

BOLETÍN DE ADMINISTRACIÓN DEL CICLO DE VIDA DEL TRANSFORMADOR

Tangente Delta del aceite

El aceite de transformador se utiliza en transformadores, disyuntores, cables e interruptores de alta tensión. En los transformadores, el aceite realiza varias funciones. Sirviendo eléctricamente como aislante y refrigerante, lo cual es fundamental para el rendimiento del transformador. El aceite no sólo actúa como un dieléctrico (aislante), sino que también mejora notablemente las propiedades dieléctricas del aislamiento sólido mediante la impregnación de papel y otros materiales de aislamiento con base de celulosa después de que se hayan secado para llenar vacíos en estos materiales. Como resultado, la resistencia dieléctrica del aislamiento sólido se incrementa significativamente comparada con la del papel seco o el aceite solo. Por último, el aceite disminuye el contacto del oxígeno con la celulosa y otros materiales en el transformador que son susceptibles a la oxidación¹. Si se analiza con regularidad, el aceite puede prolongar la vida útil de estos activos críticos para la red y evitar errores catastróficos que resultan en tiempo de inoperabilidad no deseada.

Además de proporcionar aislamiento y transferencia térmica/de refrigeración, el aceite de transformador ha de permanecer estable a altas temperaturas y durante largos periodos de tiempo, por lo que debe contar con propiedades eléctricas/dieléctricas, físicas y químicas óptimas.

Se pueden realizar una serie de pruebas en el aceite. Las mediciones eléctricas/dieléctricas, físicas y químicas del aceite proporcionan información sobre el estado del mismo. Las pruebas de análisis de gases disueltos en aceite (DGA) proporcionan información sobre el estado eléctrico del transformador. Por último, la prueba de materiales furanos en el aceite ofrece información sobre el estado de la celulosa. Entre las pruebas eléctricas, físicas y químicas que se utilizan para evaluar la calidad del aceite y su estado se incluyen:

- **Color: inspección visual y comparación con la escala de color ASTM D1500**
- **Contenido de humedad: Karl Fischer (ASTM D1533, IEC 60814)**
- **Acidez (ASTM D1534, IEC 62021)**
- **Tensión interfacial (ASTM D971, ISO 6295)**
- **Viscosidad**
- **Punto de fluidez**
- **Ruptura dieléctrica (ASTM D877 y ASTM D1816, IEC 60156)**
- **Tangente Delta (factor de disipación dieléctrica/factor de potencia) (ASTM D924, IEC 60247, IEC 61620, BS 5737, JIS C2101, VDE 0380-2, IS 6262)**
- **Resistividad (ASTM D1169, IEC 60247, BS 5737, JIS C2101, VDE 0380-2, IS 6103)**

Cada prueba proporciona información sobre el aceite y, como piezas de un rompecabezas, las distintas pruebas se combinan para formar una imagen del estado y condición para el uso del aceite.

¿Qué es tan δ o Tangente Delta?

Tangente Delta, también denominada prueba de factor de potencia, factor de disipación dieléctrica o ángulo de pérdida es una prueba eléctrica/dieléctrica del aceite aislante que se realiza con el fin de determinar sus propiedades intrínsecas. La prueba se ejecuta a dos temperaturas. La información de cada prueba y los resultados, que se consideran conjuntamente, pueden constituir la base para llegar a la conclusión sobre si es adecuado para un transformador continuar en servicio y determinar cuándo es necesaria la sustitución o la regeneración del aceite del transformador.

¿Cómo funciona?

La prueba de Tangente Delta se realiza mediante la aplicación de tensión de CA a una celda de ensayo de una separación conocida, midiendo el flujo de corriente total del aceite, y separando y luego comparando las partes reactivas y de resistencia de la corriente que pasa a través del aceite².

1 La oxidación es también un enemigo del aceite. El tanque del transformador está bien sellado atmosféricamente y el sistema de conservación del transformador sirve para eliminar o disminuir la exposición del aceite al aire.

2 Todas estas pruebas se realizan con modernos instrumentos de prueba, como Megger OTD.

Tangente Delta del aceite

Si el aceite aislante no está contaminado, el aceite y los electrodos que separados por dicho material (por ejemplo, devanados de alta tensión del transformador y el depósito conectado a tierra) exhiben mejor las propiedades de un condensador de placas en paralelo perfecto.

En un condensador perfecto, cuando se aplica una tensión de CA a través de sus electrodos, el flujo de corriente resultante a través del condensador es capacitivo (por ejemplo, fase desplazada 90 grados en relación con la señal de tensión); una manifestación que representa la energía almacenada (y liberada) por el condensador en cada medio ciclo³. Sin embargo, si hay impurezas en el aislamiento (por ejemplo, aceite) entre los electrodos del condensador, la resistencia del aislamiento (que normalmente es muy grande y, por lo tanto, impide el flujo de corriente real) disminuye, lo que causa una corriente resistiva medible y creciente a través del aislamiento/condensador. El flujo de corriente total a través del condensador resultante, I_{TOTAL} o I_T , es la suma vectorial de la corriente capacitiva, I_C , y la corriente resistiva, I_R . El cambio de fase entre la tensión de CA aplicada y la corriente total a través del condensador será de menos de 90 grados cuando I_R esté presente. Si el cambio de fase es menor de 90 grados es indicativo de la magnitud de I_R , que a su vez refleja el nivel de contaminación de aislamiento, de ahí la calidad/fiabilidad del aceite.

El "ángulo de pérdida", o δ , como se muestra en la Figura 1, es el ángulo entre una corriente capacitiva pura, el I_C y la corriente total real que fluye a través del condensador, I_T (que difiere del I_C cuando se incluye la influencia de la corriente real, I_R , que se deriva de las pérdidas en el dieléctrico que separa los electrodos del condensador). El ángulo de pérdida, o δ , se mide y la tangente de ese ángulo, dada por I_R/I_C , se analiza. Si el ángulo es cero, la Tangente Delta es 0%, lo que indica que el aceite no tiene pérdidas. A medida que las pérdidas (en vatios) en el aceite aumentan, la contribución de corriente resistiva a la medición (dada por $I_R = w/v$) aumenta y δ se incrementa en consecuencia. El % de la Tangente Delta ya no es cero. El aumento del % de la Tangente Delta implica el deterioro/aumento del nivel de contaminación en el aceite.

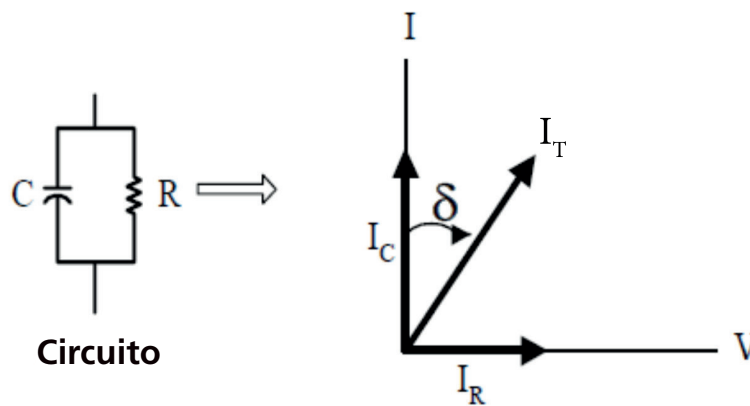


Figura 1: Ángulo de pérdida, δ

¿Qué es la resistividad?

La resistividad es otro indicador de la calidad eléctrica del aceite, particularmente adecuado para el aceite usado. La resistividad es una propiedad intrínseca que cuantifica en qué medida un material determinado se opone al flujo de corriente eléctrica. Una resistividad baja indica un material que permite fácilmente el movimiento de carga eléctrica. Para una medición de resistividad CC se aplica una tensión de CC especificada a la celda y, después de un minuto, se mide la corriente que fluye entre los electrodos. Los valores de resistividad medios se calculan a partir de las lecturas tomadas después de la polaridad inversa y directa. Se observa que los electrodos de celda deben estar en cortocircuito durante una determinada cantidad de tiempo (que puede variar según el estándar de referencia) entre mediciones de polaridad directa y polaridad inversa, y también entre las mediciones de Tangente Delta y de resistividad.

Detección de contaminación

Los principales enemigos del aceite de transformador son la oxidación, la contaminación y el exceso de temperatura. Los valores altos de Tangente Delta correspondientes a los niveles reducidos de resistividad indican la presencia de contaminantes polarizados, tales como humedad, partículas y fibras. Esta prueba es una manera sensible de detectar contaminación cuando se va a aceptar satisfactoriamente la compra de aceite nuevo sin usar y determina la mejora del proceso de purificación del aceite durante el control de calidad de aceites en servicio.

Cada prueba añade una pieza a la combinación del rompecabezas para revelar una imagen global, pero las pruebas son eficaces para identificar la presencia de determinados tipos de contaminantes, como se indica en el diagrama 1.

³ La potencia reactiva no transfiere energía de red a la carga.

Tangente Delta del aceite

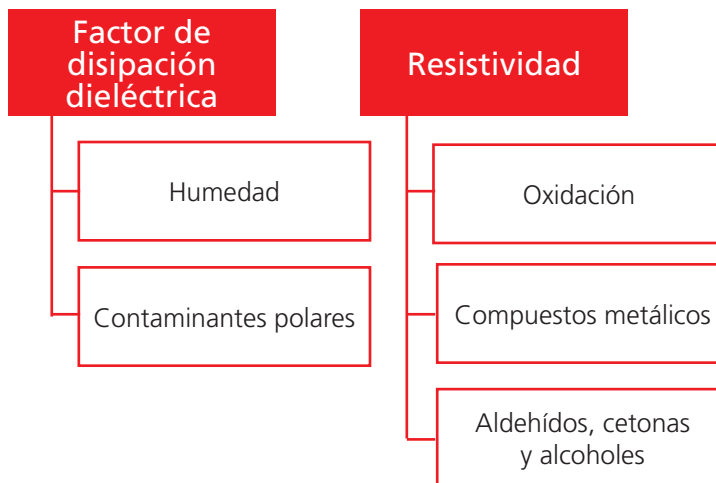


DIAGRAMA 1: Contaminantes detectables por las mediciones de resistividad y Tangente Delta

Nota del diagrama 1:

La oxidación es una reacción química que involucra la transferencia de electrones. La sustancia que cede sus electrones se oxida. La oxidación puede dar como resultado la formación de ácidos en el aceite aislante y la formación de sedimentos. El aceite de transformador puede contener un inhibidor de oxidación: un aditivo químico que actúa como conservante. El propósito del inhibidor es evitar la reacción del oxígeno con el aceite con el fin de disminuir el ritmo de envejecimiento del aceite y el aislamiento sólido.

Prevención de fallos

El exceso de calor es un enemigo del aceite. Provoca la descomposición del aceite o aumenta su velocidad de oxidación [1]. Las pérdidas dieléctricas en el aceite, indicadas en vatios, reflejan la cantidad de energía eléctrica aplicada que se pierde en calor. Por lo tanto, el aumento de las pérdidas de aceite, con el consiguiente incremento de calor, conduce a una mayor degradación del aceite, lo que, a su vez, genera más calor. El ciclo de pérdida/calor/pérdida es creado y aumenta de velocidad al empeorar la afección del aceite.

A medida que aumenta la carga en un transformador, tanto las magnitudes del flujo de corriente a través de los devanados como el calentamiento se incrementan, lo que empeora el estado del aceite ya degradado que está proporcionando a su vez la transferencia de calor. Los transformadores que tienen aceite en mal estado con una refrigeración inadecuada pueden sobrecalentarse peligrosamente y, en casos extremos, pueden provocar una explosión. El conocimiento del estado eléctrico o dieléctrico del aceite es un paso clave para evitar una situación de este tipo.

¿Por qué se deben realizar pruebas a alta temperatura?

Las pruebas de Tangente Delta a alta temperatura son más sensibles a los pequeños cambios que se producen en las características del aceite. Es posible que algunos contaminantes iónicos no se puedan detectar a 25 °C, pero se revelan en la prueba a 100 °C [2]. La medición de Tangente Delta o de la resistividad a dos temperaturas [por ejemplo, a temperatura ambiente y a 90 °C (IEC 60247)], en contraposición a una sola temperatura, puede proporcionar información adicional y útil. Por ejemplo, la obtención de un resultado alto en la prueba de Tangente Delta a temperatura ambiente y de un resultado aceptable en la misma prueba a una temperatura alta normalmente indica la presencia de humedad, ya que la humedad se evapora a temperaturas superiores. A la inversa, un resultado alto en la prueba de Tangente Delta a las dos temperaturas (o a altas temperaturas solamente) a menudo se atribuye a la presencia de contaminantes.

La tabla 1 resume lo indicado a través de combinaciones correctas y fallidas de los resultados de la prueba de Tangente Delta a temperatura ambiente y a altas temperaturas.

Resultado ambiental (t)	Resultado alto (t)	Diagnóstico
Bueno	Bueno	Satisfactorio
Malo	Bueno	Presencia de agua o productos de degradación
Bueno	Malo	Presencia de contaminantes iónicos
Malo	Malo	Nivel de contaminación importante. Sustitución de aceite: la regeneración no es posible

TABLA 1: Información de diagnóstico revelada por los resultados de la prueba de Tangente Delta a temperatura ambiente y con temperatura alta

Tangente Delta del aceite

Evaluación de los resultados de las pruebas

Los resultados de las pruebas pueden verse muy afectados por la manipulación, la limpieza y el almacenamiento del aceite y por los componentes de los instrumentos de prueba. Unos resultados erróneos pueden estar causados por:

- Contaminación debida al muestreo o la manipulación incorrecta.
- Limpieza incompleta de las celdas.
- Exposición prolongada del aceite a la luz durante el almacenamiento.

Los estándares de pruebas proporcionan un medio para evaluar los resultados de las pruebas de Tangente Delta y de resistividad.

Estándares de pruebas

IEC e IEEE proporcionan estándares de pruebas (diagrama 2) que son aplicables a determinados grupos de aceites de transformador: aceite nuevo, aceite en servicio y aceite recuperado.

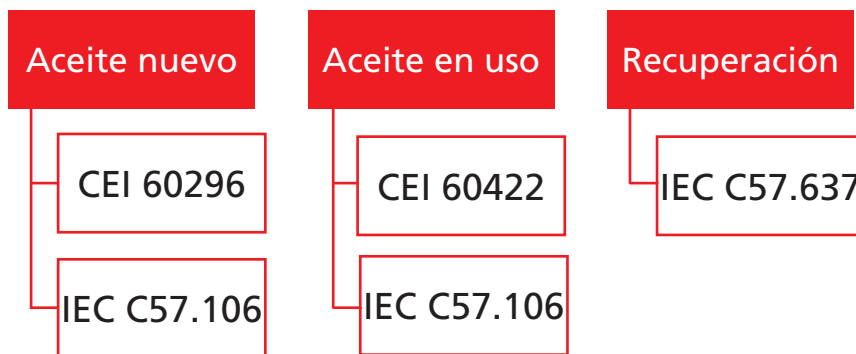


DIAGRAMA 2: Estándares IEEE e IEC para la aceptación y mantenimiento de los aceites aislantes

Cada uno de estos estándares especifica la forma de interpretar los resultados de Tangente Delta (factor de disipación dieléctrica) mediante la comparación de los resultados obtenidos con los niveles recomendados publicados que son específicos del transformador.

Para el aceite de transformador nuevo, por ejemplo, IEC 60296 especifica:

Propiedad	Método de prueba	Límites	
		Aceite de transformador	Aceite de conmutador a baja temperatura
1 función			
Viscosidad a 40 °C	ISO 3104	Máx. 12 mm ² /s	Máx. 3,5 mm ² /s
Viscosidad a -30 °C	ISO 3104	Máx. 1800 mm ² /s	
Viscosidad a -40 °C	CEI 61868		Máx. 400 mm ² /s
Punto de fluidez	ISO 3016	Máx. -40 °C	Máx. -60 °C
Contenido de agua	CEI 60814	Máx. 30 mg/kg ^c /40 mg/kg ^d	
Tensión de ruptura	CEI 60156	Mín. 30 kV/70 kV ^e	
Densidad a 20 °C	ISO 3675 o ISO 12185	Máx. 0,895 g/ml	
Factor de disipación dieléctrica a 90 °C	IEC 60247 o IEC 61620	Máx. 0,005	
Contenido de partículas	CEI 60970	Ningún requisito general ^l	

Tangente Delta del aceite

IEC60422 especifica:

Propiedad	Tensión máxima para el equipo kV		
	< 72,5	72,5 a 170	> 170
Apariencia	Materia clara, libre de sedimentos y en suspensión		
Color (según la escala ISO 2049)	Máx. 2,0	Máx. 2,0	Máx. 2,0
Tensión de ruptura (kV)	> 55	> 60	> 60
Contenido de agua (mg/kg) ^a	20 ^b	< 10	< 10
Acidez (mg KOH/g)	Máx. 0,03	Máx. 0,03	Máx. 0,03
Factor de disipación dieléctrica a 90 °C y de 40 Hz a 60 Hz ^c	Máx. 0,015	Máx. 0,015	Máx. 0,015
Resistividad a 90 °C (GΩxm)	Mín. 60	Mín. 60	Mín. 60
Azufre corrosivo	No corrosivo		
Contenido de DBDS (mg/kg)	< 5		
Tensión interfacial (mN/m)	Mín. 35	Mín. 35	Mín. 35
Contenido de PCB total (mg/kg)	No detectable (< 2 mg/kg total)		
Partículas	-	-	Consulte la tabla B.1 ^d

IEEE C57.106 especifica:

Prueba y método	Valor para la clase de tensión		
	≤ 69 kV	≥ 69 - ≤ 230 kV	≥ 230 kV
Factor de disipación (factor de potencia)			
ASTM D924			
25 °C, % máximo	0,05	0,05	0,05
100 °C, % máximo	0,40	0,40	0,30

Las tablas proporcionan una manera fácil de comparar los valores medidos con los valores esperados en la clase de tensión especificada del transformador.

Tangente Delta del aceite

REFERENCIAS

- [1] H. A. Pearce, "Significance of Transformer Oil Properties", Electrical Insulating Oils, STP 998, H. G. Erdman, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1988, pág. 47 – 54.
- [2] ABB Inc. TRES – Transformer Remanufacturing and Engineering Services, North America, ABB Service Handbook for Power Transformers, enero de 2006.