



Ciência e Tecnologia dos Materiais Elétricos

Aula 6

Prof.^a Clebes André da Silva

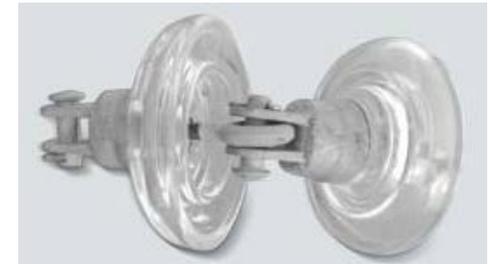
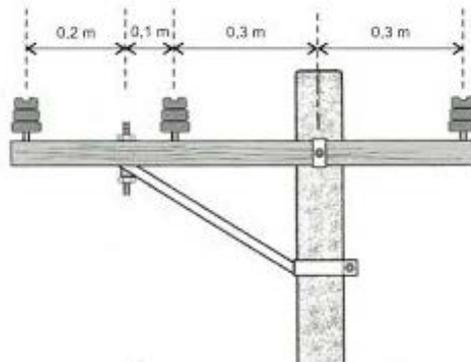
Aula 6

- **Capítulo 7 – Materiais Isolantes**

Materiais Isolantes - Introdução

• Utilização

- Não se deseja transportar carga elétrica
- Separar eletricamente partes energizadas de estruturas de sustentação
 - Exemplos:
Isoladores entre cabos de alta tensão e torre de sustentação



Materiais Isolantes - Introdução

• Utilização

- Manuseio de cargas sem riscos

- Exemplos:

Equipamentos de proteção individual (EPI)

Luvas, botas, capacetes, roupas, cintos



Materiais Isolantes - Introdução

• Utilização

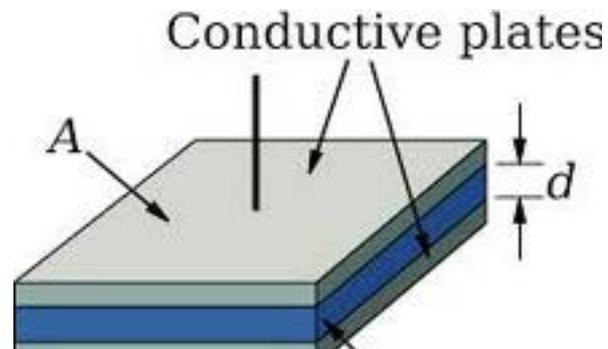
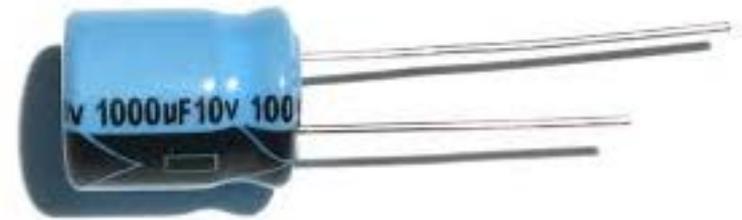
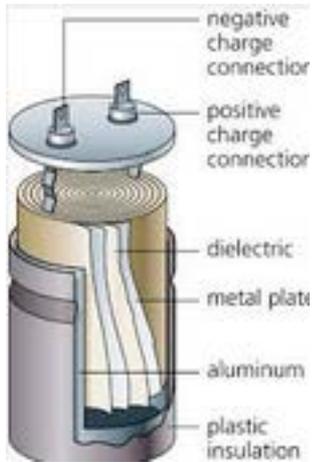
- Manuseio de cargas sem riscos
 - Exemplos:
 - Ferramentas: Alicates, hastes
 - Fitas isolantes
 - Revestimento de cabos



Materiais Isolantes - Introdução

- Utilização

- Armazenamento de campo elétrico



Materiais Isolantes

- Conceitos básicos

Definição

- Material de baixa condutividade elétrica

$$\text{Condutividade } \sigma = 10^{-18} - 10^{-7} \left(\frac{S}{m} \right)$$

$$\text{Resistividade } \rho = 10^7 - 10^{18} \Omega \cdot m$$



$$R = \rho \times L / A$$

ρ = Resistividade

L = Comprimento

A = Área da Secção Transversal

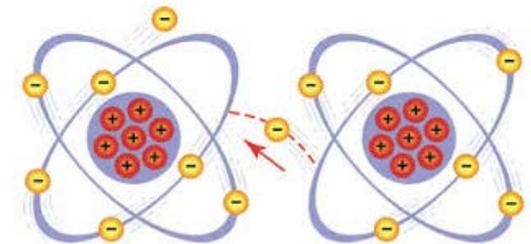
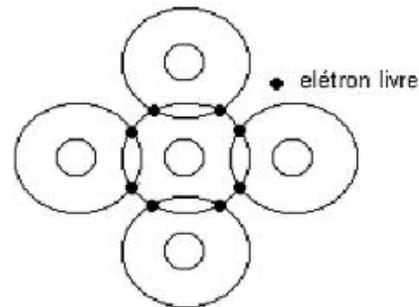
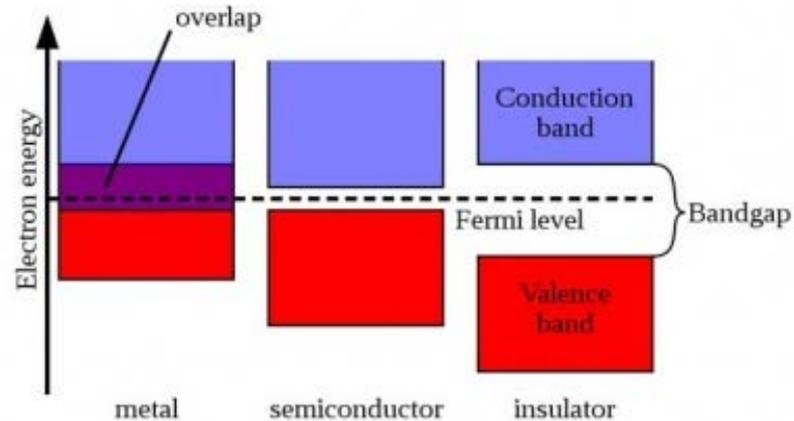
Material	Substância	Condutividade ($\Omega \times m^{-1}$)
Condutores	Prata	$6,8 \times 10^7$
	Cobre	$6,0 \times 10^7$
	Ouro	$4,3 \times 10^7$
	Alumínio	$3,8 \times 10^7$
	Ferro	$1,0 \times 10^7$
	Aço	$0,6 \times 10^7$
	Grafite	$1,7 \times 10^2$
Semi-condutores	Germânio (puro)	2,1
	Silício (puro)	$4,6 \times 10^{-1}$
Isolantes	Vidro	$1,0 \times 10^{-11}$
	Borracha	$1,1 \times 10^{-15}$

Materiais Isolantes

- Conceitos básicos

Definição

- Grande gap entre banda de valência e de condução
 - Bandgap = 6eV
- Poucos elétrons livres → correntes desprezíveis
 - Isolantes 10^6 a 10^7 elétrons livres/cm³
 - Semicondutores 10^{10} a 10^{15} portadores/cm³ (elétrons e lacunas)
 - Condutores 10^{23} elétrons livres/cm³
- Isolamento devido à pequena quantidade de elétrons livres

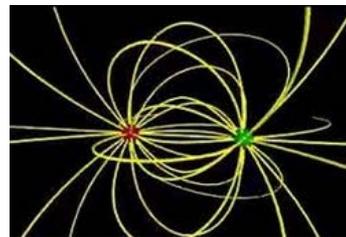
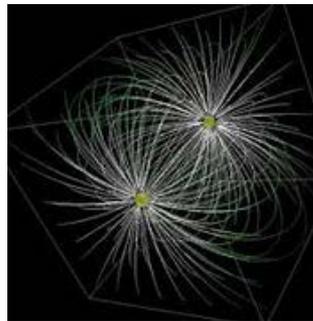
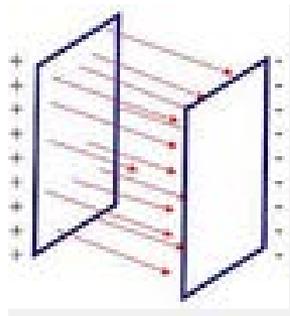


Materiais Isolantes

Conceito de Dielétrico

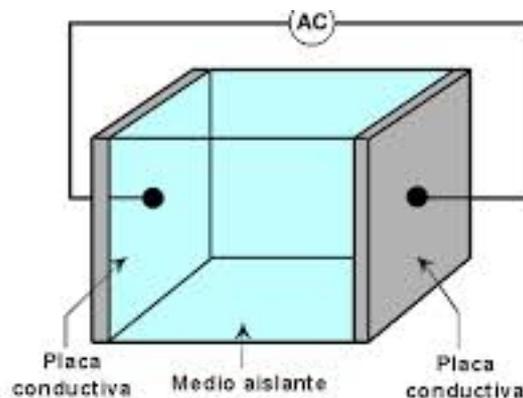
- Material isolante empregado na construção de capacitores
- Armazenamento de campo elétrico

Constante dielétrica relativa



Projeto de capacitores

$$C = \frac{KA}{d}$$



Dielétrico	k
Vácuo	1,00000 (por definição)
Ar	1,00058986 ($\pm 0,0000005$)
Vidro	5 – 10
Borracha	3 – 35
Mica	3 – 6
Papel	4 – 6
Porcelana	6,0
Teflon	2,1
Concreto	4,5
Diamante	5,5 – 10
Sal	3 – 15
Água	88 a 0°C 80,1 a 20°C 55,3 a 100°C

Materiais Isolantes

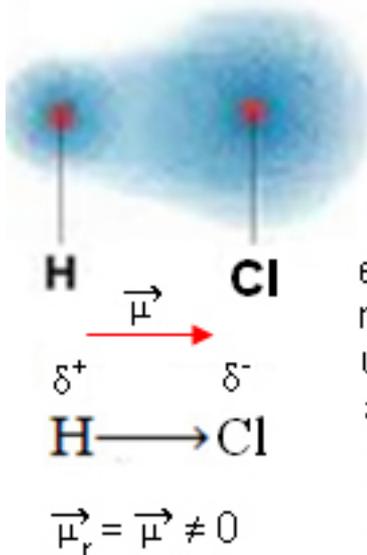
Polarização do dielétrico

Dipolo elétrico:

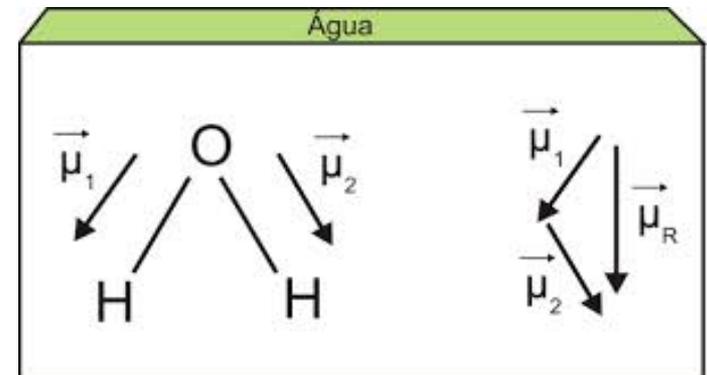
→ Grupo de cargas elétricas em que o “centro de gravidade” das cargas positivas e negativas não são coincidentes.

Molécula polar: cargas deslocadas do centro de gravidade

- Ex.: $HCl = H^+ Cl^-$ Vetor do momento dipolar no sentido de Cl



Em virtude da diferença de eletronegatividade, é formado o momento dipolar $\vec{\mu}$, que é o único, e, por isso, corresponde ao momento dipolar resultante, $\vec{\mu}_r$, que é diferente de zero. Por isso, a molécula é **polar**.

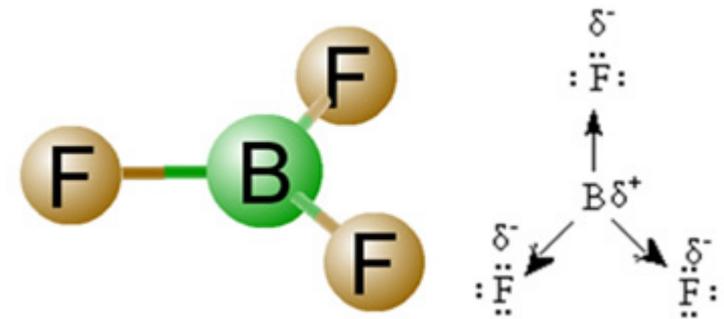
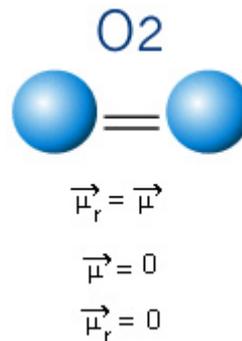
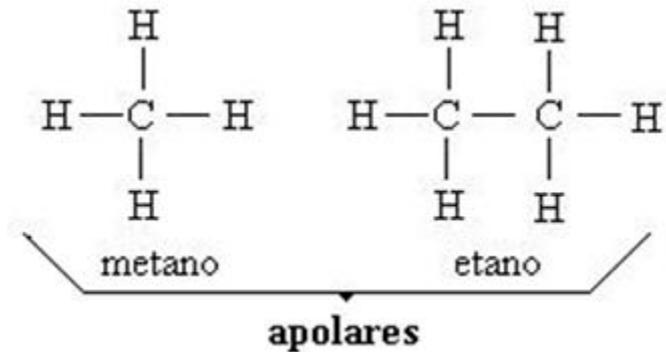
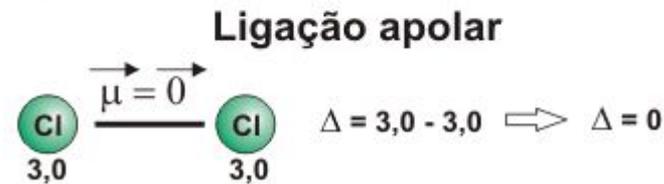


Materiais Isolantes

Polarização do dielétrico

Molécula apolar: cargas coincidentes com o centro de gravidade

- Ex.: BCl_3 Vetor do momento dipolar sem resultante líquido

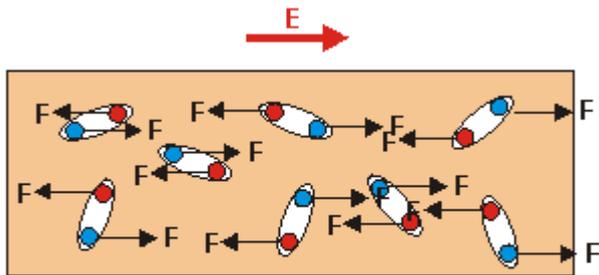


Materiais Isolantes

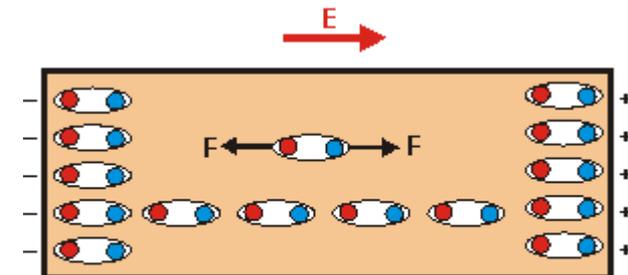
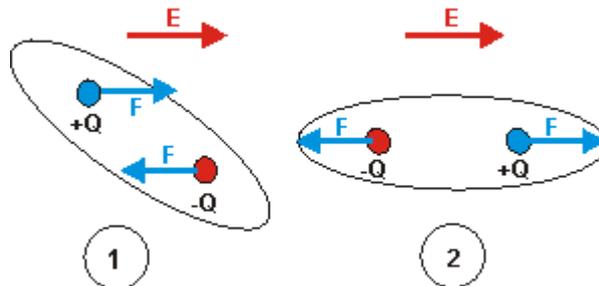
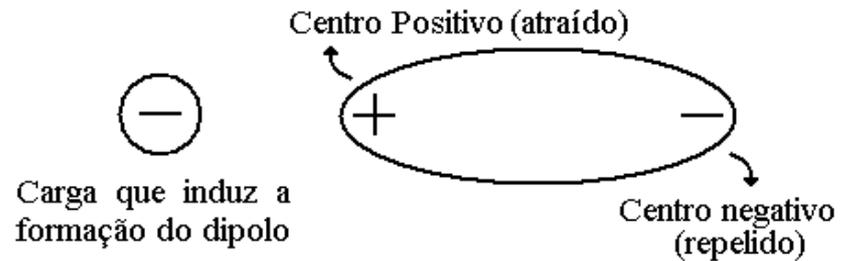
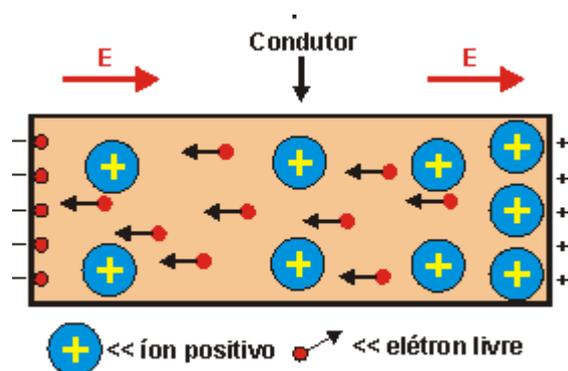
Polarização do dielétrico

Comportamento do dielétrico:

- Tanto a molécula polar como apolar tem o mesmo comportamento (de se polarizarem) perante a um campo elétrico E .



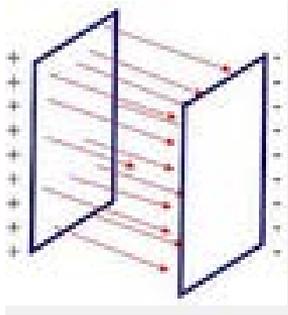
● << elétrons, carga negativa ● << dipolo
● << núcleo, carga positiva



● << elétrons, carga negativa ● << dipolo
● << núcleo, carga positiva

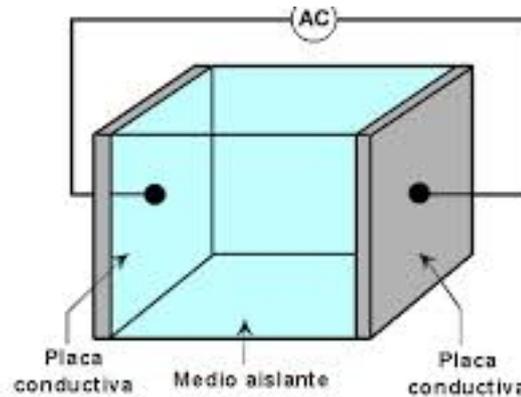
Materiais Isolantes

Polarização do dielétrico



Constante dielétrica relativa

$$C = \frac{KA}{d}$$



- Capacitor:

→ Dois condutores separados por um material dielétrico

- Capacitância:

$$C = \epsilon_o \cdot \frac{A}{\ell}$$

Relacionada com as características geométricas do capacitor

$$\epsilon_o = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

Permissividade do vácuo

ℓ Distância entre as placas

A Área das placas

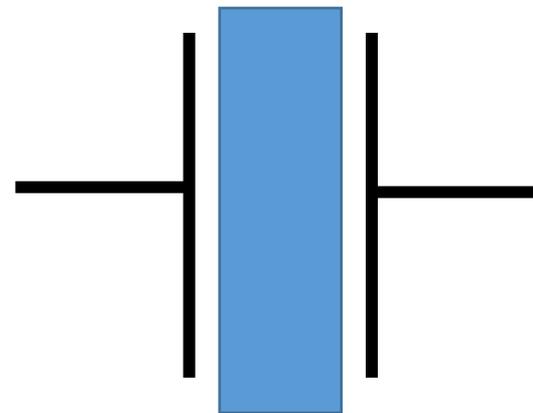
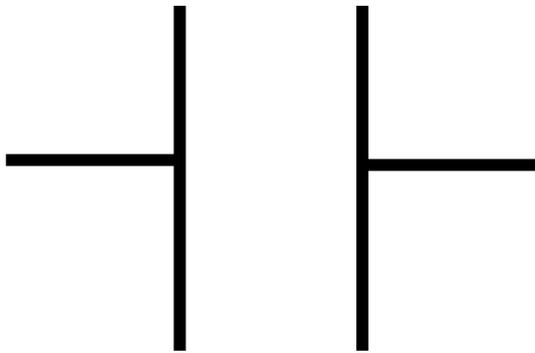
Materiais Isolantes

Polarização do dielétrico

- Capacitância:

→ Se o espaço entre as placas for preenchido com um material isolante, o fenômeno da polarização vai influenciar na capacitância, aumentando-a.

→ A criação de dipolos no isolante absorve energia dos terminais do capacitor, devolvendo-a quando este é descarregado.



Mais energia armazenada

Materiais Isolantes

Polarização do dielétrico

→ A capacitância é aumentada por um fator k (ϵ_r) conhecida como **constante dielétrica relativa do material**.

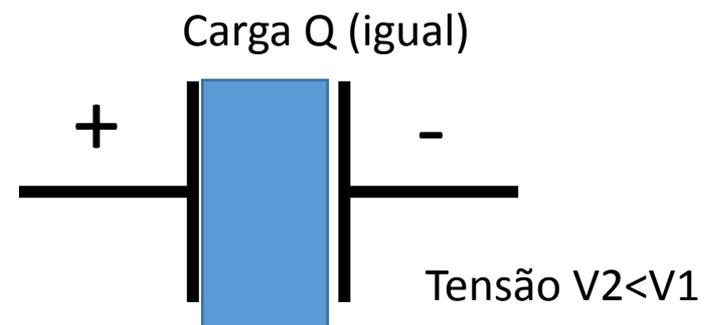
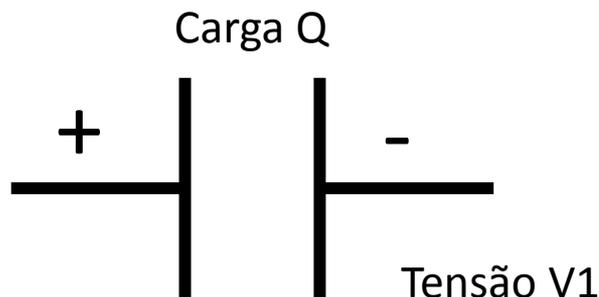
→ O aumento da capacitância tem origem na formação de dipolos (polarização) no dielétrico.

→ Com a formação de dipolos, um campo elétrico contrário ao campo resultante entre as placas é formado.

→ Como a distância d não é modificada, para a mesma carga nas placas, um capacitor com dielétrico possui uma tensão menor:

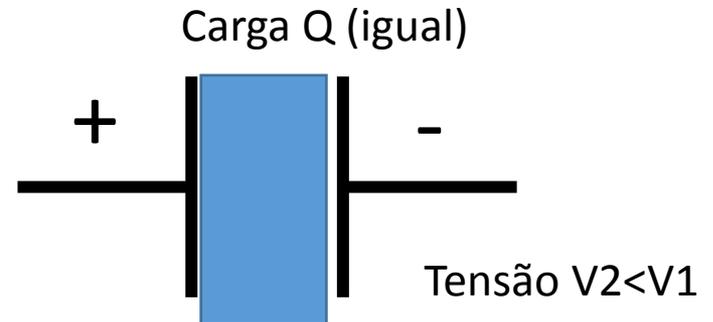
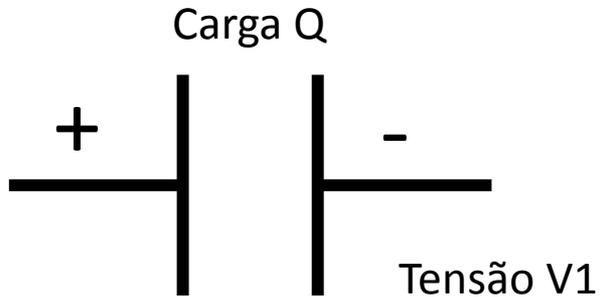
$$V = E' \cdot d$$

Onde $E' = E - E_p$, sendo E_p o campo provocado pelos dipolos do dielétrico.



Materiais Isolantes

Polarização do dielétrico



Para uma carga constante:

- Tensão diminui
- Capacitância aumenta

$$C = \frac{Q}{V}$$

The equation $C = \frac{Q}{V}$ is shown with a blue arrow pointing up next to the letter C and a red arrow pointing down next to the letter V, indicating that capacitance increases and voltage decreases.

Para a mesma carga, temos uma tensão menor com o dielétrico entre as placas, podemos concluir que a capacitância aumenta.

Materiais Isolantes

Polarização do dielétrico

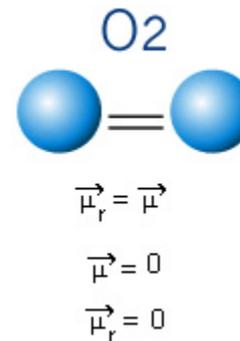
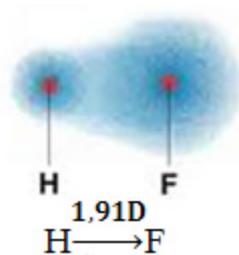
Dipolo: duas cargas opostas ($q+$ e $q-$) separadas por uma distância

O momento dipolar (μ) é a multiplicação entre o valor da carga elétrica parcial (δ), sem o sinal, e a distância (d) entre os dois extremos do dipolo.

$$\mu = \delta \cdot d$$

ou $p = q \cdot d$

Já o momento dipolar resultante é a soma dos vetores de cada ligação polar da molécula.



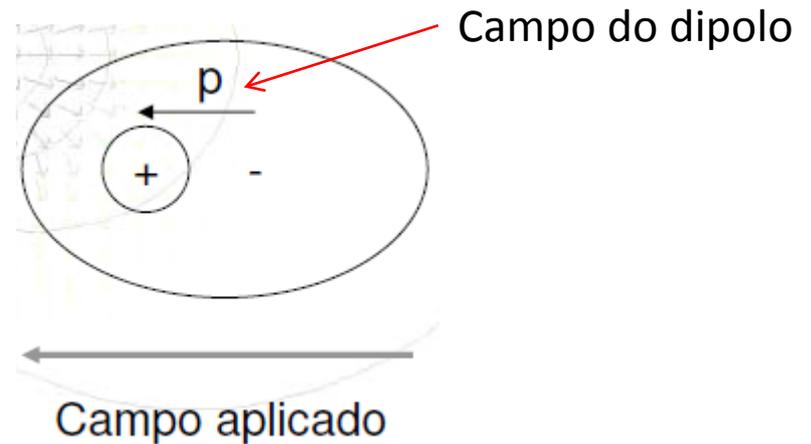
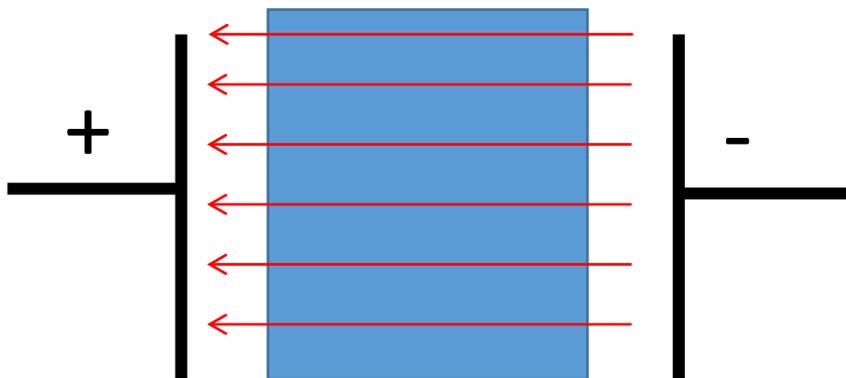
Materiais Isolantes

Polarização do dielétrico

A aplicação de tensão provoca o surgimento de um campo elétrico E no vácuo e a polarização P em um dielétrico.

A soma destes dois efeitos é chamada de deslocamento dielétrico (D).

$$D = \epsilon_0 E + P$$



Materiais Isolantes

Polarização do dielétrico

A polarização elétrica dos materiais não tem origem em uma única fonte.

A polarização total de um material será a soma de todos os tipos presentes:

Tipos de polarização

Polarização Eletrônica: associada ao deslocamento espacial da nuvem eletrônica em torno do núcleo.



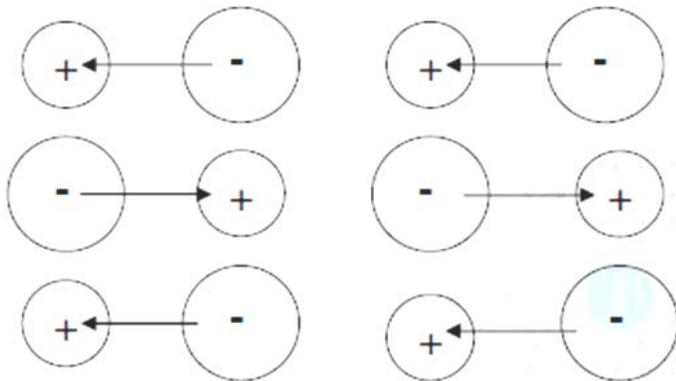
Polarização mais fraca e de reversão rápida.

Materiais Isolantes

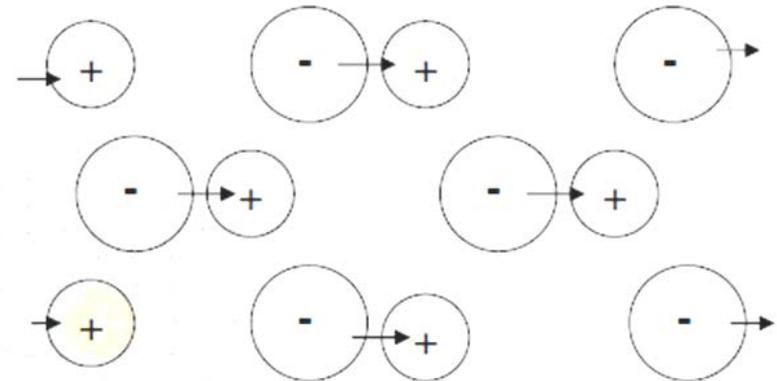
Polarização do dielétrico

Tipos de polarização

Polarização Iônica: Ocorre nos materiais iônicos. Os cátions são separados dos ânions.



Sem campo externo



Campo aplicado

Polarização de maior magnitude que a anterior e de reversão mais lenta.
(envolve massas maiores)

Materiais Isolantes

Polarização do dielétrico

Tipos de polarização

Polarização de Orientação: Ocorre em materiais que possuem dipolos permanentes, resultantes da própria estrutura do material.

→ Possui magnitudes maiores e tende a diminuir com o aumento da temperatura.

Os materiais que possuem polarização mesmo na ausência de campos elétricos externos são chamados de Ferroelétricos.

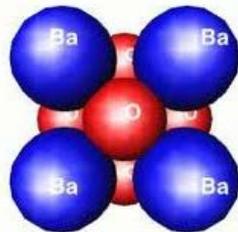
Materiais Isolantes

Materiais Ferroelétricos

Material Ferro elétrico \neq Material Ferro magnético

- Os materiais possuem um ciclo de histerese similar ao ciclo de histerese ferromagnética
- São de estrutura cristalina e são dielétricos, ou seja não conduzem corrente elétrica

Titanato de Bário



Outros exemplos:

- Niobato de Potássio
- Bismutato de Ferro
- Titanato de Chumbo

Materiais Isolantes

Polarização do dielétrico

Tipos de polarização

- Polarização Eletrônica
- Polarização Iônica
- Polarização de Orientação

Polarização total induzida = soma das polarizações eletrônica, iônica e de orientação

$$P = P_e + P_i + P_o$$

A polarização depende da frequência do campo elétrico externo aplicado.

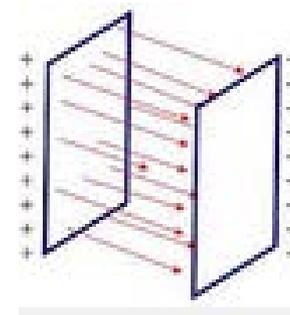
Frequência de relaxação

Cada polarização apresenta tempos típicos para orientação e reorientação

Materiais Isolantes

Funções do capacitor

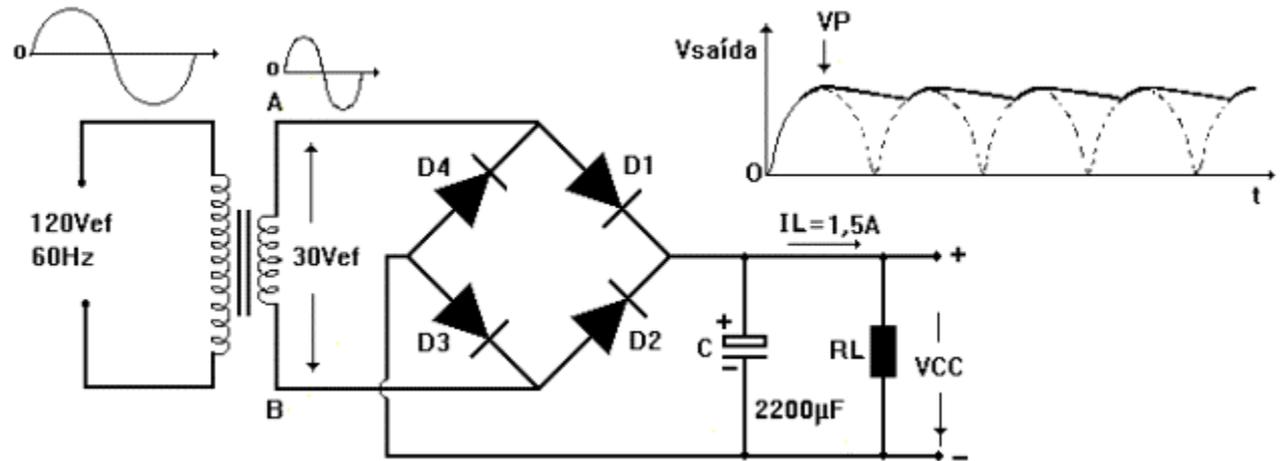
- Função básica: armazenamento de carga
- Funções específicas
 - Retificadores
 - Correção de Fator de Potência
 - Filtros de harmônicos
 - Divisores de tensão
 - Casamento de impedância
- Tipos: plano, cilíndrico, esférico.
- Materiais: cerâmica, tântalo, metálico, papel, alumínio, poliéster.



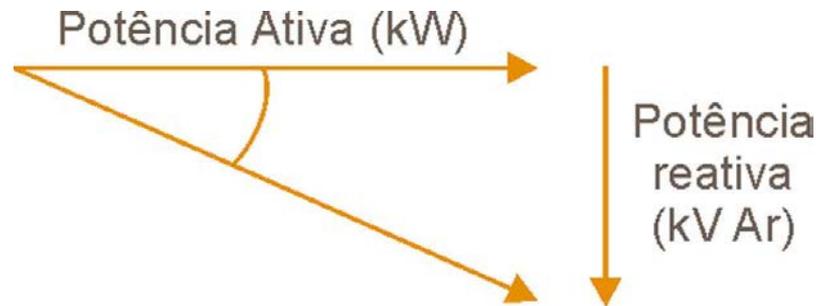
Materiais Isolantes

Funções do capacitor

- Funções específicas
 - Retificadores



- Correção de fator de potência



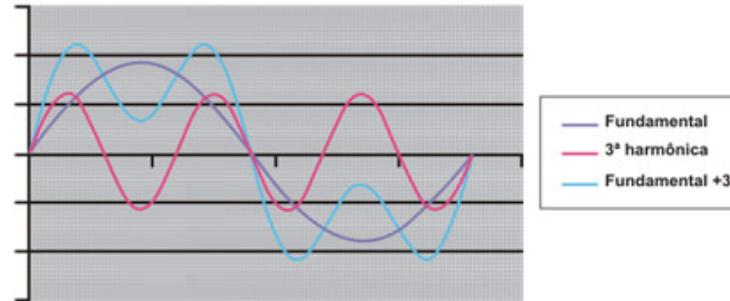
$$FP = \cos \varphi = \frac{kW}{kVA}$$

Materiais Isolantes

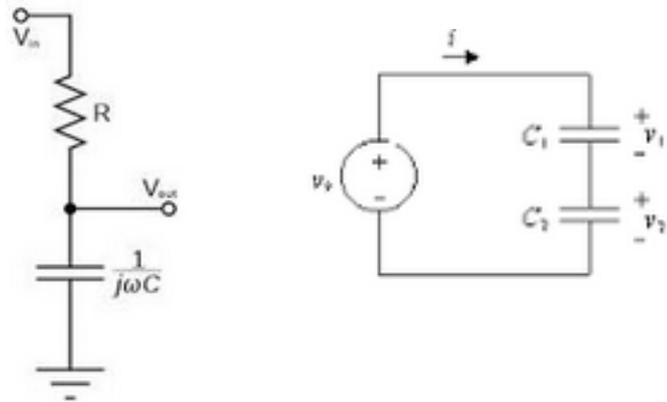
Funções do capacitor

- Funções específicas
 - Filtros de harmônicos

Influência da 3ª harmônica



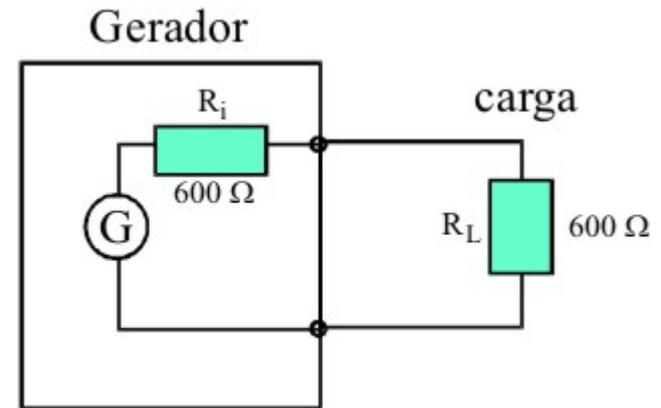
- Divisores de tensão



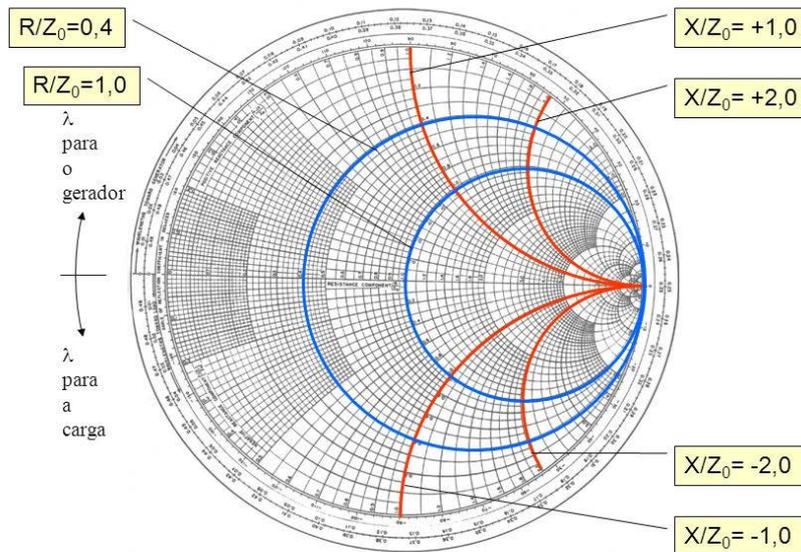
Materiais Isolantes

Funções do capacitor

- Funções específicas
 - Casamento de impedância



Carta de Smith

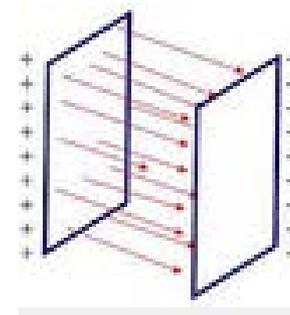


- Plano complexo do coeficiente de reflexão;
- Curvas de resistência e reatância constantes (pontos de impedância);
- Curvas de condutância e susceptância constantes (pontos de admitância);

Materiais Isolantes

Capacitor

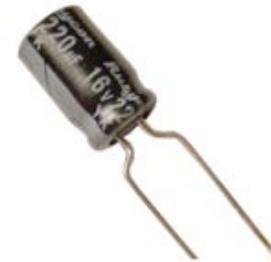
- Tipos: plano, cilíndrico, esférico.
- Materiais: cerâmica, tântalo, metálico, papel, alumínio, poliéster.



cerâmico



poliéster



eletrolítico



tântalo



óleo

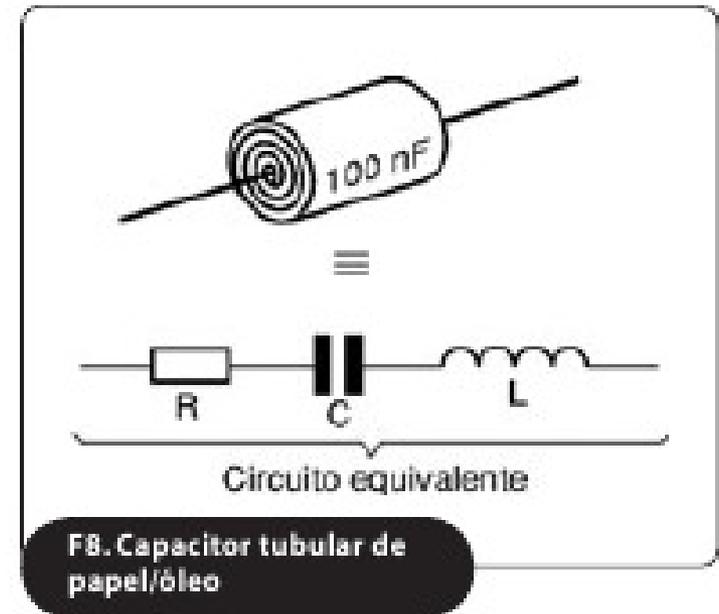
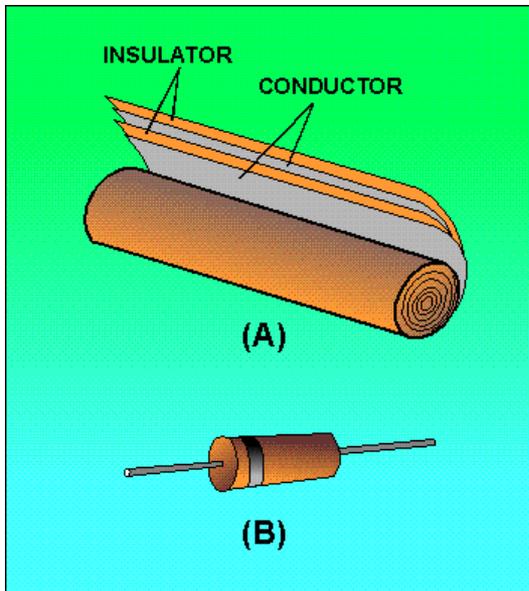


variável

Materiais Isolantes

Capacitor

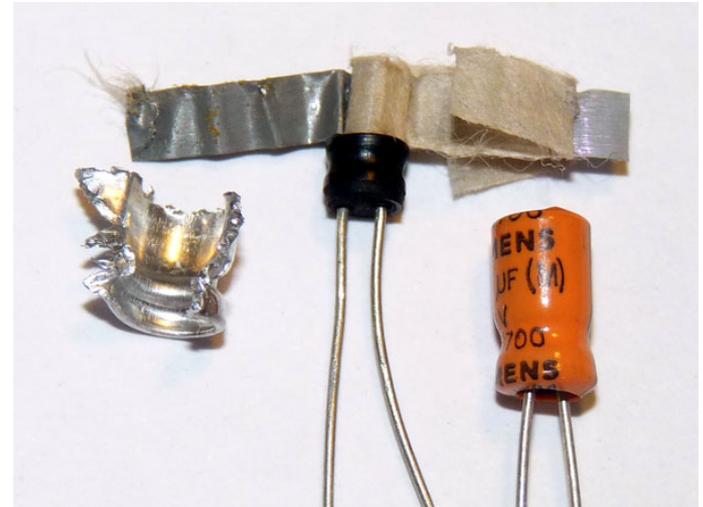
- Tubulares de papel:
 - Modelo antigo
 - Papel se deteriora e passa a apresentar fugas, levando à necessidade de substituição frequente destes componentes.
 - Duas tiras de metal (alumínio) e entre elas uma tira de papel (isolante)



Materiais Isolantes

Capacitor

- Tubulares de papel:
 - Folha de papel seco
 - Folha de papel embebida em óleo



Pelo fato destes capacitores serem enrolados, as armaduras se comportam como uma **bobina**, o que os leva a apresentar uma certa **indutância**.

Isso **impede** que eles sejam usados de forma eficiente em circuitos de **altas frequências**.

Materiais Isolantes

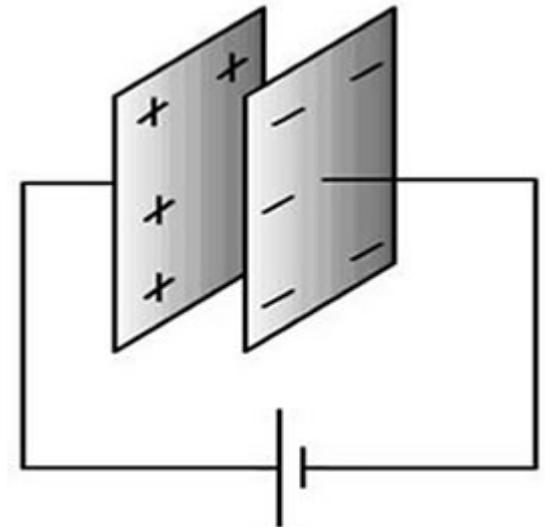
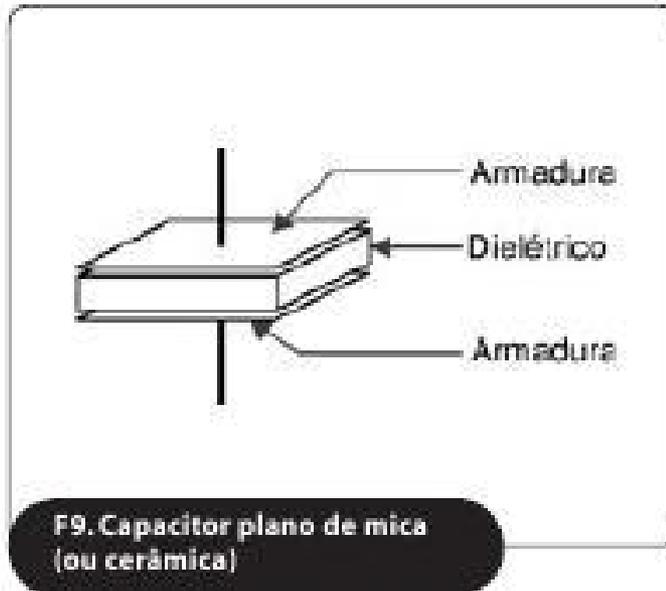
Capacitor

- Capacitores planos

→ Armaduras são planas assim como os dielétricos

→ Materiais: mica e cerâmicos

→ Baixas indutâncias, ideais para aplicações em circuitos de altas frequências



Materiais Isolantes

Capacitor

- Capacitores de poliéster



→ Bastante comum

→ Folhas de alumínio como armaduras e folhas de poliéster entre elas para formar o dielétrico.

→ Capacitores planos ou tubulares

→ As características do poliéster o tornam inapropriado para aplicações em circuitos de altas frequências.

Varição: Poliéster metalizado

→ Armadura é feita pela deposição eletrolítica de uma fina capa de metal sobre o poliéster.

Materiais Isolantes

Capacitor

- Capacitores de mica

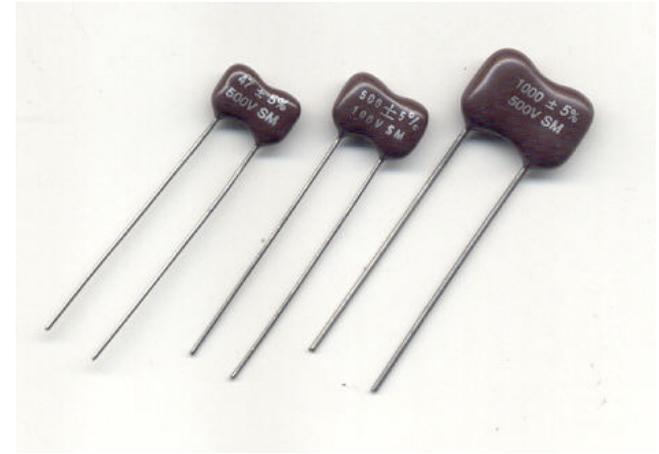
→ Duas placas metálicas são colocadas de modo a haver uma ou mais folhas de mica entre elas, formando o dielétrico.

→ mica não é flexível → construção plana

→ Material muito estável e com propriedades ideais para aplicações em altas frequências

Utilizações:

→ Instrumentação, transmissão e outras aplicações semelhantes



Materiais Isolantes

Capacitor

- Capacitores cerâmicos



→ Mais comuns atualmente

→ O comum é tubular, porém suas características não são indutivas

→ Para se obter maior capacitância podem ser empilhados diversos conjuntos

Construção:

→ Tubo oco de cerâmica sendo, depositadas por meios eletrolíticos uma armadura internamente e outras externamente.

Aplicações:

→ circuitos de corrente contínua até circuitos de frequências muito altas.

Materiais Isolantes

Capacitor

- Capacitores eletrolíticos



→ Camada de óxido de alumínio (eletrolíticos de alumínio) ou óxido de tântalo (para os capacitores de tântalo) numa armadura do mesmo metal.

→ Camada de óxido é muito fina e tem uma **constante dielétrica elevada**, podem ser obtidos **capacitores de valores elevados** ocupando pequeno espaço.

Utilização

→ São mais utilizados em desacoplamento, acoplamento e filtragem de sinais de baixas frequências.

Materiais Isolantes

Rigidez dielétrica

- Capacidade de isolação elétrica do dielétrico (kV/mm)
- Máxima ddp suportada em relação à espessura

Fatores que influenciam:

- Temperatura
- Umidade
- Frequência da corrente alternada
- Tempo de aplicação de tensão

Tabela 1 - Dielétricos mais Comuns

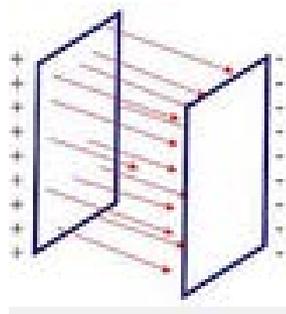
	Material	Rigidez dielétrica (kV/cm)
1	Ar	30 ¹
2	Mica	600
3	Vidros	75 a 300

Materiais Isolantes

Resistividade dielétrica (ângulo de perdas)

Quando uma tensão alternada: $v = V_m \text{sen}(\omega.t)$

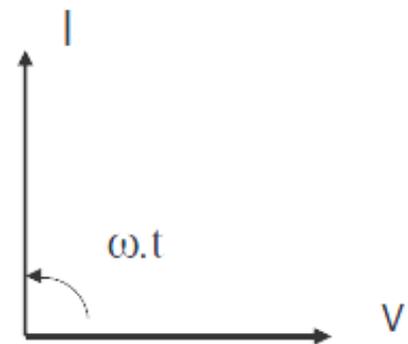
é aplicada entre dois terminais separados por um isolante (capacitor, por exemplo).



A carga resultante é dada por: $Q = C.v = C.V_m.\text{sen}(\omega.t)$

Correspondendo a uma corrente: $I_c = \frac{dQ}{dt} = j.\omega.C.V_o.\cos(\omega.t)$

Onde: $C = \frac{\epsilon_o \epsilon_r . A}{d}$



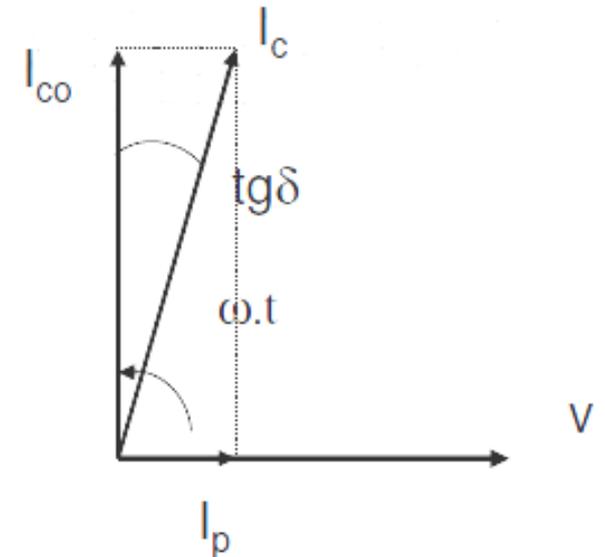
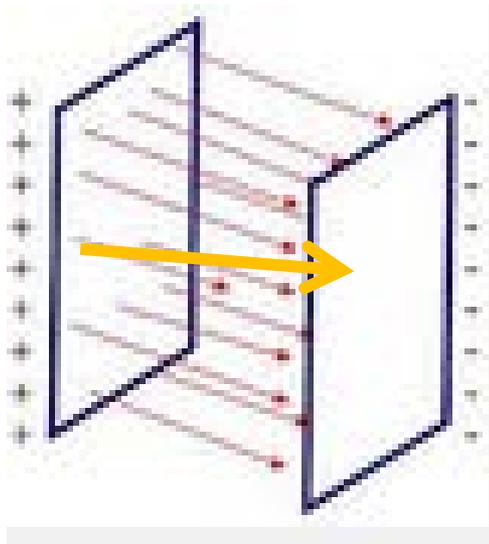
Materiais Isolantes

Resistividade dielétrica (ângulo de perdas)

No entanto se a resistência do isolante não for infinita, se o alinhamento dos dipolos atrasar em relação à variação do campo e se os terminais não forem condutores perfeitos (o que ocorre na prática),

Uma corrente resistiva deverá ser acrescentada para representar esses efeitos de perda (I_p).

O resultado é a alteração do ângulo entre a corrente e a tensão no capacitor.



Materiais Isolantes

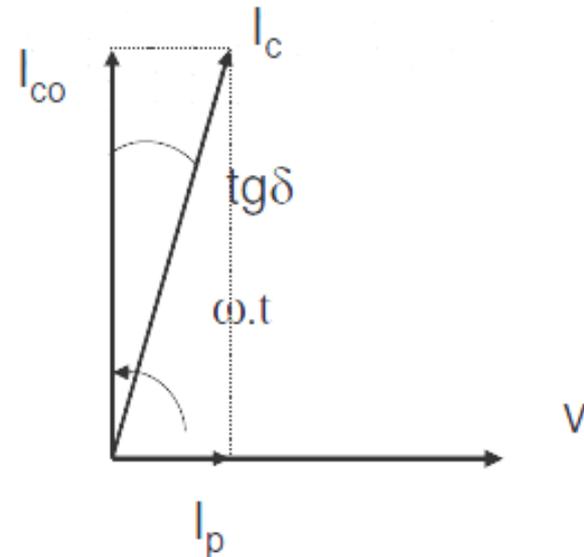
Resistividade dielétrica (ângulo de perdas)

A relação entre a componente resistiva e a componente capacitiva de corrente é conhecido como fator D, fator de perda ou ângulo de perda.

$$D \equiv \operatorname{tg} \delta = \frac{I_p}{I_{co}} = \frac{1}{\omega.R.C}$$

Onde:

$$I = I_{co} + I_p = \left(j\omega C + \frac{1}{R} \right) . V$$



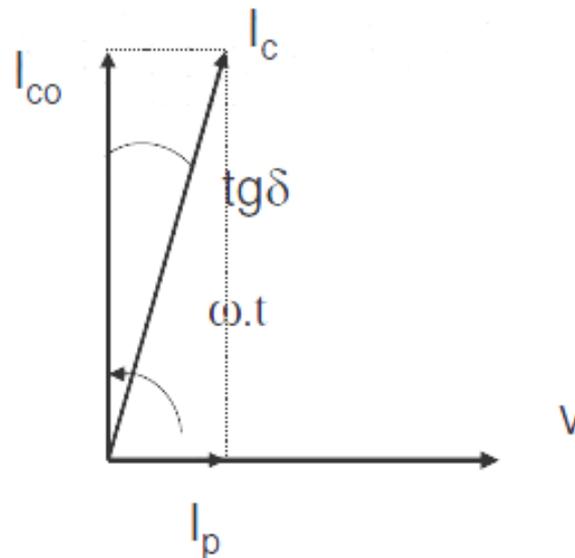
Materiais Isolantes

Resistividade dielétrica (ângulo de perdas)

$$D \equiv \operatorname{tg} \delta = \frac{I_p}{I_{co}} = \frac{1}{\omega \cdot R \cdot C}$$

Ângulo de perdas

Fator de perdas



Quanto menor fator de perdas (D), melhor é o isolante.

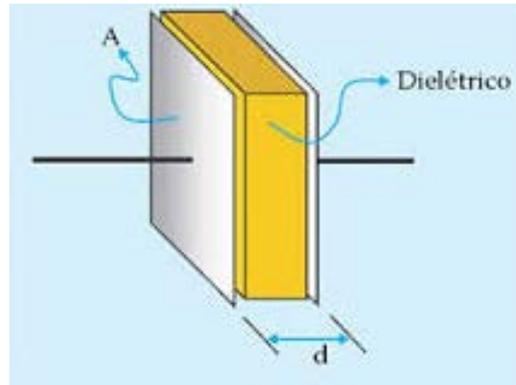
Isolante	$\operatorname{tg} \Delta$	Isolante	$\operatorname{tg} \Delta$
porcelanas	0,0400	papel	0,005
polietileno	0,0002	EPR	0,007
mica	0,0005	PVC	0,060

Tab. 7.2.2: Fator de perdas de alguns materiais
Para a frequência de 1kHz e 25 graus celsius

Materiais Isolantes

Perdas no dielétrico e envelhecimento

→ Ocorrem devido à energia gasta para o estabelecimento do campo no material.



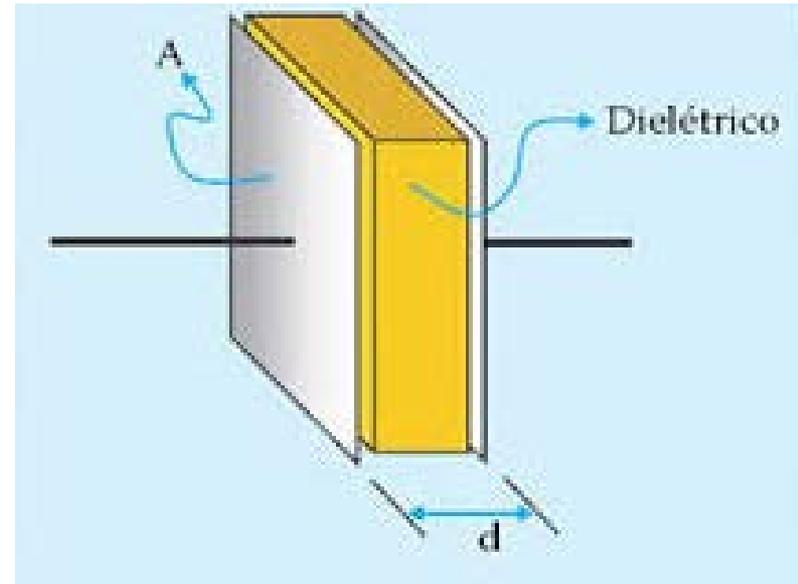
- O dielétrico sólido aumenta a capacitância, porém adiciona perdas.
- Vácuo é ausência de matéria
 - Não ha perdas
 - Único exemplo de dielétrico ideal

Materiais Isolantes

Perdas no dielétrico e envelhecimento

Tipos de perdas no dielétrico:

- 1) Perdas por efeito Joule
- 2) Perda por fuga superficial
- 3) Perda por histerese elétrica
- 4) Perda por absorção dielétrica



Materiais Isolantes

Perdas no dielétrico e envelhecimento

Perdas por efeito Joule:

- Potência dissipada pela passagem de corrente pelo corpo do dielétrico.
- Resistência da ordem de Megaohms
- *** Aquecimento



Perda por fuga superficial:

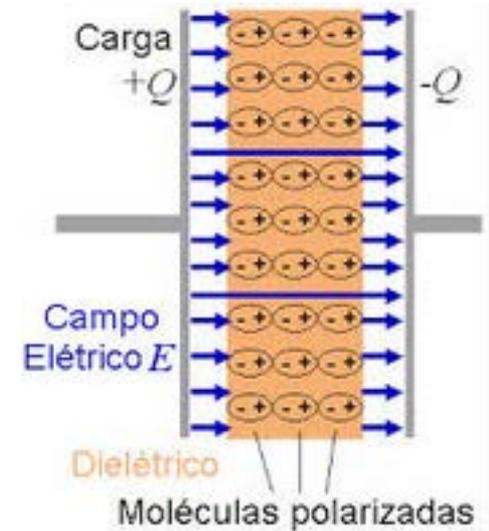
- Potência dissipada pela passagem de corrente pela superfície da estrutura.
- Caminho: Impurezas depositadas, umidade, banda de condução

Materiais Isolantes

Perdas no dielétrico e envelhecimento

Perda por histerese eléctrica:

- Perdas devido ao atraso do dipolo eléctrico em se orientar no sentido do campo eléctrico instantâneo.
- Nem toda energia fornecida é devolvida
 - Com a retirada do campo algumas moléculas não mudam seu alinhamento



Perda por absorção dielétrica:

- Perda pela absorção de cargas pelo dielétrico
 - Retenção de energia da fonte
 - Retenção longa
 - Retenção irreversível (**Material eletreto**)

Materiais Isolantes

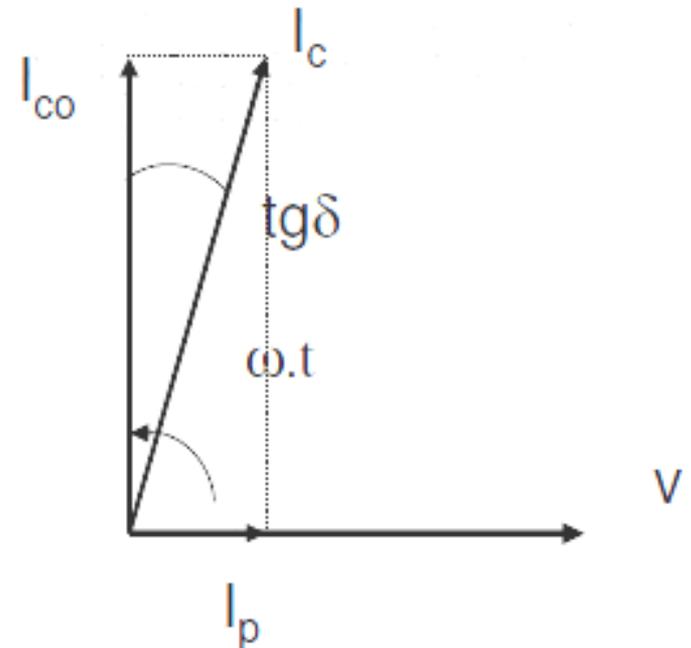
Perdas no dielétrico e envelhecimento

Soma de todas as perdas é representada pelo fator de perdas (D).

Fator de perdas:

- Medida da energia dissipada no dielétrico
- Caracteriza a qualidade do dielétrico

Menor ângulo (D) → melhor isolamento



Materiais Isolantes

Detalhando o Capacitor

- Unidade da capacitância: F – Farad

- 1 Farad é “muita capacitância !”

- Representa um capacitor com uma carga de 1 Coulomb e uma tensão de 1 volt.

- Valores variam de picofarads (10^{-12}) até algumas centenas de milifarads (10^{-3})

• 1 mF (millifarad, um milésimo (10^{-3}) de farad) = 1000 μ F = 1000000 nF

• 1 μ F (microfarad, um milionésimo (10^{-6}) de farad) = 1000 nF = 1000000 pF

• 1 nF (nanofarad, um bilhonésimo (10^{-9}) de farad) = 1000 pF

• 1 pF (picofarad, um trilhonésimo (10^{-12}) de farad)

$$F = \frac{A \cdot s}{V} = \frac{J}{V^2} = \frac{W \cdot s}{V^2} = \frac{C}{V} = \frac{C^2}{J} = \frac{C^2}{N \cdot m} = \frac{s^2 \cdot C^2}{m^2 \cdot kg} = \frac{s^4 \cdot A^2}{m^2 \cdot kg} = \frac{s}{\Omega} = \frac{s^2}{H}$$



Materiais Isolantes

Detalhando o Capacitor

Especificações:

- Tipo do dielétrico empregado:
 - Vácuo, ar, seda, cerâmica, mica, óxido de alumínio, óleo, papel impregnado ou não, óxido de tântalo, fibra de vidro, poliéster, poliéster metalizado, mylar.
- Natureza:
 - Fixos: valor nominal do fabricante.
 - Variáveis: faixa de variação por variação da distância ou área das placas.
- Forma:
 - Placas paralelas, tubulares, cilíndricas
 - Pastilha
 - Discos



Materiais Isolantes

Detalhando o Capacitor

Especificações:

- Polarização:

- Não polarizados (mica, cerâmico, poliéster)

- Polarizados (eletrolíticos): pólo positivo e pólo negativo → Explodem se ligar invertido

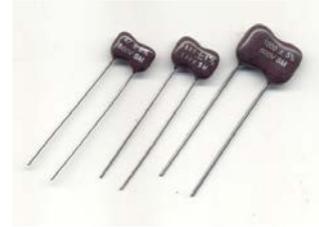
- Tensão máxima de trabalho:

- Valor máximo da tensão eficaz.

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v^2(t) dt}$$

→ Exceder a tensão do capacitor pode furar o dielétrico e carbonizá-lo.

→ Em capacitores com dielétrico a ar, o rompimento da rigidez dielétrica não o inutiliza.



Materiais Isolantes

Detalhando o Capacitor

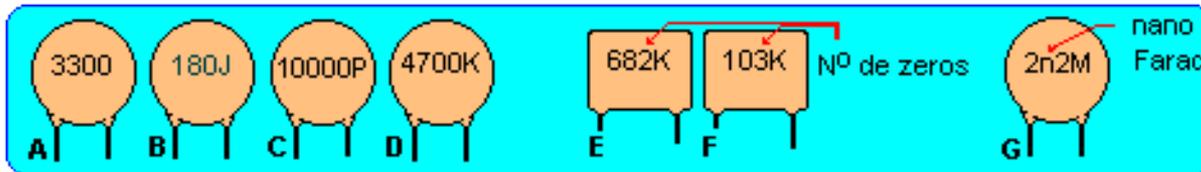
Especificações:

- Tolerância

- Diferentes números de camadas e materiais geram variações
- Diferentes graus de estabilidade e precisão do produto final

→ Maiores cuidados tecnológicos reduzem as tolerâncias

→ Aumenta o preço \$\$\$



Capacitância, tolerância e tensão máxima podem vir no corpo do capacitor

Exemplo: 0.01nF / 5% / 600V

Ou através do código de cores:

3 primeiras cores

Até 10pF	Código	Acima de 10pF
$\pm 0,1\text{pF}$	B	
$\pm 0,25\text{pF}$	C	
$\pm 0,5\text{pF}$	D	
$\pm 1,0\text{pF}$	F	$\pm 1\%$
	G	$\pm 2\%$
	H	$\pm 3\%$
	J	$\pm 5\%$
	K	$\pm 10\%$
	M	$\pm 20\%$
	S	-50% -20%
	Z	+80% -20% ou +100% -20%
	P	+100% -0%

Materiais Isolantes

Detalhando o Capacitor

Especificações:

Capacitância, tolerância e tensão máxima podem vir no corpo do capacitor

Exemplo: 0.01nF / 5% / 600V



Ou através do código de cores:

3 primeiras cores → Valor da capacitância

Quarta cor → Tolerância

Quinta cor → Tensão máxima

OE Código de Cores para Capacitores Poliéster. **OE**

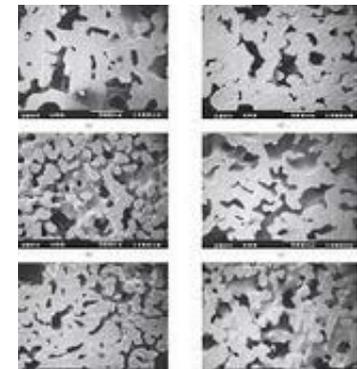
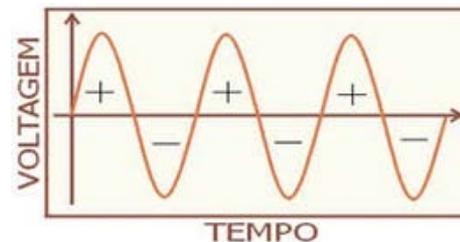
1ª Faixa	2ª Faixa	3ª Faixa	4ª Faixa	5ª Faixa
-	0	x1	10%	250v
1	1	x10	20%	400v
2	2	x100		630v
3	3	x1000		
4	4			
5	5			
6	6			
7	7			
8	8			
9	9			

OE ARCOMPTEL N° de Zeros

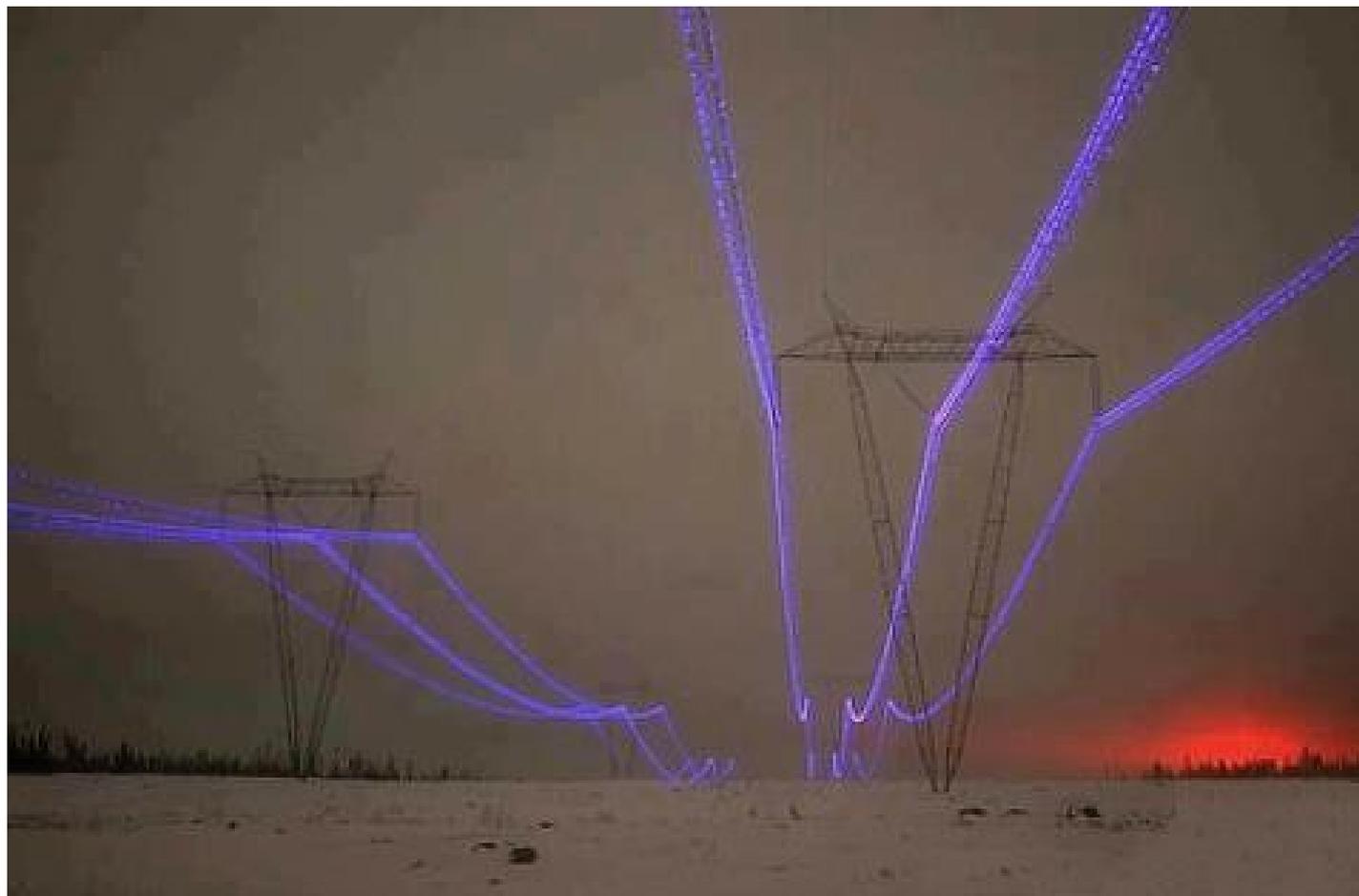
Materiais Isolantes

Fatores de envelhecimento em materiais isolantes

- Incidência de energia solar (raios UV)
- Calor
- Salinidade
- Gases agressivos
- Porosidade
- Frequência da rede
- Regime de trabalho impróprio
- Impulsos de tensão



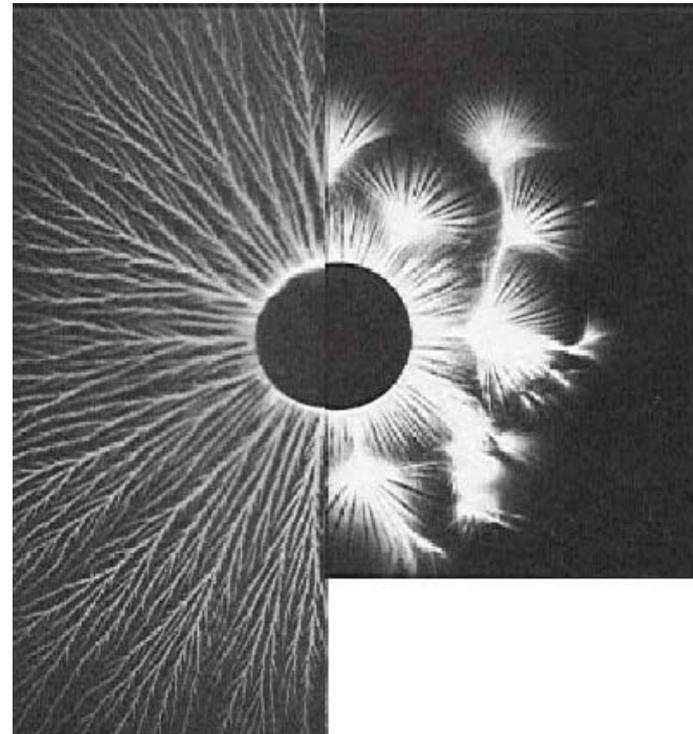
Efeito Corona



Materiais Isolantes

Efeito Corona

- Ionização de ar devido a campos elétricos muito intensos
- A aceleração dos íons pelo campo provoca um efeito de avalanche, ampliando a formação da corrente entre os eletrodos.

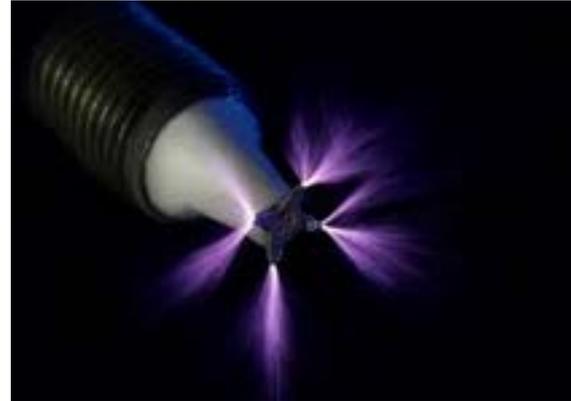


Materiais Isolantes

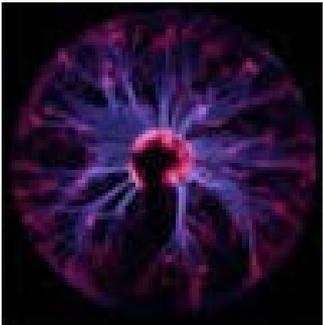
Efeito Corona

Efeitos:

- Emissão de ruído, emissões luminosas
- Interferências em ondas de rádio e TV
- Vibrações nos condutores
- Formação de ozônio



Precauções: dimensionamento adequado de chaves, barramentos, raios de curvatura dos cabos em ferragens de torres de sustentação.



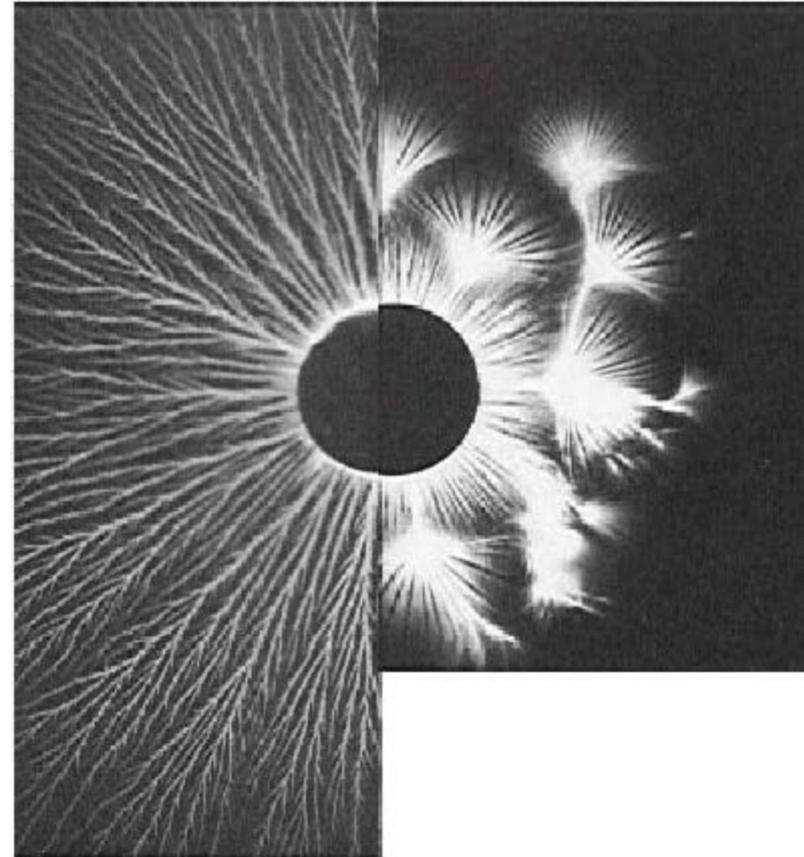
Materiais Isolantes

Efeito Corona

Tipos

Positivo:

- Uma nuvem de íons positivos é formada em torno do eletrodo atuando como uma extensão do mesmo.



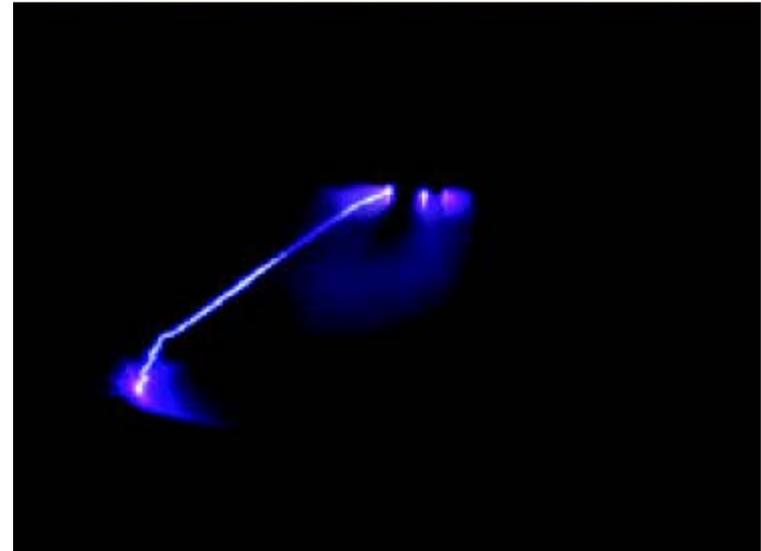
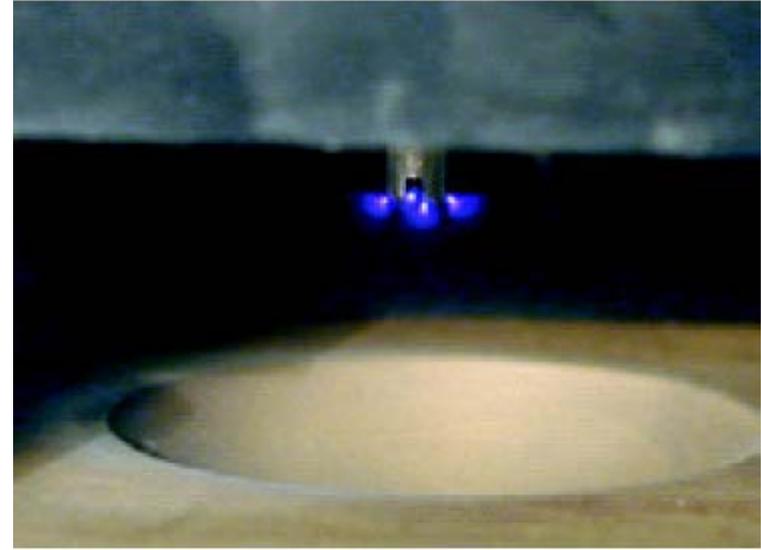
Materiais Isolantes

Efeito Corona

Tipos

Negativo:

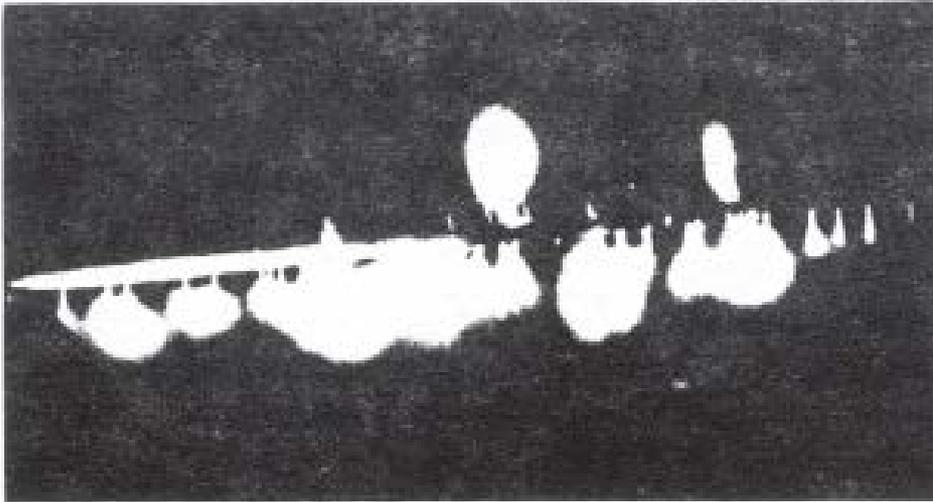
- Ocorre quando, no limiar do gradiente de potencial grupos elétrons saem do catodo produzindo pulsos de avalanches.
- As descargas estendem-se do catodo até um ponto onde a ionização torna-se fraca.
- Além desse ponto, os elétrons são capturados pelas moléculas, que seguem mais lentamente ao anodo.



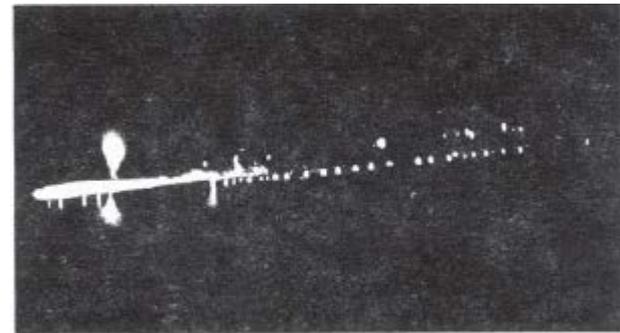
Materiais Isolantes

Efeito Corona em linhas de transmissão CA

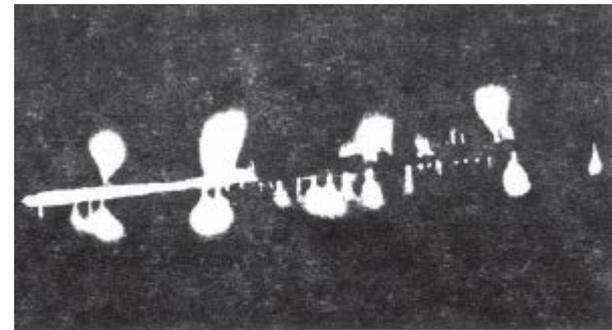
- Em linhas de transmissão CA podem ocorrer efeitos corona positivos, negativos ou ambos, alternadamente, dependendo das condições geométricas existentes. (formato, distância)



A. Both half cycles



B. Negative half cycle



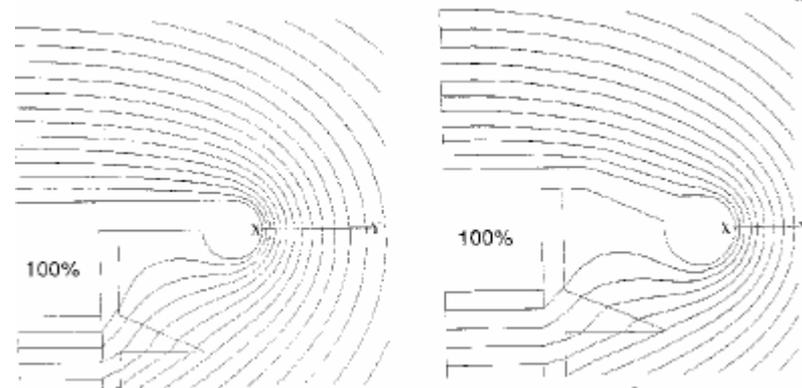
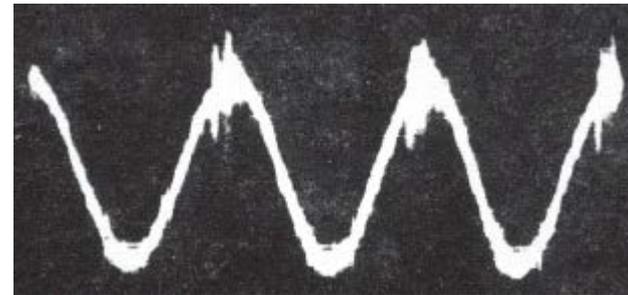
C. Positive half cycle

Materiais Isolantes

Efeito Corona

Considerações sobre a construção de isoladores

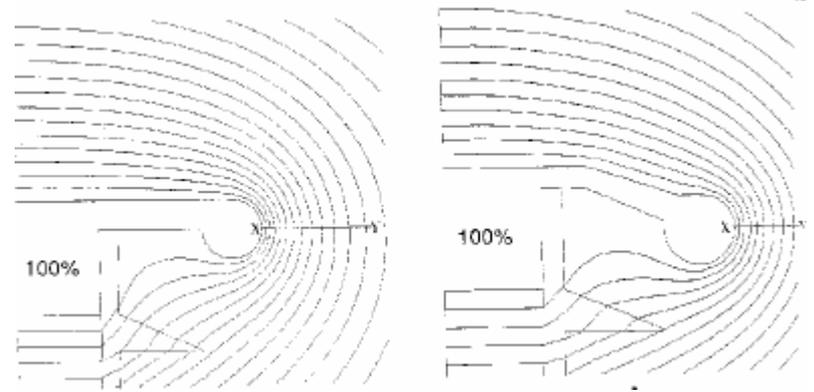
- Efeito corona pode ocorrer em linhas, isoladores ou ambientes controlados (usado em processos de fabricação).
- **Isoladores** são fabricados em formatos que minimizem o gradiente de potencial no ar em sua volta para evitar o efeito corona.



Materiais Isolantes

Isoladores

- Apreciável característica dielétrica
- Ótimas características mecânicas
- Suportar altas tensões mecânicas de compressão
- Ser duro
- Superfície altamente polida
- Contornos físicos que combatam o acúmulo de cargas
 - Poder das pontas



Principais materiais

- Porcelana e vidro



Materiais Isolantes

Eletretos

- Material dielétrico
- Capaz de manter sua polarização dielétrica por um longo período (tipicamente, 20 anos), sem que seja observada uma perda apreciável de carga.
- Usados como transdutor em diversas aplicações:
 - Microfone
 - Detectores de ultra-som
 - Xerografia
 - Dosimetria
 - Dispositivos eletrônicos



Materiais Isolantes

Piezoelectricidade

- Material dielétrico
- Quando sofrem esforços mecânicos → geram polarização
 - Tração
 - Compressão
 - Torção
- Fenômeno reversível
- Quando submetido a campos magnéticos → Deformam elasticamente

Aplicações:

- Sensores eletromecânicos :
 - Osciladores de cristal
 - Medidores de pressão
 - Balanças
 - Toca discos
 - Acelerômetros
 - Fone auriculáres

Materiais Isolantes

Isolamento de fio e cabos condutores

- Classificação

- **Isolamento estratificado**

- Camadas isolantes impregnadas
 - Isolação acima de 1000V

- Exemplos:**

- Papel impregnado com óleo (com ou sem pressão)
 - Papel com espaços ocupados por gás sob pressão

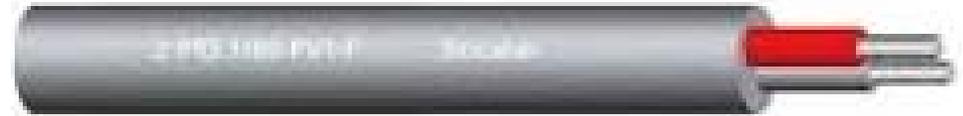
- **Isolamento sólido**

- Termoplásticos

- Mudam de estado com a temperatura (derretem)
 - Exemplos: poliestireno, polietileno, PVC, borracha, etileno, propileno, nylon.
 - Plástico da impressora 3D

- Termofixos

- Carbonizam-se quando queimados
 - Mais caros e mais resistentes
 - Quebradiços ao longo do tempo



Materiais Isolantes

Isolamento de cabos

A capa protetora externa dos fios pode ser de:

→ PVC

- Usado em BT e AT
- Normalmente cor preta

→ Chumbo

- Proteção contra umidade



A capa externa protege contra agentes:

- Químicos
- Petroquímicos
- Microorganismos
- Raios solares
- Água doce
- Água salgada

Materiais Isolantes

A capa de cabos de alta tensão possui proteção suplementar para aumentar a rigidez dielétrica devido aos altos campos elétricos.

→ Proteção contra perdas por efeito corona

Fabricantes de isolamento se esforçam para tornar os cabos resistentes a:

- Perdas dielétricas
- Perdas por Efeito Corona
- Altas temperaturas
- Abrasão
- Ação de solventes
- Inflamabilidade (isolamento anti-chama)
- Umidade
- Fungos



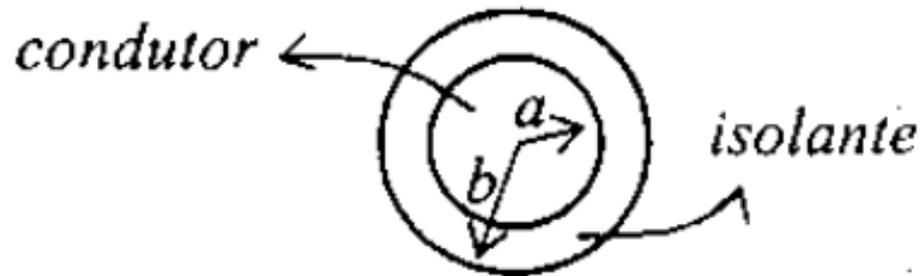
Materiais Isolantes

Dimensionamento da espessura do isolamento de cabos



Condição:

→ Campo elétrico na superfície do isolamento seja nulo



Variáveis:

a (mm) – raio do condutor

b (mm) – raio total do fio

V_{max} (V) – tensão máxima de trabalho no fio

E_d (V/mm) – rigidez dielétrica do material isolante

$$(b - a) = a \left(e^{\frac{V_{\max}}{a E_d}} - 1 \right)$$

Materiais Isolantes

Materiais dielétricos

Gases:

- Ar, SF_6 → disjuntores, cabos subterrâneos, chaves.



Fibras naturais:

- Papéis (kraft, presspan, papelão).
- Algodão (cadarços, fios).
- Madeira (suportes, calços)



Cerâmicas:

- Isoladores de AT e BT
- Porcelana
- Óxido de alumínio
- Titanato de bário



Materiais Isolantes

Materiais dielétricos

Resinas plásticas:

- Epoxi (encapsulamento de bobinas)
- Poliéster
- Polietileno
- PVC
- Teflon
- Araudite (cola)
- Tecnil



Materiais Isolantes

Materiais dielétricos

Dielétricos líquidos:

→ Isolação e refrigeração

- Óleo mineral (A e B)
 - Hidrocarbonetos
- Fluido de silicone
 - Silicatos
- Óleo vegetal
 - Triacilglicerídeos (soja, girassol, mamona)



SeisStocks



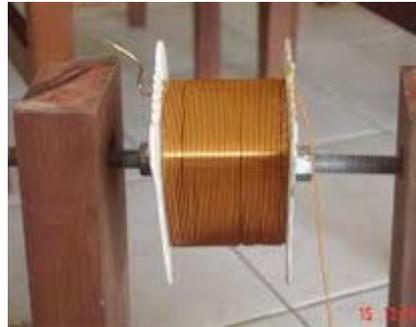
Materiais Isolantes

Materiais dielétricos

Tintas e vernizes:

→ Esmaltação de fios e cabos, isolação de laminados ferromagnéticos.

- Alkatex
- Formex
- Permafil



Mica:

→ Dielétrico de capacitores, transistores, dissipadores térmicos

- Alta rigidez dielétrica e baixo fator de perdas



Materiais Isolantes

Materiais dielétricos

Borrachas sintéticas:

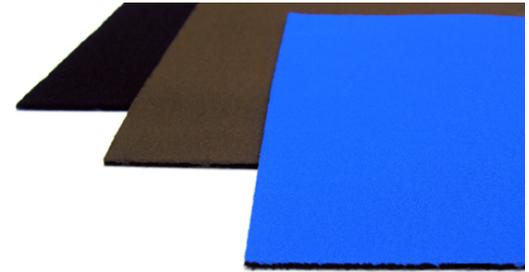
→ Isolação de cabos, partes energizadas em geral: boa elasticidade.

- Neoprene
- EPR
- Borracha butílica

Vidro

→ Elevada estabilidade, não higroscópico

- Isoladores de alta tensão
- Fibras de vidro substituindo papel



Questões

- 1) O que são dielétricos polares e não polares? Como ocorre a polarização de materiais dielétricos?
- 2) Conceitue rigidez dielétrica, Efeito Corona e permissividade dielétrica.
- 3) O que é a propriedade capacitância? O que é um capacitor? Quais as vantagens do uso de meios dielétricos sólidos nos capacitores? Como se processa o aumento da capacitância com o uso de dielétricos sólidos?
- 4) Quais são os tipos de perdas nos dielétricos? O que é fator de perdas?
- 5) Como são classificados os capacitores?
- 6) Comente sobre isoladores, eletretos e piezoeletricidade.