



## El transformador de potencia: su mantenimiento y su envejecimiento

Desde finales del siglo XVIII, y con los primeros esbozos de lo que hoy en día conocemos como transformadores de suministro eléctrico, estas máquinas han sido determinantes en la generación, transporte y distribución de la energía eléctrica.

En 1886 Stanley y Westinghouse demostraron las ventajas de los sistemas de distribución con dos transformadores, uno de principio de línea y otro de final de línea. Esto provocó fuertes disputas en los Estados Unidos entre los partidarios de la distribución en corriente alterna de Westinghouse y los partidarios del sistema de corriente continua de Edison, con el resultado que bien conocemos. Las últimas pintadas hacia el transformador tal y como hoy lo conocemos se dieron en 1890: Dolivo-Dobrowolsky, un ingeniero de AEG inventó el transformador trifásico, y ese mismo año Brown (fundador de Brown-Boveri) construyó el primer transformador en baño de aceite.

Después de 120 años, con esta máquina al servicio de la humanidad, la evolución técnica de su diseño, mantenimiento y necesidad de diagnóstico ha experimentado avances importantes, en gran parte relacionados con la evaluación del mercado eléctrico. Por ello, conceptos tales como extensión de la vida útil del transformador, incremento de carga y reducción de mantenimiento son objetos de continua investigación.

**Hoy en día, para garantizar la continuidad del suministro eléctrico, es clave la necesidad de contar con un parque de transformadores con una alta fiabilidad de funcionamiento. La carencia de esta fiabilidad, puede originar un gran impacto en el ámbito social, medio ambiental y económico. Es por ello las compañías eléctricas disponen de severas políticas de mantenimiento.**

La situación se agrava por el hecho de que la población mundial de transformadores se encuentra envejecida. Muchas de las compañías eléctricas en Europa y Norte América, tienen un gran número de equipos en servicio desde hace más de 30 años, muchas veces excediendo la vida útil para la cual fueron diseñados.

### El aceite

El comportamiento fiable de un aceite mineral aislante en un sistema de aislamiento depende de ciertas características básicas que pueden afectar al comportamiento general del equipo eléctrico. Con el fin de realizar sus múltiples funciones como aislante, refrigerante y de extinción de arcos internos, el aceite necesita poseer ciertas propiedades, en particular:

- Alta rigidez dieléctrica para soportar las solicitaciones eléctricas impuestas por el servicio,
- Viscosidad suficientemente baja como para que no se reduzca su capacidad para fluir y transferir el calor
- Propiedades adecuadas a baja temperatura, por debajo de la temperatura mínima esperada en el lugar de la instalación;
- Resistencia a la oxidación para maximizar su vida en servicio.

En servicio, el aceite mineral se degrada debido a las condiciones de utilización. En muchas aplicaciones, el aceite está en contacto y, por tanto, sometido a oxidación. Las temperaturas elevadas aceleran la degradación. La presencia de metales, compuestos organometálicos o ambos puede catalizar la oxidación. Pueden darse cambios en el color, formación de compuestos ácidos y en estados avanzados de oxidación, precipitación de lodos. Todo ello influye negativamente en las características del aceite, empeorando sus propiedades dieléctricas y, en casos extremos, las térmicas.



### El Mantenimiento Predictivo de Transformadores

En este contexto, es evidente que la explotación óptima de los transformadores de potencia pasa por una adecuada política de mantenimiento predictivo. A través de estos programas de mantenimiento se pretende conocer el estado de los equipos y determinar la existencia de defectos con el fin de anticiparse a un posible fallo y programar adecuadamente las operaciones periódicas de mantenimiento del transformador o su eventual sustitución.

Los análisis y ensayos ligados al mantenimiento predictivos de los transformadores se pueden clasificar en tres grandes grupos. En el primero de ellos se incluyen los análisis físico-químicos del aceite. En esencia, estos análisis permiten determinar el estado del aceite, detectar indicios de contaminación y evaluar su grado de envejecimiento, características que tienen una influencia decisiva en las propiedades dieléctricas y refrigerantes del aceite. Un segundo grupo de ensayos se asocia con las técnicas cromatográficas empleadas para llevarlos a cabo. Mediante un análisis por cromatografía de gases se rastrean, y en medida de lo posible se caracterizan, posibles defectos incipientes en el transformador. El último grupo de ensayos son los que se realizan "in-situ" sobre el propio transformador. Permiten confirmar y, en el mejor de los casos, localizar los posibles defectos detectados usando las técnicas analíticas del aceite.

La información obtenida a través de toda esta batería de ensayos ayuda a tomar las decisiones más adecuadas en relación a la operación y mantenimiento del transformador.

### El Laboratorio de Materiales Dieléctricos de ceis

Es en este contexto donde el Laboratorio de Materiales Electrotécnicos de CEIS desarrolla su actividad, colaborando con el sector eléctrico desde hace más de 20 años.

El Laboratorio de Materiales Dieléctricos está formado por un equipo de 8 personas, con el objetivo de diagnosticar y analizar el comportamiento de los materiales aislantes en máquinas eléctricas, mediante ensayos físicos, químicos y eléctricos.

CEIS mantiene estrechas relaciones con diversas empresas del sector eléctrico, fabricantes, usuarios y universidades, a través del trabajo diario y de la puesta en marcha de actividades de investigación, desarrollo, innovación, formación y asesoramiento tecnológico orientados al diagnóstico de transformadores, caracterización del envejecimiento y pérdida de vida útil de los materiales.

El Laboratorio de Materiales Dieléctricos cuenta con magníficas instalaciones dotadas de instrumentos de altas prestaciones y completa su oferta con la del Laboratorio Eléctrico para llevar a cabo los ensayos que requieran niveles de tensión de hasta 100kV. Acreditado por ENAC según la Norma UNE-EN-ISO 17025, el laboratorio participa y colabora de forma habitual con los Comités y Grupos de Trabajo de la Asociación Internacional CIGRE y del Comité Técnico de Normalización de Fluidos Aislantes, AEN/CTN 207 SC10.

**Los análisis y ensayos que se acometen en el Laboratorio de Materiales Dieléctricos entran de lleno en los programas de mantenimiento predictivo desarrollados por las compañías a las que se dirigen sus servicios. Todos los análisis se basan en las normas de evaluación de aceites minerales en servicio, incorporando en su diagnóstico el gran conocimiento y experiencia acumulada durante sus más de 20 años de existencia.**

No en vano, el laboratorio dispone actualmente de una base de datos con más de 300.000 registros procedentes de otros tantos análisis realizados sobre un número muy importante de transformadores. La amplitud de esta base de datos proporciona una información adicional con la que contrastar, y en su caso matizar, el diagnóstico del estado del transformador, incorporando un mayor grado de fiabilidad a los informes emitidos.

### Ensayos

Como ya se ha comentado, la primera etapa del mantenimiento predictivo se basa en los ensayos físico-químicos y cromatográficos realizados sobre muestras de aceite del transformador. Si bien en función del tipo de equipo, aceite, o aditivos, se suelen recomendar unos u otros ensayos, en general éstos se suelen agrupar en básicos, complementarios y especiales.

Durante la vida del aceite, además de productos de oxidación, pueden acumularse en el aceite y afectar a sus propiedades eléctricas otros muchos contaminantes no deseables, como agua, partículas sólidas y compuestos polares solubles. La presencia de estos contaminantes y cualquier otro producto de degradación del aceite se evidencia por el cambio de uno o más propiedades de las indicadas en la siguiente tabla.

### Análisis de aceites minerales aislantes

Propiedad	Grupo (d)	Referencia
Aspecto y color	1	ISO 2049
Rigidez dieléctrica	1	IEC 60156
Contenido en agua	1	IEC 60814
Acidez (Índice de neutralización)	1	IEC 62021-1
Factor de disipación dieléctrica (tangente delta)	1	IEC 60247
Recuento y distribución de partículas por tamaños	1	IEC 60970
Contenido en inhibidor (c)	1	IEC 60666
Sedimentos y lodos	2	IEC 60422
Tensión interfacial	2	UNE 21320-6
Estabilidad a la oxidación (a)	3	IEC 60422
Punto de inflamación (b)	3	ISO 2719
Compatibilidad (b)	3	IEC 61125
Punto de congelación (b)	3	ISO 3016
Densidad (b)	3	ISO 3675
Viscosidad (b)	3	ISO 3104
Policlorobifenilos (PCB)	3	IEC 61619
Azufre corrosivo (a)	3	IEC 62535

- a) Necesario solo en circunstancias especiales  
 b) No esencial, pero puede utilizarse para identificar el tipo de aceite  
 c) Restringido a aceites inhibidos  
 d) El grupo 1 son ensayos básicos, el grupo 2 son análisis complementarios y el grupo 3 especiales

Por otro lado, dentro del grupo de ensayos asociados a la cromatografía de líquidos y gases, destacan los análisis de:

Gases disueltos en aceite aislante mediante cromatografía de gases con desgasificación o parcial	UNE-EN 60567
Determinación de 2-Furfural y compuestos relacionados por cromatografía líquida de alta resolución	UNE-EN 61198

El análisis de gases libres y disueltos es una de las herramientas de diagnóstico más ampliamente utilizadas para detectar y evaluar fallos en equipos eléctricos. Sin embargo, la interpretación de los resultados es, a menudo, compleja y debe hacerse con cuidado por personal experimentado en mantenimiento.

## Actualidad

### AFYCET celebra su asamblea general extraordinaria en ceis

Tras la reunión, los miembros de AFYCET, Asociación de Fabricantes y Comercializadores de Emisores Térmicos, que agrupa a los 14 más importantes fabricantes de equipos emisores térmicos en España, visitaron las nuevas instalaciones de CEIS que albergan el Laboratorio de Emisores Térmicos.

Con este Laboratorio, fruto de más de un año de trabajo conjunto con AFYCET en el seno del grupo de trabajo del Comité Técnico de Certificación de AENOR, AEN/CTC 002, Electrodomésticos, CEIS pone al servicio de los fabricantes y del propio AENOR, los medios necesarios para evaluar la conformidad de los productos referidos con la norma europea EN 60673 y demás especificaciones técnicas que les afectan, a la par que servirá de apoyo a los procesos de innovación y desarrollo con los que el propio sector está comprometido.



Durante la visita se pudieron recorrer las 3 estancias que componen las nuevas instalaciones: Cámara Bioclimática, Rincón de Ensayo Normalizado y Bancos de Pruebas de Durabilidad. El nuevo laboratorio, equipado con las más modernas tecnologías y dotado de un alto nivel de automatización, incorpora un potente sistema de control remoto que permitirá al técnico actuar y evaluar en todo momento el ensayo con total independencia de su ubicación física.

### Desarrollo de modelo simplificado de estimación del envejecimiento de transformadores a partir de la concentración de compuestos furánicos en el aceite

En este sentido, por ejemplo, no existe una norma de referencia respecto de la evaluación de los resultados de 2-Furfuraldehído y compuestos relacionados, si bien existen numerosos artículos técnicos sobre con la interpretación de los resultados. Por este motivo, el Laboratorio actualmente trabaja en la mejora de modelos matemáticos y en el análisis estadístico de su base de datos, de modo que se pueda perfeccionar su diagnóstico.

**El grado de envejecimiento de un transformador está ligado al grado de envejecimiento de los aislamientos sólidos. El envejecimiento del papel aislante de un transformador está determinado por el grado de polimerización de la celulosa, ya que este parámetro guarda una estrecha relación con la resistencia a la tracción del papel y por tanto con la capacidad de que el transformador soporte los esfuerzos dinámicos de un cortocircuito.**

Es bien sabido que los procesos de envejecimiento de los papeles aislantes generan compuestos furánicos, de los cuales el principal es el 2-Furfuraldehído (2FAL), de forma que el análisis de compuestos furánicos puede ser utilizado para estimar el grado de envejecimiento del papel aislante.

En la literatura científica disponible se han encontrado varios modelos de estimación del envejecimiento del papel celulósico de un transformador, e incluso redes neuronales que estiman el grado de envejecimiento relativo. Entre los

modelos consultados, especial mención merece el modelo de Cheim<sup>[1]</sup>.



El modelo de Cheim tiene en cuenta que en un transformador existe un gradiente térmico a lo largo de la altura del arrollamiento y a lo largo del espesor del aislamiento (desde la capa de papel que toca al cobre hasta la capa de papel en contacto con el aceite). El modelo estima la producción de furfural de cada elemento diferencial de papel y lo integra para obtener el contenido en furfural del aceite. Finalmente llega a una expresión aproximada que relaciona la concentración de 2FAL con el grado de polimerización estimado para el punto más caliente.

Sin embargo, la producción de 2FAL no sólo depende del grado de polimerización del papel sino que intervienen otros factores, tales como el oxígeno y el contenido en agua.

**Es por ello que desde de CEIS se está impulsando el desarrollo de un modelo semejante al descrito pero al que se añaden otras variables relacionadas al envejecimiento de la celulosa y la experiencia acumulada en este campo. Esperamos que en breve se puedan incorporar a nuestros métodos de diagnóstico las conclusiones de este estudio que, estamos seguros, servirán para determinar con mayor exactitud el estado general del transformador y para mejorar las técnicas de mantenimiento predictivo hasta ahora empleadas.**

[1] Cheim, A.; Dupont, C. "A new transformer ageing model and its correlation to 2 FAL" 2003 Cigre Transformer Colloquium. Merida, Mexico

### Los fabricantes de barreras metálicas visitan ceis

Los días 11 y 12 de marzo representantes de las empresas APERSA (Auxiliar de Perfiles Perforados Metalúrgicos), DECOEX, ASERAL (Auxiliar de Señalizaciones y Balizamientos), PASCUAL y VILLAR e INDUSTRIAS OJERO, fabricantes de barreras metálicas para intención de vehículos, visitaron las instalaciones del laboratorio de materiales metálicos de ceis.



Además, CEIS contó con la visita de D. Gregorio Casas Carrillo, Presidente del Comité de Certificación CTC-052 de AENOR, y Dña. Roxario Bautista, responsable técnica de AENOR en el citado Comité.

Durante estas jornadas, los técnicos de las empresas fabricantes intercambiaron experiencias sobre la caracterización geométrica de las barreras con el personal técnico del laboratorio.