

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



**Trabajo Fin de Grado**

**INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LA  
DINÁMICA DE LA HUMEDAD EN EL SISTEMA  
DIELÉCTRICO DE LOS TRANSFORMADORES DE  
POTENCIA**

**(Influence of temperature on the dynamics of moisture in  
the dielectric system of power transformers)**

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA EN  
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

**Autor: César Ruiz Diego  
Julio - 2022**



## **RESUMEN**

El transformador de potencia constituye un elemento importante en la generación y transporte de energía. Su principal función es elevar la tensión de la energía en las centrales de generación para reducir de esta manera las pérdidas en el transporte de la misma, así como reducir la tensión para adecuarla a los valores solicitados en los diferentes puntos de consumo.

El principal signo de deterioro en los transformadores es el desgaste de los sistemas de aislamiento, constituidos por materiales celulósicos y aceite mineral o vegetal. Por lo tanto, el mantenimiento de estos materiales en buenas condiciones garantizará un correcto funcionamiento de la máquina. Para ello es de crucial importancia conocer su comportamiento dieléctrico ante las diferentes condiciones que pueda estar sometido durante su operación.

Con respecto al sistema de aislamiento de los transformadores se han realizado numerosos estudios tanto del papel celulósico como del aceite, que analizan su respuesta dieléctrica, la evacuación de calor o la difusión de la humedad a través de él. Sin embargo, la relación entre la disipación de calor que se produce en los aislantes y en qué manera afecta esto a la difusión de la humedad es un área que requiere de un mayor grado de estudio. Por esto, este trabajo tratará de definir el acoplamiento entre los modelos numéricos termo-hidráulico y de difusión de la humedad del sistema dieléctrico de un transformador.

Para ello, se han realizado por separado los dos modelos (térmico y de difusión de la humedad) de una capa del devanado de baja tensión de un transformador de potencia. A continuación, se ha realizado un acople unidireccional entre ellos: la distribución de temperaturas obtenidas del primer modelo fue utilizada en el segundo para determinar la difusión temporal de humedad en el papel dieléctrico. Ambos modelos han sido desarrollados con el software basado en elementos finitos *COMSOL Multiphysics*.

Del trabajo previamente descrito se puede deducir que las diferentes condiciones de trabajo a las que ha sido sometido el transformador afectan a su comportamiento higroscópico. Por un lado, el movimiento de la humedad en el aislamiento será más veloz conforme la potencia aumente, mientras que, a mayores humedades del papel celulósico, el papel estará sometido a un movimiento de humedad en un menor tiempo.

## **ABSTRACT**

The power transformer is an important element in the generation and transmission of energy. It's main function is to raise the voltage of the energy in the generation plants in order to reduce losses in it's transport, as well as to reduce the voltage in order to adapt it to the values requested at the different consumption points.

The main sign of deterioration in transformers is the wear of the insulation systems, consisting of cellulosic materials and mineral or vegetable oil. Therefore, the maintenance of these materials in good conditions will guarantee a correct operation of the machine. For this purpose, it is of crucial importance to know their dielectric behavior under the different conditions they may be subjected to during their operation.

With respect to the insulation system of transformers, numerous studies have been carried out on both cellulose paper and oil, analyzing their dielectric response, heat dissipation or the diffusion of moisture through it. However, the relationship between the heat dissipation that occurs in insulators and how this affects moisture diffusion is an area that requires a greater degree of study. Therefore, this work will attempt to define the coupling between the thermo-hydraulic and moisture diffusion numerical models of a transformer dielectric system.

For this purpose, the two models (thermal and moisture diffusion) of a layer of the low voltage winding of a power transformer have been performed separately. Then, a unidirectional coupling has been performed between them: the temperature distribution obtained from the first model was used in the second one to determine the temporal diffusion of moisture in the dielectric paper. Both models have been developed with the finite element based software COMSOL Multiphysics.

From the previously described work it can be deduced that the different working conditions to which the transformer has been subjected affect it's hygroscopic behavior. On the one hand, the movement of moisture in the insulation will be faster as the power increases, whereas, at higher cellulose paper humidities, the paper will be subjected to moisture movement in a shorter time.

**ÍNDICE DE CONTENIDO**

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>COMPORTAMIENTO TÉRMICO Y DE LA HUMEDAD EN EL TRANSFORMADOR</b>	<b>13</b>
2.1	<b>AISLAMIENTO PAPEL-ACEITE</b>	<b>13</b>
2.1.1	Aislamiento sólido a base de celulosa	13
2.1.2	Aislamiento líquido	15
2.2	<b>EXPECTATIVA DE VIDA DEL TRANSFORMADOR</b>	<b>16</b>
2.3	<b>COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL TRANSFORMADOR</b>	<b>17</b>
2.3.1	Generación de calor	17
2.3.2	Transferencia del calor	21
2.3.3	Distribución de la temperatura	24
2.4	<b>HUMEDAD EN EL SISTEMA DE AISLAMIENTO PAPEL-ACEITE</b>	<b>26</b>
2.4.1	Fuentes de humedad	27
2.4.2	Distribución de la humedad	29
2.4.3	Migración e intercambio de humedad entre los aislamientos	31
2.5	<b>INTERDEPENDENCIA DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO Y LA DINÁMICA DE HUMEDAD EN EL TRANSFORMADOR</b>	<b>34</b>
<b>3</b>	<b>PROPUESTA PARA EL MODELIZADO FEM ACOPLADO PARA ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DE TEMPERATURA Y HUMEDAD EN EL TRANSFORMADOR</b>	<b>40</b>
<b>4</b>	<b>MODELIZACIÓN NUMÉRICA DEL ACOPLAMIENTO ENTRE EL MODELO TERMOHIDRÁULICO Y DE DIFUSIÓN DEL SISTEMA DIELECTRICO DE UN TRANSFORMADOR</b>	<b>45</b>
4.1	<b>GEOMETRÍA</b>	<b>46</b>
4.2	<b>MATERIALES</b>	<b>49</b>
4.3	<b>DISCRETIZADO (MALLADO)</b>	<b>50</b>
4.4	<b>MODELO TERMO-HIDRÁULICO DEL SISTEMA DIELECTRICO</b>	<b>52</b>
4.4.1	Base teórica del modelo (ecuaciones de gobierno)	52
4.4.2	Condiciones de contorno	53
4.4.3	Valores iniciales y fuente de calor	56
4.4.4	Tipo de estudio	58
4.4.5	Posprocesado y análisis de resultados	59
4.5	<b>MODELO DE DIFUSIÓN DE HUMEDAD DEL SISTEMA DIELECTRICO</b>	<b>59</b>
4.5.1	Base teórica del modelo (ecuaciones de gobierno)	59
4.5.2	Condiciones de contorno	62
4.5.3	Valores iniciales	65
4.5.4	Tipo de estudio	69
4.5.5	Posprocesado y análisis de resultados	70

<b>5</b>	<b>POSTPROCESADO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	71
<b>5.1</b>	<b>MODELO TÉRMICO</b> .....	71
5.1.1	Validación del modelo .....	71
5.1.2	Resultados de temperaturas .....	73
<b>5.2</b>	<b>MODELO DE DIFUSIÓN DE LA HUMEDAD</b> .....	78
5.2.1	Estudio estacionario .....	78
5.2.2	Estudio temporal .....	83
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS</b> .....	93
6.1	CONCLUSIONES GENERALES.....	93
6.2	SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS .....	94
<b>7</b>	<b>REFERENCIAS</b> .....	95
<b>8</b>	<b>ANEXOS</b> .....	97
8.1	ANEXO DE GEOMETRÍA .....	97
8.2	ANEXO DE MODELOS TÉRMICOS (DIFERENTES POTENCIAS) .....	100
8.3	ANEXO DE CÓDIGOS MATLAB .....	104
8.3.1	Cálculo numérico de las condiciones iniciales.....	104
8.3.2	Cálculo gráfico de las condiciones iniciales.....	104
8.3.3	Cálculo numérico de la masa total de agua en el transformador .....	105
8.4	ANEXO DE GRÁFICAS .....	106
8.4.1	Evolución de la concentración en función de la potencia para concentración inicial de 1%	106
8.4.2	Evolución de la concentración en función de la potencia para concentración inicial de 3%	107
8.4.3	Evolución de la concentración en función de la potencia para concentración inicial de 4,5%	108
8.4.4	Superficie para 25% de la potencia nominal .....	109
8.4.5	Superficie para 50% de la potencia nominal .....	109
8.4.6	Superficie para 75% de la potencia nominal .....	110
8.4.7	Superficie para 120% de la potencia nominal .....	110
8.4.8	Superficie para 100% de la potencia nominal y $C_0 = 4,5\%$ .....	111
8.4.9	Superficie para 100% de la potencia nominal y $C_0 = 1\%$ .....	111
8.4.10	Superficie para 100% de la potencia nominal y $C_0 = 1\%$ .....	112

## ÍNDICE DE IMÁGENES

Figura 2.1 Estructura de la celulosa .....	15
Figura 2.2 Balance de potencias en un transformador [2] .....	18
Figura 2.3 Curva de histéresis .....	19
Figura 2.4 Corrientes de Foucault .....	20
Figura 2.5 Núcleo laminado [3] .....	20
Figura 2.6 Sistema de refrigeración de un transformador [4] .....	21
Figura 2.7 Refrigeración por convección natural .....	23
Figura 2.8 Distribución de temperaturas una sección del bobinado .....	25
Figura 2.9 Fuentes de humedad en un transformador [7] .....	27
Figura 2.10 Principales componentes del aislamiento de un transformador [8].....	30
Figura 2.11 Fases de la absorción de la humedad.....	32
Figura 2.12 Estructura del aislamiento celulósico .....	32
Figura 2.13 Curva de sorción isotérmica [9].....	33
Figura 2.14 Esquema de la dinámica de humedad.....	34
Figura 2.15 Curva de equilibrio Oommen .....	37
Figura 2.16 Esquema interrelación .....	38
Figura 4.1 Modelo de transformador a estudiar [14].....	45
Figura 4.2 Geometría acotada transformador modelo [14] .....	46
Figura 4.3 Detalle de las espiras envueltas en papel (COMSOL) .....	47
Figura 4.4 Geometría simplificada (COMSOL) .....	49
Figura 4.5 Mallado .....	51
Figura 4.6 Esquema de humedad en componentes de un transformador .....	62
Figura 4.7 Esquema de condiciones de contorno en la difusión de humedad Fuente: [9] .....	63
Figura 4.8 Niveles de humedad en papel según diferentes organismos .....	66
Figura 4.9 Curva de equilibrio para 20°C (código en anexo 8.3.2.).....	66

Figura 5.1 Temperaturas para diferentes aceites [15] .....	72
Figura 5.2 Temperatura máxima capa 7.....	72
Figura 5.3 Capa límite térmica papel-aceite.....	73
Figura 5.4 Gradientes de temperaturas en la entrada (b) y salida (a) del conducto y temperatura máxima y mínima en la interfase .....	74
Figura 5.5 Temperatura en la interfase papel-aceite en función de la altura .....	75
Figura 5.6 Gradiente radial de temperatura del papel a una altura de 500 mm .....	76
Figura 5.7 Distribución de temperaturas 3D de la última capa del devanado de BT .....	77
Figura 5.8 Distribuciones de temperatura en la interfase para diferentes potencias .....	77
Figura 5.9 Concentración mínima (a) y máxima(b) en la interfase.....	79
Figura 5.10 Gráfico de la concentración en humedad y temperatura en la interfase papel-aceite ....	80
Figura 5.11 Curva de equilibrio para 66,7°C (Anexo 8.3.2) .....	81
Figura 5.12 Gráfico concentración-temperatura (en la interfase) (a) y comparación de factores (b) .	82
Figura 5.13 Evolución de la humedad en un punto a una altura de 1000mm en medio del espesor del papel y en la interfase pape-cobre .....	84
Figura 5.14 Evolución de la concentración en un punto de en medio del papel para diferentes alturas para una carga del 100% de la nominal y una concentración inicial de 2%. .....	85
Figura 5.15 Evolución de la concentración de humedad en lo ancho del papel a una altura de 700mm .....	86
Figura 5.16 Evolución de la concentración de humedad en lo ancho del papel a una altura de 10mm .....	87
Figura 5.17 Evolución de la concentración de equilibrio en la interfase a una altura de 700mm .....	88
Figura 5.18 Concentración en un punto medio del papel a una altura de 980mm para las distintas potencias .....	89
Figura 5.19 Evolución de la concentración en el papel a una altura de 982mm para diferentes concentraciones iniciales para una potencia del 100% de la nominal. ....	90
Figura 5.20 Evolución de la concentración de humedad con respecto de la altura en al interfase papel-cobre para una potencia del 100% de la nominal y concentración inicial de humedad del 2% .....	91
Figura 8.1 Sección vertical de las distintas capas del bobinado de baja tensión.....	97

Figura 8.2 Sección transversal acotada del bobinado de baja tensión y los canales intermedios.....	97
Figura 8.3 Vista acotada en planta de una sección del bobinado de baja tensión .....	98
Figura 8.4 Vista de las capas del bobinado de baja tensión para una de las fases. Fuente: [18].....	99
Figura 8.5.Distribución de temperaturas en la interfase papel-aceite para una potencia del 120% de la nominal .....	100
Figura 8.6 Distribución de temperaturas en la interfase papel-aceite para una potencia del 75% de la nominal.....	101
Figura 8.7 Distribución de temperaturas en la interfase papel-aceite para una potencia del 50% de la nominal.....	102
Figura 8.8 Distribución de temperaturas en la interfase papel-aceite para una potencia del 25% de la nominal.....	103
Figura 8.9 Evolución de la concentración en un punto medio del papel a una altura de 980mm para las distintas potencias y una $C_0 = 1\%$ .....	106
Figura 8.10 Evolución de la concentración en un punto medio del papel a una altura de 980mm para las distintas potencias y una $C_0 = 3\%$ .....	107
Figura 8.11 Evolución de la concentración en un punto medio del papel a una altura de 980mm para las distintas potencias y una $C_0 = 4.5\%$ .....	108
Figura 8.12 Evolución de la concentración de humedad con respecto de la altura en al interfase papel-cobre para una potencia del 25% de la nominal y concentración inicial de humedad del 2%	109
Figura 8.13 Evolución de la concentración de humedad con respecto de la altura en al interfase papel-cobre para una potencia del 50% de la nominal y concentración inicial de humedad del 2%	109
Figura 8.14 Evolución de la concentración de humedad con respecto de la altura en al interfase papel-cobre para una potencia del 75% de la nominal y concentración inicial de humedad del 2%	110
Figura 8.15 Evolución de la concentración de humedad con respecto de la altura en al interfase papel-cobre para una potencia del 120% de la nominal y concentración inicial de humedad del 2% .....	110
Figura 8.16 Evolución de la concentración de humedad con respecto de la altura en al interfase papel-cobre para una potencia del 100% de la nominal y concentración inicial de humedad del 4,5% .....	111

Figura 8.17 Evolución de la concentración de humedad con respecto de la altura en al interfase  
papel-cobre para una potencia del 100% de la nominal y concentración inicial de humedad del 1%  
..... 111

Figura 8.18 Evolución de la concentración de humedad con respecto de la altura en al interfase  
papel-cobre para una potencia del 100% de la nominal y concentración inicial de humedad del 3%  
..... 112

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Propiedades termo-hidráulicas .....	50
Tabla 4.2. Parámetros expresados en estas ecuaciones .....	56
Tabla 4.3. Concentraciones de humedad y pesos de agua.....	67
Tabla 4.4. Concentraciones de humedad y pesos de agua ajustados .....	68
Tabla 4.5. Peso total de agua en función de la potencia para una concentración de humedad inicial del 2% .....	68
Tabla 5.1. Ubicación de los puntos calientes en función de la potencia .....	78
Tabla 5.2 Comparativa de tiempos de equilibrio según la potencia .....	89
Tabla 5.3 Comparativa de tiempos de equilibrio según la concentración de humedad inicial en el papel .....	90
Tabla 8.1. Peso total de agua en función de la potencia para una concentración de humedad inicial del 1% .....	106
Tabla 8.2. Peso total de agua en función de la potencia para una concentración de humedad inicial del 3% .....	107
Tabla 8.3. Peso total de agua en función de la potencia para una concentración de humedad inicial del 4,5% .....	108

## 1 INTRODUCCIÓN

Los transformadores de potencia son un elemento primordial tanto en las centrales de generación como en las redes de transporte y distribución de la energía eléctrica. Estas máquinas están sometidos a varios esfuerzos y cambios en su vida útil, por lo que con el tiempo se deterioran hasta cierto punto en el que fallarán y tendrán que ser remplazados. Para el funcionamiento correcto de estas máquinas, se han de llevar a cabo labores de diagnóstico y mantenimiento preventivo que permitan identificar el estado del transformador. Para ello se realiza una serie de análisis a través de los cuales se evalúa los cuatro circuitos principales: el circuito eléctrico, el geométrico, el magnético y el dieléctrico.

La temperatura y la humedad son dos de los factores claves en el deterioro de los aislamientos celulósicos de los transformadores de potencia inmersos en líquidos dieléctricos. Ambas provocan la degradación de la celulosa en mayor porcentaje que otras causas.

Es por esto por lo que determinar su comportamiento a lo largo del tiempo es indispensable para la correcta evaluación de la expectativa de vida útil de este equipo el cual es fundamental en todos los sistemas eléctricos actuales. Las compañías eléctricas muestran cada vez más interés en los sistemas de aislamiento de los transformadores a corto plazo como prevención de una posible avería o acortamiento de la vida útil del transformador. Todo esto se hace con varios objetivos, por un lado, alargar al máximo la vida de la inversión y por otro evitar tener que desembolsar altas cantidades de dinero.

El comportamiento térmico y la dinámica de humedad en los transformadores son fenómenos interdependientes pero que se suelen estudiar de manera independiente gracias a la diferencia de las constantes de tiempo de cada uno.

En este trabajo fin de grado se pretende modelizar la mencionada interdependencia mediante un modelo numérico 2D-axisimétrico de una fase del devanado trifásico de B.T. de un transformador de 14 MVA, 66/6.3 kV. La modelización se realizó con la herramienta computacional basada en elementos finitos Comsol Multiphysics.

Volviendo al diagnóstico y mantenimiento del transformador previamente mencionado, cabe destacar que se realiza a través del análisis de los diferentes componentes internos, hay un método llamado “no invasivo” ya que consiste en extraer una muestra de aceite para así mediante su análisis, poder obtener valores de los demás componentes. Mediante la relación

entre la temperatura y la humedad de la interfase entre el papel y el aceite la cual se intentará encontrar en este trabajo, se busca poder servir de utilidad para mejorar y aumentar la fiabilidad de los datos pudiendo saber tan sólo con la temperatura a la que está trabajando el transformador, la humedad presente en cierto instante de tiempo tanto en el papel como en el aceite.

## 2 COMPORTAMIENTO TÉRMICO Y DE LA HUMEDAD EN EL TRANSFORMADOR

### 2.1 AISLAMIENTO PAPEL-ACEITE

Todos los transformadores precisan de un sistema de aislamiento dieléctrico adecuado encargado de aislar las partes activas del circuito, las cuales se encuentran a diferentes potenciales eléctricos. De esta manera se evita que la máquina sufra daños en operación, para ello se deberá escoger el sistema de aislamiento con la mayor vida útil posible y por consiguiente del transformador, asunto que será tratado en el apartado 2.2. Este sistema está constituido básicamente por dos componentes: aislamiento líquido (función aislante y de refrigeración) y aislamiento sólido (función aislante y de soporte mecánico).

Un buen aislamiento se traduce en una buena fiabilidad del transformador durante su servicio. Por otro lado, la variación de sus propiedades fisicoquímicas se traduce en el deterioro de la capacidad dieléctrica y refrigerante de los aislantes, por ello es importante conocer y estudiar el comportamiento de dichas propiedades. En el presente apartado se realiza una breve descripción tanto de los diferentes tipos de aislamiento utilizados en transformadores como de sus principales propiedades y cómo se ven afectadas por diversos factores.

#### 2.1.1 Aislamiento sólido a base de celulosa

El cartón prensado y el papel dieléctrico son los elementos que constituyen el aislamiento sólido en un transformador. Su función es mantener separados eléctricamente todos los elementos que conforman la parte activa del transformador, los materiales se deben escoger de acuerdo con el espesor de la bobina. Los conductores que componen el devanado tanto de alta como de baja tensión se encuentran envueltos por papel. Este se utiliza para brindar tanta rigidez dieléctrica como mecánica a los conductores. El papel fue uno de los primeros materiales aislantes utilizados y en la actualidad lo continúa siendo.

El papel está formado por fibras de celulosa. Estas son extraídas de materiales como madera, algodón, etc. La celulosa es un polisacárido o polímero lineal formado por largas cadenas de unidades de un monómero, la glucosa. Pese a no encontrarse en estado puro en la naturaleza,

la celulosa tiene su fuente natural en la fibra de algodón, con un contenido al 95% de esta, también se puede encontrar, aunque en menor porcentaje en la madera. Además, la celulosa está asociada comúnmente a otras sustancias, tales como la lignina y las hemicelulosas. En los papeles y cartón empleados como dieléctricos, se tiene aproximadamente la siguiente proporción de componentes:

- Entre un 75 y 85% de celulosa
- Entre un 10 y 20% de hemicelulosa
- Entre un 2 y un 6% de lignina
- Un contenido inferior al 0,5% de compuestos inorgánicos

El papel Kraft es el aislante celulósico más común en los transformadores. Se usa principalmente para el aislamiento de conductores y bobinas y tiene una alta rigidez dieléctrica y mecánica. Su método de fabricación es el proceso Kraft -de ahí su nombre-, en el que la madera se trata con una mezcla de hidróxido de sodio y sulfato de sodio, obteniendo así papel Kraft.

El papel dieléctrico tiene una serie de propiedades que afectan a su comportamiento dieléctrico, como, por ejemplo, la resistencia mecánica. Esta se puede medir mediante un método químico de análisis denominado grado de polimerización DP (Degree of Polymerization en inglés). El grado de polimerización hace referencia al número de unidades repetidas (monómeros de glucosa) que se encuentran en la cadena molecular de un polímero, como se aprecia en la Figura 2.1. La resistencia mecánica de la celulosa se mide por el número de unidades de glucosa en la cadena molecular: cuanto mayor sea el número de monómeros mayor es la resistencia mecánica de la muestra. Otra forma de medir la resistencia mecánica de una muestra de papel es determinar su resistencia a tracción. Esta se define como la fuerza necesaria para romper mediante una sollicitación a tracción una probeta de papel de medidas normalizadas.

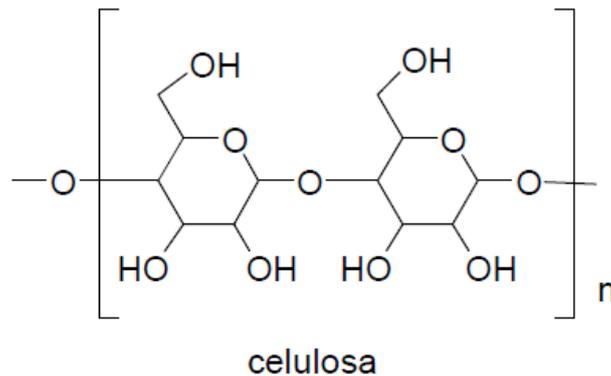


Figura 2.1 Estructura de la celulosa

### 2.1.2 Aislamiento líquido

A pesar de que existen transformadores sin líquido dieléctrico, transformadores secos, la gran mayoría están sumergidos en un fluido que puede ser aceite mineral u otros fluidos. Con la circulación de estos fluidos se busca una doble funcionalidad, aislar eléctricamente los diferentes componentes que se encuentren a distintos potenciales, así como refrigerar las partes del transformador donde se genera calor.

El aceite tiene buenas propiedades dieléctricas lo cual lo convierte en un material adecuado para proporcionar aislamiento eléctrico y así evitar la formación de arcos eléctricos entre componentes que poseen diferente potencial eléctrico. Además, evita la formación de óxidos en las partes metálicas al reducir considerablemente el contacto del oxígeno con ellas.

El aceite como medio refrigerante funciona dentro de un ciclo térmico cerrado en el que se encarga de absorber el calor de las partes que adquieren temperaturas elevadas debido a sus pérdidas, transportarlo y expulsarlo fuera del transformador. Este ciclo es movido por una bomba que impulsa al aceite o por convección natural, y las transferencias de calor se efectúan a través de mecanismos de conducción, radiación y convección que posteriormente se explicará en el apartado 2.3.2

El líquido dieléctrico también se puede usar a modo de diagnóstico del estado del transformador. Esto se lleva a cabo mediante el análisis químico periódico del aceite. Si hay algún fallo en la máquina, se producirán productos derivados de la degradación del aceite o

un cambio en las propiedades de este ya que la energía generada será disipada por el líquido, lo cual mediante ensayos en el laboratorio podrá ser detectado.

Para obtener un buen cumplimiento de ambas funciones, aislamiento eléctrico y refrigeración, el líquido dieléctrico debe ser escogido de manera que sus características permitan el mayor rendimiento posible desde ambos puntos de vista.

## 2.2 EXPECTATIVA DE VIDA DEL TRANSFORMADOR

La expectativa de vida o vida útil de un transformador es un parámetro que permite prever el tiempo que un transformador estará funcionando de manera óptima, y está determinada por el deterioro en la resistencia mecánica del papel dieléctrico.

El aislamiento líquido suele ser hidrófobo (especialmente en el caso de los aceites de origen mineral) y el aislamiento sólido es hidrófilo. Como la principal fuente de envejecimiento es la humedad, el deterioro será más notable en el papel dieléctrico. Cuando la celulosa envejece se reduce su resistencia a la tracción lo que conlleva la reducción de la capacidad de soportar esfuerzos dinámicos de cortocircuito. El aislamiento sólido envuelve por completo cada una de las pletinas que conforman las espiras y éstas los devanados del transformador. Resulta muy complicado sustituir el aislamiento sólido ya que supondría rehacer el transformador a efectos prácticos por lo tanto no es una operación que resulte factible, [1]. Por lo tanto, si las condiciones de operación son normales, la vida del transformador está asociada a la vida útil del material celulósico.

La humedad es una de las variables que merece más atención en los transformadores por su relación directa con la vida de la máquina. Un nivel excesivo de agua en el aislamiento aumenta la presencia de descargas parciales (DP), reduce su resistencia dieléctrica, acelera los índices de envejecimiento del papel y aumenta el riesgo de fallo del equipo.

Además de la humedad, la expectativa de vida del transformador depende de la temperatura a la que está sometido el aislamiento sólido. La temperatura no sólo afecta al contenido de humedad, haciéndolo migrar del aislamiento celulósico al aceite y viceversa, sino que también influye directamente en la degradación del papel dieléctrico mediante pirolisis.

Por lo tanto, ser capaz de predecir el comportamiento de humedad dentro del aislamiento del transformador es importante para optimizar el funcionamiento del transformador, los programas de mantenimiento, y la vida útil restante del transformador podría ser estimada.

## 2.3 COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL TRANSFORMADOR

Durante el funcionamiento dinámico de los transformadores, su temperatura cambia, debido a las variaciones de carga y a los cambios en las condiciones ambientales. En consecuencia, la distribución de la humedad también cambia, moviéndose hacia un punto de equilibrio que depende de la temperatura, la geometría del aislamiento y del contenido de humedad del sistema.

En el funcionamiento del transformador, desde su conexión hasta el régimen nominal, la generación de calor y por consiguiente la temperatura se van incrementando progresivamente hasta llegar al régimen estacionario. Si un transformador se ve sometido a temperaturas por encima de las de su régimen nominal puede implicar una serie de deterioros que podrán afectar a su funcionamiento y vida útil.

En este apartado se explicará los principios por los cuales se genera energía en forma de calor en una máquina electromagnética, además de cómo se transmite y distribuye ese calor en sus componentes. Es de crucial importancia conocer esta distribución de temperaturas en los componentes del transformador, en especial en el papel dieléctrico ya que la distribución de la humedad, así como su difusión, dependerán de esas temperaturas.

### 2.3.1 Generación de calor

La principal causa de la generación de calor en un transformador de potencia son las pérdidas procedentes de la diferencia de potencia entre los devanados primario  $P_1$  y secundario  $P_2$  (Figura 2.2  $P_1 > P_2$ ). Esta pérdida de potencia dentro del transformador se manifiesta en forma de calor en el cobre de los devanados y en el hierro del núcleo, causando un aumento de la temperatura no uniforme y una reducción del rendimiento.

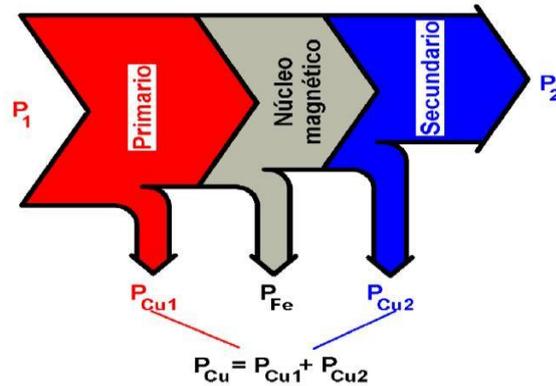


Figura 2.2 Balance de potencias en un transformador [2]

Como he explicado, el calor generado está directamente relacionado con las pérdidas por lo que procedo a clasificar y explicar los diferentes tipos de pérdidas.

- Pérdidas en el cobre: son producidas en los devanados debidas al efecto Joule. La resistividad de los devanados del transformador genera pérdidas de energía en forma de calor en los devanados. Por ello se debe considerar una separación o aislamiento entre los devanados, la cual será proporcionado por el papel y el líquido dieléctrico. Las pérdidas son proporcionales al cuadrado de las intensidades de carga y a la resistencia de los bobinados tanto primario cómo secundario (2.1)

$$P_{cu} = R_{cu} \times I^2 \quad (2.1)$$

- Pérdidas en el hierro: causadas por histéresis y por corrientes parásitas.
  - Histéresis: si un material ferromagnético está inicialmente desmagnetizado y posteriormente se le imanta, dicho material desarrollará el ciclo de histéresis. Hay una cierta diferencia entre la energía requerida por el campo durante la magnetización y la que se devuelve en la desmagnetización. Esta diferencia de energía es liberada en forma de calor, y su valor es igual al área encerrada por la curva cerrada o ciclo de histéresis que se muestra en la Figura 2.3. Para el cálculo de estas pérdidas existe una fórmula propuesta por C.P. Steinmetz (2.2)

$$P_H = k_H f V B_{max}^\alpha \quad (2.2)$$

Donde:

$P_H$ : pérdidas por el ciclo de histéresis

$k_H$ : coeficiente de Steinmetz

f: frecuencia de la señal

V: volumen de material

$B_{max}$ : valor máximo de la inducción

$\alpha$ : exponente de Steinmetz.

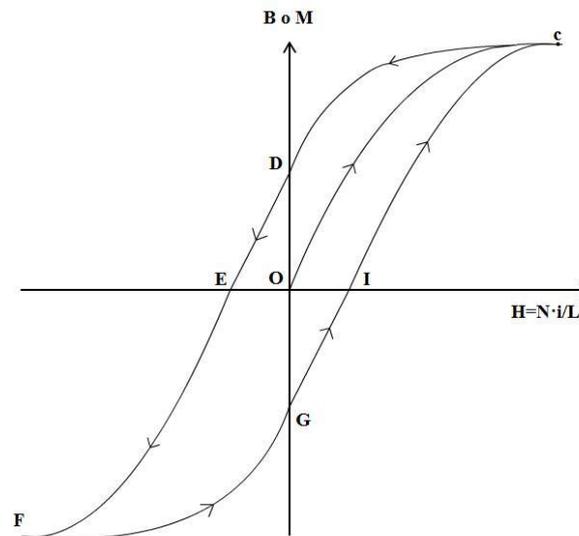


Figura 2.3 Curva de histéresis

- Corrientes parásitas: dentro de los transformadores se produce una variación del campo magnético (Figura 2.4). Los núcleos de estas máquinas están hechos de materiales ferromagnéticos, en los cuales, como respuesta a la variación del campo magnético, se induce una fuerza electromotriz. Esta fuerza a su vez origina corrientes internas (corrientes de Foucault) que causan pérdidas de energía a través del efecto Joule. Las pérdidas de potencia originadas por estas corrientes dependerán del material empleado en el núcleo.

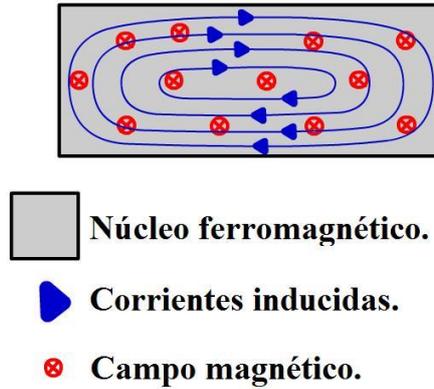


Figura 2.4 Corrientes de Foucault

Además, para disminuirlas se evita que el núcleo de hierro sea macizo. Por ello, el núcleo se construye con chapas apiladas de espesores delgados y aisladas entre sí. De esta manera se consigue que las corrientes parásitas solamente circulen en las secciones transversales de las láminas, como se muestra en la Figura 2.5, siendo estas mucho más pequeñas y reduciendo así las pérdidas.

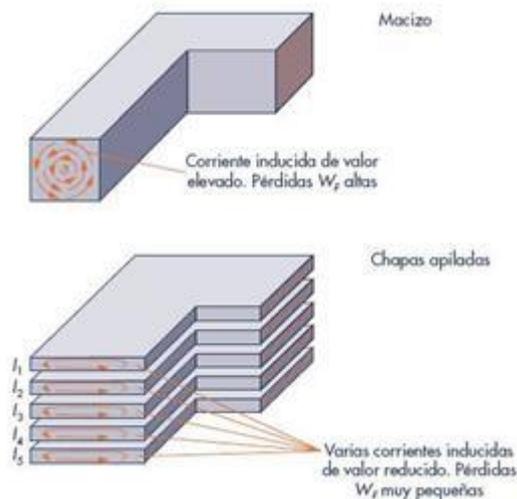


Figura 2.5 Núcleo laminado [3]

Existe una fórmula (2.3) para calcular numéricamente las pérdidas por corrientes parásitas:

$$P_F = k_F f^2 B_{max}^2 \quad (2.3)$$

Donde:

$P_F$ : pérdidas por corrientes parásitas

$k_F$ : coeficiente de Foucault

$f$ : frecuencia de la señal

$B_{max}$ : valor máximo de la inducción

Saber cómo se originan y comportan estas pérdidas nos permitirá establecer unos niveles de tensión y corriente adecuados que permitan asegurar un funcionamiento fiable del transformador con temperaturas admisibles. Con esto evitaremos la aparición de picos locales de temperatura llamados hot-spots, los cuales dañan de manera grave los materiales aislantes.

### 2.3.2 Transferencia del calor

Como hemos dicho previamente, las pérdidas que sufre el transformador tanto en devanados como en el núcleo suponen la transformación de energía eléctrica en calor y consecuentemente en un aumento de la temperatura de los componentes en contacto con los elementos que generan calor (Figura 2.6). Esta transferencia de calor se produce principalmente por dos mecanismos: conducción y convección. Ambas necesitan un medio de transporte para que el fenómeno de transferencia se dé.

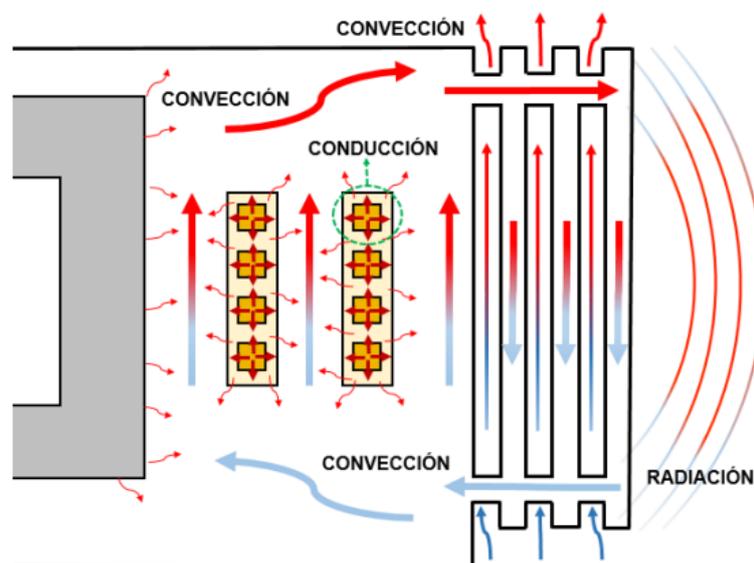


Figura 2.6 Sistema de refrigeración de un transformador [4]

### 2.3.2.1 Conducción

La conducción es la propagación de energía en un medio material entre cuerpos con un gradiente de temperatura, transmitiéndose el calor de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura [5]. El calor transmitido por conducción por unidad de área  $q$  ( $w / m^2$ ), es proporcional al gradiente de temperatura  $dT/dx$ , siendo  $k$  la conductividad térmica del material ( $w / [m^2 k]$ )(2.4).

$$Q = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.4)$$

Este mecanismo es de especial importancia en la interfase conductor-aislante sólido (cobre-papel dieléctrico), aunque se manifiesta en varios componentes del transformador (devanados de baja y alta tensión, núcleo, aislamientos y cuba). Dentro del transformador, el núcleo está compuesto por varias láminas unidas entre sí, cada una de estas laminaciones puede considerarse como un diferencial de núcleo. Como las laminaciones están en contacto físico, esto permite que el calor del núcleo fluya hacia zonas más frías por conducción. Esto explica que, aunque la generación de calor sea uniforme, la distribución de temperaturas no lo sea.[6]

### 2.3.2.2 Convección

Cuando un fluido se pone en contacto con una superficie sólida a una temperatura distinta, el proceso resultante de intercambio de energía térmica se denomina transmisión de calor por convección, [5]. Hay dos tipos, la convección forzada y la convección natural. La primera se da gracias a una fuerza exterior que se encarga de realizar la circulación del fluido. En la segunda, la fuerza motriz procede de las fuerzas ascensionales provocadas por la diferencia de densidad del fluido, resultante de la convección con un material a diferente temperatura.

Al ser la velocidad del fluido mayor en la convección forzada, se transferirá mayor cantidad de calor para una temperatura dada. Independientemente del tipo de convección, la cantidad de calor por unidad de área  $q$  ( $w / m^2$ ) dependerá del coeficiente de transmisión del calor por convección  $h_c$  ( $w / [m^2 k]$ ), y las temperaturas de la superficie  $T_s$  (k) y del fluido no perturbado lejos de la superficie conductora (temperatura ambiente)  $T_f$  (k) (2.5)

$$q = h_c (T_s - T_f) \quad (2.5)$$

También conocida como la ley de enfriamiento de Newton, [6]. Este método de transferencia del calor es de vital importancia para determinar la distribución de la temperatura en la interfase aislante sólido – aislante líquido (papel-aceite). En el modelo estudiado se considera que el ciclo que realiza el aceite extrayendo calor del bobinado y expulsándolo al ambiente es por convección natural (Figura 2.7). Este efecto se basa en que el aceite es calentado por el calor desprendido por las bobinas y el núcleo, esto hace que sus moléculas al recibir calor, disminuyen su densidad y de esta manera ascienden. El espacio dejado por el aceite caliente es ocupado por el aceite más denso y frío, gracias a este efecto, el aceite realiza un movimiento, pudiendo así conducir el fluido canalizándolo.



Figura 2.7 Refrigeración por convección natural

### 2.3.3 Distribución de la temperatura

El estudio de transferencia de calor de transformadores de grandes escalas y geometrías complejas tiene una gran importancia en aplicaciones industriales. Para poder resolver estos modelos, se ha establecido el modelizado CFD (Computational Fluid Dynamics). El CFD está basado en la solución de las ecuaciones de gobierno (ecuaciones de Navier-Stokes) que definen la conservación de masa, momento y energía para el flujo de un fluido. Estas ecuaciones diferenciales deben de ser discretizadas para obtener unas ecuaciones algebraicas que resolver.

En un transformador de potencia, el aceite refrigerante fluye en un bucle formado por:

- Devanados, donde debido a las pérdidas (explicadas en más detalle en el apartado 2.3.1) el aceite mineral se calienta.
- El depósito, en el que el aceite actúa principalmente como portador del calor.
- Radiadores, donde el aceite se enfría.

Por lo tanto, el circuito de refrigeración consiste en una combinación de flujo por los conductos internos (entre espiras y por los radiadores) y flujo abierto a través del depósito. Por otro lado, existen unas zonas llamadas puntos calientes o “hot spots” que se refieren a la zona de mayor temperatura en el transformador, pueden degradar el papel aislante haciendo que el transformador sea susceptible de fallar. Dado que la vida útil del transformador depende del papel aislante, es fundamental controlar con precisión las condiciones de temperatura.

Con respecto al modelizado, la mayoría de las pérdidas en un transformador ocurren en el bobinado, además la temperatura de los puntos calientes es decisiva en la determinación de la vida útil de la máquina. Por esto se usa el modelado CFD con alta precisión para obtener un modelo térmico detallado.

Las diferencias de flotabilidad interna del aceite juegan un papel importante en la determinación del equilibrio de la presión local y tienen un gran efecto en las distribuciones de velocidad y temperatura, incluyendo la altura y la posición de la temperatura del punto caliente en los devanados del transformador refrigerados por la corriente de refrigerante. Tener en cuenta estas fuerzas ascendentes de la variación de la densidad del fluido con la temperatura (fuerzas de flotación) es importante. Además, el aislamiento del cobre también

tiene un efecto significativo en la refrigeración, lo que produce que los puntos calientes no aparezcan siempre donde se encuentren las velocidades más bajas del aceite en el conducto (Figura 2.8).

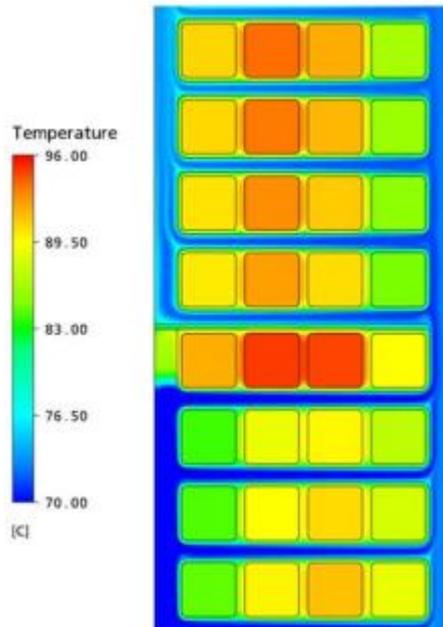


Figura 2.8 Distribución de temperaturas una sección del bobinado

En el interior del transformador existen diferentes aislamientos celulósicos que, en función de su espesor y densidad aportarán diferentes grados de aislamiento. Para el estudio realizado, es de interés obtener la distribución de temperaturas en la interfase papel-aceite, ya que es ahí donde se va a producir el intercambio de las moléculas de agua entre el aislante sólido y el aislante líquido. También es importante determinar las temperaturas al interior del papel, ya que la migración de la humedad al interior de este depende esencialmente de los gradientes de temperatura en cada instante.

La distribución de la temperatura en la interfase papel-aceite, dependerá varios factores:

- **Altura:** el aceite es un fluido que se calienta por convección en contacto con el papel caliente, es por esto por lo que cuando el fluido absorbe calor, sus moléculas se aceleran, por lo cual su temperatura aumenta y su densidad disminuye lo que lo hace más liviano. Esta fracción del fluido más ligero ascenderá ante el resto del fluido, concentrándose en la parte superior de la cuba, lo que hará que la temperatura en la parte superior de la interfase sea mayor.

- Radio: como se ha explicado, el calor se transmite por conducción a través del papel y del aceite, además dicho calor depende de la distancia que hay a la fuente de calor. En el caso del transformador estudiado esta distancia es radial, por lo tanto, conforme el radio aumenta, la temperatura irá disminuyendo.
- Capacidad de refrigeración (en este caso del aceite): depende, entre otros factores, de las propiedades termo hidráulicas del aceite
- Flujo másico de aceite por los canales: dependiendo de este flujo, la cantidad de calor evacuado variará. A mayor flujo, más refrigera y, por el contrario, si hay un flujo menor, la evacuación de calor será también menor.

Además de estos factores también hay que tener en cuenta otros aspectos como la geometría, por ejemplo, o si el conjunto espira-papel está siendo refrigerado por los dos lados.

## 2.4 HUMEDAD EN EL SISTEMA DE AISLAMIENTO PAPEL-ACEITE

Los principales efectos de la humedad son la reducción del margen dieléctrico, disminución de la tensión de inicio de las descargas parciales, el riesgo de evolución de burbujas y el incremento en la tasa de envejecimiento de los aislamientos celulósicos. Este último es el más importante ya que, como ha sido explicado previamente, afectará directamente a la vida útil del transformador, reduciéndola. Por todo ello es necesario conocer y controlar el contenido en humedad de los transformadores, además de llevar a cabo labores de mantenimiento para asegurar unos niveles de humedad por debajo de los que puedan resultar dañinos para las estructuras de la máquina.

En el siguiente apartado se tratará tanto las fuentes de humedad como sus efectos sobre ambos aislamientos, sólido y líquido, así como su distribución y movimientos dentro de estos aislamientos. Todos estos aspectos están relacionados con la temperatura, por lo que este apartado se formula habiendo ya abordado los temas relacionados con el análisis de temperaturas dentro de la máquina.

### 2.4.1 Fuentes de humedad

El ingreso de agua en el interior de un transformador puede ser producto o subproducto de procesos tanto internos como externos. En la Figura 2.9 se muestran las diferentes fuentes de humedad que van a ser descritas a continuación.

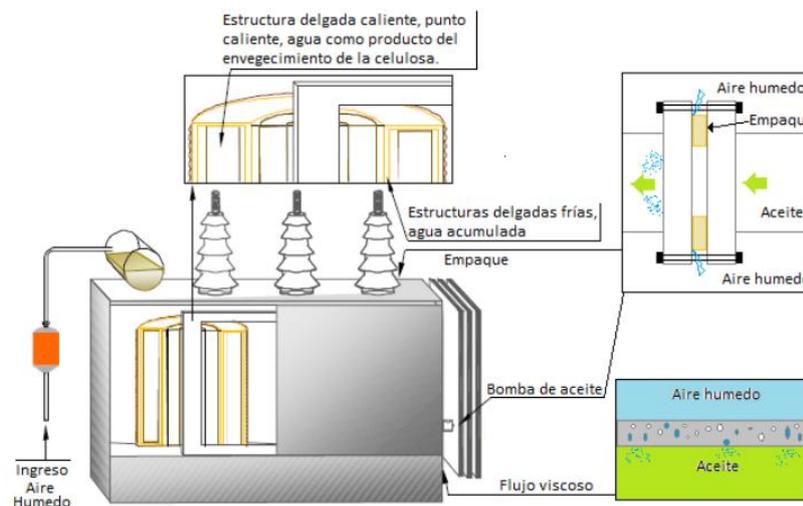


Figura 2.9 Fuentes de humedad en un transformador [7]

#### 2.4.1.1 Atmósfera:

Filtración de la humedad desde la atmósfera hacia el interior del transformador. Esto puede ocurrir de varias maneras:

- **Exposición directa:** cuando el aislamiento (papel o aceite) se expone directamente al aire de la atmósfera. Puede suceder durante la instalación o reparación.
- **Flujo de aire húmedo:** cuando la presión atmosférica es mayor que la del interior del transformador debido a la pérdida de estanqueidad de la cuba que provoca la disminución de la presión interna de la máquina. Esta filtración suele ocurrir en transformadores sellados herméticamente en los cuales el sello no es adecuado o hay deterioro en alguno de los elementos instalados en él. El sistema de bombeo del aceite crea una presión negativa en el interior que favorece el ingreso de humedad por el motivo nombrado anteriormente.

- Entrada de humedad a través del sistema de respiración del conservador de aceite.
- Flujo Knudsen: flujo molecular provocado por la diferencia de presión de vapor de agua entre el interior del transformador y la atmosfera, en forma de difusión gaseosa a través de poros y capilares en la cuba. Esto provoca el ingreso de humedad.

#### 2.4.1.2 Degradación del aislamiento celulósico

La celulosa es un polímero de condensación lineal que consiste en largas cadenas de glucosa unida por enlaces glicosídicos. Cuando el papel va envejeciendo, estas cadenas de monómeros se van rompiendo, disminuyendo así su grado de polimerización (DP) y su resistencia mecánica. Con este proceso de degradación, el aislamiento se ve dañado. Un papel nuevo tiene un DP del orden de 1000-1300, y se considera inservible en torno al valor 200, ya que supone un riesgo por la pérdida de sus propiedades.

El proceso de envejecimiento del papel se conoce como despolimerización. Hay algunos mecanismos que catalizan dicha despolimerización, debido a tres agentes: agua, oxígeno y calor. Dichos mecanismos de degradación son:

- Hidrólisis: Se trata del principal mecanismo de degradación del papel dieléctrico en los transformadores de potencia. Las cadenas de celulosa, en contacto con el agua se rompen dando lugar a la aparición de glucosa, que puede formar pentosas por oxidación y estas, compuesto furánicos (nocivos en presencia de la humedad). Cuando se rompen las cadenas de celulosa, además de dar lugar a cadenas más pequeñas, se produce agua, lo que aumenta aún más el contenido de humedad a lo largo de su vida. Parte de esa humedad producida es absorbida por el aislamiento líquido, dependiendo la cantidad del tipo de fluido que se use. Los ésteres absorberán más humedad que los aceites minerales, lo cual ayudará al papel a disminuir su contenido en humedad.
- Oxidación: El oxígeno afecta a los átomos de carbono de la molécula de celulosa debilitándola y liberando H<sub>2</sub>O, CO y CO<sub>2</sub>. Al liberarse agua, se acelera el mecanismo de hidrólisis y por tanto el deterioro. El oxígeno proviene tanto de la atmósfera como de la degradación del aislamiento, pero su efecto en el papel se agrava ante la presencia de catalizadores y aceleradores como la humedad y el cobre de los arrollamientos.

- **Pirolisis:** El calor y las altas temperaturas contribuyen a la descomposición de los monómeros individuales de la cadena de celulosa. La degradación térmica produce también agua, así como CO y CO<sub>2</sub>. Las altas temperaturas que se pueden alcanzar en un transformador pueden llegar a convertir el aislamiento celulósico en quebradizo y contraerlo, lo que lo deja susceptible a rotura en caso de una excesiva sollicitación mecánica.

Una vez explicados los mecanismos por los cuales se genera humedad durante el proceso de degradación de la celulosa, cabe destacar que el proceso de liberación de dicha agua es más intenso en las cercanías de los denominados “puntos calientes”.

#### **2.4.1.3 Humedad residual**

Corresponde a la humedad almacenada en las piezas aislantes gruesas (madera, cartones, entre otros) que son usadas como piezas estructurales, como sujeción para los demás componentes del transformador. Dicha humedad, no es eliminada durante su construcción, secado en fábrica (debido a las limitaciones de los procedimientos de secado o su duración), aunque también puede deberse al humedecimiento de la superficie del aislamiento cuando se realiza la instalación. Durante la operación del transformador, esta humedad residual es redistribuida espacialmente con la generación de calor al cabo de varios ciclos de carga. Es decir, la humedad se redistribuye, migrando hacia el aislamiento más delgado a través del aceite.

#### **2.4.2 Distribución de la humedad**

Como he mencionado previamente, debido a la naturaleza hidrofóbica del aceite y al carácter hidrófilo de la celulosa, el agua se absorbe principalmente en el aislamiento sólido del transformador en una proporción que depende de: la temperatura de aislamiento, la relación de masas entre el aceite y el papel aislante y del tipo de líquido aislante del transformador, es decir, aceite mineral, ésteres naturales o sintéticos. Por lo tanto, esta distribución depende de las condiciones de operación del transformador.

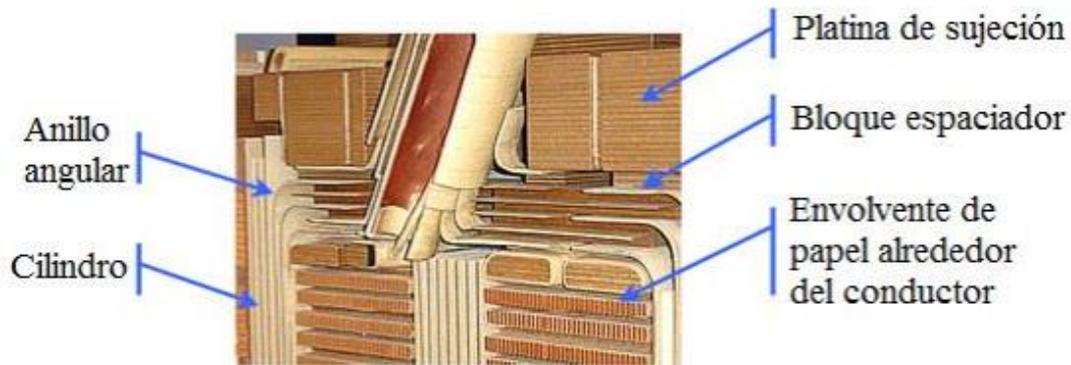


Figura 2.10 Principales componentes del aislamiento de un transformador [8]

En un transformador existen varios tipos de aislamientos sólidos (Figura 2.10) que tienen diferentes densidades y espesores que, en función de sus propiedades se utilizarán en diferentes lugares dentro del transformador.

- Delgados y fríos

Son principalmente los cartones prensados y todos los materiales dieléctricos que no estén en contacto directo con los conductores. La temperatura de estos aislamientos es aproximadamente la del aceite dieléctrico, y tienen una densidad media-baja.

- Delgados y calientes

Todos los aislamientos en contacto directo con los conductores, constituidos por papel dieléctrico con menor densidad. Tienen una temperatura aproximadamente igual a la del conductor.

- Gruesos

Piezas de mayor espesor que sirven para dar forma a la estructura interna del transformador, así como de sujeción. Tienen mayor densidad que los demás aislamientos y temperaturas bajas en comparación con los demás elementos del transformador.

Debido a la distribución no homogénea de la temperatura dentro del transformador durante su servicio, tal y como se explica en el apartado 2.4.3 en las zonas más calientes, la humedad se concentra en el aislamiento líquido. Por otro lado, en las zonas frías, la humedad estará concentrada en el aislamiento celulósico. Es por esto por lo que cada tipo de aislamiento tendrá un contenido de humedad diferente en función de su temperatura:

- Delgados y fríos

Al tener una temperatura muy parecida a la del aceite son un buen almacén para el agua que se intercambia con él.

- Delgados y calientes

Su elevada temperatura hace que tengan un contenido de humedad bajo. Además, tienen baja densidad, lo que se traduce en una mayor movilidad de las moléculas de agua a través de él. Al tener la misma temperatura que los conductores, su temperatura variará casi en la misma proporción que lo haga la temperatura de los conductores (debido al ciclo de carga). Por lo tanto, este aislamiento estará experimentando a lo largo de su vida útil repetidos intercambios de humedad con el aceite.

- Gruesos

Alrededor del 60% de la humedad del transformador está contenida en estos aislamientos, pero a pesar de esto, la dinámica de esa humedad es aproximadamente nula, ya que casi no tienen superficie de contacto con el aceite. Además, tienen una elevada densidad y trabajan a temperaturas más bajas, lo que hace que las constantes de tiempo de la difusión de la humedad sean aún más altas, tanto que no se tienen en cuenta.

### 2.4.3 Migración e intercambio de humedad entre los aislamientos

La distribución de la humedad entre el papel y el aceite no es estática, ya que a medida que aumenta la temperatura, la solubilidad del aceite en el agua aumenta mientras que la capacidad de adsorción de la celulosa disminuye dando lugar un proceso dinámico que obliga a las moléculas de agua a migrar de la celulosa al aceite. Cuando la temperatura disminuye, el proceso se invierte y el aislamiento sólido empieza a absorber las moléculas de agua del aceite.

La migración consiste en un proceso de adsorción y desorción en el cual la humedad se va moviendo entre los aislamientos sólidos y líquidos, dependiendo de las condiciones a las que estos estén sometidos.

La adsorción comienza en la superficie de los aislamientos celulósicos como se puede ver en la Figura 2.11. La celulosa está formada por fibras (Figura 2.12) entre las cuales existen poros

que son ocupados cuando las moléculas de agua entran en contacto con la mencionada superficie, quedando limitado su movimiento. Cuando todos los poros de la superficie están ocupados se forma una capa de moléculas de agua (monocapa), y es entonces cuando, si se sigue adsorbiendo humedad, las moléculas restantes obligan a las existentes en la monocapa a ser absorbidas por la siguiente capa más interna (multicapa). Este proceso seguirá hasta alcanzarse el equilibrio.



Figura 2.11 Fases de la absorción de la humedad

La desorción presenta un proceso parecido, pero desde el interior hacia el exterior del papel celulósico. No obstante, este proceso requiere de una energía de activación para poder desligar las moléculas de agua de los poros de la celulosa. Dicha energía es dada por un incremento de la temperatura, explicando así por qué al aumentar la temperatura del papel la humedad pasa del aislamiento sólido al líquido.

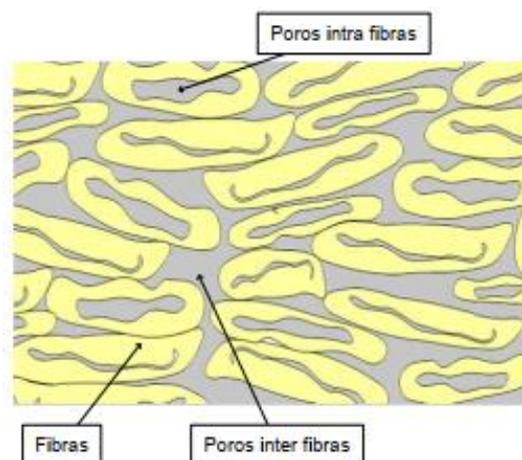


Figura 2.12 Estructura del aislamiento celulósico

Existen curvas de sorción isotérmica (Figura 2.13) que nos permite relacionar la saturación relativa con el contenido en agua (ambos en tanto por ciento). En la curva se puede observar la histéresis de los procesos tanto de absorción como de desorción provocada por la energía de activación para la desorción. Dentro de estas curvas cabe destacar que presentan tres zonas: la primera estaría relacionada con los procesos monocapa, la segunda se corresponde con los procesos multicapa (ambos explicados anteriormente), mientras que la tercera muestra altos valores de humedad donde el agua estaría libre debido a sus altos niveles de saturación.

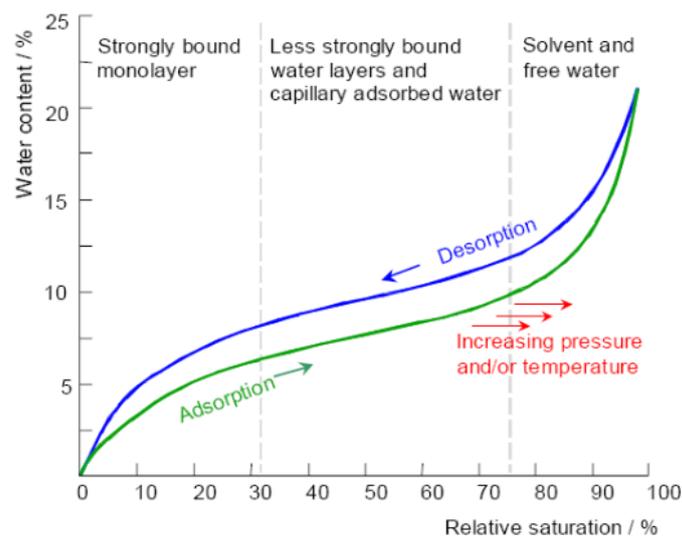


Figura 2.13 Curva de sorción isotérmica [9]

El aceite usado en transformadores tiene poca afinidad con el agua, puede absorber en disolución una cierta cantidad de partes por millón (ppm) conocido como límite de saturación, una vez sobrepasado dicho valor el agua pasaría a estar en forma libre. El límite de saturación de agua en el aceite se incrementa con la temperatura.

Por lo tanto, la humedad en un transformador está repartida entre el papel y el aceite en función de la temperatura a la que se encuentran ambos medios. Así pues, cualquier variación de dicha temperatura implicará una redistribución de la humedad buscando un equilibrio que se alcanza cuando se igualan las saturaciones relativas de ambos medios.

Como consecuencia de lo explicado en el párrafo anterior, la humedad dentro del transformador tendrá dos movimientos que se alternarán en función de la temperatura, tal como se muestra en la Figura 2.14. Cuando la temperatura asciende, la capacidad de absorción de agua por parte de la celulosa disminuye, y el límite de saturación de agua en el aceite aumenta. Esto hará que haya un flujo de moléculas de agua desde el aislamiento sólido al líquido. Si, por el contrario, la temperatura disminuye, la celulosa aumentará su capacidad para absorber agua mientras que la solubilidad del agua en el aceite disminuirá. Por lo tanto, si la temperatura baja, hará que la humedad fluya desde el aceite hacia el papel.



Figura 2.14 Esquema de la dinámica de humedad

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

En los apartados previos se ha explicado tanto la generación como la transferencia del calor en los diferentes elementos que componen el transformador y cómo funciona el transporte de las moléculas de agua entre los aislamientos sólido y líquido. En este apartado se explica la dependencia que tiene la difusión de la humedad del modelo térmico.

Las moléculas de agua se mueven entre los aislamientos del transformador siguiendo un modelo matemático gobernado por la Segunda Ley de Fick (2.6).

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (2.6)$$

Siendo  $c$  la concentración de humedad expresada en porcentaje de peso del papel seco,  $t$  el tiempo,  $D$  el coeficiente de difusión y  $x$  la distancia en el material en la dirección de movimiento de la humedad, de esta manera queda definido el movimiento de la humedad.

El coeficiente de difusión del papel celulósico impregnado (2.7) presenta una dependencia de la concentración local de humedad  $c$ , de el espesor del aislamiento  $l$ , y de la temperatura del aislamiento  $T$ , [8]. El coeficiente de difusión es una propiedad del papel aislante, y por lo tanto será diferente en cada punto del papel en función de estas tres variables. Es por esto por lo que, si el coeficiente de difusión de la humedad depende de la distribución de temperaturas en el papel celulósico, la concentración de humedad también lo hará. Además, la expresión del coeficiente de difusión depende del tipo de papel o el nivel de envejecimiento, dichas expresiones son determinadas a partir de datos experimentales. En este caso se usará el coeficiente de difusión correspondiente a papeles envejecidos impregnados en aceite mineral (2.7) determinada en [8].

$$D(c, T, l) = 0.5 \cdot e^{\left[0.5 \cdot c - \frac{10193 - 264.7 \cdot l}{T}\right]} \quad (2.7)$$

Para estudiar la dinámica de la humedad entre el papel-aceite se debe conocer el contenido en humedad del aislamiento celulósico, pero como previamente se ha explicado en el apartado 2.4.3 este contenido varía a lo largo del tiempo dependiendo de la temperatura de la interfase.

Para demostrar teóricamente la relación temperatura-humedad, se explicará sobre un caso de una dimensión en el cual las moléculas de agua se mueven sólo en dicha dimensión. Así, dadas unas concentraciones iniciales tanto para el aislamiento celulósico (%) como para el aceite (ppm) y la distribución de temperaturas en el papel podemos obtener la concentración

final de humedad en el papel a través de las curvas de equilibrio (Figura 2.15). Estas curvas establecen el reparto del agua entre la celulosa y el aceite en función de la temperatura, cuando hay equilibrio; es decir, se igualan las saturaciones relativas en los dos medios y por tanto no existe intercambio de humedad entre ellos.

El uso de las curvas de equilibrio conlleva aceptar que el sistema no va a ser perturbado hasta que llegue al equilibrio entre las concentraciones relativas de humedad del papel y del aceite. En la realidad, la temperatura del transformador está relacionada con la carga y la temperatura ambiente y, por lo tanto, las condiciones de equilibrio no serán logradas estrictamente. Además, para el uso de estas curvas se supondrá que la concentración en la interfase papel-aceite alcanza el equilibrio instantáneamente. Esto se debe a que, en la celulosa, las moléculas de agua se mueven por capas (apartado 2.4.3), y la primera capa se corresponde con la interfase papel-aceite independientemente de la dirección de las moléculas de agua. Por lo tanto, se puede considerar que la primera capa que alcanza el equilibrio de humedad es la interfase.

Numerosos investigadores han propuesto curvas de equilibrio, siendo estas curvas aproximaciones a la curva de sorción isotérmica mostrada en la Figura 2.13. Las curvas de equilibrio que serán usadas en este trabajo fueron las obtenidas usando el método propuesto por Oommen en [10].

El principio de este método se basa en que el contenido relativo de humedad en materiales adyacentes se iguala bajo condiciones de equilibrio (2.8).

$$W_{rel,cel} = W_{rel,oil} = RH \quad (2.8)$$

Siendo  $W_{rel,cel}$  el contenido relativo de humedad de la celulosa,  $W_{rel,oil}$  el contenido relativo de humedad del aceite en partes por millón (ppm), y  $RH$  la humedad relativa del aire. De esta manera las curvas de equilibrio se pueden determinar mediante la combinación de las curvas de humedad en aceite – humedad relativa en aire con las de humedad en papel - humedad relativa en aire obteniendo un solo conjunto de isoterma como las de la Figura 2.15.

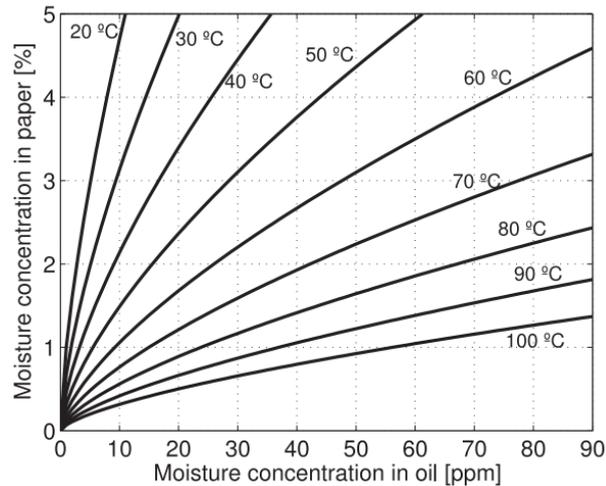


Figura 2.15 Curva de equilibrio Oommen

Para poder ver analíticamente la dependencia térmica de la concentración de humedad existen varias parametrizaciones de estas curvas. En este estudio utilizaremos la propuesta por Fessler en [11] (2.9).

$$C_{equil} = 2.173 \cdot 10^{-5} \cdot p_v^{0.6685} \cdot e^{\left(\frac{4725.6}{T}\right)} \quad (2.9)$$

Donde  $C_{equil}$  es la concentración de equilibrio en el papel expresada en %,  $T$  es la temperatura en la interfase papel-aceite y  $p_v$  es la presión parcial del vapor de agua en atmosferas que puede ser calculada a partir de la humedad relativa del aceite  $RH$  (2.10).

$$p_v = RH \cdot p_{v,sat} = \frac{ppm}{ppm_{sat}} \cdot p_{v,sat} \quad (2.10)$$

Donde  $ppm$  es la concentración de humedad expresada en partes por millón ( $ppm$ ), la cual será explicada posteriormente,  $ppm_{sat}$  es la concentración de humedad en el aceite en condición de saturación (atm) y  $p_{v,sat}$  la presión parcial del aceite en condición de saturación (atm), la cual puede ser calculada por la relación propuesta por Foss en [12] (2.11).

$$p_{v,sat} = \frac{P_c}{760} \cdot 10^{\left[ \left( \frac{T_{ex}-T_c}{T_{ex}} \right) \cdot \left( \frac{a+b \cdot (T_c-T_{ex})+c \cdot (T_c-T_{ex})^3}{1+d \cdot (T_c-T_{ex})} \right) \right]} \quad (2.11)$$

$ppm_{sat}$  puede ser calculada por la relación de Foss (2.12) explicada en [12].

$$\log(ppm_{sat}) = A - \frac{B}{T} \quad (2.12)$$

Donde A y B son constantes que dependen del tipo de aceite mineral y de las condiciones de envejecimiento consideradas en el estudio [9], siendo  $A = 7.09$  y  $B = 1567$  para aceite mineral nuevo.

De esta manera queda definida la parametrización de la curva de equilibrio mediante la cual se expresa la dependencia térmica de la humedad. Como se puede apreciar en la (2.9), la concentración de equilibrio también está relacionada con la temperatura, pero en este caso dependerá de la temperatura en la interfase papel-aceite.

Por otro lado, la concentración de humedad tanto en el papel como en el aceite afectará a sus propiedades básicas (Figura 2.16) tales como densidad, viscosidad o capacidad térmica a presión constante, cerrando así el círculo de interdependencia térmico-humedad.

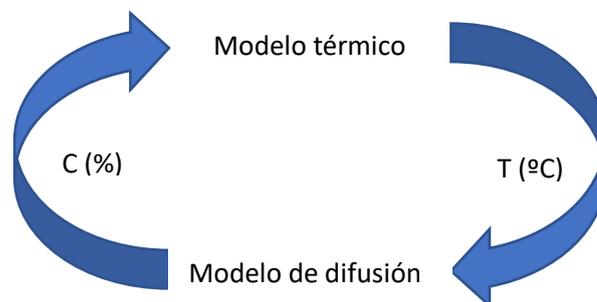


Figura 2.16 Esquema interrelación

Es por esto por lo que en un principio consideraremos la difusión de las moléculas de agua para una carga del transformador determinada y constante a lo largo del tiempo. De esta manera, podremos ver la dependencia térmica de la concentración de humedad.



### 3 PROPUESTA PARA EL MODELIZADO FEM ACOPLADO PARA ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DE TEMPERATURA Y HUMEDAD EN EL TRANSFORMADOR

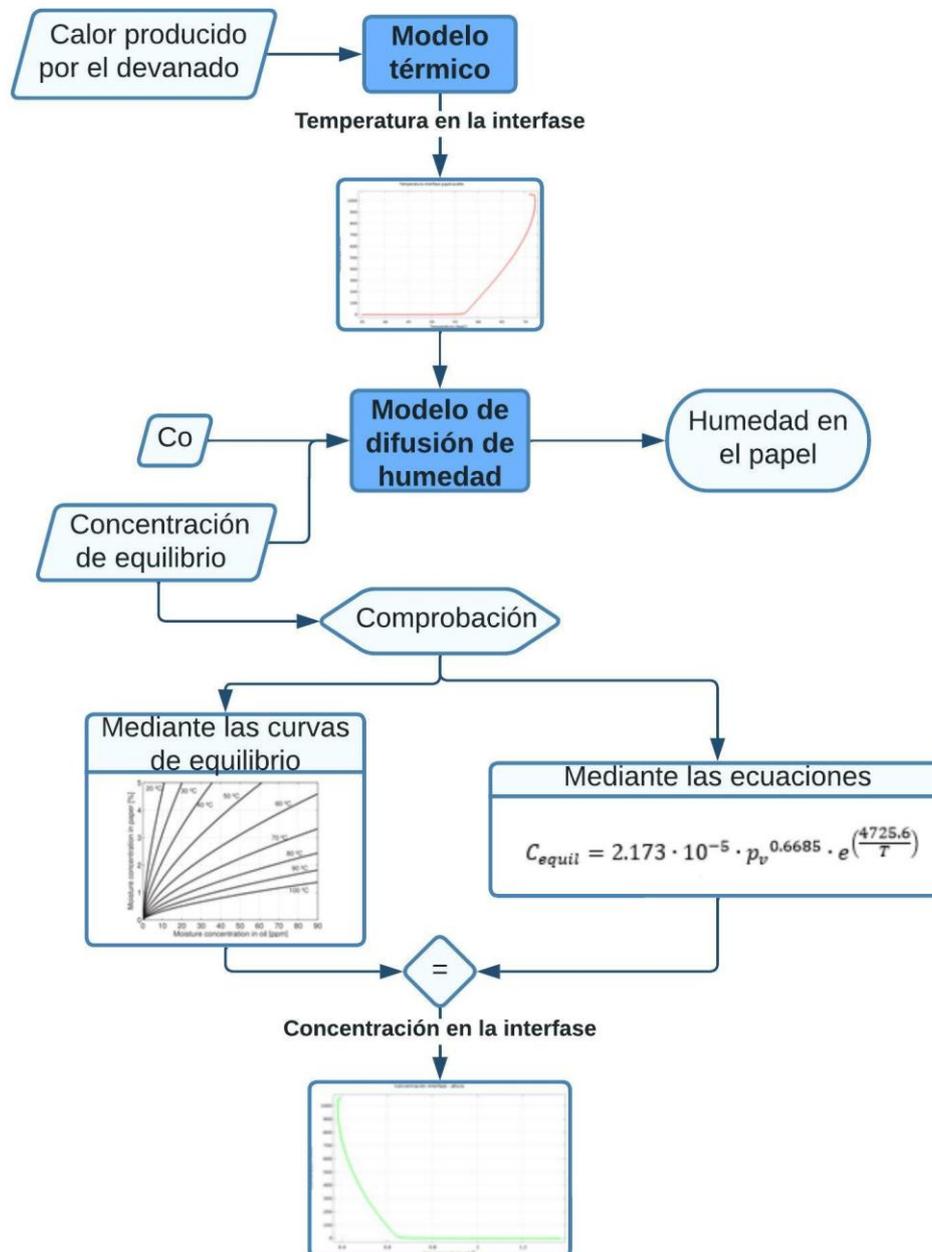
Como se ha explicado en el apartado 2.5, la física de transferencia de calor y la de difusión de la humedad están relacionadas. Esta interdependencia es mutua. Es decir, la concentración de humedad en los aislamientos sólido y líquido depende de la temperatura a la que se encuentren estos. Por otro lado, la distribución de temperaturas también está condicionada por la concentración de humedad ya que las propiedades físicas tanto del papel celulósico como del aceite se ven afectadas por el contenido en humedad en ellos.

En este trabajo se estudia el acoplamiento unidireccional entre estas dos físicas. Se acoplará el modelo térmico al modelo de difusión, dejando el acoplamiento humedad-temperatura para posteriores trabajos. El acoplamiento se estudiará tanto en régimen permanente como en régimen transitorio. Ambos modelos se estudiarán con la simplificación de que la concentración de moléculas de agua en la interfase papel-aceite es la misma que la concentración de humedad cuando el sistema se equilibra (apartado 2.5), lo cual se modela con las curvas de equilibrio.

El acoplamiento se estudiará en régimen permanente y en el dominio del tiempo. Cada uno de estos estudios tiene una finalidad diferente y, por ello, requiere de un modelizado diferente.

La concentración de equilibrio en la interfase variará para cada instante de tiempo ya que dicha concentración depende de la concentración de humedad media en toda la geometría del papel, la cual va evolucionando a cada instante de tiempo. Es por esto por lo que, además de analizar la evolución a lo largo del tiempo, para estudiar el acoplamiento de las físicas se ha de hacer un análisis temporal. Una vez explicado esto, las ecuaciones que parametrizan las curvas de equilibrio de humedad según la física de transporte de especies diluidas han sido propuestas por varios autores, en este caso se utilizarán las propuestas por Fessler en [11]. Es por esto por lo que se comprueba la validez de dichas ecuaciones comparándolas con las curvas de equilibrio de Oommen (a las cuales están representando).

Así, tal como se aprecia en el Flujograma 3.1, con el modelo estacionario se pretende validar la distribución de concentraciones en la interfase papel-aceite obtenida numéricamente, mediante su comparación con la obtenida analíticamente a través de las curvas de equilibrio de Oommen.

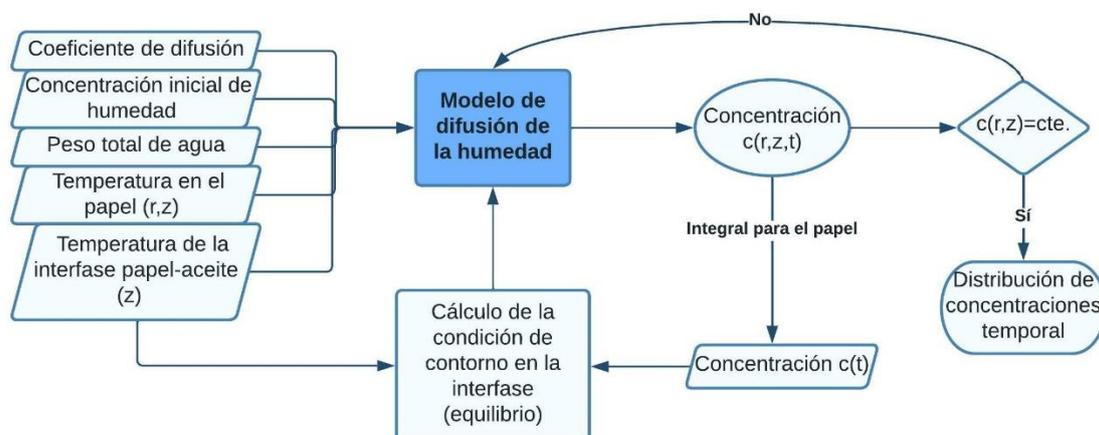


Flujograma 3.1 Flujograma del modelo de régimen permanente

La entrada del modelo térmico es la potencia disipada en forma de calor a través de las espiras, las cuales están en contacto directo con el papel celulósico transmitiéndole así el calor por conducción. El aceite a su vez está en contacto con el papel y lo refrigera produciéndose un flujo por convección en el aceite. Tras procesar el modelo térmico, obtendremos la distribución de temperaturas a lo largo de todos los materiales y, específicamente en la interfase papel-aceite en la cual se podrá definir una temperatura que irá aumentando conforme a la altura.

Posteriormente, como se está suponiendo que la interfase papel-aceite alcanza el equilibrio instantáneamente, se procede a calcular la concentración de equilibrio en la interfase. Por ello, sabiendo la temperatura en cada punto de la interfase y suponiendo unas condiciones iniciales de humedad en el papel, se puede obtener la concentración de equilibrio a través de las ecuaciones de equilibrio ( $C_{equil}$ ), las cuales no consideran la variación de la concentración de humedad en el aceite (en este modelo) ya que, al ser estacionario, no se puede analizar la variación cada instante de tiempo. Una vez obtenido esto, se comparan los resultados de las curvas de la concentración en la interfase obtenidos con a expresión matemática que se utiliza en COMSOL con los valores extraídos de las curvas de equilibrio de Oommen. De esta manera se demuestra la validez de la expresión paramétrica de las curvas de equilibrio.

Con el estudio temporal, se analiza la evolución de la concentración de humedad en el papel considerando que el sistema dieléctrico ha alcanzado el equilibrio termo-hidráulico. Para ello, se ha desarrollado el modelo numérico representado mediante el Flujoograma 3.2.



Flujoograma 3.2 Flujoograma del acoplamiento temporal

En el modelo temporal se realiza un doble acoplamiento, ya que el coeficiente de difusión de humedad del papel celulósico depende de la temperatura a la que se encuentre, por lo tanto, dicho coeficiente será distinto para cada punto del aislamiento celulósico.

Por esto, el primer acoplamiento consistirá en introducir una variable en el modelo de difusión que represente la distribución de temperaturas de todo el papel aislante. Esto se realiza representando en el modelo térmico la distribución de temperaturas en la geometría que representa el papel y exportando los resultados en un archivo el cual contiene las temperaturas en cada punto con sus coordenadas. COMSOL, determina 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 referirse a la temperatura en un punto del papel celulósico.

Por otro lado, el segundo acoplamiento se debe a las ecuaciones que definen la condición de contorno en la interfase papel-aceite. Estas ecuaciones, que dependen de la temperatura, establecen que la concentración de humedad en dicha interfase es igual a la concentración de equilibrio. Por lo tanto, es necesario obtener la distribución de temperaturas en la mencionada interfase. Para esto se representa la temperatura de la interfase en función de la altura en el modelo térmico y se exporta como se ha hecho con la distribución de temperaturas en el papel. Posteriormente en el modelo de difusión se importa en otra función de interpolación el archivo en el cual aparecerán las diferentes alturas (con una alta precisión gracias a la malla utilizada en el modelo térmico) con sus respectivas temperaturas. De esta manera tendremos una segunda función que representará la temperatura en la interfase solamente dependiente de la altura  $z$  expresada en milímetros, necesaria para calcular la concentración de equilibrio en la interfase.

Posteriormente, mediante las ecuaciones parametrizadas de concentración de equilibrio, el modelo de difusión de la humedad calcula la concentración de humedad para cada punto (con las coordenadas  $r$  y  $z$ ) y en cada instante de tiempo. Para cada instante la concentración de humedad en el aceite (ppm) depende de la concentración de humedad de todo papel (%), por lo tanto, se integrará para la concentración de humedad en el volumen de papel considerado.

De esta manera se podrá recalcular para cada instante de tiempo la concentración de equilibrio en la interfase papel-aceite (dependiente de la ppm). En el momento en que todo el papel alcance la misma concentración de humedad se habrá llegado al estado de equilibrio, en el cual la humedad ha quedado distribuida entre el papel y el aceite uniformemente.

Los dos estudios previamente descritos se aplicarán en el modelo numérico que se detalla en el siguiente apartado. Así, el modelo estacionario se aplicará para un nivel de carga nominal y humedad de 2,5% en el papel y 3ppm en el aceite. Con respecto al modelo temporal, se aplicará para diferentes niveles de carga (25%, 50%, 75%, 100% y 120% de la potencia nominal) del transformador y diferentes niveles de humedad: seco, húmedo y extremadamente húmedo según la normativa del CIGRE 349, [13].

## 4 MODELIZACIÓN NUMÉRICA DEL ACOPLAMIENTO ENTRE EL MODELO TERMOHIDRÁULICO Y DE DIFUSIÓN DEL SISTEMA DIELECTRICO DE UN TRANSFORMADOR

En este apartado se describen los diferentes aspectos que es necesario tener en cuenta para realizar el acoplamiento entre dos modelos numéricos de simulación.

El primer modelo estudia el comportamiento termo-hidráulico de una sección del bobinado de baja tensión de un transformador de potencia trifásico el cual se muestra en la Figura 4.1 (sólo se tendrá en cuenta una de las fases). En régimen nominal, las características eléctricas de este transformador son 14 MVA, 66/6.3 kV, Dyn11 y refrigeración ONAN (en inglés, *Oil Natural-Air Natural*, lo cual significa que la circulación del aceite y del aire se realiza por convección natural).

El segundo modelo estudia la difusión de humedad en la mencionada sección en función de la temperatura que soporta.

Señalar que varios de los apartados a definir son comunes a ambos modelos: la geometría (apartado 4.1), los materiales (apartado 4.2) y el mallado (apartado 4.3) de ambos modelos son compartidos. Por ello, se presentan de manera independiente.

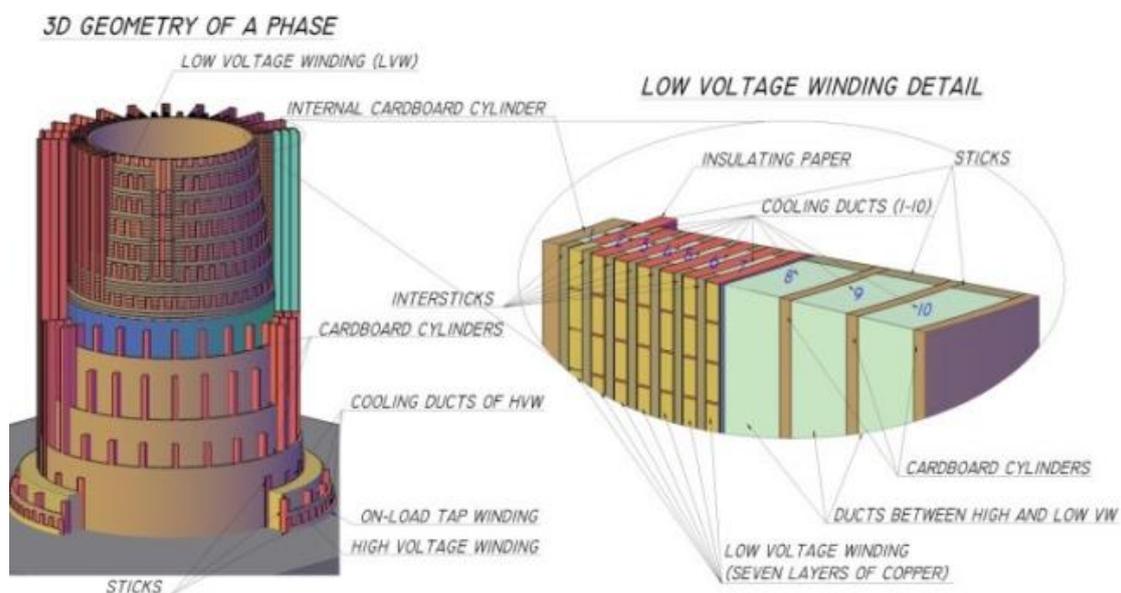


Figura 4.1 Modelo de transformador a estudiar [14]

El acoplamiento multifísico se llevará a cabo utilizando la herramienta informática basada en elementos finitos *Comsol Multiphysics 5.5*.

#### 4.1 GEOMETRÍA

La geometría considerada en este modelo se basa en la sección transversal del devanado de baja tensión del transformador mostrado en la Figura 4.1, realizando varias simplificaciones que se explicarán a continuación. Esto se debe a que la geometría real es más compleja y considerarla en detalle implicaría un coste computacional y temporal no justificable en esta fase preliminar del estudio, donde el objetivo principal es acoplar las dos físicas (térmica y de difusión de la humedad).

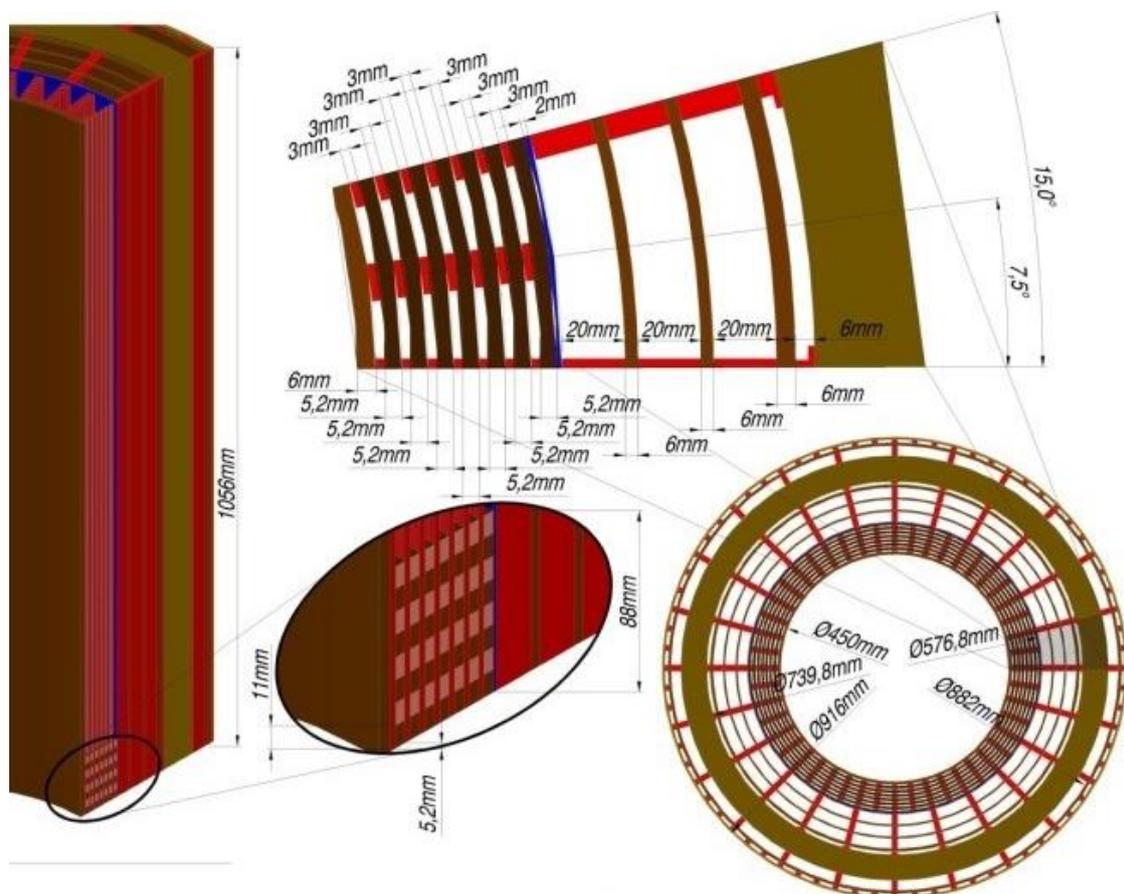


Figura 4.2 Geometría acotada transformador modelo [14]

Como se puede apreciar en la Figura 4.2, el bobinado de baja tensión se compone de un cilindro interno de cartón (6 mm de espesor y 450 mm de diámetro interior) rodeado de 7 capas concéntricas con 11 espiras de cobre por capa. Cada espira tiene 8 pletinas en paralelo (dimensiones de las placas: 10,4 mm x 4,6 mm) que están envueltas con un papel dieléctrico de 0,3 mm de ancho. Las capas están separadas por medio de 48 listones de madera intermedios de 3 mm de grosor. De este modo, 48 conductos de refrigeración de 7,5 grados de amplitud se crean entre el cilindro interno y la primera capa, otros 48 canales de refrigeración entre la primera capa y la segunda, y así sucesivamente. Finalmente, el transformador está compuesto de 11 bobinas de 8 espiras cada una, las cuales tienen una altura de 12 mm cada una. Por lo tanto, la altura total altura del bobinado de baja tensión es de 1056 mm (4.1).

$$h = 12 \times 8 \times 11 = 1056 \text{ mm} \quad (4.1)$$



Figura 4.3 Detalle de las espiras envueltas en papel (COMSOL)

La Figura 4.3 presenta la parte superior de la sección transversal a estudiar, resultado de seccionar la última capa del devanado de baja tensión y considerar el primer canal separador entre devanados de alta y baja tensión. Es decir, comenzando por la izquierda, se representa un conductor cilíndrico de la anchura correspondiente a una espira envuelto en papel dieléctrico, refrigerado por aceite que fluye por un canal vertical, además de un cilindro de cartón correspondiente al aislamiento sólido que permite construir el mencionado canal vertical.

Esta geometría está realizada considerando una serie de simplificaciones que se presentan a continuación y se representan en la Figura 4.4:

- En la realidad, las espiras están encintadas con papel en todo su perímetro, tal como se aprecia en la Figura 4.3. En cambio, en la geometría del modelo sólo he definido papel dieléctrico en el lado del cobre en el que vamos a estudiar el fenómeno de transmisión de temperatura. Es decir, se ha eliminado el papel de encintado entre espiras y el del lado izquierdo de la capa.

El papel entre espiras se puede eliminar basándose en que, debido a su bajo grosor, el gradiente de temperatura entre espiras contiguas será muy pequeño, pudiendo considerar que sus superficies enfrentadas tienen la misma temperatura y, por lo tanto, no hay transferencia de calor a través del papel.

Sin embargo, en los laterales, al tener los conductos de refrigeración con aceite, habrá un gradiente de temperatura a lo largo de la sección del papel dieléctrico lateral. De las dos capas de papel laterales no se ha representado la interna (lado izquierdo), ya que estará peor refrigerada al compartir conducto de refrigeración con la capa más interna asumiendo esta simplificación para poder considerar la difusión de la humedad en una sola interfase y de esta manera no complicar los cálculos en exceso. No obstante, su refrigeración será simulada con un flujo de calor. Además, y según lo explicado en el apartado 2.4.3, el movimiento que realizan las moléculas de agua se lleva a cabo en la interfase papel-aceite, y es un movimiento perpendicular a esta (en la geometría sería un movimiento radial).

Por todo esto, se han unificado las secciones de las diferentes espiras de cobre de la capa en una sola (5.2 mm de ancho), la cual está encintada por el lado derecho con una capa de aislamiento celulósico (2 mm de ancho).

- Seguido a este bloque conductor-papel, se ha representado el conducto de refrigeración de 20 mm de ancho por el que circulará el aceite dieléctrico de ancho.
- Se ha asumido un flujo de calor saliente de  $250 \text{ W/m}^2$  en el contorno interior del cobre para simular la refrigeración que aporta el conducto de aceite interior.
- No se representa el resto del bobinado de baja tensión, obviando de esta manera su influencia sobre la distribución de temperaturas a calcular.

- Por último, se ha obviado la influencia del devanado de alta tensión sobre la distribución de temperaturas a calcular al estar separado de la interfase papel-aceite a estudiar por dos anchos canales, que se pueden entender como volúmenes adiabáticos.

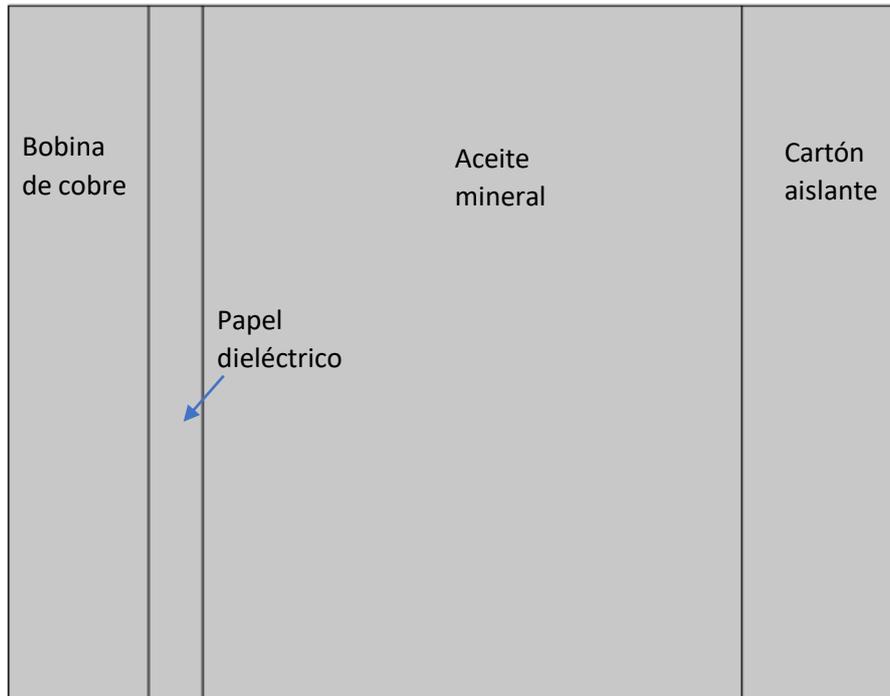


Figura 4.4 Geometría simplificada (COMSOL)

Posteriormente en el Anexo 8.1 se aportarán más detalles de la geometría escogida, así como planos de AutoCad con sus correspondientes acotaciones y fotografías del transformador.

## 4.2 MATERIALES

Tal y como se ha explicado en la geometría, este modelo simplificado consta de 4 materiales:

- Cobre: modelado con la biblioteca de materiales de COMSOL en la que ya vienen definidas sus características.

- Papel: el modelo utiliza las propiedades de la cinta de poliamida, material existente en la biblioteca de materiales en COMSOL (Kapton HN (Polyimide tape) [solid]) y cuyas propiedades son dependientes de la temperatura, pero presentan una pequeña variación.
- Aceite mineral: las propiedades de este líquido son dependientes de la temperatura y han sido obtenidas de [15].
- Cartón: las propiedades se consideran constantes y se han obtenido de [15].

Tabla 4.1 Propiedades termo-hidráulicas

	Conductividad térmica, $k$ W/(m · K)	Densidad, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico, $C_p$ J/(kg · K)	Viscosidad dinámica, $\mu$ (m <sup>2</sup> /s)
Cobre	400	8960	385	—
Papel	≈0.19	≈930	≈1340	—
Aceite	0.125	$875.6 - 0.63 \cdot T$	$1960 + 4.0005 \cdot T$	$\rho_{AM} \cdot 10^{(-4.726 - 0.0091 \cdot T)}$
Cartón	0.19	930	1340	—

### 4.3 DISCRETIZADO (MALLADO)

El mallado permite la desratización de la geometría en pequeñas unidades de formas simples, denominadas elementos de malla. Para poder mallar el modelo, después de haber creado la geometría se debe formar una unión entre los diferentes elementos definidos (cobre, papel, aceite y cartón). Esto permite crear un mallado continuo a lo largo de la geometría.

Como nuestra intención es determinar la temperatura y la concentración de humedad en el sistema dieléctrico, la malla en el papel debe de ser fina, así como la malla de la parte del aceite que colinda con el papel para capturar de manera eficiente los gradientes de temperatura y velocidad que ocurren en esta zona.

Al tener un espesor muy pequeño (2 mm), la malla del papel dieléctrico deberá de ser más fina. Para poder combinar una malla pequeña pero que a la vez sea precisa, se ha optado por definir una malla cuadrática con una escala de 0.5 en el eje  $r$  y 10 en el eje  $z$ . De esta manera

se ha dividido horizontalmente el papel en 8 elementos. Además, para obtener una mayor precisión se ha usado una “capa límite de contorno” la cual nos permite acumular más nodos en las partes del material más cercano a un cierto contorno, como se puede apreciar en la Figura 4.5 (en nuestro caso el contorno es la interfase papel-aceite).

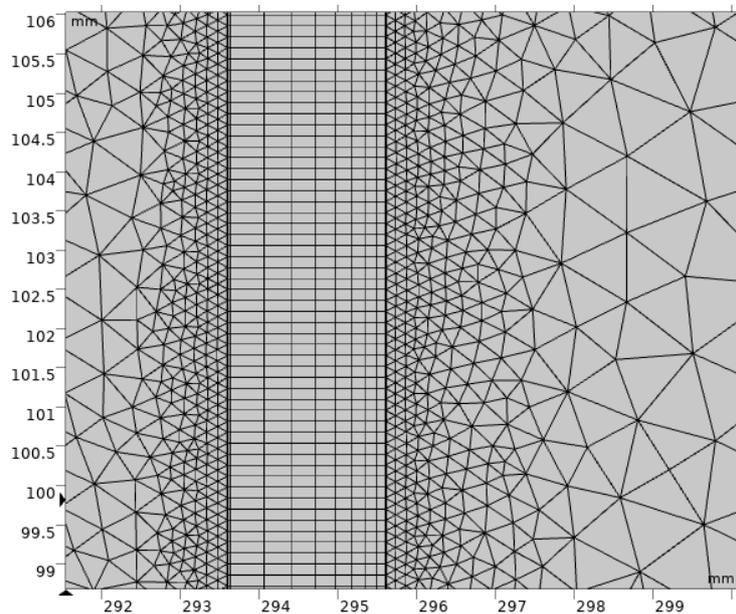


Figura 4.5 Malla

Por otro lado, para el cobre y el aceite-cartón he creado dos mallas triangulares libres. La del cobre más gruesa (con un escalado mayor) ya que no nos interesan las variables temperatura y concentración de humedad en este material y así ahorramos recursos computacionales a la hora de resolver el modelo. Por último, la malla del aceite y del cartón ha sido escalada en ambos ejes (r y z) a 0.5 lo cual nos permite una precisión ligeramente más fina. Además, como previamente se ha aplicado la “capa límite de contorno” y estamos trabajando sobre un mallado continuo, el mallado será más fino en la interfase, al igual que en el papel, tal y como se observa en la Figura 4.5.

#### 4.4 MODELO TERMO-HIDRÁULICO DEL SISTEMA DIELECTRICO

En el presente apartado se expondrán los diferentes aspectos del modelo termo-hidráulico que son necesarios definir para la obtención de su distribución de temperaturas. Se modelizará el comportamiento térmico del sistema sin considerar la dependencia de la transferencia de calor de la humedad, simplemente se obtendrá la mencionada distribución de temperaturas a partir de la generación de calor por acción de las pérdidas en el cobre. Se explicarán los siguientes aspectos: base teórica del modelo, condiciones de contorno consideradas, valores iniciales y fuente de calor, tipo de estudio realizado, y posprocesado y análisis de resultados.

##### 4.4.1 Base teórica del modelo (ecuaciones de gobierno)

Como ya se ha mencionado, el objetivo de este modelo numérico es la obtención de la distribución de temperaturas en el sistema dieléctrico papel-aceite. Por este motivo, se considera la interacción fluido-térmica, que se basa en dos físicas diferentes, transferencia de calor y mecánica de fluidos, pero que se encuentran acopladas entre sí a través de la dependencia de la temperatura de las propiedades de los materiales.

En primer lugar, tenemos 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 convección y conducción, principalmente. El calor emitido por los devanados dependerá de la carga, la cual, en un transformador tendrá variaciones a lo largo del día, pero en este caso el calor generado será estudiado como si fuera constante ya que esto facilitará el análisis de difusión de la humedad. No obstante, se simulan las condiciones de diferentes cargas (25%, 50%, 75%, 100%, 120% de la carga nominal) para poder analizar diferentes regímenes de funcionamiento.

Como se ha explicado en el apartado 2.3.2, la conducción se produce entre sólidos con un gradiente de temperatura y en contacto entre sí. El calor que se transmite de la zona con mayor temperatura a la de menor es proporcional a la superficie de contacto y al gradiente de temperatura.

Por otro lado, la convección se dará entre el aislamiento sólido y el líquido, debido a la diferencia de temperaturas, en este caso la convección será natural, dotando de una velocidad mínima de entrada al fluido (0.001 m/s).

Este modelo de transferencia de calor se basa en un balance de energía (4.2). Esta ecuación se aplica en todos los materiales, incluido el aceite:

$$\rho \cdot C_p \cdot \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q \quad (4.2)$$

$$\mathbf{q} = -k \nabla T$$

Donde  $\mathbf{u}$  es el campo de velocidades,  $k$  es la conductividad térmica,  $C_p$  el calor específico a presión constante,  $\rho$  es la densidad del material,  $T$  la temperatura y  $Q$  la generación de calor por unidad de volumen. En el caso del aceite refrigerante, la densidad, la viscosidad, la conductividad térmica y el calor específico son dependientes de la temperatura.

Para realizar el análisis del movimiento del fluido, que será con flujo laminar y no isotérmico, la herramienta recurre a las ecuaciones de Navier-Stokes para un flujo débilmente compresible en dos dimensiones. Estas ecuaciones se basan en la conservación de la cantidad de movimiento y la conservación de la masa, tal como se muestra en las expresiones (4.3) y (4.4):

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mathbf{K}] + \mathbf{F} \quad (4.3)$$

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

$$\nabla \cdot (\rho\mathbf{u}) = 0 \quad (4.4)$$

Donde la densidad ( $\rho$ ) y la viscosidad dinámica ( $\mu$ ) son dependientes de la temperatura.  $p$  es la presión,  $\mathbf{I}$  es la matriz identidad y  $\mathbf{F}$  el vector de fuerza del cuerpo.

#### 4.4.2 Condiciones de contorno

Para acabar de definir el modelo y poderlo resolver es necesario especificar las condiciones de contorno. Como se realiza un modelo multifísico acoplado (Transferencia de calor en

sólidos y fluidos y Flujo laminar) se ha de definirse las condiciones de contorno de cada una de las físicas.

Para Transferencia de calor en sólidos y fluidos:

- Superficies adiabáticas: aislamiento térmico (4.5) de los todos los contornos excepto el de entrada del aceite, la parte interna del cobre y la parte superior del cobre y el papel celulósico.

$$-n \cdot q = 0 \quad (4.5)$$

- Temperatura de entrada (4.6):  $T_{inlet} = 35^{\circ}\text{C}$  en la entrada de aceite (contorno inferior).

$$T = T_{inlet} \quad (4.6)$$

- Flujo de calor interno (4.7). Esta condición permite simular la refrigeración del cobre por el canal interno (de menor tamaño). Para las cargas del 120%, 100%, 75% y 50% de la potencia nominal se supone el mismo valor de flujo entrante de calor general de  $-250 \text{ (W/m}^2\text{)}$ . De esta manera se desprecia la variación de la capacidad refrigerante del canal de refrigeración anterior al cobre, ya que el objeto de simular diferentes potencias es el de analizar el comportamiento de la humedad bajo diferentes condiciones térmicas. Para la carga de 25% de la nominal el valor será de  $-150 \text{ W/m}^2$ , esto se hace con el objetivo de que el calor disipado no sea tan grande como para que el aceite se enfríe por debajo de la temperatura de entrada. El valor negativo se debe a que, para simular la refrigeración, el flujo de calor debe de ser saliente con respecto al cobre.

$$-n \cdot q = q_0 \quad (4.7)$$

- Flujo de calor (4.8). Esta condición permite simular la evacuación de calor tanto del cobre como del papel al aceite de la cuba, se supone una tasa de calor de  $20 \text{ W}$  salientes. Esta suposición se basa en que al simular aire se suele suponer una

evacuación de calor de  $-10 \text{ W}$ , pero como el aceite mineral es un mejor medio refrigerante, será capaz de evacuar más calor.

$$-n \cdot q = q_0 \quad (4.8)$$

Para Flujo laminar:

- Pared. A las paredes del conducto de aceite se le impone la condición de no deslizamiento. Es decir, el fluido en contacto con la pared no posee velocidad (4.9).

$$u = 0 \quad (4.9)$$

- Velocidad de entrada. Con esta condición se define la entrada de aceite a una velocidad dada de,  $v_0 = 1 \text{ (mm/s)}$ . Esta velocidad intenta simular el movimiento del fluido por convección natural del aceite a través del conducto. Así, el aceite absorberá calor en contacto con el papel, perdiendo densidad, lo cual provoca una fuerza volumétrica ascensional que empuja el fluido hacia arriba, siendo evacuado del conducto (4.10).

$$u = -U_0 n \quad (4.10)$$

- Presión nula. Se establece que la salida del conducto de refrigeración tiene una condición de presión nula, estableciendo así dicha salida como referencia de presiones (4.11).

$$[-pl + K]n = -\widehat{p}_0 n \quad (4.11)$$

$$\widehat{p}_0 \leq p_0$$

Tabla 4.2. Parámetros expresados en estas ecuaciones

$n$	Vector normal
$q$	Flujo de calor
$T_{inlet}$	35 °C
$q_0$	-20 W/m <sup>2</sup>
$u$	Campo de velocidad
$U_0$	Campo de velocidad inicial
$p$	Presión
$p_0$	Presión inicial
$K$	$K = \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u)I$

#### 4.4.3 Valores iniciales y fuente de calor

Además de las condiciones de contorno se han de definir los valores iniciales de las variables a resolver, para poder iniciar los cálculos a partir de estos valores. Asimismo, se establece el valor de la fuente de calor.

Para Transferencia de calor en sólidos y fluidos:

- Temperatura inicial. Se aplica a todos los dominios del modelo, ya que todos están sometidos a la física de transferencia de calor. El valor es 293.15 K ó 20 °C, que corresponde a la temperatura ambiente.
- Fuente de calor. Como se ha mencionado previamente, para simular la producción de calor por parte del cobre, se establece en la geometría correspondiente al cobre una fuente de calor con una tasa de calor de  $Q_0/7 = 1532.72$  w siendo  $Q_0 = 10729.08$  W, las pérdidas con carga de cada fase del devanado de baja tensión. La división entre 7 se debe a que la potencia calorífica generada está calculada para las 7 capas concéntricas pero el modelo estudiado es la simplificación de una de las capas. Las pérdidas en el cobre se pueden expresar mediante la (4.12)

$$P_{cu} = R \cdot I^2 \quad (4.12)$$

Para resolverla es necesario calcular la resistencia (4.13) a partir de los valores de longitud del bobinado y de la sección de la bobina, calculados mediante los valores de cada capa obtenidos en el análisis del transformador sin simplificar [15].

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} = 0.0065179 \text{ ohmios} \quad (4.13)$$

El fabricante nos proporciona el valor de la intensidad que circula a través del transformador (1283 A). Por lo tanto, ya podemos calcular el valor de la potencia para una de las capas de bobinado (la más externa), que será igual al de la fuente de calor y que al dividirlo entre 7, resultará el valor de la potencia calórica para una de las capas (4.14). Esto es un cálculo aproximado, ya que las pérdidas de la última capa son mayores al tener un mayor volumen de conductor.

$$P_{cu} = \frac{0.0065179 \cdot 1283^2}{7} = \frac{10729.08}{7} = k \cdot 1532.726 \text{ w} \quad (4.14)$$

Esta será la potencia nominal del transformador, pero para tener un estudio más completo, también se analizarán la distribución de temperaturas para unas potencias del 25%, 50%, 75%, 100% y 120% de la nominal, siendo  $k$  un factor de carga que expresará el porcentaje de carga nominal a aplicar en cada estudio.

Para Flujo laminar:

- En los valores iniciales de esta física se fijarán los campos de velocidad y presión iniciales nulos. Fijando en cero tanto la velocidad como la presión. Además, se añadirán restricciones a estas condiciones a través de las condiciones de contorno previamente mencionadas.

#### 4.4.4 Tipo de estudio

Cuando se resuelve un modelo multifísico hay dos enfoques que pueden adoptarse para resolver el sistema de ecuaciones (normalmente no lineal) que describe la solución. El enfoque Totalmente Acoplado forma un único gran sistema de ecuaciones que resuelve todas las incógnitas e incluye todos los acoplamientos entre las incógnitas (los efectos multifísicos) en una única iteración.

Por otro lado, el enfoque segregado no resuelve todas las incógnitas a la vez. En cambio, subdivide el problema en dos o más pasos segregados. Cada paso suele representar una sola física, pero también se puede subdividir una sola física en pasos, y a veces un paso puede contener varias físicas. Estos pasos segregados individuales son más pequeños que el sistema completo de ecuaciones que se forman con el enfoque Totalmente Acoplado. Los pasos segregados se resuelven secuencialmente dentro de una única iteración, por lo que se requiere menos memoria.

Se elige alguna de los dos enfoques en función de la robustez general del sistema. Dado que el enfoque Totalmente Acoplado incluye todos los términos de acoplamiento entre las incógnitas, suele converger de forma más robusta y en menos iteraciones en comparación con el enfoque Segregado. Sin embargo, cada iteración requerirá relativamente más memoria y tiempo para resolver, por lo que el enfoque Segregado puede ser generalmente más rápido.

Independientemente del enfoque empleado en la resolución de problemas no lineales, la solución se aborda por iteración. Es decir, el enfoque Totalmente Acoplado o Segregado se llama repetidamente, y converge gradualmente a la solución del problema no lineal.

Para el caso del estudio termo hidráulico que nos ocupa, como se quiere conocer la distribución de temperaturas una vez el sistema ha alcanzado el régimen permanente, se escoge en el constructor de COMSOL el estudio estacionario. Además, se selecciona el resolvidor estacionario segregado, ya que, aunque sea un estudio que sólo abarque el ámbito térmico, estamos trabajando con la física de transferencia de calor en sólidos y fluidos y así como con la física de flujo laminar. Todo esto hace que resulte más sencillo el enfoque Segregado, ya que de esta manera cada iteración requerirá menos memoria y tiempo para resolver.

#### 4.4.5 Posprocesado y análisis de resultados

Tras realizar el estudio, se han de obtener los resultados buscados. Del conjunto de datos obtenidos se extraen los de temperatura en el papel y la interfase papel-aceite para su implementación en el modelo de difusión. Asimismo, estos valores se presentarán en el Apartado 5.1 mediante tablas y gráficas para su estudio.

### 4.5 MODELO DE DIFUSIÓN DE HUMEDAD DEL SISTEMA DIELECTRICO

En el presente apartado se modelizará mediante el método de elementos finitos la dinámica de la humedad en el transformador. Para ello, se expondrán los diferentes aspectos que habrá que tener en cuenta para la posterior realización de la simulación a través del software informático. El estudio se centra en modelizar el comportamiento de la humedad dentro de la máquina durante su funcionamiento a carga constante. Para esto usará la distribución de temperaturas en la interfase papel-aceite obtenida en el anterior modelo. Se explicarán los diferentes aspectos que comprende el modelo: base teórica del modelo, condiciones de contorno consideradas, valores iniciales, tipo de estudio realizado, y posprocesado y análisis de resultados.

#### 4.5.1 Base teórica del modelo (ecuaciones de gobierno)

Como se ha explicado en previos apartados, la humedad de un transformador se encuentra distribuida entre el aislamiento celulósico y el aceite. Es por esto por lo que el sistema papel-aceite buscará el equilibrio en la concentración relativa de humedad.

El proceso de transferencia del calor generado por el devanado a lo largo de los diferentes materiales del transformador, basa su evolución en unas constantes de tiempo más pequeñas que las del fenómeno de difusión de humedad. Por este motivo se va a asumir la temperatura del aislamiento celulósico como constante para poder estudiar en detalle el fenómeno de la migración de humedad. Para estimar una distribución de temperaturas más cercana a la real, se usan las distribuciones de temperatura del papel y de la interfase papel-aceite determinadas en el anterior modelo.

Tal y como se explicó en el apartado 2.5 el modelo de difusión de la humedad, basa su comportamiento en las leyes de Fick. Estas se fundamentan en que, al haber un gradiente de

concentración de moléculas de agua en un material poroso, la humedad llevará a cabo un movimiento desde zonas de más concentración a regiones con una menor concentración. Por lo tanto, la humedad variará inversamente respecto del gradiente de concentración, lo cual queda expresado matemáticamente mediante la Primera Ley de Fick (4.15).

$$F = -D \cdot \nabla c \quad (4.15)$$

Donde  $F$  es el flujo de humedad,  $D$  es el coeficiente de difusión y  $c$  es la concentración local de humedad. Aplicando el teorema de Stokes a la ley de conservación de la concentración de humedad se obtiene la (4.16)

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot F = 0 \quad (4.16)$$

La combinación de (4.15) y (4.16) da lugar a la Segunda Ley de Fick (en coordenadas cartesianas (4.17) y cilíndricas (4.18)).

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \quad (4.17)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \quad (4.18)$$

Se ha considerado un coeficiente de difusión isotrópico, es decir, considera el movimiento del agua en cualquier dirección, pero debido a la física, el movimiento del agua quedará restringido. La altura de la parte activa del transformador suele ser de más de un metro, mientras que el grosor del aislamiento en un transformador real (incluso con un aislamiento grueso) es sólo unos pocos milímetros de espesor. De ahí que los gradientes de concentración en la dirección transversal sean mucho mayores que los de la dirección longitudinal ( $\Delta C/\Delta r \gg \Delta C/\Delta z$ ) y, por tanto, la difusión en la dirección longitudinal puede desprejarse. Además, en el apartado 5.1.2 se demuestra que el gradiente vertical de la temperatura son despreciables comparados con el gradiente radial y, por lo tanto, se puede desprejarse la difusión en esas direcciones. En este estudio al tratar la sección transversal de un cilindro, se estudiará la

geometría 2D en coordenadas cilíndricas ya detallada previamente. En esta geometría, la temperatura del papel variará con la altura  $y$ , por lo tanto, el flujo de humedad también lo hará ya que están relacionados de manera que, a mayor temperatura, el entorno se vuelve más seco y las moléculas de agua tienden a calentarse y migrar a partes menos calientes, por esto la humedad relativa disminuye. Esto ocurrirá a la inversa para temperaturas más bajas donde las moléculas de agua tienden a acumularse. Como se considera que el movimiento de las moléculas de agua se produce en una sola dirección, en este caso radialmente (coordenada  $r$ ), la difusión de la humedad se puede modelar matemáticamente mediante (4.19).

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( D \cdot \frac{\partial c}{\partial r} \right) \quad (4.19)$$

En (4.19), el coeficiente de difusión 'D' considera la difusión de dicha humedad en forma de vapor y en forma líquida. Para calcular dicho coeficiente se usa la ecuación propuesta por Diego en [8]. Así, partiendo de la ecuación general para el coeficiente de difusión, (4.20) se obtiene, a partir de resultados experimentales (curvas de secado), el valor de D.

$$D_{(c,T)} = D_0 \cdot e^{k \cdot c} \quad (4.20)$$

Las curvas de secado se obtienen mediante métodos experimentales. Con estas curvas se pueden obtener los coeficientes de (4.20), donde  $D_0$  es un factor preexponencial expresado en  $m^2 / s$  que relaciona el coeficiente de difusión con los diferentes parámetros (por ejemplo, la temperatura) y  $k$  es un parámetro adimensional que relaciona el coeficiente de difusión con la concentración de humedad local, además se añade la dependencia del espesor del aislamiento ( $l$ ). De esta manera, Diego obtiene la ecuación (4.21) para papeles envejecidos que han sido impregnados en aceite mineral.

$$D(c, T, l) = 0.5 \cdot e^{\left[ 0.5 \cdot c - \frac{10193 - 264.7 \cdot l}{T} \right]} \quad (4.21)$$

Donde  $l$  es el espesor del aislamiento en milímetros,  $c$  es la concentración de humedad en el papel en % y  $T$  es la temperatura en K. Estos coeficientes obtenidos experimentalmente son validados por las propias curvas de secado mencionadas anteriormente para diferentes temperaturas y espesores de aislamiento.

Por último, cabe destacar que la humedad se moverá entre el aislamiento celulósico y el líquido, a través de la interfase papel-aceite, donde el intercambio de agua será mucho más rápido y, por lo tanto, la condición de equilibrio se alcanzará antes (Figura 4.6).

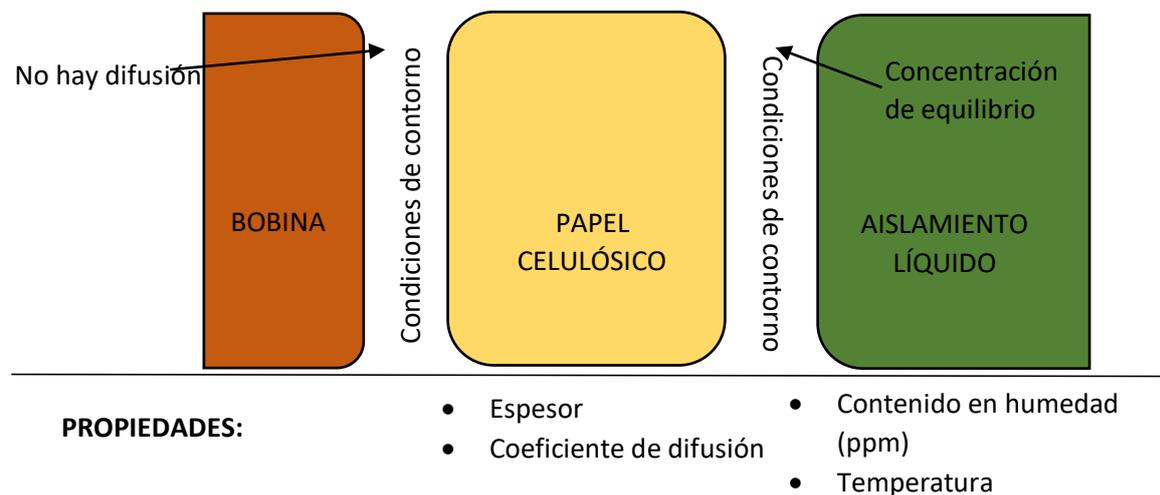


Figura 4.6 Esquema de humedad en componentes de un transformador

#### 4.5.2 Condiciones de contorno

Al igual que se ha realizado en el modelo termo-hidráulico, es necesario establecer las condiciones de contorno que permitan resolver el modelo.

Para ello, se considera que la absorción de agua en la superficie del aislamiento se comporta como un proceso convectivo. Howe, en [16], demostró que el intercambio de agua en la superficie de contacto papel-aceite es mucho más rápido que los procesos de difusión de la humedad dentro del aislamiento sólido. Por lo tanto, la concentración de equilibrio se alcanza muy rápidamente en la superficie y esta puede asumirse como condición de contorno (Figura 4.7), para resolver la difusión transitoria lenta en el interior del aislamiento, [9].

Por esto, la condición de contorno aplicada en la interfase papel-aceite es la de concentración (4.22).

$$c_i = c_0 = C_{equilibrio} \quad (4.22)$$

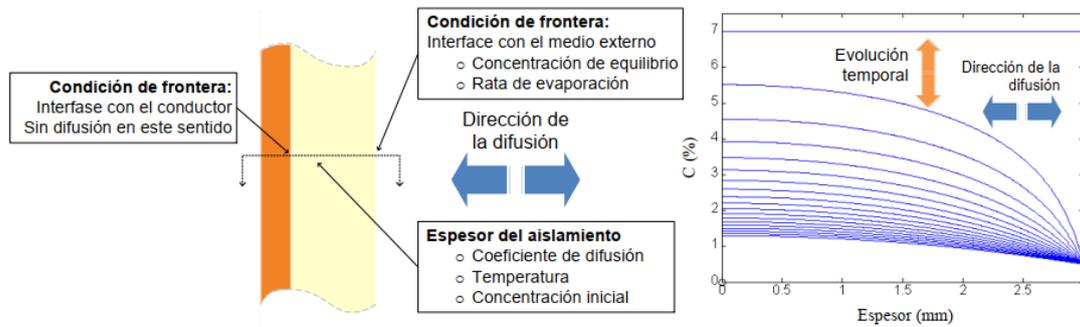


Figura 4.7 Esquema de condiciones de contorno en la difusión de humedad Fuente: [9]

La concentración de equilibrio  $C_{equil}$  se obtiene mediante la expresión (2.9), cuyo significado ya ha sido explicado en el apartado 2.5. La presión parcial del vapor de agua,  $p_v$ , al ser dependiente de la temperatura, se calcula mediante la (2.10), que ya ha sido previamente presentada en el apartado 2.5.

En este caso, la humedad relativa en el aceite, medida en ppm, será obtenida de un balance de masas. La masa de agua que hay en el transformador está distribuida entre el papel y el aceite en diferentes proporciones dependiendo de la temperatura. Dicha masa de agua se asume como constante. Teniendo en cuenta este supuesto, Frimpong en [17] propuso la (4.23) para la determinación de la mencionada humedad relativa del aceite.

$$W_{total} = M_{cel} \cdot \frac{c(t)}{100} + M_{oil} \cdot \frac{ppm(t)}{1000000} \quad (4.23)$$

Donde  $W_{total}$  es la masa total de agua en el transformador expresada en kg,  $M_{cel}$  es la masa de toda la celulosa perteneciente a los aislamientos sólidos expresada en kg,  $M_{oil}$  la masa de todo el aceite, incluyendo el que circula por cada canal además del aceite mineral de la cuba

en el que está sumergido en transformador expresada en kg,  $c$  es el porcentaje de agua en la celulosa en % (que dependerá del tiempo), y  $ppm$  es el contenido de agua en el aceite expresado en partes por millón (variará con el tiempo ya que depende de  $c$  (4.23)). Para las masas de celulosa y aceite se han usado  $M_{cel} = 1712 \text{ kg}$  y  $M_{oil} = 4680 \text{ kg}$ , los cuales son valores típicos para transformadores de estas potencias y niveles de tensión y han sido proporcionados por el fabricante de transformadores.

En este estudio se analizarán varios contenidos en humedad tanto del papel como del aceite como se ha explicado en el apartado 0. Por lo tanto, habrá diferentes valores de las concentraciones iniciales de humedad en el papel y en el aceite (Apartado 4.5.3). Finalmente se podrán calcular las distintas masas de agua totales para cada condición inicial con la ecuación (4.24), y de esta manera poder despejar  $ppm$  (4.25) y obtenerla en función de la concentración de agua en la celulosa para poder introducirla en la ecuación (2.10) para calcular  $p_v$ .

$$W_{total} = 1712 \cdot \frac{c}{100} + 4680 \cdot \frac{ppm}{1000000} \quad (4.24)$$

Con estos valores calculados, el contenido en humedad del aceite para cada instante ( $ppm(t)$ ), se puede obtener despejándolo de la ecuación (4.23) en función de la concentración del papel para cada instante  $c(t)$ . Al estar realizando el cálculo mediante elementos finitos, a través de la simulación obtenemos valores de la concentración de humedad en cada nodo del mallado. Por ello, para obtener el contenido de agua en todo el papel se ha de integrar el valor de cada nodo para todo su volumen.

Para ello se crea una función de integración de acoplamiento no local,  $intop1$  con la que se integra el volumen que constituye el papel en coordenadas cilíndricas ( $r, \phi, z$ ). Para escoger la variable que se quiere integrar, hay que referirse a ella como  $intop1(c)$ ; al integrar la concentración ( $\text{mol}/\text{m}^3$ ) para los límites del volumen se pierde la dimensión volumétrica, obteniendo el resultado en moles. Como se dese obtener la humedad en  $ppm$  es necesario dividir el valor entre la unidad de volumen. Por ello, se divide dicho resultado entre la función  $intop1(1)$  expresada en  $\text{m}^3$  (4.25).

$$ppm(t) = \frac{1000000}{M_{oil}} \cdot \left( W_{total} - M_{cel} \cdot \frac{intop1(c)/intop1(1)}{100} \right) \quad (4.25)$$

De esta manera se obtiene  $C_{equil}$ , que se aplica como condición de contorno en la interfase papel-aceite. Así, la concentración inicial de humedad del papel irá variando a lo largo de su espesor hasta alcanzar el valor de equilibrio,  $C_{equil}$ , establecido en la interfase. Esta variación será diferente para cada unidad de tiempo, ya que cada vez la concentración del papel estará más cercano al valor de equilibrio. Además, esta condición de contorno calcula automáticamente la concentración de humedad en el aceite (ppm) habiendo introducido previamente los valores del peso total de agua y la concentración inicial en el papel.

Por otro lado, tenemos la condición de contorno de flujo nulo (Sin flujo) entre el papel y el cobre (4.26). De esta manera se establece que no habrá transporte de humedad entre ambos materiales, limitando así la dirección de la difusión. Esta condición se aplica a la interfase papel-cobre.

$$-n \cdot J_i = 0 \quad (4.26)$$

### 4.5.3 Valores iniciales

Para poder resolver las ecuaciones diferenciales que modelan la difusión de las moléculas de agua a través de los aislantes sólidos y líquidos se han de definir unos valores iniciales de la variable a resolver,  $c(t)$ , en los nodos del dominio, a partir de los cuales el resolvidor numérico comienza a converger.

Para ser capaces de inicializar el modelo de difusión de la humedad, se han de definir los valores iniciales para la física de Transporte de especies diluidas.

En este caso suponemos que el transformador ha estado desconectado durante un periodo prolongado de tiempo en un ambiente con una temperatura media de 20 °C. Como en este caso se pretenden analizar la distribución de la humedad en la celulosa para diferentes condiciones iniciales de la celulosa, se tomarán como referencia la concentración de la celulosa (%) y a partir de las curvas de equilibrio se establecerá la concentración inicial del

papel (ppm). Partiendo de dicha temperatura, se realizará un análisis para distintas condiciones de humedad inicial en la celulosa correspondientes a unos estados de celulosa: nueva, seca, húmeda y excesivamente húmeda. Para ello se escogerá unos valores de acuerdo al reporte técnico del CIGRE 349 (Figura 4.8).

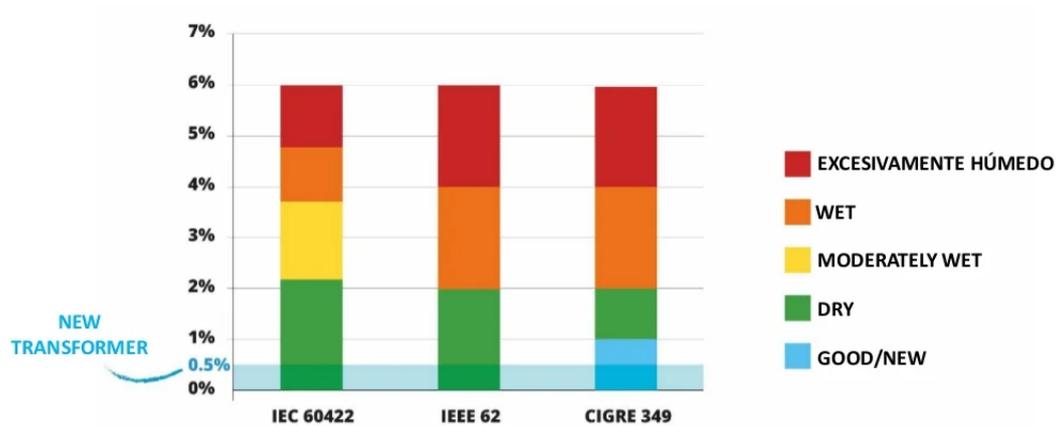


Figura 4.8 Niveles de humedad en papel según diferentes organismos

Para los diferentes estados se escogen unas humedades en la celulosa de 1%, 2%, 3% y 4.5%. Mediante las curvas de equilibrio (Figura 4.9) (código en anexo 8.3.2) o mediante la ecuación de dichas curvas (código en anexo 8.3.1) se obtienen los valores indicados en la Tabla 4.3.

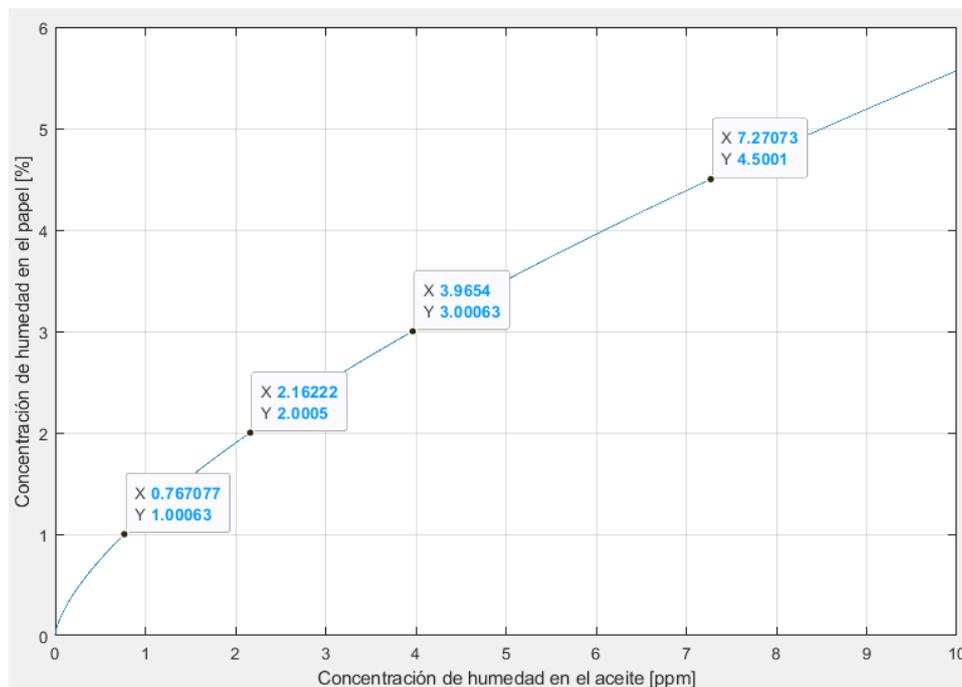


Figura 4.9 Curva de equilibrio para 20 °C (código en anexo 8.3.2.)

Además, mediante (4.24) se calcula la masa total de agua en el transformador para condición inicial. Programa en Matlab expuesto en el anexo 8.3.1.

Tabla 4.3. Concentraciones de humedad y pesos de agua

Nivel de humedad	Concentración en el papel (%)	Concentración en el aceite (ppm)	Peso total de agua (kg)
Nuevo	1	0,7664	17,1236
Seco	2	2,1614	34,2501
Húmedo	3	3,9642	51,3786
Excesivamente húmedo	4.5	7,2705	77,0740

En el modelo se introducen los datos de concentración en el a papel y de masa total de agua, posteriormente el modelo despeja de la ecuación de balance de masas (4.24) la concentración de humedad en el aceite automáticamente. El modelo temporal de difusión tiene la distribución de temperaturas (tanto en el papel como en la interfase) obtenida del modelo térmico estacionario, es decir, cuando ya se ha alcanzado una temperatura constante después de que la temperatura haya subido gradualmente en el devanado.

Esto hace que el modelo temporal de difusión tenga una temperatura constante desde el instante inicial, por lo tanto, se han de recalculan las condiciones iniciales de concentración en el aceite y de masa de agua en el transformador. Para ello, se simula el modelo temporal de difusión con las condiciones iniciales calculadas para 20 °C iniciales y se observa que el contenido inicial de humedad en el aceite inicial (ppm) no coincide con el supuesto. Esto se debe a que las ppm calculadas por el modelo establecen como temperatura inicial una temperatura media entre la máxima y la mínima (72 °C y 35 °C para el 100% de la carga). Por lo tanto, las ppm calculadas por el modelo en base a la temperatura constante (del papel y la interfase) se establecen como nuevo contenido inicial de humedad en el aceite (Tabla 4.4).

Tabla 4.4. Concentraciones de humedad y pesos de agua ajustados

Nivel de humedad	Concentración en el papel (%)	Concentración en el aceite (ppm)	Peso total de agua (kg)
Nuevo	1	9,26	17,1633
Seco	2	26,1	34,3621
Húmedo	3	47,6	51,3785
Excesivamente húmedo	4.5	88,2	77,4528

De esta manera para simular las distintas potencias (25%, 50%, 75%, 100% y 120%) para cada concentración de humedad, cada potencia resultan en diferentes distribuciones de temperaturas, a la hora de simularlas, se calculará el peso total de agua usando una temperatura que esté entre la máxima y la mínima de la obtenida para cada potencia (obtenidas en el apartado 5.1.2). En este caso se escoge una temperatura media para la potencia del 25% ya que el gradiente de temperaturas que abarca este modelo estará comprendido entre los gradientes de los modelos para las demás potencias. Esto se hará mediante el código expuesto en el Anexo 8.3.1 y 8.3.3. En la Tabla 4.5 se exponen los valores para una concentración de humedad en el papel del 2%, para las demás concentraciones ver Anexo 8.4.1, 0 y 8.4.3.

Tabla 4.5. Peso total de agua en función de la potencia para una concentración de humedad inicial del 2%

Potencia (% de la potencia nominal)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Concentración de humedad inicial en aceite (ppm)	Peso total de agua (kg)
25%	37,84	35	5,60	34,26
50%	44,69	35		
75%	58,57	35		
100%	72,16	35		
120%	82,77	35		

De cara al modelo se considera que, al comienzo del experimento, la humedad está uniformemente distribuida en todo el espesor del aislamiento de papel.

#### 4.5.4 Tipo de estudio

En este estudio se pretende ver cómo evoluciona la humedad en el papel con la temperatura a lo largo del tiempo, de esta manera se podrá ver cómo las moléculas de agua se difunden a través de los materiales aislantes del transformador.

Se realizan dos estudios:

- El primero, en régimen permanente: con este estudio se busca analizar la concentración en la interfase papel-aceite una vez se ha alcanzado el equilibrio en ella, que se considera se alcanza de manera instantánea y sin tener en cuenta la variación de humedad del aceite. De esta manera, se podrá comprobar la parametrización considerada para las curvas de equilibrio de Oommen. Dicho de otra manera, las concentraciones de equilibrio obtenidas numéricamente en la interfase se compararán con las determinadas analíticamente con las curvas de equilibrio para diferentes temperaturas. Para la realización de este modelo se ha incluido la física de transporte de especies diluidas en la distribución 2D de temperaturas ya obtenida en el modelo térmico. Se ha optado por añadir la física para la humedad a la física de transferencia de calor ya que, como es una comprobación para verificar que la parametrización de las curvas de equilibrio se cumple, no tiene muchos requisitos computacionales y se pueden simular ambas físicas en paralelo. Esta comprobación será explicada a fondo en el apartado 5.2.1.
- En el segundo estudio, se supone que el sistema ha alcanzado el equilibrio térmico (estudio estacionario) y, utilizando la distribución de temperaturas en el papel y en la interfase, se analiza la evolución de la concentración de humedad en el papel mediante un estudio temporal. Para ello se llevará a cabo un estudio temporal en el que se tendrá en cuenta la variación de la humedad en el aceite y dónde, además, se verá el tiempo que tarda la concentración en estabilizarse para un determinado nivel de carga.

#### 4.5.5 Posprocesado y análisis de resultados

Tras realizar el estudio, se han de obtener los resultados buscados. Del conjunto de datos obtenidos se extraen los de concentración, tanto en el papel y aceite como en la interfase papel-aceite para su análisis y relación con la base teórica del modelo. Asimismo, se presentarán gráficamente estos valores para su explicación más detallada en el apartado 5.2.

## 5 POSTPROCESADO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1 MODELO TÉRMICO

El objetivo principal de este modelo es la obtención de la distribución de temperaturas en el papel y en la interfase papel aceite, por lo tanto, se realiza un estudio en estacionario ya que interesan los valores una vez el sistema se ha estabilizado, de esta manera la temperatura no sufrirá más variaciones.

#### 5.1.1 Validación del modelo

La validación de este modelo se relizar mediante la comparación con otro modelo de el mismo transformador con características similares a falta de un análisis experimental de un transformdor de baja tensión como el estudiado en este trabajo. Para realizar dicha validación, las comparaciones se realizarán respecto a [14].

Para empezar, las características del papel celulósico son muy similares ya que para el material seleccionado en el estudio (cinta de Poliamida) las propiedades varían poco con la temperatura, y para el material simulado en [14] las propiedades son de valores constantes. El aceite empleado en el modelo simplificado es aceite mineral, mientras que el aceite usado en [14] es una silicona de Dow Corning con propiedades ligeramente diferentes al aceite mineral, aún así se sabe gracias al análisis hecho en [15] que existe una diferencia de temperaturas de aproximadamente 7°C (Figura 5.1).

Gracias a esta información podemos contrastar los modelos, y como se ve en el modelo de Lecuna con refrigeración por aceite silicona (Figura 5.2) la temperatura máxima de la sonda ubicada en la capa de papel celulósico a estudiar (capa 7) es de 79.162 °C, por lo tanto, para una refrigeración a base de aceite mineral debería de ser de  $79.162 - 7 = 72.162$  °C, tal y como se puede apreciar en el análisis realizado anteriormente (Figura 5.4), la máxima temperatura alcanzada es de 72.636 °C, lo cual es un valor cercano al basado en el modelo estudiado en [14]. La ligera desviación del valor podría estar causada por la pequeña variación de las propiedades del papel aislante.

De esta manera queda validado el modelo térmico pudiendo decir que los resultados son correctos ya que son muy aproximados a los obtenidos en anteriores simulaciones de modelos similares.

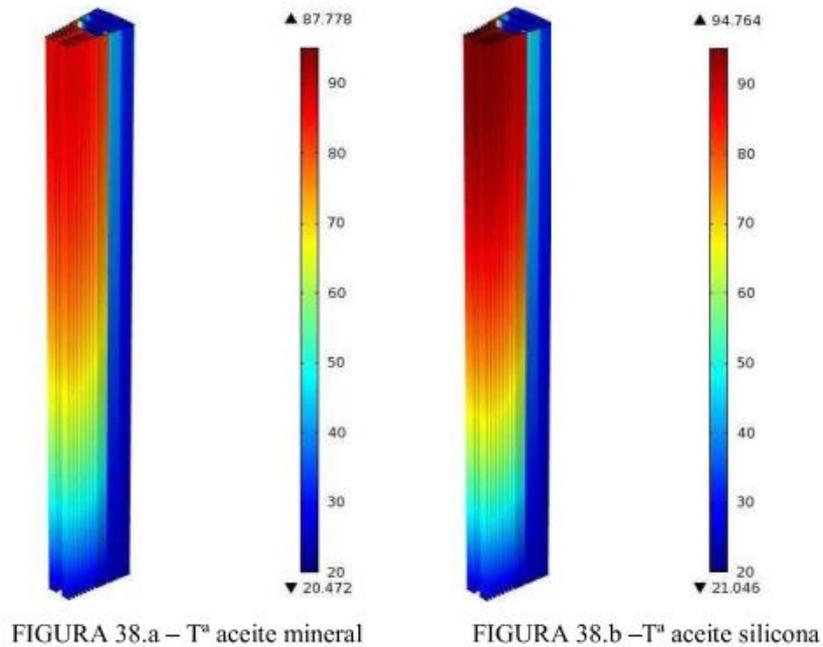


Figura 5.1 Temperaturas para diferentes aceites [15]

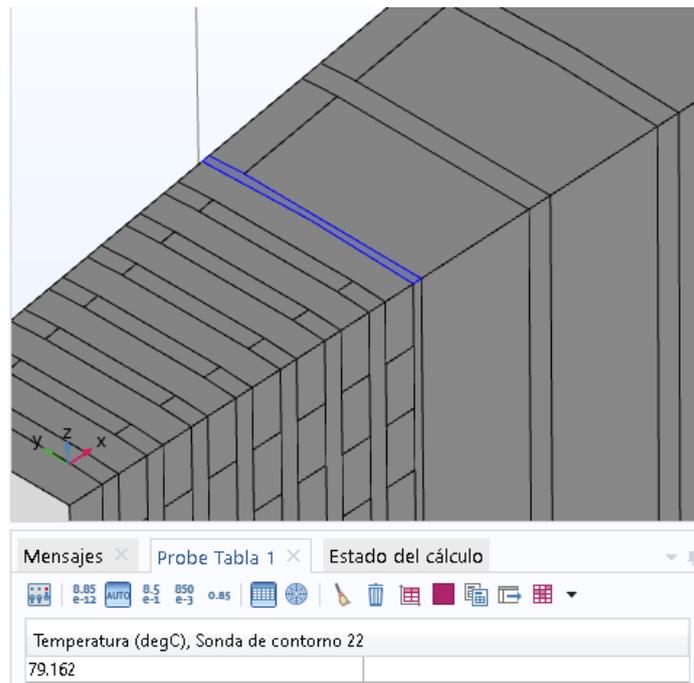


Figura 5.2 Temperatura máxima capa 7

### 5.1.2 Resultados de temperaturas

La Figura 5.3 permite apreciar el gradiente de temperaturas entre el aislamiento celulósico y el aislamiento líquido a mitad de devanado, lo cual permite comprobar el efecto refrigerante del aceite. El gradiente de temperaturas entre el papel y el aceite se debe al fenómeno de transferencia de calor que se produce entre estos dos materiales. También se observa que el papel alcanza la misma temperatura que el cobre.

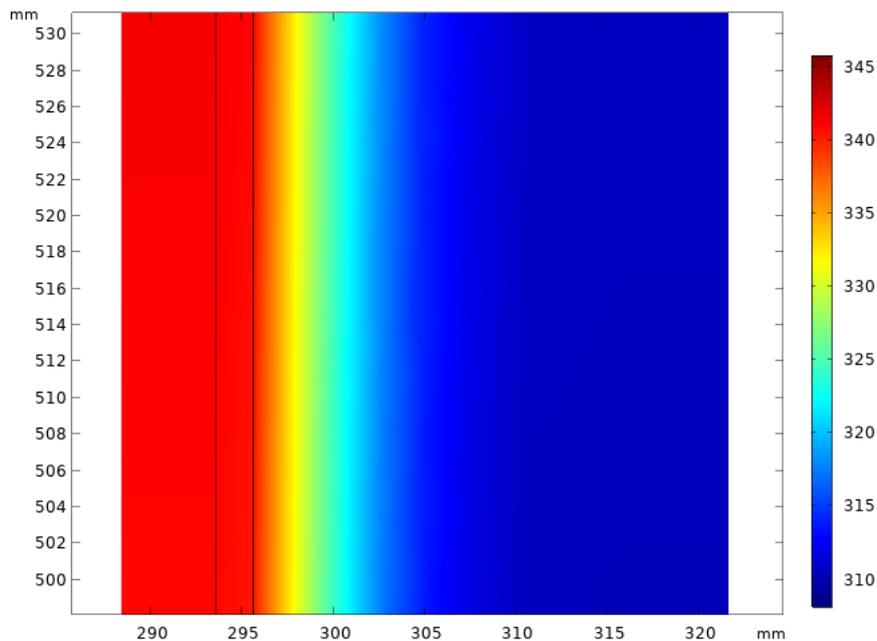
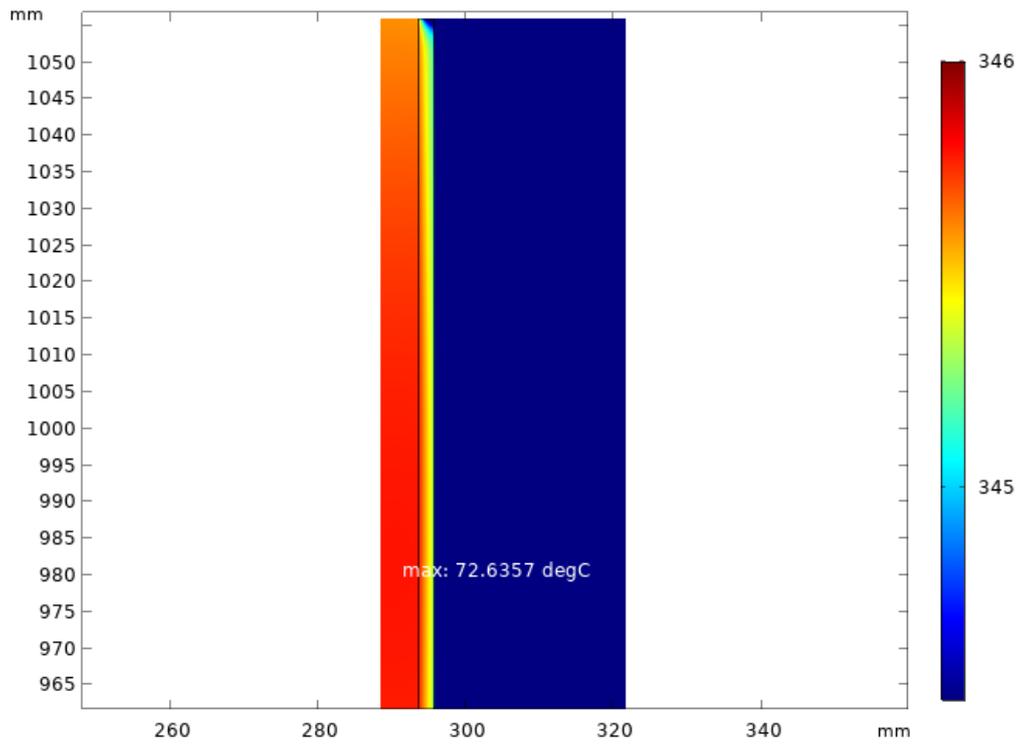
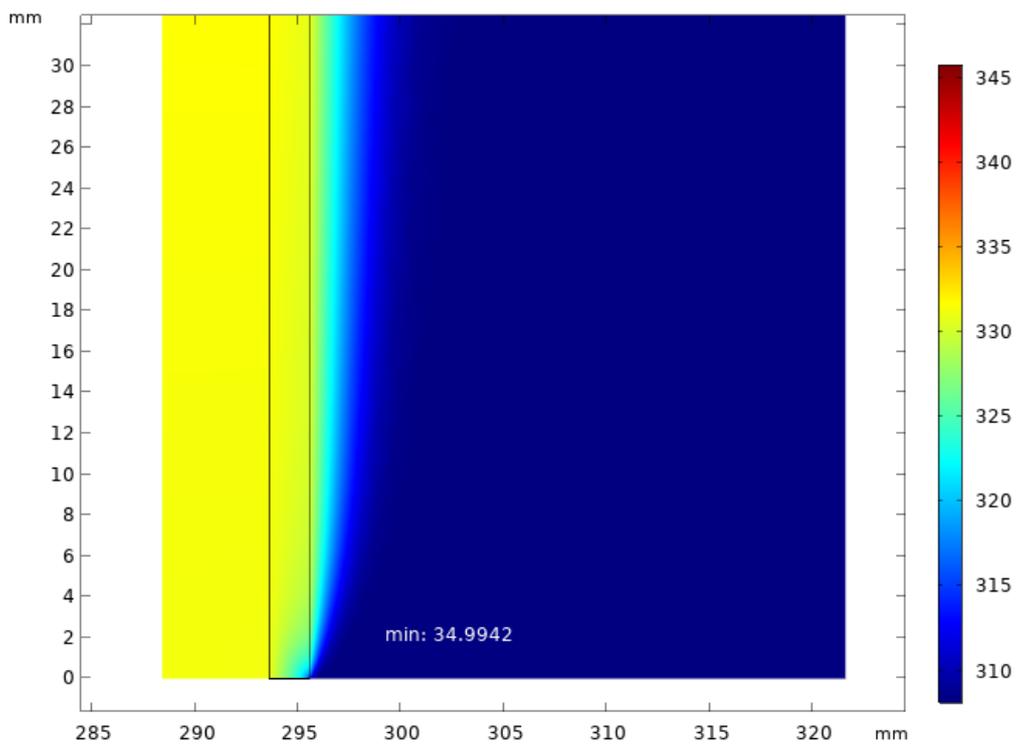


Figura 5.3 Capa límite térmica papel-aceite

De igual manera, la Figura 5.4 permite visualizar el desarrollo de la capa límite térmica en la entrada del conducto, el efecto refrigerante del aceite situado sobre el devanado y las temperaturas máxima y mínima que aparecen en la interfase del papel. En ambas figuras se aprecia el efecto refrigerante del líquido dieléctrico, de tal manera que mientras la temperatura mínima de la interfase del papel se encuentra situada en la cota cero del devanado y coincide con la temperatura de entrada del aceite, 35 °C, la temperatura máxima se alcanza a unos 980 mm de su cota máxima y tiene un valor de 72,6 °C.



a)



b)

Figura 5.4 Gradientes de temperaturas en la entrada (b) y salida (a) del conducto y temperatura máxima y mínima en la interfase

Por otro lado, la representación gráfica de las temperaturas en la interfase papel-aceite se muestra en la Figura 5.5, donde se observa la temperatura (eje horizontal) con respecto a la altura (eje vertical). La trasposición de los ejes se ha realizado para obtener una visualización más conforme a la geometría del transformador ya que durante su funcionamiento está dispuesto en vertical. Se puede observar que la temperatura de la interfase rápidamente se incrementa con la altura -a unos pocos milímetros de la entrada. El crecimiento, que inicialmente era lineal, se vuelve curvilíneo, alcanzando la temperatura máxima de  $72.6^{\circ}\text{C}$  a una altura de 982.21 mm. un máximo de. Como ya se explicó anteriormente (Figura 5.4), la temperatura de la parte superior de la capa de la papel no alcanza el valor máximo debido a la refrigeración del aceite situado sobre el devanado.. Más concretamente, la disminución es de aproximadamente  $2^{\circ}\text{C}$  ( $72.6^{\circ}\text{C} - 70.8^{\circ}\text{C}$ ).

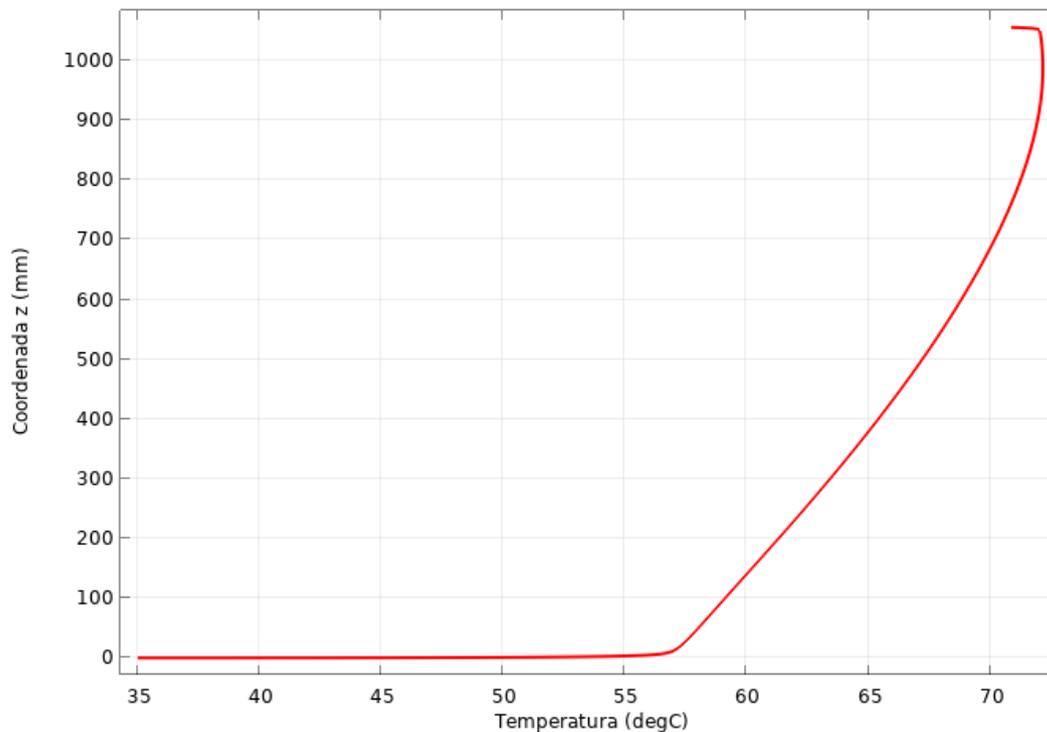


Figura 5.5 Temperatura en la interfase papel-aceite en función de la altura

Uno de los supuestos que se han considerado a la hora del modelizado es que los gradientes de temperatura hacen que el agua dentro del transformador se mueva sólo radialmente, como ya se mencionó en el apartado 2.5. Esto se puede justificar calculando el gradiente

de temperatura vertical,  $\Delta T_z$ , utilizando los valores de la Figura 5.4 y comparándolo con el gradiente de temperaturas radial,  $\Delta T_r$ , obtenido de la Figura 5.6.

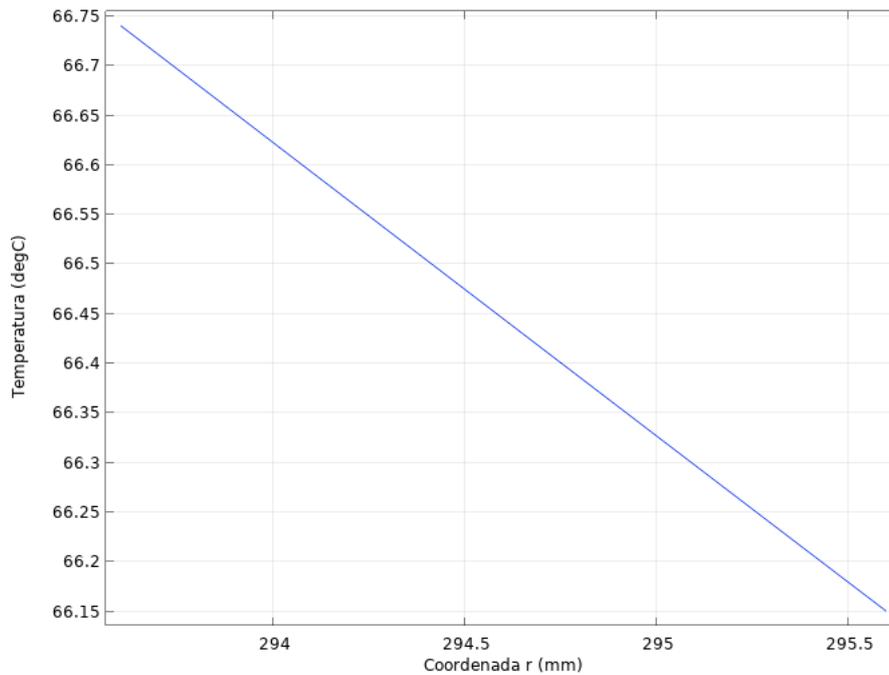


Figura 5.6 Gradiente radial de temperatura del papel a una altura de 500 mm

$$\Delta T_z = \frac{72,6 \text{ }^\circ\text{C} - 35 \text{ }^\circ\text{C}}{1056 \text{ mm}} = 0,035 \text{ }^\circ\text{C/mm} \quad (5.1)$$

$$\Delta T_r = \frac{66,75 \text{ }^\circ\text{C} - 66,15 \text{ }^\circ\text{C}}{2 \text{ mm}} = 0,3 \text{ }^\circ\text{C/mm} \quad (5.2)$$

De la comparación de ambos gradientes (5.1) y (5.2) se deduce que es unas 10 veces más grande el radial que el axial. Por todo esto se puede concluir que el gradiente radial de temperatura es más grande que los gradientes vertical, lo cual simplifica los cálculos de cara al modelo de difusión de la humedad, rigiéndose por (2.9) mencionada en el apartado 2.5.

Además, cabe destacar que al ser un modelo axisimétrico, la revolución de la sección estudiada dará lugar a un cilindro (Figura 5.7) que modeliza la última capa del bobinado de baja tensión, obteniendo así su distribución de temperaturas 3D.

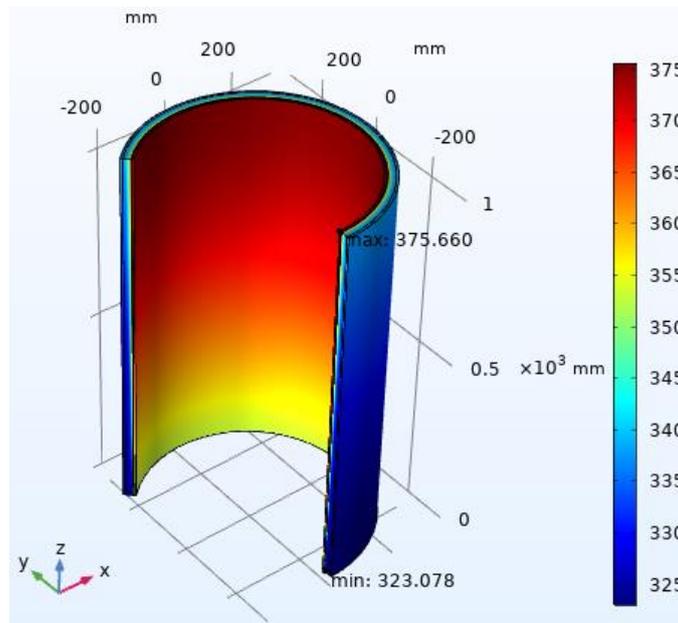


Figura 5.7 Distribución de temperaturas 3D de la última capa del devanado de BT

Como se puede observar en la Figura 5.8, la distribución de temperaturas en la interfase va variando de manera que aumenta a medida que la potencia se eleva.

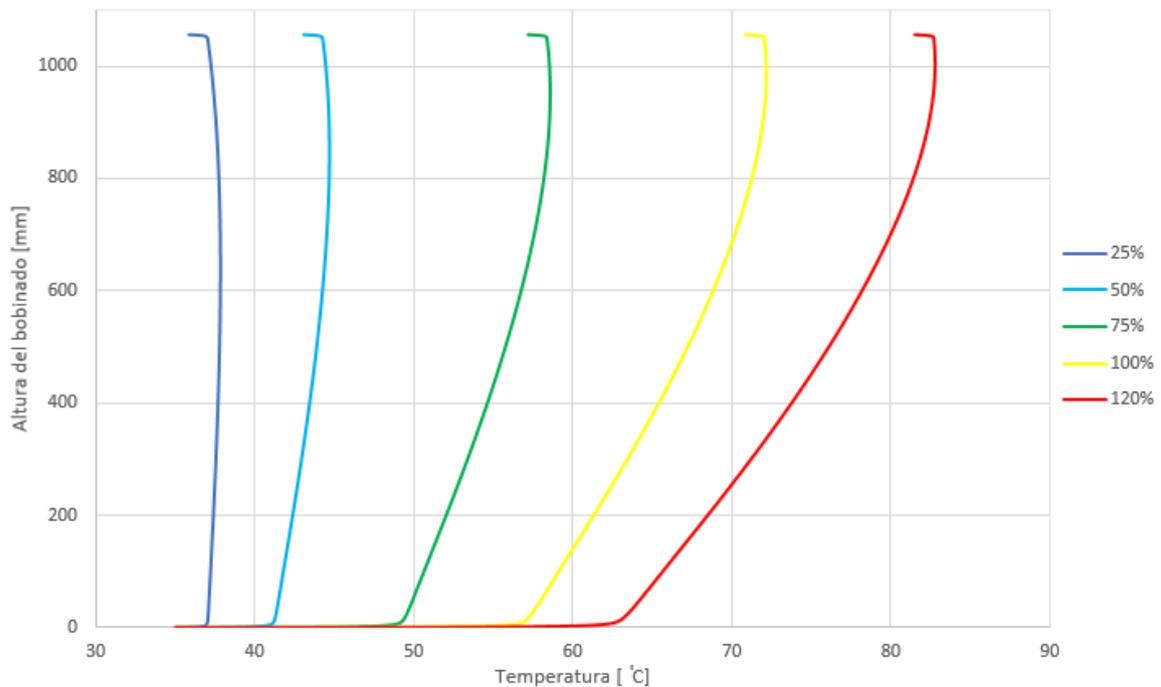


Figura 5.8 Distribuciones de temperatura en la interfase para diferentes potencias

Además, los puntos calientes o “hot spots” cada vez se van generando a una mayor altura (ver Anexo 8.2). Los valores de estos hot-spots se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Ubicación de los puntos calientes en función de la potencia

Potencia (%)	Punto caliente (mm)	T <sub>max</sub> (°C)
25	776,08	23,210
50	841,73	44,825
75	945,84	58,877
100	982,21	72,636
120	997,40	83,384

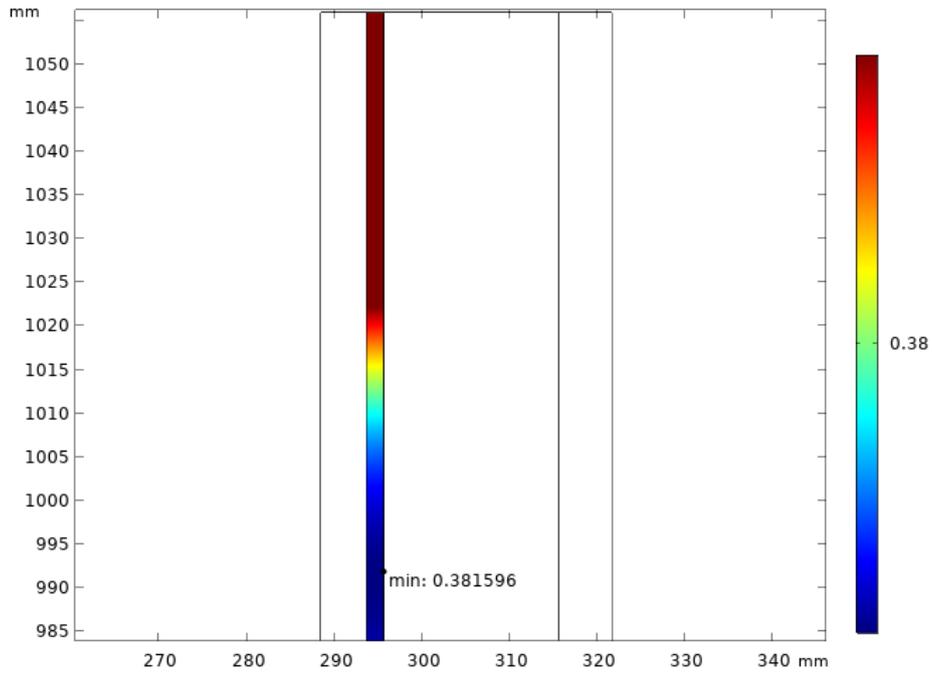
Esto tiene que ver con la refrigeración, ya que, a menor temperatura producida por el devanado, menor será la temperatura que pueda alcanzar la interfase, y es por esto que conforme la potencia va disminuyendo, las curvas se ven desplazadas hacia temperaturas cada vez menores (hacia la izquierda). Además, también al aumentar la temperatura del devanado disminuye la capacidad refrigerante del líquido, y el gradiente vertical de temperaturas será menor, tal y como se ve en la Figura 5.8, donde a menores potencias la distribución de temperaturas en la interfase se vuelve más vertical.

## 5.2 MODELO DE DIFUSIÓN DE LA HUMEDAD

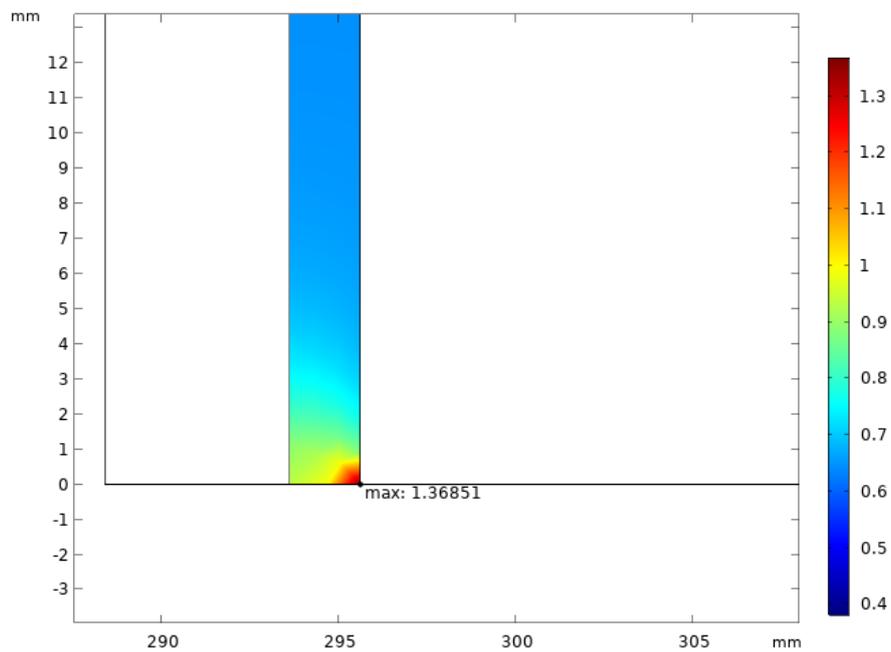
En lo que respecta al estudio de la difusión de la humedad en el transformador, se han realizado dos análisis.

### 5.2.1 Estudio estacionario

Este modelo se utilizará para comprobar la veracidad de las ecuaciones que parametrizan las curvas de equilibrio de concentraciones. Se asume una concentración inicial en el papel de 2,5 mol/m<sup>3</sup> y de 3 ppm en el aceite; además consideramos que, en el aceite, la concentración no varía para poder analizar así la parametrización de las curvas.



a)



b)

Figura 5.9 Concentración mínima (a) y máxima(b) en la interfase

Por lo tanto, se asumirá que la concentración en la interfase papel-aceite alcanza la concentración de equilibrio en un corto periodo de tiempo. Esto se debe en parte al proceso de adsorción de las moléculas de agua como se explicó en el apartado 2.4.3 ya que las

primeras moléculas que se difunden lo hacen por capas y, obviamente, sea cual sea la dirección del intercambio de humedad, la primera capa ocupada será la de contacto entre ambos materiales.

En la Figura 5.9 se puede observar una distribución de la concentración cuando se ha alcanzado la concentración de equilibrio en la interfase. La distribución posee un gradiente vertical debido a la distribución de temperaturas a lo largo de la interfase papel-aceite, la cual como ya se ha mencionado, alcanza las temperaturas más elevadas en la parte superior de la sección mientras que, en la parte inferior, los aislamientos presentan menores temperaturas. En comparación con la distribución de temperaturas en el papel, el perfil de concentración de moléculas de agua en la celulosa es inverso, en la parte inferior es donde se acumula mayor humedad ( $1,3685 \text{ mol/m}^3$ ) mientras que en la parte superior (Figura 5.9 a)), a una altura cercana a la que se obtuvo para la temperatura máxima (982.21 mm) hay una menor concentración de humedad ( $0,3816 \text{ mol/m}^3$ ). Como se esperaba, la concentración mínima se encuentra en la zona donde la temperatura es máxima, ya que la temperatura obliga a evacuar más moléculas de agua tal y como se puede apreciar en las fórmulas del coeficiente de difusión y de la concentración de equilibrio en la interfase, la temperatura es inversamente proporcional al contenido en humedad (Figura 5.10).

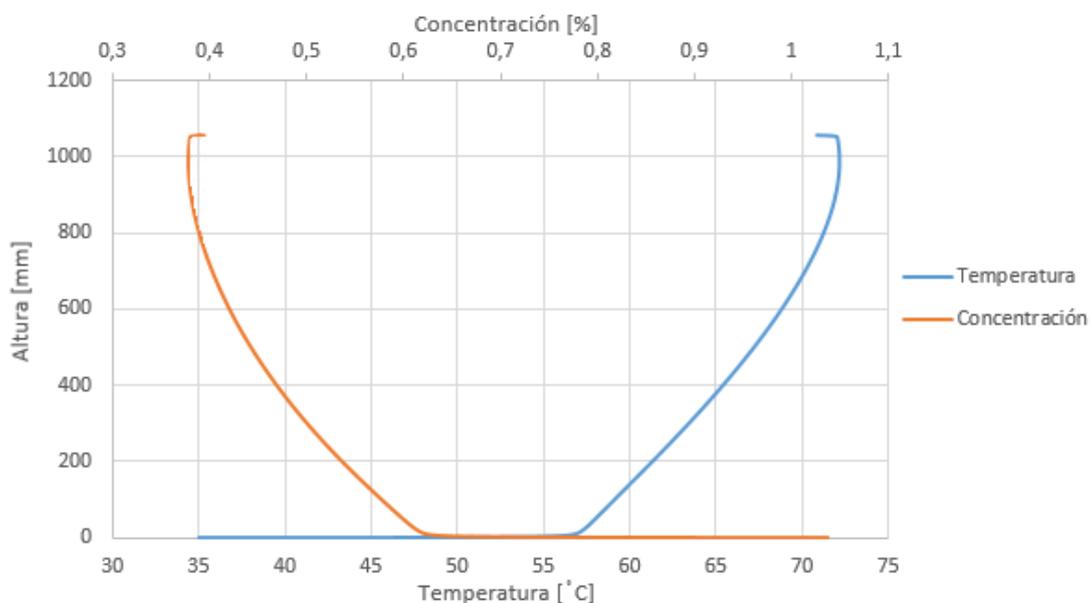


Figura 5.10 Gráfico de la concentración en humedad y temperatura en la interfase papel-aceite

Si nos centramos en la interfase, podemos apreciar una distribución de humedades en función de la altura como la de la Figura 5.10, la cual se corresponde con la parametrización de las curvas de equilibrio (5.3). Esta última afirmación se puede comprobar utilizando un caso concreto: cogemos un punto de la interfase a una altura, por ejemplo, de 500mm y vemos la temperatura a la que se encuentra ( $\approx 66,756^\circ\text{C}$ ) y si nos vamos a la curva de concentración para 500mm se tiene una concentración de  $\approx 0,4492\%$ . Por otro lado, si recurrimos a las curvas de equilibrio de Oommen, como para esta simulación se está considerando unas ppm constantes para la comprobación de la parametrización, se entraría a la curva de  $66,7^\circ\text{C}$  (Figura 5.11) con una concentración del aceite de 3ppm, lo cual nos da una concentración en el papel de aproximadamente  $0.45\%$ .

$$C_{equil} = 2.173 \cdot 10^{-5} \cdot \left[ \frac{ppm}{10^{A-\frac{B}{T}}} \cdot \frac{P_c}{760} \cdot 10^{\left[ \left( \frac{T-T_c}{T} \right) \cdot \left( \frac{a+b \cdot (T_c-T)+c \cdot (T_c-T)^3}{1+d \cdot (T_c-T)} \right) \right]} \right]^{0.6685} \cdot e^{\left( \frac{4725.6}{T} \right)} \quad (5.3)$$

Siendo  $A = 7.09$ ,  $B = 1567$ ,  $a = 3,2437814$ ,  $b = 5,86826 \cdot 10^{-3}$ ,  $c = 1,1702379 \cdot 10^{-8}$ ,  $d = 2,1878462 \cdot 10^{-3}$ ,  $P_c = 1,65807 \cdot 10^5$  (mmHg) y  $T_c = 647,26$  K.

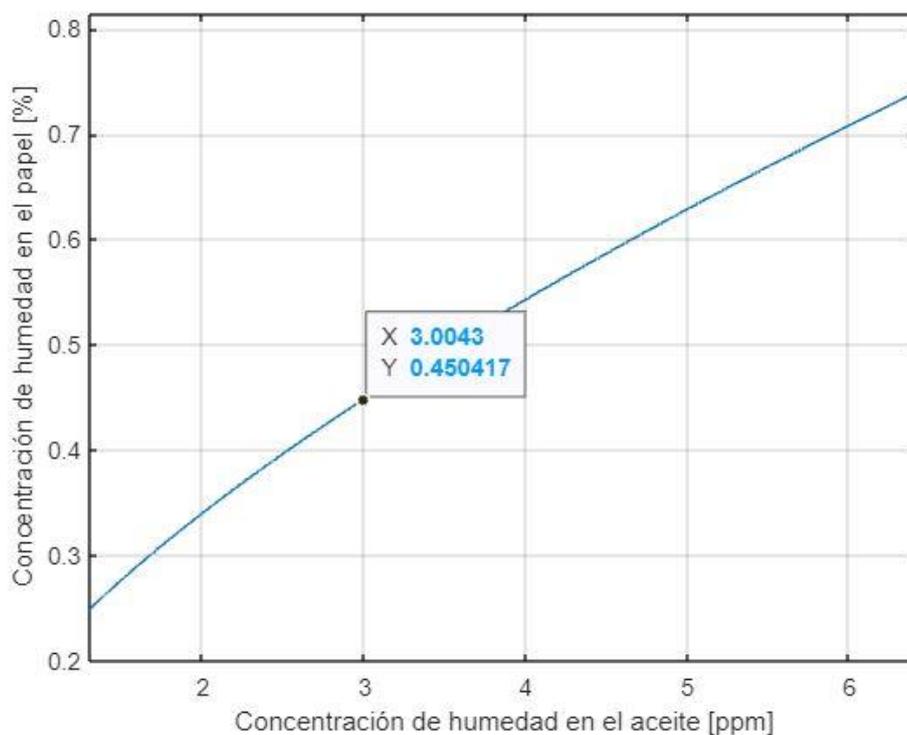
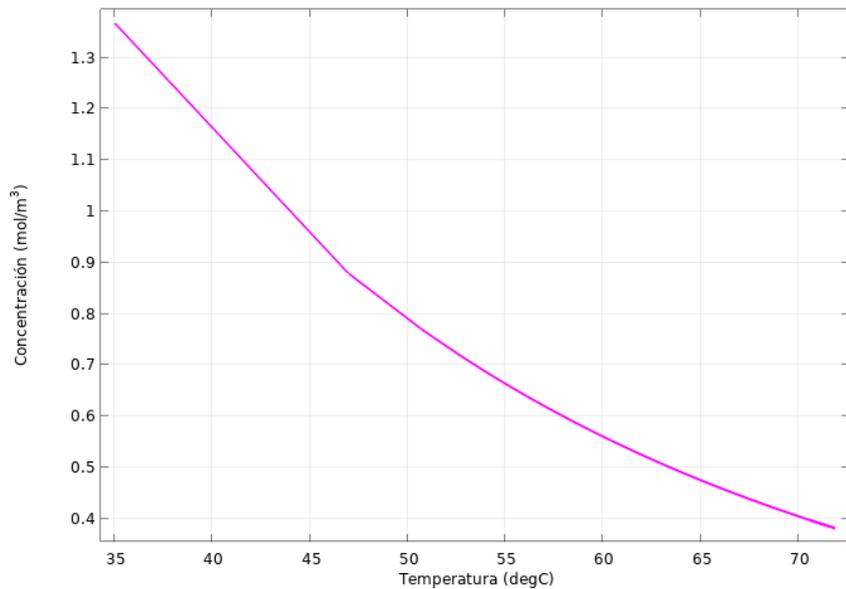


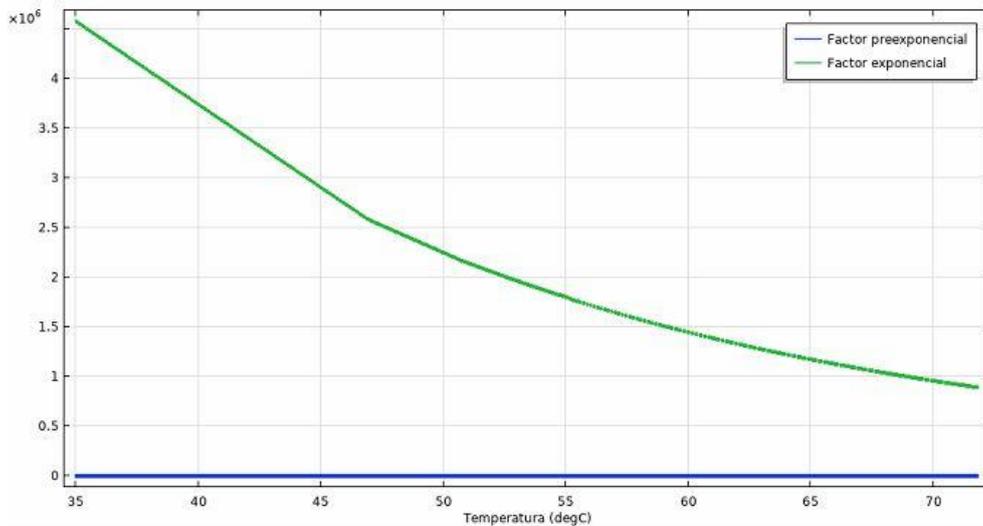
Figura 5.11 Curva de equilibrio para  $66,7^\circ\text{C}$  (Anexo 8.3.2)

Además, se puede estudiar la dependencia directa de la concentración de humedad con la temperatura (ambas en la interfase papel-aceite), tal y como se muestra en la Figura 5.12 a). Como se puede apreciar en la mencionada figura es una función exponencial decreciente

debido al término  $e^{\left(\frac{4725.6}{T}\right)}$  de la expresión. Además, el término  $\left[\frac{ppm}{10^{A-\frac{B}{T}}} \cdot \frac{P_c}{760}\right] \cdot 10^{\left[\left(\frac{T-T_c}{T}\right) \cdot \left(\frac{a+b \cdot (T_c-T)+c \cdot (T_c-T)^3}{1+d \cdot (T_c-T)}\right)\right]^{0.6685}}$  también influye pero en menor medida a la disminución exponencial (Figura 5.12 b)).



a)



b)

Figura 5.12 Gráfico concentración-temperatura (en la interfase) (a) y comparación de factores (b)

## 5.2.2 Estudio temporal

Este apartado presenta la evolución temporal de la concentración de humedad en el papel para diferentes niveles constantes de carga: 25%, 50%, 75%, 100%, y 120% de la potencia nominal. De esta manera, se verá cómo, en función de la concentración de equilibrio en la interfase, la cual va cambiando según la concentración de humedad en el aceite (ppm), por el intercambio de humedad con el papel, ya que la concentración de humedad en el papel (%), va cambiando hasta alcanzar el punto de equilibrio.

Para entender cómo se comporta la humedad en un material aislante celulósico se analizan diferentes parámetros significativos para el movimiento de las moléculas de agua a través de los aislamientos del transformador. El primero de ellos es la evolución de la concentración en un punto del papel celulósico a lo largo del tiempo. Como se explicó en el apartado 4.5.1, gracias a los gradientes de temperatura en el papel, la difusión de la humedad ocurre principalmente en dirección radial y en la interfase papel-aceite existe un intercambio de humedad entre ambos materiales, regido en cada momento por el balance de masa de agua total. Es por esto por lo que el segundo parámetro a analizar es la evolución de la concentración en el ancho del papel celulósico a lo largo del tiempo.

En el análisis y postprocesado de los resultados obtenidos en la simulación del modelo de difusión de la humedad se analizan en profundidad los datos obtenidos para unos niveles de concentración de humedad en el papel de 2% (seco), y concentración de 26,1 ppm en el aceite. Estos valores resultan en una masa total de agua en el transformador de 34,36 kg. Posteriormente se analiza la evolución de la concentración tanto para las diferentes potencias como para las diferentes concentraciones de humedad, ampliando los resultados gráficos obtenidos en el Anexo 0.

### 5.2.2.1 Análisis para carga nominal y $C_0 = 2\%$

Una vez simulado el modelo temporal de difusión de la humedad se obtiene una distribución de concentraciones a lo largo del papel celulósico. Dicha concentración, para un tiempo igual a cero, es igual al valor inicial que se ha dado para el papel en toda la geometría del papel, pero en la interfase papel-aceite, es igual que la concentración de equilibrio en ese instante. Como se explicó en el apartado 4.5.3 dicha concentración de equilibrio depende de la temperatura, la cual va a adoptar un valor constante en cada punto de la interfase

(Figura 5.5), como de la concentración de humedad en el aceite (ppm). La concentración en el aceite es dependiente a su vez de la concentración media en todo el volumen del papel para cada instante de tiempo. Por lo tanto, esto hace que el valor de las ppm y, consecuentemente, el valor de la concentración de equilibrio varíe para cada instante de tiempo oscilando hasta alcanzar la estabilidad.

La concentración de humedad a lo ancho del papel no es uniforme, los puntos del papel más cercanos a la interfase papel-aceite alcanzan el equilibrio más rápidamente como consecuencia de que la interfase está en contacto con el aceite mineral el cual también es un material que puede contener humedad. En la Figura 5.13 se puede apreciar que le toma más tiempo en alcanzar el valor de equilibrio al punto más alejado de la interfase, aunque sea difícil de visualizar debido al pequeño espesor del papel celulósico.

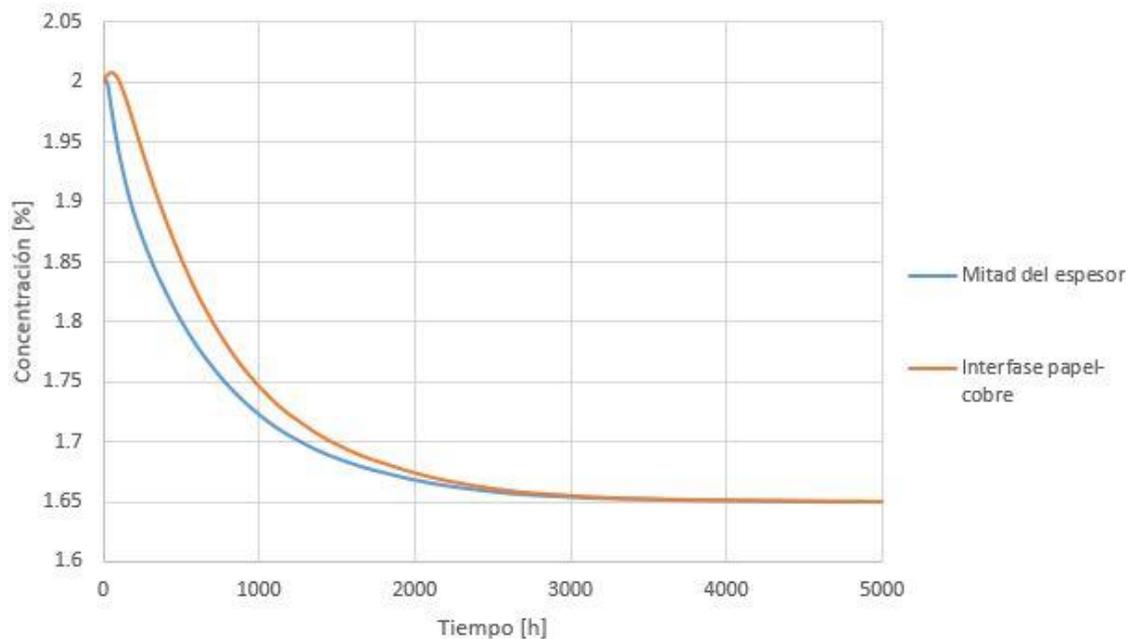


Figura 5.13 Evolución de la humedad en un punto a una altura de 1000mm en medio del espesor del papel y en la interfase pape-cobre

Por otro lado, al estar modelando una capa de un transformador cuyo devanado tiene una altura de 1056 mm habrá una distribución de temperaturas (explicada en profundidad en el apartado 5.1). Esta distribución provocará que las moléculas de agua se muevan a una velocidad y sentido que dependerá de dos factores principales:

- Gradiente de concentración de humedad en el papel. La humedad tenderá a moverse desde lugares con una mayor concentración de moléculas de agua hacia otros donde la concentración de humedad sea menor. Esto se debe a que como las moléculas de agua se alojan en los espacios entre fibras (apartado 2.4.3) de la celulosa o mezcladas en el aceite, serán más propensas a moverse hacia ubicaciones que tengan más espacios sin ocupar por otras moléculas de agua (menos húmedos).

Como estamos observando la concentración de humedad en el papel, un gradiente negativo (decreciente) con respecto al aceite favorecerá la salida de humedad del papel hacia el aceite. Por el contrario, si el gradiente es positivo (más humedad relativa en el aceite), la humedad tenderá a entrar en el papel.

- Gradiente de temperatura. En el apartado 2.4.3 se explicó cómo con temperaturas altas la celulosa perdía capacidad de sorción y el agua era más soluble en aceite. Por lo tanto, la humedad migraba de la celulosa al aceite y, por el contrario, si la temperatura era baja la humedad se desplazaba del aceite al papel.

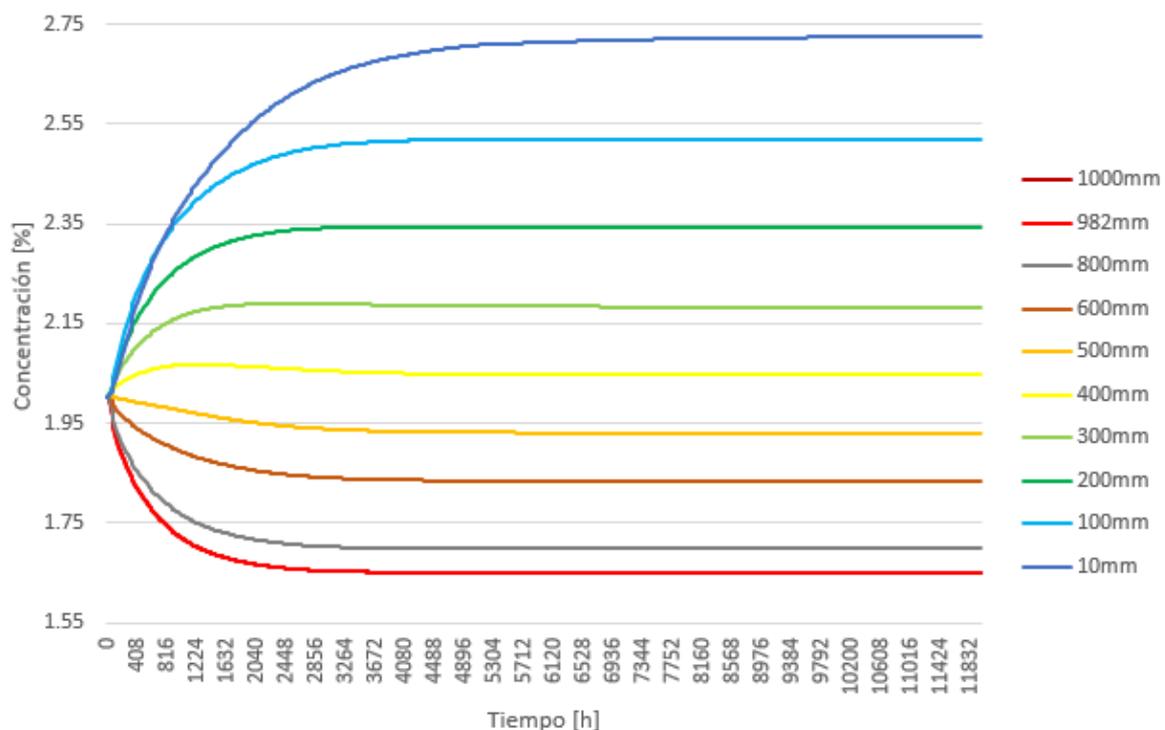


Figura 5.14 Evolución de la concentración en un punto de en medio del papel para diferentes alturas para una carga del 100% de la nominal y una concentración inicial de 2%.

En la Figura 5.14 se puede ver como en la zona superior del transformador donde las temperaturas son altas, la concentración de humedad (%) en el papel disminuye con el tiempo (h), lo cual implica una migración de moléculas de agua hacia el aceite, donde la concentración de humedad (ppm) aumentará. Sin embargo, al llegar a un punto intermedio ( $\approx 400\text{mm}$ ), donde las temperaturas comienzan a ser inferiores, la cantidad de moléculas de agua presentes en el papel celulósico aumenta a lo largo del tiempo con la consecuente disminución de la concentración en el aceite. Además, se puede observar que para la altura para la que se obtenía la máxima temperatura (982mm), se obtiene la mínima concentración a lo largo del tiempo. El modelo está sometido a una carga constante en el tiempo, esto significa que una vez estabilizados los valores de la concentración de humedad en todo el papel, estos permanecerán constantes a lo largo del tiempo.

Como se aprecia en la Figura 5.15 y la Figura 5.16, la concentración en el papel tiende a buscar la concentración de equilibrio de la interfase, pero esta varía con el tiempo debido a su dependencia de la humedad presente en el aceite (ppm) en cada instante de tiempo.

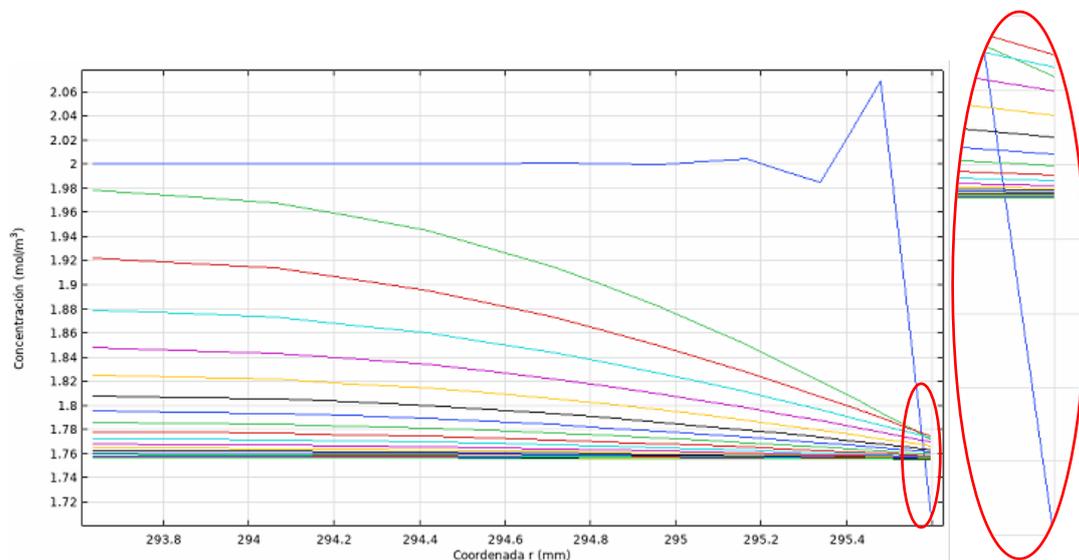


Figura 5.15 Evolución de la concentración de humedad en lo ancho del papel a una altura de 700mm

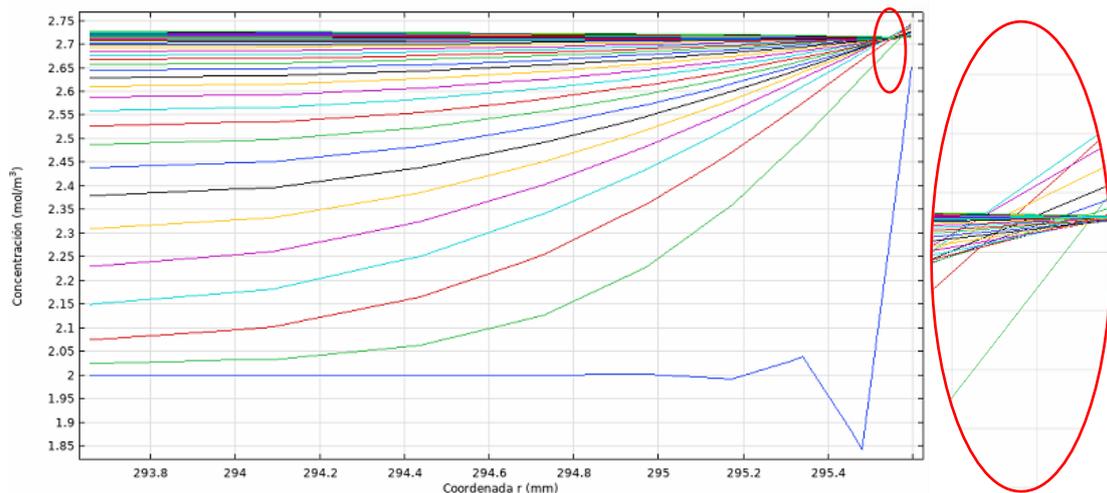


Figura 5.16 Evolución de la concentración de humedad en lo ancho del papel a una altura de 10mm

Debido a lo mencionado en el párrafo anterior, la concentración inicial en el ancho del papel tenderá al valor inicial de la concentración de equilibrio en el instante inicial, pero para los siguientes instantes cambiará su tendencia en función del valor de la concentración de equilibrio en la interfase, tal y cómo se puede apreciar en la parte señalada de la Figura 5.15. Si observamos la manera en la que varía la concentración en la interfase (Figura 5.17) veremos que realiza la misma evolución que en la Figura 5.15, es decir, primero aumenta conforme va incrementándose la concentración de humedad en el aceite (ppm) para luego estabilizarse. Esta variación será proporcional a la temperatura (de la cual depende la concentración de equilibrio), pero variará de la misma manera a cualquier altura de la interfase. Además, en la Figura 5.16 se puede ver cómo hay un punto en el papel donde la concentración de humedad apenas varía, lo cual significa que en ese punto la concentración es aproximadamente igual a la concentración de equilibrio.

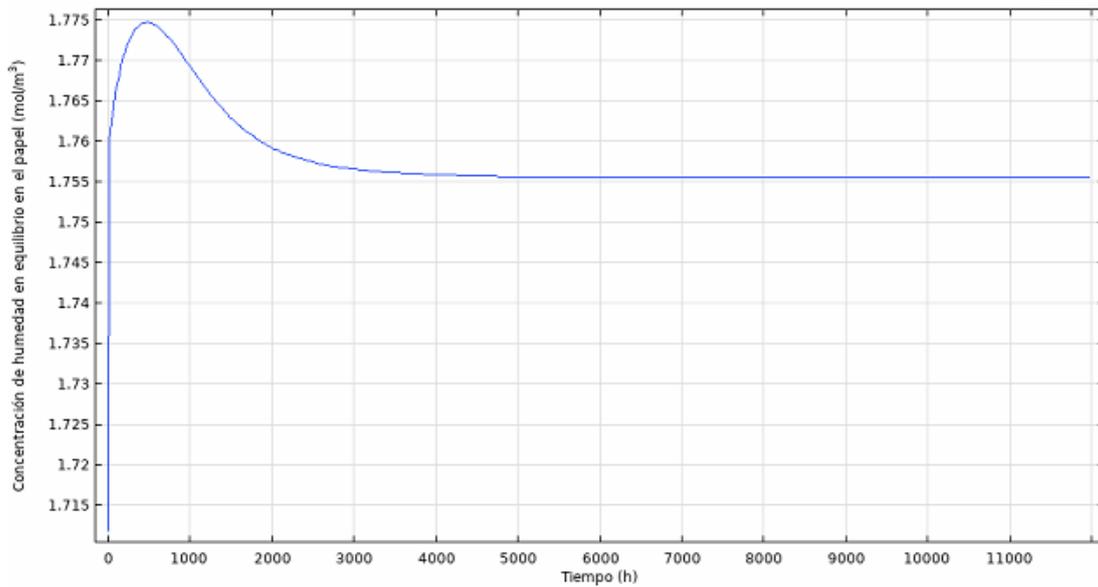


Figura 5.17 Evolución de la concentración de equilibrio en la interfase a una altura de 700mm

### 5.2.2.2 Análisis para diferentes niveles de carga y concentraciones de humedad

En este apartado se estudiará la dependencia de la humedad respecto de las diferentes distribuciones de temperatura que resultan al aplicar distintas potencias. Además, también se analizará en qué medida afecta el nivel de concentración inicial tanto del papel como del aceite para diferentes casos.

Para poder analizar la evolución de la concentración con cada potencia, se simula el modelo temporal de difusión con una concentración inicial de humedad en el papel del 2% para cada potencia y posteriormente se agrupan los datos obtenidos para una misma altura (Figura 5.18). Estas simulaciones se llevan a cabo utilizando los valores iniciales para cada potencia expuestos en el apartado 4.5.3.

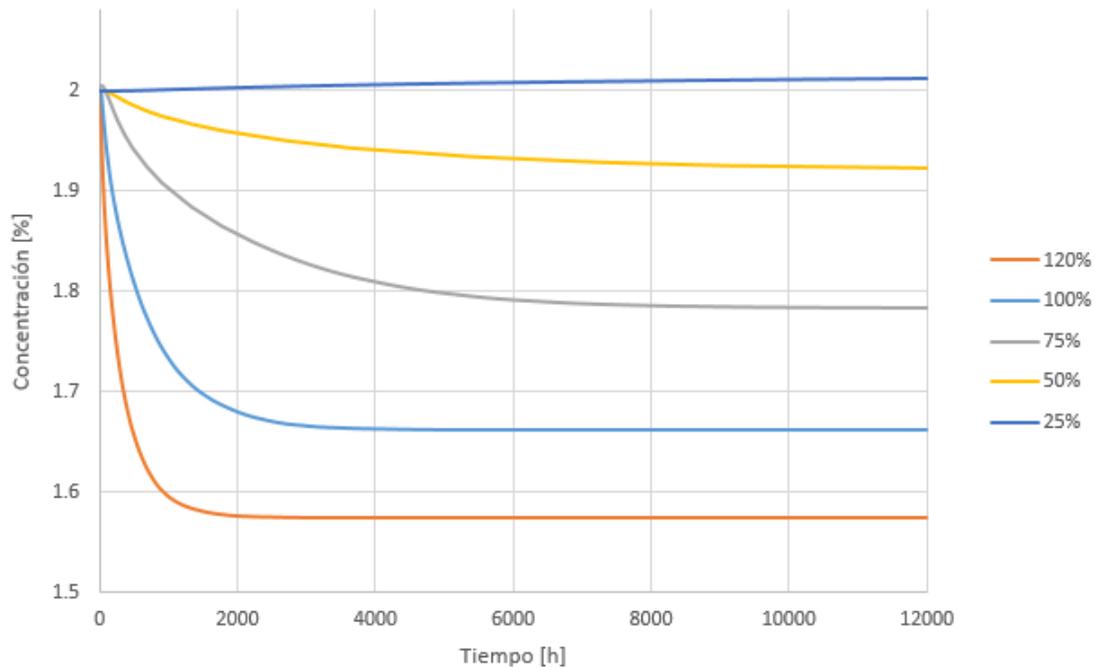


Figura 5.18 Concentración en un punto medio del papel a una altura de 980mm para las distintas potencias

Para analizar los tiempos en alcanzar el régimen permanente (Tabla 5.2) se establece un criterio específico por el cual se considera que el equilibrio se ha establecido cuando el valor sea mayor que el 90% del valor final.

Tabla 5.2 Comparativa de tiempos de equilibrio según la potencia

Carga (% de la potencia nominal)	Tiempo aproximado de equilibrio de humedades (h)
25%	20000
50%	12000
75%	11000
100%	5000
120%	2000

En la Figura 5.18 se puede ver cómo la potencia afecta directamente a la difusión de la humedad ya que, a mayor potencia, mayor flujo calórico por pérdidas del conductor y, por lo tanto, las temperaturas en el papel celulósico serán más elevadas. Esto afecta de manera directa al coeficiente de difusión  $D(c, T, l)$  (2.7) ya que, considerando una cierta concentración de humedad y espesor del papel celulósico, al aumentar la distribución de temperaturas (divisor), la potencia exponencial es mayor, esto hará que el coeficiente de difusión sea mayor. Por lo tanto, como la Ley de Fick (4.19), que modela la velocidad de

difusión, es proporcional al coeficiente de difusión, cuanto mayor sea este, más rápido se difunde la humedad.

Por otro lado, se analiza la evolución de la concentración de humedad en un punto intermedio del papel a una altura cercana a la del punto caliente (Figura 5.19) en función de la concentración inicial para una potencia constante del 100% de la nominal. Se puede apreciar cómo la concentración de equilibrio (régimen permanente) se establece con mayor rapidez para concentraciones iniciales más altas. Esto se debe a que, si consideramos el coeficiente de difusión (2.7) para una cierta distribución de temperaturas y un espesor del aislamiento celulósico, cuanto mayor sean las concentraciones, mayor es el exponente de la función y, por lo tanto, el agua tendrá mayor movilidad y la concentración de equilibrio se establecerá en menos tiempo.

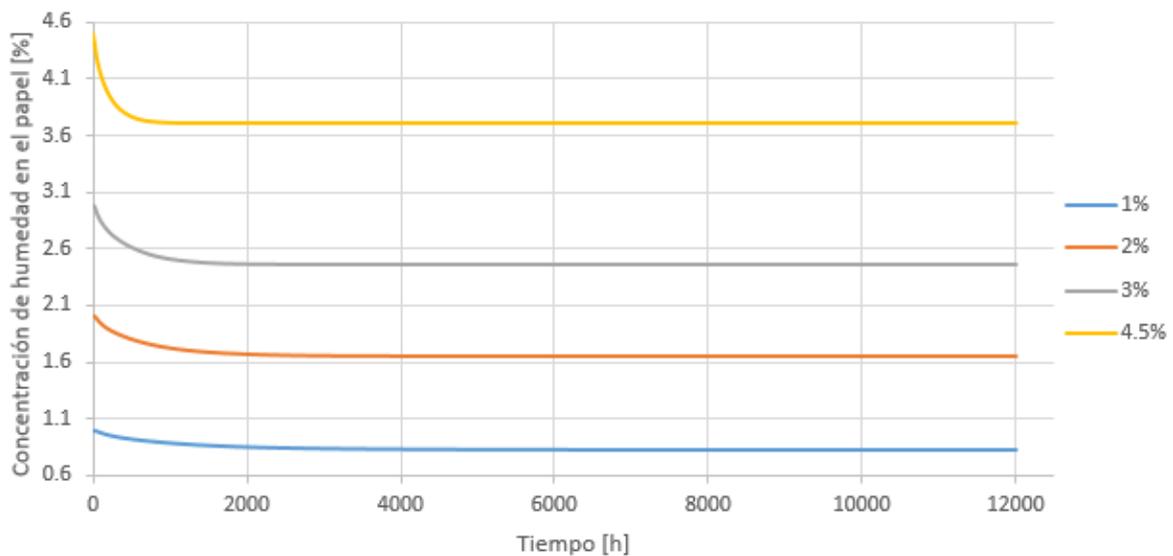


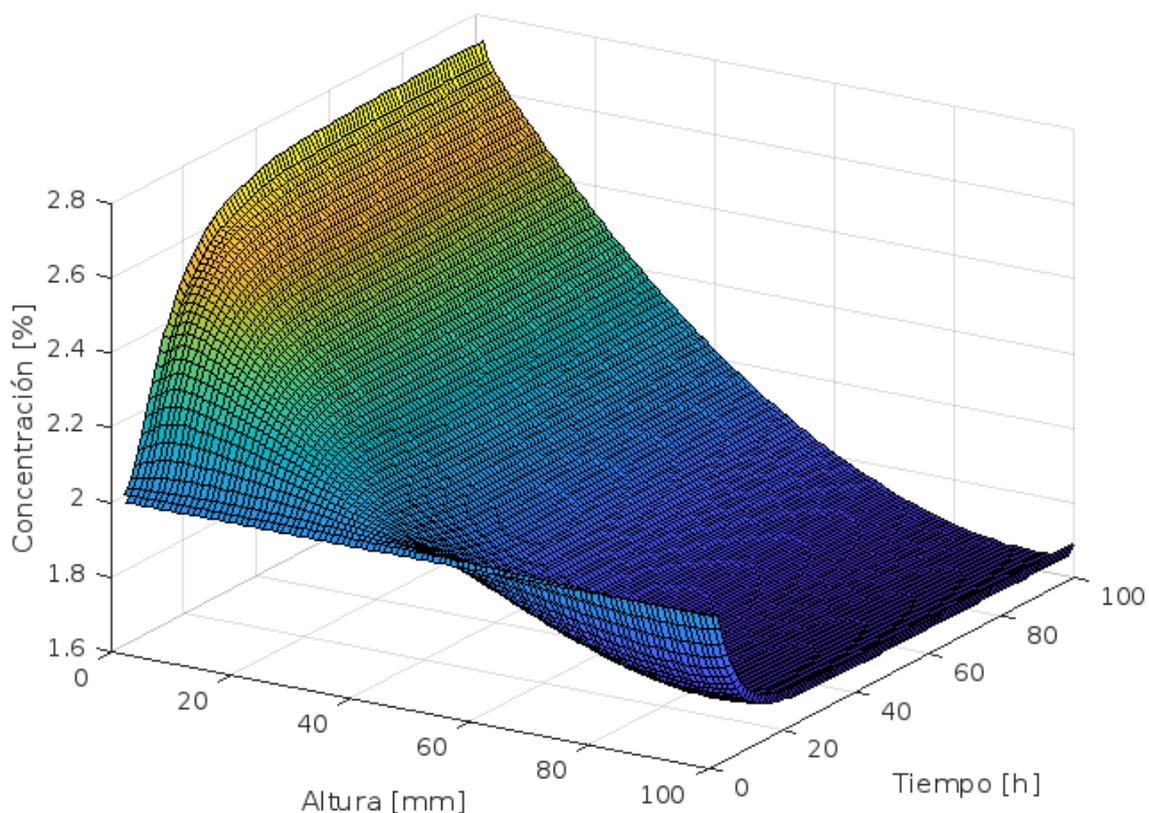
Figura 5.19 Evolución de la concentración en el papel a una altura de 980mm para diferentes concentraciones iniciales para una potencia del 100% de la nominal.

Tabla 5.3 Comparativa de tiempos de equilibrio según la concentración de humedad inicial en el papel

Concentración inicial de humedad en el papel (%)	Tiempo aproximado de equilibrio de humedades (h)
1%	7000
2%	5000
3%	3000
4,5%	1200

En el Anexo 8.4 se presentan el resto de las curvas que relacionan la evolución de la concentración a distintas potencias con las diferentes concentraciones iniciales de humedad en el papel.

Se produce un gradiente de concentraciones de humedad en la altura del papel, producido por la distribución de temperaturas del papel generada por la potencia disipada por el devanado. Por lo tanto, se puede equiparar la relación concentración-altura con la relación concentración-temperatura. Es por esto por lo que si representamos esta relación a lo largo del tiempo (Figura x) podremos observar la dependencia térmica de la humedad. Dicho análisis se realiza en la interfase papel-cobre, ya que constituyen los puntos más alejados de la zona de intercambio de humedad entre el papel y el aceite y que, por lo tanto, tardará más tiempo en alcanzar la concentración de equilibrio.



*Figura 5.20 Evolución de la concentración de humedad con respecto de la altura en al interfase papel-cobre para una potencia del 100% de la nominal y concentración inicial de humedad del 2%*

Como se puede ver en la Figura 5.20, la concentración de la humedad parte de un valor inicial constante para toda la altura (2% en este caso), posteriormente, a bajas alturas la

concentración de las moléculas de agua va aumentando mientras que en la parte superior del transformador la concentración disminuye. Esto se debe a que, como se explicó en el apartado 5.2.2.1 las temperaturas son más elevadas en la parte superior del transformador, y por esto, la humedad disminuye en esas zonas, al contrario que en la parte inferior.

Además, cabe destacar que hay un punto a mitad de la altura cuya concentración de humedad permanece aproximadamente constante. Esto quiere decir que dicho punto tiene una concentración inicial igual a la de equilibrio y, por lo tanto, permanece estático a lo largo del tiempo con una concentración del 2%.

Si comparamos la superficie para una potencia del 100% de la nominal con las del 25%, 50%, 75% y 120% (expuestas en el anexo 8.4) se aprecia cómo los extremos superior e inferior del papel van adoptando concentraciones menores y mayores respectivamente, mientras que el punto central se mantiene constante para las distintas potencias. Esto se debe a que al elevar la potencia se produce un mayor gradiente en la distribución de temperaturas. De la misma manera, al aumentar la concentración inicial se observa un incremento más temprano de la concentración de la humedad (Anexos 8.4.8, 8.4.9 y 8.4.10), debido a la mayor cantidad de agua presente en la celulosa.

## 6 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este apartado se presentan las conclusiones generales obtenidas tras desarrollar el trabajo. Además, se resumen los trabajos futuros de investigación a los que podría dar lugar.

### 6.1 CONCLUSIONES GENERALES

En este trabajo se ha propuesto una metodología sistemática para el acoplamiento unidireccional de las físicas termo-hidráulica y de transporte de especies diluidas. Este método se aplica sobre el sistema dieléctrico de una capa del bobinado de baja tensión de un transformador de potencia. Una vez analizados los resultados numéricos se puede exponer las siguientes conclusiones extraídas de los mismos:

Se ha encontrado una relación directa entre el modelo termo-hidráulico y el modelo de difusión de la humedad a través del coeficiente de difusión y la concentración de equilibrio entre el papel celulósico y el aceite mineral. El coeficiente de difusión (dependiente del espesor, concentración y temperatura del papel celulósico) es el factor principal que modeliza la física de la difusión de humedad, por eso, analizándolo se ha podido estudiar el comportamiento de las moléculas de agua en los materiales dieléctricos de un transformador en operación.

Se ha observado que, al tener una distribución de temperaturas en el papel, la humedad se redistribuye siguiendo una distribución proporcional a la de temperaturas. Conforme la temperatura en el papel dieléctrico se eleva, la concentración disminuye (siendo evacuada hacia el aceite). Por otro lado, cuando la temperatura es baja, la concentración de humedad aumenta, pasando del aceite mineral al papel celulósico. En el punto caliente del papel, se encuentra la máxima temperatura y mínima concentración de humedad, mientras que en el punto frío se dará una concentración de humedad máxima y una temperatura mínima.

El punto medio de la altura del transformador posee una concentración de humedad inicial igual a la de equilibrio, por lo tanto, esta no varía a lo largo del tiempo. En alturas superiores a ese punto, la humedad disminuirá y en alturas por debajo de esa, la humedad aumentará.

## 6.2 SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS

A continuación, se mencionan algunas líneas de investigación que se pueden abordar en un futuro, empleando los resultados y la experiencia obtenidos durante el desarrollo de este trabajo.

Uno de los trabajos a desarrollar es el cerramiento de la interdependencia describiendo la dependencia que tiene el modelo térmico con respecto al modelo de difusión. Esto significa analizar cómo afecta el grado de concentración de moléculas de agua a las propiedades físico-químicas tanto del papel celulósico como del aceite mineral, que son los principales contenedores de humedad en un transformador. Esto, cerraría el acoplamiento de ambas físicas, además realimentaría al lazo estudiado en este trabajo, sirviendo como entrada y creando un modelo cíclico.

Los transformadores son máquinas que están conectadas a la red eléctrica y que, por lo tanto, están sometidos a cargas variables en el tiempo. En futuros estudios se podrá introducir un ciclo de carga variable en el tiempo representando por ejemplo la variación a lo largo de un día de funcionamiento. De esta manera se verá la evolución temporal de la concentración en función de la carga aplicada en ese instante ya que debido a la alta constante de tiempo de la difusión de la humedad y la variación de la carga en un periodo relativamente más corto no dará tiempo a las moléculas de agua a distribuirse de manera que alcancen el equilibrio.

## 7 REFERENCIAS

- [1] J. Carcedo, “Aportaciones al estudio del envejecimiento de componentes dieléctricos en transformadores de potencia.” p. 133, 2015.
- [2] Alejandro Piquero González, “EVALUACIÓN EXPERIMENTAL Y NUMÉRICA DE LA INFLUENCIA DEL ENVEJECIMIENTO EN LA CAPACIDAD REFRIGERANTE DE UN LÍQUIDO DIELECTRICO BIODEGRADABLE,” 2017.
- [3] “Ing.-Victor-Gonzales-Zamora\_compressed-7.”
- [4] D. F. García and I. Electricista, “Trabajo de investigación como requisito parcial para optar por el título de Magíster en Ingeniería,” 2018.
- [5] Delfin Silió Salcines, *Apuntes de Ingeniería Térmica I*. 2020.
- [6] J. Carlos, C. Valdes, and J. De, “INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY.”
- [7] Conseil international des grands réseaux électriques. Comité d'études A2. and Impr. conformes), *Moisture equilibrium and moisture migration within transformer insulation systems*. CIGRÉ, 2008.
- [8] “TesisDoctoral Diego F Garcia.”
- [9] B. Garcia, R. Villarroel, and D. Garcia, “A Multiphysical model to study moisture dynamics in transformers,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 34, no. 4, pp. 1365–1373, Aug. 2019.
- [10] (Vega, 2021) Vega, M. D. (2021). *Evaluación experimental y numérica de las propiedades dieléctricas del papel aislante en función del envejecimiento*.
- TV Oommen, “Moisture equilibrium in paper-oil systems,” in *Electrical/Electronics Insulation Conference*, 1983.
- [11] W. A. Fessler, T. O. Rouse, and W. J. McNutt, “Bubble formation in transformers,” Palo Alto, CA, USA, 1987.
- [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] W. G. A. . CIGRE, “Moisture Equilibrium and Moisture Migration Within 349,” *Atlantic*, no. June, pp. 1–53, 2008.

- 
- [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.
- [15] "PFC - Daniel Bezanilla García."
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] GE Energy Power Systems España, S.A., "Informe sobre los trabajos realizados al transformador propiedad de CEISA Las Palmas,"

## 8 ANEXOS

### 8.1 ANEXO DE GEOMETRÍA

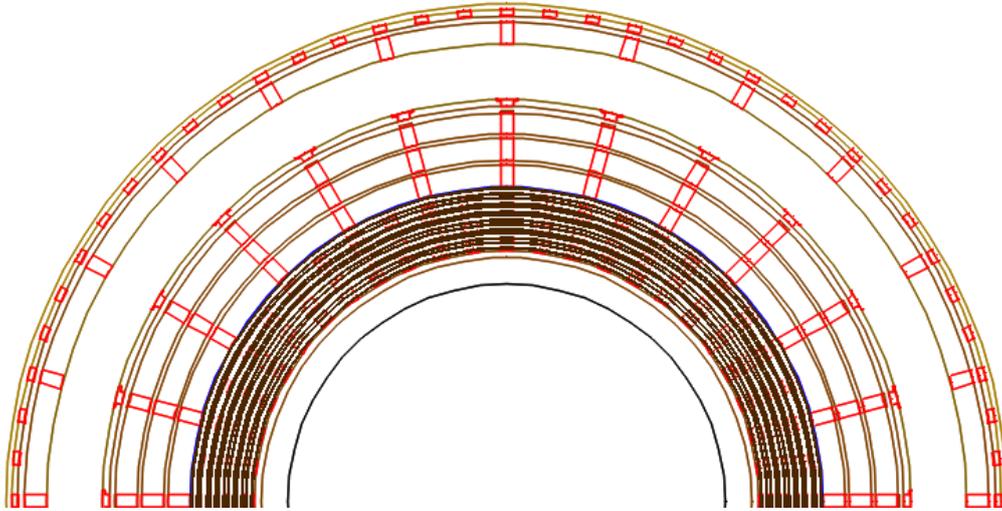


Figura 8.1 Sección vertical de las distintas capas del bobinado de baja tensión

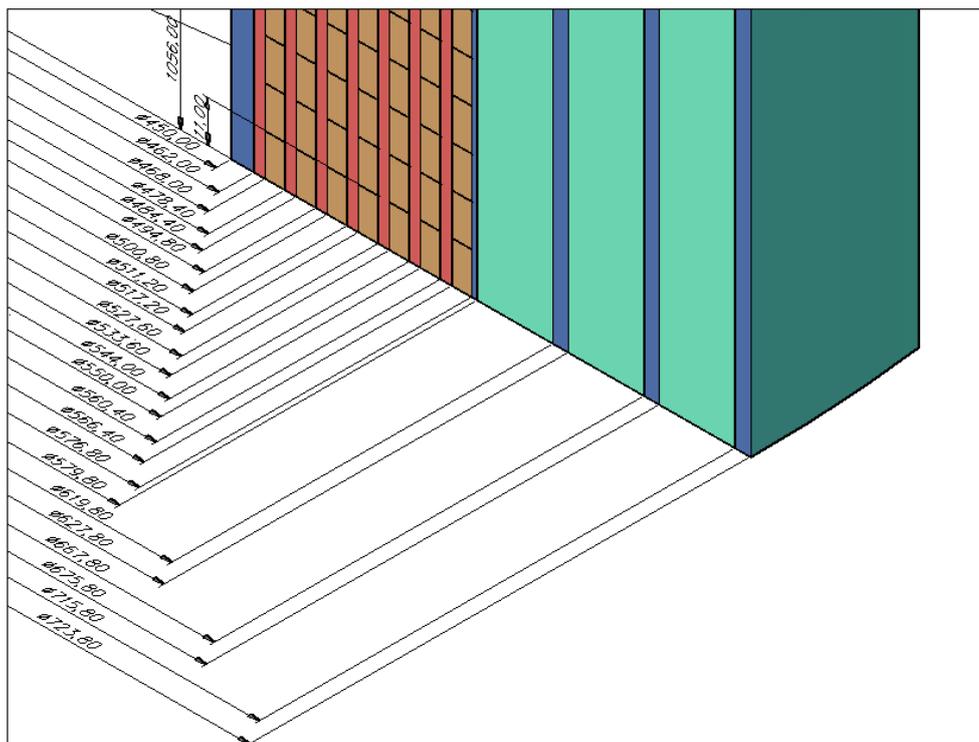


Figura 8.2 Sección transversal acotada del bobinado de baja tensión y los canales intermedios

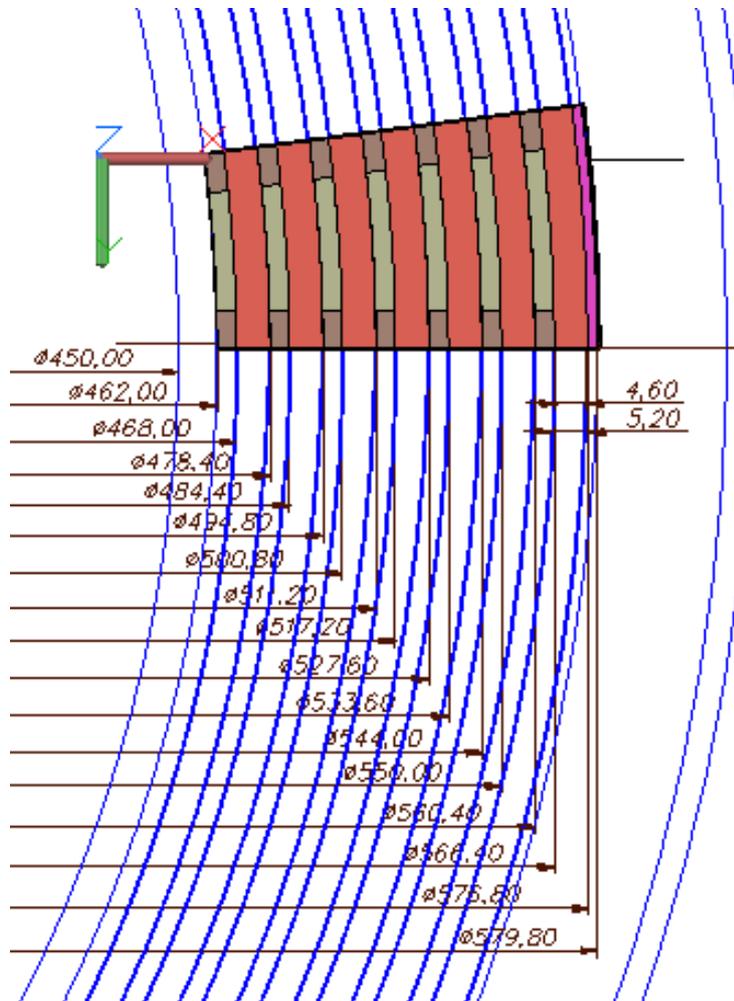
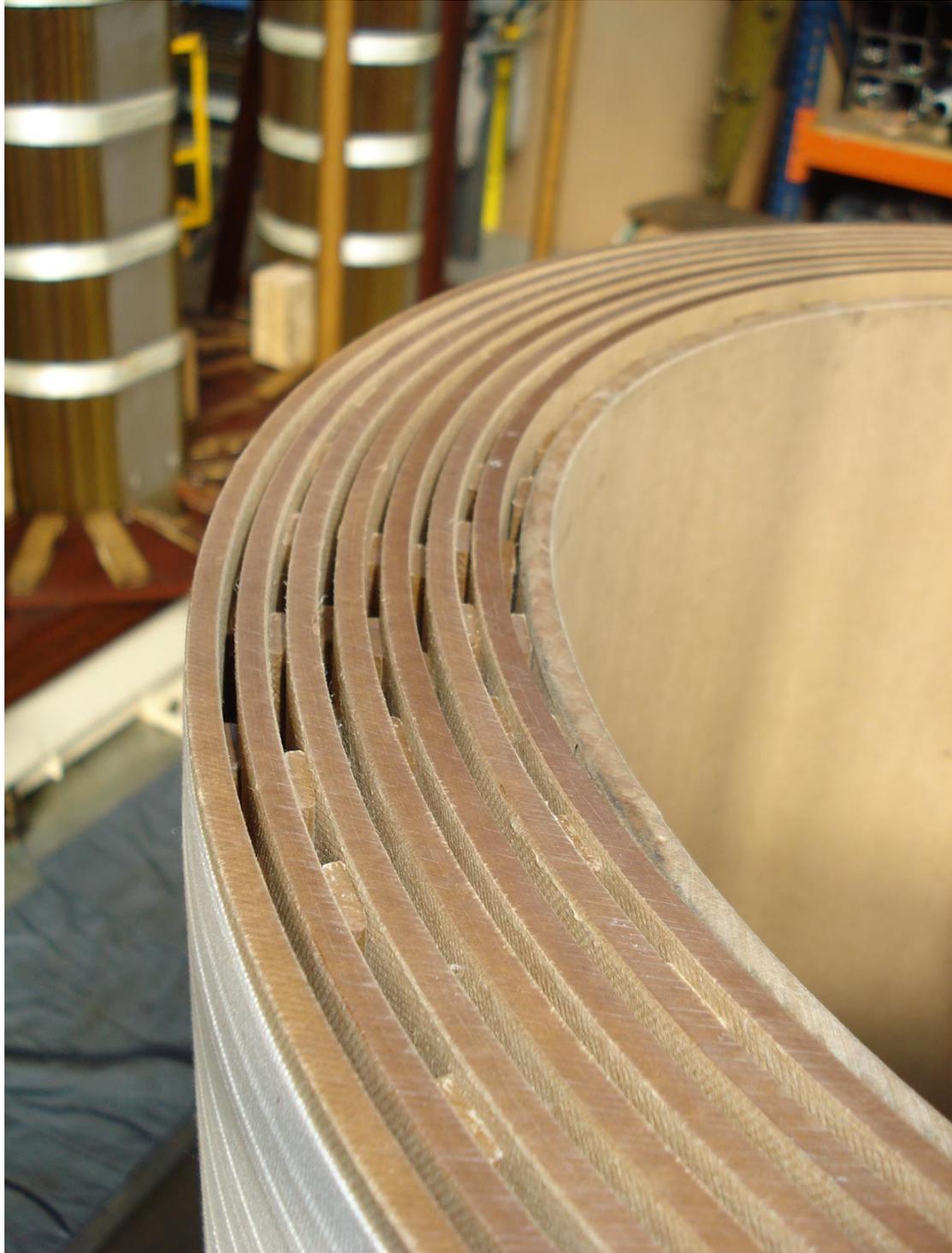
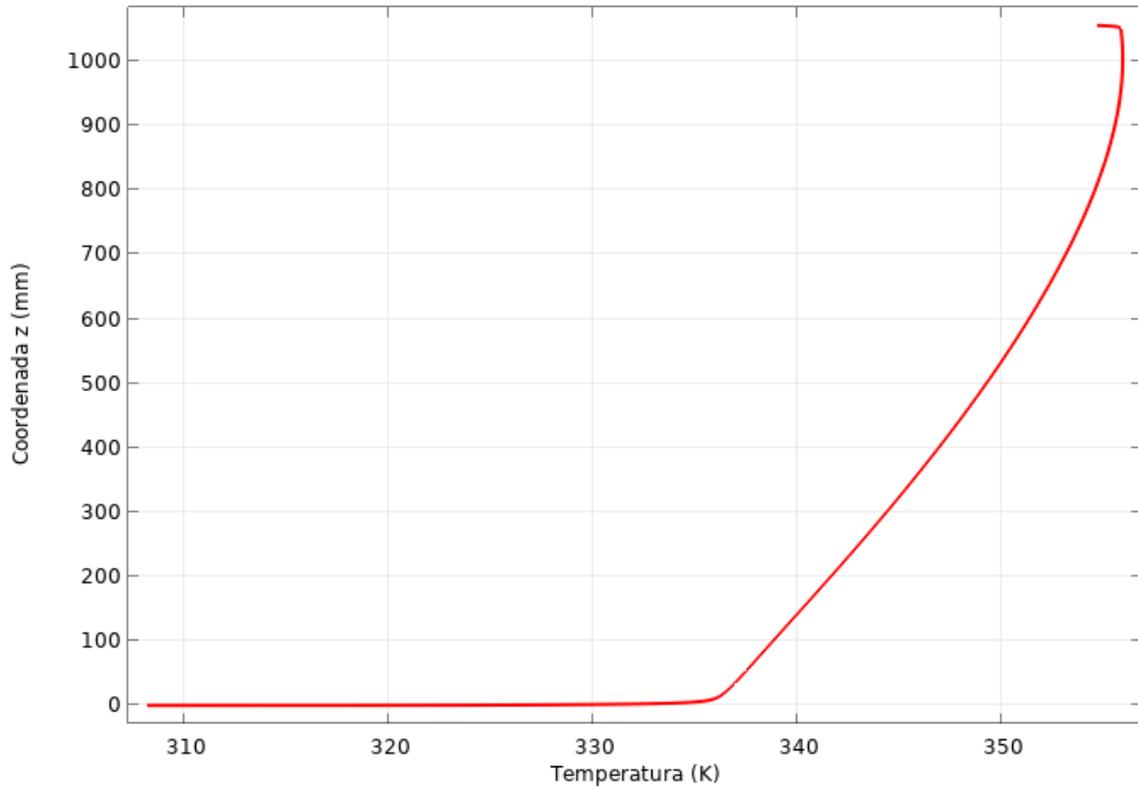


Figura 8.3 Vista acotada en planta de una sección del bobinado de baja tensión



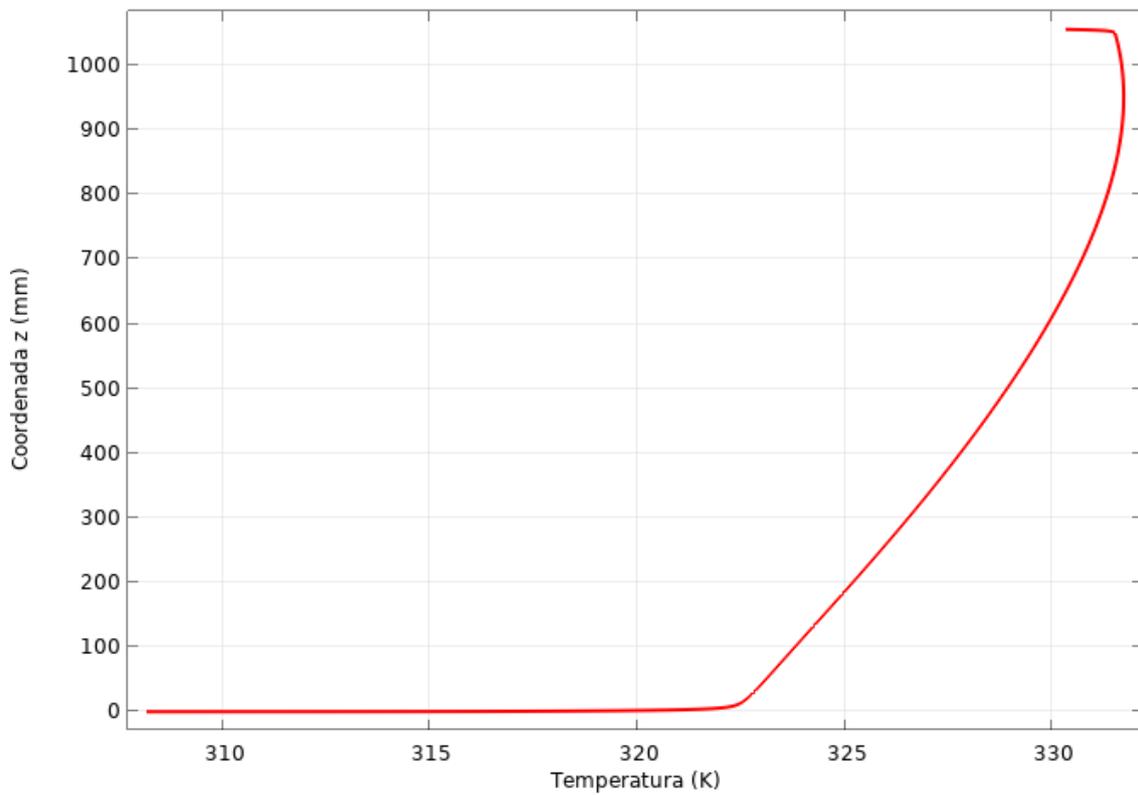
*Figura 8.4 Vista de las capas del bobinado de baja tensión para una de las fases. Fuente: [18]*

## 8.2 ANEXO DE MODELOS TÉRMICOS (DIFERENTES POTENCIAS)



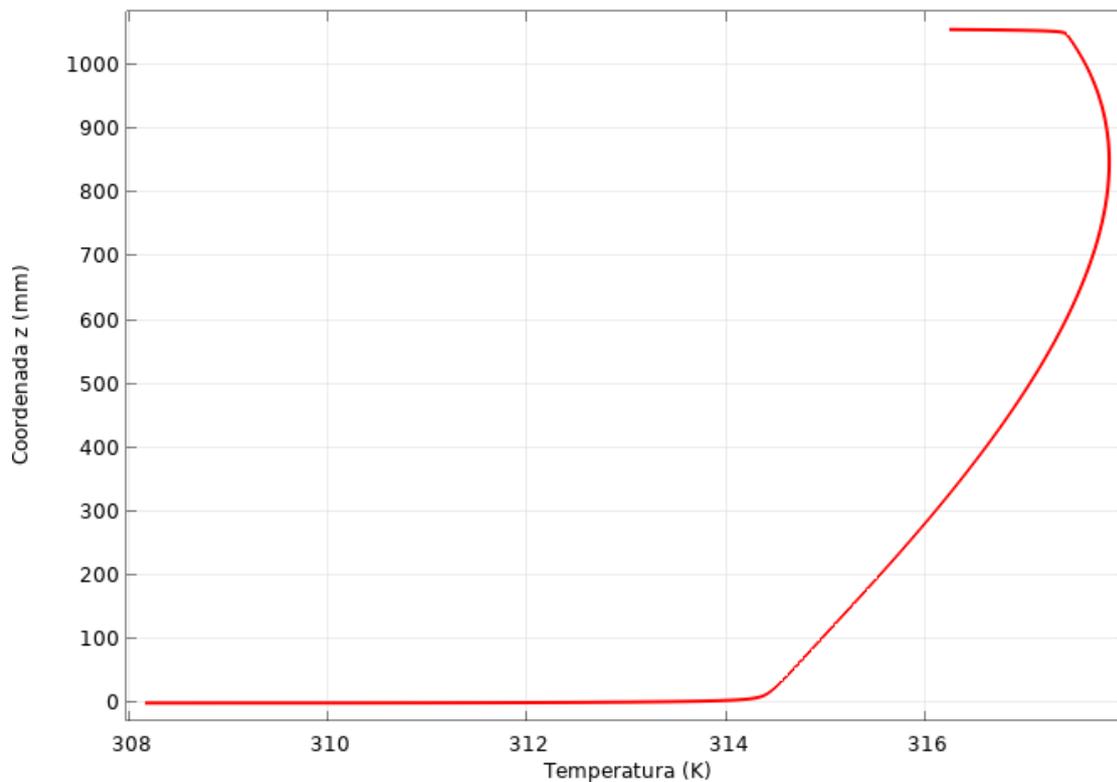
r	z	Temperature (degC)
298.97	2.6284	34.993
289.77	997.40	83.384

Figura 8.5. Distribución de temperaturas en la interfase papel-aceite para una potencia del 120% de la nominal



r	z	Temperature (degC)
298.97	2.6284	34.996
290.90	945.48	58.877

Figura 8.6 Distribución de temperaturas en la interfase papel-aceite para una potencia del 75% de la nominal



r	z	Temperature (degC)
298.97	2.6284	34.998
292.04	841.73	44.825

Figura 8.7 Distribución de temperaturas en la interfase papel-aceite para una potencia del 50% de la nominal

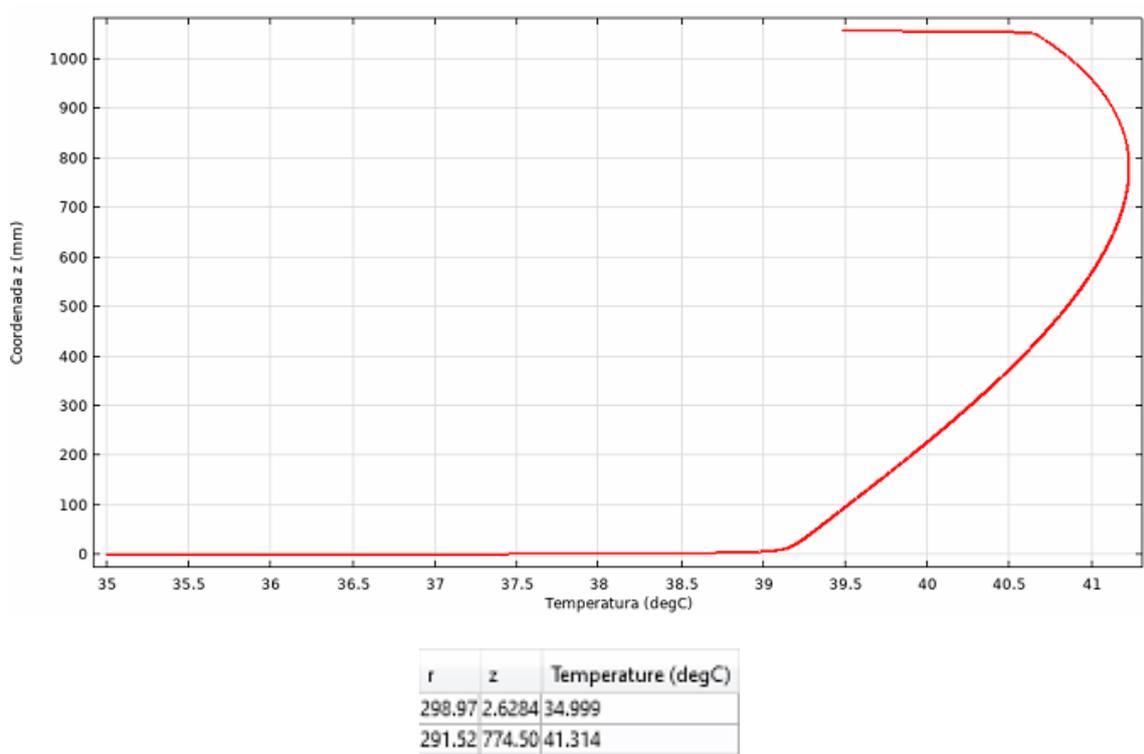


Figura 8.8 Distribución de temperaturas en la interfase papel-aceite para una potencia del 25% de la nominal

## 8.3 ANEXO DE CÓDIGOS MATLAB

### 8.3.1 Cálculo numérico de las condiciones iniciales

```

%CÁLCULO DE LAS CONDICIONES INICIALES PARA LAS DIFERENTES MUESTRAS
%Condiciones del transformador a estudiar
T=20+273.15;
Cequil=1

%Parámetros
A=7.09;
B=1567;
Pc=1.65807e5;
Tc=647.26;
a=3.2437814;
b=5.86826e-3;
c=1.1702379e-8;
d=2.1878462e-3;

%Despeje de la humedad en el aceite según las curvas de equilibrio
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=(Cequil/(2.173e-5*exp(4725.6/T)))^(1/0.6685);
ppm=(pv/pvsat)*ppmsat

```

### 8.3.2 Cálculo gráfico de las condiciones iniciales

```

%CURVA DE EQUILIBRIO DE 20 °C
%Parámetros
T=20+273.15;
A=7.09;
B=1567;
Pc=1.65807e5;
Tc=647.26;
a=3.2437814;
b=5.86826e-3;
c=1.1702379e-8;
d=2.1878462e-3;

%Ecuaciones
ppm = linspace(0,10,10000);
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=2.173e-5*(pv.^0.6685)*exp(4725.6/T);
plot(ppm,Cequil)
xlabel('Concentración de humedad en el aceite [ppm]')
ylabel('Concentración de humedad en el papel [%]')
grid on

```

### 8.3.3 Cálculo numérico de la masa total de agua en el transformador

```
%CÁLCULO DEL PESO TOTAL DE AGUA
```

```
%Parámetros
```

```
Co =
```

```
ppm =
```

```
%Ecuaciones
```

```
Mcelulosa = 1712;
```

```
Moil = 4680;
```

```
Wtot = (Mcelulosa*(Co/100)) + (Moil*(ppm/1000000))
```

## 8.4 ANEXO DE GRÁFICAS

### 8.4.1 Evolución de la concentración en función de la potencia para concentración inicial de 1%

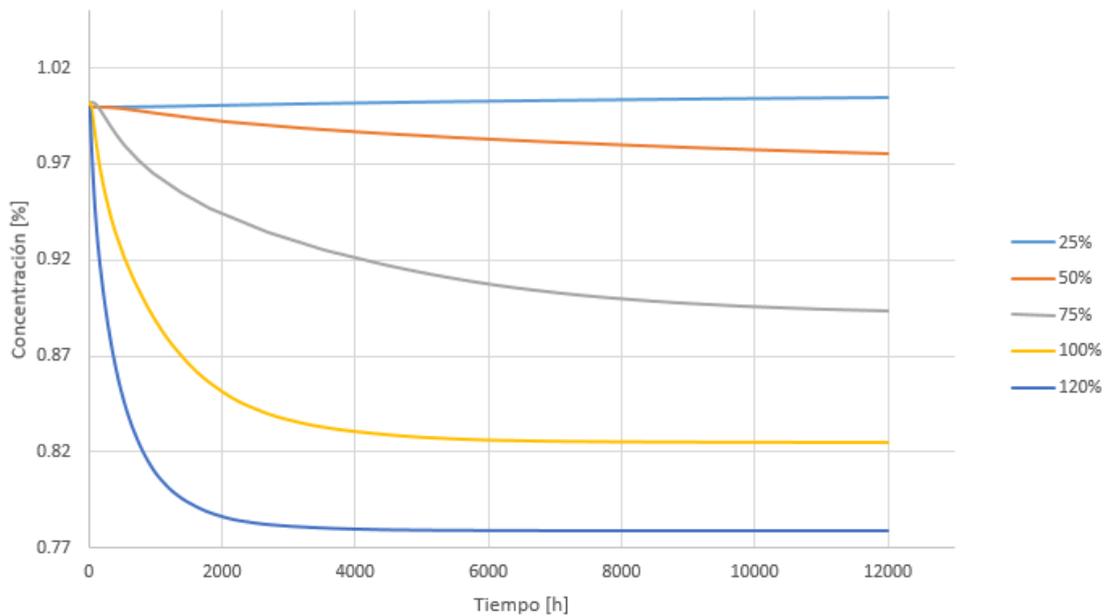


Figura 8.9 Evolución de la concentración en un punto medio del papel a una altura de 980mm para las distintas potencias y una  $C_0 = 1\%$

Tabla 8.1. Peso total de agua en función de la potencia para una concentración de humedad inicial del 1%

Potencia (% de la potencia nominal)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Concentración de humedad inicial en aceite (ppm)	Peso total de agua (kg)
25%	37,84	35	1,9	17,1293
50%	44,69	35		
75%	58,57	35		
100%	72,16	35		
120%	82,77	35		

### 8.4.2 Evolución de la concentración en función de la potencia para concentración inicial de 3%

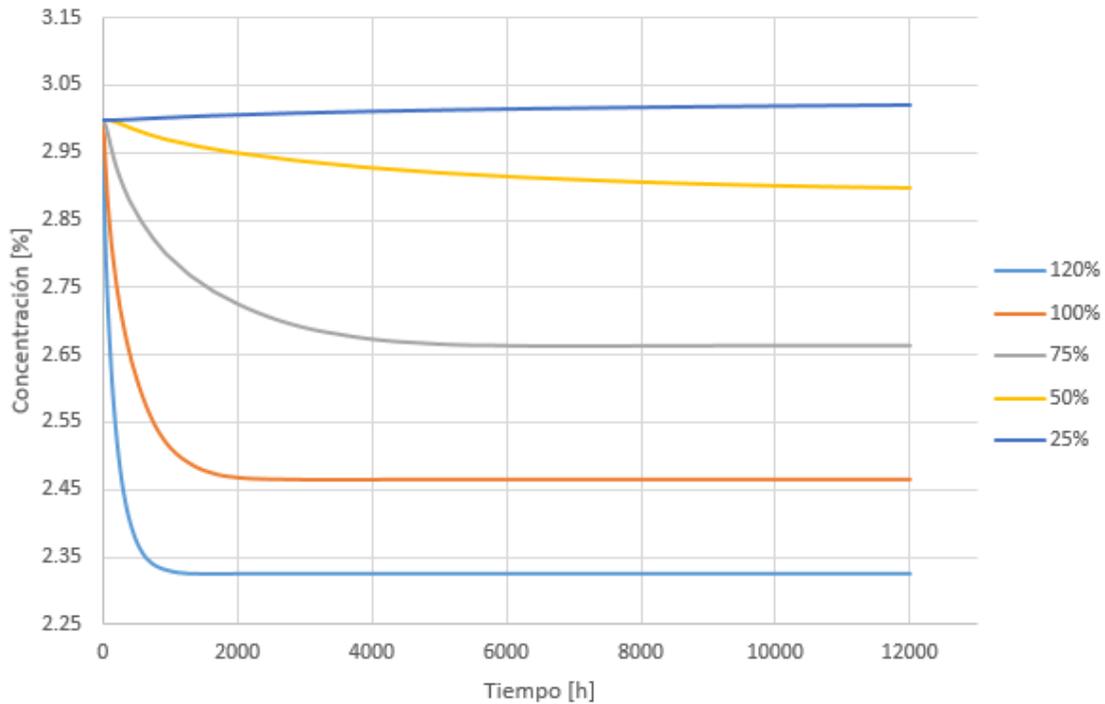


Figura 8.10 Evolución de la concentración en un punto medio del papel a una altura de 980mm para las distintas potencias y una  $CO = 3\%$

Tabla 8.2. Peso total de agua en función de la potencia para una concentración de humedad inicial del 3%

Potencia (% de la potencia nominal)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Concentración de humedad inicial en aceite (ppm)	Peso total de agua (kg)
25%	37,84	35	18,8	77,1282
50%	44,69	35		
75%	58,57	35		
100%	72,16	35		
120%	82,77	35		

### 8.4.3 Evolución de la concentración en función de la potencia para concentración inicial de 4,5%

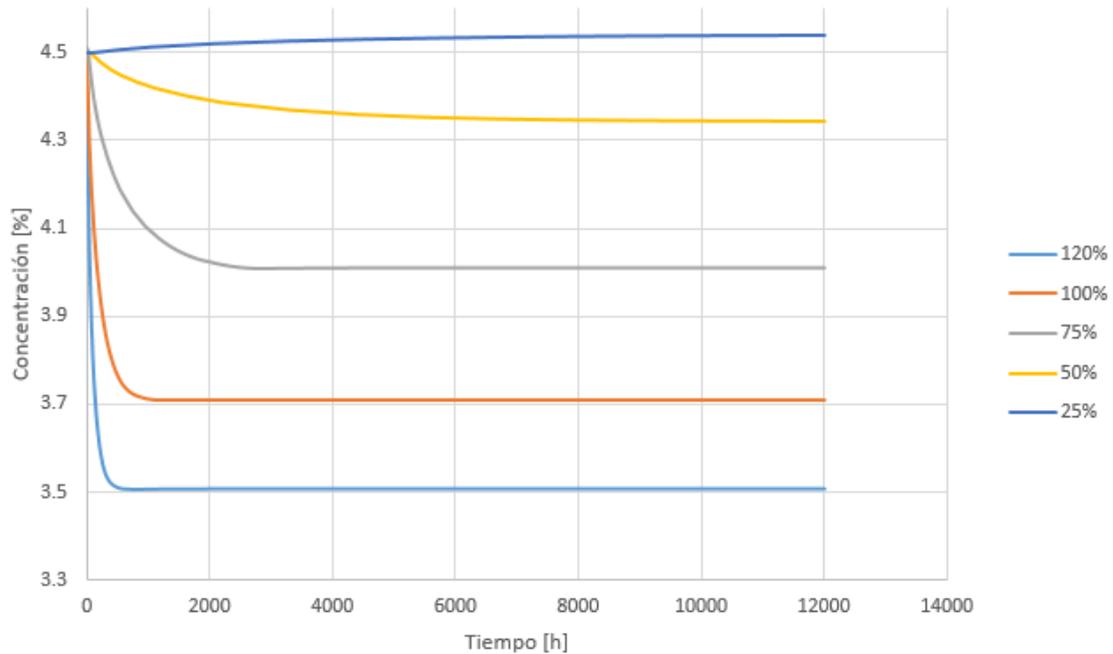


Figura 8.11 Evolución de la concentración en un punto medio del papel a una altura de 980mm para las distintas potencias y una  $C_0 = 4.5\%$

Tabla 8.3. Peso total de agua en función de la potencia para una concentración de humedad inicial del 4,5%

Potencia (% de la potencia nominal)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Concentración de humedad inicial en aceite (ppm)	Peso total de agua (kg)
25%	37,84	35	18,8	77,1282
50%	44,69	35		
75%	58,57	35		
100%	72,16	35		
120%	82,77	35		

#### 8.4.4 Superficie para 25% de la potencia nominal

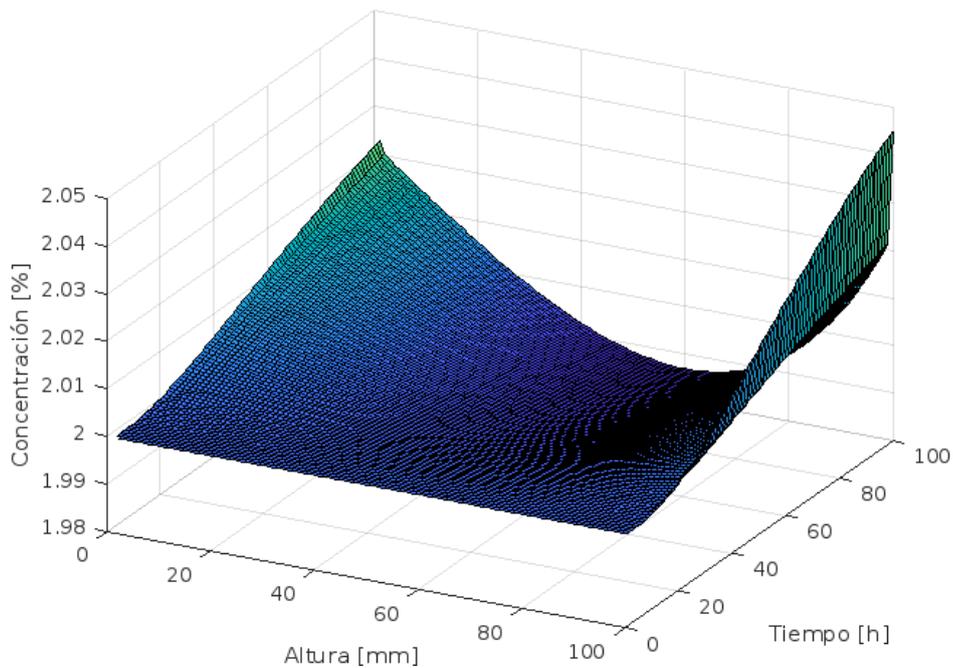


Figura 8.12 Evolución de la concentración de humedad con respecto de la altura en al interfase papel-cobre para una potencia del 25% de la nominal y concentración inicial de humedad del 2%

#### 8.4.5 Superficie para 50% de la potencia nominal

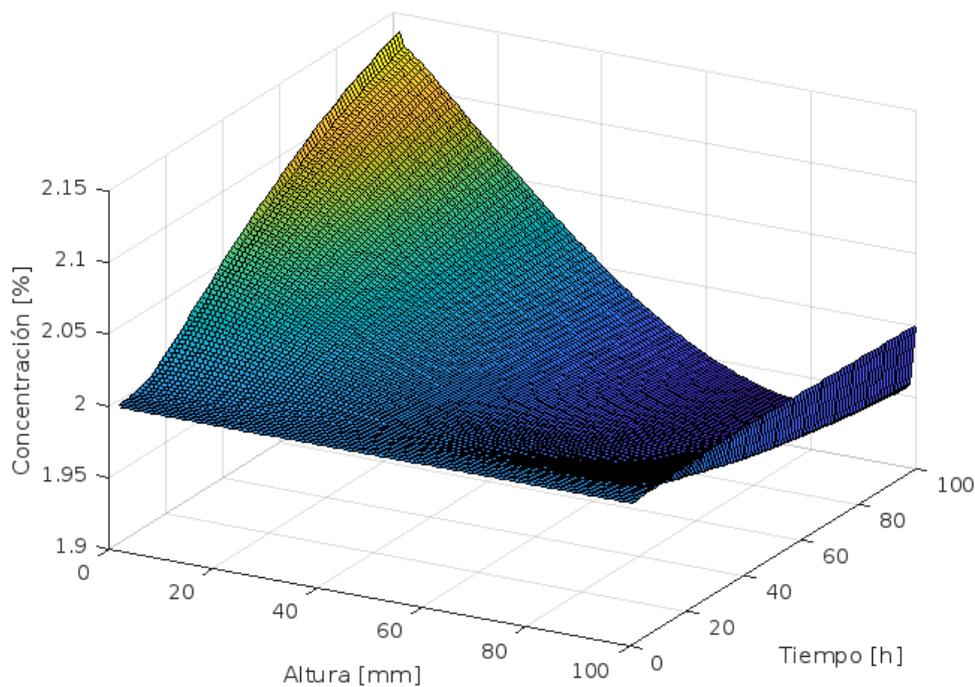


Figura 8.13 Evolución de la concentración de humedad con respecto de la altura en al interfase papel-cobre para una potencia del 50% de la nominal y concentración inicial de humedad del 2%

#### 8.4.6 Superficie para 75% de la potencia nominal

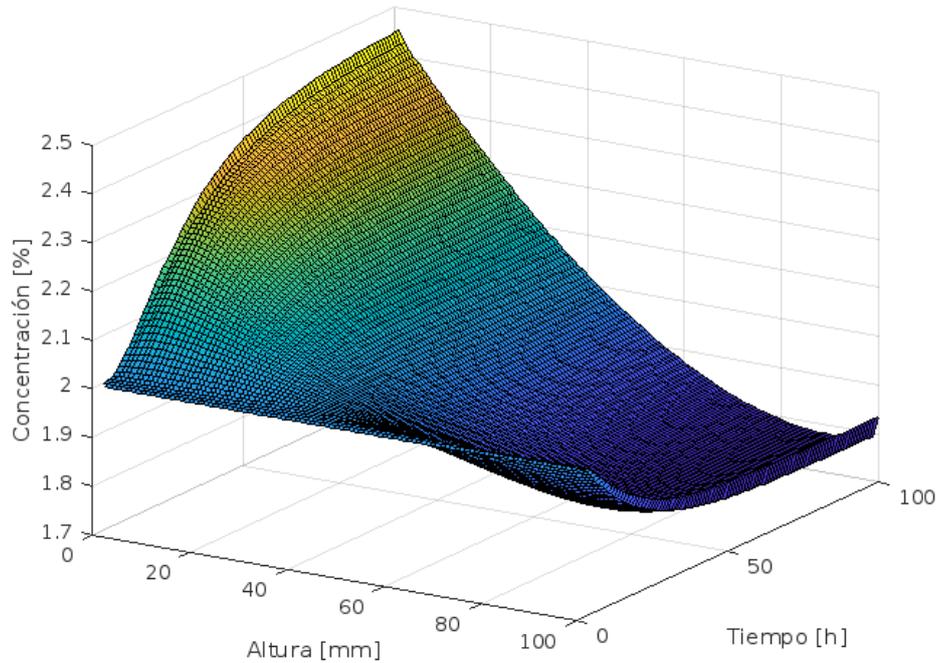


Figura 8.14 Evolución de la concentración de humedad con respecto de la altura en al interfase papel-cobre para una potencia del 75% de la nominal y concentración inicial de humedad del 2%

#### 8.4.7 Superficie para 120% de la potencia nominal

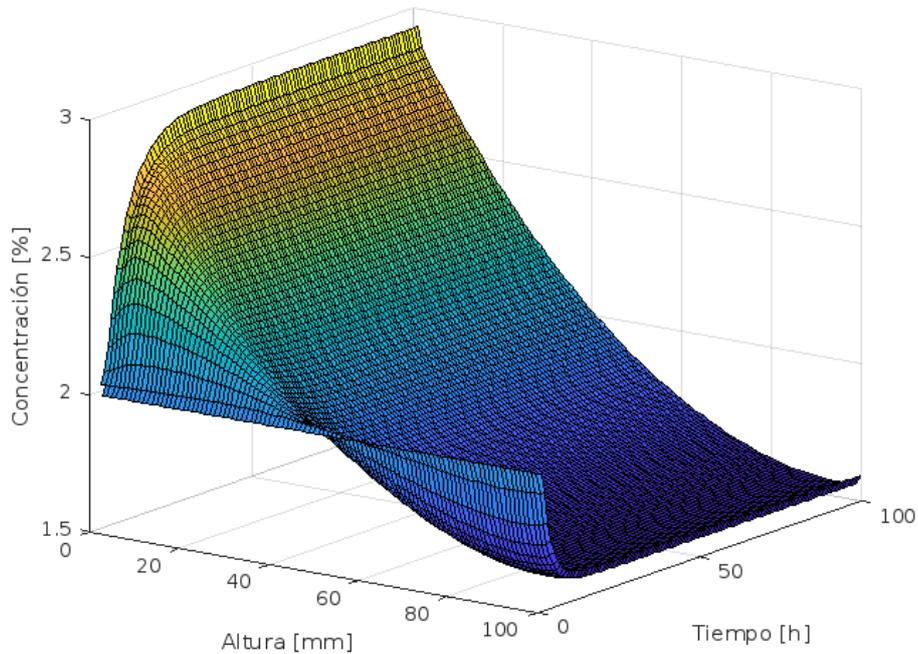


Figura 8.15 Evolución de la concentración de humedad con respecto de la altura en al interfase papel-cobre para una potencia del 120% de la nominal y concentración inicial de humedad del 2%

#### 8.4.8 Superficie para 100% de la potencia nominal y $C_0 = 4,5\%$

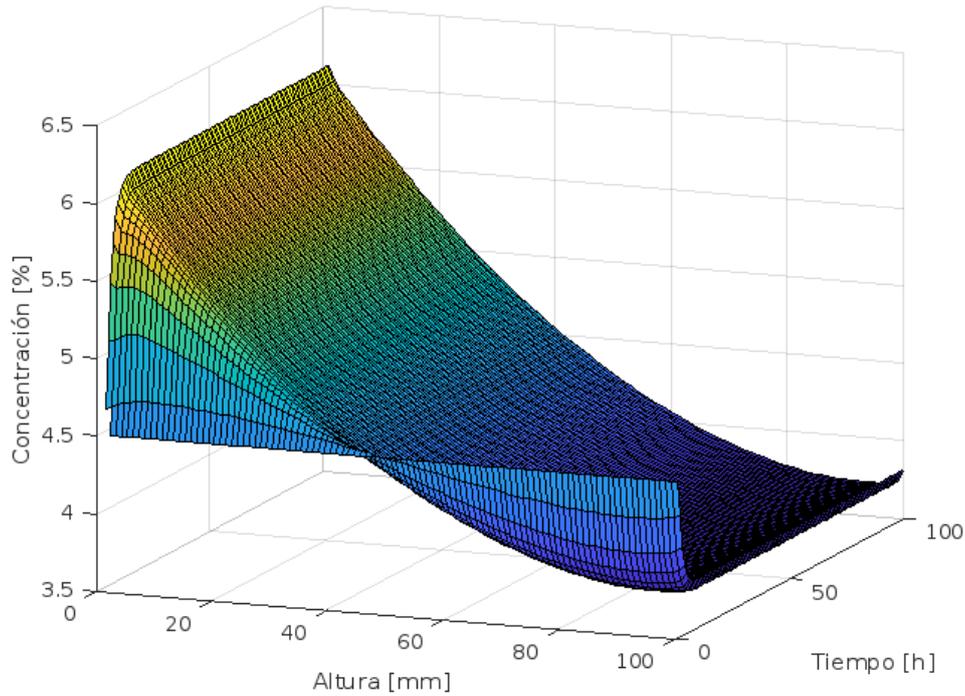


Figura 8.16 Evolución de la concentración de humedad con respecto de la altura en al interfase papel-cobre para una potencia del 100% de la nominal y concentración inicial de humedad del 4,5%

#### 8.4.9 Superficie para 100% de la potencia nominal y $C_0 = 1\%$

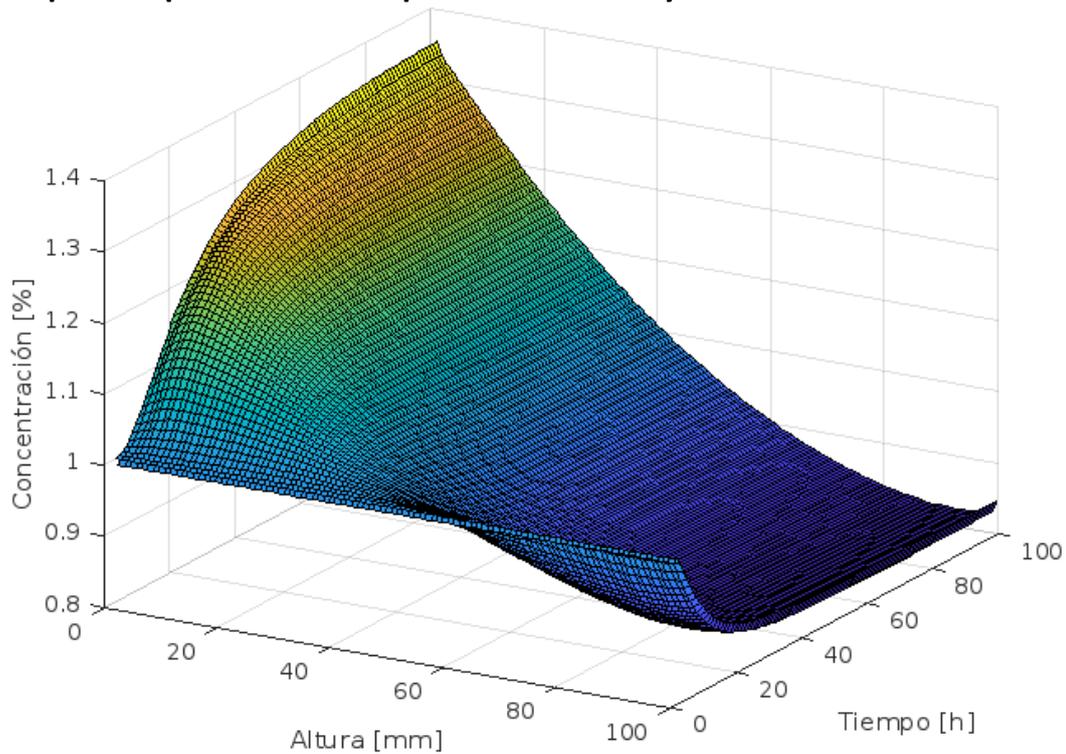


Figura 8.17 Evolución de la concentración de humedad con respecto de la altura en al interfase papel-cobre para una potencia del 100% de la nominal y concentración inicial de humedad del 1%

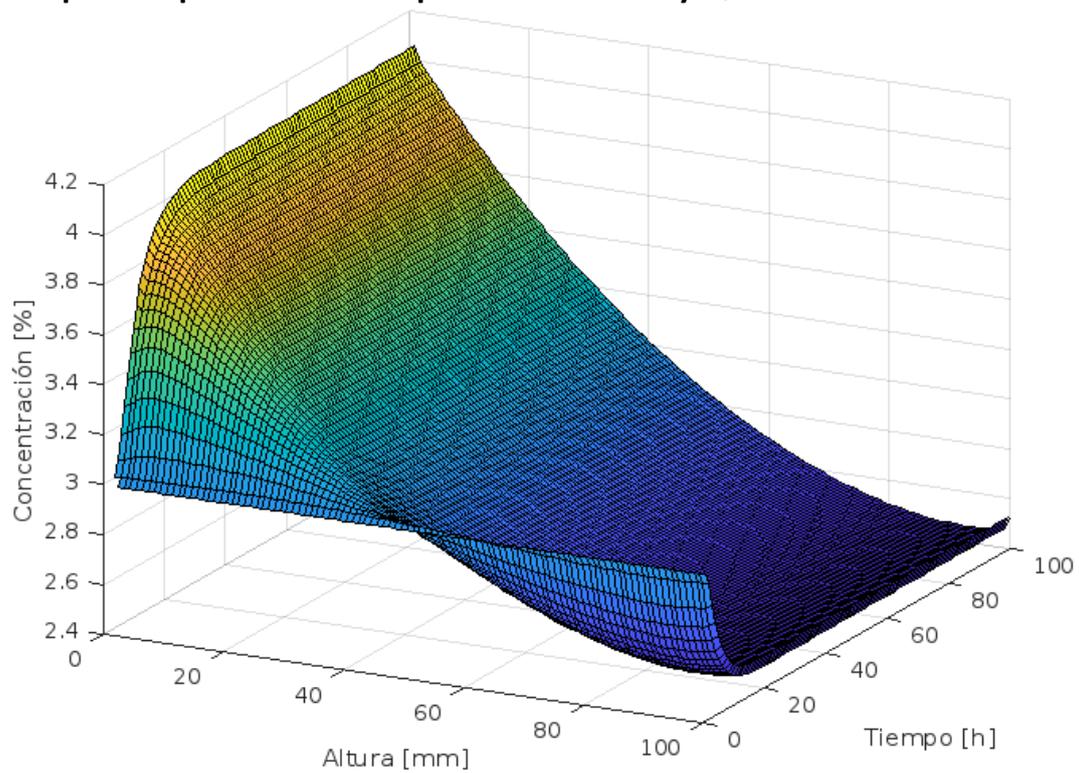
**8.4.10 Superficie para 100% de la potencia nominal y  $C_0 = 3\%$** 

Figura 8.18 Evolución de la concentración de humedad con respecto de la altura en al interfase papel-cobre para una potencia del 100% de la nominal y concentración inicial de humedad del 3%