



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA**



AISLANTES Y CONDUCTORES

UTILIZADOS EN LAS

MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Doctor Ingeniero Industrial

© 2015, Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Universidad de Cantabria (España)

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.



Está permitida la reproducción total o parcial de este documento bajo la licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Unported que incluye, entre otras, la condición inexcusable de citar su autoría (Miguel Angel Rodríguez Pozueta - Universidad de Cantabria) y su carácter gratuito.

Puede encontrar más documentación gratuita en la página web del autor: <http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm>

AISLANTES Y CONDUCTORES UTILIZADOS EN LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

AISLANTES UTILIZADOS EN LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

MATERIALES AISLANTES

Aislante eléctrico o dieléctrico es aquel material que tiene una conductividad eléctrica tan baja que se puede despreciar la corriente que pasa por él. Esta pequeñísima corriente que pasa a través de un aislante se denomina *corriente de fuga*.

El vacío es el único aislante perfecto ya que tiene conductancia nula y por él no circulan corrientes de fuga. Los demás materiales aislantes son imperfectos, con conductancia no nula pero tan pequeña que sus corrientes de fuga son despreciables.

Los aislantes se utilizan en las máquinas eléctricas para asegurar el aislamiento eléctrico entre los conductores y entre éstos y las piezas metálicas y la carcasa. Estos materiales suelen ser la parte más delicada de una máquina eléctrica debido a su sensibilidad a las sollicitaciones térmicas, mecánicas y dieléctricas.

A la hora de elegir un aislante para una aplicación dada hay que considerar un conjunto de propiedades que debe cumplir y que se pueden clasificar en:

- Propiedades eléctricas
- Propiedades mecánicas
- Propiedades físico-químicas

Evidentemente, las propiedades eléctricas son las más importantes, pero no hay que olvidar las demás. De las propiedades no eléctricas, una de las más importantes es la máxima *temperatura* que puede soportar un aislante sin que sus propiedades eléctricas se vean afectadas.

RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

La *resistencia de aislamiento* de un aislante es la resistencia que opone al paso de la corriente eléctrica, medida en la dirección en que se tiene que asegurar el aislamiento.

La corriente de fuga de un aislante sigue dos caminos: uno sobre la superficie y otro a través del interior del material. La resistencia de aislamiento que presenta el material se debe al efecto de estos dos caminos en paralelo.

La *resistividad de aislamiento superficial* se mide en $M\Omega$ y es debida a la resistencia que ofrece la superficie del material al paso de la corriente cuando se aplica tensión entre dos puntos de dicha superficie (Fig. 1a). Evidentemente esta magnitud está muy afectada por el estado de limpieza de la superficie. La suciedad (grasa, polvo, etc.) depositada sobre la superficie de un aislante reduce la resistividad de aislamiento superficial. Por esta razón, las piezas aislantes hay que construirlas lisas y pulidas.

Según la norma UNE 21303 la resistividad superficial es igual a la resistencia superficial que presenta una superficie cuadrada y es independiente del tamaño de este cuadrado. Para obtener esta resistividad se utiliza el montaje de la Fig. 1a donde se mide la resistencia entre los electrodos (por ejemplo, usando una fuente de tensión continua, midiendo la corriente que aparece y aplicando la ley de Ohm) y la resistividad se calcula multiplicando esta resistencia por el perímetro de un electrodo y dividiéndola por la distancia entre los electrodos.

La resistividad de aislamiento transversal o volumétrica se mide en $M\Omega\text{cm}^2/\text{cm}$ y es debida a la resistencia que ofrece el dieléctrico a ser atravesado por una corriente cuando se aplica tensión entre dos de sus caras (Fig. 1b). Esta magnitud no tiene un valor constante para un mismo material, ya que le afectan la temperatura, la humedad, el espesor de la pieza, el envejecimiento del material, etc.

Es obvio que se debe procurar que la resistencia de aislamiento de un material aislante sea lo más alta posible.

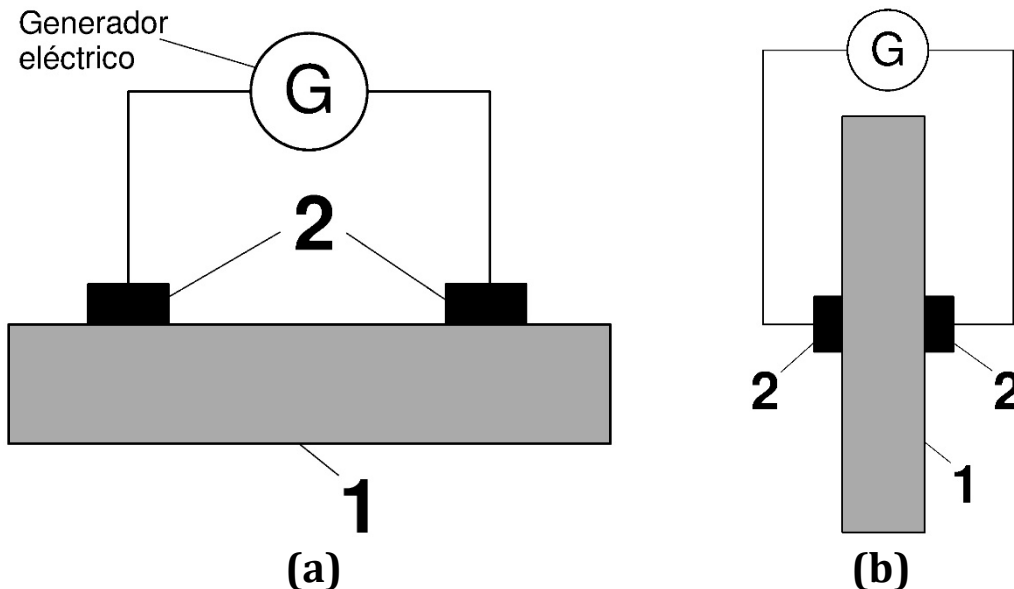


Fig. 1: Resistencia de aislamiento superficial (a) y transversal (b).
 (1: Material aislante; 2: Electrodo)

RIGIDEZ DIELECTRICA

Cuando se aplica tensión eléctrica moderada entre dos caras de un aislante el campo eléctrico que aparece produce una pequeña corriente de fuga debido a los pocos electrones libres que tiene el material. Además, los átomos se ven sometidos a fuerzas que afectan a las órbitas de sus electrones ligados. Si la tensión y, por lo tanto, la intensidad del campo eléctrico, aumentan y superan cierto límite los electrones empiezan a abandonar sus átomos y algunos de ellos chocan con otros átomos provocando un aumento de temperatura y la separación de nuevos electrones. Se produce así un efecto acumulativo denominado *descarga* que provoca la pérdida permanente (*perforación* del aislante) o temporal (*descargas parciales*) de las cualidades aislantes del material.

Se denomina *rigidez dieléctrica* de un aislante a la intensidad del campo eléctrico máxima que puede soportar el aislante sin que se produzca su perforación. Es decir, cuando la intensidad del campo eléctrico en el interior del material aislante supera a su rigidez dieléctrica, este deja de ser aislante y se convierte en conductor.

Esta magnitud se determina experimentalmente mediante ensayos normalizados en los que se aplica una tensión entre dos electrodos colocados en caras opuestas de una muestra del aislante (como en la Fig. 1b). La tensión se va aumentando gradualmente hasta provocar la perforación del aislante.

La rigidez dieléctrica se expresa como cociente entre la tensión de perforación del material y el espesor de la pieza aislante y se mide en kV/mm. En el caso de que la tensión que se aplica al aislante sea alterna hay que especificar si se utiliza su valor eficaz o el de cresta (valor máximo). Usualmente se utiliza el valor de cresta.

El valor de la rigidez dieléctrica depende de las condiciones en las que se realiza el ensayo del material: dimensiones y forma de los electrodos, espesor del aislante, duración de la aplicación del voltaje, frecuencia, forma de la onda de tensión, condiciones ambientales, etc.

También existe la *rigidez dieléctrica superficial* cuando la tensión se aplica entre dos puntos de la superficie del aislante. En este caso la rigidez dieléctrica es el cociente entre la tensión de perforación y la distancia entre los electrodos (que se colocan de una manera similar a la indicada en la Fig. 1a). La rigidez dieléctrica superficial también se mide en kV/mm, pero ahora, si la tensión es alterna, se utiliza su valor eficaz.

Los materiales aislantes sumergidos en aceite tienen mejor rigidez dieléctrica que los que se encuentran al aire.

CONSTANTE DIELECTRICA ϵ_r

Se puede definir la *constante dieléctrica o permitividad relativa ϵ_r* de un aislante como el cociente de la capacidad de un condensador que tuviera como dieléctrico a este material entre la capacidad que tendría el mismo condensador si utilizara el vacío como dieléctrico.

Así si se tiene un condensador plano cuyas placas tienen una sección S, están separadas una distancia τ y usa el vacío como dieléctrico, su capacidad C_0 viene dada por

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{S}{\tau} \quad (1)$$

En esta expresión ϵ_0 es la permitividad absoluta del vacío.

Si este mismo condensador utiliza como dieléctrico un material de *permitividad absoluta ϵ* y constante dieléctrica ϵ_r , su capacidad pasa a valer C, la cual viene dada por

$$C = \epsilon \frac{S}{\tau} = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{S}{\tau} \quad (2)$$
$$(\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0)$$

Luego, la constante dieléctrica ϵ_r se obtiene mediante este cociente

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (3)$$

Considérese ahora un condensador plano de sección S que tiene como dieléctrico varias capas planas de diferentes materiales aislantes (Fig. 2) con espesores τ_1, τ_2, \dots , siendo τ la separación entre las placas del condensador:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \dots \quad (4)$$

La tensión total aplicada entre las placas del condensador es V y da lugar a las caídas de tensión V_1 entre las dos caras del material aislante 1, V_2 entre las caras del material aislante 2, ...

$$V = V_1 + V_2 + \dots \quad (5)$$

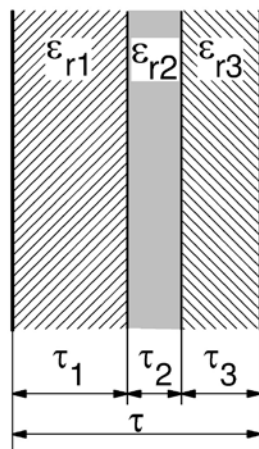


Fig. 2: Condensador plano cuyo dieléctrico son varias capas paralelas de material aislante.

La intensidad del campo eléctrico E_i en el interior del aislante i vale

$$E_i = \frac{V_i}{\tau_i} \quad (6)$$

y E_m es la intensidad del campo eléctrico media en el condensador:

$$E_m = \frac{V}{\tau} \quad (7)$$

Este condensador se lo puede suponer equivalente a colocar en serie varios condensadores parciales de la misma sección S , cuyas placas tuvieran respectivamente una separación τ_1, τ_2, \dots y cuyos dieléctricos tuvieran respectivamente las constantes dieléctricas $\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}, \dots$. Las tensiones entre las placas de cada uno de estos condensadores parciales serían, respectivamente, V_1, V_2, \dots y la capacidad C_i de uno de estos condensadores parciales viene dada por esta expresión

$$C_i = \epsilon_{ri} \epsilon_0 \frac{S}{\tau_i} \quad (8)$$

Al tratarse de varios condensadores en serie, la capacidad C del conjunto se puede obtener de

$$\frac{1}{C} = \sum_j \frac{1}{C_j} = \frac{1}{\epsilon_0 S} \sum_j \frac{\tau_j}{\epsilon_{rj}} \quad (9)$$

En serie todos los condensadores están recorridos por la misma corriente, por lo cual tienen la misma carga Q. Luego:

$$\begin{aligned}
 Q &= V C = V_i C_i \\
 \frac{V_i}{V} &= \frac{C}{C_i} = \frac{1}{\frac{1}{C}} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_0 S} \sum_j \frac{\tau_j}{\epsilon_{rj}}} = \frac{\tau_i}{\sum_j \frac{\tau_j}{\epsilon_{rj}}} \\
 \frac{E_i}{E_m} &= \frac{V_i}{V} = \frac{\tau_i}{\sum_j \frac{\tau_j}{\epsilon_{rj}}} = \frac{1}{\frac{1}{\tau} \sum_j \frac{\tau_j}{\epsilon_{rj}}} \quad (10)
 \end{aligned}$$

En el caso de que el condensador sólo tuviera dos capas de material aislante (materiales 1 y 2), la expresión (10) aplicada al material 1 se convierte en:

$$\frac{E_1}{E_m} = \frac{\frac{\tau}{\epsilon_{r1}}}{\frac{\tau_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{\tau_2}{\epsilon_{r2}}} = \frac{1}{\frac{\tau_1}{\tau} + \frac{\tau_2}{\tau} \frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}}} \quad (11)$$

Si sucede que el espesor del material 1 es mucho más pequeño que el del material 2, se puede deducir que

$$\tau_1 \ll \tau_2 \Rightarrow \frac{\tau_1}{\tau} \rightarrow 0 \text{ y } \frac{\tau_2}{\tau} \rightarrow 1 \Rightarrow E_1 = \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}} E_m$$

$$E_1 = \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}} E_m \quad (12)$$

En resumen, en un condensador plano cuyo dieléctrico esté formado por dos capas de material aislante (materiales 1 y 2), tales que el espesor τ_1 del material 1 es bastante inferior al espesor τ_2 del material 2, la expresión (12) permite obtener el campo eléctrico E_1 en el interior del material aislante 1 en función del campo eléctrico medio del condensador. De dicha expresión (12) se puede deducir que si la constante dieléctrica ϵ_{r2} del material 2 es mayor comparada con la constante dieléctrica ϵ_{r1} del material 1 sucede que

$$\epsilon_{r2} > \epsilon_{r1} \Rightarrow E_1 > E_m \quad (13)$$

Por lo tanto, el aislante 1 tiene un campo eléctrico superior al medio, por lo que probablemente sea el que se encuentre más cerca de alcanzar su rigidez dieléctrica y se pueda perforar.

Aunque los párrafos anteriores se han referido a un condensador plano con dos capas de material aislante, se puede generalizar y decir que en cualquier tipo de aislamiento formado por varias capas de material aislante sucede lo siguiente:

- El material aislante más solicitado es el de menor constante dieléctrica ϵ_r , lo cual hace que, si no tiene una rigidez dieléctrica apreciablemente más alta que la de los demás, este material sea el que tenga más probabilidad de llegar a perforarse primero.

- Esto da lugar a la paradoja de que aumentando el espesor del mejor aislante, pensando así aumentar la rigidez dieléctrica del conjunto, lo que se logra es provocar la perforación del otro. En este caso toda la tensión queda aplicada al primer aislante, que también puede acabar perforado.

La mejor disposición de aislantes en serie se consigue cuando se utilizan materiales que tienen igual valor del producto de su constante dieléctrica por su rigidez dieléctrica.

De lo anterior se deduce lo peligrosas que resultan las burbujas de aire que puedan quedar en el interior de un aislante. La intensidad del campo eléctrico en el interior de estas burbujas es muy alta (ver las relaciones (12) y (13)), lo que puede provocar descargas en ellas que pueden ser el inicio de un fallo generalizado de todo el aislamiento.

En consecuencia, es necesario eliminar el aire interior de los aislantes, rellenando con barniz todos los posibles huecos, para lo cual se utilizan distintos procedimientos de *impregnación*. También es preciso eliminar toda la humedad que puedan contener las bobinas, para lo cual estas se calientan antes de la impregnación durante el tiempo necesario para que la evaporación del agua sea lo más completa posible.

La impregnación de los devanados se puede realizar por *goteo*; es decir, vertiendo un barniz - elegido especialmente para este propósito- sobre los bobinados.

Otro procedimiento es el de *inmersión* de la pieza en un barniz hasta que ya no aparezcan burbujas de aire en la superficie del mismo. Este es el procedimiento que se suele emplear en máquinas pequeñas y medianas de baja tensión.

Para máquinas de tensiones más altas (1200 a 15000 V) es conveniente utilizar el método de *impregnación en autoclave* haciendo primero vacío y luego inmersión en el barniz bajo presión.

La viscosidad del barniz debe ser la apropiada para conseguir la máxima penetración.

Después de la impregnación se efectúa un proceso de *secado* para eliminar el exceso de barniz y parte de los solventes. Según las características del barniz utilizado el secado se realiza de una de estas dos maneras:

1. *Secado al aire* en un ambiente bien ventilado y libre de polvo.
2. *Secado al horno* para impedir que una parte de los solventes quede atrapada en la película del barniz y ataque el esmaltado del conductor.

En las máquinas que superan los 5 kV y en transformadores de alta tensión se utiliza un *aislante semiconductor*, que tiene por finalidad proteger las bobinas contra los daños que producen los efluvios y las descargas parciales.

PÉRDIDAS EN LOS AISLANTES

Cuando un aislante está sometido a una tensión eléctrica aparece una corriente de fuga que da lugar a unas pequeñas pérdidas de potencia por efecto Joule. Esto sucede tanto cuando la tensión es continua como cuando es alterna.

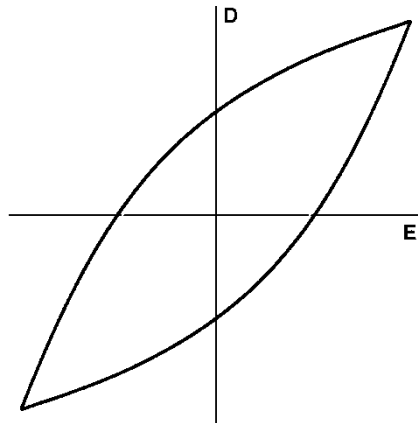


Fig. 3: Histéresis dieléctrica

Cuando la tensión a la que se somete el aislante es alterna o, al menos, variable en el tiempo, aparece el fenómeno de la *histéresis dieléctrica* (Fig. 3). Este fenómeno guarda cierta analogía con la conocida histéresis magnética y es debido a la inercia con que el desplazamiento o densidad de carga D sigue las variaciones de la intensidad del campo eléctrico E.

Las pérdidas por histéresis dieléctrica son mayores que las debidas al efecto Joule de las corrientes de fuga y son las únicas que se tienen en cuenta cuando un aislante se encuentra sometido a una tensión alterna.

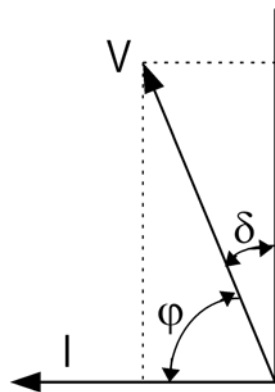


Fig. 4: Ángulo de pérdidas de un aislante

Cuando se tienen dos conductores separados por un dieléctrico y conectados a una tensión alterna, el conjunto se comporta como un condensador y a través de él debería circular una corriente puramente capacitiva; es decir, adelantada 90° con respecto a la tensión. El hecho de que existan pérdidas dieléctricas exige que se deba consumir algo de potencia activa de la fuente de tensión, lo que provoca que el desfase φ entre la tensión y la corriente sea ligeramente inferior a 90° (Fig. 4). De esta manera el factor de potencia $\cos \varphi$ no es nulo.

El ángulo δ , complementario del ángulo φ (Fig. 4), se denomina *ángulo de pérdidas*. Entre los datos de un aislante es frecuente que se indique el valor de la tangente de este ángulo ($\text{tg } \delta$), la cual se conoce con el nombre de *factor de disipación*. Dado el pequeño valor del ángulo δ (normalmente inferior a 1°), sucede que esta tangente es igual al factor de potencia $\cos \varphi$ del material aislante:

$$\delta \ll \Rightarrow \cos \varphi = \text{sen } \delta \approx \text{tg } \delta \approx \delta \tag{14}$$

Puesto que la energía almacenada en un aislante depende de su constante dieléctrica ϵ_r , sus pérdidas dieléctricas son proporcionales al producto $\epsilon_r \cdot \text{tg } \delta$, el cual se denomina *factor de pérdidas dieléctricas*.

Las pérdidas dieléctricas normalmente no se computan cuando se estudian las pérdidas de una máquina eléctrica debido a su pequeño valor frente a las demás pérdidas: en el hierro, en el cobre, mecánicas, ... Sin embargo, el estudio del valor de $\text{tg } \delta$ y de su variación con el tiempo permite conocer en qué estado se encuentra el aislamiento de una máquina y su grado de envejecimiento.

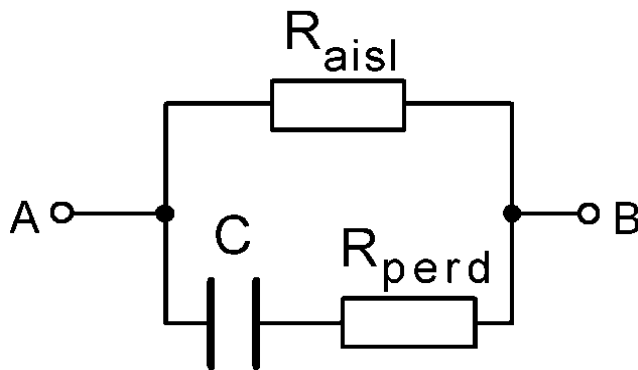


Fig. 5: Circuito equivalente de dos conductores, A y B, separados por un aislante.

Un par de conductores, A y B, sometidos a una tensión eléctrica y separados por un aislante se pueden representar por el *circuito equivalente* de la Fig. 5. En este circuito, C es la capacidad del conjunto, R_{aisl} es la resistencia de aislamiento del aislante y la resistencia R_{perd} permite incluir el efecto de las pérdidas dieléctricas en este circuito equivalente.

Las pérdidas dieléctricas calientan el material y aumentan su temperatura. Esto aumenta el fenómeno perjudicial de la descarga y la perforación subsiguiente. Se puede demostrar que existe para cada material aislante un *voltaje crítico* que puede aguantar. Por encima de este voltaje se produce la perforación del material, sea cual sea su espesor.

CLASE TÉRMICA DE LOS SISTEMAS DE AISLAMIENTO

Según la norma UNE-EN 60085 un *sistema de aislamiento eléctrico* es “una estructura aislante que contiene uno o más materiales aislantes eléctricos junto con partes conductoras asociadas y que se utiliza en un dispositivo electrotécnico”.

En casi todas las máquinas eléctricas la potencia que pueden suministrar está limitada por la temperatura que alcanzan. Cuanto mayor es la potencia que suministra una máquina, mayores serán sus pérdidas y, en consecuencia, el calor que se genera en ella. Este calor aumenta su temperatura y llega un momento en que esta temperatura es peligrosa para la integridad de la máquina. Normalmente los materiales aislantes son los elementos más sensibles a la temperatura y, por consiguiente, los que limitan la potencia que puede proporcionar una máquina dada.

Tabla I: Clase térmica de los sistemas de aislamiento eléctrico según las normas UNE-EN 62114, 60085 y 60034-1.

CLASE TÉRMICA (°C)	ANTIGUA DESIGNACIÓN	TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	CALENTAMIENTO MÁXIMO (*) (°C)
90	Y	90	50
105	A	105	65
120	E	120	80
130	B	130	90
155	F	155	115
180	H	180	140
200	N	200	160
220	R	220	180
250	-	250	210

(*) Esta columna indica el calentamiento máximo en el supuesto que el fluido refrigerante sea aire ambiente a una altitud inferior a 1000 metros sobre el nivel del mar

A medida que pasa el tiempo un material aislante va envejeciendo y el sistema de aislamiento eléctrico va perdiendo sus cualidades dieléctricas, lo cual se ve agravado si resulta sometido a temperaturas elevadas. Es decir, los materiales aislantes y los sistemas de aislamiento eléctrico tienen una *vida* que, de forma orientativa, se puede establecer en 40 años en las máquinas grandes, 30 años en las medianas y 20 años en las pequeñas.

Se han estudiado y analizado los materiales aislantes utilizados en las máquinas eléctricas para averiguar cuál es la máxima temperatura que pueden soportar sin peligro de acortar su vida. Esta temperatura máxima se denomina *endurancia térmica* (véanse las normas UNE-EN 62114 y 60085).

La *clase térmica* (UNE-EN 62114, 60085 y 60034-1) de un sistema de aislamiento se designa mediante el valor numérico de la temperatura de utilización continua máxima recomendada medida en grados centígrados. Antiguamente algunas de estas clases térmicas se designaban mediante una letra. En la tabla I se recogen las designaciones de las clases térmicas.

La clase térmica de un sistema de aislamiento eléctrico puede no estar directamente relacionada con la *endurancia térmica* de uno de los materiales aislantes incluidos en él. Es la combinación de todos los elementos que constituyen el sistema de aislamiento lo que da lugar a su clase térmica.

En la tercera columna de la tabla I se indica la temperatura máxima a la que se puede someter un sistema de aislamiento según su clase térmica para que su vida no se vea reducida. En la cuarta columna de esta tabla se señala el *calentamiento* máximo a que se lo puede someter si el fluido refrigerante es el aire ambiente.

Se denomina *calentamiento* a la diferencia entre la temperatura del sistema de aislamiento y la del fluido de refrigeración. La norma UNE 600034-1 establece que en España, para altitudes por debajo de 1000 m sobre el nivel del mar, se debe considerar que la temperatura del aire ambiente es 40°C. Por lo tanto, la columna 4 de la tabla I -que muestra el calentamiento máximo admisible cuando el fluido refrigerante es el aire ambiente- se obtiene restando 40°C a los valores de la columna 3.

Normalmente la temperatura de los bobinados se mide mediante procedimientos que proporcionan el valor medio de dicha magnitud, pudiendo haber *puntos calientes* de la máquina donde la temperatura tiene un valor superior al medio. Por lo tanto, la norma UNE-EN 600034-1 establece que debe haber un margen de seguridad por debajo de 5 a 15°C -o incluso mayor- según los casos, entre la temperatura que se mide por estos procedimientos y la temperatura límite indicada en la tabla I.

Los materiales aislantes cuya endurancia térmica es más baja son aquellos con mayor proporción de componentes orgánicos. Por el contrario, los aislantes que aguantan temperaturas más elevadas están formados en mayor medida por sustancias inorgánicas.

A continuación, se citan algunos ejemplos de los aislantes cuya endurancia térmica se corresponde con las clases térmicas de los sistemas de aislamiento recogidas en la tabla I:

- 90°C: Algodón, seda, papel sin impregnación.
- 105°C: Algodón, seda, papel impregnados o sumergidos en aceite.
- 120°C: Fibras orgánicas sintéticas. Por ejemplo: esmaltes de acetato de polivinilo, barnices de resinas alquídicas, ...
- 130°C: Materiales a base de poliéster y poliimidos aglutinados mediante materiales orgánicos. Por ejemplo, los esmaltes de resinas de poliuretano.
- 155°C: Materiales a base de fibra de mica, amianto y fibra de vidrio aglutinados mediante materiales orgánicos. Por ejemplo, la fibra de vidrio tratada con resinas de poliéster.
- 180°C: Materiales a base de mica, amianto y fibra de vidrio aglutinados con siliconas de alta estabilidad térmica. Por ejemplo, el papel de mica aglomerado con siliconas.
- 200°C: Materiales a base de mica, vidrio, cerámica, ... capaces de soportar hasta 200°C.
- 220°C: Materiales a base de mica, vidrio, cerámica, ... poliimididas tipo Kapton, capaces de soportar hasta 220°C.
- 250°C: Materiales a base de mica, vidrio, cerámica, ... poliimididas tipo Kapton, capaces de soportar hasta 250°C.

CONDUCTORES UTILIZADOS EN LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

MATERIALES CONDUCTORES

Los materiales conductores se caracterizan por su elevada conductividad que los permite conducir las corrientes eléctricas.

La *resistencia eléctrica* R de un conductor se puede calcular mediante la expresión siguiente

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (15)$$

En la expresión (15),

- l es la longitud del conductor, que usualmente se mide en metros (m)
- S es la sección del conductor, que se suele medir en mm^2
- ρ es la *resistividad* del material, que se suele indicar en $\Omega \text{mm}^2/\text{m}$
- R es la resistencia, la cual se mide en *Ohms* (Ω).

A veces se utiliza la magnitud inversa a la resistencia que se llama *conductancia*, G ; cuya unidad de medida es el *Siemens* (S), también denominado *Mho* (Ω^{-1}):

$$G = \frac{1}{R} \quad (16)$$

La *conductividad* σ es la inversa de la resistividad y se mide en $\text{S m}/\text{mm}^2$:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (17)$$

Tabla II: Conductividad a 20°C de varios materiales conductores

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD σ A 20°C (S m/mm ²)
Cobre patrón	58
Cobre electrolítico recocido	57
Cobre electrolítico comercial	56
Cobre electrolítico duro	56
Aluminio recocido	36
Aluminio duro	35,4
Aluminio inyectado para rotores	33

En las máquinas eléctricas se utilizan básicamente dos materiales conductores, que son el cobre y el aluminio. Para que la conductividad de estos materiales se mantenga alta deben ser de gran pureza. Los procesos de laminación y estirado disminuyen su conductividad, por lo que deben ser sometidos seguidamente a un proceso de recocido. En la tabla II se indican los valores característicos de conductividad a 20°C para varios materiales.

EFECTO DE LA TEMPERATURA

Al aumentar la temperatura la resistividad del cobre y del aluminio, como la de casi todos los metales, aumenta linealmente.

Por otra parte, el aumento de la temperatura también produce dilataciones que afectan a la longitud l y a la sección S del conductor.

De todo lo anterior se puede deducir que la resistencia de un conductor aumenta linealmente con la temperatura. Por consiguiente, la resistencia $R_{\theta'}$ de un conductor a la temperatura θ' se puede relacionar con la resistencia R_{θ} del mismo conductor a la temperatura θ , mediante esta ley:

$$R_{\theta'} = R_{\theta} [1 + \alpha_{\theta} (\theta' - \theta)] \quad (18)$$

El coeficiente α_{θ} se denomina *coeficiente aparente de temperatura* y su valor no es constante, sino que depende de la temperatura θ a la que se refiere la resistencia R_{θ} . Para 20°C este coeficiente vale aproximadamente $0,0040^{\circ}\text{C}^{-1}$, tanto para el cobre como para el aluminio.

Si se parte de una temperatura inicial de 0°C ($\theta = 0^{\circ}\text{C}$) y se enfría el material hasta que su resistencia se anule ($R_{\theta'} = 0$), se observa que la temperatura $-T_0$ ($\theta' = -T_0$) en que la resistencia se anula vale:

$$0 = R_0 [1 + \alpha_0 ((-T_0) - 0)] = R_0 [1 - \alpha_0 T_0]$$

$$T_0 = \frac{1}{\alpha_0} \quad (19)$$

Luego, comparando la resistencia del conductor a dos temperaturas diferentes θ' y θ'' se deduce que

$$\frac{R_{\theta'}}{R_{\theta''}} = \frac{R_0 [1 + \alpha_0 \theta']}{R_0 [1 + \alpha_0 \theta'']} = \frac{1 + \alpha_0 \theta'}{1 + \alpha_0 \theta''} = \frac{\frac{1}{\alpha_0} + \theta'}{\frac{1}{\alpha_0} + \theta''}$$

En resumen, se tiene también esta otra expresión para relacionar la resistencia de un conductor a dos temperaturas diferentes, θ' y θ'' :

$$\frac{R_{\theta'}}{R_{\theta''}} = \frac{T_0 + \theta'}{T_0 + \theta''} \quad (20)$$

Para el cobre el valor de la constante T_0 es 235°C. Para el aluminio esta constante vale 225°C (según la norma UNE-EN 60034-1).

Cuando se conoce el valor de la resistencia $R_{\theta'}$ de un conductor a una temperatura θ' (que también es conocida), la relación (20) permite calcular el valor $R_{\theta''}$ de la resistencia de este conductor a una nueva temperatura θ'' o, alternativamente, también permite determinar la nueva temperatura θ'' del conductor cuando se conoce su resistencia $R_{\theta''}$ a dicha temperatura.

EFECTO PELICULAR

Cuando por un conductor circula una corriente continua, esta corriente se reparte de forma uniforme por toda la sección S de dicho conductor (Fig. 6a).

Sin embargo, cuando la corriente es alterna, esta genera campos magnéticos alternos que, a su vez, inducen f.e.m.s sobre el propio conductor. Esto hace que la corriente ya no se reparta de forma uniforme por toda la sección S , sino que se tienda a concentrar en la parte externa (Fig. 6b). Este es el *efecto pelicular*, también llamado *efecto piel*, *efecto Kelvin* o *efecto skin*.

El efecto pelicular hace que en alterna la sección efectiva por la que realmente circula la corriente sea inferior a S , lo que conlleva que la resistencia que presenta el conductor en corriente alterna sea superior que la que tiene en corriente continua.

Existen fórmulas que permiten calcular un coeficiente que relaciona las resistencias en alterna y en continua de un conductor eléctrico. Este coeficiente depende de la forma y las dimensiones del conductor, del material y de la frecuencia.

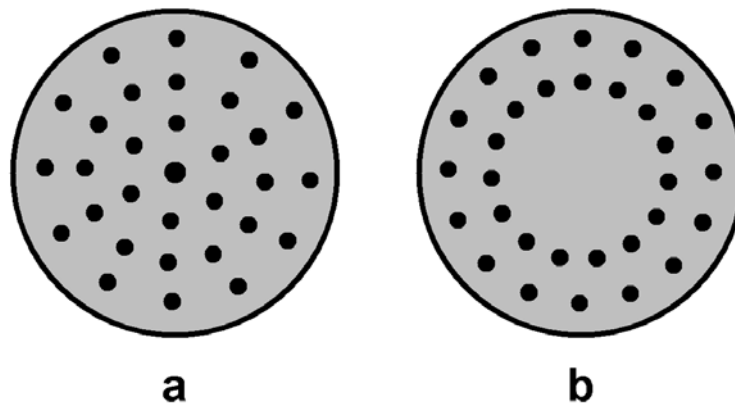


Fig. 6: Efecto pelicular en un conductor

La reducción de la resistencia debida al efecto pelicular se manifiesta de forma más acusada cuanto mayor es la sección S del conductor. Sin embargo, para secciones pequeñas este efecto apenas se manifiesta. Por esta razón, cuando se necesitan conductores de gran sección para conducir corrientes elevadas, se emplean un conjunto de conductores elementales de pequeña sección, aislados entre sí y conectados en paralelo. A efectos del bobinado este conjunto de conductores elementales en paralelo se lo considera como un único conductor.

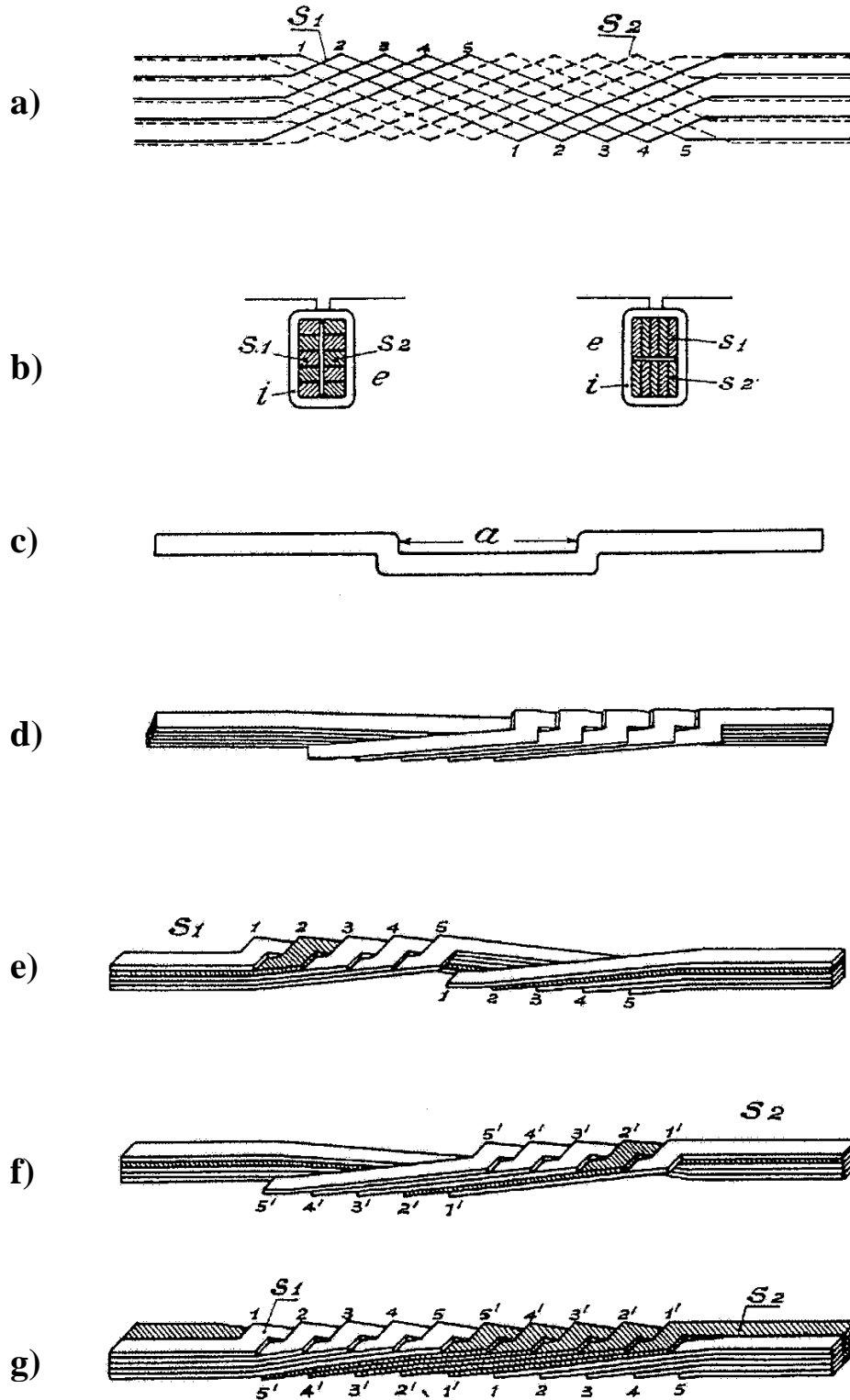


Fig. 7: Barra Roebel

- a) y b) Los conductores elementales se van trasponiendo de forma que ocupan todas las posiciones posibles en la ranura.
- c) Conductor elemental de una barra Roebel.
- e) Semibarra Roebel (1, 2, 3, 4, 5: Conductores elementales)
- f) Semibarra Roebel (1', 2', 3', 4', 5': Conductores elementales)
- g) Barra Roebel completa.

(Fuente: Wikipedia: <http://de.wikipedia.org>. Obtenida de la patente presentada en 1912)

Un ejemplo de esto es la *barra Roebel*. Cada conductor elemental de una barra Roebel tiene la forma indicada en la Fig. 7c. Primero se forman dos semibarras (Fig. 7e y Fig. 7f) que se unen para formar la barra completa (Fig. 7g). Los conductores elementales se van transponiendo a lo largo de la barra de forma que todos y cada uno de ellos ocupen todas las posiciones posibles en la barra (Fig. 7a y Fig. 7b). Así todos los conductores elementales se comportan igual y tienen el mismo flujo de dispersión.

PÉRDIDAS EN LOS CONDUCTORES

La circulación de una corriente, de valor eficaz I , a través de un conductor, de resistencia R , provoca la aparición en él de unas pérdidas por efecto Joule, las cuáles vienen dadas por la conocida expresión:

$$P_{Cu} = R \cdot I^2 \quad (21)$$

Las *pérdidas específicas* por unidad de peso del material se obtienen así:

$$p_{Cu} = \frac{P_{Cu}}{G} \quad (22)$$

En la expresión anterior G es el peso del conductor.

El peso G del material se puede obtener a partir de su peso específico γ y de su volumen, que es igual al producto de su longitud por su sección ($l \cdot S$):

$$G = \frac{\gamma(l \cdot S)}{1000} \quad (23)$$

En la expresión anterior el factor $1/1000$ aparece porque se supone que l se mide en m, S en mm^2 y γ en kg/dm^3 . El peso G , entonces, queda expresado en kg.

El valor eficaz I de la corriente se puede obtener de la densidad de corriente por unidad de superficie J :

$$I = J \cdot S \quad (23)$$

En esta fórmula, la corriente I se mide en A, la densidad de corriente J en A/mm^2 y la sección S en mm^2 .

Teniendo en cuenta las relaciones (15), (22), (23) y (24) se deduce que las pérdidas específicas (expresadas en W/kg) se pueden calcular mediante esta fórmula:

$$p_{Cu} = \frac{1000}{\gamma(l \cdot S)} \left(\rho \frac{l}{S} \right) (J \cdot S)^2 = 1000 \frac{\rho}{\gamma} J^2 \quad (24)$$

Como se acaba de demostrar las pérdidas específicas en un conductor vienen dadas por

$$p_{Cu} = 1000 \frac{\rho}{\gamma} J^2 \quad (25)$$

donde:

- p_{Cu} son las pérdidas específicas medidas en W/kg
- ρ es la resistividad del conductor en $\Omega \text{mm}^2/\text{m}$
- γ es el peso específico del conductor en kg/dm^3
- J es la densidad de corriente, medida en A/mm^2

Luego, las pérdidas en un conductor valen

$$P_{Cu} = p_{Cu} \cdot G = \left(1000 \frac{\rho}{\gamma} J^2 \right) \cdot G \quad (26)$$

En esta expresión el peso G se debe indicar en kg.

En consecuencia, se deduce que, para un material conductor dado (donde el cociente ρ/γ es una constante), *las pérdidas por efecto Joule son proporcionales al peso G del conductor y al cuadrado de la densidad de corriente J .*

ESCOBILLAS

Mediante colectores es posible conectar al exterior el circuito eléctrico del rotor de una máquina. Existen dos tipos de colectores: de delgas y de anillos. En ambos casos la corriente circula a través de unas escobillas de grafito colocadas en el estator que rozan sobre el colector que gira con el rotor.

Las escobillas se clasifican en dos grandes grupos:

- *Metálicas:* compuestas por una mezcla de cobre y carbón.
- *De carbón:* compuestas solamente de carbón, sin agregados metálicos.

El contacto de una escobilla con el colector presenta una resistencia que no es constante, sino que depende de la densidad de corriente. Simplificando, se puede aceptar que, en cuanto la densidad de corriente empieza a tener un cierto valor, la caída de tensión entre una escobilla y el colector es prácticamente constante.

Por otra parte, en corriente continua no se comporta igual la escobilla positiva que la negativa, habiendo diferentes caídas de tensión en ambas.

Esta es la causa de que se trabaje con la *caída de tensión por par de escobillas o por par de carbones $2u_e$* (en otros textos se usa la nomenclatura V_{esc} ($V_{esc} = 2u_e$)). El signo de esta caída de tensión depende del sentido de la corriente (es siempre una caída de tensión; es decir, del mismo signo que la diferencia de potencial que aparecería en una resistencia recorrida por la misma corriente que pasa por las escobillas).

El valor de $2u_e$ oscila entre 0,5 y 3 V. Los valores más usuales son los siguientes:

- En colectores de delgas: $2u_e = 2 \text{ V}$
- En colectores de anillos: $2u_e = 1 \text{ V}$

Por lo tanto, en una máquina de corriente continua y, en general, en las máquinas con *colector de delgas*, con una intensidad de inducido I (que se reparte entre todos los pares de escobillas del colector) aparecen unas *pérdidas en el colector* que se obtienen así:

$$P_{\text{col}} = 2u_e I \quad (27)$$

Esta misma expresión se puede aplicar para calcular la potencia perdida en el *colector de dos anillos* de una máquina síncrona.

En el *colector de tres anillos* de un motor asíncrono trifásico, por cuyo rotor circulan unas corrientes de valor eficaz I , las pérdidas en el colector valen

$$P_{\text{col}} = \frac{3}{2} (2u_e I) = 1,5 (2u_e I) \quad (28)$$

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Corrales Martín, Juan. *“Cálculo industrial de máquinas eléctricas. Tomo I”*. Marcombo. Barcelona. 1982.
- [2] Fraile Mora, Jesús. *“Máquinas eléctricas”*. McGraw-Hill/Interamericana de España. Madrid. 2008.
- [3] N. L. Sacchi, Jorge; Rifaldi, Alfredo. *“Cálculo y diseño de máquinas eléctricas”*. Cátedra de sistemas de potencia. Facultad de ingeniería. Universidad de la Plata (Argentina). (ver el sitio Web: http://davinci.ing.unlp.edu.ar/sispot/1-LyP_-_Intro.html).
- [4] Ramírez Vázquez, José. *“Materiales electrotécnicos”*. Colección “Enciclopedia CEAC de la Electricidad”. Editorial CEAC. Barcelona. 1986.
- [5] Serrano Iribarnegaray, Luis. *“Fundamentos de máquinas eléctricas rotativas”*. Marcombo. Barcelona. 1989.
- [6] AENOR. Norma UNE-EN 62114: *“Sistemas de aislamiento eléctrico (SAE). Clasificación térmica”*. Diciembre 2002.
- [7] AENOR. Norma UNE-EN 60034-1: *“Máquinas eléctricas rotativas. Parte 1: Características asignadas y características de funcionamiento”*. Marzo 2005.
- [8] AENOR. Norma UNE-EN 60085: *“Aislamiento eléctrico. Evaluación y designación térmica”*. Junio 2008.
- [9] WIKIPEDIA (versión alemana). <http://de.wikipedia.org/>.
- [10] AENOR. Norma UNE-21303: *“Métodos para la medida de la resistividad transversal y superficial de los materiales aislantes eléctricos sólidos”*. Julio 1983.