

---

# 1 - Materiais Elétricos

---

*Carlos Marcelo Pedroso*

28 de julho de 2009

## 1 Introdução

O estudo de Materiais Elétricos constitui-se em um tema básico para que sejam estudados tópicos de Instalações Elétricas, Projeto de Máquinas, Eletrônica Industrial, entre outras.

O objetivo básico do tema é permitir que um Engenheiro possa analisar as propriedades dos materiais de que são construídos equipamentos e componentes eletrônicos, que fornece subsídio para que o Engenheiro possa raciocinar em termos de matérias primas e, eventualmente, de sua adaptação a novas condições de serviço ou de sua substituição por outros mais adequados.

Nesta aula serão abordados os tópicos básicos a respeito de Materiais Elétricos, de forma a introduzir os seguintes temas:

1. Materiais Condutores;
2. Materiais Semicondutores;
3. Materiais Isolantes;

Também é de interesse especial o estudo dos materiais magnéticos, que podem ser divididos em materiais ferromagnéticos, diamagnéticos e paramagnéticos.

Os materiais podem ser caracterizados por diversas métricas, destacando-se a Condutibilidade (térmica, elétrica), a Ductibilidade (capacidade de ser transformada em fios), a Maleabilidade (ser maleável, e ter a capacidade de ser transformado em uma lâmina), a Elasticidade (ser esticado e voltar ao normal) e a Tenacidade (resistência à tração)

Os materiais podem ser classificados com base no valor da resistividade do material. A resistividade é a capacidade de um corpo qualquer se opor a passagem de corrente elétrica quando existe uma diferença de potencial aplicada a ele. O critério de classificação dos materiais com base em sua resistividade é dada por:

1. Condutores:  $10^{-2}$  a  $10\Omega mm^2/m$
2. Semicondutores: 10 a  $10^{12}\Omega mm^2/m$
3. Isolantes:  $10^{12}$  a  $10^{24}\Omega mm^2/m$

Tabela 1: Sumário das características dos principais metais

Nome do metal	Resistividade ( $\rho$ )	Nome do metal	Resistividade ( $\rho$ )
Ouro	0.0240	Mercúrio	0.960
Prata	0.0162	Chumbo	0.205
Cobre	0.0169	Ferro	0.098
Alumínio	0.0262	Platina	0.100
Níquel	0.072	Tungstênio	0.055
Zinco	0.059	Estanho	0.114

## 2 Materiais Condutores

Do ponto de vista prático, a maior parte dos materiais condutores é formada por *metais*. Isso se dá pela estrutura atômica dos metais, em que os átomos da camada de valência podem fluir livremente de átomo para outro. Quando uma corrente elétrica é estabelecida em um condutor metálico, um número muito elevado de elétrons livres passa a se deslocar neste condutor. Neste movimento, os elétrons podem colidir entre si e com os átomos que constituem o material, encontrando certa dificuldade para se deslocar - no entanto esta resistência à passagem de corrente oferecida é muito pequena. Deve ser destacado que existem não metais que são bons condutores de eletricidade, como o grafite, a água salgada ou qualquer material em estado de plasma.

Os principais metais são o cobre, alumínio, ferro, prata, ouro, titânio, zinco, estanho, chumbo. Na natureza, os metais são obtidos unidos à outros materiais (oxigênio, enxofre, sais e ácidos) em forma de minério. Processos de metalurgia podem separar os diversos componentes.

Também é de particular interesse o estudo de ligas metálicas, formadas por diversos metais, devido à melhoria em aspectos como a resistência mecânica. Os metais apresentam boas características de condutividade elétrica e também boa condutividade térmica, além de apresentar boa resistência mecânica. Em particular, o cobre apresenta características que lhe garante posição de destaque entre os materiais condutores.

A Tabela 1 mostra a resistividade para os principais metais utilizados como condutores. A escolha do material mais adequado para uma aplicação deve satisfazer simultaneamente uma série de requisitos quanto à resposta a esforços mecânicos, térmicos, magnéticos, luminosos, entre outros. Os metais mais utilizados na eletrônica são:

**cobre** pequena resistividade, boas características mecânicas, baixa oxidação, fácil deformação a quente - o bronze e o latão são as ligas mais usadas;

**alumínio** é o segundo metal mais usado depois do cobre, tendo características elétricas e mecânicas piores do que este mas com um custo menor;

**chumbo** é utilizado principalmente em soldas, sendo sensível a vinagre, cal e materiais orgânicos em apodrecimento - é um produto venenoso;

**prata** seu principal uso é em peças de contato;

**ouro** bastante resistente à oxidação por sua estrutura altamente estável, é utilizado principalmente em peças de contato.

Metais puros tem uma estrutura cristalina perfeita, o que reduz a sua resistividade. No entanto, a inserção de impurezas, mesmo em pequenas quantidades, alteram a estrutura aumentando a resistividade do material. Um aumento de resistividade também ocorre quando se realiza uma liga de dois ou mais metais. Desta forma, as ligas possuem valores próprios de resistividade e geralmente apresentam uma resistividade maior do que a dos seus componentes - fato que se deve à alteração da estrutura cristalina do produto resultante.

Um material não metálico que merece destaque por sua utilização é o carvão. O carvão é obtido a partir de grafita natural ou antracito (reduzido a pó e moldado no formato desejado), que possui características aceitáveis de condutividade e é utilizado em peças de contato, com destaque para as escovas em motores onde o problema de faiscamentos intensos pode exigir o uso de um material com boas características de resistência térmica, o que é o caso do carvão.

### 3 Semicondutores

São sólidos cristalinos de condutividade intermediária. Os principais materiais em uso atualmente são o Silício e o Germânio - mas já foram utilizados o Selênio e o Carbono (em certas condições). A característica comum a todos os semicondutores é que todos eles são tetravalentes, possuindo o Silício uma configuração eletrônica  $s^2p^2$ .

A condutividade de um semicondutor é influenciada por eventuais perturbações de suas condições cristalinas, sobretudo pela presença de impurezas. A inserção de impurezas pode ser utilizada para criar materiais abundantes em elétrons livres ou materiais com vazios de elétrons livres (o material "prende" elétrons ou "fornece" elétrons ao semicondutor), em um processo chamado *dopagem*, criando respectivamente materiais N e P. A associação do Silício (tetravalente) com o Antimônio (pentavalente) irá fazer com que apenas 4 dos 5 elétrons do Antimônio participem das ligações de valência, ficando livre um dos elétrons em um movimento próprio de rotação, não estando fixo em sua posição poderá ser deslocado com uma facilidade maior do que qualquer outro elétron, criando a dopagem N. Uma outra situação, em que podem ser acrescentados ao Silício átomos com Índio, com 3 elétrons na camada de valência, fará com que uma das ligações do silício ficará com falta de um elétron, que provocará uma re-estruturação das ligações dos átomos vizinhos, produzindo uma lacuna (material P).

Materiais N e P podem ser combinados de modo a obter-se controle sobre a corrente elétrica, criando dispositivos como diodos e transistores. Um diodo é formado por uma união entre materiais P e N de modo a permitir a passagem de corrente apenas caso o componente seja polarizado em um sentido. Um transistor bipolar é obtido a partir de uma junção NPN ou PNP de modo a permitir o controle do fluxo de corrente a partir de um pino de controle.

As junções entre os materiais N e P criam campos elétricos, que tende a separar os elétrons e as lacunas e este efeito é crucial para a operação dos dispositivos criados a partir de materiais semicondutores. Além disso, a diferença de densidade entre a quantidade de impurezas é utilizada para produzir materiais com diferentes finalidades. Adicionalmente, a dopagem cria resistências elétricas que podem ser controladas dinamicamente pela aplicação de campos elétricos - um grande número de dispositivos semicondutores podem ser encontrados, por exemplo, diodos (zener, túnel, scotch, led, varicap, etc.) transistores (bipolares, FET, MOSFET, etc.).

Exemplo. Diodo

A Figura 1 mostra um diodo composto por uma junção PN, ilustrando o caso de uma polarização direta, que leva o dispositivo à condução (desde que a tensão da fonte seja suficiente para romper a

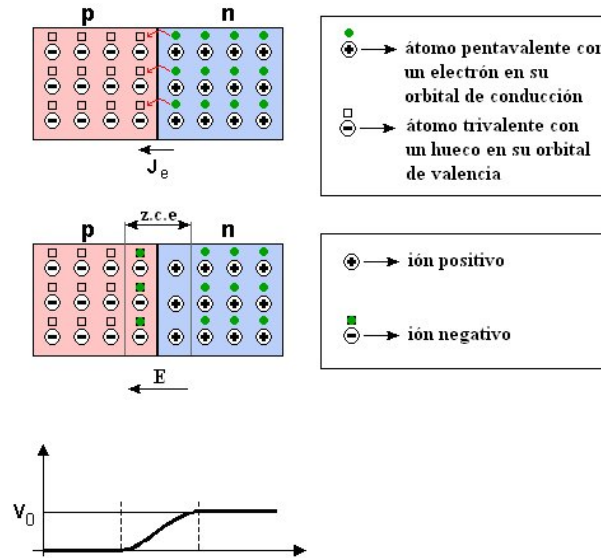


Figura 1: Operação do diodo [Fonte: Wikipedia]

barreira de potencial formada pela recombinação dos materiais NP na junção.

## 4 Isolantes ou Dielétricos

Os dielétricos oferecem uma considerável resistência à passagem de cargas elétricas. Exemplos de materiais dielétricos são a borracha, o silicone, o vidro, a cerâmica, o ar, o papel e a 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 irá tornar-se um condutor de eletricidade.

Um dielétrico submetido a uma diferença de potencial será polarizado devido à presença do campo elétrico, comportando-se de forma semelhante a um capacitor de placas paralelas (ilustrado na Figura 2 ). A polarização do dielétrico leva a um aumento de temperatura, resultante de um consumo de energia. Os dielétricos são classificados em relação ao tipo de polarização apresentando os materiais dielétricos características bastante diversas. Quando o dielétrico é submetido a uma tensão existirá uma pequena corrente circulando em um circuito fechado, que deverá ser estudada dependendo da aplicação em questão. As condições de resposta como temperatura, rigidez, envelhecimento são de particular importância.

A *rigidez dielétrica* de um material é o valor limite de *tensão* aplicado sobre o material a partir de que os átomos que compõem o material se ionizam e o material dielétrico deixa de funcionar como um isolante. O valor da rigidez dielétrica depende de diversos fatores como: temperatura, espessura, tempo de aplicação da diferença de potencial, taxa de crescimento da tensão, a pressão é fator importante para gases. A Tabela 2 mostra a rigidez dielétrica de vários materiais.

Os materiais dielétricos podem ser sólidos, líquidos ou gasosos. Os dielétricos sólidos são prova-

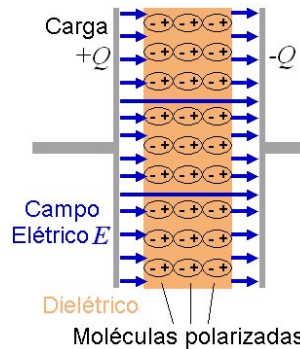


Figura 2: Elemento dielétrico sob carga [Fonte: Wikipedia]

Material	Rigidez dielétrica (kV/mm)
Ar (1 atm)	3
Vidro	35
Papel	20
Oleo	4
Borracha	25

Tabela 2: Rigidez dielétrica de vários materiais

velmente o tipo mais utilizado na engenharia elétrica pois muitos sólidos são bons isolantes. Alguns exemplos incluem a porcelana, vidro e plásticos. Ar e hexafluorido sulfúrico são dois dielétricos gasosos comumente utilizados.

Em um dielétrico real, as misturas de estruturas de matérias-primas levam à presença simultânea de diversas das formas de polarização possíveis. O circuito equivalente é em essência um circuito capacitivo com os seguintes elementos:

- capacitância  $C_0$  e carga no vácuo  $Q_0$
- capacitância  $C_e$  e carga na polarização eletrônica  $Q_e$
- capacitância  $C_i$  e carga na polarização iônica  $Q_i$
- capacitância  $C_d$  e carga na polarização dipolar  $Q_d$
- capacitância  $C_s$  e carga na polarização estrutural  $Q_s$

A *polarização eletrônica* é proveniente de um deslocamento elástico dos elétrons ligados ao núcleo do átomo pela ação de um campo elétrico externo. A *polarização iônica* é uma característica dos sólidos devido ao deslocamento de íons - lembro que um íon é um átomo que ganhou ou perdeu elétrons na camada de valência. A *polarização dipolar* se destaca como sendo a orientação espacial de conexões das moléculas, havendo possibilidade de re-organização molecular quando o dielétrico é submetido a uma diferença de potencial. A *polarização estrutural* é a orientação de estruturas complexas de material perante a ação de um campo externo, aparecendo devido a um deslocamento

de íons e de dipolos, na presença de aquecimentos. As polarizações estrutural e dipolar apresentam grande sensibilidade à temperatura.

A carga  $Q_0$ , que um capacitor possui no vácuo e a carga eletrônica  $Q_e$ , resultante da polarização eletrônica, estão sempre presentes. As demais polarizações (iônica, estrutural e dipolar) dependem do tipo de dielétrico. A constante dielétrica  $\varepsilon$  de um dielétrico é dada por

$$\varepsilon = 1 + 4\pi\kappa_e + 4\pi\kappa_d + 4\pi\kappa_s \quad (1)$$

onde  $\kappa_e$ ,  $\kappa_d$  e  $\kappa_s$  são as suscetibilidades elétricas que se originam nas polarizações respectivas.

O comportamento dos materiais dielétricos mais utilizados pode e deve ser objeto de discussão detalhada, normalmente realizada em função da constante dielétrica e das propriedades mecânicas dos materiais - será abordado em aulas futuras.

## 5 Materiais Magnéticos

Os materiais podem ser classificados magneticamente em três grandes grupos: os materiais ferromagnéticos, diamagnéticos e paramagnéticos.

Os materiais ferromagnéticos caracterizam-se por uma magnetização espontânea, que é totalmente independente de campos magnéticos externos. A grandeza desta magnetização depende da temperatura (a partir de uma temperatura crítica o material passa de ferromagnético a diamagnético).

A permeabilidade magnética  $\mu$  é dada por  $\mu = H/B$ , sendo  $B$  a indução magnética por unidade de superfície e  $H$  a intensidade de campo no interior do material. Os materiais ferromagnéticos apresentam valores de  $\mu$  muito maiores que a unidade. Materiais neste grupo são o ferro, cromo, o cobalto, entre outros e suas respectivas ligas.

Materiais diamagnéticos são os materiais nos quais o valor de  $\mu < 1$ , havendo neste grupo metais (cobre, bismuto, ouro), gases inertes, bem como a grafita. Nestes materiais, sob a ação de um campo magnético, os elétrons que giram em torno de seu próprio eixo vão se ajustando, liberando durante este ajuste um momento magnético dirigido contrariamente ao campo de magnetização aplicado, enfraquecendo o próprio campo.

O paramagnetismo representa materiais com  $\mu$  próximo a unidade - ex. alumínio, platina, certos sais de cobalto, etc.

É de particular interesse o estudo destes materiais, principalmente por sua aplicação em transformadores, de modo a obter técnicas para reduzir as resistências parasitas em núcleos de materiais ferromagnéticos, com destaque para o estudo dos núcleos laminados de modo a dificultar a formação de correntes elétricas e a permitir a condução de campos eletromagnéticos.

## 6 Exercícios Seleccionados

*Exercício 1:* Quais os dois principais mecanismos que proporcionam a condução de corrente em materiais? Quais as características dos materiais que determinam a maior ou menor facilidade de condução? □

*Exercício 2:* Considere dois condutores distantes entre si em 10cm separados apenas por ar. Qual a tensão máxima pode ser aplicada entre os condutores? □

*Exercício 3:* Compare o cobre e o alumínio como condutores, analisando resistividade, peso e custo. Se a utilização do alumínio é aparentemente vantajosa, por que os fios de cobre são tão utilizados? □

*Exercício 4:* Porque a inserção de um dielétrico entre as placas de um capacitor provoca o aumento da capacitância? □

*Exercício 5:* Quais são os três tipos de polarização de dielétricos? Compare suas características. □

*Exercício 6:* Quais as diferenças nas bandas de energia dos condutores semicondutores e isolantes? □

## Referências

- [1] Walfredo Schmit, *Materiais Elétricos - Condutores e Semicondutores*, 2a edição revista, Editora Edgard Blucher, 1979 7a reimpressão 2002.
- [2] Walfredo Schmit, *Materiais Elétricos - Isolantes e Magnéticos*, 2a edição revista, Editora Edgard Blucher, 1979 7a reimpressão 2002.
- [3] William D. Callister Jr, *Ciência de Engenharia de Materiais: Uma Introdução*, Ed. LTC, 5a Edição, 2002,
- [4] Condutores. Semicondutores. Dielétricos. Em: Wikipédia: a enciclopédia livre. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/>, <http://en.wikipedia.org/>, <http://es.wikipedia.org/>, acesso em março de 2008