

## Información Técnica

### ENSAYOS DIELECTRICOS EN CORRIENTE CONTINUA

#### 1- Introducción

En este escrito se procederá a detallar los fundamentos básicos que justifican la implementación de los ensayos dieléctricos en corriente continua, sobre transformadores de distribución y potencia.

Nuestro principal objetivo será el de destacar los fundamentos e importancia de estos ensayos dieléctricos, a la hora de establecer el estado integral del sistema de aislación (SA) que conforma a la máquina.

#### 2. Principios de los Ensayos Dieléctricos y Diagnóstico

Sabiendo que las solicitaciones afectan y degradan al SA de los transformadores, podemos establecer que la consecuencia inmediata de éstas será la de reducir significativamente la rigidez dieléctrica de los materiales aislantes que conforman la aislación, tanto sólida como líquida (también se reducirá la resistencia mecánica entre otras propiedades físicas).

Es muy importante tener en cuenta que todos los defectos en la aislación, junto al proceso de envejecimiento, se manifiestan como anomalías o cambios en las propiedades físicas de los materiales dieléctricos que conforman el SA.

Además de los procesos ya citados, se deberán considerar los eventos externos y las condiciones de operación adversas, ya que ambas ayudan a desarrollar los mecanismos de fallas. Como ejemplos de los eventos externos podemos mencionar las descargas atmosféricas y las perturbaciones en el sistema de potencia; en el caso de las operaciones adversas se incluyen, entre otras, los errores de operación sobre la máquina, así como el diseño y/o implementación deficiente del sistema de mantenimiento.

Podemos decir entonces, en relación al SA del transformador:

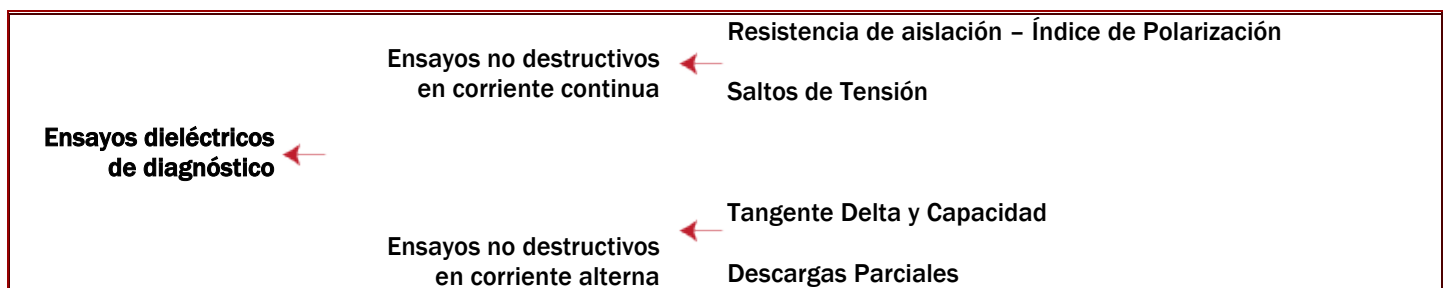


En este sentido, la vida útil del SA se define como el período de tiempo durante el cual éste puede ser utilizado en forma económica y confiable. Una buena calidad del sistema se estima en 20 a 30 años si fue operado y mantenido apropiadamente.

Con el objetivo de detectar todos los problemas ocasionados por las solicitaciones ya mencionadas, de forma tal de operar a tiempo antes de que se produzca la salida de servicio de la máquina por fallas, será conveniente diseñar e implementar un programa de Ensayos Dieléctricos periódicos.

A través de estos ensayos se realizarán mediciones cuyo fin será el de adquirir un conjunto de valores asociados a determinados Parámetros Macroscópicos, característicos de los materiales dieléctricos, a los fines de evaluar la calidad y estado del SA.

Estos Ensayos Dieléctricos, que forman parte del programa de control del Mantenimiento Predictivo, se pueden clasificar de la siguiente forma:



## Información Técnica

Para la realización de un diagnóstico correcto del SA del transformador, además de los valores obtenidos de las mediciones implementadas en cada ensayo dieléctrico, se deberá contar con la siguiente información:

- Resultados obtenidos de una minuciosa Inspección Visual.
- Historia clínica de la máquina.
- Comparación de valores entre fases y Tendencias en el tiempo de los parámetros.
- Comparación de parámetros con otras máquinas similares (Estudio de Casos).
- Recomendaciones y Especificaciones del fabricante.

A continuación desarrollaremos los Ensayos Dieléctricos en Corriente Continua.

### 3. Ensayos Dieléctricos en Corriente Continua

#### 3.1- Resistencia de Aislación e índice de Polarización

##### A- Principios Teóricos

- Cuando se aplica una tensión de continua sobre un sistema de aislación de un transformador, se genera la circulación de una **Corriente Total de Pérdidas** (itp), la cual se puede considerar que se debe a la suma de cuatro componentes, a saber:

##### a- Corriente de Absorción (ia)

Se debe fundamentalmente a la orientación de las moléculas polares, que constituyen el material dieléctrico del SA, en la dirección del campo eléctrico de continua, creado al aplicar la tensión de ensayo (corresponde al fenómeno físico de Polarización Dipolar).

También se puede deber a un efecto combinado de distorsión molecular como consecuencia del campo eléctrico, el cual distorsiona y desplaza la nube de carga negativa de los electrones con respecto al centro de carga positiva de la molécula (en este caso corresponde a la denominada Polarización Electrónica).

La orientación de los momentos polares de las moléculas en el campo eléctrico, requerirá una energía que será suministrada por la fuente de continua utilizada en el ensayo, la cual se manifiesta por esta componente de la corriente total de pérdidas. Una vez que las moléculas se han orientado en la dirección del campo eléctrico, esta corriente cesará en su circulación. Se destaca que posee un valor relativamente alto al aplicarse la tensión en continua y luego decae lentamente hacia cero; el tiempo de caída a su valor nulo se asume por lo general en 10 minutos, a partir del instante de aplicación de la tensión de ensayo.

##### b- Corriente Capacitiva (icp)

Como consecuencia de la capacidad eléctrica a tierra del arrollamiento de la máquina, al aplicar una tensión en continua se producirá una circulación de corriente de carga, cuya característica será la de poseer un valor muy elevado en el instante inicial, para luego decaer exponencialmente a cero en un tiempo muy corto. Se asume que este tiempo es menor a los 10 segundos.

Desde el punto de vista del diagnóstico, esta componente no provee de información útil, por lo que a los fines prácticos la medición de la corriente total de pérdidas (o de la Resistencia de Aislación) se realiza a partir de los 10 segundos de aplicada la tensión de ensayo en continua.

##### c- Corriente de Conducción Superficial (ics)

Esta componente tiene su causa en la existencia de contaminantes conductivos incorporados en el SA (humedad, soluciones salinas, polvos, etc.).

Se caracteriza por poseer un valor constante en el tiempo.

## Información Técnica

Un valor elevado de esta corriente es un indicador de advertencia, por el deterioro que ocasiona sobre la superficie de la aislación sólida, al crearse caminos de circulación para los portadores de carga (tracking).

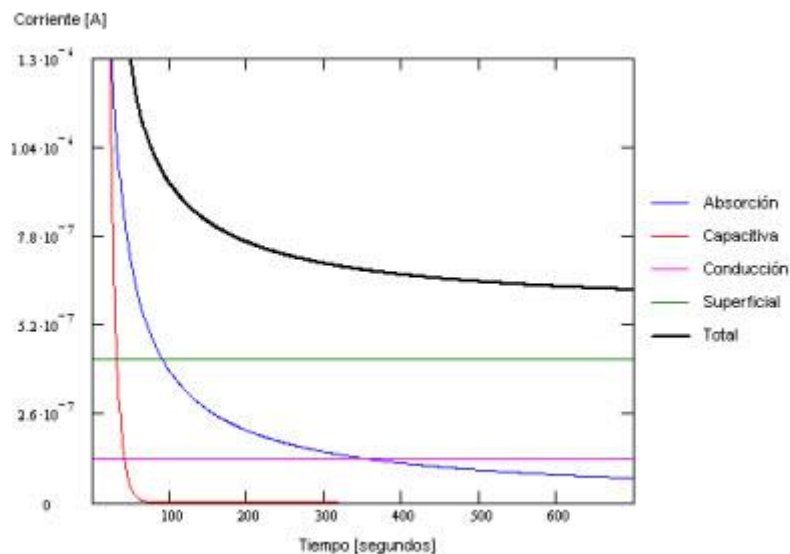
### d- Corriente de Conducción Volumétrica (icv)

Su origen se debe a la circulación de iones y electrones en el volumen del material aislante que conforma el SA. La circulación de esta corriente se debe fundamentalmente a los iones (cationes + aniones), los cuales migran o se difunden debido a la presencia del campo eléctrico. La conducción electrónica es mucho menor ya que existe una fuerte ligadura entre los electrones externos y el núcleo atómico en las moléculas del dieléctrico. La causa más importante de la circulación iónica es la debida a la absorción de humedad por parte del aislante. También circulará cuando existan cracks o fisuras en el arrollamiento, ya que se depositarán, en el interior de los mismos, agentes contaminantes conductivos (flujo de corriente por impurezas iónicas). También se caracteriza por poseer un valor constante en el tiempo.

También se define la Corriente de Conducción Total (ict) como la suma de las corrientes de conducción superficial y volumétrica:  $ict = ics + icv$

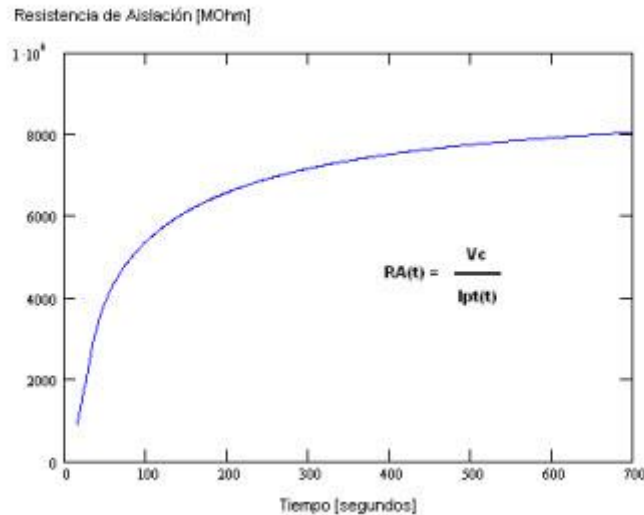
Por lo tanto podemos establecer:  $ipt(t) = ia + icp + ics + icv = ia + icp + ict$

Representando gráficamente las corrientes en función del tiempo tendremos:



- La **Resistencia de Aislación (RA)** de un aislante se define como aquella resistencia que éste ofrece al paso de la corriente total de pérdidas (lpt), al aplicarle una tensión en continua (Vc), medida entre el potencial del conductor del arrollamiento y el potencial de tierra (cuba del transformador). Por lo tanto,  $RA = Vc / ipt$ .
- Se destaca que por las características de la ipt, la RA será una función del tiempo. Por este motivo, este ensayo se basa en obtener la característica de la RA en el tiempo, midiendo los valores de la misma para un rango inicial de 15 segundos a 1 minuto (en intervalos de 15 segundos) y un rango final de 1 minuto a 10 minutos (en intervalos de 1 minuto). La disposición de estos rangos temporales se justifica por las características intrínsecas de cada componente de la ipt, según se ha detallado en el ítem previo.
- Por ejemplo, considerando la corriente de pérdidas total del gráfico previo, y teniendo en cuenta que la tensión de continua aplicada durante el ensayo es de 5000 V, se podrá obtener la característica de la Resistencia de Aislación en función del tiempo. Graficando:

## Información Técnica



- Idealmente el valor de la RA final tendría que ser infinito, pero en la práctica, para un buen material aislante, este parámetro alcanzará valores muy elevados.
- Debido a las propiedades eléctricas del material dieléctrico, en lo que se refiere a su capacidad de polarizar, la RA incrementará su valor a través del tiempo hasta alcanzar un valor constante. Por ejemplo, la RA de un aislante que se encuentra en óptimas condiciones de sequedad, libre de contaminación y en buen estado, adquirirá valores crecientes en el tiempo, alcanzando un valor constante luego de transcurridos varios minutos. A los fines prácticos se asume que alcanzará su valor final a los 10 minutos de aplicada la tensión de ensayo (también suele adoptarse un tiempo de 15 minutos).
- La RA es un parámetro del dieléctrico que nos permite detectar, en primera instancia, los siguientes problemas: absorción de humedad, contaminación conductiva, grado de curado de la resina de impregnación (en los aislantes sólidos), cracks y fisuras.
- El valor de la RA debe ser el más alto posible, ya que valores bajos son indicadores de problemas con la calidad y/o condición del SA.
- Por ejemplo, valores bajos de la RA medida a 1 minuto son indicadores, entre otras causas, de la existencia de impurezas iónicas residuales.
- Sobre el valor de la RA influyen notablemente la Temperatura, Humedad Relativa y la Contaminación Superficial. Las mediciones deben realizarse, en lo posible, en ambientes limpios y secos, tratando siempre de implementar el ensayo en las mismas condiciones ambientales.
- Existen tablas de corrección por efectos de la temperatura y la humedad relativa. En este sentido se puede adoptar, en primera instancia, la siguiente regla práctica para la corrección por temperatura: *"El valor de la RA disminuye a la mitad por cada 10 °C de aumento de temperatura"* (1).

### B- Metodología

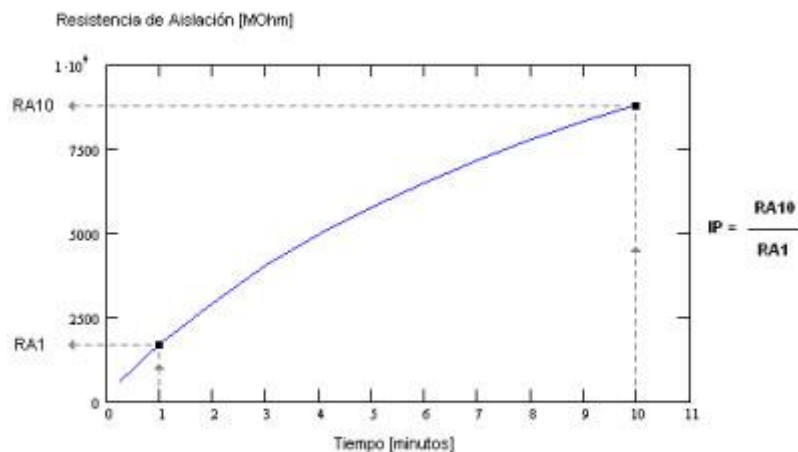
- La norma adoptada para la implementación de estos ensayos es la **IRAM 2325** (Aislación Eléctrica – Guía para la evaluación de su estado por mediciones de su resistencia).
- Esta norma nos especifica la corrección de la RA por temperatura a través de una expresión de ajuste de naturaleza exponencial, así como la representación gráfica en escala logarítmica para el factor de conversión. La corrección se deberá realizar a 20 °C.
- Sin embargo, la misma no nos provee de medios efectivos para realizar la corrección por humedad, estableciendo en este caso que las mediciones sean realizadas en las mismas condiciones de humedad relativa que los controles previos, con el objetivo de poder realizar los análisis comparativos.
- Las tensiones de ensayo en continua a aplicar se basan en los siguientes criterios, según sea el valor de la Un de la máquina:

## Información Técnica

- Para  $Un \leq 1000$  V → 500 V
- Para  $1000$  V <  $Un \leq 2500$  V → 1000 V
- Para  $2500$  V <  $Un \leq 5000$  V → 2500 V
- Para  $5000$  V <  $Un \leq 12000$  V → 5000 V
- Para  $Un > 12000$  V → 5000 V a 10000 V

### C- Interpretación y Análisis

- Se adopta un valor de **RA mínima** de 1000 MΩ, medida a 1 minuto y corregida a 20 °C, para el sistema completo.
- El parámetro **Índice de Polarización** ( $IP = RA$  medida a los 10 minutos /  $RA$  medida a 1 minuto) nos da una indicación de: sequedad, contaminación e integridad física del sistema de aislación.
- Este parámetro adimensional es muy útil en la evaluación del estado del SA, ya que provee información que se puede considerar independiente de la temperatura (o en su defecto, menos sensitiva a la temperatura).
- Un SA muy contaminado y húmedo alcanzará el máximo de RA en un tiempo muy corto (inferior a los 10 minutos). Por el contrario, un sistema de aislación limpio, seco y en buenas condiciones puede seguir aumentando el valor de la RA luego de horas después de la energización, según ya hemos comentado.



- A partir de los datos adquiridos de este ensayo podemos obtener de cálculo el parámetro **Constante de Tiempo** ( $CT = RA$  medida a 1 minuto multiplicada por la Capacidad medida en continua). El valor de Capacidad en continua se obtiene por medición del megóhmetro.
- La CT nos permite evaluar la velocidad de crecimiento de la RA en el proceso de polarización del dieléctrico. La evolución de este parámetro es una herramienta importante para determinar el estado del dieléctrico en lo que se refiere a su capacidad de polarizar.
- Cuánto mayor sea el valor de la CT mejor será el estado del SA. En este sentido se pueden establecer los siguientes criterios prácticos:
  - Aislación en mal estado →  $CT < 100$  s
  - Aislación en estado satisfactorio →  $100$  s  $\leq$   $CT < 2000$  s
  - Aislación en buen estado →  $CT \geq 2000$  s
- La norma recomienda un valor de  $IP \geq 2$ .
- Existen criterios prácticos que permiten clasificar el estado del sistema de aislación en base a los valores de IP; tendremos:

## Información Técnica

- Aislación en estado inaceptable →  $IP < 1$
  - Aislación en estado cuestionable →  $IP < 1,5$
  - Aislación en estado aceptable →  $1,5 \leq IP < 2$
  - Aislación en estado satisfactorio →  $2 \leq IP < 3$
  - aislamiento en estado muy bueno →  $3 \leq IP < 4$
  - Aislación en estado excelente →  $IP \geq 4$
- Con el objetivo de evaluar el estado del SA en su fase de absorción inicial se define la **Relación de Absorción Dieléctrica** o **Índice de Absorción** ( $IA = RA$  medida a 1 minuto /  $RA$  medida a los 30 segundos). Este parámetro nos provee información acerca del grado de calidad del material aislante, evaluando el comportamiento del mismo en la etapa de predominancia de la corriente de absorción. Se establecen los siguientes límites:
    - Aislación en estado inaceptable →  $IA < 1,1$
    - Aislación en estado cuestionable →  $1,1 \leq IA < 1,25$
    - Aislación en estado aceptable →  $1,25 \leq IA < 1,4$
    - Aislación en estado satisfactorio →  $1,4 \leq IA < 1,6$
    - aislamiento en estado muy bueno →  $IA \geq 1,6$
  - Para realizar una interpretación correcta de los datos adquiridos en las mediciones, se deberán comparar los valores de  $RA$ ,  $IP$  e  $IA$  entre fases o secciones, así como el de obtener tendencias en el tiempo, con el objetivo de analizar la evolución de estos parámetros. También es aconsejable la comparación contra valores obtenidos en ensayos realizados en máquinas similares.

### 3.2- Saltos de Tensión

#### A- Principios Teóricos

- Este ensayo se basa en ir incrementando en saltos la tensión aplicada de continua, con el objetivo de evaluar el comportamiento del dieléctrico ante sollicitaciones cada vez mayores.
- El principio teórico de este ensayo se basa en que para detectar los procesos de envejecimiento o deterioro en la aislación se deberán aplicar saltos discretos con niveles de tensión creciente. Se sustenta en el principio de que la resistencia de aislación decrece rápidamente con el aumento brusco del gradiente de tensión cuando existen fallas en el seno del dieléctrico.
- En este sentido, nos permite controlar el cambio relativo de las resistencias de aislación, por lo que sus resultados son independientes de la temperatura y la humedad. Los valores absolutos de  $RA$  sí serán dependientes de la temperatura y humedad relativa ambiente, según ya hemos comentado.
- La norma **IRAM 2325** también hace referencia a este ensayo dieléctrico en continua.

#### B- Metodología

- Se implementa, para máquinas de  $Un \geq 4000$  V, en cinco saltos de 1000 V aplicados durante 1 minuto cada uno, en el nivel máximo de 5000 V. Por lo tanto, los saltos serán: 1000 V, 2000 V, 3000 V, 4000 V y 5000 V.
- Para máquinas con  $1000 \text{ V} \leq Un < 4000$  V, se implementa en cinco saltos de 500 V aplicados durante 1 minuto cada uno, en el nivel máximo de 2500 V. Los saltos a aplicar serán: 500 V, 1000 V, 1500 V, 2000 V y 2500 V.
- En todos los casos, los valores de  $RA$  que pertenecen a las Características Intermedias, se miden en intervalos de 15 s, 30 s y 45 s, a partir de aplicado el salto de tensión correspondiente.
- Para máquinas con  $Un < 1000$  V (BT), no se implementa este ensayo debido a la sollicitación excesiva a las que se las sometería.

#### C- Interpretación y Análisis



## Información Técnica

- Fundamentalmente nos provee de dos clases de información para el análisis, a saber:

- 1- Variación de las Características Intermedias
- 2- Variación de la Pendiente.

- Las **Características Intermedias** representan las mediciones de RA previas al minuto de aplicado el salto de tensión correspondiente. La variación de éstas es una evidencia objetiva útil para determinar las actividades de DP superficiales en la aislación. También nos permite evaluar la degradación del material dieléctrico.
- La **Pendiente** de los saltos de tensión representa el lugar geométrico linealizado de los valores de RA medidos a 1 minuto de aplicado el salto correspondiente.
- La variación de esta pendiente nos permite evaluar el grado de humedad y/o contaminación del SA. También nos provee evidencia acerca del grado de envejecimiento, deterioro o fallas (grietas o fisuras), ya que estos problemas son causas de la caída en el valor de la pendiente.
- Como regla práctica se puede adoptar aquella que dice: *“Una variación del 25 % en la caída de la pendiente, con una relación de 1 a 5 en los saltos, es evidencia de la existencia de un excesivo aumento de humedad o contaminante en la aislación”*.
- A continuación se muestra en el gráfico la característica obtenida a partir de los datos medidos en este ensayo, junto a los parámetros de análisis:

