

Instituto Schneider Electric de Formación

El aislamiento del equipo eléctrico de Media Tensión



La **Biblioteca Técnica** constituye una colección de títulos que recogen las novedades en automatismos industriales y electrotécnica. Tienen origen en el Centro de Formación para cubrir un amplio abanico de necesidades pedagógicas y están destinados a Ingenieros y Técnicos que precisen una información específica, que complemente la de los catálogos, guías de producto o noticias técnicas.

Estos documentos ayudan a conocer mejor los fenómenos que se presentan en las instalaciones, los sistemas y equipos eléctricos. Cada Publicación Técnica recopila conocimientos sobre un tema concreto del campo de las redes eléctricas, protecciones, control y mando y de los automatismos industriales.

Puede accederse a estas publicaciones en Internet: <http://www.schneiderelectric.es>.

Igualmente pueden solicitarse ejemplares en cualquier delegación comercial de **Schneider Electric España S.A.**, o bien dirigirse a:

Centro de Formación Schneider
C/ Miquel i Badia, 8 bajos
08024 Barcelona

Telf. (93) 285 35 80
Fax: (93) 219 64 40
e-mail: formacion@schneiderelectric.es

La colección de **Publicaciones Técnicas**, junto con los Cuadernos Técnicos (ver CT-0), forma parte de la «Biblioteca Técnica» del **Grupo Schneider**.

Advertencia

Los autores declinan toda responsabilidad derivada de la utilización de las informaciones y esquemas reproducidos en la presente obra y no serán responsables de eventuales errores u omisiones, ni de las consecuencias de la aplicación de las informaciones o esquemas contenidos en la presente edición.

La reproducción total o parcial de esta Publicación Técnica está autorizada haciendo la mención obligatoria: «Reproducción de la Publicación Técnica nº 060: *Operaciones de inspección y mantenimiento de Centros de Transformación* de Schneider Electric».

PT- 060

El aislamiento del equipo eléctrico de Media Tensión



Andrés Granero

Ingeniero Técnico Eléctrico, ha desempeñado el cargo de Director Técnico en diversas Empresas Instaladoras y de Mantenimiento Eléctrico en Barcelona. Actualmente ejerce como Responsable Técnico y Promotor Comercial de Transformadores de Potencia en el Departamento T&D de Schneider Electric.

En el campo de la docencia ha sido profesor invitado para impartir cursos y conferencias en distintas empresas e instituciones públicas y privadas de educación media y superior. Así también, ha publicado diversos trabajos de memorias en simposios, congresos y revistas técnicas, y ha editado y colaborado en numerosas obras y libros de texto.

Índice

1 Objetivo	1.1 El aislamiento del equipo eléctrico	p. 5
	1.2 Objeto	p. 5
2 Magnitudes	2.1 Resistencia de aislamiento	p. 6
	2.2 Rigidez dieléctrica	p. 7
	2.3 Factor de impulso	p. 8
	2.4 Constante dieléctrica	p. 8
	2.5 Pérdidas dieléctricas	p. 8
3 Medidas	3.1 Medida de la resistencia de aislamiento en transformadores	p. 9
	3.2 Medición y prácticas de la resistencia de aislamientos	p. 12
	3.3 Ejemplos gráficos de conexión	p. 17
	3.3 Valores mínimos de la resistencia de aislamiento	p. 18
4 El aislamiento con relación a la tensión	4.1 Variaciones dieléctricas debidas a la aplicación de la tensión nominal	p. 20
	4.2 Esfuerzos dieléctricos. Sobretensiones	p. 20
	4.3 Ensayos dieléctricos normalizados	p. 21

1 Objetivo

1.1 El aislamiento del equipo eléctrico

El equipo eléctrico de una instalación deberá estar aislado entre sí y con respecto a tierra. Esta característica de aislamiento no es constante y puede deteriorarse con el paso del tiempo por razones de humedad, por la acción de inclemencias atmosféricas, contaminación, etc.

Por esta razón se hace aconsejable el estudio del aislamiento a lo largo de la vida de los equipos, para poder prevenir su envejecimiento prematuro y sus averías.

1.2 Objeto

El ensayo de aislamiento tiene por objeto comprobar si las máquinas están en condiciones de soportar, sin inconvenientes, su tensión asignada, es decir, la tensión especificada en su placa de características.

El ensayo de aislamiento se divide en:

- medida de la resistencia de aislamiento,

- ensayo de rigidez dieléctrica entre los distintos circuitos y entre cada uno de ellos y la masa de la máquina,

- ensayo de funcionamiento a sobretensión, es decir, con tensiones y frecuencias superiores a lo especificado en la placa de características.

2 Magnitudes

2.1 Resistencia de aislamiento

Aislante eléctrico es toda sustancia cuya conductividad es tan pequeña, que el paso de la corriente a través de ella es prácticamente despreciable. Esta pequeña corriente se llama «de fuga».

Un dieléctrico es «un medio que tiene la propiedad de que la energía requerida para establecer en él un campo eléctrico (solicitud dieléctrica) es recuperable en su totalidad o en parte como energía eléctrica».

El establecimiento del campo o la aplicación de la tensión van acompañados por corrientes de desplazamiento o de carga. El vacío es el único dieléctrico perfecto conocido; los materiales aislantes son dieléctricos imperfectos y cuando están sometidos a una tensión presentan:

- corrientes de desplazamiento,
- absorción de corriente,
- paso de corriente de conducción.

Es prácticamente imposible fabricar máquinas con aislantes absolutos. Todos son parcialmente conductores. Si se establece una diferencia de potencial constante entre dos electrodos que atraviesan el aislante, o situados sobre cada una de sus caras, se establecen corrientes, (en general muy débiles), que atraviesan y contornean los aislantes, designándose por resistencia total del aislamiento al cociente de la tensión aplicada por la corriente total. Expresándose habitualmente en megaohmios.

El comportamiento de los dieléctricos, cuando están sometidos a una tensión, es similar al circuito AB representado en la **figura 1**, donde el condensador C determina la corriente de absorción del dieléctrico y la resistencia R la corriente de fuga de conducción. En un dieléctrico perfecto, el valor de R sería infinito.

Los valores de C y R como anteriormente se ha indicado, no son constantes, sino que dependen de la temperatura, la frecuencia y la tensión del dieléctrico.

No es una característica que determine la elección de los aislantes para transformadores, generadores y máquinas eléctricas en general, pero sí nos indica su grado de sequedad (particularmente en el desarrollo de operaciones de mantenimiento tales como tratamientos de secado) y la evolución regresiva de los aislamientos durante la vida útil de la máquina, siendo por ello un factor importante a controlar.

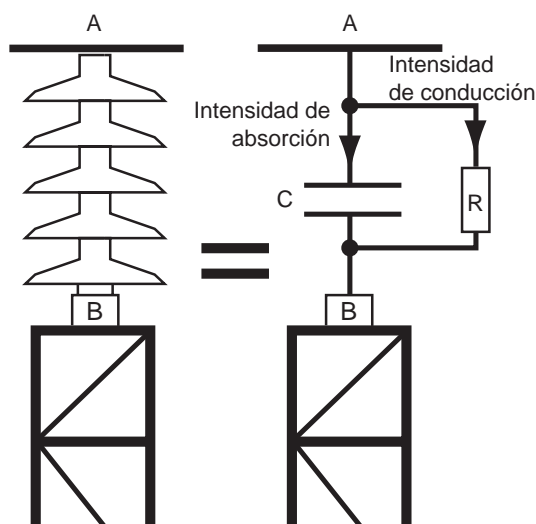


Fig. 1: Circuito equivalente de un dieléctrico.

2.2 Rigidez dieléctrica

Se define por el máximo gradiente de potencial que puede soportar un aislante sin que se produzca la descarga disruptiva (perforación del dieléctrico).

Si aumentamos progresivamente la tensión alterna aplicada entre electrodos que atraviesa un aislante, o aplicada entre sus caras, observaremos en principio fenómenos luminosos (efluvios, penachos), seguidamente y de repente, una ruptura, es decir, una descarga disruptiva de un electrodo a otro, a través o a lo largo del aislante.

Llamamos «tensión instantánea de ruptura» la que se alcanza elevando la tensión a la velocidad convencional de 2 KV/s.

Se llama «rigidez dieléctrica» en KV/mm al cociente de la tensión instantánea de ruptura, expresada en KV por el espesor o la distancia mínima al campo eléctrico.

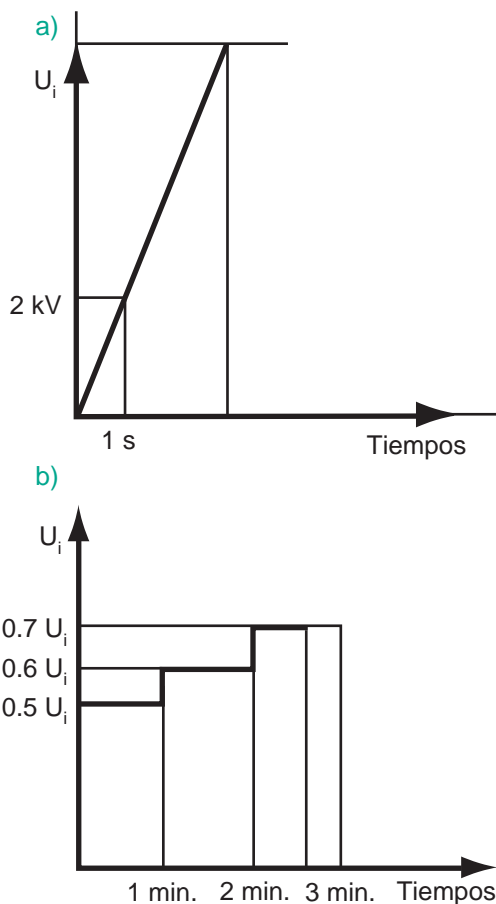


Fig. 2: a) Tensión instantánea de ruptura.
b) Tensión de ruptura «1 minuto».

Se distingue por «rigidez dieléctrica transversal», en el caso en que la descarga perfora efectivamente el aislante y por «rigidez dieléctrica superficial» en el caso de que la descarga contornee las superficies (figuras 2 y 3)

En la práctica, se habla a menudo de «rigidez dieléctrica de un minuto» de un aislante. Es la magnitud que se determina a consecuencia de dos ensayos:

- un ensayo rápido por elevación de la tensión al límite convencional de 2 KV/s, para alcanzar la tensión instantánea de ruptura, llamémosla U_i .
- un ensayo, partiendo de $0,5 U_i$ y aumentando por saltos de $0,1 U_i$, manteniendo cada aumento durante 1 minuto, hasta obtener la ruptura.

La rigidez dieléctrica es una magnitud muy importante en la técnica del aislamiento de transformadores, generadores, etc.

Depende de varios parámetros:

- del tiempo de aplicación de la tensión; la rigidez dieléctrica es tanto más pequeña cuanto más larga es la aplicación de la tensión,
- de la forma de onda de la tensión,
- de la homogeneidad del campo eléctrico, y por consiguiente, de la forma de los electrodos,
- de la temperatura,
- de la presión (para gases y líquidos),
- de la difusión (para aislantes sólidos).

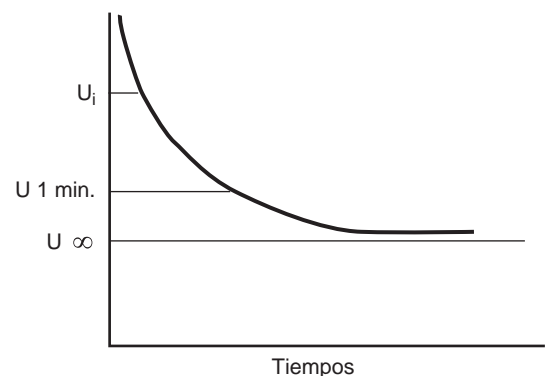


Fig. 3: Variación de la tensión de ruptura en función del tiempo.

2.3 Factor de impulso

La forma característica de las sobretensiones de origen atmosférico (ondas unidireccionales de frente muy escarpado y cola relativamente larga) ha conducido a considerar una «rigidez dieléctrica de choque o de impulso» que, según la naturaleza del aislante y según la forma de la onda, es netamente más elevada que la rigidez dieléctrica de un

minuto. Se ha definido un factor de impulso que es el cociente entre la rigidez dieléctrica de choque (valor de cresta) por la rigidez dieléctrica a frecuencia industrial (ensayo de un minuto; valor de cresta). Recientemente se ha definido también un valor de correlación, que es la relación, no entre las tensiones de ruptura, sino entre las tensiones mantenidas.

2.4 Constante dieléctrica

La constante dieléctrica de un aislante es la relación de la capacidad del condensador construido con este aislante como

dieléctrico, a la que tendría este mismo condensador siendo el dieléctrico reemplazado por el vacío.

2.5 Pérdidas dieléctricas

Un aislante sometido a un campo eléctrico alterno da lugar a pérdidas. Estas pérdidas dependen de la naturaleza del aislante, del campo específico, de la temperatura y de la frecuencia

Se las designa generalmente por el «ángulo de pérdidas», que es el complemento de la diferencia de fase entre la tensión senoidal aplicada a este aislante y la corriente de la misma frecuencia que atraviesa el aislante (**figura 4**).

No es el valor absoluto de las pérdidas dieléctricas, sino su estabilidad, en función del tiempo y la temperatura lo más importante en la elección de los aislantes.

A continuación se exponen de forma práctica y adaptados preferentemente a transformadores, los ensayos enunciados anteriormente.

$$P = U \cdot I_r$$

$$I_r = I_c \cdot \operatorname{tg} \delta$$

$$I_c = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}} = \omega C \cdot U$$

$$P = \omega C_0 \epsilon \cdot \operatorname{tg} \delta U^2 = G \cdot U^2$$

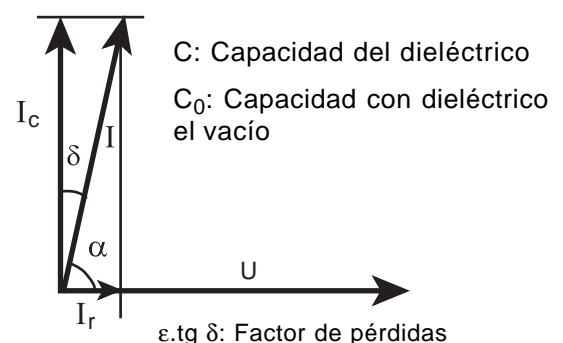


Fig. 4: Factor de pérdidas dieléctricas.

3 Medidas

3.1 Medida de la resistencia de aislamiento en transformadores

En un transformador de potencia, la medida de la resistencia de aislamiento tiene como fin dar una útil información sobre su estado, con objeto de poner al descubierto posibles defectos de aislamiento y determinar por medio de mediciones periódicas la probable degeneración del mismo.

En general, la resistencia de aislamiento:

■ decrece con:

- el aumento de tamaño de la máquina,
- la mayor longitud del cable,
- el aumento de temperatura (la resistencia de aislamiento con el transformador frío es mayor que en caliente y asimismo mayor que cuando los bobinados están sumergidos en aceite).

■ aumenta con:

- la mayor tensión de la máquina como consecuencia del mayor grosor del material aislante. Los valores obtenidos son siempre relativos, debido a que se ven influenciados por:
 - la humedad,
 - los deterioros en los aislantes,
 - la suciedad.

– un aumento apreciable de la resistencia de aislamiento durante el tiempo de aplicación de la tensión denota un buen estado de los aislantes de devanados en caso de transformadores,

– un aislamiento pobre denota humedad, suciedad y/o deterioros,

Es fundamental indicar por tanto, las condiciones de medición, tanto del transformador (si está totalmente desconectado o incluye parte del embarrado y cables) así como la de su temperatura, la del ambiente y humedad relativa.

Los valores obtenidos serán referenciados a 20 °C utilizando el factor de corrección K, tal que obtengamos:

$$R_{20\text{ }^{\circ}\text{C}} = R_{\text{medida}} \cdot K$$

El factor K, para los transformadores en baño de aceite (temperatura del aceite muy similar a la de los devanados) toma los valores indicados en la **figura 5**.

Para el caso de transformadores secos (temperaturas tomadas en bobinados), se tiene:

Temperatura °C	Factor $K_{20\text{ }^{\circ}\text{C}}$
0	0,25
5	0,36
10	0,50
15,6	0,74
20	1,00
25	1,40
30	1,98
35	2,80
40	3,95
45	5,60
50	7,85
55	11,20
60	15,85
65	22,40
70	31,75
75	44,70

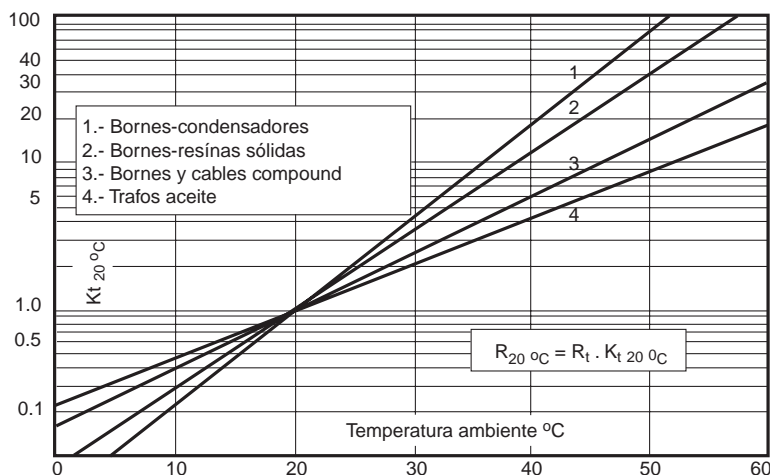


Fig. 5: Factor de corrección a 20 °C de la resistencia de aislamiento.

$$R_{40\text{ }^{\circ}\text{C}} = R_{\text{medida}} \cdot K$$

La constante K toma, en este caso, los valores de la **figura 6**.

La resistencia de aislamiento es directamente proporcional al potencial aplicado e inversamente proporcional a la corriente resultante y al tiempo necesario para su estabilización.

Esta fórmula determina:

- que es necesario controlar con el Megger la estabilidad de la corriente, o bien, efectuar lecturas a tiempo fijo, por ejemplo, después de mantener durante un minuto la tensión aplicada, leyendo a continuación el valor de la resistencia de aislamiento,
- el potencial aplicado se deberá elegir con relación a la tensión nominal de los devanados, según:

Tensión devanados	Tensión Megger
< 1000 V	500 V
1 kV a 10 kV	2500 V
> 10 kV	5000 V
> 130 kV	30000 V

La mayoría de las grandes máquinas, tienen además de una resistencia de aislamiento, una capacitancia interna que puede ser más importante de lo que puede parecer. Cuando se aplica un voltaje de c.c. con un equipo adecuado, el efecto es el

descargar un condensador con fugas a través de una resistencia en serie, la cual es la del mismo equipo. La corriente resultante tiene como anteriormente se dijo, tres componentes:

- Corrientes de carga capacitiva. Son de gran magnitud y corta duración, desaparecen antes de la toma de datos, no afectando a la medida. Dependen de las características del dieléctrico.
- Corrientes de absorción. Varían en proporción decreciente con el tiempo desde un valor inicial relativamente alto hasta un valor cero. La relación resistencia/tiempo es una relación de potencia pudiendo ser representada en un papel logarítmico como una línea recta. Normalmente la resistencia medida en los primeros minutos del desarrollo de una prueba es debida principalmente a la corriente de absorción.
- Corrientes de conducción. Fluyen a través del dieléctrico y son constantes en el tiempo de aplicación de la tensión de medida. A su vez se dividen en dos componentes:
 - Corrientes superficiales o de fuga. Son sendas de corriente que se deslizan por la superficie de los aislamientos y son constantes en el tiempo. Dependen principalmente de la película de humedad, mezclada con polvo y otras sustancias extrañas depositadas sobre la superficie del material.

Temperatura °C	Factor $K_{40^{\circ}\text{C}}$
0	0,065
5	0,095
10	0,13
15	0,19
20	0,26
25	0,33
30	0,52
35	0,70
40	1,00
45	1,50
50	2,02
55	2,90
60	4,20

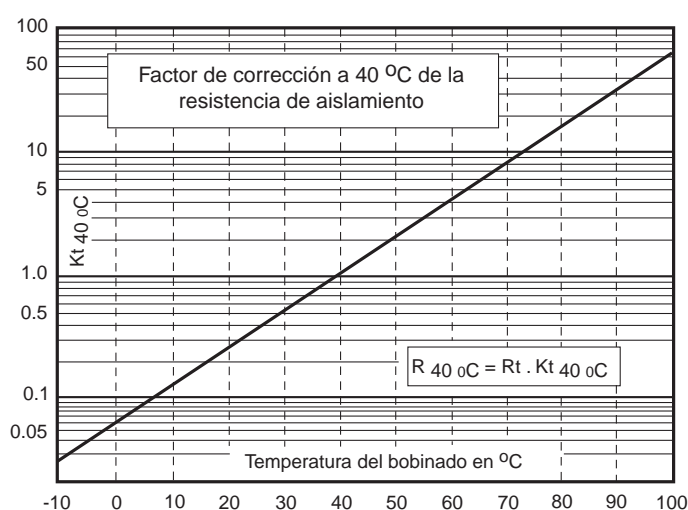


Fig. 6: Factor de corrección a 40 °C de la resistencia de aislamiento.

– Corrientes volumétricas. Fluyen por el interior del cuerpo dieléctrico y al igual que las corrientes de fuga, son prácticamente estacionarias con el tiempo. Estas dos últimas corrientes predominan una vez que la corriente de absorción se ha hecho insignificante.

Observamos que las corrientes de carga capacitiva y las de absorción son variables con respecto al tiempo, por lo que la corriente total también variará de la misma forma. Ello implica que la resistencia de aislamiento variará igualmente.

Existen tres métodos de comprobación de la resistencia de aislamiento en c.c. que se fundamentan en este concepto.

3.1.1.- Método de un minuto

Consiste en aplicar un voltaje de prueba al aislamiento manteniéndolo constante durante un minuto. Se toma la resistencia de aislamiento al final de este periodo. Si la resistencia disminuye durante la aplicación de la tensión, el aislamiento denota posible humedad o contaminación superficial. Si por el contrario la resistencia de aislamiento aumenta constantemente durante este periodo, denota que el aislamiento está seco y sus superficies están limpias, sin contaminación.

3.1.2.- Método tiempo-resistencia

Cuando se aplica un voltaje de prueba a un aislamiento y la intensidad disminuye durante la comprobación, aumenta la resistencia aparente del aislamiento, este incremento puede ser bastante rápido al principio, pero pueden pasar varios minutos antes de que llegue a un valor constante, particularmente si el aislamiento está seco.

Por otra parte, si el devanado está húmedo o sucio, la corriente de conducción será alta y la corriente de absorción será comparativamente baja (véase «curva típica tiempo-resistencia»).

Es evidente que la curva tiempo-resistencia puede servir como indicación del estado del

aislamiento. No será necesario trazar toda la curva, sino anotar la lectura un minuto después de la aplicación de la tensión de prueba y a los diez minutos posteriores.

A veces, a este método, se le ha dado el nombre de «prueba de absorción dieléctrica» por estar basado en el efecto de la absorción de un buen aislamiento comparado con otro contaminado por suciedad, grasa, etc. tomando el nombre de índice de absorción dieléctrica, la relación de dos lecturas tiempo-resistencia. Es decir, la lectura tomada a los 6 segundos dividida por la lectura tomada a los 30 segundos.

Al término aplicado al índice de absorción dieléctrica como la relación entre la resistencia aparente del aislamiento después de 10 minutos y la resistencia aparente del aislamiento después de un minuto, se le conoce como «índice de polarización» y se define también, como la tendencia que tienen los aislantes a incrementar sus valores durante el tiempo en que se aplica el potencial de prueba.

Es evidente que una curva ascendente corresponde a un índice más alto y una curva plana a un índice bajo.

Las ventajas de este método son:

- es independiente de la temperatura,
- es independiente del tamaño del equipo bajo prueba,
- muestra directamente la condición de aislamiento sin necesidad de referirse a los resultados de pruebas anteriores.

3.1.3.- Método de las dos tensiones

Es la aplicación de un voltaje de prueba durante un tiempo conocido, por ejemplo, un minuto, midiéndose la resistencia de aislamiento aparente una vez finalizado este tiempo. Se eleva posteriormente el voltaje hasta un nivel determinado, midiéndose la resistencia de aislamiento al final del mismo.

Resistencia de aislamiento

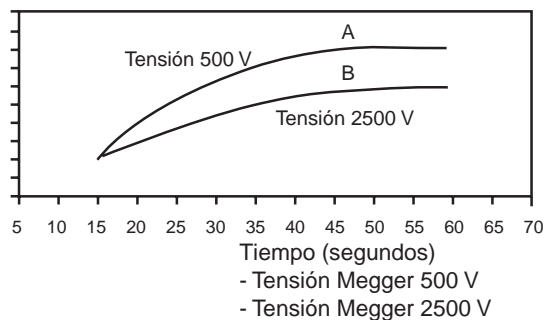


Fig. 7: Método de las dos tensiones.

Si una prueba que se realiza a 500 V y (una vez descargado el equipo en prueba) seguidamente aplicamos una tensión de 2500 V observáramos que las lecturas tomadas a 2500 son inferiores que a 500 V detectará un fallo a la tensión de prueba mayor, siendo necesario investigar las posibles causas.

Es cierto que el valor de la resistencia de aislamiento disminuye a medida que aumenta la tensión de prueba, sin embargo para devanados en buen estado, los valores obtenidos son muy parecidos independientemente de la tensión aplicada. Es suficiente con un tiempo para la prueba de 60 segundos (**figura 7**).

3.2 Medición y prácticas de la resistencia de aislamientos

3.2.1.- Medidor de resistencias de aislamiento

Para la medición de la resistencia de aislamiento, se emplea esencialmente el megómetro (**figura 8**).

Las partes esenciales de este instrumento de medida son:

- Generador, cuya misión es proporcionar una tensión continua que se aplica en los elementos a medir.
- Cuadrante o escala del elemento de medida, donde van grabadas las medidas directamente en $M\Omega$ (millones de ohmios) o en $k\Omega$ (miles de ohmios).

El cuadro donde se efectúan las medidas dispone de varias escalas. A las lecturas se les aplicará un factor de corrección dependiente del valor de la tensión que vendrá indicada en el selector de tensiones. Otros cuadrantes son de doble escala para todas las tensiones, la escala superior para las medidas de mayor valor de resistencia y en la inferior la de menor valor.

- Selector de tensiones y escalas. Es el elemento que nos selecciona la tensión de prueba para aplicar a los elementos objeto del ensayo.

El selector de tensiones puede seleccionar el alcance de las escalas y tener reflejados los factores de corrección de éstas.

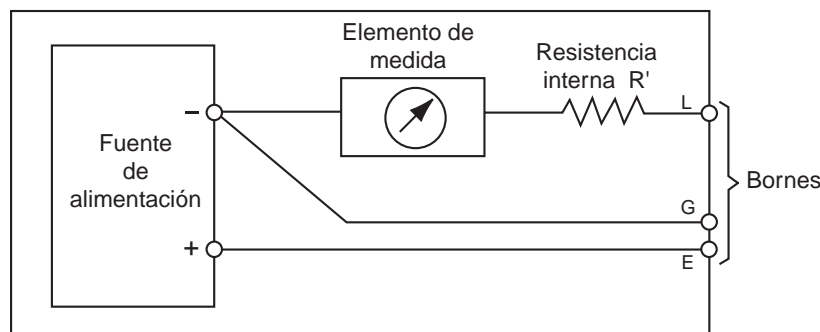


Fig. 8: Circuito básico de un megómetro Megger.

Los selectores de escalas, como su nombre indica, seleccionan las distintas escalas de que disponen los aparatos de medida.

■ **Bornes de salida.** Los megómetros pueden disponer de dos o tres bornes, en los cuales van marcadas las polaridades (–), (+) o bien las letras L - E; si disponen del tercer borne, vendrá marcado por las letras S o G.

En las dos primeras (–, +) o (L - E) es donde se dispone de la f.e.m. que queremos aplicar y el borne (S o G), denominado «guarda», evita que las corrientes superficiales afecten a la medida de aislamiento. El borne de guarda tiene la misma polaridad que la línea (– ó L).

3.2.2.- Medida de los aislamientos

Con la medida de aislamiento podremos determinar en primer lugar el estado de conservación de las máquinas y componentes eléctricos de una instalación, y en segundo lugar nos indica cuándo debemos aplicar las técnicas de secado a dichos elementos. Por ello es importante tener en cuenta los siguientes aspectos:

■ 1.- La medición de la resistencia de aislamiento se realiza normalmente con el megómetro obteniéndose los resultados en miles de ohmios o megaohmios.

■ 2.- Antes de cada prueba de aislamiento, se deberán realizar las siguientes operaciones con el megómetro:

□ a) conectando el megómetro con los cables de prueba cortocircuitados comprobar que la indicación en la escala sea cero (0),

□ b) compruébese igualmente que el aparato marca infinito (∞) con los cables conectados y a circuito abierto (**figura 9**).

■ 3.- Estas mediciones realizadas periódicamente nos permiten disponer de historiales evolutivos del estado de conservación de los componentes dieléctricos de una máquina o circuito eléctrico.

■ 4.- La prueba de la resistencia de aislamiento no es destructiva y es muy apropiada antes de la puesta en marcha de máquinas e instalaciones.

■ 5.- Las lecturas de resistencia de aislamiento no sólo son cuantitativas sino a su vez son relativas y comparativas viéndose totalmente influenciadas por la temperatura, humedad, suciedad y deterioros.

Es por tanto necesario cuando se efectúe una medición, limpiar los elementos aislantes, quitar la humedad si fuera necesario y sobre todo anotar la temperatura ambiente y la humedad relativa, también la temperatura de la máquina si se disponen de medios.

■ 6.- Se deberá delimitar la zona de ensayo con barreras, cintas y señales de advertencia.

■ 7.- Se deberán poner a tierra los elementos objeto de ensayo, antes y después de realizar cualquier prueba de medición de aislamiento.

Debido a las características de los circuitos y equipo eléctrico a comprobar, (bobinas, cables, condensadores, etc.) las mediciones se efectúan con corriente continua, ya que con corriente alterna las lecturas inducirían a errores, debido a que la corriente de circulación estaría limitada, por la resistencia del aislante y por las corrientes inductivas y capacitivas generadas.

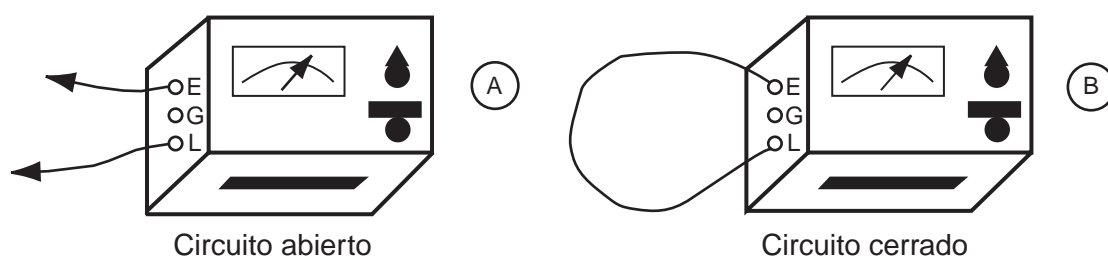


Fig. 9: Comprobaciones del megómetro. Operaciones previas a la medida con megómetro.

También existen dos errores muy comunes en la medición de la resistencia de aislamiento, que deberemos tener en cuenta para poderlos evitar:

■ El primer error se produce cuando no se espera que la aguja del instrumento permanezca estacionaria. El tiempo necesario dependerá del tamaño, potencia de la máquina y de la absorción dieléctrica de la corriente de aislamiento (**figura 10, «A»**).

■ El segundo error se suele producir debido a la gran variación de la resistencia con la temperatura. Por lo tanto será necesario indicar la temperatura de medida con exactitud razonable (**figura 10, «B»**).

Dada la importancia de este aspecto, se acepta como regla general, que el valor de la resistencia de aislamiento aumenta o disminuye el doble en cada variación de temperatura de $\pm 10^\circ\text{C}$ el empleo de esta regla es orientativo, no pudiéndose aplicar específicamente a cada máquina.

3.2.3.- Aplicación del método tiempo-resistencia

Este método está basado en el hecho de que el aislamiento en buenas condiciones, relativamente seco y libre de humedad, muestra con la aplicación de la tensión de prueba, un aumento en su resistencia de aislamiento.

Este método se fundamenta en el fenómeno de absorción (**figura 11**).

Por lo tanto deducimos que si existe un aumento apreciable de la resistencia de aislamiento durante el tiempo de aplicación de la prueba, el aislamiento estará en buenas condiciones.

La aplicación práctica de este método, consiste en determinar la relación de dos lecturas de resistencia de aislamiento hechas a intervalos de tiempo diferentes durante la misma prueba. Las condiciones del aislamiento en función de la relación de absorción las podemos ver en la siguiente tabla:

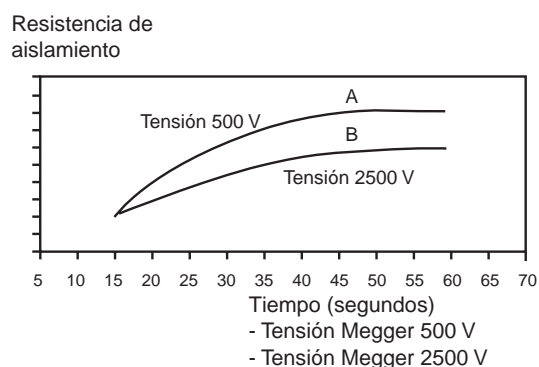
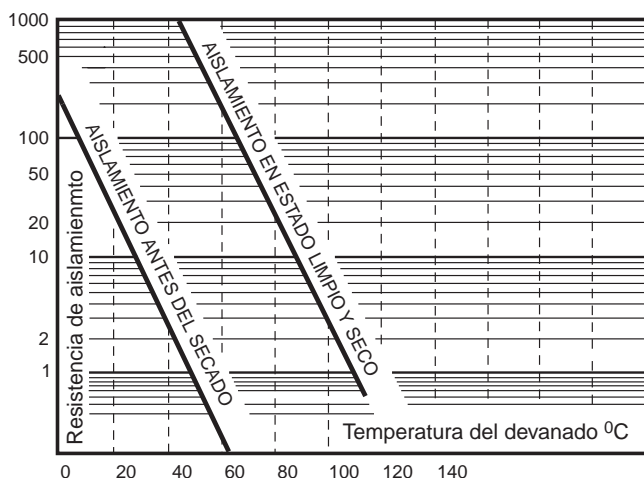


Fig. 11: Método de las dos tensiones.
«A»: curva de un dieléctrico satisfactorio.
«B»: curva de un dieléctrico que revela contaminación o humedad. Curva típica tiempo/resistencia.

Curva «A»



Curva «B»

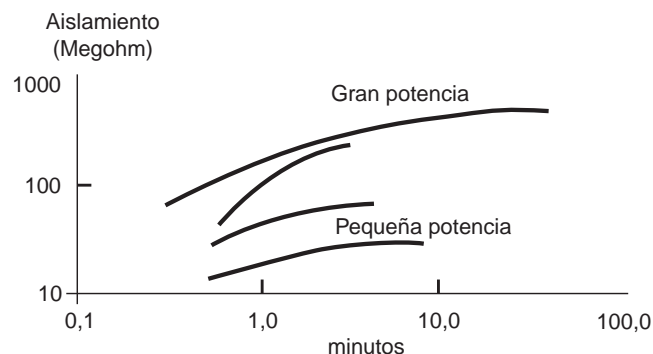


Fig. 10: Curva «A»: Aislamiento/temperatura. Curva «B»: Aislamiento/potencia.

Absorción dieléctrica	Índice polarización	Condiciones de aislamiento
60s/30 s Relación	10min/1min Relación	Condición
-----	< 1	peligroso
< 1,1	< 1,5	pobre
1,1 a 1,25	1,5 a 2,0	dudoso
1,25 a 1,4	2,0 a 3,0	aceptable
1,4 a 1,6	3,0 a 4,0	bueno
> a 1,6	> a 4,0	excelente

Cuando las lecturas de los aislamientos se toman a 30 s y 60 s se denomina a esta modalidad, método de tiempo corto (se aplica a máquinas de pequeña potencia).

La relación de absorción está determinada por el cociente que resulta de dividir la lectura tomada a 60 s y a 30 s.

La relación a 10 min y 1 min se conoce como índice de polarización (se aplica a máquinas de gran potencia). El índice de polarización puede ser una guía muy útil del estado de sequedad y limpieza de devanados. Además proporciona una útil indicación para ver si el transformador se encuentra en condiciones de ser sometido a un «test dieléctrico» (ver «rigidez dieléctrica»).

3.2.4.- Aplicación del método de las dos tensiones

Este método, también basado en el fenómeno de absorción, suele aplicarse para determinar la presencia de humedad dentro de las partes activas.

Para la correcta aplicación de este método se tendrá en cuenta:

- 1.- La relación entre las tensiones elegidas para la prueba se aconseja que sea de 1 a 4, por ejemplo: 500 V la tensión más pequeña y 2500 V la tensión más elevada.
- 2.- La resistencia de aislamiento se prueba a base de lecturas de tiempo corto, para una mejor precisión, durante 60 seg para cada tensión.
- 3.- Se efectuarán las pruebas empezando por la tensión mas pequeña, en el ejemplo anterior 500 V y después se aplicará el potencial mayor 2500 V.
- 4.- Si obtenemos un valor más bajo de resistencia de aislamiento con la tensión de prueba más elevada (2500 V) será indicio, normalmente, de presencia de humedad.
- 5.- Experimentalmente se ha comprobado que cambios del 25% en la resistencia de aislamiento, respetando la relación 1 a 4 en las tensiones de prueba, se debe a la presencia de cantidades excesivas de humedad.

3.2.5.- Medición del devanado de BT contra AT, sin el borne de guarda

Con la medición de la resistencia de aislamiento sin el borne de guarda, determinaremos en realidad, la resistencia global del transformador, siendo la resultante R_A la suma de dos resistencias en paralelo, una R , la propia de los devanados (caso de la medida del devanado de AT respecto al de BT) entre si y otra R_2 , de fuga superficial (**figura 12**).

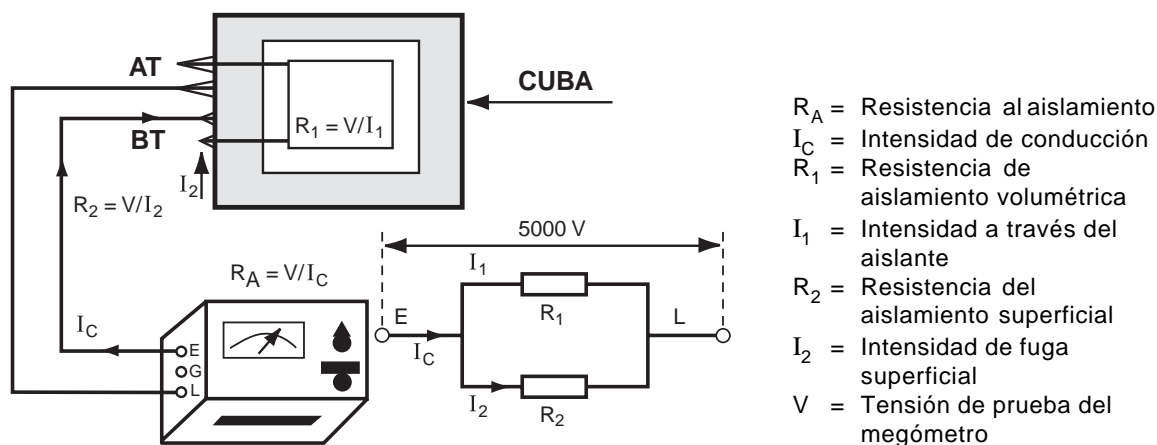


Fig. 12: Medida BT contra AT sin borne de guarda.

Observamos que la resistencia R_A , es inferior a R_1 , que es la resistencia de los devanados.

$$R_A = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \Rightarrow R_A \leq R_1$$

3.2.6.- Medición con borne de guarda

Para evitar, en las pruebas de aislamiento, que las corrientes de fuga superficiales incidan en las mediciones, utilizaremos el borne de guarda del megómetro.

Con el borne de guarda conseguiremos eliminar la resistencia de fuga superficial R al retornar al aparato de medida la corriente de fuga I_2 , restándole ésta a la intensidad de conducción I_C , de esta forma obtenemos la resistencia de aislamiento exclusiva de los devanados (**figura 13**).

Es evidente que es deseable que las dos mediciones, con y sin borne de guarda, sean coincidentes, lo cual nos indicaría que dicho transformador carece de fugas superficiales.

Es interesante recordar, que a la hora de evaluar una medición de aislamiento, hay que tener muy presente la humedad relativa existente en el momento de la prueba, ya que cuanto mayor sea ésta, mayores serán las fugas superficiales, siendo por tanto menor la resistencia de aislamiento obtenida en la modalidad sin borne de guarda, sin embargo, el aislamiento obtenido en la modalidad con borne de guarda, no se verá influenciado por esta causa.

Debido a esta circunstancia, es conveniente efectuar las pruebas con borne de guarda, con objeto de poder contrastar valores con otras medidas obtenidas anteriormente y poder elaborar un historial de aislamientos fiable y lógico.

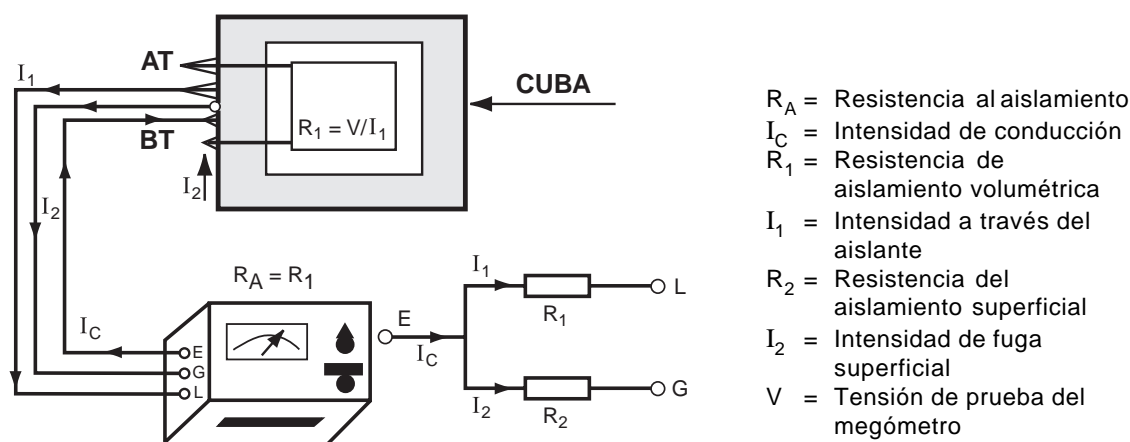


Fig. 13: Medida BT contra AT con borne de guarda.

3.3 Ejemplos gráficos de conexión

Conexión de megóímetros en función del elemento de la instalación eléctrica a comprobar:

■ Ejemplo «A»

- Comprobación de un cable de potencia:

Aislamiento de un conductor respecto a tierra, protegido de las corrientes superficiales de los demás conductores (figura 14).

- Comprobación de un cable de potencia:

Aislamiento de un conductor respecto a los demás y tierra, protegiendo de las corrientes superficiales (figura 15).

■ Ejemplo «B»

- Comprobación de bornes, botellas, terminales, pasamuros, etc. (figura 16).

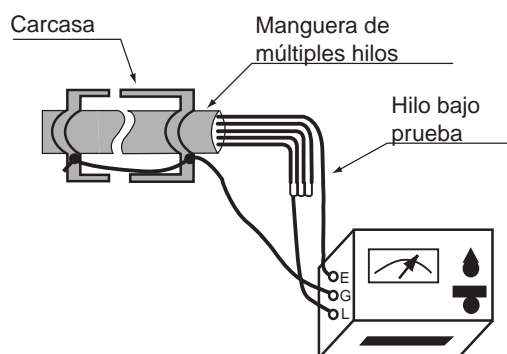


Fig. 14.

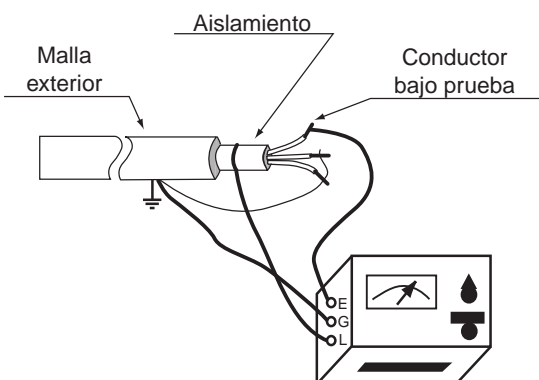


Fig. 15.

■ Ejemplo «C»

- Comprobación de transformador de potencia:

Aislamiento del primario respecto al secundario, protegiendo a masa contra corrientes superficiales (figuras 17 y 18).

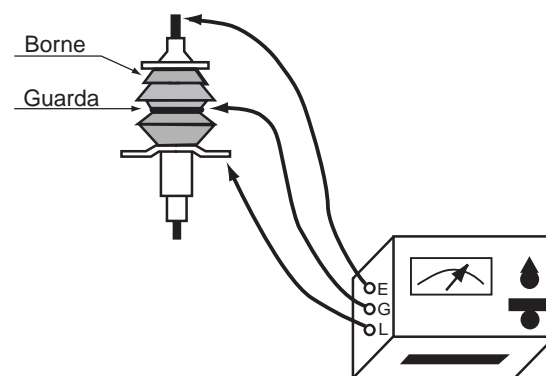


Fig. 16.

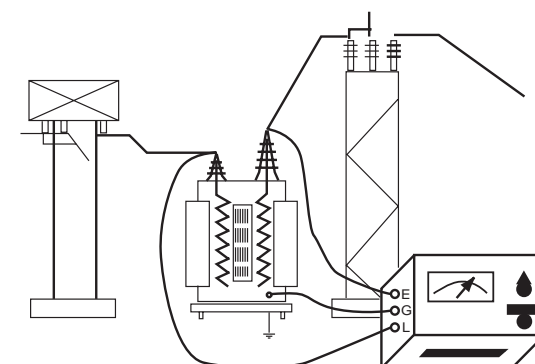


Fig. 17: Prueba de AT contra BT protegido a tierra.

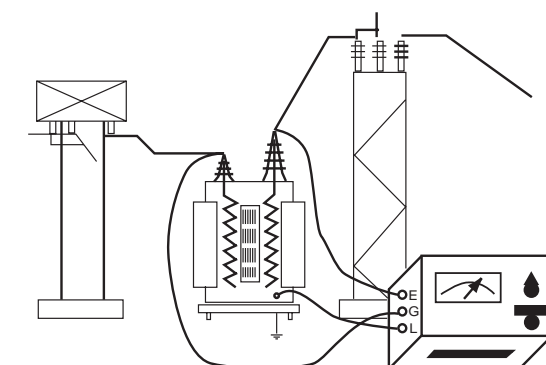


Fig. 18: Prueba de AT contra tierra protegido en BT.

□ Medida del aislamiento del devanado primario respecto a tierra, protegiendo contra corrientes superficiales en devanado secundario (**figura 19**).

□ Medida del aislamiento del devanado secundario respecto a tierra, protegiendo en devanado primario contra corrientes superficiales.

■ Ejemplo «D»

□ Comprobación de disyuntores: Medida de la resistencia de aislamiento de un polo respecto a tierra (con disyuntor cerrado) (**figura 20**).

□ Medición de la resistencia de aislamiento entre cámaras (con disyuntor abierto) (**figura 21**).

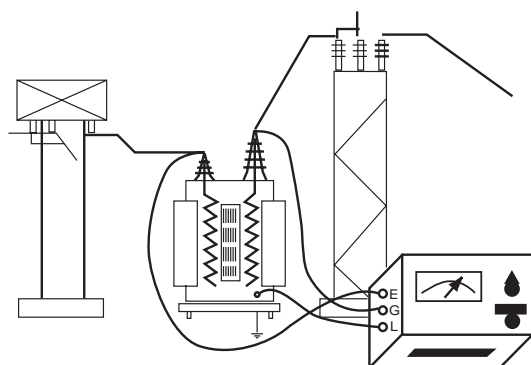


Fig. 19: Prueba de BT contra tierra protegido en AT.

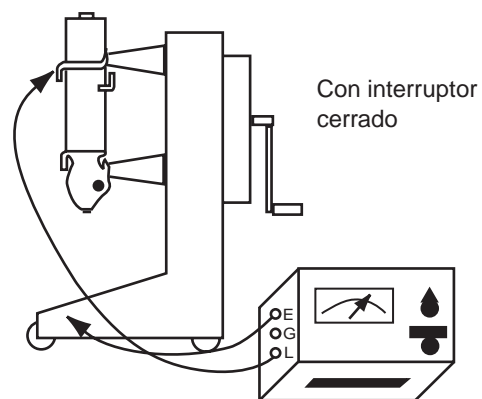


Fig. 20: Medida de aislamiento de polos contra masa.

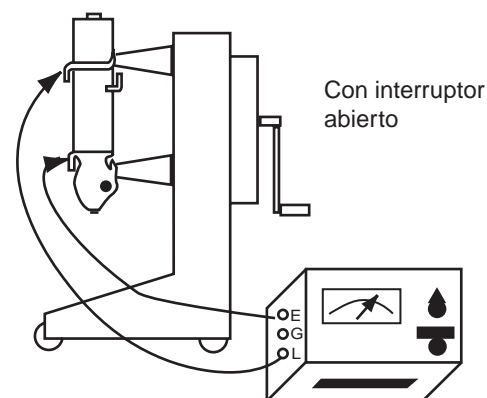


Fig. 21: Medida de aislamiento de cámaras.

3.4 Valores mínimos de la resistencia de aislamiento

Niveles de aislamiento

Dentro de los criterios de aceptación, se recomienda como regla práctica la posibilidad de considerar como válidos aquellos aislamientos cuya resistencia en megaohmios supere el valor dado por la fórmula:

$$R = K \frac{E(V)}{P} \text{ (M}\Omega\text{)}$$

siendo:

R = resistencia de aislamiento en MΩ,
K = factor de corrección por temperatura, referido a 20 °C,
E = tensión de servicio en V,
P = potencia de la máquina en kVA.

Desde muy antiguo se acepta de una forma poco científica, que el valor del aislamiento mínimo para la tensión de 1 kV ha de ser de 1 MΩ y, aplicado a tensiones más elevadas, se dice que ha de ser:

$$1 \text{ M}\Omega \cdot \text{kV} + 1.$$

El CEI (Comité Electrotécnico Internacional) da la siguiente fórmula para el cálculo de la resistencia mínima de aislamiento:

$$R \geq \frac{E}{P + 1000}$$

siendo:

R = resistencia de aislamiento en MΩ,
E = tensión de la máquina en V,
P = potencia nominal de la máquina en kVA.

Si la tensión E es inferior a 1 000 V, la resistencia de aislamiento deberá ser de 1 MΩ y no se tendrá en cuenta la fórmula anterior.

Experimentalmente se aceptan los valores mínimos, expresados en MΩ, siguientes en función de la tensión nominal y la temperatura:

Tensión nominal	MΩ/20 °C
≥ 66 kV	1 200
22 a 44 kV	1 000
6,6 a 19 kV	700
< 6,6 kV	300

Para máquinas rotativas, la resistencia mínima de seguridad recomendada por la AIEE (Instituto Americano de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) para equipos eléctricos a la temperatura de 75 °C nos da la siguiente fórmula. Ésta tiene por objeto servir de guía y no se debe tomar como regla precisa:

$$R_1 = S K_S f \frac{E + 3600}{\frac{kVA}{30} + 200}$$

siendo:

R₁ = resistencia de aislamiento mínimo en MΩ, medida con corriente continua a 500 V durante 1 minuto,

E = tensión nominal de la máquina en V,

kVA = potencia nominal de la máquina,

S = constante de velocidad del devanado, para:

S	Velocidad (rpm)
1,3	3600
1,0	1600
0,9	1200
0,7	600
0,4	100

K_S = constante dependiente de la clase de aislamiento:

1 para clase B

0,1 para clase A

f = constante de la temperatura del devanado:

Aislamiento clase B		Aislamiento clase B	
f	Temp. °C	f	Temp. °C
1	75	1	75
2,6	50	6,9	50
6,9	25	47	25

4 El aislamiento con relación a la tensión

Según las recomendaciones de la CEI, los valores normalizados de las tensiones nominales en MT, expresados en kV, son los siguientes:

V_n : 3 - 6 - 10 - 15 - 20 - 30 - 45 kV.

A cada escalón de tensión de esta serie se le hace corresponder un valor de tensión máxima V_m que puede darse en condiciones de servicio normales.

Estos valores normalizados por CEI son los siguientes:

V_m : 3,6 - 7,2 - 12 - 17,5 - 24 - 36 - 52 kV.

En una red normal, la máxima tensión no debe sobrepasar los valores máximos de V_m indicados. Estos valores son esencialmente para el dimensionado del material y, sobre todo, para su aislamiento.

El escalonamiento de tensiones para redes trifásicas de baja tensión, es el siguiente:

127/220 V
(127 V entre fase y neutro;
220 V entre fases),

220/380 V
(220 V entre fase y neutro;
380 V entre fases),

600 V (entre fases)

Debiendo mantenerse la tensión de servicio entre el $\pm 10\%$ de los valores nominales anteriormente citados.

Variaciones dieléctricas debidas a la aplicación de la tensión nominal.

4.1 Variaciones dieléctricas debidas a la aplicación de la tensión nominal

En todo momento, el aislamiento de un material eléctrico deberá resistir las variaciones dieléctricas que resulten de la aplicación de la tensión asignada.

Estas variaciones conducen, en caso de insuficiente aislamiento, a la perforación brusca del mismo, a recebados del arco en

su superficie, o a la destrucción lenta y progresiva del aislamiento por efecto térmico.

La alteración sufrida por un dieléctrico depende de la tensión aplicada y del tiempo de mantenimiento de la misma.

4.2 Esfuerzos dieléctricos. Sobretensiones

Los esfuerzos dieléctricos a los que suele estar sometido el aislamiento de los equipos eléctricos pueden ser de origen externo o interno.

4.2.1.- Sobretensiones externas

Tienen su origen en descargas atmosféricas, con una velocidad de propagación próxima a la velocidad de la luz (300 000 km/s). Estas descargas se manifiestan normalmente en forma de ondas de frente escarpado, alcanzando su valor máximo en el corto espacio de tiempo de 1 ms y disminuyendo al valor cero en unos 100 ms.

Se ha fijado en 1,2/50 μ s la onda de prueba para realizar ensayos dieléctricos con impulsos de tensión, según normas UNE y CEI, referentes a ensayos en instalaciones de AT (**figura 22**).

Las sobretensiones de origen externo pueden ser de los siguientes tipos:

- descarga directa sobre la línea; son las más peligrosas,
- descargas entre nubes próximas a líneas (descarga inducida),
- descarga entre líneas y tierra (descarga indirecta),
- efecto pantalla en edificaciones (descarga reflejada).

4.2.2.- Sobretensiones internas

Tienen su origen en las variaciones de carga de la red, maniobras de desconexión de interruptores, fallos a tierra, puestas en servicio de líneas aéreas o subterráneas, desconexión de transformadores en vacío, etc.

A continuación se resumen las principales características de las sobretensiones internas, según su origen:

■ Sobretensiones de maniobra

Las principales sobretensiones de maniobra se deben a la apertura de interruptores, fusión de fusibles y desconexión de transformadores que trabajan en vacío.

■ Sobretensiones de puesta a tierra

Se consideran únicamente las que forman parte de fenómenos transitorios producidos durante la puesta a tierra e interrupción de la misma. Los arcos producidos son muy perjudiciales y las sobretensiones originadas por ellos pueden alcanzar valores de 3.1 veces la tensión nominal entre fases, pudiendo disminuir a 1.3 cuando el neutro está rígidamente unido a tierra.

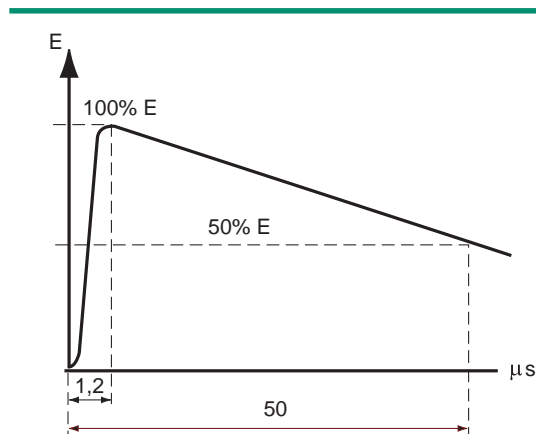


Fig. 22: Forma de la onda 1,2/50 μ s.

■ Sobretensiones a la frecuencia de servicio

Son las originadas en las centrales eléctricas a consecuencia de disminuciones bruscas de carga en la red que alimentan, al permanecer constante la excitación del alternador, motivando el embalamiento de la turbina.

■ Sobretensiones de puesta en servicio de líneas

La puesta en servicio de una línea, aérea o subterránea origina una onda estacionaria de corta duración que normalmente se amortigua a lo largo de la red.

4.3 Ensayos dieléctricos normalizados

En la práctica industrial sobre transformadores, su aislamiento se ha previsto desde antiguo, para poder soportar, durante un minuto, dos veces la tensión nominal a la frecuencia industrial.

Esta regla, a pesar de su origen empírico, ha resultado satisfactoria en su empleo y no ha sufrido más que ligeras modificaciones (para las muy bajas y muy altas tensiones). Corresponde al ensayo dieléctrico llamado de «tensión aplicada». Consiste en poner sucesivamente cada devanado a un potencial uniforme de frecuencia industrial estando los otros devanados unidos entre ellos y a masa, así como una tierra. Este ensayo dura un minuto (figura 23).

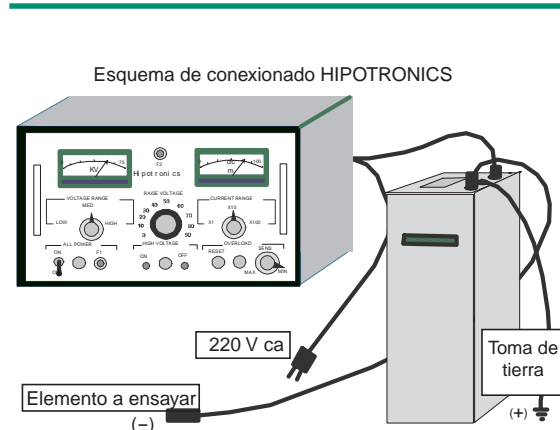


Fig. 23: Equipo portátil para ensayo de tensión aplicada hasta 75 kV.

Sin embargo este ensayo no comprueba más que el aislamiento entre devanados de una parte y entre devanados y tierra por otra; el aislamiento entre espiras y entre bobinas no se comprueba. Para ello es necesario inducir (alimentando por baja tensión, por ejemplo) una tensión doble de la tensión nominal, que aparecerá a la vez entre espiras, entre bobinas y entre fases.

Para no sobrepasar la inducción normal en el núcleo magnético, se opera corrientemente con frecuencia aumentada (doble o triple de la frecuencia industrial). Este ensayo se llama «de tensión inducida». Se observa que comprueba igualmente el aislamiento respecto a tierra.

Pero las sobretensiones de origen atmosférico de frente muy escarpado tienen como característica el repartirse muy desigualmente en los devanados. Pudiendo por ello ocasionar entre espiras y entre bobinas esfuerzos muy superiores a dos veces el valor nominal.

Éste es el motivo de establecerse en fábrica el ensayo llamado «de ondas de choque» que tiene por objeto el reproducir por descarga de condensadores, sobre

tensiones análogas a las provocadas en explosión por los rayos y, en particular, la onda de choque normalizada 1/50 μ s. Este ensayo también comprueba el aislamiento respecto a tierra.

Los ensayos dieléctricos correspondientes a cada tensión normalizada están dados en la tabla de la **figura 24**.

Niveles de aislamiento (Sistema Europeo VDE O111/IEC 71-1)

Acabamos de examinar los ensayos dieléctricos que comprueban la aptitud de un aislamiento para soportar las sobretensiones, pero la experiencia ha demostrado que la simple aplicación permanente de la tensión de servicio, puede producir en ciertas circunstancias, averías. Se trata generalmente de defectos locales de evolución lenta y debidos a la presencia de efluvios. Los aislantes cerámicos suelen ser poco sensibles en estos casos, pero los aislantes orgánicos pueden ser progresivamente destruidos por carbonización. Están desarrollándose estudios para llevar a cabo métodos de medida de ionización en los aislantes.

Tensión máxima de la red entre fases (kV) valor eficaz	Tensión alterna nominal soportable (kV) valor eficaz	Tensión de choque 1,2/50 μs	
		Aislamiento reducido (kV)	Aislamiento pleno (kV)
3,6	10	20	40
7,2	20	40	60
12	28	60	75
17,5	38	75	95
24	50	95	125
36	70	145	170

Fig. 24: Niveles de aislamiento.