



9

**DIELÉCTRICOS**

## 9.1 DIELÉCTRICOS

### 9.1.1 O QUE SÃO OS DIELÉCTRICOS?

Os dielétricos são materiais, geralmente não metálicos, com uma alta resistividade, pelo que a passagem de corrente através deles é muito fraca (corrente de passagem ou de fuga).



Aproveitando esta característica, usam-se como isolantes para bloquear os electrões ou delimitar o caminho que podem tomar.

### 9.1.2 RIGIDEZ DIELÉCTRICA

É o máximo gradiente de potencial que pode suportar um material antes de produzir a sua destruição por disrupção; expressa-se em kV/mm. O seu valor é fortemente influenciado pelas condições de ensaio - mesmo supondo que se consegue um campo perfeitamente uniforme e se estabilizam as propriedades do material eliminando impurezas e efeito da humidade, também se nota a influência do tempo de ensaio. O mecanismo de degradação com tempos de ensaio longos é um fenómeno térmico (aquecimento por perdas dielétricas e correntes de carga), enquanto que para tempos curtos estes fenómenos não influem e estamos perante fenómenos ligados às forças eléctricas presentes.

Em geral a rigidez dielétrica diminui ao aumentar o tempo de ensaio segundo uma lei do tipo hiperbólico.





### 9.1.3 CONSTATNE DIELECTRICA

É a relação entre a carga de um condensador com dielétrico do material considerado e a do mesmo condensador se o dielétrico fosse o vazio.

O fenómeno que se mede corresponde à polarização das partículas que compõem a estrutura do dielétrico. Quanto maior for a separação entre as cargas e o seu valor na molécula maior será a influência que exercem sobre o campo eléctrico e a constante dielétrica.

A energia acumulada num condensador é dada por:

$$W = \frac{1}{2} C V^2 = \frac{1}{2} C_0 \epsilon V^2$$

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



C = capacidade

C<sub>0</sub> = capacidade sendo o dielétrico o vazio

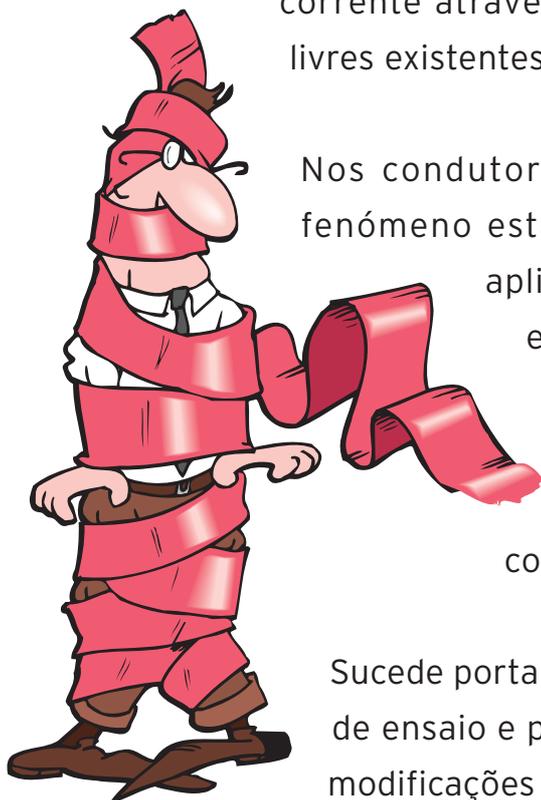
ε = constante dielétrica relativa

## 9.2 CONSTANTES DIELÉCTRICAS DE VÁRIAS SUBSTÂNCIAS

SUBSTÂNCIA	CONDIÇÕES	CONSTANTE DIELÉCTRICA
AR	GÁS, 0° C, 1 ATM	1,00059
ÁGUA	LÍQUIDO, 20° C	80
ÓLEO DE TRANSFORMADOR	LÍQUIDO, 20° C	2,24
QUARTZO	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
PEX	SÓLIDO, 20° C	2,5 - 3

### 9.2.1 RESISTIVIDADE (ISOLANTES)

Quando se submete um dielétrico a uma tensão contínua, a passagem da corrente através dele estabelece-se por meio das poucas cargas livres existentes.



Nos condutores com grande quantidade de cargas livres, o fenómeno estabiliza a valores de resistência (relação tensão aplicada / intensidade de corrente) que variam pouco em intervalos bastante grandes; não sucede o mesmo nos dielétricos, onde a temperatura e as impurezas podem alterar significativamente as cargas livres disponíveis e por consequência a corrente resultante.

Sucedo portanto que a resistividade varia muito com as condições de ensaio e podem ocorrer variações importantes por pequenas modificações da composição do material. Em geral, a resistividade



diminui com o aumento da temperatura e com a humidade (nos óleos).

A resistividade medida com corrente alterna é superior à obtida com corrente contínua, por intervirem outros processos de transferência de cargas.



### 9.2.2 RESISTÊNCIA SUPERFICIAL

Em muitas ocasiões pode passar corrente pela superfície do dieléctrico em lugar de fazê-lo através da massa. Trata-se de um fenómeno diferente da resistividade própria do dieléctrico, e que se mede pela resistência superficial.

Este valor depende da qualidade da superfície e da presença de pó, humidade, etc.. Este fenómeno não é muito importante nos cabos, mas pode ter importância junto aos terminais. É fundamental tê-lo em conta na concepção de isoladores.

### 9.2.3 ABSORÇÃO ELÉCTRICA

Quando se aplica uma tensão a um dieléctrico, para além dos fenómenos de polarização dá-se uma absorção de carga eléctrica que dura um certo tempo e cessa

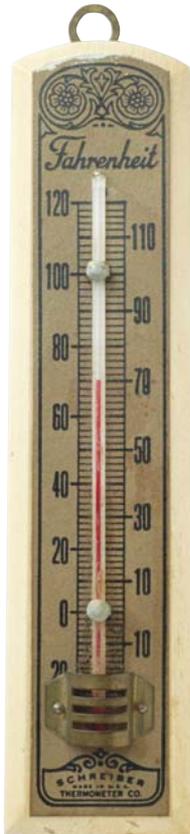
mesmo que se mantenha a tensão. Se se deixar de aplicar tensão e curto-circuitarmos os eléctrodos o dieléctrico perde a carga.

Este fenómeno deve ser tido em conta quando medimos resistências, já que pode afectar os resultados.



## 9.2.4 PERDAS NO DIELECTRICO

Se aplicarmos uma tensão alternada a um dielétrico ocorrem os seguintes fenômenos:



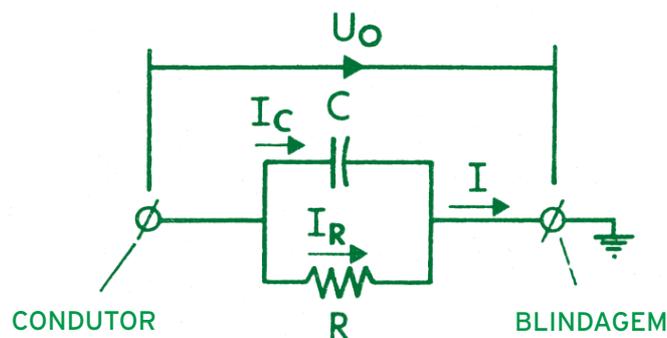
**A)** Circulará uma corrente de acordo com a lei de Ohm. O valor da intensidade dependerá da resistividade do isolante nas condições de operação e a sua passagem produzirá um aquecimento por efeito de Joule.

**B)** Haverá uma corrente de polarização, deslocada de  $\pi/2$  radianos no plano de Gauss em relação à tensão aplicada. A intensidade da corrente dependerá da constante dielétrica do material (que influencia a capacidade do condensador que se forma). Não produz efeitos caloríficos.

**C)** As partículas polares vibrarão seguindo a excitação a que estão submetidas. Este fenômeno produz um efeito térmico no material que traduz o processo energético no seu interior. Este efeito não pode ser separado do referido em a), mas só se manifesta com aplicação de uma tensão alternada.

### ÂNGULO DE PERDAS

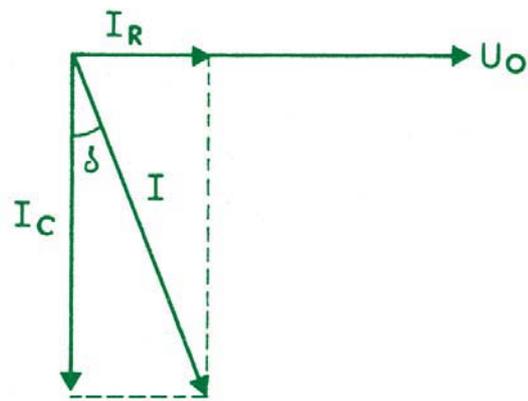
Dado que um cabo não é um condensador ideal, existe uma corrente de fuga  $I_R$  no dielétrico em fase com a tensão  $U_0$



ESQUEMA EQUIVALENTE



## DIAGRAMA VECTORIAL



A corrente real  $I$  no dielétrico forma um ângulo  $\delta$  (de perdas) com a corrente reactiva  $I_C$  desfasada  $90^\circ$  da tensão  $U$ , correspondente a um condensador ideal sem perdas. É expresso por:

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

O ângulo de perdas depende da temperatura, do material e da frequência. A Figura 1 mostra a variação de  $\operatorname{tg} \delta$  com a temperatura para diferentes tipos de isolamento.

### Condutância de isolamento (Perditância)

Define-se a condutância  $G$  como o inverso da resistência de perdas do isolamento.

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

$\omega = 2\pi f$  = Vel. angular

$\epsilon$  = Constante dielétrica relativa

$C_0$  = Capacidade se o dielétrico for o vazio

$\operatorname{tg} \delta$  = Ângulo de perdas

O produto " $\epsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$ " é designado por factor de perdas.

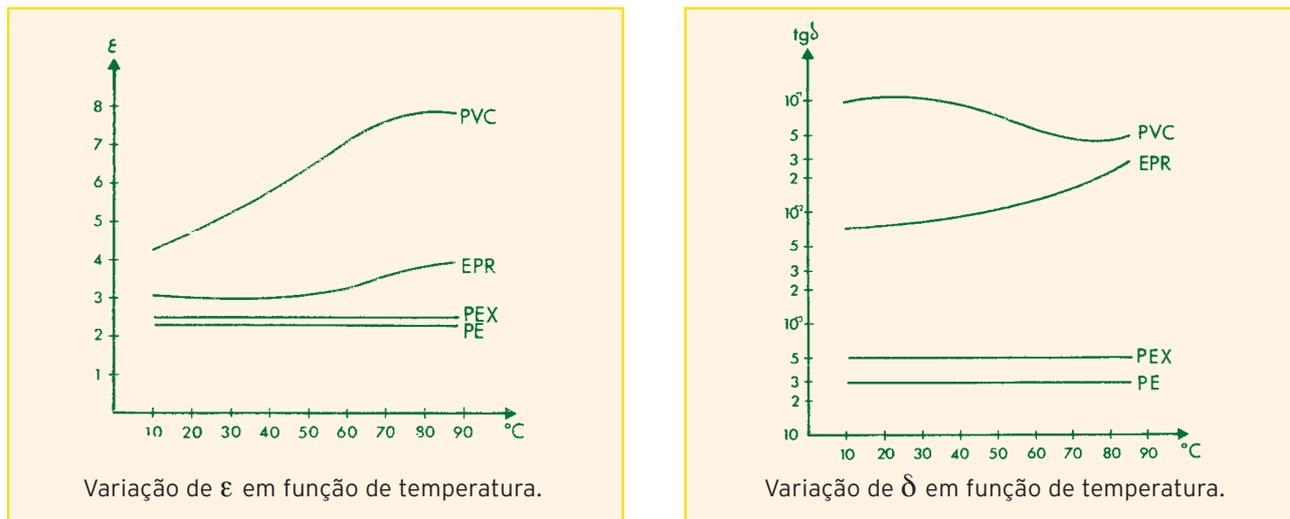


FIGURA 1

As perdas dieléctricas por fase num sistema trifásico são dadas pela fórmula:

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

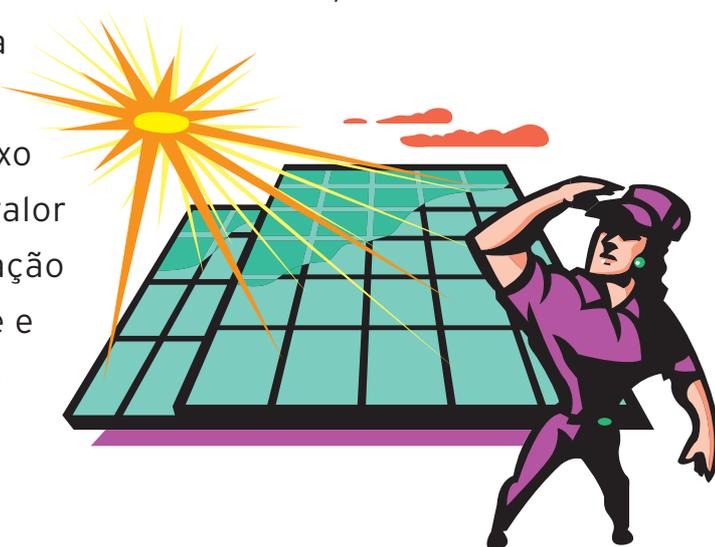
$U_0$  = tensão simples (V)

$C$  = capacidade ( $\mu\text{F/km}$ )

Verifica-se que as perdas dieléctricas são proporcionais à perditância e ao quadrado da tensão simples. Nos cabos de baixa tensão estas perdas são praticamente desprezáveis mas adquirem importância para tensões mais elevadas.

### 9.2.5 FACTOR DE PERDAS

Nos cabos, para dar um indicador da qualidade do isolamento, é habitual medir o valor da tangente  $\operatorname{tg} \delta$ . Este valor dá a relação entre a corrente resistiva e a corrente capacitiva e deve ser o mais baixo e constante possível. Um aumento do valor de  $\operatorname{tg} \delta$  indica possibilidade de deterioração do dieléctrico por passagem de corrente e consequentes efeitos térmicos no seu seio.





## 9.2.6 EFEITO DE CORONA

Se o campo eléctrico num ponto ultrapassa o valor da tensão disruptiva do material, produzir-se-á uma ionização com criação de cargas livres por destruição de moléculas electricamente equilibradas.

Pode suceder que o valor do campo eléctrico só seja suficiente em certos pontos, por concentração do campo devido a um defeito de concepção ou pela presença de inclusões ou vacúolos com um diferente valor de  $\epsilon$  (p. ex., inclusões de ar). Nesse caso a ionização fica limitada no espaço e a descarga é designada descarga parcial.

Existem dieléctricos que resistem bem a níveis elevados de descargas parciais mas outros degradam-se por decomposição mesmo com níveis de descargas baixos (muitos dos isolamentos de cabos secos de MT e AT são sensíveis a estes fenómenos).



## 9.2.7 RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO

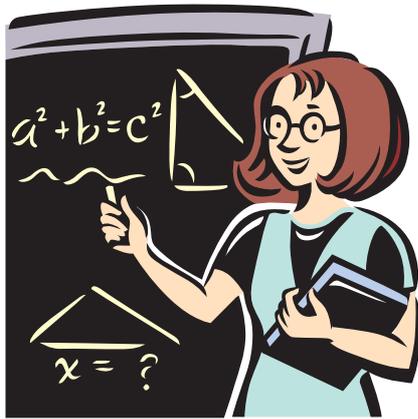
A resistência de isolamento dos cabos mede-se normalmente em  $M\Omega \cdot km$ . Para um mesmo valor de resistividade do dieléctrico a resistência de isolamento é tanto maior quanto maior for a espessura do isolante e menor o diâmetro do condutor.

O valor da resistência de isolamento para cabos monocondutores (secção circular) é:

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

em que:

- $\rho$  = Resistividade volúmica
- $d_1$  = Diâmetro do condutor
- $d_2$  = Diâmetro sobre isolamento (expresso nas mesmas unidades que  $d_1$ )
- $l$  = Comprimento do cabo



A definição de Ki (Constante de Isolamento) pode ser a resistência de isolamento em  $M\Omega$  de um cabo modelo com 1 km de comprimento e uma relação de diâmetros de 10 ( $d_2/d_1 = 10$ ). O valor de Ki depende apenas do material isolante.

$$K_i = 0,367 \cdot \varnothing \cdot 10^{-5} \quad M\Omega.km$$

Assim, pode comparar-se a resistência de isolamento de cabos diferentes calculando os Ki dos mesmos

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

em que R é a resistência de isolamento do cabo ( $M\Omega$ ).

Em consequência se conhecermos o valor de Ki a 20 °C para os isolantes poliméricos mais usuais e aplicando a fórmula anterior podemos prever facilmente a resistência de isolamento em  $M \Omega.km$ .

Tipo de isolante	Valor de Ki a 20°C
PVC	36,7
EPR	3.670
PEX	3.670
PE	50.000
Si (Borr. Silicone)	1.500



## 9.2.8 CAPACIDADE

---

A capacidade de um cabo depende das dimensões do cabo e da constante dielétrica relativa do isolamento.

Nos cabos de campo radial a capacidade pode ser calculada considerando o cabo como um condensador cilíndrico.

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

$\epsilon$  = constante dielétrica relativa

$D$  = diâmetro sobre isolamento

$d$  = diâmetro do condutor, incluindo a camada semi-condutora se existir

## 9.2.9 QUEDAS DE TENSÃO

---

Nas ligações eléctricas, a existência de resistência e reactância origina uma diferença entre as tensões nos extremos do troço considerado, a qual se designa por queda de tensão. O seu valor numérico depende da natureza e intensidade da corrente que atravessa o troço, do comprimento, e das dimensões e disposição dos condutores.

Em ligações de cabos isolados não se toma em consideração, excepto para comprimentos muito longos, a influência da capacidade entre condutores ou à terra, o que não significa que seja desprezável em todas as situações.

Também se ignora a condutância do isolamento (Perditância). Podemos assimilar a linha a um circuito equivalente (Figura 2), em que  $R$  é a resistência da linha,  $X_L$  a sua reactância (indutiva) e se admite que metade da capacidade está concentrada nos extremos.

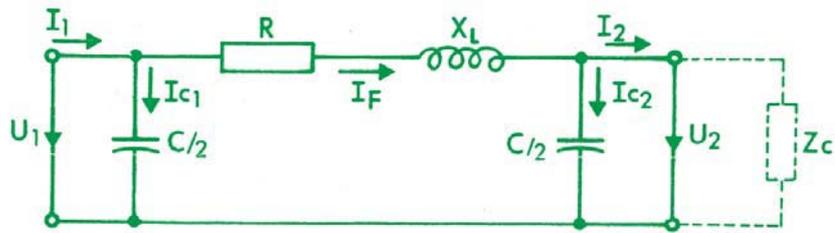


FIGURA 2

O diagrama vectorial equivalente de tensões e correntes é o da Figura 3, ou mais simplesmente o da Figura 4 dado que na prática  $I_{c1}$  e  $I_{c2}$  são bastante inferiores a  $I_1$  e  $I_2$

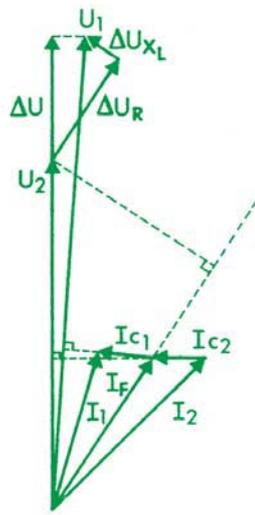


FIGURA 3

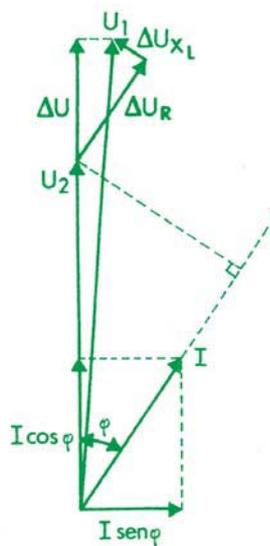


FIGURA 4

Na prática a queda de tensão é calculada pelas fórmulas seguintes:

1) Corrente 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 = Resistência total do condutor
- r = Resistência por unidade de comprimento
- $X_L$  = Reactância total (indutiva) de um condutor
- x = Reactância por unidade de comprimento
- L = Comprimento da ligação
- P = Potência activa
- Q = Potência reactiva
- $\Delta U$  = Queda de tensão entre fases
- $\delta U$  = Queda percentual da tensão entre fases
- U = Tensão composta

Corrente 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, X = valores totais para os dois condutores

NOTA: Nos nossos catálogos técnicos incluímos as quedas de tensão em V / A.km com  $\cos \varphi$  0,8 e 1, para cada uma das secções em mm<sup>2</sup>. A resistência do condutor R, em Ohm / km, está referida a 90 °C c.a..