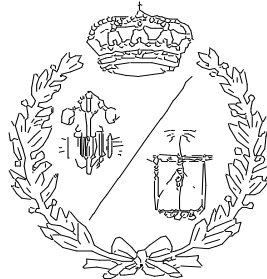


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Máster

**ANÁLISIS FLUIDO-TÉRMICO DE LA
CAPACIDAD DE ENFRIAMIENTO DE LOS
TRANSFORMADORES A BAJAS
TEMPERATURAS AMBIENTE CON
DIFERENTES FLUIDOS DIELECTRICOS:
ACEITE MINERAL Y ÉSTERES.**

**(Analysis of the cooling capacity of a
transformer at low ambient temperatures with
different dielectric fluids: mineral oils and
esters)**

Para acceder al Título de

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INVESTIGACIÓN EN
INGENIERIA INDUSTRIAL**

Autor: Andrés Felipe López Rodríguez

Septiembre- 2022

Dedicatoria

A mi madre que nunca me ha faltado y porque aún en la distancia la he sentido más cerca que siempre. Gracias por tanto, gracias por todo. Es por ti.

Por su puesto a ti M^a Antonia, siempre a ti. Han pasado años y tu apoyo y motivación sigue siendo inigualable, tú haces que todo sea posible.

A ambas las llevo conmigo en cada logro.

Agradecimientos

A mi familia por apoyarme y creer en mí, gracias; a los/as amigos/as que han estado siempre, y a aquellos/as que han llegado; y a todas las demás personas desde mi llegada, ha validado la pena cruzar el Atlántico y vivir está increíble experiencia.

A todo el equipo de GITEP que hicieron que esto fuera posible de alguna u otra manera, gracias por su apoyo.

A la Universidad de Cantabria y todo su increíble cuerpo docente.

A los profesores Félix O., Cristián O., Agustín S., e Inmaculada F., gracias por su tiempo y sus consejos. Ha sido invaluable cada cosa.

Y, por su puesto, en especial, a mi tutor de TFM D. Carlos Javier Renedo Estébanez, infinitas gracias por el tiempo dedicado, la orientación, la motivación y por acompañarme durante todo este camino.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	11
ABSTRACT	12
1. INTRODUCCIÓN	13
2. OBJETIVOS	15
2.1. OBJETIVO GENERAL	15
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3. ESTADO DEL ARTE	16
4. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	21
4.1. TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS DE POTENCIA	21
4.1.1. Transformador Ideal y Real	23
4.1.2. Ensayos en Transformadores	24
4.1.3. Pérdidas Durante la Transformación	26
4.1.4. Influencia del Envejecimiento en el Rendimiento del Equipo	27
4.1.5. Sistema de Refrigeración de los Transformadores	27
4.2. FLUIDOS DIELECTRICOS	30
4.2.1. Aceite Mineral	31
4.2.2. Éster Natural	32
4.2.3. Éster Sintético	32
4.3. FLUJO DE FLUIDOS	32
4.3.1. Estudio diferencial del flujo	34
4.3.2. Aproximación de la Capa Límite	36
4.3.3. Flujo Laminar y Turbulento	38
4.3.4. Flujo Compresible e Incompresible	39
4.3.5. Flujo Viscoso y No Viscoso	39
4.4. TRANSFERENCIA DE CALOR	39
4.4.1. Conducción	40
4.4.2. Convección	43
4.5. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD): MODELAMIENTO NUMÉRICO	49
4.6. MARCO NORMATIVO PARA TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS SUMERGIDOS EN ÉSTERES	49
5. PROCESO METODOLÓGICO	51
5.1. ENSAYOS EXPERIMENTALES	51
5.1.1. Transformador	51
5.1.2. Mediciones de Viscosidad	51

5.1.3.	Condiciones de Ensayo.....	53
5.2.	MODELO NUMÉRICO.....	59
5.2.1.	CAD del Transformador.....	59
5.2.2.	Mallado.....	65
5.2.3.	Ecuaciones de Gobierno.....	68
5.2.4.	Definición del Solver y Modelos.....	69
5.2.5.	Definición de los Materiales.....	70
5.2.6.	Parametrización de las Zonas de Sólido y de Fluido del Modelo.....	74
5.2.7.	Condiciones de Frontera e Iniciales.....	75
5.2.8.	Método de Solución: <i>Solver</i>	80
5.2.9.	Condiciones de Convergencia e Inicialización.....	82
5.2.10.	Últimos Ajustes e Inicio de las simulaciones.....	83
6.	RESULTADOS.....	84
6.1.	EXPERIMENTACIÓN.....	84
6.1.1.	Medición de viscosidad.....	84
6.1.2.	Escenarios de Ensayo: índice de Carga y Mediciones Eléctricas.....	86
6.1.3.	Medición de Velocidad del Flujo de Aire.....	87
6.1.4.	Distribución de Temperatura.....	87
6.2.	SOLUCIÓN NUMÉRICA.....	96
6.2.1.	Cálculo de Parámetros Adicionales.....	96
6.2.2.	Distribución de Temperatura en el Transformador.....	98
6.2.3.	líneas de Flujo y Campo de Velocidades.....	103
7.	CONCLUSIONES.....	108
8.	RECOMENDACIONES Y LINEAS FUTURAS.....	110
9.	REFERENCIAS.....	112
10.	ANEXOS.....	114

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Clasificación de transformadores monofásicos según posición relativa entre núcleos y devanados: a) acorazado y b) de columnas; y c) transformadores trifásicos - Fuente: [24]	21
Ilustración 2. Tipos de devanados según la posición relativa entre arrollamientos: a) concéntricos y b) alternados - Fuente: [24]	22
Ilustración 3. Esquema de un transformador real con las resistencias eléctricas y los flujos magnéticos de dispersión - Fuente: [24]	23
Ilustración 4. Circuito equivalente aproximado de un transformador eléctrico que es reducido a la bobina primaria - Fuente: [24]	24
Ilustración 5. Esquema del ensayo en vacío en un transformador - Fuente: [25]	25
Ilustración 6. Esquema eléctrico del ensayo en cortocircuito en un transformador – Fuente: [25]	25
Ilustración 7. Enfriamiento ODAF de un transformador - Fuente: [9]	28
Ilustración 8. Variación de densidad y viscosidad de una mezcla aceite mineral-éster sintético conforme se varia la proporción de aceite mineral y éster sintético de dicha mezcla - Fuente: [27]	30
Ilustración 9. Ejemplo de un análisis diferencial de flujo de aire (en una antena) - Fuente:	35
Ilustración 10. Presión hidrostática actuando sobre un fluido en reposo – Fuente: [28]	35
Ilustración 11. Diferenciación del flujo externo y de la capa límite - Fuente: [28]	37
Ilustración 12. a) Desarrollo de la capa límite y b) capa límite térmica - Fuente: [29] ..	37
Ilustración 13. Comportamiento a) laminar y b) turbulento de un fluido – Fuente: [28]	38
Ilustración 14. Regios de flujo viscosos y nos viscoso de un fluido sobre una placa plana - Fuente: [29]	39
Ilustración 15. Conducción de calor a través de una placa plana de espesor Δx y área A – Fuente: [29]	40
Ilustración 16. Conducción de calor tridimensional en un elemento cúbico - Fuente: [29]	41
Ilustración 17. Condiciones de frontera típicas: a) temperatura específica, b) flujo específico de calor, c) frontera aislada y d) simetría térmica – Fuente: [29]	42
Ilustración 18. Ejemplo de condición de frontera de convección sobre ambas superficies de una placa plana - Fuente: [29]	43
Ilustración 19. Perfil de velocidad y temperatura de un flujo de aire en la transferencia de calor por convección de una placa caliente a l aire - Fuente: [29]	44
Ilustración 20. Región laminar y turbulenta de una capa límite para un flujo cobre una placa plana - Fuente: [29]	45
Ilustración 21. Representación del coeficiente de transferencia de calor promedio sobre una placa plana con flujo laminar y turbulento – Fuente: [29]	46
Ilustración 22. Perfil de velocidad y térmico típico para un flujo de convección natural sobre una placa plana vertical caliente – Fuente: [29]	47
Ilustración 23. Corriente de convección natural en a) recinto cerrado horizontal y b) recinto cerrado vertical - Fuente: [29]	49
Ilustración 24. a) Transformador empleado para los ensayos experimentales, b) transformador anclado a la tapa del tanque con pernos y c) tanque contenedor de transformador y fluido dieléctrico - Fuente: Grupo de investigación GITEP	52
Ilustración 25. viscosímetro rotacional HAAKE™ Viscotester™ 550	52
Ilustración 26. Montaje de viscosímetro y equipo para baño termostático para mediciones de viscosidad a temperatura controlada - Fuente: El autor	53
Ilustración 27. Montaje eléctrico para ajustar los distintos niveles de carga en cada uno de los experimentos - Fuente: El autor	54

Ilustración 28. Paredes internas del cajón (tres laterales e inferior) con poliestireno para evitar el calentamiento por los alrededores – vista superior - - Fuente: El autor.....	55
Ilustración 29. Instalación térmica y eléctrica para los ensayos - Fuente: El autor	55
Ilustración 30. Montaje del sistema y bomba de calor para enfriar el sistema - Fuente: El autor	56
Ilustración 31. Anemómetro de hilo caliente empleado para la medición de velocidad de flujo de aire en el interior del cajón - Fuente: El autor	57
Ilustración 32. Puntos de toma de velocidad de flujo de aire sobre la superficie superior de la cuba - Fuente: El autor.....	57
Ilustración 33. a) Vista frontal y b) vista lateral de la cuba con la distribución de los puntos en los que se realizaron mediciones de velocidad de aire - Fuente: El autor	58
Ilustración 34. Interfaz de usuario para la visualización de los registros de temperaturas captados con el sistema de adquisición de datos - Fuente: El autor	58
Ilustración 35. CAD del núcleo del transformador: a) Núcleo conformado por las 130 láminas superiores e inferiores; b) lámina superior; c) 130 láminas superiores superpuestas; d) lámina de columnas de núcleo; e) superposición de las 130 láminas de columnas de núcleo - Fuente: El autor.....	60
Ilustración 36. Devanado de a) alta y b) baja tensión - Fuente: El autor	60
Ilustración 37. a) tapa plástica inferior y b) superior de los devanados - Fuente: El autor	60
Ilustración 38. a) clema estrecha y b) ancha - Fuente: El autor.....	61
Ilustración 39. a) Base del transformador y b) pernos con tuerca para el anclaje del transformador a la tapa de la cuba - Fuente: El autor	61
Ilustración 40. Cuba y tapa - Fuente: El autor	61
Ilustración 41. a) Ensamble de transformador y b) ensamble de transformador y tapa de cuba - Fuente: El autor	62
Ilustración 42. Ensamble de transformador y cuba - Fuente: El autor	62
Ilustración 43. a) Simplificación de los devanados a una sola bobina maciza y de la b) base del transformador - Fuente: El autor.....	63
Ilustración 44. a) tapa plástica superior e b) inferior con simplificaciones en la geometría - Fuente: El autor	63
Ilustración 45. Modelo 3D del transformador simplificado: a) vista isométrica, b) vista lateral, c) vista frontal - Fuente: El autor.....	64
Ilustración 46. a) Modelo 3D y b) modelo 2D. Versiones para la simulación numérica – Fuente: El autor	65
Ilustración 47. Generación de geometría 2D importada - Fuente: El autor	66
Ilustración 48. Parametrización para el mallado de la geometría en Ansys - Fuente: El autor	66
Ilustración 49. Mallado de la geometría - Fuente: El autor	67
Ilustración 50. Definición de parámetros para el solver - Fuente: El autor.....	70
Ilustración 51. Selección de los modelos aplicables para la simulación numérica - Fuente: El autor	70
Ilustración 52. a) Densidad, b) Calor específico y c) Conductividad térmica de los fluidos dieléctricos ensayados - Fuente: El autor a partir de [20].....	72
Ilustración 53. Definición de las propiedades del éster natural como tipo polinomial - Fuente: El autor	72
Ilustración 54. Definición de los coeficientes de la función polinomial que hace referencia a la densidad del éster natural – Fuente: El autor	73
Ilustración 55. Definición de las propiedades del acrílico plástico – Fuente: El autor ..	74
Ilustración 56. Asignación de material (Acero AISI 4340) a la zona base - Fuente: El autor	74
Ilustración 57. Definición de la zona del devanado como una fuente de energía en forma de calor a carga nominal - Fuente: El autor	75

Ilustración 58. Definición de las condiciones de pared y de simetría - Fuente: El autor	76
Ilustración 59. Definición de condición térmica para los lados de pared sólidos - Fuente: El autor	76
Ilustración 60. Definición de condición de momento para los lados de pared de fluido - Fuente: El autor	77
Ilustración 61. Definición de condición térmica para los lados de pared de fluido - Fuente: El autor	77
Ilustración 62. Definición de condición térmica de transferencia de calor por convección entre fluido y aire frío circundante - Fuente: El autor	78
Ilustración 63. Definición de condición de momento para los límites que están en contacto con el flujo de aire enfriado - Fuente: El autor	78
Ilustración 64. Definición de las condiciones de frontera - Fuente: El autor	80
Ilustración 65. Configuración para la discretización espacial del método de solución del modelo - Fuente: El autor	81
Ilustración 66. Configuración del método de acople de velocidad-presión y del factor de corrección-relajación – Fuente: El autor	81
Ilustración 67. Definición de los factores de falta de relajación – Fuente: El autor	82
Ilustración 68. Definición de los residuos de cada ecuación para los ajustes de condiciones de convergencia – Fuente: El autor	83
Ilustración 69. Configuración de la inicialización de la solución del modelo - Fuente: El autor	83
Ilustración 70. Medición de viscosidad para los tres fluidos - Fuente: El autor	85
Ilustración 71. Curva y función polinomial de viscosidad para cada aceite dieléctrico - Fuente: El autor	85
Ilustración 72. Definición de la viscosidad del fluido como una función polinomial dependiente de la temperatura - Fuente: El autor	86
Ilustración 73. Esquematización de las velocidades de flujo de aire evaluadas en cada superficie del tanque – Fuente: El autor	87
Ilustración 74. Distribución de temperatura en el transformador inmerso en aceite mineral a media carga - Fuente: El autor	89
Ilustración 75. Distribución de temperatura en el transformador inmerso en aceite mineral a carga nominal - Fuente: El autor	89
Ilustración 76. Distribución de temperatura en el transformador inmerso en aceite mineral a sobrecarga - Fuente: El autor	89
Ilustración 77. Distribución de temperatura en el transformador inmerso en éster sintético a media carga - Fuente: El autor	90
Ilustración 78. Distribución de temperatura en el transformador inmerso en éster sintético a carga nominal - Fuente: El autor	90
Ilustración 79. Distribución de temperatura en el transformador inmerso en éster sintético a sobre carga - Fuente: El autor	90
Ilustración 80. Distribución de temperatura en el transformador inmerso en éster natural a media carga - Fuente: El autor	91
Ilustración 81. Distribución de temperatura en el transformador inmerso en éster natural a carga nominal – Fuente: El autor	91
Ilustración 82. Distribución de temperatura en el transformador inmerso en éster natural a sobre carga - Fuente: El autor	91
Ilustración 83. Distribución de temperatura empleando aceite mineral con a) media carga, b) carga nominal y c) sobre carga – Fuente: El autor	100
Ilustración 84. Distribución de temperatura empleando éster natural con a) media carga, b) carga nominal y c) sobre carga – Fuente: El autor	100
Ilustración 85. Distribución de temperatura empleando éster sintético con a) media carga, b) carga nominal y c) sobre carga – Fuente: El autor	100

Ilustración 86. Residuos (convergencia y precisión) obtenidos para la simulación con éster natural a sobrecarga - Fuente: El autor	101
Ilustración 87. Residuos (convergencia y precisión) obtenidos para la simulación con aceite mineral a sobrecarga a) sin ajuste de factores de relajación y b) con ajuste de factores de relajación – Fuente: El autor	102
Ilustración 88. Modelo numérico errado (distribución de temperatura) para transformador sumergido en éster natural a carga nominal – Fuente: El autor	102
Ilustración 89. Líneas de flujo y campo de velocidades empleando aceite mineral con a) media carga, b) carga nominal y c) sobre carga – Fuente: El autor	104
Ilustración 90. Líneas de flujo y campo de velocidades empleando éster natural con a) media carga, b) carga nominal y c) sobre carga – Fuente: El autor	104
Ilustración 91. Líneas de flujo y campo de velocidades empleando éster sintético con a) media carga, b) carga nominal y c) sobre carga – Fuente: El autor	104
Ilustración 92. Variación de presión en el dominio del aceite mineral: a) media carga, b) carga nominal y c) sobre carga – Fuente: El autor	106
Ilustración 93. Variación de presión en el dominio del éster natural: a) media carga, b) carga nominal y c) sobre carga – Fuente: El autor	106
Ilustración 94. Variación de presión en el dominio del éster sintético: a) media carga, b) carga nominal y c) sobre carga – Fuente: El autor	106
Ilustración 95. Distribución de temperatura a carga nominal a -40°C para el a) aceite mineral b) éster natural y c) éster sintético - Fuente: EL autor	107
Ilustración 96. Distribución de flujo y campo de velocidades a carga nominal a -40°C para el a) aceite mineral b) éster natural y c) éster sintético - Fuente: EL autor	107
Ilustración 97. Modelos 3D a evaluar en futuros trabajos - Fuente: El autor	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparativo entre las propiedades del aceite mineral, el éster natural y el éster sintético - Fuente: a partir de [5]	31
Tabla 2. Normativa aplicada a los fluidos dieléctricos tipo éster - Fuente: Tomado de [30]	50
Tabla 3. Propiedades físicas de los materiales de los que están hechas las piezas del transformador y cuba - Fuente: A partir de [18] y la librería de materiales Ansys Fluent	73
Tabla 4. Registros de corriente y tensión en los devanados para escenario de carga - Fuente: El autor	86
Tabla 5. Mediciones de temperatura por escenario de carga para cada fluido dieléctrico - Fuente: El autor	92
Tabla 6. Temperaturas máximas obtenidas experimental y numéricamente, y variación con respecto al valor experimental - Fuente: El autor	95
Tabla 7. Generación de calor por índice de carga - Fuente: El autor	96
Tabla 8. Número de Reynolds, tipo de flujo, número de Nusselt y coeficiente de transferencia de calor para cada superficie de la cuba por índice de carga - Fuente: El autor	97
Tabla 9. Temperaturas mínimas obtenidas en cada simulación por fluido y para índice de carga - Fuente: El autor	99
Tabla 10. Velocidades máximas (en [m/s]) obtenidas numéricamente con cada fluido para cada condición de carga - Fuente: El autor	103
Tabla 11. Presiones (en Pa) máximas y mínimas en el transformador con cada fluido y para cada índice de carga - Fuente: El autor	105

RESUMEN

Con este trabajo se ha buscado estudiar la viabilidad de emplear líquidos de tipo éster para sustituir de aceites minerales en su uso como fluidos refrigerantes de transformadores eléctricos utilizados en condiciones ambientales de baja temperatura a partir de un estudio fluido térmico de dichos aceites dieléctricos. Para ello se ha realizado un modelado numérico de CFD del proceso de enfriamiento (distribución de temperatura y flujo) de un transformador monofásico de 800 VA (230V / 115V), teniendo como principal parámetro de entrada la viscosidad registrada de cada uno de los fluidos a analizar (éster y mineral) a bajas temperaturas ambientales. Los resultados del modelo numérico han comparado con la medición experimental realizada en laboratorio.

Para el modelamiento por CFD se ha empleado el software ANSYS Fluid Flow Fluent; dicho modelamiento fue en estado estable, y se evaluó la distribución de temperatura, y la distribución del flujo y el campo de velocidades. Para los ensayos experimentales se ha medido las viscosidades de los fluidos dieléctricos, para lo cual se han realizado en el laboratorio ensayos empleando un viscosímetro y un sistema de baño termostático que ha permitido controlar la temperatura del ensayo. El líquido del baño ha sido un anticongelante para poder ensayar los fluidos a temperaturas bajo cero. Tanto el aceite mineral como los fluidos de tipo éster en el que se sumergió el transformador fue evaluado con diferentes condiciones de carga.

El sistema fue enfriado por convección forzada de tal manera que se alcanzó como temperatura mínima 4°C. Con esta temperatura no fue posible obtener resultados concluyentes para un correcto análisis del arranque frío junto con la generación de puntos calientes. No obstante, el modelo numérico construido, al contrastarse con los resultados experimentales, muestra un gran ajuste para la identificación de la magnitud y ubicación de los puntos más calientes de la máquina; además de que se ha corroborado que: al sumergir el transformador en los fluidos tipo éster la distribución de temperatura observada en el equipo evidencia temperatura máximas superiores a los ensayos con aceite mineral, y que en la simulaciones las velocidades de circulación alcanzadas por el éster son menores que con aceite mineral. Finalmente se han planteado algunas conclusiones que ha arrojado la realización del presente junto con unos planteamientos para trabajos futuros con el mismo enfoque investigativo.

ABSTRACT

This work has sought to study the feasibility of using ester type liquids to replace mineral oils in their use as cooling fluids of electrical transformers used in low temperature environmental conditions from a thermal fluid study of these dielectric oils. For this purpose, a CFD numerical modeling of the cooling process (temperature and flow distribution) of a single-phase 800 VA (230V / 115V) transformer has been carried out, having as main input parameter the viscosity recorded for each of the fluids to be analyzed (ester and mineral) at low ambient temperatures. The results of the numerical model have been compared with the experimental measurement carried out in the laboratory.

For the CFD modeling, the ANSYS Fluid Flow Fluent software was used; this modeling was in steady state, and the temperature distribution, flow distribution and velocity field were evaluated. For the experimental tests, the viscosities of the dielectric fluids were measured, for which tests were carried out in the laboratory using a viscometer and a thermostatic bath system that made it possible to control the test temperature. The bath liquid was an antifreeze in order to be able to test the fluids at temperatures below zero. Both the mineral oil and ester-type fluids in which the transformer was immersed were evaluated under different load conditions.

The system was cooled by forced convection in such a way that a minimum temperature of 4°C was reached. At this temperature it was not possible to obtain conclusive results for a correct analysis of cold start-up together with the generation of hot spots. However, the numerical model built, when contrasted with the experimental results, shows a great adjustment for the identification of the magnitude and location of the hottest points of the machine; in addition, it has been corroborated that when the transformer is immersed in ester type fluids, the temperature distribution observed in the equipment shows higher maximum temperatures than the tests with mineral oil, added to the fact that the flow velocities are lower than in the tests with mineral oil. Finally, some conclusions have been drawn from the present study, together with some proposals for future works with the same research approach.

1. INTRODUCCIÓN

En un transformador eléctrico sumergido en un fluido dieléctrico el cual tiene una doble funcionalidad: dieléctrica (aislar eléctricamente las partes en tensión de la máquina), y refrigerante (evacuar el calor generado en su interior al exterior), uno de los aspectos más representativos para garantizar su fiabilidad, seguridad y durabilidad resulta ser su refrigeración [1], [2]. El calor generado en el transformador, que está asociado a pérdidas (eléctricas en los devanados y magnéticas en el núcleo), contribuye a incrementar la temperatura del equipo, y si alcanza un valor excesivo se traduce en envejecimiento del aislamiento eléctrico (aceite y papel) y por tanto en la reducción de la vida útil de la máquina [3], [4].

Los fluidos que se han utilizado tradicionalmente han sido aceites de origen mineral, pero, tanto por motivos medioambientales (biodegradabilidad) como de seguridad (relativamente baja temperatura de ignición: 180°C con respecto a los 370°C y 320°C del éster natural y del éster sintético, respectivamente), se está estudiando su sustitución por fluidos tipo éster [2], [4], [5], que presentan mejor biodegradabilidad y su punto de ignición es mayor.

No obstante, para estos fluidos sustitutos la refrigeración puede resultar más crítica con temperaturas ambientes bajas, ya que su viscosidad es mayor, especialmente a baja temperaturas, lo que disminuyen las fuerzas de flotabilidad, y por lo tanto tienen peores características como fluido refrigerante. Es por ello por lo que en el presente trabajo se ha evaluado la capacidad de refrigeración de un transformador a bajas temperaturas empleando tres fluidos dieléctricos diferentes: aceite mineral, éster natural y éster sintético.

Para evaluar dicha capacidad de refrigeración en la máquina, se ha evaluado una componente experimental y otra numérica: la experimental incluye:

- Mediciones de viscosidad: empleando un baño termostático con el que se han podido tomar registros de viscosidad a diferentes temperaturas, a partir de -4°C; este aspecto es relevante especialmente en los fluidos alternativos, pues disminuye considerablemente a bajas temperaturas; la curva de viscosidad de cada fluido ha sido trazada y su expresión polinómica como función de la temperatura es la que se ha incluido en la definición de las propiedades de los fluidos.
- Ensayo de un transformador: la máquina fue ensayada a cortocircuito con tres niveles de carga diferente, y sumergido en los tres fluidos (9 ensayos), y para conseguir las bajas temperaturas se ha empleado una bomba de calor, hasta alcanzar una temperatura ambiente mínima, en el contenedor que se ha dispuesto la cuba, de 4°C. Además de los datos eléctricos (potencia, intensidad, ...), se recopilaban los datos de temperatura en las zonas de interés del transformador (aceite, hierro, cobre, ...) y con ayuda de un anemómetro de hilo caliente se han realizados mediciones de velocidad del flujo de aire que se hacía recircular con un ventilador axial sobre el transformador.

En cuanto al modelo numérico, se ha definido el modelo CAD simplificado para las simulaciones, se ha definido el mallado tal que capture la capa límite en las interfaces sólido-líquido y los puntos calientes en la máquina; se diferenciaron y parametrizaron cada una de las zonas del modelo, con las respectivas propiedades de los materiales para las partes sólidas del transformador (propiedades constantes) y para los fluidos (como funciones polinómicas dependientes de la temperatura); seguido por la asignación de las condiciones de frontera de pared y la fuente de calor constante

concentrada en el devanado. Tanto el coeficiente de transferencia de calor como la fuente de calor fueron calculados analíticamente; para el primero se tuvo en cuenta la geometría del tanque, el tipo de flujo y la velocidad del flujo de aire. Se establecieron las condiciones del *solver* para Ansys Fluent teniendo en cuenta las condiciones de frontera, el problema físico a evaluar y el tipo de flujo, junto a las condiciones de convergencia del modelo.

Una vez ejecutadas las simulaciones para estimar la distribución de temperatura en la máquina y los flujos y campos de velocidades de estos, dichos resultados fueron comparados con las curvas de temperatura vs tiempo que fueron trazadas a partir de los datos experimentales de temperatura.

Para la consecución de los objetivos planteados, el desarrollo del presente trabajo está dividido en 6 capítulos principales: en el 2 se establecen, en el 3 se realiza un estado del arte analizando las investigaciones más recientes que se han realizado en relación con el campo de estudio; el 4 abarca la fundamentación teórica relevante en temas de transformadores eléctricos, fluidos dieléctricos, transferencia de calor y mecánica de fluidos, y en dinámica de fluidos computacional; el 5 abarca la descripción de la metodología experimental y numérica que han sido tenido en cuenta; finalmente el 6 corresponde al análisis por separado de los resultados obtenidos con cada metodología y luego el comparativo entre ambas; y se cierra con una serie de conclusiones y planteamientos de recomendaciones y líneas de trabajo futuros, respectivamente.

2. OBJETIVOS

En este apartado se plantean el objetivo general y los específicos del presente trabajo. El desarrollo de tales objetivos es abordado en los siguientes capítulos del trabajo.

2.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar fluido térmicamente la capacidad de enfriamiento de los transformadores a bajas temperaturas ambiente cuando se emplean como fluidos dieléctricos líquidos de diferente naturaleza, en este caso aceite mineral y ésteres natural y sintético.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Se ha planteado la consecución de los siguientes objetivos específicos:

- Investigar sobre trabajos que hayan estudiado previamente experimental y numéricamente la capacidad de refrigeración de los transformadores operados a bajas temperaturas y sumergidos en fluidos dieléctricos alternativos como los de tipo éster.
- Estudiar los principios de funcionamiento y tipos de ensayo llevados a cabo en los transformadores eléctricos, y las características y propiedades de los fluidos dieléctricos alternativos que han venido empleándose en este tipo de máquinas eléctricas.
- Reconocer la aplicabilidad de la dinámica de fluidos computacional para la solución de problemas físicos que involucren transferencia de calor y mecánica de fluidos.
- Determinar experimentalmente la distribución de temperatura en un transformador ensayado a diferentes niveles de carga y sumergiéndolo en aceite mineral y fluidos tipo éster, mientras se mantiene a baja temperatura ambiente.
- Evaluar numéricamente la distribución de temperatura en el transformador y la distribución del flujo y campo de velocidades, para cada fluido dieléctrico a estudiar, con diferentes niveles de carga, y enfriado a baja temperatura ambiente.
- Comparar los resultados obtenidos con la experimentación y el modelo numérico y definir conclusiones y líneas futuras de trabajo.

3. ESTADO DEL ARTE

Como fluido dieléctrico, pensando en el aislamiento eléctrico y enfriamiento del transformador, se han empleado habitualmente aceites de origen mineral; sin embargo, por motivos medio ambientales (baja biodegradabilidad) y seguridad (relativamente baja temperatura de ignición), se ha venido estudiando desde hace varios años su sustitución por fluidos de tipo éster [2], [4]–[6], y es que estos fluidos, de acuerdo con Dombek *et al.*, ya están siendo utilizados tanto en transformadores de distribución como de transmisión [7]. Dentro de este tipo se han considerado alternativas como lo son los aceites de tipo vegetal, los cuales se caracterizan por ser más resistentes al fuego, tener alta inflamabilidad, ser más biodegradables y no tóxicos, ya que la mayoría de ellos se utilizan para uso doméstico [8].

El mayor inconveniente de implementar los ésteres como fluido dieléctrico resulta ser la refrigeración del transformador, que se vuelve más crítica a temperaturas ambiente más bajas, ya que la viscosidad de este tipo de líquidos puede resultar demasiado elevada como para que fluya correctamente por los canales de los devanados, dificultando así el enfriamiento del transformador. De allí a que, tal como fue expuesto por Mohan Rao *et al.* [5], se deba seguir investigando, entre otros aspectos, en la usabilidad de los fluidos de tipo éster en las regiones con climas fríos.

Cuando el transformador está en servicio normal esto no representa un problema, ya que las pérdidas que ocurren en la máquina durante la transformación, eléctricas en las bobinas y magnéticas en el núcleo, contribuyen a calentar el aceite, de tal manera que este se mantiene con la viscosidad apropiada. Pero cuando un transformador se arranca con temperaturas ambiente bajas, hasta que el aceite no se calienta, el líquido tarda cierto tiempo en empezar a circular normalmente, lo que puede provocar que se produzcan puntos calientes (los cuales provocan una degradación acelerada del aislamiento de celulosa de los devanados impregnada de aceite, reduciendo su resistencia dieléctrica y provoca la creación de gases disueltos en el fluido [9]) en el interior del devanado, ya que un bajo flujo de fluido se traduce en una baja velocidad del fluido y por tanto de la tasa de transferencia de calor del interior hacia el ambiente.

Por la década de los 80 se trató de buscar nuevos líquidos con alto punto de inflamación, se quiso sustituir los aceites minerales por Fluidos Hidrocarburos de Alto peso Molecular (High Molecular Weight Hydrocarbon Liquid, HWMHL). Tratando de estudiar la viabilidad del uso de estos líquidos en transformadores, en [10] se presentaron los resultados de ensayos realizados a -30°C en dos transformadores, cuya diferencia entre ambos era la configuración del tanque. Uno uso aletas onduladas para el enfriamiento y el otro empleaba paneles de radiador. Los dos transformadores se ensayaron con aceite mineral y con un tipo de fluido HMWHL. Ambas unidades tuvieron un arranque en frío con éxito con los dos tipos de fluido, y los resultados indicaron que los transformadores llenados con el fluido HMWH pueden tolerar sobrecargas de operación continua y de arranque a bajas temperaturas ambiente.

En la misma década, en el año 1985 fue presentado el trabajo de W. Lampe [11], el cual consistió en el estudio de las precauciones y operación de los transformadores de potencia a bajas temperaturas, teniendo en cuenta que, en zonas como Escandinavia y Canadá, considerando los registros de aquel entonces, podían alcanzar temperaturas de -35°C y -50°C , respectivamente. Si bien para el modelo de flujo de aceite el autor definió que la temperatura del modelo debería ser inferior a los -25°C con el fin de simular el arranque en frío, para lo que se consideró, además, aceites con alta viscosidad, en los ensayos realizados en los transformadores no se consiguieron resultados concluyentes considerando que no se obtuvieron temperaturas inferiores a

los -12°C . De la experimentación obtuvieron como una de las recomendaciones principales la elección del aceite para este tipo de equipos, sugiriendo por consiguiente fluidos con viscosidades cinemáticas inferiores a $0.006\text{m}^2/\text{s}$ a -40°C y un punto de fluencia $\leq -45^{\circ}\text{C}$.

Por otra parte, finalizando la década de los 90 Rapp *et al.* evaluaron el punto de fluencia de los fluidos de tipo éster en los transformadores a bajas temperatura ambiente; para lo cual realizaron las mediciones de algunas de las propiedades de dichos fluidos, para luego realizar ensayos experimentales de arranque en frío (-30°C) a plena carga en el transformador sumergido en el éster natural mientras se realizaban mediciones de temperatura con los sensores dispuestos en el equipo (puntualmente en núcleo y devanados) [12]. El experimento lo llevaron a cabo por 25 días a -15°C para el estado estable y a -30°C para el arranque en frío. Finalmente evidenciaron que los fluidos tipo éster se estaban solidificando a temperaturas frías superiores a las sugeridas por el punto de fluidez.

En el año 2014 se presentó en la EWEA 2014 Conference un trabajo realizado por los equipos de CG Power Systems Belgium y OWI-lab (Sirris), [13], en el cual se evaluó el comportamiento del éster sintético y aceite mineral empleado como fluido dieléctrico en transformadores utilizados para dar servicio a la generación de turbinas eólicas offshore, los cuales pueden estar expuestos a temperatura que pueden alcanzar los -40°C (sin operar), y -20°C (operando). Realizaron mediciones de viscosidad a cada fluido a muy bajas temperaturas para evaluar el efecto de la viscosidad en la distribución de temperatura, analizaron las caídas de presión en el tanque y como este se deforma y puede fracturarse por la fatiga a la que se somete; además, a partir de la distribución de temperatura registrada en el transformador a distintos rangos de temperatura de arranque en frío (-25°C , -30°C y -40°C), evidenciaron que el éster sintético en las aletas del tanque no fluye inmediatamente a bajas temperaturas.

En ese mismo año en un trabajo publicado por H. Yu *et al.* [2] se investigó el comportamiento de varios fluidos dieléctricos de diferente origen (ésteres metílicos de origen vegetal y mineral). Además de comparar diferentes propiedades eléctricas, analizaron la saturación de agua y la viscosidad de los líquidos. Evidenciaron que a temperaturas próximas a 40°C los ésteres de metilo estudiados tuvieron una viscosidad más baja que el aceite mineral, mostrando dichos fluidos mejor capacidad de enfriamiento; sin embargo, los ésteres mostraron poca fluidez a bajas temperaturas a causa de su alto punto de fluidez. No obstante, en dicho trabajo no se indagó a profundidad el rendimiento de cada uno de los fluidos dieléctricos a bajas temperaturas.

S.P. Moore *et al.* publicaron también en 2014 el arranque en frío de un transformador nuevo de 240 MVA (GSU) inmerso en éster natural, que fue documentado a mediados del 2010 en Burlington, IA, [6], entre las condiciones iniciales se destaca temperaturas del equipo en reposo y de los alrededores cercanas al punto de fluidez del fluido (-21°C). Para el diseño del sistema de refrigeración emplearon un programa de simulación que fue usado en trabajos previos con el mismo tipo de transformador. En los ensayos no se emplearon los ventiladores externos de los intercambiadores de calor para aumentar la tasa de transferencia de calor. Validaron que siempre y cuando las propiedades del éster natural sean similares al fluido empleado en el transformador, en especial la viscosidad, se puede emplear los mismos procedimientos de arranque en frío cuando se utiliza aceite mineral, en casos de transformadores llenados con éster natural.

El trabajo presentado en el 2016 por M. Kosterec *et al.* [14] se focalizó en los fluidos magnéticos, los cuales se caracterizan por una alta transferencia de calor y por crear una circulación forzada (convección termomagnética) a partir del uso de campos

magnéticos externos, especificándose como en este campo se emplea la simulación numérica para verificar como afecta el cambio del campo magnético incidente al espectro del campo eléctrico local, flujo del fluido y la transferencia de calor. El trabajo consistió en el desarrollo de un modelo numérico para evaluar la distribución de temperatura y el flujo de un fluido refrigerante de tipo magnético. Para el estudio emplearon un fluido magnético que consistía en aceite de transformador Mogul y nanopartículas magnéticas de Fe_3O_4 con una concentración de 0,15% en volumen del aceite del transformador. La distribución de temperaturas y flujo del fluido fueron obtenidos con un modelo numérico empleando ANSYS; el solucionador empleo el modelo de Boussinesq, el cual calcula las fuerzas de flotabilidad en el aceite del transformador, y dicho modelo considera la densidad como un valor constante en las ecuaciones resueltas, a excepción del término de flotabilidad en la ecuación de impulso. Si bien el modelo numérico que definieron para la distribución de temperatura y el flujo del fluido mostro las mismas tendencias que las mediciones experimentales, este presento algunas inexactitudes. No obstante, notaron que un fluido magnético tiene mejor capacidad de enfriamiento que el aceite del transformador. Este trabajo resulta relevante en cuando a validaciones experimentales y numéricas, pero no se han evaluado los resultados a bajas temperatura ambiente de operación.

También en el 2016, Liu *et al.* estudiaron la influencia de ambientes fríos en la operación de transformadores de elevada tensión en zonas de gran altitud y bajas temperaturas, y cómo estas condiciones influyen en las distintas partes del equipo, comentando además algunas alternativas para cada restricción de diseño de cada componente del transformador que ensayaron [15]. En cuanto al aislamiento, evaluaron como las bajas temperaturas influyen en la tensión de ruptura del fluido dieléctrico empleado y expusieron algunas recomendaciones para el arranque en frío teniendo en cuenta la variación en la viscosidad del aceite del transformador a estas condiciones ambiente, más no abordaron la capacidad de refrigeración del equipo a dichas temperaturas ambiente. Algo muy parecido fue lo hecho por Sun *et al.* (2017) [16], pues solo evaluaron algunas de las propiedades del aislamiento dieléctrico de un transformador que funcione en un ambiente de frío extremo como el de algunas zonas de China, principalmente en cómo influye la humedad en la resistencia dieléctrica en el sistema de aislamiento (papel y fluido dieléctrico).

Bachinger *et al.*, integrantes de SIEMENS Austria, presentaron en el 2017 los resultados de los ensayos experimentales realizados a un autotransformador monofásico (15 MVA / 55 kV) llenado con éster sintético y sometido a ultra bajas temperaturas ambiente (entre -50°C y -30°C) en estado estable bajo diferentes niveles de carga [17]. El enfriamiento del sistema se llevó a cabo por convección natural, el transformador contaba con radiadores y se evaluó únicamente la distribución de temperatura (emplearon sensores para medir temperatura y para medir nivel de humedad) en el equipo en estado estable para cada nivel de carga; por lo que no evaluaron los arranques en frío ni ningún otro fenómeno transitorio, sino en analizar la relación entre la carga del transformador y la temperatura ambiente con el aumento de la temperatura del fluido en la parte superior e inferior del tanque. Se concluyó que a temperaturas ambiente muy bajas el flujo del fluido y la distribución de temperaturas en los transformadores enfriados naturalmente es crítico en el caso de utilizar fluidos dieléctricos de alta viscosidad como los ésteres.

Ya en el artículo presentado por A. Ortiz *et al.* en 2018 presento un estudio sobre la capacidad de enfriamiento de un éster natural con 3 niveles de envejecimiento a partir de un estudio numérico 2D y uno experimental. Las variaciones de temperatura se constataron con el ensayo experimental y con el modelamiento numérico se determinó la distribución de temperatura y velocidad, y ambos estudios se empezaron a

temperatura ambiente. Se concluyó que la capacidad de enfriamiento del fluido disminuye por el aumento de su viscosidad ocasionado por el envejecimiento [18].

A. Santisteban *et al.* [19] contribuyeron en el 2019 en la estimación del comportamiento termo-hidráulica de un aceite mineral (para calibrar el modelo) y de un fluido éster sintético y uno a base de éster natural a partir de un Modelado de Redes Termo hidráulicas (THNM) de un devanado tipo disco. Se validó el comportamiento por THNM de cada fluido en régimen ON y OD, y los resultados fueron comparados con los resultados en las simulaciones hechas en CFD 2D con el fin de verificar la precisión del modelo THNM en cuanto a las desviaciones de los puntos calientes, temperatura máxima y promedio en los devanados y la distribución de la tasa de flujo entre los canales radiales.

También en el 2019, M. Daghrach *et al.* presentaron un estudio experimental (empleando un radiador y una bomba para el sistema de refrigeración) para constatar cuál era el comportamiento fluido térmico de diferentes fluidos (ensayaron tres en total) empleados en transformadores en un transformador con un modelo devanado tipo disco zig-zag utilizando el enfriamiento dirigido y natural [4]. Las pérdidas de potencia fueron controladas y emplearon la bomba para la circulación del fluido y realizaron mediciones de: velocidad de entrada, las caídas de presión, mediciones de temperatura. Experimentalmente evaluaron el comportamiento del flujo de cada fluido, las caídas de presión en el devanado y la distribución de temperatura, dichos fluidos fueron forzados a fluir con diferentes velocidades de entrada, aparte de ello, no se evaluó la capacidad de enfriamiento de dicha máquina a bajas temperaturas ambiente.

Por otro parte, el trabajo presentado por Dombek *et al.* (2019) consistió en estudiar y comparar las propiedades térmicas de varios fluidos dieléctricos, entre esos dos ésteres naturales, para evaluar la capacidad de refrigeración del transformador sumergido en estos líquidos [7]. Estimaron la conductividad térmica, la viscosidad, el calor específico, la densidad y el coeficiente de expansión térmica, aunque a temperaturas entre los 25°C y 80°C. Desde otra perspectiva, así mismo en el 2019, Madsen *et al.* comparó el diseño y control de la refrigeración de transformadores convertidores de cinco empresas de servicios públicos en Canadá que habían presentado problemas en la energización de dichos equipos [9]; evaluaron los inconvenientes con este tipo de equipos en cada empresa y plantearon algunas recomendaciones, entre las que destacan controlar el proceso de energización, y la metodología de monitoreo y control del flujo, así como solicitar al fabricante los puntos calientes esperados para ambientes a bajas temperatura estando el transformador a plena carga.

En el trabajo realizado por Altay R. *et al.*, desarrollado en el 2020, los autores expusieron los resultados del modelado 3D con CFD del rendimiento de la refrigeración del Bobinado de Baja Tensión (LVW) de un transformador de 100 MVA HPTy que tenía un sistema de refrigeración axial. Se comparó el rendimiento del enfriamiento empleando tres líquidos distintos, dos ésteres (natural y sintético) y un aceite mineral. El modelo fue validado con un ensayo de la máquina. Los autores concluyeron afirmando que los líquidos a base de éster son una buena alternativa para sustituir los aceites minerales [20]. No obstante, este trabajo no consideró bajas temperaturas ambientales.

También, en el 2020, se dio la investigación de M. Daghrach *et al.*, en la cual estudiaron el enfriamiento de transformadores por líquido forzado y dirigido (conocidos como transformadores dirigidos por aceite) utilizando herramientas experimentales y numéricas variando la velocidad de entrada del fluido; para el modelo numérico emplearon el software COMSOL Multiphysics y realizaron modelos en 2D y 3D [21], encontrando que es recomendable el modelado CFD 3D para los casos en que se

presenten flujos inversos – a la entrada de los ductos -, y que, por otro lado, los modelos en 2D coinciden en gran medida con las mediciones experimentales. Ese mismo año, parte del equipo de trabajo del trabajo mencionado, también presento la segunda parte del trabajo de investigación inicial [22], cuya variante principal es que se analizaría un enfriamiento por convección natural tanto numérica como experimentalmente.

De manera adicional, en la guía de referencia del fluido FR3 del 2021 [23], se aprecian algunas especificaciones de este fluido que sirve como refrigerante en transformadores de potencia y distribución, haciendo hincapié en la aplicabilidad que tiene dicho fluido para regiones con muy bajas temperaturas pues su viscosidad no disminuye tanto (y con ello su capacidad de enfriamiento) como algunos ésteres.

Las temáticas abordadas en las investigaciones antes enunciadas van encaminadas precisamente a abordar alguna o varias de las propiedades que, en cualquier fluido empleado en un transformador como aislamiento y refrigerante, son deseadas, y estas son las mismas enunciadas en el review expuesto por S. Bhattacharya *et al.* en el 2020: Alta rigidez dieléctrica, alto punto de inflamación y combustión, extinción rápida del arco, baja viscosidad, lodo mínimo por oxidación, alta resistividad, libre de álcalis ácidos, humedad y azufre corrosivo [8].

En conclusión, en la bibliografía analizada se observa que los trabajos cuyo interés se centra en estudiar el enfriamiento de este tipo de máquinas bajo condiciones medioambientales de baja temperatura, la propiedad con mayor influencia es la viscosidad. Y, para dicho estudio, se suelen apoyar de la experimentación y/o el modelamiento numérico.

4. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

4.1. TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS DE POTENCIA

De acuerdo con lo tratado por J. Fraile Mora [24], el transformador es una máquina eléctrica estática que opera con corriente alterna y que está compuesta por dos devanados (de alta y de baja tensión) que permiten hacer la transformación de energía eléctrica con determinados valores de tensión y corriente; mientras Liu *et al.* lo definen como uno de los equipos eléctricos más importantes del sistema energético, pues está relacionado con estabilidad y seguridad de la red eléctrica [15]. Por otro lado, la caracterización de un transformador se basa en la energía que podrá ser transportada por inducción electromagnética de una bobina a otra a partir de un flujo variable, con un mismo circuito magnético y a la misma frecuencia.

Teniendo en cuenta que durante la transformación ocurren unas pérdidas por efecto Joule, histéresis y corrientes de Foucault, es necesario que el transformador deberá ser capaz de tolerar dichas pérdidas más la potencia nominal para la que se ha proyectado, es decir, sin que se genere deterioro por sobrecalentamiento o de envejecimiento de los conductores y el sistema de aislamiento [25].

Desde el punto de vista funcional, las partes principales de un transformador son [24]: núcleo, devanados, aisladores pasantes, papel dieléctrico y sistema de refrigeración.

a. Núcleo

Forma el circuito magnético del transformador y generalmente está constituido por láminas de acero de silicio. Dicho núcleo lo conforma las columnas (donde se disponen los devanados) y las culatas (unión entre las columnas), y las ventanas del núcleo hacen referencia a los espacios entre columnas y culatas. Por otro lado, según la posición relativa entre núcleo y devanados, los transformadores se clasifican en acorazados y de columnas. Ver la Ilustración 1a e Ilustración 1b. En este tipo de transformadores las secciones de columnas y culatas son las mismas para garantizar que la inducción sea la misma en todo el circuito. En el caso de los transformadores trifásicos (Ilustración 1c) se tiene tres columnas idénticas, y las uniones entre dichas columnas y culatas se llaman juntas, y para reducir la reluctancia del circuito magnético deben tener un espesor lo más reducido posible.

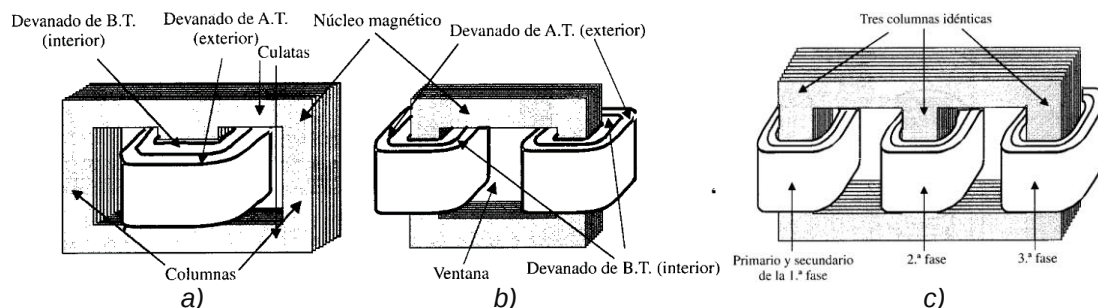


Ilustración 1. Clasificación de transformadores monofásicos según posición relativa entre núcleos y devanados: a) acorazado y b) de columnas; y c) transformadores trifásicos - Fuente: [24]

En los transformadores de potencia elevada es habitual que se intercalen canales de ventilación entre los paquetes de chapas del núcleo para mejorar la transferencia hacia el entorno.

b. Devanados

Conforman el circuito eléctrico de la máquina y están hechos a partir de conductores de cobre, en forma de hilos redondos o de sección rectangular para casos de secciones mayores. Dichos bobinados pueden ser concéntricos o alternados según la disposición relativa entre los arrollamientos de alta y baja tensión. En los devanados concéntricos (Ilustración 2a, las bobinas son coaxiales y están separadas por un cilindro aislante de papel o cartón, y generalmente la bobina de baja tensión, por su fácil aislamiento con respecto a la de alta, se ubica más cerca de la columna); o alternados (se disponen alternativamente los devanados de alta y baja tensión en secciones como se observa en la Ilustración 2b).

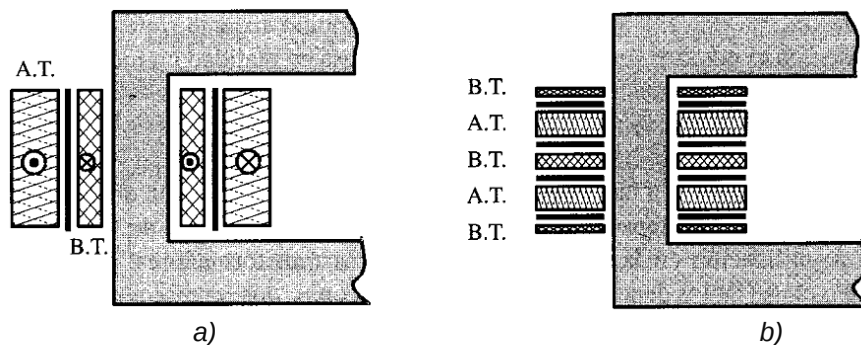


Ilustración 2. Tipos de devanados según la posición relativa entre arrollamientos: a) concéntricos y b) alternados - Fuente: [24]

c. Aisladores pasantes

Los bornes de los transformadores de media tensión se llevan hasta el exterior del tanque contenedor a partir de pasatapas debidamente aislados. Los aisladores pasantes de alta y baja tensión cuentan con una altura que es directamente proporcional a la tensión. Por otro lado, los transformadores de una elevada potencia cuentan con un relé de gas que protege al equipo de sobrecargas o fallas por aislamiento.

d. Papel dieléctrico

El aislamiento en transformadores dieléctricos de potencia es una combinación de sólido (papel de celulosa) y líquido [6]. En cuanto al papel dieléctrico con el que cuentan los transformadores eléctricos se emplea para, entre otras cosas, determinar su vida útil. El parámetro que se considera del papel, para indicar la vida útil del transformador, es su tasa de envejecimiento, que a su vez aumenta exponencialmente por la temperatura [21].

e. Sistema de refrigeración.

Considerando el enfoque del presente trabajo, se tratará a mayor detalle el sistema de refrigeración en apartados posteriores.

Todos los transformadores incluyen una placa de especificaciones que contiene los datos de potencia (la aparente y es aplicable a ambos devanados), así como las tensiones (las nominales hacen referencia a las que se ha proyectado la máquina para que opere, además de que serán de referencia para los ensayos y funcionamiento del

equipo), frecuencia e impedancia equivalencia en determinado porcentaje, o la variación de voltaje relativo de cortocircuito. Dicha placa también incluye las conexiones internas, sistema refrigerante, serial, código, fabricante y condiciones de funcionamiento.

4.1.1. Transformador Ideal y Real

Un *transformador ideal* es aquel en el que no se produce pérdidas de tipo magnética y eléctrica. El funcionamiento de un transformador se puede entender asumiendo las siguientes consideraciones ideales:

- Ambos devanados, primario y secundario, cuentan con valores resistivos despreciables, lo cual se traduce en que no se presenten pérdidas por efecto joule y que no hayan caídas de voltaje resistivos en la máquina. En la realidad dichos valores resistivos nunca son nulos.
- El flujo magnético está contenido en el núcleo y enlaza ambos devanados, es decir, no está disperso el flujo. Pero en la realidad solo una pequeña parte de dicho flujo atraviesa ambos devanados y son los flujos los que completan el circuito por el aire.

Cuando se ha definido el sentido que siguen las fuerzas electromotrices (f.e.m.s.) y corrientes en el transformador se procede a reconocer las relaciones que hay entre tensiones, flujos magnéticos y f.e.m.s. De lo anterior resulta la relación de transformación m (ver la ecuación 1), que para el caso ideal refleja una igualdad entre la relación de tensiones y de espiras, lo que al final resulta ser la relación de transformación:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = m \quad (1)$$

Donde V_i , E_i y N_i es la tensión [V], la f.e.m.s [V] y el número de espiras en el devanado i , respectivamente (1 primario, 2 secundario). Por otro lado, en un *transformador real* es necesario considerar tanto los valores resistivos de los devanados como la dispersión del flujo magnético (el cual es distribuido por zonas no magnéticas), y su representación se puede observar en la Ilustración 3.

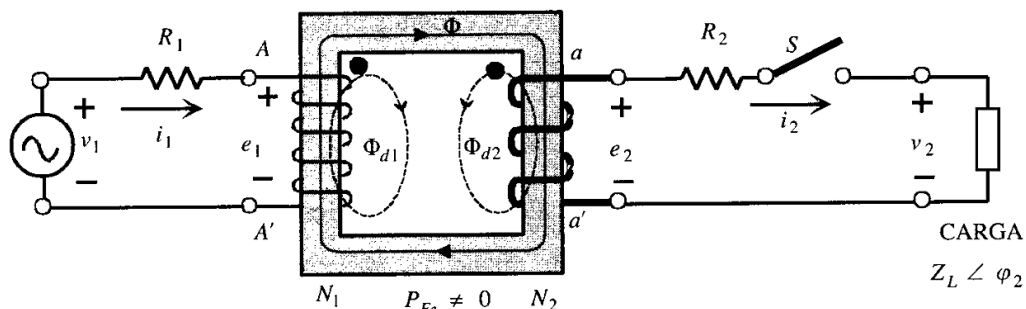


Ilustración 3. Esquema de un transformador real con las resistencias eléctricas y los flujos magnéticos de dispersión - Fuente: [24]

Donde Φ_i , e_i , R_i , i_i , v_i , A , a , A' , a' y N son el flujo magnético, fuerza contraelectromotriz, la resistencia del conductor, la corriente, tensión, terminales positivos, terminales negativos y número de espiras del devanado i , respectivamente; Z_L y S representan impedancia de carga y el interruptor. En el transformador real, así como en el ideal, la

relación de las f.e.m.s. es igual a la relación de espiras y a la relación de transformación, como se observa en la ecuación 2. Sin embargo, como en la realidad este tipo de máquinas presentan caídas de voltaje, la relación de tensiones entre devanados será una aproximación: $V_1/V_2 \approx m$.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = m \rightarrow \text{Transformador real} \quad (2)$$

J. Fraile Mora [24] destaca, además, como en la práctica se emplea un circuito equivalente aproximado a la bobina primaria para representar el transformador eléctrico (Ilustración 4), considerando que con este se puede resolver problemas prácticos que traen el uso de este tipo de máquinas (como las variaciones de tensión y el rendimiento); un circuito que corresponde con gran exactitud al comportamiento del transformador real, que no introduce errores de cálculo considerables, pero que simplifica en gran medida el estudio del transformador. En el circuito de la Ilustración 4, I_0 , I_{Fe} , I_μ , R_{cc} y X_{cc} hacen referencia a la corriente de vacío, corriente activa, corriente reactiva, resistencia de cortocircuito y la reactancia de cortocircuito, respectivamente.

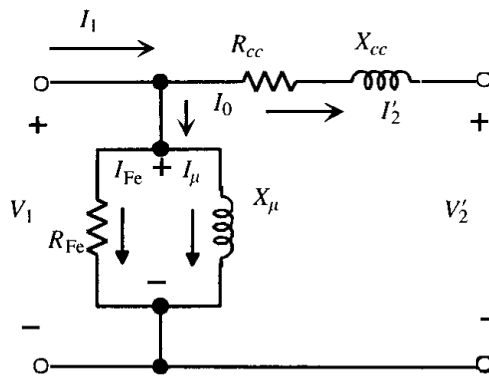


Ilustración 4. Circuito equivalente aproximado de un transformador eléctrico que es reducido a la bobina primaria - Fuente: [24]

No obstante, se deberá llevar a cabo distintas pruebas para obtener los parámetros de circuito equivalente con el fin de validar el comportamiento de dicho transformador.

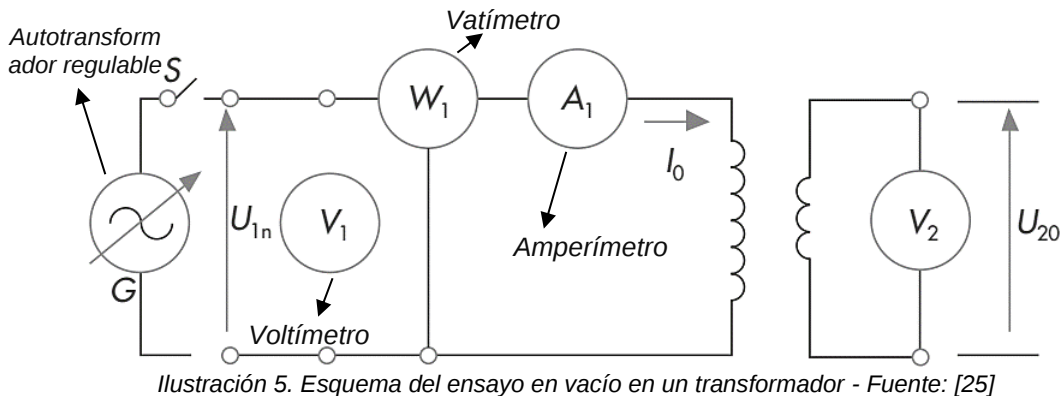
4.1.2. Ensayos en Transformadores

Las pruebas por ejecutar en un transformador corresponden a determinados ensayos que requieren poca energía y que a partir de los cuales se pueden obtener los elementos que conforman el circuito equivalente aproximado. Estos son los *ensayos a cortocircuito y de vacío* [24], [25].

4.1.2.1. Ensayo en Vacío

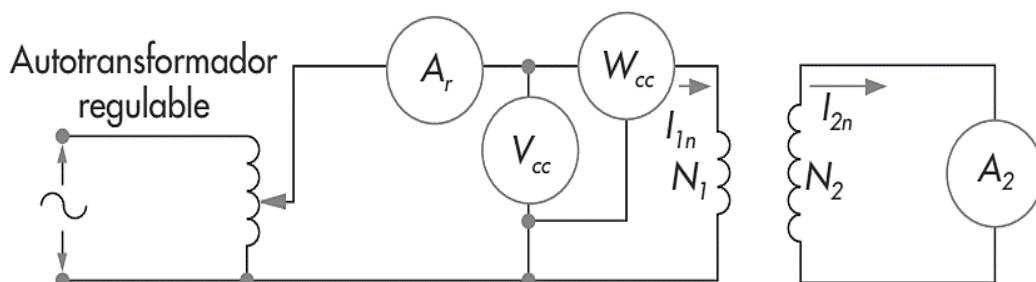
Consiste en determinar las pérdidas de potencia en el hierro al suministrarse un voltaje en la bobina primaria con un autotransformador regulable, mientras se registra la potencia absorbida o pérdidas con un vatímetro y la intensidad de vacío en dicha bobina empleando un amperímetro. Para lo anterior será necesario dejar abierta la bobina secundaria. Una esquematización básica de este tipo de ensayos es la que se observa en la Ilustración 5. A partir de las mediciones realizadas se podrá estimar la relación de

transformación, la impedancia, la potencia aparente en vacío y el factor de potencia de vacío.



4.1.2.2. Ensayo en cortocircuito

Este tipo de ensayos se hace para evaluar las pérdidas producidas en los conductores de los devanados (pérdidas en el cobre) mientras se someten a una intensidad. Lo que se hace es aplicar una tensión en el primario, con un autotransformador regulable, que se irá aumentando de manera gradual hasta alcanzar la corriente de plena carga en ambos devanados, luego de que se ha cortocircuitado el secundario con un amperímetro cuya resistencia es aproximadamente nula. Es decir, con este ensayo se consiguen las corrientes nominales en ambos devanados. La tensión con la que se ha alcanzado la corriente nominal en el secundario se le conoce como tensión de cortocircuito, un valor bajo con respecto al voltaje nominal que es aplicado a un transformador eléctrico en carga: aproximadamente entre un 3 y un 10% del valor nominal. Adicionalmente, es importante reconocer que en este ensayo se puede determinar la impedancia total de la máquina y que la corriente de cortocircuito depende de las resistencias de los devanados y las inductancias de dispersión que se dan en estos, así como el factor de potencia. En la Ilustración 6 se aprecia el esquema eléctrico de un ensayo a cortocircuito en un transformador.



Por último, la potencia que es absorbida en cortocircuito coincide con las pérdidas en los devanados por efecto Joule, pero las pérdidas en cortocircuito no necesariamente deberán hacer referencia a las pérdidas nominales o a plena carga, sino que dependerán del régimen de carga atribuible a la corriente de cortocircuito a la que se haya realizado el ensayo; además, la tensión de cortocircuito será proporcional a dicha intensidad. El índice de carga C , definido como el cociente entre la corriente secundaria del transformador y la nominal, puede estimarse con la siguiente expresión [24]:

$$C = \frac{I_2}{I_{2n}} \approx \frac{I_1}{I_{1n}} \quad (3)$$

Donde I_i e I_{in} son, en amperios [A], la corriente de cortocircuito (a la que se realiza el ensayo, es decir, la que circula en el devanado en cuestión) y la corriente nominal en la bobina i .

4.1.3. Pérdidas Durante la Transformación

Como se ha mencionado en apartados anteriores en un transformador se dan pérdidas en el cobre y en el núcleo. Las que se dan en los devanados son pérdidas variables ya que cambian según el índice de carga y dependen del índice de carga (ecuación 3), y las que se dan en el hierro son fijas. Las pérdidas en el núcleo magnético (P_{Fe}) son iguales a la potencia absorbida en vacío (P_0). Y las pérdidas en los devanados (P_w) corresponden a la potencia activa que es disipada en dichos arrollamientos, es decir, la potencia de cortocircuito con corriente nominal.

Describiendo las pérdidas en el núcleo, estas se pueden dar por [25]: histéresis, fenómeno que hace referencia a las pérdidas de energía en forma de calor por el magnetizado y desmagnetizado del material ferromagnético (núcleo); y por corrientes de Foucault (también conocidas como Corrientes de Eddy), las cuales se dan en cualquier material conductor cuando se encuentra sometido a una variación de flujo magnético, de allí a que el núcleo de un transformador no sea macizo, pues lo que se busca es que, al no poder la corriente circular entre las chapas (las que conforman el núcleo) sino de manera independiente en cada una, se induzca menos corriente y con ello disminuya las pérdidas de este tipo. Para estimar las pérdidas por histéresis (P_h), por corrientes de Foucault (P_f) y totales en núcleo (P_{Fe}) se emplea a la ecuación 4, 5 y 6, respectivamente [25]:

$$P_h = k_H \cdot f \cdot \beta_{max,T}^n \quad (4)$$

$$P_f = \frac{2,2 \cdot f^2 \cdot \beta_{max,G}^2 \cdot e^2}{10^{11}} \quad (5)$$

$$P_{Fe} = P_h + P_f \quad (6)$$

Donde k_h es el coeficiente del material (suele estar entre 0.001 y 0.3); f es la frecuencia [Hz]; $\beta_{max,T}$ es la inducción máxima en Teslas; n es el exponente de Steinmetz y es 1.6 para $\beta_{max,T} < 1$ Tesla (10^4 Gauss) o 2 para $\beta_{max,T} > 1$ Tesla; $\beta_{max,G}$ es la inducción máxima en Gauss; e es el espesor de la chapa magnética [mm]. Con el anterior planteamiento las pérdidas totales en el núcleo se expresan en W/kg.

Ahora bien, en cuanto a las pérdidas en el cobre, éstas dependen de la intensidad de carga (de cortocircuito) al cuadrado y la resistencia del devanado i . Para evaluar las pérdidas en el cobre es importante que se tenga en cuenta el asilamiento que habrá entre los devanados, que en transformadores de baja potencia consiste en los hilos de cobre esmaltados y en los de gran potencia se emplean pletinas rectangulares encintadas en papel impregnado de aceite. La pérdida total en los devanados se cuantifica con la siguiente ecuación:

$$P_w = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 \quad (7)$$

Donde I_1 y R_1 , e I_2 y R_2 , son la intensidad [A] y resistencia [Ω] de la bobina primaria, y la intensidad [A] y resistencia [Ω] de la bobina secundaria, respectivamente. Es importante resaltar que cuando el transformador se ensaya en vacío, la potencia que se registra en

el transformador en el circuito abierto es la sumatoria de las pérdidas en el núcleo y en el cobre de los devanados.

4.1.4. Influencia del Envejecimiento en el Rendimiento del Equipo

El contenido de humedad es uno de los factores que más puede afectar cualquier sistema de aislamiento. Parte de dicho sistema de aislamiento del transformador es el papel de celulosa, el cual está conformado por hidrocarburos, que puede degradarse por el proceso de pirólisis, hidrólisis y oxidación, obteniéndose de dicha desintegración CO_2 , CO , ácidos orgánicos, agua e incluso furanos. Es así como el grado de polimerización del papel envejecido es un parámetro empleado para determinar el resto de vida útil del transformador [8].

4.1.5. Sistema de Refrigeración de los Transformadores

A la hora de evaluar la capacidad de refrigeración de un transformador, las propiedades termo-físicas del fluido dieléctrico que se tienen en cuenta para evaluar la transferencia de calor son: la densidad, la viscosidad cinemática, la conductividad térmica, el calor específico y el coeficiente de expansión térmica [4], [7]. Estas propiedades y su importancia en la dinámica de fluidos y transferencia de calor serán abordadas en apartados posteriores. Por otra parte, en el mismo trabajo, M. Daghray *et al.* resalta que el rendimiento de refrigeración en este tipo de máquinas está enmarcado por dos factores de refrigeración: uno local, que es el coeficiente de transferencia de calor; y otro global, que es la distribución de temperatura en el bobinado del transformador.

El calor generado por las pérdidas ocurridas durante la transformación debe ser transferido al ambiente para garantizar el buen funcionamiento de la máquina y no influir en el aumento de temperatura del aislamiento y por lo tanto en su envejecimiento. En este sentido, las temperaturas más altas se dan en los devanados de un transformador son las conocidas como puntos calientes; los cuales se traducen en la reducción de la capacidad de refrigeración del equipo debido al flujo insuficiente de aceite dieléctrico en algunas zonas del tanque del transformador [9]. Por consiguiente, en los últimos años, el hablar del enfriamiento de los transformadores eléctricos es referirse especialmente a las investigaciones que se concentran en la capacidad de refrigeración de diferentes líquidos que puedan ser empleados para tal fin, si bien desde hace décadas se ha empleado los aceites minerales, se han estudiado otros tipos de fluidos. Para el caso particular de climas fríos, M. Daghray *et al.* hace referencia a que los transformadores enfriados con aceites naturales son más apropiados condiciones medio ambientales de bajas temperaturas.

En el trabajo de Madsen *et al.* se menciona la designación de cuatro letras que se tiene en cuenta para identificar los métodos de refrigeración de los transformadores [9]:

- 1^{ra} letra, Medio interno → O: Fluido con un punto de inflamación $\leq 300^\circ\text{C}$.
K: Fluido con un punto de inflamación $\geq 300^\circ\text{C}$.
L: Fluido sin punto de inflamación medible.
- 2^{da} letra, Mecanismo interno → N: Convección natural a través del equipo de refrigeración y los devanados.
F: Circulación forzada a través del equipo, convección natural en los devanados.

D: Circulación forzada a través del equipo de refrigeración, flujo dirigido en los devanados.

- 3^{ra} letra, Medio externo → A: Aire.
W: Agua.
- 4^{ta} letra, Mecanismo externo → N: Convección natural.
F: Circulación forzada.

En la Ilustración 7 se observa un tipo de enfriamiento ODAF, donde hay una serie de radiadores conectados controlados con soporte superior y/o inferior a los devanados, de tal manera que se está forzando el aceite a fluir por los canales de los devanados. Mientras el aceite fluye continuamente por los radiadores, la operación permanente de los ventiladores transfiere el calor del fluido al exterior.

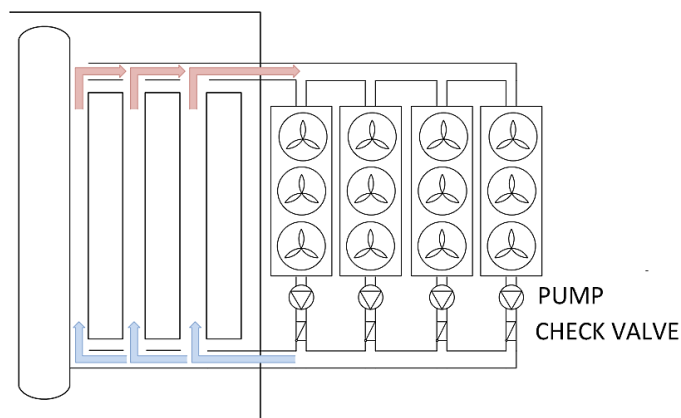


Ilustración 7. Enfriamiento ODAF de un transformador - Fuente: [9]

Para el caso puntual del enfriamiento por convección natural, tal como es abordado por X. Zhang *et al.* [22], el flujo del fluido y la transferencia de calor están adjuntos al término de fuerza flotante en la formulación matemática de conservación del momento, para cuyo análisis se emplea el parámetro adimensional de Richardson [Ri] (ver la ecuación 8). Si Ri es próximo o superior a 1, el enfriamiento se considera en el régimen de convección natural, y en caso contrario en convección forzada.

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad (8)$$

Donde Gr y Re son los números de Grashof y Reynolds, respectivamente. Ambos parámetros serán abordados en apartados posteriores. Adicionalmente, cuando actúa únicamente la convección natural entre el fluido dieléctrico y los componentes sólidos del transformador (entre estos los devanados y núcleo), es decir, el movimiento del fluido se da por las fuerzas de flotabilidad en distintos rangos de temperatura, la transferencia de calor se da del interior a las paredes externas del tanque contenedor. A bajas temperaturas, por ejemplo, como lo primero que se enfría es la capa de aceite que está en contacto con las caras internas del tanque, el fluido se va tornando más viscoso, evitando que este fluya y que el calor del interior sea transferido al exterior.

En el caso de ambientes a bajas temperaturas, como es mencionado en el trabajo de [9], si el transformador se mantiene desenergizado por largos períodos de tiempo a temperaturas inferiores a -25°C, el aumento de la viscosidad impide el flujo correcto del aceite dieléctrico, y si se somete inmediatamente a carga, se crearan las condiciones

propicias para que se generen los puntos calientes en la máquina. Es por ello que la IEEE sugiere un aumento progresivo de la potencia con intervalos de tiempo.

Considerando que, por una parte, en la guía de recomendaciones para el arranque en frío de transformadores que han sido llenados con el fluido dieléctrico FR3 [23] se resalta que, de acuerdo a los datos evaluados por el fabricante, las temperaturas ambiente diarias más bajas a las que está siendo expuesto el transformador no representa verdaderamente la distribución de temperatura de este (durante el día hay variaciones de temperatura), por lo que resulta más razonable considerar una temperatura ambiente promedio (con base a los registros de las estaciones meteorológicas), teniendo en cuenta que son pocos los transformadores que están sometidos a temperaturas ambiente diarias promedio $\leq 20^{\circ}\text{C}$, para el presente trabajo, y limitado por la instalación del laboratorio, se ha mantenido una temperatura ambiente de ensayo comprendida en el rango de 3 a 5°C .

4.1.5.1. Funcionamiento a bajas temperaturas

La necesidad de estudiar el arranque en frío de los transformadores y su operación a temperaturas ambiente muy bajas radica en que algunos de los fluidos que son empleados como aceites dieléctricos tienen alta viscosidad, cercana a sus puntos de fluencia, lo que sin duda dificulta el flujo de dicho fluido, que a su vez resulta en una menor tasa de transferencia de calor y en un aumento en las temperaturas internas de la máquina [17], [26].

Aun cuando, por ejemplo, en países como EE. UU. no se experimentan temperaturas diaria promedio extremas, y donde menos del 0.1% de los transformadores eléctricos que están instalados experimentan temperaturas diarias promedio de -25°C por más de 3 días, como lo es por ejemplo Alaska [23], o aunque es especialmente en zonas de la región ártica donde se dan temperaturas entre los -40°C y -50°C (de gran cuidado sobre todo en fluidos dieléctricos de tipo éster) [17], el estudio de la tasa de enfriamiento de los transformadores eléctricos de potencia a bajas temperaturas es de gran importancia considerando lo ya expuesto en apartados anteriores.

Desde hace décadas, tal como fue expuesto en el trabajo de [11], para la disposición de equipos de subestaciones eléctricas, tales como los transformadores eléctricos, la dependencia de la temperatura era por la resistencia dieléctrica y mecánica, además de, en mayor proporción, la viscosidad del refrigerante, viscosidad de los lubricantes, resistencia dieléctrica del aislamiento, entre otros detalles.

En lo que respecta al arranque en frío de los transformadores, tal como resalta el apartado 3.8.3. de la normativa IEEE C57.93-20073, el mismo que ha sido citado en [23], en los transformadores eléctricos que están sumergidos en aceite mineral y cuyo arranque debe darse a temperaturas que están por debajo de los -20°C es recomendable que el equipo sea energizado, mantenerlo sin carga por 8 horas e ir incrementando la carga en un 10 a 25%, con a lo sumo 30 minutos entre cada incremento. Tal como resalta el fabricante de fluido FR3 en su informe, la necesidad de aplicar dicho procedimiento radica en que transformadores con aceite mineral está presente el riesgo de que se presente baja rigidez eléctrica a bajas temperaturas a causa del agua que pueda estar condensada en el aceite. Es así como en los casos en los que el aumento de la viscosidad en el fluido dieléctrico por las bajas temperaturas ambiente obliga a que haya un precalentamiento de dicho aceite y que no se accione ningún equipo móvil, si los hubiese, hasta no haber culminado con dicho procedimiento.

4.2. FLUIDOS DIELECTRICOS

Los líquidos sobre los que se sumergen los transformadores cumplen una doble funcionalidad [21]: por un lado, sirve de dieléctrico para aislar las partes en tensión de la máquina, y por otro, sirve como medio refrigerante para evacuar hacia el ambiente el calor generado en su interior. El enfriamiento a partir del fluido dieléctrico se puede dar por convección natural al circular el fluido entre los devanados y el radiador o por convección forzada haciendo circular el líquido dieléctrico a partir del uso de bombas.

Tal como ha enfatizado Zdanowski [27], además de la tensión de ruptura, dos de las propiedades más importantes de un fluido dieléctrico son: la densidad (en el diseño para estimar el peso del transformador y el volumen del vaso de expansión); y la viscosidad (para evaluar su eficacia de enfriamiento del transformador, puesto que fluidos dieléctricos con viscosidades más bajas son más efectivos en transmitir el calor del transformador hacia el ambiente). Además de que, por otro lado, al verse influenciada la conductividad y viscosidad de dichos fluidos por la temperatura, se ven afectadas otras propiedades de estos fluidos. Precisamente en el trabajo desarrollado por el autor se resalta como un aumento de aceite mineral (*Fresh Trafo EN*) en la mezcla con el éster sintético (*Nycodiel 1255*) ocasiona una caída lineal de la densidad y una caída no lineal en la viscosidad cinemática, como se puede apreciar en la Ilustración 8.

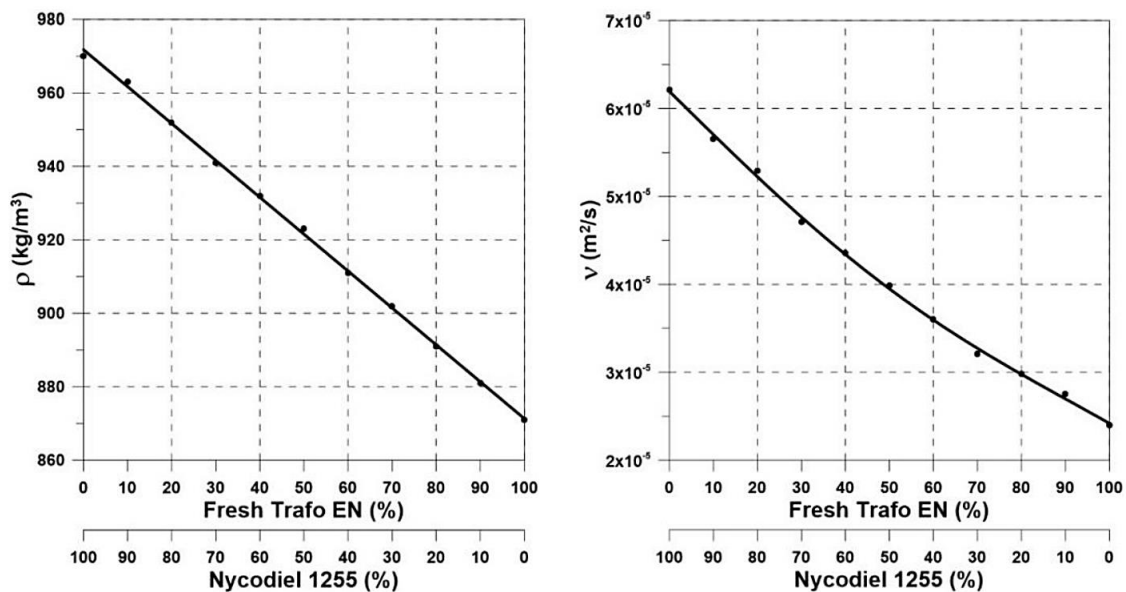


Ilustración 8. Variación de densidad y viscosidad de una mezcla aceite mineral-éster sintético conforme se varía la proporción de aceite mineral y éster sintético de dicha mezcla - Fuente: [27]

Al considerar el comportamiento del fluido dieléctrico del transformador en un arranque en frío, además de evaluar la capacidad de refrigeración del transformador estando en estas condiciones iniciales el fluido (viscosidad muy elevada), es de gran relevancia verificar la capacidad dieléctrica global de dicho fluido, considerando que fluidos como los aceites minerales, sometidos a temperaturas muy bajas, pueden encogerse, agrietarse y crear vacíos cuando tienen temperaturas inferiores a la de su punto de fluencia, llegando a desencadenar en una falla dieléctrica del sistema [23].

De manera general, los fluidos dieléctricos se suelen clasificar en [5]:

- Componentes orgánicos: aceites naturales o de origen agrícola, como lo pueden ser el aceite de soja, coco, entre otros, todos provenientes de semillas o flores. Habitualmente se les conoce como ésteres naturales.
- Componentes inorgánicos o sintéticos: se obtienen químicamente, tales como el aceite mineral, aceites siliconados, ésteres sintéticos, nano fluidos, y fluidos aislantes mixtos.

Aunque en los siguientes subtítulos será descrito cada uno de los tres fluidos dieléctricos empleados en el presente trabajo, en la Tabla 1 se condensan, a modo comparativo, las propiedades de estos mismos fluidos.

Tabla 1. Comparativo entre las propiedades del aceite mineral, el éster natural y el éster sintético - Fuente: a partir de [5]

Propiedad	Aceite mineral	Éster natural	Éster sintético
Fuente	Petróleo	Natural y sintetizado	Síntesis química y natural
Tipo	Hidrocarburos	Ácidos grasos	Ácidos y alcohol
Naturaleza del líquido	Nafteno/parafínico	Éster	Diéster, éster, etc.
Disponibilidad	Crisis en el futuro	Abundante	Abundante
Costo	En aumento	Alto	Alto
Tensión de interfase [mN/m] – ASTM D971	40 a 45	36	35 a 39
Acidez [mgK OH/g]	0.01	0.02	0.06 a 0.2
Color – ASTM D974	Transparente	Amarillo pálido	Transparente / verde pálido
Densidad [kg/m ³] – a 20°C ASTM D1298	0.83 a 0.89	0.87 a 0.92	0.9 a 1
Viscosidad (cSt) – a 40°C ASTM D445	3 a 16	16 a 50	14 a 29
Punto de fluencia [°C] – ASTM D97	-30 a -63	-10 a -33	-40 a -60
Punto de ignición [°C] – ASTM D92	110 a 175	310 a 343	250 a 310
Punto de inflamabilidad [°C] – ASTM D92	110 a 185	300 a 369	300 a 322
Conductividad térmica [W/m.K] – a 20°C ASTM 2717	0.135	0.17	0.165
Calor específico [kJ/kg.K] – a 25°C ASTM D2766	1.63 a 2	1.5 a 2.38	1.8 a 2.3
Coefficiente de expansión térmica [°C] – ASTM D1903	7x10 ⁻⁴ a 9x10 ⁻⁴	5.5x10 ⁻⁴ a 7x10 ⁻⁴	6.5x10 ⁻⁴ a 10x10 ⁻⁴
Tendencia a la gasificación [µl/min] – ASTM D2300	-10 a 24	-22 a -80.5	10 a 30
Absorción [Abs] – ASTM D6802	0.022113	0.02973	0.09674
Resistividad [Ω-m] – ASTM D1169	10 ¹³	10 ¹³ a 10 ¹⁴	10 ¹³
Tensión de ruptura [kV] – ASTM D1816	45 a 55	80 a 85	75 a 80
Constante dieléctrica – IEC 60247	2.4 a 25°C / 2.4 a 90°C	3.3 a 25°C / 2.8 a 90°C	3-3.5 a 25°C / 2.8-3 a 90°C
Factor de disipación [%] – ASTM D924	0.02 a 25°C / 0.09 a 90°C	0.08 a 25°C / 0.64 a 90°C	0.0006 a 0.001 a 25°C / 10 ⁻⁴ a 0.03 a 90°C

4.2.1. Aceite Mineral

Estos son aceites a base de petróleo, y aunque desde los puntos de vista de la seguridad y el medio ambiente no sean muy llamativos, desde un enfoque más funcional son

fluidos de los que se puede esperar un buen funcionamiento y buena fluidez [12]. Teniendo en cuenta lo anterior y las especificaciones generales de un aceite mineral vistas en la Tabla 1, es de resaltar que este tipo de fluidos son más inflamables con respecto a los ésteres, tienen baja biodegradabilidad, cuentan con poca saturación de humedad (especialmente a bajas temperaturas), y está expuesto a un nivel de oxidación que puede desencadenar en la formación de lodos y con esto en la degradación del sistema de aislamiento.

4.2.2. Éster Natural

En general, los ésteres naturales son fluidos biodegradables. En el trabajo de S. P. Moore *et. al.* [6] exponen las propiedades más relevantes a la hora de considerar un éster natural como fluido dieléctrico en un transformador. Este tipo de aceites se encuentran hechos de aceites vegetales, los cuales son una combinación de diferentes componentes de triglicéridos, cada uno con propiedades físicas diferentes, como lo son la temperatura de fusión y cristalización (congelación). Tanto la gelificación, congelación, cristalización y fusión ocurren por un largo tiempo y en distintos intervalos de temperaturas. Por lo que concierne al aumento de cristales, esto ocasiona lentamente un incremento de la viscosidad del aceite, redes de cristales que a medida que crecen terminan impidiendo el flujo hasta que se alcanza el punto de fluidez de dicho fluido. La que ocasiona un aumento en la viscosidad es que este tipo de fluidos están conformados por moléculas de alto peso molecular, de allí que se sugiera en algunas ocasiones que el éster natural a emplear en el transformador tenga cierto nivel de aditivos para mejorar su fluidez en frío [12].

Aunque puede ser preocupante el nivel de oxidación de este tipo de fluidos, los ésteres naturales han demostrado que cuentan con una tensión de ruptura elevada y buenas propiedades dieléctricas [5]. Es por eso por lo que, sumado a su renovabilidad, biodegradabilidad, disponibilidad y seguridad, están despertando el interés de la industria para ser empleados en transformadores sellados.

4.2.3. Éster Sintético

Son vistos como sustitutos químicos de aquellos aceites provenientes de los hidrocarburos [5]. Para el caso del enfriamiento del transformador con los modos de líquido dirigido, el éster sintético ha demostrado que, de acuerdo con trabajos como el de [4], ofrece más resistencia a que se presente el fenómeno de flujos inversos, ocasionando una distribución más uniforme del flujo del fluido, pero ocasionando caídas de presión en los devanados de transformadores tipos disco. Además de eso, y así como los ésteres naturales, los ésteres sintéticos se ven como una buena alternativa de fluido dieléctrico en los transformadores debido a su alto punto de ignición y sus propiedades medioambientales [13].

4.3. FLUJO DE FLUIDOS

Para describir el flujo de los fluidos se suele emplear la descripción euleriana, la cual consiste en la definición de volumen finito (volumen de control) por el que fluye el fluido hacia un lado u otro, y en el que se definen variables de campo (funciones del espacio y tiempo) para evaluar la velocidad y posición de las partículas del fluido. Para un fluido tridimensional (en coordenadas cartesianas) y que no sea estacionario, se considera el campo de presión (variable escalar) $P=P(x, y, z, t)$; el campo de velocidad (variable

vectorial) $\vec{V}=\vec{V}(x, y, z, t)$ y el campo de aceleración (variable vectorial) $\vec{a}=\vec{a}(x, y, z, t)$. Al final, con esta descripción euleriana, más que centrarse en el comportamiento individual de las del fluido, se focaliza en la presión, velocidad, aceleración, posición, de cualquier partícula del fluido en determinado instante de tiempo y determinada ubicación. Por lo tanto, en la dinámica de fluidos, resulta más conveniente la aplicación de la descripción euleriana que la lagrangiana, sin contar que en la experimentación se suele aproximar más a la euleriana [28].

En la mecánica de fluidos es habitual que se traten las ecuaciones (de balance) que rigen a tres de las principales leyes de conservación: *ley de la conservación de la masa*, *ley de la cantidad de movimiento* y la *ley de la conservación de la energía*.

En el estudio del flujo de fluidos, la relación de la conservación se la masa definida para un volumen de control diferencial se suele llamar ecuación de continuidad y su formulación general es la siguiente (en coordenadas cartesianas):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot v_z)}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

Donde ρ , t y v_x , v_y y v_z , son la densidad, el tiempo y la componente velocidad en la dirección x , y , z , respectivamente. ∇ es el vector operador: $\{\partial/\partial x + \partial/\partial y + \partial/\partial z\}$. La ecuación 9 es la forma general de la ecuación de continuidad y valida incluso para flujos compresibles, y en cualquier punto en el dominio del fluido. Por otra parte, la tasa de flujo másico es igual al producto de la densidad, velocidad promedio y área de la sección transversal perpendicular al flujo.

La cantidad de movimiento resulta ser el producto de la masa y velocidad de un cuerpo, y en la mecánica de fluidos es abordado por la ecuación de momento (segunda ley de Newton). De acuerdo con la segunda ley de Newton, el producto de la masa y velocidad de un cuerpo es lo que se llama momento lineal o cantidad de movimiento de ese cuerpo. Por lo tanto, una expresión adecuada para la segunda ley de Newton, y aplicable a la mecánica de fluidos cuando se están estudiando las fuerzas generadas a causa de los cambios de velocidad de los flujos de fluidos, es como la razón de cambio de la cantidad de movimiento de un volumen de control es igual a la fuerza neta que actúa sobre él; esto es lo que se conoce como el principio de conservación de la cantidad de movimiento. Las fuerzas que pueden actuar sobre dicho volumen de control son: fuerzas de cuerpo (fuerzas de gravedad, eléctricas y magnéticas, y son proporcionales al volumen del cuerpo) y fuerzas superficiales (como las fuerzas por presión hidrostática y las fuerzas por los efectos viscosos, y son proporcionales al área superficial).

Por otro lado, la ley de la conservación de la energía establece que la energía neta transferida o extraída a un sistema durante determinado proceso, sea igual al cambio de la energía contenida por el sistema evaluado. El principio de la conservación de la energía, también conocido como Primera Ley de La termodinámica, proporciona las bases para el estudio de las relaciones entre las diferentes formas de energía y de sus interacciones, y establece que la energía ni se crea ni se destruye, solo cambia de forma. Por lo tanto, el cambio de energía de un sistema será igual a la diferencia de la energía que sale y entre de este; ahora bien, si se está consideran un sistema cerrado, el contenido de energía de esa cantidad de masa fija (no hay entrada ni salida de un flujo másico por las fronteras del sistema) puede cambiar a través de dos mecanismos: la transferencia de calor $[Q]$ y la transferencia de trabajo $[W]$ [28].

Para el caso de un flujo estacionario, el cambio de energía por unidad de tiempo de un volumen de control es cero (permanece constante), es decir, la transferencia de energía

neta a un volumen de control por transferencia de calor o trabajo es igual a la diferencia entre las razones de los flujos entrantes y salientes con la masa, y puede describirse con la siguiente ecuación [29]:

$$Q_{net} + W_{net} = \sum \dot{m}_{int} \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right) + \sum \dot{m}_{out} \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) \quad (10)$$

Donde Q_{net} , W_{net} , $\dot{m}$, h_i , $V_i^2/2$ y gz_i son la transferencia neta de calor al fluido, entrada neta de trabajo al fluido, flujo másico, entalpía, energía cinética y la energía potencial del fluido. Si se tratara de un flujo estacionario e incompresible en presencia de aparatos mecánicos, sin disipación de energía mecánica en forma de energía térmica y considerando las pérdidas, la ecuación de la energía puede describirse como un balance de *energía mecánica* (en términos de cargas) con la ecuación 11:

$$\frac{P_1}{\rho_1 g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + w_{bomba} = \frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{turbina} + h_L \quad (11)$$

Donde $P_i/\rho_i g$, $V_i^2/2g$, z_i , w_{bomba} , $h_{turbina}$ y h_L son la energía de flujo, energía cinética del fluido, la energía potencia del fluido, la entrada de trabajo mecánico, la salida de trabajo, y la pérdida irreversible de la carga; todos por unidad de masa. En cuanto a i , hace referencia a la entrada/posición 1 y la salida/posición 2, sobre la misma línea de corriente. Si se tratara de un flujo incompresible sin aparatos de trabajo mecánico (sin dispositivos de trabajo como turbinas, bombas, ventiladores, etc.) y con fricción despreciable, se eliminan los términos de w_{bomba} , $h_{turbina}$ y h_L de la ecuación 11.

Si se limitara el análisis de energía a un fluido en movimiento, la energía cinética y potencial y cinética suele ser despreciable en comparación con la entalpía, es por ello por lo que de la ecuación 10 se podrían eliminar los términos que representan estos tipos de energía. Teniendo en cuenta esta última consideración, la energía del fluido será igual a la entalpía y esta última igual al producto entre calor específico y temperatura, y sumado esto a que se aborda el problema como una transferencia de energía para un flujo másico del fluido que entra a un volumen de control, la *ecuación de la energía* para un flujo tridimensional estacionario de un fluido será la ecuación 12:

$$\rho c_p \left(v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (12)$$

En la anterior ecuación se expresa que la transferencia de calor por convección por el fluido hacia afuera del volumen de control es igual a la energía neta transferida hacia dicho volumen por la conducción de calor [29]. Pero esta misma ecuación es solo aplicable si las propiedades del fluido son constantes (densidad, calor específico, viscosidad y conductividad térmica) y si los esfuerzos cortantes son despreciables. En caso tal de que se consideraran los esfuerzos viscosos, sería necesario incluir el producto de la viscosidad dinámica del fluido y la función de disipación viscosa (Φ) al final del lado derecho de la ecuación L. La disipación viscosa toma importancia si se trata de flujos a alta velocidad, y principalmente cuando la viscosidad del fluido es elevada

4.3.1. Estudio diferencial del flujo

A la hora de analizar los flujos se lleva a cabo un análisis por volumen de control y otro de tipo diferencial: en el primero es útil para reconocer las características globales del flujo, por lo que no se puede obtener las propiedades que tiene el flujo en el interior de dicho dominio, como lo pueden ser la velocidad y la presión; mientras que con un análisis de tipo diferencial se puede establecer el movimiento que está llevando a cabo el fluido

en cualquier y cada uno de los puntos del campo de flujo (llamado también dominio de flujo). Es así como, cuando el tamaño de un volumen de control se reduce a un punto y cuando la cantidad de dichos volúmenes tiende al infinito, las ecuaciones diferenciales son simplificadas a un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales que son válidas en cualquier punto del flujo, y cuando se resuelven exponen la velocidad, presión, densidad, etc., en cualquier punto del flujo [28]. En la Ilustración 9 se observa un ejemplo de análisis diferencial del flujo de aire sobre una antena.

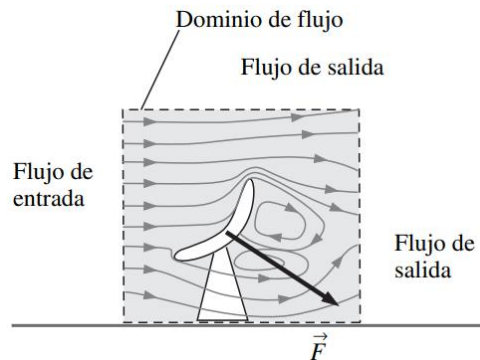


Ilustración 9. Ejemplo de un análisis diferencial de flujo de aire (en una antena) - Fuente:

Si se tratara de un flujo incompresible tridimensional donde los cambios de densidad y temperatura no son despreciables, se deberán resolver la ecuación de conservación de la masa (escalar) y tres de conservación de cantidad de movimiento (una para cada dirección), y las variables serán las componentes de velocidad y la presión. Como las ecuaciones estarán acopladas, alguna de dichas variables estará en todas las ecuaciones planteadas; por lo que será necesario para su solución que el sistema de ecuaciones sea solucionado simultáneamente y que se definan las condiciones de frontera del dominio del flujo.

Por otro lado, cuando se tiene el fluido en reposo, el esfuerzo que está actuando en cualquier superficie de cualquiera de los elementos de fluido es la presión hidrostática (o presión termodinámica, ver la Ilustración 10), que actúa hacia dentro y en dirección normal a la superficie, y se relaciona con la temperatura y densidad por medio de algún tipo de ecuación de estado (pero si se incluye la temperatura, como puede pasar en flujo compresible, se tiene que incluir otra ecuación en forma diferencial, y esa es la de la conservación de la energía). Pero cuando un fluido se mueve, aunque la presión sigue actuando hacia dentro normal, también pueden darse los esfuerzos viscosos, por lo que la formulación del tensor de esfuerzo de un fluido consideraría el tensor de esfuerzo viscoso o de esfuerzo desviatorio, además de la presión. Por lo tanto, al final la presión mecánica (o presión media) corresponde al esfuerzo medio que actúa hacia dentro sobre un elemento de fluido [28].

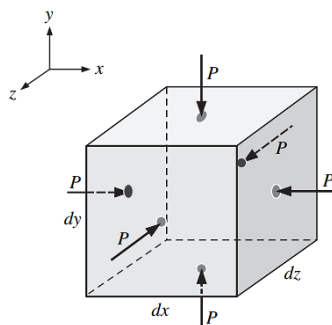


Ilustración 10. Presión hidrostática actuando sobre un fluido en reposo – Fuente: [28]

4.3.1.1. Deducción de la ecuación de Navier-Stokes: flujos isotérmicos e incompresibles

Asumiéndose el abordaje de solamente flujos incompresibles ($\rho=\text{constante}$) e isotérmicos (cambios de temperatura mínimos o inexistentes para no emplear una ecuación diferencial de ecuación de la energía), conlleva a que propiedades como la viscosidad dinámica y cinemática sean consideradas como constantes (fluido newtoniano incompresible). Al incluir ahora las componentes (ecuaciones) del tensor de esfuerzo viscoso en el tensor de esfuerzo, se obtienen las tres componentes (independientemente del sistema coordenado ortogonal) de la ecuación de cantidad de movimiento; y de combinarse estas tres ecuaciones en una ecuación vectorial (ecuación 13) se obtiene como resultado la ecuación de Navier-Stokes (*cantidad de movimiento*) para un flujo incompresible con *viscosidad constante* [28].

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -\vec{\nabla}P + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (13)$$

Donde $\vec{V}$, P , $\vec{g}$ y μ son el campo de velocidad representado vectorialmente, presión, gravedad y viscosidad dinámica, respectivamente. En caso tal de que se desee estimar un campo de presión a partir de un campo de velocidad conocido, se suele considerar por simplicidad un flujo incompresible. Como la presión no se incluye en la ecuación de continuidad para este tipo de fluidos se puede generar el campo de velocidad basado solamente en la conservación de la masa, pero como el termino velocidad también se incluye en la ecuación de Navier-Stokes, ambas ecuaciones son acopladas, además de que la presión aparece en las tres componentes de dicha ecuación. Por consiguiente, al final no resulta relevante la presión absoluta, sino las diferencias de presión, pues la presión en la ecuación 13 aparece como un gradiente, y, en consecuencia, el campo de velocidad de un flujo incompresible no se ve influenciado por la presión absoluta [28].

No obstante, para solucionar un flujo compresible, al estar acoplada la presión a la densidad y temperatura por medio de una ecuación de estado, la magnitud absoluta de la presión será importante y deberá considerarse la ecuación de conservación de masa, cantidad de movimiento, conservación de la energía y una ecuación de estado. En cuanto a las condiciones de frontera necesarias para la solución del sistema de ecuaciones, se suele tener en cuenta dos [28]: una condición de frontera de no deslizamiento (la velocidad del fluido en contacto con una pared será igual a la velocidad de dicha pared por la adherencia que ocurre de las partículas del fluido a tales paredes) y una de interfase (es cuando dos fluidos diferentes comparten una interfase, y además de que las velocidades de ambos fluidos deben ser iguales, los esfuerzos cortantes sobre las partículas adyacentes a la interface en la dirección paralela a la interface también podrían ser iguales entre ambos fluidos).

4.3.2. Aproximación de la Capa Límite

Hacia 1904 Ludwig Prandtl expuso la aproximación de la capa límite, la cual consiste en dividir el flujo en dos regiones: un flujo exterior que es invíscido (fuerzas viscosas son despreciables en comparación con las inerciales y/o de presión) y/o irrotacional (la vorticidad en el fluido es mínima, casi despreciable).; y una región de flujo interior conocida como *capa límite*, una región muy ‘delgada’ próxima a la pared en la que no se pueden despreciar ni los efectos viscosos ni la rotacionalidad. Ver la Ilustración 11.

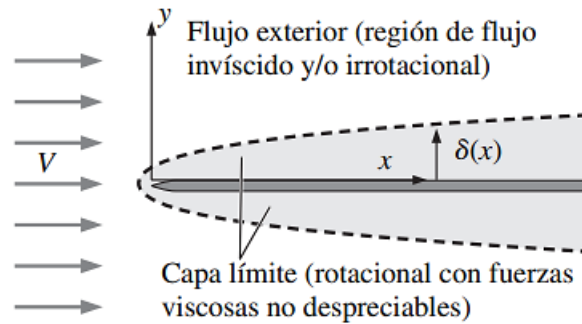


Ilustración 11. Diferenciación del flujo externo y de la capa límite - Fuente: [28]

Entre lo más representativo de la capa límite se encuentra que ajusta algunas de las deficiencias de la ecuación de Euler, pues refuerza lo concerniente a la condición de no-deslizamiento en paredes sólidas, por lo que pueden existir fuerzas viscosas cortantes a lo largo de paredes, los cuerpos sumergidos en un flujo libre pueden experimentar arrastre y puede predecirse con más precisión la separación de flujo en regiones de gradiente de presión adversa. Aun con lo descrito, es imperativo enfatizar que las soluciones de la capa límite son aproximaciones de la solución completa de la ecuación de Navier-Stokes [28].

En cuanto al espesor de la capa límite (δ), extrapolándolo al flujo sobre una placa plana de longitud x , suele definirse como la distancia de la pared a la cual la componente velocidad paralela a la pared es 99% de la velocidad del fluido afuera de la capa límite, por lo que a mayor velocidad (mayor número de Reynolds) del flujo libre más delgada será la capa límite. De manera análoga, una capa límite térmica se desarrolla cuando un fluido fluye a determinada temperatura sobre una superficie que se encuentra a una temperatura diferente. En este caso, las partículas de fluido en la capa adyacente a la superficie alcanzan el equilibrio térmico con la placa y tomarán la temperatura superficial de dicha placa; entonces, la capa límite hace referencia a la región del flujo sobre la que la variación de la temperatura en la dirección normal a la superficie es relevante [29]. En la Ilustración 12 se aprecia el desarrollo de la capa límite y la capa límite térmica.

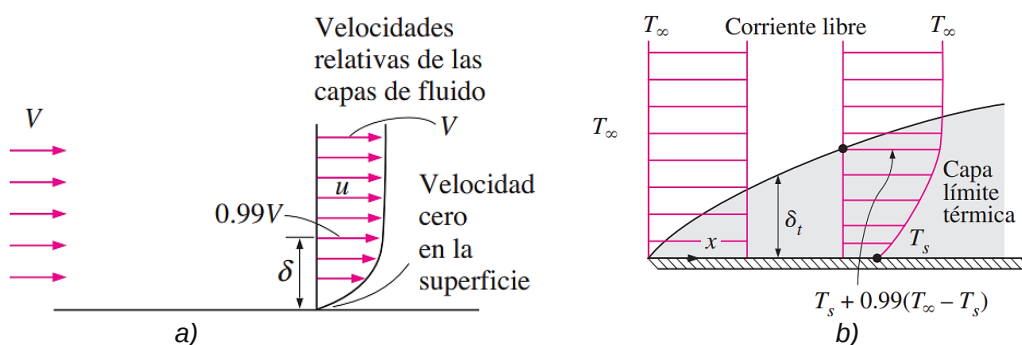


Ilustración 12. a) Desarrollo de la capa límite y b) capa límite térmica - Fuente: [29]

Para la descripción del espesor relativo de la capa límite de velocidad y térmica se emplea el parámetro adimensional conocido como número de Prandtl [Pr] (relación entre la difusividad molecular, y se define como sigue a continuación:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu c_p}{k} \quad (14)$$

Donde ν , α , C_p y k son la viscosidad cinemática del fluido ($\nu=\mu/\rho$), difusividad térmica, el calor específico y la conductividad térmica del fluido, respectivamente.

4.3.3. Flujo Laminar y Turbulento

El flujo laminar se caracteriza por tener líneas de corriente suaves y un movimiento muy ordenado; mientras que el turbulento, hace referencia a un flujo que presenta fluctuaciones en la velocidad y un movimiento desordenado. Ilustración 13. Para que el flujo pase de laminar a turbulento debe pasar por una zona de transición en la que fluctúa hasta convertirse totalmente turbulento. En la práctica, es decir, en una gran cantidad de estudios de ingeniería tienen mayor presencia los flujos de tipo turbulento, y los de tipo laminar son evidenciables en los fluidos que son muy viscosos, tales como los aceites, y especialmente cuando fluyen en tuberías o espacios muy estrechos [28].

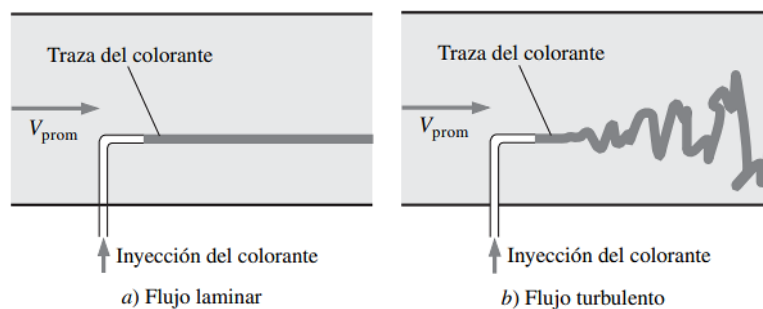


Ilustración 13. Comportamiento a) laminar y b) turbulento de un fluido – Fuente: [28]

Por otra parte, el flujo puede dividirse en dos regiones: la región de la capa límite, en la que los efectos viscosos (esfuerzos cortantes por la viscosidad del fluido) y cambios de velocidad son considerables; y la región de flujo irrotacional (después de la capa límite), donde los efectos por la fricción pueden ser despreciables y la velocidad permanece aproximadamente constante. Adicionalmente, la transición de flujo laminar a turbulento depende de: la configuración geométrica de la superficie, rugosidad de la superficie, velocidad del flujo, temperatura superficial y el tipo de fluido [29].

4.3.3.1. Número de Reynolds

Hacia 1880, Osborne Reynolds había descubierto que el régimen del flujo, es decir, que un fluido fuera laminar o turbulento dependía principalmente de la razón de las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas en el fluido; esta razón es conocida como número de Reynolds [Re] (una cantidad adimensional) y es descrita con la siguiente expresión:

$$Re = \frac{v \cdot L_c}{\nu} \quad (15)$$

Donde v y L_c son la velocidad promedio de la corriente libre y la longitud característica de la configuración geométrica. A números grandes de Reynolds (> 2.500), las fuerzas inerciales son grandes en comparación con las fuerzas viscosas, por lo que las fuerzas viscosas no pueden evitar las aleatorias y rápidas fluctuaciones del fluido, típico en flujo turbulento. Ahora bien, si se trata de un número de Reynolds pequeño (< 1.800), las fuerzas viscosas son lo suficientemente grandes como para evitar las fluctuaciones, habitual en flujo laminar [28]. Teniendo en cuenta las unidades de la viscosidad

cinemática (m^2/s), las mismas que la difusividad térmica, se puede reconocer como la difusividad para la cantidad de movimiento.

4.3.4. Flujo Compresible e Incompresible

Un flujo es incompresible si la densidad permanece constante a lo largo de dicho flujo, por lo que el volumen de cada porción de fluido no variara mientras se mueve. Para el caso de los líquidos las densidades son constantes, por lo que es típico que el flujo de éstos sea incompresible. Por lo que los líquidos se suelen tratar como sustancias incompresibles.

4.3.5. Flujo Viscoso y No Viscoso

La viscosidad ya ha venido mencionándose (y se seguirá tratando en los siguientes capítulos), pero en cuanto a su significado, hace referencia a la resistencia interna del fluido al movimiento. Lo que origina la viscosidad son las fuerzas de cohesión entre las moléculas, líquidos, y por colisiones moleculares en los gases. No existen fluidos con viscosidad cero. Cuando hay flujos en los que los efectos de fricción son significativos estos se conocen como flujos viscosos; pero también existen regiones del flujo (más alejadas de la superficie) en donde las fuerzas viscosas pueden ser despreciables en comparación con las fuerzas inerciales o de presión, y es lo que se conoce como un flujo no viscoso [29]. En la se pueden diferenciar gráficamente estos tipos de flujos.

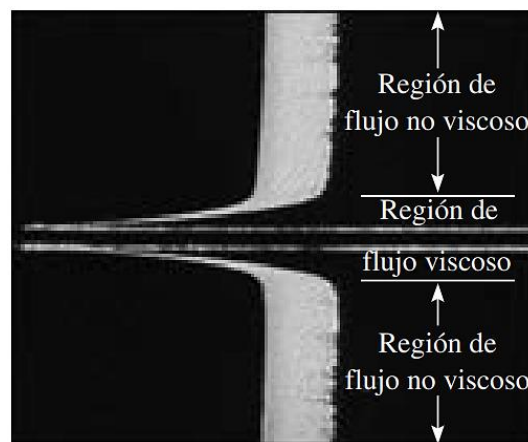


Ilustración 14. Regios de flujo viscosos y nos viscoso de un fluido sobre una placa plana - Fuente: [29]

4.4. TRANSFERENCIA DE CALOR

Tal como es abordado en el libro de Çengel *et al.* [28], es habitual que se haga referencia a la cantidad de energía en forma de calor que contiene un cuerpo, la cual se asocia como la forma sensible y latente de la energía interna en forma de calor, aunque el nombre correcto para dichas formas de calor sería el de energía térmica. Por otro lado, cuando se cuenta con una sustancia constituida por una sola fase, un cambio en la energía de térmica de masa se traduce en un cambio en la temperatura, de allí a que la temperatura sea una buena manera de representar dicha energía. Adicionalmente, la energía en forma de calor se puede transferir de un lado a otro por la diferencia de temperatura, y las razones de dichas transferencias es lo que se conoce como transferencia de calor [29]. Los métodos de transferencia de calor son tres: conducción,

convección y radiación. La transferencia de calor por radiación no será abordada teniendo en cuenta que no se consideraron los efectos de transferencia de calor por radiación en el sistema estudiado, no obstante, hace referencia a la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. Cualquiera de estos tres mecanismos de transferencia de calor se puede dar individualmente o dos o más de manera simultánea.

4.4.1. Conducción

La conducción hace referencia al flujo de energía de las partículas con más energía de una sustancia hacia las que tienen menor energía, y se puede dar en sólidos, líquidos o gases, por lo que al final la conducción es la colisión y difusión de las moléculas en sus movimientos aleatorios. La tasa de transferencia de calor por conducción dependerá de la geometría del medio, el espesor y el material del que este hecho, además de la diferencia de temperatura. Para el caso particular de una placa plana, la conducción de calor es proporcional a la diferencia de temperatura en está y al área de transferencia, e inversamente proporcional al espesor de dicha placa [29]. Ver la Ilustración 15.

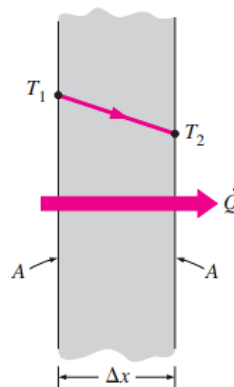


Ilustración 15. Conducción de calor a través de una placa plana de espesor Δx y área A – Fuente: [29]

Por otro parte, es importante mencionar que los problemas de transferencia de calor pueden ser del tipo estacionario (o estable, es decir, no hay cambio con el tiempo en cualquier punto del medio, por lo que la temperatura y el flujo de calor no se ven alterados) o transitorios (la temperatura varía con el tiempo y posición). En la práctica, los problemas de transferencia de calor suelen ser de tipo transitorio, aunque suelen aproximarse a estados estacionarios, ya que estos últimos son más fáciles de analizar y resolver. Tal es el caso del presente trabajo, en el que el planteamiento del problema y solución numérica es de tipo estacionario o estable.

Además, en cuanto a la dirección del flujo de calor, estos problemas suelen clasificar como unidireccionales, bidimensionales y tridimensionales, pero la representación general de la transferencia de calor a través de un medio es de tipo tridimensional: la variación de la temperatura ocurre a lo largo de los tres ejes, sea en coordenadas cartesianas, cilíndricas o esféricas. Para el presente trabajo, teniendo en cuenta que el modelo planteado ha sido en 2D, el problema de transferencia de calor evaluado es de tipo bidimensional.

Para expresar la transferencia de calor en un medio de manera unidireccional y de forma diferencial, se emplea la ecuación de la Ley de Fourier de la conducción de calor unidimensionalmente:

$$Q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (16)$$

Donde k , A y dT/dx es la conductividad térmica del material, que corresponde a la transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura, es decir, es una medida de la capacidad del material para conducir energía; el área perpendicular a la dirección de la transferencia de calor y el gradiente de temperatura, respectivamente. Como en ingeniería es habitual que los materiales sean de tipo isotrópico (tienen las mismas propiedades en todas las direcciones), no es necesario evaluar la variación de sus propiedades con la dirección [29].

Adicionalmente, cuando se tiene un proceso de conversión de energía (mecánica, eléctrica, nuclear o química) por el que se genera una transferencia de calor, en un estudio de conducción de calor dichos procesos son conocidos como generación de calor. Tal es el caso del presente estudio, donde se producen pérdidas de energía en forma de calor por el proceso de variación/transformación de la tensión en el transformador eléctrico.

Aunque en las aplicaciones de ingeniería se suele aproximar el problema de transferencia de calor de manera unidireccional, no siempre puede realizarse dicha aproximación y realmente se debe evaluar la transferencia de calor multidimensionalmente. Ilustración 16. Es así como la ecuación general de la conducción de calor en coordenadas cartesianas es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (17)$$

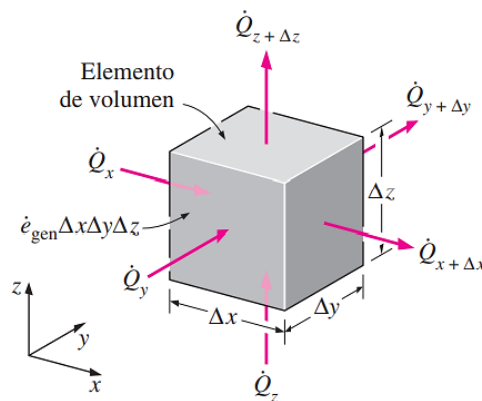


Ilustración 16. Conducción de calor tridimensional en un elemento cúbico - Fuente: [29]

Donde Q y $k/\rho c_p = 1/\alpha$ corresponde a la generación de calor (si la hubiese) y $1/\alpha$ es la difusividad térmica del material, respectivamente. La ecuación 17 también puede ser presentada en coordenadas cilíndricas y polares. En cualquiera de los casos, la ecuación diferencial planteada hará referencia al balance de energía que se haya realizado al diferencial en el interior del medio, pero sin incorporar las condiciones de las superficies, como lo puede ser la temperatura a la que se encuentra o el flujo de calor específico. Dichas condiciones son conocidas como *condiciones de frontera* y son

necesarias para la descripción completa de un problema de transferencia de calor, y a lo sumo se deben especificar dos condiciones de frontera para cada dirección del sistema de coordenadas a lo largo de la cual la transferencia de calor es significativa: por lo que al final se necesitarán dos para problemas unidimensionales, cuatro para los bidimensionales y seis para los tridimensionales. Además de las condiciones de frontera también se deben fijar las *condiciones iniciales*, es decir la distribución de temperatura inicial (en $t=0$) [29].

Las condiciones de frontera típicas en la mayoría de los problemas de transferencia de calor son: temperatura específica (la temperatura de una superficie se puede medir fácil y directamente), flujo específico de calor (transferencia de calor por unidad de área), convección (la que se ha tenido en cuenta para el presente estudio) y radiación. Además de estos, también puede darse dos casos de condición de frontera especial: frontera aislada, en el que la frontera se aísla de tal manera que se reduzca y se aproxime idealmente una eliminación del flujo de calor por allí; y frontera de simetría térmica, la cual consiste en definir que la transferencia de calor en un cuerpo (normalmente se asume una placa plana) con respecto a un plano central poseerá simetría térmica, es decir, el flujo de calor en cualquier punto será dirigido hacia la superficie más cercana a dicho punto y no habrá flujo de calor a través del plano central, por lo que dicho plano se podrá asumir como una superficie aislada. En la Ilustración 17 se aprecia gráficamente las condiciones de frontera típicas.

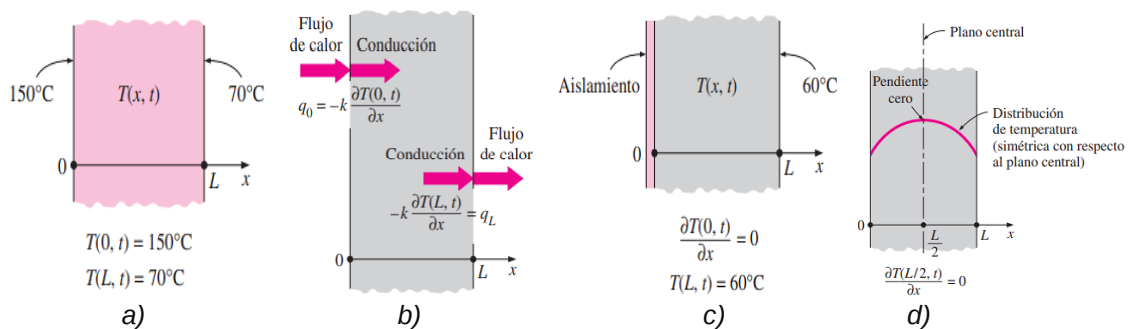


Ilustración 17. Condiciones de frontera típicas: a) temperatura específica, b) flujo específico de calor, c) frontera aislada y d) simetría térmica – Fuente: [29]

Adicionalmente, se encuentra la condición de frontera de convección (Ilustración 18), quizá de las más empleadas en la práctica, y es precisamente una de las empleadas en el presente trabajo. La razón por la que es la condición más común se debe a que casi todas las superficies de transferencia de calor están sometidas a un medio y temperatura específica, y se basa en el siguiente balance de energía superficial: Conducción de calor en la superficie en una dirección seleccionada = Convección de calor en la superficie en la misma dirección [29]. Por último, también se puede dar la condición de frontera por radiación, único mecanismo de transferencia de calor entre la superficie y alrededores cuando una superficie está rodeada por un espacio vacío y el balance de energía es: Conducción de calor en la superficie, en una dirección seleccionada = Intercambio de radiación en la superficie, en la misma dirección; y la condición de frontera en la interfase (un cuerpo formado por al menos dos materiales diferentes, y se basa en que los dos materiales estarán a la misma temperatura en el área de contacto y una interfase no puede almacenar energía, por lo que el flujo de calor sobre ambos lados de la interfase será el mismo) y condiciones de frontera generalizadas (es la combinación de las otras condiciones de frontera) [29].

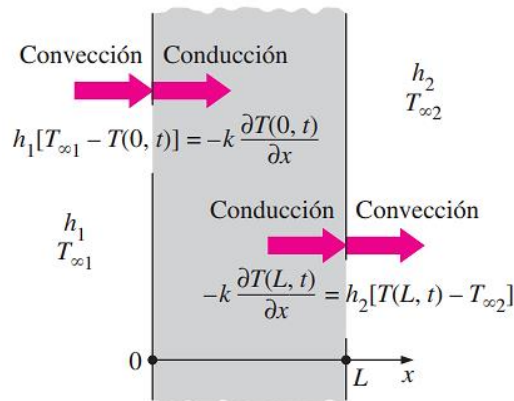


Ilustración 18. Ejemplo de condición de frontera de convección sobre ambas superficies de una placa plana - Fuente: [29]

Teniendo en cuenta lo complejo que puede ser una solución analítica (resolver las ecuaciones diferenciales) para los problemas de transferencia de calor, existen soluciones aproximadas para geometrías comunes como esferas, placas o esferas, empleando los coeficientes que ya se encuentran incluidos en tablas o gráficas.

4.4.1.1. Generación de calor en sólidos

Como aspecto general, en la transferencia de calor también suele ser de relevancia la conversión de alguna forma de energía en energía térmica en el medio. Los medios que comprenden este tipo de energía comprenden generación interna de calor, manifestándose como un aumento en la temperatura de todo el medio, tales como los son: calentamiento por resistencias, reacciones químicas exotérmicas y reacciones nucleares en las barras de combustible; por lo que a medida que aumenta la temperatura del medio, también está aumentando la transferencia de calor de este hacia los alrededores, y continua hasta que se ha alcanzado un estado estacionario. Tal generación de calor se suele expresar por unidad de volumen [W/m^3] y la temperatura máxima en un sólido que cuenta con una generación de calor constante se da en el lugar más alejado de la superficie exterior cuando es mantenida a una temperatura constante [29].

4.4.2. Convección

Es la transferencia de calor entre un sólido y un fluido adyacente que este movimiento, y abarca los efectos de conducción y de movimiento de fluidos. A mayor movimiento del fluido mayor será la tasa de transferencia de calor por convección; por lo que en caso de ausencia de movimiento del fluido la transferencia de calor será por conducción pura. Cuando el fluido se hace fluir sobre una superficie utilizando algún equipo mecánico como ventilador, bomba o viento, existe la convección forzada; en caso contrario, cuando el movimiento del fluido se da únicamente por las fuerzas de flotabilidad inducidas por las diferencias de densidad ocasionadas por las variaciones de temperatura. En la Ilustración 19 se observa la variación del perfil de velocidad y temperatura de un flujo de aire con el que se enfría por convección una placa caliente.

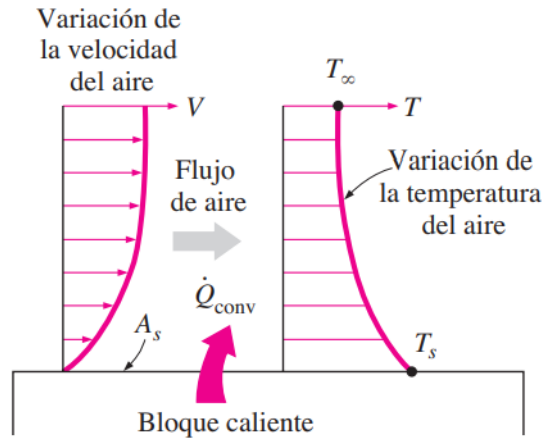


Ilustración 19. Perfil de velocidad y temperatura de un flujo de aire en la transferencia de calor por convección de una placa caliente a l aire - Fuente: [29]

Como se observa en la Ilustración 19, el fluido que está en contacto con el sólido tiene una velocidad de ≈ 0 (o a la velocidad que este dicha superficie), y ello se debe a que la 'primera' capa de fluido se adhiere a la superficie del sólido debido a las fuerzas viscosas existentes en las mismas capas de fluido, de tal manera que cada capa desacelera la siguiente; esto es lo que se conoce como condición de no deslizamiento, condición que ya fue abordada en apartados anteriores del presente trabajo. Por ende, esta condición es la que termina desarrollando el perfil de velocidad; y, como es de esperarse, la propiedad del fluido responsable de tal condición y el desarrollo de la capa límite (también fue descrita anteriormente) es la viscosidad [29].

El movimiento del fluido mejora la transferencia de calor al poner en contacto regiones más calientes y frías del fluido, provocando que se dé una conducción de calor mayor en una mayor cantidad de zonas, es así como la velocidad de la transferencia de calor a través de un fluido es superior por convección que por conducción. En consecuencia, la tasa de transferencia de calor por convección es proporcional a la velocidad del fluido; además de la velocidad, las experimentaciones realizadas han demostrado que la transferencia de calor también depende en gran medida de otras propiedades del fluido como lo son: la viscosidad, la conductividad térmica, la densidad y el calor específico; así como si el fluido es laminar o turbulento. En cuanto al sólido, dependerá de su geometría y la rugosidad de la superficie [29].

Aunque la transferencia de calor por convección puede resultar compleja de estudiar y evaluar, teniendo en cuenta que involucra el movimiento de un fluido, así como la conducción del calor, se puede observar que la tasa de transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y hace referencia la Ley de Newton de enfriamiento. La expresión matemática que le representa es la siguiente:

$$Q_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (18)$$

Donde h , A_s , T_s y T_∞ son el coeficiente de transferencia de calor [W/m^2K], el área superficial por la cual se da la transferencia de calor [m^2], la temperatura de la superficie sólida [K] y la temperatura del fluido de los alrededores [K], respectivamente. El coeficiente de transferencia de calor es un parámetro (no una propiedad) que no suele ser muy fácil de estimar, que se determina experimental y que es dependiente de la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de dicho fluido y la velocidad a la que se está desplazando. El h se puede definir como es descrito en el libro de [29]: "la razón de la transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido por unidad de área superficial por unidad de diferencia

en la temperatura". De manera general, el coeficiente de transferencia de calor por convección puede ser representado por la ecuación 19 cuando se conoce la distribución de temperatura en el fluido:

$$h = \frac{-k_{\text{fluido}} (\partial T / \partial y)_{y=0}}{T_s - T_\infty} \quad (19)$$

Donde $(\partial T / \partial y)_{y=0}$ es el gradiente de temperatura en la superficie. Como dicho coeficiente de transferencia de calor varía a lo largo de una superficie se tiende a promediar los coeficientes locales para obtener el valor aproximado de dicha superficie. Así como en muchas otras formulaciones de fenómenos físicos, también se puede reducir el número de variables que intervienen en el coeficiente de transferencia de calor agrupándolas en número adimensionales, en este caso con el número de Nusselt [Nu], el cual se define como:

$$Nu = \frac{L_c \cdot h}{k} \quad (20)$$

Donde L_c es la longitud característica. En tal medida, Nu representa la mejora de transferencia de calor por una capa de fluido a causa de la convección en relación con la conducción en la misma capa: a mayor Nu mejor será la transferencia de calor por convección y un $Nu=1$ para una capa de fluido representa transferencia de calor a través de esta por conducción pura.

Mientras un fluido fluye sobre una superficie, así como los coeficientes locales de resistencia al movimiento, el coeficiente de transferencia de calor por convección varía a lo largo de la superficie debido a las variaciones de la capa límite de velocidad en la dirección del flujo [29].

4.4.2.1. Convección forzada: Flujo sobre placas planas

Para el caso de un flujo de un fluido paralelo a una placa plana como el de la Ilustración 20, en la capa límite de velocidad inicia como laminar, pero si la placa es muy larga, dicho flujo se volverá turbulento a una distancia x medida desde el borde de ataque, donde Re alcanza su valor para la transición. Puede darse que una placa plana sea lo suficientemente larga para que el flujo se vuelva turbulento, pero como para descartar la región de flujo laminar.

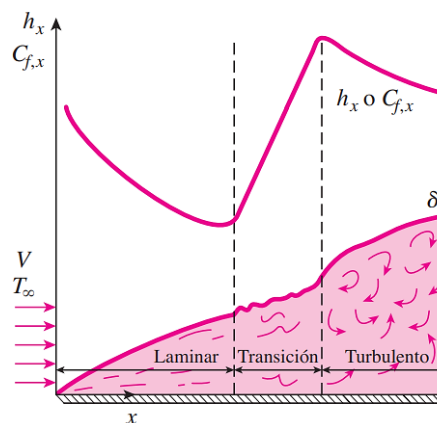


Ilustración 20. Región laminar y turbulenta de una capa límite para un flujo sobre una placa plana - Fuente: [29]

En la misma Ilustración 20 se observa además la variación del espesor de la capa límite δ y los coeficientes de fricción y transferencia de calor a lo largo de una placa plana isotérmica, por otro lado, en la Ilustración 21 se aprecia la representación gráfica del coeficiente de transferencia de calor promedio para una placa plana con flujo laminar y turbulento.

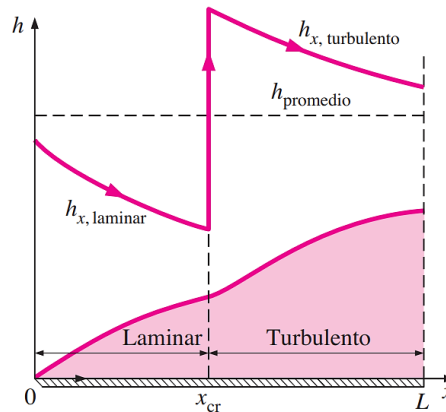


Ilustración 21. Representación del coeficiente de transferencia de calor promedio sobre una placa plana con flujo laminar y turbulento – Fuente: [29]

De tal manera, los coeficientes de transferencia de calor por convección son más altos en el flujo turbulento que en el laminar, y el valor máximo para h es alcanzado cuando el flujo se ha convertido completamente en turbulento. Teniendo en cuenta dicha variación en el h para un flujo sobre una placa plana, el Nu promedio sobre la placa completa se determina con las siguientes expresiones, dependiendo si dicho flujo es laminar o turbulento.

$$\text{Laminar} \rightarrow Nu = 0.664 \cdot Re_{L_c}^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} ; \quad Re_{L_c} < 5 \cdot 10^5 \text{ y } Pr > 0.6 \quad (21)$$

$$\text{Turbulento} \rightarrow Nu = 0.037 \cdot Re_{L_c}^{0.8} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} ; \quad 5 \times 10^5 \leq Re_{L_c} \leq 10^7 ; 0.6 \leq Pr \leq 60 \quad (22)$$

Donde Re_{L_c} es el número de Reynolds para toda la placa plana de longitud L_c . Las anteriores relaciones son aplicables a superficies isotérmicas y suponiendo además que son lisas. Calculado Nu , y estimadas las propiedades del fluido, y teniendo en cuenta la longitud de la placa, se puede estimar h despejándolo de la ecuación 20.

4.4.2.2. Convección natural

El movimiento resultante del reemplazo continuo de un fluido caliente por el aire frío se le conoce como corriente de convección natural y la transferencia de calor como resultado de dicha corriente se llama transferencia de calor por convección natural, y es tan eficaz en el calentamiento de superficies frías en un ambiente más caliente como el enfriamiento de superficies calientes en un ambiente frío. Ahora bien, en un campo gravitacional existe una fuerza que empuja hacia arriba un fluido ligero en uno más pesado, y se llama fuerza de flotabilidad o de flotación. La fuerza de flotabilidad es proporcional a la diferencia de densidades del fluido, la cual es proporcional a la diferencia de temperatura a presión constante; por lo que a mayor diferencia de temperatura entre el fluido adyacente a una superficie caliente o fría y

aquel volumen que este lejos de esta, mayor será la fuerza de flotabilidad y más fuertes las corrientes de convección natural y, por ende, mayor será la transferencia de calor.

En resumen, “la fuerza de flotabilidad es causada por la diferencia en densidades entre el fluido calentado (o enfriado) adyacente a la superficie y el fluido que lo circunda y es proporcional a esta diferencia y al volumen ocupado por el fluido más caliente” [29]. La diferencia de densidades que se da en el fluido ($\rho - \rho_\infty$), entre el interior y exterior de la capa límite, da lugar a la fuerza de flotabilidad y sostiene el flujo, y es lo que se conoce como aproximación de Boussinesq. Por otra parte, se desarrolla una fuerza de fricción en la superficie de contacto en la interfaz (sólido-sólido, sólido-fluido, o fluido-fluido), cuando uno de los cuerpos se desplaza en relación con el otro, en la dirección opuesta a la del movimiento.

En cuanto a la dirección del flujo, como sucede en la convección forzada, el espesor de la capa límite aumenta en la dirección del flujo, con la variante de que la velocidad del fluido es cero en el borde exterior de la capa límite de velocidad, así como en la superficie con la que está en contacto, tal como se gráfica en la Ilustración 22. En la superficie la temperatura del fluido es igual a la de la placa, y va decreciendo hasta la del fluido circundante a una distancia suficientemente lejos de dicha superficie. Si la superficie estuviera fría, la forma del perfil de velocidad y temperatura sería el mismo, pero en dirección opuesta [29].

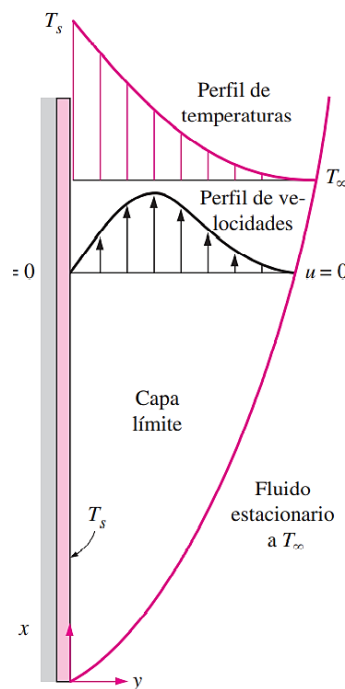


Ilustración 22. Perfil de velocidad y térmico típico para un flujo de convección natural sobre una placa plana vertical caliente – Fuente: [29]

Para representar el movimiento del fluido en la capa límite causado por el efecto de la flotabilidad, se emplea la ecuación 23 (ecuación de cantidad de movimiento en la dirección x):

$$\left(v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = v_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + g\beta(T - T_\infty) \quad (23)$$

Donde β es el coeficiente de expansión volumétrica. Como en esta temperatura se incluye la temperatura, la ecuación de cantidad de movimiento debe resolver

simultáneamente con la ecuación de continuidad y energía. Estas ecuaciones que rigen el flujo de convección natural junto a las condiciones de frontera pueden hacerse adimensionales para hacer más fácil su solución dividiendo variables dependientes e independientes entre cantidades constantes apropiadas. La ecuación adimensional para la cantidad de movimiento en un flujo natural incluye un parámetro adimensional conocido como número de Grashof [Gr], y su expresión es la siguiente:

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} \quad (24)$$

El número de Grashof, el representa la razón entre la fuerza de flotabilidad y la fuerza viscosa que están actuando sobre el fluido, es el que rige el flujo en la convección natural. El rol que cumple Re en convección forzada es el mismo que cumple Gr en la convección natural; por lo tanto, este último permite determinar en la convección natural si el flujo es laminar o turbulento.

Aunque lo abordado en párrafos anteriores está orientado principalmente a placas planas, lo cierto es que la convección natural varía para sobre una superficie dependiendo de su geometría y de su orientación con respecto a la dirección del flujo. Teniendo en cuenta dichas variables, las correlaciones empíricas para el Nu promedio en la convección natural siguen la siguiente estructura:

$$Nu = \frac{hL_c}{k} = C(Gr_L Pr)^n = C Ra_L^n \quad (25)$$

Donde C, Ra_L y n es el coeficiente constante, el número de Rayleigh [Ra] y el exponente constante, respectivamente. Tanto C como n dependen de la configuración geométrica de la superficie y del régimen del flujo; n suele ser 1/4 para flujo laminar y 1/3 para flujo turbulento, y C suele ser menor que 1. Teniendo en cuenta la definición de Gr y Pr, el número de Rayleigh puede considerarse como la razón de las fuerzas de flotabilidad y las difusividades térmica y de cantidad de movimiento y se evalúa con la siguiente ecuación:

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu\alpha} \quad (26)$$

Actualmente existen tablas con las expresiones para calcular el número de Nusselt promedio para las geometrías comunes, así como las longitudes características de cada geometría y los intervalos de número de Rayleigh a los cuales es aplicable. En cuanto a las propiedades del fluido, igual que en la convección forzada, son evaluadas a la temperatura de película.

4.4.2.3. Convección natural en recintos cerrados

En un recinto cerrado la transferencia de calor puede ser algo compleja por el hecho de que en un recinto de este tipo el fluido en realidad no permanece inmóvil, lo que sucede es que el fluido adyacente a la superficie más caliente sube (si la superficie es vertical) y el adyacente a la fría baja, ocasionando un movimiento de rotación en dicho recinto, lo cual termina mejorando la transferencia de calor a través de este. Ver Ilustración 23. Las características de la transferencia de calor dependerán de la ubicación de la placa caliente: si la placa caliente está en la parte de arriba no se desarrollan corrientes de convección en el fluido ya que el fluido más ligero siempre estará arriba.

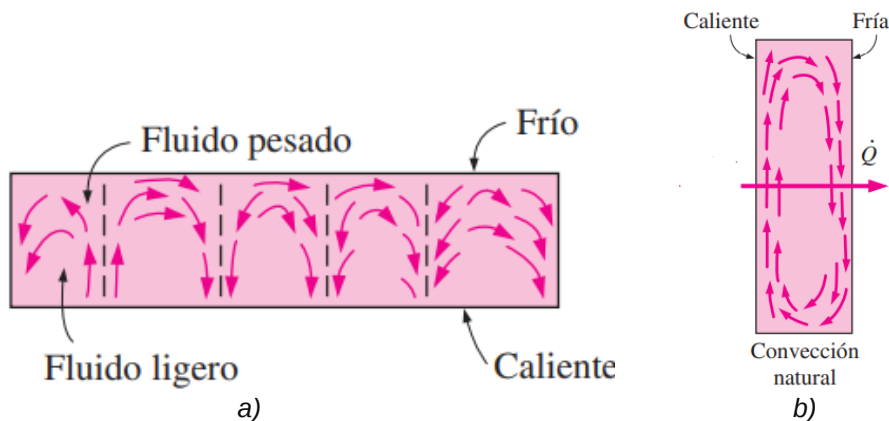


Ilustración 23. Corriente de convección natural en a) recinto cerrado horizontal y b) recinto cerrado vertical
- Fuente: [29]

4.5. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD): MODELAMIENTO NUMÉRICO

Los modelos CFD se han venido desarrollando para representar el flujo del fluido y la distribución de temperatura en los transformadores, es decir, para estudiar el comportamiento termo-hidráulico de los fluidos dieléctricos en los transformadores eléctricos [20]; aunque también se han implementado otro tipo de modelos, como lo son los THNM. En cualquier caso, ambos modelamientos comparten los mismos principios físicos: *conservación de la masa*, *conservación del momento* y *conservación de la energía*. Comparando ambos modelos, los resultados de CFD (ya sea en 2D o en 3D) son más detallados y fiables, pero requieren un mayor costo computacional; mientras los THNM son más rápidos de calcular y de fácil integración con otros algoritmos [19], además de que pueden abordar el ciclo completo de refrigeración del transformador [22].

Como fue expuesto en el capítulo anterior, este tipo de técnicas se ha venido empleando en distintas investigaciones con el fin de verificar los perfiles de velocidad y temperatura del transformador eléctrico sumergido en distintos tipos de fluidos dieléctricos.

Desde este punto de vista, y tal como lo destaca M. Daghray *et al.*, se han desarrollado estrategias para que coincidan los resultados del modelo CFD 2D que son asimétricos (temperaturas del: aceite superior, devanado medio y de los puntos caliente) con los modelos 3D. Independientemente del tipo de modelo CFD que se emplee, en las investigaciones consultadas acuden a un refinamiento de malla en las paredes de los conductos por los que circula el fluido dieléctrico con el fin de poder captar los gradientes de temperatura y velocidad que se dan en estas partes, como es el caso del trabajo de Altay R. *et al.*

4.6. MARCO NORMATIVO PARA TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS SUMERGIDOS EN ÉSTERES

Teniendo en cuenta que en el presente se focaliza en el estudio de la capacidad de refrigeración de los transformadores a baja temperatura, en la Tabla 2 se citan las normativas que se han venido definiendo para el uso de fluido tipo éster en transformadores eléctricos.

Tabla 2. Normativa aplicada a los fluidos dieléctricos tipo éster - Fuente: Tomado de [30]

Normativa	Título
Ésteres sintéticos	
IEC 61099:1992	Especificaciones para ésteres orgánicos sintéticos no utilizados para fines eléctricos
IEC 61203:1992	Ésteres orgánicos sintéticos para usos eléctricos fines eléctricos-Guía para el mantenimiento de los ésteres en los equipos
IEC 61099:2010	Líquidos aislantes-Especificaciones para ésteres orgánicos sintéticos para fines eléctricos
Ésteres naturales	
IEEE Std C57.147-2008	Guía para la aceptación y el mantenimiento del líquido aislante de Ester Natural en transformadores
ASTM D 6871-2017	Especificación estándar para fluidos de ésteres naturales (aceite vegetal) Esteres naturales utilizados en aparatos eléctricos
IEEE Std C57.147-2018	Guía para la aceptación y el mantenimiento del líquido aislante de ésteres naturales en transformadores
IEC 61099:2010	Líquidos aislantes-Especificaciones para ésteres orgánicos sintéticos no utilizados para fines eléctricos
IEC 62770:2013	Fluidos para aplicaciones electrotécnicas-Esteres naturales no utilizados para transformadores y equipos eléctricos similares
IEEE Std C57.152-2013	Guía para las pruebas de diagnóstico en campo de transformadores de potencia, reguladores y reactores llenos de fluido
IEEE Std C57.155-2014	Guía para la interpretación de los gases generados en transformadores sumergidos en ésteres naturales y sintéticos
IEC 62975:2021	Ésteres naturales-Directrices para el mantenimiento y uso en equipos eléctricos Ésteres modificados o mezclados
IEC 63012:2019	Ésteres modificados o mezclados para aplicaciones electrotécnicas

5. PROCESO METODOLÓGICO

Para evaluar la capacidad de enfriamiento del transformador a bajas temperaturas ambiente, empleando diferentes fluidos dieléctricos, se definió un modelo numérico CFD cuyos resultados fueron contrastados con los obtenidos en una fase experimental. A continuación, se describe el procedimiento experimental llevado a cabo en el laboratorio para la toma de registros de temperatura en diferentes puntos del transformador; así como la descripción del modelo numérico llevado a cabo para simular el comportamiento del transformador a dichas condiciones. Para ambas metodologías se tuvieron en cuenta los tres fluidos dieléctricos seleccionados para el estudio, así como los tres niveles de carga de ensayo.

5.1. ENSAYOS EXPERIMENTALES

La metodología experimental comprende: la descripción del transformador ensayado; la descripción de las mediciones de viscosidad para los tres fluidos dieléctricos; y finalmente la explicación de los ensayos eléctricos en la máquina, el enfriamiento del sistema, el proceso de medición de velocidad de flujo de aire libre (fuera de la capa límite) en el interior del cajón de madera, y la medición y adquisición de las mediciones de temperatura en el transformador.

5.1.1. Transformador

El transformador seleccionado para el estudio fue una máquina monofásica de 800 VA (230/115 V) con una intensidad nominal aproximada en la bobina primaria de ≈ 7 A y de ≈ 3.5 A en la secundaria, Ilustración 24a. Las medidas del transformador son de 15 cm x 13 cm x 14 cm (largo x ancho x alto), y fue sumergido en un tanque de aproximadamente 20 cm x 20 cm x 20 cm, el cual fue llenado con fluido dieléctrico, para cada uno de los ensayos con tipo diferente: aceite mineral, éster sintético y éster natural. Dos de las caras laterales del tanque tienen dos asas cilíndricas huecas, pero cuyo interior está taponado, la Ilustración 24c.

La máquina la conforman dos devanados concéntricos (primario y secundario) de hilos de cobre esmaltado, los cuales se encuentran unidos a dos tapas plásticas, una en cada extremo; y sobre la cubierta plástica superior están dispuestas dos clemas para la realización de las conexiones eléctricas respectivas del transformador. El núcleo ferromagnético no es macizo, sino que es la superposición de 130 láminas de acero al silicio. La base que soporta al transformador, así como el tanque, están hechos de acero inoxidable. El transformador se encuentra sujeto a la tapa del tanque a partir de un anclaje con pernos que van de la base que soporta el transformador hasta dicha tapa. Ver la Ilustración 24b.

5.1.2. Mediciones de Viscosidad

Como fue abordado anteriormente, la viscosidad es la propiedad más importante del aceite dieléctrico si lo que se busca es evaluar la capacidad de refrigeración del sistema. Como esta es una propiedad que varía con la temperatura, se decidió realizar mediciones de viscosidad a bajas temperaturas a cada fluido y luego estimar la función polinomial que representara dicha variación; similar a lo hecho por Cloet *et al.* [13], quienes también realizaron dichas mediciones para estudiar los efectos de la viscosidad en ensayos a bajas temperaturas, pero con la variante de que lograron tener registros

de viscosidad hasta -40°C y -30°C para el aceite mineral y el éster sintético, respectivamente.

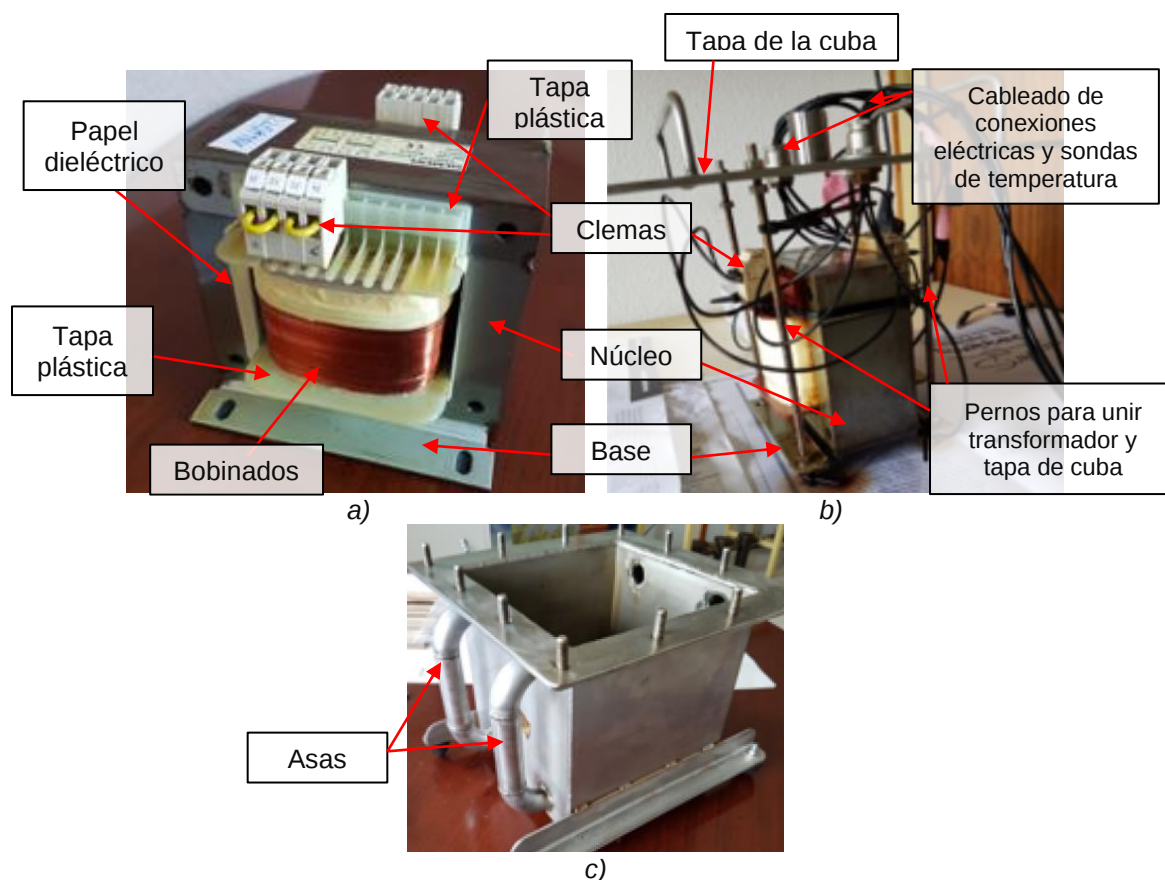


Ilustración 24. a) Transformador empleado para los ensayos experimentales, b) transformador anclado a la tapa del tanque con pernos y c) tanque contenedor de transformador y fluido dieléctrico - Fuente: Grupo de investigación GITEP

Si bien es cierto que el Grupo de Investigación en Transformadores Eléctricos de Potencia – GITEP – de la Universidad de Cantabria ha realizado mediciones de viscosidad a algunos de los fluidos dieléctricos que fueron objeto de estudio, dichas mediciones fueron iniciadas a temperatura ambiente (aproximadamente a una temperatura de 20°C). Es así como, considerando que el objetivo del presente trabajo ha sido evaluar el enfriamiento del sistema a bajas temperaturas, se han realizado mediciones de viscosidad entre -4°C y 60°C .



Ilustración 25. viscosímetro rotacional HAAKE™ Viscotester™ 550

Para la medición de la viscosidad se empleó un viscosímetro rotacional HAAKE™ Viscotester™ 550 según la ISO 3219:1993 (ver la Ilustración 25) con un rotor cilíndrico MV1. Los datos de viscosidad fueron recopilados cada 2°C; la temperatura era la medida por el sensor de temperatura PT 100 del que dispone el equipo, y visualizada en el panel del viscosímetro. Las unidades de la viscosidad medida por el equipo fueron [mPa·s], es decir, con el equipo se realizaron mediciones de viscosidad dinámica.

Las muestras fluido se introdujeron en una copa metálica cilíndrica, en cuyo interior estaba sumergido el rotor del viscosímetro, de este modo el líquido ocupaba el espacio libre entre los dos cilindros concéntricos. La copa estaba rodeada de un baño termostático por el cual circulaba líquido anticongelante, de manera que se podría controlar la temperatura del ensayo, Ilustración 25.

El líquido anticongelante se refrigeraba en el congelador de una nevera, y se introducía en la cuba del baño termostático antes empezar los ensayos, que empezaban a una temperatura de $T_i = -4^\circ\text{C}$ hasta llegar, con aumentos progresivos, a $T_f = 60^\circ\text{C}$. Las flechas rojas de la Ilustración 26 representan la dirección que sigue el fluido anticongelante para ir calentando la muestra progresivamente. El baño termostático está recubierto exteriormente con una cubierta plástica que evita que haya una ganancia de calor y/o pérdida de calor hacia el ambiente.

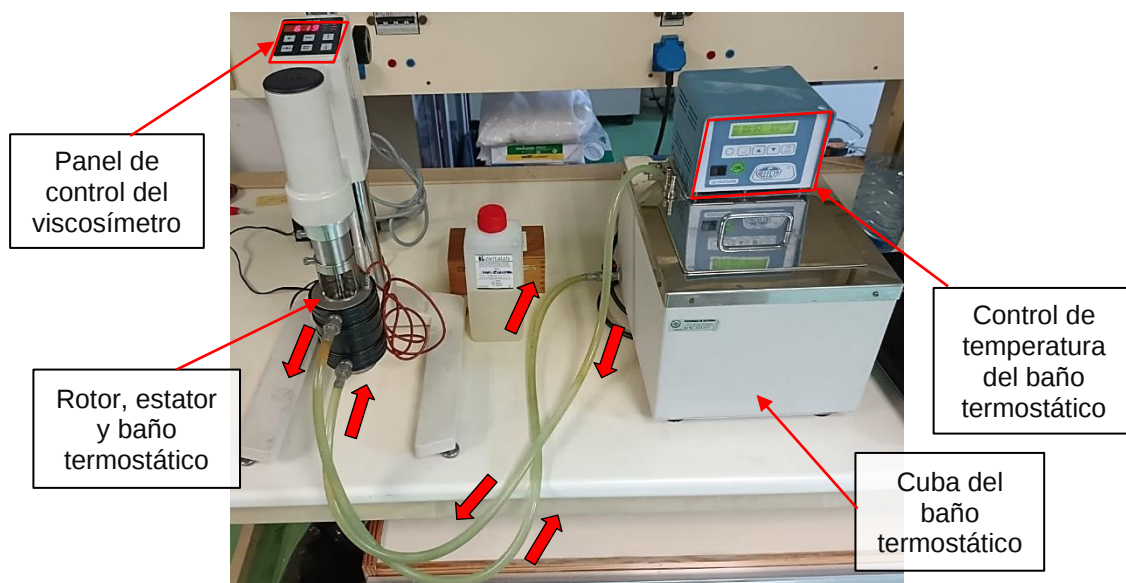


Ilustración 26. Montaje de viscosímetro y equipo para baño termostático para mediciones de viscosidad a temperatura controlada - Fuente: El autor

5.1.3. Condiciones de Ensayo

La metodología experimental se ha descrito desde dos enfoques: eléctrico y térmico. Desde el punto de vista eléctrico, se ha incluido el componente eléctrico del banco de pruebas para registrar tensiones y corrientes en cada bobina, así como la definición de los índices de carga; y desde el enfoque térmico, se ha abarcado el mecanismo de enfriamiento empleado para lograr llevar el sistema a bajas temperaturas. La experimentación se llevó a cabo en el Laboratorio de Ingeniería Energética de la Universidad de Cantabria.

5.1.3.1. Ensayo a cortocircuito e índices de carga

Los experimentos correspondientes a la toma de temperaturas que hacen referencia a la distribución de temperatura en el transformador, medida experimentalmente, fueron realizados con cada fluido dieléctrico y bajo diferentes índices de carga: *media carga* (50% de la carga nominal), *carga nominal* y *sobre carga* ($\approx 128.5\%$ de la carga nominal). El montaje eléctrico experimental se observa en la Ilustración 27, y fue realizado de tal manera que los ensayos a realizar fueran en cortocircuito. Se utilizaron 3 amperímetros; el 1 y el 2 se utilizaron para registrar la intensidad que entra al devanado primario, mientras que el amperímetro 3 es el que se utilizó para cortocircuitar el devanado secundario, y que a su vez permite visualizar la corriente por dicha bobina. Para lograr la corriente deseada según el índice de carga correspondiente, se regulaba el banco de resistencias que se observa en la misma ilustración; cada grupo de resistencias esta en serie con uno de los dos primeros amperímetros, y estos, a su vez, en paralelo con el otro conjunto de resistencias y el otro amperímetro. En cuanto a las tensiones, con el voltímetro 1 se medía el voltaje en la bobina secundaria, y con el voltímetro 2 se ha registrado la tensión que se ha suministrado al devanado primario a partir del autotransformador regulable.

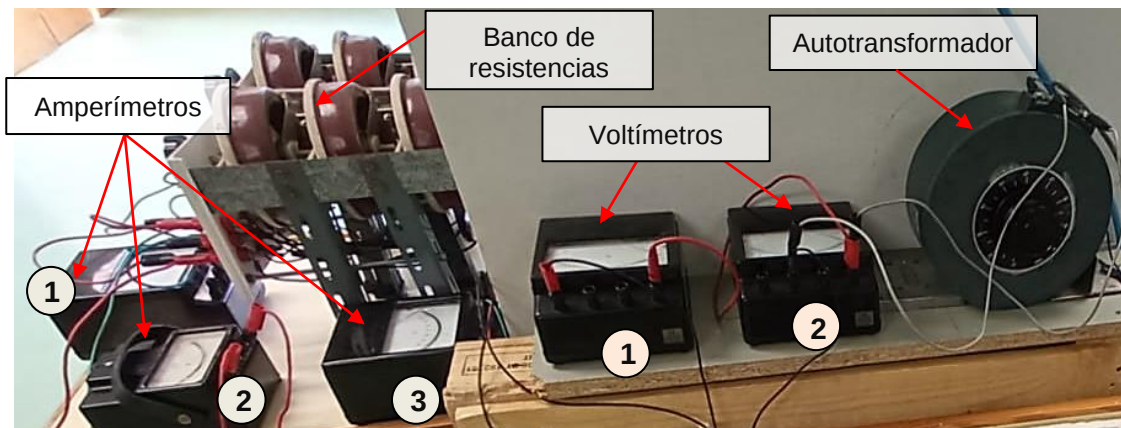


Ilustración 27. Montaje eléctrico para ajustar los distintos niveles de carga en cada uno de los experimentos - Fuente: El autor

5.1.3.2. Enfriamiento del sistema

Para llevar y mantener el sistema (transformador y cuba) a bajas temperatura 'ambiente', este fue colocado en un cajón de madera de aproximadamente 50cm x 50cm x 50cm con un espesor de madera próximo a 2 cm. La disposición del transformador en dicho cajón se puede observar en la Ilustración 28. Aunque la conductividad térmica de la madera es baja, se forraron tres de las caras internas del cajón con láminas de poliestireno expandido de 1.5 cm de espesor. Para cubrir la cara libre del cajón, la superior, se dispuso una lámina de cartón común. Con esta configuración se buscó la menor ganancia del calor del exterior del cajón de madera hacia el interior (aire y transformador-cuba-fluido), es decir, garantizar el mejor aislamiento posible para evitar el mínimo calentamiento posible por los alrededores.

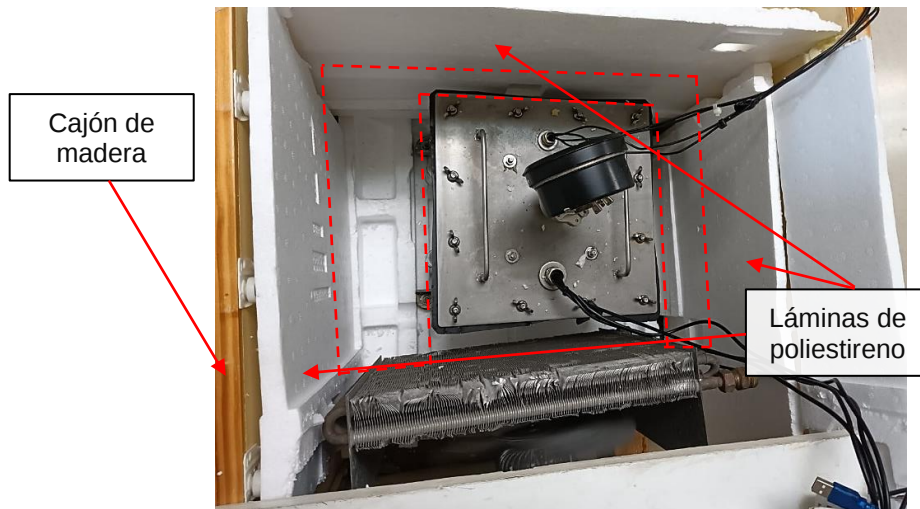


Ilustración 28. Paredes internas del cajón (tres laterales e inferior) con poliestireno para evitar el calentamiento por los alrededores – vista superior - - Fuente: El autor

Si bien la configuración anteriormente descrita fue en miras de lograr el mejor aislamiento térmico posible del sistema, para enfriar el aire que circuló en el interior del cajón, mismo que enfriaba el transformador-cuba-fluido, se utilizó una bomba calor. Aunque en trabajos como el de [17] se logró el enfriamiento del transformador por convección natural en una cámara climatizada, por la capacidad del equipo empleado en el presente estudio, se recurrió a este sistema de enfriamiento por convección forzada para lograr bajar un poco más las temperaturas del sistema.

Con este equipo se enfrió el agua que se hacía circular por un intercambiador aire-líquido que instalado en el interior del cajón extraía el calor del aire de su interior una vez el aire circulaba por este. Para lograr la recirculación del aire interior, se suspendió un ventilador axial junto a una de las caras internas del cajón, a un lado del intercambiador de calor. La distribución del montaje llevado a cabo y equipo empleado se aprecia en la Ilustración 30. De manera adicional, con el fin de superar la inercia térmica de todo el sistema lo más rápido posible, es decir, para alcanzar la temperatura mínima posible en el menor tiempo, se dispusieron botellas de hielo en el interior del cajón de madera, rodeando el transformador; la ubicación de dichas botellas fue arbitraria, pero garantizando que el aire pudiese fluir entre estas y sobre todas las caras del tanque; el espacio para disponible para ubicar tales botellas es el delimitado por las líneas rojas punteadas de la Ilustración 28. Asimismo, la visualización completa de la instalación dispuesta para la experimentación es la observada en la Ilustración 29.



Ilustración 29. Instalación térmica y eléctrica para los ensayos - Fuente: El autor

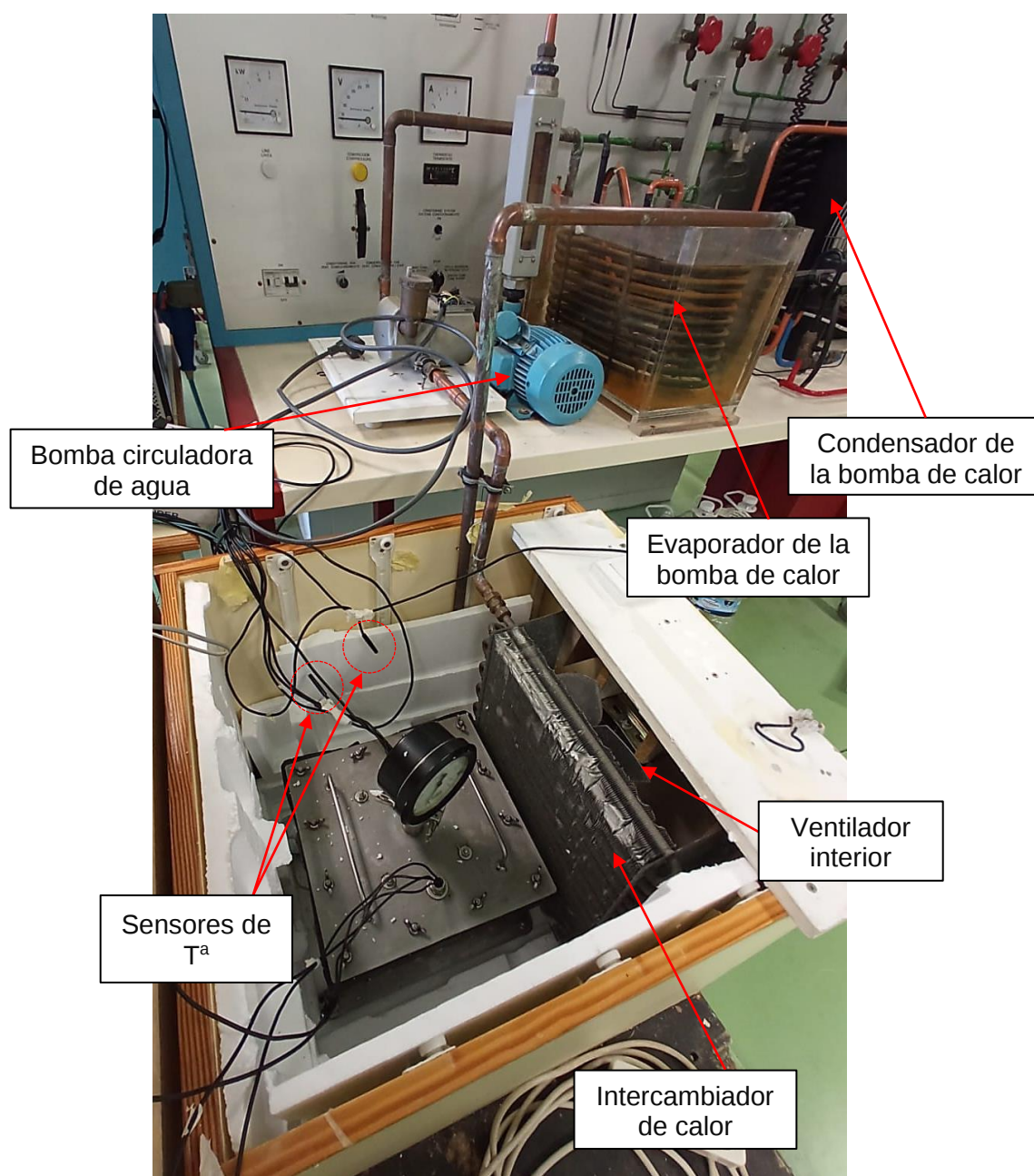


Ilustración 30. Montaje del sistema y bomba de calor para enfriar el sistema - Fuente: El autor

5.1.3.3. Medición de velocidad de flujo de aire interno

Considerando que el enfriamiento del transformador fue por convección forzada, ya que se utilizaba un ventilador para hacer circular el aire enfriado, y pensando en que el coeficiente de transferencia de calor había de ser estimado analíticamente teniendo en cuenta dicho mecanismo de transferencia de calor, se realizaron mediciones de velocidad al aire que estaba fluyendo (y que enfriaba al transformador) al interior del cajón de madera. Las mediciones de velocidad de aire se realizaron con un anemómetro de hilo caliente análogo (Ilustración 31); los registros se dieron en aproximadamente 9 puntos, aproximadamente equidistantes, de las caras laterales y superior de la cuba (ver la Ilustración 32); para la cara inferior del tanque se tomaron las mediciones realizadas

en los bordes de dicha superficie teniendo en cuenta que no era posible introducir el anemómetro en el espacio disponible (cuba y lámina de poliestireno) y medir la velocidad de flujo de aire.



Ilustración 31. Anemómetro de hilo caliente empleado para la medición de velocidad de flujo de aire en el interior del cajón - Fuente: El autor



Ilustración 32. Puntos de toma de velocidad de flujo de aire sobre la superficie superior de la cuba - Fuente: El autor

Los puntos definidos para la toma de velocidades de flujo sobre las demás superficies de la cuba se observan en la Ilustración 33; como se aprecia, para la cara inferior de la cuba se tuvieron en cuenta las mediciones realizadas próximas a los bordes inferiores (puntos verdes de la ilustración), y los puntos naranjas hacen referencia a las ubicaciones aproximadas en las que se tomaron los registros en las caras laterales. En cada uno de los puntos esquematizados, en las anteriores ilustraciones, se realizaron 5 mediciones de velocidad.

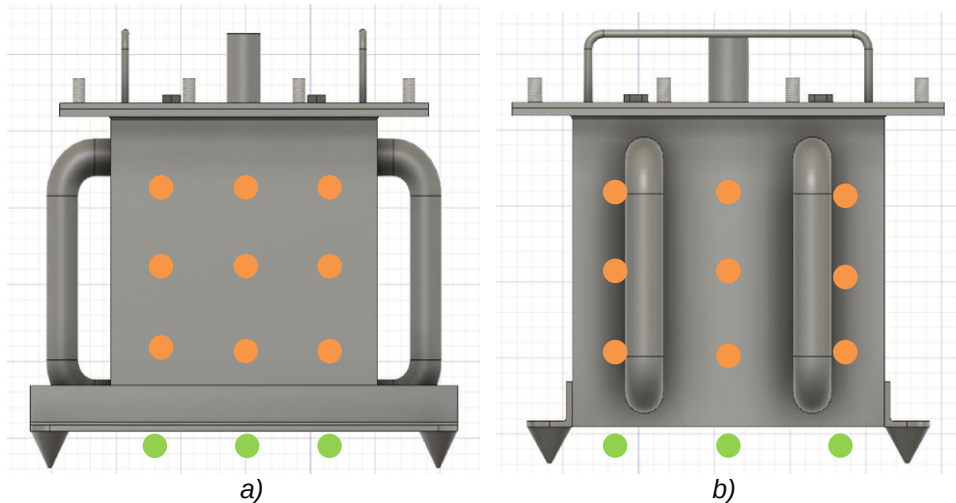


Ilustración 33. a) Vista frontal y b) vista lateral de la cuba con la distribución de los puntos en los que se realizaron mediciones de velocidad de aire - Fuente: El autor

5.1.3.4. Adquisición y almacenamiento de datos: Temperaturas

Para evaluar la (distribución) temperatura en las zonas de interés en el transformador se contó con cuatro sondas de temperatura ubicadas en distintos puntos: una en el papel dieléctrico, en la parte superior del transformador, en los devanados (zona superior, donde habitualmente se dan los puntos calientes) y en la parte inferior de la base del transformador. La ubicación aproximada de las sondas se observa en la Ilustración 46. Además, se registró la temperatura ambiente en el exterior del cajón de madera (el laboratorio) con otra sonda, y cuya ubicación se puede observar en el círculo rojo punteado de la Ilustración 29. Así mismo, para la medición y monitoreo de la temperatura del aire enfriado en el interior del cajón de madera se posicionaron dos sensores de temperatura (véase los círculos rojos punteados de la Ilustración 30), observándose que durante los ensayos no varío la temperatura registrada por un mismo sensor desde el inicio hasta el final del experimento, y porque se logró una diferencia de temperatura entre ambos sensores de máximo 1 °C.

La captura de las temperaturas registradas con los sensores fue llevada a cabo con la ayuda de una tarjeta de arduino a la que estaban conectados dichos sensores. Las sondas que fueron conectadas a la tarjeta de adquisición de datos fueron las cuatro del transformador y el que se ubicó en el exterior del cajón de madera, y la tarjeta se conectó a un ordenador por cable USB para almacenar las mediciones en un archivo con formato '.txt', uno para cada experimento. La adquisición fue programada para que se realizará cada 3 segundos. También, se dispuso de una interfaz de usuario que permitía hacer seguimiento a los registros de temperatura en 'tiempo real'. Ilustración 34.



Ilustración 34. Interfaz de usuario para la visualización de los registros de temperaturas captados con el sistema de adquisición de datos - Fuente: El autor

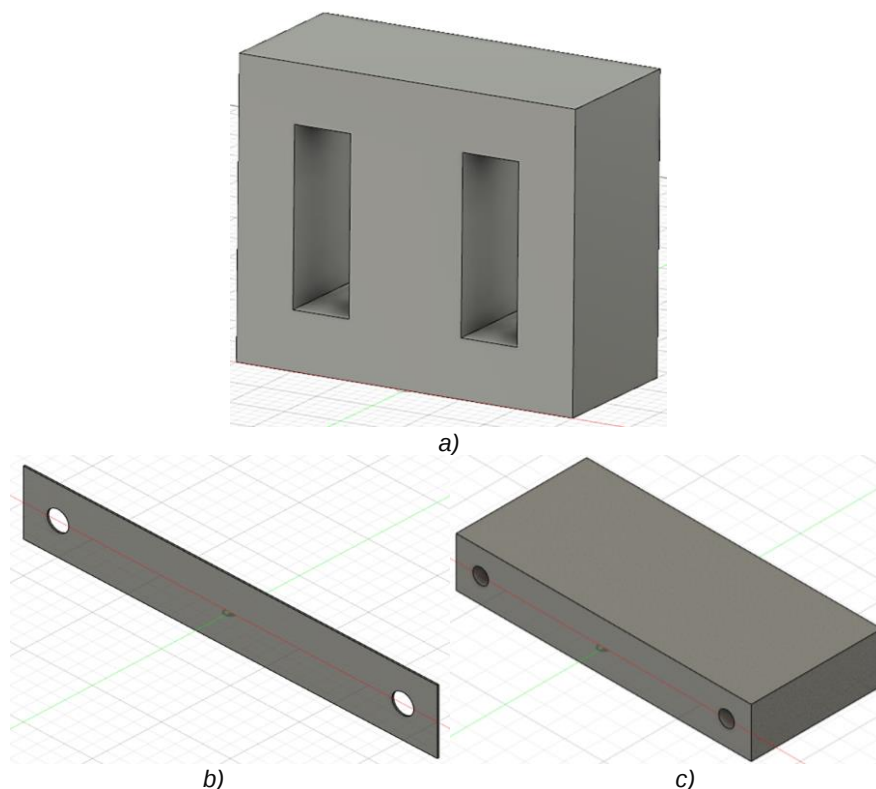
Considerando que el modelo numérico del presente trabajo se parametrizó en estado estacionario, se ha establecido como criterio de estabilización, es decir, la condición de parada de los ensayos para poder ser contrastados los resultados numéricos, la definida por la IEEE Std C57.12.90-2015, el mismo criterio empleado por Ortiz *et al.* [18] y el cual establece: el estado estable se habrá alcanzado cuando la temperatura del fluido dieléctrico haya variado menos de 1°C/h durante un periodo continuo de 3 horas.

5.2. MODELO NUMÉRICO

Con el fin de evaluar el flujo y distribución de temperatura de aceites dieléctricos tipo éster a bajas temperaturas, y cómo dichos fluidos bajo tales condiciones influyen en la refrigeración de la máquina, se ha definido un modelo numérico, objetivo principal del presente trabajo. En los subtítulos posteriores se describen las consideraciones tenidas en cuenta para su definición.

5.2.1. CAD del Transformador

Teniendo como referencia los planos del transformador, correspondientes a un trabajo realizado previamente por integrantes del grupo de investigación GITEP [31], se realizó el modelo geométrico de la máquina empleando el software Autodesk Fusion 360. En primera instancia, se observa la vista isométrica del modelo 3D de cada uno de los componentes del transformador y la cuba, a excepción del papel dieléctrico (teniendo en cuenta la simpleza y dimensiones de la geometría del papel): núcleo magnético (Ilustración 35), devanados (Ilustración 36), tapas plásticas (Ilustración 37), clemas para las conexiones eléctricas (Ilustración 38), base y perno de anclaje (Ilustración 39) y cuba (Ilustración 40). Los planos de las piezas modeladas para el presente trabajo se encuentran en el apartado de ANEXOS.



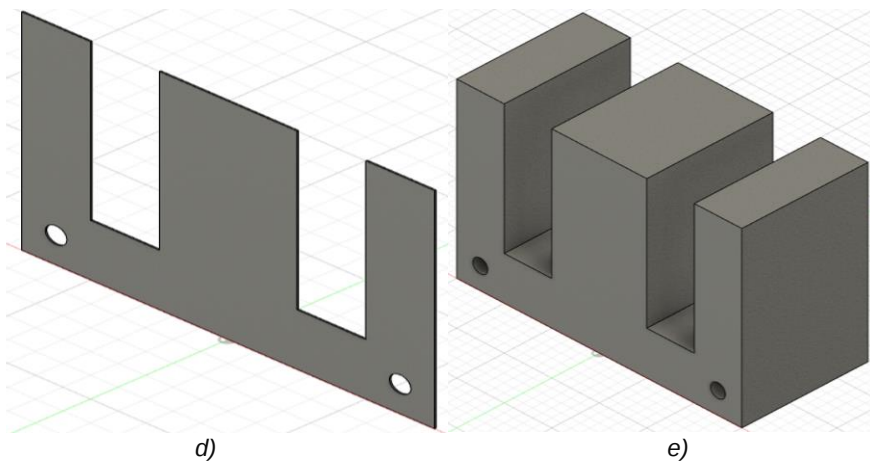


Ilustración 35. CAD del núcleo del transformador: a) Núcleo conformado por las 130 láminas superiores e inferiores; b) lámina superior; c) 130 láminas superiores superpuestas; d) lámina de columnas de núcleo; e) superposición de las 130 láminas de columnas de núcleo - Fuente: El autor

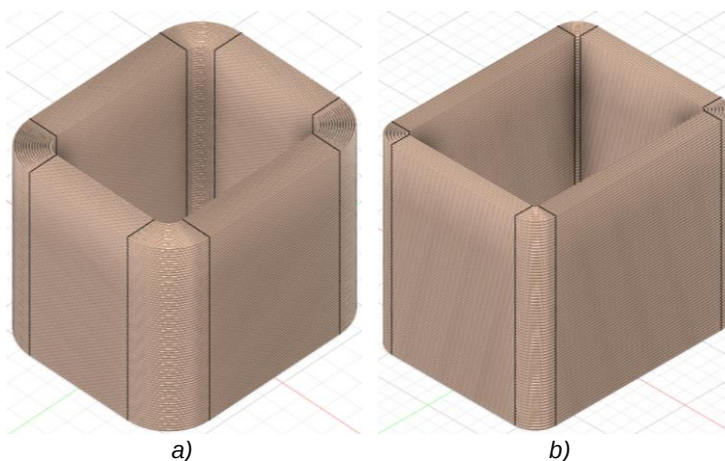


Ilustración 36. Devanado de a) alta y b) baja tensión - Fuente: El autor

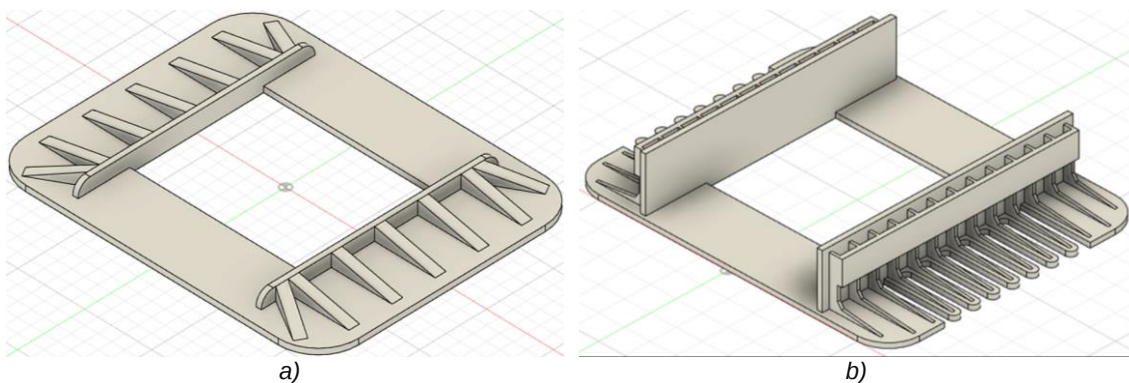


Ilustración 37. a) tapa plástica inferior y b) superior de los devanados - Fuente: El autor

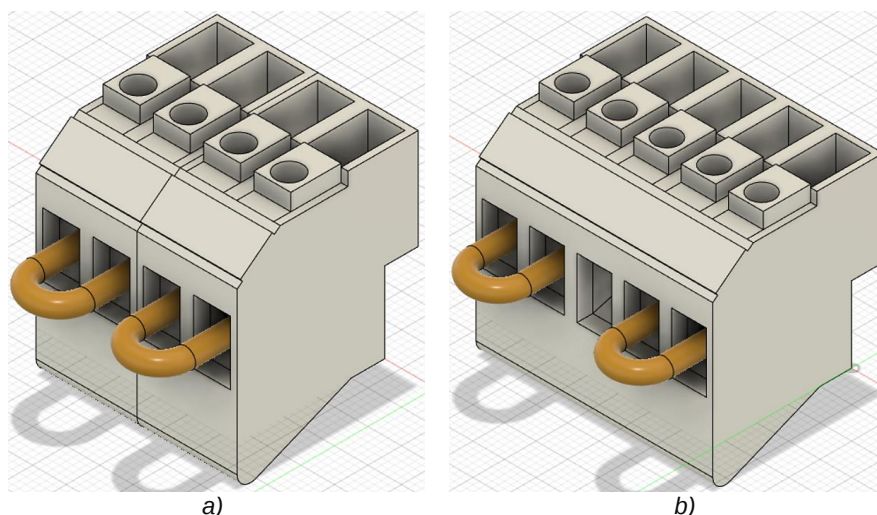


Ilustración 38. a) clema estrecha y b) ancha - Fuente: El autor

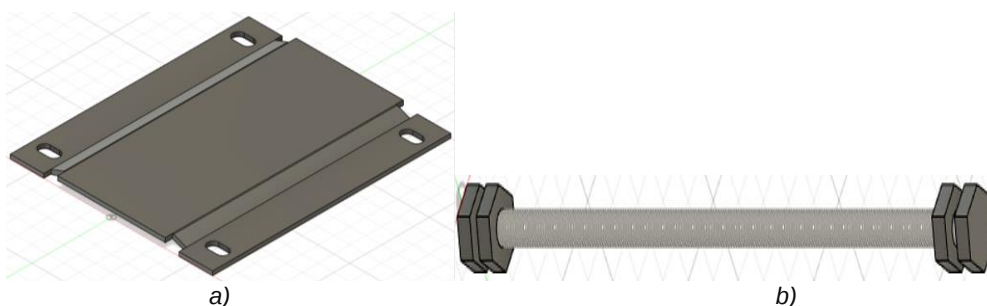


Ilustración 39. a) Base del transformador y b) pernos con tuerca para el anclaje del transformador a la tapa de la cuba - Fuente: El autor

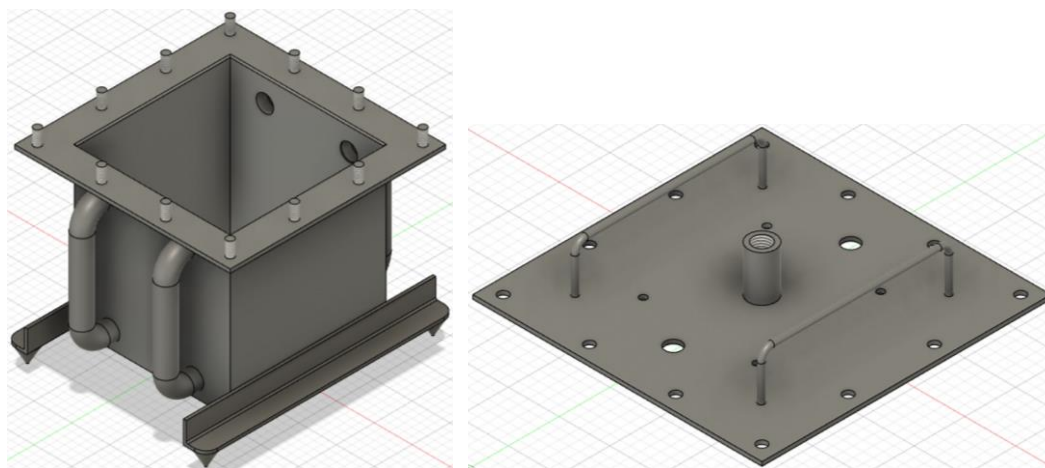


Ilustración 40. Cuba y tapa - Fuente: El autor

Por otro lado, en las Ilustración 41 y Ilustración 42 se observa el ensamble del transformador y el ensamble transformador-cuba, respectivamente. Aunque para dicho modelamiento se han considerado las dimensiones y formas reales de cada una de las piezas del sistema, es bien sabido que en las simulaciones numéricas entre más detalladas y complejas sean las geometrías, mayor será el costo computacional y el tiempo de simulación. En vista de tal consideración, se han realizado algunas simplificaciones de geometría a algunas de las piezas, algo muy habitual en el estudio

de máquinas eléctricas como el transformador, o en la explicación de ciertos fenómenos físicos, como lo puede ser los análisis fluido-térmicos, cuya formulación matemática por sí sola ya resulta verdaderamente compleja de resolver de forma analítica.

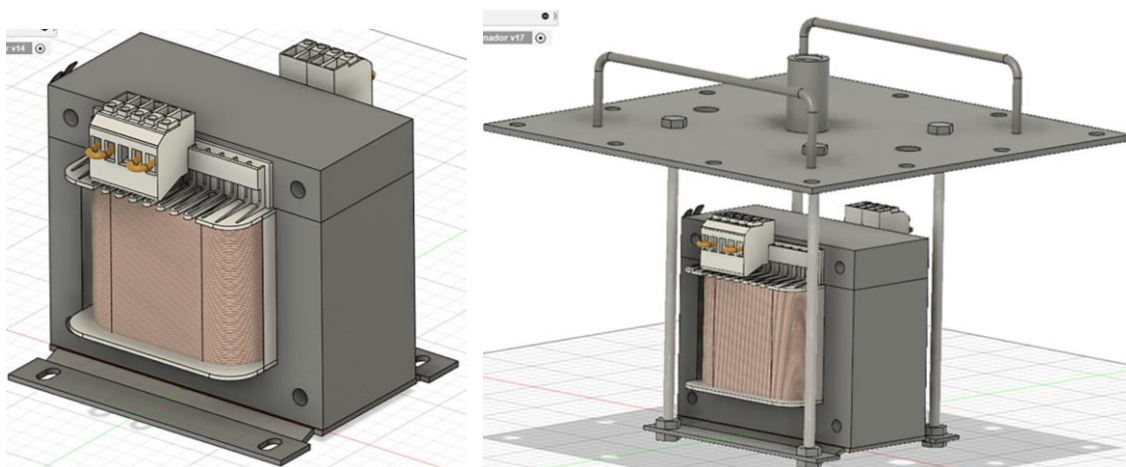


Ilustración 41. a) Ensamble de transformador y b) ensamble de transformador y tapa de cuba - Fuente: El autor

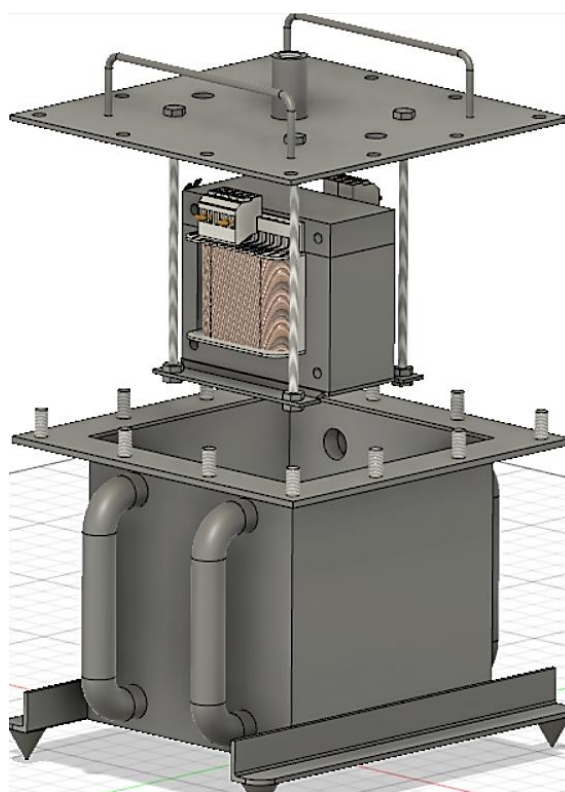


Ilustración 42. Ensamble de transformador y cuba - Fuente: El autor

Detallado por componente:

- Teniendo en cuenta los reducidos espacios en todo el arrollamiento de cobre por cada vuelta, se unificaron los *devanados* como una única bobina, una sola pieza maciza (no conformada como un arrollamiento de alambre) como es de notarse en la Ilustración 43a. Esta simplificación geométrica permite asumir que las

pérdidas de calor generadas durante la transformación están concentradas en un único componente, y que este actúa como una fuente de calor constante.

- En cuanto a las *tapas plásticas* que soportan y aíslan a los devanados en los extremos, se ha eliminado los nervios de ambas y se han evitado los espacios en los tramos laterales, de la cara paralela al plano horizontal, de la tapa superior, de tal manera que se eviten las formas irregulares y con cierto nivel de detalle; de la misma manera, para los soportes verticales que están en los costados de la tapa plástica superior (mismos sobre los que descansan las clemas) se han eliminado los agujeros, de tal manera que dichos soportes verticales cuenten con una sección prismática de base rectangular. Ver la Ilustración 44a. Teniendo en cuenta los espacios (distanciamiento de no más de 3.5 mm) y que las clemas actúan como barrera a la mínima taza de flujo que circula por dichos agujeros, partiendo que el flujo se mueve en dirección vertical en esta zona por el calentamiento al que se somete por el calor generado en los devanados, no resulta de gran trascendencia para el estudio el dejar dichos espaciamentos, por lo que se ha considerado que únicamente tendería a aumentar considerablemente los tiempos de simulación.
- Para la base se suprimieron los agujeros empleados para anclar a un extremo de los pernos, además de que se eliminaron los redondeos, zonas donde puede verse la calidad del mallado. Ver Ilustración 43a. Por volumen y dimensiones de los pernos también fueron omitidos en el modelo simplificado, así como el papel dieléctrico por ubicación y reducida conductividad térmica.

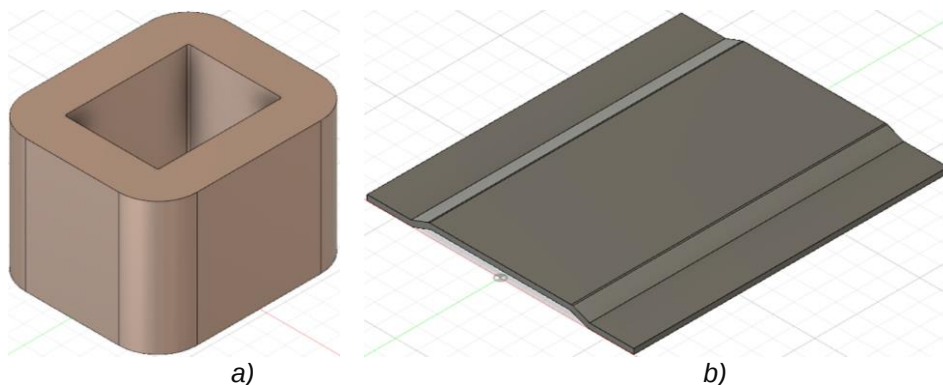


Ilustración 43. a) Simplificación de los devanados a una sola bobina maciza y de la b) base del transformador - Fuente: El autor

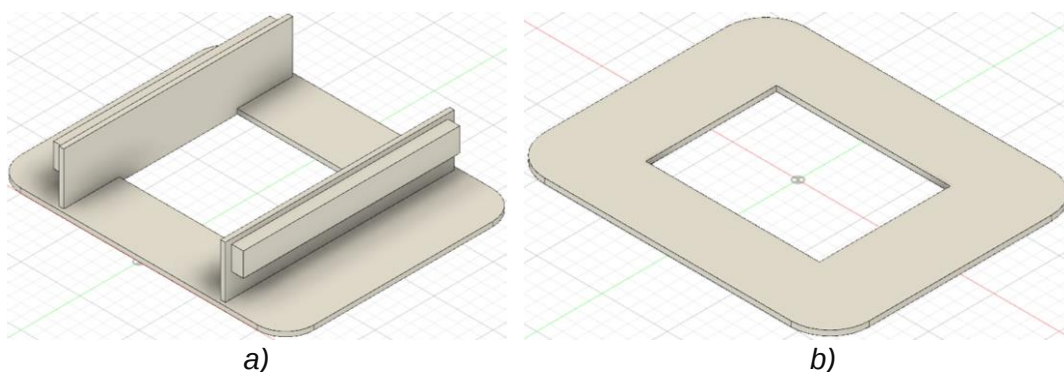


Ilustración 44. a) tapa plástica superior e b) inferior con simplificaciones en la geometría - Fuente: El autor

Aplicadas las simplificaciones de geometría descritas, el nuevo ensamble del transformador es el de la Ilustración 45. Aunque el interés del presente trabajo es estudiar numéricamente el enfriamiento del transformador a bajas temperatura ambiente con distintos fluidos dieléctricos, no se debe dejar a un lado el buscar que el modelo sea lo suficientemente eficiente como para obtener unos resultados con cierto nivel de precisión (de allí a la experimentación planteada), pero con tiempos de simulación lo más reducidos posibles; por lo que se ha simplificado aún más el modelo de la máquina para tal fin.

Daghray *et al.* [21] con el desarrollo de su trabajo han validado que con los modelos 2D, para este tipo de estudios, se obtienen resultados muy aproximados a los obtenidos de manera experimental (distribución de temperaturas), aunque los modelos 3D son más precisos y son ideales para casos de flujos inversos en canales de entrada. Teniendo como base la comprobación de los autores, para el modelo numérico del presente trabajo se ha tenido uno 2D, Ilustración 46. El planteamiento es de tipo axisimétrico, es decir, el modelo es simétrico alrededor de un eje, pues hay simetría en las restricciones (condiciones de contorno) y de tipo geométricas, considerando la forma y dimensiones de la máquina, así como las condiciones de ensayo experimental. Este tipo de aproximaciones es muy habitual en los estudios de ingeniería y no solo son planteadas en modelos numéricos sino en experimentaciones: por ejemplo, si bien en el trabajo de [17] no realizaron un modelo numérico, para el ensayo experimental aislaron la mitad de las paredes y cubierta del transformador al que se le evaluó la capacidad de enfriamiento a bajas temperaturas, principalmente porque se quería evaluar la capacidad de refrigeración en los radiadores de la máquina.

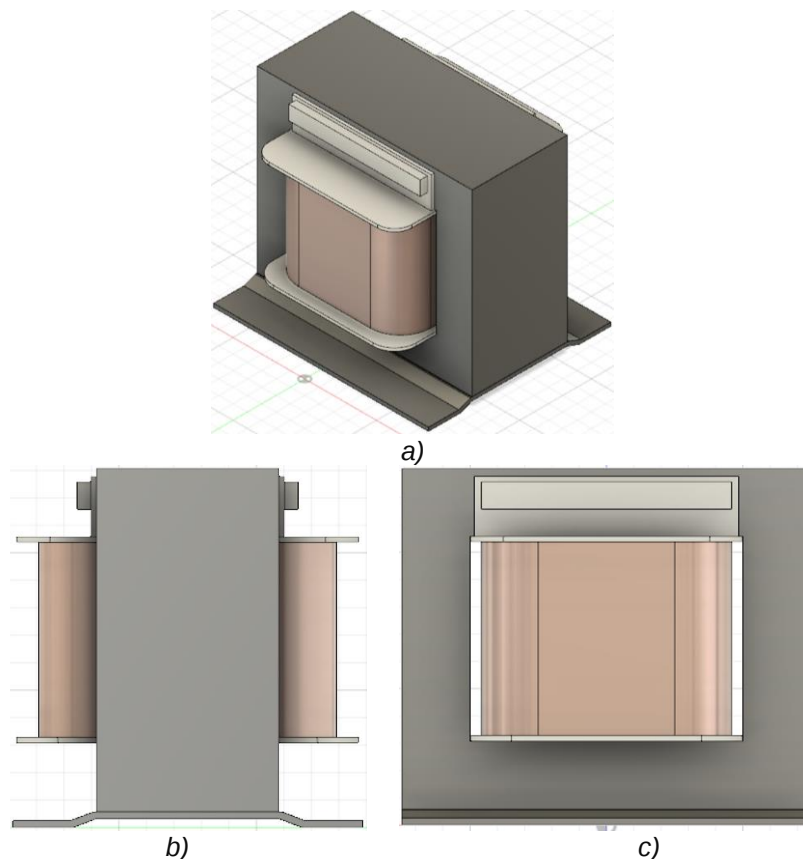


Ilustración 45. Modelo 3D del transformador simplificado: a) vista isométrica, b) vista lateral, c) vista frontal
- Fuente: El autor

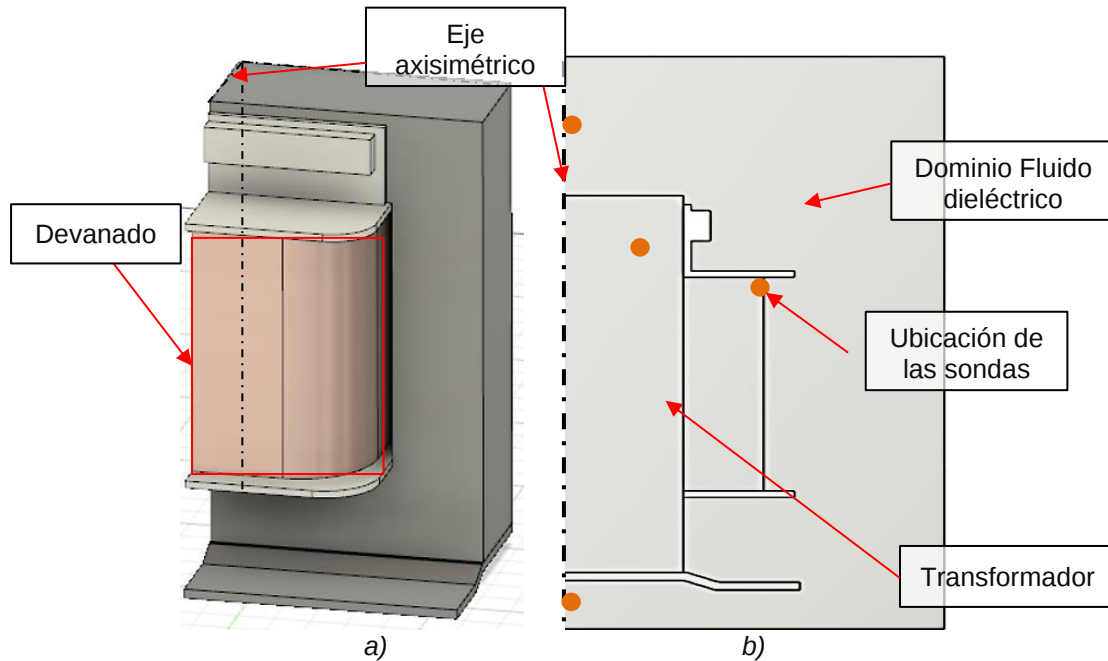


Ilustración 46. a) Modelo 3D y b) modelo 2D. Versiones para la simulación numérica – Fuente: El autor

Con estas simplificaciones se podrán definir condiciones de contorno de simetría para el modelo numérico en Ansys Fluid Flow Fluent, ya que la geometría física que es de interés, y el patrón esperando tanto el flujo como la distribución térmica, con base a la experiencia a trabajos previos y literatura consultada, cuentan con una simetría de “espejo”. Tanto para el modelo 2D como para el 3D se ha omitido el espesor de pared del tanque teniendo en cuenta que la medida es de apenas 3 mm.

5.2.2. Mallado

Se han exportado las geometrías de ambos modelos desde Autodesk Fusion 360 e importado en Ansys. Una vez cargada la geometría del modelo 2D, se generó como una única pieza (*New part*) conformada por 6 piezas, diferenciándose las regiones de sólido y de fluido (Ilustración 47) para que el mallado que se genere cuente con nodos en común para cada una de las interfaces, sea sólido-sólido o sólido-líquido. Tanto para el modelo 2D como para el 3D se empezó con la generación de un mallado por defecto y luego se ha ido parametrizando de tal manera que se fuera ajustando para capturar correctamente los puntos calientes en la máquina, los flujos de fluido, la distribución de temperatura y la capa límite.

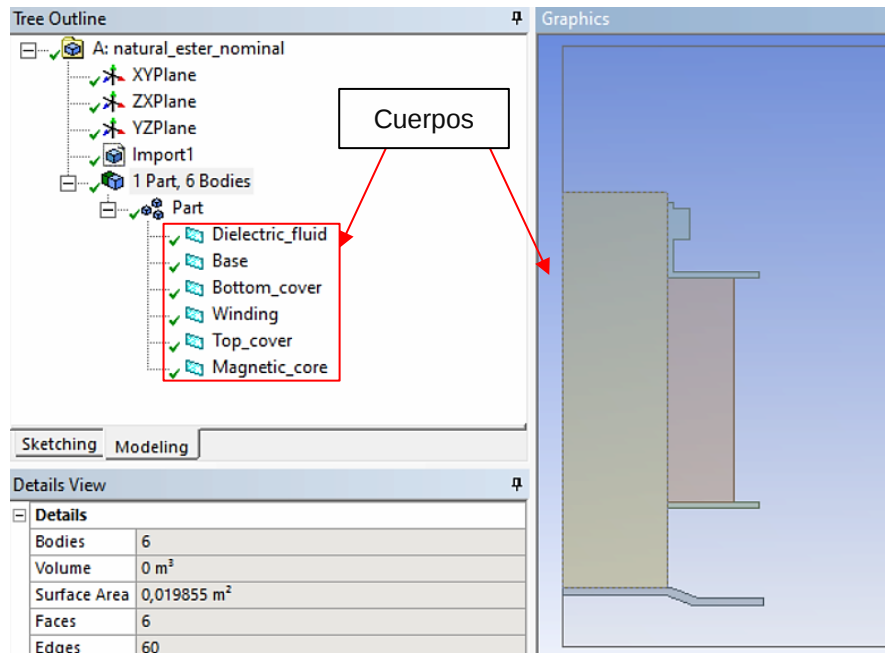


Ilustración 47. Generación de geometría 2D importada - Fuente: El autor

5.2.2.1. Modelo 2D

El mallado generado es el que se observa en la Ilustración 49. En primera instancia, se asignó un tamaño de elemento de 3 mm para cada una de las zonas del modelo, tanto para los dominios sólidos como para el dominio de fluido, con un comportamiento suave ('Soft'). También se estableció un tamaño de borde 0.5 mm para todas las interfaces sólido-sólido y sólido-líquido, definiéndose un refinamiento de malla para estas últimas. En la interfaz entre el fluido dieléctrico y las partes del transformador se asignó una relación de transición de 0.4, con una cantidad de 20 capas y una tasa de crecimiento de 1.2; para la interfaz entre las 'paredes internas del tanque' y el fluido dieléctrico se estableció una relación de transición de 0.3, con 10 capas y una tasa de crecimiento de 1.2. Con esta configuración para el refinamiento de malla ('Inflation') se evitó deformaciones en el mallado del fluido, especialmente en los cambios de dirección de las capas de mallado en el refinamiento. Se seleccionaron elementos lineales de tipo triangular para los componentes del transformador y para el dominio del fluido dieléctrico, y cuadriláteros para el refinamiento de malla, y un nivel de suavizado bajo. Los demás campos se dejaron por defecto. Con dicha parametrización se han obtenido 32336 celdas y 23762 nodos. Ilustración 48.

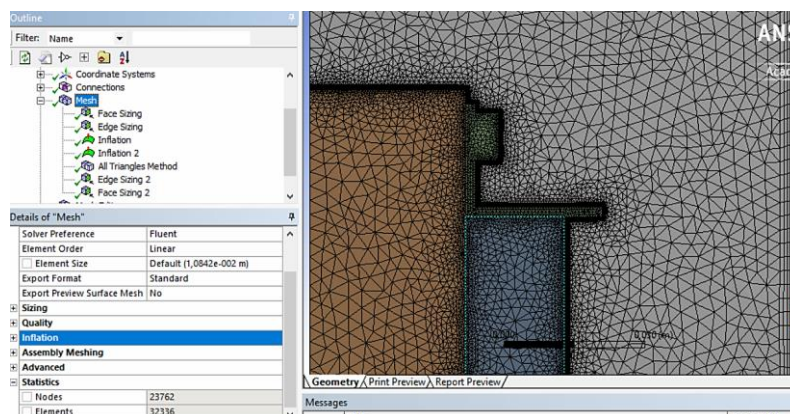


Ilustración 48. Parametrización para el mallado de la geometría en Ansys - Fuente: El autor

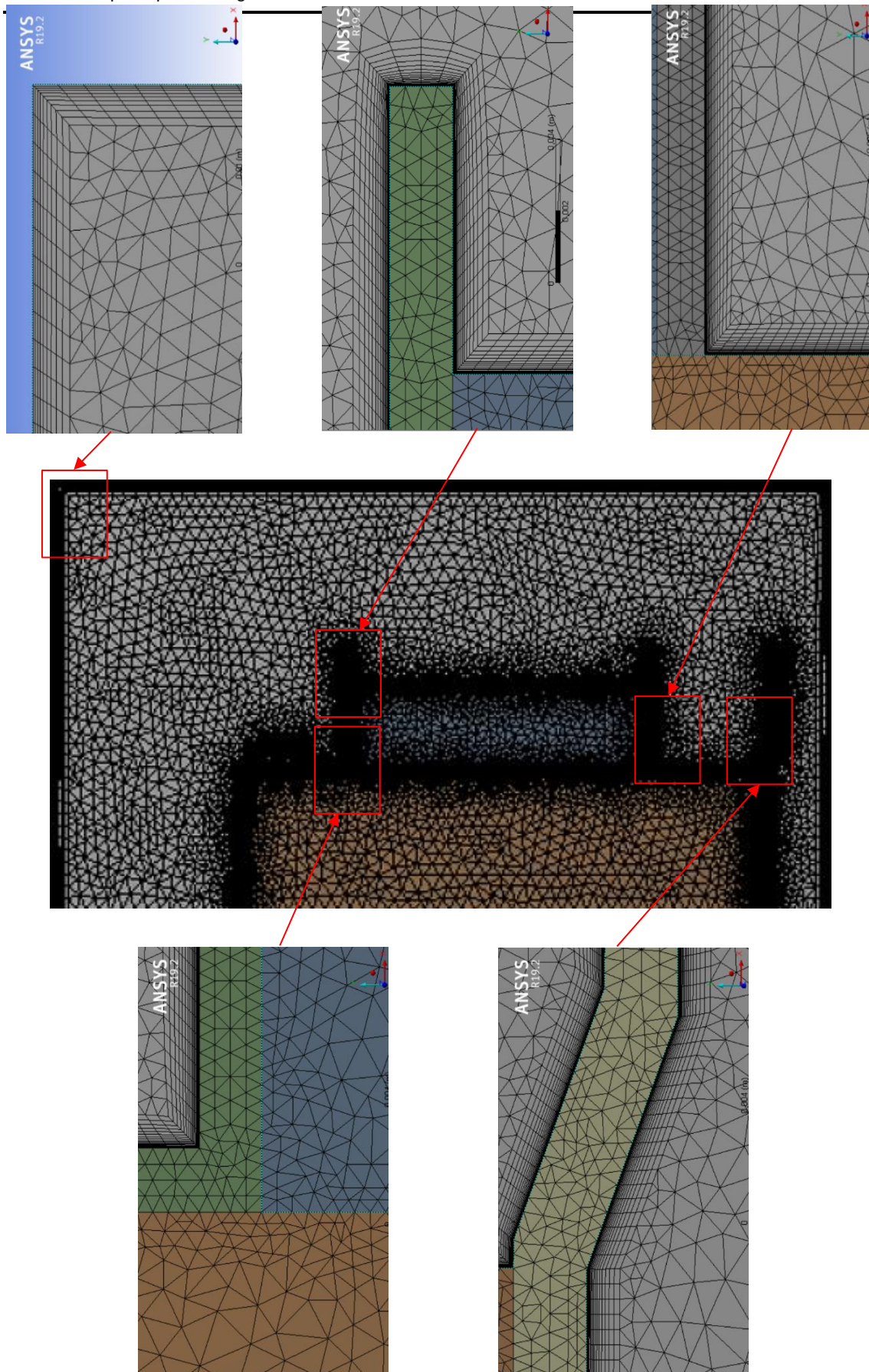


Ilustración 49. Mallado de la geometría - Fuente: El autor

5.2.3. Ecuaciones de Gobierno

A continuación, se describen las expresiones matemáticas de las leyes de conservación que rigen la dinámica de fluidos y transferencia de calor presentes en el problema estudiado.

5.2.3.1. Flujo del fluido y transferencia de calor

Para el presente estudio es menester reconocer que el enfriamiento del transformador se ha dado principalmente por dos mecanismos de transferencia de calor: entre las caras externas de la cuba y el aire frío que se hacía circular sobre estas el enfriamiento ha sido por convección forzada (se empleó un dispositivo mecánico para hacer fluir el aire); y, por otro parte entre los devanados y el fluido dieléctrico, y de este último a las caras internas del tanque, ha sido por convección natural (considerando que lo que determina el flujo del fluido son las fuerzas de flotabilidad).

En trabajos como los realizados por Daghrat *et al.* [21] y Zhang *et al.* [22], se suele emplear la aproximación de Boussinesq para el modelo numérico (utilizada en los casos en los que el fluido es inducido por convección natural) de tal manera que puedan ser abordadas las variaciones de densidad en un fluido, por causa de pequeños cambios en la temperatura, de una manera simplificada, y aplicado a problemas de convección natural. Con esta aproximación, los efectos de compresibilidad estarán asociados a los gradientes de temperatura que son ocasionados por el calentamiento del fluido a través de las superficies de los sólidos con los que pueda estar en contacto, por lo que se busca suponer que la densidad será constante (fluido incompresible) y que solo será relevante en el término de flotabilidad ($F_f = \rho g$) en la ecuación de cantidad de movimiento (ecuación 28).

Sin embargo, para el presente trabajo, considerando las condiciones de temperatura ‘ambiente’ a las que ha sido ensayada la máquina, y las variaciones de viscosidad de los aceites dieléctricos (disminuye con el incremento de la temperatura), no ha resultado conveniente desestimar los cambios de densidad de cada uno de los fluidos, en cada ensayo, para cada instante de tiempo. Es así como el modelo numérico del presente estudio se basa en la solución de las ecuaciones de: continuidad, momento y la energía; correspondientes a las ecuaciones 27, 28 y 29, respectivamente.

Las ecuaciones enunciadas son la que rigen el flujo y transferencia de calor de fluidos incompresibles, teniendo en cuenta que la viscosidad, densidad y demás propiedades físicas de cada uno de los aceites ensayados depende de la temperatura (unos en mayor proporción que otros) y porque no se trata de un modelo para una aplicación a alta presión, por lo que no se deberá cumplir la condición $\partial \rho / \partial t = 0$. En cuanto a la transferencia de calor que se da entre las partes sólidas del transformador, numéricamente se resolverá la ecuación de conducción de calor (ecuación 30). Por otro parte, teniendo en cuenta que para la transferencia de calor por convección natural entre las partes sólidas de la máquina (principalmente los devanados) y el aceite dieléctrico actúan las fuerzas flotantes, por el calentamiento del fluido al estar en contacto con las superficies calientes, estas están representadas por el último término del lado derecho de la ecuación 28: el producto entre la gravedad y la densidad (F_f).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho v) = 0 \quad (27)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla(\rho v)v = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + F_f \quad (28)$$

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \rho C_p v \nabla T = \nabla^2 T k + Q_w \quad (29)$$

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} = k \nabla^2 T + Q_w \quad (30)$$

Donde ρ , t , v , p , μ , F_f , C_p , T , k y Q_w , son la densidad, tiempo, campo de velocidades, presión, viscosidad dinámica, fuerzas de flotabilidad (asociadas a la gravedad), calor específico, temperatura, conductividad térmica y fuente de calor, respectivamente. Como se aprecia, en este caso, y como es de esperarse, las propiedades del fluido no están incluidas en las ecuaciones como constantes. Para finalizar se enfatiza en que, teniendo en cuenta las viscosidades presentes en este tipo de fluidos, el modelamiento que ha sido planteado es para un flujo laminar.

5.2.3.2. Fuente de energía

La generación de calor en el modelo numérico estará asociada a las pérdidas ocurridas en la máquina durante la transformación. Es decir, el término Q_w de la ecuación 29 y 30, el cual hace alusión a la sumatoria de las fuentes de calor presentes, corresponde a las pérdidas de energía en forma de calor ocurridas durante la transformación, que a su vez dependerán del índice de carga (C) y de las pérdidas totales (que se dan en el núcleo - P_{Fe} - y en el cobre - P_w -) en condiciones nominales. Como los ensayos experimentales son a cortocircuito, las pérdidas en forma de calor a evaluar son las ocurridas en los conductores de las bobinas, por lo que la expresión a emplear para dicha estimación es la expresada en la ecuación 31:

$$Q_w = \frac{C^2 \cdot \left(\frac{q_{l,nom}}{2} \right)}{V_{m,w}} \quad (31)$$

Donde $q_{l,nom}$, $V_{m,w}$ y Q_w , son las pérdidas en condiciones nominales [W/m^3], el volumen de medio devanado [m^3] y la fuente de calor o pérdidas en los devanados [W] según el índice de carga C . El volumen por considerar es el resultante de la bobina única obtenida después de la simplificación geométrica (Ilustración 43a); aunque será medio volumen para el modelo 2D y un cuarto del volumen para el caso del modelo 3D simplificado, sumado a que $q_{l,nom}$ también será dividido ya sea entre 2 o 4, según el tipo de modelo correspondiente (alguno de la Ilustración 46).

5.2.4. Definición del Solver y Modelos

Para la definición del modelo en Ansys Fluid Flow Fluent, teniendo en cuenta que es un problema de dinámica de fluidos y de transferencia de calor con variaciones de temperatura considerables en todo el dominio del modelo, se ha empleado el solucionador *basado en presión*, ya que es el que se suele emplear (y recomienda) para problemas de este tipo en flujos que son incompresibles o ligeramente incompresibles. Como fue mencionado anteriormente, al tratarse de fluidos cuya viscosidad se ve afectada por la temperatura, en las condiciones de operación se activó la gravedad y se definió en dirección y como $g = -9.81 \text{ m/s}^2$ (ver la Ilustración 50), la presión se ha dejado por defecto la atmosférica a nivel del mar, y no se especificó una densidad de operación constante (aplicable para la aproximación de Boussinesq), sino que, en la definición de las propiedades del fluido, la densidad y las demás propiedades fueron incluidas como función de la temperatura. Como no se ha definido una densidad de operación constante, Ansys Fluent la estimará promediando los valores de densidad

de las celdas de la zona de fluido. Adicionalmente, se ha definido como un problema en estado estable.

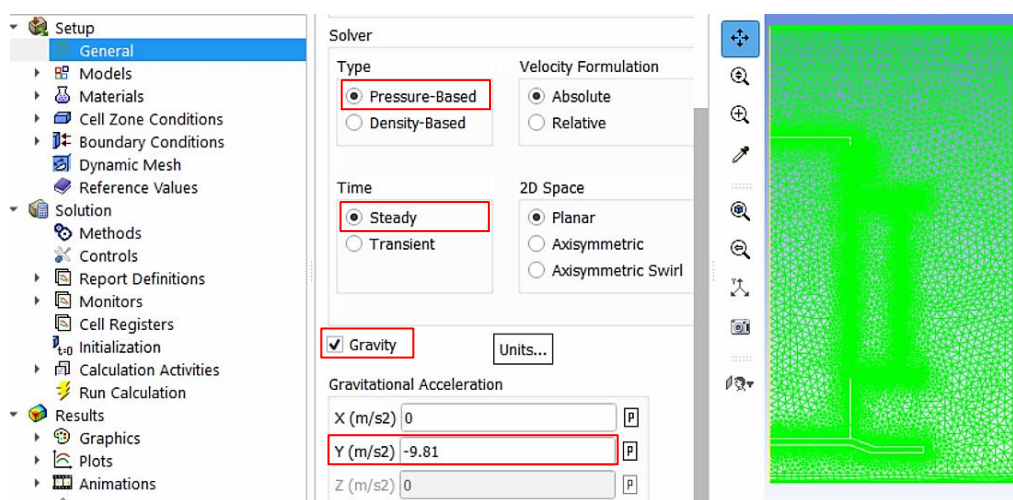


Ilustración 50. Definición de parámetros para el solver - Fuente: El autor

Para estas mismas condiciones, se ha activado la ecuación de la energía y como modelo viscoso (también conocido como modelo de turbulencia) el de tipo (flujo) laminar, como se observa en la Ilustración 51; los demás modelos se han dejado por defecto desactivados ya que no son aplicables al presente trabajo. Por defecto, para la zona de fluido se ha considerado que el fluido dieléctrico está en una sola fase, no como una mezcla de componentes, de allí a que tampoco se encuentre activado ni configurado el modelo multifase ('*Multiphase*').

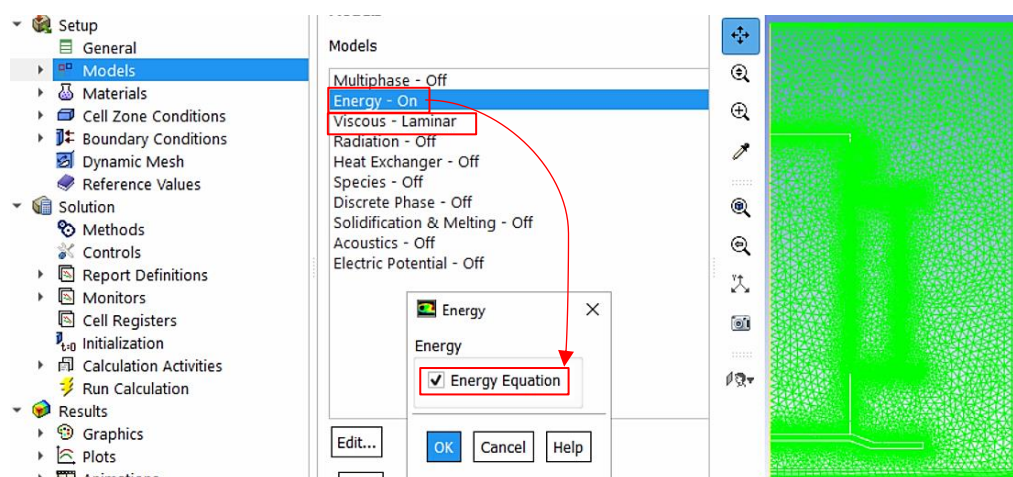


Ilustración 51. Selección de los modelos aplicables para la simulación numérica - Fuente: El autor

5.2.5. Definición de los Materiales

Para cada una de las simulaciones numéricas, para la definición de las propiedades físicas de cada fluido dieléctrico, se han empleado funciones polinomiales dependientes de la temperatura (en Kelvin). En cuanto a los materiales sólidos (del transformador y cuba), las propiedades se han fijado como valores constantes.

5.2.5.1. *Propiedades de los fluidos*

Para este tipo de modelos, considerando lo expuesto por Moore *et al.* [6], las propiedades de los fluidos dieléctricos que son de mayor interés son la densidad, viscosidad, el coeficiente de expansión térmica, el calor específico y la conductividad térmica, las cuales influyen tanto en la fricción que pueda haber entre el aceite al fluir a través de las partes del transformador, como en el coeficiente de transferencia de calor entre los devanados y fluido. Para la definición de cada uno de los fluidos empleados (aceite mineral, éster natural y éster sintético) del modelo numérico en Ansys Fluid Flow Fluent se ha incluido como propiedades físicas la densidad [ρ], viscosidad dinámica [μ], calor específico [C_p], conductividad térmica [k].

Teniendo en cuenta que el componente numérico del presente trabajo consistente en un modelamiento que incluye la transferencia de calor y que los flujos son incompresibles, la densidad ha sido definida como una función polinomial, y que depende únicamente del perfil de temperatura, esta es la situación habitual para problemas como este en el que hay un flujo no isotérmico en convección natural. Las demás propiedades también han sido definidas como funciones polinomiales dependientes de la temperatura: La viscosidad por tratarse de un flujo que no es isotérmico y por ser un modelamiento de transferencia de calor; en cuanto al calor específico de cada fluido, este debe incluirse para la solución de la ecuación de la energía; la conductividad térmica, además de deberse a un modelo de transferencia de calor, por incluirse en la solución de la ecuación de la energía y por tratarse de flujos de tipo viscoso.

Para la ρ , C_p y k se ha considerado las expresiones matemáticas que les describen en función de la temperatura y que han sido utilizadas en el trabajo de [20]; en la Ilustración 52 se observa la curva de cada una de dichas propiedades físicas y su función polinomial correspondiente; la temperatura en kelvin [K]. Teniendo en cuenta que en trabajos donde se estudia la capacidad de refrigeración del transformador sumergido en diferentes fluidos dieléctricos se estiman las propiedades de interés de dichos líquidos, como es el caso de la investigación de Donbek *et al.* [7], adicional a la relevancia que tienen propiedades como la viscosidad para estos estudios, las viscosidad de cada fluido en el que fue sumergido el transformador se ha obtenido, como función de la temperatura, a partir de los ensayos experimentales realizados con el viscosímetro (véase la Ilustración 71).

Las funciones que se observan en la Ilustración 52 y la Ilustración 71, las cuales representan las propiedades de cada fluido, han sido las incluidas en Ansys Fluent. En la Ilustración 53 se observa la definición de las propiedades del fluido como tipo polinomial para el éster natural, y en la Ilustración 54 se aprecia como se especifican los coeficientes de la función polinomial de la densidad del éster natural. Dicho procedimiento se ha repetido para cada una de las cuatro propiedades de cada fluido para cada simulación.

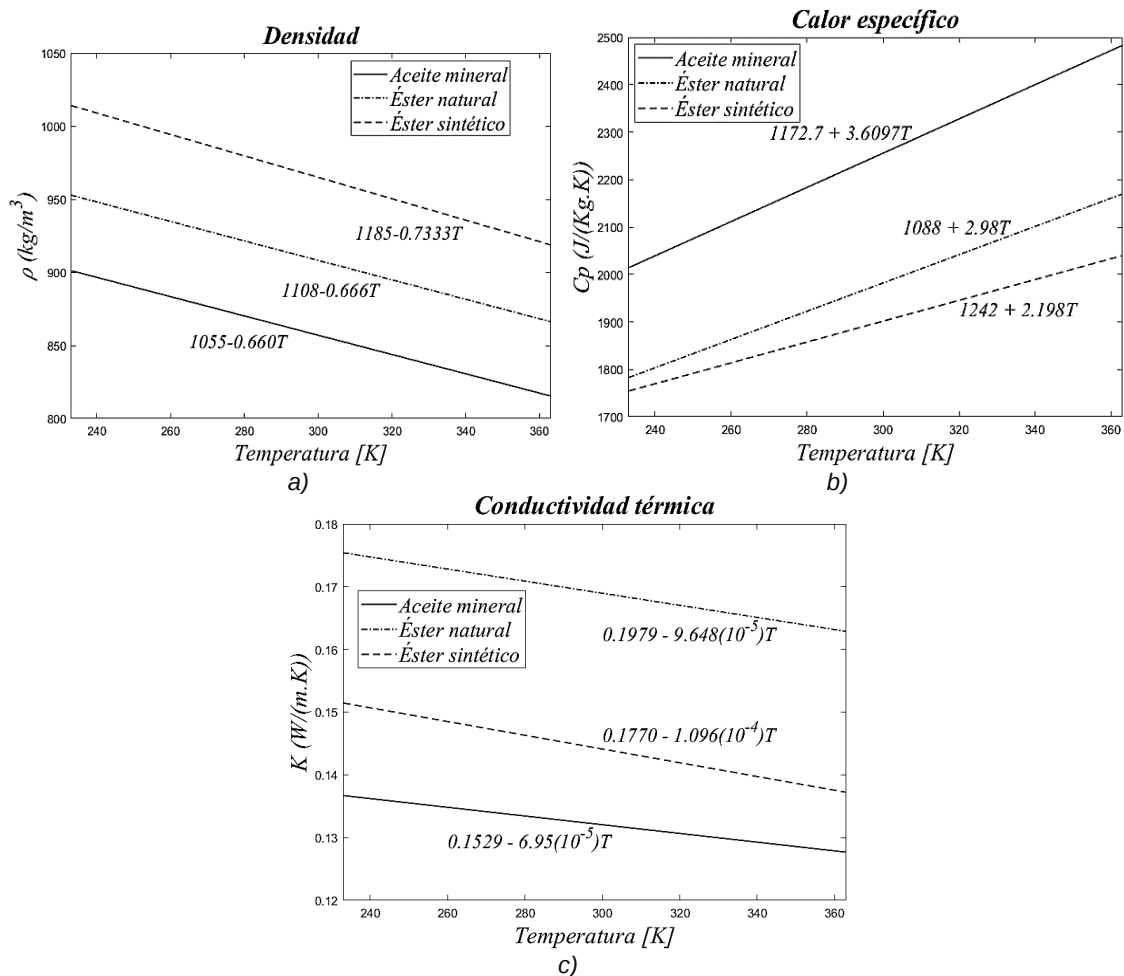


Ilustración 52. a) Densidad, b) Calor específico y c) Conductividad térmica de los fluidos dieléctricos ensayados - Fuente: El autor a partir de [20]

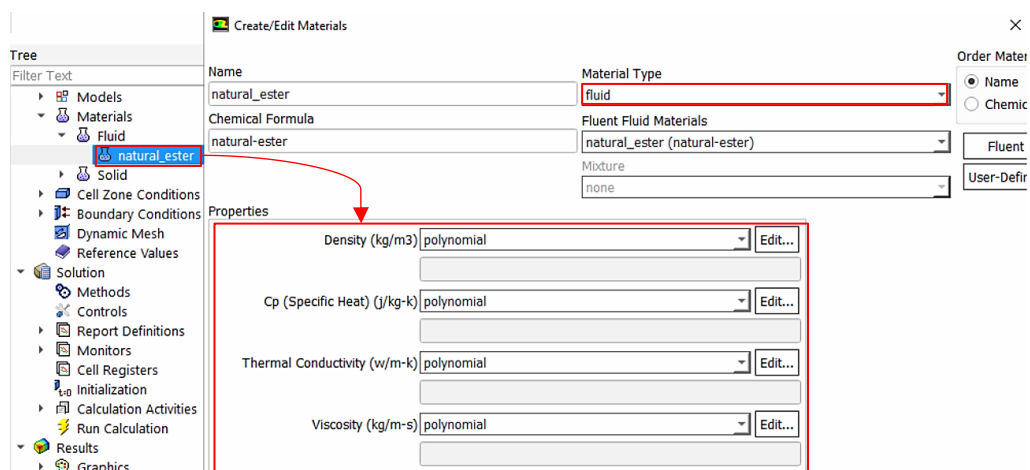


Ilustración 53. Definición de las propiedades del éster natural como tipo polinomial - Fuente: El autor

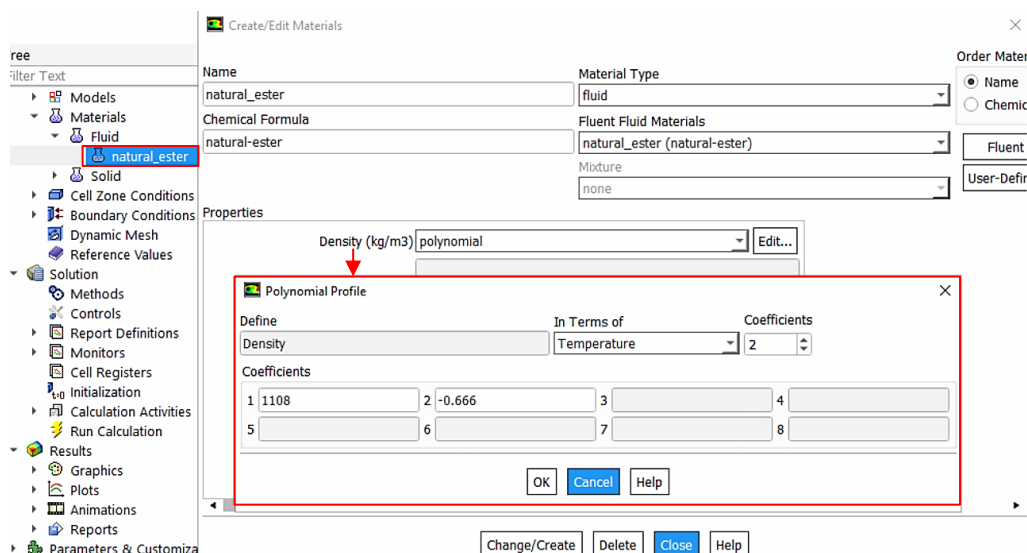


Ilustración 54. Definición de los coeficientes de la función polinomial que hace referencia a la densidad del éster natural – Fuente: El autor

5.2.5.2. Propiedades de los materiales

En cuanto a los componentes del transformador y la cuba, se ha considerado que: las tapas de los devanados están hechas de plástico acrílico; los devanados están hechos de alambre de cobre; el núcleo magnético de la máquina es de acero al silicio; y, tanto la base del transformador, como la cuba, son de acero comercial 4340. Dada la escasa o nula influencia en la transmisión de calor de los pernos y el papel dieléctrico, no se han considerado en las simulaciones, por lo que no se han definido sus propiedades. Las propiedades más relevantes de dichos materiales, y que son necesarias incluir en el modelo numérico, son las enlistadas en la Tabla 3.

Tabla 3. Propiedades físicas de los materiales de los que están hechas las piezas del transformador y cuba - Fuente: A partir de [18] y la librería de materiales Ansys Fluent

Material	$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$Cp = \frac{J}{kg \cdot K}$	$k \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$
Cobre	8978	381	387.6
Plástico acrílico	1190	1470	0.18
Acero al silicio (SI) GO 3%	7650	460	30.5
Acero AISI 4340	7850	475	44.5

De los materiales de la Tabla 3 han sido creado en Ansys Fluent el Plástico acrílico, el acero al silicio y el acero 4340, incluyéndose sus propiedades como valores de tipo constante, similar a lo hecho para el acrílico plástico, como se observa en la Ilustración 55. Para este caso y los demás materiales, como es de esperarse, el tipo de material ha sido 'solid'. En cuanto al cobre, este ha sido seleccionado de la base de datos de Fluent, aunque sus propiedades también son constantes y son los mismos valores de la Tabla 3.

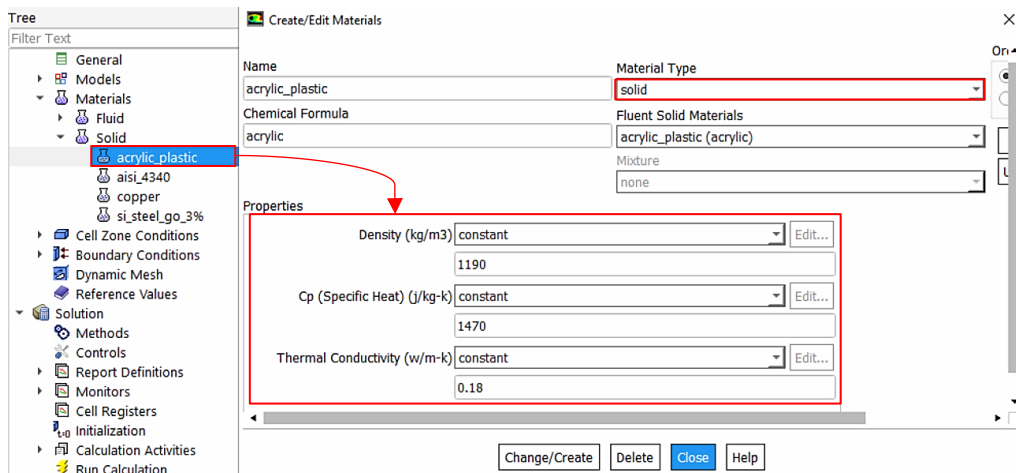


Ilustración 55. Definición de las propiedades del acrílico plástico – Fuente: El autor

5.2.6. Parametrización de las Zonas de Sólido y de Fluido del Modelo

En Ansys Fluent es importante asignar el sólido o fluido correspondiente a cada una de las zonas o piezas de la geometría del modelo, de tal manera que las propiedades anteriormente definidas se asignen al dominio del fluido o a las partes sólidas correspondientes y así el software pueda resolver las ecuaciones 27, 28, 29 y 30. Para el presente trabajo cada zona hace referencia a una de las piezas del transformador y al dominio del fluido. Para todas las zonas que se observan en el recuadro 'Cell Zone Conditions' de la Ilustración 56 se les ha asignado el material correspondiente, el mismo que se les ha establecido en la sección 5.2.5.2.

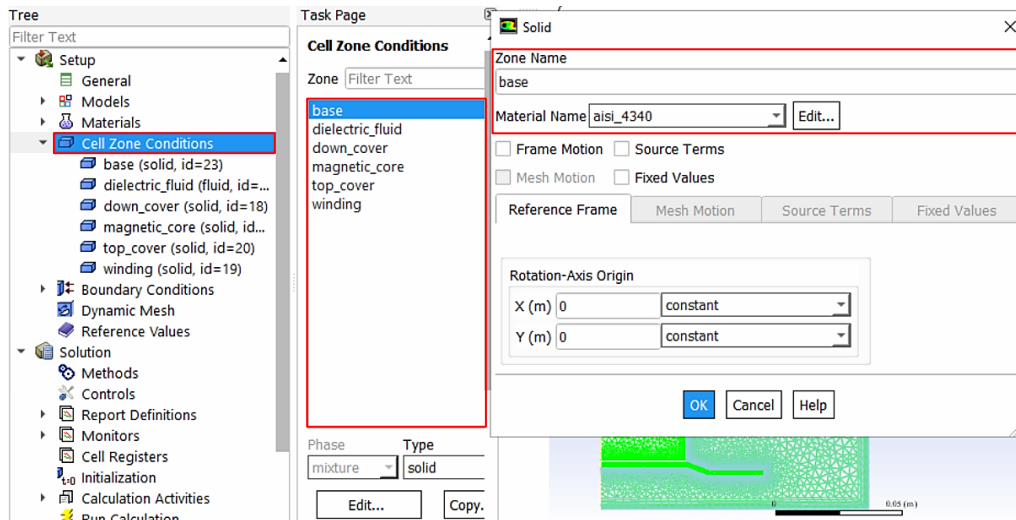


Ilustración 56. Asignación de material (Acero AISI 4340) a la zona base - Fuente: El autor

5.2.6.1.1. Fuente de calor

Para caracterizar el calor generado en el interior de la máquina se ha asumido que el devanado resultante de la simplificación geométrica (Ilustración 43a) concentra todas las pérdidas ocurridas en el transformador. Para llevar a cabo esta parametrización en Ansys Fluent, a la zona del devanado en el modelo ('winding'), además de habersele asignado el material cobre, se definió como una fuente de energía (en forma de calor)

constante por unidad de volumen [W/m^3]. Esta definición debe seguirse sin importar si el modelo es 2D o 3D, y para estimar el volumen se ha tenido en cuenta el modelamiento CAD correspondiente: para el presente trabajo corresponde a la zona delimitada por el recuadro rojo del modelo 2D, el cual hace referencia a medio devanado y que se puede observar en la Ilustración 64. Si se estuviera abordando el modelo 3D simplificado, el volumen sería el correspondiente a un cuarto de devanado, y es el que se observa en la Ilustración 46. Por otro lado, el valor de la fuente de calor constante a introducir en el modelo de Ansys Fluent (ver la Ilustración 57) se ha estimado para cada simulación utilizando la ecuación 31, teniendo en cuenta el índice de carga, el volumen de dicha fuente de calor y considerando unas pérdidas en condiciones nominales de operación fijadas en $\approx 20\text{W}$ (tal y como se fijó en [31]).

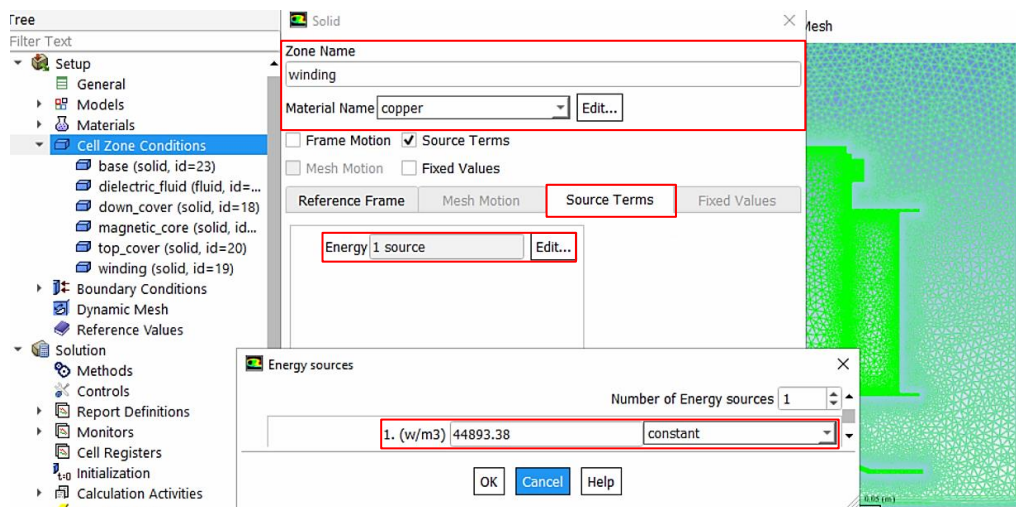


Ilustración 57. Definición de la zona del devanado como una fuente de energía en forma de calor a carga nominal - Fuente: El autor

5.2.7. Condiciones de Frontera e Iniciales

En el presente estudio no se evalúan condiciones de frontera ya que no hay presencia o no se considera las variaciones de masa, velocidad y dirección flujo, temperatura, presión, condición de turbulencia, etc, en una entrada y/o salida del volumen de control (que en este caso corresponde al transformador-fluido-cuba). En lugar de ello, se han definido unas condiciones de contorno de pared ('wall'), empleadas habitualmente para la delimitación de fluidos y sólidos. También se han fijado las condiciones de contorno de simetría, pero para dichos límites de simetría (Ilustración 46) no se ha definido ninguna condición de frontera. Ilustración 58.

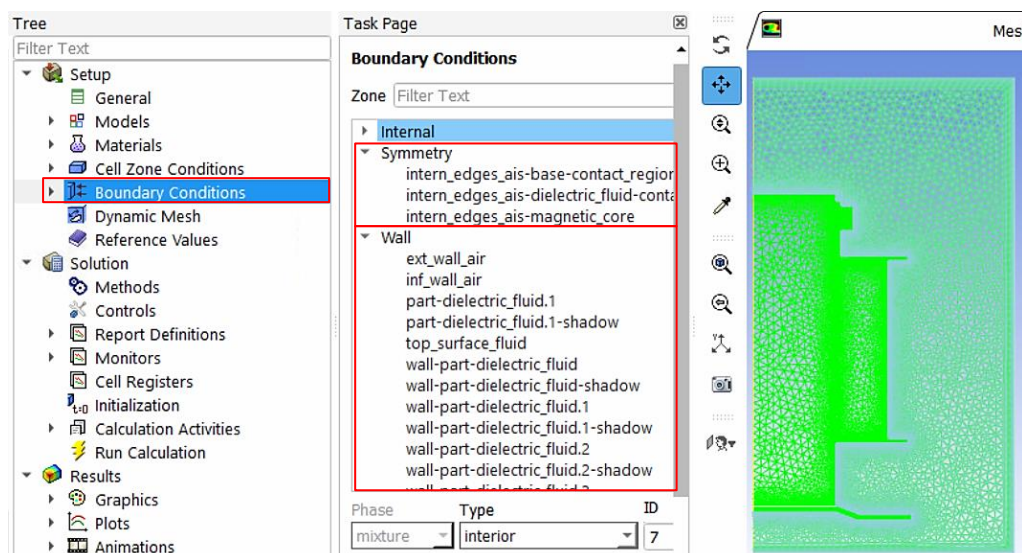


Ilustración 58. Definición de las condiciones de pared y de simetría - Fuente: El autor

Los parámetros ajustados para las condiciones de frontera de pared han sido: *condiciones de momento* (incluye parámetros para la solución de la ecuación de momento -flujo del fluido-) y *condiciones de frontera térmicas* (necesarias para los cálculos de transferencia de calor, ecuación de la energía). Para aquellas condiciones de pared que resulten ser la interfaz de dos regiones del tipo sólido-líquido, donde las zonas de sólido hacen referencia a las partes del transformador y el líquido es el aceite dieléctrico (distinguidas en el software como “paredes de dos lados”), Ansys Fluent genera por defecto para el modelo una zona de pared para cada lado, y que pueden ser reconocidas como “Shadow Face Zone” (zonas de cara de sombra). Los lados de pared asociados a las zonas de sólido se diferencian porque al final del nombre asignado se incluye la palabra ‘shadow’. A este tipo de lados de pared se les ha definido la condición térmica acoplado (‘Coupled’), para lo cual solo ha sido necesario asignar el material a la zona correspondiente, como se observa en la Ilustración 59.

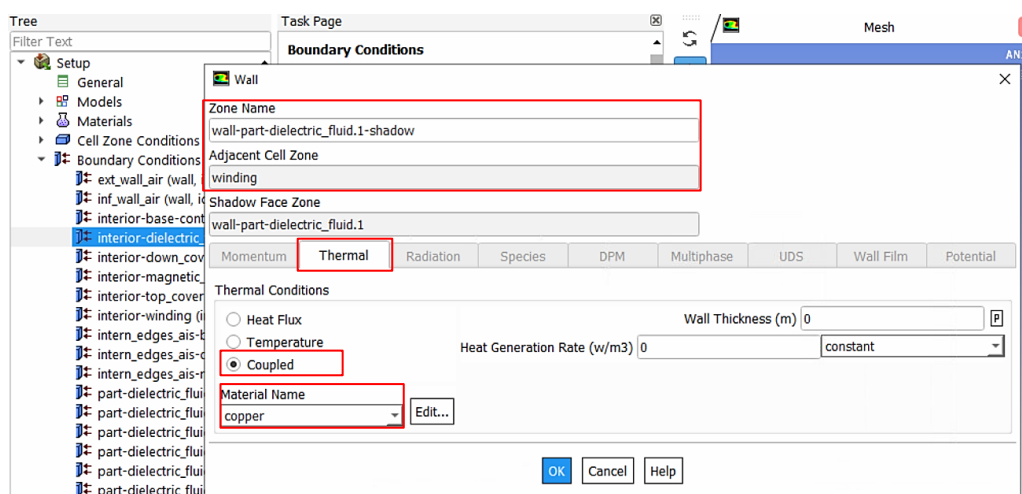


Ilustración 59. Definición de condición térmica para los lados de pared sólidos - Fuente: El autor

En cuanto a los lados de pared que hacen referencia a las zonas de fluido, ha sido necesario establecer la condición térmica y de momento. Para esta última se ha definido una *condición de frontera de no deslizamiento* en el apartado de condición cortante de

Ansys Fluent (es decir, la velocidad del fluido será igual a la de la pared con la que está en contacto), y como las paredes son de tipo estacionarias, la velocidad del fluido será igual a la de la pared está última estará una velocidad cero: $v_{\text{fluido}} = v_{\text{pared}} = 0$ (Ilustración 60). Además de estar la sección de fluido que está en contacto con las caras internas de las paredes del tanque y las partes del transformador a una velocidad igual a cero, se omite cualquier efecto asociado a la rugosidad de las regiones sólidas (rugosidad=0).

Para este mismo lado de pared, pero en cuanto a la condición térmica, se ha definido, al igual que los lados de pared sólidos, la condición de acople térmico y se ha fijado el material de la parte sólida (ver Ilustración 61). Con este acople térmico los nodos de las interfaces tendrán las mismas propiedades para cada zona. Así mismo, el límite de simetría corresponde a los tramos de núcleo, base y fluido dieléctrico señalados en el contorno (línea a trazos) de la Ilustración 46b.

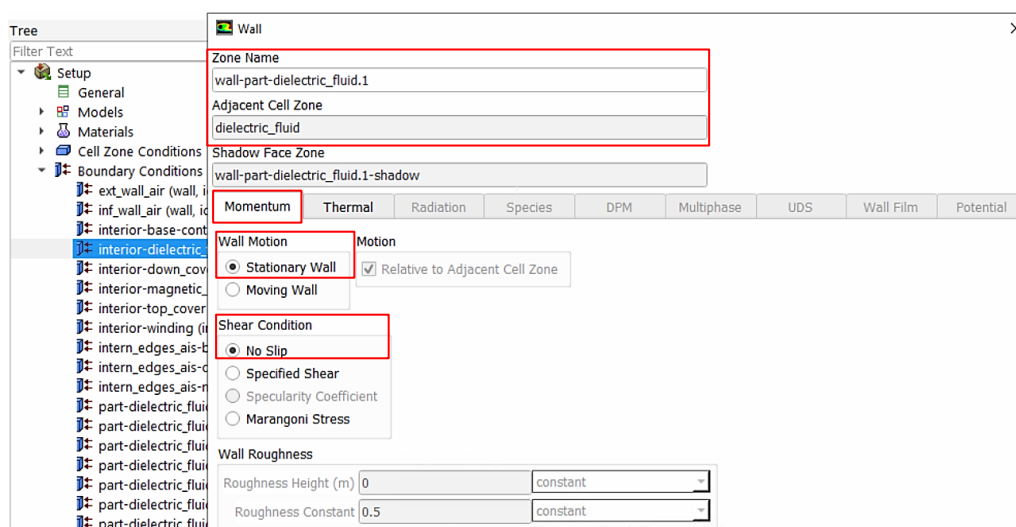


Ilustración 60. Definición de condición de momento para los lados de pared de fluido - Fuente: El autor

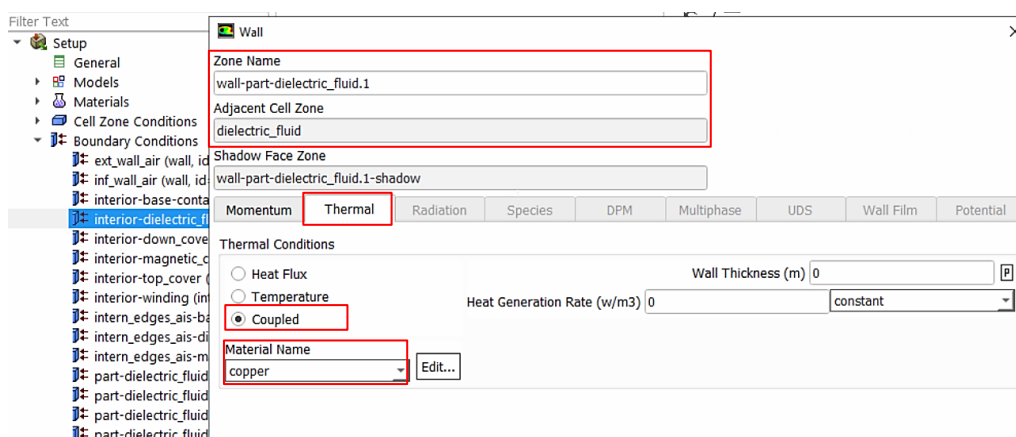


Ilustración 61. Definición de condición térmica para los lados de pared de fluido - Fuente: El autor

El anterior procedimiento se ha llevado a cabo para todas las 'paredes de dos lados' que han sido generadas para el modelo. Para determinar los valores de las variables físicas presentes en los ejes de simetría no se hace necesario establecer condiciones térmicas adicionales, ya que al definirse la condición de acople térmico el solucionador de Ansys Fluent estimará la transferencia de calor a partir de los valores obtenidos de la solución de los nodos de las celdas adyacentes, sea una zona de sólido o de fluido.

De allí a la importancia de que se haya garantizado que, en la definición CAD del modelo, las interfaces compartan los nodos correspondientes.

Ahora bien, para la condición de pared donde el límite hace referencia al fluido que estaría en contacto con las paredes de la cuba (aunque geométricamente no se ha definido dicho espesor), y estas últimas con el aire enfriado que circula en el cajón de madera, se ha precisado una condición de contorno de transferencia de calor por convección para la condición térmica (véase la Ilustración 62), por lo que se omite cualquier transferencia de calor por radiación. Para esta zona no está definida por defecto un acople térmico pues el modelo no tiene definida explícitamente una zona de fluido para el aire circundante. La definición de dicha condición ha requerido dos parámetros: una *temperatura de flujo libre* (es constante y ha sido la temperatura promedio registrada del flujo de aire en el interior del cajón para cada ensayo) y el *coeficiente de transferencia de calor* (es constante y hace referencia a los h calculados de la Tabla 8). Se han llevado a cabo nueve experimentos, y la temperatura promedio registrada experimentalmente con las sondas suspendidas al interior del cajón (ver la Ilustración 30) fue de $4^{\circ}\text{C}=277.15\text{K}$. Para la condición de momento para este tipo de límites, la parametrización realizada es la de la Ilustración 63: paredes estacionarias y no deslizamiento para la condición de esfuerzos cortantes.

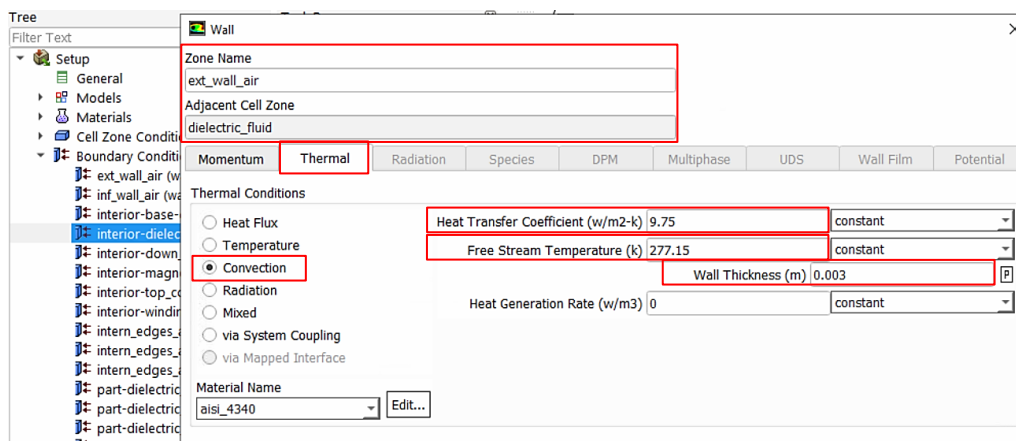


Ilustración 62. Definición de condición térmica de transferencia de calor por convección entre fluido y aire frío circundante - Fuente: El autor

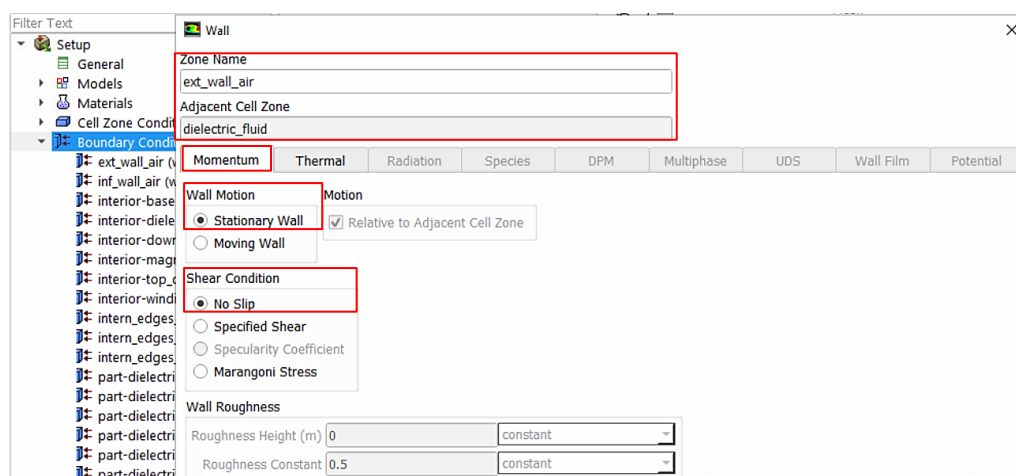


Ilustración 63. Definición de condición de momento para los límites que están en contacto con el flujo de aire enfriado - Fuente: El autor

Con los parámetros anteriormente descritos para la condición de convección Ansys Fluent evalúa la transferencia de calor por la pared con la ecuación de la Ley de la Enfriamiento de Newton. Por otro lado, aunque geométricamente no se distingue el espesor del tanque, además de que por defecto en las condiciones de frontera el espesor de pared es cero, se ha asignado un grosor de pared de 3 mm y definido el tipo de material que tendría dicha pared (Acero AISI 4340); con estos datos, el software resolverá la ecuación de conducción de calor para determinar tanto la resistencia térmica como la generación de calor en las paredes de la cuba. Considerando la elevada conductividad térmica que tiene el metal del que está hecho la cuba, y su reducido grosor de pared, podría omitirse estos aspectos para los cálculos numéricos teniendo en cuenta que la resistencia térmica sería casi despreciable.

Continuando, para este tipo de ensayos se suele emplear un coeficiente de transferencia de calor para convección natural en aire de $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, una aproximación realizada en trabajos como el de [22]. No obstante, por el foco de investigación del presente trabajo, la componente experimental se ha llevado a cabo bajo condiciones de enfriamiento por convección forzada (aunque hayan sido velocidades de flujo relativamente bajas), por lo que se ha decidido calcular analíticamente dicho valor. Para ello se han usado las correlaciones empíricas del número de Nusselt [Nu], número de Prandtl [Pr] y el número de Reynolds [Re].

Inicialmente, se ha utilizado una de las expresiones definidas para evaluar el Nu promedio para toda una placa plana isotérmica, para luego estimar el coeficiente de transferencia de calor por convección [h] promedio sobre dicha placa. En este sentido, la formulación a emplear dependerá de si el flujo es laminar o turbulento, ecuación 21 y 22, respectivamente. Por otro lado, para determinar Re, y con ello reconocer si el flujo del aire libre es laminar o turbulento (es decir, para poder evaluar ya sea la ecuación 21 o 22) y así estimar Nu con la ecuación correspondiente, se ha empleado la ecuación 15. Para estimar Re, la longitud característica de la geometría será la de una placa plana.

El número Prandtl será el de la temperatura de película [T_p] del fluido, que no es más que la temperatura promedio entre la temperatura del fluido libre [T_f] y la temperatura de la superficie [T_s] con la que está en contacto: $T_p = (T_f + T_s)/2$, por lo que se supone que las propiedades del fluido se mantendrán constantes en dichos valores a lo largo de todo el flujo. Así como Pr, las demás propiedades termodinámicas del fluido, que este caso es aire, fueron obtenidas de la Tabla A-15 del libro [29]. Una vez se ha calculado Nu, se podrá evaluar el h al despejarlo de la ecuación 20.

Para poder emplear las expresiones seleccionadas se debe asumir que la temperatura en cada una de las caras de la cuba es la misma en cada punto, es decir, que son isotérmicas, lo cual no está fuera de lugar si se tiene en cuenta que experimentalmente se controló la temperatura del aire circundante y que se dio inicio al ensayo (y con ello se empezaba a dar un calentamiento del fluido) una vez se alcanzaba la temperatura mínima posible en el interior del cajón. Por otro lado, se han considerado las expresiones empíricas para placa plana teniendo en cuenta que la geometría del tanque que contiene el transformador lo permite, es decir, puede evaluarse como un cubo, donde cada cara es aproximadamente plana, una apreciación aceptable teniendo en cuenta que las tuercas y manijas de la tapa del transformador no son de un volumen y dimensiones lo suficientemente relevantes como para provocar variaciones representativas en el flujo de aire.

Esta última descripción procedimental ha sido aplicada para los límites con condición de frontera térmica de convección (tres en total). Como la velocidad de flujo de aire ha sido

diferente en cada superficie del tanque, el h estimado para cada una de dichas caras también ha sido diferente.

Las condiciones anteriormente descritas, convección natural en el aceite contenido en la cuba y forzada en el aire exterior a la misma, pueden reconocerse gráficamente en la Ilustración 64. Además, la descripción de dichas condiciones de contorno, junto a los planteamientos de la sección 5.2.6, expone claramente que el flujo y transferencia de calor del modelo del presente trabajo están acoplados, lo que se traduce en afirmar que hay propiedades dependientes tanto de la temperatura como de las fuerzas de flotación: especialmente para el aceite dieléctrico.

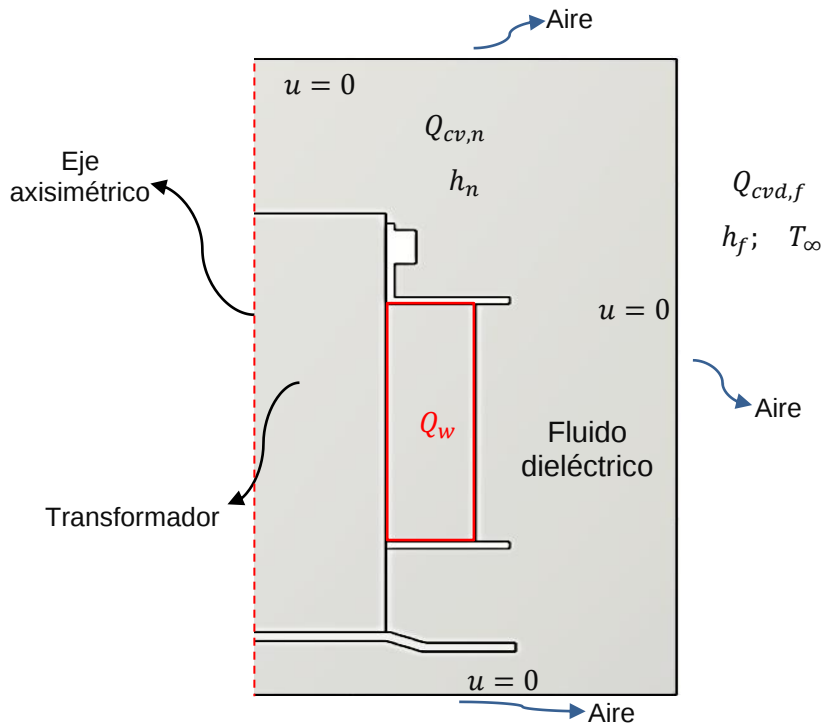


Ilustración 64. Definición de las condiciones de frontera - Fuente: El autor

5.2.8. Método de Solución: Solver

En primera instancia, si bien para el acoplamiento presión-velocidad (*Pressure-Velocity Coupling*) se puede obtener una implementación más robusta y eficiente con el algoritmo acoplado (*'Coupled'*) para flujos en estado estacionario, se ha empleado el método SIMPLEC (SIMPLE-Consistente), teniendo en cuenta que al tratarse de un problema en estado estable y que involucra un flujo del aceite dieléctrico de tipo laminar, con este método se puede obtener una solución que converja más rápido.

Para el esquema de discretización espacial, el gradiente seleccionado, necesario para la solución de la ecuación de continuidad (derivadas de la velocidad y términos de difusión secundarios) ha sido el Green-Gauss Cell Based. Continuando con el resto de la parametrización de la discretización espacial, como este es un problema monofásico (es decir, el fluido no está conformado por distintas fases) en el que se ha definido utilizar el solucionador basado en presión, para su solución se ha seleccionado, de las opciones de esquema de discretización que ofrece Ansys Fluent, la discretización de segundo orden para los términos de convección de cada ecuación de flujo (*Momentum* → *Second Order Upwind*) y las ecuaciones escalares (*Pressure* → *Second Order*); para las cantidades de turbulencia se ha seleccionado la discretización de segundo orden

(Energy $\rightarrow$ Second Order Upwind). Ver Ilustración 65. El factor de relajación se ha establecido en 0.7 por tratarse de un estudio en estado estable y para evitar inestabilidades en el modelo, Ilustración 66.

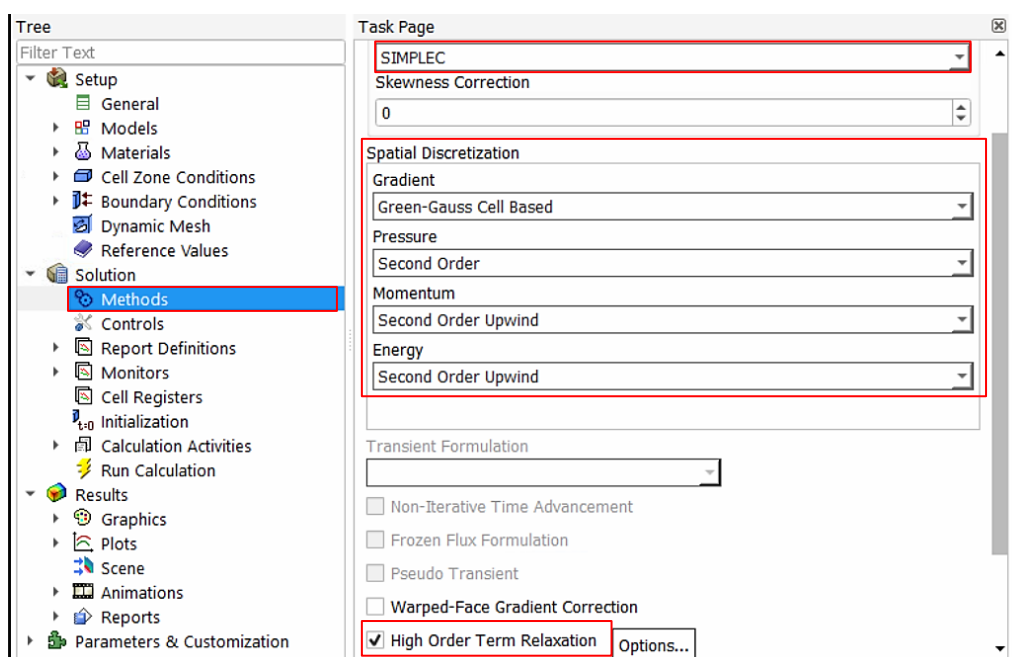


Ilustración 65. Configuración para la discretización espacial del método de solución del modelo - Fuente: El autor

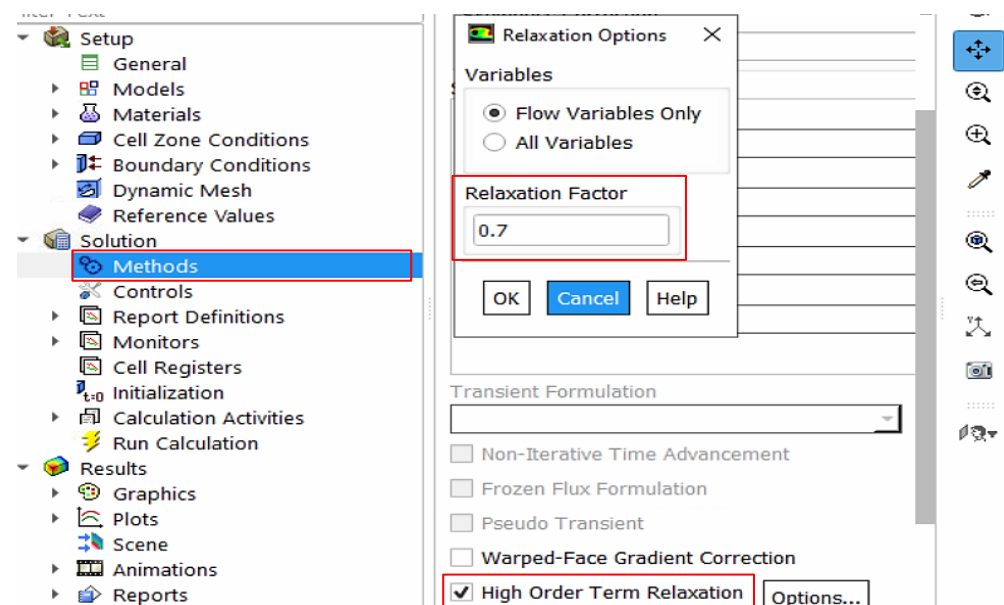


Ilustración 66. Configuración del método de acople de velocidad-presión y del factor de corrección-relajación – Fuente: El autor

Aunque en las zonas de refinamiento de malla tiene celdas de tipo cuadrilátero, gran parte del dominio de fluido y de las zonas de sólido poseen un mallado triangular, de tal manera que el flujo no estará alineado con la malla. Teniendo en cuenta lo anterior, y en miras de llegar a obtener resultados más precisos, fue la razón por la que se

seleccionó las discretizaciones de segundo orden. Con el de primer orden se obtiene una mejor convergencia, pero resultados menos precisos.

Como se emplean discretizaciones espaciales de orden espacial superior a uno se ha habilitado la Flexibilización de Términos de Elevado Orden (*High Order Term Relaxation- HOTR-*). Se ha habilitado esta opción, como se observa en la Ilustración 66, ya que se ha buscado lograr una mejora en el arranque y comportamiento de las soluciones de las simulaciones del flujo, de tal manera que se busque evitar estancamiento de convergencia, pues los términos de orden superior pueden conducir a inestabilidades numéricas.

En cuanto al factor de relajación y corrección de presión (*pressure-correction under-relaxation factor*) aunque puede fijarse en 1.0 para acelerar la convergencia, se ha establecido en 0.25 con el fin de evitar inestabilidades en el modelo por la asimetría que puede haber en el mallado, especialmente en el dominio del fluido; y por defecto para los demás factores que se observan en la Ilustración 67.

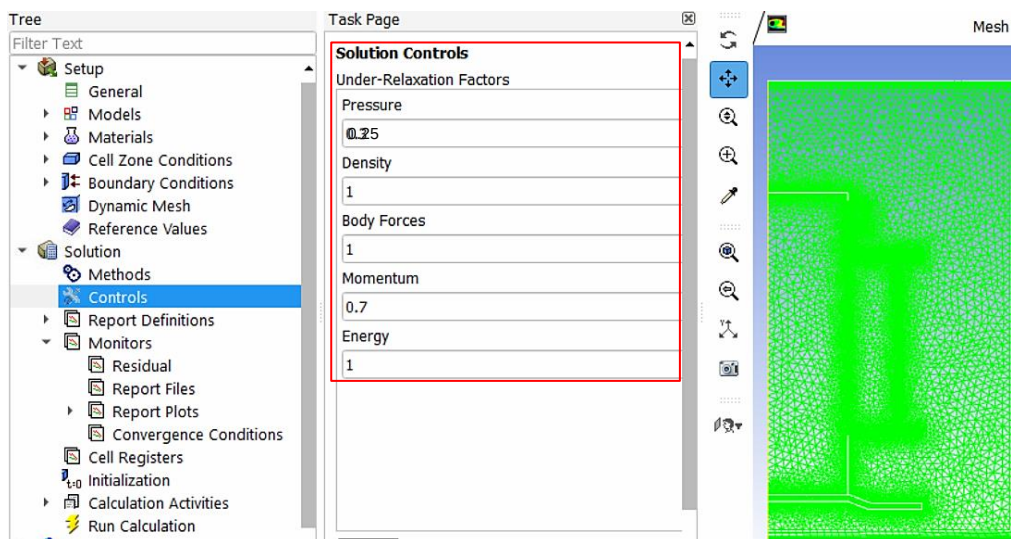


Ilustración 67. Definición de los factores de falta de relajación – Fuente: El autor

5.2.9. Condiciones de Convergencia e Inicialización

Como parámetros de ajuste para las condiciones de convergencia se definió un residuo para la ecuación de energía de 1×10^{-6} y de 1×10^{-4} para las ecuaciones de continuidad y de momento, como se observa en la Ilustración 68.

Para la inicialización del campo de flujo de todo el dominio del modelo se ha seleccionado el método estándar (*Standar Initialization*) como se aprecia en la Ilustración 69, lo cual se traduce en que Ansys Fluent emplee los valores medios calculados; y para ello se ha asignado una temperatura inicial. Como temperatura inicial se ha asignado la temperatura a la cual se inició el ensayo a corto circuito con el fluido y condición de carga correspondiente. Por otro lado, para completar de parametrizar dicha inicialización, se han seleccionado todas las zonas (*all zones*) del modelo para que se les aplique dicha inicialización. A partir de ellos Ansys Fluent ha calculado y actualizado los valores iniciales teniendo en cuenta todas las condiciones definidas en las zonas de contorno.

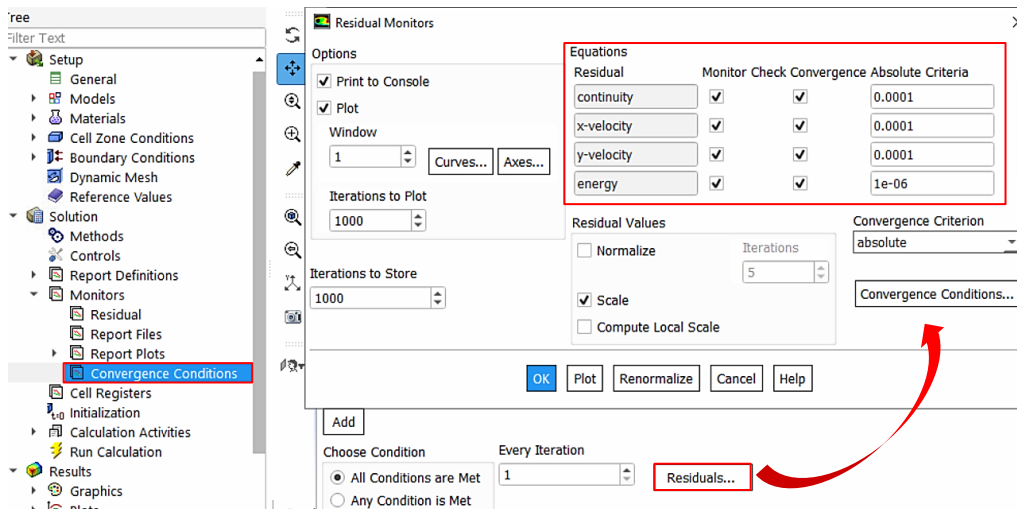


Ilustración 68. Definición de los residuos de cada ecuación para los ajustes de condiciones de convergencia – Fuente: El autor

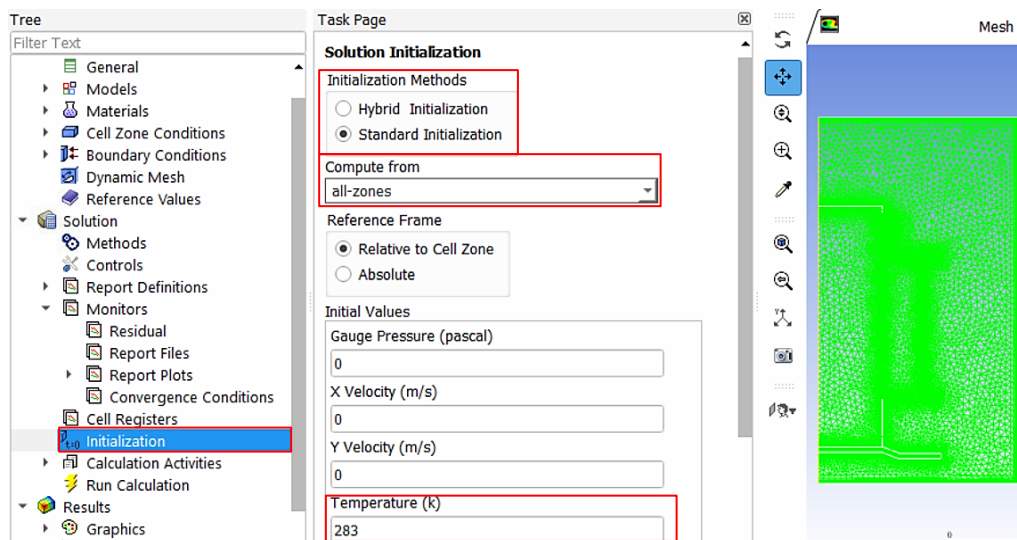


Ilustración 69. Configuración de la inicialización de la solución del modelo - Fuente: El autor

5.2.10. Últimos Ajustes e Inicio de las simulaciones

Por ser un estudio en estado estable, se definió la cantidad de iteraciones a realizar para dar solución al modelo planteado. Inicialmente se hicieron pruebas con 500, 1000 y 1500 iteraciones en 3 de las simulaciones a ejecutar. Al final, se asignó para todas las simulaciones 1000 iteraciones, pues con esta cantidad se llegaba a la convergencia con el menor tiempo computacional posible. La frecuencia definida para que Ansys Fluent compruebe la convergencia de la solución es el valor por defecto del programa: 1.

6. RESULTADOS

El presente trabajo abarca tanto 9 ensayos experimentales como 9 simulaciones numéricas. Es decir, si bien se estudió la capacidad de enfriamiento del transformador a bajas temperaturas, este fue inmerso en tres fluidos dieléctricos diferentes y luego evaluados en tres condiciones de carga diferentes, por lo que al final se analizaron nueve escenarios de simulación y experimentación. Como sucede en la realidad, estas máquinas eléctricas no siempre operan a condiciones nominales de diseño, de tal manera que resulta imperativo evaluar cómo se comporta el transformador, en lo que concierne a la capacidad de refrigeración, a distintos niveles de carga, pues será diferente la cantidad de pérdidas de energía en forma de calor y con ello las condiciones de distribución de temperatura y flujo del aceite dieléctrico; por lo que al final la tasa de transferencia de calor por convección natural del interior a las paredes del tanque, y de estas al exterior, no será siempre la misma.

Para las simulaciones numéricas, en términos generales se podría decir que es casi que el mismo modelo para cada una de las simulaciones, pues las condiciones iniciales (a excepción de una) y de frontera, así como los demás parámetros definidos en Ansys Fluent, han sido los mismos para cada caso. Las simulaciones están diferenciadas especialmente por la fuente de generación de calor constante por unidad de volumen, recordando que para su definición es necesario tener en cuenta el índice de carga, las pérdidas en condiciones nominales y el volumen del devanado (ver la ecuación 12); y, por otro lado, cada simulación difiere en las propiedades definidas para cada aceite dieléctrico. En el presente apartado se exponen y describen los resultados obtenidos, para los nueve escenarios evaluados, tanto experimentalmente como numéricamente.

6.1. EXPERIMENTACIÓN

De la componente experimental se resaltan los resultados obtenidos en cuanto a: mediciones de viscosidad; mediciones eléctricas para cada escenario de ensayo; medición de velocidad de flujo de aire libre en el cajón; y distribución de temperatura en el transformador.

6.1.1. Medición de viscosidad

Se midió con el viscosímetro rotacional la viscosidad dinámica de los tres fluidos empleados para el estudio. Con ayuda del baño termostático los registros empezaron desde -4°C (269.15 K) y se detuvieron hasta alcanzar una temperatura de 60°C (333.15 K). Los resultados de las mediciones se pueden observar en la Ilustración 70.

En vista de que la viscosidad es función de la temperatura (en Kelvin), fue necesario, a partir de los datos experimentales obtenidos, extrapolar la curva de viscosidad para cada fluido, de tal manera que se obtuviera una función con la que se pudiera estimar viscosidades para un amplio rango de temperatura. Para el presente trabajo se extrapolaron los datos de viscosidad para un rango de temperatura de 233.15 K (-40°C) a 363.15 K (90°C). La función polinomial de grado 4 que describe la viscosidad de cada aceite dieléctrico, así como el trazado de la curva, se observa en la Ilustración 71. Con el fin de apreciar visualmente el ajuste que se obtiene con dichas funciones polinomiales, se han trazado las mediciones experimentales (puntos rojos) en la misma gráfica, por lo que al final se obtiene un ajuste aceptable. Estas funciones son las que se han incluido para describir la propiedad de viscosidad dinámica de los fluidos dieléctricos en Ansys Fluent (ver la Ilustración 72).

Viscosidad experimental

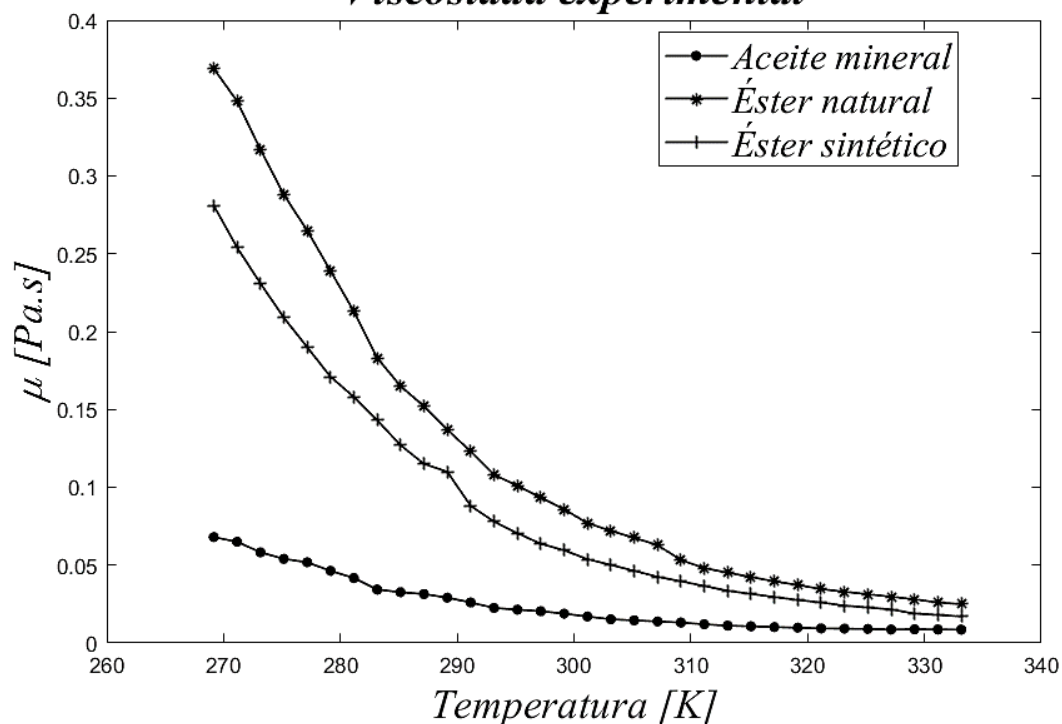


Ilustración 70. Medición de viscosidad para los tres fluidos - Fuente: El autor

Viscosidad

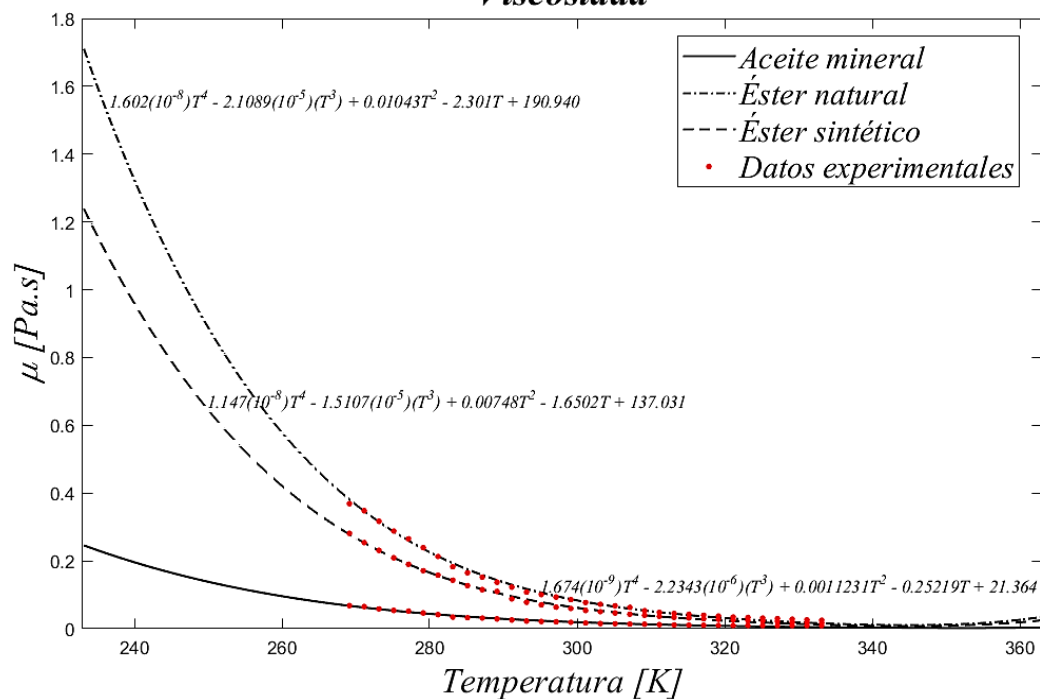


Ilustración 71. Curva y función polinomial de viscosidad para cada aceite dieléctrico - Fuente: El autor

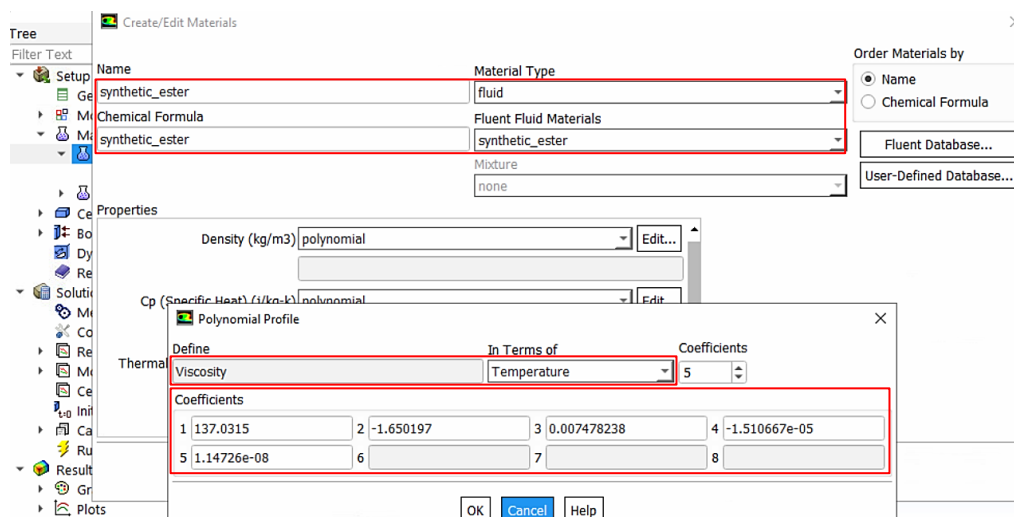


Ilustración 72. Definición de la viscosidad del fluido como una función polinomial dependiente de la temperatura - Fuente: EL autor

6.1.2. Escenarios de Ensayo: índice de Carga y Mediciones Eléctricas

Como fue mencionado en el apartado 5.1.3.1, se llevaron a cabo tres escenarios de carga. La intensidad en la bobina primaria y secundaria en condiciones nominales de operación fue de $\approx 3.5\text{A}$ y $\approx 7.1\text{A}$, respectivamente (ambas registradas con ayuda de los amperímetros); para los ensayos a media carga se redujo la corriente de la bobina primaria a la mitad, aproximadamente $\approx 1.75\text{A}$; y para los ensayos a sobre carga se aumentó la intensidad en el devanado primario en un 28.5%, hasta alcanzar una corriente de $\approx 4.5\text{A}$. Con la corriente registrada en la bobina primaria y la bobina secundaria, y empleando la ecuación 3, se ha calculado el índice de carga para cada escenario. Además, en cuanto a las tensiones de entrada y salida, estas estuvieron entre $\approx 230\text{V}$ (bobina primaria) y $\approx 121\text{V}$ (bobina secundaria), respectivamente. Los registros de las mediciones eléctricas y factor de carga calculado para cada escenario de ensayo se encuentran registrados en la Tabla 4.

Tabla 4. Registros de corriente y tensión en los devanados para escenario de carga - Fuente: El autor

Escenario de carga	C	Bobina primaria		Bobina secundaria	
		Corriente [A]	Tensión de entrada [V]	Corriente [A]	Tensión de salida [V]
Media carga	0.55	≈ 1.75		≈ 3.9	
Carga nominal	1	≈ 3.5	≈ 230	≈ 7.1	≈ 121
Sobrecarga	1.28	≈ 4.5		≈ 9.1	

Tanto las tensiones como las corrientes de la Tabla 4 fueron seleccionadas teniendo en cuenta las restricciones de diseño del equipo: tensiones y corrientes máximas permisibles en el transformador, así como el rango de medición de los amperímetros. Para alcanzar la corriente esperada en la bobina primaria se ajustaba el banco de resistencias variable (Ilustración 27). Cada fluido fue sometido a los tres ensayos descritos.

6.1.3. Medición de Velocidad del Flujo de Aire

La medición de la velocidad del flujo de aire en el interior de cajón, recirculado permanentemente por un ventilador axial, se realizó antes de iniciar los ensayos. Es decir, el aire no estaba enfriado aún, sino que se encontraba a temperatura ambiente. Se procuró que el cajón estuviera lo más hermético posible para evitar tomar registros que fueran afectados por corrientes de aire diferentes a las del interior, y para que el flujo de aire interior no se dirigiera hacia el exterior. Adicionalmente, no se dispusieron las botellas de hielo en el interior del cajón para el momento de las mediciones.

Las condiciones de medición fueron arbitrarias: se realizaron mediciones en 9 puntos equidistantes para las caras laterales y superior del tanque, y para la superficie inferior las medidas se tomaron en el borde de dicha cara (fue descrito e ilustrado en la sección 5.1.3.3) por restricción de espacio, pues no era posible introducir el anemómetro en el espacio resultante entre el fondo del cajón y la superficie inferior de la cuba. En cada punto se realizaron 10 mediciones, y el tiempo entre mediciones no siempre el mismo, aunque nunca llegó a ser mayor a un minuto.

Se registraron velocidades de flujo de aire diferente en cada una de las superficies del tanque por las siguientes condiciones: disposición del transformador en el interior; el espesor y poca homogeneidad en las superficies internas de las láminas de poliestireno expandido; la ubicación del ventilador (su eje no estaba alineado con el centro de la cara del tanque que estaba perpendicular a la dirección del flujo, puesto que la longitud de los cables de conexiones eléctricas y de los sensores desde el transformador a la tarjeta arduino, y el cable de datos de esta última al ordenador, no permitían mucha maniobra para reubicarlo; sin contar que dicho ventilador estaba ubicado en la parte superior del cajón), ya que el área del barrido del rotor no abarcaba todo el transformador; la potencia del ventilador; y el estado de las aletas del intercambiador.

Las velocidades máximas del aire obtenidas para la superficie superior y para las superficies laterales fueron de 2 m/s y 1.2 m/s, respectivamente; y los registros mínimos fueron de 0.12 m/s. Por otro lado, para la superficie inferior las velocidades de flujo de aire estuvieron entre 0.12 y 0.3 m/s. Ver la Ilustración 73.

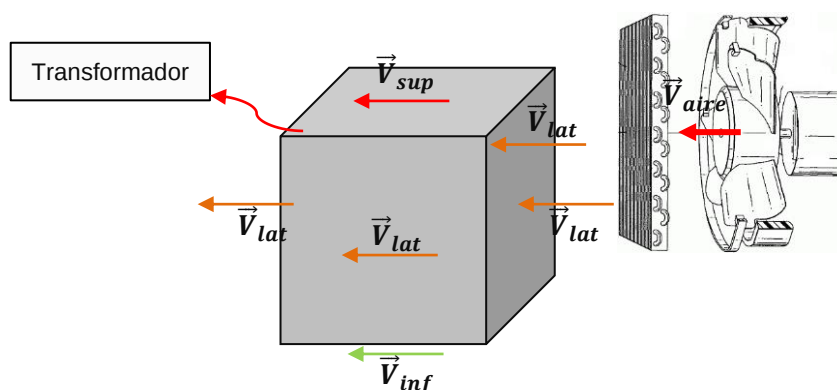


Ilustración 73. Esquematización de las velocidades de flujo de aire evaluadas en cada superficie del tanque – Fuente: El autor

6.1.4. Distribución de Temperatura

Teniendo en cuenta el criterio de estabilidad seleccionado, las temperaturas en estado estable estarán después de haber transcurrido entre 8.5 y 14.5 horas aproximadamente. Cada experimentación se llevó a cabo a lo largo de un día, y cada una de estas fue

empezada sobre las 9:30 a.m. Antes de poner en marcha cada ensayo, y una vez dispuestas en el interior las botellas del hielo en el interior del cajón y por los alrededores de la cuba, se necesitó entre 1 y 1.5 horas de funcionamiento de la bomba de calor (sistema de enfriamiento) para llevar el sistema a la temperatura mínima posible: 277.15 K. En cuanto a la temperatura ambiente externa, es decir, en el laboratorio, esta fue de $\approx 17.5^{\circ}\text{C}$ en promedio durante la realización de los ensayos.

Dadas las condiciones de los equipos de laboratorio, es decir, por evitar cualquier tipo de averías en el banco de la bomba de calor con la que se enfriaba el agua que actuaba como fluido de trabajo refrigerante, no se realizó cada ensayo experimental hasta alcanzar 8 o más horas, sino que se mantuvo operando el transformador a cortocircuito durante aproximadamente 4 y 4.5 horas para cada escenario; luego, se trazó la curva de temperatura para cada zona de interés del transformador a partir de las mediciones registradas con las sondas de temperatura. Seguidamente se estimó y trazo la línea de tendencia para cada zona (fondo, superior, devanado y papel) de cada escenario de carga con cada fluido dieléctrico; las líneas de tendencia fueron de tipo potencial y logarítmico. En cada una de las gráficas de las ilustraciones presentadas a continuación se encuentra el trazado de la curva experimental de temperatura vs tiempo, sí como la curva de tendencia (pronóstico).

Para todas las siguientes gráficas de temperatura vs tiempo del presente apartado, se podrá observar en la leyenda que hay dos curvas de temperatura para cada zona del transformador. En estas mismas, las curvas trazadas como líneas a trazos, y en cuya leyenda se distingue una '(E)', hacen referencia a la distribución de temperatura según las temperaturas registradas con las sondas de temperatura; por otro lado, las curvas de trazado sólido, y en cuya leyenda se distingue una '(P)', hacen alusión a la evolución de la temperatura en el tiempo para cada zona del transformador vista como un pronóstico. Dicho pronóstico tiene como punto final el instante de tiempo y temperatura en el que se cumple el criterio de estabilidad. Como regla general, para los escenarios de media carga el criterio, bajo las condiciones de ensayo ya descritas, se podría haber alcanzado luego de haber pasado entre 8.5 y 9 horas de prueba, de acuerdo con las curvas de tendencia; para carga nominal, entre 10.5 y 11 horas; y para sobre carga entre 14 y 14.5 horas aproximadamente. Fue la última temperatura estimada (a partir de los registros reales de las cuplas) para cada zona, para cada fluido en cada condición de carga, la que se tuvo en cuenta para realizar un comparativo con los resultados obtenidos numéricamente. Ver la Tabla 6.

En la Ilustración 74, Ilustración 75 e Ilustración 76 se observan las distribuciones de temperatura medida, y la estimada a partir de los datos reales para un periodo de tiempo más largo, para el aceite mineral a media carga, a carga nominal y a sobre carga, respectivamente. Para el ensayo a media carga, se tomaron 3530 registros de temperatura; a carga nominal 4502 registros de temperatura y para sobre carga se cuenta con 4103 datos de temperatura para cada zona. Para el aceite mineral el mejor ajuste para las curvas de temperatura vs tiempo se dio con índices de carga $C=1$ y $C=1.28$. Aunque las curvas de temperatura de pronóstico para $C=0.55$ parecen ajustarse mejor a los datos reales, pues las curvas parecen dejar de crecer y tender a la estabilidad, lo cierto es que cuenta con una menor cantidad de datos con respecto a los otros escenarios de carga, por lo que estas curvas de tendencia han tenido en cuenta una muestra más pequeña para su trazado, lo que se traduce en un aumento en el error conforme pasa el tiempo (hasta llegar al criterio de estabilidad).

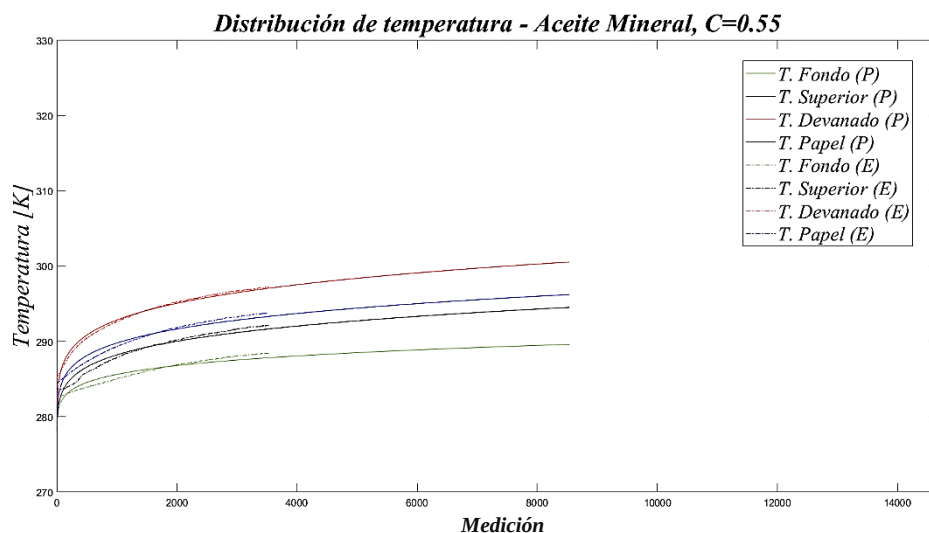


Ilustración 74. Distribución de temperatura en el transformador inmerso en aceite mineral a media carga -
Fuente: El autor

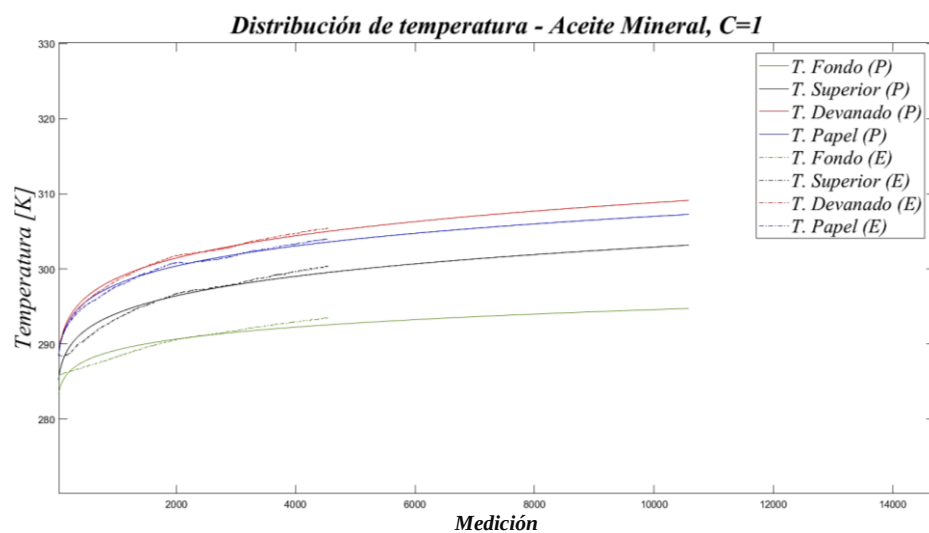


Ilustración 75. Distribución de temperatura en el transformador inmerso en aceite mineral a carga nominal -
Fuente: El autor

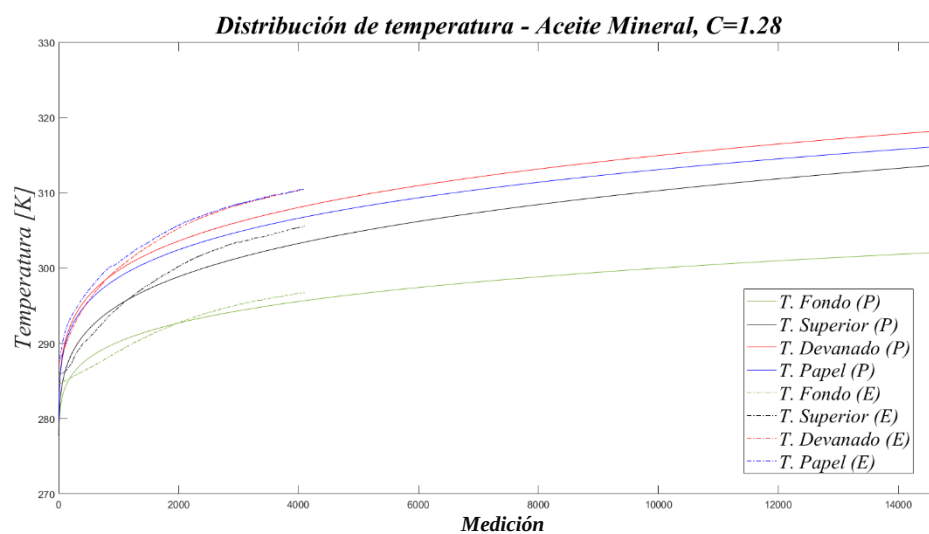


Ilustración 76. Distribución de temperatura en el transformador inmerso en aceite mineral a sobrecarga -
Fuente: El autor

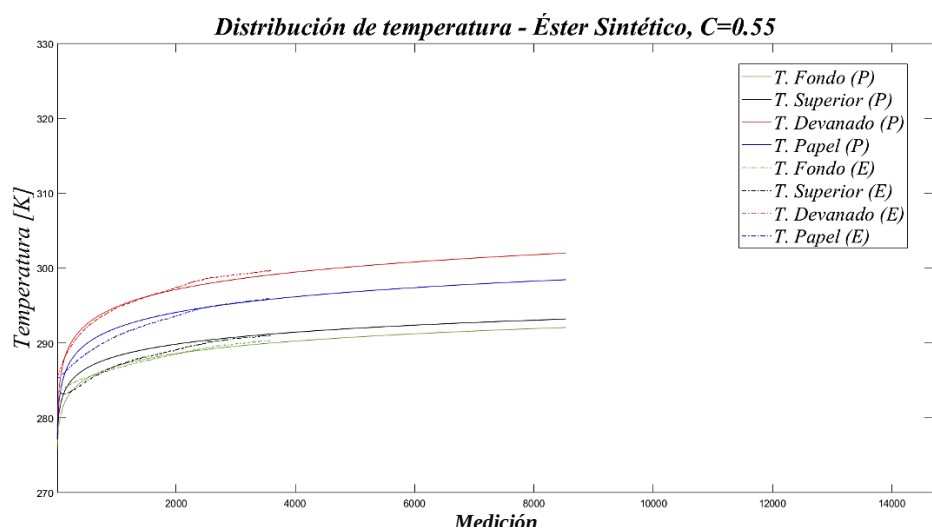


Ilustración 77. Distribución de temperatura en el transformador inmerso en éster sintético a media carga -
Fuente: El autor

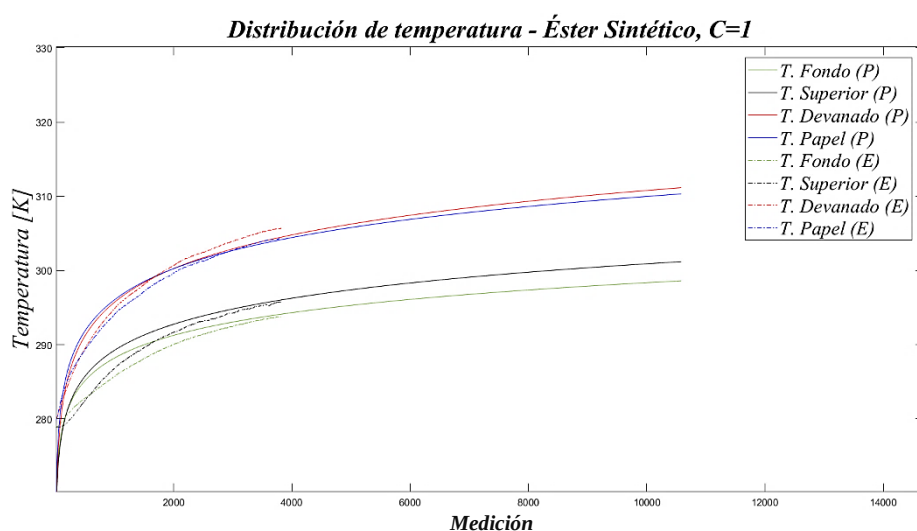


Ilustración 78. Distribución de temperatura en el transformador inmerso en éster sintético a carga nominal -
Fuente: El autor

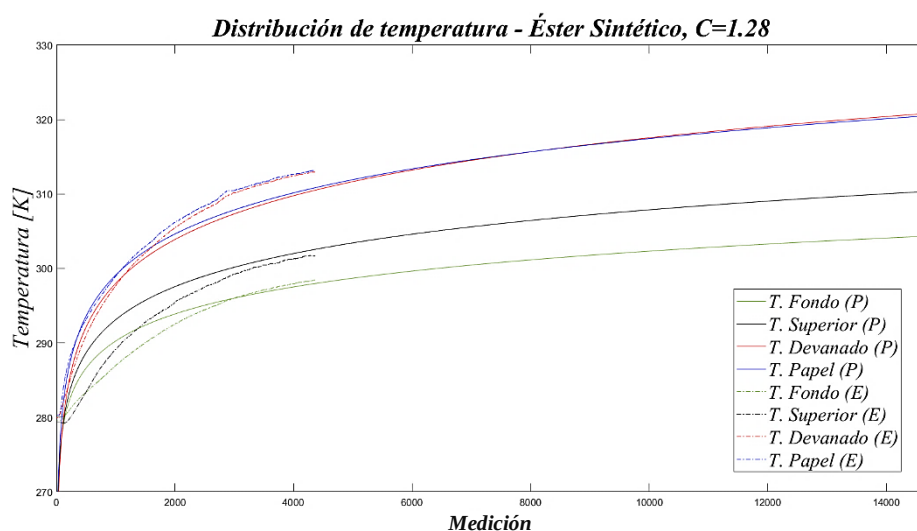


Ilustración 79. Distribución de temperatura en el transformador inmerso en éster sintético a sobre carga -
Fuente: El autor

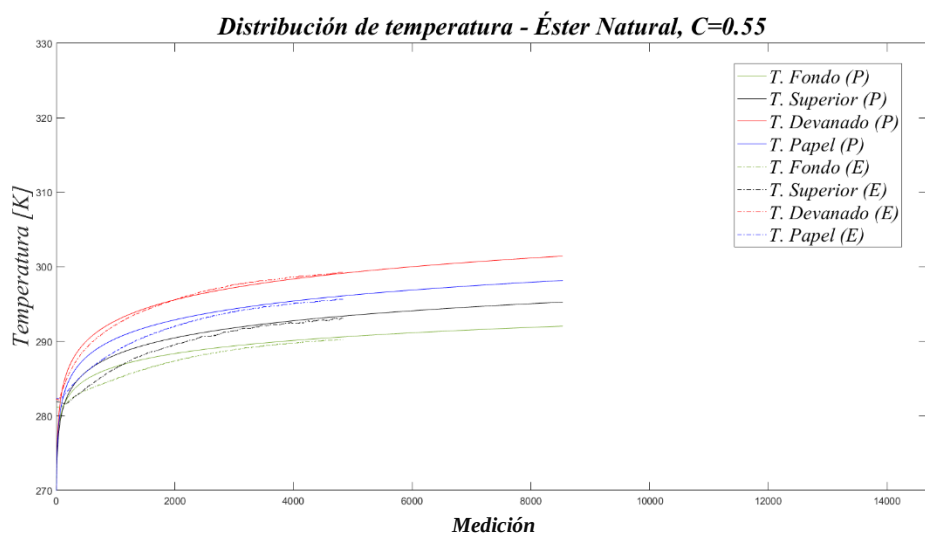


Ilustración 80. Distribución de temperatura en el transformador inmerso en éster natural a media carga -
Fuente: El autor

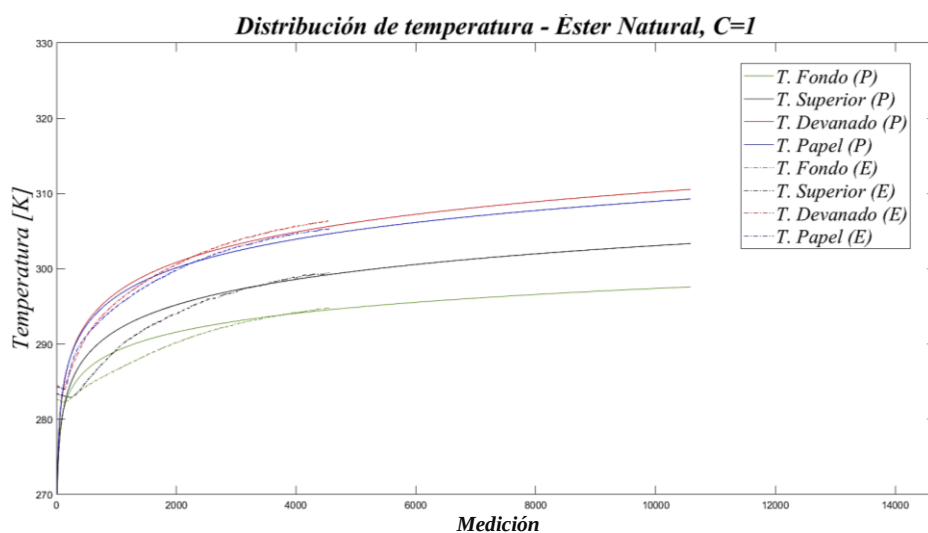


Ilustración 81. Distribución de temperatura en el transformador inmerso en éster natural a carga nominal -
Fuente: El autor

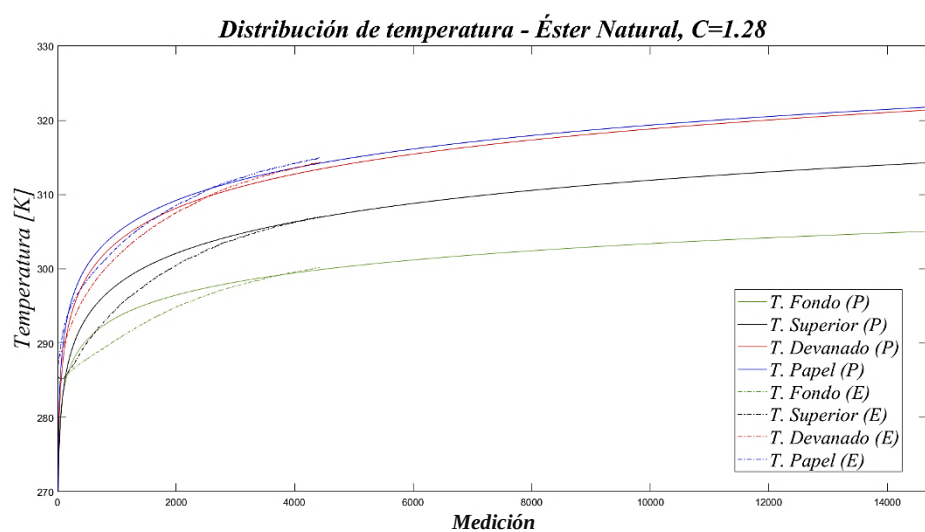


Ilustración 82. Distribución de temperatura en el transformador inmerso en éster natural a sobre carga -
Fuente: El autor

Para el éster sintético la curva (de datos reales y de tendencia) de temperatura vs tiempo para cada zona para un índice de carga $C=0.55$, $C=1$ y $C=1.28$, se observa en la Ilustración 77, Ilustración 78 e Ilustración 79, respectivamente. Para el ensayo a media carga, se realizaron 3581 registros de temperatura; a carga nominal 3815 registros de temperatura y para sobre carga se cuenta con 4360 datos de temperatura para cada zona. Similar a lo evidenciado en el aceite mineral, para el éster sintético el mejor ajuste para las curvas de temperatura vs tiempo se dio en las condiciones de ensayo de sobre carga y a carga nominal; en ambos casos la cantidad de datos registrados con las sondas fue superior que a media carga. En la gráfica de ensayo a sobre carga (Ilustración 79) se puede apreciar fácilmente que no hay un buen ajuste entre la curva real y ajustada durante las primeras horas; sin embargo, al comparar el último dato de temperatura obtenido con la curva ajustada, una vez se ha alcanzado el criterio de estabilidad, con las temperaturas máximas obtenidas numéricamente, se puede evidenciar que el error es menor que con índice de carga a media carga y a carga nominal.

Por otro lado, en lo que respecta a la distribución de temperatura real y pronosticada para el éster natural, dichas curvas de temperatura vs tiempo para cada zona, a media carga, carga nominal y sobre carga se detallan en la Ilustración 80, Ilustración 81 e Ilustración 82, respectivamente. Para el ensayo a media carga, se tomaron 4834 registros de temperatura; a carga nominal 4557 registros de temperatura y para sobre carga se contabilizaron 4434 datos de temperatura para cada zona. Aunque el error entre la temperatura experimental máxima (de estabilidad) pronosticada y la calculada numéricamente es mayor con $C=0.55$ que con $C=1$ y $C=1.28$ (ver Tabla 6), al comparar los errores para cada zona de cada uno de los fluidos a media carga, se puede reconocer que con el éster natural se ha obtenido errores menores a esta condición de ensayo. Adicionalmente, el tamaño de muestra por escenario para el éster natural es mayor en algunos índices de carga, con respecto a los tamaños de muestra de los escenarios de carga de los otros dos fluidos dieléctricos. Con respecto al índice de carga $C=1.28$, para el éster natural, en contraste con el aceite mineral y el éster sintético, es mejor el ajuste entre la curva de temperatura real y la estimada incluso en las primeras horas.

En la Tabla 5 se recopilan la cantidad de registros de temperaturas obtenidos experimentalmente con cada fluido dieléctrico para cada índice de carga. Los registros de temperatura fueron recopilados cada 3 o 4 segundos.

Tabla 5. Mediciones de temperatura por escenario de carga para cada fluido dieléctrico - Fuente: El autor

Índice de carga	Cantidad de datos de temperatura		
	Aceite mineral	Éster natural	Éster sintético
$C=0.55$	3526	4834	3581
$C=1$	4542	4554	3815
$C=1.28$	4103	4434	4360

Aunque para la gran mayoría de las curvas de distribución de temperatura parece haber un buen ajuste entre los valores reales y estimados durante las primeras horas, lo cierto es que ello no garantiza que para estos casos el ajuste haya sido el mejor. Principalmente porque las curvas de tendencia de temperatura con mejor ajuste son aquellas cuyo tamaño de muestra fue mayor. Por otro lado, comparando las temperaturas máximas registradas de los tres fluidos, al llegar la estabilidad, se observa

que las mayores temperaturas, considerando tanto las mediciones disponibles como las curvas de tendencia, se dieron en los fluidos alternativos (ésteres), lo cual está en concordancia con las investigaciones consultadas.

Ahora bien, evaluando estas mismas temperaturas entre solo los ésteres, por índice de carga se puede reconocer que con un $C=0.55$ las temperaturas máximas posibles están en el éster sintético, aunque con muy poca diferencia con respecto al éster natural (variaciones de entre 0.5% y 9.5%); y para los índices de carga $C=1$ y $C=1.28$, las temperaturas máximas se dan con el transformador sumergido en el éster natural. En vista de que la máquina se ha mantenido durante los ensayos a una temperatura ambiente de 4°C (en el interior del cajón), y dado que la viscosidad del éster natural aumenta en mayor proporción conforme disminuye la temperatura (véase la Ilustración 71), es de esperarse que se obtengan dichos registros de temperatura; es decir, la generación de calor es mayor para carga nominal y sobrecarga, y por consiguiente aumenta la temperatura del fluido que está en contacto con el devanado, pero como el resto de volumen está a una temperatura inferior por la transferencia de calor que se da del fluido hacia las paredes del tanque y exterior que están a temperaturas más bajas, el flujo en estas zonas es a velocidades más bajas, evitando que se logre un enfriamiento por convección natural a una tasa superior.

Observando la distribución de temperatura por región en el transformador, en todos los ensayos, para todos los fluidos e índices de carga, el fluido más caliente fue el adyacente a los devanados, seguido del volumen ocupado en la parte superior y por último el volumen de fluido de la parte inferior de la máquina. Las mediciones registradas están acordes con la dinámica de fluidos esperada teniendo en cuenta las corrientes de convección natural entre los devanados y núcleo y el fluido dieléctrico, es decir, por la fuerza de flotabilidad generada por la variación de densidad conforme aumenta la temperatura por las pérdidas durante la transformación, cada uno de los líquidos se ha desplazado de tal manera que el más caliente quede en la parte superior y el más frío en el fondo del tanque.

De manera adicional, y complementando lo descrito anteriormente, si bien en las curvas de distribución de temperatura se puede apreciar un aumento progresivo de la temperatura con unos resultados de temperaturas máximas y mínimas esperadas para cada zona del transformador, lo cierto es que como la temperatura de inicio del fluido dieléctrico y del flujo libre de aire para enfriar la máquina no fue lo suficientemente baja como para evaluar la generación de puntos calientes en la máquina. Teniendo en cuenta que los puntos de fluencia promedio para los fluidos ensayados, hizo falta reducir la temperatura del transformador unos 40°C más.

Como se ha mencionado anteriormente, en la Tabla 6 se recopilan las temperaturas experimentales máximas pronosticadas en el transformador y las máximas obtenidas en cada simulación en las regiones de interés del modelo, con cada fluido dieléctrico, para cada escenario de carga. Al evaluar dichos registros por fluido y nivel de carga se aprecia que a media carga las temperaturas experimentales se dieron con el transformador sumergido en éster sintético, pero luego fueron mayores a carga nominal y sobrecarga con el éster natural.

También se incluye la diferencia (delta de temperatura) entre cada par de resultados obtenidos, así como el error (ε) entre ambos resultados. Para estimar dicho error se empleó la siguiente expresión:

$$\varepsilon = \frac{T_{exp} - T_{CFD}}{T_{exp}} \quad (32)$$

Donde T_{exp} [°C] y T_{CFD} [°C] son la temperatura máxima experimental estimada y la temperatura máxima calculada numéricamente, respectivamente. Aunque los datos de temperatura de la Tabla 5 están en Kelvin, para calcular el error (ϵ) se hizo la conversión de ambas temperaturas a °C (escala relativa). En esta misma tabla se encuentran resaltados también la temperatura más alta tanto experimental como numéricamente y la diferencia entre ambos resultados, para cada zona de interés del transformador para cada escenario de carga. Así mismo, con el objetivo de diferenciar las zonas del transformador con un mayor nivel de ajuste entre resultados numéricos y experimentales, con cada fluido dieléctrico y en cada escenario de carga, se ha resaltado y diferenciado aquellos errores que sean menores o iguales al 5% (color verde); los errores mayores a 5% y menores o iguales a 20% (color amarillo); y, por último, los errores que hayan estado por encima al 20% (color naranja).

Tabla 6. Temperaturas máximas obtenidas experimental y numéricamente, y variación con respecto al valor experimental - Fuente: El autor

Índice de carga	Zona	Aceite mineral				Éster natural				Éster sintético			
		T_{exp}	T_{CFD}	ΔT	$\varepsilon[\%]$	T_{exp}	T_{CFD}	ΔT	$\varepsilon[\%]$	T_{exp}	T_{CFD}	ΔT	$\varepsilon[\%]$
C=0.55	Devanado	300.5	297.1	3.4	12.4	301.4	298.8	2.6	9.2	302	298.8	3.2	11.1
	Papel	296.2	297	0.8	3.5	298.2	298.7	0.5	2	298.5	298.7	0.4	0.8
	Superior	294.5	296.1	1.6	7.5	295.3	297.7	2.4	10.8	293.2	297.5	4.3	21.4
	Fondo	289.6	295.6	6	36.5	292	295.8	3.8	20.2	292.1	295.1	3	15.8
C=1	Devanado	309.1	306.7	2.4	6.7	310.5	308.8	1.7	4.6	311.1	308.4	2.7	7.1
	Papel	307.2	306.4	0.8	2.3	309.3	308.5	0.8	2.2	310.3	308.1	2.2	5.9
	Superior	303.1	303.4	0.3	1	303.3	305.1	1.8	6	301.2	304.7	3.5	12.5
	Fondo	294.7	297.4	2.7	12.5	297.5	300.2	2.7	11.1	298.6	296.3	2.3	9
C=1.28	Devanado	318.2	317.6	0.6	1.3	321.7	320.9	0.8	1.6	320.8	319.9	0.9	1.9
	Papel	316.2	317.2	1	2.3	321.3	320.5	0.8	1.7	320.4	319.5	0.9	1.9
	Superior	313.7	312.9	0.8	2	314.3	315.8	1.5	3.6	310.4	314.9	4.5	12.1
	Fondo	302.1	307.3	5.2	18	305	306.1	1.1	3.5	304.3	304.9	0.6	1.9

$\varepsilon\%$

Diferencia entre metodologías $\leq 5\%$

$\varepsilon\%$

$5\% < \text{Diferencia entre metodologías} \leq 20\%$

$\varepsilon\%$

$20\% < \text{Diferencia entre metodologías}$

T_{CFD}

Temperatura máxima obtenida numéricamente por zona e índice de carga.

T_{exp}

Temperatura máxima aproximada obtenida experimentalmente por zona e índice de carga.

ΔT

Mínima diferencia de temperatura entre temperatura experimental máxima pronóstica y la temperatura máxima obtenida numéricamente por zona e índice de carga.

6.2. SOLUCIÓN NUMÉRICA

Para el modelamiento numérico se ha tenido en cuenta el modelo 2D simplificado y la parametrización descrita en el apartado 5.2. Los resultados de las simulaciones llevadas a cabo se dividen en dos componentes: La distribución de temperatura en el transformador inmerso en los tres fluidos dieléctricos para cada condición de carga y la distribución del flujo (líneas de corriente y campo de velocidades) para las mismas condiciones de operación.

6.2.1. Cálculo de Parámetros Adicionales

Antes de la ejecución de las simulaciones fue necesario calcular tanto el coeficiente de transferencia de calor para cada superficie de la cuba (para transferencia de calor entre las superficies externas de la máquina y el flujo de aire circundante del cajón de madera), así como la fuente de generación de calor. Empezando por esta última, se ha empleado la ecuación 20 para su cálculo: los índices de carga (C) son los mismos que se han calculado con la ecuación 3 y los valores se encuentran la Tabla 4; las pérdidas en condiciones de carga nominal ya han sido definidas como $\approx 20W$; y el volumen de la mitad del devanado (Ilustración 43a) se ha obtenido con ayuda de las propiedades del CAD diseñado en Autodesk Fusion 360, el cual ha sido de $\approx 2.2275 \times 10^{-4} m^3$. Al reemplazar estos valores en la ecuación 31, se han obtenido las tasas de energía en forma de calor por unidad de volumen de la Tabla 7; y cada uno de estos valores se ha asignado a la zona definida en Ansys Fluente como devanado en el modelo CAD 2D (Ilustración 64) como una fuente de generación de calor constante.

Tabla 7. Generación de calor por índice de carga - Fuente: El autor

Índice de carga [C]	$Q_w [W/m^3]$
0.55	13580.2
1	44893.3
1.28	73553.3
$q_{l,nom} \approx 20W; \quad V_{m,w} \approx 2.2275 \times 10^{-4} m^3$	

Para el coeficiente de transferencia de calor se ha empezado con determinar las propiedades del aire a la temperatura de película, el mismo que estará fluyendo alrededor de la cuba y que enfriará el sistema. Si la temperatura de las superficies del tanque contenedor del fluido transformador ha estado a aproximadamente $4^\circ C$ (asumiendo que dicha temperatura permanece constante: idealmente como placas planas isotérmicas), así como la temperatura del aire enfriado en el interior del cajón, la temperatura de película ha sido $T_p = 4^\circ C = 277.15 K$: a esta temperatura se han obtenido las siguientes propiedades para el flujo de aire [29]:

- Densidad $\rightarrow \rho = 1.2736 \text{ Kg}/m^3$
- Viscosidad cinemática $\rightarrow \nu = 1.3732 \times 10^{-5} m^2/s$
- Número de Prandtl $\rightarrow Pr = 0.73524$
- Conductividad térmica $\rightarrow k = 0.023936 \text{ W}/m \cdot K$

Como la velocidad de aire fue diferente para cada superficie del tanque (ver la Ilustración 73), ha sido necesario calcular el número de Reynolds a la velocidad de flujo libre sobre cada superficie utilizando la ecuación 15, para luego, dependiendo de si sea en cada caso un flujo laminar o turbulento, estimar Nu y con este el h . En la Tabla 8 el número

de Reynolds calculado de acuerdo con la velocidad de aire correspondiente; el Re obtenido; el número de Nusselt evaluado con base al tipo de flujo y el coeficiente de transferencia de calor para cada superficie.

Tabla 8. Número de Reynolds, tipo de flujo, número de Nusselt y coeficiente de transferencia de calor para cada superficie de la cuba por índice de carga - Fuente: El autor

Índice de carga	Superficie	V [m/s]	Re	Nu	$h [W/m^2 \cdot K]$
Sub carga	Superior	0.12	1800	25.4	3
	Laterales	0.12	1800	25.4	3
	Inferior	0.12	1800	25.4	3
Nominal	Superior	2	30000	103.8	12
	Laterales	1.2	18000	80.4	9.3
	Inferior	0.3	4500	40.2	4.6
Sobre carga	Superior	2	30000	130.8	12
	Laterales	2	30000	130.8	12
	Inferior	0.3	4500	40.2	4.6

Como las mediciones de velocidad de aire no fueron realizadas durante cada experimento, sino que llevaron a cabo a temperatura ambiente y sin estar operando la máquina y sin las botellas de hielo en el interior del volumen de control, los valores de velocidad de flujo de aire reales para cada condición de carga puedan discrepar con respecto a los registros llevados bajo las condiciones ya descritas. Uno de los motivos estaría asociado al cambio de densidad en dicho aire por las variaciones de temperatura en la capa límite: es decir, cuando el índice de carga aumenta también aumenta la temperatura del fluido adyacente al devanado, ocasionado un movimiento del fluido por las variaciones de temperatura; tal desplazamiento (soportado por el perfil de velocidad que se genera en la capa límite) permitirá que el fluido se vaya moviendo seguidamente por las paredes del tanque, propiciándose una transferencia de energía en forma de calor del interior al exterior por la diferencia de temperaturas entre el fluido y las paredes del tanque. Esta energía en forma de calor terminará calentando el flujo de aire adyacente, de tal manera que disminuya su densidad y aumente su velocidad de flujo, teniendo en cuenta que estarían presentándose fuerzas de flotabilidad facilitando la recirculación del flujo de aire con el ventilador axial (disminuye la densidad del aire en dicha región), siendo menos notorio en la región del flujo de aire donde la vorticidad y efectos asociados a las fuerzas viscosas son ínfimas con respecto a las inerciales.

Es por lo anterior que durante la medición de la velocidad del aire en el interior se procuro que el hilo caliente estuviese en dirección perpendicular a la dirección del flujo y lo más próximo a las superficies del tanque. Es cierto que no se podrá garantizar que se haya capturado el perfil de velocidad en la capa límite del aire teniendo en cuenta el espesor que suelen tener dicha capa y por el tipo de instrumentación empleada; no obstante, si se podrá tener una aproximación en las velocidades más representativas para la transferencia de calor por convección forzada. En el caso de un índice de carga menor sucedería todo lo contrario al hacerse más denso el flujo de aire circundante (fuerzas viscosas superiores en la capa límite).

Los planteamientos hechos son válidos considerando que: el parámetro que relaciona las fuerzas inerciales y viscosas de un fluido en convección forzada es Re (ecuación 15), por lo que dicho parámetro adimensional es proporcional a la velocidad del flujo e inversamente su viscosidad cinemática. La velocidad en general no se vería afectada

por el ventilador ya que su velocidad de giro fue siempre la misma, sin embargo, en la capa de flujo de aire adyacente a las paredes del tanque si habría una disminución (mínima) en la viscosidad del aire, aumento en las fuerzas flotantes y, con esto, un aumento en la velocidad del flujo. Y se termina de soportar por el hecho de que el coeficiente de transferencia de calor es directamente proporcional a Nu , y este último a Re (ver la ecuación 20).

Inicialmente se ejecutaron las simulaciones una vez calculado el h con las velocidades de aire máxima para cada superficie, los mismos para cada condición de carga. Con estos valores de coeficiente de transferencia de calor el error en la distribución de temperatura era superior, a excepción del obtenido por zona para carga nominal. A raíz de dichos resultados (errados), se calculó el coeficiente de transferencia de calor con la velocidad de aire mínima registrada y se fijó dicho valor a todos los límites para la condición de media carga. Para la condición de sobre carga se realizaron los cálculos con la mayor velocidad de aire y se asignó el h estimado a las superficies laterales y superior del tanque; para la inferior no, teniendo en cuenta que por las condiciones de experimentación puntualizadas habría velocidades de aire muy bajas sobre esta superficie, por lo que para esta superficie no variaría notoriamente el coeficiente de transferencia de calor.

Con estas consideraciones para el cálculo y asignación del coeficiente de transferencia de calor los niveles de error disminuyeron considerablemente para cada una de las zonas, para cada condición de carga, con cada fluido dieléctrico. Es importante enfatizar que en este trabajo no se evaluó la variación del parámetro de Gr teniendo en cuenta que el enfriamiento ha sido por convección forzada.

6.2.2. Distribución de Temperatura en el Transformador

La distribución de temperatura obtenida numéricamente para el transformador, con cada condición de carga y con cada fluido dieléctrico, se observa en las gráficas de contorno isométrico de las Ilustración 83, Ilustración 84 y Ilustración 85. Al realizar un reconocimiento global, se puede reconocer fácilmente que las temperaturas máximas obtenidas numéricamente (las mismas que se encuentran en la Tabla 6 - T_{CFD} -) por fluido dieléctrico, sumado a la metodología de reconocimiento para la Tabla 6, se han dado en el éster natural, aquel cuya viscosidad es mayor a bajas temperaturas. Observando la distribución de temperatura obtenida, como era de esperar, los valores obtenidos fueron superiores conforme aumentaba el nivel de carga.

En cuanto a la temperatura por zona del transformador, para aquella que corresponde al devanado, donde es habitual encontrar los puntos calientes en ensayos de arranque en frío, se obtuvieron las temperaturas más altas. Sin embargo, las temperaturas máximas obtenidas numéricamente no se localizaron precisamente en la superficie de los devanados sino en la zona centro superior del devanado del modelo 2D. No obstante, al comparar las temperaturas obtenidas experimentalmente y los valores obtenidos con el modelo numérico en los puntos donde aproximadamente han estado dispuestas las sondas de temperatura, el error para dicha zona fue en promedio de 6% (considerando todos los niveles de carga). Discrepa de la experimentación ya que con los sensores se han podido registrar temperaturas más próximas a las superficies externas del devanado y no en el interior; no obstante, considerando el nivel de error entre ambas metodologías (Tabla 5),

Por condición de ensayo, a sobrecarga, donde precisamente la fuente de calor tiene una tasa de generación por unidad de volumen superior a las demás, se obtienen

temperaturas superiores en el transformador. Adicionalmente, las temperaturas mínimas obtenidas en cada simulación (en [K]) se encuentran recopiladas en la Tabla 9. Así como en trabajos como el de [4], se ha demostrado que hay un aumento en la temperatura del transformador cuando se ha sumergido la máquina en los fluidos de tipo éster.

Tabla 9. Temperaturas mínimas obtenidas en cada simulación por fluido y para índice de carga - Fuente: El autor

Índice de carga	Aceite mineral	Éster natural	Éster sintético
Sub carga	289.52	290.66	290.64
Nominal	291.91	291.80	290.91
Sobre carga	299.28	294.86	297.28

Si bien de los 36 pares de datos de temperatura (T_{exp} y T_{CFD}) de la Tabla 6, solo el 47% cuentan con un error $\leq 5\%$, en términos generales se han acertado en todas las simulaciones la ubicación de los puntos calientes: zona superior del devanado; además de que el error y diferencia de temperatura promedio entre los registros máximos de temperatura para dichas ubicaciones se mantuvieron en un 6,2% y 2.03°C, respectivamente.

Aun cuando en la superficie inferior del tanque estuvo expuesta a las velocidades de viento más bajas, y con ello a un coeficiente de transferencia de calor menor, es en la parte inferior del volumen de control (transformador y fluido dieléctrico) donde se registraron las temperaturas más bajas, y dicha tendencia se ha mantenido tanto en los resultados numéricos como en los experimentales. La razón principal se debe a que un fluido cuando está expuesto a una superficie caliente, este tiende a desplazarse hacia arriba aumentando su perfil de velocidad a medida que avanza, y hasta alcanzar la capa límite; si se considera que la zona más caliente es el devanado y que este calienta el fluido y partes del transformador que están en contacto, las líneas de flujo de fluido que se desplazan no abarcan el volumen de volumen dieléctrico en la parte inferior del tanque. Al no calentarse lo suficiente el fluido de la parte inferior y por lo tanto al no tener un desplazamiento, este volumen se termina enfriando y estratificando; situación que se puede apreciar en las ilustraciones correspondientes a los resultados de distribución de temperatura para cada fluido.

Observando las regiones isotérmicas para cada uno de los fluidos, para todos los casos de carga, se puede reconocer que el flujo que está en contacto con las paredes del transformador y el tanque evidencia un perfil de velocidad típico sobre una placa plana, según si está caliente o fría: es decir, para el perfil de temperatura del fluido que está en contacto con el devanado, la región más caliente, la temperatura más caliente se ha dado en el fluido adyacente al devanado, y la capa límite ha ido aumentando en la dirección del flujo, en este caso ascendente por las fuerzas de flotabilidad a causa del calentamiento; por otro lado, en lo que serían las paredes del tanque, en especial las laterales, al estar más frías la capa límite, y con esto el perfil de temperatura, también aumenta en la dirección, pero en este caso es descendente.

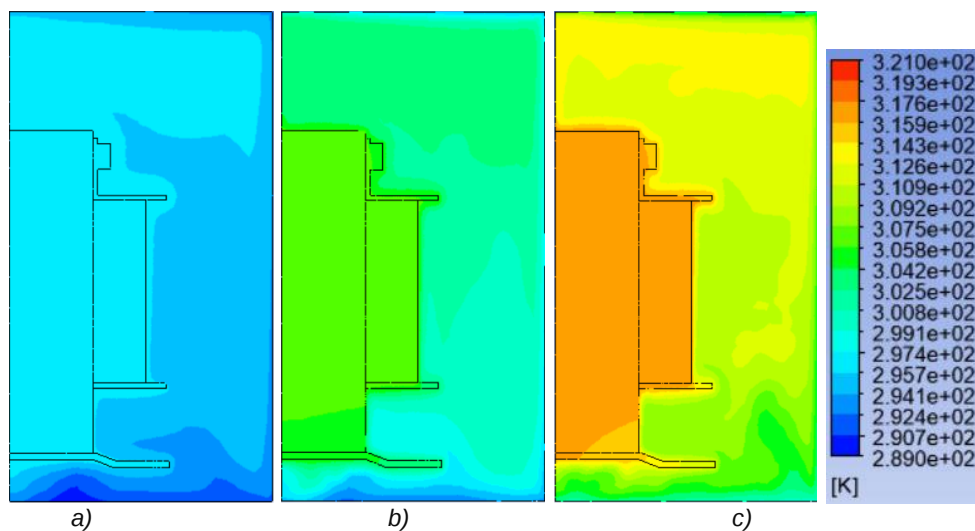


Ilustración 83. Distribución de temperatura empleando aceite mineral con a) media carga, b) carga nominal y c) sobre carga – Fuente: El autor

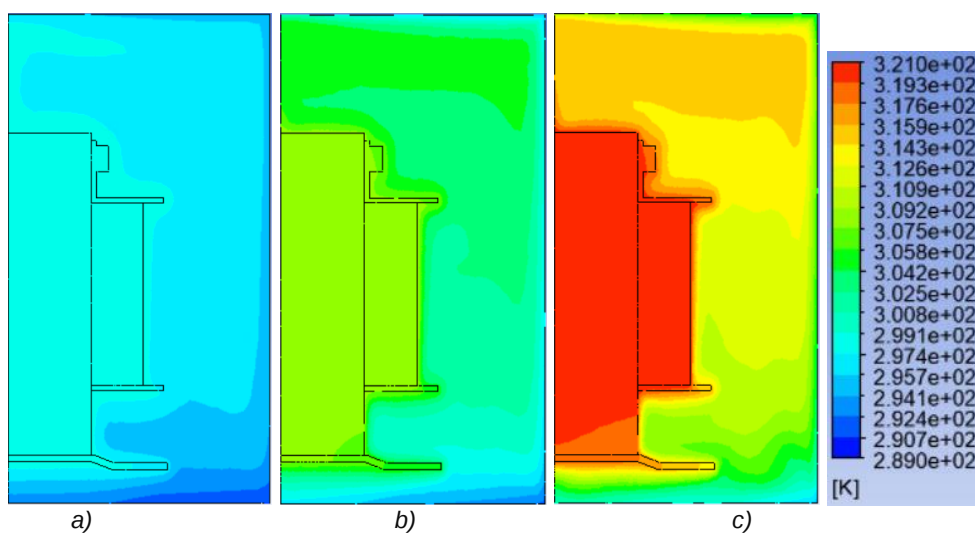


Ilustración 84. Distribución de temperatura empleando éster natural con a) media carga, b) carga nominal y c) sobre carga – Fuente: El autor

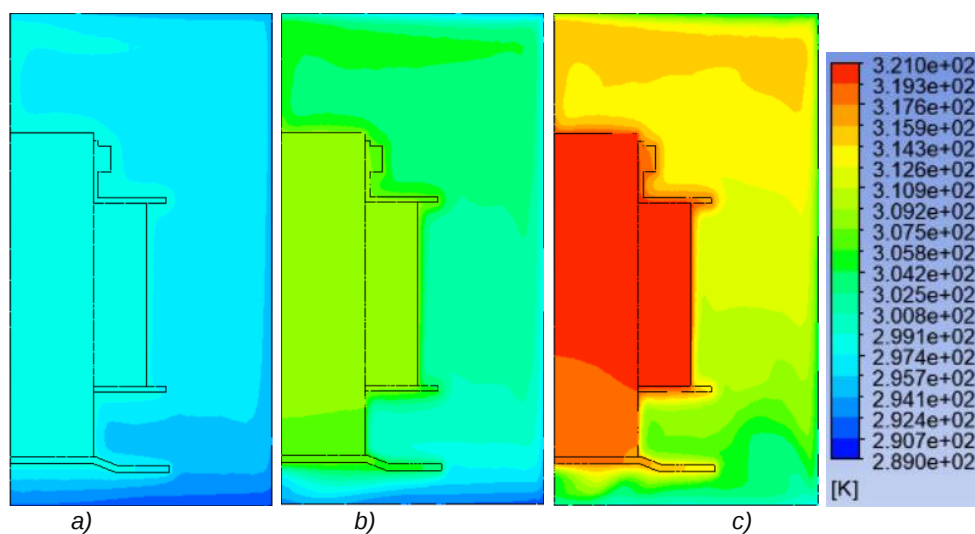


Ilustración 85. Distribución de temperatura empleando éster sintético con a) media carga, b) carga nominal y c) sobre carga – Fuente: El autor

Los perfiles de temperatura descritos anteriormente es una aproximación válida y habitual por un flujo de convección natural en estado estacionario, de tipo laminar y bidimensional, con una diferencia de densidades en la capa límite que da lugar a la fuerza de flotabilidad, situación que es reconocible para todos los niveles de carga del éster natural (Ilustración 84) y el éster sintético (Ilustración 85), y a sub-carga y nominal del aceite mineral (Ilustración 83a e Ilustración 83b). Sin embargo, este comportamiento de la capa límite no es reconocible y/o apreciable fácilmente a sobre carga para el aceite mineral (Ilustración 83c); el fluido tiene una gran cantidad de regiones isotérmicas sin un 'orden' y sin una evolución en el perfil de temperatura de la capa límite para una dirección de flujo definida. Este tipo de resultados numéricos se podría asemejar a un flujo con un comportamiento de tipo turbulento, empezando porque las fuerzas viscosas para el aceite mineral son menores que los otros fluidos por lo menos a temperaturas inferiores 330K.

El planteamiento de que el flujo de aceite mineral haya tenido un comportamiento más del tipo turbulento, es decir, no un flujo estacionario y laminar, podría soportarse al evaluar las curvas de los residuos para cada una de las ecuaciones que rige el modelamiento numérico: mientras la simulación con el éster natural a sobre carga muestra, aún con un nivel de precisión menor para la ecuación de continuidad, una convergencia estable, según el valor de los residuos, después de haber pasado unas 300 iteraciones (Ilustración 86); para la simulación numérica del aceite mineral al mismo nivel de carga ($C=1.28$), las curvas de residuos tienen un comportamiento más transitorio, es decir, poco estable de haber llegado al número de iteraciones máximo. Aunque dicha inestabilidad en la simulación (Ilustración 87a) se disminuyó y se mejoró el nivel de convergencia con un ajuste en los factores de relajación (Ilustración 87b), los mismos descritos en el apartado metodológico, los resultados de distribución de temperatura obtenidos numéricamente no corresponden a los de un flujo laminar y enfriado por convección natural, no obstante, las temperaturas máximas obtenidas por zona se asemejan considerablemente con los registros experimentales. Visto desde las propiedades del fluido, es el aceite mineral es el que presenta fuerzas viscosas inferiores con respecto a los ésteres, por lo que es más propenso a que tenga fluctuaciones aleatorias y rápidas del flujo, como puede ser evidenciado en la distribución del flujo de la Ilustración 89.

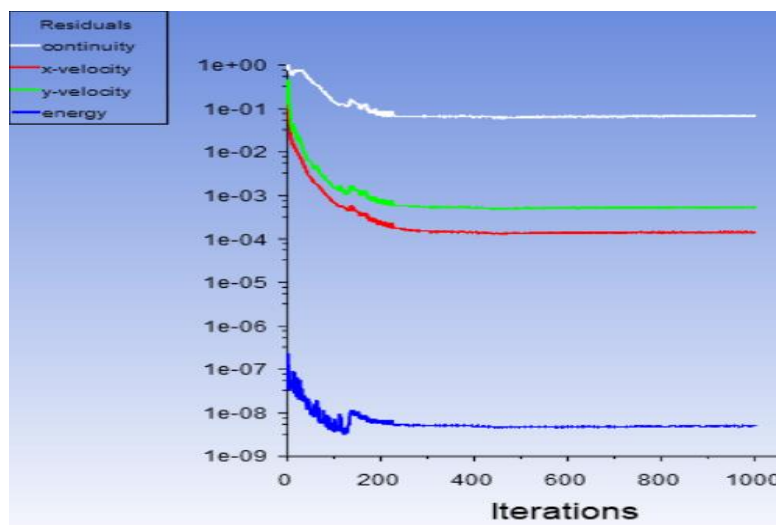


Ilustración 86. Residuos (convergencia y precisión) obtenidos para la simulación con éster natural a sobrecarga - Fuente: El autor

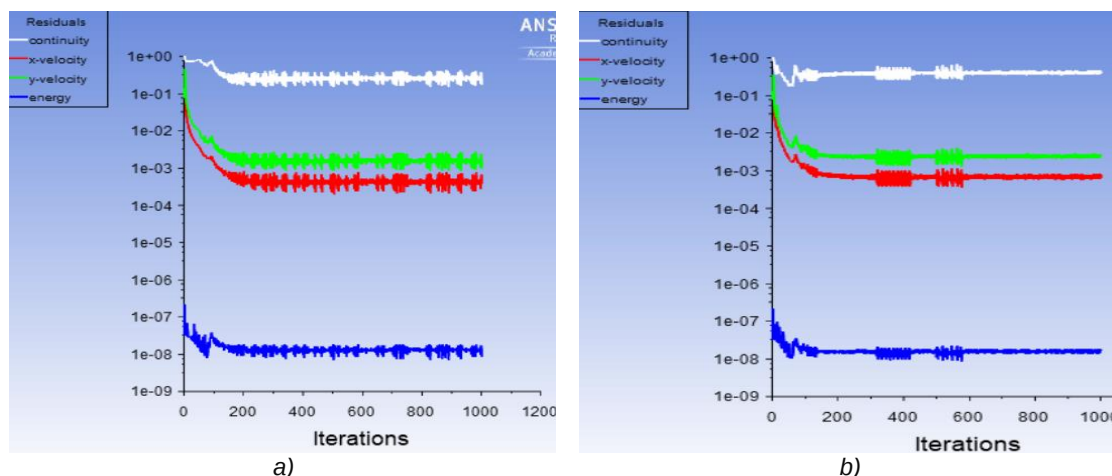


Ilustración 87. Residuos (convergencia y precisión) obtenidos para la simulación con aceite mineral a sobrecarga a) sin ajuste de factores de relajación y b) con ajuste de factores de relajación – Fuente: El autor

Es de gran importancia la correcta definición y planteamiento de las condiciones de frontera e iniciales con el que se resolverá el modelo numérico para el transformador, partiendo del reconocimiento de los principios físicos involucrados en el flujo de fluidos y transferencia de calor que se da. Por ejemplo, si no se tuviera conocimiento de cómo debería ser el comportamiento aproximado de un flujo (teniendo en cuenta las propiedades térmicas del fluido y cómo éstas pueden ser dependientes de la temperatura) sometido a convección natural y en contacto con una fuente de generación de calor constante, se podría dar por sentado que la “distribución de temperatura” de la Ilustración 88 es correcta. En este caso se definieron propiedades constantes para el éster natural y un coeficiente de transferencia calor de $50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Si bien es cierto que se han obtenido temperaturas en estado estacionario, la distribución y magnitud de las temperaturas obtenida por zona no están acordes con las obtenidas experimentalmente. En este caso es como si solo se calentará o enfriara (según corresponda) una región del fluido sin que haya ningún tipo de desplazamiento de este, por lo que al final las temperaturas del fluido adyacente a cada superficie serán próximas a la de la superficie, pero la transferencia de calor sería por conducción pura en líquidos, nada eficiente (y nada lógico) en contraste con la convección natural, pues solo se considera la conductividad térmica del líquido y no los efectos de convección.

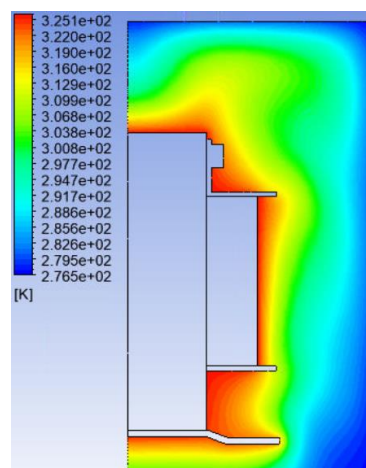


Ilustración 88. Modelo numérico errado (distribución de temperatura) para transformador sumergido en éster natural a carga nominal – Fuente: El autor

6.2.3. Líneas de Flujo y Campo de Velocidades

Inicialmente las partículas de los fluidos dieléctricos son irrotacionales, pero, por la acción de la viscosidad y el calentamiento del fluido, la vorticidad de las partículas de los aceites dieléctricos empieza a cambiar, empezando por las que están en contacto con el devanado (la fuente de calor). El fluido de la capa límite viscosa próxima a las paredes solidas (partes del transformador y paredes de la cuba) son rotacionales, y el que está más alejado tiende a ser irrotacional. Ver distribución del flujo y campo de velocidades para el aceite mineral, éster natural y éster sintético en la Ilustración 89, Ilustración 90 e Ilustración 91, respectivamente. A parte de la capa límite de velocidad, al observar la distribución del flujo para el resto de dominio del fluido, se observa que dichas vorticidades aparecen en mayor proporción en los resultados cuyas simulaciones se llevaron a cabo con el aceite mineral. Las vorticidades son notorias en la región donde no es considerable las fuerzas viscosas, tal como ha sido expuesto anteriormente.

Teniendo en cuenta que las fuerzas viscosas disminuyen en el aceite mineral en mayor proporción que en los fluidos de tipo éster, para cada condición de carga, se puede reconocer que el espesor de la capa límite es menor para este fluido, y que el perfil de velocidad cuenta con velocidades máximas superiores a las obtenidas en los resultados numéricos con los fluidos tipo éster, hasta llegar a velocidades próximas a cero al llegar a la frontera de la capa límite. Tabla 10. También se puede reconocer que las velocidades del flujo son próximas a cero en las capas de fluido adyacente a las superficies sólidas y en el fondo del tanque.

Tabla 10. Velocidades máximas (en [m/s]) obtenidas numéricamente con cada fluido para cada condición de carga - Fuente: El autor

Fluido	Índice de carga [C]		
	0.55	1	1.28
Aceite mineral	1.27507×10^{-3}	2.70078×10^{-3}	3.52074×10^{-3}
Éster natural	0.647333×10^{-3}	1.64704×10^{-3}	2.11765×10^{-3}
Éster sintético	0.847916×10^{-3}	1.84416×10^{-3}	2.66305×10^{-3}

Evaluando por zonas del volumen del control, las velocidades mínimas (próximas a cero) se encuentran en la región inferior del fluido (en los tres fluidos ensayados), de allí a que se evidencie una estratificación, lo cual es una muestra de que en dicha región del transformador se puede estar dando una transferencia de calor por conducción pura a través de dicho fluido, especialmente para el escenario de media carga. Además, también se puede observar hay una menor concentración de líneas de flujo, las cuales representan los desplazamientos que estarían dándose en el fluido dieléctrico.

En el transformador como solo está actuando la convección natural, los cambios de velocidad que se están dando en los fluidos dieléctricos están asociados a la fuerza neta que está actuando sobre el volumen del fluido (es decir, la razón de cambio de cantidad de movimiento), que en este caso se debe a las fuerzas de gravedad (fuerza de cuerpo) y fuerzas por efectos viscosos (fuerza superficial). Por estas fuerzas hay una variación de velocidad, cuyos valores máximos de velocidad por fluido son los que se observan en la Tabla 10. Es por esto por lo que la capa límite de velocidad en los ésteres tiene un espesor mayor pero velocidades máximas menores al aceite mineral: principalmente porque tienen mayores fuerzas por viscosidad y por ende menores fuerzas por gravedad (flotabilidad).

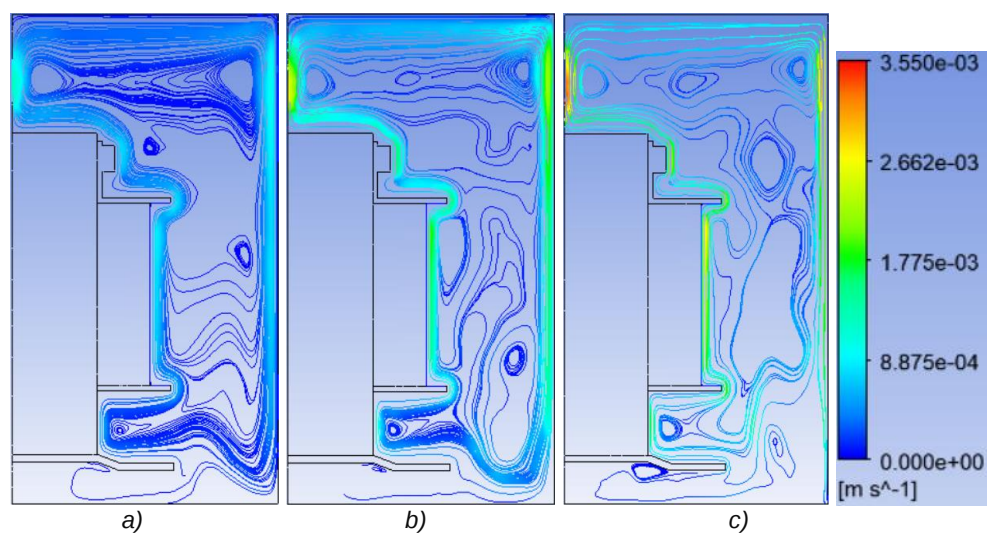


Ilustración 89. Líneas de flujo y campo de velocidades empleando aceite mineral con a) media carga, b) carga nominal y c) sobre carga – Fuente: El autor

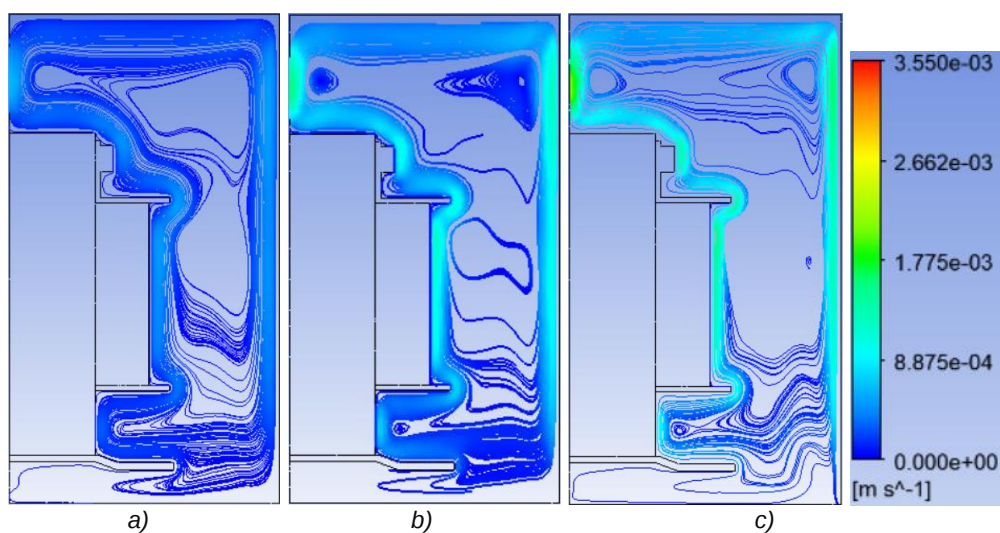


Ilustración 90. Líneas de flujo y campo de velocidades empleando éster natural con a) media carga, b) carga nominal y c) sobre carga – Fuente: El autor

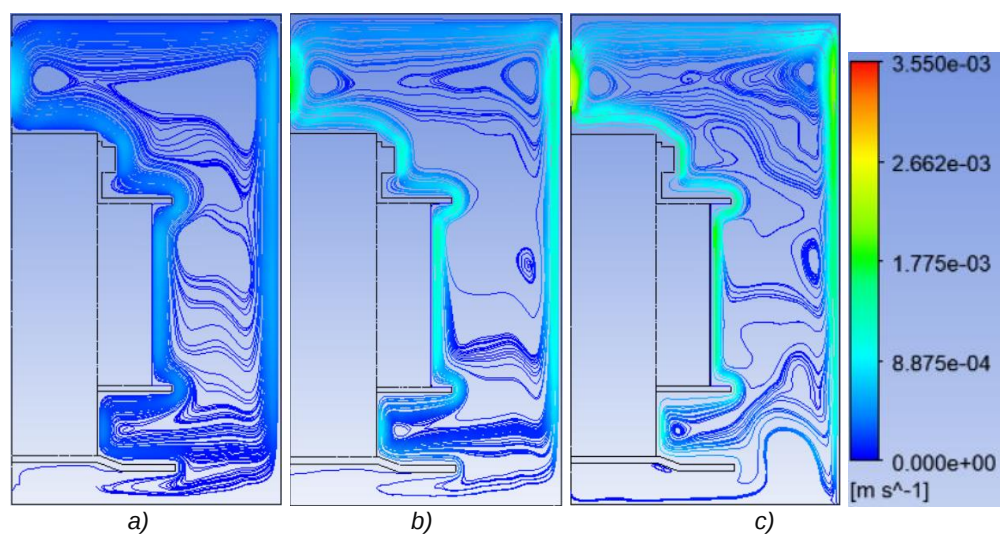


Ilustración 91. Líneas de flujo y campo de velocidades empleando éster sintético con a) media carga, b) carga nominal y c) sobre carga – Fuente: El autor

Al comparar entre ésteres, es el sintético el que tiene velocidades entre un 12% y 25% superiores a las evidenciadas en el éster natural. Por otra parte, las velocidades para el flujo de aceite mineral son entre 62% y 66% más altas que las obtenidas para los flujos de éster natural. Aunque las viscosidades del éster natural y sintético tienden a parecerse a partir de una temperatura superior a los 320K (ver Ilustración 71), lo cierto es que la del éster natural sigue siendo menor, y por lo tanto es más probable que se aprecien algunos vórtices en la Ilustración 91c. Teniendo en cuenta que las velocidades obtenidas son del orden de mm/s, resulta más conveniente para procedimientos comparativos considerar la variación de velocidad de flujo entre los tres fluidos, tal como se ha planteado.

Es cierto que no es posible validar la generación de puntos calientes con la experimentación llevada a cabo, teniendo como premisa el punto de fluencia de cada uno de los fluidos; sin embargo, aprovechando la precisión del modelo para representar la distribución de temperatura y flujo para el transformador estudiado, se simularon los modelos a carga nominal pero con una corriente de flujo de aire libre a 233.15 K y una temperatura inicial de 233.15 K. En la Ilustración 95 se observa la distribución de temperatura a carga nominal con aceite mineral, éster sintético y éster natural, con la condición de frontera e inicial planteada; así como la distribución de flujo y campo de velocidades bajo la misma parametrización y los mismos fluidos en la Ilustración 96. Nuevamente, aunque no se han evaluado fenómenos transitorios, se puede observar que las temperaturas máximas siguen prevaleciendo en los ésteres con estas condiciones, así como las velocidades máximas están con el aceite mineral (fuerzas viscosas menores). La temperatura máxima en el aceite mineral, éster natural y éster sintético han sido 265.5K, 269.3K y 268.9K, respectivamente. Por otro lado, la velocidad máxima del aceite mineral ha estado por 0.0013 m/s, y para el éster natural y éster sintético entre 0.00053 m/s y 0.00056 m/s, respectivamente; es decir, la velocidad del flujo de aceite natural fue aproximadamente un 60% superior a la de los ésteres, relación similar a la obtenida con las condiciones de frontera e iniciales planteadas en un principio.

En cuanto a las variaciones de presión, el efecto termosifón ocasionado por el calentamiento del fluido adyacente a los devanados han generado una caída de presión sobre los devanados, tal como ha sido comprobado por [4] en su investigación. Las presiones máximas y mínimas obtenidas numéricamente con cada fluido para cada índice de carga se observan en la Tabla 11. Visto por tipo de fluido, las mayores caídas de presión se han dado con el éster natural; en cuanto a índice de carga, es a sobre carga que se dan las mayores caídas de presión; y, para todos los escenarios simulados, es en la región próxima a los devanados donde se da la mayor caída de presión y va aumentando a medida que aumenta la velocidad del flujo.

Tabla 11. Presiones (en Pa) máximas y mínimas en el transformador con cada fluido y para cada índice de carga - Fuente: El autor

Índice de carga	Aceite mineral		Éster natural		Éster sintético	
	$P_{\min}$	$P_{\max}$	$P_{\min}$	$P_{\max}$	$P_{\min}$	$P_{\max}$
Sub carga	-0.27	0.16	-0.47	0.18	-0.43	0.22
Nominal	-0.72	0.3	-1.05	0.32	-1.03	0.38
Sobre carga	-1.05	0.41	-1.45	0.52	-1.42	0.47

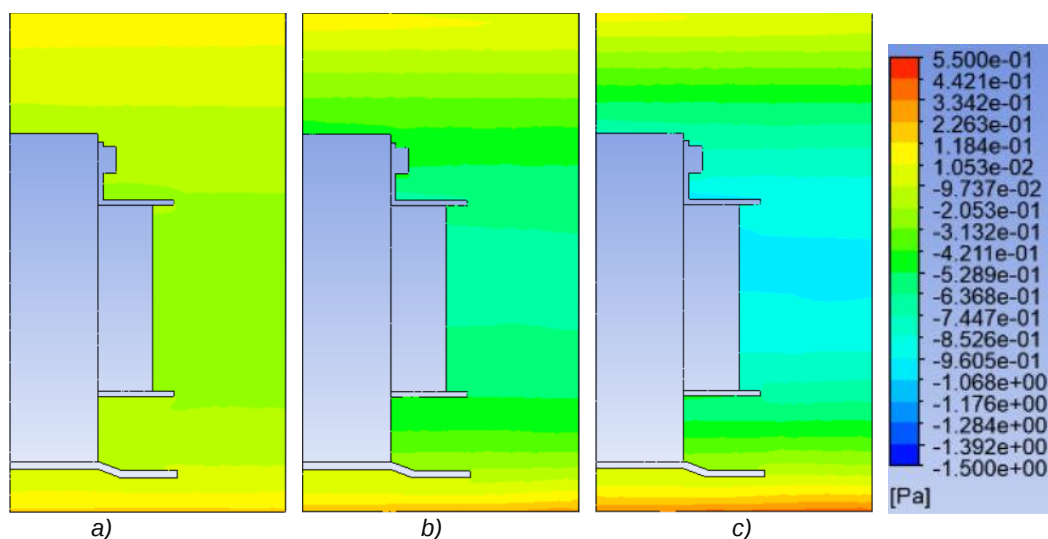


Ilustración 92. Variación de presión en el dominio del aceite mineral: a) media carga, b) carga nominal y c) sobre carga – Fuente: El autor

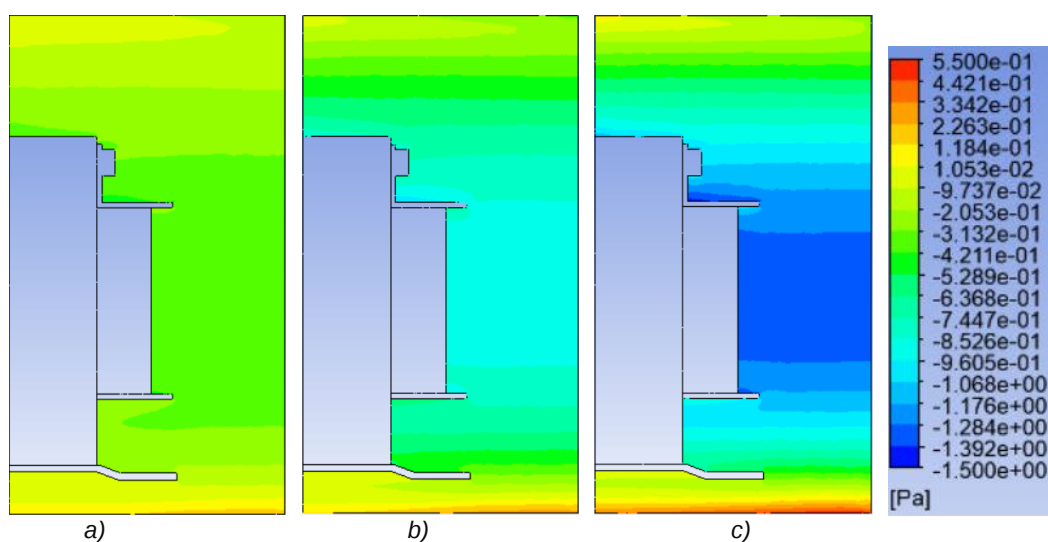


Ilustración 93. Variación de presión en el dominio del éster natural: a) media carga, b) carga nominal y c) sobre carga – Fuente: El autor

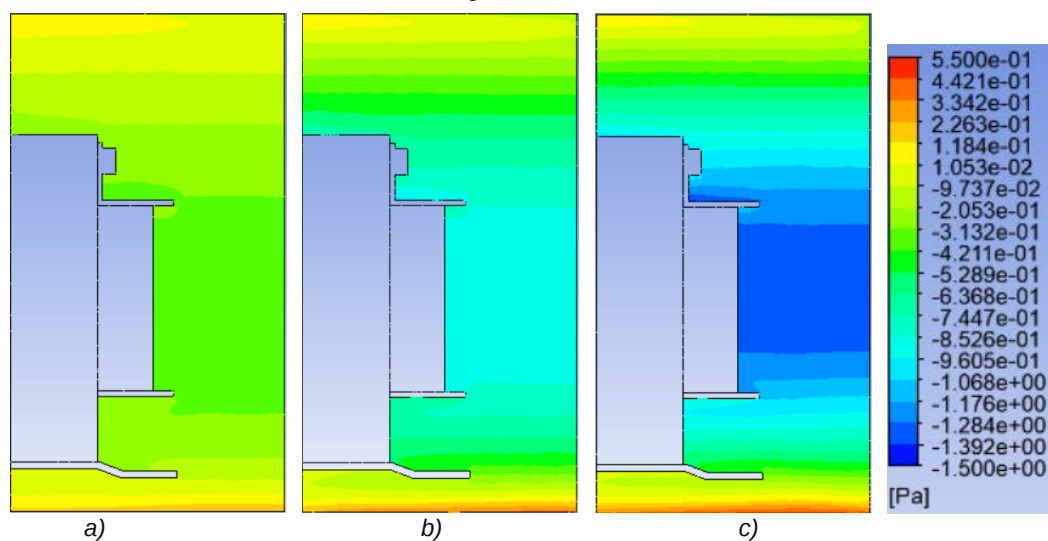


Ilustración 94. Variación de presión en el dominio del éster sintético: a) media carga, b) carga nominal y c) sobre carga – Fuente: El autor

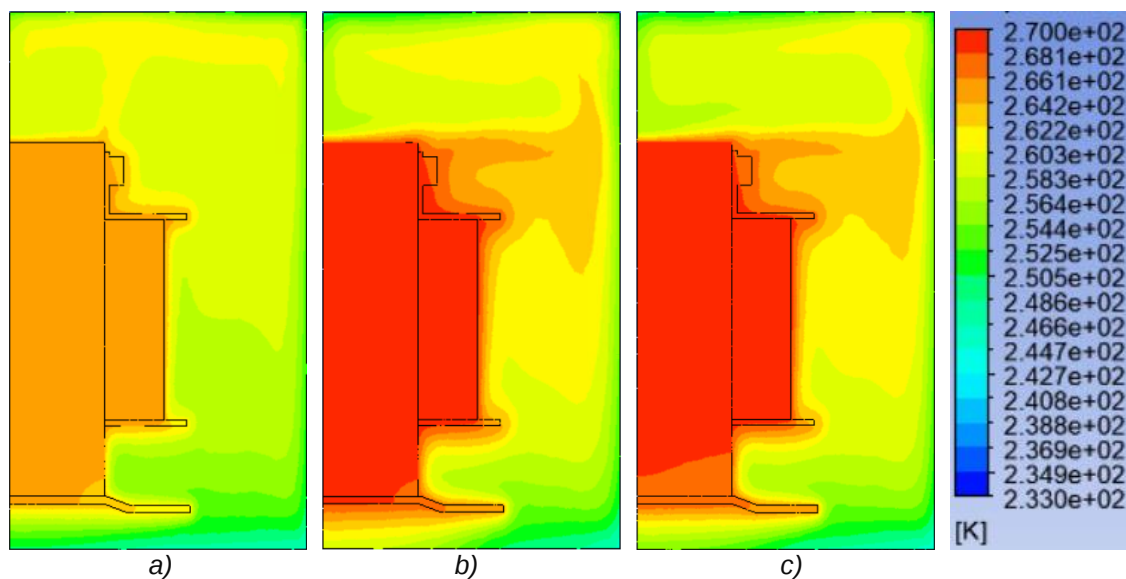


Ilustración 95. Distribución de temperatura a carga nominal a -40°C para el a) aceite mineral b) éster natural y c) éster sintético - Fuente: EL autor

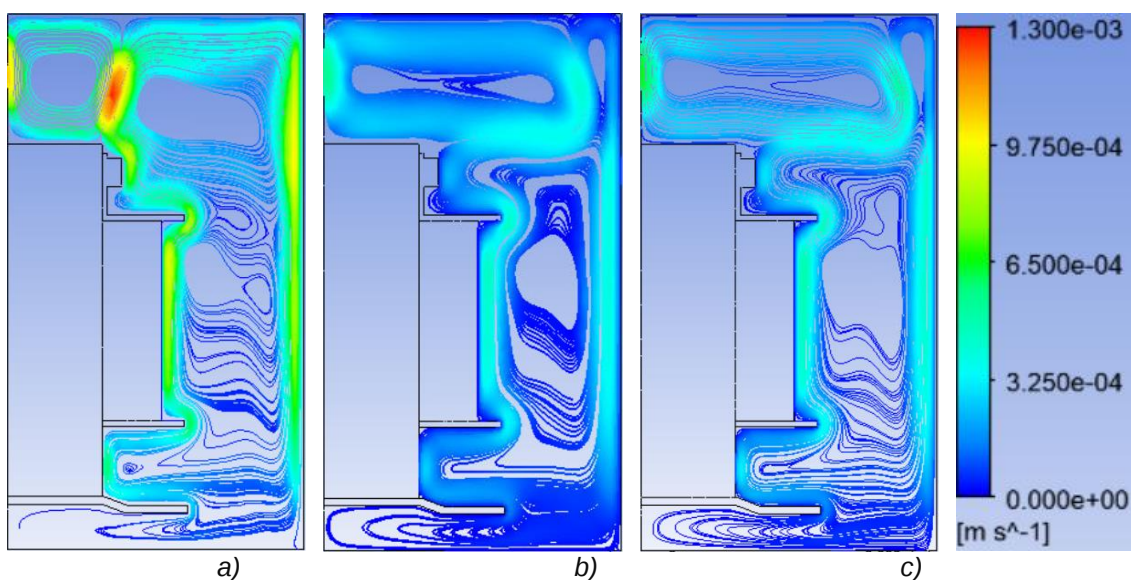


Ilustración 96. Distribución de flujo y campo de velocidades a carga nominal a -40°C para el a) aceite mineral b) éster natural y c) éster sintético - Fuente: EL autor

7. CONCLUSIONES

Tras la realización y análisis del presente trabajo, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La razón principal de no haber validado la generación de los puntos calientes en la máquina ha sido el punto de fluencia de los fluidos y la temperatura mínima alcanzada en la experimentación. Es decir, para poder analizar y verificar la generación de puntos calientes en el transformador ensayado es necesario que el transformador sea energizado una vez el fluido dieléctrico (aceite mineral o ésteres) haya alcanzado a lo sumo una temperatura menor o igual al punto de fluencia. Con el montaje propuesto y la capacidad del equipo se ha podido llegar a una temperatura ‘ambiente’ de $\approx 4^{\circ}\text{C}$ y el punto de fluencia de fluencia del aceite mineral, éster natural y éster sintético es en promedio -60°C , -21°C y -50°C , respectivamente (ver la Tabla 1).
- Continuando con la componente experimental, puede ser deducible que habrá cierto margen de error en las curvas de distribución de temperatura pronosticadas con base a las mediciones de temperatura registradas con las sondas, ya que como cualquier aproximación estadística, habrá un error asociado y este podrá ser reducido cuando se aumente la muestra (en este caso datos de temperatura) o cuando se tomen todos los datos necesarios. Es cierto que se ha estimado un $\% \varepsilon$
- Aunque no se evidencio problemas de refrigeración para la máquina, si es cierto que con los fluidos tipo éster se redujo la tasa de transferencia de calor hacia el exterior con respecto al aceite mineral, debido al aumento de la viscosidad en los ésteres a medida que disminuye la temperatura ambiente.
- El modelo numérico, con sus respectivas apreciaciones para la definición de condiciones de frontera e iniciales, resulta aceptable para determinar la distribución de temperatura en el transformador eléctrico una vez se ha alcanzado el estado estacionario. Dicho de otra manera, ha sido claro y verificable el aumento de temperatura en el transformador al sumergirse en los ésteres. Sin embargo, por ser un modelo en estado estable, no es válido para determinar y evaluar puntos calientes generados durante el arranque en condiciones de clima frío, ya que en el modelamiento numérico no se consideraron los fenómenos transitorios de transferencia de calor.
- El perfil de velocidades y la distribución de temperatura obtenidas para cada escenario permiten garantizar un nivel de precisión aceptable para el modelo numérico: (1) los puntos más calientes se dieron en el interior de la fuente de calor, y cuando hay generación de calor en sólidos las temperaturas máximas siempre van a estar lo más alejadas de las superficies exteriores de dicho cuerpo; (2) la dirección y trayectoria del flujo (las líneas de corriente) es acorde a la temperatura superficial a la que se encuentren ya sean los componentes del transformador o las paredes de la cuba; (3) el espesor de la capa límite térmica y el sentido en que dicho espesor aumenta es similar al de un flujo de convección natural sobre una placa vertical (acorde para este modelo 2D); y (4) el perfil de velocidad evidencia velocidad cero en las capas de fluido en contacto con los sólidos, aumenta conforme aumenta el espesor de la capa límite, y llega a aproximadamente cero al llegar a la frontera de la capa límite.

- En este apartado se ha enfatizado en la importancia del reconocimiento de la capa límite en análisis fluido-térmicos como el planteado, y un buen mallado en el modelo numérico para su captura y visualización en los resultados obtenidos en la simulación. Si se cuenta con un refinamiento de malla adecuado, así como unas condiciones iniciales y de contorno correctas, se podrá apreciar tanto el perfil de velocidades como el de temperatura. Además de que, si se tiene en cuenta que hay un previo conocimiento de que superficies estarán caliente o frías, se podrá garantizar, en parte, teniendo en cuenta la dirección del flujo y el cambio de espesor de la capa límite conforme este avanza, que el modelo numérico es el idóneo. Ello parte del hecho de que el espesor de la capa límite aumenta al incrementar la viscosidad cinemática del fluido y disminuye conforme aumenta la velocidad.
- Con las simulaciones a una temperatura inicial y de flujo libre próxima al punto de fluencia promedio de los tipos de fluidos estudiados, se ha corroborado que se mantiene la tendencia de temperaturas superiores en el transformador al sumergirse en ésteres que al ser sumergido en aceite mineral. Es una muestra de que el modelo recrea las condiciones a las que estará el transformador cuando este operando a dichas condiciones y una vez llegue a un estado de estabilidad. Por otro lado, las caídas de presión se mantienen en los devanados para cada escenario de carga, con cada fluido, es una muestra de que hay un desplazamiento del fluido por la variación de densidad conforme aumenta su temperatura.

8. RECOMENDACIONES Y LINEAS FUTURAS

Después de analizar el trabajo desarrollado en este TFM, se pueden establecer las siguientes recomendaciones para alguien o bien desee mejorar el trabajo realizado, o quiera continuar con su desarrollo:

- En caso tal de que se quisiera mejorar el sistema de ensayo del transformador de manera que se pudieran lograr temperaturas ambiente más bajas, es recomendable ajustar lo siguiente: mejorar el sistema de aislamiento o emplear una cámara climatizada. Si se quisiera emplear un contenedor como el que ha sido utilizado en el presente trabajo, es imperativo mejorar el aislamiento tanto en el interior como el exterior del cajón. En cuanto al equipo, sería conveniente emplear una bomba de calor, en caso de no contar con una cámara frigorífica, por ejemplo, u otro equipo de refrigeración con mayor calor o capacidad sensible, de tal manera que se puedan lograr temperaturas ambiente aún más bajas (bajo cero).

Por otra parte, si dicho enfriamiento se fuera a llevar a cabo por convección forzada, es decir, emplear una máquina (ventilador) que fuese más eficiente y con una mayor potencia y capacidad volumétrica de aire transmitido, de tal manera que se pueda hacer recircular y dirigir el flujo de aire uniformemente. Lo anterior, acompañado de un intercambiador en mejores condiciones, en especial las aletas para evitar cambios de la dirección del flujo de aire.

Adicionalmente, partiendo de la premisa de que se piense emplear un transformador cuya geometría sea la misma a la de la máquina actual, de tal manera que se puedan emplear las mismas relaciones empíricas para estimar el coeficiente de transferencia de calor, es recomendable emplear un anemómetro que permita ser ubicado fácilmente en cualquier zona de las superficies del tanque y con el que se pueda hacer una captura de datos de velocidad de flujo de aire durante todo el ensayo y en distintos puntos.

- Si bien los aceites ensayados han sido nuevos, es decir, no contaban con algún nivel de envejecimiento, debe resultar de interés hacer mediciones de viscosidad posteriores a cada ensayo con el objetivo de constatar que tanto pudo haberse visto esta propiedad en el proceso de cambio de fluido. Aunque en el trabajo de Ortiz *et al.* [18] han llegado a la conclusión, con base a los estudios experimentales y numéricos realizados, de que en fluidos frescos propiedades como la viscosidad, densidad, calor específico y conductividad térmica no suelen variar, aunque se vean afectadas por el envejecimiento y nivel de humedad, debería ser de relevancia evaluar el funcionamiento a bajas temperaturas cuando el transformador emplea como primer fluido dieléctrico uno de tipo éster y cuando está lleno con aceite mineral inicialmente y luego es re-embasado, teniendo en cuenta que: por un lado, como fue demostrado en el presente trabajo, la viscosidad de ambos fluidos difiere considerablemente a bajas temperaturas; y segundo, porque como ha sido expuesto por Zdanowski [27], pueden quedar pequeños remanentes de aceite mineral de entre 4 y 7% del volumen inicial, en los bobinados, núcleo, papel aislante y otras zonas de difícil acceso; una situación típica en los cambios de aceite dieléctrico del transformador.

- Como fue mencionado en algunas investigaciones, las simulaciones numéricas que emplean modelos en 3D serán más precisas que las 2D, y, aunque requieren un mayor costo computacional, nunca deben ser descartadas. En este sentido, se recomienda evaluar el modelo numérico para una CAD como el de la Ilustración 46a. Además de que, siguiendo esta misma línea, se podría evaluar la capacidad de refrigeración de esta máquina, una vez ajustado y mejorado el modelo numérico planteado, con modificaciones en la geometría del tanque y ver sus efectos en la distribución del flujo y temperatura en la máquina empleando fluidos dieléctricos alternativos como los de tipo éster. Algunas de las geometrías 3D propuestas son las que siguen a continuación. Dichos CAD están simplificados de tal manera que disminuya el costo computacional y que sigan siendo axisimétricos.

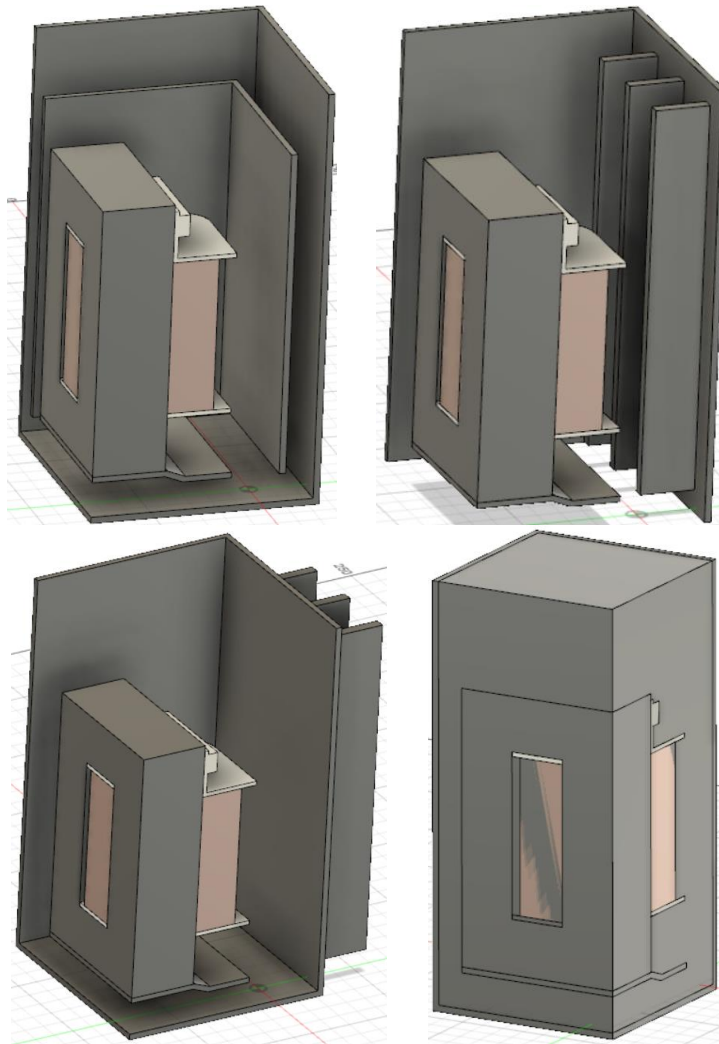


Ilustración 97. Modelos 3D a evaluar en futuros trabajos - Fuente: El autor

- Para los transformadores que operen a temperaturas muy frías, y que estén sumergidos en fluidos de tipo éster, siempre será necesario evaluar la generación de puntos calientes con arranques en frío (temperaturas próximas al punto de fluencia). Una vez sea ajustado y mejorado los ensayos experimentales, será prudente evaluar un modelo numérico en estado transitorio para validar que efectivamente se este llegando al criterio de estabilidad en determinado tiempo y la generación de puntos calientes en la máquina.

9. REFERENCIAS

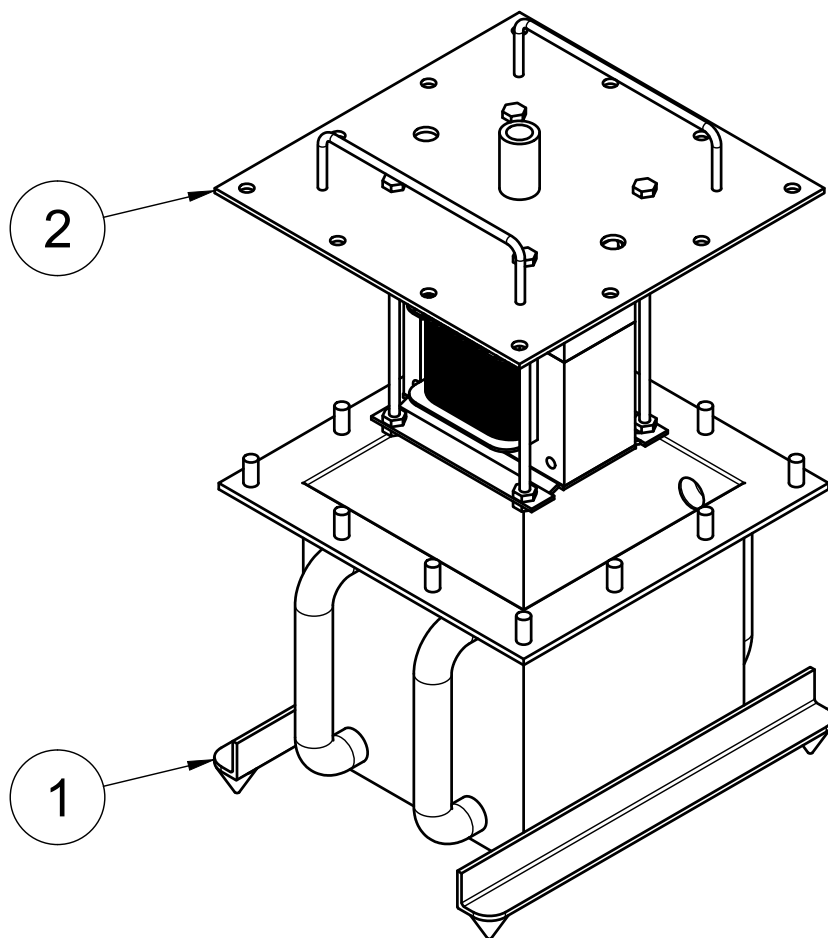
- [1] A. v Dmitriev, O. S. Dmitrieva, and I. N. Madyshev, "Prospects for the Use of Additional Cooling System for the Oil-Immersed Transformers with Thermoelectric Transducers," 2017. doi: 10.1051/mateconf/20179515008.
- [2] H. Yu, P. Yu, and Y. Luo, "Renewable low-viscosity dielectrics based on vegetable oil methyl esters," *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 12, no. 2, pp. 820–829, Mar. 2017, doi: 10.5370/JEET.2017.12.2.820.
- [3] W. Tao, W. Qianggang, and W. Peng, "Three-dimensional thermal modelling of transformers in transformer room for spatial and temporal failure analysis," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 12, no. 13, pp. 3314–3321, Jul. 2018, doi: 10.1049/iet-gtd.2017.1862.
- [4] M. Daghray, Z. Wang, Q. Liu, A. Hilker, and A. Gyore, "Experimental Study of the Influence of Different Liquids on the Transformer Cooling Performance," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 2, pp. 588–595, Apr. 2019, doi: 10.1109/TPWRD.2019.2895533.
- [5] U. Mohan Rao, I. Fofana, T. Jaya, E. M. Rodriguez-Celis, J. Jalbert, and P. Picher, "Alternative dielectric fluids for transformer insulation system: Progress, challenges, and future prospects," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 184552–184571, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2960020.
- [6] S. P. Moore, W. Wangard, K. J. Rapp, D. L. Woods, and R. M. del Vecchio, "Cold start of a 240-MVA generator step-up transformer filled with natural ester fluid," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 1, pp. 256–263, Feb. 2015, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2330514.
- [7] G. Dombek, Z. Nadolny, and A. Marcinkowska, "Thermal properties of natural ester and low viscosity natural ester in the aspect of the reliable operation of the transformer cooling system," *Eksploatacja i Niezawodnosc*, vol. 21, no. 3, pp. 384–391, 2019, doi: 10.17531/ein.2019.3.4.
- [8] S. Bhattacharya and S. Dalai, "Suitability of Alternate Fluids as Transformer Insulation - A Comprehensive Review," Kolkata, India, 2020.
- [9] C. Madsen *et al.*, "Converter transformer cold starts: specification nuances and operational impacts," in *2019 CIGRE Canada Conference*, Sep. 2019, pp. 1–9.
- [10] S. D. Northrup and M. A. Thompson, "Cold start performance of transformers filled with high molecular weight hydrocarbon liquid," *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-103, no. 11, pp. 3373–3378, 1984.
- [11] W. Lampe, "Power transformers and shunt reactors for arctic regions," *IEEE Transactions on Power Delivery*, no. 1, pp. 217–224, Dec. 1986.
- [12] K. J. Rapp, G. A. Gauger, and J. Luksich, "Behavior of ester dielectric fluids near the pour point," in *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Oct. 1999, pp. 1–4.
- [13] B. Cloet, P. Jan Jordaens, J. Nuri, and R. van Schevensteen, "Cold start of a 5.5MVA offshore transformer."
- [14] M. Kosterec *et al.*, "Analysis of thermal field in mineral transformer oil based magnetic fluids," in *Acta Physica Polonica A*, Apr. 2017, vol. 131, no. 4, pp. 937–939. doi: 10.12693/APhysPolA.131.937.
- [15] B. Liu, X. Ni, G. Yan, B. Li, and Z. Liu, "Study on the characteristics of XiMeng 11001kV at extremely-low temperature," in *IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Conference - Xi'an - China*, 2016, pp. 2580–2583.
- [16] J. Sun *et al.*, "Oil-paper Insulation characteristic and maintenance measures of oil-immersed transformer in cold environment," in *19th IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, Jun. 2017, pp. 1–5.
- [17] F. Bachinger and P. Hamberger, "Thermal measurement of an ester-filled power transformer at ultra-low temperatures: steady state," in *Procedia Engineering*, 2017, vol. 202, pp. 130–137. doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.700.

- [18] A. Ortiz, F. Delgado, F. Ortiz, I. Fernández, and A. Santisteban, "The aging impact on the cooling capacity of a natural ester used in power transformers," *Appl Therm Eng*, vol. 144, pp. 797–803, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.08.049.
- [19] A. Santisteban, A. Piquero, F. Ortiz, F. Delgado, and A. Ortiz, "Thermal Modelling of a Power Transformer Disc Type Winding Immersed in Mineral and Ester-Based Oils Using Network Models and CFD," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 174651–174661, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2957171.
- [20] R. Altay *et al.*, "Use of Alternative Fluids in Very High-Power Transformers: Experimental and Numerical Thermal Studies," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 207054–207062, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3037672.
- [21] M. Daghray, X. Zhang, Z. Wang, Q. Liu, P. Jarman, and D. Walker, "Flow and temperature distributions in a disc type winding-part I: Forced and directed cooling modes," *Appl Therm Eng*, vol. 165, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114653.
- [22] X. Zhang, M. Daghray, Z. Wang, and Q. Liu, "Flow and temperature distributions in a disc type winding-Part II: Natural cooling modes," *Appl Therm Eng*, vol. 165, no. 114616, pp. 1–9, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114616.
- [23] "Cold start recommendations for FR3 ® fluid filled transformers," Oct. 2020.
- [24] J. Fraile Mora, *Máquinas Eléctricas*, 5º. Madrid: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA. S.A.U., 2003.
- [25] Mc Graw Hill, "Ensayo de transformadores."
- [26] S. P. Moore, W. Wangard, K. J. Rapp, D. L. Woods, and R. M. del Vecchio, "Cold start of a 240-MVA generator step-up transformer filled with natural ester fluid," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 1, pp. 256–263, Feb. 2015, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2330514.
- [27] M. Zdanowski, "Streaming electrification of nycodiel 1255 synthetic ester and trafo en mineral oil mixtures by using rotating disc method," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 23, pp. 1–14, Dec. 2020, doi: 10.3390/en13236159.
- [28] Y. A. Çengel and J. M. Cimbala, *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones*, 4th ed. México, D.F.: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V., 2006.
- [29] Y. A. Çengel and A. J. Ghajar, *Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones*, 4º. México D.F., 2011.
- [30] B. García, A. Ortiz, C. Renedo, D. F. García, and A. Montero, "Use Performance and Management of Biodegradable Fluids as Transformer Insulation," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 19, p. 6357, Oct. 2021, doi: 10.3390/en14196357.
- [31] A. Piquero González, "Evaluación experimental y numérica de la influencia del envejecimiento en la capacidad refrigerante de un líquido dieléctrico biodegradable," Santander, Sep. 2017.

10. ANEXOS

A continuación, se observan los siguientes planos.

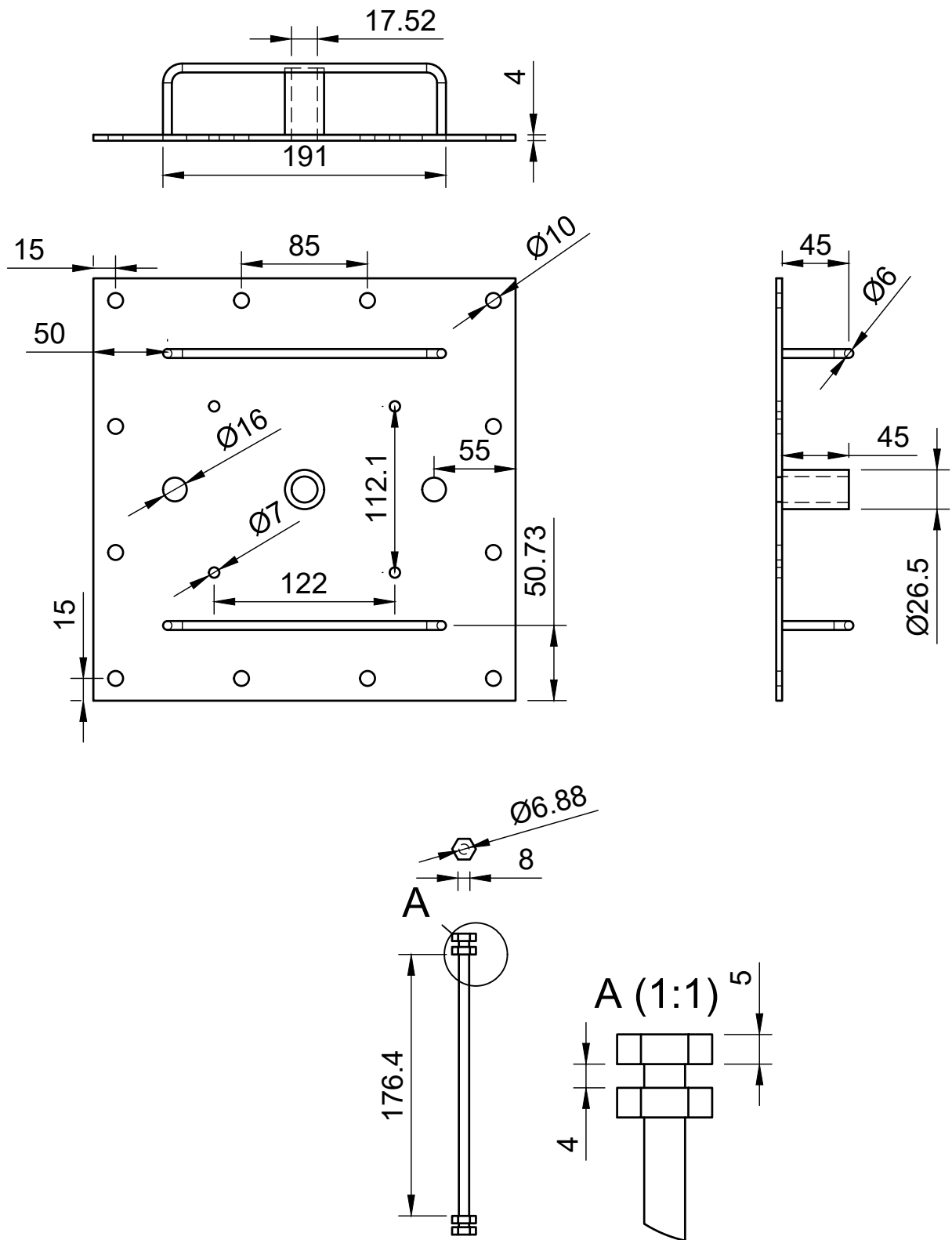
- Ensamble transformador.
- Tapa transformador y conjunto tuercas pernos.
- Lámina de núcleo superior, lámina de núcleo inferior y puesta a tierra.
- Tapa plástica superior y tapa plástica inferior.
- Bornera grande y pata tanque.
- Bornera pequeña y base del transformador.
- Bobina de alta tensión y bobina de baja tensión.
- Tanque y papel dieléctrico.



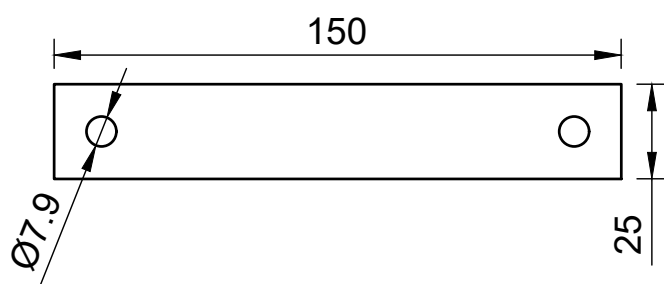
Parts List

Item	Qty	Part Number
1	1	Ensamble_cuba v2
2	1	Ensamble_transfor mador v18

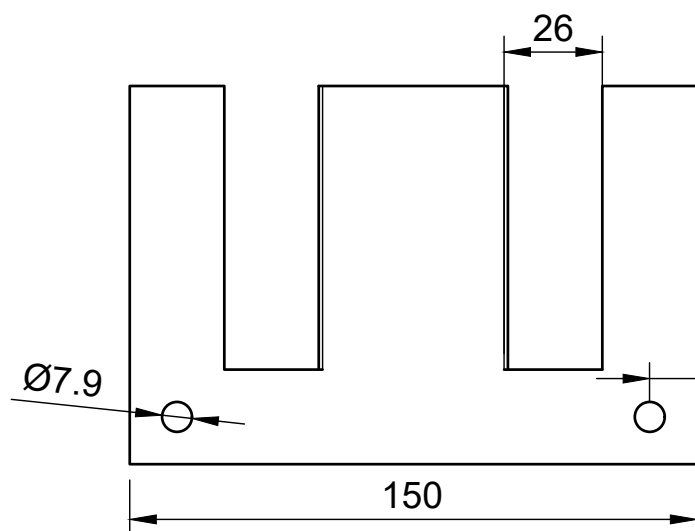
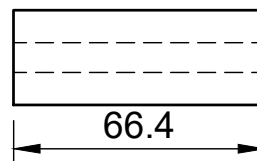
Dept. ETSIIT	Technical reference Planos transformador	Created by Andres Felipe Lopez Rodriguez	Approved by Carlos Javier Renedo E.		
Máster Universitario en Investigación en Ingeniería Industrial Universidad de Cantabria		Document type Trabajo Fin de Máster	Document status Escala 1:5		
		Title Ensamble transformador	DWG No. 1		
			Rev.	Date of issue	Sheet 1/8



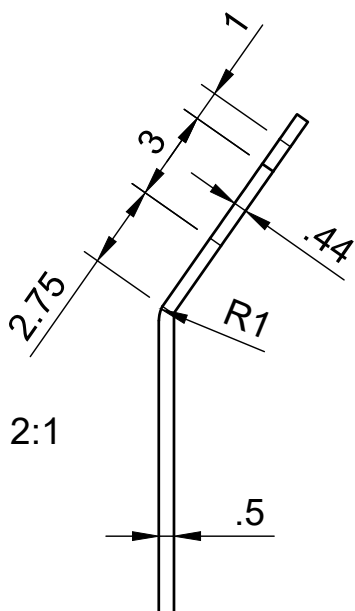
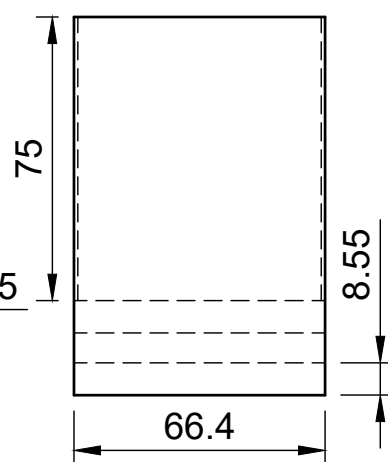
Dept. ETSIIT	Technical reference Planos transformador	Created by Andres Felipe Lopez Rodriguez	Approved by Carlos Javier Renedo E.
Máster Universitario en Investigación en Ingeniería Industrial Universidad de Cantabria	Document type Trabajo Fin de Máster	Document status Escala 1:4	
	Title Tapa transformador y tuerca_perno	DWG No. 2	
		Rev.	Date of issue Sheet 2/8



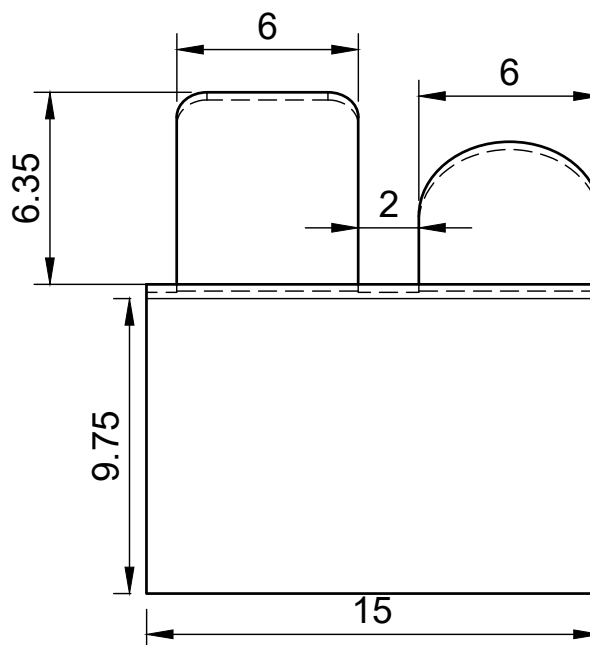
30 láminas x 0.55mm



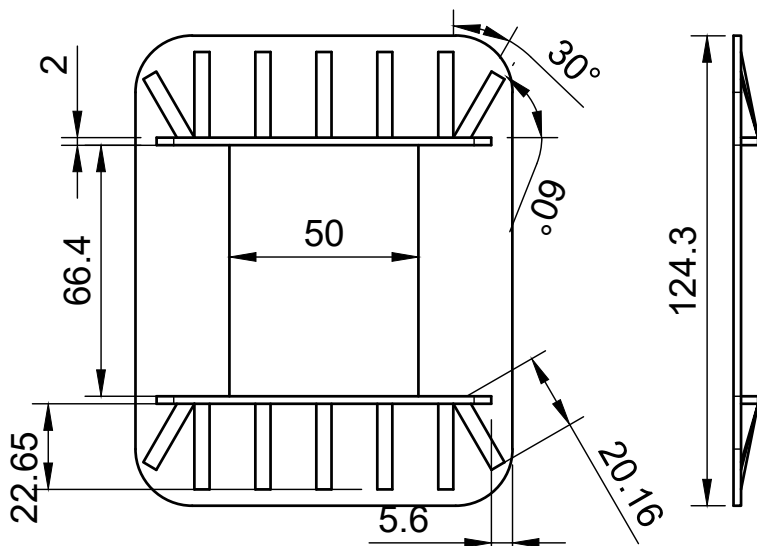
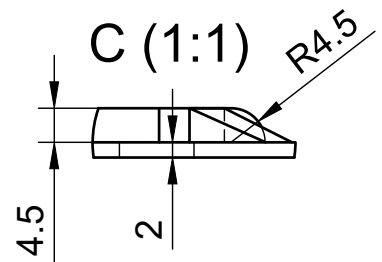
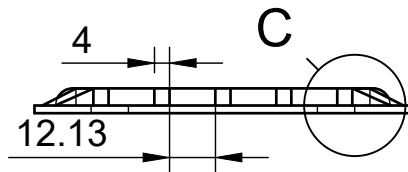
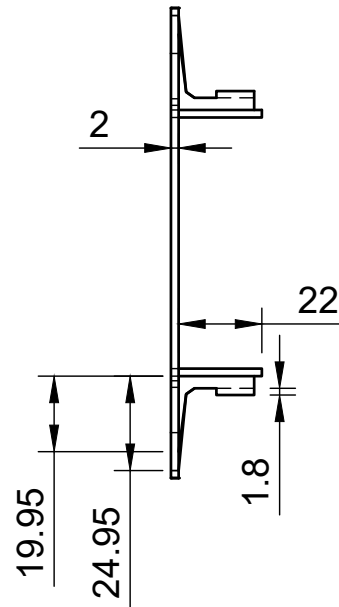
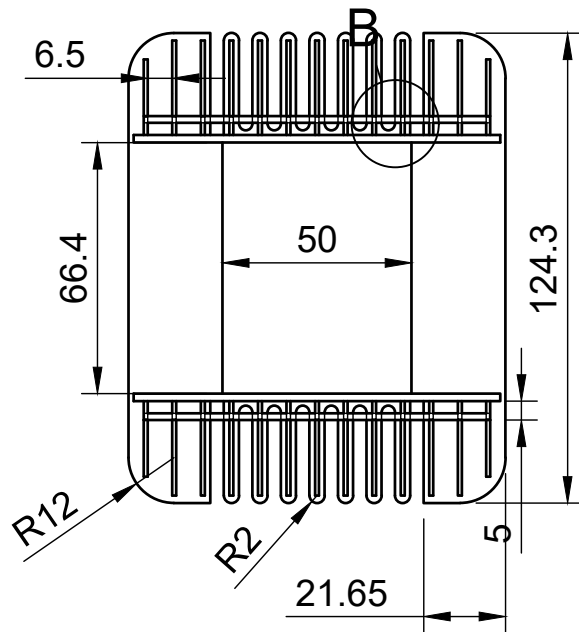
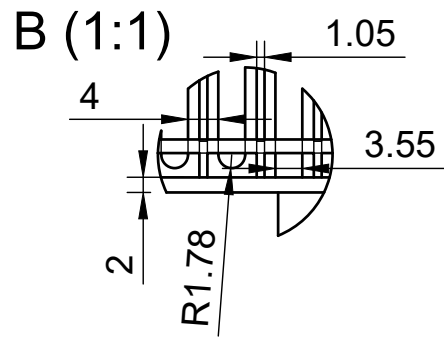
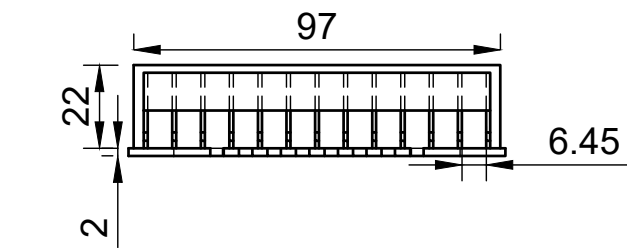
30 láminas x 0.55mm



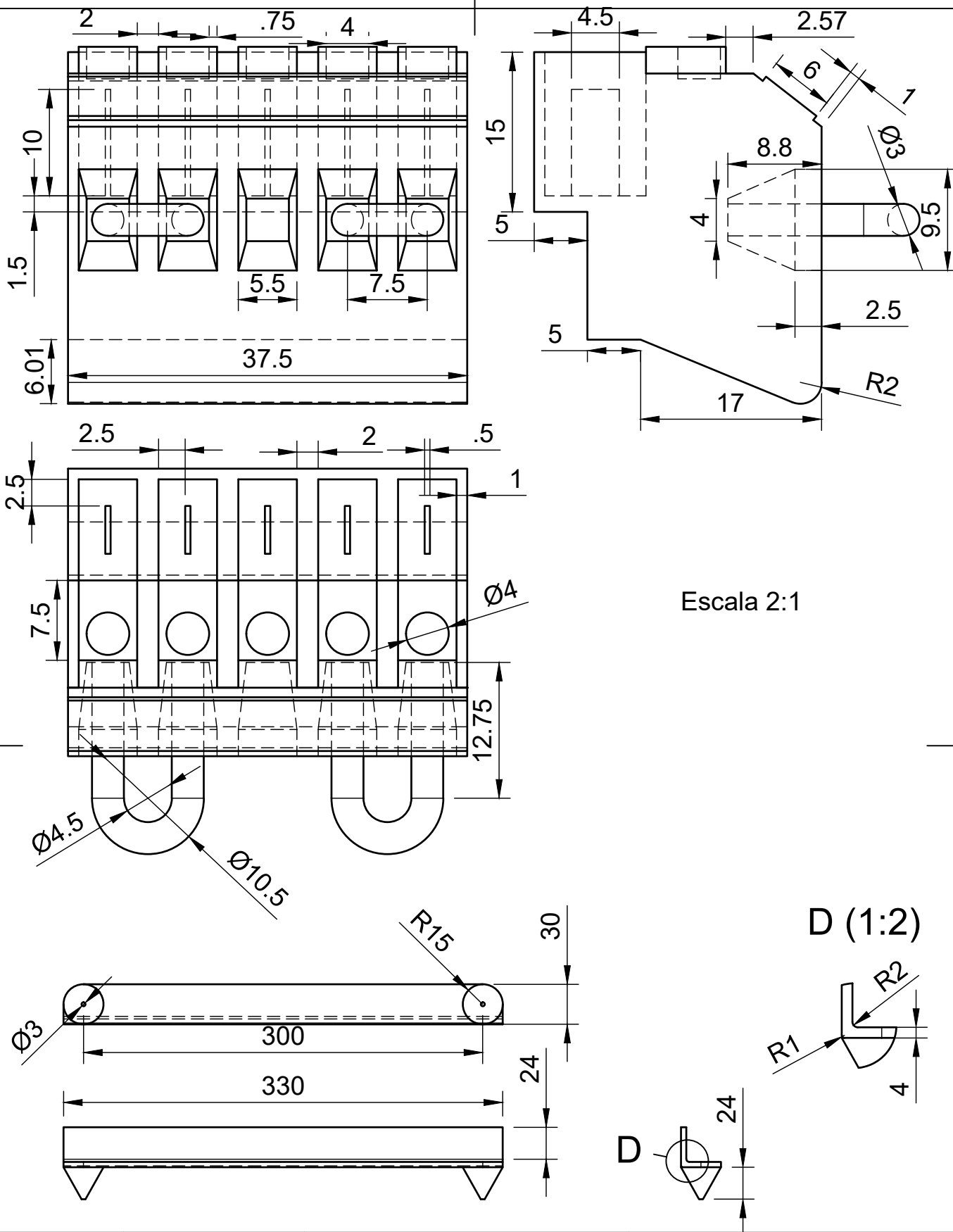
Escala 2:1



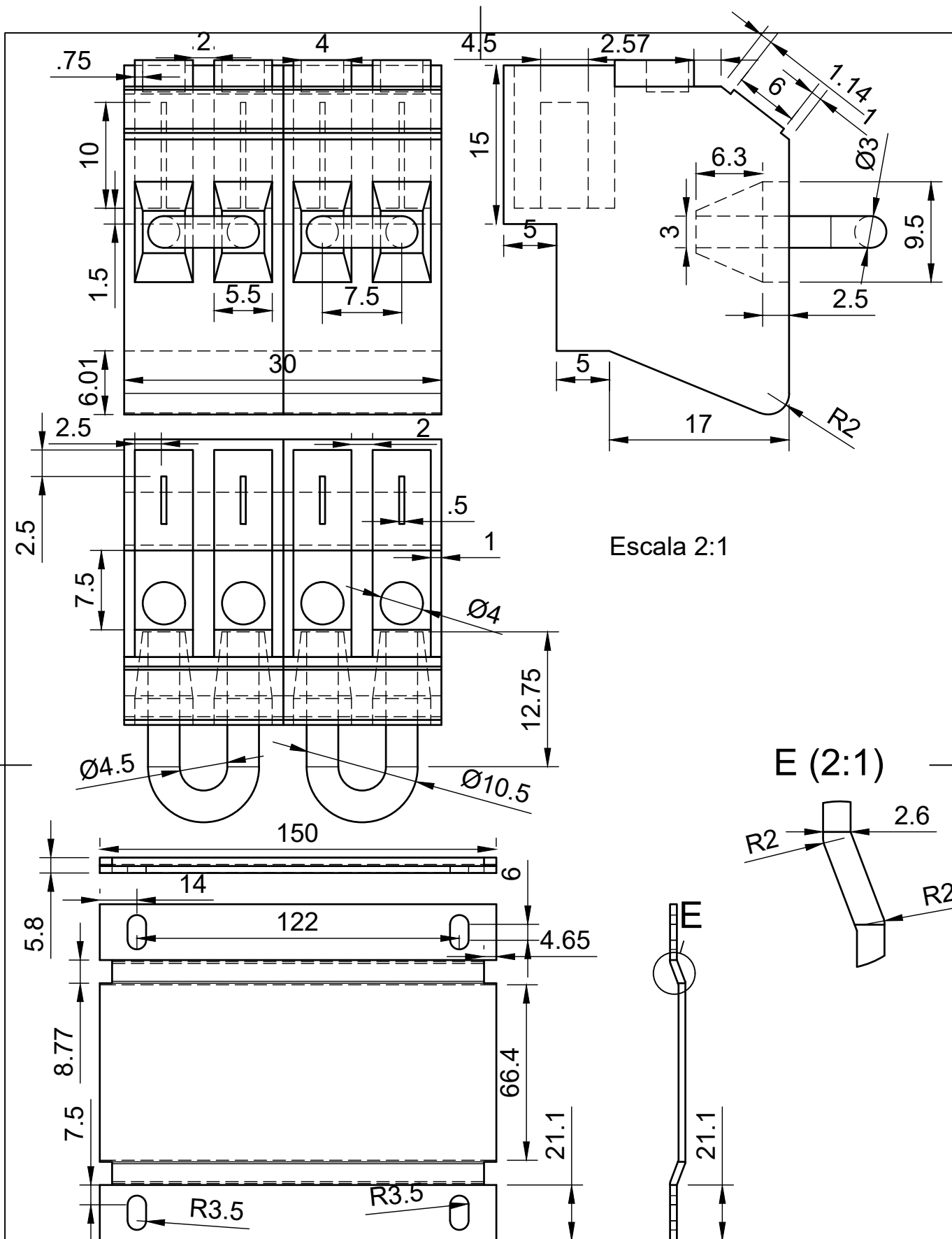
Dept. ETSIIT	Technical reference Planos transformador	Created by Andres Felipe Lopez Rodriguez	Approved by Carlos Javier Renedo E.
Máster Universitario en Investigación en Ingeniería Industrial Universidad de Cantabria	Document type Trabajo Fin de Máster		Document status Escala 1:2
	Title Lámina núcleo sup. lámina núcleo inf., y puesta a tierra		DWG No. 3
	Rev.	Date of issue	Sheet 3/8



Dept. ETSIIT	Technical reference Planos transformador	Created by Andres Felipe Lopez Rodriguez	Approved by Carlos Javier Renedo E.
Máster Universitario en Investigación en Ingeniería Industrial Universidad de Cantabria		Document type Trabajo Fin de Máster	Document status Escala 1:2
		Title Tapa plástica sup. y tapa plástica inf.	DWG No. 4
		Rev.	Date of issue
		Sheet 4/8	

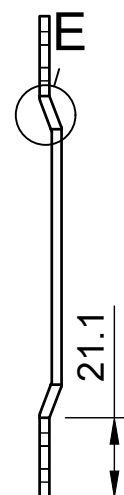
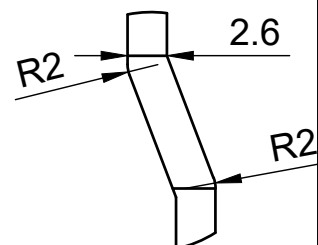


Dept. ETSIIT	Technical reference Planos transformador	Created by Andres Felipe Lopez Rodriguez	Approved by Carlos Javier Renedo E.
Máster Universitario en Investigación en Ingeniería Industrial Universidad de Cantabria	Document type Trabajo Fin de Máster		Document status Escala 1:4
	Title Bornera grande y pata tanque		DWG No. 5
	Rev.	Date of issue	Sheet 5/8

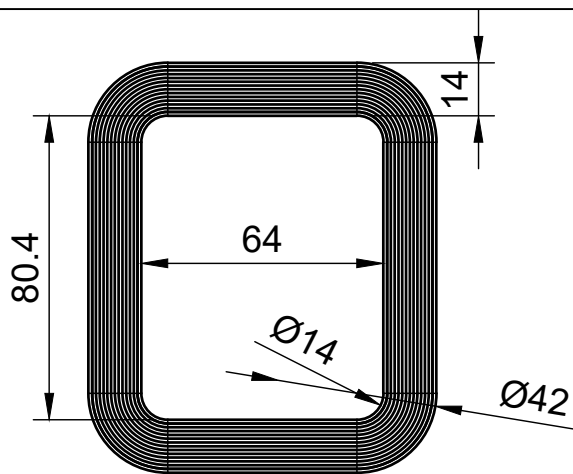


Escala 2:1

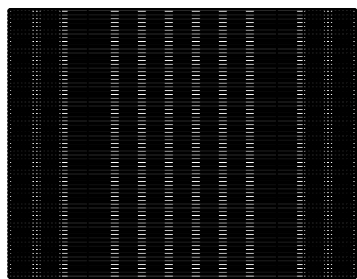
E (2:1)



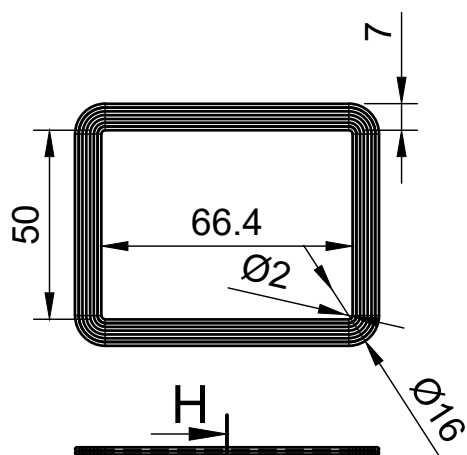
Dept. ETSIT	Technical reference Planos transformador	Created by Andres Felipe Lopez Rodriguez	Approved by Carlos Javier Renedo E.
Máster Universitario en Investigación en Ingeniería Industrial Universidad de Cantabria	Document type Trabajo Fin de Máster		Document status Escala 1:4
	Title Bornera pequeña y base de transformador		DWG No. 6
	Rev.	Date of issue	Sheet 6/8



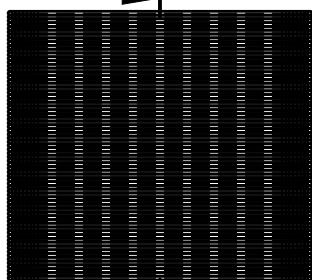
F →



F →

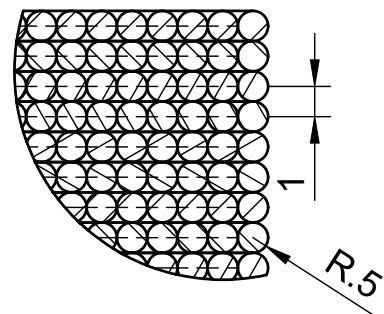


H →

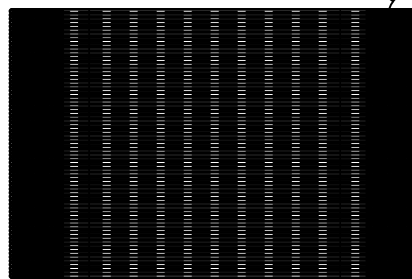


H →

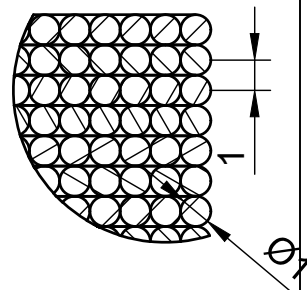
G (4:1)



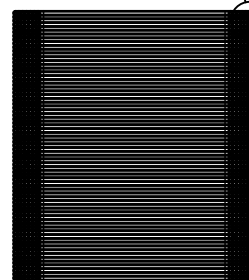
F-F (1:2)



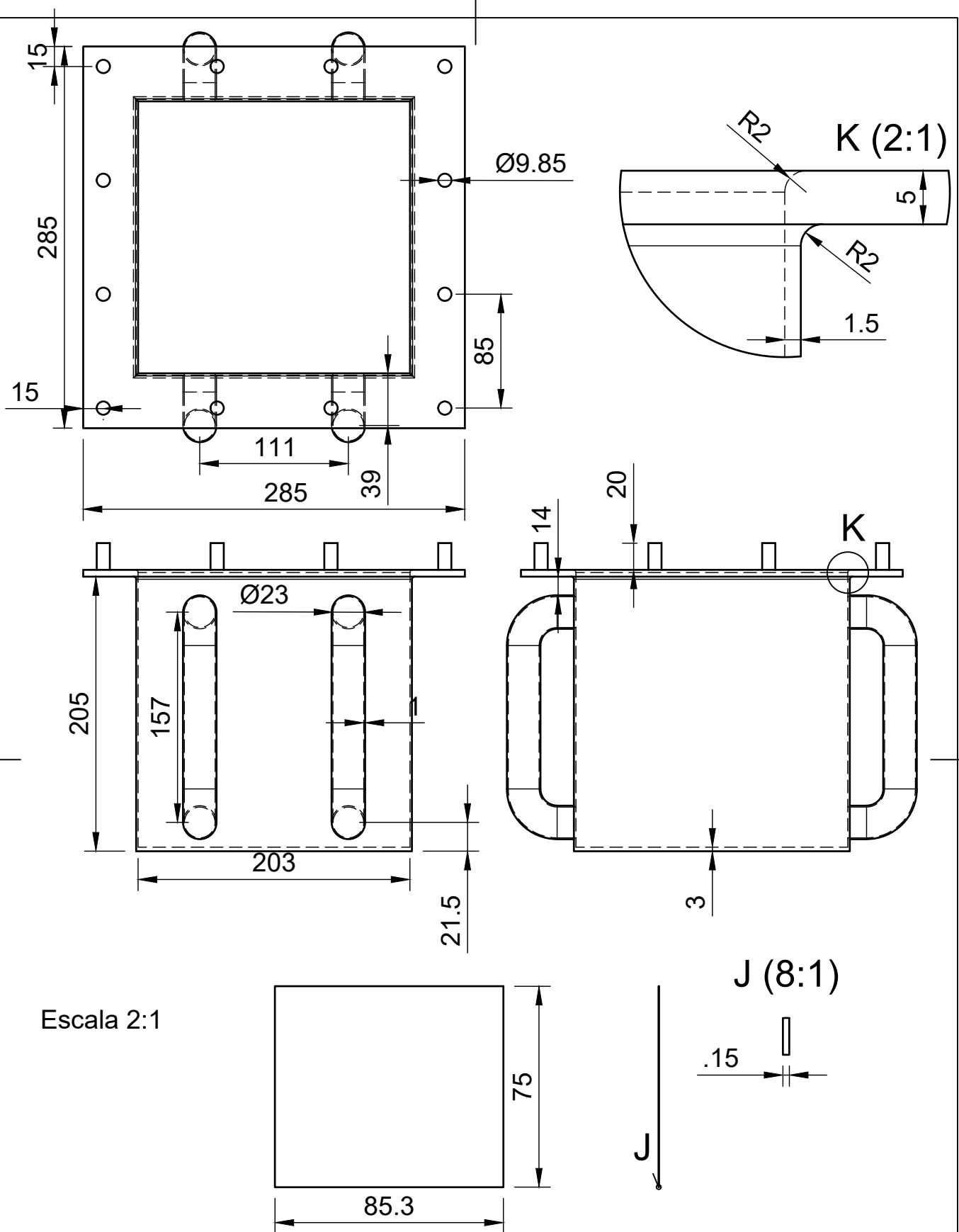
I (4:1)



H-H (1:2)



Dept. ETSIIT	Technical reference Planos transformador	Created by Andres Felipe Lopez Rodriguez	Approved by Carlos Javier Renedo E.
Máster Universitario en Investigación en Ingeniería Industrial Universidad de Cantabria	Document type Trabajo Fin de Máster		Document status Escala 1:2
	Title Bobina AT y bobina BT		DWG No. 7
	Rev.	Date of issue	Sheet 7/8



Dept. ETSIIT	Technical reference Planos transformador	Created by Andres Felipe Lopez Rodriguez	Approved by Carlos Javier Renedo E.
Máster Universitario en Investigación en Ingeniería Industrial Universidad de Cantabria		Document type Trabajo Fin de Máster	Document status Escala 1:4
		Title Tanque y papel dieléctrico	DWG No. 8
		Rev.	Date of issue Sheet 8/8