

Disciplina de Materiais Elétricos

Mauro Hemerly Gazzani

mauro.hemerly@gmail.com

Universidade Estadual de Minas Gerais
Câmpus de Ituiutaba

Ituiutaba, 1º Semestre de 2018

<https://goo.gl/LnSZRi>

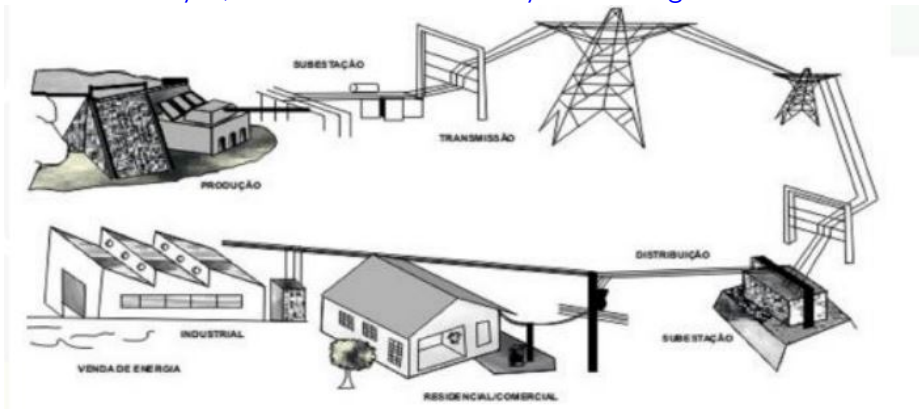
<https://github.com/mauro-hemerly/UEMG-2018-1>

Sistema Elétrico de Potência e o Estudo de Materiais Elétricos



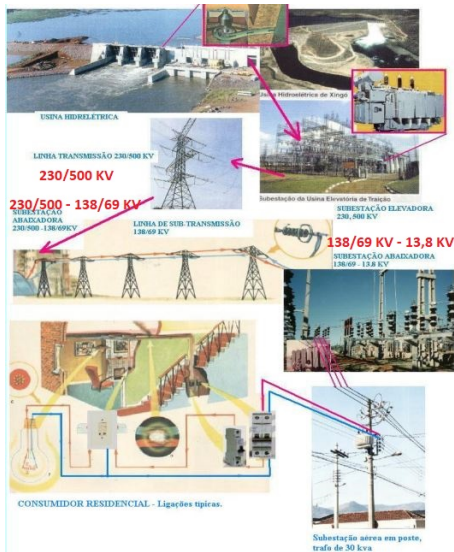
Sistema Elétrico de Potência - Estrutura básica

Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica

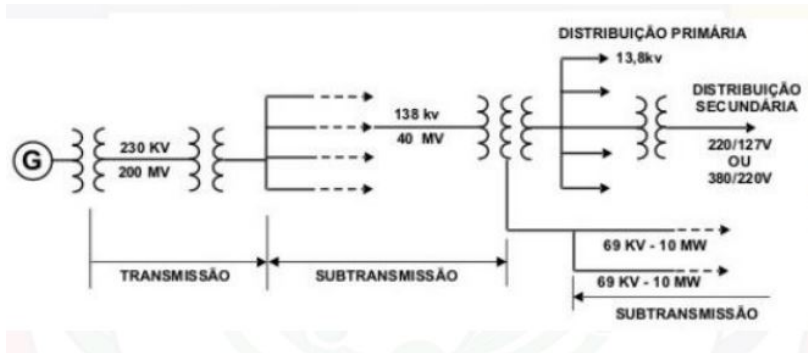


- Torres metálicas ou postes de concreto de grande porte, cadeia de isoladores, feixe de condutores de cabo nu, cabos de para-raios aéreos, condutor de aterramento, etc...

Sistema Elétrico de Potência - Estrutura básica



Sistema Elétrico de Potência - Estrutura básica



Sistema Elétrico de Potência - Estrutura básica

SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

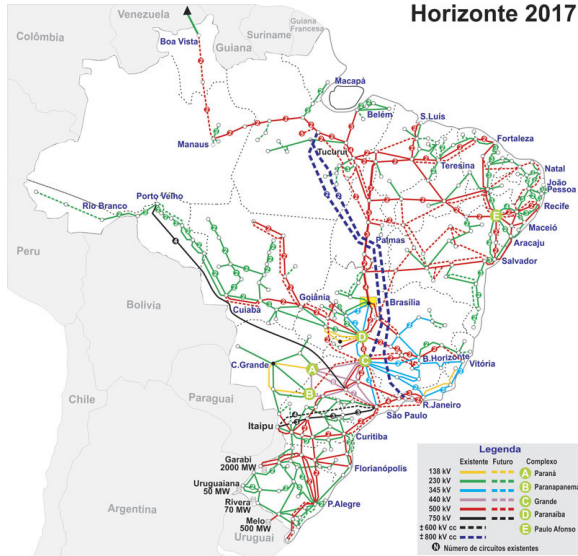


ØInterconexões com cerca de 86,4 mil km de linhas de alta tensão (final de 2007)

ØExpansão 2008/2017 de cerca de 36,4 mil km de linhas de alta tensão (a partir de 230kV)

Fonte: Eletrobrás, PDE 2008-2017

Sistema Elétrico de Potência - Estrutura básica



Propriedades dos Materiais

- São características auferidas ao material de acordo com a sua estrutura atômica ou molecular.
- Algumas propriedades auferidas são **penalizadas**.

Propriedades Elétricas

Os materiais, quando **mergulhados em um campo elétrico**, exibem certos comportamentos que **determinam suas propriedades elétricas** e os classificam dentro das **três classes de materiais** caracterizados por estas propriedades: **condutores, semicondutores e isolantes**.

Propriedades Elétricas

Condutividade Elétrica

A propriedade **condutividade elétrica** σ quantifica a disponibilidade ou a facilidade de circular corrente elétrica em um meio material submetido a uma diferença de potencial.

Definição física mais geral é dada por:

$\sigma = n.e.\mu_n + p.e.\mu_p$, onde: σ = condutividade elétrica do material (S/m , onde S = Siemens; ou ainda $\Omega^{-1}m^{-1}$)

n = concentração de elétrons livres do material (m^{-3})

p = concentração de cargas livres positivas do material (m^{-3}), chamadas **lacunas**

e = carga elétrica elementar = $1,6022 \times 10^{-19} C$ (C = Coulombs)

μ_n, μ_p = mobilidade dos elétrons livres e das lacunas

Elétrons livres e **lacunas** são chamados portadores de carga livre, pois reagem a campos elétricos e magnéticos e fluem livremente. Elétrons livres estão presentes em todos os tipos de materiais mas as **lacunas apenas nos semicondutores**.

Resistividade Elétrica

A **resistividade elétrica** ρ de um material pode ser entendida como a maior ou menor oposição que este material impõe a um fluxo de elétrons (corrente elétrica). O inverso da condutividade

e pode ser dada por:
$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{n.e.\mu_n + p.e.\mu_p}$$

onde a unidade da resistividade pode ser dada em $\Omega.m$ ou $\Omega.mm^2/m$

Influência da Temperatura na Resistividade

A resistividade elétrica depende da temperatura. Nos materiais condutores, a resistividade aumenta com o aumento da temperatura.

Material	$\rho (\Omega m)$	Material	$\rho (\Omega m)$	Material	$\rho (\Omega m)$
prata	$1,5 \times 10^{-8}$	ferro	10×10^{-8}	água	128
cobre	$1,7 \times 10^{-8}$	solda	$14,3 \times 10^{-8}$	silício (puro)	2300
ouro	$2,4 \times 10^{-8}$	chumbo	21×10^{-8}	porcelana	10^{10}
alumínio	$2,8 \times 10^{-8}$	mercúrio	$9,6 \times 10^{-7}$	vidro	10^{10} a 10^{14}
zinco	6×10^{-8}	grafite	$1,4 \times 10^{-5}$	polistireno	10^{16}

Tab. 1.2.1: Resistividade de alguns materiais a 20 °C

Propriedades Elétricas

Nos metais, o aumento na temperatura aumenta a vibração dos átomos, isto é, aumenta a dificuldade que os elétrons livres encontram para passar por entre os átomos, diminuindo a sua mobilidade.

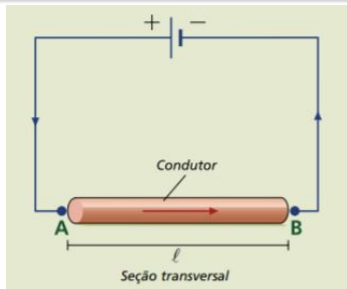
Efeito Joule

A resistividade está relacionada diretamente com a **perda de energia na forma de calor**, conhecido como **Efeito Joule**, que ocorre em qualquer material percorrido por corrente elétrica devido ao choque entre si dos elétrons livres do material. O estudo da resistividade elétrica de um material é importante quando, através do mesmo, se deseja passar um fluxo de elétrons para se determinar quais serão as perdas por **Efeito Joule** e a **queda de potencial**. Quanto **menor a resistividade do material**, **menor será a perda de energia** e melhor será o material para o transporte de corrente elétrica. Por isso, resistividade e condutividade são propriedades mais interessantes no estudo dos materiais condutores e

Propriedades Elétricas

Parâmetros que afetam o valor da resistência ôhmica

A resistência elétrica dos condutores depende dos seguintes parâmetros: comprimento do fio (l), área de sua seção transversal (A), temperatura e material de que é feito. Ohm estudou a influência deles na resistência com experimentos em que variava um parâmetro de cada vez, mantendo os demais constantes.

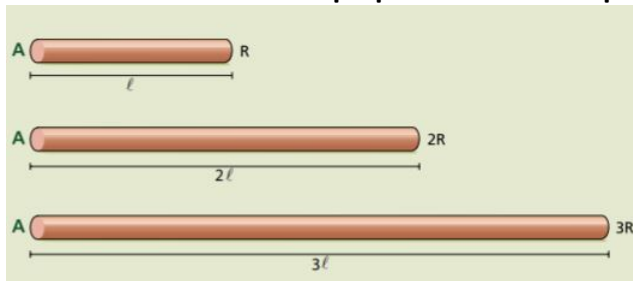


Propriedades Elétricas

Fatores que influenciam a resistência elétrica

A resistência elétrica é uma característica do condutor, portanto, depende do material de que é feito, de sua forma e dimensões, bem como da temperatura a que está submetido o condutor.

A resistência elétrica R é diretamente proporcional ao comprimento l do fio

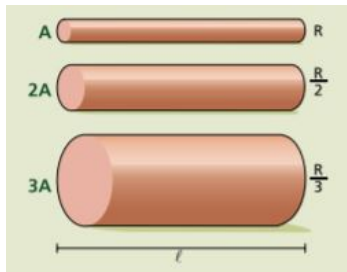


Propriedades Elétricas

Fatores que influenciam a resistência elétrica

A resistência elétrica é uma característica do condutor, portanto, depende do material (ρ) de que é feito, de sua forma e dimensões, bem como da temperatura a que está submetido o condutor.

A resistência elétrica R é inversamente proporcional à área A da seção transversal do fio.



Fatores que influenciam a resistência elétrica

Com base nas análises acima, pode-se escrever que a **resistividade elétrica** de um material pode ser obtida numericamente através da medida da resistência entre os centros das faces opostas de um corpo de prova homogêneo do material, com dimensões unitárias, expressa por:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A}, \text{ onde:}$$

ρ : resistividade elétrica do material em $\Omega \cdot m$

R : resistência elétrica em Ω

l : comprimento em m

A : área da seção transversal em m^2

A resistência elétrica R obedece a **Lei de Ohm** ($V = RI$) e pode ser entendida como a **avaliação quantitativa da resistividade**, pois depende da geometria do material.

Observação

- O cálculo $R = \frac{\rho \cdot l}{A}$, não pode ser aplicado quando um material é percorrido por **corrente alternada** devido ao **Efeito Pelicular**.
- A distribuição uniforme de corrente através da seção de um condutor existe apenas para a corrente contínua. Com o aumento da frequência acontece uma distribuição não-uniforme de corrente, fenômeno este chamado de **efeito pelicular**, pois em um condutor circular a densidade de corrente geralmente aumenta do interior em direção a superfície.

Propriedades Elétricas

1. Exercício Resolvido

Determine a resistência de um fio de cobre, na temperatura de 20°C , com $2,5\text{mm}^2$ de seção transversal, para os seguintes valores de comprimento:

a) $l_a = 20\text{cm}$

b) $l_b = 100\text{m}$

c) $l_c = 5\text{km}$.

Dado o $\rho_{cu} = 1,7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ (a 20°C).

Solução

$$R_a = \rho \frac{l_a}{A} = \frac{(1,7 \times 10^{-8})(0,2)}{2,5 \times 10^{-6}} = 1,36 \text{ m}\Omega \quad R_b = \rho \frac{l_b}{A} = \frac{(1,7 \times 10^{-8})(100)}{2,5 \times 10^{-6}} = 680 \text{ m}\Omega$$

$$R_c = \rho \frac{l_c}{A} = \frac{(1,7 \times 10^{-8})(5 \times 10^3)}{2,5 \times 10^{-6}} = 34.000 \text{ m}\Omega$$

2. Exercício Resolvido

Calcule a resistência de uma barra de prata com 6,15 mm de diâmetro e 1,10 m de comprimento. Dado: condutividade da prata = $6,3 \times 10^7 (\Omega.m)^{-1}$.

Solução

$$r = \text{raio} = 6,15/2 = 3,075 \text{ mm}; l = 1,10 \text{ m}$$

$$A = \pi.r^2 = \pi.(3,075 \times 10^{-3})^2 = 9,455 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$\sigma_{Ag} = 6,3 \times 10^7 (\Omega.m)^{-1}; \rho = 1/\sigma_{Ag} = \frac{1}{6,3 \times 10^7} = 1,5 \times 10^{-8} \Omega.m \text{ (ou pela tabela 1.2.1)}$$

$$R_{Ag} = \rho_{Ag} \cdot \frac{l}{A} = 1,5 \times 10^{-8} \cdot \frac{1,10}{9,455 \times 10^{-6}} = 0,1745 \times 10^{-2} = 1,8 \text{ m}\Omega$$

3. Exercício Resolvido

Seja um cabo de **1000 m de comprimento**, constituído por **19 fios** de cobre de seção transversal circular com **1,4 mm de diâmetro**. Calcule as resistências à passagem de corrente contínua, de um fio e do cabo. Considere temperatura de **20 °C** e despreze o encordoamento

Solução

$r = \text{raio do fio} = 1,4/2 = 0,7\text{ mm} = 0,7 \times 10^{-3}\text{ m}; l = 10^3\text{ m}$

$$A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot (0,7 \times 10^{-3})^2 = 1,539 \times 10^{-6}\text{ m}^2$$

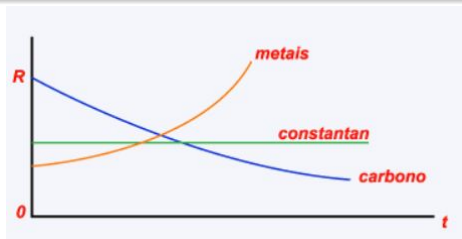
Pela tabela 1.2.1 (slide anterior): $\rho_{Cu,20^\circ C} = 1,7 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot m$

$$\text{1 fio: } R_{fio,20^\circ C} = \rho_{Cu,20^\circ C} \frac{l}{A} = 1,7 \times 10^{-8} \cdot \frac{10^3}{1,539 \times 10^{-6}} = 11,04\ \Omega$$

$$\text{cabo de 19 fios: } R_{cabo,20^\circ C} = \rho_{Cu,20^\circ C} \frac{l}{19A} = \frac{R_{fio}}{19} = \frac{11,04}{19} = 0,58\ \Omega$$

Varição da Resistência em função da Temperatura

A resistência de um condutor varia com a temperatura. No caso dos metais a resistência aumenta quando a temperatura aumentar. Mas, há certas substâncias cuja resistência diminui à medida que a temperatura aumenta; as principais são o carbono e o telúrio. Um gráfico de resistência em função da temperatura tem o aspecto indicado na figura abaixo: são curvas de pequenas curvaturas, tanto que em trechos relativamente grandes podem confundir-se com retas.



Variação da Resistência em função da Temperatura

O **coeficiente de temperatura** α é uma propriedade dos materiais que **quantifica a relação entre a variação da resistência elétrica de um material** e a alteração de temperatura. Este

coeficiente se expressa como $\alpha(t) = \frac{1}{R(t_o)} \cdot \frac{\partial R(t)}{\partial t}$, onde:

α : coeficiente de temperatura, que pode variar com a temperatura ($^{\circ}\text{C}$)⁻¹

$R(t)$: resistência elétrica à temperatura t

$R(t_o)$: resistência elétrica à temperatura de referência t_o

Se o coeficiente de temperatura é praticamente constante no intervalo de temperaturas entre t_o e t , ou seja, a resistência elétrica depende linearmente da temperatura, então pode realizar-se a seguinte aproximação:

$$\alpha = \frac{1}{R(t_o)} \cdot \frac{\Delta R(t)}{\Delta t} = \frac{1}{R(t_o)} \cdot \frac{R(t) - R(t_o)}{t - t_o} \Rightarrow R = R_o[1 + \alpha(t - t_o)]$$

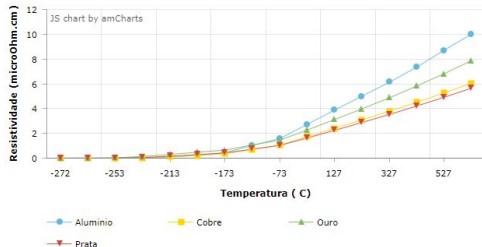
Propriedades Elétricas

Variação da Resistividade em função da Temperatura

As figuras abaixo apresentam a resistividade de diversos metais em função da temperatura. Observa-se que a resistividade de todos os metais apresentados varia de forma não linear com a temperatura. Contudo, a resistividade pode ser linearizada e sua variação pode ser considerada constante se as variações de temperatura não forem muito grandes.

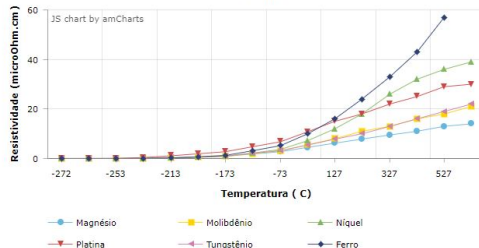
Resistividade dos Metais

Fonte: Haynes, W.M.



Resistividade dos Metais

Fonte: Haynes, W.M.



Propriedades Elétricas

Variação da Resistividade em função da Temperatura

Em vez de exprimirmos a variação da resistência podemos exprimir a variação de resistividade em função da temperatura. A expressão é análoga ao da resistência: $\rho = \rho_o[1 + \alpha(t - t_o)]$

	Material	ρ a 20°C em $\Omega \cdot m$	α (a 20°C)
Metais	Cobre	$1,7 \times 10^{-8}$	$\sim 4 \times 10^{-3}$
	Prata	$1,6 \times 10^{-8}$	$\sim 4 \times 10^{-3}$
	Alumínio	$2,8 \times 10^{-8}$	$\sim 4 \times 10^{-3}$
	Ferro	10×10^{-8}	$\sim 5 \text{ a } 6 \times 10^{-3}$
	Chumbo	22×10^{-8}	$\sim 4 \times 10^{-3}$
Semicondutores	Silício puro	$\sim 3 \times 10^3$	$\sim -7 \times 10^{-2}$
	Germânio	~ 10	$\sim -5 \times 10^{-2}$
Isolantes	Vidro	$\sim 10^{10} \text{ a } 10^{14}$	
	Quartzo fundido	$\sim 10^{16}$	
	Papel	$\sim 10^{12} \text{ a } 10^{16}$	
	Borracha dura	$\sim 10^{16}$	

$\left. \begin{array}{l} \text{Semicondutores} \\ \text{Isolantes} \end{array} \right\} \alpha < 0$

Exercício Proposto

Quando uma barra metálica é aquecida, varia não só sua resistência R , mas também seu comprimento L e a área A de sua seção transversal. A relação $R = \rho L/A$ sugere que todos os três fatores devem ser levados em conta na medida de ρ em temperaturas diferentes. **(a)** Quais são, para um condutor de cobre, as variações percentuais quando a temperatura varia de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. **(b)** Que conclusões podemos tirar daí? O coeficiente de dilatação linear do cobre é $1,7 \times 10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Exercício Proposto

A planta de **Geração Energética Brasileira** é formada, em sua grande maioria, por usinas hidrelétricas espalhadas pelos quatro sistemas monitorados pelo **Operador Nacional do Sistema Elétrico** (ONS). Devido a estas usinas estarem localizadas longe dos centros consumidores, a energia elétrica precisa ser transmitida através de linhas de transmissão. Você, como engenheiro do ONS, recebe a missão para calcular a resistência de uma linha de transmissão de **100 km** de comprimento, composta por fios de cobre cuja seção transversal é igual a **500 mm²**. Sabendo-se que a temperatura ambiente é igual a **20°C** e que a resistividade do cobre nesta temperatura é igual a **1,7x10⁻⁸ Ω.m**, determine qual o valor da resistência ôhmica da linha para uma temperatura de **80°C** (Adotar o coeficiente de temperatura do cobre igual a **3,9x10⁻³ °C⁻¹**).

Dielétricos e Isolantes

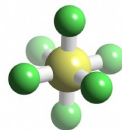
- Qualquer máquina ou equipamento elétrico deverá **suportar campos elétricos**, onde determinada parte de sua estrutura deverá ter uma resistividade muito alta, assegurando uma oposição à passagem de corrente elétrica de condução. O elemento que promove tal condição é chamado de **dielétrico**, sendo chamado de **isolante** o material que o constitui.
- A finalidade do **dielétrico** na indústria elétrica é realizar o **isolamento entre os elementos condutores** do equipamento elétrico.

Dielétricos e Isolantes

- Os dielétricos oferecem uma considerável resistência à passagem de cargas elétricas. A resistividade de tais materiais varia entre $10^8 \Omega.m$ e $10^{22} \Omega.m$ (ou seja, que a temperatura ambiente, pouquíssimos elétrons podem ser ativados).
- Exemplos de **materiais dielétricos**: borracha, silicone, vidro, cerâmica, ar, papel, madeira.
- O que torna um material isolante é a **ausência de elétrons livres** a uma determinada temperatura.
- A propriedade de isolante é mantida até **determinados níveis de diferença de potencial** aplicada ao material, acima deste limite o material torna-se um condutor elétrico.
- Um material isolante, quando submetido a um campo elétrico, tem seus elétrons deslocados de **distâncias microscópicas**. Este fenômeno é conhecido como **polarização** (deslocamento limitado de carga elétricas).

Materiais Isolantes de Uso Industrial mais Frequente

- Os materiais dielétricos podem ser **sólidos**, **líquidos** ou **gasosos**. Os dielétricos sólidos são provavelmente o tipo mais utilizados na engenharia elétrica. Alguns exemplos incluem a porcelana, vidro e plásticos. Os gasosos mais utilizados são o ar e o hexafluoreto de enxofre.
- Gases** (ar, anidrido carbônico, hidrogênio, gases raros, hexafluoreto de enxofre SF₆)
 - Amplamente utilizado como isolante em redes elétricas de transmissão e distribuição;
- Hexafluoreto de enxofre (SF₆) – usado em isolamentos de cabos subterrâneos e disjuntores de alta potência (subestações);



Materiais Isolantes de Uso Industrial mais Freqüente

- **Fibras Naturais**

- papel impregnado em resinas ou óleos, algodão, seda – usados em suportes isolantes e em revestimentos de cabos, capacitores e bobinas;



Materiais Isolantes de Uso Industrial mais Freqüente

- **Cerâmicas** (óxido de alumínio, titanato de bário, porcelana, etc.)
 - utilizadas basicamente em isoladores de baixa, média e alta tensão, e em capacitores de baixa e alta tensão (elevada constante dielétrica);



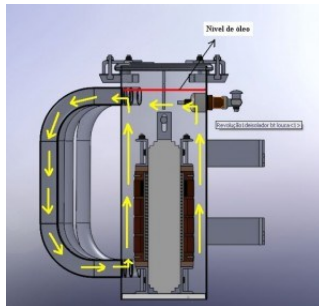
Materiais Isolantes de Uso Industrial mais Freqüente

- **Resinas Plásticas** (Poliéster, polietileno, PVC (Cloro de Polivinila), Teflon, etc.)
 - aplicados em revestimentos de fios e cabos, capacitores e peças isolantes;



Materiais Isolantes de Uso Industrial mais Freqüente

- **Líquidos** (Óleo mineral e óleo de silicone)
 - atuam nas áreas de refrigeração e isolamento em transformadores e disjuntores a óleo. Também empregados para impregnar papéis usados como dielétricos em capacitores.



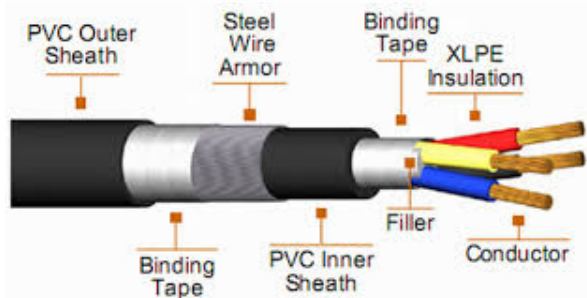
Materiais Isolantes de Uso Industrial mais Freqüente

- **Tintas e Vernizes** (compostos químicos de resinas sintéticas)
 - têm importante emprego na tecnologia de isolação de componentes eletrônicos como: esmaltação de fios e cabos condutores, isolação de laminados ferromagnéticos, circuitos impressos e proteção geral de superfícies;



Materiais Isolantes de Uso Industrial mais Freqüente

- **Borrachas Sintéticas** (compostos químicos de resinas sintéticas)
 - usados como capa protetora de cabos;



Materiais Isolantes de Uso Industrial mais Freqüente

- **Mica**

- material mineral usado em capacitores e em ligações entre transistores de alta potência;



Materiais Isolantes de Uso Industrial mais Freqüente

- **Vidro e Madeira**

- **Vidro:** principal emprego em isoladores de linhas de transmissão. **Madeira:** grande utilização em cruzetas dos postes de distribuição.



Permissividade ou Constante Dielétrica

- Um material dielétrico é caracterizado por sua **constante dielétrica** ou por sua **permissividade elétrica absoluta** ε .
- A constante dielétrica é normalmente apresentada de forma relativa em relação à constante dielétrica do vácuo ε_0 : $\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = k$
- A **permissividade elétrica absoluta** para o vácuo (ε_0) é dada por:
 $\varepsilon_0 = 8,854187817 \times 10^{-12} \text{ F/m} \implies k = 1$ (constante dielétrica do vácuo).

Propriedades Elétricas

Permissividade ou Constante Dielétrica

- Nenhum material dielétrico é **perfeito**, ou seja, a partir de uma determinada intensidade de campo elétrico ocorre a **ruptura** do dielétrico, isto é, a formação de **canal condutivo** no corpo do dielétrico.
- Em dielétricos na forma **gasosa** ou **líquida** normalmente **não ocorre dano permanente** ao material.
- Em dielétricos **sólidos**, por outro lado, ocorre uma **mudança permanente** - formação do canal condutor - e o dielétrico fica inutilizado.



Permissividade ou Constante Dielétrica

Valores Típicos de Constante Dielétrica e Ponto de Ruptura

Material	ϵ_r	Ponto de ruptura [kV/cm]
Ar	1	30
Baquelite	4,8	25
Vidro	4 a 9	30
Mica	5,4	200
Porcelana	5 a 9	11
Poliestireno	2,6	20
Óleo	2,3	15

Permissividade ou Constante Dielétrica

- A **permissividade dielétrica do meio só pode ser analisada indiretamente**. Uma das maneiras simples de fazer esta análise é associar a propriedade à um elemento de circuito que funcione baseado principalmente em campo elétrico: **um capacitor**.

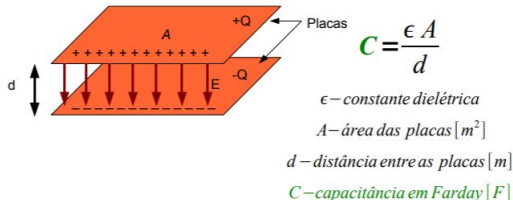
Permissividade ou Constante Dielétrica

- Uma aplicação típica de dielétricos são os capacitores, componentes muito utilizados tanto na Eletrotécnica (p.ex., **correção do fator de potência**) quanto na Eletrônica (p.ex., **filtros**).
- Os capacitores têm a propriedade em armazenar energia elétrica.

Propriedades Elétricas

Permissividade ou Constante Dielétrica

- A capacitância de um capacitor de área **A** e distância entre placas **d** para um dielétrico qualquer, é dada por: $C = \epsilon \frac{A}{d}$
- Assim podemos designar, em função da capacitância, a permissividade relativa de um material, definida pela razão mostrada a seguir, em que C é a capacitância entre duas placas paralelas separadas pelo material isolante e C_0 é a capacitância das mesmas placas paralelas separadas por vácuo $\epsilon_r = \frac{C}{C_0}$



Propriedades Elétricas

Experimento de Faraday

Faraday, em 1837, descobriu que, quando o espaço entre as placas de um capacitor é preenchido com um dielétrico, sua **capacitância aumenta por um fator $k > 1$, constante dielétrica** do material. Nas fórmulas de capacitância tendo ar entre as placas, para incluir o efeito de um dielétrico, basta trocar a constante ε_0 por $k\varepsilon_0$. Por exemplo, um capacitor de placas paralelas contendo dielétrico entre as placas

Influências do Fator k

$$C = k C_o \quad E = \frac{E_o}{k} \quad Q = k Q_o \quad V = \frac{V_o}{k}$$

Exemplo: capacitor de placas paralelas

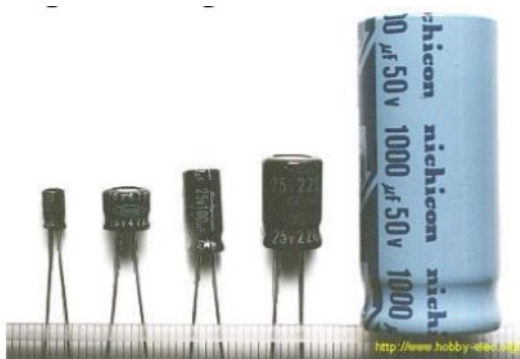
$$\varepsilon_o = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m} \quad C = 1 \text{ F} \quad d = 1 \text{ mm} \quad A = \frac{d \cdot C}{\varepsilon_o}$$

Dielétricos

Ver experimento USP

Tipos de Capacitores mais usados na Eletrônica

Eletrolítico: placas são eletrodos de alumínio, com um dielétrico formado por um sal condutor em solução eletrolítica). Devido a este fato eles são polarizados: só pode ser usados em um sentido de polarização. São os tipos mais usados e comuns na prática.



Tipos de Capacitores mais usados na Eletrônica

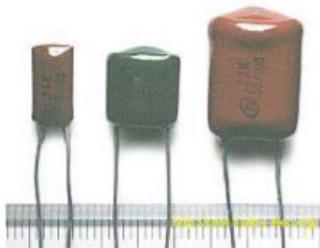
Tântalo: são capacitores eletrolíticos onde as placas são feitas de **pentóxido de tântalo**. Têm características superiores a eletrolíticos convencionais: operam a altas temperaturas e altas frequências.



Propriedades Elétricas

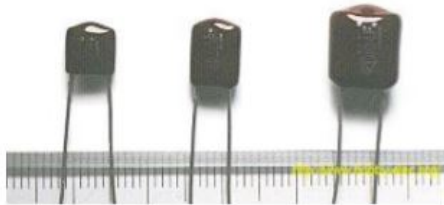
Tipos de Capacitores mais usados na Eletrônica

Fio de Poliéster: é o dielétrico usado neste tipo de capacitor, bastante usado por ser barato e estável em diversas temperaturas. Sua capacitância tem uma tolerância da ordem de 5 a 10%.



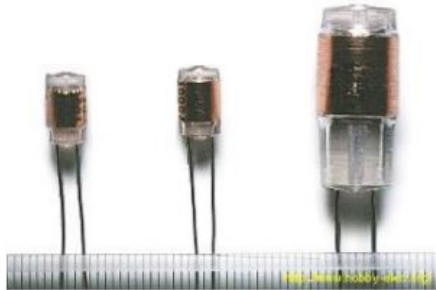
Tipos de Capacitores mais usados na Eletrônica

Filme de Polipropileno: é o dielétrico deste tipo de capacitor, usado quando uma tolerância mais alta é necessária (da ordem de 1%) para a capacitância.



Tipos de Capacitores mais usados na Eletrônica

Filme de Poliestireno: usado como dielétrico, com (eletrodos) feitos de cobre ou prata.



Tipos de Capacitores mais usados na Eletrônica

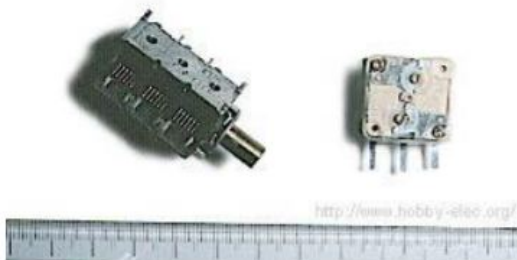
Cerâmicos: usam materiais como ácido titânico-bárico como dielétrico, bastante usados em aplicações de altas frequências. Junto com os eletrolíticos, são os capacitores mais utilizados na prática. São bastante sensíveis a variações de temperatura.



Propriedades Elétricas

Tipos de Capacitores mais usados na Eletrônica

Capacitores de Sintonia: utilizam ar como dielétrico. Muito usados em controle de sintonia de rádios, especialmente os mais antigos. Usualmente têm várias placas associadas com um eixo comum, que pode ser movido pelo botão de sintonia.



Propriedades Elétricas

Rigidez Dielétrica

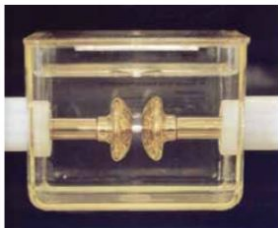
A **rigidez dielétrica** (ponto de ruptura) é o **máximo valor de campo elétrico** (E_{max}) que pode ser aplicado a um material dielétrico sem que este perca suas propriedades isolantes. De outra forma, pode-se afirmar que após um valor de tensão, designada por **tensão de ruptura**, o material isolante passa a conduzir corrente. Assim, define-se **rigidez dielétrica** como a capacidade de resistir à tensão sem que haja a citada descarga, conforme a distância entre os dois pontos de aplicação. Este valor é dado em **kV/mm** ou no SI, **V/m**.

Se $E > E_{max}$ pode haver passagem de cargas pelo dielétrico, formando uma faísca ou arco voltaico (ou raio nas tempestades).

A rigidez dielétrica dos isolantes não é constante para cada material, pois depende fundamentalmente da espessura do isolante, da pureza do material, do tempo e método de aplicação da tensão, da frequência da tensão aplicada e do tipo de solicitação ao qual o sistema dielétrico é submetido, da temperatura, da umidade, entre outros fatores ambientais.

Rigidez dielétrica de alguns materiais a 20°C

Material	$E_{max}(kV/mm)$	Material	$E_{max}(kV/mm)$	Material	$E_{max}(kV/mm)$
Ar seco	3	EPR	53	vidro	80
poliestireno	20	mica	60	porcelana	100
PVC	50	polietileno	65	óleo mineral	15 a 280



Cuba de medidor de
rigidez dielétrica com
eletrodos VDE




Ferramenta VDE

Condutores Elétricos e Isolantes

- Condutor é um fio composto por um corpo de metal estirado usualmente de forma cilíndrica, e de seção circular, isolado por uma camada de **isolante termoplástico** (PVC) ou **termofixo** (EPR – borracha).
- **PVC** também é conhecido como **Cloreto de Polivinila**.
- Cabo é melhor que fio?
 - Depende da utilização. A única diferença que existe é a flexibilidade, pois a capacidade de corrente é a mesma, ou seja, um fio 1,5mm, um cabo 1,5mm, ou um cabo flexível 1,5mm, possuem a mesma capacidade de condução de corrente.
 - Resumindo, a capacidade de corrente é a mesma para as mesmas seções nominais, independente da classe do condutor.
 - O que vai definir a classe a ser utilizada é a aplicação e/ou a preferência do projetista ou instalador.
 - A diferença entre um Fio e um Cabo é a flexibilidade.
 - Os fios são feitos de um único e espesso filamento, e por isso são rígidos.

Condutores Elétricos e Isolantes

- Qual a diferença entre as **têmperas dura, meio-dura e mole**?
 - A diferença está no **tratamento térmico** que é aplicado aos três tipos de têmpera. O condutor de cobre com têmpera mole é mais maleável que o condutor com têmpera dura.
- Para que serve a isolação?
 - A função básica da isolação é confinar o campo elétrico gerado pela tensão aplicada a condutor no seu interior.
 - Com isso, é reduzido ou eliminado o risco de choques elétricos e curtos-circuitos.



Condutor
Seção nominal em mm²(S)

Isolação
Tensão de isolamento (V_0 V)
Temperatura máxima para:
- serviço contínuo $\ominus Z$
- de sobrecarga $\ominus SC$
- de curto-circuito $\ominus CC$

Cobertura

Tipo de Isolação	De	Qcc	Qcc
PVC	70°C	100°C	160°C
EPB/XLPE	90°C	130°C	250°C



Classificação dos Condutores Elétricos

- **Classe de Encordoamento**: Os condutores elétricos são classificados quanto à **flexibilidade**.
- A **classe de encordoamento** está relacionada com o **diâmetro** dos **fios elementares** (classe de 1 a 5).
- Quanto **menor o diâmetro** dos fios elementares, **maior será a classe** e consequentemente **maior será a flexibilidade** do condutor.
- A norma que especifica os **tipos de encordoamento** é a **NBR NM 280 - Condutores de Cabos Isolados**, e todas as classes desde que produzidas conforme esta norma, possuem capacidade de condução de corrente elétrica **similar** para uma mesma seção nominal.
- A escolha da classe de encordoamento dos condutores para uma instalação é feita de acordo com o tipo de aplicação.

Classificação dos Condutores Elétricos

- Classificação dos cabos quanto ao **encordoamento**.
- A **Classe 1** destina-se somente a condutores sólidos (fios) e a **Classe 2** a condutores encordoados (cabos rígidos).
- Para condutores flexíveis, as **Classes 4 e 5**, sendo a Classe 5 mais flexível que a 4.



Classificação dos Condutores Elétricos

- Quais são as **cores padrão** utilizadas em circuitos de Baixa-Tensão?
 - De acordo com a norma técnica **NBR 5410** para instalações elétricas de baixa tensão as cores azul e verde-amarelo (brasileirinho) ou simplesmente verde, são exclusivas para certas funções:
 - **NEUTRO**: O condutor com isolação na cor azul deve ser utilizado como **condutor neutro**.
 - **TERRA**: O condutor com isolação **verde-amarelo** ou verde deve ser utilizado como condutor de proteção, também conhecido como **terra**.
 - **FASE**: O condutor utilizado como fase poderá ser de **qualquer cor**, **exceto** as cores citadas acima.
- Antichamas = BWF. A sigla **BWF** gravada no produto significa que o produto é anti-chama.



Seminário sobre Cabos Condutores de Alumínio e Isolantes

- **Apresentação:** 27/04/18 - 1ª Avaliação Parcial (20 pontos)
- **Duração para cada dupla:** 20 min
- **Pontos a serem abordados:** capacidade de corrente, seção nominal, nível de isolamento, cobertura, isolamento dos fios, classe de encordoamento, aplicações, norma técnica aplicável,

Exercício Resolvido

Tem-se um material isolante de **3 mm** de espessura, no qual aplica-se, transversalmente à sua espessura, uma tensão crescente e observa-se que o material rompe-se quando é atingido uma ddp de **60 kV**. Qual a rigidez dielétrica do material?

$$E_{max} = \frac{\text{limite de tensão de ruptura}}{\text{espessura}} = \frac{60 \text{ kV}}{3 \text{ mm}} \Rightarrow E_{max} = 20 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$$

Exercício Proposto

Num dia de chuva, uma nuvem eletricamente carregada pode se descarregar produzindo relâmpagos. Uma nuvem típica se encontra a uma altura de **5.000 m** do solo, com uma diferença de potencial de **10 milhões de volts** em relação ao solo. Em um laboratório, uma estudante de Física realiza uma experiência para medir a rigidez dielétrica do ar seco usando um capacitor de placas planas e paralelas cuja distância entre as placas pode ser variada. Mantendo uma diferença de potencial constante entre as placas e iguais a **24 kV**, a estudante diminui lentamente a distância entre elas até que, na distância de **0,8 cm**, observa uma centelha no ar entre as placas. Quais são os valores do campo elétrico entre a nuvem e o solo e da rigidez dielétrica do ar seco, respectivamente?

- | | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| a) 2,0 kV/m e $3,0 \times 10^6$ V/m | b) 2,0 kV/m e $1,9 \times 10^4$ V/m |
| c) 5,0 kV/m e $3,0 \times 10^6$ V/m | d) 10 kV/m e $3,0 \times 10^5$ V/m |
| e) 20 kV/m e $1,9 \times 10^6$ V/m | |

Exercício Proposto

A distância entre os eletrodos de uma vela de ignição de automóvel é de **0,060 cm**. Para produzir uma faísca elétrica em uma mistura gasolina/ar deve haver um campo de **$3,0 \times 10^6 \text{ V/m}$** . Para que o automóvel "dê partida", qual deve ser a tensão mínima aplicada na vela de ignição?

Exercício Proposto

Calcule a capacitância de um capacitor feito com 2 placas paralelas condutoras de alumínio com **1 cm²** de área preenchido com um dielétrico de **2,5 mm** de espessura e constante dielétrica relativa de **2,8**.

Exercício Proposto

A rigidez dielétrica é o mesmo que constante dielétrica? Explique as possíveis diferenças entre essas duas grandezas. Existe alguma relação simples entre a constante dielétrica e a rigidez dielétrica?

Material	Constante dielétrica, K	Rigidez dielétrica, $E_{\text{máx}}$ (V/m)
Polycarbonato	2,8	3×10^7
Poliéster	3,3	6×10^7
Polipropileno	2,2	7×10^7
Poliestireno	2,6	2×10^7
Vidro Pyrex®	4,7	1×10^7