



9

DIELÉCTRICOS

9.1 DIELECTRICOS

9.1.1 ¿QUÉ SON LOS DIELECTRICOS?

Los dieléctricos son materiales, generalmente no metálicos, con una alta resistividad, por lo que la circulación de corriente a través de ellos es muy débil (corriente de paso o de fuga).



Aprovechando esta característica, se emplean como aislantes para detener los electrones o para delimitar el camino que deben tomar.

9.1.2 RIGIDEZ DIELECTRICA

Es el máximo gradiente de potencial que puede soportar un material antes de que se produzca su destrucción por perforación; se expresa en Kilovoltios por milímetro. Su valor queda influido por las condiciones del ensayo. Suponiendo incluso que se consiga un campo sin distorsión (y en consecuencia perfectamente uniforme) y se establezcan las propiedades del material a ensayar eliminando impurezas y humedad, queda aún la influencia del tiempo de ensayo. El mecanismo de destrucción con tiempos de ensayo largos es un fenómeno térmico (calentamiento por pérdidas dieléctricas y corrientes de carga), mientras que en tiempos cortos estos fenómenos no influyen y nos encontramos frente a destrucciones físicas debidas a las fuerzas eléctricas presentes.

En general, la rigidez dieléctrica disminuye al aumentar el tiempo de ensayo según una ley aproximadamente hiperbólica.





9.1.3 CONSTANTE DIELECTRICA

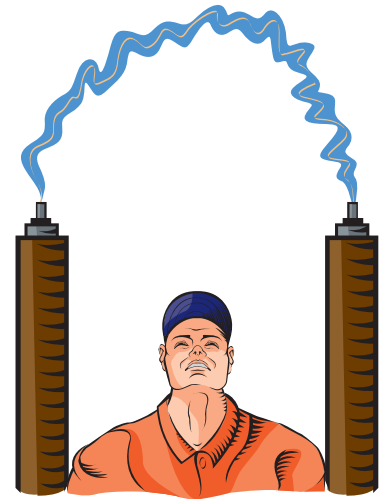
Es la relación que existe entre la carga que toma un condensador con el material considerado como dieléctrico y la que tomaría si el dieléctrico fuera el vacío.

El fenómeno que se mide corresponde a la polarización de las partículas unitarias que componen la estructura del dieléctrico. Cuanto mayor sea la separación entre las cargas elementales y su importancia dentro de la molécula mayor será la influencia que ejercerán sobre el campo eléctrico y mayor será en consecuencia la constante dieléctrica.

La energía acumulada en un condensador viene dada por:

$$W_e = \frac{1}{2} C \cdot U^2 = \frac{1}{2} C_0 \epsilon U^2$$

de donde: $\epsilon = \frac{C}{C_0}$



- C = capacidad del dieléctrico en cuestión
- C₀ = capacidad siendo el dieléctrico el vacío
- ε = constante dieléctrica relativa

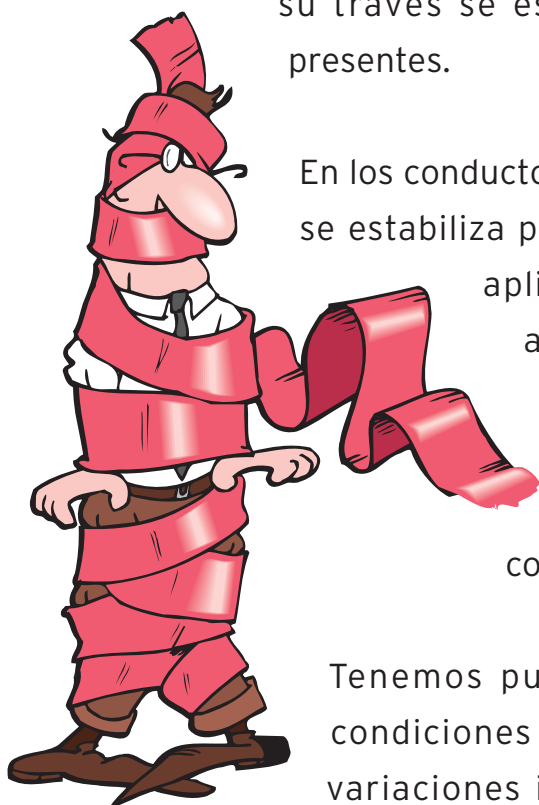
9.2 CONSTANTES DIELECTRICAS

DE VARIAS SUSTANCIAS

SUSTANCIA	CONDICIONES	CONSTANTE DIELECTRICA
AIRE	GAS, 0° C, 1 ATMÓSFERA	1,00059
AGUA	LÍQUIDO, 20° C	80
ACEITE DE TRANSFORM.	LÍQUIDO, 20° C	2,24
CUARZO	CRISTAL, 20° C	4,27 - 4,34
POLIETILENO	SÓLIDO, 20° C	2,25 - 2,3
NEOPRENO	SÓLIDO, 20° C	4,1
PVC	SÓLIDO, 20° C	6 - 8
EPR	SÓLIDO, 20° C	3
XLPE (POLIET. RETICULADO)	SÓLIDO, 20° C	2,5 - 3

9.2.1 RESISTIVIDAD (Aislantes)

Cuando se somete un dieléctrico a una tensión continua, el paso de la corriente a su través se establece por medio de las pocas cargas libres presentes.



En los conductores con gran cantidad de cargas libres, el fenómeno se estabiliza para valores de resistencia (relación entre tensión aplicada e intensidad circulante) poco variables en amplios intervalos; no ocurre lo mismo en los dieléctricos en los que la temperatura y las impurezas pueden modificar notablemente las cargas libres presentes y en consecuencia la corriente de respuesta.

Tenemos pues que la resistividad varía mucho según las condiciones del ensayo y es fácil también que se presenten variaciones importantes con pequeñas modificaciones en la



composición del material. En general, la resistividad disminuye con el aumento de la temperatura y con la humedad (en los aceites).

La resistividad medida con corriente alterna es mayor que el valor obtenido con corriente continua, ya que intervienen otros fenómenos de transferencia de cargas.



9.2.2 RESISTENCIA SUPERFICIAL

En muchas ocasiones puede circular corriente por la superficie del dieléctrico en lugar de hacerlo a través de la masa. Este fenómeno no tiene ninguna relación con la resistividad propia del dieléctrico, sino que se mide por la resistencia superficial.

Influye mucho en este valor la calidad de la superficie y la presencia del polvo, humedad, etc. Este fenómeno es de poco interés en cables, ya que sólo influye en los terminales. Su importancia es básica en el diseño de aisladores en los que se deben evitar las descargas superficiales.

9.2.3 ABSORCIÓN ELÉCTRICA

Cuando se aplica una tensión a un dieléctrico, además de los fenómenos de polarización se presenta una absorción de carga eléctrica que ocurre durante un

tiempo (que puede ser importante) y cesa aunque persista la tensión.

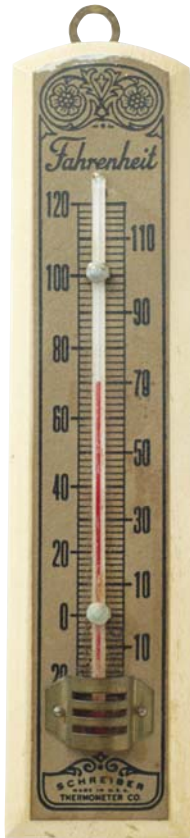
Esta carga la volverá a ceder el dieléctrico si dejamos de aplicar tensión y cortocircuitamos los electrodos.

Este fenómeno es preciso que se tenga en consideración al efectuar las mediciones de resistencia, ya que la presencia de esta corriente puede alterar los valores obtenidos.



9.2.4 PÉRDIDAS DIÉLECTRICAS

Al aplicar una tensión alterna a un dieléctrico ocurrirán los siguientes fenómenos:



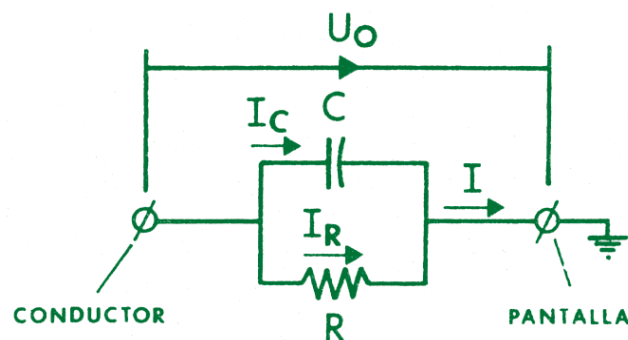
a) Circulará una corriente que cumplirá la ley de Ohm. El valor de esta corriente dependerá de la resistividad del aislante en las condiciones de trabajo. Su paso producirá calentamiento por efecto Joule.

b) Se presentará también una corriente de desplazamiento, adelantada $\pi / 2$ radianes en el plano de Gaus respecto a la tensión aplicada. La magnitud de esta corriente dependerá de la constante dieléctrica del material (que influye en la capacidad del condensador que se forma). Esta corriente no calentará el dieléctrico por ser de desplazamiento.

c) Las masas polares vibrarán siguiendo la excitación a la que están sometidas. Este fenómeno producirá un calentamiento en el material que reflejará el proceso energético que ocurre en su interior. La medición de este fenómeno no es distinguible del que ocurre en el apartado a), salvo que aquel se presenta siempre y éste sólo cuando se trata de excitación alterna.

ANGULO DE PÉRDIDAS

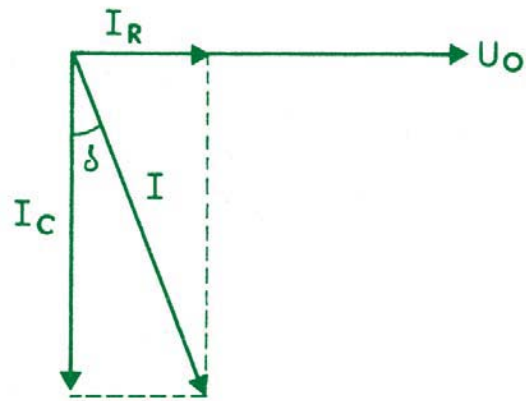
Dado que un cable no es un condensador ideal, existe una corriente I_R de fugas en el dieléctrico en fase con la tensión U_0



ESQUEMA EQUIVALENTE



DIAGRAMA VECTORIAL



La corriente real I en el dieléctrico forma un ángulo δ (de pérdidas) con la corriente reactiva I_C defasada 90° de la tensión U , correspondiente a un condensador ideal sin pérdidas. Se expresa por:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C}$$

El ángulo de pérdidas depende de la temperatura, del material y de la frecuencia. En la Figura 1 se presenta la variación de $\operatorname{tg} \delta$ con la temperatura para los distintos tipos de aislamiento.

Conductancia de Aislamiento (Perditancia)

Se define la conductancia G , como la inversa de la resistencia de pérdidas del aislamiento.

$$G = \frac{I_R}{U_0} = \frac{I_C \operatorname{tg} \delta}{U_0} = \frac{\omega C U_0 \operatorname{tg} \delta}{U_0} = \omega C \operatorname{tg} \delta = \omega \epsilon C_0 \operatorname{tg} \delta \quad \text{Siemens/Km}$$

$\omega = 2\pi f$ = pulsación

ϵ = cte. dieléctrica relativa

C_0 = Capacidad considerando como dieléctrico el vacío

$\operatorname{tg} \delta$ = ángulo de pérdidas

Al producto " $\epsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$ " se llama factor de pérdidas

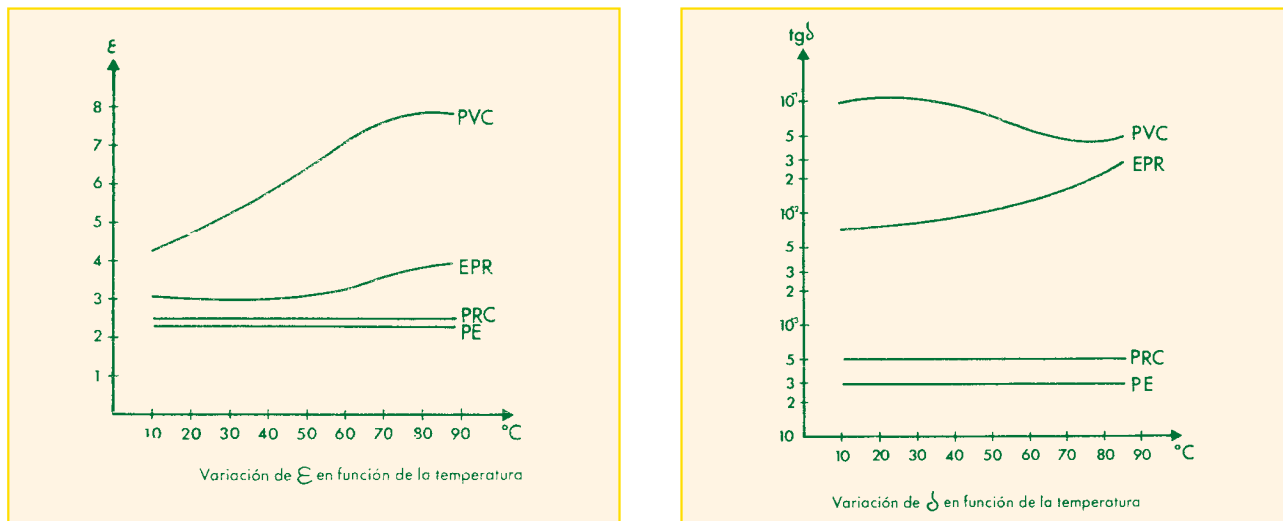


FIGURA 1

Las pérdidas dieléctricas por fase de una distribución trifásica vienen dadas por la fórmula:

$$Wd = \omega C U_0^2 \operatorname{tg} \delta \cdot 10^{-6} = G \cdot U_0^2 \cdot 10^{-6} \text{ en W/Km}$$

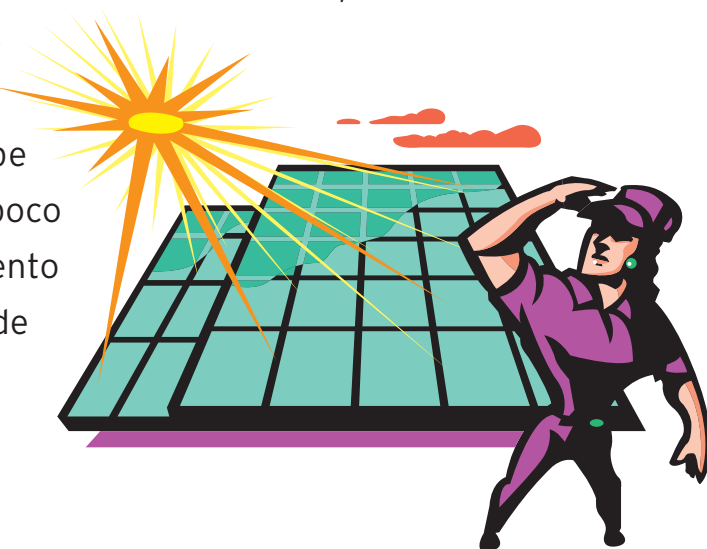
U_0 = tensión simple, en V

C = capacidad en $\mu\text{F/Km}$

Se observa que las pérdidas dieléctricas son proporcionales a la perditancia, y al cuadrado de la tensión simple. En los cables de baja tensión estas pérdidas son prácticamente despreciables. Van adquiriendo importancia a medida que se eleva la tensión.

9.2.5 FACTOR DE PÉRDIDAS

En los cables, para dar un índice de calidad del aislamiento, se acostumbra a medir el valor de la tangente ($\operatorname{tg} \delta$). Este valor nos da la relación entre la corriente resistiva y la corriente capacitiva y debe permanecer lo más bajo posible y variar poco para el trabajo óptimo de cable. Un aumento en el valor de $\operatorname{tg} \delta$, significa la posibilidad de deterioro del dieléctrico al circular a su través corrientes que originarán calentamientos.





9.2.6 EFECTO CORONA

Si el campo eléctrico en un punto sobrepasa el valor de la tensión disruptiva del material presente, se producirá una ionización con creación de cargas libres por destrucción de moléculas equilibradas eléctricamente.

Puede ocurrir que este valor del campo eléctrico sólo se presente en determinados lugares, sea por concentración de campo debido a un diseño incorrecto o bien por la presencia de oclusiones de distinto valor de "épsilon" (por ejemplo, oclusiones de aire). Entonces, esta ionización se limita a este lugar de campo concentrado. A este fenómeno se le llama efecto corona y a la descarga limitada se le llama descarga parcial.

Existen dieléctricos que resisten bien niveles altos de descargas parciales y otros se degradan descomponiéndose ante la presencia de bajos niveles de ionización (muchos aislantes de tipo seco son sensibles a estos fenómenos).



9.2.7 RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

La resistencia de aislamiento de los cables se evalúa generalmente en MΩ por Kilómetro. Para una misma resistividad de su dieléctrico, la resistencia de aislamiento es tanto mayor cuanto más grande es el espesor del aislante y más pequeño el diámetro del conductor.

El valor de la resistencia de aislamiento para cables de un solo conductor de sección circular, es:

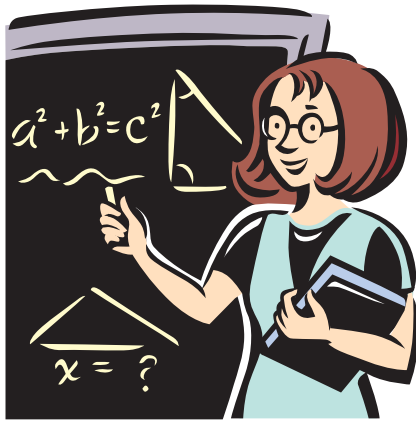
$$R=0,367 \frac{\vartheta}{l} \log \frac{d_2}{d_1}$$

ϑ = resistividad M por centímetro cúbico

d_1 = diámetro del conductor

d_2 = diámetro sobre aislamiento (expresado en las mismas unidades que d_1)

l = longitud del cable en kilómetros



Definición de Ki:

Es la resistencia de aislamiento expresada en MΩ de un cable tipo, de 1Km de longitud, cuya relación de diámetros es 10 ($d_2 / d_1 = 10$). El valor del Ki es sólo función del aislante.

$$K_i = 0,367 \cdot \varnothing \cdot 10^{-5} \text{ M}\Omega \text{ Km}$$

De este modo, puede compararse la resistencia de aislamiento de diferentes cables, calculando el Ki de los mismos

$$K_i = \frac{R \cdot l}{\log \frac{d_2}{d_1}}$$

R = resistencia de aislamiento del cable, expresada en MΩ.

Por consiguiente, conociendo el valor de Ki, a 20° C, en los aislantes poliméricos más utilizados y empleando la fórmula anterior, podremos deducir fácilmente la resistencia de aislamiento en MΩ Km.

Tipo de aislante	Valor de Ki a 20°C
PVC	36,7
EPR	3.670
XLPE	3.670
PE	50.000
S (Silicona)	1.500



9.2.8 CAPACIDADES

La capacidad de un cable depende de las dimensiones del cable y de la cte. dieléctrica relativa del aislamiento.

En los cables de campo radial la capacidad se calcula considerando el cable como un condensador cilíndrico.

$$C = \frac{0,0241 \epsilon}{\log \frac{D}{d}} \text{ en } \mu\text{F/Km}$$

ϵ = cte. dieléctrica relativa

D = diámetro sobre aislamiento

d = diámetro del conductor, incluyendo la capa semiconductor

9.2.9 CAIDAS DE TENSION

En las líneas eléctricas, la existencia de resistencia y reactancia serie de ellas, origina una diferencia entre las tensiones en los extremos del tramo considerado, diferencia que recibe el nombre de caída de tensión. En su valor numérico influyen la naturaleza e intensidad de la corriente que recorre la línea, la longitud, dimensiones y disposición de los conductores.

En las líneas constituidas por cables aislados no se tiene en cuenta, salvo en casos de longitud muy elevada, la influencia de la capacidad entre conductores o entre ellos y tierra, a efectos de caída de tensión, lo que no significa que sea despreciable desde otros puntos de vista.

Igualmente se prescinde de la conductancia del aislamiento o perditancia. La línea puede presentarse mediante un circuito equivalente (Fig. 2), en el que R es la resistencia de la línea, X_L su reactancia inductiva y en el que suponemos que la mitad de la capacidad de la línea está concentrada en los extremos.

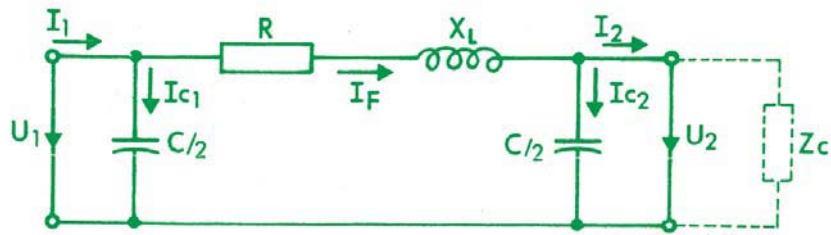


FIGURA 2

El diagrama vectorial equivalente de tensiones y corrientes es el de la Figura 3. Ahora bien, dado que la práctica I_{c1} e I_{c2} son bastante inferiores a I_1 e I_2 se utiliza el diagrama simplificando que muestra la Figura 4.

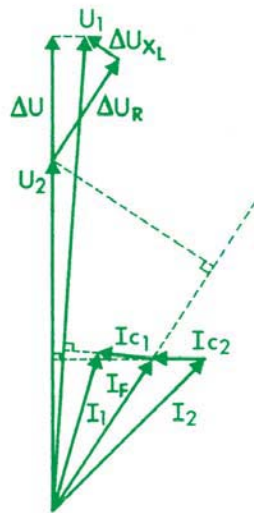


FIGURA 3

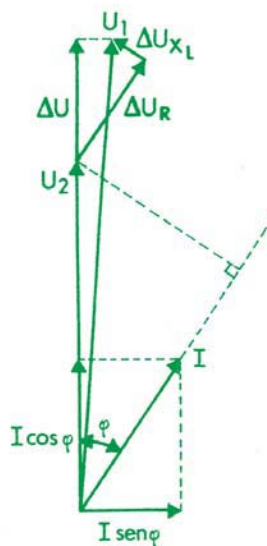


FIGURA 4

Prácticamente las fórmulas que se utilizan para el cálculo de la caída de tensión son las siguientes:

1) Corriente alterna trifásica:

$$\Delta U = \sqrt{3} I L (r \cos \varphi + x \operatorname{sen} \varphi) = \sqrt{3} I (R \cos \varphi + X_L \operatorname{sen} \varphi)$$

$$\Delta U = L \frac{rP + xQ}{U} = \frac{RP + X_L Q}{U}$$

$$\delta U = \frac{\sqrt{3} I L}{U} (r \cos \varphi + x \operatorname{sen} \varphi) = \frac{\sqrt{3} I}{U} (R \cos \varphi + X_L \operatorname{sen} \varphi)$$

$$\delta U = L \frac{rP + xQ}{U^2} = \frac{RP + X_L Q}{U^2}$$



- R = Resistencia total de un conductor
- r = Resistencia por unidad de longitud
- X_L = Reactancia inductiva total de un conductor
- x = Reactancia por unidad de longitud
- L = Longitud de la línea
- P = Potencia activa
- Q = Potencia reactiva
- ΔU = Caída de tensión entre fases
- δU = Caída de tensión porcentual entre fases
- U = Tensión compuesta

1) Corriente alterna monofásica:

$$\Delta U = I(R \cos \varphi + X \sin \varphi)$$

$$\Delta U = \frac{RP + XQ}{U}$$

$$\delta U = \frac{I}{U}(R \cos \varphi + X \sin \varphi)$$

$$\delta U = \frac{RP + XQ}{U}$$

R y X = valores totales para los dos conductores de la línea.

NOTA: En todos nuestros catálogos y CD-ROM, figuran las caídas de tensión en V/A·Km con $\cos \varphi$ 0,8 y 1 - para cada una de las secciones en mm². La resistencia del conductor "R", en ohmios/Km, está referida a 90°C corriente alterna.