecha) y a su vez, este induce una corriente eléctrica en la bobina secundaria, para lo que se requiere entender el concepto de inducción electromagnética.

i. Inducción electromagnética

Es una corriente que se induce o genera a partir de tener otra corriente circulando, lo cual promueve un cambio en el campo. Este fenómeno ocasiona la creación de la fuerza electromotriz (FEM). Se produce inicialmente una corriente a circular en un devanado y como consecuencia se tiene la corriente eléctrica a la salida dando cumplimiento con la coexistencia de los campos magnéticos y eléctricos generados entre sí.

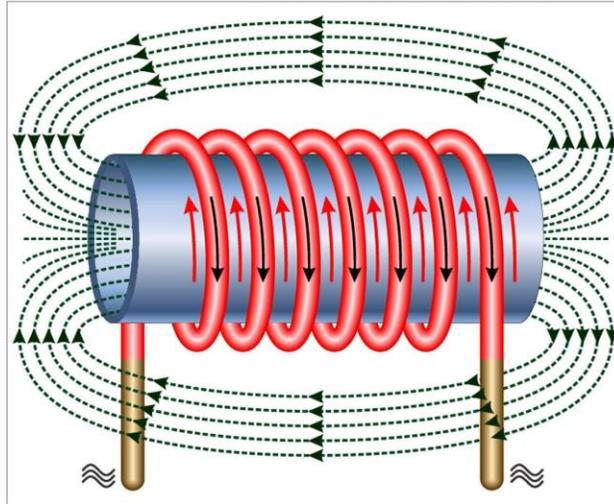


Ilustración 4. Esquema inducción electromagnética. [11]

El principio físico que rige el comportamiento del transformador eléctrico se da por la ley de Faraday, Ley de Lenz y ley de Lorentz; las cuales se describirán brevemente a continuación para poder dar claridad a los conceptos básicos de análisis del modelo. [6-7]

ii. Ley de Faraday

Es la relación existente entre el flujo magnético que pasa a través de una espira, con la magnitud de la fuerza electromotriz (FEM) inducida en la espira. Esta relación está dada por la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = N \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

La diferencia de potencial que se da a través de la espira descargada es lo que se llama la fuerza electromotriz y por esto tiene a confundirse con el voltaje, dado que tienen la misma unidad de medición. La ley de Faraday es precisamente la que permite cuantificar la magnitud de la FEM producida. [6]

iii. Ley de Lenz

Se da como consecuencia de la inducción electromagnética, teniendo en cuenta el principio de conservación de la energía, por lo que permite identificar la dirección del flujo de corriente, dado que dicha corriente siempre está en oposición al flujo de la corriente que la produce. En ocasiones se suele relacionar la ley de Faraday con la de Lenz, dada la correlación existente entre ambas.

iv. Ley de Lorentz

Establece que una partícula que tenga cierta carga y circule a una velocidad, siendo sometido a un campo magnético, sentirá una fuerza la cual es denominada “fuerza de Lorentz” y el valor de la magnitud de dicha fuerza dependerá de la carga, la velocidad y el campo, tal como se muestra en la siguiente ecuación. [8]

$$\vec{F} = q * \vec{v} \times \vec{B} \quad (2)$$

Donde,

\vec{F} : Fuerza de Lorentz.

q : carga eléctrica.

\vec{v} : Velocidad.

\vec{B} : Campo magnético

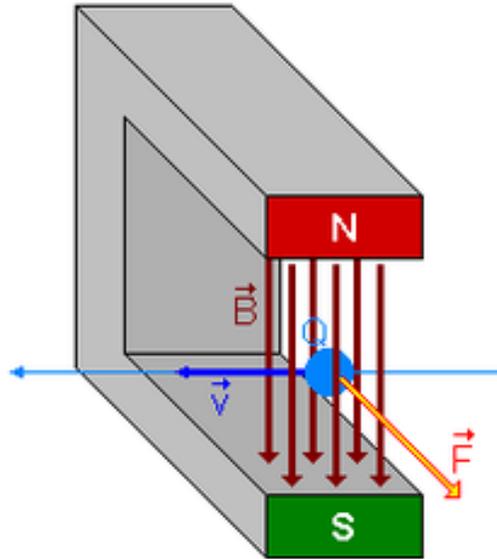


Ilustración 5. Representación fuerza de Lorentz. [12]

Habiendo abordado los principios físicos que rigen el fenómeno de comportamiento del transformador, entonces se precisa hablar directamente del transformador en sus elementos y definir el modelo de estudio, diferenciando los diferentes tipos de transformadores existentes actualmente.

v. *Transformador*

Un transformador es una máquina estática de corriente alterna, que consta de un núcleo y unas bobinas que se enrollan sobre el núcleo. Este elemento ha sido esencial para el transporte y la distribución de la energía en las diferentes empresas, viviendas, comercios, entre otros. Estos elementos aseguran unas condiciones específicas de comportamiento de la energía en términos de voltajes, corrientes y frecuencias, por lo que generan seguridad para la protección las diferentes conexiones requeridas. [5], [9]

El núcleo de un transformador está fabricado en un material que cumpla con propiedades magnéticas, por ejemplo, acero magnético (acero al silicio). Existen diferentes tipos de núcleos, sin embargo, para este caso, el material se procesa desde láminas que van enrolladas sobre sí, formando una especie de marco. Por otro lado, las bobinas están fabricadas en materiales que garanticen buena conducción eléctrica, por ejemplo, cobre o aluminio. Estas bobinas se fabrican a través de

este material en forma de alambre o fleje, el cual se enrolla sobre el núcleo con un recubrimiento aislante que evita la formación de un corto circuito. En la siguiente imagen se muestra una representación esquemática del núcleo y del transformador, sin embargo, se entiende que el núcleo es fabricado a través del apilamiento de láminas y las bobinas a través del enrollamiento del alambre o el fleje. Las imágenes se hicieron directamente en el software COMSOL Multiphysics.

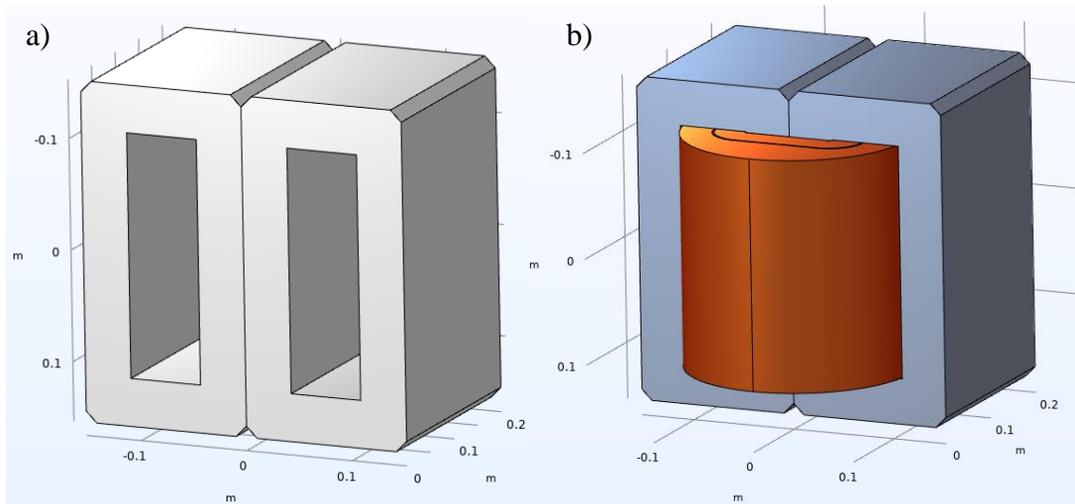


Ilustración 6. a) el núcleo de forma esquemática, b) el transformador monofásico de manera esquemática.

El modelo presentado en las imágenes corresponde a un transformador monofásico sumergido en aceite, pero se enunciarán, a continuación, los diferentes tipos de transformadores existentes. Los transformadores pueden clasificarse basados en los principios básicos, aunque se tienen dos grandes grupos que los clasifican en transformadores de potencia y de medida.

Para el estudio en cuestión se realizará la segmentación de los transformadores de acuerdo con las líneas de conexiones que tienen.

vi. *Tipos de transformadores*

a. *Transformador monofásico:*

Es un transformador que cuenta con dos polos, teniendo una línea y un neutro. Este tipo de transformador tiene un núcleo con dos devanados, uno correspondiente a la alta tensión y otro al de baja tensión. En ocasiones, para la instalación, se implementan varios transformadores de este tipo realizando una conexión de un sistema bifásico, trifásico. [5], [9]

b. Transformador bifásico:

Por otro lado, el transformador bifásico cuenta con tres polos, contando con dos líneas y un neutro. Para este tipo de arreglo se tiene entonces cuatro devanados, correspondientes a dos de cada línea y conservando que, en cada línea, uno de ellos es para alta tensión y el otro es para baja tensión. [5], [9]

c. Transformador trifásico:

Este tipo de transformador cuenta con tres fases, para lo que requiere de 6 devanados, teniendo dos embobinados para cada una de las fases. En cada fase se tiene, igual que los mencionados anteriormente, dos embobinados correspondiente a uno de alta tensión y otro de baja tensión. [5], [9]

vii. Software COMSOL Multiphysics

Adicionalmente, para el estudio acá presentado, se requiere describir el funcionamiento del software que se utilizará para la elaboración del modelo numérico por CFD. El software utilizado será COMSOL Multiphysics, el cual está diseñado para aplicaciones electromecánicas de ingeniería. Este software proporciona herramientas para el modelado de la geometría, aunque también presenta la opción de importar la geometría de un software de diseño externo. Se recomienda realizar el modelado con la herramienta que proporciona COMSOL, dado que el comportamiento de las simulaciones es mejor en este caso que cuando se importa la geometría debido a las relaciones de las fronteras del modelo y las relaciones entre los diferentes elementos internos. [10]

El software permite desarrollar y analizar modelos en dos o tres dimensiones, además que cuenta con interfaces físicas predefinidas, las cuales se pueden adaptar para modelar los diferentes fenómenos físicos existentes. Los estudios se pueden realizar de manera estacionaria o dependientes del tiempo, de acuerdo con lo que se requiera analizar o simular. Además, cuenta con una herramienta que permite parametrizar las variables, dependiendo del estudio que se pretenda

realizar, lo cual puede ser para el modelado de la geometría, las especificaciones de los diferentes materiales, el mallado, o las propiedades físicas a simular. [10]

También, este software (COMSOL Multiphysics), tiene una extensión para realizar el diseño de una aplicación, lo cual permite tener una interfaz gráfica más amigable y que el usuario que desee realizar las modificaciones de los parámetros pueda hacerlo con facilidad, sin necesidad de tener conocimientos en el manejo del software. [10]

viii. Modelo de simulación por volúmenes finitos (FEA)

a. Geometría

Lo más beneficioso del desarrollo de los modelos por volúmenes finitos, es lograr resolver sistemas que contemplen geometrías complejas y que son de difícil solución para realizar los cálculos de manera analítica. En otros casos, para resolver estos sistemas, se hacen simplificaciones, pero no permite evidenciar a detalle el fenómeno ocurrido dentro de los diferentes elementos del modelo. El método de los volúmenes finitos realiza la división de las piezas en pequeños elementos en los cuales se resuelven las diferentes ecuaciones y en la iteración de los resultados dadas las propiedades de continuidad del modelo, se logra tener una convergencia y resultados de la simulación. Particularmente el software COMSOL Multiphysics, permite realizar el modelamiento de las piezas directamente o importar las geometrías desde otros programas de modelado en formato STEP. El modelamiento en el software se realiza desde unos comandos de operaciones de geometrías y se realiza la construcción acorde con el modelo que se requiere simular.

Para el modelado se tienen consideraciones geométricas del diseño y dimensiones referentes a la disposición de los materiales tal como vienen para la fabricación, por ejemplo, el caso de las láminas de acero al silicio utilizadas para la fabricación del núcleo, o los alambres de cobre o aluminio implementados. Se tomaron los valores de los diámetros y áreas respectivas de cada alambre según la norma AWG.

La selección del alambre es parte importante dentro del proceso de diseño de los transformadores, debido a que, de acuerdo con esto, se tendrá mejor o peor comportamiento de los fenómenos físicos asociados al transformador.

b. Materiales

El transformador cuenta, en su parte activa, con 3 elementos principales: dos bobinas (una interior y otra exterior) y un núcleo. Para el caso de análisis del trabajo acá presentado, se cuenta con un núcleo que está conformado por chapa doblada de acero al silicio y los bobinados están fabricados en cobre o aluminio. Esta configuración es para un caso de diseño específico que es utilizado en la empresa, sin embargo, existen diferentes modificaciones en el diseño para la fabricación de lo que conforma la parte activa del transformador. Las propiedades de permeabilidad y conductividad asociadas a ellos se muestran a continuación. [13]

Tabla 1. Características magnéticas y eléctricas de los casos del modelo.

	Permeabilidad relativa	Conductividad [S/m]
Núcleo	7000	1,12E-07
Baja tensión	1	6,00E+07
Alta tensión	1	1,00E+07
Aceite	1	0,00E+00
Cuba	100	1,03E+07

El software COMSOL Multiphysics cuenta con unas librerías de materiales, que, a su vez, tienen los valores de las propiedades definidas. Sin embargo, se realizaron modificaciones específicas de acuerdo con los catálogos de los proveedores y la literatura, buscando una mayor fidelidad al modelo físico fabricado. Es importante tener en cuenta que el comportamiento del modelo depende estrictamente de los materiales implementados y que los resultados pueden variar significativamente con el cambio de los valores asociados a las propiedades físicas. Por ejemplo, los valores límite para las densidades de corriente de los materiales para las bobinas, se extrajeron de la literatura y se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Densidades de corriente para los materiales conductores eléctricos.

	Aluminio [A/mm ²]	Cobre [A/mm ²]
Transformador en aceite	2,7	4,2
Transformadores secos	2,4	3,5

El modelo en cuestión tiene asociado a las bobinas el material aluminio, aunque se deja estandarizado y ajustado también el cobre, dada su alta implementación en la fabricación de transformadores y su mejor comportamiento con relación a la conductividad eléctrica. Por lo que

es importante tener presente la información mostrada en la ilustración anterior que muestra el comportamiento de la densidad de corriente de acuerdo con el material y el tipo de aislamiento.

c. Física

Cómo se mostró anteriormente, la física asociada al fenómeno de análisis del presente trabajo está relacionada con la inducción electromagnética que se presenta y los campos eléctricos y magnéticos coexistentes entre sí. El software cuenta con unos módulos multifísica que permiten asociar las ecuaciones al modelo y resolverlas para cada uno de los nodos definidos de acuerdo con el mallado de las piezas. El módulo AC/DC de COMSOL permite realizar análisis de sistemas estáticos (estado estable) como lo es el transformador eléctrico, involucrando los diferentes principios de fenómenos eléctricos y definiendo un sistema circuital que de cuenta del tipo de conexiones, corrientes y demás valores de entrada para el cálculo de pérdidas, voltajes puntuales, corrientes puntuales, campos y perfiles térmicos, entre otros.

El diseño de la geometría definirá el comportamiento físico, los sistemas de refrigeración, los materiales asociados a cada elemento y otros factores que van a tener incidencia en el estudio de la física del comportamiento del modelo en general.

d. Mallado

Dentro del software se tienen diferentes opciones para el mallado, diferentes tipos de elementos, refinamientos de superficie, de vértice, de arista y un sin número de configuraciones que podrían variar la configuración estructural del mallado de la pieza y con ello los resultados obtenidos, además de los tiempos de cómputo. La definición de un mallado es indispensable para obtener resultados convergentes, con valores acertados y con tiempos computacionales racionales, por lo que se busca, en cualquier caso, tener un modelo con independencia del mallado.

VI. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del plan estipulado para el período de prácticas del semestre 2024/1, se establecen una serie de actividades que dan cuenta del proceso requerido para poder dar cumplimiento con los objetivos en mención.

Se tienen tres momentos, iniciando por una fase de **conceptualización y reconocimiento** que consta de: el reconocimiento del modelo físico, el comportamiento del sistema que se desea analizar y el acercamiento con el manejo del software con sus diferentes herramientas. Seguido de una fase de **modelado y simulación**, en la cual se realiza el modelo geométrico parametrizado, la asignación de los materiales a los diferentes elementos, la definición de las propiedades físicas a analizar y el mallado del modelo. Para finalizar, se realiza la fase de **evaluación y validación**, donde se debe: realizar mediciones de laboratorio con el modelo real equivalente al simulado para comparar los valores obtenidos en los resultados y realizar las adecuaciones o acondicionamientos del modelo para ajustar los resultados de la simulación a los valores de las mediciones reales.

Cabe resaltar que en la primera fase se debe realizar una búsqueda bibliográfica de trabajos similares, que permitan llegar a plantear un modelo simplificado y acorde con los resultados esperados. También, se especifican las actividades con sus respectivas fechas programadas para la ejecución de la propuesta acá planteada en el cronograma de actividades que se presenta a continuación.

VII. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Se presenta a continuación el cronograma de tareas asociadas a la actividad principal de la pasantía de prácticas empresariales, pero adicionalmente se mencionan algunas tareas o actividades adicionales referentes a otras labores desempeñadas dentro del rol de ingeniero mecánico dentro de la compañía.

Tabla 3. Cronograma de actividades desarrolladas en el período de práctica empresarial.

ÍTEM	TÍTULO DE LA TAREA	FECHA DE INICIO	FECHA DE ENTREGA	DURACIÓN [Semanas]	% COMPLETADO
1	DISEÑO DE MODELO DE TRANSFORMADOR PARAMETRIZADO PARA SIMULACIONES POR VOLÚMENES FINITOS.				100%

1.1	Reconocimiento COMSOL (geometría, mallado, parametrización, materiales, propiedades físicas, simulación)	13/12/23	20/01/24	6	100%
1.2	Búsqueda en literatura sobre diseño y simulaciones en transformadores	13/12/23	25/01/24	7	100%
1.3	Simplificación del sistema	18/12/23	22/12/23	1	100%
1.4	Definir variables físicas para tener en cuenta para la simulación	26/12/23	02/02/24	6	100%
1.5	Diseño y parametrización geométrica del modelo simplificado	02/01/24	02/02/24	5	100%
1.6	Simulación de modelo	05/02/24	24/05/24	16	100%
1.7	Pruebas experimentales en laboratorio	05/02/24	31/05/24	17	100%
2	PLAN DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO				66%
2.1	Identificación de inventario segmentado por secciones de la planta	14/12/23	21/12/23	1	70%
2.2	Levantamiento de fichas técnicas de las maquinas.	22/12/23	16/02/24	8	30%
2.3	Levantamiento de hojas de vida de las máquinas	22/01/24	16/02/24	4	60%
2.4	Diseño de plan de gestión de mantenimiento enfocado a la prevención de fallas y paradas súbitas.	19/02/24	05/04/24	7	100%
2.5	Implementación de metodologías enfocadas en mantenimiento preventivo	08/04/24	11/06/24	10	30%
3	TRABAJO COMPLEMENTARIO				90%
3.1	Apoyo en creación de protocolos de transformadores para exportación	20/12/23	19/1/24	5	100%
3.2	Apoyo en proyecto de INNOVACIÓN de acople flexible.	19/12/23	16/1/24	4	100%

3.3	Levantamiento de planos de sección de planta para sistema de refrigeración de hornos	14/12/23	15/12/23	53	100%
3.4	Levantamiento de planos de planta 1 y planta 2	2/1/24	19/1/24	3	0%
3.5	Presentación de propuesta de sistema de control de nivel para tanques de aceite	5/1/24	19/1/24	2	100%
3.6	Diseño de accesorio para estibas, soporte de rollos de núcleo.	15/1/24	9/2/24	4	100%
3.7	Diseño de plano de corte para placas de laboratorio				100%
3.8	Presentación de propuesta de mejora para bobinadora de núcleo (Planta 2)				100%

VIII. PRESUPUESTO

Se discriminan los ítems requeridos para el desarrollo del proyecto de práctica, teniendo en cuenta los costos asociados al salario del practicante (investigador), las licencias del software con extensiones y/o actualizaciones (calculado por el tiempo de uso de este) y las pruebas experimentales en laboratorio para las validaciones de los resultados obtenidos a través de las simulaciones.

Tabla 4. Presupuesto discriminado del proyecto

Ítem	Nombre	Descripción	Cant.	Unidad	Costo unitario	Costo total
1	Investigador	Salario del investigador a cargo	6	Mes	\$ 1.462.000	\$ 8.772.000
2	Software	Correspondiente a la licencia del software, por el tiempo de uso para el desarrollo del proyecto.	1	unidad	\$ 11.000.000	\$ 11.000.000
3	Pruebas	Prueba de calentamiento	3	Unidad	\$ 800.000	\$ 2.400.000
		Prueba de impulso	3	Unidad	\$ 950.000	\$ 2.850.000
		Prueba de rutina	3	Unidad	\$ 500.000	\$ 1.500.000
TOTAL						\$ 26.522.000

IX. RESULTADOS

Como actividad principal se desarrolló un modelo parametrizado que logró mostrar el comportamiento físico de un transformador monofásico, de lo cual se detallarán a continuación los avances obtenidos. Mas adelante, en el documento, también se describirán brevemente los resultados obtenidos producto de actividades adicionales que se realizaron de manera complementaria en el período comprendido. Se logró cumplir con el objetivo propuesto e incluso se pudieron obtener resultados adicionales a los planteados inicialmente. Se discretiza y segmenta el modelo desarrollado por las diferentes etapas para la definición de las diferentes variantes convergentes para la obtención de los resultados finales.

Se establece un árbol de procesos para las diferentes etapas de construcción del modelo, desde la definición de los parámetros, la geometría, los materiales, la física asociada, el modelo circuital, el mallado, el estudio y los resultados requeridos para la evaluación del transformador.

i. Geometría

Se realizó la construcción de la geometría respectiva del modelo para un transformador monofásico, dejando como resultado la construcción del sistema con el ingreso de los parámetros geométricos referentes a las dimensiones del núcleo, dado que estas dimensiones son las resultantes del proceso de diseño eléctrico. Al ingresar los 4 parámetros dimensionales y el número de espiras para los dos embobinados, el software realiza la construcción del modelo de manera automática.

El diseño que se implementó se construyó a partir de las mediciones de las dimensiones físicas de las partes activas fabricadas. Como no se construyó el modelo implementando el material aislante (papel) de la parte activa, se dejó una tolerancia entre las bobinas que permita el flujo de aceite entre ellas y evite el contacto para no tener superficies en contacto que puedan generar interferencia en los cálculos. En la Tabla 5 se muestran los parámetros definidos para la geometría y los valores asociados a ellos. Se evidencia allí que la construcción del modelo dependerá solo de ocho valores de entrada, los cuales están definidos al inicio de la tabla.

Tabla 5. Definición de parámetros geométricos en el programa COMSOL Multiphysics.

Name	Expression	Value	Description
L_n	130 [mm]	0.13 m	Largo núcleo
Al_vn	120 [mm]	0.12 m	Alto ventana núcleo
An_vn	67 [mm]	0.067 m	Ancho ventana nucleo
E_n	30 [mm]	0.03 m	Espesor núcleo
Np_Bin	78	78	Número de espiras bobina interna
Np_Bout	4290	4290	Número de espiras bobina externa
D_Bin	3.909 [mm]	0.003909 m	Diámetro de cable bobina interna
D_Bout	0.643 [mm]	6.43E-4 m	Diámetro de cable bobina externa
Al_n	(Al_vn + (2*E_n))	0.18 m	Alto núcleo
An_n	An_vn + (2*E_n)	0.127 m	Ancho núcleo
Ch_n	((Al_n + An_n/2)*0.055)	0.013393 m	Chaflan núcleo
L_Bin	L_n + (2 * E_Bin)+ 0.005	0.1782 m	Largo bobina interior
Al_Bin	Al_vn - 0.010	0.11 m	Alto bobina interior
An_Bin	(2*E_n) + 0.01 + (2 * E_Bin)	0.1132 m	Ancho bobina interior
E_Bin	((An_vn - 0.01 - At_Bt) * 0.4)	0.0216 m	Espesor bobina interior
Rin_Bin	5 [mm]	0.005 m	Redondeo interior bobina interior
Rout_Bin	2 * Rin_Bin	0.01 m	Redondeo exterior bobina interior
L_Bout	2 * L_n	0.26 m	Largo bobina externa
Al_Bout	Al_vn - 0.01	0.11 m	Alto bobina de baja
An_Bout	(2 * An_vn) + (2 * E_n) - 0.01	0.184 m	Ancho bobina de baja
R_Bout	(An_Bout)/2	0.092 m	Radio exterior bobina de alta
At_Bt	3 [mm]	0.003 m	Distancia entre bobinas (radial)
R_tan	(L_Bout + An_n)/2	0.1935 m	Radio del tanque

También, se agregaron los valores de los parámetros para siete de los diseños de los transformadores monofásicos fabricados en la planta, validando la creación automática de la geometría al realizar los cambios dimensionales y evitando la interferencia de los diferentes elementos o construcciones no correspondientes con el modelo fabricado. En la siguiente imagen se muestran las referencias de los trasformadores ingresados al sistema.

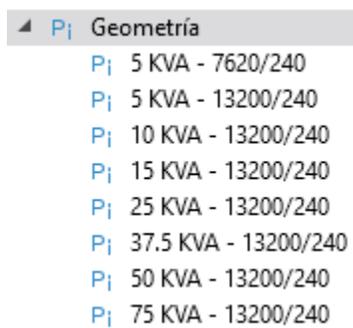


Ilustración 7. Árbol de procesos, diseños de transformadores. COMSOL Multiphysics.

Se muestra brevemente lo que corresponde con el árbol de procesos para la construcción de la geometría parametrizada, la creación de los diferentes planos, elementos geométricos y operaciones requeridas para la construcción de la geometría de la parte activa del modelo de transformador para posteriormente realizar el mallado.

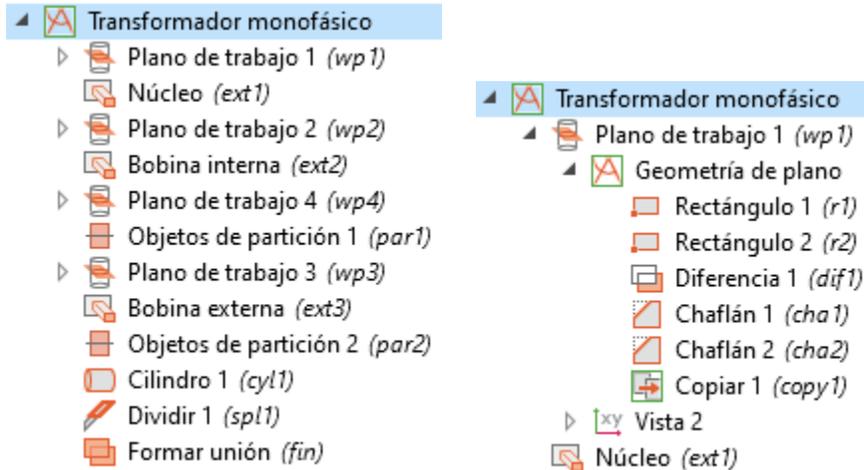


Ilustración 8. Árbol de procesos, construcción geométrica. COMSOL Multiphysics.

Se muestra a continuación en una ilustración, el proceso asociado a la creación de una forma geométrica que hace parte del proceso de creación de la geometría del transformador, donde se evidencia la asociación de los parámetros con la construcción del modelo.

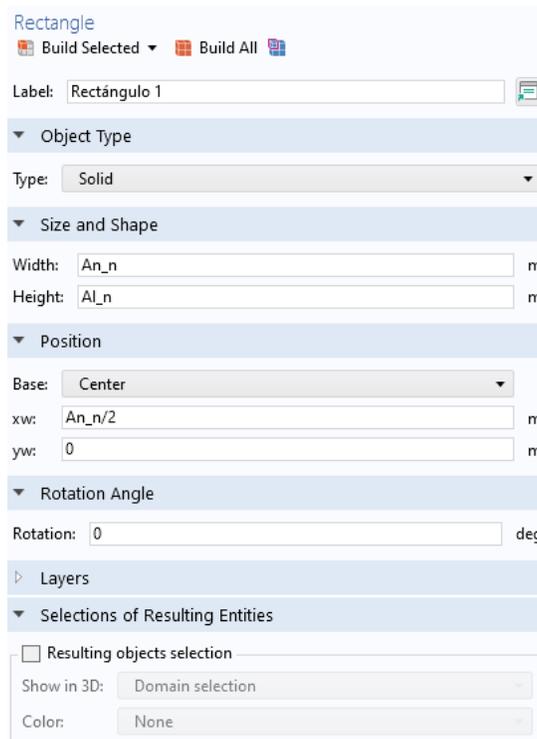


Ilustración 9. Construcción geométrica parametrizada, COMSOL Multiphysics.

Así mismo, se realizaron todas las formas geométricas y procesos de construcción del modelo, asociándolo todo a unos parámetros de diseño.

ii. *Materiales*

Se definieron como parámetros las propiedades de los materiales y otros factores asociados a ellas, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 6. Parámetros de materiales, software COMSOL Multiphysics a condiciones estándar de temperatura y presión.

Name	Expression	Value	Description
P_n	1	1	Permitividad del núcleo
Th_n	0.27 [in]	0.006858 m	Espesor del núcleo
Ca_n	0.00000048 [1/ m]	4.8E-7 1/m	Coefficiente de absorción del núcleo
Rho_n	7.65 [kg/dm^3]	7650 kg/m ³	Densidad del núcleo
Ea_n	1 [J/mol]	1 J/mol	Energía de activación
K_n	1[m^2]	1 m ²	Permeabilidad
Pr	0	0	Permeabilidad relativa parte real
Pr_i	-1	-1	Permeabilidad relativa imaginaria
Sigma_Al	3.77e7 [S/m]	3.77E7 S/m	Conductividad aluminio
Sigma_Cu	5.81e7 [S/m]	5.81E7 S/m	Conductividad cobre
K_nu	1	1	Conductividad térmica del acero al silicio
R_nu	48 [ohm *m]	48 Ω·m	Resistividad acero al silicio
Sigma_nu	1/R_nu	0.020833 S/m	Conductividad acero al silicio
R_Al	1/Sigma_Al	2.6525E-8 Ω·m	Resistividad del aluminio
R_Cu	1/Sigma_Cu	1.7212E-8 Ω·m	Resistividad del cobre

Estas propiedades dan cuenta del comportamiento de los materiales en el fenómeno eléctrico que actúa sobre los diferentes elementos del modelo y esto debe ser lo más cercano a los valores entregados por cada proveedor de las materias primas, para tener resultados de los valores de las simulaciones del modelo con valores más exactos. Cada elemento del transformador tiene un material diferente, tal como se muestra en la siguiente imagen, y se asocia a cada elemento el material acorde con el diseño. Cabe resaltar que para este caso se tenían los embobinados en aluminio, pero se dejó estandarizado el cobre para posibles modificaciones del diseño.



Ilustración 10. Listado de materiales del modelo, COMSOL Multiphysics.

De igual manera, hay variaciones que se dan en el proceso de fabricación que modifican las propiedades del material y que aleja un poco los resultados experimentales con los obtenidos a través de la simulación.

iii. *Propiedades físicas*

Para el caso de las propiedades físicas de los materiales fue necesario definir las condiciones de presión, temperatura y frecuencia de trabajo para restringir su comportamiento. En la siguiente tabla se muestran los valores determinados para las variables en cuestión, los cuales pueden someterse a cambio para futuros estudios bajo condiciones diferentes.

Tabla 7. Variables de entrada, propiedades físicas. COMSOL Multiphysics.

Name	Expression	Value	Description
P_atm	0.84 [atm]	85113 Pa	Presión atmosférica
Temp_amb	298.15[K]	298.15 K	Temperatura ambiente
Fr_n	60 [Hz]	60 Hz	Frecuencia de línea nacional
Fr_EU	50 [Hz]	50 Hz	Frecuencia de línea europea

Así mismo, se realizaron unas selecciones de dominios que permitieron la discretización de la totalidad de los dominios según la zona en la que se encuentren. Esto fue relevante para facilitar la aplicación de las diferentes condiciones físicas presentadas en cada elemento.

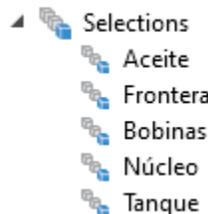


Ilustración 11. Árbol de procesos, selección de dominios. COMSOL Multiphysics.

Teniendo definidas las condiciones iniciales y segmentados los dominios de acuerdo con los requerimientos del modelo, se continuó con la destinación de las leyes físicas regidas para cada

elemento, desde el árbol de procesos. Como se mostró en el marco teórico, las ecuaciones asociadas al comportamiento de los fenómenos físicos están regidas por la ley de Ampere, pero además hubo que definir unos dominios con condiciones específicas como aislamiento magnético o contorno de impedancia, como se muestra en la siguiente imagen.

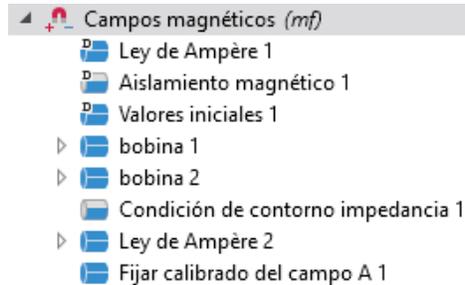


Ilustración 12. Árbol de procesos, campos magnéticos. COMSOL Multiphysics.

Dentro de la definición del módulo de campos magnéticos también se establecen las condiciones de operación de las bobinas, donde se asocian los valores de los parámetros de números de espiras y otros valores relevantes para el análisis de la geometría de las bobinas.

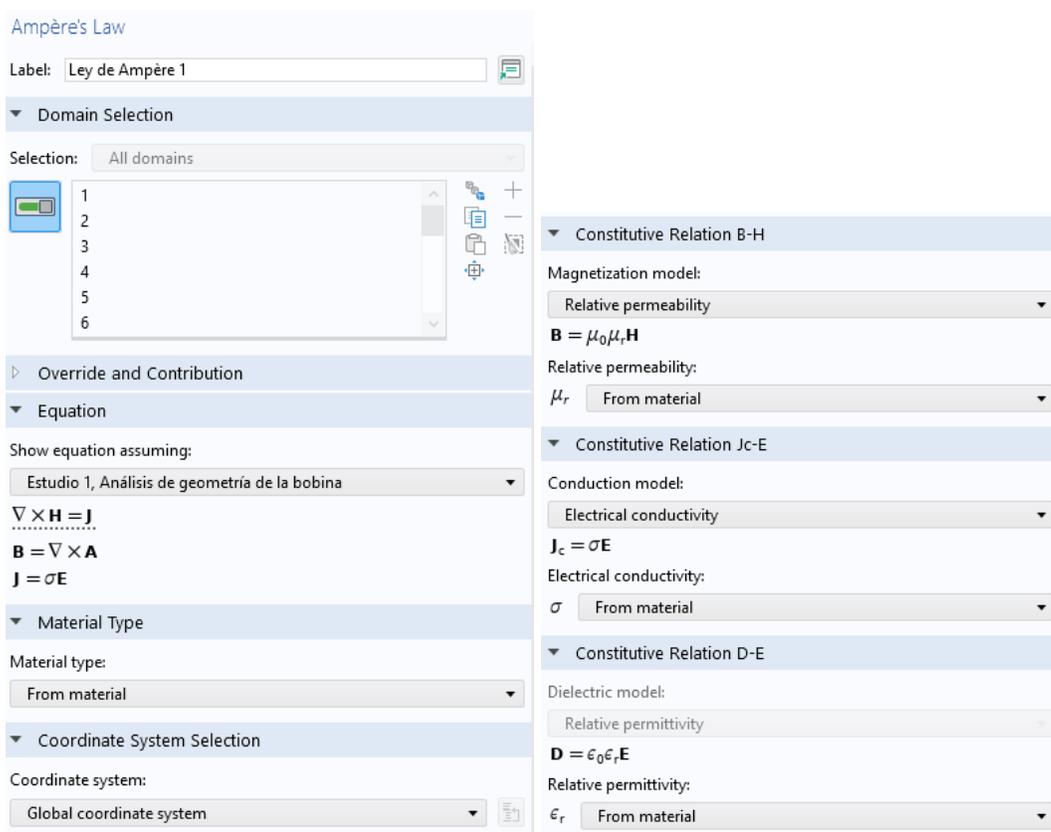


Ilustración 13. Configuración de propiedades físicas, Ley de Ampere. COMSOL Multiphysics.

Cómo se puede observar en la imagen anterior, las ecuaciones de interés para el caso de estudio están asociadas al análisis de la geometría de la bobina y los valores dependientes para la solución

de las simulaciones están dados de acuerdo con las propiedades de los materiales, por lo cual se requiere tener un conocimiento avanzado de los valores exactos para cada una de las propiedades de cada material, dado que los resultados estarán determinados por estos valores.

Cabe resaltar que el software cuenta con varios modelos para la magnetización y la conducción, pero para este caso se seleccionaron los mas convenientes de acuerdo con la información que se tiene de los materiales y estos fueron permeabilidad relativa y conductividad eléctrica respectivamente.

iv. Modelo circuital

Los transformadores eléctricos pueden representarse como un circuito eléctrico, pero las configuraciones de las conexiones del circuito van a cambiar de acuerdo con el tipo de prueba al que esté sometida la máquina. Para este caso de estudio, se realizó el análisis bajo condiciones de vacío y corto circuito, aunque solo se presentan resultados del ensayo bajo condiciones de corto circuito, que son los que permiten tener los resultados requeridos para cumplir con los objetivos de la investigación planteada. El ensayo de vacío solo se tuvo en cuenta para la validación del modelo.

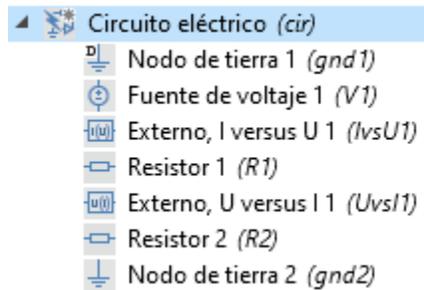


Ilustración 14. Árbol de procesos, circuito eléctrico. COMSOL Multiphysics.

La configuración de los diferentes elementos del circuito se da a través de nodos y los elementos que figuran como “Externo” hacen referencia a las bobinas, con la diferencia de que una tiene una configuración de voltaje que proporciona una circulación de corriente y la otra tiene una corriente inducida por los fenómenos físicos existentes en el modelo. La estructura del circuito es semejante a la documentada en la norma NTC 380, con las adecuaciones requeridas para ser modelada en el software COMSOL. [15]

Se muestra, a continuación, la configuración del montaje para uno de los elementos del árbol de procesos correspondiente al circuito eléctrico, como ejemplo procedimental del requerimiento para tener la configuración completa del sistema en el programa.

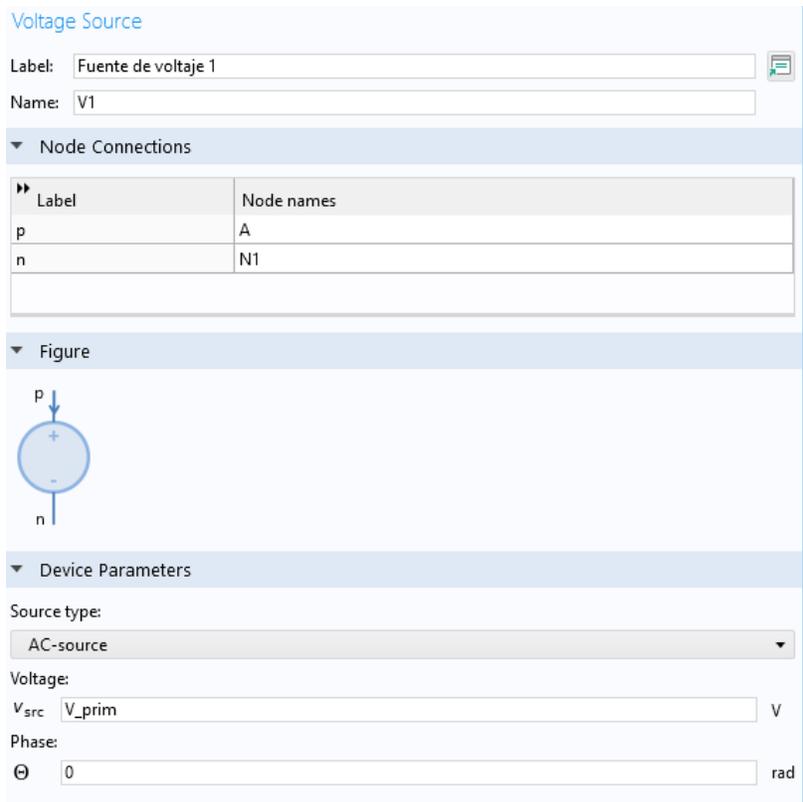


Ilustración 15. Configuración fuente de voltaje, circuito eléctrico. COMSOL Multiphysics.

Se evidencia, que dicha configuración también está asociada a un parámetro de entrada que puede ser sometido a cambio de acuerdo con los valores de prueba que se requieran simular.

v. *Mallado*

Se inició con una malla burda, utilizando elementos hexaédricos, pero el modelo no permitía realizar correctamente la convergencia de las simulaciones, entonces se procedió a realizar una variación de los tamaños de los elementos y obtener una mejor calidad de malla, pero el problema persistía, por lo que se inició una búsqueda bibliográfica y se pudo determinar que lo mas conveniente para el desarrollo de estos modelos, haciendo uso del software COMSOL Multiphysics, era implementar elementos tetraédricos. Se muestra a continuación una malla que se implementó, pero que no permitió tener convergencia de la solución.

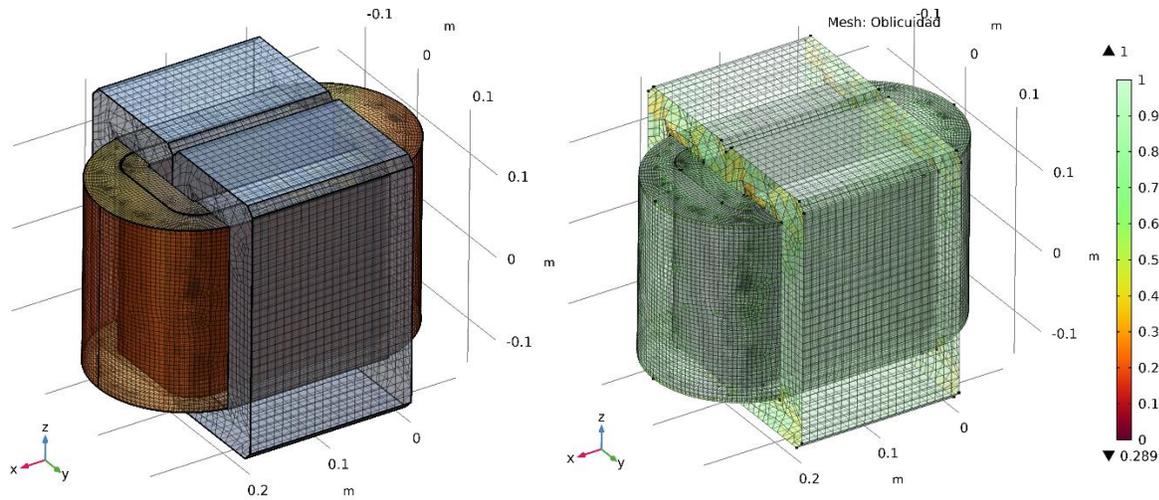


Ilustración 16. Malla previa, proceso de mallado. COMSOL Multiphysics.

Se realizaron diferentes mallas, con los elementos mencionados, unas con mejor calidad que otras, pero con tiempos de computo tan grandes que incluso se llegó a agotar el recurso computacional del equipo en el que se trabajaba. Se realizaron simulaciones que duraron más de 72 horas corriendo sin tener resultados convergentes, pero al final se logró determinar una malla que cumpliera con la resolución adecuada, con una cantidad de elementos suficientes para tener convergencia de los resultados con fidelidad al comportamiento del modelo real y con una utilización de recurso computacional racional.

Para esta malla resultante se definieron tres tamaños diferentes que corresponden a dominios diferentes dentro del modelo, lo que permitió tener elementos mas finos en los embobinados y mas burdos en el tanque, por ejemplo. Se muestra a continuación el árbol de procesos de la composición de la malla.

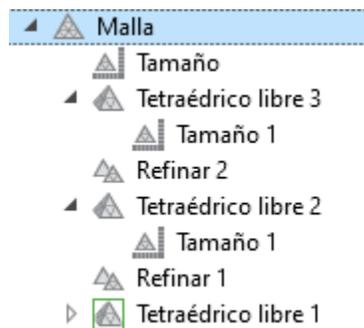


Ilustración 17. Árbol de procesos, mallado. COMSOL Multiphysics.

De acuerdo con la física del fenómeno eléctrico, se evidencia que la zona entre las dos bobinas es donde se presenta mayor fuerza electro motriz (FEM), por lo que se realiza un refinamiento de malla en esa zona. Para el caso del núcleo se definen unos elementos de mayor tamaño respecto a

los elementos de las bobinas, sin embargo, menores que los del tanque o el aceite. Siguiendo la misma lógica de las bobinas, se realiza un refinamiento de malla en la zona mas cercana a las bobinas, dado que los campos magnéticos asociados a estas corrientes tienen mayor magnitud en esta franja.

Se muestra a continuación una ilustración con una representación del mallado del modelo, donde se realiza un detalle de algunas zonas para evidenciar la diferencia de los tamaños de malla de acuerdo con los elementos de estudio.

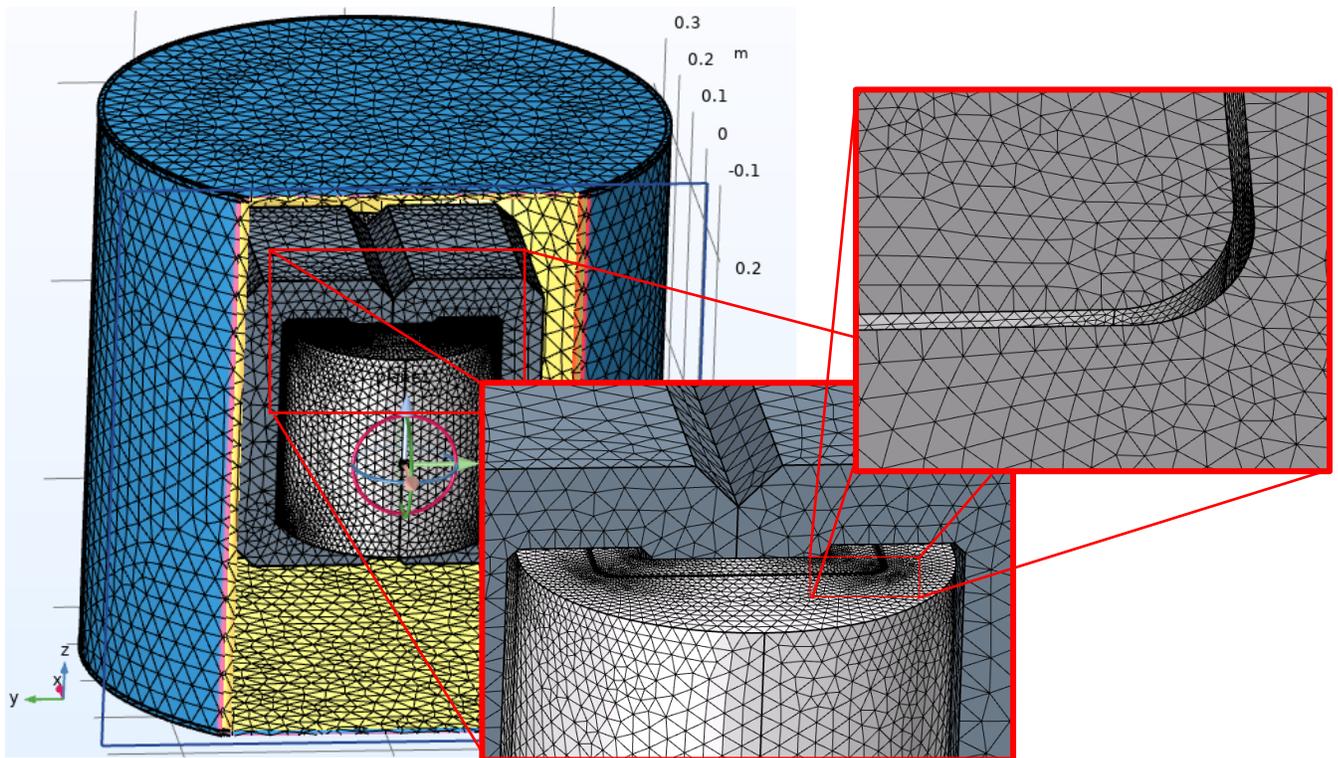


Ilustración 18. Esquema del mallado, transformador monofásico, COMSOL Multiphysics.

Se menciona que el modelo de mallado, dentro del proceso de la generación de la malla, se dejó parametrizado, de acuerdo con las dimensiones generales de los transformadores, en su parte activa. Se realizó de esta manera para asegurar un cumplimiento del mallado para cualquier caso de implementación, sin importar las magnitudes de los valores de entrada geométricos.

Se presenta a continuación la calidad de la malla final, la cual es de 61,85%. Adicionalmente, se muestra el histograma de la distribución de la calidad de todos los elementos de la malla.

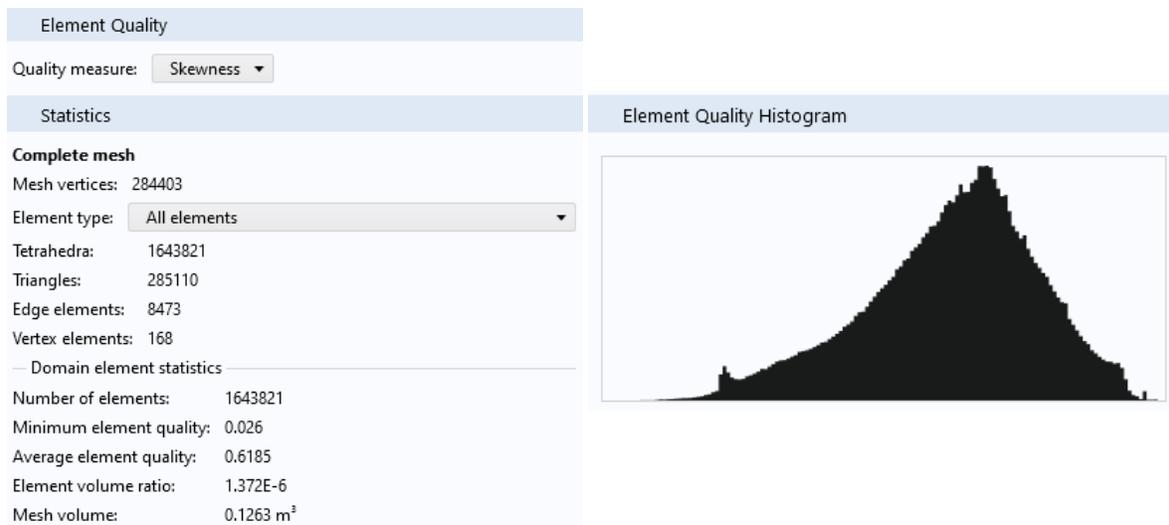


Ilustración 19. Calidad de malla, COMSOL Multiphysics.

Fue importante mejorar los refinamientos de algunas de las zonas requeridas, donde se presentan mayores densidades de corriente, dado que esto permite la captación precisa de los gradientes y evita que se presenten errores numéricos.

vi. *Estudio*

El software COMSOL, para la solución de los modelos, tiene un módulo llamado “Estudio” que obedece a una serie de procesos que se solucionan paso a paso hasta completar la convergencia del cálculo. Los estudios van a obedecer al comportamiento del modelo que se tenga y a lo que se busque calcular con ellos. Por ejemplo, en el caso puntual nuestro, era importante realizar el análisis del comportamiento de las bobinas para unas condiciones de operación específicas. Se buscaba evidenciar el comportamiento de la geometría cuando se alcanza la estabilidad del sistema, lo que podría llamarse sistema estacionario.

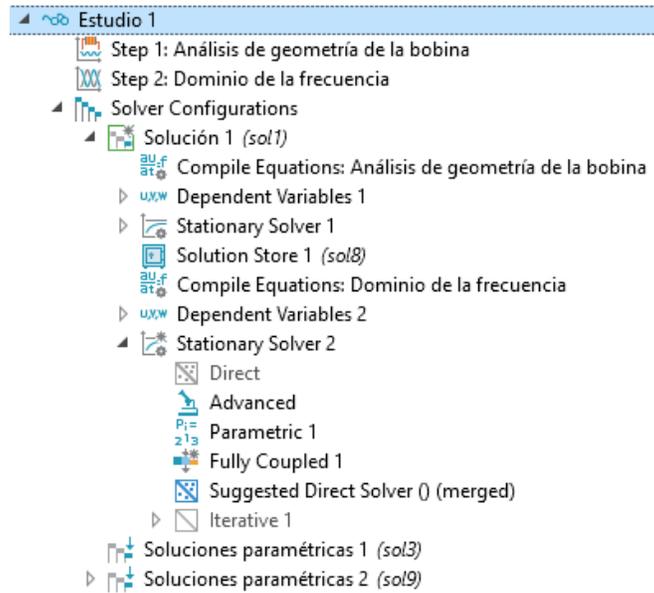


Ilustración 20. Árbol de procesos, estudio. COMSOL Multiphysics.

Para poder realizar el cálculo del dominio de la frecuencia del modelo, era necesario tener un paso anterior de análisis de la geometría, dado que la solución de las ecuaciones asociadas al modelo depende, en gran medida, de la distribución del material en el espacio. El análisis del dominio de la frecuencia se realiza para unos rangos de frecuencia específicos y en este caso se usan las frecuencias de línea que son a las cuales va a estar sometida la máquina en su funcionamiento normal. Los proveedores de los materiales magnéticos entregan unas curvas del comportamiento de las pérdidas de acuerdo con las frecuencias específicas, las cuales obedecen a pérdidas por corriente de Foucault e histéresis.

El dominio de la frecuencia se apoya de los módulos de campos magnéticos y circuito eléctrico para la búsqueda de la solución. Además, requiere un valor de entrada asociado al punto de operación de la frecuencia, el cual se ingresa como parámetro y puede estar sometido a variación para futuros análisis de estudio bajo operaciones diferentes. Se muestra a continuación esta configuración.

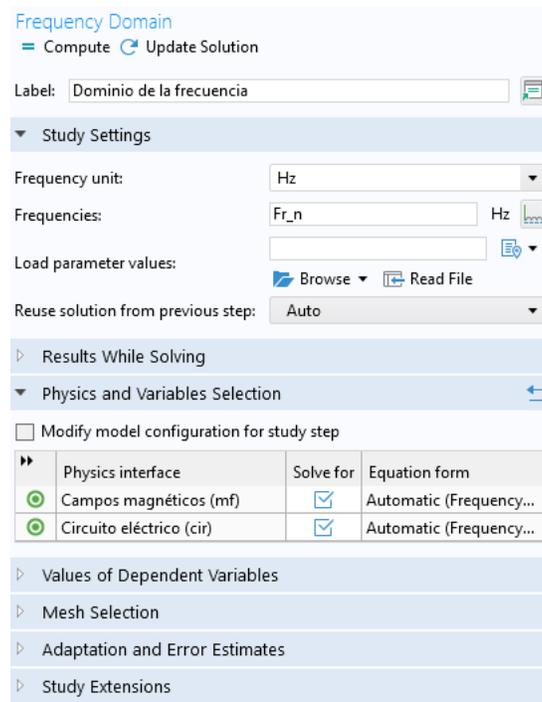


Ilustración 21. Configuración dominio de la frecuencia, COMSOL Multiphysics.

No se ahonda mucho en el presente trabajo mostrando las particularidades de los modelos de solución del software y otras configuraciones del estudio, con el interés de proteger el desarrollo obtenido en este trabajo investigativo.

vii. Simulación

Dentro del proceso de simulación, se obtuvieron muchos resultados que no fueron contundentes para el cumplimiento de los objetivos planteados, por lo que se debió realizar adecuaciones en todos y cada uno de los procesos anteriormente descritos, que posibilitaran llegar a la solución del modelo.

Posterior a todo lo ya especificado, era necesario definir las expresiones o variables que se querían mostrar para los cálculos resueltos por el software referentes al comportamiento de la parte activa del transformador. Se muestra entonces, a continuación, el árbol de procesos asociado a los resultados que se extrajeron de los análisis realizados a lo largo de la simulación. Estos valores se definen acordes con lo planteado en los objetivos del proyecto.

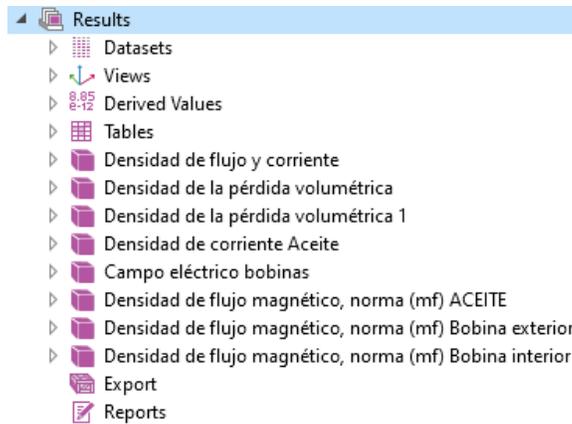


Ilustración 22. Árbol de procesos, resultados. COMSOL Multiphysics.

Existen varias formas de extraer los resultados en el programa, para casos de soluciones puntuales o para gráficos que evidencien el comportamiento espacial. En el proceso llamado tablas, se tiene definida una tabla con algunos valores puntuales para el comparativo con los resultados de laboratorio. Por otro lado, se realizan unas representaciones de volúmenes que dan cuenta del comportamiento de los campos, densidades de corriente, densidad de flujo magnético o densidad de la pérdida volumétrica. Esta última hace referencia a la cantidad de energía perdida por unidad de volumen en forma de calor.

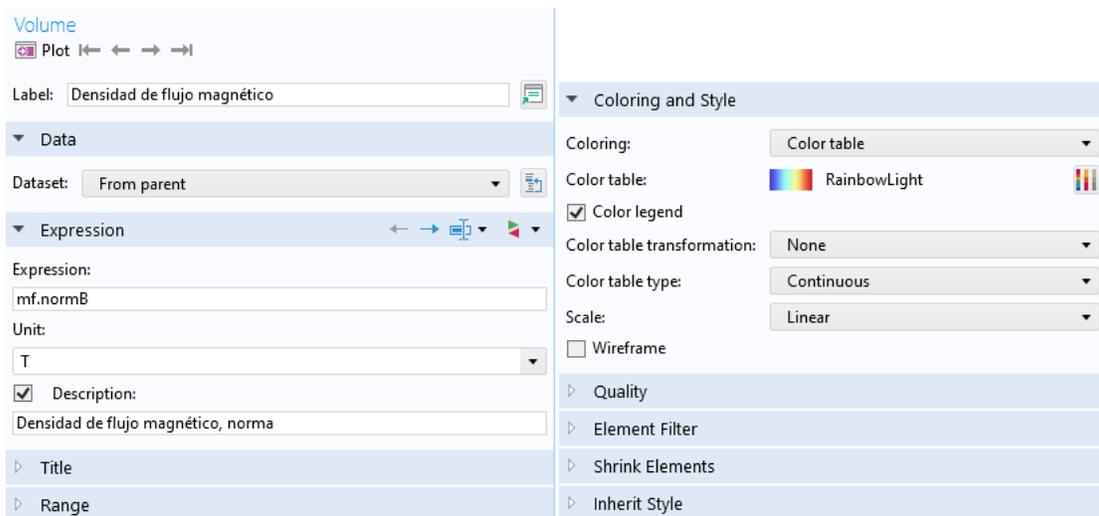


Ilustración 23. Configuración densidad de flujo magnético, COMSOL Multiphysics.

Se muestra como ejemplo, la configuración del resultado extraído referente a la densidad de flujo magnético. De igual manera se realizó la configuración para los demás resultados presentados a continuación.

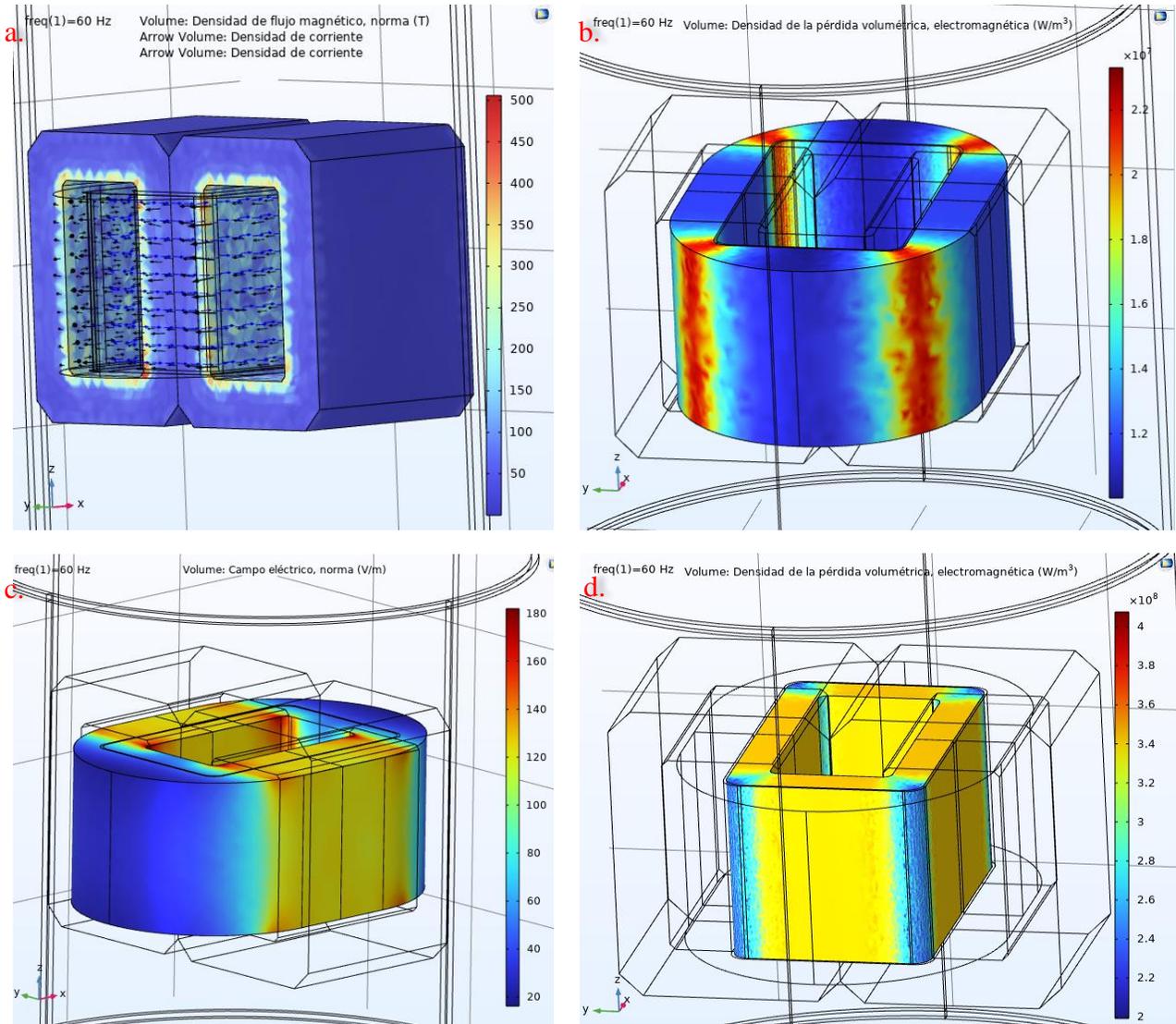


Ilustración 24. Resultados simulaciones en bobinas y núcleo. COMSOL Multiphysics.

En la ilustración anterior se muestran cuatro gráficas de los diferentes resultados extraídos de las simulaciones. Para empezar, en la grafica a. se evidencian las líneas de corriente eléctrica de las bobinas, las cuales son contrarias entre sí, como se esperaba de acuerdo con la teoría mostrada de la inducción electromagnética. Pero, lo que más se quiere resaltar de esta primera gráfica, obedece al campo magnético presente en el núcleo, el cual se observa tener un comportamiento de mayor intensidad al interior del núcleo, dado que estas líneas de campo son cerradas y en el caso interior realizan un recorrido menor, por lo que presentan mayor intensidad.

Las gráficas b y d representan la densidad de pérdida volumétrica en las bobinas externa e interna respectivamente. Esta expresión está asociada a la energía perdida en forma de calor, como se mencionó anteriormente y para este caso se evidencia que esas zonas de mayor concentración de

calor son donde hay un área transversal menor del diseño de la geometría. Cada transformador está calculado en las eléctricamente para que cumpla con las densidades de corriente que van a circular, sin embargo, hay unos espacios que están mas compactos que otros a la hora de la fabricación y es por ello que se dan este tipo de geometrías de las bobinas. Siendo consecuente con lo acabado de mencionar, son estos espacios mas compactos los que tendrán mayor concentración de calor y con ello se producirán entonces mayores pérdidas en el cobre.

En el caso de la bobina interior se observa un comportamiento homogéneo a lo largo de toda la bobina, pero con unas esquinas que emiten menos calor, esto se presenta por que tienen en esa zona la misma densidad de corriente, pero mayor área de transferencia de calor, por lo que hay mayor disipación y por ende menor calentamiento.

Para el gráfico c. se muestra el comportamiento, referente al campo eléctrico, de las pérdidas por calentamiento resistivo en las bobinas, el cual se da por efecto Joule. Se evidencia un incremento en la temperatura de la zona interior al núcleo. Esto se debe a que esta zona, al estar encerrada por el núcleo, tiene menor material aislante térmico disponible (aceite) que pueda disipar el calor generado. Adicionalmente, se observa una zona mayormente afectada térmicamente y es la más cercana al núcleo, lo que es correspondiente al fenómeno explicado de la gráfica a.

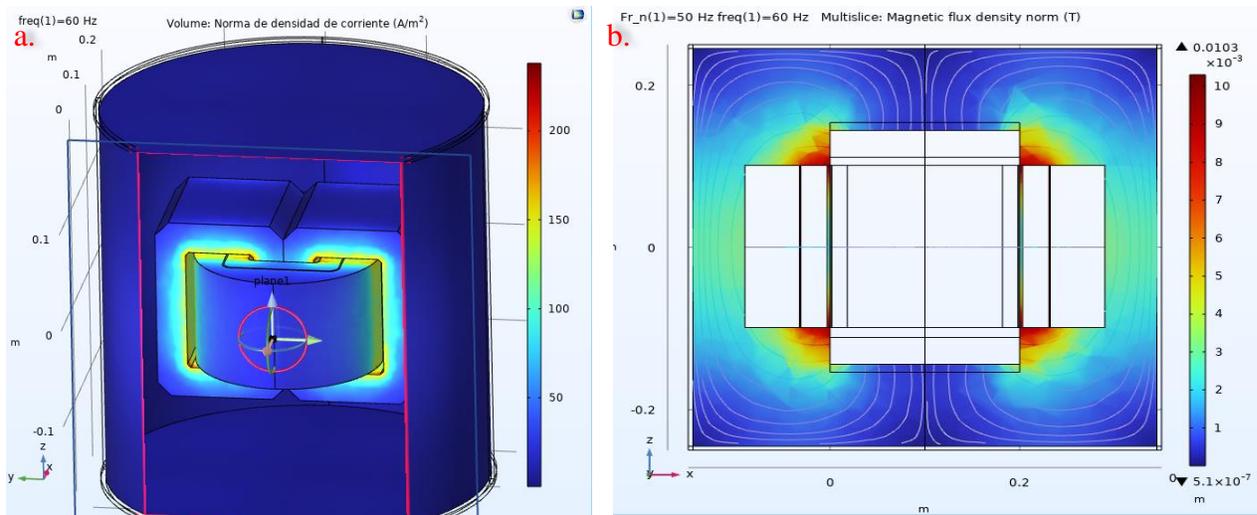


Ilustración 25. Resultados simulaciones, en aceite. COMSOL Multiphysics.

El aceite dieléctrico, a pesar de ser aislante térmico y eléctrico, sufre calentamiento e incluso puede llegar a tener cierta carga eléctrica, por lo que se hace indispensable la realización de estos procesos de simulaciones que permitan evidenciar las condiciones de operación de este material. La calidad del aceite puede verse gravemente afectada bajo condiciones operativas de altas temperaturas,

degradando el material a tal punto que se pueden tener fallas totales de la máquina. Para el resultado acá mostrado, se evidencia un cumplimiento dentro de los rangos normales de temperatura.

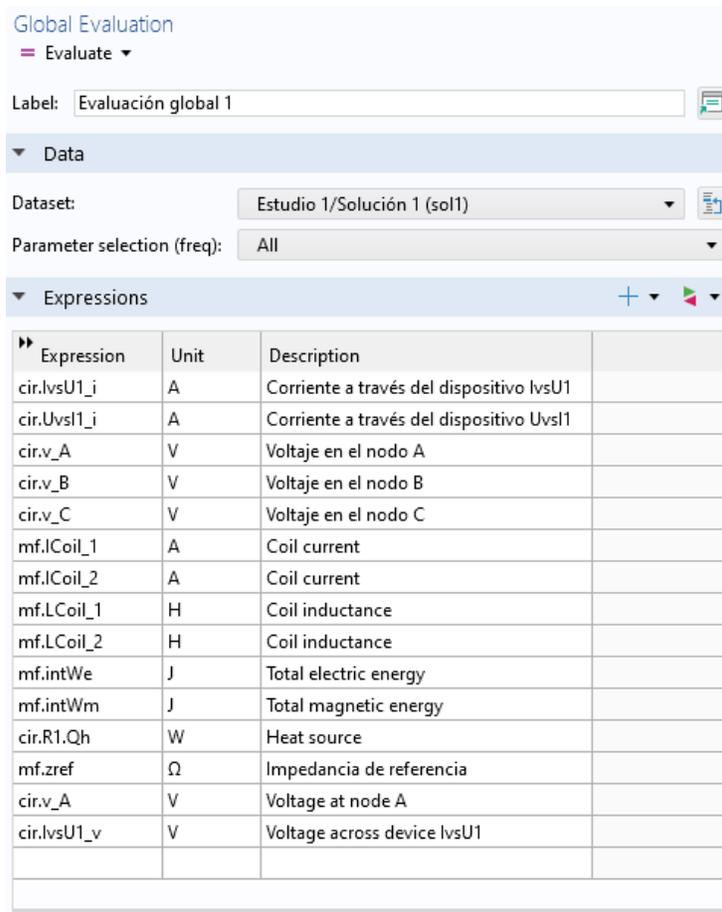


Ilustración 26. Evaluación global de valores de referencia. COMSOL Multiphysics.

De manera simultánea se realiza una tabla con la evaluación de unos valores específicos referentes a las corrientes, voltajes, energía, impedancia entre otros; con la intención de poder comparar con los resultados reposados en los protocolos y que dan cuenta de los ensayos de laboratorio de las pruebas de rutina.

Tabla 8. Tabla comparativa datos de diseño contra resultados de simulación

	Corriente nominal AT [A]	Corriente nominal BT [A]	Pérdidas en carga [W]	Peso [kg]
Datos medidos en laboratorio	0,379	20,833	79	85
Resultados simulación	0,379	19,863	75,23	85,46

Estas expresiones se muestran en la Ilustración 26 y los resultados se entregan en la Tabla 8. Se evidencian variaciones de los resultados de las simulaciones referente a los valores de las

mediciones en laboratorio, sin embargo, todos los valores están en un rango de porcentaje de error inferior al 5%.

X. CONCLUSIONES

Se desarrolló un modelo paramétrico de simulaciones por volúmenes finitos para evaluar transformadores monofásicos. Este modelo se convierte en una herramienta de diseño que permite evidenciar los comportamientos de los fenómenos físicos, los comportamientos térmicos y eléctricos, para plantear mejoras en los diseños.

El análisis de una máquina estática como un transformador, requiere de suficiente información de materiales, geometría, física asociada, conexiones eléctricas, entre otros; que permitan llevar a cabo un modelo fiable para ser comparado con el modelo real.

Los métodos analíticos de cálculo para las pérdidas de los transformadores proporcionan valores fiables en general, sin embargo, no permiten ver en detalle el comportamiento térmico de la máquina y con ello se limita la intervención que podría plantearse para posibles mejoras en diseño. El método de los volúmenes finitos (FEM) es una alternativa fiable para validar diseños y evidenciar comportamientos de fenómenos físicos, por lo que se debe buscar un modelo que evite simplificaciones y que sea cada vez mas fiel al producto fabricado.

El mallado es uno de los procesos críticos para obtener mejores resultados, convergencia de los cálculos y menores tiempos computacionales. La elaboración de la malla debe estar acorde a la física asociada y debe permitir tener suficientes elementos en zonas de mayores gradientes eléctricos, que permitan capturar con precisión los detalles del comportamiento.

La diferencia de los valores obtenidos en la simulación respecto a los valores medidos en el laboratorio es pequeña. Está asociada a consideraciones de simplificaciones que se tienen del modelo de simulaciones o referente al proceso de fabricación que genere variación en las propiedades de los materiales.

XI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ENERGÍA ELÉCTRICA. (s/f). Gov.co. Recuperado el 24 de enero de 2024, de https://geoportal.dane.gov.co/servicios/atlas-estadistico/src/Tomo_III_Economico/1.4.-energ%C3%ADa-el%C3%A9ctrica.html
- [2] Portafolio. (s/f). ¡Que se haga la luz! Así se genera la energía eléctrica en Colombia. Portafolio.co. Recuperado el 24 de enero de 2024, de <https://www.portafolio.co/economia/infraestructura/sector-electrico-en-colombia-asi-funciona-la-generacion-de-energia-en-el-pais-584285>
- [3] ScienceDirect. (s/f). Computational Fluid Dynamics. Howard H. Hu, in Fluid Mechanics (Fifth Edition), 2012. Recuperado el 25 de enero de 2024, de [https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/computational-fluid-dynamics#:~:text=Computational%20fluid%20dynamics%20\(CFD\)%20is%20a%20science%20that%20with,and%20energy\)%20governing%20fluid%20motion.](https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/computational-fluid-dynamics#:~:text=Computational%20fluid%20dynamics%20(CFD)%20is%20a%20science%20that%20with,and%20energy)%20governing%20fluid%20motion.)
- [4] PROYECCIÓN DE LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y POTENCIA MÁXIMA 2023-2037. (S/f). Ministerio de Minas y Energía. upme.gov.co. Recuperado el 30 de enero de 2024, de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/UPME_Proyeccion_demanda_2023-2037_VF2.pdf
- [5] Tipos de transformadores eléctricos. Funcionamiento y diferencias. (2017, mayo 29). Transformadores. <https://www.transformadores.cl/noticias/tipos-transformadores-electricos-funcionamiento-diferencias/>
- [6] ¿Qué es la ley de Faraday? (artículo). (s/f). Khan Academy. Recuperado el 31 de enero de 2024, de <https://es.khanacademy.org/science/physics/magnetic-forces-and-magnetic-fields/magnetic-flux-faradays-law/a/what-is-faradays-law>
- [7] Inducción electromagnética. (2021, November 23). Lifeder. <https://www.lifeder.com/inducion-electromagnetica/>
- [8] Wikipedia contributors. (n.d.). Fuerza de Lorentz. Wikipedia, The Free Encyclopedia. https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Fuerza_de_Lorentz&oldid=155237797

-
- [9] El transformador eléctrico. (s/f). Endesa. Recuperado el 2 de febrero de 2024, de <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/corrientes-alternas-con-un-transformador-electrico>
- [10] The COMSOL Multiphysics® Model Builder functionality. (s/f). COMSOL. Recuperado el 2 de febrero de 2024, de <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics/model-builder>
- [11] Lifeder. 30 de noviembre de 2021. “Inducción electromagnética: qué es, aplicaciones, ejemplos - Lifeder.” [Online]. Available: <https://www.lifeder.com/induccionelectromagnetica/>
- [12] Iñaki Úcar, “La fuerza de Lorentz y el motor homopolar – Enchufa2.” [Online]. Available: <https://www.enchufa2.es/archives/la-fuerza-de-lorentz-y-el-motor-homopolar.html>
- [13] UNMDP, “TRANSFORMADORES: SU CÁLCULO Y CONSTRUCCIÓN.” Capítulo 6: CÁLCULO DE LOS ARROLLAMIENTOS. [Online]. Available: http://www3.fi.mdp.edu.ar/dtoelectrica/files/transformadores/g_Cap6_calculo_de_los_arrollamientos_20.pdf
- [14] NTC 317, "Transformadores de potencia y distribución. Terminología.", Norma técnica colombiana, Santa Fe de Bogotá, Colombia, 1998.
- [15] NTC 380, "Transformadores eléctricos. Ensayos eléctricos. Generalidades.", Norma técnica colombiana, Bogotá D.C., Colombia, 2001.

XII. ANEXOS

[Plan de acción de actividades de mantenimiento](#)