**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS** 

INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

# UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

# INFLUENCIA DEL NIVEL DE CARGA DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA EN LA DIFUSIÓN DE HUMEDAD EN SU AISLAMIENTO CELULÓSICO

(Influence of the load level of a power transformer on the moisture diffusion in its cellulosic insulation)

Para acceder al Título de

# **GRADUADO EN INGENIERÍA EN**

**TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES** 

Autor: Antonio Sánchez Gutiérrez

Septiembre – 2022



En primer lugar, me gustaría agradecer a Fernando Delgado San Román y a Diego Fernando García Gómez su ayuda. Ellos han sido mis tutores y han estado siempre dispuestos para guiarme, apoyarme y enseñarme a lo largo de este curso.

En segundo lugar, a mi familia, quienes han estado a mi lado, en lo bueno y en lo malo, apoyándome durante toda mi vida y, sobre todo, estos últimos años en la carrera, que no han sido para nada fáciles.

*Y, por último, a mis compañeros, a toda la gente que he conocido durante estos años, pero en especial a mis amigos, sin ellos no hubiese sido lo mismo.* 

Gracias a todos.





# RESUMEN

Los transformadores de potencia son máquinas indispensables en el transporte y la distribución de energía eléctrica. Son los elementos, dentro de los sistemas de potencia, encargados de elevar la tensión a unos niveles tales que se reduzcan las pérdidas por efecto Joule en los cables conductores. También hacen posible reducir la tensión a unos niveles acordes a los puntos de consumo.

Son máquinas con unas expectativas de vida altas, normalmente de varias décadas. Muchos factores influyen en la vida útil de los transformadores, pero el que más destaca es el deterioro del sistema de aislamiento dieléctrico, compuesto principalmente por papel celulósico y un fluido el cual desempeña una doble función, como aislante dieléctrico y como refrigerante.

En cada deterioro del papel, su sustitución requeriría el desarme completo del transformador, y esto es inviable, por motivos técnicos y económicos. Por ello, la vida útil del transformador está ligada a la vida útil del aislamiento sólido.

Los factores que más influyen en el deterioro del papel son principalmente el calor y la humedad. Se han realizado innumerables estudios sobre cómo influyen en la vida útil de los transformadores, pero la forma en la que se relacionan entre ellos y cómo influyen el uno en el otro requiere aún de más investigación.

El objetivo de este trabajo es investigar cómo influye la variación de las temperaturas en la difusión de la humedad en el aislamiento celulósico del transformador.

Para lograrlo, se han realizado dos modelos numéricos temporales diferentes y se han acoplado entre sí. El primero es el modelo



termohidráulico, en el cual se ha introducido una carga variable y cíclica, que simula las pérdidas por efecto Joule en el devanado del transformador. El perfil de la carga replica la demanda eléctrica del sistema eléctrico español. Esta carga da lugar a que las temperaturas del devanado alcancen un régimen permanente cíclico. El perfil de temperaturas obtenido de este modelo es importado por el segundo, que es el de difusión de la humedad, para estudiar como varían las concentraciones de humedad en función de las mencionadas temperaturas. Se han estudiado dos casos de humedad inicial, 1.5% y 3%, para un periodo de 304.5 días.

Para realizar ambos modelos se han empleado los softwares *COMSOL Multiphysics* y MATLAB. El acoplamiento entre ambas herramientas, necesario para acoplar ambos modelos, se ha llevado a cabo mediante la herramienta informática *LiveLink* proporcionada por *COMSOL Multiphysics*. Este software resuelve los modelos utilizando el Método de Elementos Finitos.

Este estudio ha evidenciado la relación que existe entre temperatura y humedad del papel dieléctrico: se observa que cuando se incrementa las temperaturas debido a la variación de carga, las concentraciones de humedad disminuyen y viceversa.



# ABSTRACT

Power Transformers are essential machines for the transport and distribution of electric energy. These are the elements, in power systems, in charge of raising voltage levels, so that the losses caused by Joule's effect decrease through the conductor cables. They also make possible to reduce the voltage until the consumption levels.

These are machines with high life expectancies, normally of several decades. There are several factors that affect the power transformers' life expectancies, but the one which stands out over the others is the dielectric insulation system, which is mainly composed of cellulosic paper and a fluid, which has a double function, as a dielectric insulation and as a cooling liquid.

Every time that the cellulosic paper degrades, it would require to disassemble the whole transformer, and this is unfeasible, due to technical and economic reasons. For this reason, it is related the power transformer's life expectancy with the cellulosic paper's one.

The facts that influence the most in the deterioration of the solid dielectric system in power transformers are the heating and the moisture's diffusion. Countless studies have been developed to study how these factors affect to the transformers' life expectancy but it is still necessary to invest in how these facts are related between them.

The objective of this study is to invest how the temperatures' variations influence on the moisture's diffusion in the cellulosic insulation of the transformer.

To achieve it, two different models have been carried out and coupled between them. The first one is the thermohydraulic model, in which a variable and cyclic load has been introduced, to simulate the losses



produced by Joule's effects in the transformer's winding. The load's profile replicates the electric demand in the Spanish electric system. This load leads to a cyclic permanent regime in the temperature's behaviour. This temperature's profile is imported in the second model, which studies de moisture's diffusion and how the moisture's concentrations vary depending on the imported temperatures. Two different cases have been studied according to the initial concentration, 1.5% and 3%, in a total period of 304.5 days.

To carry out both models *COMSOL Multiphysics* and *MATLAB* have been used. The coupling between these software, which is necessary to couple both models, has been carried out with *LiveLink* proportioned by *COMSOL Multiphysics*. This software solves the models utilizing the Finite Elements Method.

This study has demonstrated the existing relation between the temperature and the moisture in the dielectric paper: it is noted that when the temperature increases due to the load's variation, the moisture's concentrations decrease and vice versa.



# ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	IN	ITROD	UCCIÓN	.16
2	С	омро	RTAMIENTO TÉRMICO Y DE LA HUMEDAD EN EL TRANSFORMADOR	.21
2	2.1	AISLA	AMIENTO PAPEL – ACEITE	.21
	2.	1.1	Aislamiento sólido celulósico	. 22
	2.	1.2	Aislamiento líquido	. 26
2	2.2	EXPE	CTATIVA DE VIDA DEL TRANSFORMADOR	. 27
2	2.3	СОМ	PORTAMIENTO TÉRMICO DEL TRANSFORMADOR	. 29
	2.	3.1	Generación de calor	. 30
	2.	3.2	Transferencia de calor	. 34
	2.	3.3	Distribución de la temperatura	. 36
2	2.4	HUM	IEDAD EN EL SISTEMA DE AISLAMIENTO PAPEL – ACEITE	. 39
	2.	4.1	Fuentes de humedad	. 40
	2.	4.2	Distribución de la humedad	. 44
	2.	4.3	Migración e intercambio de humedad entre los aislamientos	. 46
2	2.5	INTE	RDEPENDENCIA DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO Y DE LA DINÁMICA DE LA HUMEDAD EN EL	
٦	FRAN	ISFOR	MADOR	.51
3	PF	ROPUE	ESTA DE ACOPLAMIENTO TEMPORAL ENTRE TEMPERATURAS Y HUMEDAD EN EL SISTEMA	
DIE	LÉCT	RICO	DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA	.57
2	3.1	мор	ELO TERMOHIDRÁULICO	.59
3	3.2	MOD	ELO DE DIFUSIÓN DE LA HUMEDAD	. 62
4	M		ZACION NUMERICA DEL ACOPLAMIENTO ENTRE EL MODELO TERMOHIDRAULICO Y EL	<b>~</b> -
MO	DEL	O DE L	DIFUSION DE HUMEDAD DEL SISTEMA DIELECTRICO DEL TRANSFORMADOR	.65
Z	4.1	CARA		
Z			ACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR	. 65
2	4.2	GEO	ACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR	.65 .70
	4.2 4.3	GEON MAT	ACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR MTERÍA ESTUDIADA ERIALES	. 65 . 70 . 73
2	4.2 4.3 4.4	GEON MAT MOD	ACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR MTERÍA ESTUDIADA ERIALES DELADO NUMÉRICO Y SOFTWARES UTILIZADOS	.65 .70 .73 .75
Z	4.2 4.3 4.4 <i>4.</i> 4	GEON MAT MOD 4.1	ACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR MTERÍA ESTUDIADA ERIALES DELADO NUMÉRICO Y SOFTWARES UTILIZADOS Modelados numéricos.	.65 .70 .73 .75 .76
2	4.2 1.3 1.4 <i>4.</i> <i>4.</i>	GEON MAT MOD 4.1 4.2	ACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR MTERÍA ESTUDIADA ERIALES DELADO NUMÉRICO Y SOFTWARES UTILIZADOS Modelados numéricos. Método de Elementos Finitos	.65 .70 .73 .75 .75 .76 .77
2	4.2 4.3 4.4 <i>4.</i> <i>4.</i> <i>4.</i>	GEON MATH MOD 4.1 4.2 4.3	ACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR MTERÍA ESTUDIADA ERIALES DELADO NUMÉRICO Y SOFTWARES UTILIZADOS Modelados numéricos Método de Elementos Finitos COMSOL Multiphysics	.65 .70 .73 .75 .76 .77 .78
2	1.2 1.3 1.4 <i>4.</i> <i>4.</i> <i>4.</i>	GEON MATI MOD 4.1 4.2 4.3 4.4	ACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR MTERÍA ESTUDIADA ERIALES DELADO NUMÉRICO Y SOFTWARES UTILIZADOS Modelados numéricos Método de Elementos Finitos COMSOL Multiphysics MATLAB y el LiveLink con COMSOL	. 65 . 70 . 73 . 75 . 76 . 77 . 78 . 80
2	1.2 1.3 1.4 4. 4. 4. 1.5	GEON MAT MOD 4.1 4.2 4.3 4.4 DISCI	ACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR MTERÍA ESTUDIADA ERIALES DELADO NUMÉRICO Y SOFTWARES UTILIZADOS Modelados numéricos Método de Elementos Finitos COMSOL Multiphysics MATLAB y el LiveLink con COMSOL RETIZADO (MALLADO)	.65 .70 .73 .75 .76 .77 .78 .80 .82



	4.7	MOE	DELO TERMOHIDRÁULICO	86
		4.7.1	Base teórica del modelo (ecuaciones de gobierno)	86
		4.7.2	Condiciones de contorno	88
		4.7.3	Valores iniciales, potencias y fuente de calor	90
	4.8	MOE	DELO DE LA DIFUSIÓN DE LA HUMEDAD10	00
		4.8.1	Base teórica del modelo (Ecuaciones de gobierno)10	01
		4.8.2	Condiciones de contorno10	04
		4.8.3	Variables iniciales	07
5		POSTPF	ROCESADO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS12	10
	5.1	MOL	DELO TERMOHIDRÁULICO1	10
	5.2	MO	DELO DE DIFUSIÓN12	25
6		CONCLU	USIONES GENERALES Y ESTUDIOS FUTUROS14	41
	6.1	CON	CLUSIONES GENERALES	41
	6.2	ESTU	JDIOS FUTUROS Y POSIBLES MEJORAS14	42
7		REFERE	NCIAS14	44
8		ANEXO	S14	47
	8.1	. CÓD	IGOS DE MATLAB PARA EL ACOPLAMIENTO ENTRE EL MODELO TERMOHIDRÁULICO Y EL MODELC	)
	DE	DIFUSIO	ŹN14	47
	8.2	CÓD	IGOS DE MATLAB PARA LA REPRESENTACIÓN DE LAS GRÁFICAS DE EQUILIBRIO1	54
	8.3	TABL	AS DE CONCENTRACIONES MÍNIMAS, MÁXIMAS Y MEDIAS OBTENIDAS EN LA SIMULACIÓN1	55
		8.3.1	Concentraciones de la interfase papel-aceite 1, situada en la coordenada, r = 290mm1	55
		8.3.2	Concentraciones de la interfase papel-aceite 2, situada en la coordenada, r = 280.2mm1	58



# ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1: TRANSFORMADOR MONOFÁSICO IDEAL CON NÚCLEO FERROMAGNÉTICO. FUENTE: [1]16
FIGURA 2.1: ESTRUCTURA QUÍMICA DE LA CELULOSA. FUENTE : [2]23
FIGURA 2.2: VELOCIDAD DE REACCIÓN DE LOS DIFERENTES PROCESOS DE DEGRADACIÓN DE LA CELULOSA
EN TRANSFORMADORES SUMERGIDOS EN ACEITE. FUENTE: [3]25
FIGURA 2.3: DEPENDENCIA DE LA EXPECTATIVA DE VIDA DE UN TRANSFORMADOR CON LA HUMEDAD Y LA
TEMPERATURA. FUENTE: [3]
FIGURA 2.4: BALANCE DE POTENCIAS DE UN TRANSFORMADOR. FUENTE: [2]
FIGURA 2.5: CURVA DEL CICLO DE HISTÉRESIS. FUENTE: [2]32
FIGURA 2.6: NÚCLEO MACIZO Y NÚCLEO LAMINADO. FUENTE: [8]33
FIGURA 2.7: MÉTODOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN TRANSFORMADOR. FUENTE: [9]
FIGURA 2.8: FUENTES DE HUMEDAD EN EL TRANSFORMADOR. FUENTE: [10]40
FIGURA 2.9: DISTRIBUCIÓN DE MASAS Y DE HUMEDAD DE LOS DIFERENTES TIPOS DE AISLAMIENTOS
FIGURA 2.9: DISTRIBUCIÓN DE MASAS Y DE HUMEDAD DE LOS DIFERENTES TIPOS DE AISLAMIENTOS SÓLIDOS DE UN TRANSFORMADOR. FUENTE: [3]45
FIGURA 2.9: DISTRIBUCIÓN DE MASAS Y DE HUMEDAD DE LOS DIFERENTES TIPOS DE AISLAMIENTOS SÓLIDOS DE UN TRANSFORMADOR. FUENTE: [3]45 FIGURA 2.10: ADSORCIÓN DE LA HUMEDAD EN EL PAPEL AISLANTE CELULÓSICO. FUENTE: [3]48
FIGURA 2.9: DISTRIBUCIÓN DE MASAS Y DE HUMEDAD DE LOS DIFERENTES TIPOS DE AISLAMIENTOS SÓLIDOS DE UN TRANSFORMADOR. FUENTE: [3]
FIGURA 2.9: DISTRIBUCIÓN DE MASAS Y DE HUMEDAD DE LOS DIFERENTES TIPOS DE AISLAMIENTOS SÓLIDOS DE UN TRANSFORMADOR. FUENTE: [3]
FIGURA 2.9: DISTRIBUCIÓN DE MASAS Y DE HUMEDAD DE LOS DIFERENTES TIPOS DE AISLAMIENTOS SÓLIDOS DE UN TRANSFORMADOR. FUENTE: [3]
FIGURA 2.9: DISTRIBUCIÓN DE MASAS Y DE HUMEDAD DE LOS DIFERENTES TIPOS DE AISLAMIENTOS    SÓLIDOS DE UN TRANSFORMADOR. FUENTE: [3]
FIGURA 2.9: DISTRIBUCIÓN DE MASAS Y DE HUMEDAD DE LOS DIFERENTES TIPOS DE AISLAMIENTOS SÓLIDOS DE UN TRANSFORMADOR. FUENTE: [3]
FIGURA 2.9: DISTRIBUCIÓN DE MASAS Y DE HUMEDAD DE LOS DIFERENTES TIPOS DE AISLAMIENTOS    SÓLIDOS DE UN TRANSFORMADOR. FUENTE: [3]
FIGURA 2.9: DISTRIBUCIÓN DE MASAS Y DE HUMEDAD DE LOS DIFERENTES TIPOS DE AISLAMIENTOS    SÓLIDOS DE UN TRANSFORMADOR. FUENTE: [3]



FIGURA 4.1: TRANSFORMADOR TRIFÁSICO ABB. FUENTE: [13]66
FIGURA 4.2: VISTA EN PLANTA DE UNA DE LAS FASES DEL TRANSFORMADOR. FUENTE: [13]68
FIGURA 4.3: VISTAS EN PLANTA Y EN PERSPECTIVA DE UNA DE LAS FASES DEL TRANSFORMADOR. FUENTE: [14]69
FIGURA 4.4: VISTA EN PERSPECTIVA DE UNA DE LAS FASES DEL TRANSFORMADOR. FUENTE: [14]69
FIGURA 4.5: SECCIÓN TRANSVERSAL REAL DEL TRANSFORMADOR. FUENTE: [2]
FIGURA 4.6: GEOMETRÍA SIMPLIFICADA71
FIGURA 4.7: GEOMETRÍA ACOTADA71
FIGURA 4.8: MATERIALES DEL MODELO74
FIGURA 4.9: MALLA CONTROLADA POR LA FÍSICA EN EL MODELO CFD83
FIGURA 4.10: VISTA EN DETALLE DE LA MALLA CONTROLADA POR LA FÍSICA EN EL MODELO CFD83
FIGURA 4.11: GRÁFICA DE LA POTENCIA DEMANDADA EN TODO EL PAÍS A LO LARGO DEL DÍA. FUENTE: [25]
FIGURA 4.12: GRÁFICA DE LA CARGA VARIABLE INTRODUCIDA EN COMSOL MULTIPHYSICS
FIGURA 4.13: CONDICIONES DE CONTORNO DE LA DIFUSIÓN DE LA HUMEDAD ENTRE EL PAPEL CELULÓSICO
Y EL FLUIDO. FUENTE: [4]105
FIGURA 4.14: CLASIFICACIÓN DEL NIVEL DE HUMEDAD EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN (%). FUENTE: [28]108
FIGURA 4.15: GRÁFICA DE LA CURVA DE EQUILIBRIO PARA ÉSTERES NATURALES
FIGURA 5.1: VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA CON RESPECTO A LA CARGA, EN LA INTERFASE PAPEL-ACEITE
(R=290MM), DURANTE 2 DÍAS, A UNA ALTURA Z=800MM110
FIGURA 5.2: VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA SOBRE LA INTERFASE PAPEL-ACEITE (R=290MM) A UNA ALTURA Z=800MM
FIGURA 5.3: VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA SOBRE LA INTERFASE PAPEL-ACEITE (R=290MM) A UNA ALTURA Z=200MM



FIGURA 5.4: DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS EN DIFERENTES INSTANTES, EN LA PARTE SUPERIOR DE LA
GEOMETRÍA113
źź
FIGURA 5.5: DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS EN DIFERENTES INSTANTES, EN LA PARTE INFERIOR DE LA
GEOMETRIA
FIGURA 5.6: GRADIENTE DE TEMPERATURAS ENTRE LOS DOMINIOS115
FIGURA 5.7: EVOLUCIÓN DE LAS TEMPERATURAS EN TODO EL ANCHO DE LA GEOMETRÍA A 800MM119
FIGURA 5.8: EVOLUCIÓN DE LAS TEMPERATURAS DEL CONDUCTO DE REFRIGERACIÓN DE 20MM CON EL
TIEMPO, A UNA ALTURA DE 800MM
FIGURA 5.9: EVOLUCIÓN DE LAS TEMPERATURAS DEL CONDUCTO DE REFRIGERACIÓN DE 3MM CON EL
TIEMPO, A UNA ALTURA DE 800MM120
FIGURA 5.10: EVOLUCION DE LAS TEMPERATURAS DEL CONDUCTO DE REFRIGERACION DE 3MM CON EL
TIEMPO, A UNA ALTURA DE 800MM, EN EL INSTANTE 1=304.5 D
FIGURA 5.11: EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA CON LA ALTURA, EN LA INTERFASE PAPEL-ACEITE
(R=290MM), EN EL INSTANTE D=304.5 DÍAS
FIGURA 5.12: EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA CON LA ALTURA, EN LA INTERFASE PAPEL-ACEITE
(R=290MM), EN TODOS LOS INSTANTES122
FIGURA 5.13: EVOLUCION DE LA TEMPERATURA CON LA ALTURA, EN LA INTERFASE PAPEL-ACEITE
(R=280.2MM), EN EL INSTANTE T=304.5 DIAS123
FIGURA 5.14: EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA CON LA ALTURA, EN LA INTERFASE PAPEL-ACEITE
(R=283.2MM), EN EL INSTANTE T=304.5 DÍAS
· "
FIGURA 5.15: REVOLUCIÓN 3D DE LA GEOMETRÍA DEL MODELO EN EL INSTANTE T=304.5 DÍAS125
FIGURA 5.16: CAPAS DE PAPEL CELULOSICO EN EL MODELO126
FIGURA 5.17: DISTRIBUCIÓN DE CONCENTRACIONES EN DIFERENTES INSTANTES EN LA PARTE SUPERIOR DE
LA GEOMETRÍA
FIGURA 5.18: DISTRIBUCIÓN DE CONCENTRACIONES EN DIFERENTES INSTANTES EN LA PARTE INFERIOR DE
LA GEOMETRÍA



FIGURA 5.19: EVOLUCIÓN TEMPERATURA VS CONCENTRACIÓN EN AMBAS INTERFASES EN FUNCIÓN DE LA
ALTURA, EN EL INSTANTE T = 304.5 DÍAS
FIGURA 5.20: EVOLUCIÓN DE LA HUMEDAD EN LA INTERFASE PAPEL-ACEITE 1 EN FUNCIÓN DE LA ALTURA.
FIGURA 5.21: RELACIÓN ENTRE LA TEMPERATURA Y LA HUMEDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO, EN UN PUNTO
DE LA INTERFASE 1, A UNA ALTURA DE Z=800MM131
FIGURA 5.22: CONCENTRACIONES EN AMBAS INTERFASES, LA DE PAPEL-ACEITE 1 Y LA DE PAPEL-COBRE 1, DE
LA CAPA DE PAPEL CELULÓSICO DE 1.8MM DE ESPESOR133
FIGURA 5.23: CONCENTRACIONES EN AMBAS INTERFASES, LA DE PAPEL-ACEITE 2 Y LA DE PAPEL-COBRE 2, DE
LA CAPA DE PAPEL CELULÓSICO DE 0.3MM DE ESPESOR134
FIGURA 5.24: COMPARATIVA ENTRE LA INTERFASE PAPEL-ACEITE Y LA INTERFASE PAPEL-COBRE DEL PAPEL
AISLANTE DE 1.8MM DE ESPESOR135
FIGURA 5.25: ESTABILIZACIÓN DEL RÉGIMEN PERMANENTE CÍCLICO DE LA HUMEDAD136
FIGURA 5.26: COMPARACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LA HUMEDAD EN LA INTERFASE PAPEL-COBRE A LO
LARGO DEL TIEMPO A DIFERENTES ALTURAS137
FIGURA 5.27: COMPARACIÓN DE LAS GRÁFICAS DE HUMEDAD EN EL PAPEL AISLANTE 1, DE ESPESOR 1.8MM,
PARA CONCENTRACIONES INICIALES DEL 3 % Y DEL 1.5 %
FIGURA 5.28: COMPARACIÓN DE LAS GRÁFICAS DE HUMEDAD EN EL PAPEL AISLANTE 2, DE ESPESOR 0.3MM,
PARA CONCENTRACIONES INICIALES DEL 3 % Y DEL 1.5 %



# ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL TRANSFORMADOR. FUENTE [13]65
TABLA 2: DIÁMETROS EXTERIORES E INTERIORES DEL DEVANADO DE B.T. FUENTE: [13]67
TABLA 3: PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES
TABLA 4: DIÁMETROS MEDIOS DEL DEVANADO DE B.T92
TABLA 5: LONGITUD DE LAS CAPAS DE DEVANADO DE B.T92
TABLA 6: DATOS DE LA GRÁFICA DE LA FIGURA 4.11 DE POTENCIA DEMANDADA REAL.  98
TABLA 7: DATOS DE LA GRÁFICA DE LA CARGA VARIABLE DEL MODELO.  99
TABLA 8: VALORES INICIALES PARA LAS CONCENTRACIONES DE HUMEDAD EN EL PAPEL Y EN EL ESTER 109
TABLA 9:TEMPERATURAS MAXIMAS EN LOS DIFERENTES INSTANTES DE TIEMPO
TABLA 10: TEMPERATURAS MEDIAS EN LOS DIFERENTES INSTANTES DE TIEMPO



# **1 INTRODUCCIÓN**

El transformador es una máquina eléctrica estática destinada a funcionar con corriente alterna, constituida por dos arrollamientos, primario y secundario, que permite transformar la energía eléctrica con unas determinadas magnitudes V-I, a otras con magnitudes diferentes.

Para explicar el principio de funcionamiento de un transformador, téngase en cuenta la Figura 1.1.



Figura 1.1: Transformador monofásico ideal con núcleo ferromagnético. Fuente: [1]

A la izquierda se tiene el devanado primario de N1 espiras y a la derecha el devanado secundario de N2 espiras. El primario actúa como un receptor respecto de la red o de la fuente de alimentación a la que esté conectado el transformador, en este caso V1. Esto significa que absorbe una corriente y una potencia determinada, desarrollando una fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.) E1. Se denomina fuerza contraelectromotriz porque se opone a la tensión aplicada V1 y limita la corriente del primario.

A su vez, el secundario se comporta como un generador respecto de la carga conectada a sus bornes, suministrando una corriente y una potencia a esta, generándose a su vez una fuerza electromotriz (f.e.m.) inducida E2.



Al aplicarse una tensión alterna V1 en el primario, empieza a circular una corriente alterna por él, la cual produce a su vez un flujo magnético alterno en el núcleo.

Este núcleo normalmente está compuesto de materiales ferromagnéticos con permeabilidades lo más altas posibles, para conducir el flujo magnético correctamente hacia el devanado secundario y traerle devuelta al primario, produciéndose las menores pérdidas posibles.

Debido a las variaciones periódicas de dicho flujo se generarán las f.e.m.s inducidas en los arrollamientos, nombradas anteriormente.

Teniendo en cuenta el criterio de signos y como han sido asignadas las polaridades, de acuerdo con la Ley de Lenz de oposición al cambio de flujo, se puede afirmar que la fuerza magnetomotriz (f.m.m.) del secundario actúa en contra de la f.m.m. primaria, produciendo un efecto de desmagnetización sobre esta.

También es importante resaltar el hecho de que el transformador de la Figura 1.1 es ideal. En los transformadores reales, los devanados primario y secundario tienen resistencias óhmicas pequeñas, pero no despreciables, las cuales suponen mayores pérdidas por efecto Joule. Además, en las aplicaciones reales, los núcleos ferromagnéticos no son ideales tampoco y existen pérdidas magnéticas, más bien conocidas como flujos de dispersión, los cuales completan su circuito a través del aire y no llegan a realizar el recorrido completo por el núcleo.

Generalmente N1  $\neq$  N2, y al no tener el mismo número de espiras, E1  $\neq$  E2 y consecuentemente I1  $\neq$  I2.

La gran importancia que tienen los transformadores se debe a que gracias a ellos se ha logrado el gran desarrollo de la industria eléctrica, al haberse



conseguido la realización práctica y económica del transporte de energía eléctrica a grandes distancias.

El transporte de la energía eléctrica, desde las centrales donde se genera hasta los puntos de consumo, es tanto más económica cuanto más alta sea la tensión de las líneas, ya que para una determinada potencia (corriente continua: P = V \* I), disminuye la corriente que circula por los conductores de la línea. Por lo tanto, sabiendo, que las pérdidas por efecto Joule dependen mayoritariamente de la corriente ( $P_{per} = R * I^2$ ), si para una misma potencia se aumenta, por ejemplo, la tensión 10 veces, la corriente se reduce 10 veces, y las pérdidas por efecto Joule se reducen consecuentemente 100 veces.

Sin embargo, las tensiones generadas en los alternadores de las centrales eléctricas oscilan entre los 15 kV y los 30 kV, siendo valores insuficientes para poder cumplir con la reducción de pérdidas en el transporte. Por otro lado, los puntos de consumo no soportan estas tensiones de 15 – 30 kV, ya que la mayoría de ellos han sido diseñados para soportar tensiones mucho más bajas. Los transformadores pueden funcionar como elevadores o reductores de tensión, pudiendo modificar el nivel de tensión en función a las necesidades.

Aquí en España, para el transporte de la energía, se llega a elevar la tensión hasta los 400 kV (y en otros países llegan a superar los 1000 kV). A su vez, en los centros receptores hay transformadores que se encargan de realizar la labor inversa, reduciendo la tensión hasta los niveles convenientes para su consumo.

Dentro del transformador, el arrollamiento de mayor tensión recibe el nombre de devanado de alta tensión (A.T.), mientras que el de menor tensión, devanado de baja tensión (B.T.).



Los transformadores son máquinas con rendimientos muy altos, ya que no disponen de elementos móviles, pudiendo llegar en la práctica, los grandes transformadores, a rendimientos cercanos al 100 %, [1].

Por otro lado, durante su operación, son máquinas que están sometidas a diversas condiciones como esfuerzos, presiones o temperaturas que pueden producir deterioros y averías, pudiendo acortar su vida útil considerablemente. Para su correcto funcionamiento se deben de llevar a cabo labores de mantenimiento preventivo que permitan determinar la situación de la máquina y evitar dichos deterioros. Estas labores de mantenimiento se realizan mediante métodos no invasivos, en los cuales se extraen muestras de aceite o del fluido dieléctrico en cuestión y se analizan, evitando de esta forma el desmantelamiento del transformador. Para ello se evalúan los cuatro circuitos principales de la máquina: El circuito eléctrico, el geométrico, el magnético y el dieléctrico, [2].

Los transformadores llevan siendo objeto de estudio desde hace mucho tiempo y, aun así, sigue habiendo muchos aspectos sobre los cuales todavía queda mucho por investigar y aprender.

La principal causa de deterioros y acortamientos de la vida útil de un transformador es el deterioro del sistema de aislamiento, que está formado básicamente por material sólido celulósico y un líquido dieléctrico. Si se garantiza un correcto funcionamiento y mantenimiento de este sistema dentro del transformador, se podría garantizar un correcto funcionamiento de este a lo largo de su vida útil. Naturalmente existen otros sistemas que también pueden afectar a la vida útil de la máquina, como por ejemplo el sistema de refrigeración y de ventilación, entre otros [2].

Dos factores fundamentales que influyen en la durabilidad y la vida útil del sistema dieléctrico del transformador son la temperatura y la humedad. Aunque ya se hayan realizado muchos estudios sobre la disipación de calor



o la difusión de la humedad, la relación y como afectan la una en la otra, requiere de una mayor investigación y en eso se va a centrar este trabajo.

Algunas de las investigaciones que se han utilizado para realizar este estudio son, entre otras: La investigación llevada a cabo por César Ruiz Diego durante este curso 2021 – 2022, [2], la de Wilver Correa Bravo en el año 2018, [3], la de Diego Fernando García Gómez en 2012, [4], o la de Rafael David Villarroel Rodríguez en el año 2015, [5].



# 2 COMPORTAMIENTO TÉRMICO Y DE LA HUMEDAD EN EL TRANSFORMADOR

### 2.1 AISLAMIENTO PAPEL – ACEITE

Los transformadores requieren de sistemas de aislamiento que les proporcionen la mayor protección dieléctrica posible, aislando las partes activas que se encuentren a diferentes tensiones entre sí y de las partes no activas. Dicho aislamiento se compone principalmente de: un aislamiento sólido (papel y cartón) y uno líquido (aceite, ésteres, etc.), teniendo este último una doble función que es por una parte la de aislar dieléctricamente y por otra parte la de actuar como refrigerante, para mejorar la evacuación del calor generado en el interior del transformador, [6].

Existen dos tipos de transformadores dependiendo de la forma en la que se refrigera la máquina: transformadores en seco, que no requieren de un líquido refrigerante, ya que suele ser suficiente la refrigeración que proporciona el aire que circula por él. Generalmente se trata de transformadores de baja potencia. Y los transformadores sumergidos en líquido dieléctrico, para máquinas que tengan que soportar mayores potencias, siendo este último tipo el que se va a estudiar en este trabajo.

La vida útil del transformador depende muy significativamente del buen desempeño de su sistema dieléctrico y de la calidad de este. Un buen y correcto aislamiento se traduce en fiabilidad de la máquina durante su servicio. Lo normal es que inevitablemente los diferentes materiales de aislamiento se degraden con el paso del tiempo debido a diferentes procesos fisicoquímicos que se producen y a las condiciones de operación a las que se tiene que exponer el transformador, [6].

En conclusión, es de vital importancia asegurar un sistema de aislamiento fiable y seguro y que además perdure a lo largo del tiempo. A continuación,



se mostrará más en detalle los materiales de aislamiento de los transformadores y los factores que influyen en su degradación.

## 2.1.1 Aislamiento sólido celulósico

Como ya se ha explicado previamente la expectativa de vida del transformador viene determinada principalmente por el envejecimiento y deterioro del sistema de aislamiento dieléctrico.

Uno de los aislantes sólidos más utilizados, sino el que más, es el papel Kraft, cuya función principal es envolver los conductores de los bobinados. Un segundo aislamiento sólido es el cartón prensado. Ambos materiales proporcionan estructuras de aislamiento rígidas dieléctrica y mecánicamente hablando, [7].

El papel Kraft está formado por fibras de celulosa, sin embargo, no se encuentra en forma pura en la naturaleza, aunque se pueden encontrar compuestos formados por esta, tales como las fibras de algodón, la madera, etc.

Los aislantes sólidos pueden ser fácilmente impregnados en aceite u otros líquidos dieléctricos. Se aplica principalmente en transformadores con altas tensiones o con altos gradientes de la intensidad del campo eléctrico.

El principal problema que esto conlleva es que la celulosa impregnada en aceite con el paso del tiempo adquiere humedad. Dicho contenido en humedad del papel se utiliza como un indicador de antigüedad.

El sistema de aislamiento sólido se compone de varios materiales cuya distribución es, en general, la siguiente: en las bobinas de baja y alta tensión se utiliza el papel Kraft, mientras que los devanados son separados entre sí y del núcleo mediante cilindros de cartón prensado que, junto con esmaltes especiales y bandas de fibra de vidrio, permiten que el



transformador sea capaz de soportar mayores tensiones y esfuerzos térmicos y mecánicos. Los bobinados son conductores de cobre con aislamiento sólido entre espiras y entre capas.

La mayoría de los materiales utilizados en el aislamiento sólido de los transformadores de potencia son materiales porosos, lo cual exige eliminar mediante vacío los gases y el agua contenida en los poros, así como, posteriormente, rellenar estas cavidades con aceite.

El papel Kraft tiene una base de celulosa,  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , como se muestra en la Figura 2.1, siendo esta un polisacárido compuesto de moléculas de glucosa, [7].



#### Figura 2.1: Estructura química de la celulosa. Fuente : [2]

Los aislantes sólidos dieléctricos suelen tener aproximadamente esta proporción de compuestos, [2]:

- Celulosa: 75 % 85 %.
- Hemicelulosa: 10 % 20 %.
- Lignina: 2 % 6 %.
- Compuestos inorgánicos: < 0.5 %.

El papel aislante utilizado en los transformadores de potencia debe de tener unas características específicas. Para conseguir buenas propiedades



eléctricas en el papel, es necesario encontrar un buen balance entre la longitud de las fibras y las propiedades mecánicas, aunque sea a costa de debilitar la resistencia mecánica del aislante. El problema es que se pueden dar casos en los que se someta al transformador a tensiones mecánicas excesivas y que estas no puedan ser soportadas por el papel. Es por eso por lo que, para determinadas condiciones, se tenga que complementar con el uso del cartón prensado, [7].

Es importante que el papel aislante no se degrade, aunque resulte inevitable en la mayoría de los casos. En el momento que comienza a degradarse todas sus propiedades se deterioran, aunque las propiedades mecánicas lo hacen más rápidamente que las propiedades dieléctricas.

#### Deterioro del aislamiento sólido en transformadores

Dentro del transformador los materiales envejecen y se descomponen con el tiempo. El envejecimiento se acelera considerablemente cuando son expuestos a altas temperaturas y humedad. El deterioro del fluido dieléctrico tiene una solución relativamente sencilla, ya que se puede resolver reemplazándolo o depurándolo. Sin embargo, el reemplazo del papel aislante no suele ser viable. Por eso el deterioro de este define la vida útil del transformador.

En los aislamientos sólidos no se produce la regeneración total del dieléctrico tras producirse la perforación eléctrica. Es decir, una vez ocurra la primera perforación, la integridad y seguridad del transformador se verá comprometida. Hay que tener en cuenta tanto las propiedades dieléctricas del aislante como otro tipo de propiedades y fenómenos, los cuales se nombran a continuación: La inestabilidad química, la oxidación, la hidrólisis, la migración de sustancias químicas activas, la contaminación, el deterioro electroquímico y el efecto del campo eléctrico. Tienen una gran



relevancia en el condicionamiento del comportamiento de los aislantes sólidos, [7].

Los aislamientos celulósicos se degradan por diversos agentes como son principalmente la pirólisis (por efecto de las temperaturas), la hidrólisis (por efecto de la humedad) y la oxidación, aunque cada uno de ellos actúe con una velocidad de reacción diferente en función de la temperatura, como se muestra en la Figura 2.2, [3].



# Figura 2.2: Velocidad de reacción de los diferentes procesos de degradación de la celulosa en transformadores sumergidos en aceite. Fuente: [3]

Se puede observar que el calor y el agua tienen un mayor efecto en la degradación del papel celulósico que el oxígeno.

La temperatura, es una condición fundamental en la operación del transformador que se puede controlar manteniendo en buenas condiciones el sistema de refrigeración y evitando largos periodos de sobrecarga, así



como mitigando todas las posibles condiciones medio ambientales que influyan en ella.

Por otra parte, el contenido de agua del aislamiento celulósico puede ser controlado mediante procesos de secado, en línea o con el transformador desenergizado. La humedad es un factor que también se tiene en cuenta en el proceso productivo y de ensamblado, ya que se le realiza un secado a la parte activa antes de ser impregnada en aceite, [3].

Las fibras de la celulosa son muy higroscópicas y las moléculas de agua se acumulan en ellas, lo que causa una continua descomposición de las cadenas de celulosa, produciendo así la glucosa libre, [7].

Por lo tanto, es esencial prevenir la absorción de humedad por el papel. El problema es que, aunque esto se consiguiese, se produciría agua de forma interna, debido al envejecimiento natural de la celulosa, [7].

## 2.1.2 Aislamiento líquido

La gran mayoría de los transformadores bajo carga en los sistemas eléctricos de potencia se encuentran inmersos en un líquido dieléctrico. Actualmente el más usado es el aceite mineral, por sus excelentes propiedades físico - químicas y eléctricas.

El líquido dieléctrico y la calidad de este, desempeña una función muy importante a la hora de asegurar la fiabilidad, la eficiencia y la perdurabilidad del transformador durante toda su vida útil, [6].

Su función principal es la de aislar eléctricamente las diferentes partes activas del transformador, además de actuar como un recubrimiento protector que evita la oxidación de las superficies metálicas. Otra función importante del líquido dieléctrico es la de mejorar la transmisión de calor. Retira el calor de las partes activas mediante mecanismos de conducción y



convección para disiparlos a la atmósfera mediante convección y radiación. La última función, pero no menos importante, es la de actuar como indicador de su vida operativa. Se extraen muestras de diferentes puntos del transformador a lo largo de su vida útil para examinar la degradación del aceite mediante ensayos de laboratorio.

Los líquidos utilizados en los transformadores tienden a degradarse con el paso del tiempo, afectando negativamente a sus propiedades aislantes y refrigerantes. Existen muchos factores que aceleran dicho proceso como pueden ser: La temperatura, el agua, los gases disueltos o el estrés eléctrico, entre otros, [6].

Un deterioro prematuro del líquido dieléctrico puede suponer un gran impacto económico, ya que se requiere una gran cantidad de este para el correcto funcionamiento del transformador. Por eso es de vital importancia invertir tiempo y dinero en la correcta conservación del líquido dieléctrico.

## 2.2 EXPECTATIVA DE VIDA DEL TRANSFORMADOR

Como bien se ha explicado previamente, la expectativa de vida de un transformador está limitada por la integridad de su sistema de aislamiento, y principalmente del aislamiento sólido celulósico, ya que las principales causas de falla en estos equipos están relacionadas con la degradación natural e inevitable de dicho aislamiento, lo cual reduce su capacidad para resistir esfuerzos electro – mecánicos, [3].

Hay un aspecto primordial que diferencia ambos aislamientos. El papel celulósico es hidrófilo mientras que el fluido dieléctrico es hidrófobo. Si a esto le añades que la principal fuente de envejecimiento es la humedad, el deterioro será mucho más notable en el papel, por este motivo tiene una mayor relevancia en la vida del transformador, [2].



Existen más diferencias entre el aislamiento sólido y el líquido. Los fluidos dieléctricos tienen una gran ventaja frente al papel y es que se autoregeneran, además de ser de fácil extracción. Sin embargo, el papel celulósico no se regenera si se presenta una falla en él y para extraerlo es necesario el desarme del transformador y su reconstrucción. Por este motivo se relaciona la vida útil del transformador con la vida útil del papel, [3].

La humedad es el factor que más afecta a la vida útil del transformador junto a la temperatura. Una humedad del 4 % puede llegar a acortar la vida útil de la máquina hasta un 97.5 % respecto a lo que se consideraría como seco. En la Figura 2.3 se muestra la relación de la expectativa de vida con la humedad y la temperatura.



Figura 2.3: Dependencia de la expectativa de vida de un transformador con la humedad y la temperatura. Fuente: [3]

Para medir el deterioro de los aislamientos celulósicos en el transformador suele utilizarse como método de estudio el grado de polimerización (DP),



que representa la longitud de las cadenas de glucosa que conforman la celulosa. Si hay presentes muchos productos de la degradación del aceite, los enlaces entre las unidades de glucosa se rompen, acortando las cadenas de celulosa y disminuyendo por lo tanto el valor del DP. Afectan principalmente la humedad y la temperatura y en menor medida la oxidación.

Considerando estos aspectos, si se conocen los niveles de humedad y de temperatura a los que se ve expuestos el transformador durante su operación, se podría estimar el envejecimiento del papel.

Para medir la temperatura interna de trabajo de un transformador existen diversos modelos, algunos de ellos ya normalizados.

Sin embargo, los métodos para medir el contenido de humedad en los aislamientos sólidos implican la desconexión del transformador, los cuales tienen una doble desventaja. Por un lado, representan grandes costos económicos asociados a dicha desconexión. Por otro lado, se trata de métodos poco precisos en los que se desprecian o asumen determinados parámetros, haciendo imprecisa la estimación de la humedad, [3].

# 2.3 COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL TRANSFORMADOR

La temperatura del transformador no es constante durante todo su funcionamiento debido a las variaciones de carga y los cambios que se producen en las condiciones ambientales. Al cambiar las temperaturas cambia la distribución de la humedad en los dieléctricos, tratando de encontrar un punto de equilibrio que dependa de la temperatura, de la geometría y del contenido de humedad, [2].



Desde que se conecta la máquina hasta que alcanza el régimen nominal, la tasa de generación de calor y las temperaturas se van incrementando progresivamente. Si se diese el caso en el cual el transformador alcanzase unas temperaturas superiores a las que debería de tener a régimen nominal, podrían producirse una serie de deterioros que afectaran a la vida útil del transformador, acortándola significativamente.

A continuación, se explicarán los mecanismos por los cuales se genera energía en forma de calor en este tipo de máquinas, como se transmite y se distribuye por lo diversos componentes del transformador. Es de vital importancia conocer la distribución de temperaturas ya que está fuertemente ligada a la difusión de la humedad.

## 2.3.1 Generación de calor

Existen diversas fuentes de calor dentro de un transformador de potencia, las cuales dan lugar a una diferencia de potencias entre el devanado primario y el devanado secundario ( $P_1 > P_2$ ). Esta pérdida de potencia se manifiesta principalmente como un aumento no uniforme de la temperatura y consecuentemente una reducción del rendimiento de la máquina.



Figura 2.4: Balance de potencias de un transformador. Fuente: [2]



A continuación, se explican los diferentes tipos de pérdidas.

#### Pérdidas en el cobre

Son producidas en los devanados de cobre debido al Efecto Joule. Se trata del choque de los electrones con las partículas fijas durante la circulación de la corriente eléctrica a través de los conductores. Consecuentemente dichas partículas fijas ganan energía aumentando su vibración y generando calor, [3].

Se debe de considerar una separación o aislamiento entre los devanados, proporcionado tanto por el papel como por el fluido aislante. Las pérdidas por Efecto Joule son proporcionales a la resistencia del bobinado y al cuadrado de la intensidad que circula por él, como se muestra en la ecuación (1), [1].

$$P_{Cu} = R_{Cu} * I_{Cu}^2 \tag{1}$$

Siendo las variables: " $P_{Cu}$ " la potencia perdida [W], " $R_{Cu}$ " la resistencia del conductor de cobre [ $\Omega$ ] e " $I_{Cu}$ " la corriente que circula por dicho conductor [A].

#### Pérdidas en el hierro

Pueden ser causadas por histéresis y por corrientes parásitas.

Para construir los núcleos de los transformadores suelen utilizarse materiales ferromagnéticos con altas permeabilidades y que se produzcan la menor cantidad de pérdidas magnéticas posibles. Si un material ferromagnético está inicialmente desmagnetizado y posteriormente se le imanta, dicho material desarrollará el denominado ciclo de histéresis.

Existe una diferencia entre la energía requerida para la magnetización y la que se devuelve en la desmagnetización. Esa diferencia de energía es



liberada en forma de calor y su valor es igual al área encerrada por la curva del ciclo de histéresis. En la actualidad se utiliza la fórmula propuesta por C.P. Steinmetz para el cálculo de las pérdidas por histéresis, [1].

$$P_{\rm H} = k_{\rm H} * f * V * B_{\rm max}^{\alpha}$$
 (2)

Siendo las variables: "P<sub>h</sub>" las pérdidas producidas por el ciclo de histéresis [W], "k<sub>h</sub>" el coeficiente de Steinmetz, "f" la frecuencia de la señal [Hz], "V" el volumen del material ferromagnético, "B<sub>max</sub>" el valor máximo de la inducción magnética [T] y "a" el exponente de Steinmetz.





Además de la histéresis, dentro de los transformadores se producen variaciones del campo magnético. En los núcleos compuestos de materiales ferromagnéticos se induce una fuerza electromotriz como respuesta a las variaciones de dichos campos magnéticos. Esa fuerza a su vez origina corrientes internas o corrientes de Foucault que causan pérdidas adicionales de energía por el efecto Joule. Las pérdidas dependerán del material empleado en el núcleo, [1].



Uno de los aspectos más importantes es que se debe evitar la construcción del núcleo de hierro macizo. Es por eso por lo que se construye con chapas apiladas de espesores delgados y aisladas entre sí. Lo que se consigue así es que las corrientes parásitas circulen únicamente en las secciones transversales a las láminas, siendo estas más pequeñas y reduciendo por lo tanto las pérdidas. En la Figura 2.6 se muestra lo previamente explicado, obtenida en [8].



Figura 2.6: Núcleo macizo y núcleo laminado. Fuente: [8]

La fórmula (3) es la utilizada para calcular numéricamente las pérdidas por corrientes de Foucault, [1].

$$P_{\rm F} = k_{\rm F} * f^2 * B_{\rm max}^2 * \sigma * V$$
 (3)

Siendo las variables: " $P_F$ " la potencia perdida [W], " $k_F$ " el coeficiente de Foucault, "f" la frecuencia de la señal [Hz] y " $B_{max}$ " el valor máximo de la



inducción [T], "a" el espesor de las chapas magnéticas, " $\sigma$ " la conductividad del material y "V" el volumen del material ferromagnético [m<sup>3</sup>].

Conocer todas estas pérdidas, cómo se originan y cómo se comportan es muy importante para poder establecer unas condiciones de operación adecuadas y asegurar un correcto funcionamiento de la máquina a temperaturas admisibles. De esa manera, se puede evitar la aparición de picos locales de temperatura conocidos como hot–spots que pueden llegar a dañar gravemente los materiales aislantes celulósicos, [2].

## 2.3.2 Transferencia de calor

Todas las pérdidas previamente mencionadas, tanto las que se producen en los devanados como las que se producen en el ferromagnético, suponen la transformación de energía eléctrica en calor lo que conlleva un aumento generalizado de las temperaturas de los componentes en contacto con los elementos que generan dicho calor. El calor se transfiere principalmente mediante dos mecanismos: conducción y convección. Observar la Figura 2.7, obtenida en [9].



Figura 2.7: Métodos de transferencia de calor en un transformador. Fuente: [9]



#### <u>Conducción</u>

Se trata de la propagación de energía en un medio material entre cuerpos con un gradiente de temperatura, transmitiéndose el calor de las regiones de mayor temperatura a las de menor temperatura. La ecuación (4) define la transmisión de calor por conducción, [2].

$$q = -k * \frac{dT}{dx}$$
(4)

Siendo las variables: "q" el calor transmitido por unidad de tiempo y de área [W/m<sup>2</sup>], "k" la conductividad térmica del material [W/(K\*m<sup>2</sup>)] y "T" la temperatura [K].

Es de mayor relevancia en la interfase conductor – papel, aunque se puede encontrar en diversas partes del transformador. El núcleo a su vez está formado por láminas las cuales están separadas entre sí mediante un aislante sólido, lo cual permite que el calor del núcleo fluya hacia zonas con menores temperaturas por conducción. Aunque la generación de calor sea uniforme la distribución de las temperaturas no lo es.

#### Convección.

Este mecanismo se da cuando un fluido entra en contacto con una superficie sólida estando los dos a diferentes temperaturas. Existen dos tipos: convección natural y convección forzada.

En la convección natural la fuerza motriz procede de las fuerzas ascensionales provocadas por las diferencias en la densidad del fluido que resulta de la convección con un material a diferente temperatura.

Mientras que la convección forzada se produce gracias a la acción de una fuerza exterior la cual se encarga de forzar la circulación del fluido. En este



tipo como la velocidad del fluido es mayor, también lo será la cantidad de calor transferida para una determinada temperatura.

Independientemente del tipo de convección, la fórmula (5) describe el fenómeno de la convección, conocida como la Ley de enfriamiento de Newton, [2].

$$q = h_c * (T_s - T_f)$$
 (5)

Siendo las variables: "q" el calor transmitido por unidad de tiempo y de área [W/m<sup>2</sup>], "h<sub>c</sub>" el coeficiente de transmisión de calor por convección [W/(K\*m<sup>2</sup>)], "T<sub>s</sub>" la temperatura de la superficie de contacto [K] y "T<sub>f</sub>" la temperatura del fluido no perturbado lejos de la superficie conductora [K].

Donde mayor relevancia tiene es en las interfases papel – líquido dieléctrico para poder determinar la distribución de temperaturas.

En el modelo realizado en este trabajo se ha considerado un transformador cuyo sistema de refrigeración funciona por convección natural. Así, los devanados de cobre y el núcleo ferromagnético producen la mayoría del calor dentro del transformador, transfiriéndose al aceite, el cual se calienta. Al recibir dicho calor disminuye la densidad de sus moléculas y por lo tanto ascienden. El espacio que se libera es ocupado instantáneamente por aceite más denso, es decir, más frío. De esta forma el aceite se mueve únicamente por las fuerzas ascensionales originadas por el calor recibido, [2].

## 2.3.3 Distribución de la temperatura

Para poder resolver los modelos de este trabajo se ha que recurrido al modelizado CFD (Computational Fluid Dynamics). Estos modelos están gobernados por las ecuaciones de Navier – Stokes que definen la conservación de la masa, el momento y la energía para el flujo de un fluido. Dichas ecuaciones diferenciales tienen que ser discretizadas para obtener


un sistema de ecuaciones algebraicas y poder resolver el modelo. De eso es de lo que se encarga el software computacional *COMSOL Multiphysics*.

En un transformador de potencia, el fluido dieléctrico fluye por diferentes partes de la máquina.

- Devanados: debido a las pérdidas en forma de calor el líquido se calienta, aumentando su temperatura.
- Cuba: el fluido actúa principalmente como el portador y transmisor del calor.
- Radiadores: donde el líquido se enfría.

El circuito de refrigeración es una combinación del flujo que circula por los conductos internos del transformador y el flujo abierto que circula a través de la cuba.

Si no se controla en todo momento con precisión las condiciones de funcionamiento y de operación de la máquina, pueden producirse puntos calientes o hot – spots en los devanados, puntos en los que se sobrepasan las temperaturas normales de funcionamiento y que pueden degradar o poner en peligro los sistemas de aislamiento del transformador y consecuentemente la integridad de la propia máquina.

Las diferencias de flotabilidad del fluido, que se han nombrado previamente, tienen un papel importante a la hora de determinar el equilibrio de la presión local y las distribuciones de velocidad y temperatura, incluyendo las posiciones de los puntos calientes. Además, el aislamiento de los devanados de cobre tiene un efecto significante sobre la refrigeración ya que puede evitar que los puntos calientes aparezcan siempre en las posiciones donde se encuentran las velocidades más bajas del fluido.



Es muy importante en este estudio obtener la distribución de temperaturas en las interfases papel – aceite, ya que es donde se produce el intercambio de moléculas de agua entre el papel aislante y el fluido dieléctrico. También es de interés determinar las temperaturas en el papel porque la migración de humedad en un sentido o en otro, del conductor al aceite o del aceite al papel está directamente relacionado con los gradientes de temperatura que se producen en cada instante.

La distribución de temperaturas en las interfases papel-fluido dependen de varios factores, que son los siguientes

### <u>Altura</u>

Teniendo en cuenta lo explicado previamente de las fuerzas ascensionales, el fluido caliente asciende y el frío desciende y por lo tanto las temperaturas irán aumentando a medida que lo hace la altura, a pesar de que el calor generado por los devanados sea constante y no dependa de esta.

### <u>Radio</u>

Como se ha explicado ya, el calor se transmite por el interior del transformador tanto por conducción como por convección y dicho calor dependerá, en algunos casos, de la distancia a la fuente de calor. En este estudio y por el transformador elegido, se trata de una distancia radial y a medida que el radio aumenta, la temperatura de los puntos va disminuyendo progresivamente, [2].

### Capacidad de refrigeración

Depende, entre otros factores, de las propiedades termohidráulicas del fluido refrigerante utilizado.

### Flujo másico del fluido



En función de esta variable el calor evacuado variará. A mayor flujo, mayor cantidad de calor se evacuará, y, por lo tanto, mejor se refrigerará el transformador, optimizando la vida útil de este.

# 2.4 HUMEDAD EN EL SISTEMA DE AISLAMIENTO PAPEL – ACEITE

En general, la parte sólida del sistema de aislamiento, como el cartón prensado, el papel y la madera, contienen la mayor parte de la humedad, pudiendo llegar a ser hasta 200 veces superior a la del líquido dieléctrico, [7].

Tanto el papel como el aceite absorben humedad, deteriorándose su rigidez dieléctrica y disminuyendo las tensiones eléctricas y mecánicas que pueden soportar. Una cantidad excesiva de agua en el aceite podría producir, además, una disminución de la tensión de ruptura dieléctrica y de la resistividad, así como el aumento del factor de pérdidas dieléctricas.

En los materiales celulósicos, se trata de un proceso retroalimentado, ya que el agua acelera su envejecimiento y este a su vez produce más agua, [7].

Por ello, además de llevar a cabo labores de mantenimiento preventivo para asegurar unos determinados niveles de humedad y que estos se encuentren siempre por debajo de los que puedan resultar dañinos para la máquina, es importante conocer los contenidos en humedad del transformador, [2].

La difusión de la humedad está fuertemente relacionada con la distribución de temperaturas, ya que, por lo general, en los lugares donde haya mayores temperaturas habrá menores concentraciones de humedad y viceversa.



A continuación, se explicarán las fuentes de humedad, sus efectos sobre los sistemas de aislamiento, tanto el sólido como el líquido, su distribución y como se difunde por los aislamientos.

## 2.4.1 Fuentes de humedad

El ingreso de agua en el interior de un transformador puede ser producto de procesos tanto internos como externos, siendo algunos de ellos inevitables, por muy buenos que sean los sistemas de aislamiento del transformador. La Figura 2.8, obtenida en [10], presenta las diferentes fuentes de humedad que se pueden dar y que serán explicadas a continuación.



Figura 2.8: Fuentes de humedad en el transformador. Fuente: [10]



### <u>Atmósfera</u>

La filtración de la humedad desde la atmósfera hacia el interior de la máquina puede ocurrir de diferentes maneras, [2].

- Por exposición directa: Ocurre si el sistema de aislamiento está expuesto directamente al aire de la atmósfera, lo cual puede ocurrir durante la instalación o la reparación del transformador.
- Por flujos de aire húmedos: Este caso se da si la presión atmosférica es mayor que la del interior del transformador, y la cuba no es estanca. Suele darse en transformadores que no han sido sellados correctamente o cuando se producen deterioros en alguno de sus componentes. El sistema de bombeo del aceite crea una presión negativa en el interior favoreciendo el ingreso de humedad en la máquina.
- Ingreso de humedad a través del sistema de respiración del conservador del fluido.
- Por flujo Knudsen: Flujo molecular debido a la diferencia de presión de vapor de agua entre el interior del transformador y la atmósfera, en forma de difusión gaseosa, a través de poros y capilares en la cuba.

### Degradación del aislamiento celulósico

La celulosa es un polímero que consta de largas cadenas de glucosa unidas entre sí por enlaces glicosídicos. A medida que pasa el tiempo el papel envejece y dichas cadenas se van rompiendo, disminuyendo así su grado de polimerización, DP, previamente mencionado. Si el aislamiento envejece, se daña y pierde progresiva y significativamente sus propiedades dieléctricas y mecánicas con el paso del tiempo.



Un papel aislante nuevo, tiene un DP del orden de entre 1000 – 1300. Ese valor disminuye con el paso del tiempo y cuando llega a un valor de aproximadamente 200 es cuando se considera como inservible. Sería arriesgado que el transformador siguiese funcionando en esas condiciones tanto para la propia máquina como para el sistema, [2].

El proceso de envejecimiento del papel se conoce como despolimerización. Existen otros mecanismos que catalizan dicho proceso, producidos principalmente por tres agentes que son: el agua, el oxígeno y el calor. Además, como se ha explicado con anterioridad, aunque los sistemas de aislamiento fuesen perfectos y se consiguiese prevenir la entrada de humedad desde el exterior en su totalidad, este proceso de despolimerización, que es un proceso natural e inevitable, genera humedad, siendo en la actualidad imposible evitarlo.

Anteriormente se nombró una serie de procesos que influyen en la degradación del papel, pero ahora se van a explicar brevemente los más relevantes.

- La hidrólisis: Es el más relevante de todos, al menos en los transformadores de potencia. Las cadenas de celulosa del papel aislante se rompen en contacto con el agua, dando lugar a la aparición de glucosa. Cuando ocurre esto se produce más agua aún, aumentando el envejecimiento y reduciendo la vida útil de la máquina. Parte de esa humedad producida en el papel es absorbida por el fluido dieléctrico. El grado de adsorción depende del líquido que se esté utilizando. Por ejemplo, los ésteres, debido a su composición química y a sus propiedades, absorben más humedad que los aceites minerales, ayudando al papel a reducir sus niveles de humedad.
- La oxidación: El oxígeno interacciona con los átomos de carbono de la molécula de celulosa, debilitándola y liberando agua, monóxido de



carbono y dióxido de carbono. Al liberarse moléculas de agua, se potencia la hidrólisis y por tanto el deterioro del papel. El oxígeno al igual que el agua puede provenir tanto del exterior como de la propia degradación del aislamiento. Su efecto en el papel se agrava ante la presencia de agentes catalizadores como la humedad o el cobre de los devanados.

 La pirolisis: El calor y las altas temperaturas a las que se ve sometido el transformador durante su operación contribuyen a la descomposición de los monómeros individuales de la cadena de celulosa. Esta degradación térmica se produce en ausencia de oxígeno, y produce los mismos compuestos que el proceso de oxidación. Si el transformador en algún momento alcanzase temperaturas peligrosas por encima de los límites establecidos, estas podrían llegar a convertir el aislamiento celulósico en un material quebradizo y contraerlo, dejándolo susceptible a la rotura, en caso de verse expuesto a solicitaciones o cargas excesivas.

Cabe destacar que los procesos de liberación del agua en el transformador son más intensos en las cercanías de los ya nombrados puntos calientes o hot – spots.

### Humedad residual

Hace referencia a la humedad almacenada en las piezas aislantes gruesas, tales como la madera o el cartón entre otros, cuya función principal es proporcionar una mayor rigidez a la estructura mecánica del transformador. Dicha humedad no es eliminada en su totalidad durante su fabricación debido a las limitaciones en los procedimientos de secado. También se debe al humedecimiento de la superficie del aislamiento durante la construcción e instalación de la máquina. Durante el funcionamiento del transformador esta humedad se redistribuye sola, por la generación de calor tras varios



ciclos de carga, migrando desde los aislamientos gruesos hacia los delgados a través del fluido dieléctrico.

## 2.4.2 Distribución de la humedad

Como ya se ha explicado el carácter hidrófilo del papel celulósico y la naturaleza hidrófoba del fluido dieléctrico, algunos fluidos más que otros, hace que la humedad sea absorbida mayoritariamente por el aislante sólido. La proporción de humedad papel-fluido depende de diversos factores como son: La temperatura del aislamiento, la relación de masas papel-fluido y el tipo de líquido dieléctrico que se utilice, que puede ser aceites minerales, hidrocarburos de alto peso molecular, siliconas o ésteres naturales o sintéticos. Cada uno de ellos tiene su composición química única y diferentes propiedades fisicoquímicas. Además, la distribución de la humedad en el transformador también depende de las condiciones de operación.

Dentro de los aislamientos sólidos, el más relevante para este trabajo es el aislamiento celulósico situado entre los devanados de cobre y el fluido dieléctrico. Sin embargo, existen diferentes tipos, con diferentes densidades y espesores y que en función de sus propiedades se utilizarán con unos fines específicos

### Aislamientos delgados y fríos

Principalmente son los cartones prensados y el resto de los materiales dieléctricos que no están en contacto con los conductores. La temperatura de estos es similar a la del fluido dieléctrico y tienen una densidad media – baja.

### Aislamientos delgados y calientes



Hace referencia a los aislamientos que sí están en contacto con los conductores, siendo principalmente el papel celulósico con menor densidad. Tienen una temperatura prácticamente igual a la del conductor con el que estén en contacto.

### Aislamientos gruesos

Son aquellos que tienen mayores espesores. Más que una función dieléctrica, tienen funciones mecánicas, para aportar una mayor rigidez y sujeción a todos los componentes del transformador. Son los aislamientos con mayores densidades y con las temperaturas más bajas en comparación con los demás elementos.



# Figura 2.9: Distribución de masas y de humedad de los diferentes tipos de aislamientos sólidos de un transformador. Fuente: [3]

La distribución de la temperatura en el transformador durante su funcionamiento no es homogénea. En las zonas más calientes la humedad se concentra en el aislamiento líquido, mientras que en las zonas frías



ocurre lo contrario. Por este motivo cada tipo de aislamiento de los mencionados antes tendrá un contenido de humedad diferente, ya que cada uno de ellos oscila entre unos determinados valores de temperatura, [2].

### Aislamientos delgados y fríos

Tienen temperaturas similares a la del fluido con el que están en contacto, así que son buenos para almacenar la humedad que se intercambia con él.

### Aislamientos delgados y calientes

Estos tienen temperaturas prácticamente iguales a las de los conductores, muy elevadas, por lo que su contenido en humedad es bajo. Además de eso, tienen una baja densidad lo cual se traduce en una mayor movilidad de las moléculas de agua a través de él. Su temperatura variará a la vez que lo hace la del devanado y como los transformadores están expuestos a ciclos de carga variables, estos aislamientos se verán sometidos a constantes intercambios de humedad con el fluido dieléctrico.

### Aislamientos gruesos

Aproximadamente el 60 % de la humedad del transformador está contenida en este tipo de aislamientos. Sin embargo, la dinámica de la humedad en estos es casi nula, ya que apenas están en contacto con el fluido. Hay que añadir que tienen altas densidades y trabajan generalmente a temperaturas más bajas, haciendo que las constantes de tiempo de la difusión de la humedad sean tan altas que no se tengan en cuenta.

# 2.4.3 Migración e intercambio de humedad entre los aislamientos

Dentro de un transformador la distribución de la humedad no es estática, hay movimientos e intercambios constantemente. Cuando la temperatura



aumenta, la solubilidad de agua en el fluido dieléctrico aumenta a la vez que disminuye la capacidad de adsorción de la celulosa, obligando a las moléculas de agua a migrar del aislamiento sólido al líquido. Sin embargo, si la temperatura disminuye, ocurre el proceso inverso, el aislamiento sólido absorbe con mayor facilidad la humedad proveniente del fluido.

La difusión de la humedad por lo tanto consiste en un proceso de adsorción y desorción constante en el que la humedad se va trasladando entre ambos aislamientos, dependiendo de las condiciones de operación en cada instante.

Tal como se aprecia en la Figura 2.10 la adsorción comienza en la superficie de los aislamientos celulósicos. Estos están formados por fibras entre las cuales existen poros que van siendo ocupados a medida que las moléculas de agua entran en contacto con dicha superficie, limitando su movimiento. Llegará un momento en el que todos los poros de dicha superficie hayan sido ocupados y se forme una capa de moléculas de agua, que se denomina monocapa. A partir de ese instante, si se sigue absorbiendo humedad, las moléculas entrantes obligan a las ya existentes en la monocapa a ser absorbidas por la siguiente capa más interna, formándose lo que se denomina multicapa.

Dicho proceso seguirá repitiéndose hasta que se consiga alcanzar el equilibrio en el papel aislante. A continuación, se muestra la Figura 2.10, donde se expone visualmente dichos fenómenos.





Figura 2.10: Adsorción de la humedad en el papel aislante celulósico. Fuente: [3]

La desorción es un proceso parecido pero inverso, ya que se lleva a cabo desde el interior hacia el exterior del papel celulósico. Sin embargo, este proceso requiere de una energía de activación para que se puedan desligar las moléculas de agua de los poros de las fibras de celulosa. Esa energía la proporciona el incremento de la temperatura. Esto explica el por qué al aumentar la temperatura del papel aislante, la humedad migra del aislamiento sólido al fluido dieléctrico. En la Figura 2.11 se muestra como son las fibras de celulosa.



Figura 2.11: Estructura del aislamiento sólido celulósico. Fuente: [4]



En la actualidad existen curvas de sorción isotérmica que permiten relacionar la saturación relativa con el contenido en agua. En la Figura 2.12 se puede observar los procesos de adsorción y de desorción de los que se ha hablado anteriormente.



Figura 2.12: Curva de sorción isotérmica. Fuente: [4]

Se pueden distinguir tres zonas principales en la curva de sorción isotérmica de izquierda a derecha: La primera zona está relacionado con el fenómeno de la monocapa, la segunda se corresponde con el proceso de multicapa y la tercera hace referencia a altos valores de humedad que superan los límites de saturación del agua en ese material, pudiendo encontrar en esos casos agua libre, lo cual sería fatal para la vida útil del aislamiento.

Los fluidos dieléctricos utilizados en transformadores de potencia, en general, tienen poca afinidad con el agua, sobre todo cuando se trata de aceites minerales. Estos pueden absorber en disolución una pequeña



cantidad de agua, que se miden en partes por millón, ppm, de lo pequeñas que suelen ser, conocida como límite de saturación. Una vez superado dicho límite, se podría encontrar agua libre, es decir, sin estar diluida con el fluido dieléctrico. Este límite de saturación se incrementa con el aumento de la temperatura, [2].

Se puede decir por lo tanto que, dentro de un transformador, la proporción de humedad entre el papel y el fluido depende de las temperaturas a las que se encuentren ambos aislamientos en cada instante. Una variación de las temperaturas ocasionará una redistribución de la humedad, buscando un equilibrio el cual se alcanza cuando se igualan las saturaciones relativas de ambos medios.

Consecuentemente habrá dos movimientos de la humedad que se irán alternando en función de cómo varíe la temperatura. Cuando la temperatura asciende, la capacidad de adsorción de la humedad por parte del papel aislante disminuye y el límite de saturación del agua en el fluido aumenta, lo que hará que se difundan las moléculas de agua desde el aislamiento sólido hacia el aislamiento líquido.

No obstante, si ocurriese lo contrario, y las temperaturas descienden, la celulosa aumenta su capacidad para adsorber las moléculas de agua y la solubilidad del agua en el fluido dieléctrico disminuye, produciéndose en este caso la difusión en el sentido contrario, desde el líquido hacia el papel.

En la Figura 2.13 se muestra visualmente lo recién explicado.





Figura 2.13: Esquema de la dinámica de la humedad. Fuente: [2]

# 2.5 INTERDEPENDENCIA DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO Y DE LA DINÁMICA DE LA HUMEDAD EN EL TRANSFORMADOR

Previamente se ha explicado cómo se genera y se transfiere el calor a través de los diferentes componentes y elementos del transformador y como migran las moléculas de agua entre los aislamientos sólidos y líquidos. Ahora se explicará la dependencia que tiene la difusión de la humedad de la distribución de temperaturas a lo largo del transformador.

Las moléculas de agua se difunden entre los aislamientos del transformador siguiendo un modelo matemático gobernado por la Segunda Ley de Fick, la cual predice la forma en que la difusión causa que la concentración cambie con el tiempo, [2].

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D * \nabla c \tag{6}$$



Si la ecuación (6) se aplica a una única dimensión espacial, se convierte en la ecuación (7).

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D * \frac{\partial c}{\partial x} \right)$$
 (7)

Siendo las variables: "c" la concentración de humedad en porcentaje de peso del papel seco, "t" el tiempo [s], "D" el coeficiente de difusión [m<sup>2</sup>/s] y "x" la dirección del movimiento de la humedad [m].

El coeficiente de difusión es una propiedad del papel celulósico aislante. Dicho coeficiente depende del tipo de papel que se utilice y del nivel de envejecimiento de este. Esas expresiones son determinadas mediante datos experimentales. En este estudio se utilizará el coeficiente de difusión correspondiente a papeles impregnados en un éster natural de Biotemp, cuya expresión se muestra en la ecuación (8), obtenida en [5].

$$D_{\text{Biotemp}} = 1.2 * 10^{-7} * l^{-3.7} * e^{(0.25 * c - \frac{4491 * l^{-0.5}}{T})}$$
(8)

Siendo las variables: "Dbiotemp" el coeficiente de difusión [m<sup>2</sup>/s], "l" el espesor del papel celulósico [mm], "c" la concentración del papel [mol/m<sup>3</sup>] y "T" la temperatura [K].

Para estudiar la dinámica de la humedad en el sistema papel-fluido se debe de conocer el contenido en humedad del aislamiento celulósico, pero como se ha explicado dicho contenido varía a lo largo del tiempo en función de la temperatura de la interfase en cada momento.

En este trabajo se utilizarán unas curvas de equilibrio con las cuales, partiendo de unas concentraciones iniciales de humedad tanto en el aislamiento celulósico, en tanto por ciento, como en el fluido, en ppm y teniendo en cuenta también la distribución de temperaturas en el papel, se obtendrán las concentraciones finales de humedad en el papel.



Estas curvas de equilibrio establecen la relación que hay entre el reparto de agua en la celulosa y en el fluido dieléctrico en función de la temperatura, únicamente en estado de equilibrio. Es decir, con las saturaciones relativas de ambos medios aislantes iguales y, por lo tanto, sin intercambio de humedad entre ellos.

El uso de estas curvas conlleva realizar el supuesto de que el sistema no será perturbado hasta que se llegue al equilibrio de humedades. Esto es algo que en la práctica real no tiene por qué ocurrir, debido a que los transformadores están sometidos a cargas variables y a la temperatura ambiente, la cual también varía.

Otra suposición que se hace en este estudio es que la concentración en las interfases papel-aceite alcanza el equilibrio instantáneamente. Esta simplificación se fundamenta en que en la celulosa las moléculas de agua son adsorbidas por capas en el papel y la primera capa, la más externa, se corresponde con la interfase papel-aceite, sin importar cual sea la dirección del movimiento de las moléculas de agua. Es por ello por lo que se puede considerar que la primera capa en alcanzar el equilibrio de humedad es la interfase y lo hace de forma instantánea.

Existen numerosas curvas de equilibrio, siendo muchas de ellas aproximaciones de la curva de sorción isotérmica previamente mostrada. Las que se utilizan en este trabajo son las curvas obtenidas usando el método propuesto por Oommen en [11].

El principio básico de este método se basa en que el contenido relativo de humedad en materiales adyacentes es el mismo cuando se encuentren bajo condiciones de equilibrio, [2].

$$W_{rel,cel} = W_{rel,oil} = RH$$
 (9)



Siendo las variables: "W<sub>rel,cel</sub>" el contenido relativo de humedad en la celulosa [ppm], "W<sub>rel,oil</sub>" el contenido relativo de humedad en el aceite o fluido dieléctrico [ppm] y "RH" la humedad relativa del aire [ppm].

De esta forma las curvas de equilibrio pueden ser determinadas combinando las gráficas: Humedad en el aceite-Humedad relativa en el aire con Humedad en el papel-Humedad relativa en el aire, llegando así a un solo conjunto de isotermas como se muestra en la Figura 2.14 a continuación.



Figura 2.14: Curvas de equilibrio de Oommen. Fuente: [2]

Al igual que se obtuvieron estas curvas en su momento, ha habido numerosos investigadores que han intentado parametrizarlas. Se va a utilizar la ecuación (10), propuesta por Villarroel en [5], para aceites vegetales basados en ésteres naturales.



$$C_{\text{equil}} = 1.18 * 10^{-18} * p_{v}^{3} * e^{\left(\frac{16570}{T}\right)} - 5.39 * 10^{-12} * p_{v}^{2}$$

$$* e^{\left(\frac{10960}{T}\right)} + 9 * 10^{-6} * p_{v} * e^{\left(\frac{5418}{T}\right)} + \frac{1004}{T} - 3$$
(10)

Siendo las variables: "C<sub>equil</sub>" la concentración de equilibrio en el papel [%], "T" la temperatura de las interfases papel – aceite [K] y "p<sub>v</sub>" la presión parcial del vapor de agua [atm]. Esta última puede ser a su vez calculada mediante la ecuación (11), obtenida en [5].

$$p_{v} = RH * p_{vsat} = \frac{ppm}{ppm_{sat}} * p_{vsat}$$
 (11)

Siendo las variables: "RH" la humedad relativa en el aceite, "ppm" la concentración de humedad en el aceite [ppm], "ppm<sub>sat</sub>" la concentración de humedad en el aceite en condiciones de saturación [ppm] y "pv<sub>sat</sub>" la presión parcial del aceite en condiciones de saturación [atm]. Tanto "ppm<sub>sat</sub>" como "pv<sub>sat</sub>" pueden ser calculadas mediante las ecuaciones ( 12 ) y ( 13 ) propuestas por Foss en [12].

$$p_{vsat} = \frac{P_c}{760} * 10^{\left[\left(\frac{T_{ex} - T_c}{T_{ex}}\right) * \left(\frac{a + b * (T_c - T_{ex}) + c * (T_c - T_{ex})^3}{1 + d * (T_c - T_{ex})}\right)\right]}$$
(12)

Siendo las variables: "P<sub>c</sub>" la presión crítica del agua [atm], "T<sub>c</sub>" la temperatura crítica del agua [K], "T<sub>ex</sub>" la temperatura en la interfase papelaceite [K] y las constante a, b, c y d con los valores de a = 3.2437814, b =  $5.86826*10^{-3}$ , c =  $1.1702379*10^{-8}$  y d =  $2.1878462*10^{-3}$ .

$$\log(\text{ppm}_{\text{sat}}) = A - \frac{B}{T}$$
 (13)

Siendo las variables: "A" y "B" los parámetros de saturación que dependen del tipo de fluido utilizado en el transformador y "T" la temperatura de dicho



fluido [K]. En este trabajo se va a utilizar un éster natural de Biotemp, cuyos coeficientes son: A = 5.67 y B = 791.

Con todas estas ecuaciones queda definida la parametrización de la curva de equilibrio mediante la cual se puede expresar la dependencia térmica de la humedad. Como se puede apreciar en la ecuación (10), la "Cequil" está relacionada directamente con la temperatura, pero siendo esta la de la interfase papel-aceite.

Cabe destacar que la relación entre la humedad y la temperatura es bilateral. Porque no solo la humedad depende de la temperatura, sino que puede haber propiedades dieléctricas del transformador que se vean afectadas y modificadas en el caso de que se alcanzasen unos determinados niveles de humedad en la máquina, influyendo en su distribución de temperaturas.



Figura 2.15: Interdependencia entre el modelo térmico y el modelo de difusión de la humedad. Fuente: [2]



# **3 PROPUESTA DE ACOPLAMIENTO TEMPORAL ENTRE TEMPERATURAS Y HUMEDAD EN EL SISTEMA DIELÉCTRICO DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA**

El objetivo principal de este trabajo es continuar con la investigación llevada a cabo por el alumno de Ingeniería Industrial Cesar Ruiz Diego, en [2], en la que se desarrolla un modelo numérico en el que se acopla la física de transferencia de calor a la física de transporte de especies diluidas. La finalidad última de este trabajo es estudiar la influencia que tiene la temperatura en la difusión de humedad en el sistema dieléctrico de un transformador de potencia.

Con este trabajo lo que se pretende es mejorar el modelo anterior para que reproduzca de manera más fiel el comportamiento termohidráulico y de difusión de la humedad de un transformador de potencia, implementando características nuevas y/o diferentes. Los aspectos más relevantes que se han modificado en este trabajo con respecto a [2] son los siguientes.

### <u>Tipo de estudio</u>

El aspecto más importante de todos. Ambos modelos, tanto el de CFD como el de difusión de humedad, han sido simulados con estudios temporales, de tal forma que se pueda estudiar la evolución de la humedad sin que las temperaturas alcancen un régimen permanente constante, lo cual fue contemplado en el estudio anterior. Para ello, ha sido necesario el uso de la herramienta *LiveLink* que permite conectar *COMSOL Multiphysics* con el entorno de trabajo de *MATLAB*. En apartados posteriores se explicará detalladamente como se realiza dicha conexión en tiempo real entre ambos softwares.



#### <u>Uso de carga variable</u>

Otra característica muy importante que se ha modificado, y debido a la cual las temperaturas no alcanzan un valor constante en el tiempo, es la introducción de una carga variable en el devanado de baja tensión, en concreto a la sexta y séptima capa, que son las que se van a estudiar en este trabajo. Los detalles de la carga que se ha utilizado son explicados más adelante. Simplemente hay que mencionar que se trata de una carga escalonada y cíclica, dividida en 24 intervalos, cada uno de ellos correspondiente a una hora del día.

### Implementación de un aceite vegetal

Bien es cierto que los aceites minerales han sido los más utilizados durante décadas en los transformadores de potencia por tener las mejores propiedades dieléctricas y termohidráulicas.

Sin embargo, se llevan investigando desde hace algunos años, alternativas a estos aceites, ya que, pese a sus propiedades, tiene una serie de desventajas o inconvenientes. Entre dichos puntos negativos, los que más destacan son, su bajo punto o temperatura de ignición y su bajísima biodegradabilidad.

Una de esas alternativas son los aceites vegetales basados en ésteres naturales, los cuales son obtenidos de semillas como la soja, la colza o el girasol. Aunque, en líneas generales, tienen peor capacidad refrigerante que los aceites minerales, son fluidos más seguros contra incendios y explosiones y tienen una alta biodegradabilidad.

Por ello, en este trabajo se ha utilizado el aceite vegetal cuya denominación comercial es Biotemp, obtenido a partir de la colza. Contiene triglicéridos y su composición es una base derivada del aceite de las semillas de colza y aditivos para mejorar el desempeño del fluido.



Una vez explicadas las mejoras más importantes realizadas en ambos modelos, termohidráulico y de difusión de humedad, en los dos subapartados siguientes se presenta, mediante flujograma, la metodología de estudio seguida en cada uno de ellos.

Es importante resaltar que cada modelo se ha realizado en un archivo mph diferente (mph es la extensión de los archivos de *COMSOL Multiphysics*). También es importante el hecho de que una parte de los parámetros, variables y modificaciones que se han llevado a cabo sobre los modelos, se han realizado directamente desde el *COMSOL Desktop*, es decir, el escritorio propio de *COMSOL*, y la otra parte se ha tenido que programar a través del *LiveLink*. A medida que se avance en la explicación se concretará que aspectos corresponden a cada caso.

Una última cuestión. Los códigos de *MATLAB* necesarios para la realización del estudio han sido adjuntados en el anexo 8.1, en la página 147.

# 3.1 MODELO TERMOHIDRÁULICO

La Figura 3.1 presenta el flujograma con las entradas requeridas, físicas y condiciones de contorno consideradas, tipo de estudio realizado y salidas obtenidas.





Figura 3.1: Diagrama de flujo del modelo temporal de CFD.

Se comienza iniciando el programa de *COMSOL Multiphysics*. Para este trabajo se ha decidido realizar un estudio con una geometría en 2D axisimétrico, de tal forma que, si fuese oportuno, la geometría del modelo se podría revolucionar alrededor del eje central para obtener una figura en 3D.



A través del *COMSOL Desktop* se introducen todos los parámetros, las ecuaciones y las variables que influyen en el modelo, la geometría, los materiales, las expresiones que definen la carga variable, las c.c. (condiciones de contorno) y las c.i. (condiciones iniciales) de las dos físicas de este primer modelo, que son la física de Transferencia de calor en sólidos y líquidos y la física de mecánica de fluidos para Flujo Laminar.

Todo lo relacionado con el mallado ha sido configurado por defecto. Es decir, el propio *COMSOL* calcula en función de las físicas, el tipo de malla y la cantidad de nodos y su distribución.

Una vez se ha terminado con todas las configuraciones anteriores hay que programar desde *MATLAB* la creación del tipo de estudio que se desea realizar, los intervalos de tiempo y los archivos que se quiere exportar. Por ejemplo, si se quiere estudiar la distribución de temperaturas en el intervalo [0,0.1,10] segundos, con el código de *MATLAB* se generarán 11 archivos csv, cada uno de ellos con las temperaturas en todos los puntos de la geometría en cada instante. Por lo tanto, se exportarán las temperaturas en función de las coordenadas "r", que representa el radio respecto del eje central y "z", que representa la altura del punto y en función del tiempo "t".

En la Figura 3.1 se puede apreciar la importancia que tiene la carga variable en este estudio, ya que en cada hora de simulación su valor cambia, haciendo variar las temperaturas de forma cíclica.

Las distribuciones de temperaturas, gráficas y resultados finales se obtienen fácilmente desde el *COMSOL Desktop*.





## 3.2 MODELO DE DIFUSIÓN DE LA HUMEDAD





Lo primero que hay que hacer, al igual que en el modelo anterior, es introducir desde el *COMSOL Desktop*, la configuración inicial, parámetros, ecuaciones y variables, geometría, materiales, c.c. y c.i. de la física de este modelo que es el Transporte de especies diluidas.

Una característica muy importante que se configura también desde el propio *COMSOL* es la función de integración, la cual se va a encargar de calcular la concentración de humedad media en todo el papel durante la simulación del estudio. Como se puede apreciar en la Figura 3.2, está constantemente recalculando dicha concentración media, ya que el valor del coeficiente de difusión y el valor de la concentración de equilibrio en la interfase papel–aceite depende de esta y de la temperatura que también cambia cada cierto tiempo: Cequil (ppm, T), D (c, T).

Es importante resaltar que las ecuaciones de "Cequil" no se expresan explícitamente en función de dicha concentración media de humedad en el papel, pero sí se expresan en función de la concentración de humedad media en el aceite, y como una de las condiciones iniciales es que se supone que el peso total del agua es constante a lo largo del tiempo, se puede afirmar que la concentración de equilibrio depende de cómo sea la distribución de la humedad entre el papel y el aceite en cada instante de tiempo.

A continuación, desde el script de MATLAB se programa un código con el que se importan las temperaturas que han sido generadas en el modelo anterior. Esto se realiza con las funciones de interpolación, las cuales se encargan de determinar las temperaturas en los puntos intermedios mediante un proceso de interpolación con forma de función, de manera que posteriormente se pueda llamar a dicha función cuando se necesite calcular la temperatura en un punto intermedio que no hubiese sido calculado en el modelo previo.



Una de las claves a la hora de programar en el script de *MATLAB* es tener en cuenta que cada cierto tiempo se importa una distribución de temperaturas completamente diferente a la anterior. Es por eso por lo que hay que tener en cuenta, que en ese instante cambian los valores de muchas de las variables y las ecuaciones presentes en el modelo, y todos esos cambios han tenido que ser programados desde *MATLAB*. Porque además esas variables a su vez influyen directamente sobre otros parámetros del modelo.



# 4 MODELIZACIÓN NUMÉRICA DEL ACOPLAMIENTO ENTRE EL MODELO TERMOHIDRÁULICO Y EL MODELO DE DIFUSIÓN DE HUMEDAD DEL SISTEMA DIELÉCTRICO DEL TRANSFORMADOR

En este apartado se explican los diferentes aspectos que hay que tener en cuenta para configurar ambos modelos correctamente y así poder realizar el acoplamiento entre ellos.

Es importante resaltar el hecho de que, aunque sean modelos diferentes, hay aspectos que son comunes a ambos, como pueden ser la geometría, los materiales, el mallado y el tipo de estudio realizado.

El acoplamiento entre ambos modelos se llevará a cabo mediante un *LiveLink*, es decir, un enlace en directo, entre *COMSOL Multiphysics* y *MATLAB*.

# 4.1 CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR

En la Tabla 1 se muestra las principales características técnicas del transformador del cual se ha obtenido el sistema dieléctrico que se ha modelizado, [13].

Fabricante	ABB	Tensión del primario	66 kV
Número de serie	61271	Tensión del secundario	6.3 kV
Potencia nominal	14 MVA	Intensidad del primario	122.46 A
Tipo de conexión	Dyn 11	Intensidad del secundario	1283 A
Tipo de refrigeración	ONAN	Frecuencia	50 Hz

Tabla 1: Características té	écnicas del tra	ansformador. I	Fuente [	[13]
-----------------------------	-----------------	----------------	----------	------



Es importante mencionar que se trata de un transformador reductor trifásico con el núcleo en columnas, con una disposición concéntrica de los devanados respecto al eje vertical de cada una de las fases. En la Figura 4.1 se muestra una imagen del transformador real.



### Figura 4.1: Transformador trifásico ABB. Fuente: [13]

Sin embargo, dadas la entidad de este estudio -TFG- y las limitaciones temporales y computacionales existentes, se ha considerado únicamente una pequeña parte del devanado de B.T. de una de las fases. El devanado de B.T. está compuesto por 77 bobinas, 7 capas de 11 bobinas cada una. Cada una de esas bobinas a su vez está compuesta por 8 conductores de cobre de sección rectangular 10.4mm x 4.6mm cada uno de ellos, aunque con el papel dieléctrico con el que son envueltos, aumentan sus dimensiones a 12mm x 5.2mm.



Sin embargo, el devanado de A.T. está compuesto por 1397 conductores repartidos a lo largo de 122 bobinas.

En la Tabla 2, se muestran los diámetros tanto exteriores como interiores de las siete capas del devanado de B.T.

Tabla 2: Diámetros e	exteriores e interiore	s del devanado de B.T.
	Fuente: [13]	

		Diámetro exterior
Сара	Diámetro interior (mm)	(mm)
1	478.4	468
2	494.8	484.4
3	511.2	500.8
4	527.6	517.2
5	544	533.6
6	560.4	550
7	577	566.4

Entre cada una de las capas, como elementos separadores se colocan unos listones de madera, que forman los canales por los que circulará el fluido dieléctrico, encargado de refrigerar el transformador.

En la Figura 4.2 se muestra una vista general en planta de una fase del transformador trifásico.





Figura 4.2: Vista en planta de una de las fases del transformador. Fuente: [13]

En la Figura 4.2 las coronas circulares verdes representan los devanados de cobre, las azules al cartón y las tiras rojas son los listones de madera que se han mencionado previamente. Cada una de las capas de cobre está cubierta por papel dieléctrico, aunque en esta imagen no se puede apreciar. Todos los huecos en blanco son conductos de refrigeración por los que va a circular el fluido dieléctrico en cuestión.

Se pueden ver las 7 capas que conforman el devanado de B.T. que son las más internas, mientras que el devanado de A.T. está representado por la gruesa capa verde más externa.

Tanto en la Figura 4.3 como en la Figura 4.4 se detalla mejor la geometría de una de las fases del transformador, obtenidas en [14].





Figura 4.3: Vistas en planta y en perspectiva de una de las fases del transformador. Fuente: [14]



Figura 4.4: Vista en perspectiva de una de las fases del transformador. Fuente: [14]



## 4.2 GEOMTERÍA ESTUDIADA

En lo que se refiere a la geometría a estudiar, para realizar el modelado geométrico, se ha escogido un corte transversal del devanado de B.T. de una fase del transformador y se le han realizado varias simplificaciones, que van a ser explicadas a continuación.

La Figura 4.5 muestra la sección transversal mencionada sin simplificaciones.



### Figura 4.5: Sección transversal real del transformador. Fuente: [2]

En la Figura 4.5 se puede apreciar el detalle de lo finas que son las capas del papel dieléctrico celulósico que aíslan las pletinas de cobre. A cada lado, tanto a su izquierda como a su derecha, el grosor del papel es de 0.3mm, mientras que el papel que separa a las pletinas entre sí es de 1.6mm de grosor.

A continuación, se muestran tanto en la Figura 4.6 como en la Figura 4.7 la geometría utilizada en el modelo y se van a explicar las simplificaciones que se han realizado en lo que a la geometría se refiere.





Figura 4.6: Geometría simplificada.



### Figura 4.7: Geometría acotada.

La simplificación que más resalta es que solo se han representado la sexta y la séptima capa del devanado de baja tensión, que son las correspondientes a las cotas de .4.6mm y 4.7mm de la Figura 4.7. También se puede apreciar que se han representado las capas de papel laterales de 0.3mm cada una, que envuelven los devanados de cobre, el papel aislante de 1.5mm de espesor que separa la séptima capa de cobre del primer canal de refrigeración de 20mm de espesor que lo separa del devanado de A.T., dos conductos de refrigeración de 3mm y 20mm de espesor y finalmente una capa de cartón de 4mm a la derecha del todo.



Teniendo en cuenta que el devanado de B.T. está conformado por 11 bobinas, dispuestas verticalmente las unas sobre las otras, de 8 conductores de cobre cada una y de 12mm de altura cada conductor, se tiene una altura de 1056mm, [13].

Altura (h) = 
$$11 * 8 * 12 = 1056$$
 mm (14)

Por otra parte, se ha obviado la influencia en la distribución de temperaturas del resto de capas del devanado de B.T. Lo único que se ha supuesto es un flujo de calor saliente de 250 W/m<sup>2</sup> en el contorno más interior, que se representa en azul en la Figura 4.7 que considera la refrigeración que aporta el conducto de fluido interior contiguo.

Además, tampoco se ha incluido en el modelizado el devanado de A.T., el cual está separado por otros dos anchos canales de fluido refrigerante, pudiéndose entender como volúmenes adiabáticos.

Otra de las simplificaciones que se han realizado es no tener en cuenta el papel aislante que separa a las pletinas entre sí, de 1.6mm de altura. Esto se puede justificar de la siguiente manera: La altura del transformador, y de las capas de papel aislante consecuentemente, es mucho mayor que su anchura. Por lo tanto, a la hora de realizar el modelado térmico, los gradientes serán mucho mayores en la dirección transversal que en la dirección axial. Por este motivo sí se han tenido en cuenta las capas de papel laterales, pero las capas de papel que separan las pletinas entre sí se han despreciado, suponiendo que la diferencia de temperaturas entre las pletinas contiguas es nula y que por lo tanto no se produce transferencia de calor entre ellas, juntando así todas las pletinas en un único bloque de cobre.

Todas estas simplificaciones se han realizado porque una geometría más compleja supondría un aumento de los costes computacionales y los


tiempos de simulación no justificable, ya que el objetivo del trabajo es realizar el acoplamiento entre ambos modelos. Solamente el hecho de añadir al modelo el conducto de refrigeración de 3mm y la sexta capa del devanado de B.T. con sus correspondientes papeles aislantes ha supuesto que los tiempos de simulación prácticamente se dupliquen.

## 4.3 MATERIALES

El modelo simplificado de la Figura 4.6 consta de 4 materiales diferentes que van a ser explicados a continuación.

#### <u>Cobre</u>

Elemento químico utilizado en la actualidad para la producción, entre otras cosas, de conductores eléctricos. Es el material del que se componen los devanados de A.T. y B.T. del transformador. Sus propiedades térmicas vienen definidas en la biblioteca de materiales de *COMSOL* y en este trabajo se muestran en la Tabla 3.

#### Papel celulósico

Se ha utilizado en el modelo las propiedades de la cinta de poliamida, material existente y definido en la biblioteca de materiales de *COMSOL* como *Kapton HN (Polymide tape)*. Sus propiedades térmicas tienen una escasa dependencia de la temperatura, y en este trabajo se muestran en la Tabla 3 con valor constante para el rango de temperaturas de operación del modelo.

#### <u>Éster natural</u>

Se ha decidido que, para este trabajo, en vez de utilizar aceite mineral como se hace en la mayoría de los transformadores, se ha utilizado un



aceite vegetal basado en ésteres naturales, cuyas propiedades termohidráulicas, dependientes de la temperatura, se han obtenido del artículo científico publicado por Ramón Lecuna [14] y se muestran en las ecuaciones (15), (16), (17) y (18).

#### <u>Cartón</u>

Es un material utilizado en el modelo, pero cuyas propiedades no vienen definidas en la biblioteca de *COMSOL*, por lo que los datos de la Tabla 3 se han obtenido de [2].

En la Figura 4.8 se muestra cómo se distribuyen los materiales en los dominios del modelo.



Figura 4.8: Materiales del modelo.

De izquierda a derecha y de arriba abajo, la primera selección es el cobre, la segunda el papel celulósico dieléctrico, la tercera el éster natural y la cuarta el cartón.



	Conductividad térmica	Densidad	Calor específico	Viscosidad dinámica
Material /				
Propiedad	k [W/(m*K)]	ρ [kg/m³]	Cp [J/(kg*K)]	μ [kg/(m*s)]
Cobre	400	8960	385	-
Papel	0.19	930	1340	-
Cartón [2]	0.19	930	1340	-

Tabla 3: Propiedades térmicas de los materiales.

Las propiedades del éster se pueden ver en las ecuaciones mostradas a continuación, donde las temperaturas se expresan en grados Kelvin, obtenidas en [14].

Conductividad térmica del éster

$$-0.0001 * T + 0.2063$$
 (15)

Densidad del éster

$$-0.6587 * T + 1113.5$$
 (16)

Calor específico del éster

$$0.0209 * T^2 - 10.171 * T + 3134.7 \tag{17}$$

Viscosidad dinámica del éster

$$\label{eq:rho} \begin{split} \rho * & [2*10^{-12}*T^4 - 3*10^{-9}*T^3 + 2*10^{-6}*T^2 - 0.0004 \\ & *T + 0.0338 \end{split} \tag{18}$$

# 4.4 MODELADO NUMÉRICO Y SOFTWARES UTILIZADOS



En este apartado se va a realizar una breve introducción sobre el modelado numérico, qué es, qué estudia y cuáles son los softwares utilizados en este trabajo para dicho modelado.

### 4.4.1 Modelados numéricos

La investigación de este trabajo se basa únicamente en el modelado numérico de una pequeña parte de un transformador. Un modelo numérico sirve para representar un sistema y simular su comportamiento, de la manera más real posible, obteniendo resultados numéricos.

Para poder realizar estos modelos se requiere de herramientas computacionales muy potentes que sean capaces de realizar cálculos complejos, como son *COMSOL Multiphysics* y *MATLAB*. Más adelante se hará una pequeña descripción de cada uno de ellos.

Las leyes físicas que rigen problemas dependientes de espacio y tiempo suelen ser expresadas mediante Ecuaciones Diferenciales Parciales (PDE, por sus siglas en inglés). Para la gran mayoría de geometrías, problemas y aplicaciones estas PDEs no se pueden resolver con métodos analíticos, [15].

Sin embargo, sí que se pueden construir aproximaciones de dichas ecuaciones, mediante su discretización, con bastante precisión. Estos métodos de discretización aproximan las PDEs a sistemas de ecuaciones algebraicas que pueden ser resueltas utilizando métodos numéricos y obteniendo así una solución aproximada a la real.

Por lo tanto, los métodos numéricos se utilizan para aproximar ecuaciones diferenciales parciales que en la mayoría de los casos no pueden ser resueltas. Presentan la solución continua de una ecuación diferencial mediante una serie de valores que conforman una solución discreta que se aproxima.



El método utilizado por *COMSOL Multiphysics* es el conocido Método de Elementos Finitos (MEF), que va a ser explicado a continuación, aunque existen otros como el Método de Diferencias Finitas o el Método de Volúmenes Finitos.

# 4.4.2 Método de Elementos Finitos

Es uno de los métodos más utilizados, sino el que más, en problemas y aplicaciones relacionadas con el mundo de las ingenierías. Es fácilmente adaptable a diversos tipos de problemas relacionados con diferentes ámbitos ingenieriles, como pueden ser la transmisión de calor, la mecánica de fluidos, mecánica estructural, transporte de especies diluidas, etc.

El M.E.F. (Método de Elementos Finitos) proporciona una solución numérica aproximada a ciertas PDEs o ecuaciones integrales definidas en un dominio que caracterizan su comportamiento físico, a través de métodos como el de Euler o Runge-Kutta.

Básicamente lo que hacen es dividir el dominio en elementos finitos o subdominios interconectados por una serie de puntos representativos denominados nodos. De acuerdo con las relaciones de adyacencia se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad (g.d.l.). Con todos los nodos y los grados de libertad el software en cuestión genera una malla.

Las relaciones de los valores de ciertas variables entre nodos se pueden escribir como un sistema de ecuaciones lineales, dando lugar a una matriz, siendo el número de ecuaciones proporcional al número de nodos existentes en el sistema.

A través de los nodos se transmite la solución de un elemento, sirviendo como condición de contorno a los elementos adyacentes. El software, en



este caso *COMSOL Multiphysics*, sigue un proceso iterativo hasta alcanzar una solución mediante convergencia.

En resumidas cuentas, se pasa de un sistema continuo con infinitos grados de libertad regido por una PDE a un sistema con un número finito de g.d.l. regido por un sistema de ecuaciones, que conforman la matriz.

En todos los sistemas y problemas a analizar se tienen los siguientes aspectos.

<u>Dominios</u>: Espacios geométricos en los que se analiza el sistema. En la Figura 4.8 se puede apreciar que la geometría de los modelos de este trabajo está compuesta por 10 dominios diferentes: 2 dominios de cobre, 5 de papel dieléctrico celulósico, 2 de éster natural y 1 de cartón.

<u>Condiciones iniciales y de contorno:</u> Variables conocidas que condicionan los cambios del sistema, como bien pueden ser la temperatura, la concentración de humedad, la velocidad del fluido, la presión, etc.

<u>Incógnitas</u>: Variables del sistema que se determinan una vez consideradas las condiciones de contorno del sistema, conocidos también como los g.d.l. de cada nodo, siendo las variables que determinan el estado y la posición del nodo, [15].

### 4.4.3 COMSOL Multiphysics

Pese a existir otros softwares que funcionan de forma similar como son ANSYS o SolidWorks, finalmente se ha decidido emplear para este trabajo *COMSOL Multiphysics*.

Se trata de un software informático que permite la resolución de modelos numéricos basándose en el MEF.



Resulta ser un programa de gran utilidad para ingenieros, científicos e investigadores en la realización de preanálisis de cierta profundidad. Las simulaciones son de vital importancia ya que se deben de llevar a cabo para estudiar cómo va a ser el comportamiento de una determinada tecnología, máquina o prototipo sin que sea necesaria su fabricación para realizar los análisis pertinentes. Además, las simulaciones suelen requerir de cientos o miles de pruebas, variaciones o cambios en cualquier aspecto, que harían perder mucho dinero y tiempo a las empresas en el caso de que no se realizasen.

Una de las ventajas que tienen estos softwares es que proporcionan resultados de forma relativamente rápida y sencilla y con resultados bastante precisos en general o que se asemejan a los reales.

Este software posee infinidad de opciones de análisis para diversos módulos de aplicación como son los siguientes.

<u>Radiación</u>: Acústica, electromagnetismo, sistemas microelectromecánicos, ingeniería de microondas, componentes de radiofrecuencia, propagación de ondas.

<u>Mecánica de fluidos</u>: Difusión, dinámica de fluidos, fluidos en medios porosos, transferencia de calor, fenómenos de transporte, etc.

<u>Mecánica de estructuras</u>: Mecánica de sólidos, esfuerzos térmicos, electromecánica, fatiga, etc.

Física: Geofísica, óptica, fotónica, mecánica cuántica.

Y otros como plasmas, sistemas de control, modelización de componentes o matemática aplicada.

Presenta características muy remarcables como que posee cientos de prestaciones de multifísicas, formulación general para un modelado rápido



y sencillo de sistemas arbitrarios de PDEs, multifísica dimensional para modelado simultáneo de 1D, 2D y 3D, generación automática de mallas (aunque se pueden caracterizar y modificar como uno quiera), extensa biblioteca de propiedades y materiales, material bibliográfico, tutoriales, ejemplos prácticos, etc.

Parte de ese material bibliográfico es el que se ha utilizado para aprender a manejar tanto el software de *COMSOL* como el *LiveLink* con *MATLAB* y su lenguaje de programación. En las referencias [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23] y [24] se muestran todos los manuales y páginas webs empleados para ello.

# 4.4.4 MATLAB y el LiveLink con COMSOL

Se trata de un software de programación y cálculo numérico con una infinidad de utilidades y prestaciones, entre las que se encuentran: Análisis de datos, realización de gráficas y desarrollo de algoritmos, [15].

Entre sus usos y aplicaciones principales están los sistemas de control, Machine Learning, procesamiento de señales, Deep Learning, mantenimiento predictivo, prueba y medición, procesamiento de imágenes y robótica.

Se trata de un programa muy utilizado, destinado tanto a la formación como a su uso a nivel profesional y empresarial.

Pero ambos programas no se han utilizado por separado, sino que se ha tenido que utilizar el producto conocido como *LiveLink* o conexión en directo entre ambos softwares para que *COMSOL Multiphysics* pudiese sacar partido a las prestaciones de *MATLAB*.

Permite al usuario optimizar los modelos de *COMSOL Multiphysics* y en muchos casos realizar procesos que no serían posibles sin las herramientas



de *MATLAB*, como es el caso del acoplamiento llevado a cabo en este trabajo.

Tiene diversas aplicaciones como bien son crear y modificar modelos de *COMSOL* a través de un script de *MATLAB* o desde su ventana de comandos, importar funciones de *MATLAB* en *COMSOL* para definir parámetros, características o propiedades del sistema, modelado interactivo y en tiempo real entre ambos programas, análisis de resultados de *COMSOL* con *MATLAB*, entre otras.

Para poder conectar ambos programas el procedimiento a seguir es el siguiente.

Lo primero que hay que hacer es ejecutar *COMSOL Multiphysics with MATLAB* que es un acceso directo que se instala junto con el resto del programa.

La clave de este *LiveLink* es que al ejecutar dicho acceso directo lo que el programa hace automáticamente es conectar *MATLAB* a un servidor local de *COMSOL* conocido como *COMSOL* server.

La primera vez que se conecta *MATLAB* a este servidor, se va a pedir al cliente que establezca un nombre de usuario y una contraseña que no se le va a volver a pedir nunca más.

Una vez hecho esto se abre *MATLAB* automáticamente y se muestra en la ventana de comandos un mensaje indicando que se ha realizado la conexión entre el servidor y *MATLAB* correctamente.

A continuación, se conecta a través de la ventana de comandos o de un script, el archivo mph (archivo de *COMSOL Multiphysics*) que contenga el modelo deseado para terminar de realizar el LiveLink.



A partir de ese momento ya están totalmente conectados y si se realiza cualquier cambio desde la ventana de comandos o el script de *MATLAB*, se actualiza automáticamente el archivo mph conectado a través del servidor y viceversa.

De esta forma se ha realizado el acoplamiento entre ambos modelos mph. No hubiese sido posible sin el uso de una herramienta de apoyo como ha sido en este caso *MATLAB*.

# 4.5 DISCRETIZADO (MALLADO)

En este trabajo se ha optado por permitir al software que realice el mallado en función de las físicas resueltas, tanto en el modelo CFD como en el modelo de difusión. La justificación es simple, los costes computacionales y los tiempos de simulación aumentarían de manera importante si se mejorase el mallado de forma manual, algo innecesario dada la entidad de este trabajo. Las mallas controladas por la física son realizadas por *COMSOL* con todos los valores y parámetros configurados por defecto. En la generación de la malla contribuyen principalmente tanto las físicas utilizadas en el modelo como la forma y el tamaño de la geometría. En la Figura 4.9 y Figura 4.10 se muestra la malla generada en el modelo CFD, en la cual han contribuido la física de Transferencia de calor en sólidos y líquidos, la física de mecánica de fluidos, teniendo en cuenta que ambas físicas están acopladas entre sí.





Figura 4.9: Malla controlada por la física en el modelo CFD.



Figura 4.10: Vista en detalle de la malla controlada por la física en el modelo CFD.

La malla completa consiste en 206986 elementos de dominio y 22784 elementos de contorno.

# 4.6 ESTUDIOS TEMPORALES



A la hora de resolver un modelo multifísico hay dos enfoques principales que pueden adoptarse para resolver el sistema de ecuaciones generado por la malla. Es decir, *COMSOL* tiene integrado dos tipos de resolvedores, [2].

Por un lado, está el enfoque Totalmente Acoplado el cual forma un único gran sistema de ecuaciones que resuelve todas las incógnitas e incluye todos los acoplamientos entre incógnitas los efectos multifísicos, en cada iteración.

Por otro lado, se tiene el enfoque Segregado, el cual no resuelve todas las incógnitas a la vez, sino que subdivide el problema en varios pasos agregados. Cada paso normalmente representa una sola física, pero se puede dividir una física en varios pasos o un único paso puede contener varias físicas. Estos pasos segregados son más pequeños que el sistema completo de ecuaciones del enfoque Totalmente Acoplado y se resuelven secuencialmente dentro de una única iteración, por lo que se requiere menos memoria.

El enfoque Totalmente Acoplado incluye todos los términos de acoplamiento entre incógnitas y es por eso por lo que suele converger de forma más robusta y en menos iteraciones que con el otro enfoque. Sin embargo, normalmente cada iteración requiere de más memoria y tiempo para resolver, por lo que el enfoque Segregado suele ser generalmente más rápido, [2].

Independientemente del enfoque adoptado, la resolución se aborda por iteraciones y se llama repetidamente, convergiendo gradualmente a la solución del problema.

Para el caso de este estudio se ha optado en ambos modelos por estudios temporales, ya que se pretende utilizar una distribución de temperaturas que varíe con el tiempo para analizar la difusión de la humedad a lo largo



del tiempo también. Además, se ha optado en todas las simulaciones por la configuración de los resolvedores Segregados, tras comprobar que con el enfoque Totalmente Acoplado los tiempos de simulación aumentan demasiado.

En cuanto a los tiempos elegidos, una aclaración importante que se debe hacer es el hecho de que se hayan elegido unas variaciones de tiempo atípicas. Las simulaciones principales se han llevado a cabo dentro del intervalo [0–304.5] días. El paso de tiempo ha sido de 10.15 días, obteniendo 31 conjuntos de datos en cada simulación y gráfica que se ha realizado.

Esto se ha debido a tres razones principalmente.

La primera es que, al tratarse de un estudio relacionado con la difusión de la humedad, las constantes de tiempo que se manejan son muy pequeñas, por lo que para poder analizar el desarrollo de la humedad correctamente, se debían cubrir intervalos de tiempo muy grandes, en este caso de más de 300 días.

Este hecho está muy ligado a la segunda razón. Al realizar las simulaciones y los análisis basados en estudios temporales, los requisitos de computación y los tiempos de ejecución son enormes, por lo que, si se quiere abarcar intervalos de tiempo tan grandes, hay que aumentar el paso en las iteraciones llevadas a cabo. Es decir, si se quiere analizar la difusión de la humedad para un tiempo total de 304.5 días, en vez de tomar intervalos de tiempo de 1 día, se toman de 10.15 días para que el software no tenga que realizar tantas iteraciones.

Y la última razón por la que se ha elegido un paso de 10.15 días ha sido por el hecho de que, si se escogían intervalos de tiempo enteros, de 10 días, por ejemplo, al tener una distribución de temperaturas variable cuyo



ciclo tiene un periodo de 24 horas (1 día), las gráficas resultantes mostrarían unas temperaturas prácticamente constantes. Parecería que se tratase de un régimen permanente a valor constante y no se podrían apreciar las variaciones de temperatura en las gráficas.

Hasta aquí se han explicado todos los aspectos que tienen en común ambos modelos. Ahora se procede a explicar las características propias de cada uno de los modelos.

# 4.7 MODELO TERMOHIDRÁULICO

En este apartado se van a exponer todos los aspectos relacionados con el modelo CFD o modelo termohidráulico, necesarios para obtener la distribución de temperaturas buscada. La distribución de temperaturas que se obtiene es debida a las pérdidas producidas por efecto Joule en las dos últimas capas de cobre del devanado de B.T.

A continuación, se va a mostrar la base teórica del modelo, es decir, las ecuaciones de gobierno de las físicas empleadas, así como las condiciones de contorno y los valores iniciales supuestos en este estudio.

# 4.7.1 Base teórica del modelo (ecuaciones de gobierno)

Hay que considerar en este modelo la interacción fluido-térmica, que se basa en dos físicas diferentes. Por un lado, la de Transferencia de calor en sólidos y líquidos y por otro lado la física de mecánica de fluidos en flujo laminar. Ambas están acopladas entre sí a través de la dependencia de la temperatura de las propiedades termohidráulicas del fluido.



Por un lado, se tiene el fenómeno de la transferencia de calor. Mediante este fenómeno el calor generado en los devanados del transformador es evacuado al exterior por el aceite mediante los mecanismos de conducción y convección principalmente, [2].

El calor emitido por los devanados dependerá de la carga, la cual ha sido modelada como variable y cíclica con un periodo de 24 horas. Pero la carga se explicará más adelante.

Como ya se ha explicado la conducción se produce entre materiales con un gradiente de temperaturas y que se encuentran en contacto entre sí. El flujo de calor se transmite del sólido con mayores temperaturas hacia el de menores temperaturas.

Este modelo de transferencia de calor se basa en un balance de energía, expresado por las ecuaciones (19) y (20), obtenidas en [2] y que se aplican a todos los materiales del modelo, incluyendo el aceite.

$$\rho * C_{p} * u * \nabla T + \nabla q = Q$$
 (19)

$$q = -k * \nabla T \tag{20}$$

Siendo las variables: "u" es el campo de velocidades, "k" es la conductividad térmica, "C<sub>p</sub>" el calor específico a presión constante, "p" la densidad del material, "T" la temperatura, "Q" la generación de calor por unidad de volumen. En el caso del éster natural, como ya se ha señalado anteriormente, la conductividad térmica, la densidad, el calor específico y la viscosidad son funciones dependientes de la temperatura.

Para realizar el análisis del movimiento del fluido, en el caso de este estudio un éster natural, con flujo laminar y no isotérmico, la herramienta computacional recurre a las ecuaciones de Navier-Stokes para un flujo débilmente comprensible en dos dimensiones.



Estas ecuaciones se basan en la conservación de la cantidad de movimiento y la conservación de la masa, de acuerdo con las ecuaciones (21), (22) y (23), obtenidas en [2].

$$\rho * (u * \nabla) * u = \nabla * [-p * I + K] + F$$
 (21)

$$K = \mu * (\nabla u + (\nabla u)^{T}) - \frac{2}{3} * \mu(\nabla u) * I$$
 (22)

$$\nabla * (\rho u) = 0 \tag{23}$$

Siendo las variables: " $\rho$ " la densidad, " $\mu$ " la viscosidad dinámica, ambas dependientes de la temperatura, "p" la presión, "I" es la matriz identidad en estas ecuaciones y "F" el vector fuerza del cuerpo.

### 4.7.2 Condiciones de contorno

Es necesario especificar las condiciones de contorno (c.c.) para poder completar el modelizado del sistema. Hay que definir por separado las c.c. que afectan a cada una de las físicas.

#### C.c. de la física de trasferencia de calor en sólidos y líquidos

Superficies adiabáticas: Se supone que hay superficies adiabáticas en todos los contornos exteriores excepto en algunos casos puntuales como las entradas de aceite, el contorno interno del papel que está en contacto con otro conducto de refrigeración que no se muestra en este modelado y los contornos superiores de los dominios del cobre y del papel celulósico. Excepto estos contornos que se acaban de mencionar, en el resto se suponen superficies adiabáticas que siguen la ecuación (24).

$$-n * q = 0$$
 (24)



Siendo las variables: "n" el vector normal" y "q" el flujo de calor.

Otra condición de contorno es la temperatura de entrada del aceite, que se ha supuesto en este trabajo de 35°C, como en la ecuación (25).

$$T = T_{in} = 35^{\circ}C$$
 (25)

Flujo de calor interno: Esta condición permite tener en cuenta la refrigeración de la sexta capa de cobre del devanado de B.T. por el canal de refrigeración interno, lo que sería el quinto canal de refrigeración de aceite, que para la potencia nominal se ha supuesto un flujo saliente de 250 W/m<sup>2</sup>. Se muestra en la ecuación (26).

$$-\mathbf{n} * \mathbf{q} = q_0 \tag{26}$$

Flujo de calor superior: Esta c.c. permite simular la evacuación de calor tanto del cobre como del papel al aceite de la cuba, por la parte superior. Se ha supuesto una tasa de calor de 50 W salientes. Se muestra esta c.c. en la ecuación (27).

$$-n * q = q_0 \tag{27}$$

#### C.c. de la física de flujo laminar

Condición de no deslizamiento: A las paredes laterales de ambos conductos de refrigeración, tanto el de 3mm de espesor como el de 20mm, se les impone la condición de no deslizamiento. Es decir, el fluido en contacto con la pared no posee velocidad, [2], como se muestra en la ecuación (28).

$$u = 0$$
 (28)

Siendo la variable: "u" el campo de velocidad.



Velocidad de entrada del aceite: Se define la velocidad de entrada del aceite a los conductos de refrigeración por los contornos inferiores. Esta velocidad trata de simular el movimiento del fluido por convección natural del éster a través del conducto. El fluido dieléctrico absorberá el calor cuando esté en contacto con el papel dieléctrico celulósico, perdiendo densidad, lo cual genera una fuerza volumétrica ascensional que empuja al fluido hacia arriba, siendo evacuado por el conducto. Se establece esta velocidad de entrada de 1 mm/s, como en la ecuación (29).

$$u = -U_0 * n$$
 (29)

Siendo las variables: " $U_0$ " el campo de velocidad inicial y "n" el vector normal.

Presión nula: Se establece que en los contornos de salida de los conductos de refrigeración se tiene una presión nula, estableciendo así dicha salida como referencia de presiones, como se muestra en las ecuaciones (30) y (31), obtenidas en [2].

$$[-p * I + K] * n = -\widehat{p_0} * n$$
 (30)

$$\widehat{p_o} \le p_o \tag{31}$$

Siendo las variables: "p" es la presión, "I" la matriz identidad, "n" el vector normal y "p<sub>0</sub>" es la presión inicial.

# 4.7.3 Valores iniciales, potencias y fuente de calor

Han de definirse, aparte de las c.c., los valores o condiciones iniciales (c.i.) de las variables que se vayan a resolver, para poder comenzar con los cálculos partiendo de dichos valores. Asimismo, más adelante se va a explicar todo lo relacionado con la fuente de calor y la carga variable utilizado en este modelo.



#### C.i. de la física de transferencia de calor en sólidos y fluidos

Temperatura inicial: Se aplica a todos los dominios que componen el sistema del modelo, ya que todos están sometidos a esta física. El valor inicial que se ha elegido es el de la temperatura ambiente, como se puede ver en la ecuación (32).

$$T_{in} = T_{amb} = 20^{\circ}C = 293.15K$$
 (32)

A continuación, se expondrá la potencia perdida por efecto Joule en el sistema y la fuente de calor del sistema.

Ahora se van a presentar los cálculos realizados para establecer las pérdidas del transformador por efecto Joule y como se ha modelado la carga variable utilizada para llevar a cabo las simulaciones del modelo CFD.

La ecuación (1) describe las pérdidas que se producen en los conductores de cobre por efecto Joule. A su vez la resistencia de los conductores viene determinada por la ecuación (33), obtenida en[13].

$$R = \rho * \frac{L}{S}$$
(33)

Siendo las variables: "R" la resistencia del conductor [ $\Omega$ ], " $\rho$ " la resistividad del material [ $\Omega$ \*m], "L" la longitud del conductor [m] y "S" la superficie [m<sup>2</sup>].

En la Tabla 4 se adjuntan los diámetros medios de las 7 capas del devanado de B.T. ya que son con los que se van a calcular las longitudes de las capas.



Diámetro medio (m)		
0.4732		
0.4896		
0.506		
0.5224		
0.5388		
0.5552		
0.5717		

#### Tabla 4: Diámetros medios del devanado de B.T.

Para el cálculo de la longitud de cada una de las 7 capas se tendrá en cuenta la ecuación (34), obtenida en [13].

$$L_{capa} = \pi * D_{medio} * n \tag{34}$$

Siendo las variables: " $L_{Capa}$ " la longitud de la capa [m], " $D_{medio}$ " el diámetro medio [m] obtenido de la Tabla 4 y "n" el número de bobinas por capa, en este caso n =11.

Aplicando la ecuación (34) se obtienen los siguientes resultados de la Tabla 5.

#### Tabla 5: Longitud de las capas de devanado de B.T.

Longitud capa (m)		
16.3526		
16.9194		
17.4861		
18.0528		
18.6196		
19.1863		
19.7565		
Total:		
126.3734		



A continuación, se calcula la sección total de cada una de las bobinas. Para ello hay que recordar que cada una de ellas está compuesta de 8 pletinas y cada pletina tiene las dimensiones de 10.4mm de altura y 4.6mm de ancho, por lo que la sección total de la bobina es la siguiente, [13].

Seccion<sub>bobina</sub> = 
$$8 * 10.4 * 4.6 * 10^{-6} = 0.00038272 \text{ m}^2$$
 (35)

Otro aspecto importante para tener en cuenta es que la resistividad a 20°C es de 1.67785e-8  $\Omega^*m$ . Sin embargo, un transformador en funcionamiento no va a trabajar a esa temperatura nunca y la resistividad es un parámetro que depende de la temperatura, por lo que tendrá un valor diferente a ese mientras esté conectado a la red.

Se ha supuesto una temperatura media de funcionamiento de 65°C ya que tras realizar las primeras simulaciones se pudo observar que dicha temperatura es un término medio. Para calcular la resistividad a esa temperatura se ha utilizado la ecuación (36), obtenida en [13].

$$\rho_{\rm Tf} = \rho_{\rm To} * \frac{(235 + T_f)}{(235 + T_o)}$$
(36)

Siendo las variables: "T<sub>f</sub>" la temperatura final [°C] en este caso T<sub>f</sub> = 65°C, "T<sub>0</sub>" la temperatura inicial [°C] en este caso T<sub>0</sub> = 20°C, "p<sub>Tf</sub>" la resistividad del cobre a la temperatura final [ $\Omega$ \*m] y "p<sub>To</sub>" la resistividad del cobre a la temperatura inicial [ $\Omega$ \*m]. Resulta lo mostrado en la ecuación (37).

$$\rho_{65^{\circ}C} = 1.67785 * 10^{-8} * \frac{(235+65)}{(235+20)} = 1.973 * 10^{-8} \Omega * m \quad (37)$$

Aplicando la ecuación (33), junto con el valor de la longitud total de las 7 capas y el valor de la superficie, se obtiene el valor de la resistencia a 65°C que es el calculado en la ecuación (38).



$$R_{65^{\circ}C} = 1.973 * 10^{-8} * \frac{126.3734}{0.00038272} = 0.0065179 \,\Omega \qquad (38)$$

Teniendo en cuenta este valor de la resistencia, la ecuación (1) y que la corriente que circula por el devanado de B.T., es de 1283 Amperios, la potencia total perdida por efecto Joule en todo el devanado de baja tensión es la calculada en la ecuación (39).

$$P_{Cu} = 0.0065179 * 1283^2 = 10729.08 \, W \tag{39}$$

Esta potencia es muy importante, ya que ahora se va a definir la carga a la que el transformador está sometido durante el estudio.

Las pérdidas por efecto Joule previamente calculadas mediante la ecuación ( 39 ) son las que se producen cuando el transformador se encuentra trabajando en régimen nominal. Sin embargo, estas pérdidas variaran con la potencia que suministre la máquina.

Así, para definir la carga diaria del transformador se ha utilizado como base la gráfica de la demanda real de energía eléctrica obtenida directamente de la página web de REE, Red Eléctrica de España, [25], tal y como se muestra en la Figura 4.11.





#### Figura 4.11: Gráfica de la potencia demandada en todo el país a lo largo del día. Fuente: [25]

Esta gráfica, obviamente, muestra la potencia diaria demandada (MW) de por el país. Se ha supuesto que el transformador se ve sometido a un perfil de carga análogo. Sin embargo, las potencias que se tienen que utilizar en el modelado del transformador son potencias perdidas por efecto Joule, no potencias demandadas.

Se ha utilizado la gráfica de la Figura 4.11 para poder hacer una gráfica análoga de la carga del estudio, pero se han tenido que hacer diversos cálculos para ello.

Otro aspecto para tener en cuenta es que la potencia perdida de 10729.08 W es la correspondiente al devanado de B.T. entero, pero en este modelizado solo se van a tener en cuenta 2 capas de las 7 que lo conforman, la sexta y la séptima. Por este motivo se realiza una



simplificación que consiste en dividir dicha potencia entre el número de capas, y aplicar esa potencia a cada una de las capas del modelo, como se muestra en la ecuación (40).

$$P_{\text{capa}} = \frac{10729.08}{7} = 1532.73 \text{ W}$$
 (40)

Como se puede comprobar en la Figura 4.11 el máximo de potencia demandada se produce a las 14:20 horas del mediodía, con un pico de 35392 MW. Entonces, se ha supuesto que la potencia calculada en la ecuación (40) de 1532.73 W son las pérdidas que se producen en cada una de las capas del devanado de B.T. del transformador operando a régimen nominal, al 100 %, es decir, se ha supuesto que son las pérdidas máximas del transformador.

Gracias a este supuesto, se puede realizar una gráfica de las pérdidas análoga a la de la Figura 4.11.

Otro aspecto que hay que mencionar antes de mostrar los cálculos es que en la página web de REE, [25],los datos que se muestran son en intervalos de 5 minutos, es decir, los datos se actualizan cada 5 minutos. Esto suponía unos costes computacionales y unos tiempos de simulación bastante mayores, por lo que se ha decidido realizar una gráfica escalonada, manteniendo constantes las potencias en vez de cada 5 minutos, cada 60 minutos, es decir, 1 hora, quedando la gráfica dividida en 24 intervalos diferentes.

Para ello se ha tenido que realizar el promedio de 12 datos, que son los que se corresponde a cada hora. Es por eso por lo que, el pico en vez de ser de 35392 W, al realizar el promedio desde las 14:00 hasta las 15:00, resulta ser de 35243.583 W.



A continuación, se van a explicar los cálculos llevados a cabo para la realización de la gráfica de la carga con un ejemplo. Después de eso se van a mostrar todos los datos en las tablas.

Tras realizar los promedios de todos los datos para aplicarlos a la gráfica en intervalos de 1 hora y no de 5 minutos, resulta que el máximo que se produce entre las 14:00 – 15:00 horas del mediodía es de 35243.583 W como se ha explicado anteriormente. Y el promedio entre las 15:00 – 16:00 horas del mediodía es de 34687.417 W. Este último dato supone un 98.422 % de la potencia máxima demandada. En otras palabras, una reducción de la potencia real demandada del 1.578 %.

Sin embargo, si se supone que el máximo en la gráfica de la carga del estudio se produce también entre las 14:00 – 15:00 horas del mediodía con un valor pico de 1532.73 W, la potencia entre las 15:00 – 16:00 horas no va a ser del 98.422 %, ya que no se trata de potencia demandada sino de potencia perdida por efecto Joule.

Por lo tanto, hay que tener en cuenta como se relacionan las variaciones de potencia, ya que se está tratando con diferentes tipos de potencia.

Para relacionarlas hay que tener en cuenta la ecuación (41), obtenida en [1].

$$P_{v} = (\frac{I}{I_{N}})^{2} * P_{vN} = C^{2} * P_{vN}$$
 (41)

Siendo las variables: " $P_v$ " la potencia perdida en un determinado instante (es variable) [W], "I" la corriente en ese determinado instante [A], "I<sub>N</sub>" la corriente a régimen nominal (en este caso nominal y máximo son términos análogos) [A], " $P_{vN}$ " la potencia perdida máxima o a régimen nominal [W] y "C" el índice de carga, [1].



De esta forma, siguiendo el ejemplo anterior,  $I/I_N$  corresponde a 98.422/100, y, por lo tanto, lo que se reducen las pérdidas por efecto Joule corresponde a:  $1-C^2 = 0.9687$ . Por lo tanto, la potencia perdida por efecto Joule se reduce un 3.131 %, y no un 1.578 % como la potencia demandada.

Siguiendo esta metodología se han obtenido los datos mostrados a continuación en la Tabla 6 y Tabla 7.

			Porcentaje que se reduce
Hora	Demanda horaria (MW)	Índice de carga, C	la potencia real (%)
00 01	28513.333	0.8090	19.0964
01 02	26877.25	0.7626	23.7386
02 03	25752.417	0.7307	26.9302
03 04	25104.917	0.7123	28.7674
04 05	24795.25	0.7035	29.6461
05 06	24982.5	0.7089	29.1148
06 07	26714.833	0.7580	24.1994
07 08	28489	0.8083	19.1654
08 09	29720.75	0.8433	15.6705
09 10	31280.167	0.8875	11.2458
10 11	32634.083	0.9260	7.4042
11 12	33339.667	0.9460	5.4022
12 13	34192.5	0.9702	2.9823
13 14	35095.167	0.9958	0.4211
14 15	35243.583	1.0000	0.0000
15 16	34687.417	0.9842	1.5781
16 17	34504.417	0.9790	2.0973
17 18	34517.583	0.9794	2.0599
18 19	34195.667	0.9703	2.9734
19 20	33715.583	0.9566	4.3355
20 21	33363.583	0.9467	5.3343
21 22	33949.667	0.9633	3.6714
22 23	32108.667	0.9111	8.8950
23 00	29736.583	0.8437	15.6255

# Tabla 6: Datos de la gráfica de la Figura 4.11 de potencia demandada real.



Г

	Cuadrado del índice de	Porcentaje que se reducen	
		las pérdidas por efecto Joule	
Hora	Carga, C <sup>2</sup>	(%)	Potencia perdida (W)
00 01	0.6545	34.5460	1003.23
01 02	0.5816	41.8420	891.40
02 03	0.5339	46.6080	818.35
03 04	0.5074	49.2592	777.72
04 05	0.4950	50.5032	758.65
05 06	0.5025	49.7528	770.15
06 07	0.5746	42.5428	880.66
07 08	0.6534	34.6577	1001.52
08 09	0.7111	28.8853	1089.99
09 10	0.7877	21.2269	1207.38
10 11	0.8574	14.2601	1314.16
11 12	0.8949	10.5125	1371.60
12 13	0.9412	5.8757	1442.67
13 14	0.9916	0.8405	1519.84
14 15	1.0000	0.0000	1532.73
15 16	0.9687	3.1312	1484.73
16 17	0.9585	4.1506	1469.11
17 18	0.9592	4.0775	1470.23
18 19	0.9414	5.8583	1442.93
19 20	0.9152	8.4831	1402.70
20 21	0.8962	10.3841	1373.57
21 22	0.9279	7.2079	1422.25
22 23	0.8300	16.9988	1272.18
23 00	0.7119	28.8095	1091.16

#### Tabla 7: Datos de la gráfica de la carga variable del modelo.

La Figura 4.12 muestra la columna de las pérdidas de la Tabla 7 graficada. Estos valores serán los utilizados en el modelo numérico como fuente de calor en ambas capas.





Figura 4.12: Gráfica de la carga variable introducida en Comsol Multiphysics.

#### C.i. de la física de mecánica de fluidos en flujo laminar

Las condiciones iniciales del flujo laminar son bastante sencillas ya que únicamente se han fijado como nulos los campos de velocidad y de presión en el instante inicial tal y como se describe matemáticamente en las ecuaciones (42) y (43).

$$u = 0$$
 (42)

$$p = 0$$
 (43)

# 4.8 MODELO DE LA DIFUSIÓN DE LA HUMEDAD

En el presente apartado se explicarán todos los aspectos que hay que tener en cuenta a la hora de realizar el modelo de difusión de la humedad, tales como las ecuaciones de gobierno, las condiciones de contorno y las condiciones iniciales. Es importante recordar que las temperaturas



presentes en este modelo son las que se importan en cada instante, provenientes del modelo de CFD.

# 4.8.1 Base teórica del modelo (Ecuaciones de gobierno)

Como ya se ha explicado en apartados anteriores, la humedad presente en el transformador se encuentra distribuida entre sus diversos componentes, pero las que se van a tener en cuenta en este modelo son las presentes en el papel celulósico dieléctrico y en el fluido dieléctrico. El sistema papelfluido, por lo tanto, va a buscar el equilibrio en la concentración relativa de humedad, como se muestra en la ecuación (9),aunque es algo que se tardará mucho tiempo en conseguir teniendo una carga variable y consecuentemente un cambio continuo en las temperaturas.

El proceso de transferencia de calor generado por el devanado, debido al efecto Joule, a lo largo de los diferentes materiales y componentes del transformador se desarrolla en unas constantes de tiempo significativamente menores que el fenómeno de la difusión de la humedad. Es por eso por lo que las temperaturas varían más rápido que los valores de la concentración de humedad.

La difusión de la humedad basa su comportamiento en las Leyes de Fick, como ya se explicó en apartados previos. Estas leyes se fundamentan en que, al haber un gradiente de concentración de moléculas de agua en un material poroso, la humedad se trasladará desde las zonas con mayores concentraciones hacia las zonas con menores concentraciones, similar a lo que ocurre cuando se transmite calor entre objetos a diferentes temperaturas. La primera Ley de Fick se expresa matemáticamente mediante la ecuación (44).



$$\mathbf{F} = -\mathbf{D} * \nabla \mathbf{c} \tag{44}$$

Siendo las variables: "F" el flujo de la humedad que se genera entre las regiones de diferentes concentraciones, "D" es el coeficiente de difusión y "c" la concentración local de humedad,

Si se aplica además el Teorema de Stokes a la ley de conservación de la concentración de humedad se obtiene una expresión como la de la ecuación (45), [2].

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla F = 0 \tag{45}$$

La combinación de las ecuaciones (44) y (45) da lugar a la segunda Ley de Fick, la cual ha sido expresada en coordenadas cartesianas y en coordenadas cilíndricas respectivamente en las ecuaciones (46) y (47) **iError! No se encuentra el origen de la referencia.** 

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2})$$
(46)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2})$$
(47)

Se considera que el coeficiente de difusión es isotrópico, es decir, que el movimiento del agua se puede producir en cualquier dirección en las mismas condiciones.

Sin embargo, debido a la geometría del estudio, hay que tener en cuenta que los gradientes de concentración van a ser mucho mayores en la dirección transversal que en la dirección axial. Esto se debe a que la altura del modelo es de 1056mm, y por lo tanto la del papel también, mientras que el grosor del papel es de un par de milímetros o incluso menos. El gradiente vertical por lo tanto va a ser mucho más pequeño que el



horizontal. Es por eso por lo que se centrará el trabajo en el estudio de los gradientes de temperatura en la dirección horizontal, es decir, en el eje de abscisas, despreciando la difusión vertical.

Como se mencionaba en el párrafo anterior, a pesar de que las temperaturas varían con la altura y estas influyen sobre las concentraciones de humedad de los puntos que se encuentren tanto por encima como por debajo suyo, se va a modelizar la difusión de tal forma que se desprecie la variación de humedad en la dirección vertical y se tenga en cuenta únicamente la variación en la dirección radial, de tal forma que se cumpla la ecuación (48).

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( D \frac{\partial c}{\partial r} \right)$$
(48)

EL coeficiente de difusión "D" considera que la difusión se produce tanto en forma de vapor de agua como en forma líquida. Para el cálculo de dicho coeficiente se ha empleado la ecuación (49) propuesta por R. Villarroel en [5].

$$D_{(c,T)} = D_o * e^{k*c}$$
 (49)

"Siendo las variables": " $D_0$ " el factor preexponencial [m<sup>2</sup>/s], el cual relaciona el coeficiente de difusión "D" con el resto de los parámetros, "k" es un parámetro adimensional que relaciona el coeficiente de difusión con la concentración local de humedad, el cual depende a su vez del espesor del papel celulósico "I".

Estos parámetros se obtienen mediante curvas de secado empleando métodos experimentales. De esta forma R. Villarroel propone en [5] para papeles celulósicos impregnados en el éster natural de Biotemp, la ecuación (50).



$$D_{\text{Biotemp}} = 1.2 * 10^{-7} * l^{-3.7} * e^{(0.25 * c - \frac{4491 * l^{-0.5}}{T})}$$
(50)

Siendo las variables: "I" el espesor del papel [mm], "c" la concentración de humedad en el papel [mol/m<sup>3</sup>] y "T" las temperaturas importadas [K].

Por último, pero no menos importante, hay que recordar el hecho de que la humedad fluye entre el papel celulósico y el fluido y viceversa a través de las interfases papel-fluido, siendo este intercambio muy rápido.

## 4.8.2 Condiciones de contorno

Se considera que la adsorción del agua en la superficie del aislamiento se comporta como un proceso convectivo. Es un hecho que el intercambio de agua en la superficie de contacto entre el papel celulósico y el fluido refrigerante es mucho más rápido que el intercambio en el resto del papel. La concentración de equilibrio se alcanza rápidamente y esto se va a utilizar como una condición de contorno para poder resolver la difusión en el resto del aislamiento sólido. En la ecuación (51) se muestra dicha condición de contorno, propuesta por Howe en [26].

$$c_i = c_0 = C_{equil} \tag{51}$$

En la Figura 4.13 se muestran las condiciones contorno de la difusión de la humedad entre los sistemas de aislamiento del transformador, [4].





#### Figura 4.13: Condiciones de contorno de la difusión de la humedad entre el papel celulósico y el fluido. Fuente: [4]

Las ecuaciones de la concentración de equilibrio ya fueron mostradas en las ecuaciones (10), (11), (12) y (13).

A continuación, se va a explicar cómo se calcula la humedad en el aceite, obtenida mediante un balance de masas. Esta variable es necesaria para el cálculo dinámico de la concentración de equilibrio en la interfase.

La masa de agua que hay en el transformador está distribuida entre el papel celulósico y el fluido dieléctrico, en diferentes proporciones dependiendo en este caso del tiempo, ya que en función de esta variable cambian las temperaturas y, como ya se ha explicado, si aumentan las temperaturas, la humedad migra desde el papel hacia el fluido y viceversa.

Teniendo en cuenta este supuesto, Frimpong propuso en [27] la ecuación (52) para la determinación de la humedad en el aceite, asumiendo el valor de la masa total de agua como constante.

$$W_{\text{total}} = M_{\text{cel}} * \frac{c(t)}{100} + M_{\text{oil}} * \frac{\text{ppm}(t)}{1000000}$$
 (52)

Siendo las variables: "W<sub>total</sub>" la masa total de agua en todo el transformador [kg], "M<sub>Cel</sub>" la masa de todo el papel celulósico [kg], "M<sub>oil</sub>" la masa total de



fluido dieléctrico en el transformador [kg], "c(t)" la concentración de humedad en el papel [%] y "ppm(t)" la concentración de humedad en el aceite [ppm]. Para el estudio se han utilizado los valores de:  $M_{cel} = 1712$ kg y  $M_{oil} = 4680$  kg, proporcionados por el fabricante de transformadores.

En este trabajo se van a utilizar diferentes concentraciones iniciales de humedad en el papel, como se verá en el apartado siguiente. De esa forma se calcularán las condiciones iniciales de la masa total de agua y se podrá despejar ppm(t) en la ecuación (52) e introducirla en la ecuación (11) para calcular "pv".

Una vez se ha calculado la masa total de agua, como una constante, se podrá expresar ppm(t) en función únicamente de c(t).

Es en este punto donde tiene un papel fundamental la función de integración de la que se ha hablado anteriormente. Esto se debe a que c(t) en la ecuación (52) es la concentración media en todo el papel y no en cada punto del mallado. Por ello se crea la función de integración de acoplamiento no local, llamada intop1 en *COMSOL Multiphysics*, con la que se integra todo el volumen que constituye el papel celulósico. Como se quiere integrar la variable de concentración de humedad, se introduce en *COMSOL* intop1(c). Sin embargo, al integrar la concentración en mol/m<sup>3</sup> para los límites del volumen, se pierde la dimensión volumétrica. Es por eso por lo que las unidades de la variable intop1(c) son en moles. Para solucionarlo, en *COMSOL* se declara la variable intop1(1) que calcula únicamente el volumen total del papel celulósico, resultando la ecuación (53).

$$ppm(t) = \frac{10^{6}}{M_{oil}} * (W_{total} - M_{cel} * \frac{\frac{intop1(c)}{intop1(1)}}{100})$$
 (53)



La ecuación (53) se introduce en la ecuación (11), la cual se usa a su vez para el cálculo de la concentración de equilibrio en la interfase papelaceite.

La otra condición de contorno que se ha impuesto en este modelo es la de flujo nulo entre el papel y los devanados de cobre, de tal forma que se establezca que no se producirá transporte de humedad entre ambos materiales, para poder limitar la dirección de la difusión. Se muestra en la ecuación (54), [2].

$$-n * J_i = 0$$
 (54)

Siendo las variables: "n" el vector normal y " $J_i$ " los diversos flujos de humedad que pudiesen darse entre el papel celulósico y el cobre de los devanados.

# 4.8.3 Variables iniciales

Al igual que en el modelo de CFD, para poder resolver las ecuaciones de gobierno de este modelo, es necesario definir unos valores iniciales de la variable c(t) a partir de los cuales el resolvedor trata de converger.

Inicialmente se supone que el transformador parte de una temperatura de 20°C, es decir, la temperatura ambiente. El objetivo del trabajo es estudiar los niveles de concentración del papel celulósico, por ese motivo se tomarán como referencia diferentes concentraciones iniciales de humedad en el papel celulósico, expresadas en %, y a partir de la ecuación (53) se establecerá la concentración inicial de aceite, expresada en ppm.

Para ello se escogerán unos valores iniciales de la concentración en el papel, acorde al reporte técnico del CIGRE 349, el cual se muestra en la Figura 4.14, obtenido en [28].





# Figura 4.14: Clasificación del nivel de humedad en función de la concentración (%). Fuente: [28]

En este caso se van a escoger las concentraciones iniciales de 1.5 % y 3% para analizar las condiciones de seco y húmedo respectivamente.

Utilizando las ecuaciones (10), (11), (12) y (13) y representándolas en *MATLAB* con el código mostrado en el anexo 8.2, en la página 154, se obtiene una curva como la que se muestra en la Figura 4.15.



Figura 4.15: Gráfica de la curva de equilibrio para ésteres naturales.


Con la curva de la Figura 4.15 se obtienen los valores iniciales de humedad en el aceite, en ppm (t), obteniendo los datos mostrados en la Tabla 8, en lo que se refiere a las masas totales de agua en todo el transformador.

### Tabla 8: Valores iniciales para las concentraciones de humedad en el papel y en el éster.

			Peso total
Nivel de humedad	Concentración inicial	Concentración inicial	en
para una T = 20°C	en el papel (%)	en el aceite (ppm)	el agua (kg)
Seco	1.500	51.673	25.922
Húmedo	3.000	159.527	52.107

En el modelo se introducen los valores iniciales de c (%) y de la masa total de agua, y ya el propio modelo calcula el valor de ppm (t) a partir de la ecuación (53) del balance de masas.

En lo que se refiere al modelo, se supone que al comienzo de la simulación la humedad está uniformemente distribuida por todo el espesor del papel celulósico dieléctrico, lo que significa que, en cada uno de los puntos del papel, la concentración inicial será la misma.



# 5 POSTPROCESADO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

## 5.1 MODELO TERMOHIDRÁULICO

El objetivo principal de este modelo es obtener la distribución de temperaturas en función del tiempo. Se podrá comprobar que las temperaturas varían, debido a la carga variable que se ha introducido en el modelo.

Se va a mostrar en la Figura 5.1 como se producen las variaciones de la temperatura a medida que varía la carga (gráfica a tramos).



Figura 5.1: Variación de la temperatura con respecto a la carga, en la interfase papel-aceite (r=290mm), durante 2 días, a una altura z=800mm.



En la Figura 5.1 se puede apreciar un retraso en la variación de las temperaturas respecto a la carga. Si se observa atentamente, el mínimo de la carga se produce en un instante determinado pero el mínimo de la temperatura no se produce hasta 1 hora después aproximadamente. Tiene sentido ya que las temperaturas no cambian instantáneamente, sino que requieren de un determinado tiempo para seguir el sentido de la carga.

A continuación, se muestran dos gráficas de la temperatura, correspondientes a la Figura 5.2 y la Figura 5.3. Ambas gráficas han sido realizadas sobre la interfase papel-aceite, situada entre la séptima capa y el conducto de refrigeración de 20mm, es decir, la coordenada "r" igual a 290mm, y a dos alturas, z = 800mm y z = 200mm. Se puede apreciar el carácter cíclico y que las temperaturas son mayores en la cota superior.



Figura 5.2: Variación de la temperatura sobre la interfase papelaceite (r=290mm) a una altura z=800mm.





Figura 5.3: Variación de la temperatura sobre la interfase papelaceite (r=290mm) a una altura z=200mm.

A continuación, se muestra en la Figura 5.4 y la Figura 5.5 varias distribuciones de temperaturas en diferentes instantes de tiempo en la parte superior del devanado. Estas Figuras recalcan la variación de las temperaturas con el tiempo.





Figura 5.4: Distribución de temperaturas en diferentes instantes, en la parte superior de la geometría.





Figura 5.5: Distribución de temperaturas en diferentes instantes, en la parte inferior de la geometría.

En la Figura 5.6 se puede apreciar más en detalle como varían las temperaturas en función de los dominios y los materiales que corresponden a cada uno de ellos.





Figura 5.6: Gradiente de temperaturas entre los dominios.

Hay que hacer varias aclaraciones sobre la Figura 5.6. Lo que más destaca es el gradiente de temperaturas que se produce entre el papel de la séptima capa y el último canal de refrigeración del modelo. Esto se debe a la mayor cantidad de fluido refrigerante que fluye por este canal y a la menor



aportación de calor que soporta con respecto al fluido que fluye entre capas. Dicho de otra manera, la refrigeración del fluido que fluye entre capas es mucho menor. Aun así, se puede observar una ligera caída de las temperaturas desde la sexta hacia la séptima.

Además, las temperaturas prácticamente no varían entre las capas de cobre y las capas de papel celulósico adyacentes a ellas.

La Tabla 9 y la Tabla 10 presentan las temperaturas máximas (hot-spots) y medias en cada uno de los instantes que se han tomado las medidas, junto con las coordenadas de los puntos en los que se producen.



## Tabla 9:Temperaturas máximas en los diferentes instantes de

Tiempo (d)	r de Tmax (mm)	z de Tmax (mm)	Tmax (K)
10.15	278.79	955.90	335.82
20.3	278.13	964.50	342.06
30.45	277.58	995.19	362.72
40.6	277.02	1006.00	374.61
50.75	277.60	1004.50	371.20
60.9	277.63	999.61	364.62
71.05	278.18	975.99	344.53
81.2	278.65	953.70	335.35
91.35	278.18	975.99	347.99
101.5	277.62	999.05	366.55
111.65	277.60	1005.70	373.25
121.8	277.60	1004.50	371.08
131.95	277.58	995.19	359.74
142.1	278.68	966.35	339.79
152.25	278.80	952.86	336.06
162.4	277.74	985.24	354.26
172.55	277.60	1003.80	371.75
182.7	277.60	1005.70	372.59
192.85	277.59	1002.10	367.63
203	278.24	989.42	353.65
213.15	278.79	955.90	335.96
223.3	278.61	963.77	341.41
233.45	277.54	995.81	362.78
243.6	277.60	1003.80	371.31
253.75	277.60	1005.10	371.59
263.9	277.61	997.92	363.05
274.05	278.23	981.38	347.86
284.2	279.02	950.46	334.55
294.35	278.08	975.22	347.58
304.5	277.63	999.61	366.76

### tiempo.



### Tabla 10: Temperaturas medias en los diferentes instantes de

Tiempo (d)	Tmedia (K)	
10.15	319.73	
20.3	322.23	
30.45	330.16	
40.6	334.65	
50.75	333.31	
60.9	330.79	
71.05	323.05	
81.2	319.56	
91.35	324.52	
101.5	331.61	
111.65	334.10	
121.8	333.26	
131.95	328.90	
142.1	321.24	
152.25	319.87	
162.4	326.93	
172.55	333.57	
182.7	333.83	
192.85	331.94	
203	326.55	
213.15	319.79	
223.3	321.97	
233.45	330.17	
243.6	333.39	
253.75	333.45	
263.9	330.18	
274.05	324.34	
284.2	319.26	
294.35	324.35	
304.5	331.69	

#### tiempo.

Respecto a las temperaturas máximas, cabe destacar que se producen siempre entre los 950mm y los 1006mm de altura, entre los 277mm y los 279mm de radio, coordenadas que corresponden a la sexta capa de cobre (la primera en este modelo).



La temperatura del modelo, en general, aumenta con la altura debido a lo explicado en apartados previos en relación con las fuerzas ascensionales que se producen por el calor transmitido al aceite.

Sin embargo, las temperaturas máximas no se producen a la altura máxima, como se puede apreciar en los datos aportados en la Tabla 9, y esto se debe a que los devanados también se refrigeran por la parte superior, en menor medida, gracias al aceite que circula por la cuba.

La Figura 5.7 muestra la evolución temporal de las temperaturas en todo el ancho de la geometría, a una altura de 800mm. La curva inferior describe la situación de partida del devanado.



Figura 5.7: Evolución de las temperaturas en todo el ancho de la geometría a 800mm.





Figura 5.8: Evolución de las temperaturas del conducto de refrigeración de 20mm con el tiempo, a una altura de 800mm.



Figura 5.9: Evolución de las temperaturas del conducto de refrigeración de 3mm con el tiempo, a una altura de 800mm.





# Figura 5.10: Evolución de las temperaturas del conducto de refrigeración de 3mm con el tiempo, a una altura de 800mm, en el instante t=304.5 d.

Como ya se ha señalado las temperaturas varían con la altura. Por ello, las siguientes gráficas y figuras muestran esta variación.

En la Figura 5.11 se puede ver cómo evoluciona la temperatura con la altura en la interfase papel-aceite de la séptima capa de cobre, situada en r=290mm, en el último instante, mientras que la Figura 5.12 muestra dicha evolución en todos los instantes.









Figura 5.12: Evolución de la temperatura con la altura, en la interfase papel-aceite (r=290mm), en todos los instantes.

Se puede apreciar en la Figura 5.12 que las temperaturas aumentan con la altura. Todas las curvas presentan la misma forma, con una temperatura máxima de unos 2 K superior a la existente en la parte superior del



devanado. Este punto caliente se ubica, aproximadamente a unos 50-100mm de la mencionada parte superior.

La Figura 5.13 y la Figura 5.14 presentan los mismos resultados en las otras dos interfases papel-aceite (canal interno).



Figura 5.13: Evolución de la temperatura con la altura, en la interfase papel-aceite (r=280.2mm), en el instante t=304.5 días.



Figura 5.14: Evolución de la temperatura con la altura, en la interfase papel-aceite (r=283.2mm), en el instante t=304.5 días.

Se puede apreciar un par de diferencias entre estas últimas gráficas y la Figura 5.11. La primera diferencia es la magnitud del punto caliente, ubicado cerca de la parte superior del devanado, que, en vez de ser del



orden de 2 K, es del orden de 0.5 K Se debe a que la refrigeración del conducto de 3mm de fluido no es tan efectiva como la refrigeración que lleva a cabo el conducto de 20mm. Hay menos fluido, además de que el conducto de 3mm está rodeado por dos fuentes de calor, por lo que las temperaturas van a ser más altas y la refrigeración menos eficaz.

Otro aspecto del que ya se ha hablado en este estudio es la diferencia existente entre los gradientes de temperaturas axiales y radiales. Se va a demostrar a continuación, con los datos de las gráficas expuestas hasta ahora.

Por ejemplo, en la Figura 5.8 las temperaturas llegan a descender unos 60 K en un grosor de 20mm. Otro ejemplo, en la Figura 5.10 se puede apreciar como disminuyen las temperaturas más de 5K en apenas 3mm de espesor.

Sin embargo, en la Figura 5.11, la variación de temperaturas es aproximadamente de unos 35 K a lo largo de toda la altura, que son 1056mm. Los gradientes en dirección radial son mucho más grandes que los gradientes en la dirección axial, es por eso por lo que se ha despreciado la difusión de la humedad en esa dirección, y se ha tenido solo en cuenta la difusión en la dirección radial, como ya se explicó en apartados anteriores.

Finalmente, la Figura 5.15. muestra la distribución de temperaturas en todo el devanado utilizando una figura 3D, que ha sido realizada a partir de la geometría 2D axisimétrica.





Figura 5.15: Revolución 3D de la geometría del modelo en el instante t=304.5 días.

## 5.2 MODELO DE DIFUSIÓN

En este apartado se va a exponer y analizar los datos obtenidos en relación con la difusión de la humedad y la distribución de las concentraciones en dos papeles celulósicos diferentes.

En la Figura 5.16 se muestran las capas de papel presentes en la geometría.





Figura 5.16: Capas de papel celulósico en el modelo.

En este apartado, únicamente se van a mostrar resultados de dos capas de papel, la situada entre las coordenadas r = 288.2mm y r = 290mm, denominando a partir de ahora a su interfase papel-aceite como interfase 1 (por ser la principal y la más grande), y la capa situada entre las coordenadas r = 279.9mm y r = 280.2mm, cuya interfase será denominada interfase 2 (con un grosor menor).

Otro aspecto para tener en cuenta es que la mayoría de los resultados y gráficos provienen de simulaciones llevadas a cabo con una concentración inicial del 3 %. Sin embargo, en la parte final, se presentarán unas gráficas para comparar los resultados entre simulaciones con una concentración inicial del 3 % y del 1.5 %.

Se comienza presentando en la Figura 5.17 y en la Figura 5.18 las distribuciones de humedad correspondientes a las distribuciones de temperatura de la Figura 5.4 y la Figura 5.5 (en los mismos instantes).





Figura 5.17: Distribución de concentraciones en diferentes instantes en la parte superior de la geometría.





Figura 5.18: Distribución de concentraciones en diferentes instantes en la parte inferior de la geometría.



Como ya se ha explicado previamente, en el fenómeno de la difusión de la humedad, para que se produzcan cambios importantes o apreciables, los tiempos deben de ser mucho mayores que en el fenómeno de la transferencia de calor. Por este motivo, en la Figura 5.17 y en la Figura 5.18, en el instante 10.15 días (que representa el segundo instante de tiempo estudiado) los resultados son atípicos, por el hecho de que habiendo transcurrido 10.15 días la humedad aún no se ha distribuido por la geometría, partiendo de una concentración inicial del 3 %.

Como se puede ver en los instantes 162.4 días y 304.5 días, las distribuciones de la humedad son más uniformes.

Se puede apreciar en dichas figuras un gradiente importante de concentraciones a lo largo del eje vertical. Son resultados coherentes, ya que las temperaturas máximas se producen en la parte superior, y es ahí donde las concentraciones son mínimas. Mientras, en la zona inferior de la geometría ocurre lo contrario, las temperaturas son mínimas, y consecuentemente las concentraciones son mayores.

Esto se puede comprobar en las tablas adjuntas en el anexo 8.3 en la página 155 se muestran las concentraciones mínimas, máximas y medias, tanto de la interfase 1 como de la interfase 2.

Se puede comprobar la relación entre la altura y la distribución de la humedad en la geometría.

La Figura 5.19 presenta las concentraciones de humedad frente a las temperaturas en las dos interfases estudiadas en un determinado instante.





Figura 5.19: Evolución Temperatura vs concentración en ambas interfases en función de la altura, en el instante t = 304.5 días.

En la Figura 5.19 se puede comprobar que las gráficas de la temperatura y la concentración de humedad tienen la misma forma, y esto se cumple en ambas interfases. En la interfase 1, se puede apreciar el pico en ambas gráficas, producido por la refrigeración de la cuba, en la parte superior de la geometría.

Otro aporte interesante es el de la Figura 5.20, en la que se puede apreciar que hay una altura de la geometría en la que convergen todas las gráficas de todos los instantes. Se puede concluir, que, a esa altura, la



concentración va a ser siempre prácticamente la misma, independientemente de si las temperaturas aumentan o disminuyen.



Figura 5.20: Evolución de la humedad en la interfase papel-aceite 1 en función de la altura.

La Figura 5.21 presenta la evolución de la humedad con la temperatura en un punto de la interfase 1 a una altura de 800mm.



Figura 5.21: Relación entre la temperatura y la humedad en función del tiempo, en un punto de la interfase 1, a una altura de z=800mm.



La Figura 5.21 presenta dos gráficas que son prácticamente simétricas. Es evidente que en los intervalos de tiempo en los que aumenta la temperatura, la concentración disminuye. Y los intervalos de tiempo en los que la temperatura disminuye la concentración de humedad aumenta.

Ahora se van a exponer las gráficas de las dos interfases papel-aceite, conocidas como interfase 1 e interfase 2 y, además, se van a mostrar las gráficas de las interfases papel-cobre. La de la primera capa de papel será denominada cobre 1 y la correspondiente a la segunda capa cobre 2.

En la Figura 5.22 se muestran las gráficas de la primera capa mientras que en la Figura 5.23 se muestran las de la segunda capa estudiada.





Concentracion int1

Figura 5.22: Concentraciones en ambas interfases, la de papel-aceite 1 y la de papel-cobre 1, de la capa de papel celulósico de 1.8mm de espesor.

Se puede apreciar tanto en la Figura 5.22 como en la Figura 5.21, que las concentraciones alcanzan un régimen permanente cíclico, de manera análoga a las temperaturas. Esta característica también se puede apreciar en la Figura 5.23. Puede parecer que los ciclos no sean exactamente



iguales, pero esto se debe principalmente a los intervalos de tiempo escogidos.



Figura 5.23: Concentraciones en ambas interfases, la de papel-aceite 2 y la de papel-cobre 2, de la capa de papel celulósico de 0.3mm de espesor.

A simple vista pueden parecer las mismas gráficas, pero si se representan juntas se pueden apreciar ligeras diferencias entre la interfase papel-aceite y la interfase papel-cobre, como se puede ver en la Figura 5.24.





Figura 5.24: Comparativa entre la interfase papel-aceite y la interfase papel-cobre del papel aislante de 1.8mm de espesor.

Las gráficas mostradas en la Figura 5.24 son las mismas que las de la Figura 5.22. Lo que se puede sacar en claro es que hay una diferencia de unos cuantos días entre ambas gráficas. Tiene sentido que la curva de la interfase papel-cobre avance con un retraso temporal respecto de la gráfica de la interfase papel-aceite. Este hecho se debe a lo explicado en este trabajo respecto a los fenómenos de la monocapa y la multicapa.

Hay que recordar, que las capas de papel aislante están compuestas por fibras de celulosa, un material poroso. Dichos poros son donde se ubican las moléculas de agua en el aislamiento sólido.

La interfase papel-aceite es la primera en rellenar todos sus poros de humedad, al estar en contacto con el aceite. Es por eso por lo que va a ser siempre la primera en sufrir las variaciones de humedad y



consecuentemente va a estar adelantada a la interfase papel-cobre situada en el otro extremo del papel, tal y como se aprecia en la Figura 5.24.

A continuación, la Figura 5.25 presenta la tendencia de la humedad, calculada en promedio, a alcanzar un régimen permanente.



Promedio Conc int1

Figura 5.25: Estabilización del régimen permanente cíclico de la humedad.

Se ha escogido una altura de 800mm en todos los resultados en los que ha sido necesario para la realización de las gráficas. Hasta ahora, no se habían mostrado resultados a otras alturas. Por ello, la Figura 5.26 se muestra resultados sobre la interfase papel-cobre 1 a diversas alturas.





Figura 5.26: Comparación de la evolución de la humedad en la interfase papel-cobre a lo largo del tiempo a diferentes alturas.

Como ya se ha evidenciado anteriormente, las temperaturas aumentan con la altura y consecuentemente la humedad se reduce a su vez. Se puede ver gráficamente en la Figura 5.26. La altura z4 mostrada se encuentra dentro del rango en el cual se producen las temperaturas máximas o hot-spots, por eso la gráfica amarilla se podría interpretar como la distribución de concentraciones casi mínima.

Y finalmente, se presentan varias gráficas donde se comparan los resultados de humedad para dos condiciones iniciales de humedad: 1.5 % vs 3 %.

Se pueden ver dichas comparaciones a continuación, tanto en la Figura 5.27 como en la Figura 5.28.





Figura 5.27: Comparación de las gráficas de humedad en el papel aislante 1, de espesor 1.8mm, para concentraciones iniciales del 3 % y del 1.5 %.





Figura 5.28: Comparación de las gráficas de humedad en el papel aislante 2, de espesor 0.3mm, para concentraciones iniciales del 3 % y del 1.5 %.



Como se ha podido comprobar en la Figura 5.27 y la Figura 5.28 las distribuciones de la humedad son muy parecidas con ambas concentraciones iniciales.

Viendo estos últimos resultados, se puede suponer que, si se presentasen el resto de las gráficas anteriores, en vez de con un 3 % de condición inicial, con un 1.5 %, las gráficas y distribuciones tendrían una forma muy similar, salvando las diferencias que habría numéricamente.



## 6 CONCLUSIONES GENERALES Y ESTUDIOS FUTUROS

### 6.1 CONCLUSIONES GENERALES

En este trabajo se ha presentado un modelo acoplado entre dos estudios temporales, el primero de CFD (Transferencia de calor y mecánica de fluidos en flujo laminar) y el segundo de difusión de la humedad. El acoplamiento entre ambos modelos se ha realizado utilizando la herramienta informática *LiveLink* que permite conectar el software de cálculo numérico *COMOL Multiphysics* con *MATLAB*.

Las simulaciones se han llevado a cabo para un tiempo total de 304.5 días, dividiendo los datos en intervalos de 10.15 días. En resumidas cuentas, cada estudio está en un archivo mph diferente. Se ha ejecutado el estudio de CFD, se han obtenido unas temperaturas T(r,z,t), y se han exportado a archivos csv. Posteriormente dichos archivos se importan en el estudio de difusión de la humedad y se analiza la dinámica de la humedad en función de las temperaturas que cambian en cada instante.

Se han obtenido unos resultados y gráficas que demuestran la relación directa que hay entre las temperaturas y la difusión de la humedad en el sistema de aislamiento sólido celulósico del transformador. Es importante resaltar que estos dos factores son los que más influyen en las propiedades dieléctricas y en el deterioro de los sistemas de aislamiento de estas máquinas, por lo que resulta crucial realizar un correcto y exhaustivo seguimiento de ellos.

También se ha podido comprobar que en los intervalos en los que aumenta la temperatura, disminuyen las concentraciones de humedad, y viceversa.



Con los resultados vistos, se ha expuesto lo crucial que ha sido la introducción de una carga variable en el modelo, ya que ha sido la responsable de que las temperaturas y las concentraciones varíen de forma cíclica.

Sin embargo, hay algunos puntos que se podrían mejorar durante el proceso de modelado y simulación, que serán expuestos en el próximo apartado.

### 6.2 ESTUDIOS FUTUROS Y POSIBLES MEJORAS

Este estudio deja abiertas futuras líneas de investigación que se podrán abordar en otros trabajos. A continuación, se van a mencionar algunas de ellas.

Una de las más importantes, es establecer la dependencia de la transferencia de calor de la humedad (ver la Figura 2.15) cosa que en este trabajo no se ha considerado. Únicamente se ha modelado la dependencia en el sentido contrario: como varía la humedad con la variación de la temperatura.

Otro aspecto importante que se podría tratar en futuros trabajos es tratar de optimizar y mejorar el código desarrollado en *MATLAB* para la gestión de simulaciones realizadas en *COMSOL*. Los requisitos computacionales y los tiempos de simulación han sido muy grandes. Bien es cierto que los requisitos computacionales son así por muchos motivos diferentes, como pueden ser la geometría, los tipos de estudio (ya que todos son temporales), las ecuaciones, etc. Se podrían investigar otros enfoques de programación, otra forma de exportar, almacenar e importar los datos, incluso el uso de otros softwares, que no fuesen obligatoriamente *COMSOL Multiphysics* y *MATLAB*.



Teniendo en cuenta los modelos desarrollados, otra posible mejora sería ampliar la geometría del modelo, ya que en este estudio se han modelado las dos últimas capas del devanado de baja tensión de una única fase del transformador. Sin embargo, hay que tener muy en cuenta lo mencionado anteriormente, ampliar la geometría supondría un aumento muy significativo en los tiempos de ejecución. También se podría mejorar el post procesado y análisis de resultados aumentando la cantidad de puntos o intervalos a estudiar. Es decir, en este trabajo al realizar las simulaciones, se han obtenido 31 conjuntos de datos, pero esta cantidad de datos para un total de 300 días puede ser insuficiente. El problema es que aumentarían considerablemente los tiempos de ejecución, por lo que habría que encontrar un equilibrio entre ambos aspectos.

Se podrían implementar otros mejoras o cambios en el modelado, el uso de otros materiales, tanto para el papel celulósico como para el fluido dieléctrico, establecer otro tipo de carga variable, otras condiciones de contorno, valores iniciales o incluso implementar alguna otra física, de todas las disponibles en *COMSOL Multiphysics,* para mejorar el modelo.

Finalmente, proponer el análisis experimental. Diseñar una plataforma experimental que permita contrastar experimentalmente los datos obtenidos numéricamente, ya que, al fin y al cabo, se trata de datos y resultados teóricos obtenidos a partir de simulaciones numéricas.



### 7 **REFERENCIAS**

- [1] J. Fraile Mora, *Máquinas eléctricas (6a. ed.)*. 2008.
- [2] C. Ruiz Diego, "Influencia de la temperatura en la dinámica de la humedad en el sistema dieléctrico de los transformadores de potencia," 2022.
- [3] W. Correa Bravo, "Validación experimental de un modelo multifísico de difusión de humedad-temperatura en un transformador sumergido en aceite," 2018.
- [4] D. F. Garcia, "Determinación de coeficientes de difusión de humedad en papeles aislantes de transformador," 2012.
- [5] R. D. Villarroel Rodriguez, "MOISTURE DYNAMICS IN TRANSFORMERS INSULATED WITH NATURAL ESTERS," 2015.
- G. En, I. En, and A. Piguero González, "ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR [6] DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN UNIVERSIDAD DE CANTABRIA Trabajo Fin de Grado EVALUACIÓN Υ NUMÉRICA DE LA EXPERIMENTAL INFLUENCIA DEL ENVEJECIMIENTO EN LA CAPACIDAD REFRIGERANTE DE UN LÍQUIDO DIELÉCTRICO BIODEGRADABLE (Experimental and numerical evaluation of the influence of aging in the cooling capacity of a biodegradable dielectric liquid) Para acceder al Título de," 2017.
- [7] L. V. Moreno, "Influencia de la humedad y la temperatura en las características dieléctricas del papel Kraft," 2009.
- [8] "Ing.-Victor-Gonzales-Zamora\_compressed-7".
- [9] D. F. García and I. Electricista, "Trabajo de investigación como requisito parcial para optar por el título de Magíster en Ingeniería,"


2018.

- [10] Conseil international des grands réseaux électriques. Comité d'études
   A2. and Impr. conformes), Moisture equilibrium and moisture migration within transformer insulation systems. CIGRÉ, 2008.
- [11] TV Oommen, "Moisture equilibrium in paper-oil systems," 1983.
- [12] S. D. Foss and L. Savio, Mathematical and experimental analysis of the field drying of power transformer insulation, vol. 8. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 1993.
- [13] "PFC Daniel Bezanilla García".
- [14] R. Lecuna, F. Delgado, A. Ortiz, P. B. Castro, I. Fernandez, and C. J. C. J. Renedo, "Thermal-fluid characterization of alternative liquids of power transformers: A numerical approach," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, no. 5, pp. 2522–2529, Oct. 2015, doi: 10.1109/TDEI.2015.004793.
- [15] M. Díaz Vega, "Trabajo Fin de Grado EVALUACIÓN EXPERIMENTAL Y NUMÉRICA ENVEJECIMIENTO ( Experimental and numerical evaluation of the dielectric properties of insulating paper as a function of aging ) Autora : Mónica Díaz Vega," 2021.
- [16] F. Delgado and S. Rom, "Introducción al Método de Elementos Finitos," pp. 1–18.
- [17] W. B. J. ZIMMERMAN, "Introduction To Comsol Multiphysics," pp. 1– 26, 2006, doi: 10.1142/9789812773302\_0001.
- [18] R. W. Pryor, "Multiphysics Modelling using COMSOL 5 and MATLAB."
- [19] Comsol, "COMSOL Multiphysics Reference Manual," 2019. [Online]. Available: www.comsol.com/blogs



- [20] COMSOL Inc., "Introduction to LiveLink for MATLAB," *Syntax*, p. 154, 2013.
- [21] C. Multiphysics, "LiveLink for MATLAB User's Guide," Version 4.3b, p. 282, 2013.
- [22] P. R. Manual, "COMSOL Multiphysics Programming Reference Manual," 2010.
- [23] COMSOL, "No Title," https://www.comsol.com/videos.
- [24] COMSOL, "No Title," https://www.comsol.com/blogs.
- [25] REE, "No Title," Gráfica a tiempo real de la potencia demandada a nivel nacional, https://demanda.ree.es/visiona/peninsula/nacional/.
- [26] A. F. Howe and AF Howe, "DIFFUSION OF MOISTURE THROUGH POWER-TRANSFORMER INSULATION.," Proc Inst Electr Eng, vol. 125, no. 10, pp. 978–986, 1978, doi: 10.1049/piee.1978.0229.
- [27] G. K. Frimpong, T. V. Oommen, and R. Asano, "A survey of aging characteristics of cellulose insulation in natural ester and mineral oil," *IEEE Elect. Insul. Mag., vol. 27, no. 5*, Piscataway, New Jersey, USA, pp. 36–48, 2011.
- [28] W. G. A. . CIGRE, "Moisture Equilibrium and Moisture Migration Within 349," *Atlantic*, no. June, pp. 1–53, 2008.



#### 8 ANEXOS

#### 8.1 CÓDIGOS DE MATLAB PARA EL ACOPLAMIENTO ENTRE EL MODELO TERMOHIDRÁULICO Y EL MODELO DE DIFUSIÓN.

% Fundamental: Este código complementa a dos archivos mph ya existentes % por lo que muchas de sus propiedades han sido configuradas desde el % COMSOL Desktop como la geometría, los materiales, la carga variable, % físicas, condiciones de contorno e iniciales, mallado, etc. % Esto ocurre tanto en el modelo termo-hidráulico como en el modelo de % difusión de la humedad. tOm = 0; % Tiempo de inicio de la simulación. dtm = 10.15; % Paso de tiempo en días. tfm = 304.5; % Tiempo final de ejecución. division = tfm / dtm; % Indicador importante para los bucles. r = 290; % Coordenada "r" para la obtención de resultados y gráficas. z = 800; % Coordenada "z" para la obtención de resultados y gráficas. %%%%%%% Modelo CFD: model = mphopen('modelo\_acoplado\_NUEVO\_a'); % Se carga el modelo mph en el % servidor de COMSOL. mphtags -show % Asegura que solo haya 1 archivo cargado en el servidor. mphlaunch % Abre el archivo mph que ha sido previamente cargado. tic % Comienza el temporizador para calcular el tiempo de ejecucion del % código. model.param.set('t0\_m', t0m); % Se introduce el parámetro t0m en el mph. model.param.set('dt m', dtm); % Se introduce el parámetro dtm en el mph. model.param.set('tf\_m', tfm); % Se introduce el parámetro tfm en el mph. model.study('std1').create('time', 'Transient'); % Se genera un paso o % fase de carácter transitorio. model.study('std1').label('Estudio 1 - CFD - MATLABcv'); % Se configura el % nombre del estudio. model.study('stdl').feature('time').label('Temporal 1 - CFD - MATLABcv'); % Se configura el nombre del paso o fase. model.study('stdl').feature('time').set('tunit', 'd'); % Para cambiar la % unidad de tiempo. model.study('stdl').feature('time').set('tlist', 'range(t0 m,dt m,tf m)'); % Se introduce el rango de tiempo que se desea evaluar. std1\_CFD.run; % Se ejecuta el estudio.



```
□ for i = 1:division+1 % Comienza el bucle para iterar una cantidad de veces
     % proporcional a los intervalos de tiempo elegidos. En este caso,
     % por ejemplo, [0;10.15;304.5], va a realizar 31 iteraciones.
     model.result.export.create(['data' num2str(i)], 'Data'); % Genera una
     % sección de exportación en el archivo mph.
     model.result.export(['data' num2str(i)]).set('looplevelinput',...
         {'manualindices'}); % Se le indica que no exporte todos los datos
     % en un solo archivo, sino que se configura manualmente para exportar
     % un archivo por iteración.
     model.result.export(['data' num2str(i)]).set('looplevelindices', i);
     % En cada iteración se exporta el conjunto de datos "i".
     model.result.export(['data' num2str(i)]).set('filename',...
          ['C:\\TemperaturasGN_intervalo_' num2str(i) '.csv']);
     % En esta línea se configura el directorio al que se quieren exportar
     % los archivos. Ha sido recortado, pero entre las \\ iría el
     % directorio completo. Además, se le indica el nombre del archivo y el
     % tipo, csv.
     model.result.export(['data' num2str(i)]).run; % Se lleva a cabo la
     % exportación de datos.
 end % Fin del bucle.
 % Este trozo de código es para realizar gráficas de una dimensión desde el
 % script de MATLAB, aunque la mayoría de ellas se han realizado
 % directamente desde el COMSOL Desktop.
 model.result.create('pg1', 'PlotGroup1D'); % Se crea un grupo gráfico 1D
 % en el archivo mph.
 model.result('pg1').set('data', 'dset1'); % Se indica el conjunto de datos
 % del cual se quiere realizar el gráfico. En este modelo solo se ejecuta
 % un único estudio por lo que solo hay un conjunto de datos que abarca
 % todos los intervalos de tiempo llamado "dset1".
 model.result.dataset.create('cpt1', 'CutPoint2D'); % Se genera un punto de
 % estudio.
 model.result.dataset('cpt1').set('data', 'dset1'); % Se indica el conjunto
 % de datos.
 model.result.dataset('cpt1').set('pointx', r); % Configuración de la
 % coordenada "r".
 model.result.dataset('cpt1').set('pointy', z); % Configuración de la
 % coordenada "z".
 model.result('pg1').create('ptgr1', 'PointGraph'); % Se crea la gráfica
 % para un punto de estudio.
 model.result('pg1').feature('ptgr1').set('data', 'cpt1'); % Se le indica
 % el punto de estudio utilizado.
```



```
% Esta parte del código se ha hecho para exportar los datos específicos de
% los gráficos.
model.result.export.create('plot1', 'Plot'); % Genera una sección de
% exportación de gráficos.
model.result.export('plot1').set('filename', ...
    ['C:\\Grafico_temperaturas_z=' num2str(z) '_interfase.txt']);
% Se indica el directorio donde se quieren exportar los datos, el nombre
% del archivo y el tipo, txt.
model.result.export('plot1').set('plot', 'ptgr1'); % Se indica el gráfico
% cuyos datos se quieren exportar.
model.result.export('plot1').run; % Se ejecuta la exportación da datos.
mphplot(model, 'pg1', 'rangenum', 1); % Para que se muestre en MATLAB una
% imagen del gráfico con una leyenda de colores.
toc % Termina el temporizador para calcular el tiempo que tarda en
% ejecutarse el codigo. La última simulación fueron 33779.742 segundos.
clear % Para borrar todas las variables anteriores y evitar errores.
tOm = 0; % Tiempo de inicio de la simulación.
dtm = 10.15; % Paso de tiempo en días.
tfm = 304.5; % Tiempo final de ejecución.
division = tfm / dtm; % Indicador importante para los bucles.
r = 290; % Coordenada "r" para la obtención de resultados y gráficas.
z = 800; % Coordenada "z" para la obtención de resultados y gráficas.
%%%%%%% Modelo de DIFUSIÓN:
model2 = mphopen('modelo acoplado temporal ppm NUEVO a');% Se carga el
%modelo mph en el servidor de COMSOL.
mphtags -show % Asegura que solo haya 1 archivo cargado en el servidor,
% aunque al ejecutar el comando "mphopen" por segunda vez, se borra
% automáticamente el otro modelo del servidor.
mphlaunch % Abre el archivo mph que ha sido previamente cargado.
model2.param.set('Co', '3 [mol/m^3]',...
   'Concentracion inicial humedad en papel'); % Esta línea se utiliza
% para generar la condición de concentración inicial de humedad, sin
% necesidad de entrar al archivo mph.
model2.result.create('pgl', 'PlotGroup1D'); % Se crea un grupo gráfico 1D
% en el archivo mph.
model2.result('pg1').set('data', 'none'); % Se le indica que no escoja
% ningún conjunto de datos, ya que en este modelo va a haber 31 datasets,
% 1 por cada archivo csv importado.
model2.result.create('pg2', 'PlotGroup1D');
model2.result('pg2').set('data', 'none');
```



```
\Box for i = 1:division+1 % Un bucle iqual que el del modelo anterior.
     tic % Inicio del temporizador en cada iteración.
     d = 2; % subintervalos = d + 1.
     % Dentro de cada iteración (intervalo) se divide su correspondiente
     % estudio temporal en más subintervalos. Por ejemplo, para i=1, el
     % intervalo del primer estudio será [0;10.5/d;10.5].
     model2.param.set(['t0 m ' num2str(i)], t0m + (i-1)*dtm); % Se carga la
     % variable t0_m_ en el archivo mph.
     model2.param.set(['dt m ' num2str(i)], dtm / d); % Se carga la
     % variable dt m en el archivo mph.
     model2.param.set(['tf_m_' num2str(i)], t0m + i*dtm); % Se carga la
      % variable tf m en el archivo mph.
     % Esta parte genera las funciones de interpolación.
     model2.func.create(['int' num2str(i)], 'Interpolation'); % Se crea una
      % función de interpolación en el modelo.
     model2.func(['int' num2str(i)]).set('source', 'file'); % La fuente es
      % un archivo exterior al modelo.
     model2.func(['int' num2str(i)]).label(['Temperatura del intervalo '...
         num2str(i)]); % Se configura el nombre de la función.
     model2.func(['int' num2str(i)]).set('importedname',...
          ['TemperaturasGN intervalo ' num2str(i)]); % El nombre del archivo
      % importado.
     model2.func(['int' num2str(i)]).set('importedstruct', 'Spreadsheet');
      % El tipo de archivo importado.
     model2.func(['int' num2str(i)]).set('importeddim', '2D'); % Las
     % dimensiones de los datos importados.
     model2.func(['int' num2str(i)]).set('argunit', 'mm'); % Unidad de
      % los argumentos de la función.
     model2.func(['int' num2str(i)]).set('fununit', 'K'); % Unidad de la
     % función que se está generando.
     model2.func(['int' num2str(i)]).set('filename',...
          ['C\\TemperaturasGN intervalo ' num2str(i) '.csv']);
     % Directorio donde se encuentra el archivo que se desea importar, su
     % nombre y el tipo de archivo, csv.
     model2.func(['int' num2str(i)]).importData; % Se importan los datos.
     model2.func(['int' num2str(i)]).set('nargs', '2'); % Se indica la
     % cantidad de argumentos que tiene la función. En este caso son 2, ya
     % que las temperaturas dependen de las coordenadas: T(r,z).
     model2.func(['int' num2str(i)]).set('struct', 'spreadsheet');
     % Que estructura se le quiere dar a los datos.
```



```
% A continuación se muestra como generar tablas. Se han usado para
% poder acceder a los datos de temperaturas importados en cualquier
% momento desde el propio archivo mph. No afecta al comportamiento del
% modelo.
model2.result.table.create(['tbl ' num2str(i)], 'Table'); % Se crea
% la tabla y se configura el nombre.
model2.result.table(['tbl_' num2str(i)]).set('tablebuffersize',...
    120000); % El número máximo de filas que tienen las tablas. Los
% archivos csv tenían 112000 filas de datos cada uno.
model2.result.table(['tbl_' num2str(i)]).importData...
    (['C\\TemperaturasGN intervalo_' num2str(i) '.csv']); % Se
% Se importan los datos de las temperaturas a la tabla.
% En este apartado se generan variables nuevas, dependientes de las
% temperaturas en cada instante.
model2.component('comp1').variable('var1').set...
    (['T' num2str(i)], ['int' num2str(i) '(r,z)']); % Variable de
% la temperatura.
model2.component('compl').variable('varl').set...
    (['pvsat' num2str(i)], ['(Pc[1/mmHg]/760)*10^(((T' num2str(i) ...
    '[1/K]-Tc[1/K])/T' num2str(i) '[1/K])*(a+b*(Tc[1/K]-T' ...
    num2str(i) '[1/K])+1.1702379e-8*(Tc[1/K]-T' num2str(i) ...
    '[1/K])^3)/(1+d*(Tc[1/K]-T' num2str(i) '[1/K])))[atm]'],...
    'Presion parcial en condicion de saturacion'); % Variable de la
% presión parcial de saturación del fluido.
model2.component('comp1').variable('var1').set...
    (['ppmsat' num2str(i)], ['10^(A-B/T' num2str(i) '[1/K])[atm]'],...
    'Concentracion de humedad en condicion de saturacion del ester');
% Variable de la concentración de humedad en saturación del fluido.
model2.component('comp1').variable('var1').set...
    (['pv' num2str(i)], ['(ppm/ppmsat' num2str(i) ')*pvsat' ...
    num2str(i) '[atm]'], ['Presion parcial del fluido']);
% Variable de la presión parcial del fluido.
model2.component('compl').variable('varl').set...
    (['Cequil' num2str(i)], ['1.18e-18*((pv' num2str(i) ...
    '[1/atm])^3)*exp(16570/T' num2str(i) '[1/K])-5.39e-12*((pv' ...
    num2str(i) '[1/atm])^2)*exp(10960/T' num2str(i) ...
    '[1/K])+9e-6*(pv' num2str(i) '[1/atm])*exp(5418/T' num2str(i) ...
    '[1/K])+(1004/T' num2str(i) '[1/K])-3'],...
    'Concentracion de humedad en equilibrio en el papel');
% Variable de la concentración de equilibrio.
model2.component('comp1').variable('var1').set(['D ' num2str(i)], ...
    ['1.2e-7*((esp[1/mm])^(-3.7))*exp(0.25*c[m^3/mol]-'...
    '(4491*((esp[1/mm])^(-0.5))/T' num2str(i) '[1/K]))']);
% Variable del coeficiente de difusión.
```



```
% Cambios que se realizan en los materiales ya existentes en el
% archivo mph, debido al cambio de variables. "mat2" es el papel
% celulósico.
model2.component('comp1').material('mat2').propertyGroup...
    ('def').set('diffusion', {['D_' num2str(i)] '0' '0' '0' ...
    ['D_' num2str(i)] '0' '0' ['D_' num2str(i)]}); % Cambio del
% coeficiente de difusión del papel, D(c,T).
model2.component('comp1').material('mat2').propertyGroup...
    ('def').set('diffusion symmetry', '0');
% Cambios en las físicas ya existentes, por el mismo motivo que en:
% los materiales.
if i == 1
   model2.component('comp1').physics('tds').feature...
        ('init1').set('initc', 'Co');
end
% Para que se establezca la condición inicial solo en la primera
% iteración.
model2.component('comp1').physics('tds').feature('cdm1').set...
    ('minput_temperature_src', 'userdef'); % Para configurar
% manualmente la temperatura que influye en la física de difusión.
model2.component('comp1').physics('tds').feature('cdm1').set...
    ('minput_temperature', ['T' num2str(i)]); % Se introduce la
% variable temperatura, recién importada.
model2.component('comp1').physics('tds').feature('cdm1').set...
    ('D_c', {['D_' num2str(i)]; '0'; '0'; '0'; ['D_' num2str(i)]; ...
    '0'; '0'; '0'; ['D ' num2str(i)]}); % Se cambia el coeficiente
% de difusión.
model2.component('compl').physics('tds').feature('concl').set...
    ('c0', ['Cequil' num2str(i)]); % Y la concentración de equilibrio
% como condición de contorno.
% Creación de los estudios en cada iteración.
% Los códigos son los mismos que en el modelo termo-hidráulico.
std CFD num2str(i) = model2.study.create(['std' num2str(i)]);
model2.study(['std' num2str(i)]).create('time', 'Transient');
model2.study(['std' num2str(i)]).label(['Estudio ' num2str(i) ...
    ' - CFD - MATLABcv']);
model2.study(['std' num2str(i)]).feature('time').label...
    (['Temporal ' num2str(i) ' - CFD - MATLABcv']);
model2.study(['std' num2str(i)]).feature('time').set('tunit', 'd');
model2.study(['std' num2str(i)]).feature('time').set('tlist', ...
    ['range(t0_m_' num2str(i) ',dt_m_' num2str(i) ',tf_m_' ...
    num2str(i) ')']);
% Esta es la clave del modelo, ya que en las siguientes líneas es como
% se le ordena a MATLAB que tiene que tomar como condiciones iniciales
% los datos obtenidos en el estudio anterior y que no vuelva a partir
```

% desde el valor de la concentración inicial.



```
if i > 1
    model2.study(['std' num2str(i)]).feature('time').set...
        ('useinitsol', true);
    model2.study(['std' num2str(i)]).feature('time').set...
        ('initmethod', 'sol');
   model2.study(['std' num2str(i)]).feature('time').set...
        ('initstudy', ['std' num2str(i-1)]);
    model2.study(['std' num2str(i)]).feature('time').set...
       ('solnum', 'auto');
end
std_CFD_num2str(i).run; % Se ejecuta el estudio.
% El siguiente código es para la generación de gráficos lineales.
% El código es el mismo que en el modelo de difusión.
model2.result.dataset.create(['cpt1' num2str(i)], 'CutPoint2D');
model2.result.dataset(['cpt1' num2str(i)]).set('data', ['dset' ...
    num2str(i)]);
model2.result.dataset(['cpt1' num2str(i)]).set('pointx', r2);
model2.result.dataset(['cpt1' num2str(i)]).set('pointy', z1);
model2.result('pgl').create(['ptgrl' num2str(i)], 'PointGraph');
model2.result('pg1').feature(['ptgr1' num2str(i)]).set('data', ...
   ['cpt1' num2str(i)]);
model2.result('pg1').feature(['ptgr1' num2str(i)]).set...
    ('solrepresentation', 'solnum');
model2.result('pq1').feature(['ptqr1' num2str(i)]).set('unit', 'd');
% La significativa diferencia con respecto al modelo termo-hidráulico,
% es que en dicho modelo se obtenía un único dataset (conjunto de
% datos) que abarca todos los intervalos de tiempo. En el modelo de
% difusión se obtienen 31 conjuntos de datos para abarcar todos los
% intervalos de tiempo. Por ese motivo es mucho más cómodo en este
% caso realizar los gráficos desde el script de MATLAB.
% Código para la exportación de gráficos. Es el mismo que el del
% modelo anterior, a excepción de la segunda línea en la que hay que
% indicar de que grupo gráfico provienen los datos.
model2.result.export.create(['plot1' num2str(i)], 'Plot');
model2.result.export(['plot1' num2str(i)]).set('plotgroup', 'pg1');
model2.result.export(['plot1' num2str(i)]).set('filename', ...
    ['C:\\Grafico_humedad_z=' num2str(z) '_1_' num2str(i) '.txt']);
model2.result.export(['plot1' num2str(i)]).set('plot', ...
    ['ptgr1' num2str(i)]);
model2.result.export(['plot1' num2str(i)]).run;
```



```
fprintf('Fin de iteracion N°.%d\n',i); % Devuelve un mensaje para
% saber cuando termina la iteración.
toc % Termina el temporizador en cada iteración.
end
% Para mostrar en MATLAB los gráficos con leyendas de colores.
mphplot(model2,'pg1','rangenum',1);
mphplot(model2,'pg2','rangenum',1);
```

## 8.2 CÓDIGOS DE MATLAB PARA LA REPRESENTACIÓN DE LAS GRÁFICAS DE EQUILIBRIO.

```
% Parametrizacion de las curvas de Oommen.
% PARAMETROS:
T = 20 + 273.15;
A = 5.67;
B = 791;
Pc = 1.65807e5;
Tc = 647.26;
a = 3.2437814;
b = 5.86826e-3;
c = 1.1702379e - 8;
d = 2.1878462e-3;
% VARIABLES:
ppm = linspace(0, 500, 10^{6});
pvsat = (Pc/760)*10^(((T-Tc)/T)*(a+b*(Tc-T)+c*(Tc-T)^3)/(1+d*(Tc-T)));
ppmsat = 10^{(A-B/T)};
pv = (ppm/ppmsat) *pvsat;
Cequil = 1.18 \times 10^{(-18)} \times (pv.^3) \times exp(16570/T) - 5.39 \times 10^{(-12)} \times (pv.^2) \times ...
    exp(10960/T)+9*10^(-6)*pv*exp(5418/T)+(1004/T)-3;
plot(ppm,Cequil)
xlabel('Concentracion de humedad en el aceite [ppm]')
ylabel('Concentracion de humedad en el papel [%]')
grid on
```



### 8.3 TABLAS DE CONCENTRACIONES MÍNIMAS, MÁXIMAS Y MEDIAS OBTENIDAS EN LA SIMULACIÓN.

### 8.3.1 Concentraciones de la interfase papel-aceite 1, situada en la coordenada, r = 290mm

Interfase 1	Interfase 1	Interfase 1	Interfase 1
Tiempo (d)	r de Cmin (mm)	z de Cmin(mm)	Cmin (%)
0	290	0	2.758
10.15	288.2	0	2.2183
20.3	290	1056	2.7392
30.45	290	1056	2.528
40.6	290	1056	2.4073
50.75	288.2	1056	2.3902
60.9	288.2	1056	2.3959
71.05	288.2	1056	2.418
81.2	288.2	1056	2.5805
91.35	290	1056	2.6694
101.5	290	1056	2.488
111.65	290	1056	2.4164
121.8	288.2	1056	2.3945
131.95	288.2	1056	2.3886
142.1	288.2	1056	2.4493
152.25	288.2	1056	2.6368
162.4	290	1056	2.6102
172.55	290	1056	2.4365
182.7	290	1056	2.4203
192.85	288.2	1056	2.3869
203	288.2	1056	2.4091
213.15	288.2	1056	2.4934
223.3	288.2	1056	2.7011
233.45	290	1056	2.5242
243.6	290	1056	2.4387
253.75	288.2	1056	2.4266
263.9	288.2	1056	2.3901
274.05	288.2	1056	2.439
284.2	288.2	1056	2.5516
294.35	290	1056	2.6711
304.5	290	1056	2.4867



Interfase 1	Interfase 1	Interfase 1	Interfase 1
Tiempo (d)	(mm)	z de Cmax(mm)	Cmax (%)
0	290	1056	3.1837
10.15	290	0	3.8254
20.3	290	0	4.0166
30.45	290	0	4.6693
40.6	290	0	5.3115
50.75	290	0	5.1086
60.9	288.2	0	4.784
71.05	288.2	0	4.8662
81.2	288.2	0	4.1452
91.35	290	0	4.173
101.5	290	0	4.84
111.65	290	0	5.2375
121.8	290	0	5.1033
131.95	288.2	0	4.8718
142.1	288.2	0	4.696
152.25	288.2	0	3.9473
162.4	290	0	4.3655
172.55	290	0	5.1105
182.7	290	0	5.1996
192.85	290	0	4.9073
203	288.2	0	4.8492
213.15	288.2	0	4.4722
223.3	290	0	3.9801
233.45	290	0	4.6655
243.6	290	0	5.1221
253.75	290	0	5.1347
263.9	288.2	0	4.7735
274.05	288.2	0	4.7325
284.2	288.2	0	4.2471
294.35	290	0	4.1579
304.5	290	0	4.8478



Interfase 1	Interfase 1	
Tiempo (d)	Cmedia (%)	
0	2.9865	
10.15	2.9373	
20.3	2.9261	
30.45	2.8881	
40.6	2.8629	
50.75	2.8712	
60.9	2.8857	
71.05	2.9267	
81.2	2.9393	
91.35	2.9165	
101.5	2.8803	
111.65	2.8662	
121.8	2.8715	
131.95	2.8963	
142.1	2.9345	
152.25	2.9375	
162.4	2.9047	
172.55	2.8692	
182.7	2.8679	
192.85	2.8791	
203	2.9087	
213.15	2.9398	
223.3	2.9283	
233.45	2.8881	
243.6	2.8702	
253.75	2.8703	
263.9	2.8891	
274.05	2.9195	
284.2	2.941	
294.35	2.9174	
304.5	2.8798	



# 8.3.2 Concentraciones de la interfase papel-aceite 2, situada en la coordenada, r = 280.2mm

Interfase 2	Interfase 2	Interfase 2	Interfase 2
Tiempo (d)	r de Cmin (mm)	z de Cmin(mm)	Cmin (%)
0	280.2	0	2.758
10.15	280.2	1056	2.655
20.3	280.2	1056	2.584
30.45	280.2	1056	2.2858
40.6	280.2	1056	2.1241
50.75	279.9	1056	2.0953
60.9	279.9	1056	2.1081
71.05	279.9	1056	2.0799
81.2	279.9	1056	2.4323
91.35	280.2	1056	2.4878
101.5	280.2	1056	2.2322
111.65	280.2	1056	2.1395
121.8	279.9	1056	2.119
131.95	279.9	1056	2.0714
142.1	279.9	1056	2.1396
152.25	279.9	1056	2.5488
162.4	280.2	1056	2.4015
172.55	280.2	1056	2.1625
182.7	280.2	1056	2.1468
192.85	279.9	1056	2.1022
203	279.9	1056	2.0938
213.15	279.9	1056	2.2333
223.3	280.2	1056	2.5774
233.45	280.2	1056	2.2825
243.6	280.2	1056	2.1675
253.75	280.2	1056	2.1582
263.9	279.9	1056	2.0861
274.05	279.9	1056	2.14
284.2	279.9	1056	2.3504
294.35	280.2	1056	2.4915
304.5	280.2	1056	2.2298



Interfase 2	Interfase 2	Interfase 2	Interfase 2
<b>T</b>	r de Cmax		
Tiempo (d)	(mm)	z de Cmax(mm)	Cmax (%)
0	280.2	1056	3.1185
10.15	280.2	0	3.8254
20.3	280.2	0	4.0166
30.45	280.2	0	4.6693
40.6	280.2	0	5.3115
50.75	280.2	0	5.1086
60.9	280.2	0	4.7562
71.05	279.9	0	4.3018
81.2	279.9	0	3.7994
91.35	280.2	0	4.173
101.5	280.2	0	4.84
111.65	280.2	0	5.2375
121.8	280.2	0	5.1033
131.95	280.2	0	4.5322
142.1	279.9	0	4.1624
152.25	280.2	0	3.8247
162.4	280.2	0	4.3655
172.55	280.2	0	5.1105
182.7	280.2	0	5.1996
192.85	280.2	0	4.9073
203	279.9	0	4.3828
213.15	279.9	0	4.0074
223.3	280.2	0	3.9801
233.45	280.2	0	4.6655
243.6	280.2	0	5.1221
253.75	280.2	0	5.1347
263.9	280.2	0	4.6791
274.05	279.9	0	4.2456
284.2	279.9	0	3.8754
294.35	280.2	0	4.1579
304.5	280.2	0	4.8478
	-	-	



Interfase 2	Interfase 2
Tiempo (d)	Cmedia (%)
0	3.0012
10.15	2.9703
20.3	2.8595
30.45	2.7809
40.6	2.6614
50.75	2.6093
60.9	2.637
71.05	2.702
81.2	2.814
91.35	2.8397
101.5	2.7454
111.65	2.6453
121.8	2.6164
131.95	2.6456
142.1	2.7337
152.25	2.8356
162.4	2.8258
172.55	2.7071
182.7	2.6219
192.85	2.6258
203	2.6727
213.15	2.7695
223.3	2.8448
233.45	2.784
243.6	2.6672
253.75	2.6245
263.9	2.6382
274.05	2.7045
284.2	2.7998
294.35	2.8423
304.5	2.7473

