



**Universidad
Carlos III de Madrid**

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**DETERMINACIÓN DE LA MÁXIMA SOBRECARGA ADMISIBLE DE CORTA
DURACIÓN EN UN TRANSFORMADOR**

AUTOR: QIANQIAN FU

DIRECTOR: JUAN CARLOS BURGOS DÍAZ

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....

- 1.1 ENTORNO SOCIO-ECONÓMICO
- 1.2 DESCRIPCIÓN DE PROBLEMA A ABORDAR
- 1.3 OBJETIVOS
- 1.4 EXPLICACIÓN DEL ÍNDICE DEL TRABAJO FIN DE CARRERA

CAPÍTULO 2: EL TRANSFORMADOR DE POTENCIA.....

- 2.1 INTRODUCCIÓN
- 2.2 PRINCIPIO BÁSICO DE FUNCIONAMIENTO
- 2.3 CONSTITUCIÓN FÍSICA
 - 2.3.1 NÚCLEO MAGNÉTICO
 - 2.3.2 ARROLLAMIENTOS
 - 2.3.3 AISLAMIENTO
 - 2.3.4 SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN
 - 2.3.5 OTROS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

CAPÍTULO 3: EFECTO DE LAS SOBRECARGAS EN TRANSFORMADORES

- 3.1 EFECTO DE SOBRECARGA EN EL TRANSFORMADOR
- 3.2 EFECTO GENERALES DE SOBRECARGA
- 3.3 EFECTO DE SOBRECARGA DE LARGA DURACIÓN
- 3.4 EFECTO DE SOBRECARGA DE CORTA DURACIÓN
- 3.5 NORMATIVA
 - 3.5.1 NORMATIVA IEC 60076-7
 - 3.5.2 NORMATIVA STD IEEE C57.91

CAPÍTULO 4: MODELOS DE FORMACIÓN DE BURBUJAS.....

- 4.1 INTRODUCCIÓN
- 4.2 FORMACIÓN DE BURBUJAS
- 4.3 MODELO DE OOMMEN

4.3.1 INTRODUCCIÓN

4.3.2 METODOLOGÍA

4.3.3 RESULTADOS

4.4 MODELO DE KOCH Y TENBOHLEN

4.4.1 INTRODUCCION

4.4.2 METODOLOGÍA

4.4.3 RESULTADOS

4.4.3.1 INFLUENCIA DEL ESTADO Y TIPO DEL PAPEL

4.4.3.2 INFLUENCIA DEL ESTADO DE ACEITE

4.4.3.3 INFLUENCIA DE LA TASA DE CRECIMIENTO DE TEMPERATURA

4.4.3.4 FORMULARIO DEL MODELO

4.4.3.5 CONCLUSIONES

4.5 MODELO DE P. PRZYBYLEK

4.5.1 INTRODUCCION

4.5.2 METODOLOGIA

4.5.3 RESULTADO Y DISCUSIONES

CAPÍTULO 5: PROGRAMA DE CÁLCULO DE LA SOBRECARGA ADMISIBLE EN UN TRANSFORMADO RESULTADOS.....

5.1 Entrada de datos

5.1.2 HOJA 1: INSTRUCCIONES

5.1.2. HOJA 2: DATOS DE ENTRADA AL PROGRAMA

5.1.3 CARGA ANUAL

5.2 MÓDULOS DEL PROGRAMA

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Entorno socio-económico.

Los transformadores eléctricos han sido unos de los inventos más importantes de la tecnología eléctrica. Sin la existencia de transformadores, sería imposible la distribución de energía tal y como tenemos hoy en día. La causa a ello es que, por motivos de seguridad, no se puede suministrar a los hogares o industrias los KW que salen de los centrales de generación. En este sentido, se trata de una máquina fundamental en el sistema eléctrico moderno, de manera que, la

fiabilidad de las subestaciones eléctricas depende en gran medida del correcto funcionamiento de los transformadores.

A pesar de que el fallo de un transformador no es frecuente (una tasa de falta inferior a un 2% anual), el fallo de un transformador siempre implica problemas muy graves y hay que enviarlo a reparar. Para aquellos casos en que se trabajan dos transformadores en paralelo, el fallo de uno implica que el otro tiene que continuar conectado con la red eléctrica. En esas ocasiones, el transformador compañero puede quedar sobrecargados y trabajar en esas condiciones hasta que se repare el otro transformador. Estas sobrecargas provocan deterioros importantes a la máquina, pues aunque son aceptable por el transformador, las diferentes partes del mismo no están contruidos para aguantar estas anomalías durante tiempos largos.

Como vamos a comentar más adelante, la vida útil del transformador depende estrechamente de la temperatura a la que sufre y de la duración de esa temperatura. Durante la sobrecarga, las diferentes partes de la máquina sufren un calentamiento, que puede conllevar al envejecimiento prematuro del transformador.

El transformador es el elemento más complicado y costoso de los que se encuentra en un sistema eléctrica [9], por lo que es imprescindible tener limitadas estas temperaturas de funcionamiento del mismo con el fin de prevenir faltas graves y envejecimiento prematuro de la máquina.

Sabemos por el otro lado que la demanda de potencia varía notablemente a lo largo de un día, que se muestra en la figura 1.2:

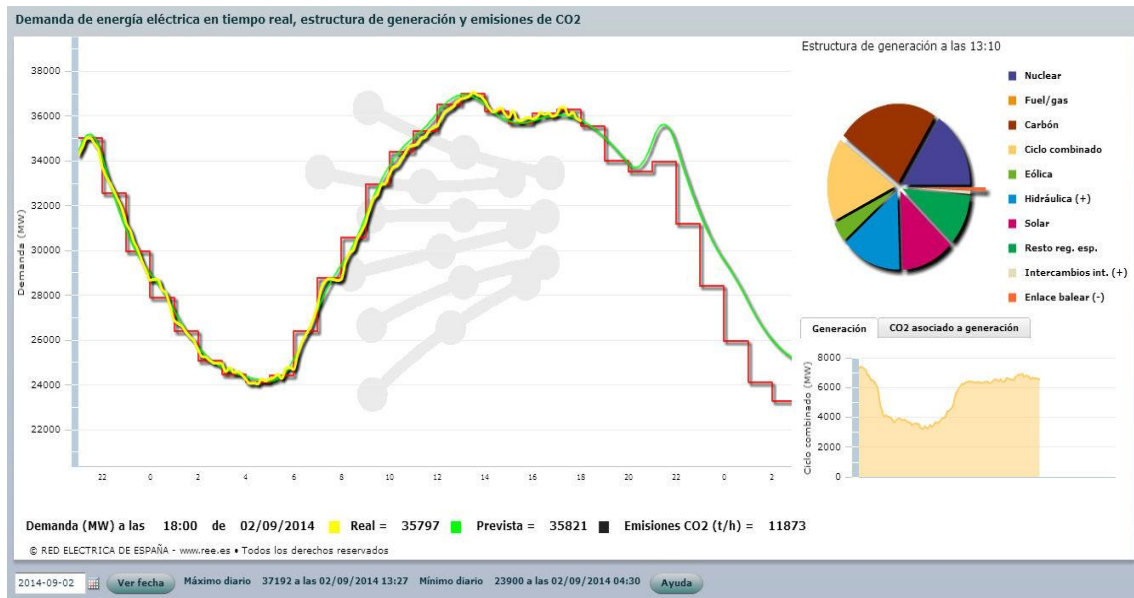


Figura 1.2 Curva de demanda de potencia. [12]

Como se puede ver en la figura anterior de la REE hay variaciones de demanda de hasta 14GW. Estas variaciones implican que el transformador sufre a lo largo del día cambios muy importantes en cuando al grado de carga, pudiendo superar en ocasiones cargas admisibles que puede poner peligro a la red eléctrica.

1.2 Problema a abordar

Como se va comentar en los capítulos siguientes, las pérdidas generadas por el cobre y el hierro del transformador provocarán calentamientos importantes que influyen directamente en la vida útil del aparato. Esto es porque el incremento excesivo de temperatura deteriora el aislamiento que lleva el transformador.

La temperatura afecta tanto al aislamiento sólido (papel) como al aislamiento líquido (aceite) [14]. La temperatura disminuye el grado de polimerización del papel y favorece el proceso de hidrólisis; reduce la capacidad del papel para soportar tracciones térmicas durante el cortocircuito y acelera a la acumulación de humedad en el papel. Y en el aceite, ayuda a formación de burbujas de agua que pueden desembocar fallos dieléctricos.

Sabemos que en el transformador existe un punto situado en el arrollamiento donde se producen las temperaturas más altas. A la temperatura que se llega en ese punto se le llama "Temperatura del punto más caliente" [1]. Tanto la pérdida de vida experimentada como la formación de burbujas en el transformador se estiman a base de esta temperatura más caliente. Hay formación de burbujas si las tasas de variación de las temperaturas en momentos consecutivos durante la sobrecarga de corta duración superan los 3K/min y la temperatura del punto caliente supera en los mismos momentos a los 140°C (Con un contenido de humedad del 2% según la norma [1]).

Llegados a este punto se tiene que estudiar si esta sobrecarga de corta duración es admisible por el transformador, pues de ser así evitaría la necesidad de la desconexión inmediata del transformador. De no ser admisible las consecuencias pueden ser fatales para el entorno del aparato, con la posibilidad de crear un incendio de la máquina que no se extingue hasta el consumo completo del aceite. Por lo que, la determinación de si una sobrecarga de corta duración es asumible por el transformador es un tema de gran interés tanto, económico como medioambiental.

Para hacer el estudio de la evaluación de la capacidad de un transformador de potencia de soportar una determinada sobrecarga se precisa, en primer lugar, un modelo térmico que determina las temperaturas significativas de la máquina, y en segundo lugar, un modelo que calcula la posibilidad de formación de burbujas cuando se somete a dichas temperaturas.

El modelo térmico de nuestro caso va ser el de la norma IEC. Y los modelos de burbujas son el de Oommen, el de Koch y Tebohlen y el de Przybylek.

1.3 Objetivos

El objetivo del presente trabajo consiste en desarrollar un programa informático que sirve de ayuda para determinar si una sobrecarga de corta duración en el transformador es admisible o no. Se trata de una herramienta que combina el uso de Excel y el Matlab: Los datos de entradas son registradas por una hoja del Excel que los transfieren posteriormente al programa del Matlab para hacer los cálculos pertinentes y una vez finalizado las ejecuciones los resultados vuelven a salir en otra hoja del Excel.

El programa se construirá a base del modelo térmico de la norma IEC 60076-7 del año 2010. Y en ella se registrará también ecuaciones para el cálculo de pérdida de vida y la formación de burbujas en el transformador. El programa será capaz de evaluar tanto la sobrecarga de larga duración como el de corta duración.

Sin embargo, al ser un trabajo ya empezada por el otro estudiante [3], que se ha dedicado la mayor parte de su programa a módulos que estudian sobrecarga de larga duración, el enfoque principal del trabajo va estar centrada en la sobrecarga de corta duración y por lo consiguiente, la formación de burbujas producida a causa de la anomalía (En el proyecto mencionado, el autor considera una temperatura de formación de burbujas constantes e igual a 140°C , cosa que no es cierta, ya que éste varía según el contenido de humedad y otros factores del transformador).

La herramienta desarrollada debe de ser capaz de acoplarse al programa desarrollada por el autor previo, extrayendo los resultados de las temperaturas significativas que posteriormente se combinan con las temperaturas sacadas de cada uno de los modelos existentes de la formación de burbujas para la determinación final de la aparición de vapores de agua en el transformador. Se verá en el capítulo de los resultados la comprobación y el análisis de cada uno de los criterios de la máxima sobrecarga admisible que viene definido en el reglamento IEC 60076-7[1].

Por lo tanto, el presente trabajo constituirá la parte final que completa al deseo del departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Carlos III de evaluar la capacidad de carga de un transformador de potencia.

1.4 Explicación del índice del Trabajo Fin de Grado

Como se podrá comprobar más adelante, el índice del proyecto está elaborado de forma escalonada, el proyecto está estructurado a base de tres aspectos: teoría, práctica y por último resultados.

Los primeros 4 capítulos son puramente teóricos. En el primer capítulo explicaremos la razón y la importancia del presente estudio. A continuación, dedicamos todo el segundo capítulo a las teorías básicas del transformador, del funcionamiento y de la constitución física. En la tercero, comentaremos el efecto de las sobrecargas en la máquina tratada, así como las normas que han de cumplir para que la sobrecarga sea admisible y no produzca fallos vitales. Y el cuarto y el último de este bloque, nos dedicamos al análisis de los artículos de tres autores diferentes que evaluaron la formación de burbujas en condiciones de sobrecargas de corta duración en el transformador.

El capítulo 5, es el capítulo de prácticas. En este capítulo explicaremos de forma detallada el programa desarrollada que evalúa el comportamiento del transformador ante las anomalías presentada. La aclaración se dividirá en dos partes: en la primera explicaremos el libro Excel que vamos a usar como herramienta para procesar datos de entradas y de salidas, en la segunda hablaremos de los módulos programados que simulan el comportamiento que tendría el transformador ante las condiciones de entradas por el Excel.

Por último, dedicaremos el capítulo 6 y 7 a los resultados y conclusiones que obtendremos de comprobar los criterios de carga admisible planteadas en la norma UNE EN 60076-7-2010 [1]. Existe además un capítulo 8, que lo utilizaremos para hacer un cálculo simple del presupuesto total que conlleva a la realización del trabajo.

CAPÍTULO 2

TRANSFORMADOR DE POTENCIA

2.1 Instrucción

La invención de los transformadores de potencia hacia los finales de la década 90 hizo posible el desarrollo del moderno sistema de alimentación de tensión constante AC, el cual facilita el suministro de electricidad permitiendo conectar centrales principales de generación con estaciones eléctricas alejados. Para fechas anteriores (al principio del suministro público de la electricidad), los sistemas de distribución era DC y tenía que estar cerca de la fuente de generación.

Los pioneros de la industria de electricidad de aquel entonces reconocieron rápidamente del beneficio de esta herramienta la cual permite crear corrientes elevadas mediante tensiones de salidas del generador de electricidad relativamente bajas, y que posteriormente las transforman en tensiones superiores para que sean transportados a través de cables de dimensiones prácticas a consumidores de grandes distancias con una eficiencia espectacular para aquel tiempo.

Los sistemas de transmisión y distribución de hoy en día son obviamente muchos más extensos y más dependientes en transformadores los cuales son definitivamente más eficientes que los del siglo pasado. Los transformadores pasaron de tener enormes dimensiones como el mostrado en la figura 2.1 a obtener salidas de 400KV con una intensidad del 19000A a 23,5 KV. Reduciendo

así la intensidad a un nivel más manejable (Aproximadamente 1200A) para aquellas unidades de distribución pequeñas que funcionan casi ininterrumpidamente día tras día proporcionando suministros a las industrias y los consumidores domésticos.

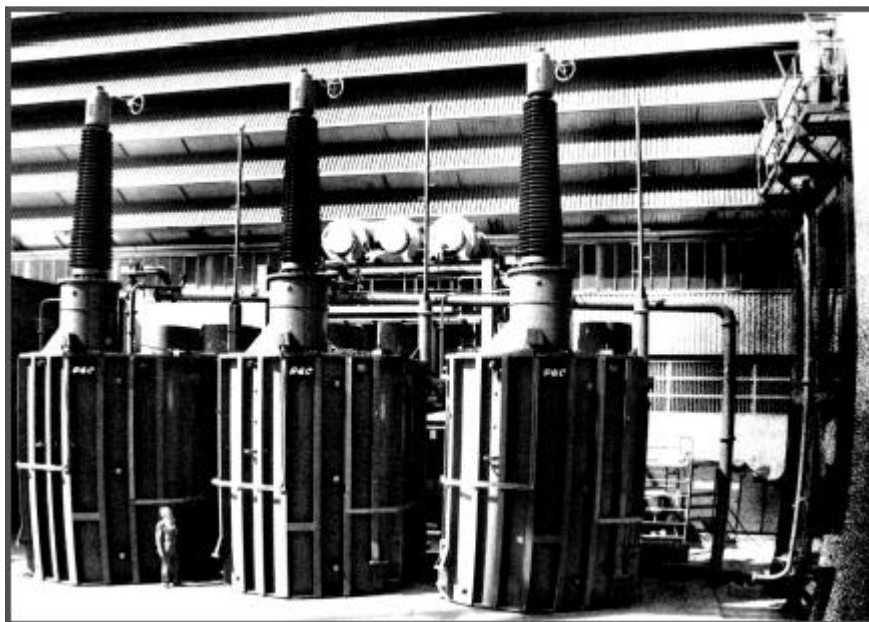


Figura 2.1 Transformadores en el siglo 19 [8].

2.2 Principio de funcionamiento

Dado el propósito del presente proyecto no es obligatorio entrar en detalle en tema, vamos a explicar el funcionamiento de un transformador ideal cuyo concepto es suficiente para entender el comportamiento de este mecanismo.

El transformador consiste básicamente en dos arrollamientos, primaria y secundaria, unidos mediante un circuito magnético o núcleo. En la figura 2.2 se muestra un esquema simplificado de la máquina.

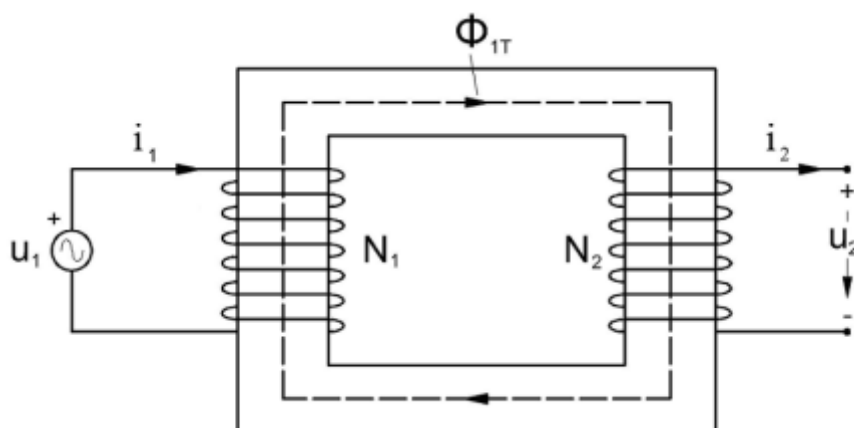


Figura 2.2 Esquema del funcionamiento del transformador [9]

Al aplicar una tensión alterna v_1 al arrollamiento primario, se circulará por ella una corriente alterna que creará un flujo alterno en el núcleo. Como consecuencia de la variación del flujo en el tiempo, provocará fuerzas electro-motrices (f.e.m) en los arrollamientos.

Según Faraday, dicho fenómeno tienen las siguientes ecuaciones:

$$e_1 = N_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = N_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

De las ecuaciones anteriores vemos que la f.e.m producida en el arrollamiento secundario del transformador depende del número de espiras del mismo.

Suponiendo que el flujo es sinusoidal:

$$\Phi = \Phi_p \cdot \text{sen}(wt) \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

Sustituyendo la fórmula anterior en la ecuación 2.1 tenemos que:

$$e_1 = N_1 \cdot \Phi_p \cdot w \cdot \text{cos}(wt); \quad e_2 = N_2 \cdot \Phi_p \cdot w \cdot \text{cos}(wt) \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

Se comprueba que la f.e.m adelante 90° al flujo creado.

2.3 Constitución física

Las características físicas del transformador vienen determinado por el servicio que se va a realizar. Para los transformadores de potencias, las características eléctricas que se interesan son gran rendimiento, baja regulación de tensión y gran rigidez dieléctrica. Con ellas, el calentamiento es un factor principal para la determinación de sus parámetros físicos.

2.3.1 Núcleo Magnético

Es la parte encargada del trasvase de energía entre los arrollamientos mediante el flujo magnético, conduce del flujo desde el primario al secundario. Por este motivo, el núcleo magnético está construido con materiales de baja reluctancia como es las chapas de acero al silicio. El núcleo de los transformadores está compuesto por las columnas, donde se montan los arrollamientos, y las culatas, que es la parte que une las columnas.

Los dos tipos fundamentales de estructuras del transformador son: columna y acorazonado. La primera está formado por dos devanados que abrazan al mismo núcleo mientras que el segundo está formado por un único devanado pero con dos núcleos. Las diferencias se observan en la figuras 2.3.

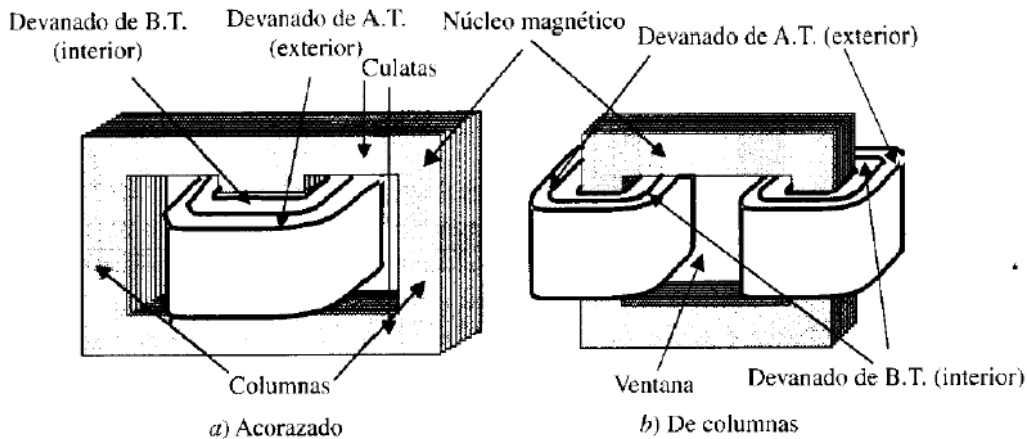


Figura 2.3 Núcleo acorazado y de columnas[3]

Como el núcleo es atravesado por el flujo variable en el tiempo se engendra en él una f.e.m que provoca además corrientes parásitas o Foucault, ya que el núcleo magnético está hecho con materiales conductores. La circulación de dichas corrientes provocan pérdidas de potencia activa que conocida como pérdida de Foucault, que se puede expresar de la siguiente forma:

$$P_{Fo} = \frac{(4,44 * B * f * S_{Fe})^2}{\rho_{Fe} * \frac{l_{Fe}}{S_{Fe}}} = K_{Fo} * B^2 * f^2 * V_{Fe} \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

De ecuación 2.5 se concluye que para reducir las pérdidas potencia activa se debe incrementar la resistencia del hierro al paso de corriente. Una primera forma para lograr eso es utilizar chapas magnéticas con silicios (Normalmente se limita al 3% ya que el silicio hace más blando las placas magnéticas). La otra forma es que el núcleo magnético se forma apilando láminas magnéticas (habitualmente con un espesor de 3mm). De esta manera, las placas se aíslan entre sí, evitando que la corriente del Foucault circulen de una chapa a otra.

Por otro lado, sabiendo que la otra inconveniencia de las corrientes de Foucault es que se oponen al paso del flujo que las produjo, haciendo el flujo que circula por el centro del núcleo magnético es menor que en el borde del mismo. Por eso, al emplear láminas magnéticas para una geometría dada la sección útil del núcleo es mayor.

2.3.2 Arrollamientos

Los arrollamientos son elementos encargados de transmitir la energía del sistema eléctrico de alimentación desde el primario hasta el sistema eléctrico de salida, el secundario.

Están formado por conductores que pueden ser hilos redondos o sección rectangular dependiendo de las medidas del mismo. Puede ser de cobre o aluminio, aunque el material que siempre emplea suele ser cobre, ya que es el material con la conductividad más alta de los metales comerciales y que muestra buenas propiedades mecánicas.

Se trata básicamente de un arrollamiento de alta tensión (primario) y otro de baja tensión (secundario). El arrollamiento de A.T precisa mayores niveles de tensión, tendrá un mayor

número de espira que el de baja tensión pero su sección será menor ya que los niveles de corrientes serán muy inferiores (cientos amperios inferiores).

En los transformadores con núcleo de columnas los arrollamientos se disponen de forma concéntricas (figura 2.4.a). Dado que el núcleo magnético está conectado a la tierra, el arrollamiento de baja tensión es normalmente el más interno. En caso de núcleo acorazonado, los arrollamientos están contruidos por “galletas” o secciones rectangulares paralelos, de manera que los devanados de alta y baja tensión se van alternando por la columna (figura 2.4.b).

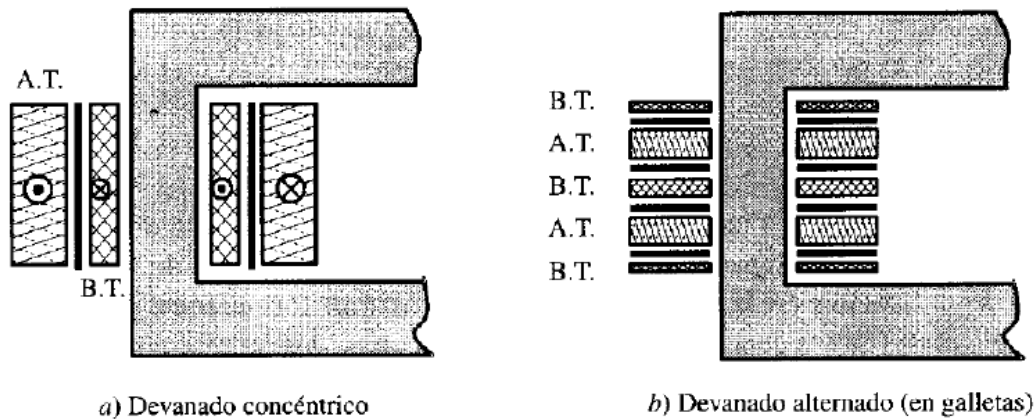


Figura 2.4 Disposición de los devanados [3]

A la hora del diseño de los arrollamientos del transformador se tendrá como objetivo, entre todos, de reducir a máxima las pérdidas resistivas causadas por la corriente que circulan por ellos (Efecto Joule):

$$P_J = RI^2 = \rho \frac{l}{S} I^2 = \rho \delta^2 V_{cu} \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

Como se puede comprobar en la fórmula anterior, podemos reducir las pérdidas provocado por el efecto Joule incrementando la sección del conductor. Sin embargo, el aumentado mencionado implica también el incremento del tamaño del núcleo. Esto es, minimizamos la pérdida por el cobre a costa del aumento de pérdida en el hierro, por lo que se deberá buscar el equilibrio para optimizar ambas parámetros.

2.3.3 Aislamientos

El aislamiento es una de las partes más importantes a tener en cuenta a la hora de diseñar un transformador ya que un fallo de está puede provocar problemas grandes y costosos de resolver. Es un parámetro fundamental para determinar la cargabilidad de un transformador ya que su capacidad de soportar a las temperaturas más altas sin degradarse implica el grado de carga que puede admitir el transformador.

En transformadores de B.T (menos de 20KV) los conductores del arrollamiento están aislados por un barniz o esmalte. Para transformador de tensiones mayores el aislamiento se hace mediante papel poroso impregnado en aceite. Con la inmersión del papel en aceite se consigue incrementar la rigidez dieléctrica, se mejora su estabilidad térmica y además impide o retrasa la absorción de humedad (los poros se encuentran impregnados).

El papel de apantallamiento es un polímero formado por monómeros de celulosa. Para los transformadores nuevos la longitud media de las cadenas poliméricas son 800 monómeros. No obstante, bajo la acción de la temperatura y de la humedad las cadenas de celulosa se rompen (hidrólisis) y el grado de polimerización baja. El efecto de hidrólisis además de dividir las cadenas en longitudes más pequeñas, da lugar a tres moléculas de agua, por lo que el aislamiento del transformador acumula contenido de agua a lo largo de su vida. Las celulosas más utilizadas son el papel Kraft y el cartón prensado o pressboard.

Si en el proceso de fabricación se incluyen ciertas bases orgánicas (urea, dicianidamida) se forma el papel térmicamente mejorado, el cual es capaz de soportar mayores temperaturas con menor grado de deterioro.

2.3.4 Sistemas de refrigeración

El calor generado por las pérdidas producidas tanto en los arrollamientos como el núcleo magnético explicado anteriormente provocará aumentos de temperaturas que conllevará pérdida de vida del aislamiento según las ecuaciones 3.1 y 3.2 que se explicará más adelante. Por lo que, para un funcionamiento correcto y duradero del transformador necesitamos acordar las temperaturas para que no sobrepase del valor de trabajo nominal. Para ello, el transformador deberá estar dotado de un sistema de refrigeración adecuado a los grados de carga que deba cubrir.

Es sabido que las pérdidas de potencia activa (tanto del cobre como del hierro) depende del volumen de dichos materiales en el transformador (Véase las ecuaciones 2.4 y 2.5), mientras que el calor disipado al exterior depende del área. Cuando se aumenta el tamaño de un cuerpo, el volumen crece al cubo y el área incrementa al cuadrado. Por ello, las unidades grandes tienen más problemas de refrigeración que los pequeños.

Para los transformadores pequeños (menores de 30MVA) la refrigeración se abastece por la circulación del aire ambiental. Este tipo de máquina se conoce por transformador en seco. Sin embargo, para el caso del transformador de gran potencia el aire no es un medio suficiente para disipar todo el calor interior y debe de apoyarse de algún otro medio más eficiente.

La refrigeración que se lleva a cabo por los transformadores de grandes potencias es sumergirse en una cuba el cual está lleno de aceite mineral. Dicha aceite cumple una doble función al mismo tiempo, como refrigerante y como aislante, ya que su capacidad térmica y rigidez dieléctica son superiores a las del aire. Sin embargo, este aceite experimenta con el tiempo un proceso de deterioro debido a los gases disueltos y contenidos de húmedas adquiridas desde el exterior. En los capítulos vamos a explicar en más detalle el fenómeno hablado.

En caso de que se requiera una mejor refrigeración se disponen de la posibilidad de juntar radiadores a la cuba del transformador, los cuales refrigera la cuba mediante ventiladores externos que fuerzan la circulación del aire por el transformador. Otro de los medios es emplear al aceite los aerorefrigerantes con agua e incluso puede forzar la circulación del aceite añadiendo una bomba. Para denominar el tipo de refrigeración del transformador se emplea un código con cuatro dígitos:

Las dos primeras letras se refieren a refrigerantes internos, mientras que las dos últimas son refrigerantes externos. En cada pareja, la primera letra indica la naturaleza del refrigerante y la segunda indica la forma de circulación. En la tabla 2.1 se muestra las letras que corresponden a cada tipo de refrigerante y circulación.

Refrigerante		Tipo de circulación	
Símbolo	Medio	Símbolo	Circulación
A	Aire	N	Natural
G	Gas		
L	Líquido	F	Forzada
O	Aceite		
W	Agua	D	Dirigida (y forzada)

Tabla 2.1. Nomenclatura de los sistemas de refrigeración de un transformador [4].

De esta manera, un transformador ONAN (ver figura 2.5) es una máquina en el que el refrigerante interno es el aceite, el externo es aire y no tiene bomba ni ventiladores, esto es tanto el aceite como el aire fluye de manera natural. Y un transformador ODAF (ver figura 2.6) es un transformador en el que la circulación del aceite está impulsados por bombas y además dispone de deflectores para dirigir el flujo del aceite, y el aire es forzado por ventiladores.

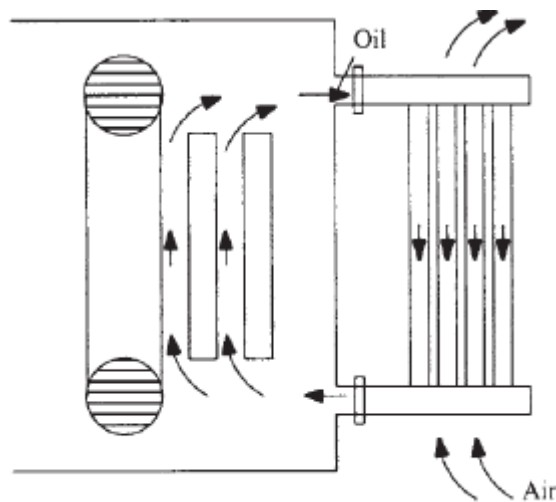


Figura 2.5 Refrigeración ONAN[3]

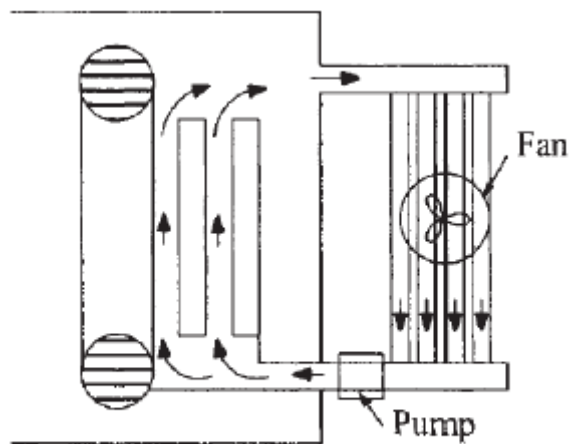


Figura 2.5 Refrigeración ODAF[3]

Como hemos explicado anteriormente, el tipo de refrigeración de cada transformador depende de su potencia nominal, a mayores niveles de potencia mayores exigencias de refrigeración tendrá la máquina: Se usa ONAN para potencias nominales menores de 15MVA, para potencias entre 15MVA-100MVA se recomienda transformador con ventilador ONAF, y para potencia superiores se requiere sistemas de refrigeración OFAF[4].

Es importante destacar que para aquellos transformadores cuyo sistema de refrigeración es OFAD (el más completo), sus sistemas se activarán en función de grado de carga que se soportando el transformador: para grado de cargas menores se puede funcionar sin accionar ni ventiladores ni motobombas, y a medida que se va el grado de carga se va conectando gradualmente los distintos grupos de ventiladores y motobombas. Es importante optimizar el sistema de refrigeración para evitar por un lado que el transformador sufra sobrecargas inadmisibles que ponen en peligro al sistema eléctrico completo, y por otro lado para prevenir consumos eléctricos innecesarios causados por los ventiladores y bombas.

2.3.5 Otros elementos constructivos

En los apartados anteriores se ha estudiado los elementos constructivos fundamentales para el funcionamiento del transformador pero es importante también hablar de los otros aparatos que forman parte del correcto funcionamiento del transformador. Estos elementos son: el depósito conservador del aceite, el desecador de aire, el cambiador de tomas, las bornas, el armario de control y por último las protecciones del transformador [4].

- **Depósito conservador de aceite:** es el encargado de mantener constante el nivel de aceite en la cuba; el nivel del aceite debe de ser lo más alto posible para evitar la precipitación de oxígeno en la cuba. El recipiente está destinado a recibir el aceite de la cuba cuando esté se expande, a causa del calentamiento por pérdidas internas.
- **Desecador de aire:** está destinado a secar el aire existente en el aceite del transformador a través de gel de sílice, puede absorber hasta un cuarenta por ciento de su peso

en humedad. Dispone de una junta líquida que evita su contacto directo con la atmósfera.

- **Bornas:** es el elemento mediante la cual se conecta los arrollamientos con los conductores (funciona como soportes también) de los dos circuitos entre los que se encuentra conectado el transformador. Se trata de una parte que requiere un alto nivel de aislamiento para evitar el paso de corriente entre los conductores y la cuba. Existen tres tipos diferentes en función del aislamiento del conductor al que está unido: aceite-aceite, aceite-aire, y aceite-DF6.
- **Cambiador de tomas:** su principal función es regular la tensión secundaria del transformador de acuerdo al nivel de tensión en el primario. Los cambiadores de tomas se pueden clasificar en: con carga y sin carga. La primera se usan en transformadores de gran potencia en las redes de transmisión mientras que la segunda se usan en unidades de baja potencias en las redes de distribución o en aplicaciones industriales. El mecanismo del cambiador de tomas en vacío es mucho más fácil sin embargo, deberá descargar el transformador cada vez que se quiere cambiar la toma de selección. Y el mecanismo de la toma en carga es más complicado y está formado por varios aparatos (conmutador, selector, depósito de aceite del conmutador, preselector...) pero permitirá ejecutar regulaciones de tensiones rápidas sin tener que desconectar el transformador.
- **Armario de control:** control de funcionamiento de todos los elementos del circuito. Se señalarán todas las alarmas y disparos. Vigila también la activación de los ventiladores y bombas.
- **Protecciones:** las protecciones pueden ser tanto interiores como exteriores. Las protecciones interiores sólo detectan fallos producidas internamente, mientras que las protecciones exteriores localizan ambos defectos.

Las protecciones propias integradas del transformador son las siguientes:

- Termómetro: controla la temperatura del aceite, da señal de alarma en caso de superación a un umbral.
- Termostato: mide la temperatura interior del transformador y dará señal de alarma si supera los límites marcados.
- Imagen térmica: se trata de una herramienta que controla la temperatura del arrollamiento y dará señales de alarma incluso disparo en caso de detectar valores inadecuados.
- Indicador nivel de aceite: mostrará nivel del aceite de la cuba y se activa señal de alarma en caso de que sea bajo.
- Liberadora de presión: consiste en una válvula liberadora de presiones anormales provocadas por el calentamiento, dará señal de alarma en caso de sobrepresión.

- Relé Buchholz: es la protección fundamental para el transformador. Detecta a partir de los gases disueltos en el aceite, todo tipo de defectos como cortocircuitos, fallo de aislamiento o sobrecargas violentos. Está localizado en el medio de la cuba y el depósito conservador del aceite (figura 2.6) y dará dos tipos de señales: señal de alarma por desprendimiento de gases y señal de disparo por velocidad anormal de circulación del aceite. Además, en caso de detectar la presencia de burbujas en el aceite, hay que atender inmediatamente al transformador para realizar las pruebas adecuadas y poner fuera de servicio si es necesario.

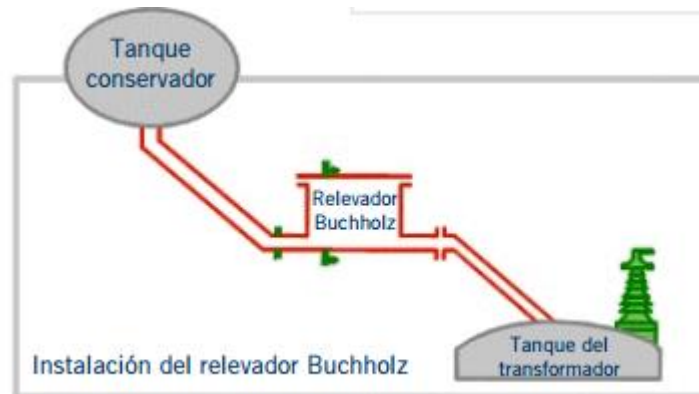


Figura 2.6. Esquema de la instalación del relevador Buchholz [11]

- Relé Buchholz-Jansen: está localizado entre el depósito de aceite del conmutador de la regulación de tomas y el depósito de expansión. Da señal de disparo en caso de detectar circulación rápida del aceite.

Y las protecciones externas del transformador son:

- Protección diferencial: controla el valor de la intensidad de la entrada y salida del transformador. En caso de desigualdad de corrientes manda una señal de disparo.
- Protección de sobreintensidad: mecanismo de apoyo a la protección diferencial que detecta las intensidades elevadas. Podría ser de actuación instantánea o de actuación retardada, tanto de tiempo inverso como constante.

CAPITULO 3

EFFECTO DE LAS SOBRECARGAS EN TRANSFORMADORES

3.1 SOBRECARGAS EN TRANSFORMADORES

Un transformador se caracteriza por su potencia asignada (antiguamente llamada potencia nominal) que es aquella potencia para la cual se alcanzan las temperaturas límites indicadas en la norma IEC 60076-2[12]. Esta potencia asignada se obtiene como producto de la tensión asignada y de la intensidad asignada (o nominal), valores ambos que se indican en la placa de características del transformador.

Se dice que un transformador está en sobrecarga cuando el transformador entrega a la carga una corriente superior a la nominal, de forma que durante un tiempo más o menos largo se sobrepasan las temperaturas indicadas en la norma IEC 60076-2[12].

Las temperaturas límites indicadas en la norma IEC 60076-2[12] se obtienen cuando por el transformador circula la corriente nominal y cuando la temperatura ambiente es la indicada en dicha norma. Sin embargo, cuando la temperatura ambiente es superior a la indicada en la norma, la temperatura final de los diferentes puntos del transformador también puede ser excesiva. Por eso, también se dice que un transformador está en sobrecarga cuando, a pesar de que la corriente es inferior a la nominal la temperatura ambiente es tal que la temperaturas de funcionamiento son superiores a los valores especificados.

Las sobrecargas acortan la vida normal del transformador e implica un grado de riesgo para la red a la que está conectado. La norma IEC 60076-7[2] especifica las condiciones que no se deben sobrepasar durante las sobrecargas en los transformadores. En Estados Unidos y países de su influencia, la norma que regula las sobrecargas admisibles en transformadores es la Std. IEEE C57.91 de 1995 [2] revisada y puesta al día en el 2013.

3.2 EFECTOS GENERALES DE LAS SOBRECARGAS

Independientemente de la cuantía o duración de la sobrecarga, las sobrecargas tienen los siguientes efectos nocivos:

- a) Las temperaturas de los arrollamientos, conexiones, aislamientos y aceite aumentarán bruscamente pudiéndose llegar a niveles inadmisibles.
- b) Aumento de la densidad de flujo de dispersión, causante del efecto Foucault que calienta los elementos metálicos, tales como vigas de apriete, tornillo, paredes de la cuba, etc.
- c) Aumento de la humedad y el contenido de gas en el aislamiento en el aceite debido al incremento de la temperatura, ya que la capacidad del papel de retener agua disminuye con la temperatura, mientras que la solubilidad del agua en el aceite aumenta con la temperatura. Ello hace que cuando la temperatura aumenta una parte del agua que se encuentra en el papel pase al aceite y al contrario cuando el transformador se enfría.
- d) Los accesorios del transformador (tales como pasatapas, cambiadores de tomas en carga, etc.) se ven sometidos esfuerzos mayores que limitan los márgenes de diseño y de aplicación.

La combinación del flujo principal y el incremento del flujo de dispersión conducen a una posible sobreexcitación en el núcleo.

Durante las sobrecargas la tensión máxima no se puede sobrepasar 1,05 veces bien la tensión asignada (toma principal) o la tensión de tomas (otras tomas) en cualquier arrollamiento del transformador. Pero Las limitaciones se pueden varia para regulación de tensión ante cambio de flujo.

Como consecuencia de todo ello hay peligro de un defecto prematuro ligado al aumento de la corriente y de las temperaturas. El riesgo mencionado puede manifestarse a corto plazo inmediato o a largo plazo como un envejecimiento térmico acumulado.

Por otro lado, los transformadores de gran potencia son más vulnerables que los de pequeña potencia, por las siguientes razones:

- La mezcla del flujo de dispersión generada por una sobrecarga y del flujo principal en los bornes de la culata y en las columnas del núcleo hace que los transformadores grandes sean especialmente débiles a la sobreexcitación. Se generan también mayores corrientes Foucault que afectan a los restos de componentes metálicas.
- Los efectos de la degradación de las propiedades mecánicas del aislamiento en función de temperatura y el tiempo, así como deterioro causado por la dilatación térmica, son más rigurosos que los de pequeñas potencias.
- La temperatura del punto caliente afuera de los arrollamientos no es abastecida con un ensayo térmico normal. No es posible sacar conclusiones válidas de los ensayos simples para el caso de alta corriente, ya que esta extrapolación puede que no ha sido considerada en el proceso de diseño.
- El cálculo del punto más caliente de los arrollamientos a corriente mayor que la asignada, son menos fiables que los que tienen menor capacidad.

3.3 EFECTOS DE LAS SOBRECARGAS DE LARGA DURACIÓN

Las sobrecargas de emergencia de larga duración son creadas por los fallos de equipos o posiciones del sistema que tardarán un tiempo largo en poder ser subsanados, su efecto puede persistir durante semanas e incluso meses y pueden perjudicar a los aislantes y acelerar el envejecimiento del transformador. Sin embargo, esta situación puede ser preferible para la compañía a una pérdida de servicio eléctrico.

En la figura 3.1 se ilustra un ejemplo de un perfil de carga de larga duración. Durante varias horas al día se sobrepasa la temperatura correspondiente al funcionamiento nominal del transformador (suma de 40 °C de temperatura ambiente máxima más 78 K de calentamiento máximo del punto más caliente del arrollamiento).

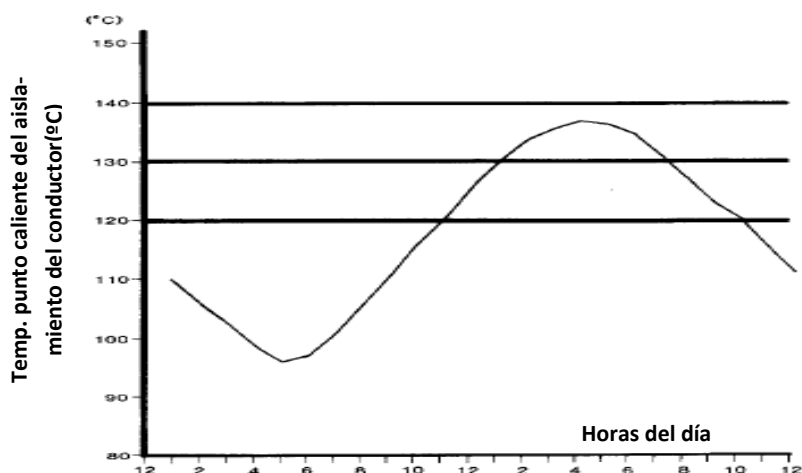


Figura 3.1. Sobrecargas de larga duración: La temperatura del punto más caliente para este ejemplo es superior 120 ° C [3].

Las principales consecuencias adversas de este tipo de ciclos de carga son:

- a) El aumento de la temperatura acelera la degradación del aislamiento de los conductores, lo que puede reducir la vida efectiva del transformador si este está sometido a un cortocircuito en el sistema.
- b) Otras partes del aislamiento, como las que soportan las fuerzas axiales del bloque de arrollamiento, están expuestas también a temperaturas elevadas y por tanto se degradan de forma más rápida.
- c) La resistencia de contacto del cambiador de tomas aumenta con el incremento de temperatura y esto provoca un efecto realimentado que puede dar lugar al fallo del cambiador.
- d) El incremento de la temperatura también debilita los materiales de las juntas existentes entre la tapa del transformador y la cuba.

Las estimaciones del riesgo de la sobrecarga de larga duración es la que determina la tasa de envejecimiento relativa y porcentaje de vida del transformador. En cualquier caso, la cuantía de la sobrecarga admisible resulta de un balance económico entre la pérdida de vida producida por la sobrecarga y los beneficios que una sobrecarga puede reportar por lo que se refiere a la posibilidad de diferir una inversión, posibilidad de eludir reclamaciones de clientes por falta de suministro de energía, multas de comunidades autónomas, etc.

3.4 EFECTOS DE LAS SOBRECARGAS DE CORTA DURACIÓN

Las sobrecargas de gran intensidad sólo se pueden aceptar durante cortos períodos de tiempo, y por ello son llamadas en la norma “Sobrecargas de corta duración”. Una sobrecarga de corta duración causa unas condiciones anormales de funcionamiento que suponen un aumento del peligro de fallo del sistema. Este tipo de acontecimiento tiene mayor riesgo que una carga de larga duración puesto que origina un nivel del punto caliente en los conductores o de la temperatura del aceite que puede dar lugar a una eventual disminución de la resistencia dieléctrica, por lo que la sobrecarga debe ser reducida rápidamente o desconectando el transformador. No obstante, en ocasiones es preferible esta situación durante un tiempo breve a la pérdida de suministro que se podría producir si no se sobrecargara el transformador.

La figura 3.2 ilustra un ejemplo de un perfil de carga de emergencia de corta duración. En la figura se presenta una curva de temperatura que corresponde a un ciclo de carga normal hasta las 4 pm del día, momento en el que se produce un evento en el sistema que provoca una sobrecarga muy elevada en el transformador de manera que la temperatura del punto más caliente se eleva rápidamente hasta 163 ° C en 1 h.

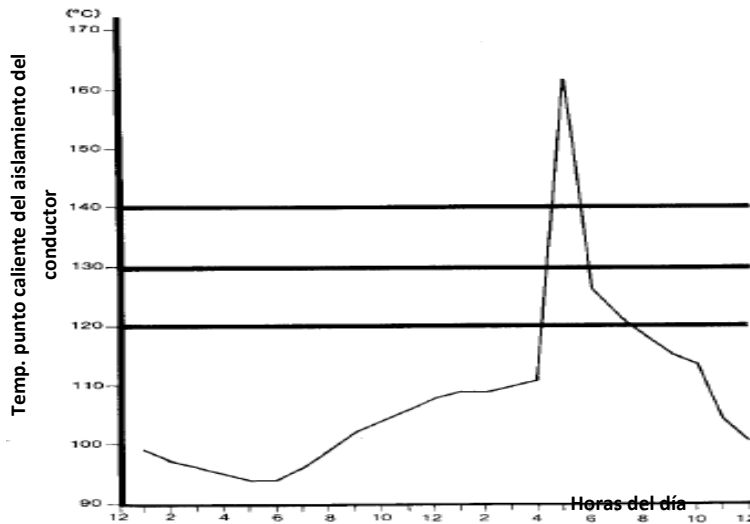


Fig.3.2 Sobrecargas de corta duración [3].

El tiempo admisible para este tipo de sobrecargas es menor que la constante de tiempo térmico del transformador y depende de la temperatura de funcionamiento antes del aumento de la carga.

Los problemas que acarrea este tipo de sobrecargas son:

- a) El mayor riesgo de fallos de este tipo de sobrecargas es la reducción de rigidez dieléctrica causada por la presencia de burbujas de gas en una región de altas solicitaciones eléctricas, es decir, en los arrollamientos y las conexiones. Para un transformador con un contenido de humedad del 2% estas burbujas se crean cuando la temperatura del punto caliente sobrepasa los 140°C. Esta temperatura crítica disminuye cuando se incrementa la concentración de humedad.
- b) La elevada corriente de la sobrecarga crea un flujo de dispersión muy elevado. Se generan también burbujas de gas libre en las superficies de las partes metálicas que hayan sido calentadas por corrientes parásitas generadas por el flujo de dispersión o por súper-saturación del aceite. Sin embargo, estas burbujas no tendrán mayores repercusión al menos que atraviesen zonas donde el esfuerzo dieléctrico es superior. Por otra parte, en las partes metálicas desnudas, exceptuando el arrollamiento, que están en contacto con aislamiento no celulósico (por ejemplo, fibra de vidrio) y con el aceite del transformador acelera rápidamente el aumento de temperatura que pondrá en peligro el equipo si supera los 180°C para no provocar daños en la pintura.
- c) Un material caliente es más plástico, debido a ello la degeneración de las propiedades mecánicas expuestas a temperaturas elevadas puede reducir la capacidad de resistir los esfuerzos de cortocircuito.
- d) El aumento de presión en los pasapatas puede provocar fugas de aceite que posteriormente conducirán a un fallo del equipo. En los pasapatas de tipo condensador tienen también posibilidad de existencia de burbujas si la temperatura del aislamiento es superior a los 140°C indicada anteriormente.
- e) La dilatación del aceite puede provocar desbordamiento del mismo en el depósito conservador.

- f) La interrupción de corrientes altas en el cambiador de tomas podría ser arriesgado.

Las estimaciones del riesgo de las sobrecargas de corta duración son las que determinan la temperatura máxima del punto caliente en los arrollamientos, núcleo y partes estructuras del transformador. En este sentido, como se expondrá posteriormente, la normativa limita la máxima temperatura que se puede alcanzar en diferentes puntos del transformador durante las sobrecargas de corta duración.

Aunque el peligro de la sobrecarga a corto plazo desaparece después de que la carga haya sido reducida a su nivel normal, es conveniente identificar los riesgos y que sea aceptada por todas las partes implicadas, esto es, un estudio sobre el envejecimiento que se ha tenido en el proceso de la anomalía y luego estimar el degeneración acumulado durante un ciclo de carga completa.

Por lo demás, después de una sobrecarga de corta duración es conveniente realizar un análisis de gases disueltos en el transformador para verificar si el transformador ha resultado dañado durante la sobrecarga.

3.5 Normativa

Como se indicó anteriormente, la norma internacional que realiza las recomendaciones relativas a sobrecargas en transformadores es la norma IEC 60076-7 [1]. Por el contrario en EEUU la norma de aplicación es el IEEE Std C57-91-1995 [2], que tuvo una primera versión en el año 1995 y ha sido revisada en 2011. A continuación se realiza un pequeño resumen de la norma IEC y se citan las diferencias más importantes entre la norma internacional y las normas americanas.

3.5.1 Norma IEC 60076-7

La norma IEC 60076-7 proporciona una tabla indicativa de las tensiones y grados de carga que no se deben sobrepasar en los diferentes grados de carga de un transformador (carga cíclica normal, carga de emergencia de larga duración y carga de emergencia de corta duración). La tabla 3.1 es una reproducción de la tabla de la norma.

Tipos de carga	Transformadores de distribución (véase Nota)	Transformadores de media potencia (véase Nota)	Transformadores de gran potencia (véase Nota)
Carga cíclica normal			
Corriente (p.u.)	1,5	1,5	1,3
Temperatura del punto caliente del arrollamiento y de las partes metálicas en contacto con material aislante celulósico (°C)	120	120	120
Temperatura del punto caliente de otras partes metálicas (en contacto con aceite, papel aramida, material de fibra de vidrio) (°C)	140	140	140
Temperatura del aceite superior (°C)	105	105	105
Carga de emergencia de larga duración			
Corriente (p.u.)	1,8	1,5	1,3
Temperatura del punto caliente del arrollamiento y de las partes metálicas en contacto con material aislante celulósico (°C)	140	140	140
Temperatura del punto caliente de otras partes metálicas (en contacto con aceite, papel aramida, material de fibra de vidrio) (°C)	160	160	160
Temperatura del aceite superior (°C)	115	115	115
Carga de emergencia de corta duración			
Corriente (p.u.)	2,0	1,8	1,5
Temperatura del punto caliente del arrollamiento y de las partes metálicas en contacto con material aislante celulósico (°C)	Véase el apartado 7.2.1	160	160
Temperatura del punto caliente de otras partes metálicas (en contacto con aceite, papel aramida, material de fibra de vidrio) (°C)	Véase el apartado 7.2.1	180	180
Temperatura del aceite superior (°C)	Véase el apartado 7.2.1	115	115
NOTA. Los límites de corriente y temperatura no se entienden como válidos simultáneamente. La corriente se puede limitar a un valor más bajo que el indicado, con el fin de alcanzar el requisito de limitación de temperatura. Contrariamente, la temperatura se puede limitar a un valor más bajo que el indicado, con el fin de alcanzar el requisito de limitación de corriente.			

Tabla 3.1: Valores límite considerados en la norma UNE-IEC 60076-7 para los diferentes tipos de sobrecargas [1].

Como se puede observar en la tabla anterior, los valores admisibles de temperaturas y corrientes dependen del tamaño del transformador, ya que, como se dijo, los transformadores grandes son más vulnerables a las sobrecargas que los pequeños. En este sentido la norma hace una clasificación de tres categorías:

1. Transformadores de distribución, para los cuales solo se considera la temperatura del punto caliente en los bobinados y el deterioro térmico. Cuando se usan en interiores, el calentamiento nominal del aceite superior se debe modificar para tener en cuenta el cierre del recinto. Es recomendable hacer una prueba para analizar este incremento de temperatura.
2. Transformadores de media potencia, donde es necesario tener en cuenta los diferentes tipos de refrigeraciones.
3. Transformadores de gran potencia, donde los efectos asociados del flujo de dispersión son importantes y que por lo tanto, fallos mucho más severos. Es necesario consideraciones de limitaciones adicionales para garantizar la seguridad.

Por el otro lado, para el cálculo de temperatura del punto caliente y del aceite superior, la norma proporciona dos modelos térmicos simplificados, uno para ser utilizado ante escalones de carga y un segundo modelo para ser utilizado ante cargas variables arbitrarias. El segundo de los modelos puede dibujarse en forma de diagrama de bloques como se muestra en la figura 3.3

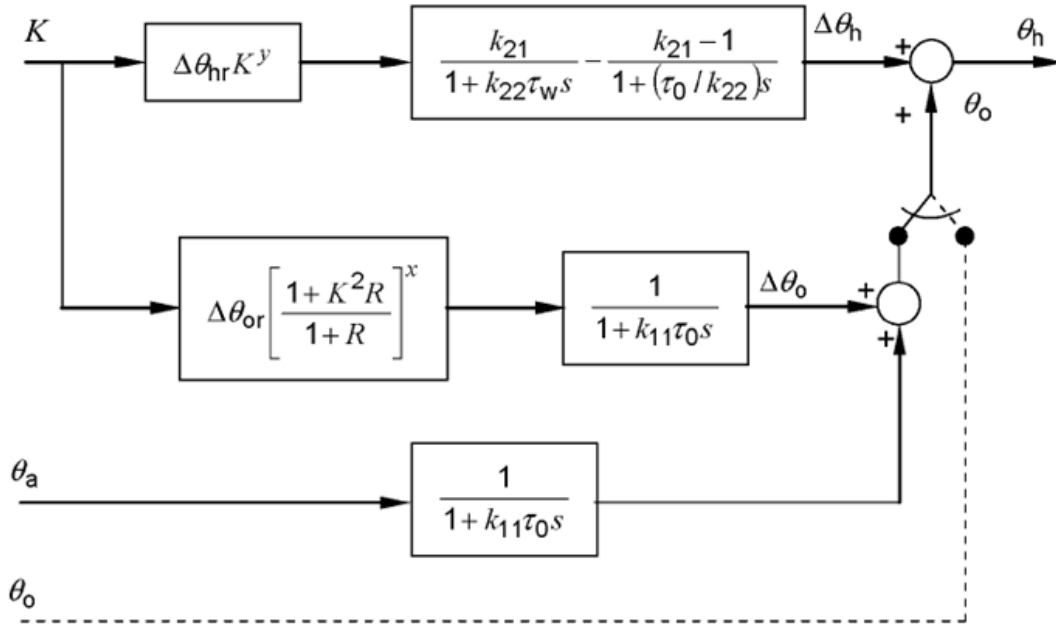


Figura. 3.3 Diagrama de bloque de las ecuaciones diferenciales [1].

La salida de estos modelos es el calentamiento de la capa superior del aceite ($\Delta\theta_o$ en la figura) y el calentamiento del punto más caliente ($\Delta\theta_b$ en la figura).

El diagrama de bloques de la figura 3.3 precisa de una serie de parámetros que han de ser obtenidos mediante ensayos o mediante cálculo. No obstante la obtención de alguno de estos parámetros es bastante complicada y la norma trae una tabla con valores que pueden ser utilizados en ausencia de otros datos más precisos (tabla 3.2). Evidentemente cuanto más se ajusten los valores del diagrama de bloque de la figura 3.3 a los valores reales del transformador mayor será la precisión en la determinación de la temperatura de la capa superior del aceite y de la temperatura del punto más caliente.

	Transformadores de distribución		Transformadores de media y de gran potencia					
	ONAN	ONAN restringida (véase la Nota)	ONAN	ONAF restringida (véase la Nota)	ONAF	OF restringida (véase la Nota)	OF	OD
Exponente del aceite x	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1,0	1,0	1,0
Exponente del arrollamiento y	1,6	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	2,0
Constante k_{11}	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0
Constante k_{21}	1,0	3,0	2,0	3,0	2,0	1,45	1,3	1,0
Constante k_{22}	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,0	1,0	1,0
Constante de tiempo τ_0	180	210	210	150	150	90	90	90
Constante de tiempo τ_w	4	10	10	7	7	7	7	7

NOTA Si un arrollamiento de un transformador con refrigeración ON o con refrigeración OF se refrigera en zigzag, un espesor de espaciador radial menor que 3 mm podría causar una circulación restringida del aceite, es decir, un valor máximo más alto de la función $f_2(t)$ que el obtenido por calas ≥ 3 mm.

Tabla 3.2 Tabla de valores orientativos para los transformadores de potencia y distribución [1].

Para el cálculo de la pérdida de vida del aislamiento debido a las sobrecargas la norma utiliza la ley de Montsinger para papeles Kraft normales. La ley de Montsinger establece que por cada 6 grados de incremento de temperatura la vida del aislamiento se reduce a la mitad. Los papeles Kraft normales son los utilizados mayoritariamente en Europa.

$$V=2^{(\Theta_h - 98)/6} \tag{Ecuación 3.1}$$

Para el caso de papeles térmicamente mejorados la norma recomienda utilizar la ley de Arrhenius para el cálculo de la velocidad de pérdida de vida del aislamiento

$$V=e^{\left(\frac{15000}{110+273} - \frac{15000}{\Theta_h+273}\right)} \tag{Ecuación 3.2}$$

Donde Θ_h es la temperatura del punto más caliente del transformador y V es la velocidad de pérdida de vida.

Así como la norma da una expresión para calcular la velocidad de pérdida de vida, la duración de vida es algo relativo, que depende del criterio utilizado por el usuario, si bien para papeles térmicamente mejorados se suele tomar como 180.000 horas de uso a una temperatura de punto caliente de 110°C. En la figura 3.4 muestra una tabla orientativa de la vida normal de un sistema de aislamiento.

Base	Vida normal del aislamiento	
	Horas	Años
Resistencia a la tracción del aislamiento mantenida al 50%	65 000	7,42
Resistencia a la tracción del aislamiento mantenida al 25%	135 000	15,41
Grado de polimerización del aislamiento mantenido a un valor de 200	150 000	17,12
Interpretación de los datos de ensayo sobre la vida funcional de los transformadores de distribución	180 000	20,55

Figura 3.4 Vida normal de un sistema de aislamiento mejorado térmicamente bien seco, libre de oxígeno a la temperatura de referencia 110°C [1].

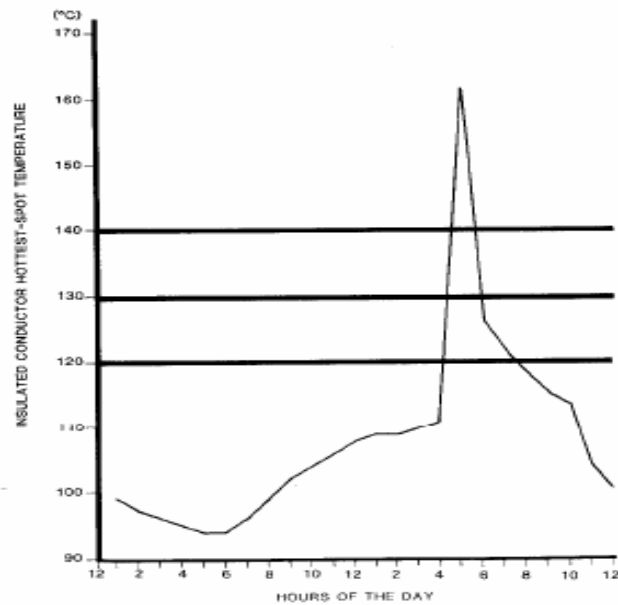
3.5.2 Norma Std IEEE C57.91

La norma IEEE Std. C57.91-2011[2] es una versión actualizada de la norma IEEE Std. C57.91-1995, donde la diferencia entre ambas es mínima.

El Std. IEEE contempla cuatro tipos de ciclos de carga diferentes:

- Carga con expectativa de vida normal, en la que el transformador no se sobrecarga en ningún momento
- Sobrecarga planificada de largo plazo, en la que se alternan períodos de sobrecarga con períodos de carga inferior a la normal, sin que haya un consumo de vida anormal.
- Sobrecargas de corta duración
- Sobrecargas de larga duración.

A título de ejemplo la figura 3.5 ilustra un perfil de la sobrecarga de corta duración. La tabla 3.3 muestra las temperaturas límite recomendadas para estos cuatro ciclos de carga.



d) Short-term emergency loading

Figura 3.5. Esta figura presenta una curva de temperatura que era estable hasta las 4 p.m. cuando una condición anormal del sistema eleva rápidamente la temperatura del punto más caliente a 163 °C en 1 h [2].

	Normal life expectancy loading	Planned loading beyond nameplate rating	Long-time emergency loading	Short-time emergency loading
Insulated conductor hottest-spot temperature, °C	120 ^a	130	140	180 ^b
Other metallic hot-spot temperature (in contact and not in contact with insulation), °C	140	150	160	200
Top-oil temperature, °C	105	110	110	110

Tabla 3.3. Límites de máximas temperaturas. La formación de burbujas puede producir un riesgo potencial para la rigidez dieléctrica del transformador. Este riesgo debe ser considerado cuando esta guía se aplica refieren al Anexo A [2].

El Std. IEEE C57.91 [2] trae dos modelos térmicos diferentes. En el apartado 7 (Cláusula 7) trae un modelo térmico simplificado que permite hallar las temperaturas de la capa superior del aceite y del punto más caliente para cualquier grado de carga a partir de los valores de dichas temperaturas para carga nominal. Este modelo requiere muy pocos datos de entrada. Este modelo es muy semejante al de la norma internacional (pero a diferencia del modelo de la norma IEC el modelo acepta que durante los transitorios de una carga a otra la temperatura evoluciona siguiendo una ley de primer orden.

En el Anexo G del Std IEEE C57.91 [2] se proporciona un segundo modelo térmico más preciso que el modelo de la Cláusula 7 pero que requiere bastantes más datos de entrada, por lo cual no es de aplicación en muchos casos en los que se desconocen dichos datos de entrada.

A diferencia de la norma IEC [1], el Std IEEE [2] incorpora un modelo de formación de burbujas, que es el modelo desarrollado por Oommen. Dicho modelo se encuentra en el Anexo A del Std.

No obstante en el anexo A de la normativa [2] se subsana una errata que había en el artículo de Oommen. En la gráfica 3.5 podemos ver la diferencia entre los valores experimentales con los valores teóricos calculados tanto por la fórmula de Oommen (Ecuación 4.4) y con la ecuación corregida del Anexo A (Ecuación 3.3).

$$T = \left[\frac{6996.7}{22.454} + 1.4495 * \ln(w) - \ln(P) \right] - [\exp(0.473W) * (g^{1.585}/30)] \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

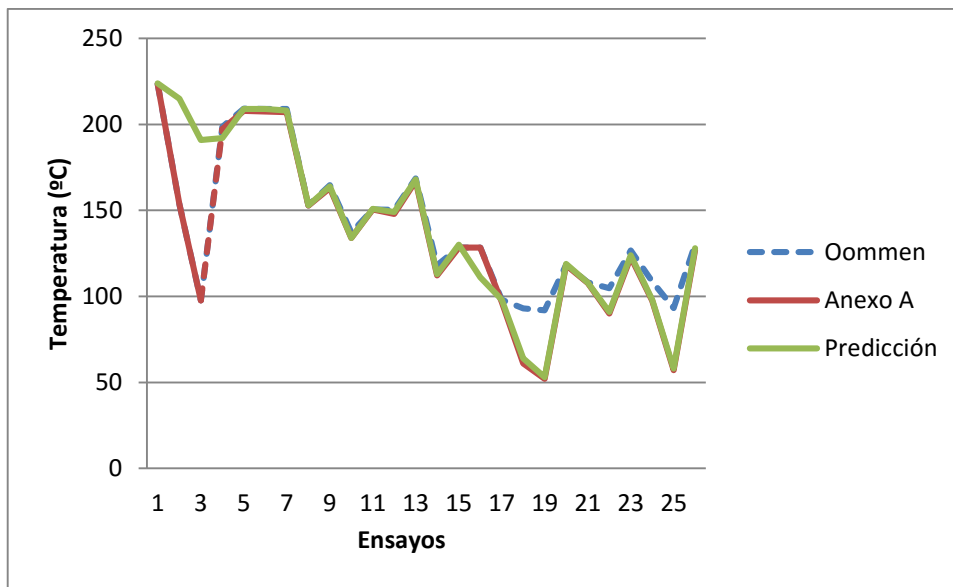


Figura 3.5. Comparación de temperaturas experimentales con los teóricos

Observamos que aunque los resultados de ambas ecuaciones (Anexo A y Oommen) se aproximan de la misma manera a los resultados observados de los ensayos 5-16, los valores sacados por la fórmula del Anexo A se ajusta más a los datos de los últimos experimentos (17-25). Cabe destacar que la desviación observada de los ensayos 2,3 se debe a faltas de datos de gas contenido en el aceite del respectivo caso.

CAPITULO 4

MODELOS DE FORMACIÓN DE BURBUJAS

4.1 Introducción

En el capítulo anterior se ha indicado que las sobrecargas de emergencia de corta duración suponen un mayor riesgo para el transformador que las sobrecargas de larga duración; la causa principal a ello es la formación de burbujas de vapor de agua en el sistema de aislamiento del transformador durante las sobrecargas intensas, que pueden conducir a la ruptura del aislamiento, poniendo en peligro el transformador y el sistema completo.

En este capítulo se examina el proceso de formación de burbujas de vapor de agua durante las sobrecargas de corta duración, así como sus efectos en los elementos del transformador. También se expondrán los diferentes modelos publicados en la literatura científica en estos últimos años, indicando los factores que cada autor considera que pueden intervenir en la formación de burbujas en el aceite y en el papel del aislamiento y las ecuaciones propuestas para determinar la temperatura de formación de burbujas.

Gar-ton y Krasucki [5] investigaron el efecto de los campos eléctricos sobre las burbujas de agua y su relación con respecto al fallo dieléctrico del aislamiento líquido y se encontraron que un campo eléctrico que alcance un nivel del orden de 1 MV/cm, puede distorsionar la forma de una burbuja esférica, alargándola en la dirección del campo. Cuando la burbuja se ha estirado suficientemente es capaz de causar que el aislamiento líquido falle.

Korobeynicov y Smikh [6] estudiaron los fenómenos que dan origen a las descargas eléctricas en el interior de una burbuja gaseosa. Descompusieron el proceso en varias partes, tales como el tiempo de disolución de la burbuja en el líquido, la formación de carga eléctrica en la burbuja, los mecanismos de ionización dentro de la burbuja y la transición de la descarga a la fase líquida. Posteriormente Atrazhev [7] mostró que existen dos mecanismos distintos de formación de descargas eléctricas en función de la duración del impulso de tensión.

La formación de estas burbujas supone una zona de rigidez dieléctrica menor que el aceite. Esto es, que el vapor de agua va a soportar un campo eléctrico E mayor, ya que el agua tiene una permisividad menor que la del aceite. La afirmación anterior se basa en la siguiente ecuación que es la que rige el reparto de campo eléctrico en un medio formado por dos dieléctricos:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

Esto supone una zona de alto riesgo de la aparición de descargas parciales que provocan la descomposición del aceite formando entre otros productos de descomposición gases que incrementan el riesgo de aparición de descargas parciales y conducen finalmente al fallo del transformador.

Por lo tanto, para evitar este modo de fallo, se debe impedir que se produzca burbujas en el transformador.

4.2 Formación de burbujas

El papel aislante que rodea los conductores del transformador consiste en un conjunto de fibras de celulosa, unidas entre sí por puentes de hidrógeno y enlaces de Van-der-Waals. El agua es adsorbida en la estructura amorfa de la celulosa, en los poros de sus paredes celulares y en los restos de lignina presentes [CIG349]. Las fibras celulósicas forman micro capilares, que contienen tanto aceite aislante, como residuos gaseosos y, cuando está húmedo, agua. Cuando el contenido de humedad es bajo las moléculas de agua son retenidas por fuerzas grandes formando una mono-capa en la pared de la fibrilla (figura 4.1). Sin embargo, a medida que incrementa el porcentaje de la humedad (>1 ó 2% de humedad respecto al peso de papel) se forma una adsorción multicapa, y las fuerzas que mantienen el agua son menores, quedando sólo las fuerzas de capilaridad y las de Van-der-Waals. Las moléculas de este último caso son las que más adelante pueden evaporarse como burbujas.

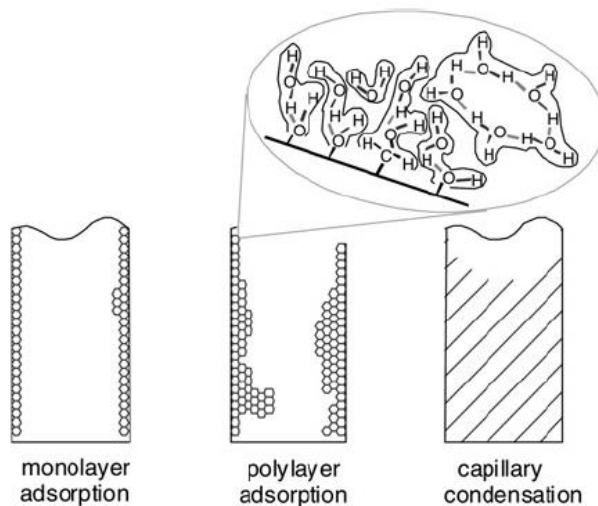


Figure 1 Bonds of water molecules in a microcapillary

Figura 4.1. Adsorción de humedad en la celulosa[17].

A lo largo de la vida de un transformador el contenido en humedad aumenta debido a la penetración de agua a lo largo de los años de por pérdida de estanqueidad, por mantenimiento inadecuado del desecador de silicagel, y por las reacciones químicas que ocurren dentro del aceite y de la celulosa. Por este motivo los transformadores viejos están más expuestos al peligro de formación de burbujas de vapor de agua. Además, los transformadores envejecidos tienen una mayor facilidad de retención del agua porque tienen menores grados de polimerización y por tanto un mayor tamaño de los poros. Un aumento rápido de temperatura causa una rápida evaporación del agua adsorbida seguida de un rápido incremento de la presión de gas en las capas internas del papel. Esta presión puede ser tan alta que expulsa el aceite contenido en los microscapilares del papel hacia fuera del aislamiento (figura 4.2).

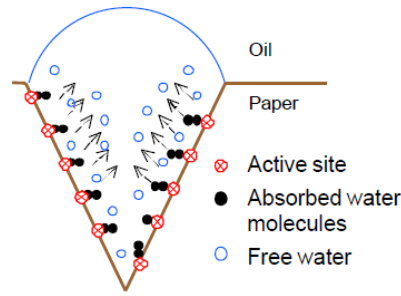


Figura 4-2. Desarrollo de la burbuja en el poro [17].

Aparece una burbuja estable, si la presión interna supera la presión externa del líquido y todas las fuerzas que obstaculizan la creación de la burbuja (como es la tensión superficial).

El desarrollo de las burbujas depende de la existencia de gérmenes de las burbujas. Los gérmenes pueden formarse a partir de las partículas disueltas existentes en los microcapilares o pueden ser microburbujas estables. Estos gérmenes pueden provenir del proceso de impregnación del papel de transformador con aceite cuando esos gérmenes de burbujas quedan atrapados en los microcapilares. Dependiendo de la tensión superficial del líquido (que a su vez depende de la presencia de sustancias tensoactivas y productos de oxidación) los gérmenes de burbujas y las microburbujas son estables o no.

Sólo el agua débilmente ligada al papel genera burbujas. El agua de las monocapas sólo genera burbujas si se aplica una fuerza muy elevada. Debido a ello es más claro analizar la temperatura de formación de burbujas en función del porcentaje de saturación de agua en el papel que en función del tanto por ciento en peso de agua en el papel. Las figura 4.3 ilustra el proceso de formación de la burbuja:

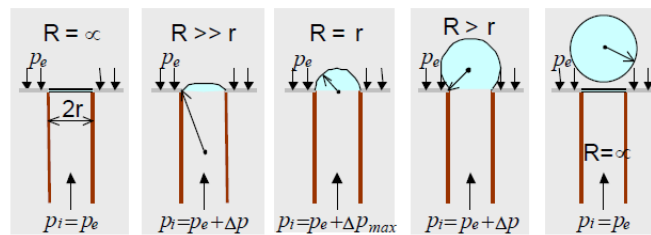


Figura 4.3. Proceso de formación de burbuja, R: radio de la burbuja, 2r: diámetro del microcapilar, pi: presión interna, pe: presión externa [17].

En la figura 4.3 se ve un capilar de radio r . A medida que la temperatura aumenta los gases y el vapor de agua se difunden en el germen de la burbuja y aumenta su volumen. Se forma una burbuja cuando la presión interna p_i vence la tensión superficial, las fuerzas de capilaridad y la fricción con las fibras y la presión externa del líquido p_e . Para que la burbuja se forme es preciso que la temperatura aumente lo suficientemente rápido como para que el vapor de agua no se difunda en el aceite.

De lo anterior se comprende que la formación de burbujas depende de la cantidad de agua que se pueda evaporar (cantidad de agua en el papel), diámetro de las microcapilaridades (depende

del envejecimiento del papel), residuos gaseosos en el aceite (gérmenes), tensión superficial del aceite (envejecimiento del aceite), presión externa (presión estática del líquido y presión atmosférica) y gases disueltos en el aceite.

4.3 Modelo de Oommen

4.3.1 Introducción

Oommen desarrolló un nuevo modelo de la generación de burbujas basado en la investigación de la relación entre la temperatura del comienzo de burbujas y el contenido de agua en el papel, fue la base para la revisión del Anexo A de la norma C57.91-1995 [1-3]. El modelo de Oommen fue una re-evaluación de los conceptos básicos consolidados en el modelo anterior.

El nuevo modelo de Oommen a diferencia de los estudios anteriores que sólo han tomado consideraciones física-química basado en la presión del vapor y el contenido de gas disueltos en el aceite, utiliza segmentos de bobinas realistas para producir burbujas en condiciones de sobrecarga y rechaza el hecho de considerar que la condición de generación de burbujas es aquel que la contribución total de presión de gas / vapor excede la presión externa ejercida sobre la burbuja.

El autor pudo comprobar que el contenido de gas sólo afecta a la temperatura de la formación de burbujas cuando el contenido de humedad es alto, por lo tanto desmiente la premisa anterior donde sostenía que diferencia la mínima de temperatura entre sistemas saturados y sistemas desgasificados era 50°C.

El primer cambio importante que introdujo fue añadir un segundo término a la presión interior del transformador, en el cual tiene en cuenta la presión superficial y radio de las burbujas

$$P_{int}=P_{ext}+2\sigma/R_B \quad \text{(Ecuación 4.2)}$$

Donde

P_{ext} es presión exterior

P_{int} es presión interior

σ es tensión superficial

R_B es radio de las burbujas

Este nuevo sumando que fue completamente ignorado por los estudios pasados tiene una grande importancia para los micro burbujas; A medida que disminuía el R_B de la burbuja, el segundo término tomaría cada vez más pesos, y tanto que en algún momento puede superar el primer término. Esto implicaría que la presión de la tensión superficial obligaría al colapso de un micro burbuja. Como consecuencia, se llegó la conclusión de que una burbuja visible no está formada por el crecimiento de un micro burbuja.

4.3.2 Metodología

Oommen utilizó dos tipos de bobinas para sus ensayos; el primero estaba compuesto por tres discos con un sensor termopar para medir la temperatura del punto caliente en el líquido y la evolución de las burbujas se observaba visualmente que mientras que el segundo que estaba formado por un único disco contaba con un sensor de fibra óptica y tenía un detector de descargas parciales que apoyaba a la observación visual. Los dos modelos son mostrados en la siguiente figura:

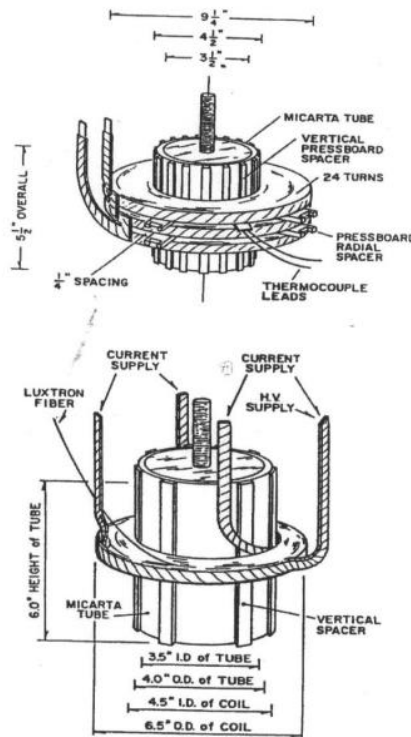


Figura 4-4. Modelos de bobinas de Oommen [15].

En total se hicieron 26 pruebas, tanto para sistema saturado como para sistema conservador, en condición de sobrecargas (calentamiento rápido en el interior del transformador), de los cuales, 12 son de la bobina con 3 discos y los restos de la bobina con sólo un disco. Y los rangos de ensayos eran bastante amplias, partía de sistemas completamente desgasificado a saturado y de contenido de humedad casi nula hasta el 8 %.

4.3.3. Resultados

Se muestra en la figura 4.5 el incremento de temperatura en el devanado y en el aceite durante el ensayo con el modelo de disco simple. El efecto zig-zag monitoreado por el sensor de fibra óptica que se muestra después del punto de formación de burbujas es debido a la nube de gas que rodea el cabezal del sensor.

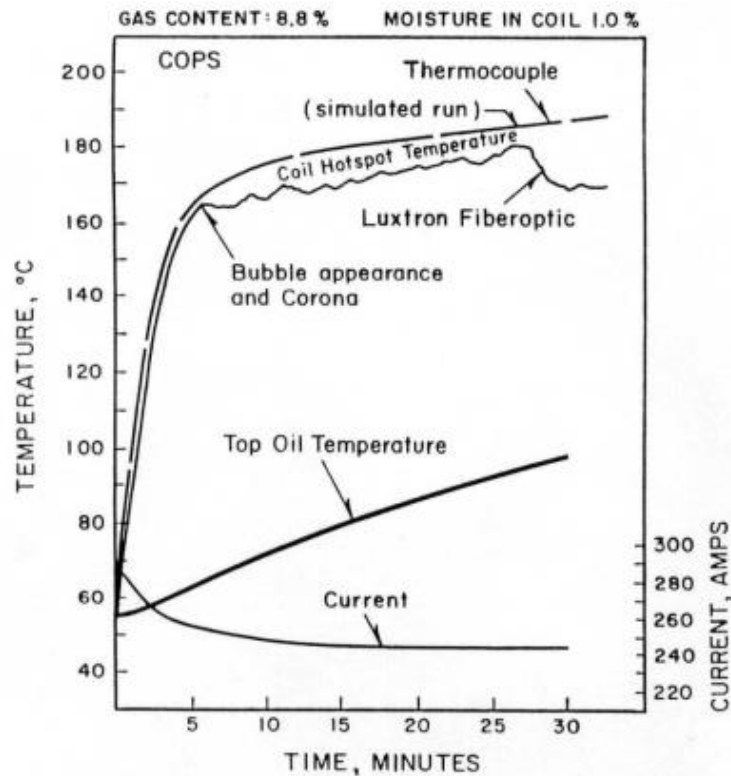


Fig. 4.5. Incremento de temperatura y formación de burbujas [15].

En la figura 4.6 se indican los resultados de los ensayos de los sistemas desgasificados y saturado, en el cual podemos observar que mientras el contenido de la humedad en el papel incrementaba, la temperatura a la cual se forman las burbujas disminuía y para valores bajos de humedad, la temperatura de formación de ambos sistemas son prácticamente iguales. El contenido del gas en el aceite empieza a influir en los resultados cuando el porcentaje de la humedad superaba el 3%.

Podemos comprobar también que los 50°C de diferencias comentado por científicos anteriores son solo detectables cuando la humedad del transformador supera un 10%. Estos datos nos proporcionan la seguridad de que el rango de temperatura de funcionamiento podría ser muy alto sin que les suceda el efecto burbujas.

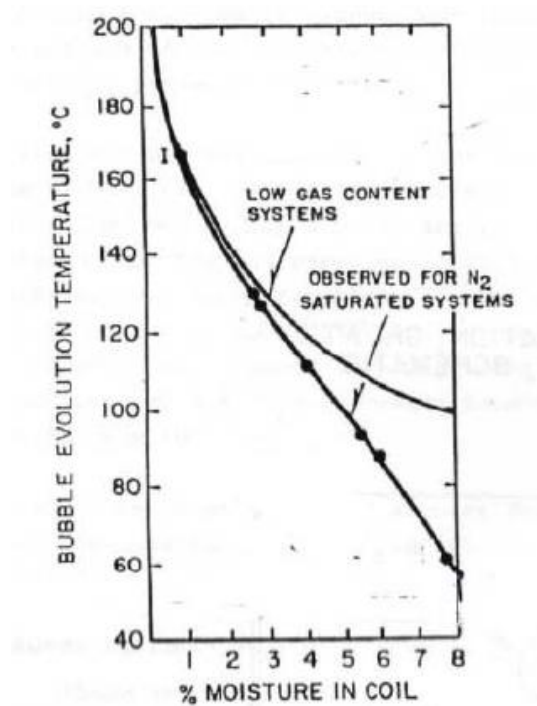


Figura 4.6. Temperatura de formación de burbujas en función de la humedad para el sistema con bajo gas y para el sistema saturado de gas [15].

Asimismo, partiendo de los resultados anteriores y basados en las curvas de equilibrio de Piper, Oomeen pudo formular la siguiente ecuación (Ecuación 4.3) para determinación de la temperatura de la formación de burbujas en condiciones similares a los que definió él mismo. Observamos que la ecuación formulada depende de la presión total del sistema y el contenido de agua en el papel.

$$T = \left(\frac{6996.7}{22.454} + 1.4495 * \ln(w) - \ln(P) \right) \quad \text{(Ecuación 4.3)}$$

Por otro lado, con el objetivo de ajustar más a los resultados de los ensayos, el autor introdujo en su ecuación un sumando que tiene en cuenta el contenido de gas en el aceite (Ecuación 4.4). Este término introducido no tiene ningún significado físico pero permite aproximar más a los resultados experimentales observadas.

$$T = \left[\frac{6996.7}{22.454} + 1.4495 * \ln(w) - \ln(P) \right] - [\exp(0.473W) * (g/30)^{1.585}] \quad \text{(Ecuación 4.4)}$$

En la tabla 4.1 siguiente se muestran valores de temperatura de formación de burbujas calculadas con la fórmula anterior, para ambos sistemas:

Test #	Observed(°C)	Predicted(°C)
1	220	224
2	215	215
3	209	191
4	209	192
5	204	209
6	209	209
7	211	208
8	158	153
9	160	164
10	131	134
11	152	151
12	158	149
13	166	168
14	110	113
15	130	130
16	109	111
17	99	98
18	60	64
19	55	53
20	122	119
21	110	108
22	90	91
23	128	124
24	93	98
25	60	58
26	132	128

Tabla 4.1 Ensayo de temperatura de formación de burbujas por el Oommen [15].

4.4 Modelo de Koch y Tenbohlen

4.4.1 Introducción

Al igual que Oommen, Koch y Thenbohlen estudiaron también la temperatura de formación de las burbujas pero enfocaron el estudio en la influencia del estado del papel y del estado de la aceite. De esta manera determinaron la relación entre la temperatura de aparición de burbujas con el tipo y estados de los papeles y aceites.

4.4.2 Metodología

Koch y Tenbohlen utilizaron para sus experimentos, un matraz de 5 litros que contiene una varilla calentada y envuelta de dos capas de papel aislamiento. El llenado de aceite de aislamiento se realizó bajo vacío, con una presión de 20 a 40 mbar para imitar al proceso de fabricación del transformador.

Empleaba una sonda optoelectrónica para medir la temperatura en el lado interior y exterior de las capas del papel que enrollaba a la varilla. Un transformador variable controla la potencia calorífica y por consiguiente la temperatura. Se incluyó un tubo que tiene una columna de aceite de 1,5m para emular la presión estática del aceite en el punto caliente del transformador. Por último, disponía de una cámara digital que registra la temperatura de inicio de formación de las burbujas y el proceso de burbujeo.

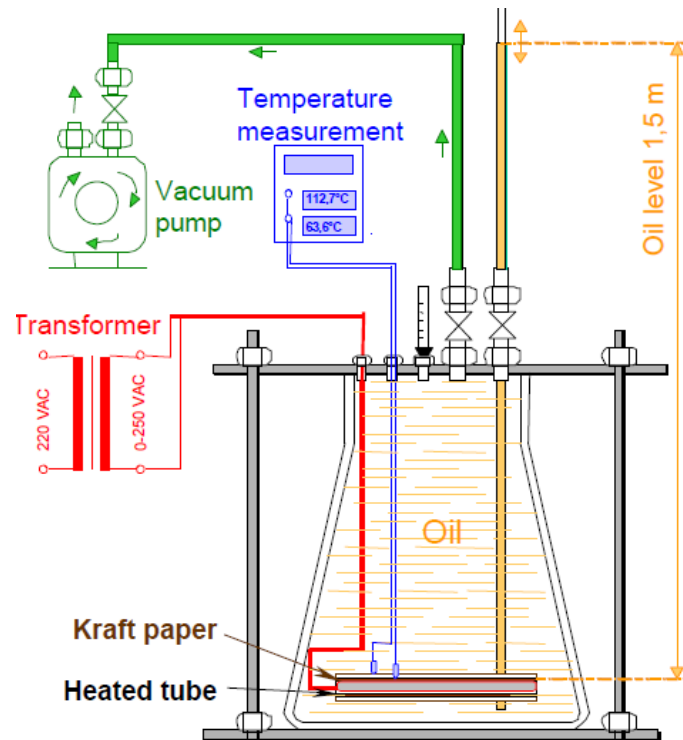


Figura 4.7. Depósito del ensayo de determinación de la temperatura de la formación de burbujas [17].

Los autores utilizaron para sus pruebas, papel Kraft nuevo, papel térmicamente mejorado y papel Kraft térmicamente degradado combinándose por otro lado, con aceite nuevo Shell Diala D y con aceite envejecido Shell K 6 SX de 1965 (ambos aceites estaban saturados de gas).

4.4.3 Resultados

En los ensayos realizados, Koch y Thenbohlen observaron que con un 1,1% de contenido de humedad en el papel, comienza a aparecer burbujas a los 172°C y se cesaban a los 177°C. Esto es debido a que a un contenido bajo de agua la energía térmica interna evapora el agua disponible y por lo consiguiente, seca el papel de aislamiento. El efecto comentado se muestra en la figura 4.8.

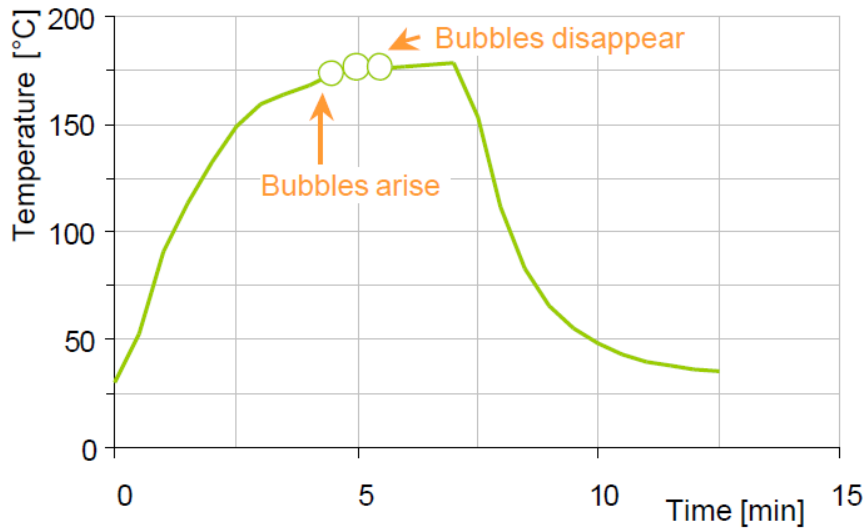


Figura 4.8 Progresión de la evolución de burbujas en aceite nuevo y papel kraft nuevo, con un contenido de agua del 1,1% [17].

Para el caso de humedades elevadas la energía calorífica generada es incapaz de secar el papel. Así la figura 4.9 muestra dos ciclos de calentamiento en un papel con un 3,9% de humedad. En el primer ciclo las burbujas empiezan a aparecer a los 123 °C mientras que en el segundo ciclo no aparecen hasta los 134 °C debido probablemente a que el papel está ahora más seco. En la figura 4.9 puede que los ensayos son bien reproducibles: a pesar de que en el ensayo marcado de color rojo se alcanzaron temperaturas mayores que en el color azul las temperaturas de inicio y final de las burbujas son idénticas.

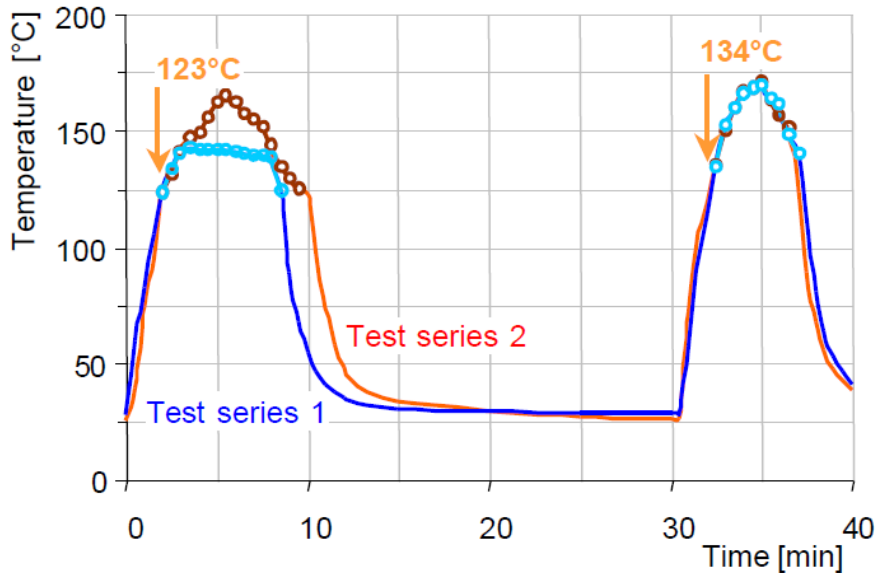


Figura 4.9 Emisión de burbujas repetida en aceite nuevo y papel Kraft Con un contenido de humedad de 3,9% [17].

4.4.3.1 Influencia del estado y tipo de papel

El contenido del agua en la celulosa del papel es el principal parámetro que influye en la temperatura de formación de burbujas, ya que este aumenta la presión interna del capilar que empuja las burbujas hacia el aceite. Tiene importancia vital también la microestructura de estos papeles.

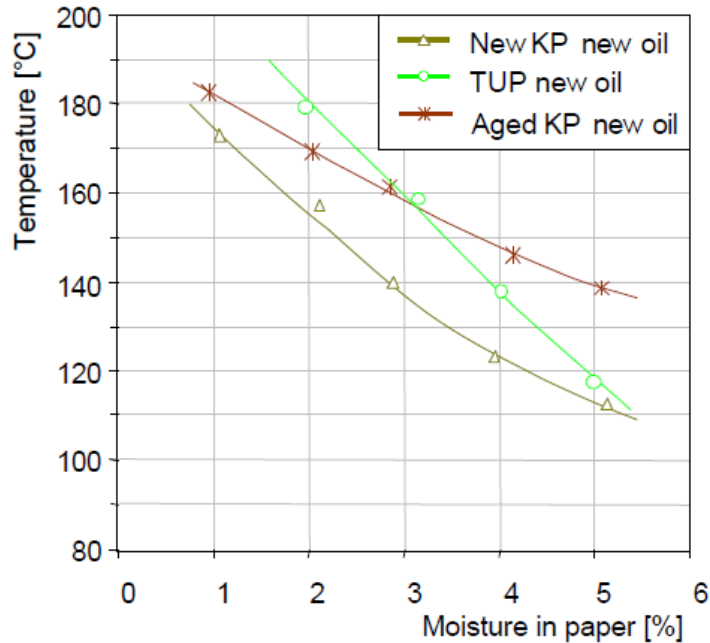


Figura 4.10. Temperatura de formación de burbujas del papel kraft nuevo, papel térmicamente mejorado y el papel kraft térmicamente degradado [17].

De la gráfica anterior podemos observar que el papel nuevo es el que tiene menor temperatura de formación, lo que es perjudicial. El papel térmicamente mejorado tiene temperaturas muchos mayores, esto es debido a que su microestructura contiene rellenos que ralentiza el envejecimiento y reduce el número y el diámetro de los capilares. De este modo, las fuerzas de capilaridad aumentan y por lo tanto, necesita mayor energía para impulsar burbujas. Además de lo anterior en el papel térmicamente mejorado el agua está más firmemente ligada a la estructura del papel.

Sorprendentemente, la temperatura de inicio de burbujas del papel degradado supera también a la de papel Kraft nuevo, la causa para ello es el llamado “efecto hornificación”: En caso de envejecimiento del papel a temperatura elevada, el grupo OH de la cadena de celulosa se saturan entre sí, construyendo por lo tanto, micro fibrillas secas conectados que no reaccionan con el agua cuando se humedecen otra vez.

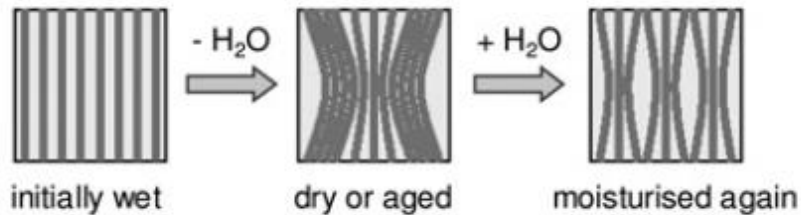


Figura 4.11: Efecto hornificación en el papel de aislamiento del transformador [17].

4.4.3.2 Influencia del estado del aceite

El estado del aceite tiene gran influencia en la formación de burbujas, pues los aceites envejecidos contienen ácidos y otros productos que reducen la tensión superficial. La figura 4.12 muestra la temperatura de inicio de burbujas en función del estado del aceite. En esta figura se puede ver que el modelo de Oommen arroja resultados intermedios entre los que se tienen con un aceite nuevo y los que se tiene con un aceite envejecido, y proporciona mejores resultados con aceites nuevos que con aceites envejecidos.

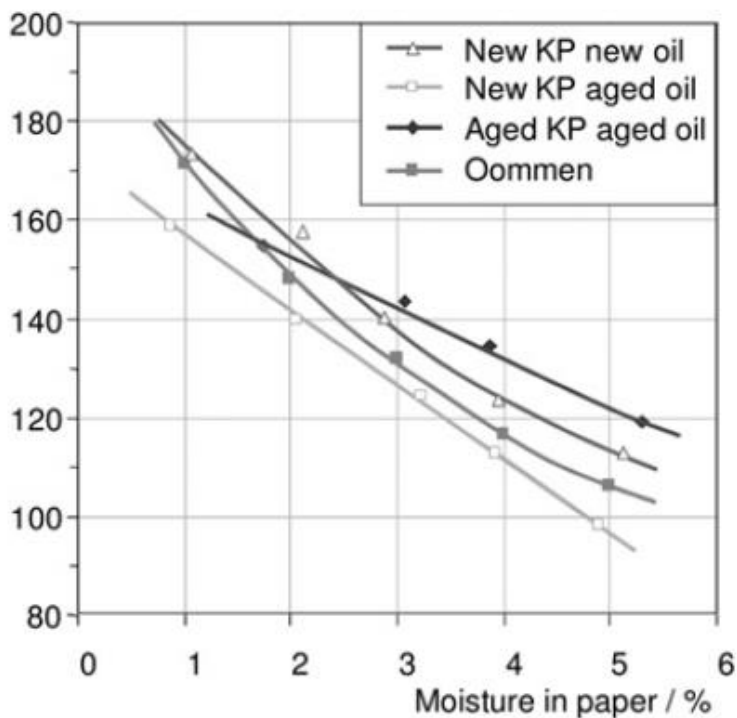


Figura 4.12 Temperatura de formación de burbujas en función del estado del papel [17].

4.4.3.3 Influencia de la tasa de crecimiento de la temperatura

Si la velocidad de crecimiento de la temperatura es muy lenta el agua se difunde en el aceite. Si la velocidad es rápida el agua no tiene tiempo de difundirse y forma burbujas. La figura 4.13 muestra el gradiente de temperatura preciso para formar burbujas.

Los transformadores reales tienen constantes de tiempo entre 3 y 9 minutos. Suponiendo una constante de tiempo de 4 minutos y que la temperatura del transformador pasa de 20 °C a 150 °C durante la sobrecarga de corta duración, el gradiente térmico es suficiente como para formar burbujas.

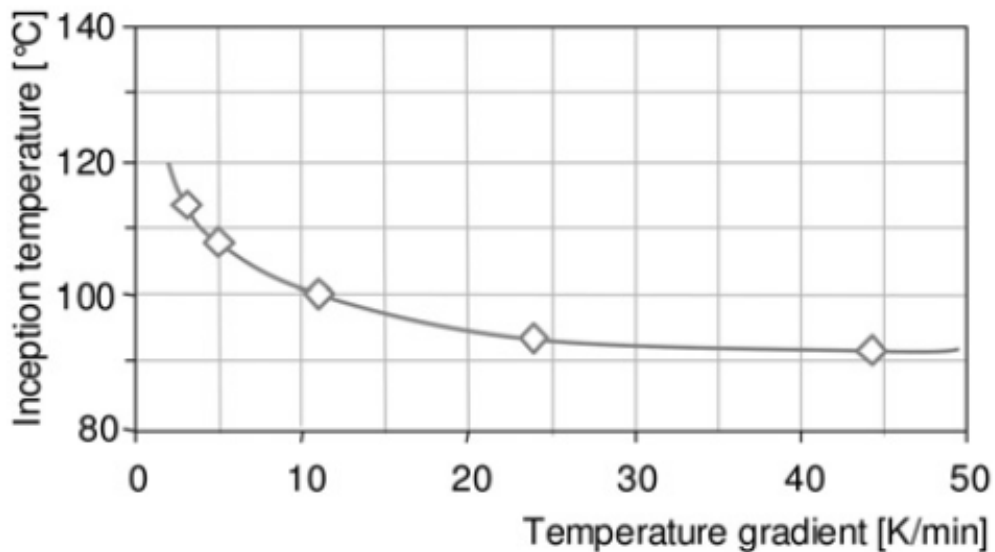


Figura 4.13: temperatura de formación de burbujas en función de la velocidad de crecimiento de la temperatura [17].

4.4.3.4 Formulación del modelo

El modelo propuesto por Koch y Tenbohlen para obtener la temperatura de formación de burbujas es el siguiente:

$$\theta_{burbujas} = a \cdot e^W \quad \text{Ecuación (4.5)}$$

Y es válido sólo para el caso de que la columna de aceite sea de 1,5 m y el aceite esté saturado con gas. Los valores de a y b se dan en la tabla 4.2.

	A	B
Aceite nuevo y papel kraft nuevo	195,5	-0,11186
Aceite nuevo, papel térmicamente mejorado nuevo	237,7	-0,13718
Aceite envejecido y papel envejecido	178	-0,07338

Tabla 4.2 Valores de constantes a para papel Kraft, térmicamente mejorado y térmicamente degradado [17].

4.4.3.5 Conclusiones

Las conclusiones que llegaron son básicamente las siguientes:

- El papel térmicamente mejorado con un aceite aislante nuevo muestran la combinación resistente a la aparición de las burbujas debido a sus microestructuras.
- El envejecimiento del papel incrementa la temperatura el cual empieza a producir burbujas mientras el envejecimiento del aceite hace que estas aparezca antes con una temperatura menor. El primero de los efectos es preponderante, de forma que un papel envejecido con un aceite envejecido tiene una temperatura de formación de burbujas mayor que un aceite nuevo con un papel nuevo.
- Las burbujas se produce solo cuando el gradiente de temperatura supera a los 3K/min, para valores menores la humedad difunde en el aceite.
- Afortunadamente el punto más caliente de un transformador está más seco, con lo que la posibilidad de formación de burbujas es más reducida. Esto puede no ocurrir en transformadores que han estado fuera de servicio mucho tiempo, en los que la humedad del punto caliente puede ser elevada.

4.5 Modelo de Przybylek

4.5.1 Introducción

Przybylek estudió el problema de la adsorción y desorción de agua en el aislamiento papel-aceite del transformador en diferentes circunstancias y describe la influencia del envejecimiento del papel en las propiedades de desorción de agua. La desorción de agua puede ser una desorción lento o puede ser una desorción rápida en cuyo caso se forman burbujas de vapor de agua. Przybylek diseña un sistema de medición para investigar la temperatura de formación de burbujas en papel Kraft nuevo y viejo y formula al final dos ecuaciones que permiten calcular la temperatura de aparición de burbujas para condiciones similares a las del ensayo realizado.

4.5.2 Metodología

El sistema de medición de Przybylek consiste básicamente en un tubo de cobre en cuyo interior se tiene un calentador. En el exterior del tubo de cobre se arrolla un papel aislante. El tubo de cobre se mete en un contenedor de vidrio lleno de aceite. Junto al tubo se fija un termopar para la medición de la temperatura de comienzo de la formación de burbujas y una cámara que graba el proceso de producción de burbujas. En la figura 4.13 se muestra el dispositivo experimental.

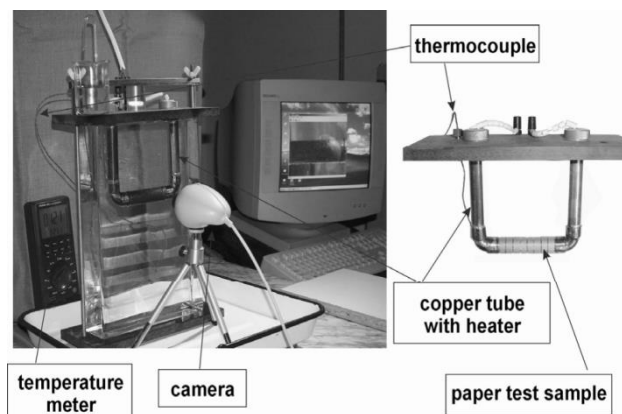


Figura 13. Sistema usado para el ensayo de formación de burbujas [16].

Przybylek empleó para sus ensayos el papel Kraft nuevo (DP=1357) y el papel Kraft envejecido (DP=341). Observaron el comportamiento del primero variando el contenido del agua en un rango de 1.46% a 6.98%, mientras para el papel envejecido el rango fue entre un 0.84% a un 3.99%. Las muestras del papel con diferente contenido de agua se obtuvieron calentado las muestras sumergidas en el aceite durante distintos periodos, y el contenido de humedad fue determinada por el método de valoración de Karl Fischer. La presión se mantuvo en 767 Torr y la temperatura se incrementó en 2 K/min.

4.5.3 Resultados y discusiones

Los resultados de las pruebas de Przybylek para el papel Kraft nuevo se muestra en la tabla 4.3 y los de papel envejecido se muestra en la tabla 4.4

Papel virgen (DP=1357)		
N °de ensayo	Contenido de agua en el papel %	Temperatura a la cual comienza la aparición de burbujas
1	6.98	90
2	3.38	117
3	2.19	142
4	1.46	160

Tabla4.3. Temperatura de la formación de burbujas del papel Kraft nuevo [16].

Papel viejo (DP=341)		
N °de ensayo	Contenido de agua en el papel %	Temperatura a la cual comienza la aparición de burbujas
1	3.99	84
2	2.76	113
3	2.21	127
4	1.27	143
5	0.84	158

Tabla4.4. Temperatura de la formación de burbujas del papel Kraft envejecido [16].

Con los datos de las tablas anteriores el autor ha ajustado los parámetros de una ecuación que tiene el mismo aspecto que la ecuación de Piper que proporciona la presión de vapor del agua para un papel humedecido. De esta forma obtuvo dos ecuaciones una para el papel nuevo (Ecuación 4.6) y el segundo para el papel viejo (Ecuación 4.7).

$$T(WCP) = \frac{10880}{30.544 + 3.156 \cdot \ln(WCP) - \ln P} \quad (\text{Ecuación 4.6})$$

$$T(WCP) = \frac{1.621 \cdot 10^7}{3.747 + 4497 \cdot \ln(WCP) + \ln P} \quad (\text{Ecuación 4.7})$$

Comparando ambas ecuaciones en la figura 4.14 obtenemos una conclusión muy importante: la temperatura a la cual empieza la formación de burbujas es aproximadamente un 12% menor para papel viejo que para papel nuevo, por ejemplo, para un contenido de agua del 2.5%, la temperatura de aparición de burbujas en papel viejo es 117°C mientras en papel nuevo hay que llegar a unos 133°C.

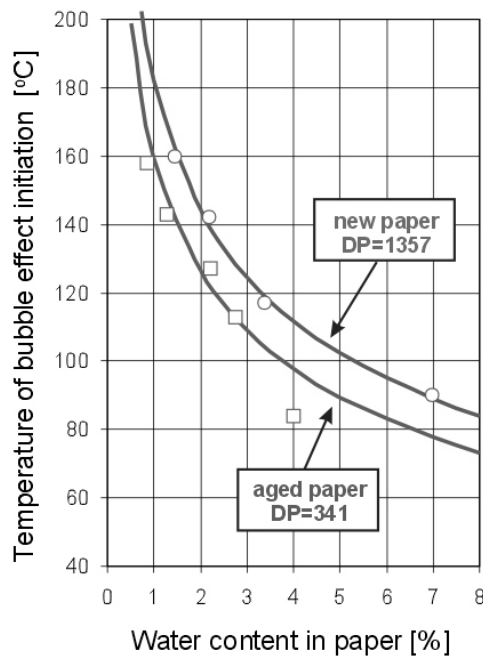


Figura 4.14 Temperatura de formación de burbujas en función del contenido de humedad en el papel [16].

Según la limitación de la guía IEEE [2], la temperatura máxima permitida para el punto caliente para una esperanza de vida normal del transformador es 120°C, esto es según el resultado mostrado en la gráfica anterior, daría lugar a la formación de burbujas en un transformador viejo con un contenido de humedad superior a 2,3%.

CAPITULO 5

PROGRAMA DE CÁLCULO DE LA SOBRECARGA ADMISIBLE EN UN TRANSFORMADOR

Como se ha mencionado en el primer capítulo, el objetivo del presente proyecto es elaborar un programa a través de Matlab, el cual nos permiten analizar el efecto que tienen las sobrecargas de corta duración en las diferentes condiciones que pueden sufrir el transformador.

Para ello, el programa cuenta, entre otros, códigos que permite el cálculo de las temperaturas de la capa superior del aceite y del punto más caliente, otros códigos que sirve para la estimación de pérdida de vida, y por último y lo más importante, códigos que nos permite evaluar la posibilidad de formación de burbujas en condiciones de sobrecargas de corta duración y al mismo tiempo nos permite medir la diferencia numérica entre los estudios realizados por los tres autores más involucrado del tema.

La entrada de datos al sistema de compilación se realiza a través de una hoja de Excel así como la salida de resultados. En este capítulo vamos a explicar detalladamente el funcionamiento del programa implementado en Matlab, indicando el orden de ejecución de los mismos, así como las combinaciones existentes para el cálculo de temperaturas del punto caliente y el cálculo de la temperatura de formación de burbujas dependiendo de las opciones elegidas y valores introducidas en la hoja de Excel.

5.1 Entrada de datos

Según como hemos explicado en la introducción, la entrada de datos se realiza mediante un libro de Excel, ya que de esta manera nos permiten obtener datos organizadas y estandarizadas. La primera de ella, llamada "Instrucciones", es una hoja ilustrativo el cual explica el proceso de entrada de datos y facilita además, valores orientativos para los parámetros solicitadas en la misma entrada. La segunda, llamada "Datos programa", está dedicada a la introducción de datos del transformador; en esta hoja se introduce el tipo de sobrecarga a estudiar, si se desea conocer la pérdida de vida sufrida por el transformador, los datos constructivos de la máquina y los perfiles de carga experimentados así como la temperatura ambiente durante el ciclo de carga. La tercera hoja, llamada "Carga anual" es utilizada para introducir un perfil de carga real del transformador durante el periodo de un año. Además de lo anterior, la última hoja del libro Excel está dedicada a la salida de datos y a la visualización de las curvas de temperatura. A continuación se detalla el manejo de las diferentes hojas.

5.1.1 Hoja 1: Instrucciones

En esta hoja nos encontramos con la información orientativa para iniciar el proceso de determinación de temperaturas y estimación de existencias de burbujas en las sobrecargas de corta

duración. La primera tabla que tenemos que dirigirnos de las 4 existentes es la tabla 5.1, el cual nos muestra los pasos a seguir por el usuario para la introducción de datos

INSTRUCCIONES DE USO	
0. Escoja el tipo de sobrecarga a analizar (corta duración o larga duración).	
1. Escoja el modelo a utilizar para el análisis.	
2. Escoja el modelo de burbujas a analizar	
3. Rellene los datos técnicos del transformador.	
4. Rellene los datos de condiciones del transformador	
5. En caso de desconocer algún dato, haga uso de la tabla situada a la derecha o abajo.	
6. Seleccione los datos de simulación para carga y temperatura.	
7. En función de su elección algunas celdas se habilitarán para su edición.	
8. En caso de que desee realizar una simulación con valores por defecto en todas las casillas, pulse el botón de reestablecer datos por defecto.	
9. Si desconoce algún valor no indicado en la tabla adjunta, sirvan de ayuda las sugerencias que aparecen en cada casilla.	
10. Seleccione si desea conocer la estimación de pérdida de vida sufrida por el transformador.	
11. Borre los valores que ya existen en la hoja "Resultados"	
Datos de carga anual	
En caso de seleccionar el modo de simulación tomando datos de carga vaya a la hoja correspondiente y siga las instrucciones.	

Tabla 5.1 Instrucciones de uso para introducción de datos de entrada al Matlab

En la tabla 5.2 y 5.3 podemos encontrar valores de entradas orientativos tanto para transformadores de distribución como de potencia. De la última tabla, el que se encuentra además clasificado según tipo de refrigeración utilizado en el transformador, hemos podido sacar valores referencia para la ejecución del modelo térmico IEC, ya que proporciona datos difíciles de conseguir de otro modo, así como todas las constantes K del modelo de las ecuaciones diferenciales.

	Transformadores de distribución	Transformadores de potencia			
Ratio de pérdidas en carga/vacio	5	6	6	6	6
Factor H del punto caliente	1,1	1,2	1,3	1,3	1,3
Constante de tiempo aceite	4	10	7	7	7
Constante de tiempo bobinado	180	210	150	90	90
Temp. Ambiente	20	20	20	20	20
Temp. punto caliente	98	98	98	98	98
Calentamiento punto caliente respecto capa superior del aceite	23	26	26	22	29
Calentamiento medio aceite	44	43	43	46	46
Calentamiento capa superior aceite	55	52	52	56	49
Calentamiento capa inferior aceite	33	34	34	36	43

Tabla 5.2 valores orientativos 1

	Transformadores de distribución	Transformadores de media y gran potencia						
	ONAN	ONAN restringida	ONAN	ONAF restringida	ONAF	OF restringida	OF	OD
exponente del aceite x	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1
exponente del arrollamiento y	1,6	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	2
constante k11	1	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	1
constante k21	1	3	2	3	2	1,45	1,3	1
constante k22	2	2	2	2	2	1	1	1
constante de tiempo to	180	210	210	150	150	90	90	90
constante de tiempo tw	4	10	10	7	7	7	7	7

Tabla 5.2 valores orientativos 2

Finalmente, tenemos otros tres tablas más (Tabla 5.3, Tabla 5.4 y Tabla 5.5) los cuales nos pueden proporcionar valores modelos o explicaciones aclarativos, en caso de que queramos hacer una análisis con los modelos del Standard C57-91-1995 y de Dejan Susa.

DATOS DE PARTIDA IEEE	DATOS DE PARTIDA SUSAS	VALORES TÍPICOS
Altura del punto caliente		1
Datos de potencia		
Potencia nominal (KVA)	Potencia nominal	Potencia nominal
Potencia base de pérdidas (KVA)		Potencia nominal
Pérdidas en el hierro (vatios)		Pérdidas ensayo en vacío
Pérdidas I ² R (vatios)	Pérdidas I ² R (vatios)	Cálculo a través de la corriente nominal. En caso de no disponer del dato son iguales a Pérdidas ensayo cortocircuito
Pérdidas adicionales por flujos dispersos (vatios)	Pérdidas adicionales por flujos dispersos (vatios)	Dato o Pérdidas cortocircuito menos I ² R. Se pueden tomar como cero si no se dispone del dato
Pérdidas adicionales por corrientes de Foucault en el bobinado (vatios)	Pérdidas adicionales por corrientes de Foucault en el bobinado (vatios)	Se pueden tomar como cero si no se dispone del dato
Pérdidas de Foucault en punto caliente (vatios)		Se pueden tomar como cero siempre

Tabla 5.3 Aclaraciones 1

Datos térmicos		
	Constante H	1,1
	Constante g	Temp. media bobinado-Temp media aceite. H·g = tmp. pto. Cliente
	Constante n	0,25
Constante de tiempo del arrollamiento en minutos	Constante de tiempo del arrollamiento en minutos	4
Calentamiento medio de los arrollamientos a potencia base de pérdidas		Calentamiento medio de los arrollamientos ensayo calentamiento
Calentamiento del punto caliente a potencia nominal	Calentamiento del punto caliente a potencia nominal	Dato de calentamiento punto caliente ensayo calentamiento. Típicamente 78°C(H·g=23)
Calentamiento capa superior aceite a potencia nominal	Calentamiento capa superior aceite a potencia nominal	Calentamiento capa superior aceite ensayo calentamiento Típicamente 55°C
Calentamiento capa inferior aceite a potencia nominal		Interpolación capa superior y calentamiento medio. Típicamente 33°C
Calentamiento medio arrollamientos a potencia nominal		Calentamiento medio de los arrollamientos ensayo calentamiento
Temperatura base para las pérdidas		75°C

Tabla 5.3 Aclaraciones 2

Temperaturas iniciales		
Temperatura capa superior aceite	Temperatura capa superior aceite	65
Temperatura capa inferior aceite		35
Temperatura punto caliente	Temperatura punto caliente	98
Temperatura media arrollamientos		55
Temp. Aceite en el interior bobinado		55

Tabla 5.3 Aclaraciones 3

5.1.2 Hoja 2: Datos de entrada al programa

Esta es la hoja de introducción de datos para el cálculo de las temperaturas importantes de nuestra máquina y el cálculo de formación de burbujas. Lo primero que nos tenemos que fijar en esta hoja es el despliegue donde se selecciona el modelo a utilizar (figura 5.1), de las cuales elegimos “Modelo Norma IEC” ya que éste es el modelo correspondiente para la obtención de temperaturas significativas.



Figura 5.1 Despliegue del selección del modelo a utilizar

Una vez seleccionado el modelo mencionado anteriormente, nos vamos al segundo despliegue donde nos dejan elegir entre sobrecarga de corta y larga duración (Figura 5.2). Seleccionamos

sobrecarga de corta duración en caso de que queramos estudiar la formación y elegimos sobrecarga de larga duración en caso de que queramos analizar la pérdida de vida del transformador durante las condiciones anormales

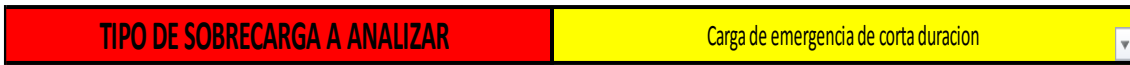


Figura 5.2 Despliegue del tipo de sobrecarga

A continuación nos encontramos el tercer despliegue “pérdida de vida” (Figura 5.3), el cual nos permite seleccionar “SI”, si queremos que muestre por pantalla la pérdida de vida sufrido por el transformador en las condiciones dictada por nosotros, y “NO”, si sólo queremos los cálculos de las temperaturas significativas.



Figura 5.3 Despliegue de pérdida de vida

El último de los despliegues es el “modelo de burbujas”, el cual le vamos a atender en la mayoría de los apartados de este proyecto (Figura 5.4). En este caso, el despliegue nos ofrecen elegir entre modelos de burbujas desarrollados por tres autores diferentes: Oommen, Koch y Tebohlen y Przybylek. Estos tres autores trataron de distinta manera del peligro de la formación de burbujas en condiciones de sobrecarga de corta duración y formularon cada uno de ellos ecuaciones que nos permite analizar cuantitativamente el problema hablado.



Figura 5.4 Despliegue de modelo de burbujas

A la izquierda de la parte intermedia de la hoja nos encontramos campos de “DATOS TÉCNICOS DEL TRANSFORMADOR” según modelo a utilizar. Como bien hemos explicado al principio de este apartado del uso del modelo, los únicos valores que tenemos que introducir son los que piden en el modelo norma IEC. Para nuestro trabajo, hemos elegido un transformador de media potencia cuyos parámetros se refleja en la figura 5.5. (Los valores están sacados del ejemplo en el Anexo D de la norma UNE-IEC 60076-7). En caso de desconocer algún valor, la hoja “Introducciones” nos pueden proporcionar valores orientativos.

Modelo Norma IEC	
Datos del ensayo de calentamiento	
Calentamiento capa superior de aceite a carga nominal	38,3
Calentamiento del punto caliente respecto del aceite a carga nominal	20,3
Constante de tiempo del aceite	150
Constante de tiempo del arrollamiento	6
Constante del modelo térmico k_{11}	0,5
Constante del modelo térmico k_{21}	2

Constante del modelo térmico k_{22}	2
Datos de Potencia	
Relación entre pérdidas en carga a corriente asignada y pérdidas en vacío	8,4
Exponente del aceite x	0,8
Exponente de los arrollamientos y	1,3

Figura 5.5 Introducción de datos del transformador para el modelo norma IEC

A la derecha nos encontramos con el campo llamado “CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN”. En la primera mitad del campo, el usuario puede intervenir en el perfil de carga y la temperatura ambiente del transformador durante la simulación (figura 5.6 Configuración de simulación).

CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN

TEMPERATURA AMBIENTE

Modo de obtención de datos de temperatura ambiente: Constante

Temperatura amb. constante (°C) 10

GRADO DE CARGA

Modo de obtención de datos de carga: Escala

Curva típica semanal

Figura 5.6 Configuración de simulación

Para la temperatura ambiente, se dispone de un desplegable el cual nos deja elegir entre “CONSTANTES” Y “DATOS ANUALES”. En caso de elegir la primera, la temperatura durante tiempo de simulación será constante e igual al valor introducido en la celda. Si escogemos la segunda opción, nos permitirá fijar distintas límites de temperaturas a lo largo del año (Figura 5.6).

Datos anuales de temperatura ambiente				
Mes	Tª media máxima diaria	mínima diaria	Tª media máxima mensual	mínima mensual
Enero	6	0,9	13,3	-5,8
Febrero	7,4	1,3	15,1	-5,2
Marzo	12,2	3,6	20,5	-1,4
Abril	15,8	6,3	24,3	1,4
Mayo	19,7	9,5	27,4	4,5
Junio	22,9	12,7	31,1	8,2
Julio	24,6	14,5	33,2	10,6
Agosto	24	14,3	31,1	9,6
Septiembre	21,1	11,9	28,6	7,1
Octubre	15,6	7,9	23,9	1,4
Noviembre	10	4,5	16,5	-1,7
Diciembre	6,6	2	13,3	-3,8
Hora para el máximo valor de temperatura en un día				14,00

Figura 5.7 Datos anuales de temperatura ambiente

Con este último método conseguimos crear una curva de temperatura ambiental siguiendo una distribución de doble sinusoidal: una sinusoidal de alta frecuencia teniendo en cuenta la evolución de temperatura a lo largo del día, conseguimos simular el valor punta y valor valle de un día, y una sinusoidal de baja frecuencia teniendo en cuenta sólo el cambio de temperatura mensualmente, que nos muestra valores correspondiente en el verano y el invierno. Otra de las opciones que nos ofrece el método anterior es que nos permite analizar durante un intervalo concreto: podemos fijar el día, la hora de comienzo y la hora de finalización (Figura 5.8).

Datos anuales de carga			
<i>"los datos se han de introducir en la hoja correspondiente"</i>			
Día inicio	200	Hora inicio	1
Día final	204	Hora final	24

Figura 5.8 Datos anuales de carga

Para la configuración del perfil de carga, disponemos de nuevo de un desplegable nombrado "MODO DE OBTENCIÓN DE DATOS DE CARGAS" el cual nos deja elegir entre "SEMANAL", "DATOS ANUALES" Y "ESCALÓN".

En caso de escoger "SEMANAL", el perfil creado sería de 7 periodos, cinco de alta carga (entre semanas) y dos de baja carga (Fin de semana). Con esta opción lo que se pretende es simular el ciclo real de carga de un transformador ya que además incluimos horas valles y horas punta diarias. En la figura 5.9 observamos los valores típicos de cargas durante una semana.

Curva típica semanal	
Fin de semana	
Valle nocturno	0,4
Pico mañana	0,9
Valle tarde	0,8
Pico tarde-noche	1
Laborable	
Valle nocturno	0,6
Pico mañana	1,3
Valle tarde	0,9
Pico tarde-noche	1,4

Figura 5.9 Datos típicos de cargas semanal

La segunda opción del modo de carga es "DATOS ANUALES", que se trata de una perfil de carga basado en una base de datos ofrecido por la empresa propietaria de nuestra máquina. Estos son los datos que aparece en la tercera hoja llamada "CARGA ANUAL" de nuestro libro de Excel. Con esta opción el usuario puede analizar cualquier día del año (Figura 5.10).

dd/mm/aaaa	L,M,X...	Festivo-labo	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9
01/01/2009	J	L	16,91	14,95	13,32	12,56	11,96	12,22	13,80	16,82	19,89
02/01/2009	V	L	18,30	16,34	14,70	13,95	13,35	13,61	15,19	18,21	21,28
03/01/2009	S	L	17,95	16,00	14,36	13,60	13,00	13,26	14,84	17,86	20,94
04/01/2009	D	F	18,00	16,05	14,41	13,65	13,05	13,31	14,89	17,91	20,99
05/01/2009	L	L	37,95	34,04	30,77	29,25	28,06	28,58	31,74	37,77	43,92
06/01/2009	M	L	37,68	33,77	30,50	28,98	27,79	28,31	31,47	37,51	43,65
07/01/2009	X	L	44,05	40,14	36,87	35,35	34,15	34,68	37,84	43,87	50,02
08/01/2009	J	L	46,03	42,12	38,85	37,33	36,13	36,66	39,82	45,85	52,00
09/01/2009	V	L	47,95	44,04	40,76	39,24	38,05	38,57	41,73	47,77	53,92
10/01/2009	S	L	42,72	38,82	35,54	34,02	32,83	33,35	36,51	42,55	48,69
11/01/2009	D	F	41,32	37,41	34,13	32,61	31,42	31,94	35,10	41,14	47,29
12/01/2009	L	L	23,35	21,39	19,75	19,00	18,40	18,66	20,24	23,26	26,33
13/01/2009	M	L	23,95	22,00	20,36	19,60	19,00	19,27	20,85	23,86	26,94
14/01/2009	X	L	23,77	21,82	20,18	19,42	18,82	19,08	20,66	23,68	26,76
15/01/2009	J	L	23,49	21,53	19,89	19,13	18,54	18,80	20,38	23,40	26,47
16/01/2009	V	L	23,12	21,16	19,53	18,77	18,17	18,43	20,01	23,03	26,10
17/01/2009	S	L	20,54	18,58	16,94	16,19	15,59	15,85	17,43	20,45	23,52
18/01/2009	D	F	19,39	17,44	15,80	15,04	14,44	14,71	16,29	19,30	22,38
19/01/2009	L	L	21,87	19,92	18,28	17,52	16,92	17,18	18,76	21,78	24,86
20/01/2009	M	L	22,41	20,46	18,82	18,06	17,46	17,72	19,30	22,32	25,40
21/01/2009	X	L	22,49	20,54	18,90	18,14	17,54	17,80	19,38	22,40	25,48
22/01/2009	J	L	22,91	20,95	19,31	18,55	17,96	18,22	19,80	22,82	25,89
23/01/2009	V	L	21,11	19,15	17,51	16,75	16,16	16,42	18,00	21,02	24,09

Figura 5.10. Datos anuales de cargas

La última opción es el grado de carga de escalón, que es el caso más fácil y quizás más útil, ya que simula el programa sin necesidad de conocer el detalle del perfil de grado de carga y temperatura ambiente, dejando libertad a los interesado analizar sólo casos que les resultes interesantes. Por lo que, el usuario puede introducir de forma aleatoria en la figura 5.11 el grado de carga (Pero siempre bajo norma), definiendo siempre en cada momento el intervalo de la carga y la temperatura ambiente durante ese intervalo. En la figura 5.12 podemos ver un ejemplo de la distribución del grado de carga escalonada.

Temperatura y grado de carga por escalones		
Duración del escalón en minutos	Temperatura (°C)	Grado de carga (p.u)
1440	25	0,2
4	25	1,2
60	25	0,2

Nº de escalones (1-10)
3

Figura 11. Grado de carga por escalón

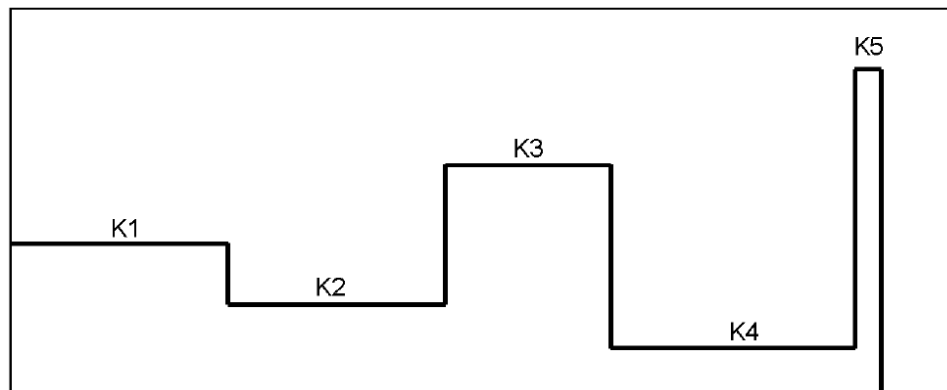


Figura 12. Distribución de grado de carga escalonada [3].

5.1.3 Hoja 3: CARGA ANUAL

Es la hoja de la cual se base si elegimos el modelo de grado de carga anual. Son datos reales que nos permite simular nuestro transformador en cualquier día del año. Y la única operación que debemos hacer en esta hoja del Excel es definir la potencia base en la figura 5.13, ya que los datos de la potencia en la tabla no está por unidad.

<i>Potencia base para los datos</i>
50

Figura 5.13 Definición de la potencia base

Tenemos una cuarta hoja llamada "Resultados" el cual se almacena todos los resultados de nuestro trabajo. Vamos a explicar detenidamente más adelante una vez explicado y aclarado los significados de cada uno de los módulos elaborados.

5.2 Módulos del programa

En este nuevo capítulo, trataremos de explicar la estructura de nuestro programa así como todos los módulos integrados. Para ello, a continuación vamos a introducir nuestro programa con un diagrama de flujo el cual deja claro la secuencia de ejecución.

5.2.1 Secuencia del programa

En la figura 5.13 se representa el diagrama de flujo del programa elaborado, donde cada uno de los bloques representa un módulo distinto.

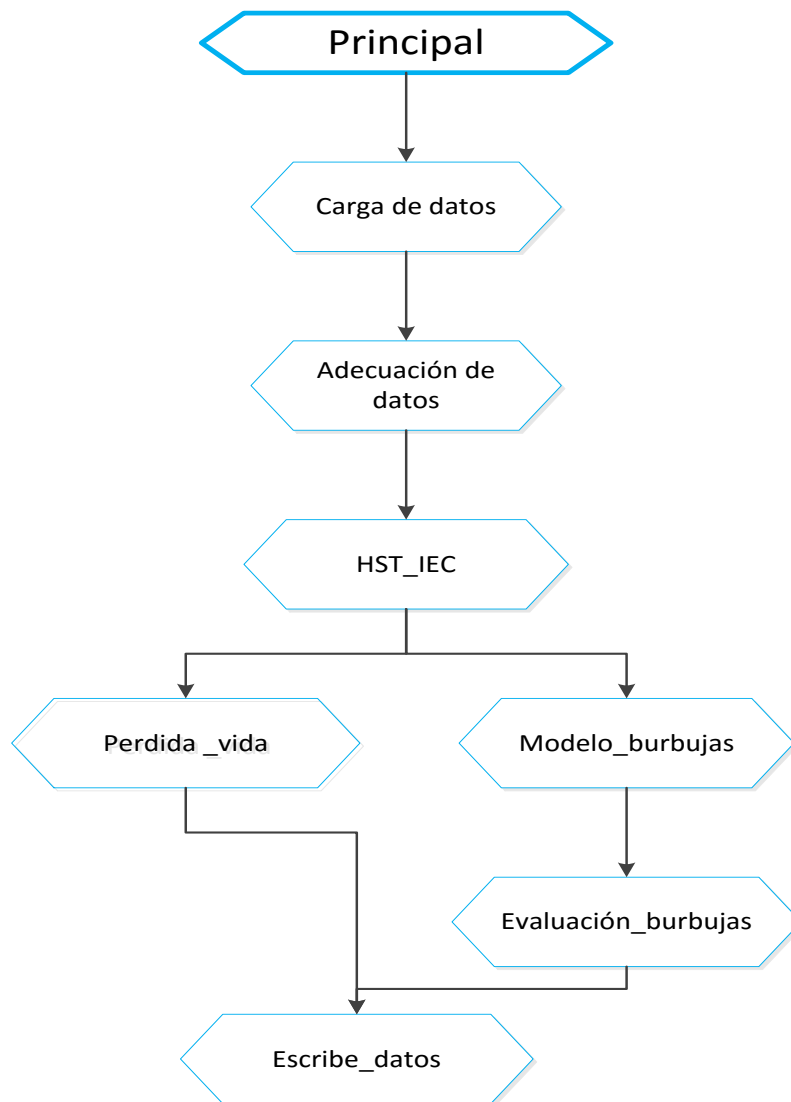


Figura 5.14 Diagrama de flujo principal

El diagrama está constituido por 8 bloques a distintos niveles. El bloque superior llamado “PRINCIPAL”, es el que se encarga de ejecutar a las demás sub-programas de forma secuencial.

5.2.2 Módulos

Carga Datos:

Como vemos en el diagrama anterior, es el primero que se ejecuta tras la llamada a la función principal. Es el encargado de leer datos desde la plantilla de Excel, explicado al principio del capítulo. Los datos leídos se almacena primeramente en una matriz y posteriormente son usado por los demás módulos a través de una función estructura llamado “DATOS”. La ventaja de una estructura es que nos deja clasificar todos los datos recogidos de forma simple y clara.

A continuación vamos a explicar una por una los campos almacenado bajo nuestra estructura llamada “DATOS”:

-Datos. IEC, registran datos para ejecutar el modelo térmico IEC: constante de calentamiento de capa superior del aceite, constante de calentamiento del punto caliente, constante de tiempo del arrollamiento, constante térmico...

-Datos. IEEE, recoge los datos necesarios del transformador para analizar el modelo térmico del Anexo G de IEEE C57.91: tipo de refrigeración, pérdidas, potencia normal...

-Datos. Susa, almacena datos para ejecutar el modelo térmico Susa: masa del aceite, constante de tiempo, pérdida de efecto Joule...

-Datos. Ambiente, registra todos los datos relacionado con la temperatura ambiente de manera que podemos ejecutar las distintas opciones que teníamos de éste: modo fijación de la temperatura ambiental, valor de la temperatura constante, numero y duración de los escalones para una temperatura variable...

-Datos. Carga, almacena parámetros relacionado con el estado de carga de nuestra máquina: modo de carga, carga, la carga máxima y mínima del día, el número de escalón de carga...

-Datos. Modelo, almacena todos los datos relacionado con las opciones elegidas por el usuario en la hoja de Excel llamado "Datos programa": tipo de modelo térmico, tipo de sobrecarga, tipo de formación de burbujas, tipo de papel y aceite usado en el transformador...

-Datos. Burbujas, recoge todos datos para una correcta análisis de formación de burbujas: humedad en el papel, densidad del aceite, porcentaje de gases disueltos, presión ambiental...

Adecuación de datos

Es el segundo bloque del diagrama y es el responsable de asignar a cada elección tomada por el usuario los datos correspondientes para los módulos de cálculos, creando así el perfil de temperatura ambiental y grado de carga oportunos.

El programa crea dos vectores, el primero es un vector que registra el valor de grado de cada en cada instante de tiempo. Además, para aquellos intervalos de tiempo donde el grado de carga no está definido, el programa interpola automáticamente en cada dos instantes de tiempo el valor de grado de carga de los otros dos instantes de tiempo más próximos conocidos. Sin embargo, éste no es viable para el caso de sobrecarga de corta duración que trataremos profundamente en el presente proyecto, ya que la formación de burbujas está íntimamente relacionada con la velocidad de crecimiento de temperatura, y la interpolación de grado de carga impediría la producción del efecto anterior. El segundo vector es casi idéntico que el primero pero en este caso almacena valores de temperatura ambiental en cada momento (Este segundo vector es inútil en nuestro caso porque para los análisis posteriores vamos a considerar en todo instante temperatura ambiental constante).

Cálculo de la temperatura en condiciones de sobrecarga

Después de tener ordenado los datos y creados los perfiles de grado de carga y temperatura ambiental oportuna, el programa hace un llamamiento al tercer módulo llamado "HTC_IEC" que es el que nos calculan las dos temperaturas más importantes del transformador en condiciones de anomalía: temperatura del punto caliente y temperatura de la capa superior del aceite.

Este módulo inicia calculando unas condiciones base considerando que nuestro transformador se encuentra en el régimen permanente. Seguidamente, mediante un bucle de iteración definido en nuestro programa y los perfiles de grado de carga y temperatura ambiental creado en los subprogramas anteriores, obtenemos otros dos vectores, los cuales almacenan los dos parámetros buscados en cada instante de tiempo. Al final de la ejecución, nuestro programa muestra en pantalla una gráfica donde se visualiza la evolución de las temperaturas significativas en los intervalos de tiempo definido.

Cálculo de la pérdida de vida

Una vez obtenido las curvas de las temperaturas significativas, pasamos al siguiente nivel que es una bifurcación. La primera de ella es el cálculo de pérdida de vida si hemos elegido modo de sobrecarga de larga-duración.

Es el subprograma que estima la disminución de vida útil de nuestra máquina. Debido que nuestro proyecto se sigue a la norma IEC 60076-7, emplearemos la ecuación Monstsinguer, si el papel usado es kraft, y ecuación de Arrhenius para uso de papeles térmicamente mejorados. En el presente proyecto no vamos a calcular la pérdida de vida ya que nos centraremos en la segunda opción de la bifurcación que vamos a explicar con detalle a continuación.

Cálculo de la formación de burbujas

En este apartado hablaremos de los dos módulos más importantes de nuestro proyecto; se trata de dos subprogramas que se encuentran a niveles distintos.

El de nivel superior llamado “Modelo de burbujas”, nos permite analizar la temperatura de formación de burbujas mediante fórmulas elaboradas por los tres autores explicados en el capítulo 4. Pero antes de ejecutar el modelo elegido, el programa hace una serie de cálculos (en función de la temperatura del capa superior de aceite calculado en el módulo HTC_IEC) que nos permite estimar el error que supone al considerar una densidad de aceite constante ya que varía dependiendo de la temperatura que se encuentra el aceite. Una vez probada que el error es menor del 10%, proseguimos con los restos de cálculos.

En la figura 5.15 tendremos un sub-diagrama de flujo el cual nos permite visualizar de forma simplificada el módulo hablado.

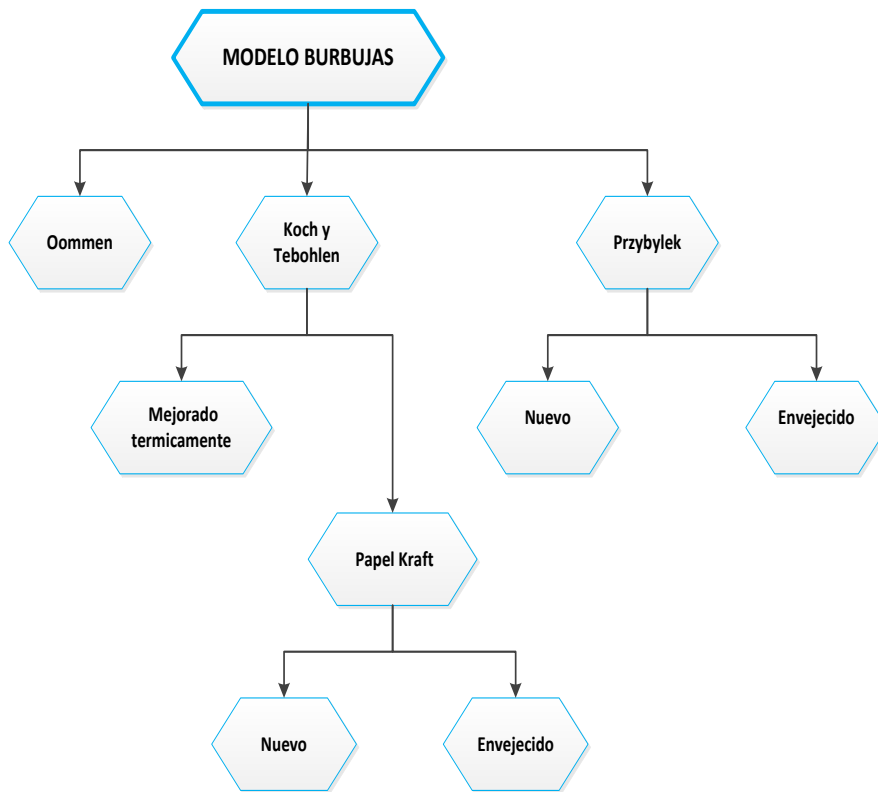


Figura 5. 15. Diagrama de flujo del módulo de modelo de burbujas

La diferencia entre elegir uno u otro modelo está en los parámetros escogida para el análisis. Pero en todos los casos depende de la humedad que se encuentra el papel aislante del transformador. Una vez ejecutado el modelo seleccionado, el sistema nos da una temperatura límite llamado “Temperatura de formación de burbujas”, a partir de la cual la aparición de burbujas es posible.

A continuación, el último paso antes de obtener los resultados es el análisis de formación de burbujas con el sub-programa “Evaluación de burbujas”. Para ello, además de cumplir la condición anterior, tenemos que probar si el gradiente de formación de burbujas ha superado o no a los 3K/s; esto es la diferencia de temperatura entre dos instantes de tiempos seguidos durante todo el intervalo de sobrecarga.

Este programa genera al finalizar su simulación una salida el cual indica el estado de transformador: si se ha formado burbujas, si se ha superado la temperatura de formación de burbujas ó simplemente un aviso de que nuestro transformador está en buenas condiciones. Además de ello, se apoya de una gráfica en el cual se observa el momento de formación de burbujas y su duración. Ambos salidas se visualizan en las figuras 16 y 17:

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.

??? Warning: Struct field assignment overwrites a value with class "char".
See MATLAB 7.0.4 Release Notes, Assigning Nonstructure Variables As Structures Displays Warning for details.
> In carga\_datos at 129
In PRINCIPAL at 16
suposicion cierta error medio 1.999860 por ciento
Se han formado burbujas desde segundo 86434.000000 hasta segundo 86520.000000, durante 87.000000 segundos

Escritura de ensayo de punto caliente finalizada
Escritura de resultado del ensayo burbujas finalizada
fx >>
    
```

Figura 5.16A. Salida del programa Matlab 1.

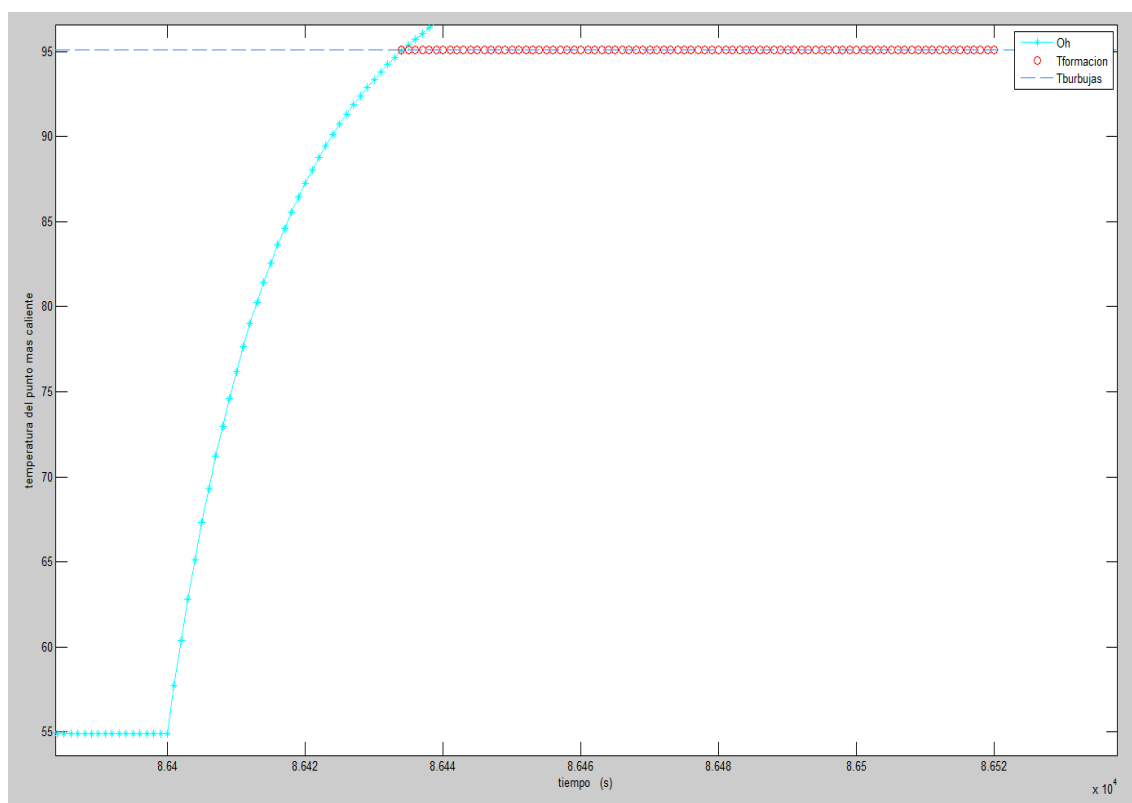


Figura 5.16B. Salida del programa Matlab 2.

Salidas del programa

Como hemos dicho al principio del capítulo que nos apoyaremos del libro Excel tanto para entrada de datos como salida de resultados. A continuación, vamos a explicar cada una de los resultados guardados en la última hoja del libro Excel llamado “Resultados”:

-Temperatura de punto caliente: es la máxima temperatura que se alcanza los arrollamientos en condiciones de sobrecargas. Este valor los empleares tanto para la pérdida de vida, en caso de sobrecarga de larga duración, como para determinar la formación de burbujas en caso de haber seleccionado sobrecarga de corta duración como objeto del análisis. Cabe destacar que, en ningún caso este valor puede superar a lo establecido en la tabla 4 de la norma IEC 60076-7.

-Temperatura de la capa superior del aceite: es el valor a partir de la cual se obtiene la temperatura del punto caliente. Además, es necesaria su determinación para comprobar que no sobrepasa a los límites fijados en la tabla 4 de la norma IEC-60076-7.

-Gradiente temperatura: es la diferencia de temperatura del punto caliente entre dos momentos consecutivos del arrollamiento del transformador (como el paso de integración es cada segundo, se trata de la variación de temperatura de segundos consecutivos). Se calcula a partir del

momento en el cual la temperatura del punto caliente supera a la temperatura de formación de burbujas. El valor es crítico cuando supera los 3K/min.

-Pérdida de vida: Se obtiene a partir de las dos temperaturas anteriores e indica la pérdida de vida en horas sufrido por el transformador en condición de a normaría explicada anteriormente.

-Formación de burbujas: Se obtiene a partir de las dos temperaturas anteriores e indica la formación de burbujas en caso que el transformador supera la temperatura límite de formación de burbujas y gradiente de incremento de temperatura superior a los 3 K/min al mismo tiempo. Muestra en la hoja de “Resultados”, en caso de aparición de burbujas, el momento de empiezo y la duración de la misma. De esta manera, nos permite saber el riesgo que se supone de some-ter nuestro transformador a determinadas condiciones.

A continuación visualizaremos las salidas mencionados en la hoja “Resultado” del libro Excel:

Tiempo	Temperatura de la capa superior del aceite	Temperatura del punto más caliente	Temperatura ambiente
86400	33,04158501	35,5467425	25
86401	33,60016751	39,1134327	25
86402	34,15130225	42,43982064	25
86403	34,69508852	45,54287794	25
86404	35,2316243	48,43836655	25
86405	35,76100628	51,14092508	25
86406	36,28332983	53,66414906	25
86407	36,79868907	56,02066536	25
86408	37,30717684	58,22220136	25
86409	37,80888479	60,27964919	25
86410	38,30390329	62,20312534	25
86411	38,79232155	64,00202602	25
86412	39,27422756	65,68507862	25
86413	39,74970816	67,26038939	25
86414	40,21884902	68,73548783	25
86415	40,68173466	70,11736783	25
86416	41,1384485	71,41252591	25
86417	41,58907282	72,62699671	25
86418	42,03368882	73,76638595	25
86419	42,4723766	74,83590105	25
86420	42,90521521	75,84037954	25
86421	43,33228264	76,78431547	25
86422	43,75365584	77,67188388	25
86423	44,16941073	78,50696362	25
86424	44,57962222	79,29315841	25
86425	44,98436422	80,03381653	25
86426	45,38370967	80,73204899	25
86427	45,7777305	81,39074648	25
86428	46,16649773	82,01259508	25
86429	46,55008139	82,60009085	25
86430	46,92855061	83,15555335	25
86431	47,30197357	83,68113826	25

Figura 5.17. Temperaturas significativas del transformador 1.

En esta primera figura de la hoja del resultado observamos una lista de las temperaturas signifi-cativas en el transformador. Las temperaturas mostradas son justo las temperaturas que se experimentaron en el momento cuando se inició la sobrecarga. Hay tantas temperaturas dife-rentes como tiempo definido para la simulación. En figura 5.18 se visualiza los mismos resulta-dos pero a través de una gráfica, esto nos permite una visión más clara de los acontecimientos producidos por la sobrecarga dada.

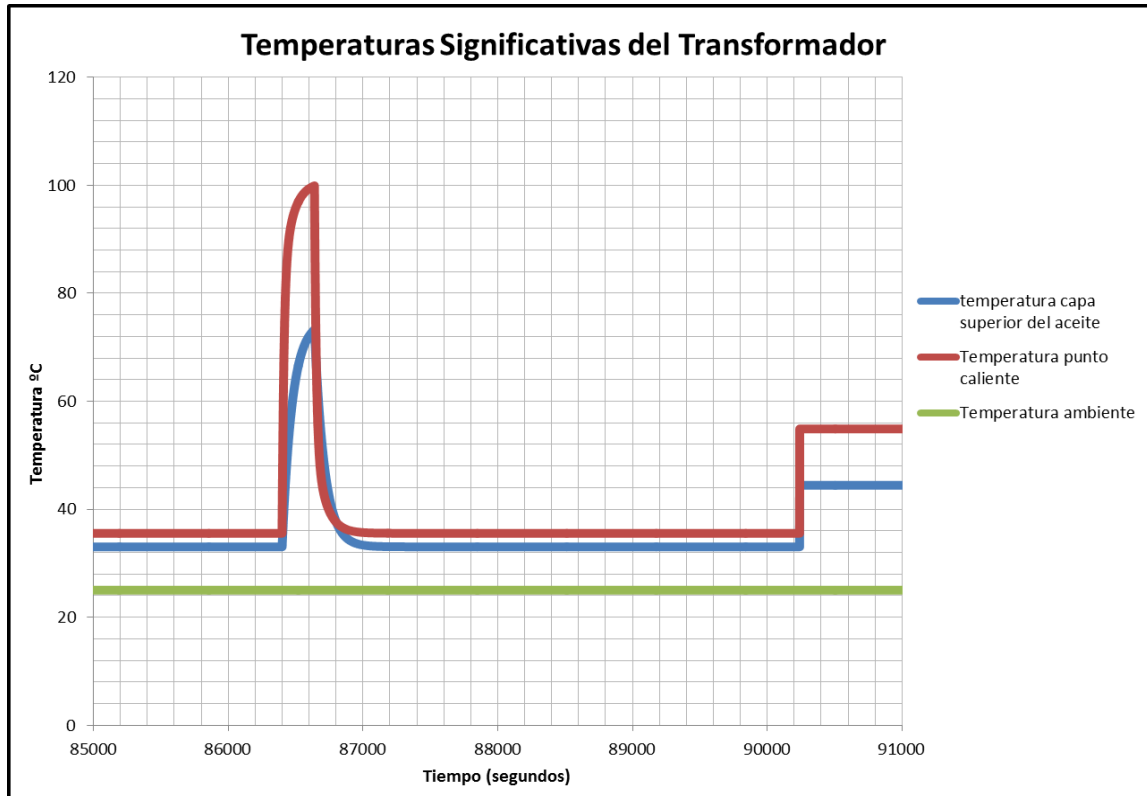


Figura 5.18. Temperaturas significativas del transformador 2.

Por el otro lado, en la figura 5.19 se contempla una celda del Excel que muestra la vida de pérdida experimentada en caso de haber realizado simulación de sobrecargas de larga duración. Como en el presente proyecto sólo se analiza los efectos de la sobrecarga de corta duración, la celda de la pérdida de vida se muestra vacía.

PÉRDIDA DE VIDA

Figura 5.19. Pérdida de vida del aislamiento celulítico

Por último, en la figura 20, observamos el resultado de la formación de burbujas. La primera columna muestra la salida del número de ensayo, ya que podemos usar la herramienta para hacer ensayos diferentes al mismo tiempo (Se pueden ejecutar 10 ensayos al mismo momento). En la segunda columna de la figura, observamos el momento de la primera aparición de burbujas en segundos (El paso de iteración es por segundos). A continuación vemos que se muestra también la temperatura del inicio de formación de burbujas y por último, nos presenta la duración del dicho efecto bajo las condiciones definidos.

ENSAYO	MOMENTO FORMACION	T_BURBUJAS	TIEMPO DE FORMACION DE BURBUJAS(s)
1	86491	95,11095301	30

Figura 5.20. Información de la formación de burbujas

CAPITULO 6

RESULTADOS

6.1 INTRODUCCIÓN

La norma UNE-IEC 60076-7 indica algunos de los factores que influyen en el hecho de que una sobrecarga determinada de corta duración sea admisible o no (por ejemplo, la temperatura de funcionamiento antes del aumento de la carga, o el contenido en humedad del aislamiento sólido). Sin embargo, se echa de menos un estudio cuantitativo de estos factores, así como el analizar la influencia de otros factores como pueden ser el grado de carga inicial, la amplitud del escalón de carga, la velocidad de variación de la carga, etc.

Por ello, en el presente capítulo se aplicará el programa desarrollado al análisis de casos para tener una visión más completa del problema de cuándo una sobrecarga es admisible y cuándo no lo es.

6.2 CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR A ANALIZAR

El transformador utilizado para el estudio ha sido el que se toma como ejemplo en el Anexo D de la norma UNE-IEC 60076-7[1], cuyas principales características se muestran en la tabla 6.1.

Potencia	25 MVA
Tensiones	66/15,75 kV
Grupo de Conexión	YNd11
Tipo de refrigeración	ONAF
Calentamiento de la capa superior del aceite a carga nominal	38,3 K
Calentamiento del punto caliente respecto del aceite a carga nominal	20,3 K
Constante de tiempo del aceite	150 min
Constante de tiempo del arrollamiento	7 min
Constante del modelo térmico k_{11}	0,5
Constante del modelo térmico k_{21}	2
Constante del modelo térmico k_{22}	2
Pérdidas en el cobre a 75 °C (incluidas adicionales)	126 kW
Pérdidas en el hierro	15 kW
Exponente del aceite x	0,8
Exponente de los arrollamientos	1,3

Tabla 6.1: Características del transformador en estudio [1]

En realidad el anexo D de la norma no da el calentamiento del punto caliente respecto del aceite a carga nominal, sino que da los valores de H y gr (1,4 y 14,5 respectivamente).

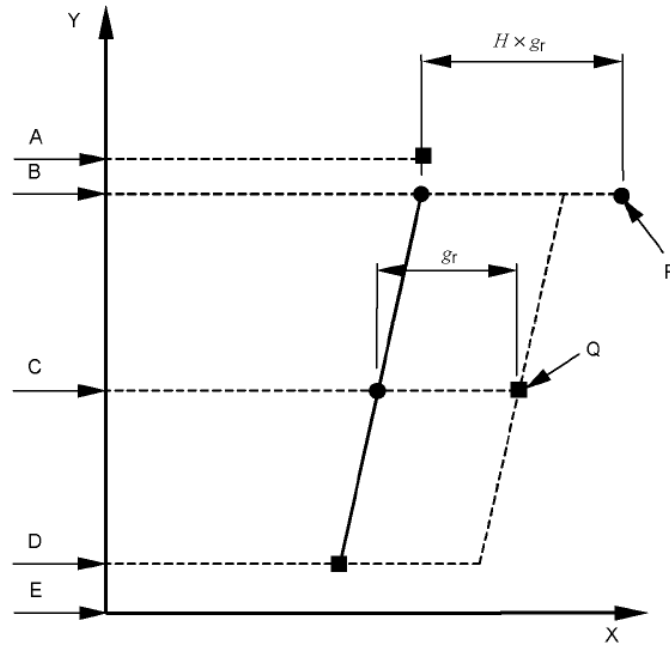


Figura 6.1: Calentamiento del punto más caliente del arrollamiento sobre la capa superior del aceite [1].

Según se muestra en la figura 6.1, el calentamiento del punto más caliente del arrollamiento sobre la temperatura de la capa superior del aceite será

$$\Delta\theta_{hr} = H \cdot g_r = 1,4 \cdot 14,5 = 20,3 \text{ k} \quad (\text{Ecuación 6.1})$$

Las sobrecargas analizadas en este capítulo son pulsos de carga de 30 minutos de duración partiendo de una carga k_1 para llegar a una carga k_2 y retornar de nuevo a la carga k_1 (figura 6.2). Para garantizar que se parte del transformador en régimen permanente se ha simulado un tiempo de 1440 minutos (24 horas) con un grado de carga k_1 antes de que se produzca el pulso de carga.

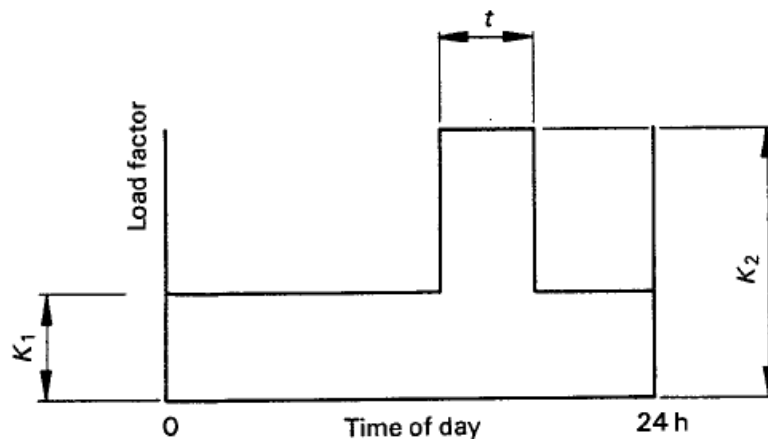


Figura 6.2: Escalón de carga considerado para los análisis de la capacidad de soportar sobrecargas de corta duración [1].

La temperatura ambiente durante la sobrecarga se ha considerado constante e igual a 25 °C, ya que al ser la duración de la sobrecarga reducida (a lo sumo media hora, según la normativa) se ha considerado que la temperatura ambiente no varía en un tiempo tan breve.

Los criterios utilizados para considerar si una sobrecarga es admisible son:

- A. No se sobrepasa el grado de carga máximo indicado en la tabla 3.1. para este tipo de sobrecargas, en el caso de transformadores de media potencia 1,8 p.u.
- B. No se sobrepasa la temperatura máxima en la capa superior del aceite de la tabla 3.1, para transformadores de media potencia 115 °C.
- C. No se sobrepasa la temperatura máxima de punto caliente del arrollamiento de la tabla 3.1, para transformadores de media potencia 160 °C.
- D. No se forman burbujas de vapor de agua. Para estimar si se forman burbujas de vapor de agua se han utilizado los tres modelos programados en este Trabajo Fin de Grado (modelo de Oommen, modelo de Koch y Tenbohlen y modelo de Przybylek) además del límite de temperatura indicado por la propia norma UNE-IEC (punto C anterior)

6.3 INFLUENCIA DE LAS PRINCIPALES VARIABLES EN LAS TEMPERATURAS SIGNIFICATIVAS

Inicialmente comprobaremos el cumplimiento de las condiciones B y C anteriores. Para ello tomaremos pulsos de carga de media hora de duración, en los que la carga inicial es el 60% de la nominal y se van variando las principales variables de interés para comprobar cuál es la máxima sobrecarga admisible sin que se sobrepasen las temperaturas indicadas en la normativa.

6.3.1 INFLUENCIA DEL GRADO DE CARGA INICIAL Y DEL VALOR DE LA SOBRECARGA

En la figura 6.3 se muestra la evolución de las temperaturas significativas en función del tiempo para un grado de sobrecarga de 1,8 p.u. y en la tabla 6.II se muestran las temperaturas significativas en función del grado sobrecarga. Para el caso en estudio tanto la temperatura del punto más caliente como la temperatura de la capa superior del aceite superan los valores admisibles (color rosa en la tabla 6.II).

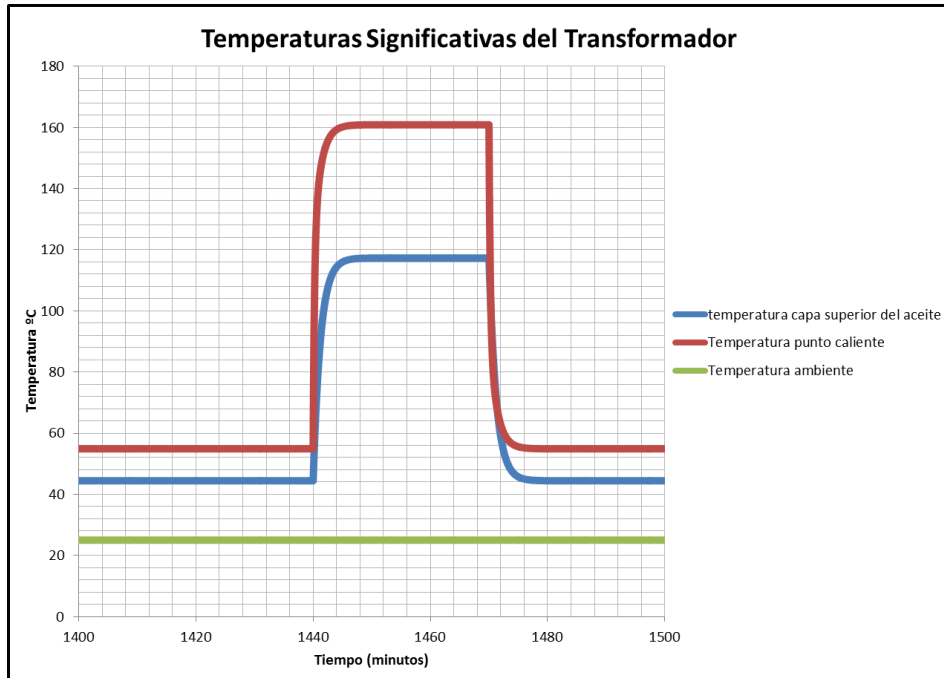


Figura 6.3. Evolución de las temperaturas significativas del transformador para el caso de un escalón de 30 minutos entre el grado de carga 60% y el grado de carga 180%

Temperatura ambiente (°C)	Grado de carga inicial (%)	Grado de sobrecarga (%)	Máxima temperatura de la capa superior del aceite (°C)	Máxima temperatura del punto más caliente (°C)
25	60%	180%	117,3	160,9
25	30%	180%	117,3	160,9
25	30%	178%	115,7	158,7
25	30%	177%	114,9	157,6
22,7	30%	180%	115,0	158,6
20	30%	180%	112,3	155,9

Tabla 6.2 Temperaturas significativas en función de la temperatura ambiente, del grado de carga inicial y del grado de sobrecarga.

Variando el grado de carga inicial no se modifican las temperaturas finales alcanzadas, de modo que la sobrecarga 1,8 p.u. tampoco es admisible si el grado de carga inicial se reduce al 30%.

Como se puede ver en la tabla 6.2 manteniendo constante la temperatura ambiente en 25 °C la máxima sobrecarga admisible es de 1,77 p.u. Vemos que la temperatura más restrictiva es la temperatura de la capa superior del aceite, porque es la primera que alcanza el límite establecido por la normativa.

También se desprende de la tabla 6.2 que las variaciones de temperatura ambiente tienen una traducción directa en la variación de las temperaturas significativas, por lo que una sobrecarga de 1,8 p.u. no es admisible si la temperatura ambiente es 25 °C pero sí que es admisible si la temperatura ambiente es de 22,7 °C.

6.3.2 INFLUENCIA DE LA DURACIÓN DE LA SOBRECARGA

En el apartado anterior se ha visto que cuando la sobrecarga es prolongada (por ejemplo 30 minutos), el grado de carga inicial no tiene influencia alguna, sin embargo en este apartado se verá que para sobrecargas de muy corta duración (menores a 5 minutos) el grado de carga inicial sí que tiene influencia en las temperaturas significativas.

Nótese que este tiempo (5 minutos) es bastante inferior a la constante de tiempo de los arrollamientos (en el caso en estudio 7 minutos). Es sabido que en un sistema de primer orden el régimen permanente se establece al cabo de 3 constantes de tiempo (21 minutos, en el caso ejemplo), sin embargo el modelo de la norma IEC 60076-7 no corresponde a un sistema de primer orden y el régimen permanente se alcanza mucho antes. Como ejemplo, en la figura 6.4 se muestra la evolución de las temperaturas cuando la carga inicial es 0,2 p.u. y la duración de la sobrecarga 4 min.

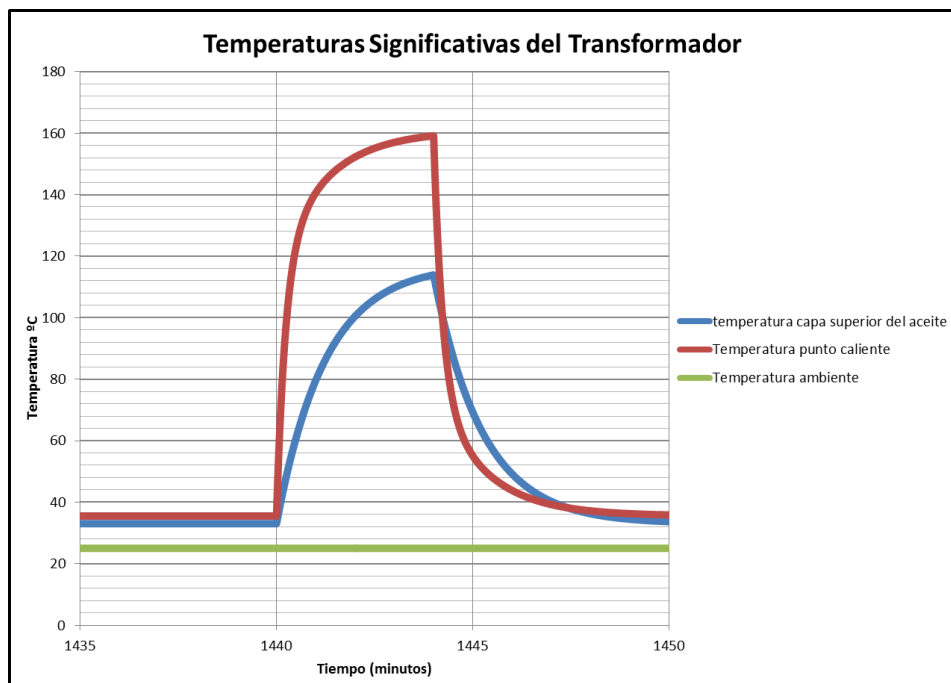


Figura 6.4. Evolución de las temperaturas significativas para el caso de una sobrecarga de 1,8 p.u y 4 minutos de duración partiendo de una carga base de 0,2 p.u.

En la tabla 6.3 se muestran la temperatura de la capa superior del aceite y la temperatura máxima del punto caliente para el caso de una sobrecarga de 1,8 p.u. y 4 minutos de duración con diferentes valores del grado de carga inicial. Como se puede ver la diferencia de temperaturas entre los diferentes casos analizados no llega a 1,5 °C, con lo que se puede considerar que para una duración concreta de la sobrecarga el grado de carga inicial tiene una influencia muy reducida.

Temperatura ambiente (°C)	Grdo de carga inicial (%)	Grado de sobrecarga (%)	Máxima temperatura de la capa superior del aceite (°C)	Máxima temperatura del punto más caliente (°C)
25	20%	180%	113,9	159,1
25	40%	180%	114,1	159,2
25	60%	180%	114,4	159,3
25	80%	180%	114,7	159,4
25	100%	180%	115,1	159,6

Tabla 6.3 Temperaturas significativas en función de la temperatura ambiente, del grado de carga inicial y del grado de sobrecarga.

Si la comparación se hace partiendo de un grado de carga inicial dado y variando el tiempo de duración de la sobrecarga la influencia es algo mayor. En la figura 6.5 se muestra la evolución de la temperatura de la capa superior del aceite y la del punto más caliente para diferentes sobrecargas entre 2 y 7 minutos de duración.

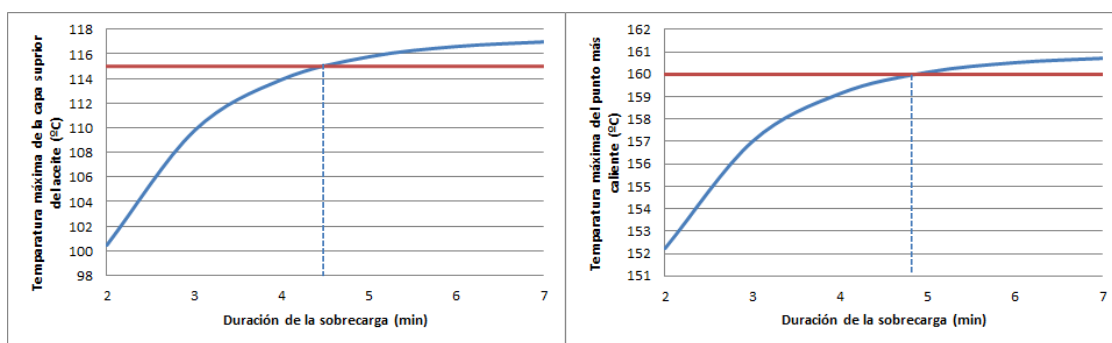


Figura 6.5. Evolución de las temperaturas de la capa superior del aceite (izquierda) y del punto más caliente (derecha) en función de la duración de la sobrecarga (grado de carga previo 0,2 p.u., valor de la sobrecarga de 1,8 p.u.)

De la figura 6.5 se desprende que una sobrecarga de 1,8 p.u. se puede mantener a lo sumo durante casi 5 minutos, pues para tiempos más prolongados se sobrepasa la temperatura máxima de la capa más caliente que indica la normativa (línea roja de la figura 6.5).

6.3.3 INFLUENCIA DE K11, K12 y K22

El modelo térmico de la norma IEC 60076-7 utiliza 3 constantes: k11, k12 y k22. Estas son constantes específicas del transformador, que varía según las condiciones de refrigeraciones interiores. Para conocer el valor de estas constantes habría que realizar un ensayo de calentamiento del transformador con una sonda de temperatura de fibra óptica ubicada en el punto más caliente. Sin embargo, no es frecuente disponer sondas de fibra óptica en un transformador por el mayor coste que supone. Además, en el caso de que se disponga de una sonda de fibra óptica en realidad ya no hace falta un modelo de calentamiento, pues la temperatura del punto más caliente puede ser medida, con lo que trabajaríamos con un valor mucho más preciso que el que se podría estimar con el modelo. A falta de los valores concretos que corresponden a nuestro

transformador, la norma da unos valores típicos de dichas constantes. El objetivo de este apartado es comprobar si se obtiene mucho error por el hecho de tomar un valor típico de K11, k12 y k22 o si el error es reducido y no merece la pena el realizar los ensayos de calentamientos mencionados.

Según la norma 60076-7, la constante k11 influye en la ecuación 6.1, el cual describe el incremento relativo del calentamiento del aceite superior. Las otras dos, k12 y k22 son valores que afecta a la ecuación 6.2, que proporcionan el gradiente de temperatura entre el punto caliente y el aceite superior durante los regímenes transitorios.

$$F_1(t) = (1 - e^{(-t)/(k11 \cdot \tau_0)}) \quad (\text{Ecuación 6.1})$$

$$F_2(t) = k12 * (1 - e^{(-t)/(k22 \cdot \tau_w)}) - (k12 - 1) * (1 - e^{(-t)/(\tau_0/k22)}) \quad (\text{Ecuación 6.2})$$

Partiremos el estudio para el transformador considerado en el apartado de 1 de este capítulo, cuyas características (refrigeración típica ONAF) podemos observar en la tabla 6.1 (K11=0,5, K12=2 y K22=2). El procedimiento que vamos a seguir será jugar con las combinaciones de estos tres parámetros, y analizar la influencia de cada uno por separado. Con este fin se analizarán los 6 casos mostrados en la figura 6.5.

CASO	k11	k12	k22
Base	0,5	2	2
1	0,4	2	2
2	0,6	2	2
3	0,5	1,8	2
4	0,5	2,2	2
5	0,5	2	1,8
6	0,5	2	2,2

Tabla 6.5 Combinación de las constantes de los modelos térmicos

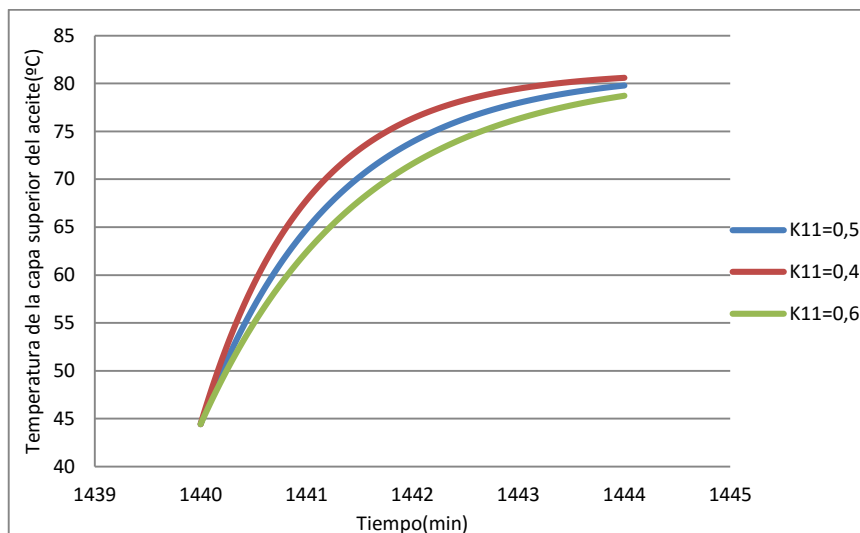


Figura 6.8 Influencia de la constante del modelo térmico k11 en cuando a la temperatura de la capa superior del aceite.

En la figura 6.8. Se muestra la influencia de k_{11} en la temperatura de la capa superior del aceite. Vemos que, cuando menor es el constante del modelo térmico, mayor influencia tiene en cuanto al calentamiento del aceite de la capa superior del transformador en las condiciones de anormales de sobrecargas. Observamos que las temperaturas finales casi no dependen del valor de k_{11} elegido (diferencias cercanas a $3\text{ }^{\circ}\text{C}$), pero durante los regímenes transitorios se pueden alcanzar diferencias de hasta $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Si tenemos en cuenta que por cada $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ de incremento de temperatura la vida se reduce a la mitad, un error de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ es un error importante, sin embargo, los regímenes transitorios tienen una duración reducida, por lo que su influencia en el envejecimiento no es excesiva. En cualquier caso, para obtener K_{11} no es preciso instalar fondas de fibra óptica en el punto más caliente, con lo que el valor de esta constante es el más sencillo de obtener.

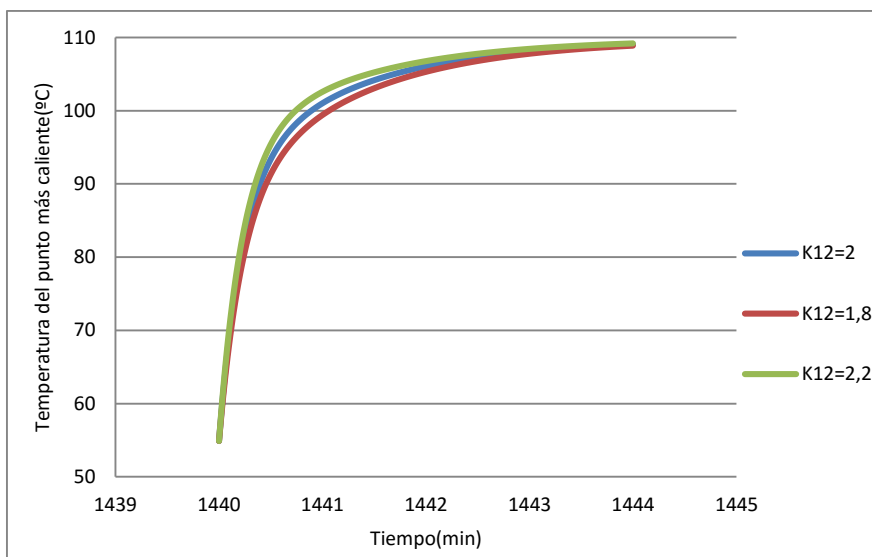


Figura 6.9 Influencia de la constante del modelo térmico k_{12} en cuando a la temperatura del punto más caliente.

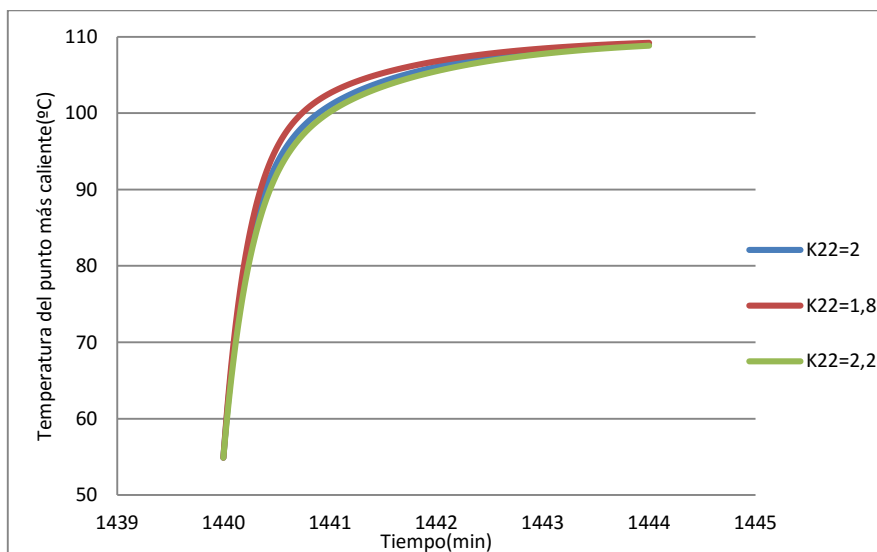


Figura 6.10 Influencia de la constante del modelo térmico k_{22} en cuando a la temperatura del punto más caliente.

En las figuras 6.9 y 6.10. Vemos que la temperatura calculada es mayor cuanto mayor es el valor de la constante K_{12} . Por lo que se refiere a K_{22} , vemos que la temperatura calculada es menor cuanto mayor es el K_{22} . En cualquier caso las variaciones en la temperatura calculada son muy reducidas, de lo cual se desprende que no es preciso trabajar con un valor de k_{12} y de k_{22} muy próximo a la realidad y es suficiente con trabajar con valores típicos.

6.4 FORMACIÓN DE BURBUJAS DURANTE LA SOBRECARGA

Como se indicó en el capítulo 4 para que se formen burbujas se precisan dos cosas:

- Que la velocidad de crecimiento de la temperatura sobrepase 3K/min
- Que la temperatura del punto más caliente sobrepase la temperatura necesaria para que se formen burbujas.

Es importante hacer notar que los dos aspectos mencionados son independientes entre sí, esto es:

- La velocidad de crecimiento de la temperatura no depende de cuál es la temperatura límite a partir de la cual se forman burbujas. Para verificar este aspecto no hay más que tener en cuenta que el modelo térmico mostrado en la figura 6.1 no incluye la temperatura de formación de burbujas en ninguna de sus ecuaciones.
- La temperatura de formación de burbujas no depende de la tasa de crecimiento de la temperatura. Para verificar esto no hay más que comprobar que en las ecuaciones 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7 no aparecen la tasa de crecimiento de la temperatura.

En los apartados siguientes se analizan estos dos aspectos, el hecho de que los dos aspectos sean independientes permite estudiarlos por separado sin tener que estudiar una combinación de ambos factores.

6.4.1 VELOCIDAD DE CRECIMIENTO DE LA TEMPERATURA

La velocidad de crecimiento de la temperatura depende del grado de carga inicial y del grado de sobrecarga y de la constante de tiempo del arrollamiento. Se estudiarán únicamente los dos primeros factores.

Para poder calcular la tasa de crecimiento de la temperatura con mayor precisión el paso de integración del programa se redujo a 1 segundo, de modo que las ecuaciones son integradas cada minuto en el caso de sobrecargas de larga duración y cada segundo en el caso de sobrecargas de corta duración.

6.4.1.1. INFLUENCIA DEL GRADO DE CARGA INICIAL

De la misma manera que los apartados anteriores, ahora vamos a analizar la influencia del grado de carga inicial y del grado de sobrecarga en cuanto a la tasa de crecimiento de la temperatura del punto más caliente.

Como se ha mostrado en el apartado anterior la tasa de variación de la temperatura del punto más caliente del arrollamiento sólo es elevada en los primeros instantes de la sobrecarga. Por ello para analizar si se forman burbujas es suficiente con analizar sobrecargas de una duración de muy pocos minutos. En nuestro caso se han considerado sobrecargas de 10 minutos de duración. Caso de que en los 10 primeros minutos no se formen burbujas tampoco se formarán en los instantes de tiempo posteriores, pues la tasa de variación de la temperatura del punto más caliente es inferior.

En la figura 6.6 se muestra la tasa de crecimiento de la temperatura del punto más caliente en función del tiempo variando la carga inicial desde un valor del 20% hasta un valor del 100% tomando una sobrecarga constante de valor 1,2 p.u. La sobrecarga comienza en el instante $t=180$ minutos y finaliza en el instante $t=190$ minutos. En la figura se observan dos zonas: una con un gradiente de temperaturas positivo, que corresponde a la aplicación de la sobrecarga, y otra con un gradiente de temperaturas negativo, que corresponde a la retirada de la sobrecarga de corta duración, el gradiente objeto de interés es el primero de ellos.

En el programa desarrollado el gradiente solamente se calcula a partir del instante de tiempo en el que la temperatura del punto más caliente supera la temperatura de formación de burbujas. Para elaborar la figura 6 la temperatura de formación de burbujas se ha introducido por teclado (esto es, no se ha obtenido a partir de ningún modelo) y su valor se ha tomado igual a 77 °C. Debido a ello, cuando el grado de carga inicial es reducido (el 20%, el 40% o el 60%) la tasa de crecimiento no se calcula hasta los minutos 186,9, 184,9 y 181,4). Por el contrario, para grados de carga iniciales elevados (80% o 100%) la tasa de crecimiento se calcula a partir del minuto 180 porque la temperatura inicial del aceite es superior a los 77 °C.

Como se puede ver en la figura 6.6 cuando la diferencia entre el grado de carga previo y el valor de la sobrecarga es reducido (grados de carga iniciales del 80% y del 100%) el gradiente es inferior a 3 °C/min, con lo que no se forman burbujas. Por el contrario cuando el grado de carga inicial difiere mucho del valor de la sobrecarga (casos 20%, 40% y 60%) el gradiente supera los 3 °C/min y sí que se pueden formar burbujas si es que la temperatura del transformador supera a la de formación de burbujas (aquí se metió 77°C sólo con el fin de que el programa pudiera calcular los gradientes, pues si se permite al programa calcular la temperatura de formación de burbujas obtenida de los modelos en un gran número de ocasiones esa temperatura es tan alta que el programa no llega a calcular el gradiente y no hubiéramos podido discutir la influencia de la temperatura inicial en el gradiente de temperatura).

El tiempo durante el cual se mantiene una tasa elevada de crecimiento de la temperatura es muy semejante para los casos de grado de carga inicial 20%, 40% y 60%: en torno a 2,2 minutos.

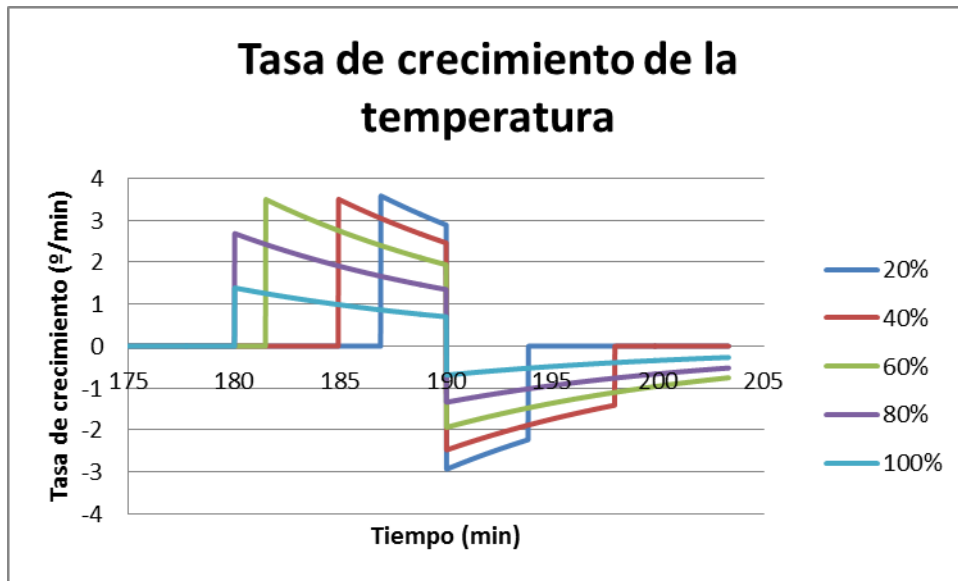


Figura 6.6 Tasa de crecimiento de la temperatura del punto caliente en función del tiempo y del grado de carga previo a la sobrecarga (entre el 20% y el 100%) con un valor constante de la sobrecarga igual a 1,2 p.u.

6.4.1.2 INFLUENCIA DEL VALOR DE LA SOBRECARGA

En la figura 6.7. Se muestra la tasa de crecimiento de la temperatura del punto más caliente en función del valor de la sobrecarga manteniendo el grado de carga inicial en un 0,6 p.u. La sobrecarga se ha variado desde 1.2 p.u a 1.8 p.u. Como antes se observa una primera parte con gradientes positivos, que corresponde a los instantes de tiempo posteriores al inicio de la sobrecarga, y una segunda parte con gradientes negativos, que corresponden a los instantes de tiempo posteriores a la retirada de la sobrecarga.

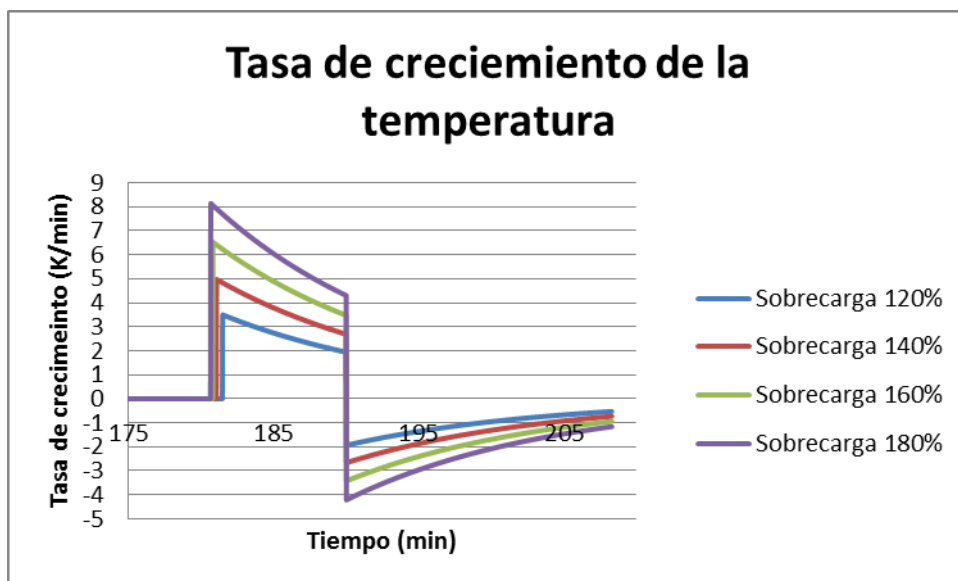


Figura 6.7 Tasa de crecimiento de la temperatura del punto caliente en función del tiempo y del grado de sobrecarga (entre el 120% y el 180%) con un valor constante de carga inicial igual a 0,6 p.u.

En la figura 6.7 observamos que para todas las sobrecargas analizadas, se superan los 3K/min durante un cierto tiempo, que será mayor cuanto mayor es el grado de sobrecarga. Por tanto, en todos estos casos sí que se formarían burbujas si la temperatura del punto más caliente del transformador supera la temperatura de formación de burbujas (que para este análisis se ha tomado 77 °C sin calcularlo a través de ninguno de los modelos presentados).

6.4.2 TEMPERATURA DE FORMACIÓN DE BURBUJAS

En este apartado obtendremos la temperatura de formación de burbujas utilizando cada uno de los modelos implementados: El modelo de Oommen, el de Koch-Tenbohlen y el modelo de Przybylek. Analizaremos también la influencia de los distintos parámetros como la humedad, la presión, la concentración de gas y el estado del papel, en su caso. En este sentido, la tabla 6.3 muestra las variables que intervienen en cada uno de los modelos mencionados.

Modelo	Humedad	Presión	Gas	Tipo Pa-pel	Estado Pa-pel
Oommen	SI	SI	SI		
Koch	SI			SI	
Przybylek	SI	SI			SI

Tabla 6.3 variables que intervienen en cada uno de los modelos de cálculo de la temperatura de formación de burbujas

6.4.2.1 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA HUMEDAD

Para analizar la influencia de la humedad se ha tomado unas condiciones base en las cuales el contenido de gas en el aceite es del 30% de la saturación, la presión se ha tomado 767 Torr, y el tipo de papel kraft con aceite nuevo. Vamos a estudiar para 6 humedades diferentes: 1%, 2%, 3%, 4% ,5% y 6%, estas humedades se refieren a la humedad del punto más caliente del transformador. Los resultados se muestran en la tabla 6.4. Esos mismos resultados se muestran de forma gráfica en la figura 6.4, lo que ayuda a la mejor comprensión del caso analizado.

Concentración de gas (%)	Humedad (%)	Modelo de Oommen	Modelo de Koch-tenbohlen	Modelo de Przybylek
		Temperatura de formación(°C)	Temperatura de formación(°C)	Temperatura de formación(°C)
30%	1%	167,2	174,8	182,2
30%	2%	139,9	156,3	144
30%	3%	124,3	139,7	124,5
30%	4%	112,4	124,9	111,7

30%	5%	101,4	111,7	102,4
30%	6%	89,5	99,9	95,1

Tabla 6.2: Temperatura de formación de burbujas en función del modelo. Papel kraft con aceite nuevo

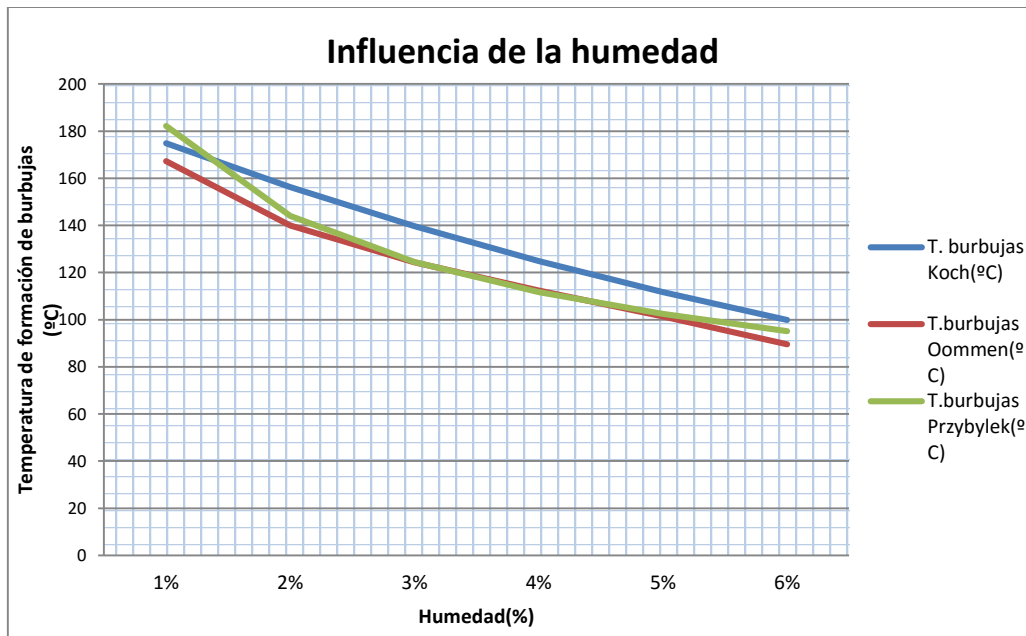


Figura 6.4. Evolución de la temperatura de formación de burbujas con el incremento de la humedad en el transformador

En la figura 6.4 vemos que en todos los casos, la temperatura de formación disminuye con el aumento del contenido de humedad en el transformador pudiendo en casos extremos (contenido en humedad entre el 5% y el 6%) alcanzar valores inferiores a la temperatura del punto caliente en condiciones nominales (según la norma UNE-EN 60076-2 el calentamiento admisible en el punto caliente es de 78 °C sobre un ambiente de 30 °C, esto es 108 °C). Afortunadamente esos contenidos en humedad tan elevados es difícil que se den, pues en todos los casos estamos hablando de contenidos de humedad en el punto más caliente, que es también el más seco.

Sin embargo, el valor de temperatura de formación de burbujas varía dependiendo el modelo usado: el modelo de Koch y Tenbohlen es el que arroja mayores temperaturas de formación y por lo tanto es el caso que muestra la menor posibilidad de aparición de burbujas dentro del transformador. Los modelos de Oommen y de Przybylek predicen valores similares entre el rango de 2%-5% de contenido de humedad aunque bastante alejados de los del modelo de Tenbohlen. Excepto en el caso de transformadores muy secos (1% de humedad) o muy húmedos (6% de humedad) la diferencia entre las temperaturas de formación de burbujas que predicen los modelos de Oommen y de Przybylek es inferior a 5°C. Sin embargo las diferencias entre los dos modelos anteriores y el modelo de Koch y Tenbohlen rondan los 15 °C. Esta diferencia es a todas luces excesiva, y puede deberse a los diferentes procedimientos de formación de burbujas de ambos autores, en un caso basándose en la utilización de cámaras de vídeo y en el otro basándose en detectores de descargas parciales.

Según el Anexo I del Sdt. IEEE C57-91.1995, se puede considerar que la humedad en el punto más caliente es la mitad de la humedad global del transformador. Un transformador recién salido de fábrica tiene una humedad inferior al 0,5%, un transformador. El Std. IEEE 62-1995 clasifica los transformadores en secos, cuando la humedad del papel es inferior al 2% (lo que supone una humedad en el punto caliente inferior al 1%), húmedos, cuando la humedad del papel está comprendida entre el 2% y el 4% (lo que supone una humedad en el punto caliente comprendida entre el 1% y el 2%), y muy húmedos, cuando la humedad del punto caliente es superior al 4,5%.

Para un transformador muy húmedo con un contenido en humedad promedio del 6% (humedad en el punto más caliente del 3%) los modelos más pesimistas (Oommen y Koch y Tenbohlen) predicen temperaturas de formación de burbujas de 124 °C, que es superior a la temperatura de punto caliente correspondiente a la carga cíclica normal (sin pérdida de vida del transformador) definida en la norma UNE-EN 60076-7 (120 °C) pero inferior a las temperaturas de punto caliente admitidas por la norma para carga de emergencia de larga duración (140 °C) y para carga de emergencia de corta duración (160 °C).

Sin embargo, para un transformador bastante húmedo, con un contenido en humedad del 4% (humedad en el punto más caliente del 2%) los modelos más pesimistas (Oommen y Koch y Tenbohlen) predicen temperaturas de formación de burbujas del orden de 140 °C, que aunque sigue siendo inferior a la temperatura correspondiente a carga de emergencia de corta duración, en este caso sí que es inferior o semejante a las temperaturas de punto caliente admitidas por la norma para carga cíclica normal y para carga de emergencia de larga duración y para carga de emergencia de corta duración.

En el caso de transformadores poco húmedos, con un contenido en humedad del 2% (humedad en el punto más caliente del 1%) los tres modelos predicen temperaturas bastante diferentes (182 °C el de Przybylek, 175 °C el de Koch, y 167 °C el de Oommen), pero incluso el modelo más pesimista (el de Oommen) predicen que no se formarían burbujas ni siquiera llegando a la temperatura que la norma admite para sobrecargas de emergencia de corta duración (160 °C). Debido a ello no se ha continuado el estudio para contenidos de humedad inferiores.

6.4.2.2 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE PORCENTAJE DE GASES

En este caso, como las ecuaciones formuladas por Koch y Tebohlen y Przybylek no dependen de la concentración de gases, vamos a centrarnos sólo en el modelo de Oommen. Empezaremos el análisis manteniendo constantes todos los parámetros indicados en el apartado anterior cambiando sólo la concentración de humedad, que pasa a ser un 4% ya que según se indicó en el capítulo 4 concentración de gases sólo es importante cuando tenemos una presencia de humedad alta(>2%).

En la tabla 6.3 se muestra la influencia del aumento del gas disuelto en el aceite del transformador a la temperatura de formación de burbujas.

Gases disueltos	Temp. de formación de burbujas(°C)
0%	119,1
20%	115,6
40%	108,7
60%	99,2
80%	87,7
100%	74,4

Tabla 6.3 Efecto de la concentración de gases disueltos en la temperatura de formación de burbujas

De la tabla anterior llegamos la conclusión de que, según las ecuación formuladas por Oommen, un aumento de gases disueltos repercutirá negativamente en la capacidad del transformador de afrontar sobrecargas de corta duración ya que disminuye de forma importante (unos 45°C de diferencia al pasar de un una concentración de gases del 0% en el aceite al 100%) la temperatura límite a partir del cual empiezan a aparecer las burbujas de vapor.

6.4.2.3 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE PRESIÓN TOTAL

Otro de los parámetros a estudiar es la influencia de presión total en la creación de burbujas.

Este estudio sólo lo vamos a hacer para Oommen y Przybylek ya que la fórmula de Koch y Tenbohlen no dependen de la presión, ya que los experimentos de este autor fueron hechos a presión constante.

La presión total a la altura del punto más caliente depende de la diferencia de alturas entre el depósito conservador y el punto más caliente, de la altura del emplazamiento del transformador sobre el nivel del mar y del tiempo atmosférico (anticiclones y borrascas). La diferencia de presión entre un día normal y un día de anticiclón es de apenas 13 mmHg (1,7%), mientras que la diferencia de presión entre un día de borrasca y otro anticiclónico es típicamente de 19 mmHg (2,5%). La diferencia de presión entre Madrid y Alicante, suponiendo una temperatura uniforme es de 54 mmHg, esto es de un 7%. Tampoco en los transformadores reales las diferencias de altura del depósito conservador entre un transformador y otro son demasiado significativas. Debido a ello el rango de variación de la presión que se ha elegido para el estudio es muy reducido.

En el caso del modelo de Oommen como caso base se ha tomado el caso del anexo A.4 de la norma IEEE Std C57-91-2011, que considera una presión atmosférica en el lugar del emplazamiento de 750 Torr y una altura de la columna de aceite entre el depósito conservador y el punto más caliente de 2,4 m, lo que corresponde a una presión hidrostática de 176 Torr; con ello la presión total en el punto más caliente es de 926 Torr (1 Torricelli es equivalente a 1 mmHg). En el estudio se han utilizado las condiciones del ejemplo A.4 del Std. IEEE: 1,2% de humedad en el punto más caliente, 1% e gas en el aceite.

En el caso del modelo de Przybylek como presión base se ha tomado la del ejemplo del artículo [16] (presión total 767 Torr).

La figura 6.7 muestra la temperatura de formación de burbujas en función del porcentaje de variación de la presión en el punto más caliente según las fórmulas de Oommen. Se observa que al aumentar el valor de la presión total, la temperatura de formación también aumenta al tener que vencer el vapor de agua una mayor oposición para que se forme la burbuja gaseosa. No obstante se aprecia que la diferencia de temperaturas no es muy importante (no llega a ser de 2 °C).

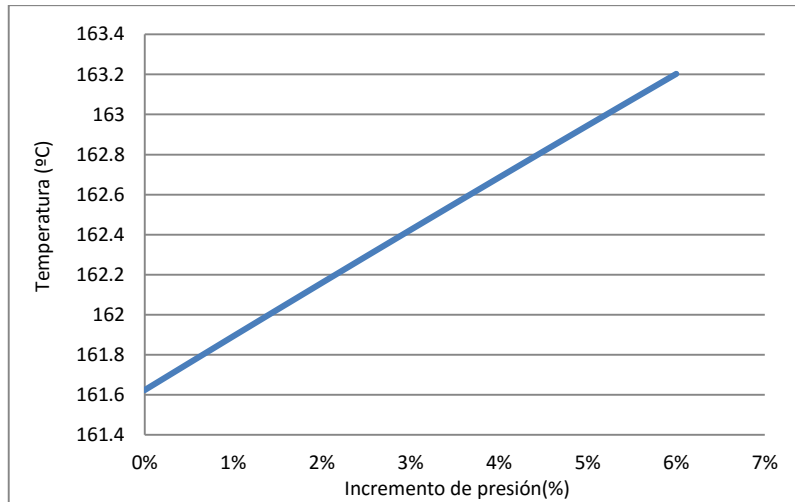


Figura 6.7 Influencia en la temperatura de formación de burbujas con respecto al incremento de la presión según la fórmula de Oommen.

En la figura 6.8 se observa la evolución de la temperatura de formación de burbujas en función de la variación de presión según las fórmulas de Przybylek. Como se puede ver las conclusiones son similares a las que se pueden obtener por aplicación de la fórmula de Oommen, lo cual es lógico ya que la fórmula Przybylek está basada en la de Oommen.

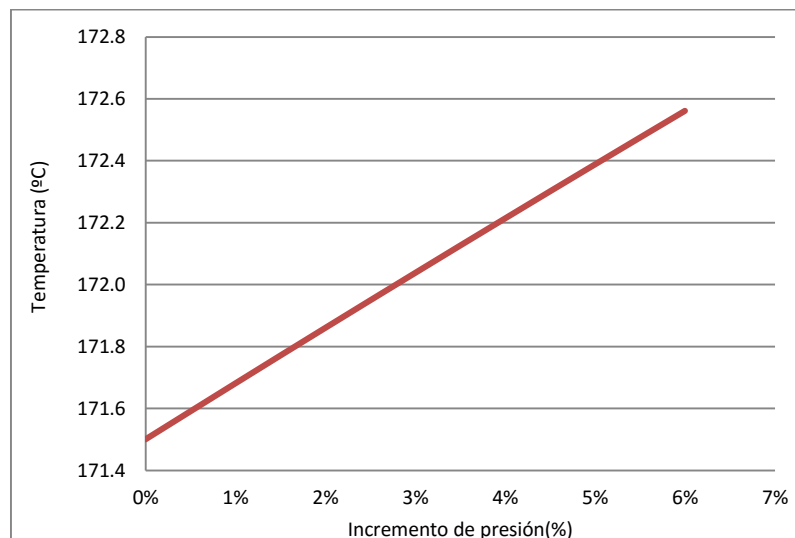


Figura 6.8 Influencia en la temperatura de formación de burbujas con respecto al incremento de la presión según las fórmulas de Pryzbylek.

En la tabla 6.4 se recoge de forma numérica los resultados de las figuras 6.7 y 6.8.

Oommen			Pryzbylek	
Aumento presión	Temp. Burbujas	ΔT	Temp. Burbujas	ΔT
0%	161,6		171,5	
1%	161,9	0,269	171,6	0,181
2%	162,2	0,266	171,9	0,179
3%	162,4	0,264	172,0	0,178
4%	162,7	0,262	172,2	0,176
5%	162,9	0,260	172,4	0,174
6%	163,2	0,258	172,6	0,173

Tabla 6.4 Diferencia entre las fórmulas de Oommen y de Pryzbylek en cuando a la influencia del aumento de presión con respecto al cambio de la temperatura de formación de burbujas.

6.4.2.4 INFLUENCIA DEL TIPO DEL PAPEL

Koch es el único autor Koch que hizo el estudio para papeles térmicamente mejorados y para papel kraft. En concreto Koch utilizó 3 tipos de papeles diferentes: papel térmicamente mejorado, papel kraft envejecido y papel Kraft nuevo. Aplicando la fórmula de Koch con las constantes correspondientes a cada uno de los papeles y considerando una humedad en el punto más caliente del 4% se obtienen los resultados mostrados en la tabla 6.5:

Tipo de papel	Temp. Burbujas
Papel kraft nuevo	125,0
Papel kraft envejecido	132,7
Papel térmicamente mejorado	137,3

Tabla 6.5 Influencia del tipo de papel en la temperatura de formación de burbujas

Observamos de la tabla 6.5 que las temperaturas de formación de burbujas difieren bastante de un tipo de papel a otro ante las mismas condiciones. La diferencia puede llegar a 12 °C entre el papel térmicamente mejorado nuevo y el papel kraft, siendo más seguro (mayor temperatura de formación de burbujas) el papel térmicamente mejorado. Por tanto, según los datos mostrados, el papel térmicamente mejorado protege mejor la máquina ante sobrecargas que el papel kraft.

6.4.2.5 INFLUENCIA DEL ESTADO DEL PAPEL

Tan sólo dos autores consideran el estado del papel: Koch y Przybylek.

Los resultados arrojados por el modelo de Koch se mostraron en la tabla 6.5 y se puede ver que hay una diferencia de unos 8 °C entre la temperatura de formación de burbujas de un papel nuevo frente a la de un papel envejecido, siendo la diferencia favorable al papel envejecido.

Como se indicó en el capítulo 4 el envejecimiento del papel dificulta la aparición de burbujas por la menor longitud de las cadenas poliméricas debido a un proceso denominado hornificación.

Por lo que se refiere a Pryzbylek, como se comentó en el capítulo 4, la ecuación que proporciona el autor para el papel envejecido es incorrecta, pues sus resultados no coinciden con los resultados de la tabla mostrada y no disponemos de una base para saber cuál de las dos son los correctos. Ello impide hacer el estudio de la influencia del estado de papel sobre la temperatura límite de las burbujas mediante la fórmula de Przybylek.

6.4.3 FORMACIÓN DE BURBUJAS

Una vez analizado el grado de influencia de los distintos parámetros sobre la temperatura de aparición de burbujas, analizamos ahora la duración del proceso de formación de burbujas según los modelos de análisis existentes (Oommen, Koch y Tebohlen, Przybylek). Los datos utilizados para el estudio son: 4% de humedad, 30% de concentración de gases y una presión ambiental de 750 mmHg. Se considera que el transformador está en funcionamiento con una carga inicial del 60% durante un día entero (1440 minutos) y que posteriormente sufre sobrecargas de 120%, 140%, 160% y 180% durante 10 minutos.

A continuación, veremos en las figuras 9.A, 9.B y 9.C los tiempos de formación de burbujas.

	G.carga	Temp. Formación	Momento de formación(min)	Duración (min)
Oommen	1.2	112.4897877	0	0
	1.4	112.4897877	1441.483333	0.75
	1.6	112.4897877	1440.433333	2.183333333
	1.8	112.4897877	1440.266667	2.666666667

Figura 9. A. Formación de burbujas del modelo Oommen

	G.carga	Temp. Formación	Momento de formación(min)	Duración (min)
Koch y Tebohlen	1.2	124.9758326	0	0
	1.4	124.9758326	0	0
	1.6	124.9758326	1440.95	1.666666667
	1.8	124.9758326	1440.416667	2.516666667

Figura 9. A. Formación de burbujas del modelo Koch y Tebohlen

	G.carga	Temp. Formación	Momento de formación(min)	Duración (min)
Pryzbylek	1.2	111.7696543	0	0
	1.4	111.7696543	1441.35	0.8833333333
	1.6	111.7696543	1440.416667	2.2
	1.8	111.7696543	1440.25	2.6833333333

Figura 9. A. Formación de burbujas del modelo Pryzbylek

Como es sabido la mayor temperatura de formación de burbujas se obtiene con el modelo de Koch y Tenbohlen y la menor con el modelo de Pryzbylek debido a que el transformador simulado se encuentra en el intervalo de contenido de humedad (2-5%) que hace que el resultado de Pryzbylek sea inferior al de Oommen (en otras circunstancias el modelo de Oommen suele ser el que produzca menor temperatura de formación de burbujas).

Aunque la variación de temperatura de formación de burbujas entre el modelo más optimista y el más pesimista es de unos 13 grados, en ningún caso se forman burbujas para una sobrecarga del 120%. La diferencia entre los tres modelos se empieza a notar para el caso de sobrecargas del 140%, ya que los modelos de Oommen y Pryzbylek indican que se forman burbujas durante 0,8 min pero en el de Koch y Tebohlen no. Sin embargo, la diferencia indicada se vuelve a reducir para la máxima sobrecarga estudiada (180% de la potencia nominal), pues en todos los casos se forman burbujas durante alrededor de 2,5 minutos.

Por lo tanto, para las condiciones dadas, el modelo de Pryzbylek es el que postula por una aparición de burbujas más temprana y duradera: se forma burbujas a partir del minuto 0,25 posterior a la aparición de la sobrecarga y dura 2,7 minutos.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

6.1 Resumen del trabajo realizado

El presente Trabajo Fin de Grado es continuación del Trabajo Fin de Grado titulado “DETERMINACIÓN DE TEMPERATURAS SIGNIFICATIVAS DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA DURANTE SOBRECARGAS”, realizado por Roberto Jesús Rodríguez Naranjo. En dicho proyecto, el autor estudió las sobrecargas de larga duración en los transformadores, implementado un programa informático que calcula las temperaturas significativas del transformador durante las sobrecargas. Con las temperaturas obtenidas del programa, el autor pudo evaluar la pérdida de vida que sufre el transformador durante una sobrecarga.

Sin embargo, al tratarse de un trabajo centrado principalmente en las sobrecargas de larga duración, no se implementó un modelo de formación de burbujas sino que se hizo uso de la afirmación simplista de la norma UNE-EN 60076-7 de que las burbujas se forman a 140 °C cuando la humedad es del 2%. Tampoco se hizo un estudio exhaustivo de los factores que determinan que una sobrecarga de corta duración sea admisible o no.

Por ello, el presente trabajo está centrado en las sobrecargas de corta duración y especialmente en el análisis de las circunstancias bajo las cuales se forman burbujas de vapor de agua o se sobrepasan los límites de temperatura indicados en la normativa.

El modelo térmico utilizado en este trabajo es el de las ecuaciones diferenciales de la Norma IEC 60076-7 ya que para cualquier compañía eléctrica que adquiere un transformador de potencia, el transformador debe ajustarse en todo lo no especificado de forma explícita durante el pedido a las indicaciones de las normas internacionales. Este modelo térmico ya había sido implementado en el Trabajo Fin de Grado Precedente.

En el presente Trabajo Fin de Grado se adaptó la interfaz de usuario (basada en una hoja Excel) para incorporar las variables de entrada a considerar en la formación de burbujas. Ello obligó a modificar los programas desarrollados en Matlab de lectura de datos.

También se modificó el programa de cálculo de temperaturas, de forma que la integración se hiciera cada minuto si la sobrecarga es de larga duración y cada segundo si la sobrecarga es de corta duración.

Se desarrolló un módulo en Matlab para el cálculo de la temperatura crítica de formación de burbujas teniendo en cuenta las características del transformador (contenido en humedad, tipo de papel, etc.), así como un módulo de cálculo del gradiente de temperaturas y de generación de alarmas.

Finalmente se desarrolló un módulo de escritura de resultados.

La exactitud con la que el programa calcula las temperaturas significativas fue verificada y se comprobó que el programa calculara correctamente la temperatura de formación de burbujas.

Mediante el programa desarrollado se han ejecutado diferentes casos para esclarecer la influencia de distintas condiciones de operación (grado de carga previo a la sobrecarga, duración de la sobrecarga, temperatura ambiente, etc.) en la admisibilidad o no de una sobrecarga.

Con la realización de este trabajo, se ha conseguido desarrollar un programa informático que completa al desarrollado por Roberto Naranjo, permitiendo de esta manera a los usuarios determinar si una sobrecarga es admisible comprobando los 4 criterios establecidos en la norma vigente (temperaturas límites y grado de carga límite).

El programa creado posibilita a los usuarios evaluar la aparición de burbujas de vapor de agua ante una sobrecarga de corta duración mediante tres modelos distintos: el modelo de Oommen, el modelo de Koch y Tenbohlen y el modelo de Pryzbylek. El usuario será capaz de estudiar el grado de influencia de los distintos parámetros que intervienen en la admisibilidad o no de una sobrecarga.

Para realizar el presente Trabajo Fin de Grado, se tuvieron que leer numerosas publicaciones en revistas científicas, normativas y estándares en el idioma inglés, ya que los principales autores que han trabajado en el tema son de origen no español. Además hemos dedicado un tiempo significativo al entendimiento y análisis del programa desarrollado por Roberto Rodríguez Naranjo, ya que nuestro proyecto debe funcionar en conjunción con el programa precedente y utilizando alguno de los módulos del trabajo precedente.

6.2 Principales conclusiones

En el capítulo 5 se sacan conclusiones sobre los valores límites de los parámetros que influyen en que la sobrecarga de corta duración que sufre un transformador sea admisible.

Las conclusiones obtenidas en el capítulo 5 se pueden clasificar en dos bloques:

- Las relativas al cumplimiento de las temperaturas límite indicadas en la norma IEC 60076-7:
 - a) Los diferentes límites de temperatura indicados en la normativa no son simultáneos, como tampoco esos límites se alcanzan con el máximo grado de carga permitido por la normativa. Para cada transformador hay que realizar un estudio para ver cuál de los límites se alcanza primero. Así, en el transformador tomado como ejemplo el límite más restrictivo (el que primero se alcanza) es el de la temperatura de la capa superior del aceite.

- b) El valor del grado de carga previo a la sobrecarga no influye en la temperatura máxima del punto caliente si la sobrecarga tiene una duración suficiente (superior a los 10 minutos). Para valores menores, por debajo de 5 minutos, el valor de grado de carga inicial tienen un peso reducido.
 - c) La máxima sobrecarga indicada por la normativa (180%) puede mantenerse durante tiempos muy reducidos (menores de 5 minutos) antes de que la temperatura de la capa superior del aceite y la temperatura del punto caliente excedan de los valores establecidos de la norma.
 - d) Podemos usar los valores típicos de los constantes K11, k12 y K22 de refrigeración para el cálculo de las temperaturas significativas en vez de sacarlos mediante sonda óptica, ya que estos sólo tienen una influencia importante durante régimen transitorio (En nuestro caso, sólo trabajamos con una sobrecarga de 5 minutos de duración, por lo que el régimen transitorio es muy breve).
- Las relativas a la formación de burbujas de vapor de agua durante la sobrecarga:
- a) Para que se formen burbujas de vapor de agua es preciso que la tasa de crecimiento de la temperatura sea superior a 3K/min. Las tasas de variación de la temperatura se dan en los instantes de tiempo inmediatamente posteriores al inicio de la sobrecarga. Si la integración de las ecuaciones diferenciales se realiza con un paso de integración de 1 minuto se obtiene una tasa de crecimiento promedio inferior a la tasa de crecimiento instantánea. Así, en un caso en el que en el primer minuto la temperatura aumentó en 2,65 °C, en la primera décima de minuto la temperatura aumentó en 0,31 °C, de modo que si el paso de integración hubiera sido de 1 minuto la conclusión hubiera sido que no se forman burbujas mientras que si se calcula cada décima de segundo la conclusión hubiera sido que sí se forman burbujas. Por ello se recomienda integrar las ecuaciones con un paso de integración de 1 segundo.
 - b) Cuando la diferencia entre el grado de carga previo y el valor de la sobrecarga es reducido (grados de carga iniciales del 80% y del 100%) el gradiente es inferior a 3 °C/min, con lo que no se forman burbujas. Por el contrario cuando el grado de carga previo a la sobrecarga difiere mucho del valor de la sobrecarga (por ejemplo si el grado de carga previo es el 20%, el 40% o el 60%) el gradiente puede superar los 3 °C/min y sí que se pueden formar burbujas si es que la temperatura del transformador supera a la de formación de burbujas
 - c) El modelo de burbujas desarrollado por Oommen (que es el modelo que incorpora la normativa Std. IEEE C57-91.2011) es el que arroja una menor temperatura de formación de burbujas en este sentido es el modelo más pesimista de los que se encuentran en la literatura para este fin. Por el contrario el modelo de Koch es el que arroja temperaturas más altas, y por tanto el más optimista.
 - d) La temperatura de formación de burbujas disminuye drásticamente con la humedad, pudiéndose generar burbujas a temperaturas significativamente inferiores a las indicadas por la norma IEC (140 °C). No obstante se debe hacer notar que los modelos de Oommen y de Koch sí que predicen que con una humedad

de punto caliente del 2% la temperatura de formación de burbujas es 140 °C (como indica la norma).

- e) El incremento de la presencia del gas disuelto en aceite reduce significativamente la temperatura de formación de burbujas, con lo que favorece a la aparición de tales burbujas.
- f) Una alteración de la presión total del transformador dentro del rango normal de variación, no afecta de manera considerable en la temperatura formación de burbujas. Sin embargo, cabe destacar que el un incremento de la presión total reduce el riesgo en el transformador.
- g) En cualquier de los modelos de burbujas estudiados, la duración máxima de formación de burbujas para una sobrecarga máxima (180%) es aproximadamente 2,6 minutos.

Los resultados obtenidos de este capítulo, sirvieron para completar el estudio del comportamiento del transformador ante sobrecargas de larga y corta duración. Actualmente, el programa perfeccionado constituye una herramienta fiable para la evaluación del envejecimiento y pérdida de vida que sufre el transformador.

6.3 Propuesta de trabajos futuros

Si se usara el programa desarrollado para la planificación de la red (valorar si se precisa otro transformador adicional para poder soportar las sobrecargas) muchos datos de en entradas no son conocidos con precisión (La temperatura y el grado de carga varia año a año por ejemplo), incluso los propios parámetros de los modelos térmicos pueden tener un cierto grado de error en su determinación. Por ello sería interesante complementar el programa actual para que tenga en cuenta todos esos errores y que de alguna manera los combine para dar el margen de tolerancia de las temperaturas calculadas por el modelo.

En los artículos de Koch Tebohlen los autores no proporcionan de forma cuantitativa los valores de los constantes a y b acordes a todos los experimentos realizados. En los artículos sólo se proporciona el valor de a y b en tres casos y esos fueron los estudiados en este Trabajo Fin de Grado. Sería interesante de estudiar más combinaciones de tipo de papel, estado del papel y aceites posibles aprovechando a las figuras 9 ,11 y 12 de [17], como ha hecho Przybylek en la tabla 4 de su artículo [16].

Hemos visto también que en el capítulo de resultados que la ecuación formulada por Przybylek para caso de papel envejecido es errónea, dan valores exagerados que son difíciles de creer. Por lo que, sería muy conveniente hacer una investigación sobre la ecuación diseñada apoyando de las gráficas resultantes de su ensayo.

CAPÍTULO 8

PRESUPUESTO

En este capítulo se estiman los costes relacionados con el desarrollo de los trabajos implicados en la realización del presente Proyecto de Fin de Grado, y a los utillajes empelados para dichos trabajos.

Podemos dividir el coste de la realización del trabajo en dos partes:

- Coste de personal: es el gasto que supone de contratar un ingeniero junior pagándole un salario a razón de 14 horas a la semana, durante 8 meses. Además se añadiría también el salario del profesor Juan Burgos que trabaja como el supervisor del proyecto. Los gastos previstos sería gastos brutos.
- Coste de equipos y software de programación:
 - Gasto asociado a la adquisición de un computador para la recopilación de información, programación de la herramienta informática desarrollada y para la elaboración del informe final de resultados.
 - Gasto asociado a la adquisición de licencias del software durante 7 meses para poder desarrollar el programa informática realizada en el presente proyecto y la redacción de la memoria del trabajo.

Los costes de los materiales son calculados considerando una amortización en tres años y un periodo de utilización de diez meses para la elaboración de este trabajo.

En las tablas 7.1 y 7.2 se especifica el coste vinculado a cada elemento que interviene:

NOMBRE	CATEGORÍA	SALARIO/HORA	HORAS TOTALES	COSTE TOTAL
Qianqian Fu	Ingeniero Junior	8,5€/h	500	4.250 €
Juan Carlos Burgos Díaz	Ingeniero Senior	34€/h	40	1.360 €

Tabla 7.1 Coste de personal

CONCEPTO	ESPECIFICACIÓN	COSTE/UNIDAD	AMORTIZACIÓN	CANTIDAD	COSTE TOTAL
HP 20-230NS	Ordenador sobremesa. Procesador: AMD E1-6010, 4GB RAM, y 500GB de almacenamiento.	492,00 €	$492 \cdot 8 / (3 \cdot 12)$	1	109,00 €
Office 365 Universitarios	Software de oficina para trabajos de escritura, hojas de cálculos, diapositivas	79,00 €	$79 \cdot 8 / (3 \cdot 12)$	1	17,56 €
Microsoft Visio 2010	Software de oficina para crear y compartir diagramas de flujos versátiles que simplifica informaciones complejas.	739,00 €	$739 \cdot 8 / (3 \cdot 12)$	1	164,22 €
Matlab R2011a	Software de programación y ejecución de tareas informáticas	105,00 €	$105 \cdot 8 / (3 \cdot 12)$	1	23,33 €

Tabla 7.2 Coste de herramientas y software

Por lo tanto, el coste total es:

- Coste de personal.....5610€
- Coste de herramientas y software.....314,11€
- Coste Total.....5924,11€

BIBLIOGRAFÍA

- [1] UNE EN 60076-7. “Transformador de potencia” Parte7- Guía de carga para transformadores sumergido en el aceite, 2010
- [2] IEEE Std C57-91. “Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers”, 1995
- [3] Roberto Jesús Rodríguez Naranjo “Determinación de temperaturas significativas de un transformador de potencia durante sobrecargas”, Escuela Politécnica Superior, UC3M
- [4] Francisco José Yébenes Cabrejas “Gestión de cargabilidad de transformador de potencia”, Escuela Politécnica Superior, UC3M
- [5] C.G. Garton, Z Krasucki “Bubbles in insulating liquids: stability in an electrical field” , Proc. R. Soc. Lond. A, Vol 280, pp 211-226, 1964
- [6] S.M. Korobeynikov and Y.N. Simikh “Bubbles and breakdown of liquid dielectrics” Conf. Rec. of 1998 IEEE Int. Symp. On Electrical Insulation. 1998
- [7] M. Atrazhev et al. “Breakdown Processes in Gas Micro-bubbles in Liquids under Electric Stress” IEEE Trans. On Dielectrics and Electrical Insulation. Vol 19, No 5. 2012.
- [8] Martin J. Heathcote “J&P Transformer Book”, 13 edition
- [9] Juan Carlos Burgos. Apuntes de la asignatura “Circuito magnéticos y transformadores”, tema 2. Departamento de Ingeniería eléctrica, UC3M
- [10] E.E. staff del M.I.T. “Circuito Magnéticos y Transformadores”, editorial reverté.
- [11] Ternium. “Transformadores”, Manual de contenido del participante
- [12] REE.es. http://www.tiempo.com/ram/wp-content/uploads/2014/09/demanda_undia.jpg
- [13] Nichese.com. <http://www.nichese.com/transformador.html>
- [14] International Standard “IEC 60072-2: Power transformers- Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers”, 2009
- [15] T.V.Oommen, “Bubble evolution from Transformer Overload”, 2000.
- [16] P.Przybylek, “The Influence of Cellulose Insulation Aging Degree on its Water Sorption Properties and Bubble Evolution”, 2010.
- [17] M.Koch and S.Tenbohlen, “Systematic Investigation on the Evolution of Water Vapour Bubbles in Oil-Paper-Insulations”,