NOVA MIRON
SERVICIOS & TRANSFORMADORES

Ensayos de Mantenimiento en Transformadores de Potencia y Distribución

Parte 2 - Ensayos Dieléctricos en Corriente Continua

1. Introducción

Siguiendo con lo indicado en la primer parte de este trabajo, en la presente Parte 2 se procederá a detallar los fundamentos básicos de los Ensayos Dieléctricos en Corriente Continua, aplicados en la etapa de Mantenimiento, en los transformadores de distribución y potencia.

La orientación principal de este escrito será la de destacar los fundamentos e importancia de los ensayos dieléctricos en corriente continua, como herramientas básicas en el diagnóstico del estado del sistema de aislación del transformador.

2. Principios de los Ensayos Dieléctricos y Técnicas de Diagnóstico

Como ya habíamos indicado en la Parte 1, el objetivo principal de los ensayos dieléctricos de corriente continua, será el de detectar, a través de la aplicación de un campo eléctrico en corriente continua, todos aquellos problemas derivados de la degradación, deterioro y contaminación de la aislación, así como fallas localizadas en los bobinados y en la tierra del núcleo magnético, de los transformadores.

A los fines del presente trabajo, vamos a describir los Principios Teóricos, Metodología e Interpretación y Análisis, de los siguientes ensayos:

Ensayos Dieléctricos en Corriente Continua
- Resistencia de aislación
- Índice de Polarización y Absorción
- Saltos de Tensión

A continuación desarrollaremos el ensayo de Resistencia de Aislación, junto al de Índice de Polarización y de Absorción, ya que los mismos se encuentran relacionados.

Dejaremos para la Parte 3, la descripción del ensayo de Saltos de Tensión.

3. Ensayo de Resistencia de Aislación. Índice de Polarización y Absorción

A- Principios Teóricos

- Cuando se aplica una tensión de continua (campo eléctrico de corriente continua) sobre el sistema de aislación (papel-aceite) 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)

Esta componente se debe fundamentalmente a la orientación de las moléculas polares, que constituyen el material dieléctrico de la aislación, 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 de la aplicación del campo eléctrico, el cual procede a desplazar 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 cierta energía, la cual será suministrada por la fuente de continua utilizada en el ensayo.
Importante tener en cuenta que, una vez que las moléculas se han orientado en la dirección del campo eléctrico, esta corriente cesará en su circulación a través del material aislante.
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 efectiva del sistema de aislación, 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)

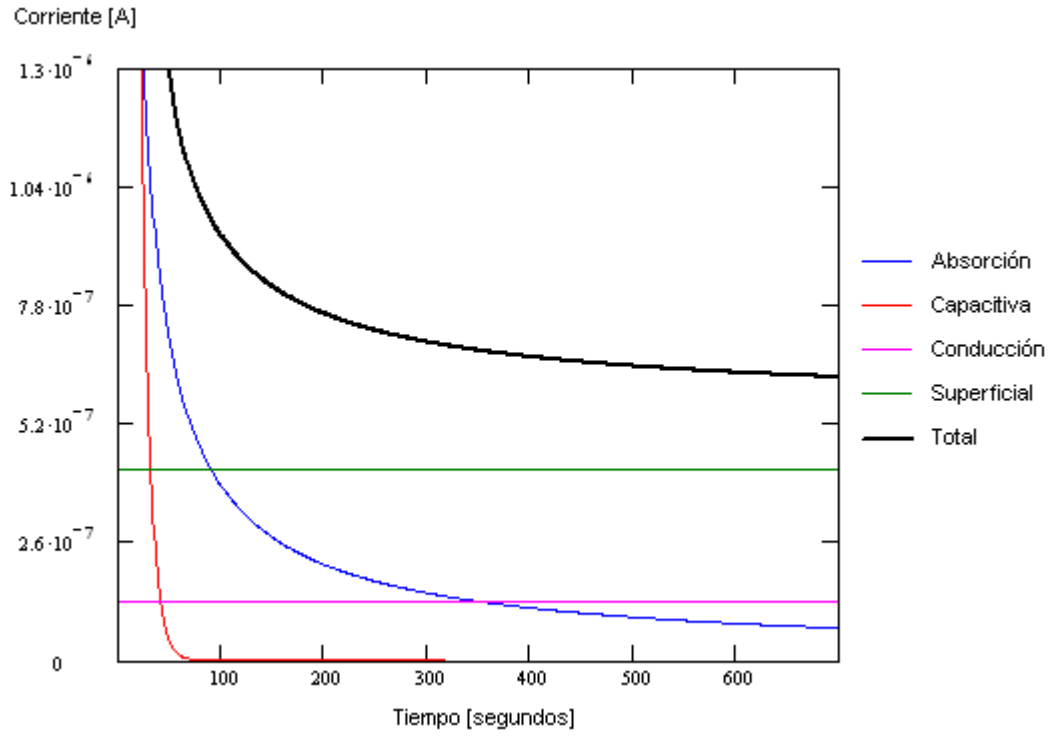
Esta componente tiene su causa en la existencia de contaminantes conductivos incorporados en el sistema de aislación (humedad, soluciones iónicas, etc.).
Se caracteriza por poseer un valor constante en el tiempo.
Un valor elevado de esta corriente es un indicador de advertencia, por el deterioro eventualmente ocasionado sobre la superficie de la aislación sólida.

d- Corriente de Conducción Volumétrica (icv)

Su origen se debe a la circulación de iones y electrones en el volumen del material aislante.
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 fisuras en los arrollamientos, ya que se depositarán, en el interior de las mismas, agentes contaminantes conductivos (flujo de corriente por impurezas iónicas).
También se caracteriza por poseer un valor constante en el tiempo.

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 (Ipt), al aplicarle una tensión en continua (Vc), medida entre el potencial del conductor del arrollamiento (o del núcleo magnético) y el potencial de tierra (cuba del transformador). Por lo tanto:

RA = Vc / ipt.

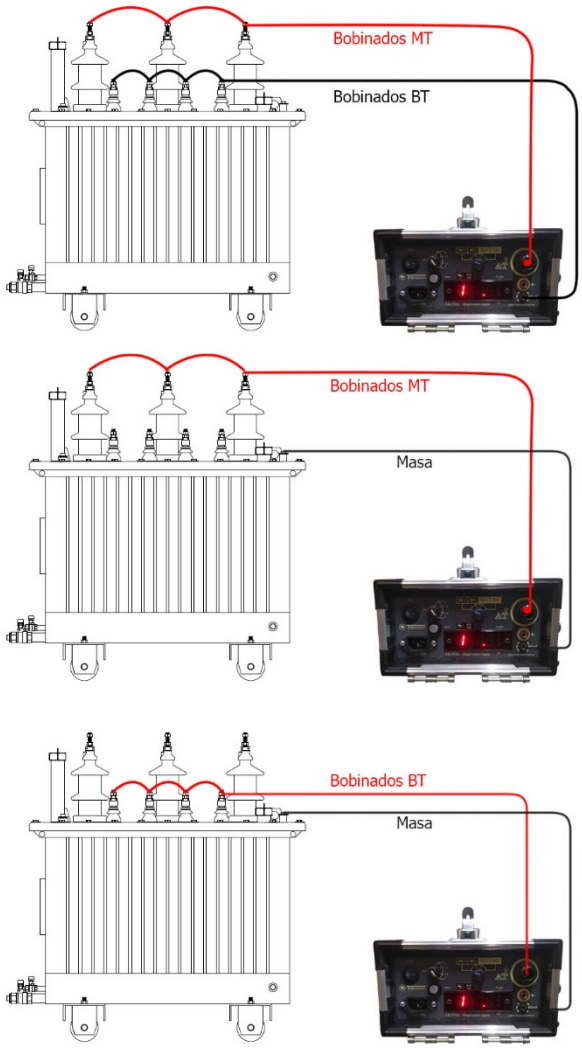
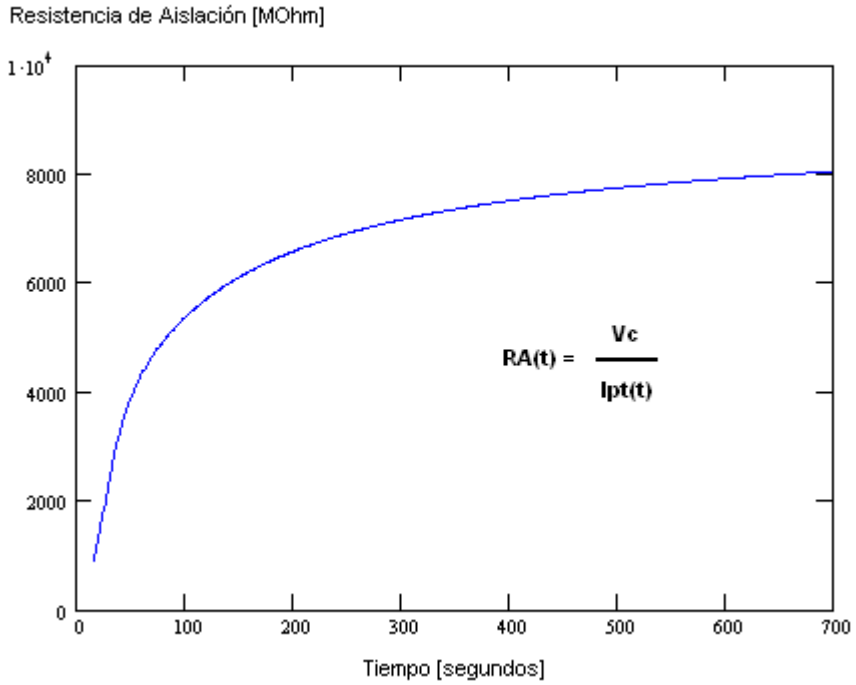


Ilustración 1 Esquema de conexión para la medición de RA e IP.

- Se destaca que, por las características de la ipt, la RA será también 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, a partir de los valores obtenidos del ensayo:



- 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).

- Desde el punto de vista del diagnóstico, la RA es un parámetro del dieléctrico que nos permite detectar, en primera instancia, los siguientes problemas: absorción de humedad, contaminación conductiva, cracks o fisuras.

- Además, permite detectar rápidamente aquellos problemas derivados de fallas a tierra, ya sea de los bobinados o del núcleo magnético.

- 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 sistema de aislación.

- Por ejemplo, valores bajos de la RA, medida a 1 minuto, son indicadores, entre otras causas, de la existencia de impurezas iónicas residuales.

- Se deberá tener muy en cuenta que, sobre el valor de la RA influyen notablemente la Temperatura, Humedad Relativa y la Contaminación Superficial (por ejemplo en los bushings). 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 ºC de aumento de temperatura"*.

Ejemplo de Megómetro

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 un valor de referencia de 20 ºC.

- 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 efectuar los análisis comparativos.

- Las tensiones de ensayo en continua a aplicar, se basan en los siguientes criterios, según sea el valor de la Un del lado del transformador a evaluar:

  - Para Un ≤ 1000 V → 500 V
  - Para 1000 V < Un ≤ 2500 V → 1000 V

- Para 2500 V < Un ≤ 5000 V → 2500 V
- Para 5000 V < Un ≤ 12000 V → 5000 V
- Para Un > 12000 V → 5000 V a 10000 V

C- Interpretación y Análisis

- A los fines de determinar el estado satisfactorio del sistema de aislación, se adopta un valor de **RA mínima** de 1000 MΩ, medida a 1 minuto y corregida a 20 ºC.

- También se puede adoptar el siguiente criterio para transformadores:

  - Un ≤ 66 kV, la RA mínima = 500 MΩ, medida a 1 minuto y a 20 °C.

  - Un > 66 kV, la RA mínima = 1000 MΩ, medida a 1 minuto y a 20 °C.

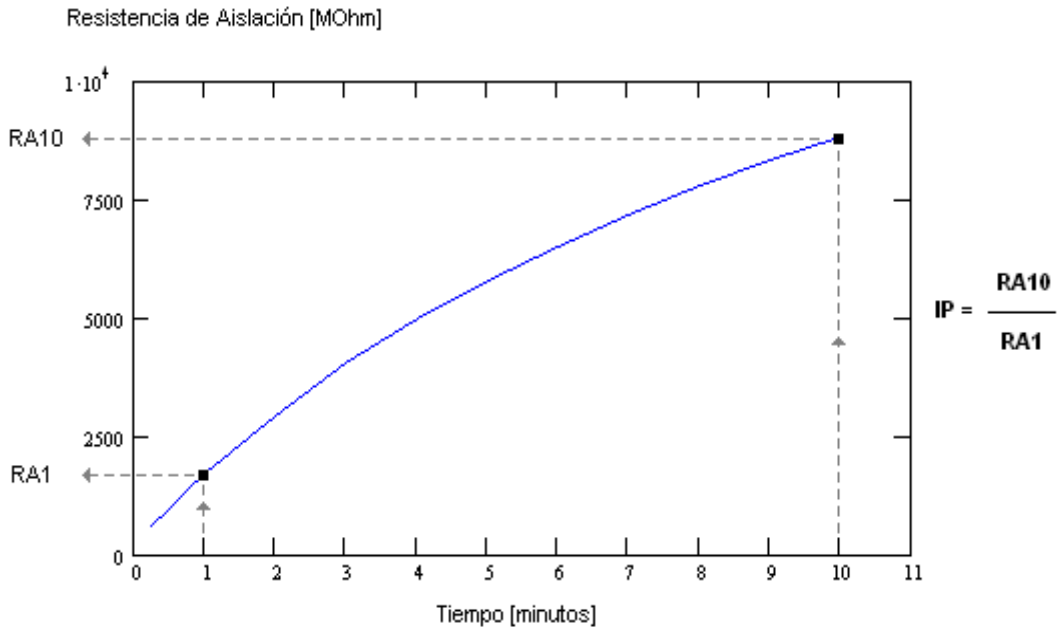
- El parámetro **Índice de Polarización** se define a través de la siguiente relación:

  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 sistema de aislación, ya que provee información que se puede considerar independiente de la temperatura (o en su defecto, menos sensitiva a la temperatura).

- Una aislación muy contaminada y húmeda 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.



- La norma recomienda un valor de **IP ≥ 2**.

- Existen criterios prácticos que permiten clasificar el estado del sistema de aislación, en base a los valores de IP; tendremos:

  - Aislación en estado inaceptable → IP < 1
  - Aislación en estado cuestionable → IP < 1,5
  - Aislación en estado aceptable → 1,5 ≤ IP < 2
  - Aislación en estado satisfactorio → 2 ≤ IP < 3
  - aislación en estado muy bueno → 3 ≤ IP < 4
  - Aislación en estado excelente → IP ≥ 4

- Con el objetivo de evaluar el estado del sistema de aislación en su fase de absorción inicial, se define la **Relación de Absorción Dieléctrica** o **Índice de Absorción**, a través de la siguiente relación:

  IA = RA medida a 1 minuto / RA medida a los 30 segundos

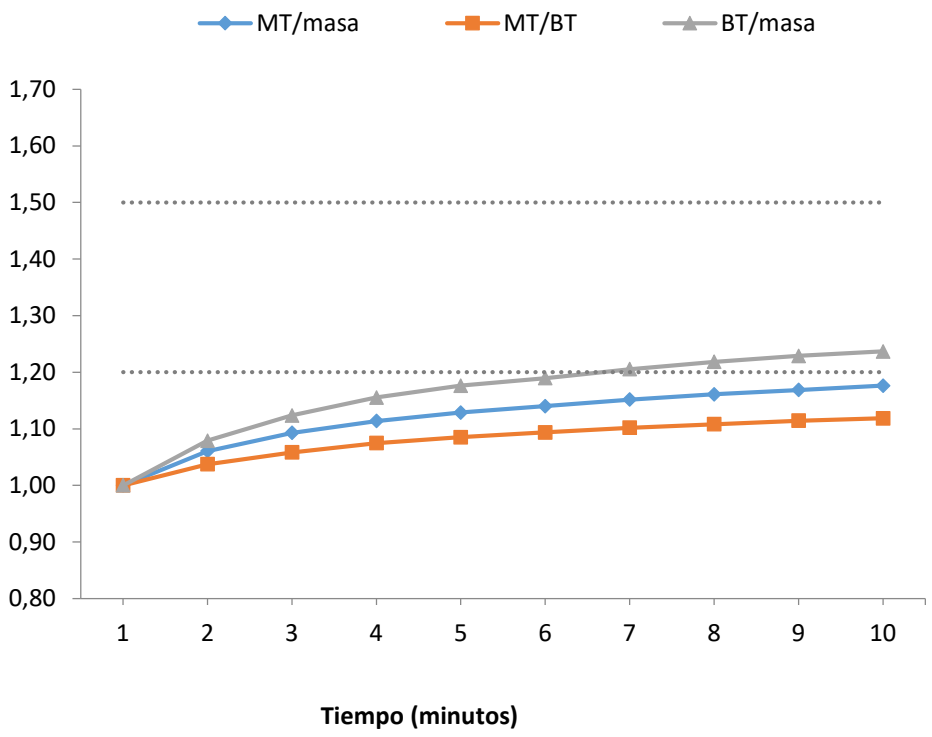
- Este parámetro nos provee información acerca del <u>grado de calidad</u> del material aislante, evaluando el comportamiento del mismo en la etapa de predominancia de la corriente de absorción. Se establecen los siguientes límites de referencia:

  - Aislación en estado inaceptable → IA < 1,1

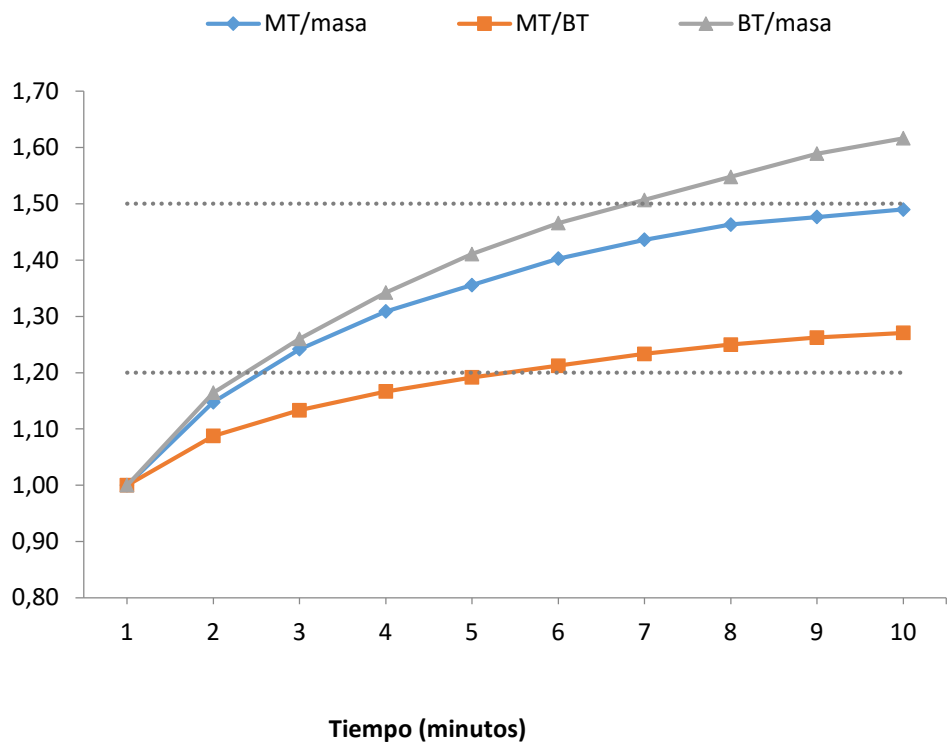
- Aislación en estado cuestionable → $1{,}1 \leq IA < 1{,}25$
- Aislación en estado aceptable → $1{,}25 \leq IA < 1{,}4$
- Aislación en estado satisfactorio → $1{,}4 \leq IA < 1{,}6$
- Aislación en estado muy bueno → $IA \geq 1{,}6$

- 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.

- En la primer figura se observa la característica de polarización del sistema de aislación de un transformador, para cada sección evaluada, el cual no presenta un estado aceptable.



- En la siguiente figura, se destaca la característica de polarización del sistema de aislación del mismo transformador, luego de realizada la intervención de mantenimiento correctivo. Se observa la mejora sustancial del sistema de aislación, en cada una de las secciones evaluadas.



Departamento de Ingenieria Nova Mirón S.A.