Universidad Carlos III de Madrid

TRABAJO FIN DE GRADO

MODELOS DE ENVEJECIMIENTO DEL AISLAMIENTO SÓLIDO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA

Autor: REYES MUÑOZ VERGARA

Tutor: María Belén García de Burgos

Juan Carlos Burgos Díaz

Titulación: Grado en Ingeniería Eléctrica

OCTUBRE 2014

Contenido

ABSTRACT:

This work aims the reviewing of the models of determining the aging of solid insulation of power transformers. For a better understanding of the discussed topic, it begins with a brief overview of the constituent parts and operation works of power transformers highlighting the importance of this equipment in the transport of energy.

It has been a bibliography review, adding the difficult that most of the documents are written in English. The bibliography has principally treated of mechanisms of aging power transformers with special interest in the degradation of solid insulation, this is the insulating paper stayed between the windings of the transformer as it is often the element that determines the life of a transformer.

In this sense, it has been reviewed developments related to the degree of polymerization of the paper and the creation of furans in oil studies.

After the bibliography review, it has been developed an application that can interact with an Excell book and Matlab Executable that we have called “Transformer Life&Care” that is available to analyze the data provided by the Electrical Engineering Department of Universidad Carlos III de Madrid, to get the most representative factors in the degradation of paper and view the dependence of these factors with different temperatures and humidity for different oxygen concentrations.

Upon obtaining the results through the application, we have compared these results with those obtained by other researchers, especially those obtained by Lelekakis and his team because the test performed are very similar to those performed by the Electrical Engineering Department of Universidad Carlos III de Madrid, obtaining results accordance to other researchers.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 IMPORTANCIA DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA

La función de un transformador de potencia es ser un enlace entre las distintas partes de un sistema de potencia que están a diferentes niveles de tensión y llega al final de su vida cuando es incapaz de llevar a cabo esta función de forma fiable. (Flores, Rattá, Mombello, & Jardini, 2007)

Los transformadores de potencia, transforman la energía eléctrica de un nivel de tensión a otro, con el fin de minimizar las pérdidas de transmisión en las líneas de transporte. Es decir, si tenemos una central que produce una energía con una potencia y tensión determinada y queremos transportar la energía a otro punto del sistema eléctrico, tenemos dos opciones:

1- Transportar la energía a la tensión de salida del generador.

La tensión a la que se produce la energía en las centrales suele estar entre 6 y 20 kV, lo cual es una tensión relativamente pequeña. Si transportamos la energía producida a esta tensión a otro punto de la red, tendremos unas pérdidas de potencia activa debido a la resistencia del cable.

$$P=I^2*R$$

Como vemos en la ecuación anterior, las pérdidas de potencia activa varían con el cuadrado de la corriente y con la resistencia del conductor. La resistencia del conductor es fija y está establecida por las características del mismo por lo que si queremos reducir las pérdidas en el transporte manteniendo la potencia, la única

opción es reducir la corriente que tenemos que transportar. Teniendo en cuenta que la potencia es:

$S=V \cdot I$

Donde S es la potencia aparente, I la corriente y V la tensión.

Si tenemos una tensión relativamente baja, la corriente que circulará por la línea es elevada y como las pérdidas en el conductor aumentan con el cuadrado de la corriente, estas serán elevadas también.

2- Aumentar la tensión a la que transportamos la energía.

Como vimos en la ecuación 2, manteniendo la potencia aparente constante, la corriente es inversamente proporcional a la tensión. Entonces si aumentamos la tensión reduciremos la corriente y con ello las pérdidas disminuirán con el cuadrado de esta.

Al disminuir la corriente también disminuiremos la sección del conductor que la transporta por ende su coste, no solo del conductor sino también de los apoyos ya que si el peso del conductor se reduce el apoyo necesario será menor.

La función del transformador es doble, no solo eleva la tensión para transportar la energía de forma más eficiente sino que también la disminuye para su consumo.

Por lo visto anteriormente los transformadores de potencia son uno de los activos más valiosos de una compañía eléctrica.

1.2 ENTORNO SOCIOECONÓMICO

El envejecimiento de los transformadores de potencia es una preocupación cada vez mayor, no solo para las compañías eléctricas sino también para los fabricantes de transformadores e incluso para las empresas aseguradoras.

El papel aislante suele ser el elemento que determina la vida de un transformador de potencia ya que la sustitución del aislamiento sólido de un transformador de potencia no es una solución viable económicamente.

Por una parte, en los años 70 y 80 del siglo pasado hubo un gran aumento de la potencia instalada de transformadores en el mundo entero.

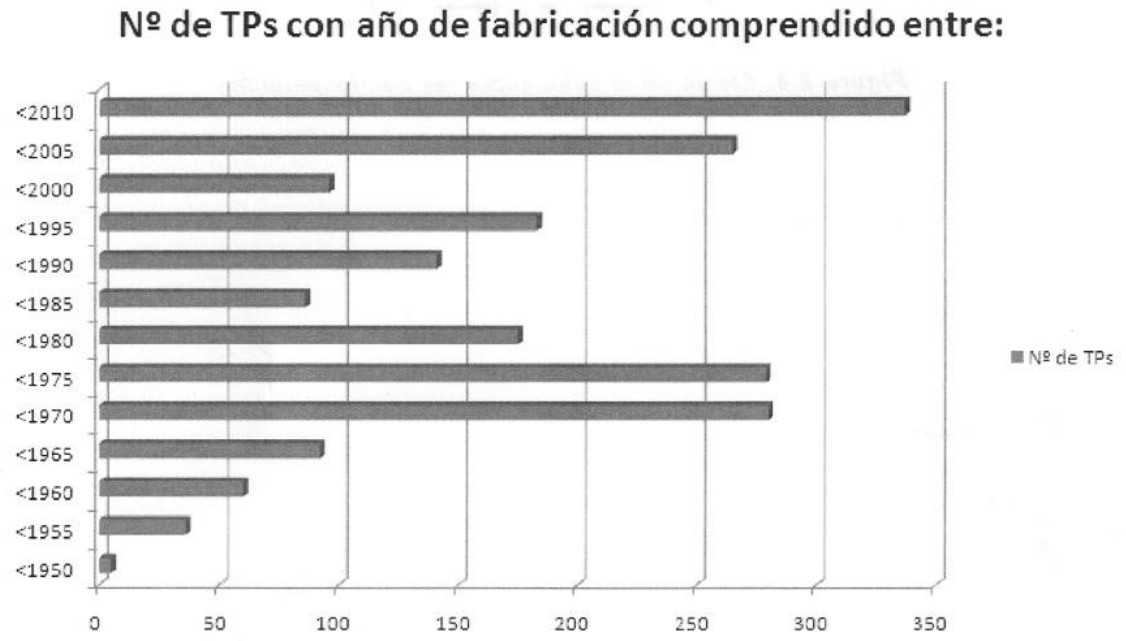


Ilustración 1: Número de transformadores instalados por año en el mundo.

Habitualmente se considera que la vida de un transformador está en torno a los 40 años (aunque en la práctica, la vida de un transformador puede llegar incluso a los 60 años con un mantenimiento y unas condiciones de funcionamiento adecuadas (Flores, Rattá, Mombello, & Jardini, 2007) con lo que se llega a la conclusión de que los transformadores instalados en las mencionadas décadas están próximos al final de su vida útil. Además de lo anterior, en el mercado eléctrico liberalizado actual las compañías eléctricas procuran sacar el máximo provecho de sus activos y de esta

forma los transformadores trabajan cada vez más cerca de sus límites de funcionamiento.

El transformador de potencia está compuesto por materiales como hierro y cobre cuyo envejecimiento es muy reducido y por materiales aislantes como celulosa y aceite cuyo envejecimiento es mucho más mayor que el del hierro y el cobre.

El mayor problema en los transformadores con aislamiento de aceite y celulosa es la edad, y que este aislamiento sólido formador por el papel no puede ser renovado. Esto sumado a líneas cada vez más sobre cargadas con cambios de carga cada vez más frecuente, reducen la vida del transformador.

1.3 OBJETIVO DEL TRABAJO FIN DE GRADO

Como se expondrá posteriormente el envejecimiento de la celulosa depende de la temperatura de trabajo y de su contenido en humedad.

Emsley dedujo una ley de envejecimiento que es la ley comúnmente aceptada por los diferentes autores. Sin embargo no existe un consenso sobre el valor de los parámetros de la ecuación de envejecimiento. En el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Carlos III se han realizado unos ensayos de envejecimiento acelerado sobre papeles aislantes de transformador. El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es desarrollar de un programa que permita ajustar esos valores a la ecuación de Emsley y obtener el valor de los parámetros que mejor ajustan el modelo.

1.4. ESTRUCTURA DEL TRABAJO

Para desarrollar los objetivos del Trabajo Fin de Grado de forma eficaz, lo dividiremos en tres partes:

1- Revisión Bibliográfica:

Con el objetivo de conocer todo lo necesario con respecto al envejecimiento de los transformadores de potencia y en especial al envejecimiento de su papel aislante, realizaremos una revisión bibliográfica de todo lo referente a este tema. También analizaremos los estudios previos realizados al respecto.

Este apartado, es una parte importante del proyecto y conlleva un gran número de horas de trabajo, ya que la mayoría de la información está en inglés.

2- Programa tratamiento de datos:

Tras la Revisión bibliográfica, desarrollaremos un programa ejecutable en Matlab para importar los datos con los que se va a trabajar que se encuentran en un archivo Excel.

Los datos leídos deben ser manipulados y estructurados de una forma que sea cómodo trabajar con ellos.

3- Estudio de la evolución del grado de polimerización en el tiempo.

Con los datos importados de los ficheros Excel se ajustará la función que proporciona el grado de polimerización en el tiempo y se comparará con los resultados obtenidos por otros autores.

CAPITULO 2

El transformador de potencia

2.1 QUÉ ES UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA. BASES FÍSICAS

Un transformador es una maquina eléctrica estática destinada a funcionar con corriente alterna, que trasvasa energía eléctrica entre dos sistemas con diferentes niveles de tensión manteniendo la potencia y sin variar la frecuencia o el desfase de la señal de forma significativa. Si bien es cierto que hay unas pequeñas perdidas que veremos más adelante, estas pérdidas son tan insignificantes que el rendimiento de los grandes transformadores ronda el 99.7% al no disponer de partes móviles. También hay un pequeño desfase sin el cual sería imposible entregar potencia activa a la salida, dado que este desfase es siempre menor de 3º se puede despreciar sin cometer errores de cálculo significativos. Es una de las máquinas eléctricas de mayor uso e importancia ya que son uno de los activos más valiosos de una compañía eléctrica.

El funcionamiento del transformador se basa en la Ley de Faraday o ley de inducción Electromagnética de Faraday. Esta establece que el voltaje inducido en un circuito cerrado es directamente proporcional a la rapidez con la que cambia en el tiempo el flujo magnético que atraviesa una superficie.

El campo magnético se mide en amperios-vuelta por metro o Amperio/metro (A/m). La inducción, B, se mide en Teslas (T) y el campo magnético en Amperios-vuelta (Av). La inducción y el campo magnético son diferentes en cada punto del espacio

2.2 CONSTITUCIÓN FÍSICA

Un trasformador consta principalmente de cuatro partes:

- Núcleo
- Devanados
- Sistema de refrigeración
- Aisladores pasantes de salida

2.2.1 Núcleo:

El núcleo es el sistema que constituye el circuito magnético del transformador. Está formado por chapas de acero al silicio agrupadas, el porcentaje de carbono en el acero debe ser menor del 0.1% ya que este provoca un considerable aumento de las perdidas por histéresis y acelera el envejecimiento de las chapas. El silicio no sobrepasa el 3 % ya que este las hace más quebradizas pero su ventaja es que retarda el envejecimiento de la chapa magnética y reduce la magneto estricción, es decir, disminuye el ruido emitido por el transformador. También reduce las perdidas por histéresis.

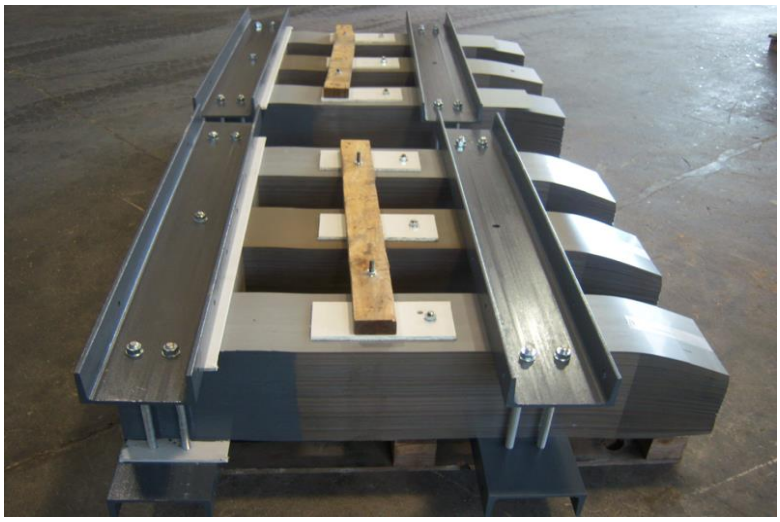


Ilustración 2: Chapas formando el núcleo magnético

Las chapas magnéticas suelen medir 0.3mm de espesor y están aisladas entre sí, el aislamiento se realiza mediante un tratamiento químico superficial denominado carlite que las recubre de una capa aislante muy delgada del entorno de 0.01 mm para aumentar la resistencia del hierro al paso de la corriente y evitar así las corrientes de Foucault, lo que reduce de forma considerable las pérdidas en el hierro.

Ilustración 3: Núcleo magnético con arrollamientos y papel aislante.

El circuito magnético está compuesto por columnas y culatas. En las columnas van arrollados los devanados y las culatas sirven de unión entre las columnas. Los huecos que se forman entre las columnas y las culatas se denominan ventanas del núcleo y es el espacio que ocupan los arrollamientos. Las uniones de las culatas con las columnas se denominan juntas y deben tener el menor espesor posible para reducir al máximo la reluctancia del circuito magnético.

Ilustración 4: Núcleo magnético

Las culatas superiores tienen que poder abrirse para colocar las bobinas y los aislantes como puede verse en las siguientes imágenes.

Ilustración 5: Proceso de colocación de los arrollamientos dentro del núcleo magnético

Ilustración 6: Ubicación final de los arrollamientos con el papel aislante dentro del núcleo magnético.

En función de la posición relativa entre el núcleo y los devanados, los transformadores se clasifican en:

- Acorazados: los devanados están en su mayor parte abrazados por el núcleo magnético. Es decir tiene una columna central sobre la que van colocados los bobinados y otras dos columnas exteriores que lo acogen en forma de armadura o coraza por lo que las espiras quedan más sujetas y resisten así mejor los esfuerzos mecánicos en los cortocircuito

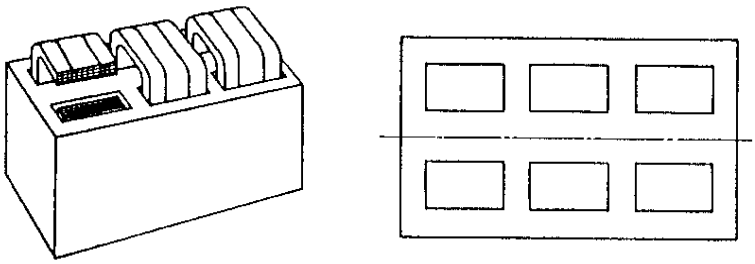


Ilustración 7: Esquema de un núcleo magnético acorazado

- De columna: En este caso son los devanados los que rodean casi por completo al núcleo magnético. Los devanados van rodeando las columnas exteriores y la construcción es más sencilla.

  En este caso la superficie que hay que aislar es menor por lo que se adapta mejor a las altas tensiones y es el tipo que se usa generalmente en la práctica para la construcción de grandes transformadores de potencia.

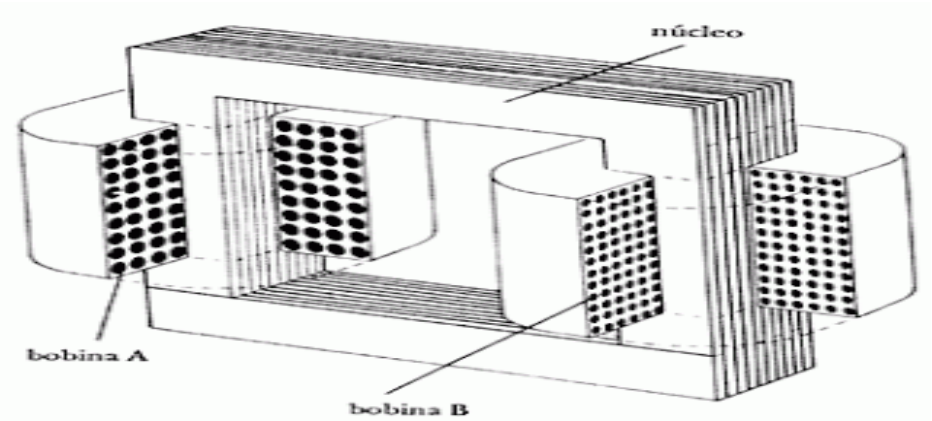


Ilustración 8: Esquema de un núcleo magnético de columnas.

2.2.2 Devanados

Un transformador consta como mínimo de dos arrollamientos, el primario y el secundario, aunque es habitual que tengan un arrollamiento terciario o de estabilización.

El material empleado para la fabricación de los arrollamientos suele ser el cobre ya que es un buen conductor pero debido a su precio en épocas de escasez económica se han fabricado transformadores con los devanados de aluminio.

Lo esencial de los arrollamientos es el número de espiras y la relación entre el número de vueltas del arrollamiento y la tensión es la siguiente:

$$\frac{V_1}{N_2} = \frac{V_2}{N_1}$$

Siendo V_1 la tensión de entrada en el primario, V_2 la tensión de salida del secundario, N_1 el número de vueltas del arrollamiento primario y N_2 el número de vueltas del arrollamiento secundario.

La constitución de los arrollamientos también es importante y normalmente se forman por un hilo o pletina de cobre, la forma del conductor tienen que ver con el aprovechamiento del hueco de la ventana del núcleo y las dimensiones de las pletinas o hilos del conductor son fundamentales para que el transformador tenga unas pérdidas de potencia activa reducidas y una resistencia mecánica adecuada para soportar los esfuerzos de cortocircuito.

Los arrollamientos son cilindros concéntricos y dado que el núcleo magnético está puesto a tierra, el arrollamiento de baja tensión es el más interno para evitar problemas de aislamiento.

Al circular corriente por los conductores, se producen perdidas de potencia activa debidas al efecto Joule:

$$P_J = \rho \; x \; \delta^2 x \; V_{cu}$$

Donde ρ es la resistividad del cobre, δ es la densidad de corriente y V_{cu} es el volumen del cobre.

Estos arrollamientos forman el circuito eléctrico del transformador y son los encargados de tomar la energía del sistema eléctrico por el arrollamiento primario y entregarla de nuevo tras variar su tensión por el arrollamiento secundario, estos arrollamientos están aislados entre sí y con el núcleo magnético bien mediante el uso de barniz o interponiendo papel aislante entre los conductores.

Ilustración 9: Interior de los arrollamientos de un transformador.

Estos devanados deben cumplir una serie de requisitos, marcados en las normas internacionales IEC (en concreto en las diferentes partes de la IEC 60076) entre ellos los más importantes son:

- La temperatura de los arrollamientos en servicio tienen que estar dentro de un rango de funcionamiento ya que como veremos más adelante un calentamiento excesivo reduce drásticamente la vida útil de un transformador.
- Los arrollamientos deben ser capaz de soportar los esfuerzos mecánicos originados por cortocircuitos repentinos.
- Deben tener el suficiente grado de aislamientos para soportar sobretensiones.

Los requisitos anteriormente mencionados suelen ser contradictorios, es decir, con una mayor densidad de corriente en el arrollamiento o devanado se emplea menos cobre, pero las pérdidas en este mismo son mayores por lo que el rendimiento del transformador disminuye.

En cuanto a la colocación de los arrollamientos de alta y baja tensión en los transformadores se distinguen las siguientes disposiciones:

2.2.2.1 Arrollamientos o devanados concéntricos:

Los bobinados tienen forma de cilindros coaxiales. Como dijimos anteriormente el devanado de Baja Tensión está colocado en la parte interior del devanado, más cercano al núcleo magnético para facilitar su aislamiento y el devanado de alta tensión está separado del de Baja por una serie de cilindros de cartón aislante. Para mejorar la refrigeración del conductor, se dejan canales entre las diferentes capas. Este tipo de arrollamientos es el utilizado en transformadores con núcleo de columnas.

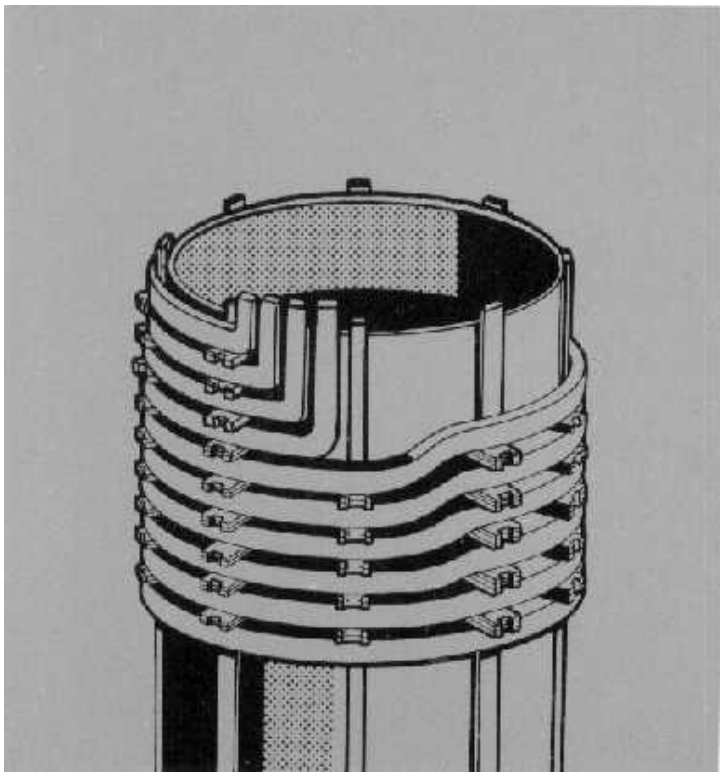


Ilustración 10: Esquema arrollamientos concéntricos

Hay varios tipos de arrollamientos concéntricos entre los que destacan los siguientes:

- Tipo discos: Cada disco es una espiral con una o más espiras (arrollada de dentro afuera o de afuera a dentro). Con estas capas, se van realizando transposiciones con el fin de que todos los conductores que forman las espiras tengan la misma impedancia para que las corrientes sean uniforme por todos ellos. Se utilizan en el caso de arrollamientos de altas tensiones pues mejora la capacidad serie entre espiras del transformador y con ello el reparto de las sobretensiones de tipo rayo.

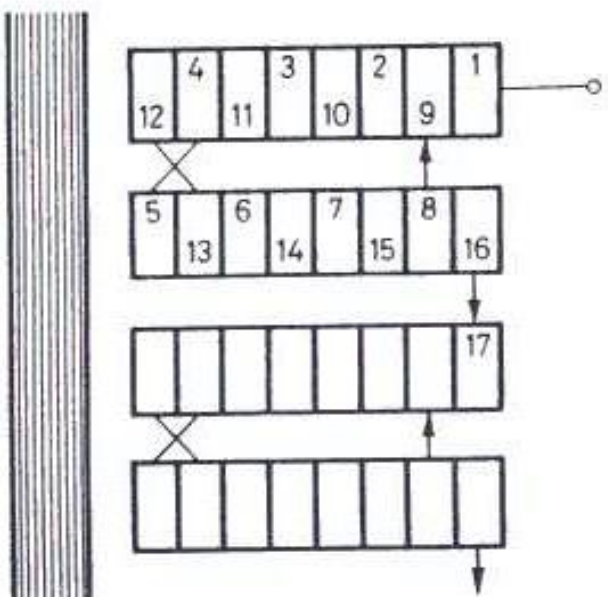


Ilustración 11: Arrollamiento por discos entrelazados

- Tipo hélice: Los devanados se forman haciendo forma de hélice (ilustración 10). Debido a su forma, en la parte superior e inferior de las bobinas, no tienen forma perpendicular a los elementos en los que apoya, por lo que se necesitan las denominadas "falsas espiras" que consisten en cuñas de materiales aislantes que ocupan las posiciones que deja libre el conductor. Estas cuñas ayudan a mantener la resistencia mecánica a la deformación de los esfuerzos electrodinámicos. Al contrario que los tipo disco, este tipo de arrollamientos se utiliza cuando por ellos circulan altas corrientes y el arrollamiento tiene pocas vueltas, ya que permite que el aceite fluya por el arrollamiento refrigerando todas las espiras.

- Arrollamientos por capas: semejantes a los de tipo hélice, pero con la particularidad de que las espiras situadas en cada capa no están separadas mediante un separados de pressboard que deje un canal de refrigeración sino que las espiras se apoyan la una en la otra.

2.2.3 Sistema de refrigeración

Las perdidas nombradas anteriormente se transforman en calor y contribuyen al calentamiento de la máquina, lo que supone una drástica reducción en la vida útil de los aislamientos de los devanados como veremos más adelante. Para evitar que se consigan altas temperaturas, los transformadores están dotados de un sistema de refrigeración que dependiendo de la energía a transformar utilizaran de refrigerante el aire exterior o bien un líquido refrigerante si es necesario evacuar una elevada cantidad de calor. Normalmente se utiliza aceite como refrigerante.

El aceite no solo actúa como refrigerante sino también como aislante.

Los diferentes sistemas de refrigeración se clasifican según un código de siglas y los más usados son los siguientes:

ONAN (Oil Natural Air Natural). Este tipo de transformadores se refrigeran mediante la circulación natural del aceite por el interior de la cuba del transformador y del aire por el exterior de la cuba.

ONAF (Oil Natural Air Forced). En este caso el aceite circula de forma natural por el interior de la cuba del transformador pero la circulación del aire por el exterior de la cuba es forzada mediante ventiladores.

OFAF (Oil forced Air Forced). Aquí tanto la circulación del aire es forzada por ventiladores como la del aceite es forzada mediante bombas.

ODAF (Oil Directed Air Forced). En este sistema de refrigeración el aire es forzado mediante ventiladores y el aceite es dirigido mediante deflectores a los puntos que se espera que sean más propicios a sufrir ese calentamiento ya que como podemos ver en la siguiente termografía, el calentamiento de los arrollamientos no se produce de manera uniforme.

El sistema de refrigeración de un transformador de potencia está directamente relacionado con su potencia nominal ya que uno de los factores que limitan el tamaño de los transformadores es la evacuación de calor y a mayor potencia nominal mayor es la evacuación de calor de la máquina eléctrica.

En la siguiente imagen podemos comprobar esta distribución de temperatura, comprobando que los puntos calientes del transformdor se encuentran en la parte superior de los arrollamientos.

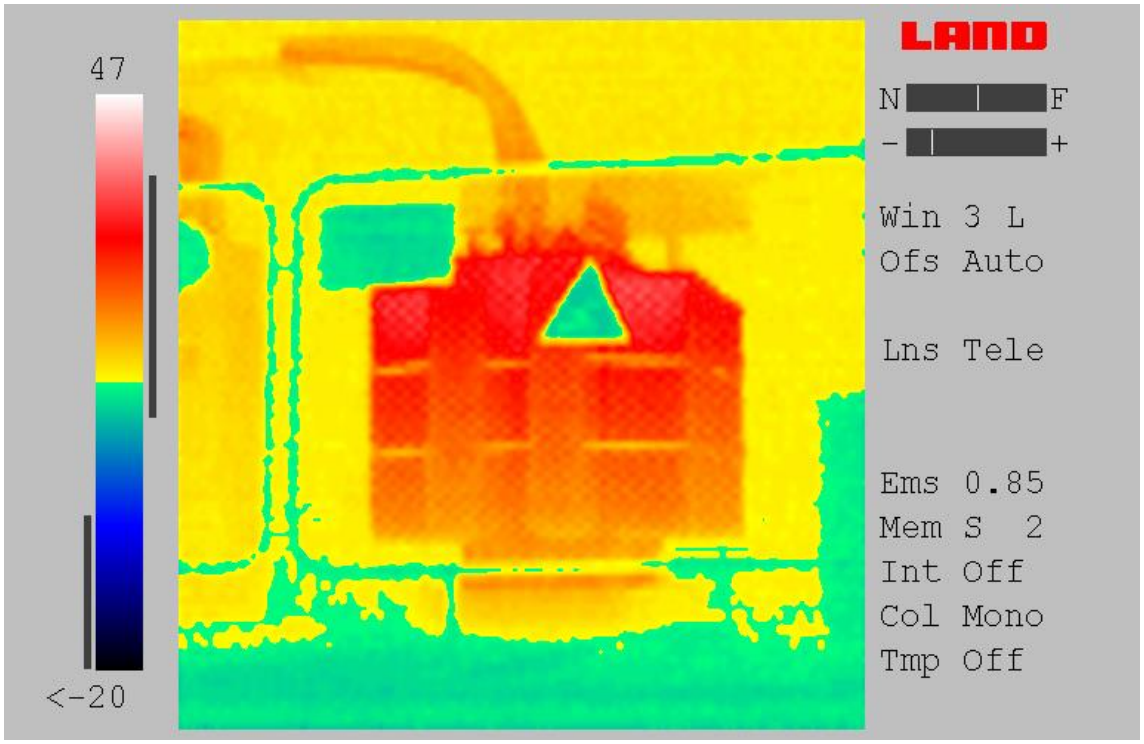


Ilustración 12: Termografía de un transformador de potencia.

2.2.4 Cuba:

La parte activa del transformador se introduce en una cuba rellena de aceite para su mejor refrigeración. Para reducir al máximo posible el contacto entre el aceite y el aire y con ello reducir su oxidación y deterioro se toman diferentes medidas (llamadas de forma genérica sistemas de preservación):

En transformadores de pequeña potencia el transformador es de llenado integral y está sellado. Las dilataciones del aceite se traducen en dilataciones de la cuba.

En transformadores de grandes potencias se une a la cuba un depósito de expansión donde el aceite está más frío y la superficie de contacto es menor.

En algunos casos en este depósito de expansión se coloca una membrana de caucho para aislar el aceite del aire, si bien este sistema no está muy extendido, especialmente en transformadores antiguos.

En América se utilizan en algunos casos sistemas de preservación de aceite basados en un colchón de nitrógeno cuya presión es regulada mediante un sistema automático.

2.3 EL SISTEMA DE AISLAMIENTO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA

El conjunto de materiales aislantes que posee el transformador que se encargan de mantener aislados entre sí las partes a diferentes niveles de tensión, forman los sistemas de aislamientos. Estos sistemas de aislamientos, pueden clasificarse en:

- Aislamientos líquidos.
- Aislamientos gaseosos.
- Aislamientos sólidos.

2.3.1 Aislamientos Líquidos:

La misión del aislamiento líquido además de aislar entre sí las diferentes partes en tensión es evacuar el calor al exterior, como se comentó anteriormente. Una de las principales ventajas de los aislamientos líquidos frente a los sólidos es que una vez producida una descarga interna, las partículas quemadas precipitan al fondo de la cuba y el aislamiento se regenera. Este sistema de aislamiento tiene tres propósitos primordiales: (Transformadores de distribución. Teoría, cálculo y construcción y pruebas. Pedro Avelino.)

1- Provee una rigidez dieléctrica.

2- Proporciona un enfriamiento eficiente.

3- Protege al resto de sistemas aislantes

El aceite mineral es el aislamiento líquido más común gracias a su bajo coste y elevada rigidez dieléctrica. En locales con riesgo de incendio para reducir los costes del seguro y el precio de los sistemas anti incendio se utilizó en el pasado el Askarel, que hoy en día está prohibido por su efecto cancerígeno. En ocasiones se utiliza el aceite de silicona, por su mejor comportamiento frente al fuego (ya que los vapores de silicona sofocan el incendio), pero este tipo de transformadores es más caro y voluminoso porque la viscosidad de la silicona es elevada y aumenta con la temperatura. Hoy en día el transformadores de llenado integral se usan bastante los aceites vegetales y ésteres sintéticos, pues aunque son más caros que los transformadores en aceite mineral tienen un menor riesgo de incendio.

2.3.2 Sistemas Sólidos:

Este sistema de aislamiento, debe cumplir con las siguientes funciones importantes:

(Transformadores de distribución. Teoría, cálculo y construcción y pruebas. Pedro Avelino.)

1- Capacidad para soportar tensiones relativamente altas, sucedidas en servicio normal. Esto incluye ondas de impulso y transitorios.

2- Capacidad para soportar esfuerzos mecánicos y térmicos los cuales, generalmente acompañan a un cortocircuito.

3- Capacidad para prevenir excesivas acumulaciones de calor.

4- Capacidad para mantener las características deseadas para un periodo de vida de servicio aceptable dando un adecuado mantenimiento.

Aunque en la actualidad existen algunos aislamientos sintéticos (tales como el Nomex) con propiedades mejoradas, en la inmensa mayor parte de los transformadores el aislamiento sólido está formado por papel (habitualmente denominado papel kraft) y cartón (denominado pressboard o transformerboard) aunque también se usan otro tipo de materiales como porcelana, mica o madera entre otros. El aislamiento sólido de un transformador se divide en aislamiento fino, que es el que rodea los conductores y aislamiento grueso, que se puede moldear de diversas maneras (cilindros aislantes entre arrollamientos, en forma de sombreretes, etc). Como puede verse en la Ilustración 9: Interior de los arrollamientos de un transformador.

El aislamiento entre arrollamientos de un transformador está formado por una serie de cilindros concéntricos de papel que separan canales de aceite (Ilustración 13: Canales de refrigeración en arrollamientos). El cartón aislante soporta un campo eléctrico muy reducido, ya que la permitividad dieléctrica del aceite (4) es muy superior a la del papel (2,2), por lo que la mayor parte del campo eléctrico entre arrollamientos es soportado por el aceite.

Por tanto la misión del cartón no es tanto soportar el campo eléctrico sino actuar como un cortafuego, impidiendo que una eventual descarga eléctrica que se haya generado en el aceite se propague al resto de los canales del aceite.

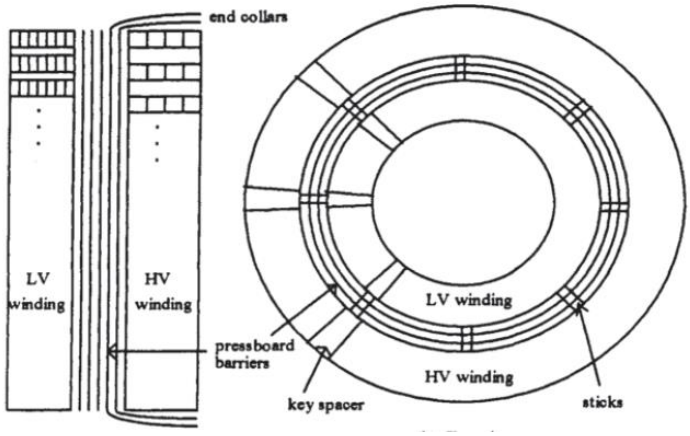


Ilustración 13: Canales de refrigeración en arrollamientos

En la siguiente figura puede verse la ubicación del papel y el cartón aislante (de color amarillo) en el interior del transformador.

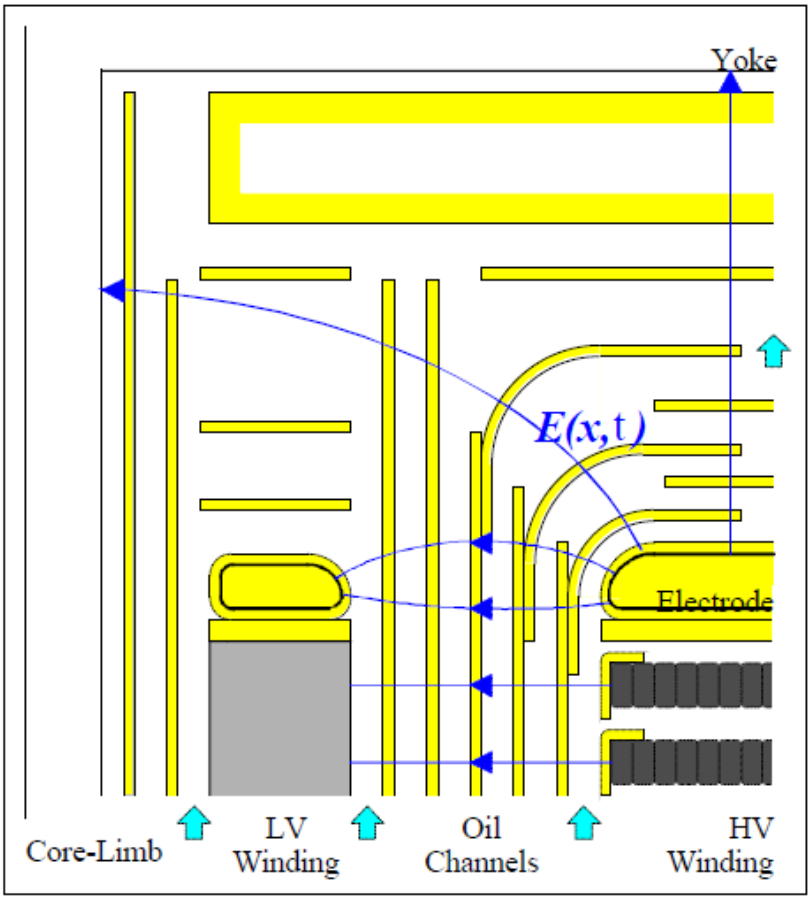


Fig. 1: Barrier System and dielectric stress at the upper end of a HV winding (schematically).

Ilustración 14: Ubicación del papel aislante dentro del transformador.

2.3.3 Sistemas Gaseosos.

Los sistemas gaseosos incluyen nitrógeno, aire y gases fluorados, la misión de estos últimos es reducir la combustibilidad. Los sistemas gaseosos, son sustitutivos de los sistemas líquidos y estos se dividen en:

- Con aislamiento de nitrógeno y aire: Estos transformadores están limitados a tensiones menores de 15 kV y en sitios limpios, ventilan a la atmósfera. El gas en el interior del transformador suele estar a presión atmosférica.

- Con aislamiento de gases de flúor: El más utilizado es el exafluoruro de azufre y la temperatura en estos transformadores suele ser mayor que en los transformadores con aislamientos de aceite.

  Estos gases tienen mejor rigidez dieléctrica y capacidad de transferencia de calor que el nitrógeno o el aire. Lo que permite la fabricación de transformadores de hasta 138 kV.

  La presión del gas en este tipo de transformadores también es mayor que en los que usan aire o nitrógeno lo que permite operar a una mayor temperatura.

2.4. EL AISLAMIENTO CELULÓSICO DE LOS TRANSFORMADORES

El papel aislante, se obtiene de las fibras de celulosa de vegetales diluida en agua y secada para conseguir una fina lámina. La principal fuente de fibras de celulosa es la madera. En el proceso de fabricación del papel, se eliminan todos los elementos como carbohidratos o lignina de la madera para quedarse solo con la fibra de celulosa.

Las fibras de manila son otra sustancia usada también en la fabricación del papel. Estás se obtienen de las hojas y tallos de las plantas de cáñamo de Manila (Musa Textilis).

La celulosa es un biopolímero compuesto exclusivamente de moléculas de β-glucosa de longitud variable en función de su naturaleza, teniendo desde cientos hasta varios

miles de unidades; es pues un homopolisacárido. Siendo la biomolécula orgánica más abundante en la biomasa terrestre.

La celulosa es un tipo de polímero de condensación lineal que consta de anhidroglucosas unidas entre ellas mediante glicosídicos. El grado de polimeración es el número n de anillos glicosídicos en una macromolécula de celulosa.

La celulosa se forma por la unión de moléculas de β-glucopiranosa mediante enlaces β-1,4-O-glucosídico. La celulosa es una larga cadena polimérica de peso molecular variable y su estructura es la siguiente:

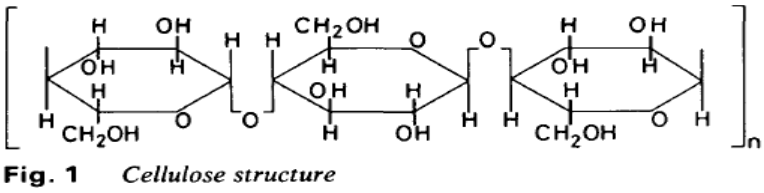


Ilustración 15: Estructura de una cadena celulosa

En la Ilustración 16: Estructura de la celulosa se muestra la estructura de la celulosa. Es decir, primero se forman microfibrillas que se van agrupando hasta formar macrofibrillas y al agruparse estas macrofibrillas son las que acaban formando las fibras de celulosa. La resistencia mecánica a la tracción de una hoja de papel depende de muchos factores, aunque la característica que mejor representa esta resistencia es el grado de polimerización.

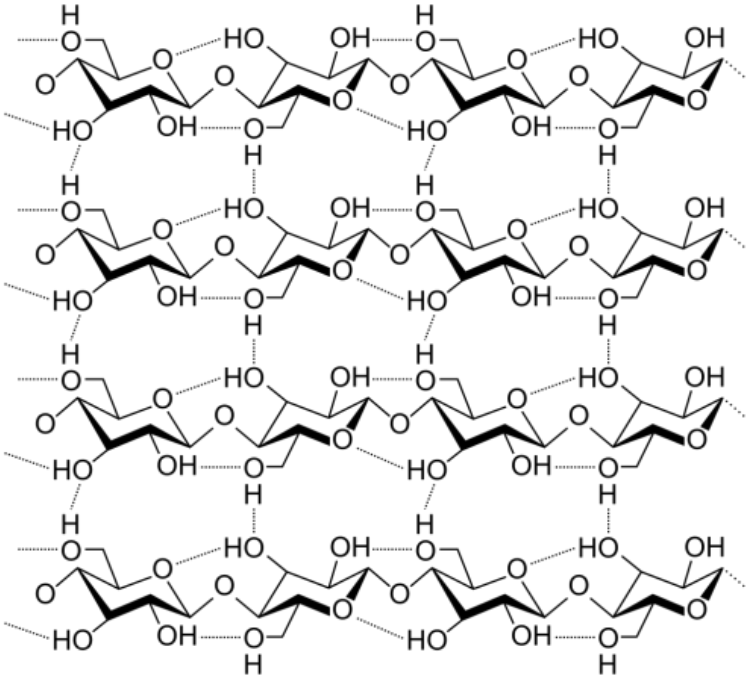


Ilustración 16: Estructura de la celulosa

En los transformadores de potencia el papel y el cartón se emplean de diversas formas como un material de aislamiento sólido. Separando los conductores entre sí y entre los arrollamientos y el núcleo magnético del transformador pues, gracias a su buena estabilidad geométrica, es fácil de modelar, envolver y curvar, entre otras características.

Junto al papel de celulosa, el aislamiento se realiza mediante aceite que se impregna en el papel para rellenar los poros del mismo y aumentar la rigidez dieléctrica del papel. El aceite además ofrece unas características idóneas y es un buen aislante de campos eléctricos. Para la fabricación del papel aislante de los transformadores se emplea cartón prensado sin blanquear y pasta “kraft” de madera blanda. La celulosa del árbol se refina por un proceso llamado sulfatado o “proceso kraft”. Habitualmente la composición de este papel de “kraft” es de 78-80% celulosa, 10-20% hemicelulosa y 2-6% lingina.

En el papel recién fabricado el grado de polimerización es de aproximadamente 1200 monómeros.

Los papeles elaborados con celulosa de kraft pueden presentar un tipo de densidad variable entre ellos según la adición de los diversos componentes que lo conforman.

Además según la cantidad de nitrógeno que contenga el papel, su duración y edad útil de funcionamiento podrán verse modificadas.

En la actualidad es cada vez más frecuente el uso en transformadores de papeles térmicamente mejorados. Estos papeles térmicamente mejorados se obtienen añadiendo al transformador bases orgánicas tales como la urea u otras.

2.5 ENVEJECIMIENTO DEL PAPEL

La degradación del papel consiste en la despolimerización del mismo. Y ésta se produce por la ruptura de las cadenas poliméricas. Esta ruptura de las cadenas de monómeros que forman el papel se puede producir por diversos factores y diferentes procesos como veremos a continuación.

Los procesos de degradación de la celulosa son los siguientes:

2.5.1 Hidrólisis

Como hemos visto el principal componente del papel es la celulosa, que es un polímero natural de hidrocarburos que se forma por unidades de anhidroglucosa unidas por un enlace de oxígeno. La unión entre las unidades de glucosa se conoce como el enlace beta-acetal (B-acetal) y se da entre los carbonos 1 y 4. (La hidrólisis de la celulosa consiste en la ruptura de estos enlaces lo que provoca que las cadenas de monómeros sean cada vez más pequeñas reduciendo así la resistencia mecánica del papel. Hay varios tipos de hidrólisis pero en los transformadores de potencia la más frecuente es la hidrólisis ácida.

La hidrólisis ácida es una reacción cíclica y el mecanismo es el siguiente:

1º Ataque protónico (H+) al enlace B-acetal (1-4) de la celulosa

2º Ruptura del enlace y formación del catión carbonio

3º Reacción del radical carbonio con el agua

4º Producción de grupos terminales hidroxilo o carboxilo

5º Liberación de otro radical H+ que realimenta el proceso.

La hidrólisis de una cadena de celulosa da lugar a tres moléculas de agua. Además de ello, la hidrólisis del papel produce CO, CO2, ácidos y compuestos furanos.

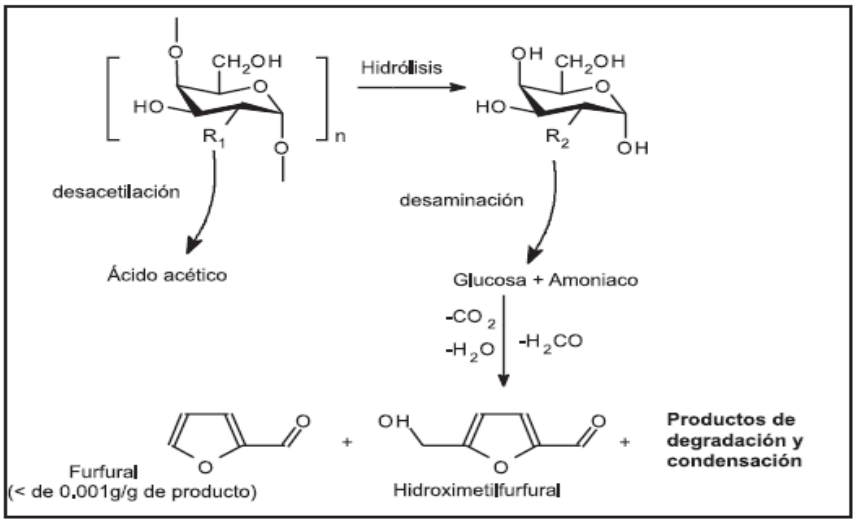


Figura 7. Esquema de rutas de reacción para conversión hidrotérmica de sustancias pécticas y quitina. Fuente: adaptado de Luijkx, 1993; Quitain, 2001; Miyazawa, 2004 y Srokol, 2004. R_1=–NH-$COCH_2$ (para quitina), –COOH (para pectina) R_1=–NH_2 (para quitina), –OH (para pectina

Ilustración 17: Productos creados a partir de la hidrólisis del agua

La humedad es extremadamente dañina para el papel aislante ya que deteriora tanto la rigidez dieléctrica como mecánica y bajo condiciones de sobrecarga promueve la evolución de burbujas de vapor de agua en el aceite. Sin embargo el papel es un compuesto altamente higroscópico, es decir que atrae el agua. Por ello, después de terminar la fabricación del transformador, se introduce éste en un horno bajo vacío donde se somete a un proceso de secado. De esta forma después de la fabricación del transformador, el papel kraft contiene menos del 0.5% de agua. Sin embargo, a lo largo de su vida este valor se incrementa por encima del 5% en parte debido a los procesos de envejecimiento del papel y del aceite y en parte debido a la entrada de agua desde el exterior.

De forma aproximada se puede decir que la tasa de deterioro del papel es proporcional al contenido de agua (Flores, Rattá, Mombello, & Jardini, 2007) de modo que la vida mecánica del aislamiento se reduce a la mitad cuando se dobla el contenido de humedad.

2.5.2 Oxidación

El contenido de oxígeno disuelto en el aceite, también afecta al envejecimiento de los transformadores de potencia ya que reacciona con el aceite creando subproductos químicos derivados de la oxidación como son los ácidos, aldehídos o epóxidos entre otros. Estas sustancias son agresivas para el papel desgarrándolo molécula a molécula reduciendo así las longitudes de las cadenas poliméricas del papel o lo que es lo mismo el grado de polimerización.

Otro factor a tener en cuenta es que en la degradación del papel por oxidación, se produce agua, y como vimos anteriormente el agua debilita las uniones de las moléculas de glucosa del papel.

Durante la oxidación uno de los productos intermedios es el 2-furfural, aunque se producen también otros que son exclusivos de la oxidación como pueden ser el 5-metil-2-fur-aldehido, 2-acetil-fúrano y alcohol furfurílico. (Gasco) Por ello el estudio de estos compuestos furánicos se usa para determinar el grado de envejecimiento del papel.

2.5.3 Pirolisis

La pirolisis de la glucosa se produce cuando el papel se expone a una temperatura superior a 130ºC y por ello se degrada debido a una reacción que descompone la levoglucosa (1,6-anhydro-β-D-glucopyranosa) originando unos azúcares deshidratados que después dan una serie de reordenamientos de enlaces, y una paulatina pérdida de

agua y formaldehido (2-furfural) y otros productos adicionales como son otros tipos de furanos.

La pirolisis puede tener lugar sin acceso a agua u oxígeno o cualquier otro agente para iniciar la descomposición. Bajo las temperaturas normales de funcionamiento o sobrecarga (valores con menos de 140ºC) la pirolisis es de poca relevancia.

En este proceso, se produce Agua, 2-Furfural, CO y CO2.

Los efectos de la degradación por pirolisis se pueden ver en la siguiente imagen.

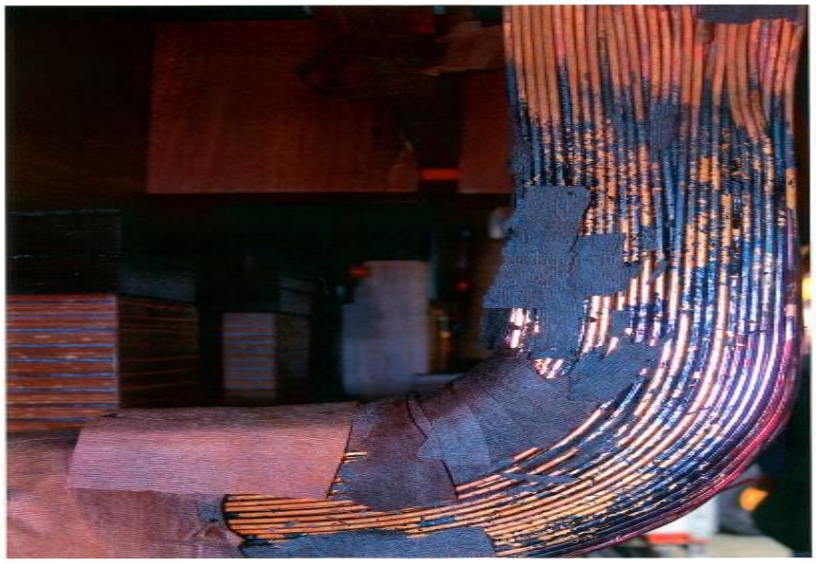


Ilustración 18: Efectos de la degradación del papel por pirolisis

2.5.4 Efectos del envejecimiento

Si la resistencia mecánica del papel del transformador se ve reducida en un 50% se considera que la vida del papel del transformador ha concluido. La medición del valor del grado de polimerización del papel de un transformador es una forma simple para evaluar la vida del papel.

En los papeles térmicamente mejorados la adición de bases orgánicas reduce el contenido en agua del papel.

Como vimos anteriormente, papel y aceite se usan en transformadores de potencia y su estabilidad depende de la temperatura y la cantidad de aire y agua presente en ellos.

Para evitar estos elementos, se han desarrollado diferentes dispositivos que ayudan a aumentar la vida del transformador, estos son:

- Repeler elementos externos:

Para evitar que agua o aire del exterior entren en el transformador se usan los sistemas de preservación mencionados en apartados anteriores.

- Disminuir el efecto de la temperatura:

Para que el efecto de la temperatura no sea tan adverso, se llevan desarrollando durante algunos años papeles cada vez más resistentes a la temperatura.

CAPITULO 3

MODELOS DE PÉRDIDA DE VIDA DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA

Antes de hablar de perdida de vida del transformador de potencia es preciso diferenciar entre pérdida de vida del transformador y pérdida de vida de su aislamiento.

3.1 VIDA DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA Y VIDA DE SU AISLAMIENTO

Las sobrecargas de los transformadores de potencia provocan un incremento de temperatura en el transformador que hace que el aislamiento se degrade más rápidamente (disminuyendo su grado de polimerización) y por lo tanto supone una pérdida de vida del transformador

Las guías de carga del IEEE (IEEE Guide for loading mineral oil-immersed transformers, 1995) e IEC (IEC PUBLICATIONS, 1991) ayudan a un usuario a estimar qué sobrecargas son admisibles y cuáles no, así como la pérdida de vida del transformador. Aunque estas guías de carga son renovadas de forma periódica, la forma de evaluar el envejecimiento del transformador data de hace más de 50 años. Según estas guías, el envejecimiento del aislamiento de los transformadores, se da casi exclusivamente por la degradación térmica de las propiedades del papel aislante.

Sin embargo, debido a los muchos factores que contribuyen al deterioro del aislamiento del transformador (térmico, químico, fatiga mecánica y eléctrico) y que influyen en el efecto acumulativo de la temperatura en un determinado tiempo, se hace casi imposible predecir con exactitud la vida útil del aislamiento en condiciones controladas por lo que es más difícil aun determinar la vida útil del aislamiento en situaciones de servicio sujetas a cambios inesperados.

En las guías de carga del IEEE, siempre que se utiliza el término "vida", se hace referencia a la vida estimada del aislamiento y no a la vida real del transformador, por la razón que se indica a continuación:

- La capacidad aislante de un papel despolimerizado es casi tan elevada como la de un papel nuevo, por tanto desde el punto de vista dieléctrico un papel despolimerizado es capaz de soportar los campos eléctricos que se van a dar en un transformador, por lo tanto, aunque se alcance el fin de vida predicho por las normas el aislamiento sigue ejerciendo su misión.

- Sin embargo, un papel despolimerizado no tiene casi resistencia mecánica. Cuando se alcanza el fin de vida predicho por las normas, el transformador puede seguir realizando su función, pero sin seguridad de suministro, ya que en el caso de que se produjera un cortocircuito fortuito en la red, el papel aislante del transformador no sería capaz de soportar los esfuerzos mecánicos y el cortocircuito externo derivaría en un cortocircuito interno del trasformador que lo dejaría fuera de servicio sin posibilidad de reposición inmediata del servicio.

En cualquier caso la vida de un transformador es una incógnita pues además de la temperatura depende de muchos otros factores (calidad del mantenimiento, sobretensiones y sobrecorrientes, etc). Por ello estimar de forma absoluta la vida restante de un equipo es difícil ya que no hay ni siquiera una definición clara de "fin de vida" y esto implica realizar muchas suposiciones. El punto de final de vida del aislamiento es una variable desconocida teniendo en cuenta el continuo debate en la comunidad científica acerca de los valores de "vida normal" y el punto de "final de vida" (IEEE Guide for loading mineral oil-immersed transformers, 1995), (SEN, 2001, 29 April- 1 May 2001).

3.1.1 Punto del final de vida del transformador de potencia:

El punto de final de vida del trasformador de potencia se puede clasificar en función de varios aspectos:

1- Final de vida técnico: se da cuando el transformador debería ser puesto fuera de servicio debido a razones técnicas, físicas o a un cierto debilitamiento de la integridad técnica del transformador

2- Final de vida estratégico: ocurre por cambios en la red, como cambios de tensión de servicio, cargabilidad o variaciones de la capacidad de cortocircuito de transformadores viejos.

3- Final de vida económico: debido a condiciones económicas de la empresa que lo explota. Este final de vida esta propiciado por elevadas pérdidas de transformación o elevados costes de mantenimiento.

3.1.2 Final de vida del aislamiento (McNutt, 1992)

Los factores determinantes en el criterio de final de vida del papel aislante son las características mecánicas del papel. Si usamos los valores del grado de polimerización como criterio de final de vida del aislamiento hay que tener en cuenta la relación entre la resistencia mecánica del papel y el grado de polimerización que se muestra en la ilustración 19.

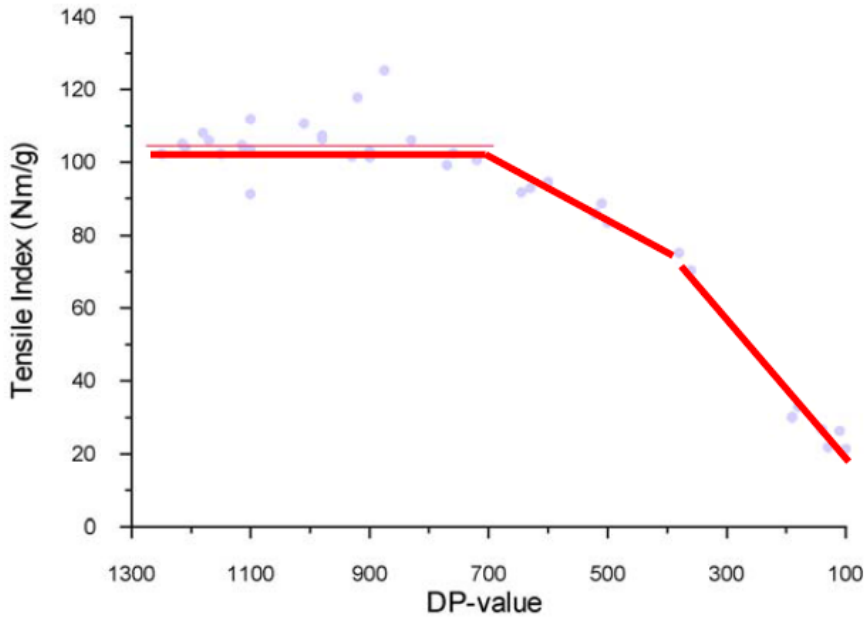


Ilustración 19: Resistencia del papel en función del grado de polimerización.

En la fabricación del transformador, el Grado de Polimerización del papel (DP), se encuentra entre 1000 y 1300. A medida que el transformador va envejeciendo el grado de polimerización se va reduciendo. Para valores del grado de polimerización entre 950 y 500, la rigidez mecánica del papel es constante. Sin embargo, entre 500 y 200, la rigidez mecánica del papel decrece de forma proporcional al grado de polimerización hasta llegar a 150 donde la rigidez mecánica del papel apenas llega al 20% de su valor inicial y por debajo de este valor el papel la rigidez mecánica del papel es casi nula. No todos los investigadores usan el mismo valor de fin de vida, así Shroff (Shroff & Atannett, 1985) usa 250 mientras que McNutt (McNutt, 1992) usa 200. Sin embargo, normalmente en la industria se considera que con un grado de polimerización menor de 200, el papel pierde todas sus propiedades mecánicas (A.M Emsley, 2000).

3.1.3 Correlación entre la vida y la temperatura

Desde la aparición de los primeros transformadores, la industria ha intentado obtener un valor numérico aproximado de la vida de los trasformadores de potencia, en este sentido se han desarrollado tres métodos para determinar este valor: (Flores, Rattá, Mombello, & Jardini, 2007)

- Modelos matemáticos para la estimación de la vida del transformador o de su grado de polimerización, tales como los modelos proporcionados por las guías de carga de la normativa
- Obtención del grado de polimerización a partir de ecuaciones matemáticas que relacionen DP con las condiciones de funcionamiento del transformador (temperatura, contenido en agua, etc). Este es el método en el que se centra este Trabajo Fin de Grado
- La obtención del grado de polimerización a partir de indicadores químicos, como puede ser la medida del contenido de furanos en el aceite.

Las guías de carga son una herramienta para determinar a qué grado de carga se puede someter un transformador sin pérdida de vida, así como la pérdida de vida que

se tendría si se somete al transformador a un grado de carga mayor. La vida calculada según las guías de carga suele ser un valor bastante conservador.

Como se indicó hay dos guías de cargas principales, que son la guía de carga internacional (IEC) y la guía de carga americana (del IEEE). La guía IEC se suele usar para los aislamientos de papel Kraft normal, sin mejora térmica; en esta guía la temperatura del punto caliente está limitada a 98ºC y la temperatura ambiente a 20ºC. Sin embargo, en Estados Unidos es muy frecuente el uso de papel térmicamente mejorado (TUK) , por ello la guía del IEEE limita el punto caliente en 110ºC y la temperatura ambiente a 30ºC.

En la guía de carca IEEE se utiliza el modelo de pérdida de vida de Arrhenius-Dakin y en la norma IEC se utiliza el modelo de pérdida de vida de Montsinger. Ambos se describen a continuación.

3.1.4 Modelo de Arrhenius-Dakin.

Este modelo parte de la base de que las fatigas eléctricas, mecánicas y del medioambiente no tienen un impacto notable en la vida del aislamiento durante la operación normal del transformador [flores]. Por tanto, este modelo es un modelo de fatiga simple, porque solo tiene en cuenta la temperatura como único factor que degrada el papel aislante.

La ecuación de la vida según el modelo de Arrhenius-Dakin es

$$\text{Vida remanente} = \mathrm{L} = \mathrm{A}e^{B/T}$$

Donde A=la vida inicial, B=constante que depende de la energía de activación de una reacción química específica que depende de la temperatura y T es la temperatura en grado Kelvin. Un posible valor de B puede ser 15000 como propone McNutt (McNutt, 1992).

Esta ecuación suele representarse como:

$$Ln(L) = Ln(A) + B/T$$

Esta modelización está basada en la existencia de una reacción química principal. En realidad, como se indicó en el capítulo anterior, en un transformador tienen lugar otras reacciones químicas de forma simultánea, si bien para cada temperatura una de las reacciones es dominante, como puede verse en el siguiente gráfico:

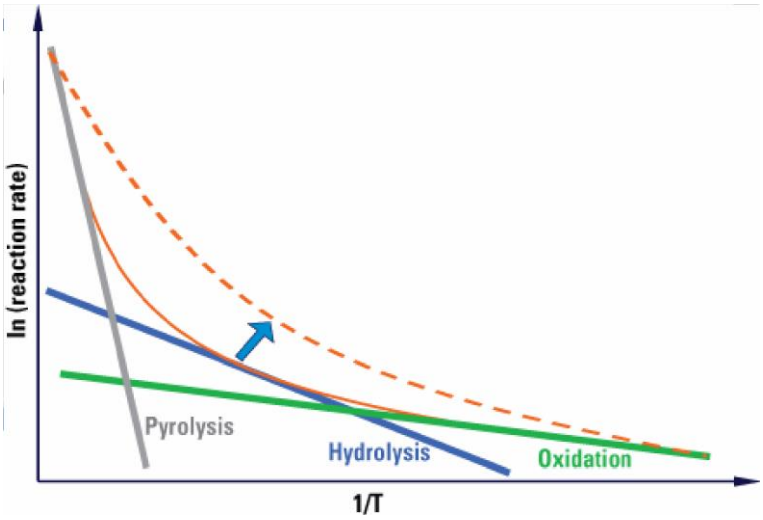


Ilustración 20: Reacción predominante en función de la inversa de la temperatura.

En la vida de un transformador, los procesos de hidrólisis, oxidación y pirolisis se dan de manera simultánea, por lo tanto el gráfico de Arrhenius resultante no es de forma lineal. Esto dificulta la aplicación de un modelo que describa de la forma más eficaz los modelos que describen la complejidad de los procesos de degradación del papel aislante de un transformador. Debemos siempre determinar qué proceso domina dependiendo de la temperatura y condiciones, que son el oxígeno, el agua y el contenido en ácidos del aceite.

Este modelo permite obtener una medida de la vida esperada de un material aislante a temperatura de operación normal.

Dado que no existe un valor de "vida absoluta", en la guía IEEE, se define la "vida por unidad" (Unsworth & Mitchell, 1990)

$$vida\ (p.u.) = 9.8 \cdot 10^{-18} \cdot e^{[\frac{15000}{\theta_H+273}]}$$

Y el "factor de aceleración de envejecimiento" o F_{AA}.

$$F_{AA} = e^{[\frac{15000}{383} - \frac{15000}{\theta_H + 273}]}$$

Donde θ_H es la temperatura en el punto más caliente.

El valor de F_{AA} se utiliza para calcular el F_{EQA} o envejecimiento equivalente del transformador, es decir, la vida que será consumida en un periodo de tiempo t para un ciclo de temperatura dado.

$$F_{EQA} = (t)^{-1} \int_0^t F_{AA}\, dt$$

El porcentaje de pérdida de vida se define como:

$$\%Perdida\ de\ vida = F_{EQA} \cdot t \cdot 100/NIL$$

La NIL es la vida normal del aislamiento, y suele ser conocida, de no ser así el usuario es libre de seleccionar un valor adecuado.

3.1.5 Modelo de Montsinger.

En la guía de carga de la IEC no se utiliza la ley de Arrhenius, sino una ley obtenida de forma experimental llamada ley de Motsinger (Fessler, Rouse, McNutt, & Compton, 1989), que muestra que la tasa de envejecimiento se dobla por cada incremento de 6 ºC de la temperatura de operación sobre la temperatura base de envejecimiento, que la guía IEC fija en 98 ºC para los papeles Kraft normales

$$Tasa\ de\ Envejecimiento\ Relativo = V = 2^{\frac{\theta_H - 98}{6}}$$

La pérdida de vida en la guía de IEC queda plasmada con la siguiente ecuación:

$$L = \frac{1}{t} \int_{t_1}^{t_2} V dt$$

En Ilustración 21: Comparación de los resultados obtenidos para el FAA por el IEEE e ICE podemos ver una comparación de los resultados de envejecimiento obtenido siguiendo los modelos de cada guía de carga. Para que los modelos sean comparables

la temperatura base de envejecimiento debe ser la misma. Por eso en la figura se muestra una tasa de envejecimiento tomando como temperatura base 98ºC y otra tasa de envejecimiento tomando como temperatura base 110ºC.

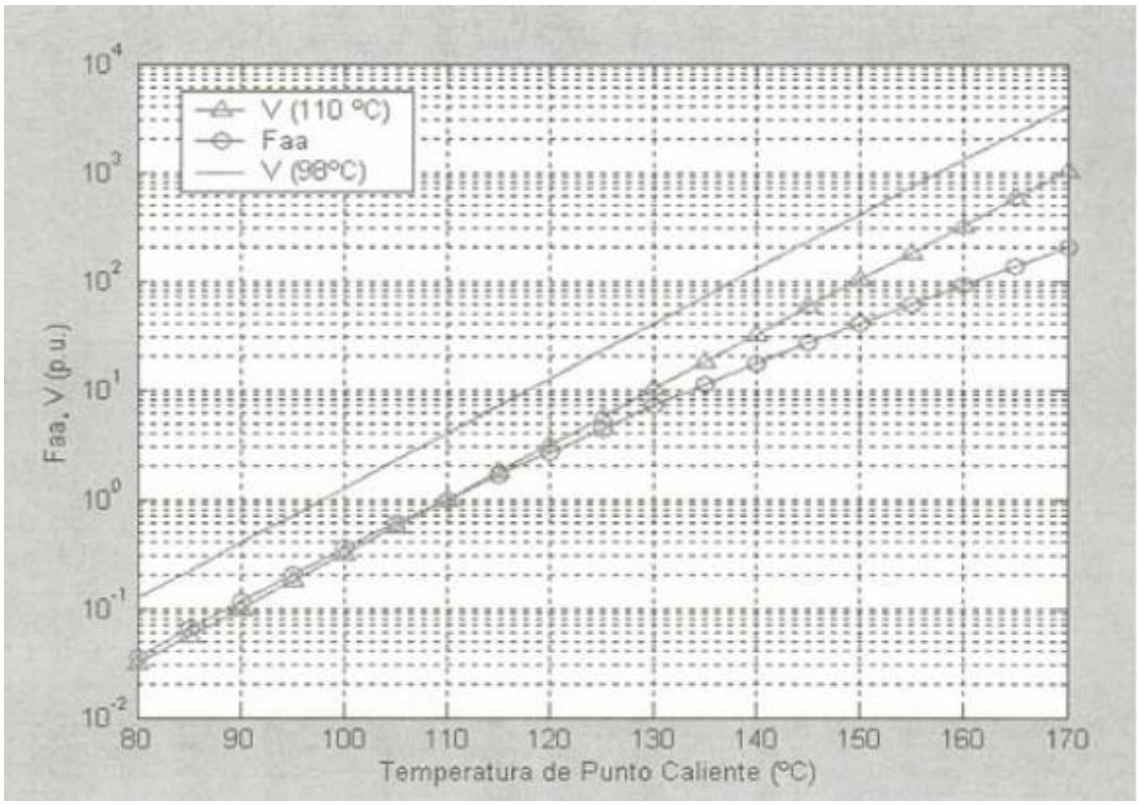


Ilustración 21: Comparación de los resultados obtenidos para el FAA por el IEEE e ICE a diferentes temperaturas

Como se puede observar, hasta 130ºC ambas guías arrojan resultados muy similares y a medida que la temperatura aumente la diferencia entre ellas también lo hace.

Las leyes de Arrhenius-Dakin y de Montsinger utilizadas en las guías de carga tienen dos inconvenientes: el primero es que no tienen en cuenta otros factores diferentes de la temperatura como factor de envejecimiento, el segundo que requieren conocer la vida base del transformador sobre la que se expresa la vida en p.u.

Por ello surgen otros modelos que permiten calcular el grado de polimerización del papel del transformador en lugar de la vida de papel.

3.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE MODELOS DE PÉRDIDA DE VIDA

La operación continuada de un transformador depende del estado de su papel aislante. El estado del papel viene cuantificado por el grado de polimerización o la media de número de cadenas de glucosa por macromolécula.

El grado de polimerización del papel dentro de un transformador nuevo después del proceso de secado es alrededor de 1000. El final de la vida útil del papel se recomienda que sea para un grado de polimerización de 200 ya que en ese momento el papel es muy frágil y pierde su resistencia mecánica.

La Temperatura, el agua, el oxígeno y los ácidos del aceite mineral degradan el papel en el tiempo por lo que es necesario investigar como estos parámetros determinan la vida operativa del transformador.

Numerosos grupos de investigación a lo largo de los años han estudiado los efectos de diferentes ambientes químicos en la degradación del papel aislante en busca de un modelo que sea capaz de determinar el grado de polimerización de un papel aislante en función de sus condiciones de trabajo.

McNutt et al (McNutt, 1992) estudiaron la degradación del papel y la relacionaron con los tres procesos químicos que influyen en la vida del papel que como vimos anteriormente estos son: Hidrolisis (agua), Oxidación (Oxígeno), y Pirolisis (calor).

3.2.1 Modelo de Emsley.

La ventaja del modelo de Emsley es que expresa el envejecimiento como un proceso físico.

Emsley y Stevens mostraron en sus estudios que la mayoría de los datos sobre envejecimiento de celulosa pueden ser modelados por la ley de una reacción de orden cero, representados por la ecuación de Ekenstam.

Para una reacción del tipo

$$A \Rightarrow B + C$$

La variación de la concentración de compuesto A, que representaremos mediante [A], puede ser descrita por la ecuación

$$\frac{d[A]}{dt} = k[A]$$

Integrando se llega a

$$[A] = [A_0]e^{kt}$$

Para el caso de polímeros lineales la concentración de A puede ser sustituida por el número total de enlaces no rotos entre monómeros (esto es, el número de monómeros en la cadena menos 1: N-1). Si inicialmente se tienen M_0 moléculas de polímeros de diferentes longitudes que contienen en total N_0 monómeros, el grado de polimerización medio (número medio de monómeros en cada polímero) será

$$DP_0 = \frac{N_0}{M_0}$$

Y el número inicial de enlaces entre monómeros será

$$l_0 = N_0 - M_0 = N_0\left(1 - \frac{1}{DP_0}\right)$$

Al cabo de un cierto tiempo las M_0, moléculas iniciales, se habrán fragmentado, con lo que se tendrán M_t moléculas (evidentemente el número de monómeros no ha cambiado), con lo que ahora el grado de polimerización será

$$DP_t = \frac{N_0}{M_t}$$

Y el número de enlaces entre monómeros será

$$l_t = N_0 - M_t = N_0\left(1 - \frac{1}{DP_t}\right)$$

Admitiendo que la cinética de las escisiones es de orden 1, el número de enlaces no rotos será

$$-\frac{dl_t}{dt} = kl_t$$

Integrando se llega a

$$l_t = l_0 \cdot e^{-kt}$$

Sustituyendo l_t y l_0 queda

$$log\left(1 - \frac{1}{DP_t}\right) - log\left(1 - \frac{1}{DP_0}\right) = -kt$$

El desarrollo en serie de Taylor de la función logaritmo en el entorno del punto cero (serie de MacLaurin) es

$$\log(1+x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} x^n$$

Con lo que, despreciando todos los sumandos de la serie, excepto el primero (por ser infinitésimos de orden superior), llegamos a que en el caso de que DP_t y DP_0 sea muy grandes, la expresión anterior se convierte en:

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0} = kt \qquad (1)$$

Esta ecuación sólo es cierta si el polímero es lineal y de gran peso molecular, los productos de escisión del polímero son a su vez cadenas poliméricas lineales y largas, el número de escisiones en la parte final de la cadena es pequeño y no hay pérdida de monómeros durante la escisión (por ejemplo por formación de furanos).

Emsley también relacionó la tasa de reacción k con una ecuación tipo Arrhenius:

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \qquad (3)$$

Donde Ea es la energía de activación, R la constante de los gases y T la temperatura de la reacción en K.

El valor del parámetro A depende del ambiente químico en el que se encuentre, de la concentración de agua, de oxígeno y ácidos. El parámetro A, deberá ser obtenido con el fin de aplicar correctamente la ecuación.

Para predecir el fin de la vida del papel, Emsley sustituyó la ecuación (3) dentro de la ecuación (1) y obtuvo lo siguiente:

$$\frac{1}{DP_{periodo\ de\ envejecimiento}} - \frac{1}{DP_{inicial}} = A\ x\ periodo\ de\ envejecimiento\ x\ e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (4)$$

Por lo que Emsley reorganizó esta ecuación para calcular el final de la vida del papel para una temperatura dada con la siguiente ecuación:

$$Vida\ esperada(años) = \frac{\frac{1}{DP_{final}} - \frac{1}{DP_{inicial}}}{Ax24x365}\ x\ \ e^{\frac{-E_a}{RT}}$$

Es preciso indicar que en un transformador el valor A no es constante durante toda su vida ya que las reacciones que van teniendo lugar en su interior, generan agua y ácidos que provocan que el valor de A aumente y con ello el grado de envejecimiento.

La ecuación $-\frac{dl_t}{dt} = kl_t$ ha sido obtenida sobre la base de que no hay pérdida del número de monómeros durante los procesos de envejecimiento. Emsley notó que a medida que el grado de polimerización disminuye por debajo de 200 el coeficiente k de la ecuación (1) no es constante sino que disminuye a medida que el aislamiento envejece y modeló lo datos experimentales usando la ecuación de una reacción de Primer Orden. (2)

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0} = \frac{k_{1o}}{k_2}(1 - e^{(-k_2 t)}) \quad (2)$$

Emsley sugirió que la reducción del ratio de envejecimiento es debido a la reducción de los reactivos y del peso molecular de la celulosa.

3.3 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO

Para determinar un modelo dinámico que calcule la vida restante de los papeles aislantes, los valores de A deben ser determinados para todas las condiciones de agua y oxígeno que se pueden dar en el papel.

La energía de activación (Ea) depende del tipo de celulosa y de la reacción química. La energía se calcula de forma gráfica representando el logaritmo de la constante de envejecimiento k con respecto a –Ea/R

$$\ln(k) = \frac{-E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} + \ln(A) \quad (5)$$

En 1994, Emsley demostró con una serie de experimentos con diferentes condiciones que la energía de activación para el papel Kraft es de 111 KJ/mol y es igual para hidrólisis y oxidación. (A.M Emsley, 2000)

En 2004, Lundgaard usó esta energía de activación de 111 kJ/mol y calculó diferentes valores de A de forma experimental para compararlos con los valores de A obtenidos por Emsley. Los valores obtenidos por Lundgaard se muestran en Tabla 1: Valores de constante A para diferentes humedades.

Table 1. Previously reported A-values (h^{-1}) based on an activation energy of 111 kJ/mol.

	Emsley's data		Lundgaard's data	
Test Condition	Kraft paper E_a = 111 kJ/mol	95 % conf. bounds	Kraft paper E_a=111 kJ/mol	Thermally upgraded paper (Insuldur) E_a = 111 kJ/mol
Dry & clean	1.1E+08	(0.2-4.7)E+08	(2.0±0.5)E+08	(0.7±0.1)E+08
0.7 % water				(1.1±0.5)E+08
1 % water	3.5E+08	(0.8-15)E+08		
1.5 % water			(6.2±2.9)E+08	
2 % water	7.8E+08	(1.8-33)E+08		
3 % water (paper in air)				(2.6±1.7)E+08
4 % water (paper in oxygen)	35E+08	(7.7-157)E+08		
4.1 % water			(21.0±7.8)E+08	

Tabla 1: Valores de constante A para diferentes humedades.

En 2009, Lundgaard obtuvo la energía de activación tanto para papel Kraft como para papel mejorado térmicamente (TUK) y mostró que la energía de activación para hidrólisis y oxidación es diferente para cada proceso y para cada tipo de papel. Mostrando que el agua no afecta a la energía de activación para niveles menores del 3.5 % de agua en el papel.

Table 2. Reported A and E values for hydrolysis of Kraft paper.

Parameter	Dry, no oxygen	1.5 % water	3.5 % water
	hydrolysis		
E_a-value (kJ/mol)	128	128	128
A-value (h^{-1})	4.1E+10	1.5E+11	4.5E+11

Table 3. Reported A and E values for hydrolysis of thermally upgraded paper (Insuldur).

Parameter	Clean system	1.5 % water	3.5 % water
	hydrolysis		
E_a-value (kJ/mol)	86	86	86
A-value (h^{-1})	1.6E+04	3.0E+04	6.1E+04

Tabla 2: Valores de Ea y A para papel Kraft y TUK con diferentes niveles de humedad.

Dentro del gran número de investigadores que han tratado de encontrar el valor de los parámetros de la ecuación de Emsley cabe destacar el trabajo realizado por Lelekakis et al (Lelekakis, Martin, & Wijaya, 2012) ya que es el más completo y reciente. Este estudio se detalla a continuación.

3.3.1. Estudios de Lelekakis

Lelekakis y su equipo en la universidad de Monash (Australia) realizaron dos estudios sobre el envejecimiento del papel:

- Para baja concentración de oxígeno (6000ppm) lo que equivaldría a transformadores sellados en los que no hay intercambio de aire con el exterior.
- Para media y alta concentración de oxígeno (>6000ppm) lo que equivaldría a transformadores que intercambian aire con el exterior mediante el depósito de expansión.

3.3.1.1. Estudios para baja concentración de Oxígeno.

Lelekakis cayó en la cuenta de que los ensayos de envejecimiento del papel normalmente se llevan a cabo en recipientes sellados a elevada temperatura. En estos experimentos el contenido de agua del papel no se mantiene constante a lo largo del periodo de envejecimiento ya que el contenido en agua del papel o bien se incrementa debido a las reacciones de envejecimiento o bien decrece si se consume en otras reacciones o por fugas en el sellado.

Dado que, como se vio, el coeficiente A depende del contenido en agua, cuando el agua es consumida en el recipiente sellado dará resultado a un envejecimiento del papel más lento que en el experimento donde el agua se mantiene constante. Lo contrario ocurre si se produce agua.

Lelekakis en su investigación, quería determinar si manteniendo constante el contenido en agua del papel mejoraba significativamente la tasa de envejecimiento y si se producen cambios significativos en el valor de A obtenido y en la energía de activación para papel Kraft y papel Kraft mejorado térmicamente (TUK).

Para ello, envejecieron las muestras de papel y el aceite mineral fue secado y desgasificado. En este experimento, se colocaron sondas de humedad en los recipientes para controlar el contenido de agua del papel para luego comparar el envejecimiento con el del papel que estaba en un recipiente sellado.

El contenido en agua inicial se obtuvo acondicionando dos trozos de pressboard tipo Kraft secado en un horno durante 3 horas. Más tarde, fueron llevados al laboratorio donde se colocaron en una báscula ya que el pressboard absorbe humedad del aire, y la forma más sencilla de medir el aumento de humedad en el pressboard es comprobando el aumento de peso. Cuando el pressboard tuvo el nivel de humedad deseado, se sumergió en aceite. Al sumergir el pressboard en el aceite, hubo un intercambio de agua entre el papel, el pressboard y el aceite hasta que se consiguió un equilibrio.

Las muestras de papel no habían sido acondicionadas antes de usarlas en el experimento por lo que mantenían su grado de polimerización inicial. Varias muestras de pressboard de papel tipo TUK también se añadieron a la muestra.

Durante los experimentos, el contenido en agua en el papel se deducía a partir del contenido en agua en el aceite del transformador ya que a temperatura constante, existe cierto equilibrio termodinámico entre la concentración de agua en el papel y la concentración de agua en el aceite, por lo que podemos calcular el contenido en agua del papel mediante la concentración de agua en el aceite (Lelekakis N. , Martin, Guo, Wijiaya, & Lee, 2012) (Fessler, Rouse, McNutt, & Compton, 1989) (Oommen & Prevost, 2006).

La concentración de agua en el aceite fue continuamente monitorizada (mediante una sonda introducida en la cuba) y ajustada para mantener el nivel deseado. En los experimentos en los que las reacciones consumian agua, se añadieron cantidades medidas de agua para mantener el nivel constante, al contrario que en los experimentos donde las reacciones producian agua, en los que se extrajo agua de las muestras para reducir ese contendido.

El método usado para extraer o añadir agua, era reemplazar las muestras de pressboard por otras reacondicionadas.

El grado de polimerización del papel se mido según las normas D4243 ASTM (ASTM D3612-02, 2002).

Los experimentos fueron realizados con bajas concentraciones de oxigeno (6000 ppm) y el contenido en agua se establecio en tres niveles: 0.5%, 1.6% y 2.7%. Las temperaturas a las que se realizó el ensayo de envejecimiento estaban entre 100 y 160 ºC.

El envejecimiento del papel Kraft durante el ensayo se puede ver en la Ilustración 22: Evolución del Grado de Polimerización del papel Kraft para diferentes niveles de humedad y temperatura de envejecimiento. donde se representa la evolución del grado de polimerización con respecto al tiempo para las diferentes muestras del estudio.

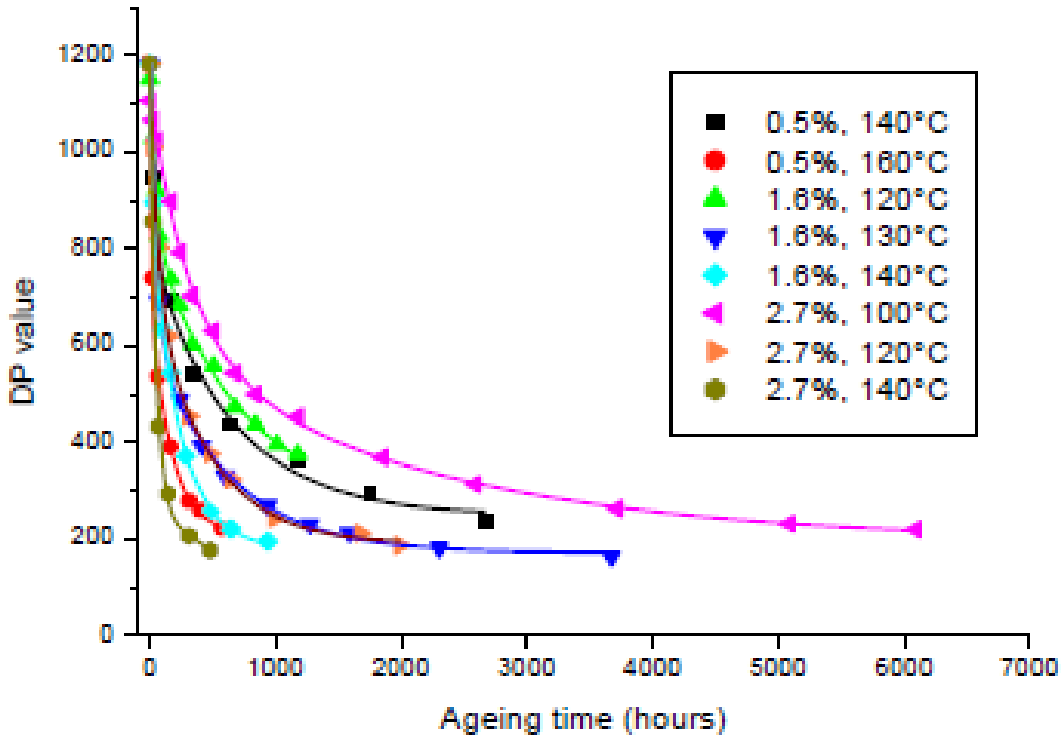


Ilustración 22: Evolución del Grado de Polimerización del papel Kraft para diferentes niveles de humedad y temperatura de envejecimiento.

En la siguente gráfica podemos ver la misma evolución pero esta vez para el papel Kraft termicamente mejorado (TUK).

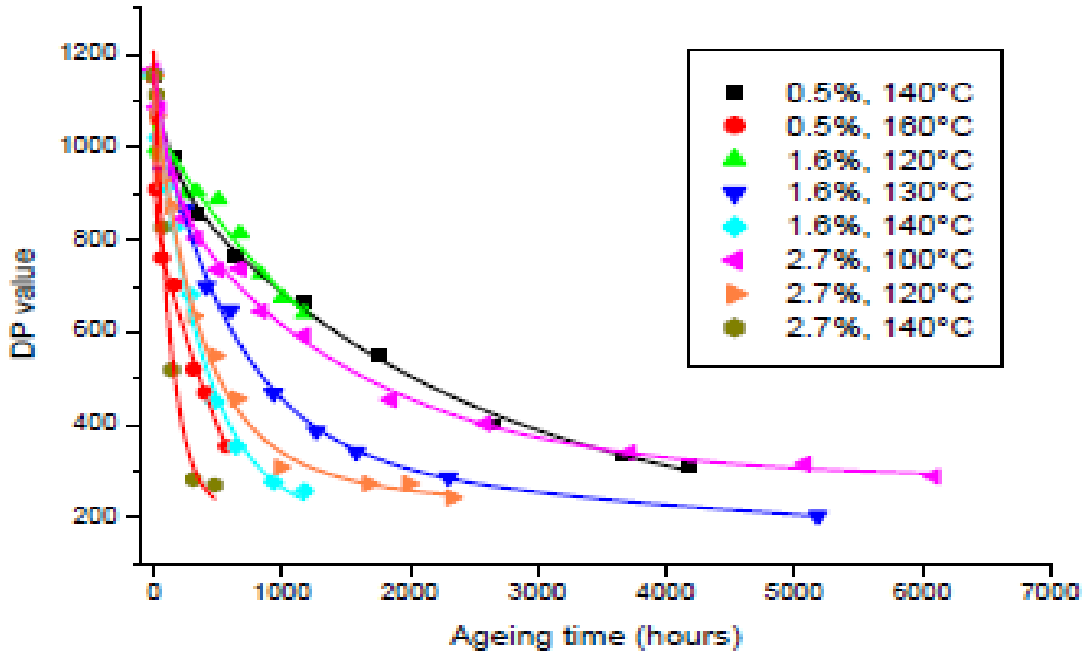


Ilustración 23: Evolución del Grado de Polimerización del papel Kraft Térmicamente Mejorado para diferentes niveles de humedad y temperatura de envejecimiento.

En ambas gráficas, vemos que la tendencia del grado de polimerización se ajusta a las previsiones ya que un aumento de agua y/o de temperatura provoca un aumento en la degradación de la celulosa tanto para el papel Kraft como para el papel Kraft térmicamente mejorado.

Cuando el contenido en agua inicial era bajo, un 0.5 %, a medida que envejece el papel, el agua aumenta tanto para la temperatura de 140 ºC como para la de 160ºC, y esto es debido probablemente a la pirólisis de la celulosa, que como vimos anteriormente genera agua, y en una pequeña cantidad a la oxidación del aceite (Lampe & Spicar, 1976) (Lelekakis, Martin, & Wijaya, 2012).

La variación del nivel de agua puede verse en las siguientes gráficas:

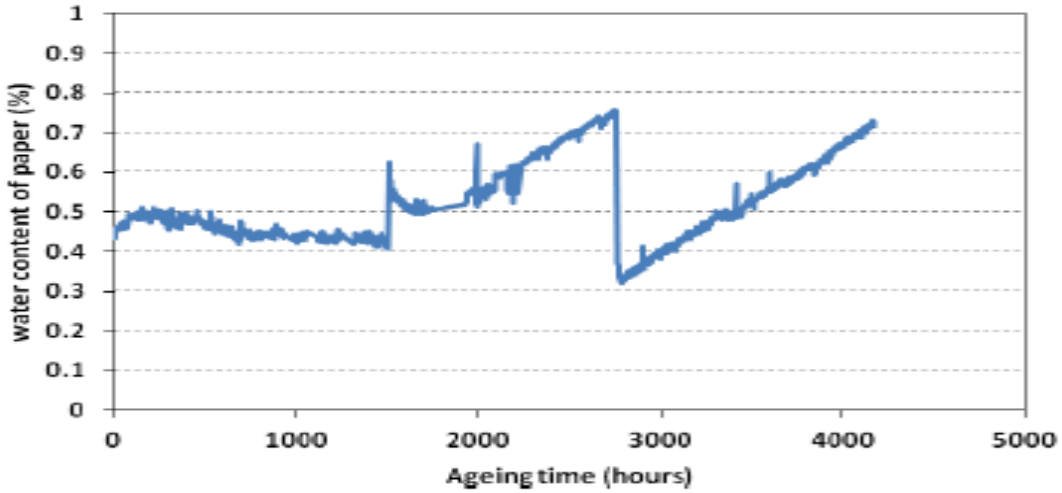


Ilustración 24: Evolución del contenido en agua en la muestra estudiada para 0.5% de agua inicial, 140 ºC y baja concentración de oxígeno.

Sin embargo, cuando el contenido en agua inicial es alto, 1.6 % y 2.7 %, el agua va reduciéndose debido a la hidrólisis de la celulosa ya que como vimos anteriormente se consume una molécula de agua por cada separación en la celulosa. (Lampe & Spicar, 1976)

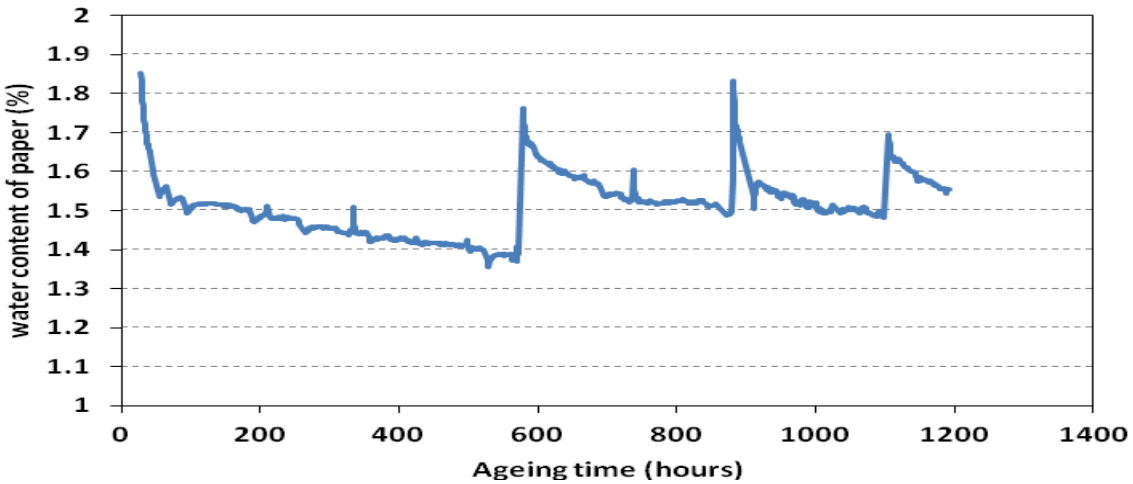


Ilustración 25: Evolución del contenido en agua en la muestra estudiada para 1.6% de agua inicial, 160 ºC y baja concentración de oxígeno.

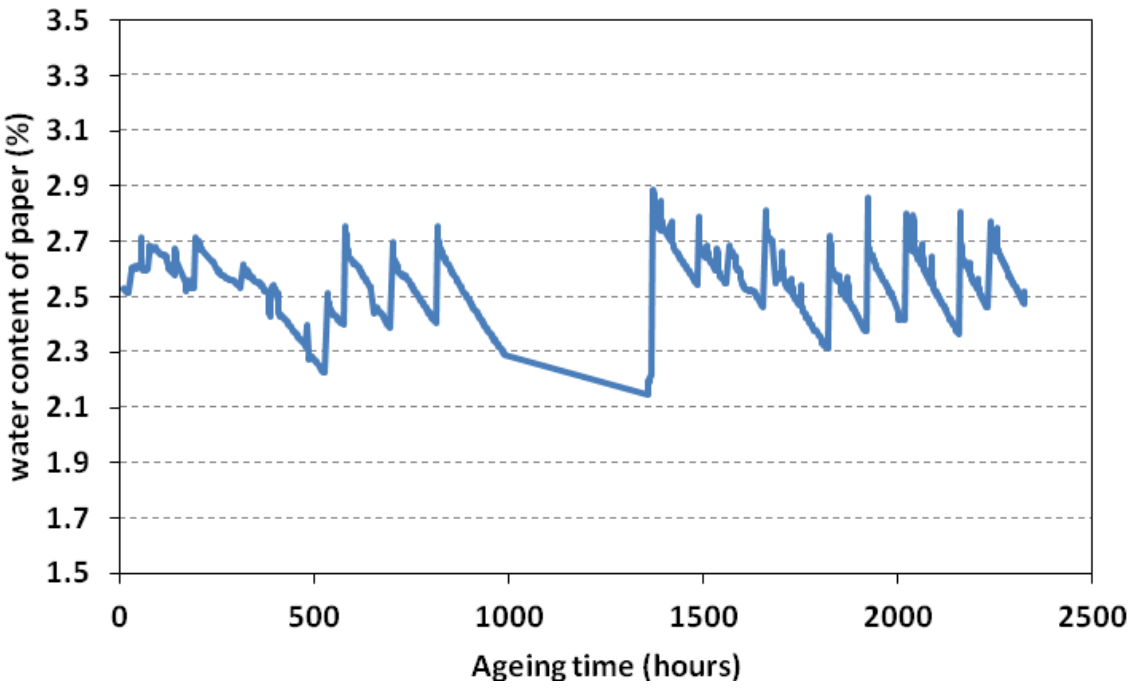


Ilustración 26: Evolución del contenido en agua en la muestra estudiada para 2.7% de agua inicial, 120 ºC y baja concentración de oxígeno.

Como se puede ver en las gráficas, en los experimentos en los que se consumía agua, se añadió agua al aceite para tratar de mantener el nivel deseado. En el caso del experimento de 0.5% de concentración inicial, al aumentar el nivel de agua en el papel se sustituyeron las muestras de pressboard por otras secas para que estas absorbieran el agua y la mezcla volviera a la concentración inicial deseada.

Aunque es obvio que hay cambios en el contenido en agua del papel, es difícil cuantificar el cambio debido al envejecimiento del papel ya que algunas de estas variaciones son debidas a pequeñas evaporaciones en el sistema y a la hidrólisis y a la oxidación del pressboard.

Lelekakis et al estudiaron si manteniendo el nivel de agua en el papel con una baja concentración de oxígeno, el ratio de degradación se mantenía constante para papel Kraft y papel Kraft térmicamente mejorado.

En la siguiente gráfica podemos ver la evolución del oxígeno en el aceite. Parte del oxígeno inicial se consumió debido a la oxidación del papel y del aceite por lo que el nivel de oxígeno se mantuvo bajo durante toda la prueba.

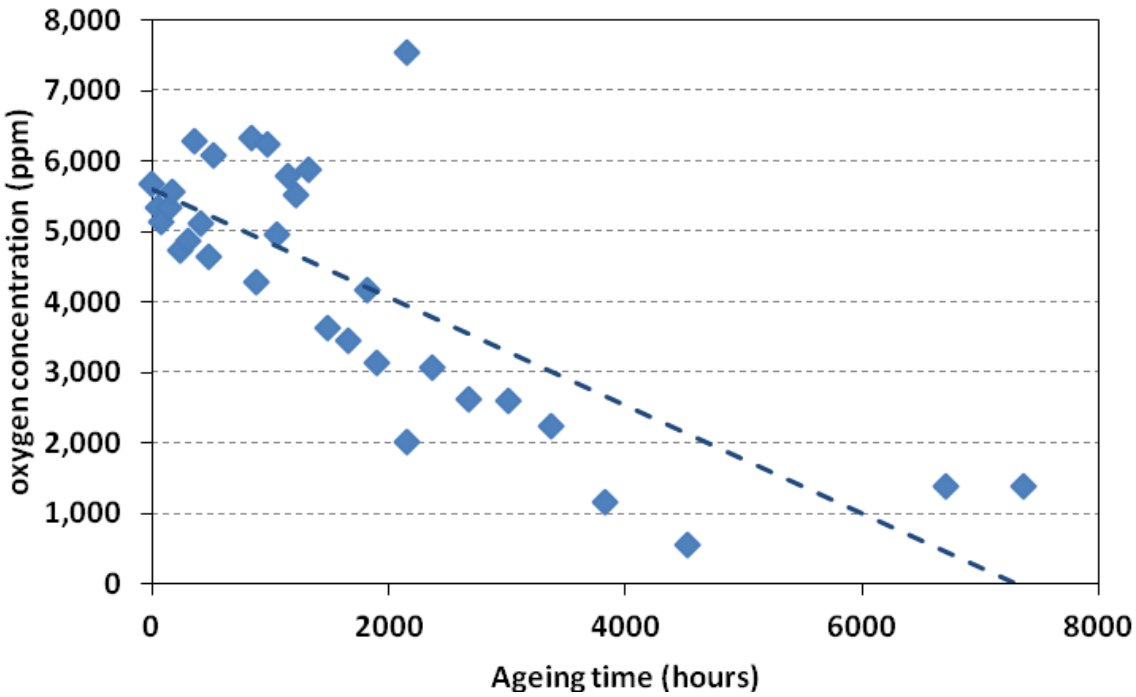


Ilustración 27: Evolución del oxígeno en el aceite.

Como se indicó, Emsley sugirió que la reducción en el grado de envejecimiento, cuando el grado de polimerización es menor de 200 es debido a la reducción en el peso molecular de la celulosa y una reducción de los reactivos. Al mantener las condiciones del experimento, al contrario que en el sistema aislado, vemos que las isotermas, no son lineales. Por lo que la ecuación de orden cero de Ekenstam no puede ser utilizada para un modelo preciso de cada reacción. Sin embargo con una extrapolación lineal de los datos se pueden comparar los valores de la energía de activación Ea y de A con los obtenidos por Emsley y Lundgaard.

Los ratios de las reacciones, determinados por la ecuación $\left(\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0}\right)$, con respecto al tiempo se muestran en la siguiente tabla. Donde se puede comparar los ratios de envejecimiento del papel Kraft y el papel Kraft térmicamente mejorado.

	% (w/w) H_2O					
	0.5		1.6		2.7	
T (°C)	Kraft	TUK	Kraft	TUK	Kraft	TUK
100					0.62E-06	0.44E-06
120			1.48E-06	0.50E-06	2.40E-06	1.43E-06
130			2.32E-06	0.80E-06		
140	1.21E-06	0.56E-06	5.79E-06	2.77E-06	12.84E-06	6.73E-06
160	6.18E-06	3.12E-06				

Tabla 3: Ratios de envejecimiento respecto al tiempo para papel Kraft y TUK a diferentes niveles de humedad y temperatura.

Vemos que el papel Kraft Térmicamente Mejorado tiene un índice de envejecimiento menor que el papel kraft cuando hay bajas concentraciones de oxígeno a las temperaturas y contenidos de agua del papel estudiados.

El grado de polimerización expresado como $\left(\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0}\right)$ con respecto al tiempo se muestras en las siguientes gráficas:

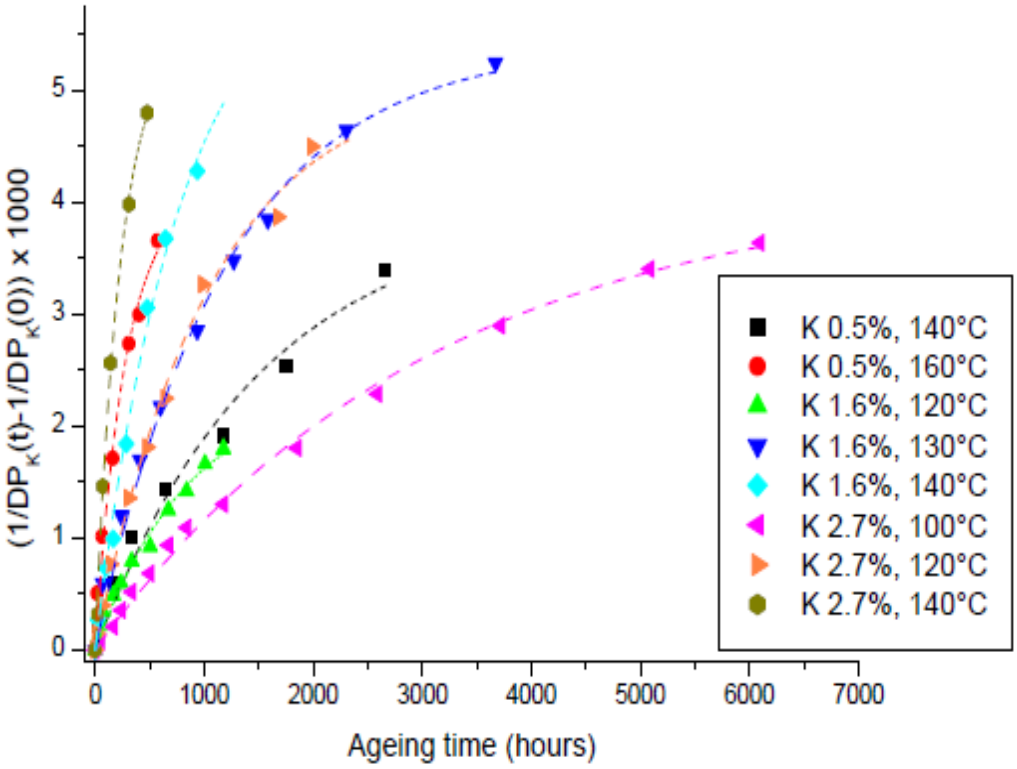


Ilustración 28: Grado de polimerización con respecto al tiempo de envejecimiento para papel Kraft

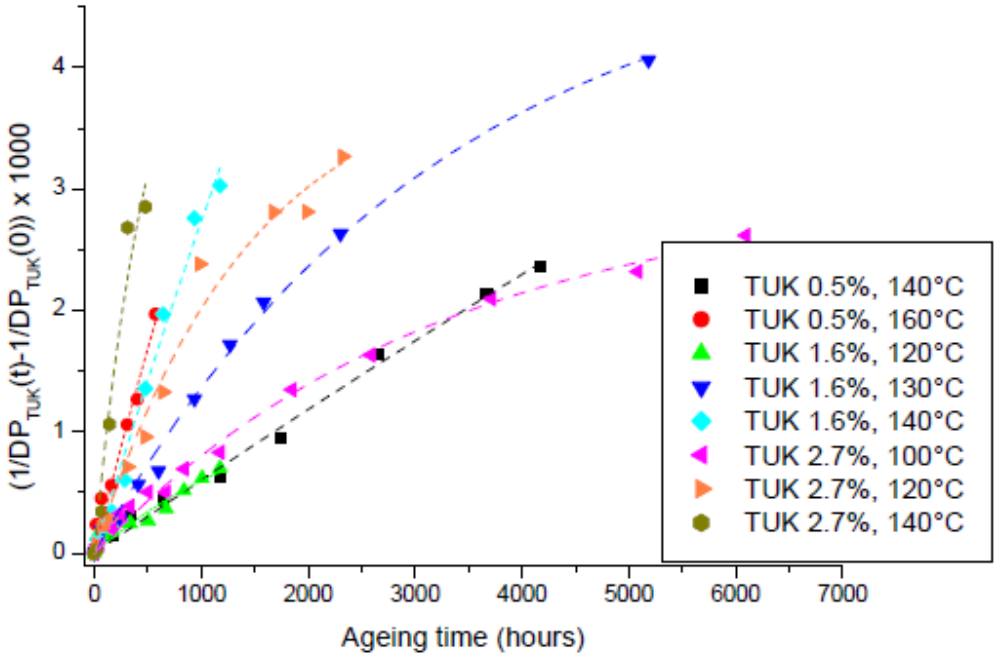


Ilustración 29: Grado de polimerización con respecto al tiempo para papel Kraft Térmicamente Mejorado (TUK)

La energía de activación fue determinada a partir de los ratios de envejecimiento de la Tabla 3: Ratios de envejecimiento respecto al tiempo para papel Kraft y TUK a diferentes niveles de humedad y temperatura. Representando el ln(K) con respecto la inversa de la temperatura. El resultado de la prueba para baja concentración de oxígeno puede verse en las siguientes gráficas:

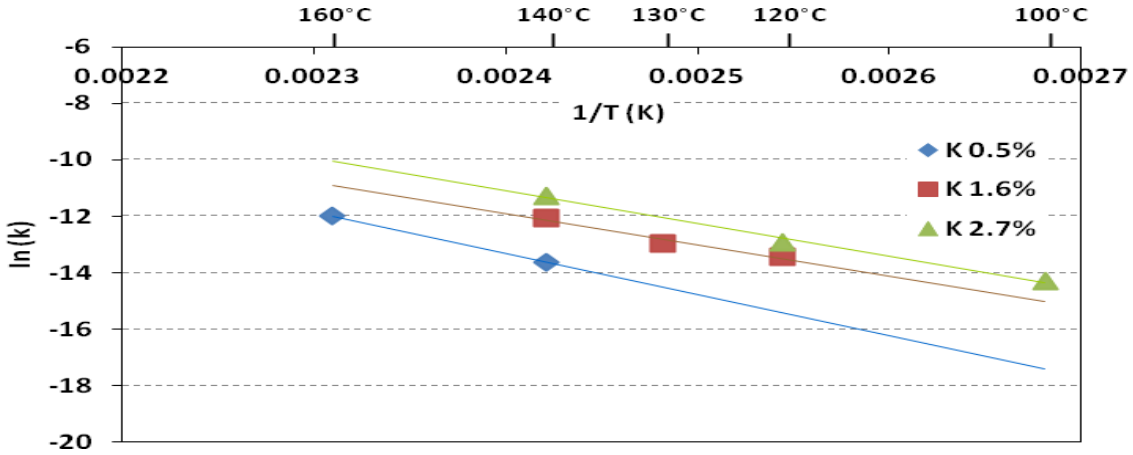


Ilustración 30: Tasa de reacción en función de la temperatura para papel Kraft.

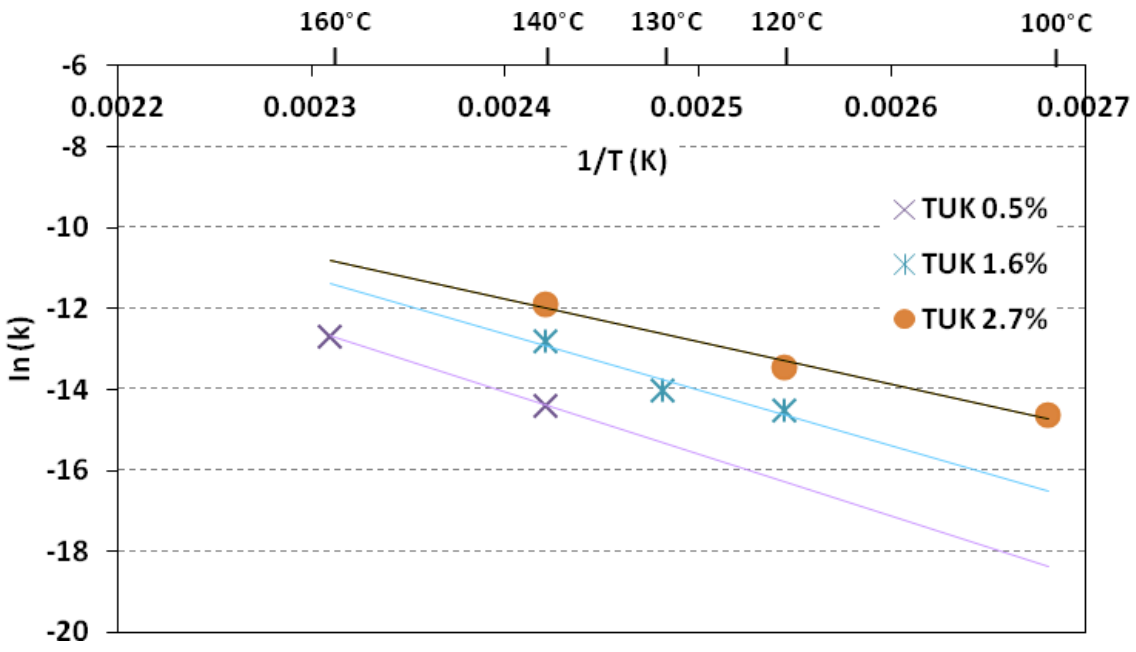


Ilustración 31: Tasa de reacción en función de la temperatura para papel Kraft térmicamente mejorado.

En la tabla 4 se muestran los valores de la energía de activación para diferentes valores de la humedad. La media de los valores de la energía de activación para ambos papeles se acerca a los 111 kJ/mol que Emsley obtuvo en sus experimentos.

	E_a (kJ/mol)
Kraft 0.5 %	121
Kraft 1.6 %	92
Kraft 2.7 %	97
Average E_a for Kraft (kJ/mol)	103
TUK 0.5 %	127
TUK 1.6 %	115
TUK 2.7 %	87
Average E_a for TUK (kJ/mol)	110

Tabla 4: Valores de la Energía de Activación obtenidos por Lelekakis de forma experimental.

El valor de A se obtiene a partir de las gráficas que muestran la dependencia de ln(k) con la temperatura, ya que, según la ecuación (5) la intersección de esas gráficas con el eje de abscisas proporciona el valor de ln(A).

Los valores determinados para A obtenidos para el papel Kraft y para el papel Kraft térmicamente mejorado pueden verse en la siguiente tabla.

	A-value (h^{-1})	Recalculated A-values based on E_a= 111 kJ/mol
Kraft 0.5 %	2.58E+09	1.42E+08
Kraft 1.6 %	2.19E+06	6.80E+08
Kraft 2.7 %	1.99E+07	1.65E+09
Average E_a for Kraft (kJ/mol)		
TUK 0.5 %	6.93E+09	6.92E+07
TUK 1.6 %	8.01E+08	2.61E+08
TUK 2.7 %	6.52E+05	1.03E+09
Average E_a for TUK (kJ/mol)		

Tabla 5: Valores del Factor A obtenidos de forma experimental por Lelekakis.

Para comparar los valores de A con los obtenidos por Emsley o Lundgaard, los valores de A fueron recalculados usando un nuevo orden de reacción determinado de forma experimental a partir de los datos y una energía de activación de 111 KJ/mol.

Los valores de A determinados por Lelekakis para 0.5%, 1.6% y 2.7% para bajos niveles de oxigeno comparados con los de Emsely pueden verse en la siguiente gráfica:

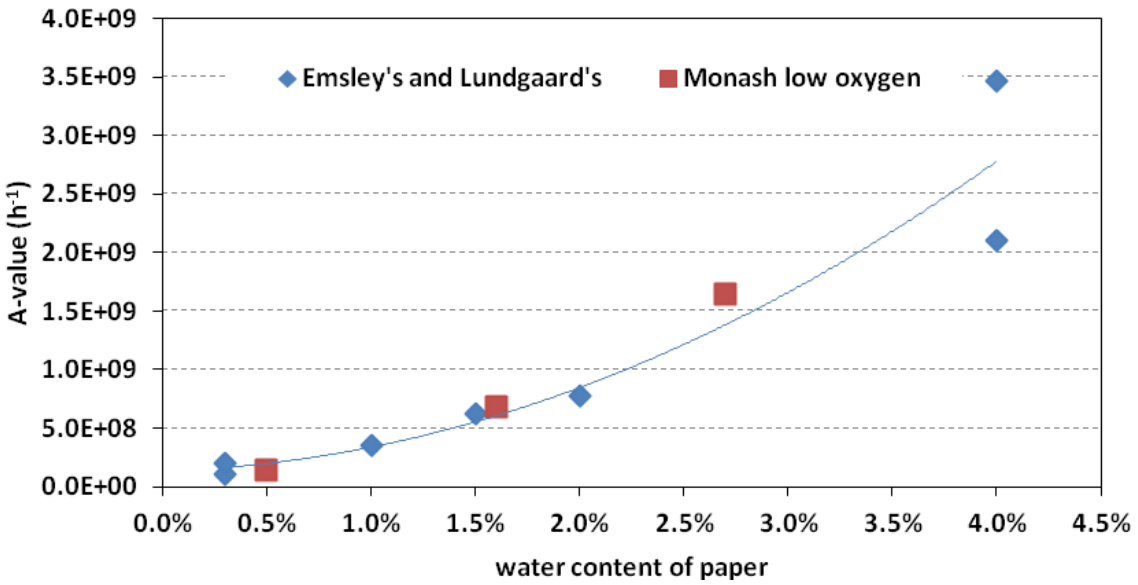


Ilustración 32: Comparativa de valores de A obtenidos por Emsley, Lundgaard y Lelekakis de forma experimental

En la segunda parte del estudio de Lelekakis, se muestra la dependencia del valor de A con la cantidad de oxígeno en el aceite.

Para ello utilizó tanto los datos de investigadores anteriores (Emsley y Lundgaard) como lo suyos, si bien debido a que el valor de A para un 4% y un 2% de contenido de agua hallados por Emsley fueron obtenidos para diferentes condiciones de oxígeno, Lelekakis los elimino de su estudio. Ajustando los datos experimentales se obtuvo la siguiente gráfica donde se puede ver que se ajusta bastante a un polinomio con R2=0.9742.

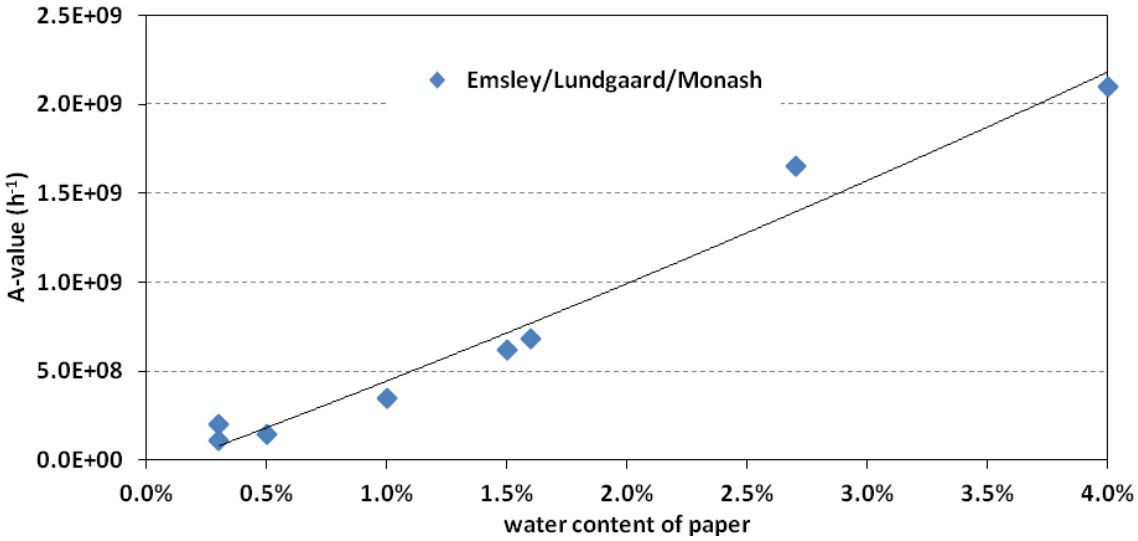


Ilustración 33: Valor de A en función de la humedad, obtenidos de forma experimental por Emsley, Lundgaard y Lelekakis.

Si se eliminan el valor de A obtenido por Lundgaard para 0.3 y 4% y se mantiene el obtenido por la Universidad de Monash para 2.7%, se puede conseguir un mejor ajuste ya que el polinomio que más se ajusta con los datos tiene R^2=1.

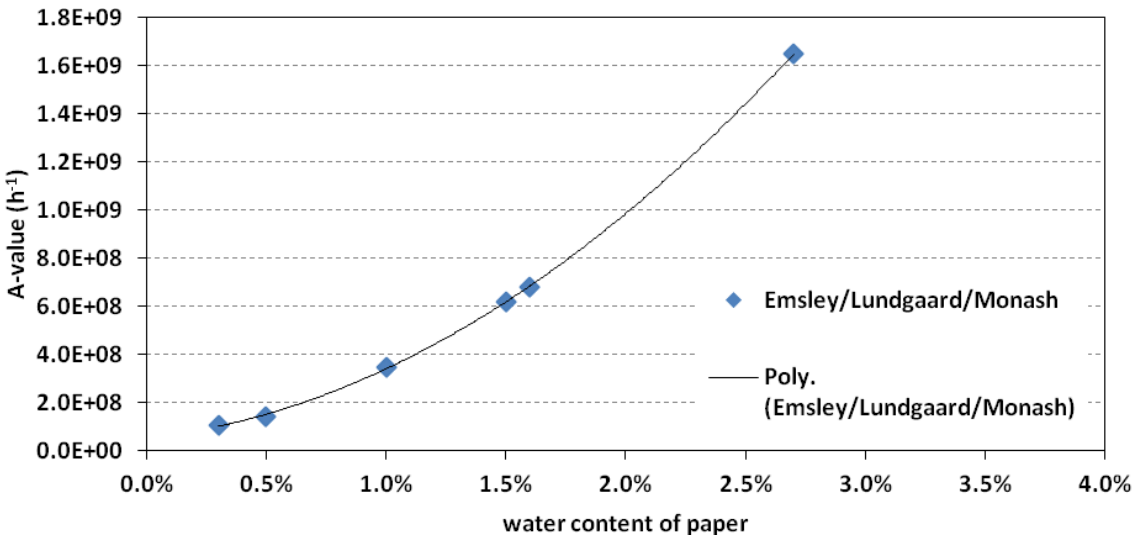


Ilustración 34: A valor en función de la humedad eliminando los datos que más se alejan a la línea de tendencia.

Por lo que llegamos a la conclusión de que el experimento realizado por Lelekakis manteniendo constante la humedad del papel, mejora la precisión en el cálculo de los valores de A y E.

Por lo que el valor de A para cualquier humedad del papel para bajos niveles de oxígeno puede ser determinado a partir de la siguiente ecuación:

$$y = (1.78E + 12)x^2 + (1.1E + 10)x + 5.28E + 0.7$$

Donde Y es el valor de A, X es el valor de agua contenido en el papel y E la energía de activación.

También se compararon los valores de A determinados por Lundgaard y Monash para el papel Kraft térmicamente mejorado con bajas concentraciones de oxígeno.

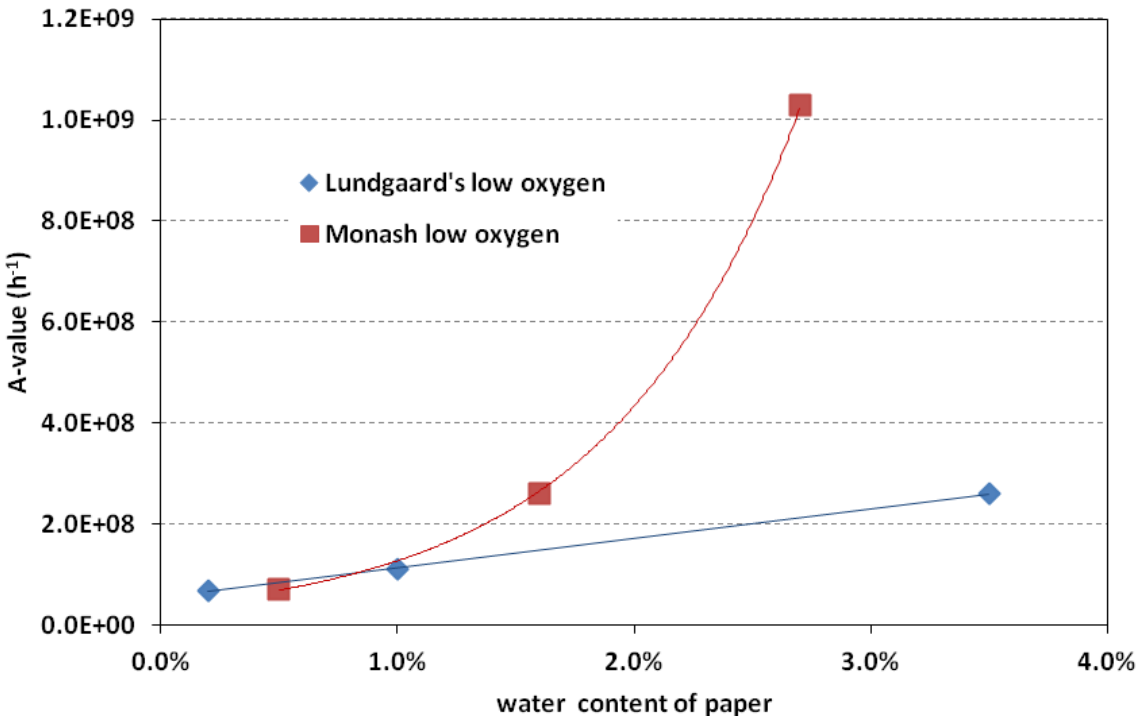


Ilustración 35: A valores en función de la humedad para diferentes tipos de papel TUK

Como se puede ver en la gráfica, los valores de A obtenidos para contenidos en agua por encima de un 1.0 % son muy diferentes para ambos investigadores. Sin embargo, Liland y otros autores advierten que la concentración de nitrógeno es muy diferente en los diferentes tipos de papel térmicamente mejorados (Lailand, Ese, Selsbak, & Lundgaard, 2011). Lundgaard realizó su experimento con un tipo de papel TUK, denominado Insuldur, que tiene un gran contenido en Nitrógeno, alrededor de un 2.7% por lo que tiene mayor resistencia a la hidrólisis, mientras que Lelekakis utilizó papel TUK con un contenido de Nitrógeno de 1.8%. Esto podría explicar la diferencia entre los valores de A obtenidos por ambos investigadores.

3.3.1.2. Curvas de vida para poco oxígeno.

Las siguientes curvas muestran el tiempo en años que debería pasar para que el papel se degrade desde un grado de polimerización inicial de 1000 a 200. Estas curvas se obtuvieron para una concentración de oxígeno menor a 6000 ppm.

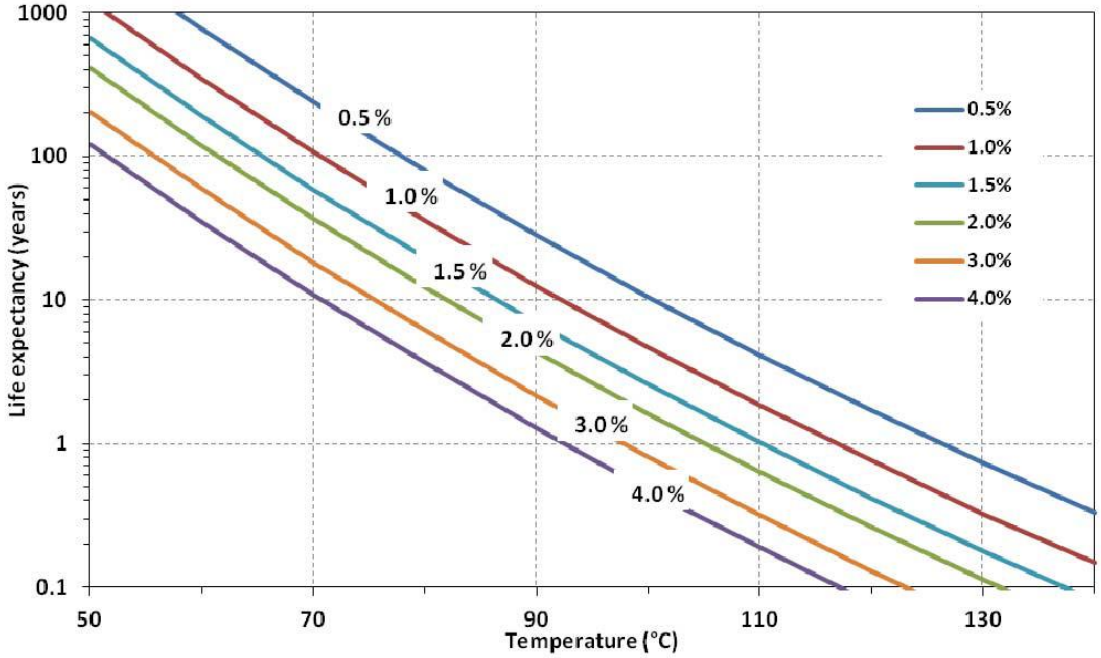


Ilustración 36: Curvas de vida para el papel TUK con baja concentración de oxígeno con los A-valores de Emsley y Lundgaard.

Las curvas de vida para bajas concentraciones de oxígeno han sido obtenidas usando los valores de A hallados por varios investigadores. De Emsley se han usado los valores de papeles con concentraciones de agua de 0.3% y 1.0%. De Lundgaard se han usado los valores de A hallados para papeles con concentraciones de agua de 1.5% y de Monash los valores de A hallados para papeles con concentraciones de agua de 0.5%, 1.6% y 2.7%.

En la gráfica Ilustración 37: Curvas de vida para papel TUK con los A-valores de Lelekakis. Podemos ver las curvas de vida de los papeles Térmicamente mejorados usando los valores de A determinados por Lelekakis.

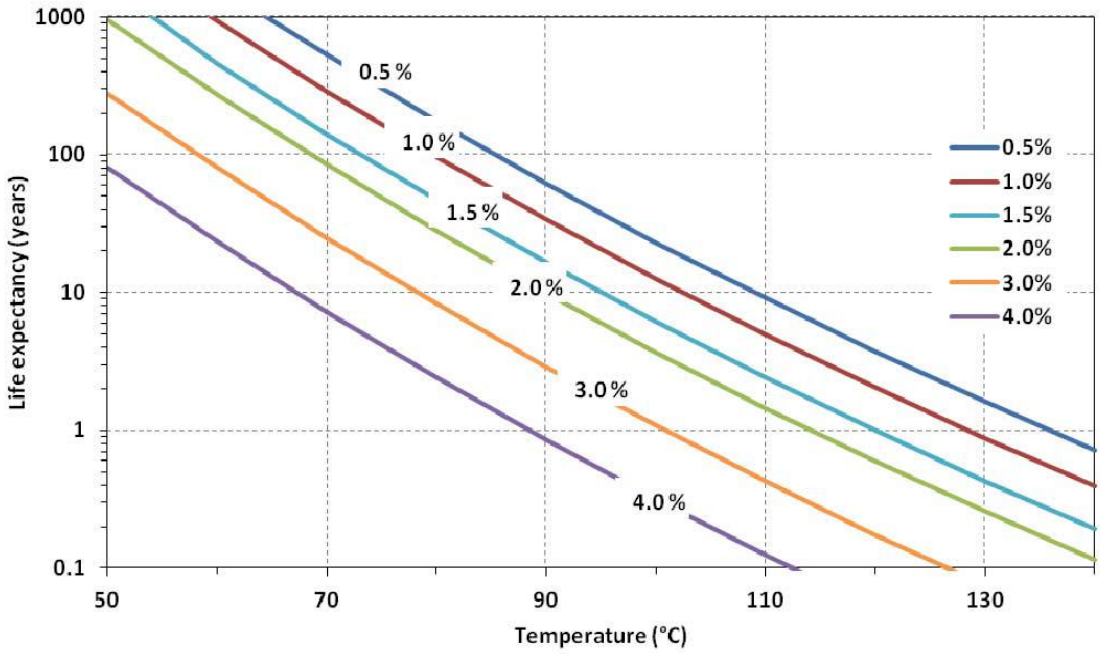


Ilustración 37: Curvas de vida para papel TUK con los A-valores de Lelekakis.

Observando esta gráfica podemos ver que el papel TUK tiene mayor vida esperada que el papel Kraft normal, sin embargo la diferencia de vida esperada se reduce drasticamente si el contenido en agua alcanza el 4%. De hecho , para un 4% de contenido de agua, la esperanza de vida para el papel TUK es menor que para el papel kraft normal.

Las principales conclusiones a las que llegó Lelekakis fueron las siguientes:

- El ratio de envejecimiento K no es constante cuando el agua contenido en el papel se mantiene constante. Las isotermas de envejecimiento no son lineales en la región $\left(\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0}\right) x1000 < 5$ es decir, para DP>200 . Se usaron reacciónes de orden cero para comparar los resultados con los obtenidos previamente por otros investigadores, sin embargo, se comprobó que las reacciones cinéticas de orden uno se ajustaban mejor a los datos obtenidos.

- La correlación entre el valor del factor A y el agua no es lineal. La dependencia el valor de A con respecto al agua se desarrolló para el papel Kraft y el papel TUK en aceite mineral y bajo contenido de oxígeno.

  Por lo que los valores de A y E son diferentes para cada tipo de papel.

La esperanza de vida del papel TUK es mayor que la del papel Kraft para condiciones de poco oxígeno y niveles de agua menores al 3% . Ya que por encima de este nivel, la esperanza de vida del papel kraft es mayor que la del papel TUK.

3.3.1.3. Estudio envejecimiento con medio y alto nivel de oxígeno.

Este experimento se desarrolló con contenidos de oxígeno medio (7000-14000 ppm) y alto (16500-25000) esta cantidad de oxigeno correspondería con transformadores no sellados y sin membrana de caucho en el depósito de expansión. El contenido de agua del papel fue controlado como en el estudio anterior y se situó en unos niveles de 0.5%, 1.6%, 2.7%. Los experimentos se desarrollaron para unas temperaturas entre 100 y 160 ºC. Y los resultados pueden verse en las siguientes gráficas:

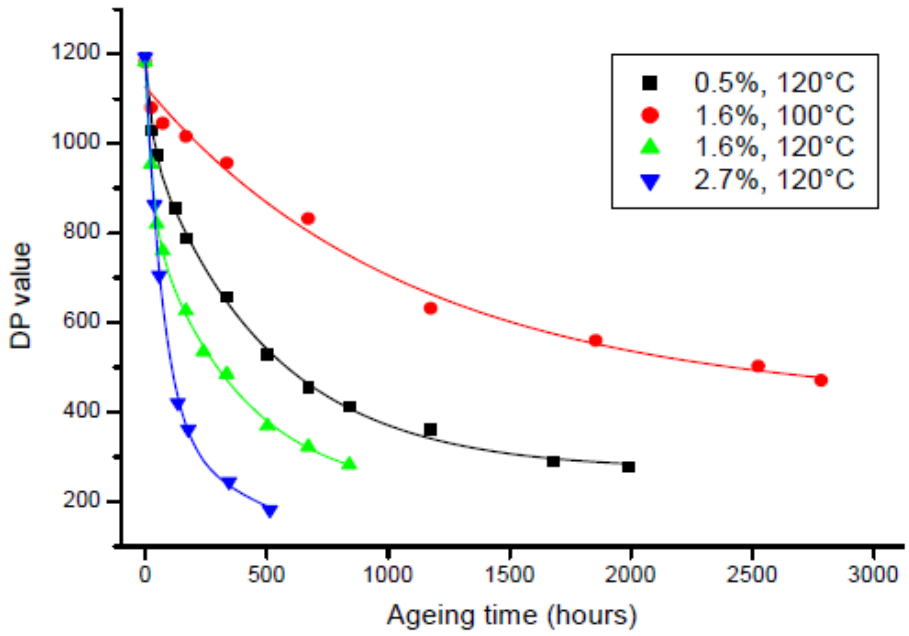


Ilustración 38: Evolución del grado de polimerización del papel Kraft para una concentración de oxígeno media, entre 7000 y 14000 ppm

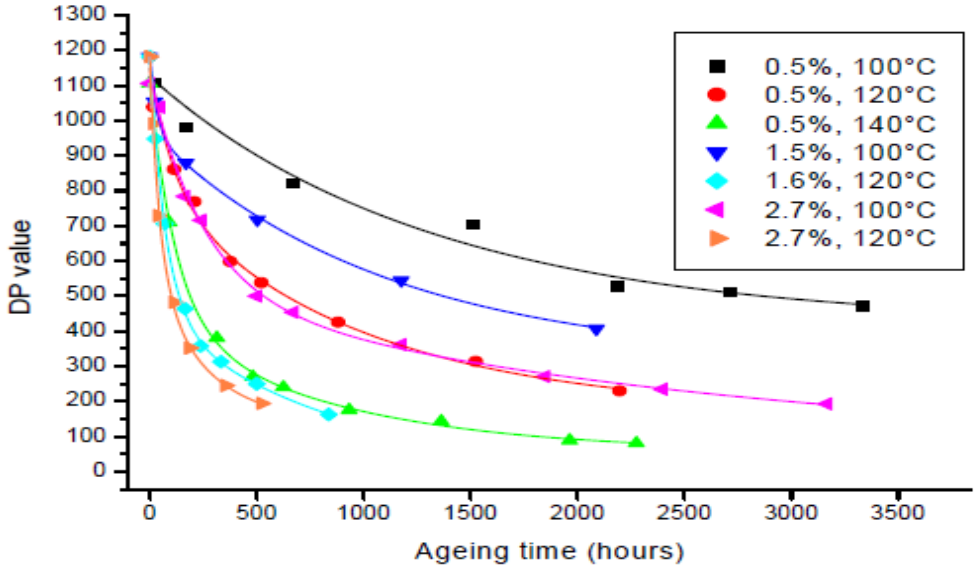


Ilustración 39: Evolución del grado de polimerización del papel Kraft para una concentración de oxígeno alta, entre 16500 y 25000 ppm

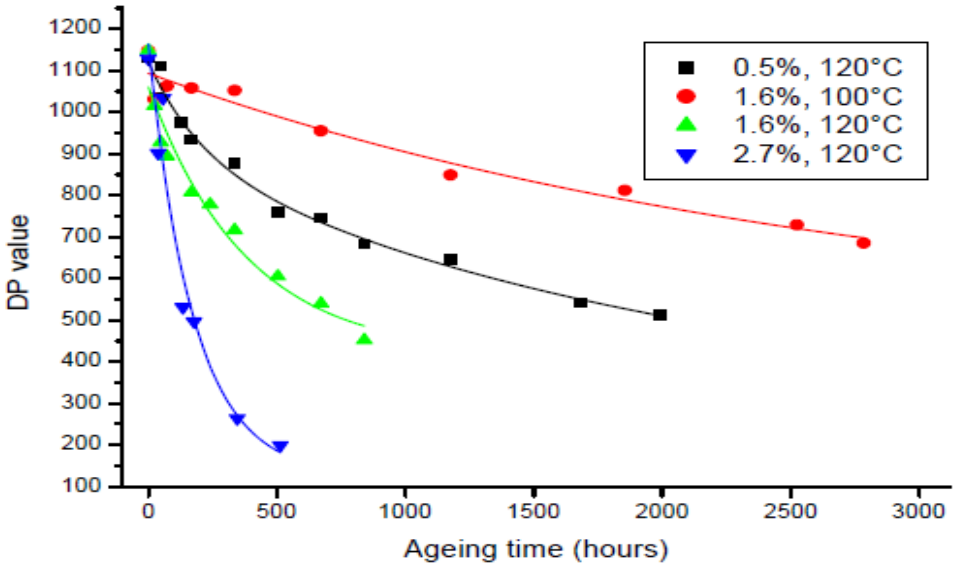


Ilustración 40: Evolución del grado de polimerización del papel TUK para una concentración de oxígeno media, entre 7000 y 14000 ppm

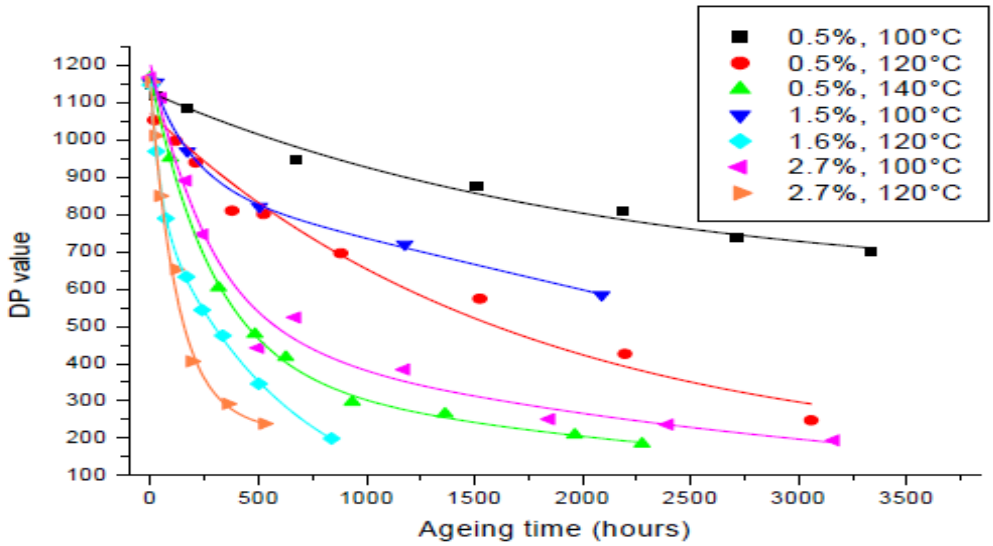


Ilustración 41: Evolución del grado de polimerización del papel TUK para una concentración de oxígeno media, entre 16500 y 25000 ppm

Como era de esperar, el contenido en agua aumentó en la mayoría de los experimentos ya que la oxidación de la celulosa produce agua. También la oxidación del aceite produce agua y ácidos de bajo peso molecular que actúan como catalizadores para la hidrólisis de la celulosa. El aumento de agua también es debido a la oxidación del pressboard que sirve para acondicionar el contenido en agua del papel.

El resumen de la variación de agua en las pruebas puede verse en las siguientes tablas:

Table 4. Summary of change in water content, as measured by moisture probe, of experiments performed at different temperatures and water contents in medium oxygen.

	0.5 %	1.6 %	2.7 %
95.5 °C		Increase	
120 °C	Increase	Increase	Decrease

Table 5. Summary of change in water content, as measured by moisture probe, of experiments performed at different temperatures and water contents with high oxygen

	0.5 %	1.6 %	2.7 %
100 °C	Increase	Decrease	Increase
120 °C	Increase	Increase	Decrease
140 °C	Increase	Increase	

Que el aceite tome colores oscuros es un indicativo de la oxidación y de la creación de ácidos carboxílicos.

Se usó la reacción de orden cero de Ekenstam para comparar los valores de A y E obtenidos de este estudio con los obtenidos por Emsley y Lundgaard para papel seco con alto contenido en oxígeno.

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0} = kt$$

El grado de polimerización expresado como $\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0}$ con respecto al tiempo se muestra en las siguientes gráficas:

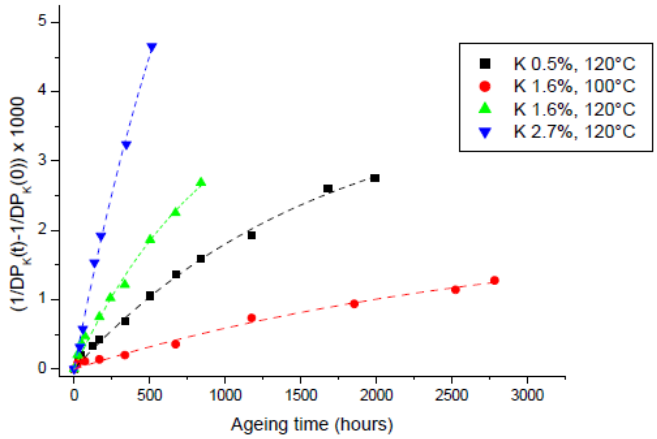


Figure 12. $1/DP_t - 1/DP_o$ versus time relationship for Kraft paper in Shell Diala AX with medium oxygen (7,000-14,000 ppm).

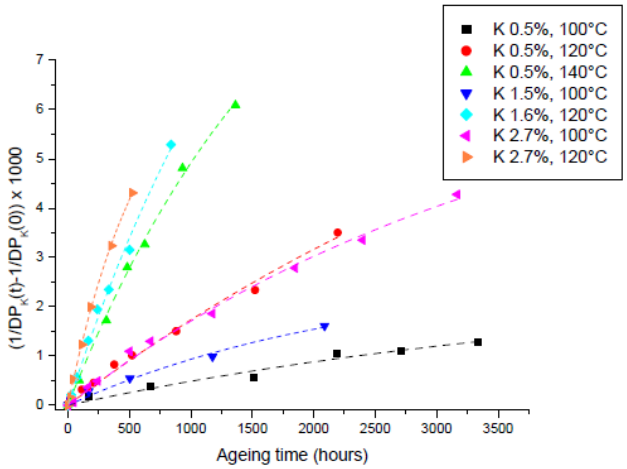


Figure 14. $1/DP_t - 1/DP_o$ versus time relationship for Kraft paper in Shell Diala AX with high oxygen (16,500 – 25,000 ppm).

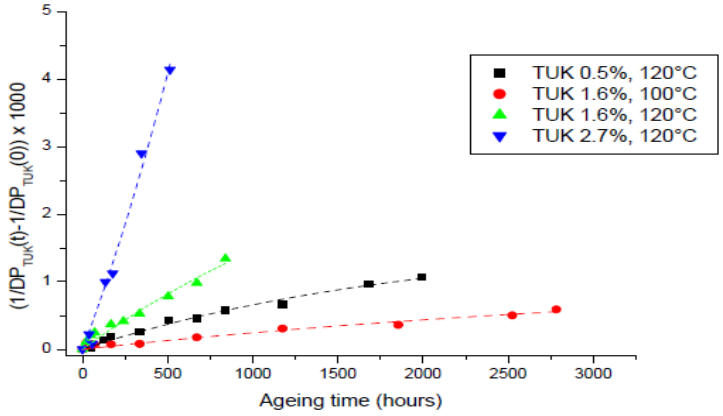


Figure 13. $1/DP_t - 1/DP_o$ versus time relationship for thermally upgraded Kraft paper in Shell Diala AX with medium oxygen (7,000-14,000 ppm).

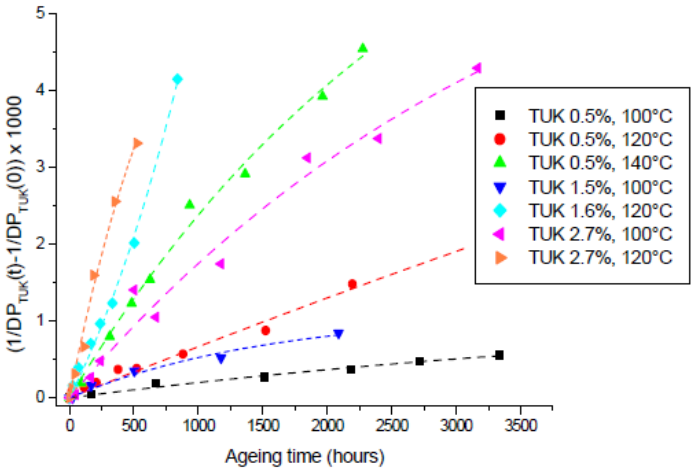


Figure 15. $1/DP_t - 1/DP_o$ versus time relationship for thermally upgraded Kraft paper in Shell Diala AX with high oxygen (16,500 – 25,000 ppm).

Como se puede ver en la tabla anterior, el papel Kraft térmicamente mejorado (TUK), envejece más despacio que el papel Kraft para concentraciones medias y altas de oxígeno en aceite.

Como vemos en las gráficas anteriores, las isotermas no son lineales por lo que las reacciones de orden uno son más precisas para modelar la reacción:

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0} = \frac{k_{1o}}{k_2}(1 - e^{(-k_2 t)})$$

Los valores de k2 y k1o se muestran en la siguiente tabla:

Table 8. First-order reaction rates determined from $1/DP_t - 1/DP_o$ versus time relationships for Kraft and thermally upgraded Kraft paper in medium oxygen (7,000 – 14,000 ppm)

	% (w/w) H_2O											
	0.5				1.6				2.7			
T (°C)	Kraft		TUK		Kraft		TUK		Kraft		TUK	
	k_{1o}	k_2	k_{1o}	k_2	k_{1o}	k_2	k_{1o}	k_2	k_{1o}	k_2	k_{1o}	k_2
95.5					6.90E-07	3.40E-04	2.70E-07	2.40E-04				
120	2.41E-06	6.10E-04	8.40E-07	5.10E-04	4.76E-06	1.06E-03	1.84E-06	4.80E-04	1.13E-05	9.50E-04	6.72E-06	-7.5E-04

Table 9. First-order reaction rates determined from $1/DP_t - 1/DP_o$ versus time relationships for Kraft and thermally upgraded Kraft paper in high oxygen (16,500 – 25,000 ppm)

	% (w/w) H_2O											
	0.5				1.6				2.7			
T (°C)	Kraft		TUK		Kraft		TUK		Kraft		TUK	
	k_{1o}	k_2	k_{1o}	k_2	k_{1o}	k_2	k_{1o}	k_2	k_{1o}	k_2	k_{1o}	k_2
100	5.40E-07	2.10E-04	2.20E-07	1.80E-04	1.14E-06	4.20E-04	7.10E-07	6.40E-04	1.94E-06	2.60E-04	2.00E-06	2.70E-04
120	1.90E-06	1.90E-04	6.80E-07	5.00E-05	7.77E-06	5.60E-04	3.38E-06	-8.5E-04	1.21E-05	1.57E-03	8.59E-06	1.17E-03
140	6.33E-06	5.30E-04	2.81E-06	3.40E-04								

CAPITULO 4

FURANOS

En este capítulo se realizará una revisión bibliográfica sobre los compuestos furánicos (Crespo), mencionando los diferentes tipos de compuestos furánicos, así como su generación y las formas en las que los diferentes autores exponen cómo estos pueden ser utilizados para estimar la vida residual del transformador.

Los compuestos furánicos son un subproducto de la degradación del papel aislante. La principal ventaja de los compuestos furánicos frente a otros marcadores de envejecimiento, como pueden ser el contenido en CO, CO2 o H2O es que la generación de compuestos furánicos es únicamente debida a la descomposición de la celulosa, mientras que el resto de los compuestos mencionados provienen tanto de la descomposición del papel como de la descomposición del aceite mineral (Crespo).

Pese a que los propios furanos se originan en el papel aislante, su determinación se realiza sobre las muestras de aceite extraídas del análisis del transformador, por lo que son capaces de proporcionar una información muy valiosa sobre el estado del aislamiento sólido de un transformador sin necesidad desconectarlo de la red y sin realizar un trabajo invasivo.

La cantidad de compuestos furánicos en el aceite es muy reducida y su concentración es medida en partes por billón en peso (esto es µg de furfural/kg de aceite) o por el volumen que estos ocupan (µg/L).

El análisis de compuestos furánicos disueltos en el aceite de los transformadores de potencia, para caracterizar la degradación del aislamiento sólido del transformador se usa desde mediados de los 80.

4.1 GENERACIÓN DE COMPUESTOS FURÁNICOS

Los compuestos furánicos se generan durante la degradación térmica del papel aislante de los transformadores. La producción de estos compuestos, particularmente del 2-furfural, depende de varios factores como el contenido en agua, la temperatura, el tipo y la calidad del papel, etc.

Los seis compuestos furánicos más importantes son:

2-furfal (2-FAL)

2-acetilfuran (2-ACF)

2-ácido fúrico

5-metil-2-furfural (5-MEF)

2-furfuralalcohol (2-FOL)

5-Hidroximetil-2-furfural (5-HMF)

Y su estructura es la siguiente:

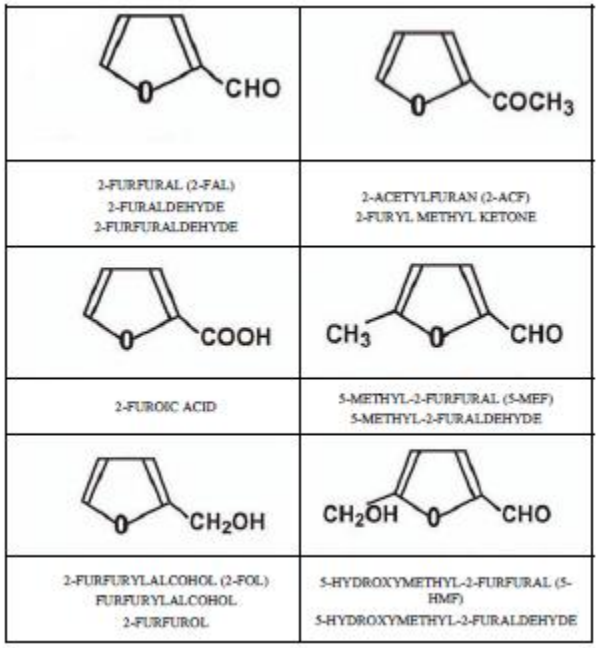


Ilustración 42: Estructura de los principales compuestos furánicos

Algunos autores aseguran (Business Unit Transformer, 2004) (Brochure, 2007) que estos compuestos furánicos no provienen de la celulosa, sino de la hemicelulosa, que es la parte más frágil del papel y representa aproximadamente entre un 10 y un 20 % de la composición del papel. Sin embargo, los mecanismos de degradación propuestos a temperaturas entre 100 y 200 ºC muestran que el 2-furfural (2-FAL), se genera también a través del 5-hidroximetil-2-furfural (5-HMF) resultante de la celulosa.

El más común de los compuestos furánicos al originarse en un 98,2% de los casos es el 2-furfural (al que también nos referiremos como 2-FAL). Los siguientes compuestos furánicos más comunes son el 5-metil-2furfural (5M2F) con un 8,3%, el 5-hidroxi-metil-2-furfulal (abreviado en 5H2F) con una aparición de un 2,8%, el 2-acetylfurano (2-ACF) con un 1,2%, y el que menos presencia tiene de los aquí mencionados, 2-furfurol (2FOL) con un 1%. Aparte del 2-furfural, el resto de compuesto aparece en cantidades mucho más reducidas en el proceso de degradación de los transformadores de potencia.

La medida del contenido en furfural da una información acerca del grado de polimerización, pero cabe mencionar que los valores absolutos pueden variar dependiendo de las condiciones de partida. (Crespo)

El proceso de generación del 5-HMF y del 2-FAL es el siguiente:

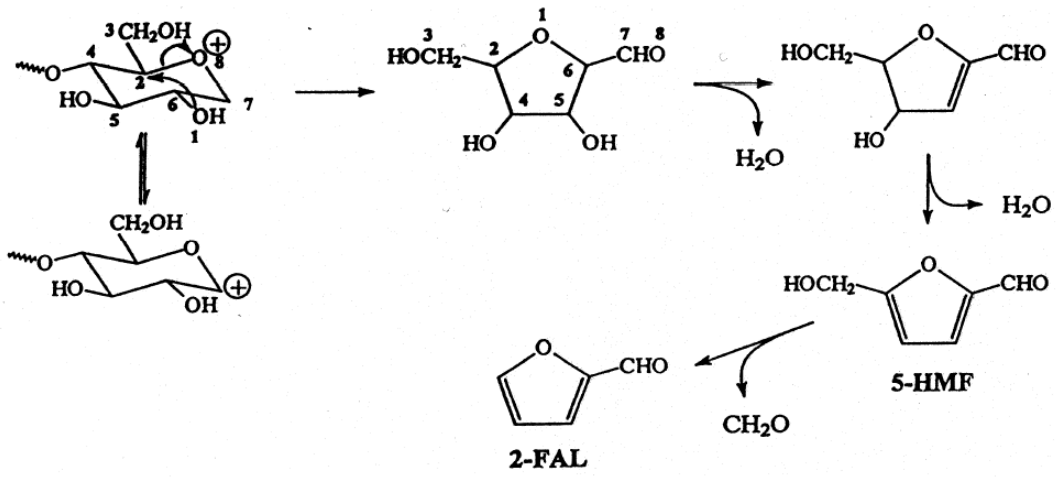


Ilustración 43: Proceso de generación de 5-HMF y 2-FAL

En este proceso destacamos también la formación de agua.

Los polímeros de glucosa se fraccionan durante el envejecimiento y esto conduce a una generación de subproductos como el agua, gases (CO, CO2), grupos aldehídos y grupos de carboxilo

En el caso de la degradación por el proceso de hidrólisis de las unidades de glucosa, aparecen cuando se unen un epoxi o un enol seguido de un reordenamiento interno y una deshidratación y eliminación adicional de formaldehido para crear un furfuraldehido y otros tipos de furanos más. Este mecanismo de hidrólisis de las unidades de glucosa es el más común a la hora de que se forme 2-FAL a temperaturas de servicio de un transformador de potencia.

Además de las reacciones anteriormente mencionadas que originan los compuestos furánicos a partir de la degradación de la celulosa del papel aislante de los transformadores, también los compuestos furánicos pueden sufrir una serie de reacciones secundarias que hacen que los compuestos creados en las reacciones primarias deriven en otros. La reacción de hidrólisis inicial es la que causa la rotura de las cadenas de celulosa, las reacciones de deshidratación siguientes son aquellas mediante las que se obtiene el furano 5-hidroxi-2-furfural como principal sustancia. Este furano a la vez se puede descomponer en 2-furfural, CO y agua.

Algunos autores han realizado estudios de correlación de la concentración de compuestos furánicos medidos en el aceite de un transformador con el grado de envejecimiento de su aislamiento celulósico. Debido a que el grado de polimerización (DP) ha sido aceptado como un indicador fiable del deterioro de aislamiento de papel Karft, una correlación directa con el contenido de furanos resultaría ser el eslabón que falta para determinar el grado de envejecimiento del papel. (Cheim, Donald, Prevost, & Xu, 2012)

Para conocer la relación entre las concentraciones de materiales furánicos en el aceite de los transformadores de potencia, y el DP del papel (el grado de polimerización del mismo), se han llevado a cabo diferentes ensayos para comprobar el envejecimiento

acelerado de muestras del papel en los laboratorios. El análisis de los datos obtenidos de las pruebas sugiere que existe una relación lineal, aproximadamente, entre el logaritmo de la concentración de 2FAL en aceite y la degradación del papel de Kraft estándar.

Muchos de los trabajos sobre este tema que han sido publicados en revistas científicas especializadas, describen los experimentos llevados a cabo en los laboratorios, pero son menos los trabajos que se centran en describir las medidas extraídas del análisis de los compuestos furanos en transformadores que se encuentran en el campo.

En los siguientes apartados realizaremos una revisión bibliográfica sobre los estudios realizados tanto en campo como en laboratorios sobre la generación de furanos.

4.1 ESTUDIOS DE GENERACIÓN DE FURANOS SOBRE MUESTRAS DE LABORATORIO

Los principales estudios de generación de furanos y sus conclusiones son las siguientes:

Höhlein realizó experimento de envejecimiento de papel a varias temperaturas (75ºC, 85ºC, 95ºC) y humedades (menor de 1%, 3,7% y 12%). Höhlein indica que la formación de furanos en aceite aislante depende de varios factores, los más importantes parecen ser la temperatura, la humedad y el tipo de papel aislante.

Yan (at., 2004), alerta sobre el hecho de que los compuestos furánicos se degradan bajo radiaciones luminosas, de modo que las muestras de aceite deben guardarse en cuartos oscuros.

Yamagata y su equipo, a través de su estudio mostraron la diferencia que existía en el proceso de envejecimiento entre el papel térmicamente mejorado (Thermo-ZA) y el papel Kraft. Para ello, empleó índices basados en la producción 2FAL y C02+C0. El experimento que desarrolló el equipo de Yamagata consistía en deteriorar por separado el papel de Kraft y el papel térmicamente mejorado en ampollas de vidrio selladas que contenían aceite mineral, aislamiento de papel y alambre de cobre con una atmósfera de gas nitrógeno por encima de la superficie del aceite. El aceite

mineral se burbujea con gas N2 para eliminar el agua y el oxígeno. Las pruebas se realizaron con una presión por debajo de los 0,1 mmHg a 105ºC durante cuarenta y ocho horas. Los experimentos se fueron realizando con variaciones tanto en la temperatura como en el contenido de humedad del papel e incluso, añadiendo cierto contenido de oxígeno (0,3%) en el aceite. Tras el deterioro, se midieron las concentraciones de CO2, CO y 2FAL.

El experimento mostró cómo el grado de polimerización del papel térmicamente mejorado disminuyó en menor medida que el del papel de Kraft, cuando envejece a 140ºC y 155ºC. Esto es debido a que el papel térmicamente mejorado lleva agregado diciandiamida que produce CO2 y CO. La razón por la que no se detectó 2-FAL (que es, como mencionamos anteriormente, el compuesto furánico con mayor presencia) en el papel térmicamente mejorado es porque el furfural generado reacciona con la diciandiamida y por ello se consume en su totalidad. Por tanto, cuando un transformador está aislado mediante papel mejorado resulta muy difícil aplicar el análisis de furanos (al., 2008).

En la Ilustración 44: Relación entre el grado de polimerización y contenido en furanos para diferentes temperaturas. Se puede ver la relación entre el grado de polimerización y el contenido en furanos para diferentes temperaturas de envejecimiento, con un contenido en humedad menor al 1%.

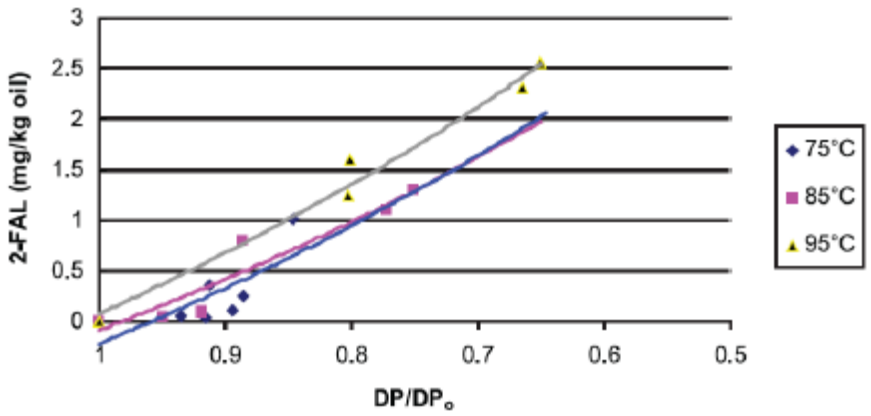


Ilustración 44: Relación entre el grado de polimerización y contenido en furanos para diferentes temperaturas.

Asimismo, se han propuesto variadas ecuaciones para relacionar el contenido de 2FAL con el grado de polimerización del papel aislante de Kraft. En el año 1991 fue determinada la Curva de Chengdong por Xue (Xue, 1991), que demuestra la siguiente ecuación:

$Log_{10}\,(2FAL) = 1{,}51 - 0{,}0035 + \mathrm{DP}$

En el año 1999 De Pablo (Pablo, 1999) planteó un nuevo modelo degradación basado en que cada vez que tres cadenas de celulosa se rompen, se genera una molécula de 2-furfural. Consecuentemente, la ecuación propuesta por el autor sería:

$$DP = \frac{7100}{8{,}88 + (2FAL)}$$

La ecuación aquí expuesta fue desarrollada por de Pablo suponiendo que el grado de polimerización (DP) del papel aislante inicial es de 800, el peso molecular del 2FAL de 96, y la relación entre el aceite y el papel transformador es de 25.

De Pablo también desarrolló otra ecuación que se basa en la hipótesis de que el 20% del papel aislante se degrada rápidamente. La ecuación propuesta es:

$$DP = \frac{800}{0{,}186 * 2FAL + 1}$$

En el año 1999 Burton (Pablo, 1999) propuso la siguiente ecuación:

$$log_{10}\,(2FAL) = 2{,}5 - 0{,}005 + DP$$

Por último, Vuarchex (Pablo, 1999) propone:

$$log_{10}(2FAL) = 2{,}6 - 0{,}0049 + DP$$

Las diferencias que apreciamos se deben a que en la cinética de formación de los compuestos también influyen otros aspectos como el contenido en agua y en ácidos de

papel y del aceite. Por tanto, la dependencia entre el 2FAl y el grado de polimerización del aislamiento de celulosa, dependerá de las condiciones del funcionamiento del transformador.

4.2 ESTUDIOS DE GENERACIÓN DE FURANOS SOBRE TRANSFORMADORES EN CAMPO

De los trabajos realizados en campo sobre la generación de furanos, destacamos el de Dong y su equipo que realizaron un estudio estadístico sobre la concentración de furfurales en una gran población de transformadores de potencia, en más de 750 de ellos, para observar la correlación entre las cantidades de furfural obtenidas tras los análisis de cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) y una serie de datos relevantes, como pueden ser: la tensión nominal, la potencia nominal, los contenidos de humedad, el tiempo de servicio etc. Así se busca establecer ciertos niveles de alarma de transformadores internamente defectuosos.

Dong comenta qué concentraciones de furfurales a partir de 0,75 mg/L pueden indicar que el envejecimiento del transformador puede llegar a causar un problema.

CAPITULO 5

PROGRAMA DESARROLLADO

5.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL TRABAJO DESARROLLADO

El trabajo realizado, consiste en una aplicación informática que denominaremos "Transformer live&care" que integra un libro Excel en el que tendremos los datos de entrada, y un ejecutable de Matlab al cual se exportarán los datos y se almacenarán en una base de datos ordenados por la temperatura y humedad de la prueba realizada.

El ejecutable de Matlab tiene tres funciones:

1- La primera función analiza los datos obtenidos en el laboratorio y representa la evolución del grado de polimerización (DP) en el tiempo. Ajusta esta evolución a una ecuación exponencial y muestra la ecuación de Emsley de degradación del papel calculando los factores A y K de esta ecuación para estas condiciones de temperatura y humedad.

2- Con los cálculos anteriores de A, muestra de forma gráfica la evolución de este factor con la humedad y la ecuación que describe dicha evolución.

3- Con los cálculos anteriores de K, muestra de forma gráfica la evolución de este factor con la humedad y la ecuación que describe dicha evolución.

5.2. DATOS DEL PROBLEMA

Los datos de entrada al transformador son los obtenidos en dos ensayos de envejecimiento realizados en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Carlos III.

En los ensayos de envejecimiento se han introducido en una estufa un conjunto de viales cada uno de los cuales contiene una muestra de papel preparada de tal forma que tenga una humedad inicial conocida y controlada. La estufa se pone a una

determinada temperatura y cada semana se extrae uno de los viales para llevarlo a analizar. Los procesos de envejecimiento se realizaron a dos temperaturas diferentes.

En total se han realizado 7 pruebas: cuatro de ellas para una temperatura de envejecimiento de 110 ºC y humedades iniciales 0.11%, 1.01%, 1.94% y 2.92% y tres de ellas para una temperatura de 130 ºC y tres grados de humedad diferentes (1.01%, 1.94% y 2.92%).

Para las pruebas a 110ºC, la concentración de oxígeno era menor de 6000 ppm mientras que para las pruebas de 130ºC la concentración de oxígeno era mayor de 6000 ppm.

Posiblemente en un futuro se realizarán más pruebas de envejecimiento. El programa está preparado para ello.

Las medidas realizadas en cada vial extraído son:

- 2 FAL

- Grado de polimerización del papel (DP)

- Contenido en agua del aceite

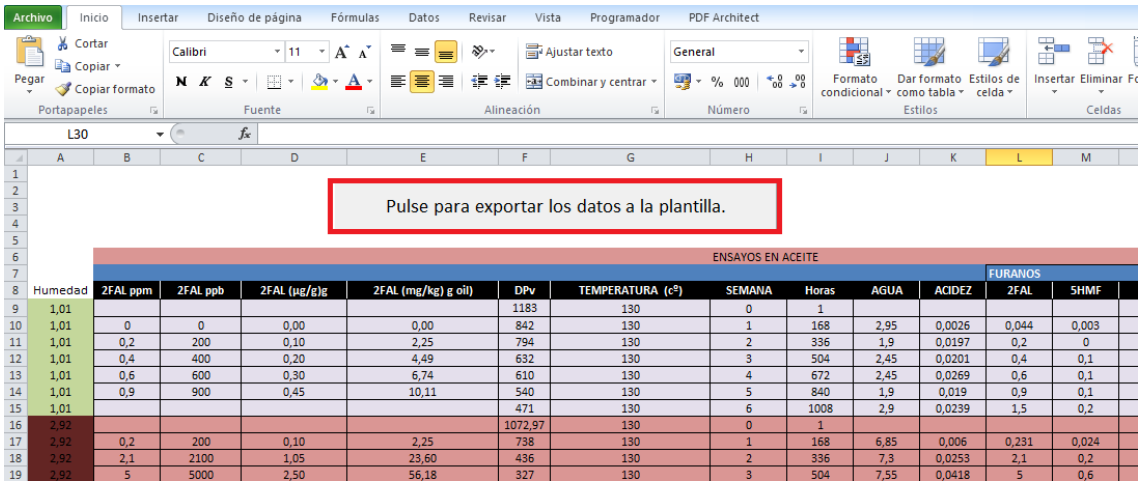
- Acidez del aceite

- Contenido en otros furanos, tales como 5HMF, 2ACF, 5MEF, 2FOL

- Gases disueltos en el aceite

Para los fines de este Trabajo Fin de Grado, solo son de interés las medidas de grado de polimerización, la temperatura de envejecimiento, el tiempo de envejecimiento y el contenido en humedad y oxígeno en el aceite.

Los datos de los ensayos fueron escritos en la hoja Datos de un libro Excel, de la forma indicada en la figura siguiente:



Pulse para exportar los datos a la plantilla.

		ENSAYOS EN ACEITE											
												FURANOS	
	Humedad	2FAL ppm	2FAL ppb	2FAL (µg/g)g	2FAL (mg/kg) g oil)	DPv	TEMPERATURA (c^{o})	SEMANA	Horas	AGUA	ACIDEZ	2FAL	5HMF
9	1,01					1183	130	0	1				
10	1,01	0	0	0,00	0,00	842	130	1	168	2,95	0,0026	0,044	0,003
11	1,01	0,2	200	0,10	2,25	794	130	2	336	1,9	0,0197	0,2	0
12	1,01	0,4	400	0,20	4,49	632	130	3	504	2,45	0,0201	0,4	0,1
13	1,01	0,6	600	0,30	6,74	610	130	4	672	2,45	0,0269	0,6	0,1
14	1,01	0,9	900	0,45	10,11	540	130	5	840	1,9	0,019	0,9	0,1
15	1,01					471	130	6	1008	2,9	0,0239	1,5	0,2
16	2,92					1072,97	130	0	1				
17	2,92	0,2	200	0,10	2,25	738	130	1	168	6,85	0,006	0,231	0,024
18	2,92	2,1	2100	1,05	23,60	436	130	2	336	7,3	0,0253	2,1	0,2
19	2,92	5	5000	2,50	56,18	327	130	3	504	7,55	0,0418	5	0,6

Ilustración 45: hoja de Excel con los datos obtenidos en las pruebas.

5.3. ECUACIÓN DE ENVEJECIMIENTO CONSIDERADA POR EL PROGRAMA

Actualmente, nuestra aplicación trabaja con una reacción de envejecimiento de orden cero, que corresponde a la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_{inicial}} = kt$$

Siendo

$$k = A\ x\ e^{\frac{-E_a}{RT}}$$

Como energía de activación se ha tomado el valor Ea=111 kJ/mol. La constante universal de los gases, R, se tomó R= 8.31 J/K·mol

La ecuación del grado de polimerización queda:

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_{inicial}} = A\ x\ t\ x\ e^{\frac{-E_a}{RT}}$$

Los valores de temperatura y humedad de las muestras deben ser datos.

5.4. ENTRADA DE DATOS AL PROGRAMA

Como paso previo a la exportación de datos al ejecutable de Matlab, se ha realizado Macro en la hoja Excel para hacer un filtrado con los datos que sean de nuestro interés y realizar algunos cálculos preliminares que es más sencillo realizar en Excel que en Matlab.

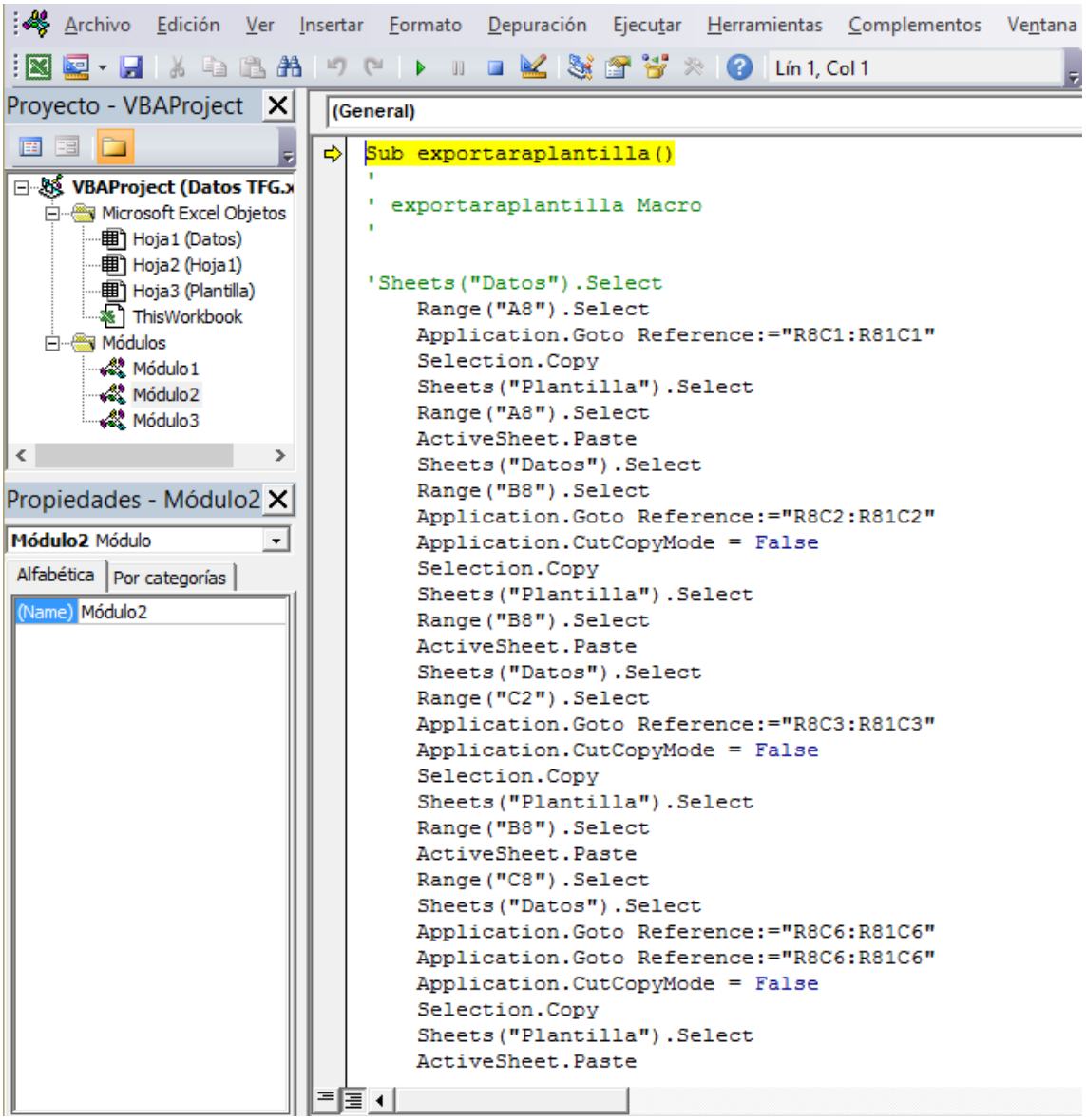


Ilustración 46: Código de la Macro para filtrar los datos de la hoja Excel.

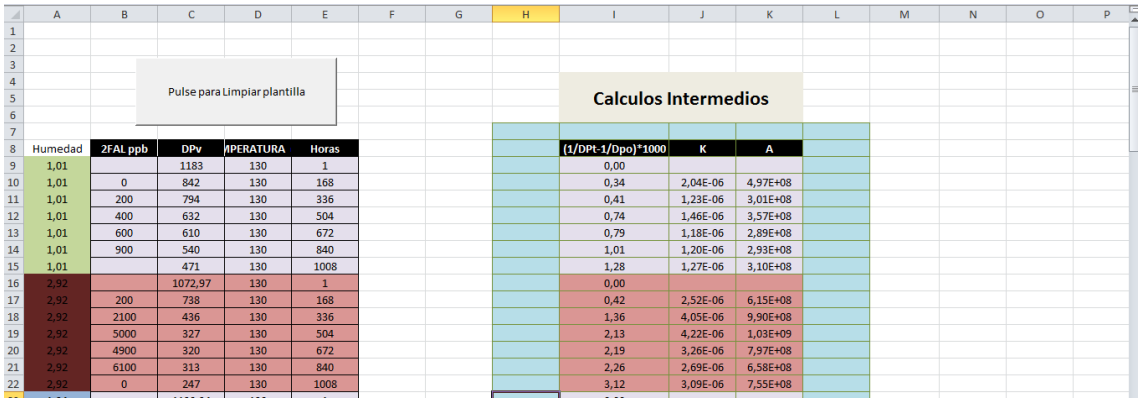
El archivo de Excel "Datos TFG" tiene dos hojas, en la primera se encuentran todos los datos de las pruebas realizadas por el departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Carlos III de Madrid y en la segunda hoja, "Plantilla" está la plantilla, en la

que aparecen los datos que se exportarán al ejecutable de Matlab y los cálculos previos realizados.

En la parte superior de la hoja “Datos”, se encuentra un botón como puede verse en la imagen de la figura 45.

Al pulsar este botón, se activa la Macro que realiza el filtrado de datos y los exporta a la hoja “Plantilla”. El código de la macro se puede ver en la Ilustración 43.

Los cálculos previos realizados por la Macro de Excel son la inversa del grado de polimerización, la tasa de reacción k y el coeficiente A. En la figura siguiente se muestra el aspecto de la hoja “Plantilla” del libro Excel.



Humedad	2FAL ppb	DPv	MPERATURA	Horas	(1/DPt-1/Dpo)*1000	K	A
1,01		1183	130	1	0,00		
1,01	0	842	130	168	0,34	2,04E-06	4,97E+08
1,01	200	794	130	336	0,41	1,23E-06	3,01E+08
1,01	400	632	130	504	0,74	1,46E-06	3,57E+08
1,01	600	610	130	672	0,79	1,18E-06	2,89E+08
1,01	900	540	130	840	1,01	1,20E-06	2,93E+08
1,01		471	130	1008	1,28	1,27E-06	3,10E+08
2,92		1072,97	130	1	0,00		
2,92	200	738	130	168	0,42	2,52E-06	6,15E+08
2,92	2100	436	130	336	1,36	4,05E-06	9,90E+08
2,92	5000	327	130	504	2,13	4,22E-06	1,03E+09
2,92	4900	320	130	672	2,19	3,26E-06	7,97E+08
2,92	6100	313	130	840	2,26	2,69E-06	6,58E+08
2,92	0	247	130	1008	3,12	3,09E-06	7,55E+08

Ilustración 47: Plantilla con los datos para exportar a Matlab

La tasa de reacción se obtiene como

$$k = \frac{\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_{inicial}}}{t}$$

Siendo t el tiempo de envejecimiento.

El valor de A se calcula como

$$A = k \cdot e^{\frac{E_a}{RT}}$$

Una vez exportados los datos a la plantilla, podemos empezar a utilizar el ejecutable de Matlab.

5.5. EJECUTABLE MATLAB

Al ejecutar el archivo Matlab, lo primero que aparece es una ventana emergente para que el usuario seleccione el archivo Excel donde estarán nuestros datos. Para esta acción usaremos la función de Matlab 'uigetfile'. La función 'uigetfile' devuelve como argumentos el nombre del archivo seleccionado y el path del directorio en el que se encuentra dicho archivo.

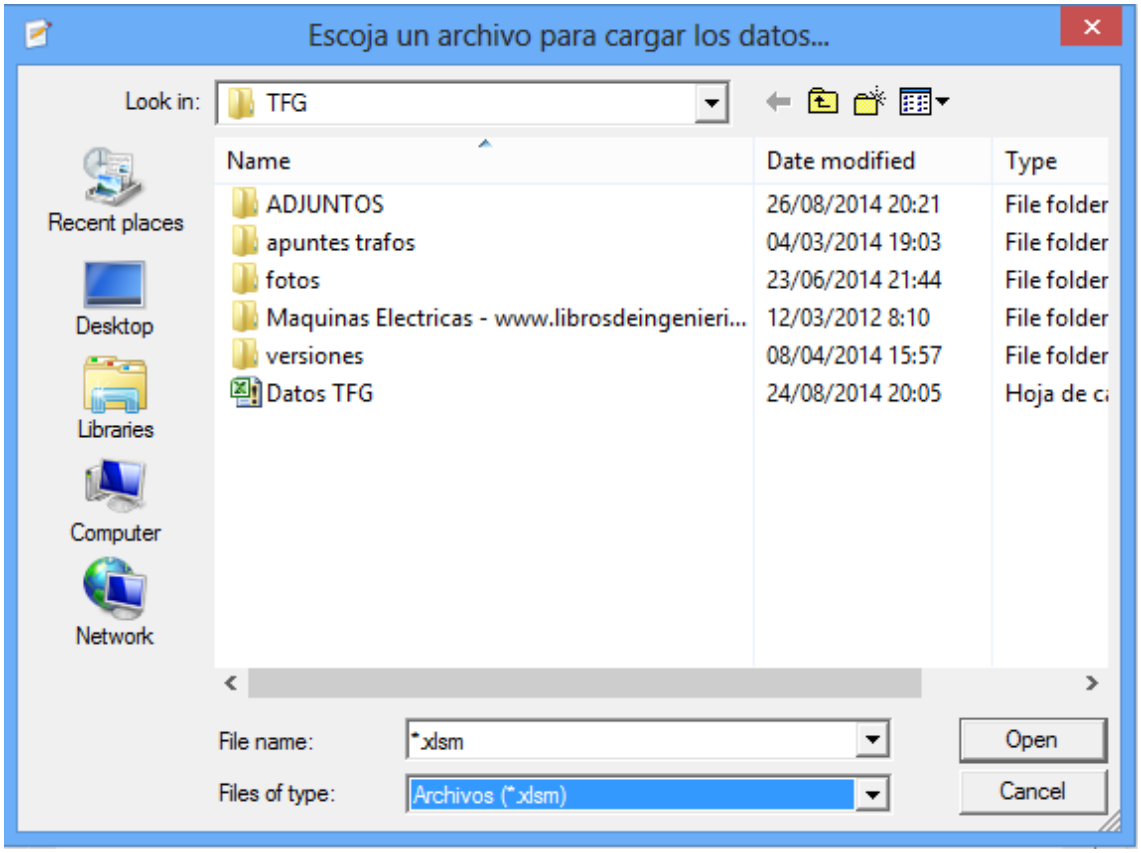


Ilustración 48: Ventana emergente para seleccionar archivos con los datos a exportar.

El archivo Excel que estamos utilizando es de la versión Excel 2010 habilitado para Macros por lo que su formato es .xlsm .Por lo tanto en " Files of Type" debemos seleccionar "Archivos (*xlsm)" para que aparezca el archivo Excel buscado.

Una vez seleccionado el archivo, el programa desarrollado en Matlab usa la función xlsread para extraer los datos de la plantilla y almacenarlos en su memoria, ordenándolos por temperatura, humedad y contenido en 2FAL. Creando una Base de

Datos que será usada posteriormente para los cálculos necesarios que el programa realiza para obtener los resultados finales.

Una vez procesados los datos, el programa pregunta por pantalla con cuál de sus funciones queremos trabajar:

- Se introduce un “1” se pulsa “Enter” para ver la evolución del grado de polimerización (DP) en el tiempo y ajustar dicha curva a la ecuación característica del proceso de envejecimiento.
- Se introduce un “2” y se pulsa “Enter” para obtener los factores K y A de la ecuación de degradación del papel de Emsley.
- Se Introduce un “3” y se pulsa “Enter” para calcular y mostrar la dependencia del factor A con la humedad.
- Se introduce un “4” y se pulsa “Enter” para calcular y mostrar la dependencia del factor K con la humedad.

Todo ello se muestra en la siguiente figura:

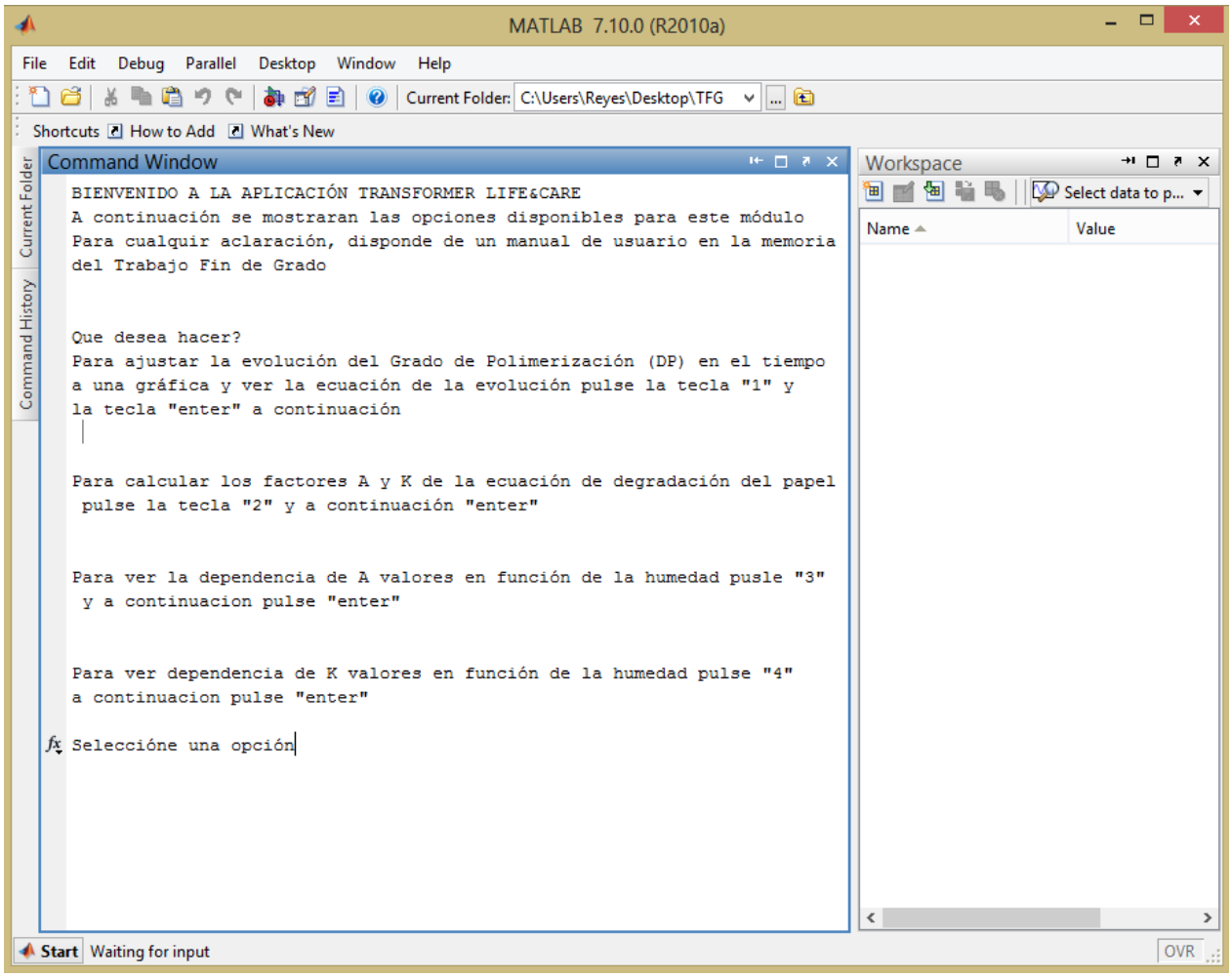


Ilustración 49: Ventana de inicio de la aplicación

Si la opción elegida es la 1, el programa nos pedirá ahora que introduzcamos para qué ensayo queremos dibujar las curvas, ya que en el libro Excel se encuentran los resultados de los 7 ensayos realizados hasta la fecha. El usuario debe indicar la temperatura y el grado de humedad que definen el ensayo con el que se desea trabajar.

Previamente, mediante la herramienta de Matlab "Curve Fitting toolbox" (cftool), hemos realizado los ajustes para todas las pruebas y exportado su código Matlab (.m) a la aplicación para que al introducir los datos de temperatura y humedad mediante un conjunto de "if" anidados muestre en pantalla los resultados para dichas condiciones.

A continuación se muestra como se han realizado los ajustes iniciales con la herramienta "cftool".

Al iniciar dicha herramienta, se muestra en pantalla la siguiente ventana:

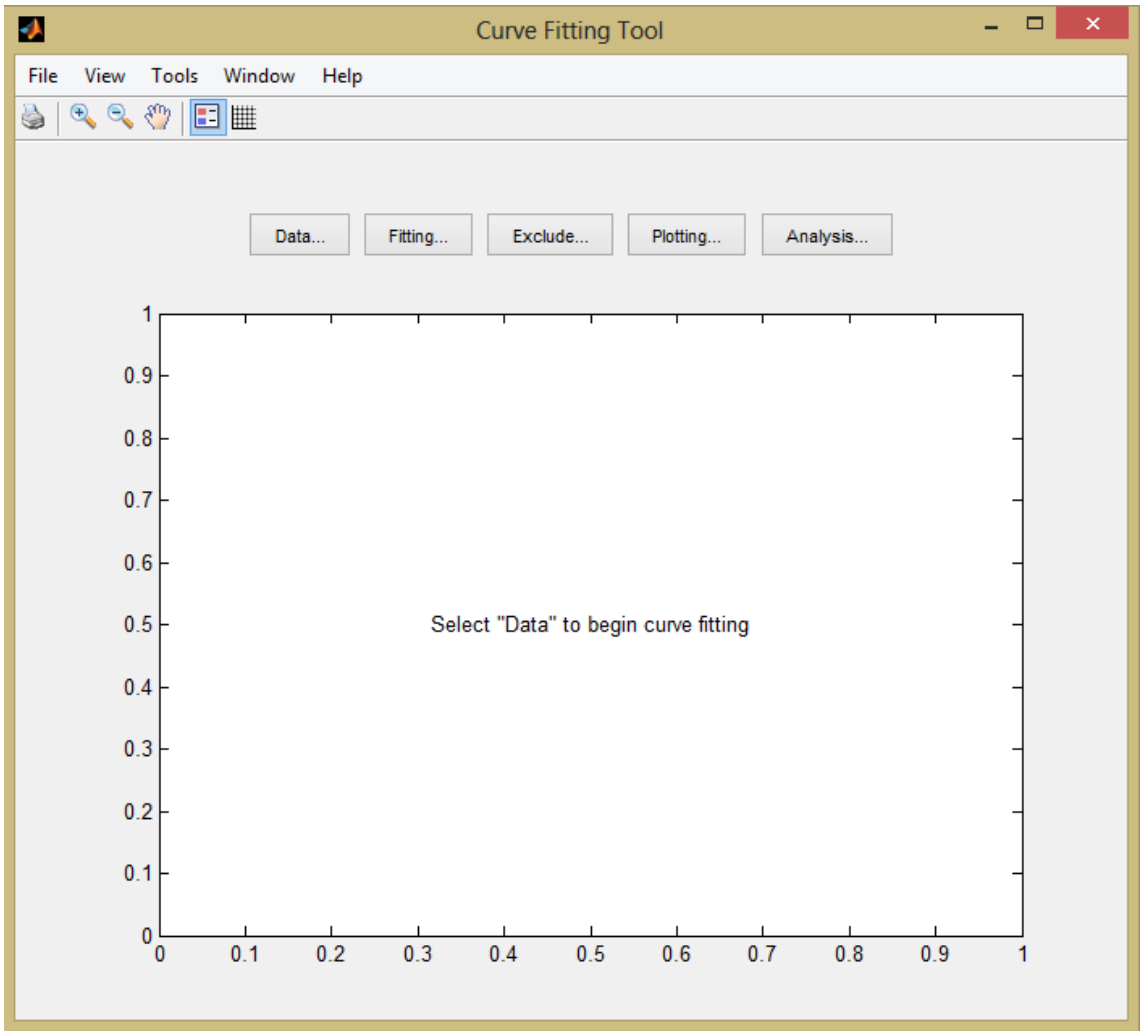


Ilustración 50: Ventana de inicio de la herramienta cftool.

En la pestaña de "Data", cargamos los datos que queremos analizar. En este caso representaremos la evolución del Grado de Polimerización en el eje Y, el tiempo en horas en el eje X.

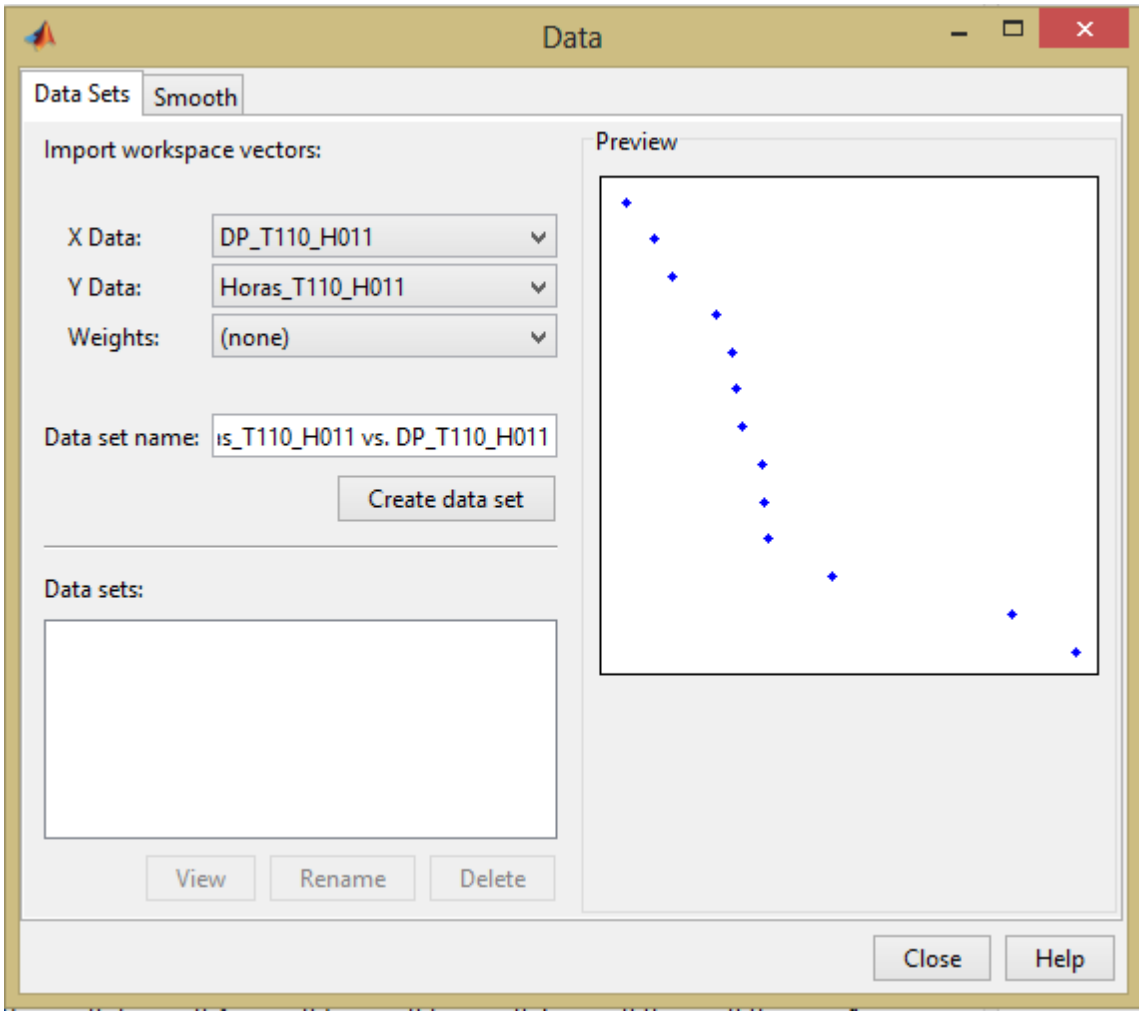


Ilustración 51: Pestaña "Data" de la herramienta cftool

Una vez introducidos los datos que queremos analizar, pulsamos el botón de “Create data set” y volvemos a la ventana inicial de la herramienta. El siguiente paso es ajustar estos datos a una gráfica y obtener la ecuación que describe la evolución, para ello

hacemos clic en la pestaña "Fitting". Donde aparecerá la siguiente ventana:

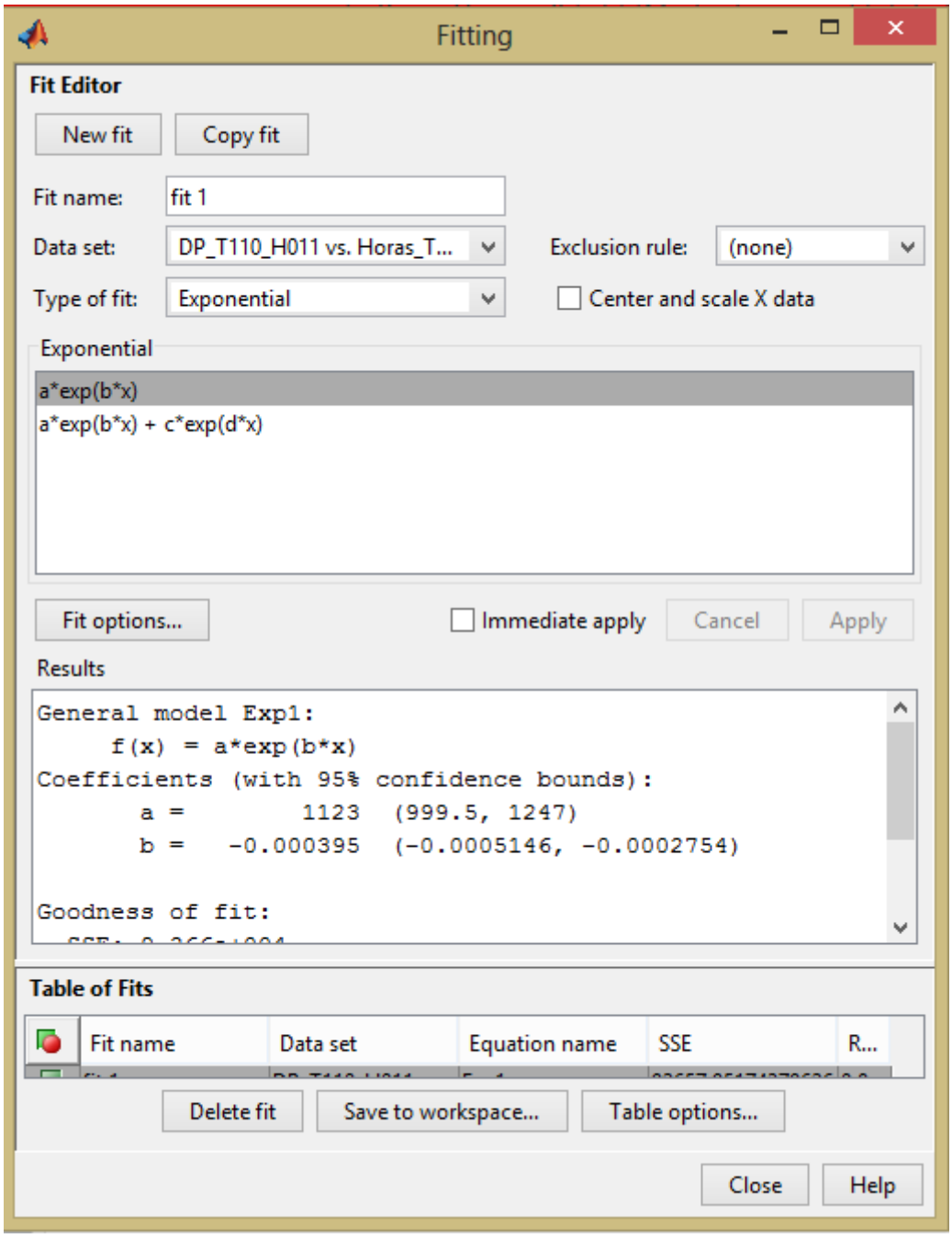
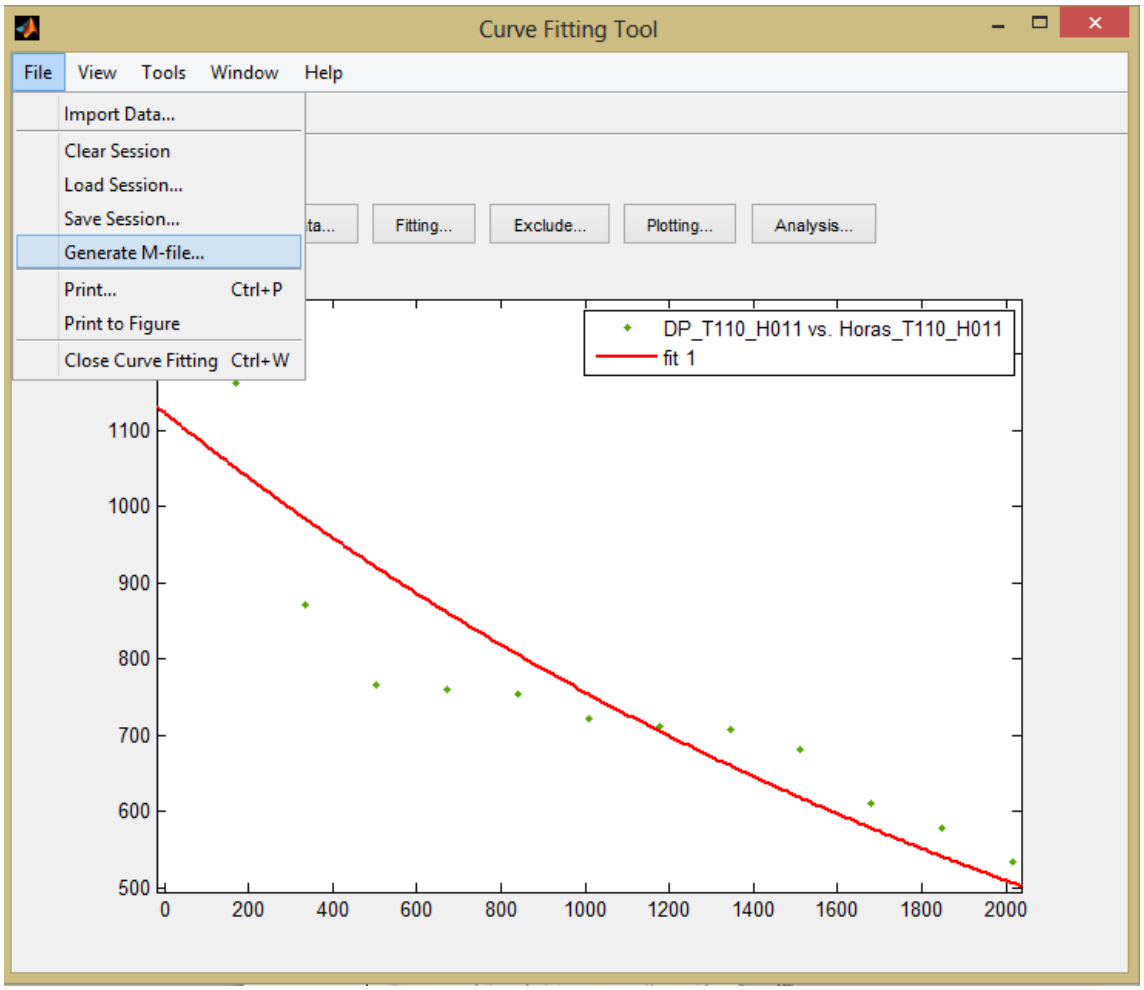


Ilustración 52: Ventana "Fitting" de la herramienta cftool

Esta herramienta da la opción de ajustar los datos previamente cargados al tipo de ecuación que nosotros seleccionemos. En este caso, dado que conocemos por estudios anteriores que la degradación del papel se asemeja a una función exponencial, seleccionamos en "Type of fit" exponencial.

En la parte de “Results” podemos ver la ecuación a la que se ajustan los datos y las características del ajuste como puede verse en la imagen anterior.

En la ventana inicial de la herramienta “cftool” aparecen ya representados los datos y el ajuste. Una vez creado el ajuste, exportamos el código Matlab de esta operación e insertamos este código en la aplicación “Transformer life&care”.



Este proceso se ha realizado en el desarrollo del programa, con lo que una vez obtenido el código Matlab de un ajuste, la aplicación va cambiando las variables sobre ese código inicial para obtener el ajuste del resto de pruebas realizadas.

Así, al introducir en la aplicación los datos de temperatura y humedad, la aplicación muestre en forma de ventana emergente la gráfica donde se puede ver la evolución de los datos del Grado de polimerización (DP) frente al tiempo en horas. También en la

ventana " Command Window" aparece la ecuación que describe la evolución y todos los datos correspondientes al ajuste.

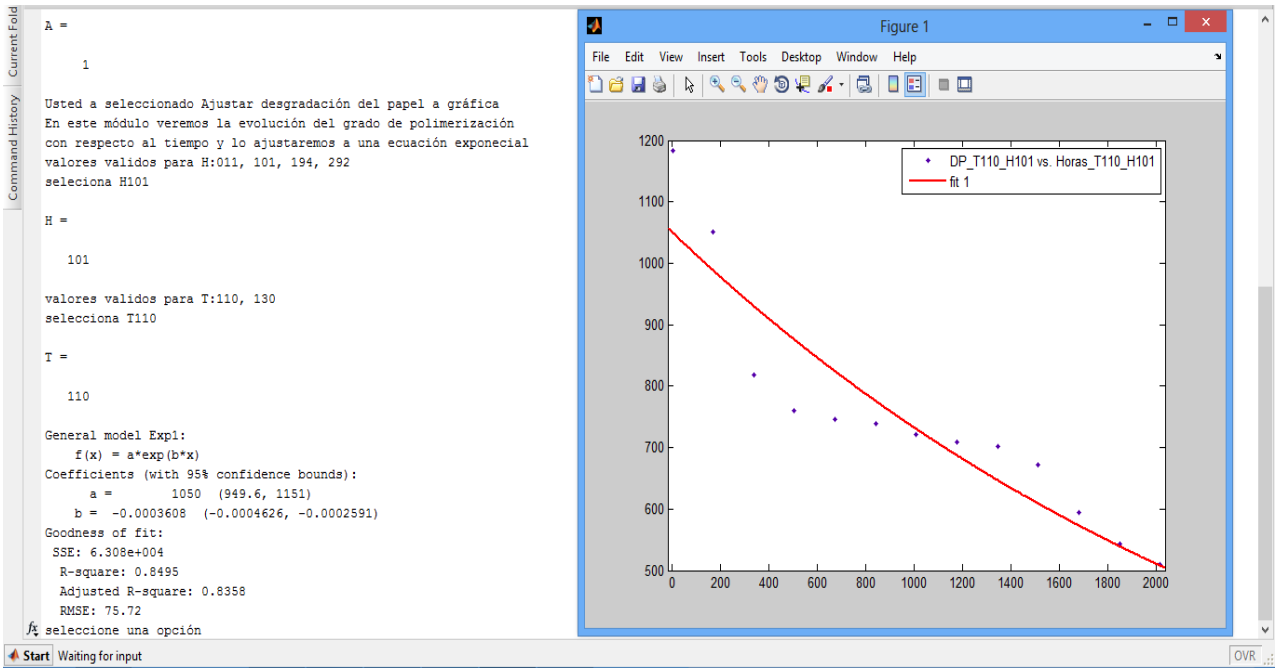


Ilustración 53: Resultados obtenidos por la aplicación para la opción 1 con una temperatura de 110ºC y una humedad del 1.01%

- Si la opción elegida de es la "2", la aplicación nos mostrará el valor de los factores A y K de la ecuación de orden cero de degradación del papel de Emsley.

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_{inicial}} = A \times t \times e^{\frac{-E_a}{RT}}$$

Siendo

$$A \; x \; e^{\frac{-E_a}{RT}} = k$$

Como vimos anteriormente, estos calculos se realizan en la hoja Excel "Plantilla" previamente a la exportación ya que el cálculo de este tipo de operaciónes en Excel es más sencillo que en Matlab por lo que la aplicación muestra el resultado de esta operación y los valores máximos y mínimos de cada factor para cada prueba.

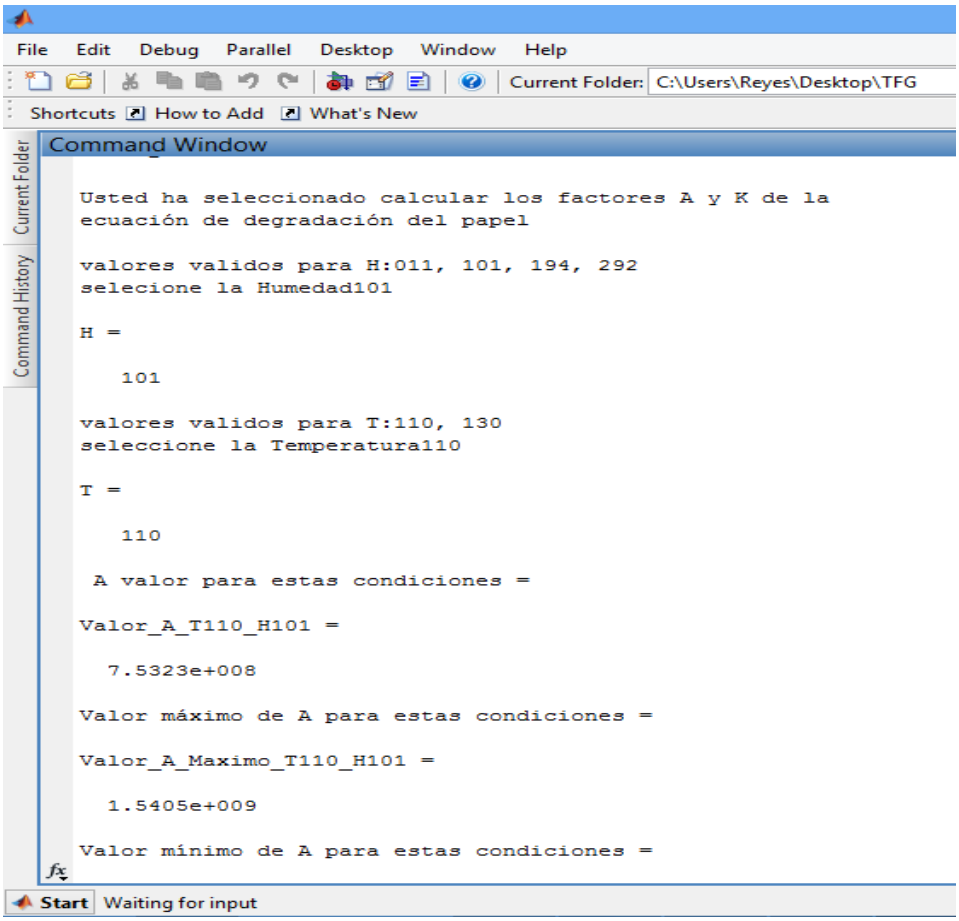


Ilustración 54: Valores de A y K obtenidos por la aplicación.

Cuando la opción elegida es la 3, la aplicación nos muestra la dependencia del valor del factor A con la humedad. Al igual que en la opción anterior, este ajuste le realizamos mediante la herramienta “Curve Fitting toolbox” (cftool).

Como se indicó en la opción 1, con la herramienta “cftool”, hacemos el ajuste inicial, en este caso ajustamos a un tipo de ecuación polinómica de segundo orden, y exportamos el código Matlab (.m) y la aplicación modificará este código en función de las condiciones de entrada que el usuario introduzca con lo que en forma de ventana emergente aparecerá la gráfica mostrándonos esta dependencia y en la ventana de “Command Window” la ecuación y los datos del ajuste.

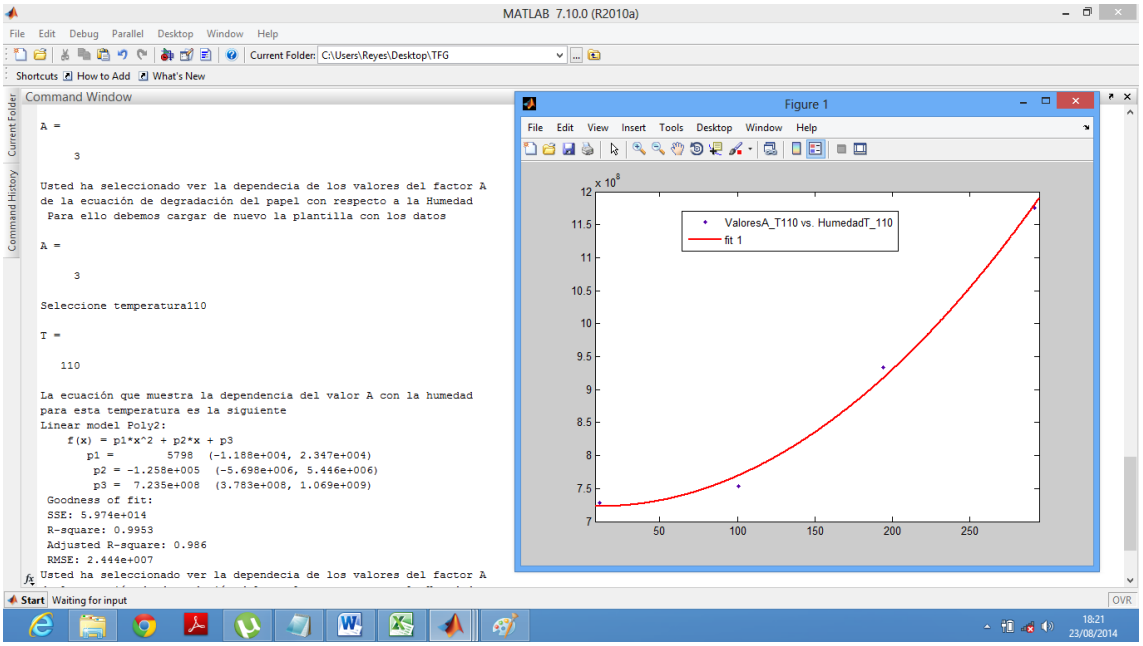


Ilustración 55: Resultados obtenidos por la aplicación para la opción 3

En la opción 4 la aplicación nos muestra la dependencia del factor K con la humedad y al igual que en la opción 3, este ajuste se realiza con la herramienta de Matlab "Curve Fitting toolbox" (cftool). El resultado es el siguiente:

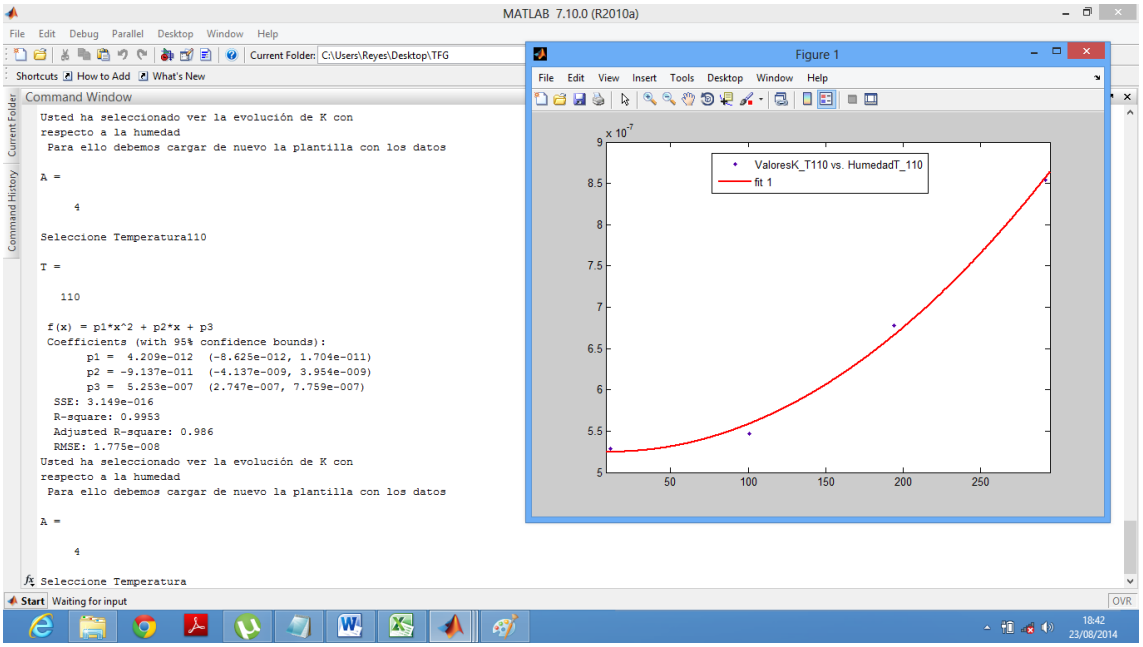


Ilustración 56: Resultados obtenidos por la aplicación para la opción 4.

Estos resultados pueden obtenerse tantas veces como se deseen para todos las condiciones de temperatura y humedad descritas anteriormente.

CAPITULO 6

RESULTADOS

Con los datos proporcionados por el departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Carlos III de Madrid mediante los resultados obtenidos con el programa Matlab realizaremos un estudio similar al de Lelekakis y contrastaremos los resultados.

6.1.1 Evolución del grado de polimerización con respecto al tiempo:

Los resultados obtenidos para la evolución del grado de polimerización con respecto al tiempo para las medidas tomadas son los siguientes:

Para una temperatura de 110ºC y un grado de humedad del 0.11%:

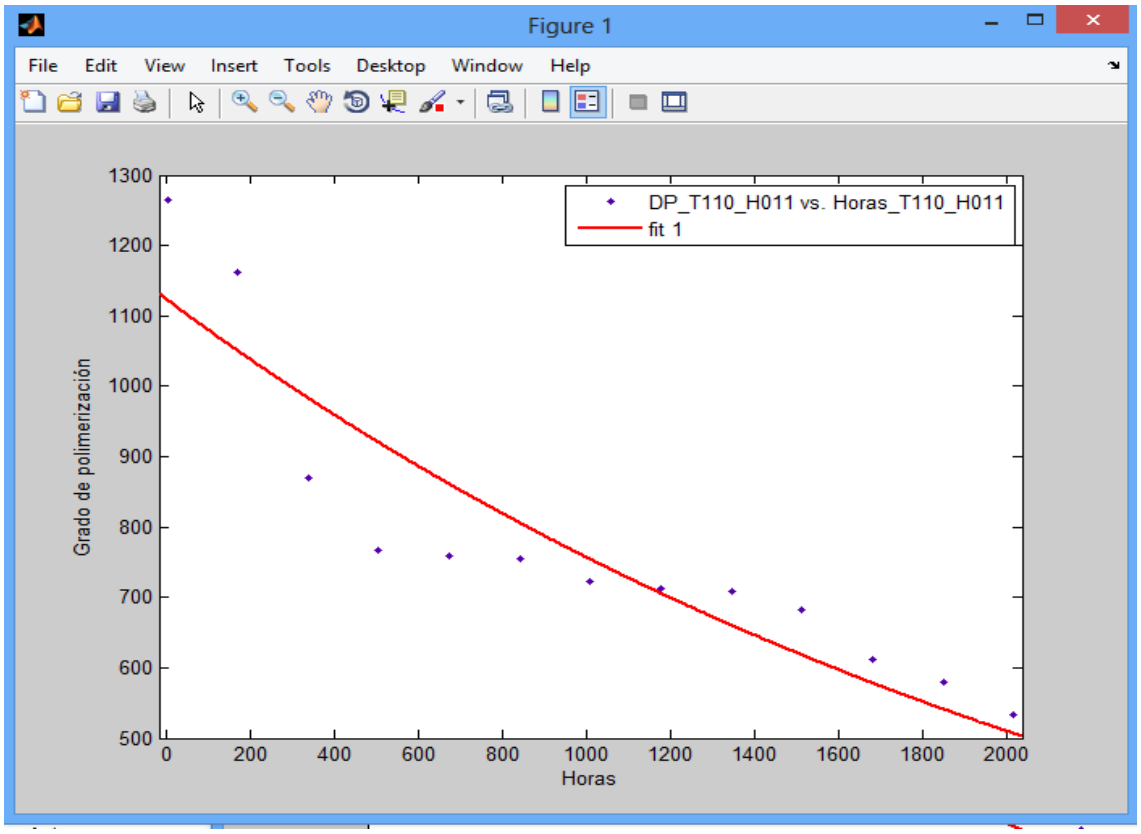


Ilustración 57: Evolución del Grado de polimerización en el tiempo para una temperatura de 110 y un grado de humedad del 0.11%

```
General model Exp1:
f(x) = a*exp(b*x)
Coefficients (with 95% confidence bounds):
     a =        1123  (999.5, 1247)
      b =   -0.000395  (-0.0005146, -0.0002754)
 Goodness of fit:
  SSE: 9.266e+004
  R-square: 0.829
 Adjusted R-square: 0.8134
  RMSE: 91.78
```

Para una temperatura de 110 y un grado de humedad de 1.01%:

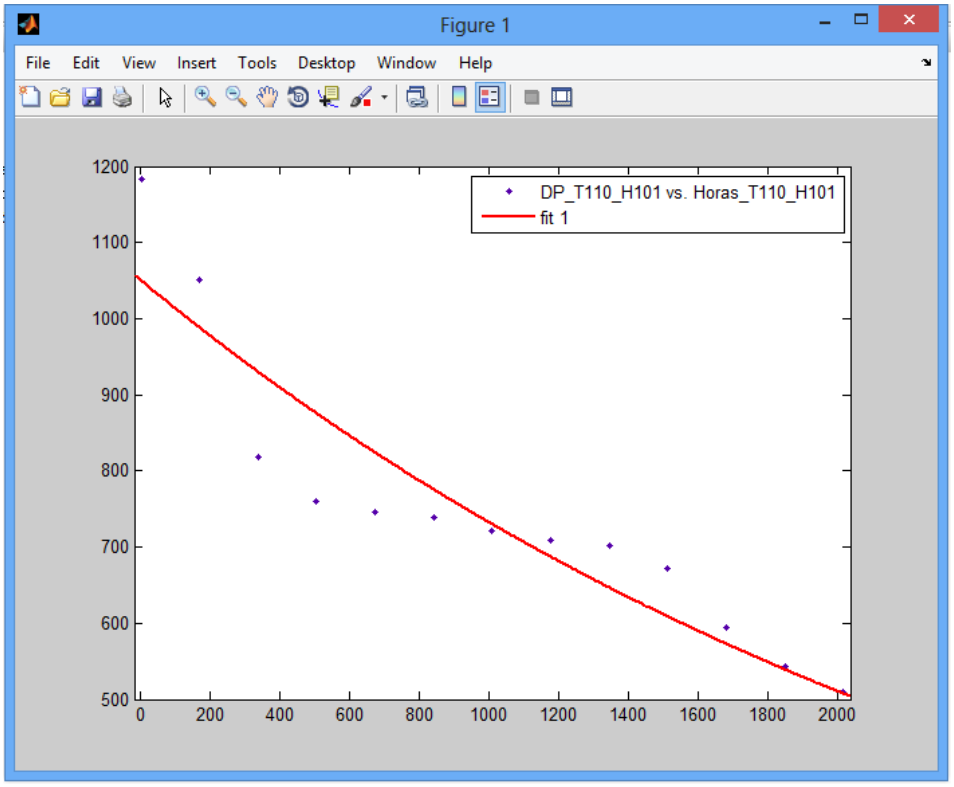


Ilustración 58: Evolución del Grado de polimerización en el tiempo para una temperatura de 110 y un grado de humedad del 1.01%

```
General model Exp1:
    f(x) = a*exp(b*x)
Coefficients (with 95% confidence bounds):
      a =        1050  (949.6, 1151)
    b =  -0.0003608  (-0.0004626, -0.0002591)
Goodness of fit:
 SSE: 6.308e+004
  R-square: 0.8495
  Adjusted R-square: 0.8358
  RMSE: 75.72
```

Para una temperatura de 110ºC y una humedad de 1.94%

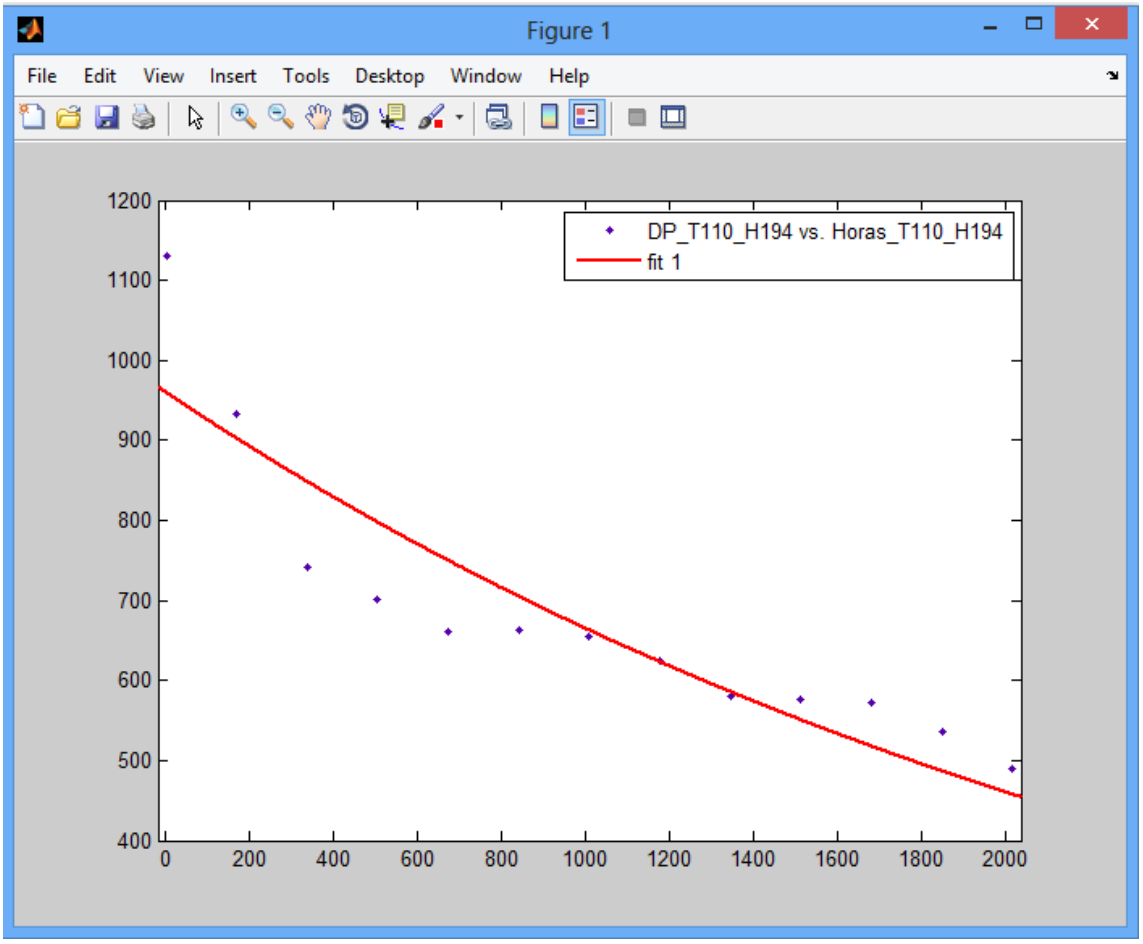


Ilustración 59: Evolución del Grado de polimerización en el tiempo para una temperatura de 110 y un grado de humedad del 1.94%

General model Exp1:
f(x) = a*exp(b*x)
Coefficients (with 95% confidence bounds):
a = 960.2 (855.3, 1065)
b = -0.0003677 (-0.000484, -0.0002513)

Goodness of fit:
SSE: 6.792e+004
R-square: 0.8137
Adjusted R-square: 0.7968
RMSE: 78.58

Para una temperatura de 110ºC y un grado de humedad de 2.92%

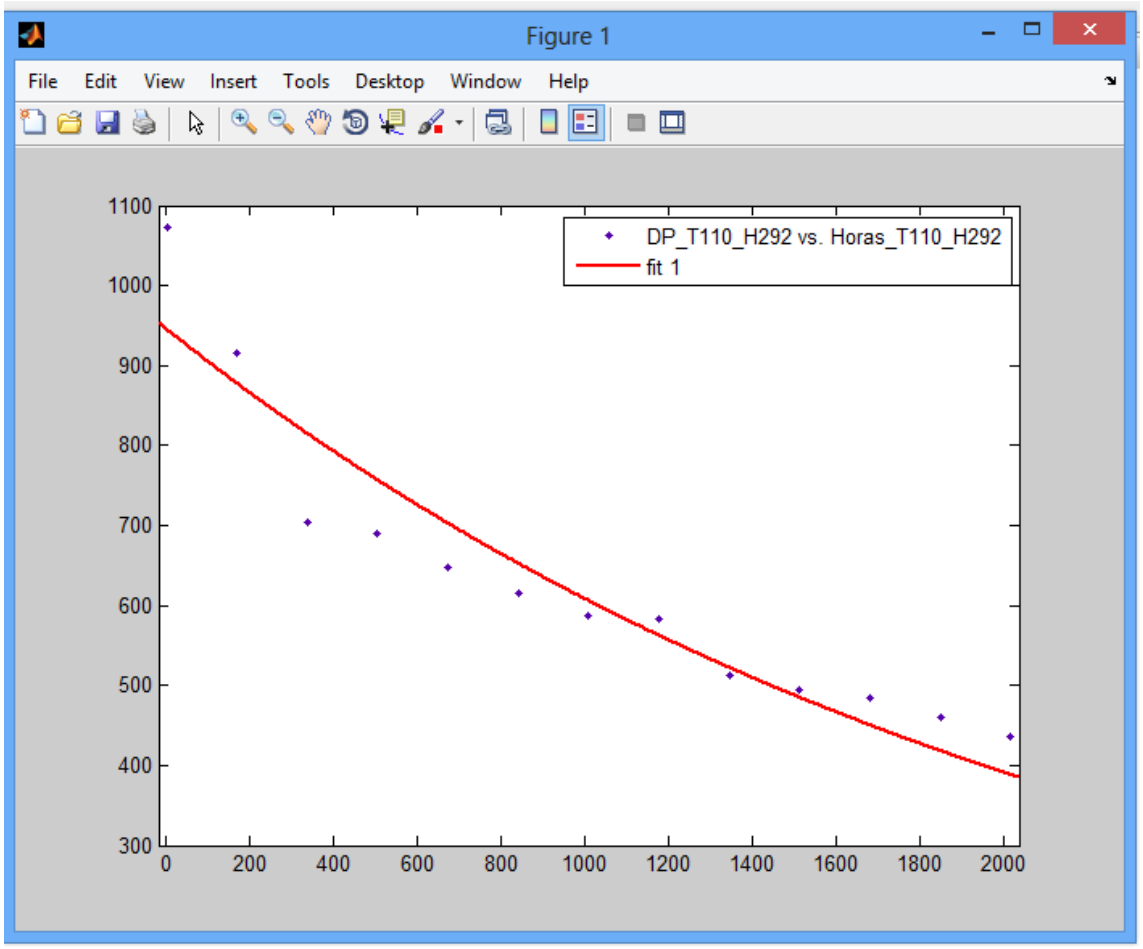


Ilustración 60: Evolución del Grado de polimerización en el tiempo para una temperatura de 110 y un grado de humedad del 2.92%

General model Exp1:
f(x) = a*exp(b*x)
Coefficients (with 95% confidence bounds):
a = 945.6 (858, 1033)
b = -0.0004416 (-0.0005457, -0.0003375)

Goodness of fit:
SSE: 4.51e+004
R-square: 0.8905
Adjusted R-square: 0.8805
RMSE: 64.03

Para una temperatura de 130ºC y un grado de humedad de 1.01%

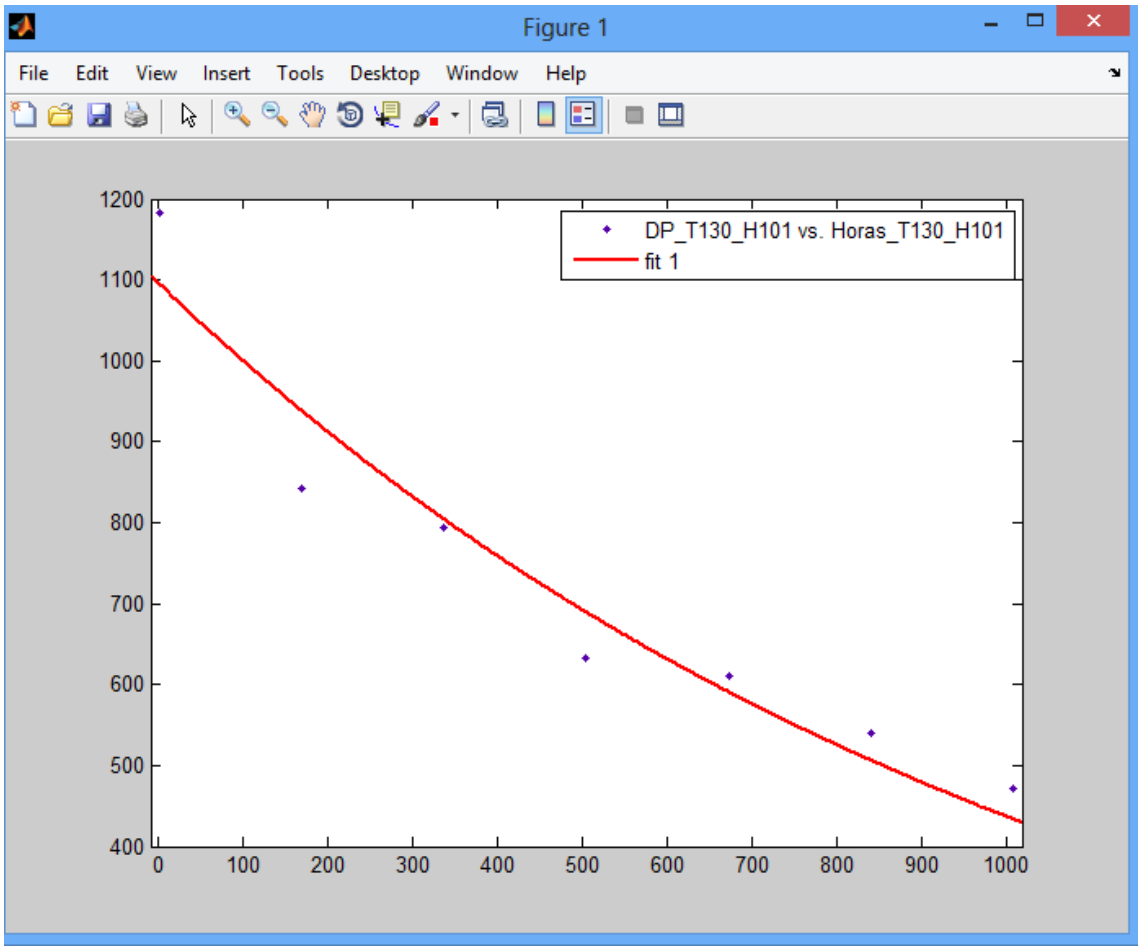


Ilustración 61: Evolución del Grado de polimerización en el tiempo para una temperatura de 130 y un grado de humedad del 1.01%

General model Exp1:
f(x) = a*exp(b*x)
Coefficients (with 95% confidence bounds):
a = 1097 (957.4, 1236)
b = -0.0009203 (-0.001214, -0.0006268)

Goodness of fit:
SSE: 2.347e+004
R-square: 0.9327
Adjusted R-square: 0.9192
RMSE: 68.52

Para una temperatura de 130ºC y un grado de humedad de 1.94%

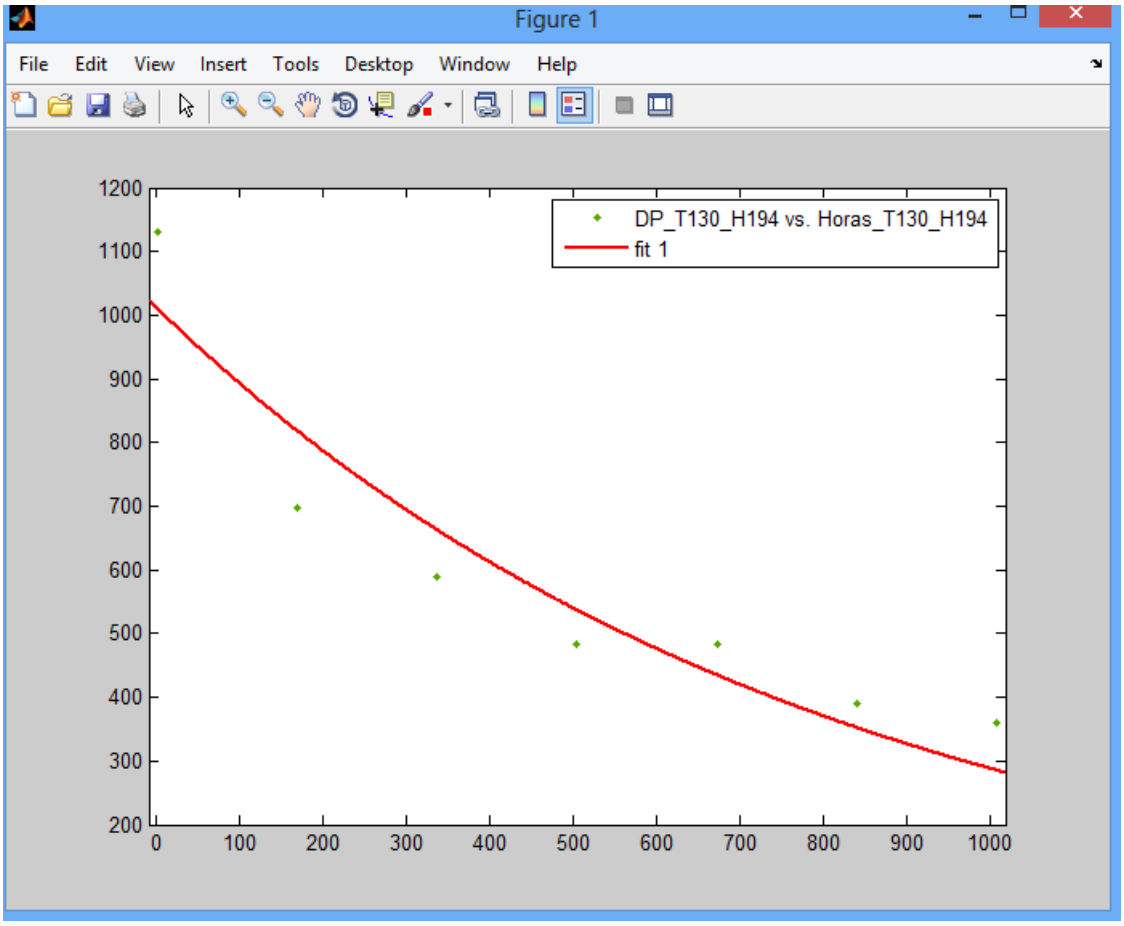


Ilustración 62: Evolución del Grado de polimerización en el tiempo para una temperatura de 130 y un grado de humedad del 1.94%

General model Exp1:
f(x) = a*exp(b*x)
Coefficients (with 95% confidence bounds):
a = 1012 (807.6, 1217)
b = -0.001257 (-0.001796, -0.0007188)

Goodness of fit:
SSE: 4.678e+004
R-square: 0.8882
Adjusted R-square: 0.8659
RMSE: 96.73

Para una temperatura de 130ºC y un grado de humedad de 2.92

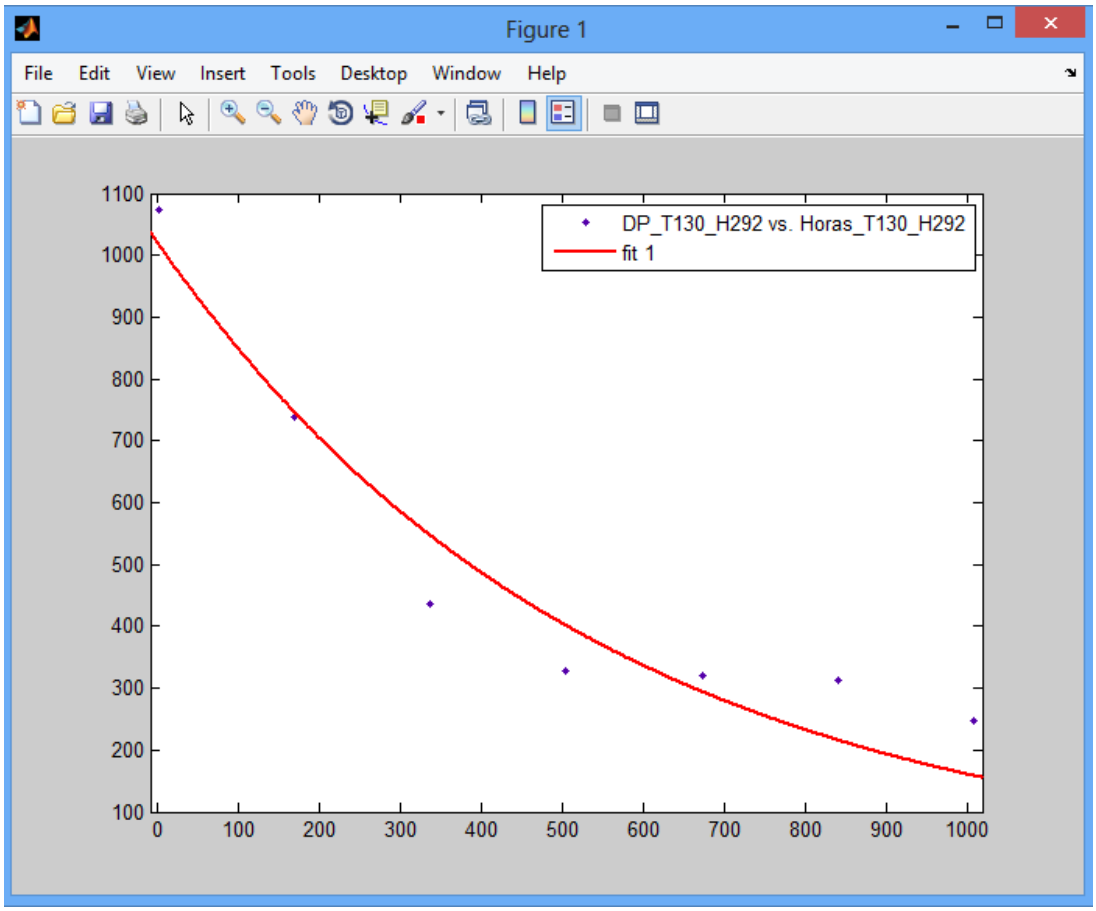


Ilustración 63: Evolución del Grado de polimerización en el tiempo para una temperatura de 130 y un grado de humedad del 2.92%

General model Exp1:
f(x) = a*exp(b*x)
Coefficients (with 95% confidence bounds):
a = 1020 (821.3, 1219)
b = -0.001849 (-0.002518, -0.001181)

Goodness of fit:
SSE: 3.921e+004
R-square: 0.9287
Adjusted R-square: 0.9144
RMSE: 88.56

Como se puede observar, el ajuste de los datos no ha sido muy bueno ya que en la mayoría de las pruebas el coeficiente de correlación es inferior a 0.9.

6.1.2 Valores de los factores A y K:

Los valores obtenidos para los factores A para las diferentes pruebas son los siguientes:

A-valor (h^-1)		
Humedad	**110 ºC**	**130ºC**
0,11%	1,33E+08	
1,01%	1,37E+08	3,15E+08
1,94%	1,42E+08	4,66E+08
2,92%	1,67E+08	7,67E+08

Tabla 6: Resultados de los A-valores obtenidos por la aplicación

Como era de esperar, a medida que la humedad aumenta el factor A aumenta al igual que al aumentar la temperatura el factor A se incrementa también.

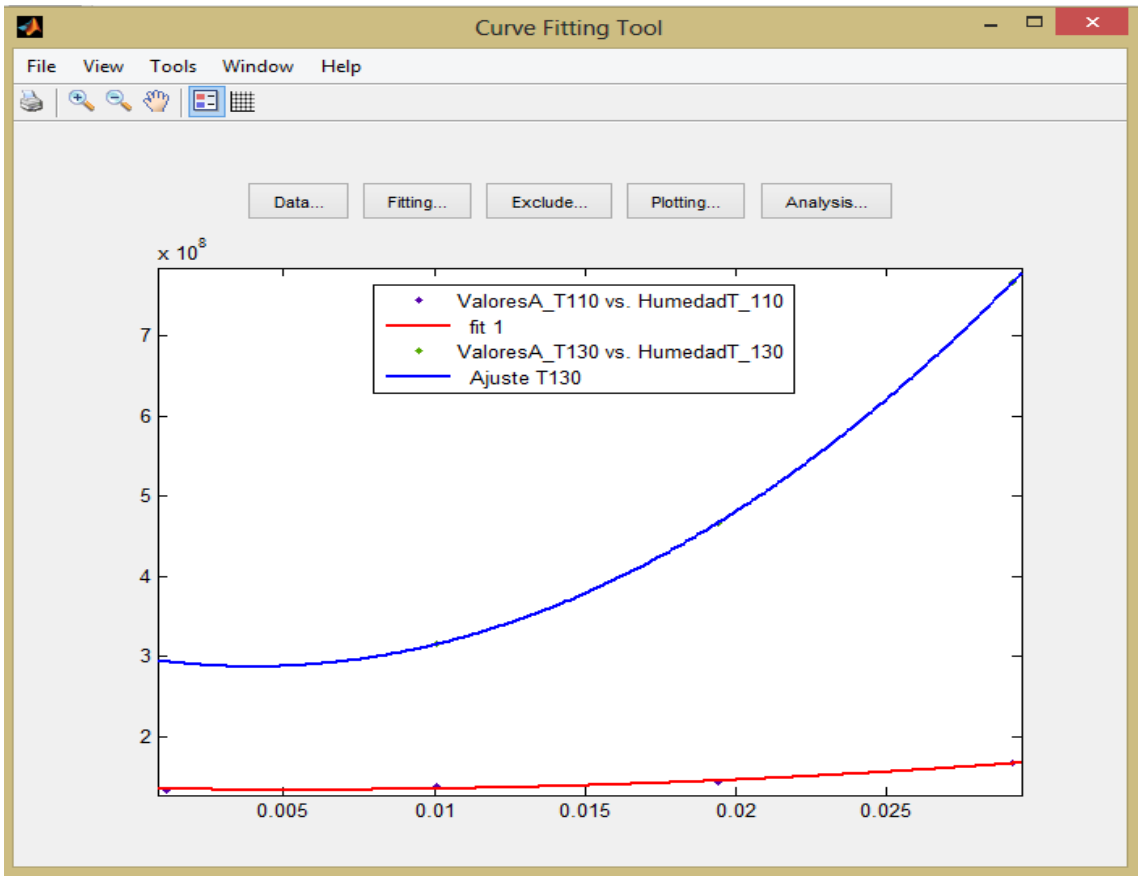


Ilustración 64: Dependencia de los A-valores en función de la humedad y la temperatura obtenidas por la aplicación.

Puede verse como para la temperatura de 110 ºC el valor de A es menos dependiente de la humedad que para las pruebas realizadas a 130ºC. Esta dependencia también se ve incrementada debido a que la concentración de oxígeno a 130ºC es mayor que a 110ºC.

Los valores obtenidos para el factor K de la ecuación de envejecimiento son los siguientes:

K-valor (h^-1)		
Humedad	110 ºC	130ºC
0,11%	5,37E-07	
1,01%	5,54E-07	1,27E-06
1,94%	5,74E-07	1,88E-06
2,92%	6,75E-07	3,09E-06

Tabla 7: Valores de la tasa de cambio o factor K obtenidos por la aplicación.

Al igual que para el factor A, este factor se incrementa al aumentar la humedad y la temperatura.

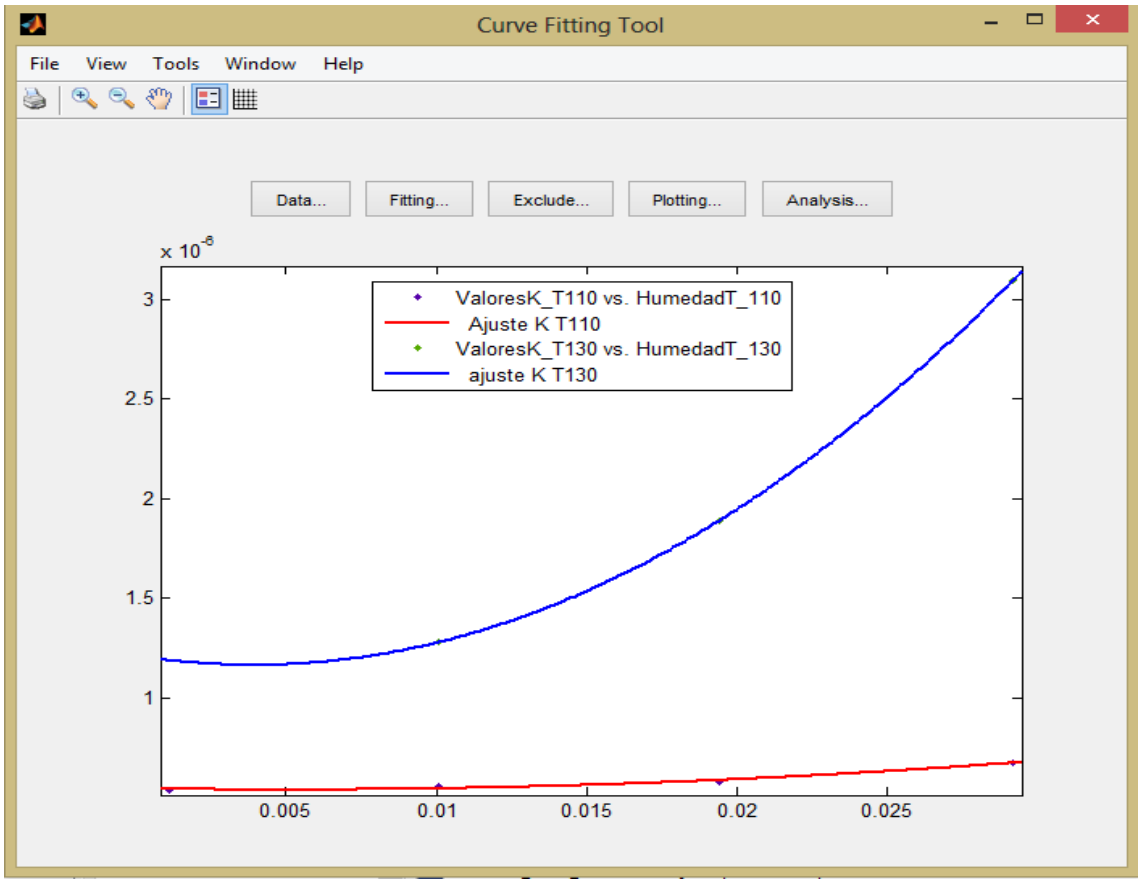


Ilustración 65: Dependencia de los K-valor en función de la humedad y la temperatura obtenidos por la aplicación.

Como era de esperar, la tasa de reacción o factor K es más dependiente de la humedad a medida que aumenta la temperatura lo cual se ve también afectado por la variación en la concentración de oxígeno de ambas pruebas.

6.1.3 Dependencia de A en función de la humedad

Para las pruebas realizadas a 110ºC la dependencia del factor A con la humedad puede verse en la siguiente gráfica:

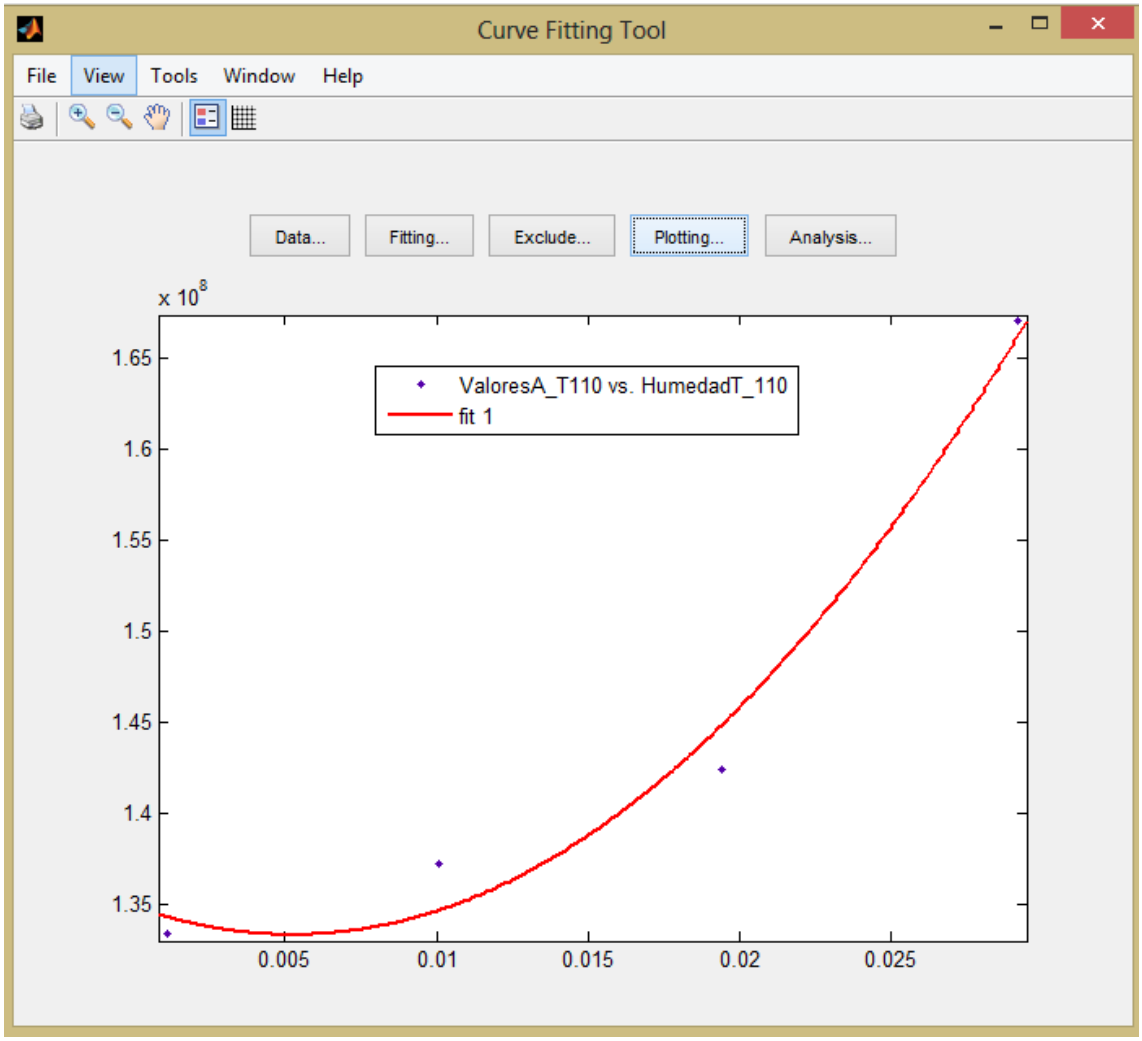


Ilustración 66: Dependencia del factor A con la humedad para una temperatura de 110ºC y baja concentración de oxígeno.

Siendo la ecuación característica la siguiente:

```
La ecuación que muestra la dependencia del valor A con la humedad
para esta temperatura es la siguiente
 A-valor=5.798e+010*x^2 -6.015e+008*x + 1.349e+008
       p1 =   5.798e+011   (-2.12e+011, 3.267e+011)
       p2 =  -6.015e+008   (-9.091e+009, 7.888e+009)
       p3 =  1.349e+008    (8.23e+007, 1.875e+008)
 Goodness of fit:
 SSE: 1.387e+013
 R-square: 0.9798
 Adjusted R-square: 0.9394
 3.724e+006
```

Para las pruebas realizadas a 130ºC la dependencia del factor A con la humedad puede verse en la siguiente gráfica:

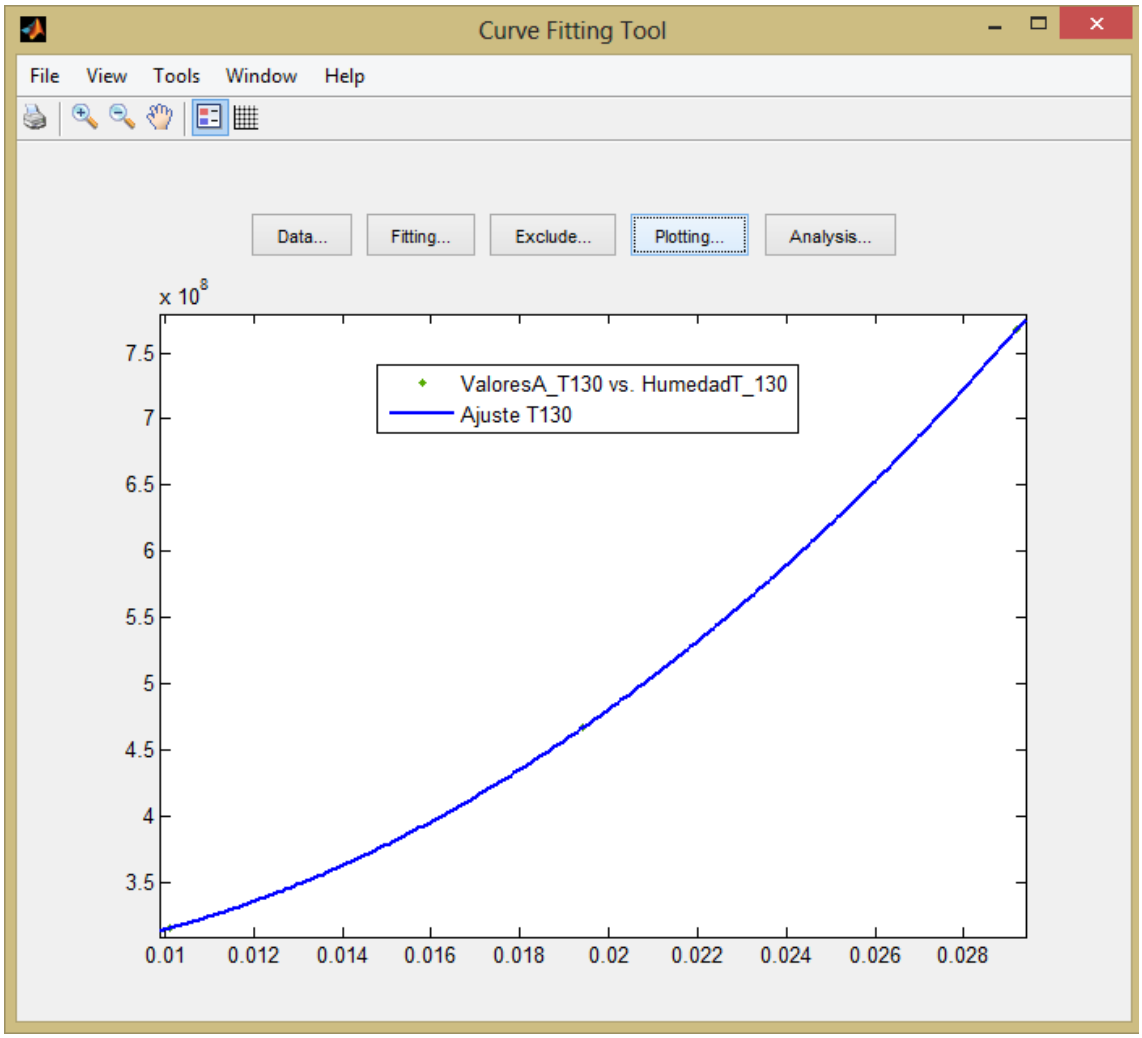


Ilustración 67: Dependencia del factor A en función de la humedad para una temperatura de 130ºC y alta concentración de oxígeno

Siendo la ecuación característica la siguiente:

```
La ecuación que muestra la dependencia del valor A con la humedad
para esta temperatura es la siguiente
 A-valor = 7.559e+011*Huemdad^2 + -6.029e+009*Humedad + 2.99e+008
    p1 =  7.559e+011
   p2 = -6.029e+009
    p3 =   2.99e+008
 SSE: 1.847e-013
 R-square: 1
 Adjusted R-square: NaN
 RMSE: NaN
```

Vemos que en este caso el ajuste es perfecto por lo que no hay coeficiente de correlación.

6.1.4 Dependencia de K-valores en función de la humedad

Para las pruebas realizadas a 110ºC la dependencia del factor K con la humedad puede verse en la siguiente gráfica:

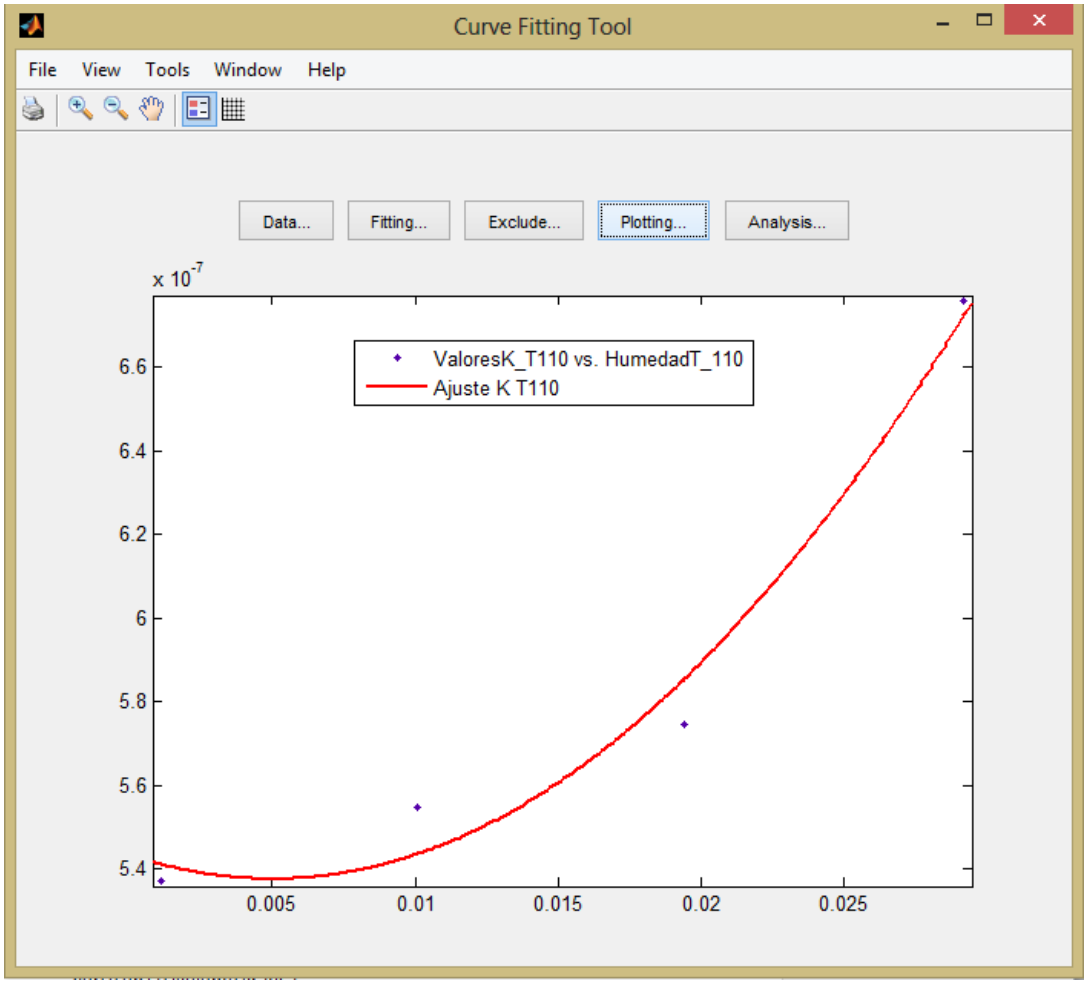


Ilustración 68: Dependencia del factor K con la humedad para una temperatura de 110ºC y baja concentración de oxígeno.

La ecuación que describe la evolución es la siguiente:

```
La ecuación que describe la dependencia del valor K con la huemdad es la siguiente:
 K-valores = 0.0002302*Huemdad^2 + -2.298e-006*Huemdad + 5.433e-007
 Coefficients (with 95% confidence bounds):
       p1 =  0.0002302  (-0.0009438, 0.001404)
       p2 = -2.298e-006  (-3.93e-005, 3.471e-005)
       p3 =  5.433e-007  (3.14e-007, 7.725e-007)
  SSE: 2.635e-016
  R-square: 0.9772
  Adjusted R-square: 0.9316
  RMSE: 1.623e-008
```

Para las pruebas realizadas a 130ºC la dependencia del factor K con la humedad puede verse en la siguiente gráfica:

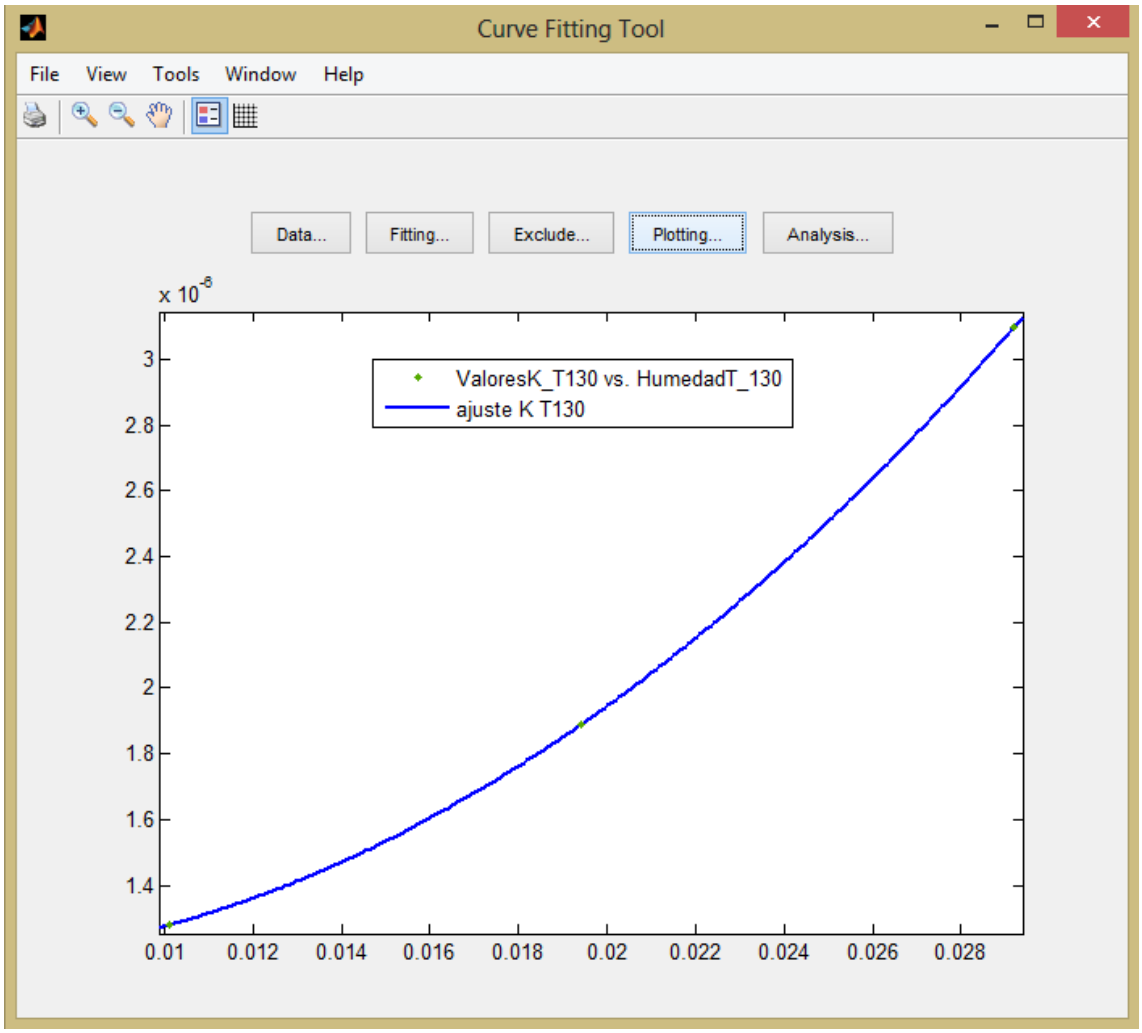


Ilustración 69: Dependencia del factor K con la humedad para una temperatura de 130ºC y alta concentración de oxígeno.

La ecuación que describe la dependencia de k con la humedad es la siguiente

```
La ecuación que describe la dependencia del K-valor con la humedad es la siguiente:
  K-valor = 0.003024*Humedad^2 + -2.369e-005*Humedad + 1.209e-006
 Coefficients:
       p1 =   2.28e-012
       p2 =  9.196e-009
       p3 =  2.979e-007
  SSE: 4.529e-042
  R-square: 1
  Adjusted R-square: NaN
  RMSE: NaN
```

6.2 Comparación de los resultados obtenidos con los estudios realizados por el resto de investigadores.

Los resultados obtenidos con la aplicación "Transformer Life&Care" los compararemos a los obtenidos por el resto de investigadores para estudios similares.

En primer lugar veremos que el grado de polimerización (DP) para las pruebas realizadas por el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Carlos III de Madrid sigue la misma evolución que en las pruebas realizadas por Lelekakis y su equipo.

Para las pruebas realizadas en la UC3M, la evolución es la siguiente:

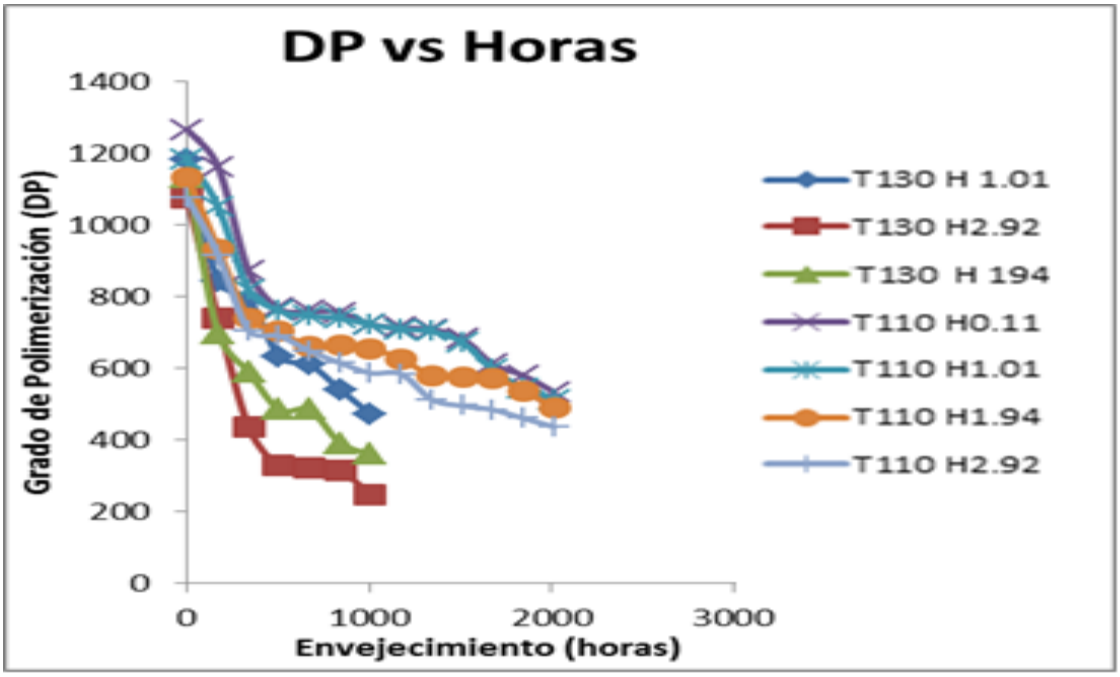


Ilustración 70: Evolución del grado de polimerización en el tiempo con los datos obtenidos por la UC3M.

Como se puede ver en la hoja de datos "Datos TFG", la concentración de oxígeno para las pruebas a 130ºC era mayor a 6000 ppm por lo que en la comparación de los resultados tendremos en cuenta estas dos situaciones.

6.2.1 Pruebas con baja concentración de oxígeno:

Para la temperatura de 110ºC y baja concentración de oxígeno obtenemos los siguientes resultados:

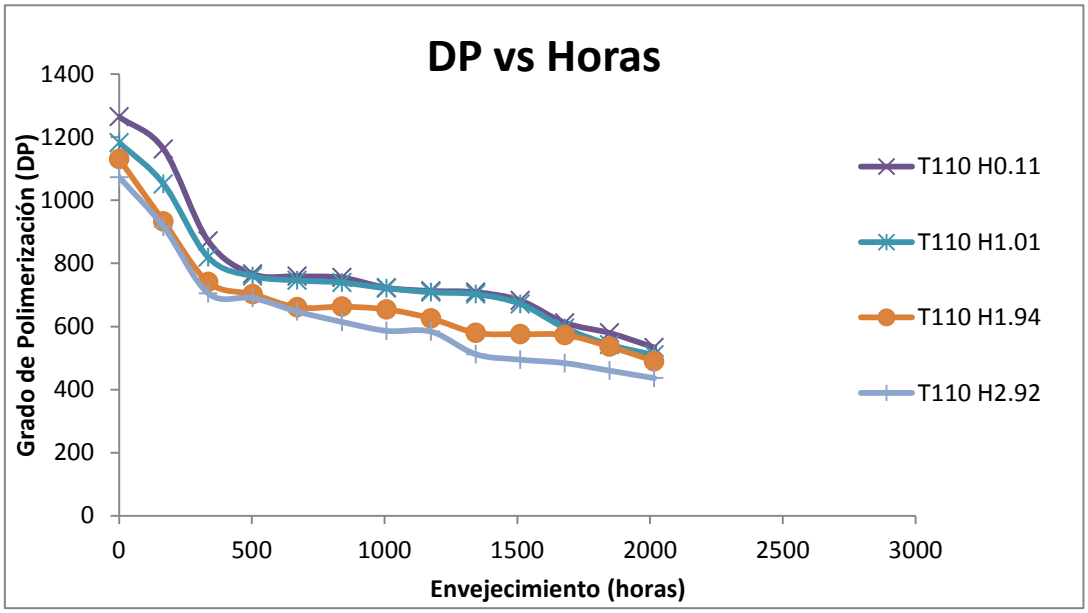


Ilustración 71: Evolución del grado de polimerización en el tiempo con los datos obtenidos por la UC3M para baja concentración de oxígeno.

Como se ve, las curvas están muy próximas entre sí, lo que parece indicar que para esta temperatura y concentración de oxígeno el envejecimiento no está muy influido por el contenido en humedad de la muestra.

Superponiendo estos resultados a los de Lelekakis para el mismo tipo de papel obtenemos la siguiente gráfica:

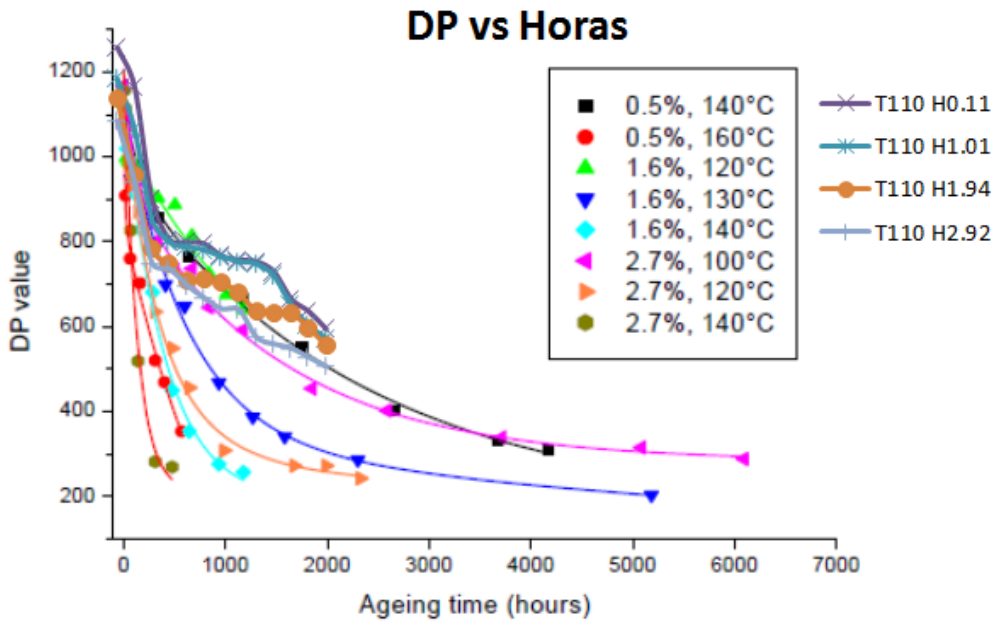


Ilustración 72: Comparación evolución del grado de polimerización del papel con datos de Lelekakis y UC3M.

En la gráfica anterior podemos ver como nuestros datos se asemejan a los de Lelekakis ya que la degradación sigue la misma evolución, pero para condiciones similares es menor, es decir, nuestro papel se degrada de forma más lenta.

Una posible hipótesis sobre la diferencia entre las curvas de Lelekakis y las de UC3M es que el tipo de papel utilizado no sea del mismo fabricante por lo que tenga propiedades ligeramente diferentes. Como por ejemplo la concentración de Nitrógeno que como vimos en la revisión bibliográfica es un factor que influye en la velocidad de degradación del papel.

En la siguiente tabla compararemos los resultados obtenidos por Emsley, Lelekakis y Lundgaard para pruebas con baja concentración de oxígeno y con una energía de activación (Ea) = 111 KJ/mol a los obtenidos por la aplicación para el valor del factor A de la ecuación anterior:

	A valor (h^-1)			
Humedad	Emsley	Lundgaard*	Lelekakis	UC3M (T=110ºC)
0,11				1,33E+08
0,5			1,42E+08	
0,7	3,50E+08			
1,01				1,37E+08
1,5		4,55E+08		
1,6			6,80E+08	
1,94				1,42E+08
2	7,80E+08			
2,7			1,65E+09	
2,92				1,67E+08
4	3,50E+09			
4,1		1,44E+09		

* se calcula el valor medio del rango

Tabla 8: Valor del factor A obtenidos de forma experimental por diferentes investigadores.

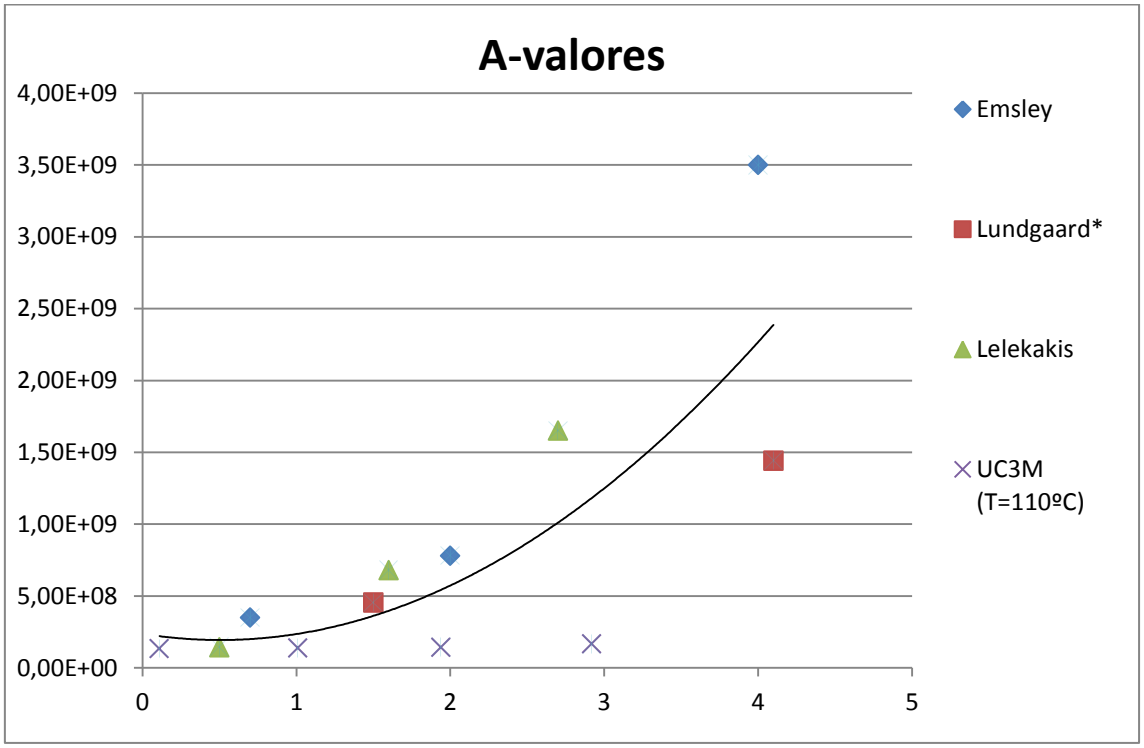


Ilustración 73: Representación gráfica de los valores de A obtenidos por diferentes investigadores en función de la humedad.

Al igual que ocurría con la evolución del grado de polimerización, el factor A obtenido para nuestras pruebas es menor.

Ajustando los datos y eliminando los más dispares, Lelekakis describió la evolución del A-valor con la humedad cuando la concentración de oxígeno es menor de 6000 ppm con la siguiente ecuación:

$$y = (1.78E+12)x^2 + (1.10E+10)x + 5.28E+07$$

Mientras que la aplicación "Transformer life&care" obtiene una dependencia del valor de A para una temperatura de 110ºC y una concentración de oxígeno menor de 6000 ppm descritas con la siguiente ecuación:

```
La ecuación que muestra la dependencia del valor A con la humedad
para esta temperatura es la siguiente
 A-valor=5.798e+010*x^2 -6.015e+008*x + 1.349e+008
       p1 =   5.798e+011  (-2.12e+011, 3.267e+011)
       p2 =  -6.015e+008  (-9.091e+009, 7.888e+009)
       p3 =  1.349e+008   (8.23e+007, 1.875e+008)
 Goodness of fit:
 SSE: 1.387e+013
 R-square: 0.9798
 Adjusted R-square: 0.9394
 3.724e+006
```

El orden de magnitud de los parámetros de nuestra ecuación es menor pero como vimos anteriormente, la degradación de nuestro papel también es menor a la de Lelekakis probablemente debido a que el papel empleado fuese diferente del que estudió Lelekakis. La reducida dependencia del valor de A con la humedad es consecuencia de la proximidad de las diferentes curvas de la figura 71.

En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos para la tasa de variación o factor K por Lelekakis y por la aplicación "Transformer life&care" para condiciones del estudio similares.

Humedad (%)	K valor (h^-1) <6000 ppm					
	T=100ºC	T=110ºC	T=120ºC	T=130ºC	T=140ºC	T=160ºC
0,11		5,37E-07				
0,5					1,21E-06	
1,01		5,54E-07				
1,6			1,48E-06	2,32E-06	5,79E-06	
1,94		5,74E-07				
2,7	6,20E-07		2,40E-06		1,28E-05	6,18E-06
2,92		6,75E-07				

Lelekakis
Uc3m

Tabla 9: Valores de K obtenidos de forma experimental por varios investigadores.

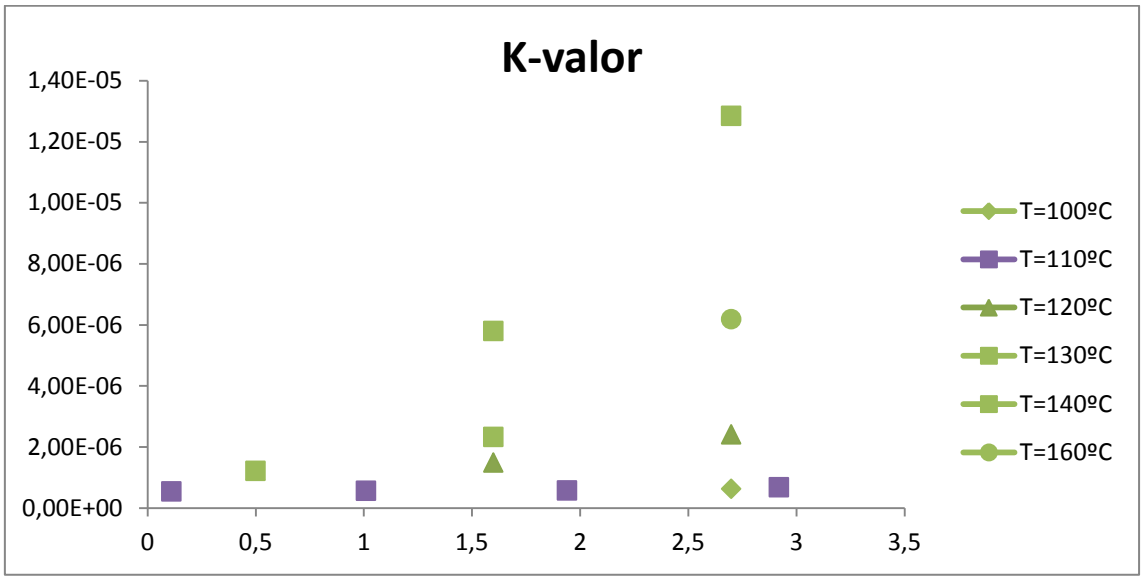


Ilustración 74: Valores de K obtenidos de forma experimental por varios investigadores. En verde se muestran los valores obtenidos por Lelekakis y en violeta los obtenidos en la UC3M.

Como era de esperar a la vista del resto de resultados, el valor para este factor obtenido por nuestra aplicación también es menor que el obtenido por otros investigadores.

La aplicación obtiene una dependencia del factor k con la humedad descritas por la siguiente ecuación:

```
La ecuación que describe la dependencia del valor K con la huemdad es la siguiente:
 K-valores = 0.0002302*Huemdad^2 + -2.298e-006*Huemdad + 5.433e-007
 Coefficients (with 95% confidence bounds):
       p1 =  0.0002302  (-0.0009438, 0.001404)
       p2 = -2.298e-006  (-3.93e-005, 3.471e-005)
       p3 =  5.433e-007  (3.14e-007, 7.725e-007)
  SSE: 2.635e-016
  R-square: 0.9772
  Adjusted R-square: 0.9316
  RMSE: 1.623e-008
```

Esta dependencia no ha sido obtenida por otros investigadores por lo que no podemos hacer comparaciones.

6.2.2 Pruebas con alta concentración de oxígeno

Paras las pruebas a 130ºC y con una concentración de oxígeno mayor que 6000ppm la evolución del grado de polimerización fue la siguiente:

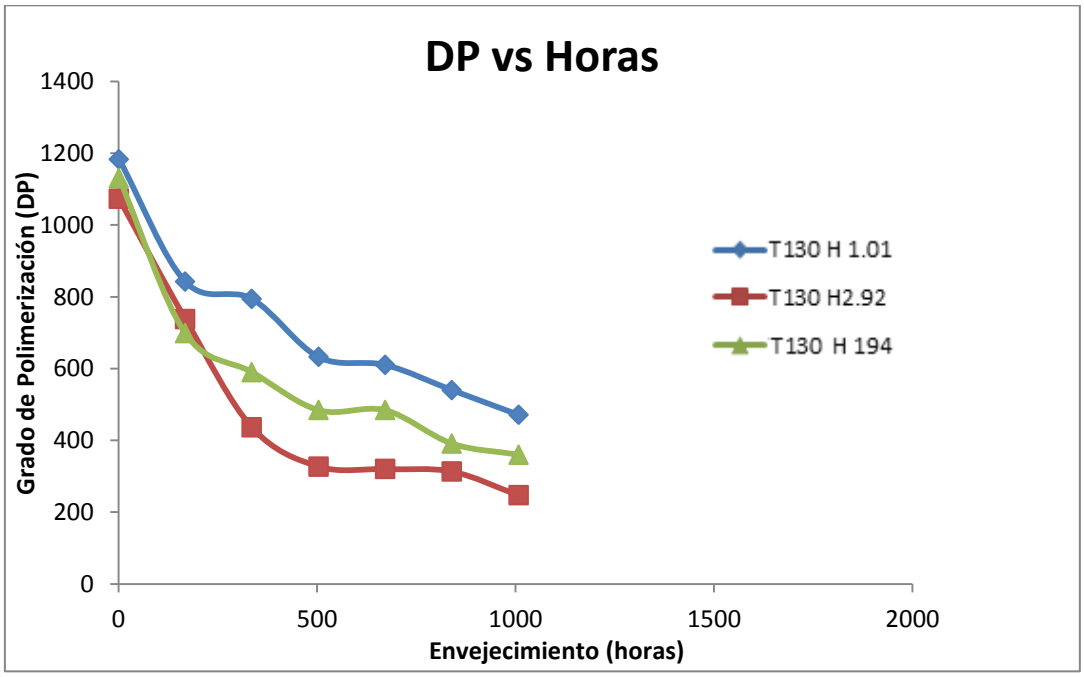


Ilustración 75: Evolución del Grado de polimerización para pruebas a 130ºC y alta concentración de oxígeno

Que superponiendo estos resultados a los obtenidos por Lelekakis nos queda la siguiente gráfica:

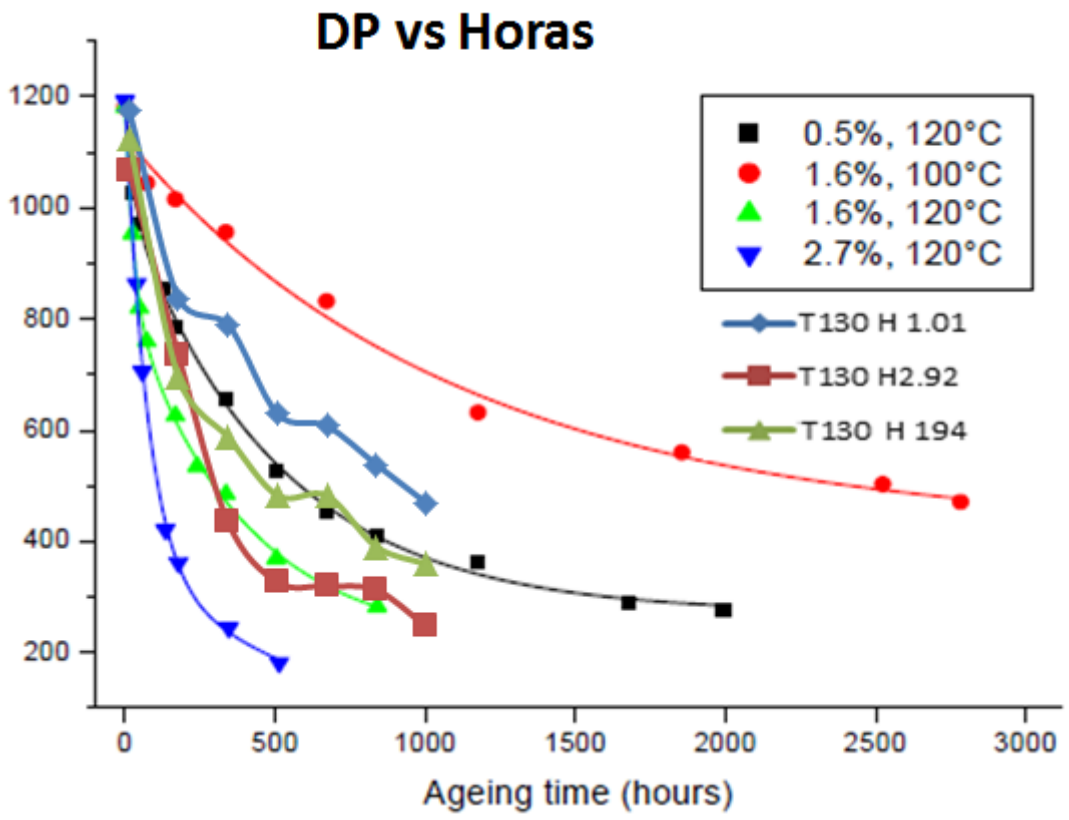


Ilustración 76: Comparación de la degradación del papel para las pruebas de Lelekakis y UC3M

Es difícil compararlas curvas de Lelekakis con las obtenidas en la UC3M porque ni la humedad ni la temperatura coinciden exactamente. Sin embargo, parece que, como en el estudio cuando la concentración de oxígeno era baja, la degradación de nuestro papel es más lenta que en el estudio realizado por Lelekakis lo cual puede tener que ver con el tipo de papel o el aceite utilizado en las pruebas (por ejemplo porque la acidez del aceite empleado sea inferior a la del empleado por Lelekakis).

Comparando los valores de A para este estudio con los obtenidos por Lelekakis para condiciones similares y estimando una energía de activación de Ea=111 KJ/mol obtenemos la siguiente tabla:

	A valor (h^-1)	
Humedad (%)	Lelekakis	UC3M (T=130ºC)
0,5	9,33E+08	
1,01		3,41E+08
1,6	3,05E+09	
1,94		5,55E+08
2,7	4,70E+09	
2,92		8,07E+08

Tabla 10: A-valores obtenidos por diferentes investigadores para pruebas con alta concentración de oxígeno.

Que representando de forma gráfica estos valores obtenemos:

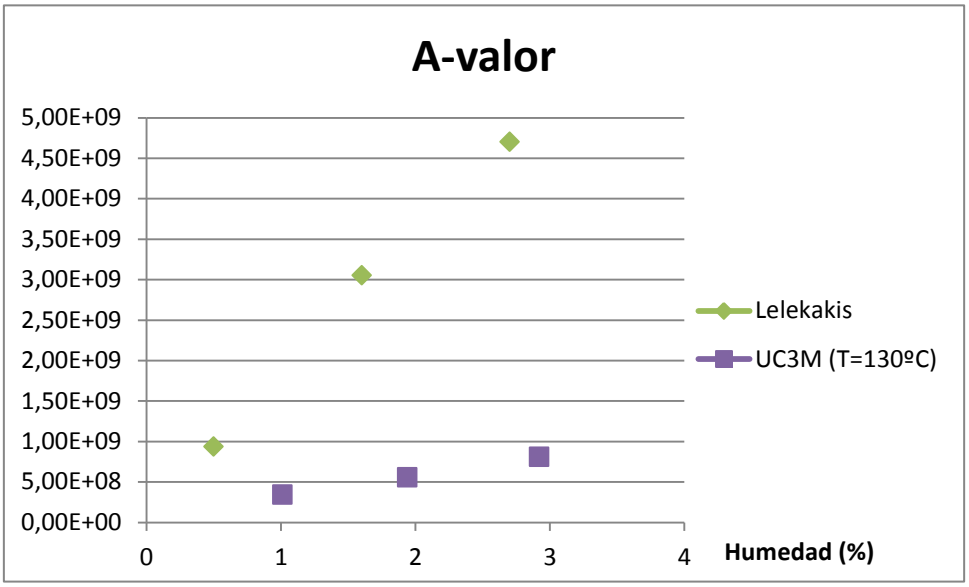


Ilustración 77: Representación de forma gráfica de los A valores obtenidos.

Para estas condiciones de elevada concentración de oxígeno, Lelekakis en su artículo no muestra la dependencia del valor de A frente a la humedad pero la aplicación creada en este Trabajo Fin de Grado al igual que para el caso del estudio con baja concentración de oxígeno, sí la calcula y es la siguiente:

```
La ecuación que muestra la dependencia del valor A con la humedad
para esta temperatura es la siguiente
 A-valor = 7.559e+011*Huemdad^2 + -6.029e+009*Humedad + 2.99e+008
    p1 =  7.559e+011
   p2 = -6.029e+009
    p3 =   2.99e+008
 SSE: 1.847e-013
 R-square: 1
 Adjusted R-square: NaN
 RMSE: NaN
```

Vemos que el ajuste es muy bueno por lo que no tiene coeficiente de correlación.

Al igual que en el caso anterior, la comparación del valor del factor K para diferentes investigadores puede verse en la siguiente tabla:

Humedad (%)	K valor (h^-1)		
	T=100ºC	T=120ºC	T=130ºC
0,5		1,41E-06	
1,01			1,27E-06
1,6	4,50E-07	3,10E-06	
1,94			1,88E-06
2,7		9,05E-06	
2,92			3,09E-06

Lelekakis
Uc3m

Tabla 11: Valores obtenidos para K por diferentes investigadores para alta concentración de oxígeno

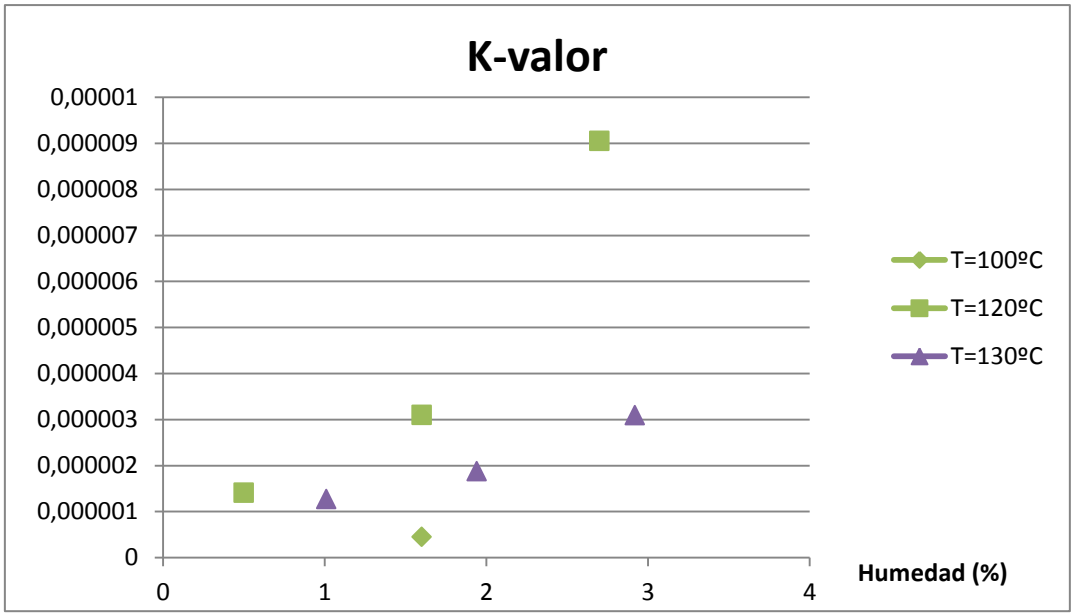


Ilustración 78: Representación gráfica de los valores de K obtenidos por diferentes investigadores para alta concentración de oxígeno.

Al igual que ocurría en el estudio anterior, nuestro valor de la tasa de reacción o factor K es menor para condiciones de estudio similares.

La dependencia de este valor con la humedad puede verse en la siguiente ecuación:

```
La ecuación que describe la dependencia del K-valor con la humedad es la siguiente:
  K-valor = 0.003024*Humedad^2 + -2.369e-005*Humedad + 1.209e-006
 Coefficients:
       p1 =   2.28e-012
       p2 =  9.196e-009
       p3 =  2.979e-007
  SSE: 4.529e-042
  R-square: 1
  Adjusted R-square: NaN
  RMSE: NaN
```

Capítulo 7

Conclusiones

7.1 RESUMEN

El presente Trabajo tiene como objeto el desarrollo de un programa que permita ajustar los valores obtenidos en unos ensayos de envejecimiento llevados a cabo en la Universidad Carlos III a la ecuación de Emsley y obtener el valor de los parámetros que mejor ajustan el modelo. Para una mejor comprensión del tema abordado se comienza con una breve síntesis de las partes constituyentes y funcionamiento de los transformadores de potencia destacando la importancia de estos equipos en el transporte de energía.

Se ha realizado una revisión bibliográfica sobre los mecanismos de envejecimiento de los transformadores de potencia, con la dificultad añadida de que la mayoría de los documentos están redactados en inglés, poniendo especial interés en los modelos de degradación del aislamiento sólido, es decir, el papel aislante que recubre los conductores del trasformador ya que suele ser el elemento que determina la vida de un transformador.

Se han revisado también estudios relacionados con la evolución del grado de polimerización del papel y la creación de furanos en el aceite.

Una vez realizada la revisión bibliográfica, se ha desarrollado una aplicación en la que interaccionan un libro Excel y un ejecutable Matlab que hemos denominado “Transformer life&Care” que es capaz de analizar los datos proporcionados por el departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Carlos III de Madrid, para obtener los factores más representativos en la degradación del papel y ver la dependencia de estos factores con la humedad para distintas temperaturas y diferentes concentraciones de oxígeno.

Tras la obtención de los resultados a través de la aplicación, hemos comparado estos resultados con los obtenidos por otros investigadores, en especial a los obtenidos por Lelekakis y su equipo ya que las pruebas que realizaron son muy similares a las realizadas por el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Carlos III de Madrid obteniendo unos resultados acordes al resto de investigadores.

7.2 CONCLUSIONES

Los objetivos del presente Trabajo Fin de Grado, se han cubierto satisfactoriamente ya que se ha verificado que la velocidad de degradación del papel es función de la temperatura, la humedad y la concentración de oxígeno de las muestras, de acuerdo a la bibliografía consultada.

Tras crear el ejecutable para obtener los resultados, podemos ver como los ajustes de la evolución del grado de polimerización en el tiempo no son muy buenos ya que el coeficiente de correlación es inferior a 0.9 en casi todos los casos, lo cual nos indica que el análisis de las muestras no fue tan preciso como deseábamos.

Analizando nuestros resultados, puede verse como para la temperatura de 110 ºC el valor de A es menos dependiente de la humedad que para las pruebas realizadas a 130ºC. Esta dependencia también se ve incrementada debido a que la concentración de oxígeno a 130ºC es mayor que a 110ºC.

Como era de esperar, la tasa de reacción o factor K es más dependiente de la humedad a medida que aumenta la temperatura lo cual se ve también afectado por la variación en la concentración de oxígeno de ambas pruebas.

Al mantener constante el valor de la Energía de Activación (Ea) de la reacción, puede verse como la tasa de reacción o factor K es linealmente dependiente con el factor A.

Tanto el factor K como el factor A, son directamente proporcionales con la velocidad de despolimerización del papel.

Comparando nuestros resultados con los obtenidos por el resto de investigadores, en especial con Lelekakis, vemos como nuestra degradación del papel sigue la misma

evolución aunque se degrada de forma más lenta. Lo que influye en que los valores de A obtenidos por nuestra aplicación, sean menores a los obtenidos por otros investigadores para condiciones de envejecimiento similares al igual que ocurre con la tasa de reacción o factor K.

7.3 TRABAJOS FUTUROS

Como sugerencias para trabajos futuros se propone lo siguiente:

1- Actualmente, nuestra aplicación trabaja con una reacción de envejecimiento de orden cero, que corresponde a la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_{inicial}} = A\ x\ t\ x\ e^{\frac{-E_a}{RT}}$$

Que agrupando elementos podemos definir como:

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_{inicial}} = kt$$

Siendo

$$A\ x\ e^{\frac{-E_a}{RT}} = k$$

Para trabajos futuros, se podría seguir desarrollando la aplicación para que trabajase con ecuaciones de reacciones de orden uno ya que sus resultados se asemejan más a la realidad cuando la concentración de oxígeno es mayor de 6000 ppm:

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_{inicial}} = \frac{k_{1o}}{k_2}(1 - e^{-k_2 t})$$

2- Realizar más ensayos en laboratorio para baja y alta concentración de oxígeno y diferentes temperaturas para poder contrastar los resultados.

3- Realizar ensayos con diferentes tipos de papel para comprobar si el tipo de papel influye en los factores K y A de la ecuación de degradación de Emsley.

4- Seguir desarrollando la aplicación para realizar estudios similares analizando los furanos y poder estimar así con mayor precisión la vida de los transformadores de potencia para poder desarrollar un programa que permita monitorizarlos y conocer en todo momento el estado real de la vida de cada transformador.

5- Calculo energía de activación (Ea). El programa desarrollado utiliza el valor de la energía de activación comúnmente aceptado por el resto de investigadores de 111 KJ/mol, aunque este valor es variable y depende del tipo de reacción que se esté produciendo en el interior del transformador por lo que para posibles trabajos futuros se debería implementar en la aplicación un módulo que calcule este valor de la energía de activación para cada prueba desarrollada.

CAPITULO 8

8.1Cronograma y presupuesto.

Título del TFG:

"Modelos de envejecimiento del aislamiento sólido de transformadores de potencia"

Autor: Reyes Muñoz Vergara

Duración: 7 meses (450 horas)

Id	Modo de tarea	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Predecesoras	Nombres de los recursos
1		Revisión bibliográfica	90 horas	sáb 01/02/14	mar 25/03/14		
2		Desarrollo Macro Excel	10 horas	mar 25/03/14	jue 27/03/14	1	
3		Formación en Matlab	50 horas	jue 27/03/14	lun 14/04/14	2	
4		Desarrollo Programa Matlab	100 horas	lun 14/04/14	jue 05/06/14	3	
5		Elaboración de Resultados	50 horas	jue 05/06/14	lun 23/06/14	4	
6		Redacción de la Memoria.	150 horas	lun 23/06/14	vie 22/08/14	5	
7		Exposición del TFG	4 días	vie 22/08/14	jue 28/08/14	6	

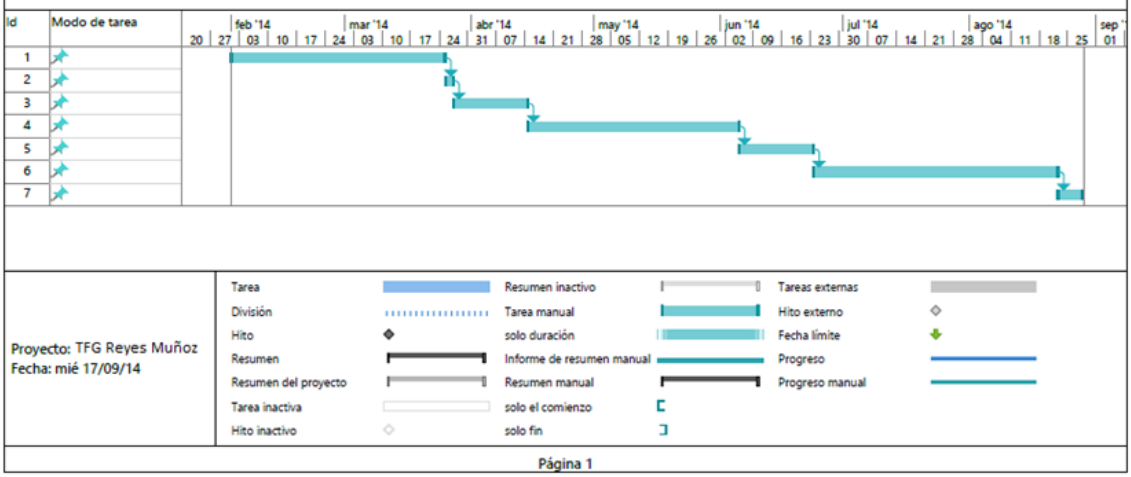


Ilustración 79: Cronograma del proyecto

Recursos: **Coste del recurso**

1 trabajador, categoría "Técnico Junior" (15€/h):450h.....6750€

1 trabajador, categoría "Técnico Senior" (32 €/h) ocupado de la dirección y supervisión del proyecto: 25h.....800€

Ordenador Portátil (amortización de 48 meses; 7 meses de uso).....105€

Licencia Microsoft Office .....100€

Licencia Matlab Student .....125€

Material de oficina, fotocopias y consumibles.....200€

Conexión a internet (20€/mes).....140€

TOTAL.....8.080€

Referencias

A.M Emsley, e. a. (Mayo de 2000). Degradation of Cellulosic insulation in power transformers. Part 2: Formation of Furan products in Insulationg Oil. *IEE Proc-Sci. Meas. Technol, 147*(3).

al., N. Y. (2008). Diagnosis of Termal Degradation for Thermally Upgraded Paper in Mineral Oil. *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis.* Beijin, China.

ASTM D3612-02. (2002). Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography. *ASTM International*.

at., Z. e. (2004). Ageing Diagnosis and Life Estimation of Paper Insulation for Operating Power Transformer. *International Conference on Solid Dielectrics.* Toulouse, France.

Brochure, C. (2007). *Ageing of cellulose in mineral-oil insulated transformers.* Task Force.

Business Unit Transformer. (2004). *Transformer Handbook.* Suiza.

Cabrejas, F. J. (Junio de 2009). Gestión de la Cargabilidad de Transformadores de Potencia. *Universidad Carlos III de Madrid, Escuela Politécnica Superior, Departamento de Ingeniería Eléctrica*.

Cheim, L., Donald, P., Prevost, T., & Xu, S. (2012). Furan Analysis for Liquid Power Transformer. *IEEE Electrical Insulation Magazine*.

Crespo, J. J.-A. (s.f.). Estado del arte en evaluación del envejecimiento de transformadores a través del análisis de compuestos furánicos.

Fessler, W. A., Rouse, T., McNutt, W., & Compton, O. (1989). A refined mathematical model for prediction of bubble evolution in transformers. *IEE Trans. Power Delivery, 4*, 391-404.

Flores, W., Rattá, R., Mombello, E., & Jardini, J. (Marzo de 2007). Vida de transformadores de potencia sumergidos en aceite: Situación actual. Parte I. Correlación entre la vida y la temperatura. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, 5*(1), 50-54.

Gasco, I. M. (s.f.). Diagnóostico del Consumo de Vida de un Transformador a Través del Análisis de Compuestos Furánicos. *Universidad Carlos III de Madrid, Escuela Politécnica Superior, Departamento de Ingeniería Eléctrica*.

IEC PUBLICATIONS. (1991). IEC Loading guide for oil-inmersed power transformers. *IEC PUBLICATIONS*(354).

IEEE Guide for loading mineral oil-immersed transformers. (1995). *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*.

Lailand, K., Ese, M., Selsbak, C., & Lundgaard, L. (2011). Ageing of oil impregnated thermally upgrated papers. *IEEE Int'l. Conf. Dielectric Liquids (ICDL)*, 1-5.

Lampe, W., & Spicar, E. (1976). *The oxygen-free transformer: Reduced ageing by continuous degassing.* CIGRE Paper.

Lelekakis, N., Martin, D., & Wijaya, J. (Diciembre de 2012). Ageing Rate of Paper Insulation Used in Power Transformers Part 1: Oil/paper System with Low Oxygen Concentration. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 19*(6).

Lelekakis, N., Martin, D., & Wijaya, J. (2012). Ageing rate of paper insulation used in power transformers. Part 2: oil/paper system with medium and high oxygen concentration. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 19*.

Lelekakis, N., Martin, D., Guo, W., Wijiaya, J., & Lee, M. (2012). A field study of two online dry-out methods for power transformers. *IEEE Electr. Insul. Mag.,, 28*, 32-39.

McNutt, W. (Enero de 1992). Insulation Thermal Life Considerations for Transformer Loading Guides. *IEEE Transactions on Power Delivery, 7*(1).

Oommen, T., & Prevost, T. (2006). Cellulose insulation in oil-filled power transformers: part II maintaining insulation integrity and life. *IEE Electr. Insul. Mag, 22*, 5-14.

Pablo, A. D. (1999). Furfural and ageing: How are they related. *IEEE*.

SEN, e. a. (2001, 29 April- 1 May 2001). Overloading and loss of Life Assessment Guidelines of Oil-Cooled Transformers. *IEEE Rural Electric Power Conference*, (págs. B4/1-B4/8).

Shroff, D., & Atannett, A. (Noviembre de 1985). A review of paper aging in power transformers. *IEE Proceedings, 132*(6).

Unsworth, J., & Mitchell, F. (1990). Degradation of electrical insulating paper monitored with high performance liquid chromatography. *IEEE Trans. Electr. Insul, 25*, 737-746.

Xue, C. (1991). Monitoring paper insulation ageing by measuring furfural contents in oil. *7th International Symposium on High Volatage Engineering*, (págs. 139-142).

Bibliografía

A.M Emsley, e. a. (Mayo de 2000). Degradation of Cellulosic insulation in power transformers. Part 2: Formation of Furan products in Insulationg Oil. *IEE Proc-Sci. Meas. Technol, 147*(3).

al., N. Y. (2008). Diagnosis of Termal Degradation for Thermally Upgraded Paper in Mineral Oil. *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis.* Beijin, China.

ASTM D3612-02. (2002). Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography. *ASTM International*.

at., Z. e. (2004). Ageing Diagnosis and Life Estimation of Paper Insulation for Operating Power Transformer. *International Conference on Solid Dielectrics.* Toulouse, France.

Brochure, C. (2007). *Ageing of cellulose in mineral-oil insulated transformers.* Task Force.

Business Unit Transformer. (2004). *Transformer Handbook.* Suiza.

Cabrejas, F. J. (Junio de 2009). Gestión de la Cargabilidad de Transformadores de Potencia. *Universidad Carlos III de Madrid, Escuela Politécnica Superior, Departamento de Ingeniería Eléctrica*.

Cheim, L., Donald, P., Prevost, T., & Xu, S. (2012). Furan Analysis for Liquid Power Transformer. *IEEE Electrical Insulation Magazine*.

Crespo, J. J.-A. (s.f.). Estado del arte en evaluación del envejecimiento de transformadores a través del análisis de compuestos furánicos.

Fessler, W. A., Rouse, T., McNutt, W., & Compton, O. (1989). A refined mathematical model for prediction of bubble evolution in transformers. *IEE Trans. Power Delivery, 4*, 391-404.

Flores, W., Rattá, R., Mombello, E., & Jardini, J. (Marzo de 2007). Vida de transformadores de potencia sumergidos en aceite: Situación actual. Parte I. Correlación entre la vida y la temperatura. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, 5*(1), 50-54.

Gasco, I. M. (s.f.). Diagnóostico del Consumo de Vida de un Transformador a Través del Análisis de Compuestos Furánicos. *Universidad Carlos III de Madrid, Escuela Politécnica Superior, Departamento de Ingeniería Eléctrica*.

IEC PUBLICATIONS. (1991). IEC Loading guide for oil-inmersed power transformers. *IEC PUBLICATIONS*(354).

IEEE Guide for loading mineral oil-immersed transformers. (1995). *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*.

Lailand, K., Ese, M., Selsbak, C., & Lundgaard, L. (2011). Ageing of oil impregnated thermally upgrated papers. *IEEE Int'l. Conf. Dielectric Liquids (ICDL)*, 1-5.

Lampe, W., & Spicar, E. (1976). *The oxygen-free transformer: Reduced ageing by continuous degassing.* CIGRE Paper.

Lelekakis, N., Martin, D., & Wijaya, J. (Diciembre de 2012). Ageing Rate of Paper Insulation Used in Power Transformers Part 1: Oil/paper System with Low Oxygen Concentration. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 19*(6).

Lelekakis, N., Martin, D., & Wijaya, J. (2012). Ageing rate of paper insulation used in power transformers. Part 2: oil/paper system with medium and high oxygen concentration. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 19*.

Lelekakis, N., Martin, D., Guo, W., Wijiaya, J., & Lee, M. (2012). A field study of two online dry-out methods for power transformers. *IEEE Electr. Insul. Mag.,, 28*, 32-39.

McNutt, W. (Enero de 1992). Insulation Thermal Life Considerations for Transformer Loading Guides. *IEEE Transactions on Power Delivery, 7*(1).

Oommen, T., & Prevost, T. (2006). Cellulose insulation in oil-filled power transformers: part II maintaining insulation integrity and life. *IEE Electr. Insul. Mag, 22*, 5-14.

Pablo, A. D. (1999). Furfural and ageing: How are they related. *IEEE*.

SEN, e. a. (2001, 29 April- 1 May 2001). Overloading and loss of Life Assessment Guidelines of Oil-Cooled Transformers. *IEEE Rural Electric Power Conference*, (págs. B4/1-B4/8).

Shroff, D., & Atannett, A. (Noviembre de 1985). A review of paper aging in power transformers. *IEE Proceedings, 132*(6).

Unsworth, J., & Mitchell, F. (1990). Degradation of electrical insulating paper monitored with high performance liquid chromatography. *IEEE Trans. Electr. Insul, 25*, 737-746.

Xue, C. (1991). Monitoring paper insulation ageing by measuring furfural contents in oil. *7th International Symposium on High Volatage Engineering*, (págs. 139-142).