

**Uniube**

UNIUBE – CAMPUS VIA CENTRO – Uberlândia/MG

Cursos de Engenharia Elétrica

Disciplina: Materiais Elétricos

## Aula 2

# Materiais Elétricos e Aplicações

Revisão 1, de 11/03/2024

Prof. João Paulo Seno

[joao.seno@uniube.br](mailto:joao.seno@uniube.br)

1

**Uniube**

## Referência para esta aula

- Capítulo 2, “Materiais Elétricos e Aplicações”, páginas 33 a 49, do livro ROCHA, M.F. et al. Materiais Elétricos. Porto Alegre: SAGAH, 2018. Disponível na Biblioteca A, acessível via AVA.

2



## Introdução

- Os materiais elétricos podem ser classificados em três grandes grupos:
  1. Materiais condutores;
  2. Materiais semicondutores e
  3. Materiais isolantes.
- O critério de classificação nos grupos acima está relacionado à intensidade da corrente elétrica que os percorre quando certa quantidade (volume) do material é submetido a uma diferença de potencial elétrico entre dois pontos de sua estrutura física.
- A intensidade da corrente é medida pela taxa de variação da carga em relação ao tempo, que atravessa determinada seção transversal do material.

$$I = dQ/dT$$

3



## Materiais condutores

- São aqueles nos quais a corrente elétrica tem baixa resistência em sua passagem;
- Podem ser classificados em dois grupos:
  - Materiais de grande condutividade: a corrente flui com maior facilidade, gerando as menores perdas ( $R \cdot I^2$ ) possível. Estes materiais são utilizados na conexão entre aparelhos ou na construção das máquinas elétricas;
  - Materiais de elevada resistividade: Estes materiais são utilizados em equipamentos cujo objetivo principal é transformar a energia elétrica em energia térmica, como chuveiros e fornos elétricos.
- De forma geral, os materiais condutores são **METAIS**;
- **Ligas metálicas** também podem ser boas condutoras;
- Metais mais nobres geralmente são melhores condutores.

4

## A escolha do material condutor em projetos

- Nem sempre a melhor condutividade é vantajosa;
- Levam-se em consideração outros aspectos ou propriedades, como:
  - **Custo;**
  - Densidade (peso);
  - Resistência mecânica;
  - ...
- Os metais de maior condutividade, mais utilizados, são (ordem decrescente):
  - Cobre, alumínio, prata, chumbo, platina, mercúrio e ouro.
- **Obs.:** O alumínio é bastante utilizado em relação ao cobre, por conta do custo. Já a prata e o ouro, apesar de mais caros, são utilizados por conta de sua grande resistência à oxidação, sendo utilizados em peças de contato elétrico crítico.

5

## Materiais semicondutores

- Nestes materiais, a condutividade é influenciada pela presença de impurezas;
- Sua condutividade é intermediária, quando há presença de impurezas, pois quando estão em seu estado puro, são considerados materiais isolantes;
- Os mais utilizados atualmente são o Silício e o Germânio;
- Os semicondutores se caracterizam por possuírem 4 elétrons livres na camada de valência (camada mais externa do átomo).

6

## Dopagem de semicondutores

- Com a dopagem, a estabilidade do cristal é desfeita;
- Há duas maneiras de se proceder com a dopagem:
  - Com átomos trivalentes (três elétrons na camada de valência), como o Boro, por exemplo. Neste caso, o cristal fica com uma característica positiva, pois ainda fica faltando um elétron, e é chamado tipo P;
  - Com átomos pentavalentes (cinco elétrons na camada de valência), como o Fósforo, por exemplo. Neste caso, o cristal fica com uma característica negativa, pois fica sobrando um elétron livre, e é chamado tipo N.

7

## Materiais isolantes ou dielétricos

- São considerados isolantes aqueles materiais que oferecem resistência à passagem da corrente elétrica;
- São exemplos: borracha, silicone, vidro, cerâmica, papel,...
- Nestes materiais não há elétrons livres, mas quando submetidos a uma diferença de potencial (tensão), ocorre a orientação dos dipolos internos, fenômeno chamado de polarização do dielétrico.
- **IMPORTANTE:** A propriedade isolante do material é mantida até determinada diferença de potencial, chamada de rigidez dielétrica, valor a partir do qual o material passa a se comportar como condutor.

8

## Rigidez dielétrica dos materiais

Material	Rigidez Dielétrica (V/m)
Ar	$3 \times 10^6$
Neoprene	$12 \times 10^6$
Nylon	$14 \times 10^6$
Papel	$16 \times 10^6$
Vidro Pyrex	$14 \times 10^6$
Poliestireno	$24 \times 10^6$
Quartzo	$8 \times 10^6$
Óleo Silicone	$15 \times 10^6$
Teflon	$60 \times 10^6$

9

## Exemplo: capacitor

- O capacitor é um componente eletrônico passivo, que armazena carga elétrica;
- É, basicamente, constituído de duas placas condutoras separadas por um material dielétrico (isolante), geralmente papel, óleo ou cerâmica, dentre outros, até mesmo o ar;
- Veja no desenho esquemático abaixo, o que acontece quando os terminais do capacitor são submetidos a uma diferença de potencial:



A carga no capacitor é:

$$Q = C \cdot U$$

onde: C é a Capacitância e U é a tensão aplicada.

10



Uniube

## Permissividade relativa ou constante dielétrica ( $\epsilon$ ), do isolante ou dielétrico

- É uma propriedade do material isolante ou dielétrico;
- É a relação entre a carga adquirida por um capacitor quando submetido a uma tensão  $U$  e a carga adquirida pelo capacitor se existisse vácuo no lugar de seu dielétrico, sob a mesma tensão  $U$ .

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_0}$$

11



Uniube

## Efeito Corona

- É o fenômeno de ionização do ar ao redor de superfícies condutoras submetidas a altos valores de diferença de potencial elétrico;
- Esta diferença de potencial elétrico não é alta o suficiente para romper o dielétrico (fazendo-o se comportar como um condutor), mas é alta o suficiente para provocar esta ionização;
- Este efeito provoca a geração de luz azulada, ozônio ( $O_3$ ) e seu cheiro característico, ruído e interferência eletromagnética. Gera também perda de energia.
- No entanto, se houver um rompimento do arco elétrico, haverá um arco elétrico;
- Este fenômeno é estudado na disciplina Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica.

12

## Efeito corona (imagens)



13

## Arco elétrico (rompimento da rigidez dielétrica do ar)



14

## Cálculo da resistividade (e condutividade)

- A resistividade elétrica de um material pode ser determinada por:

$$\rho = \frac{R \times A}{l} \left[ \frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \right] \text{ ou } [\Omega \cdot cm]$$

Onde

- $\rho$  é a resistividade elétrica do material ( $\Omega \cdot cm$ );
- $R$  é resistência elétrica ( $\Omega$ );
- $A$  é a seção transversal ( $cm^2$ );
- $l$  é o comprimento do condutor (m).

15

## Resistividade típica de alguns materiais

Material	Resistividade ( $\Omega \cdot m$ )
Prata	$1,64 \times 10^{-8}$
Cobre	$1,72 \times 10^{-8}$
Alumínio	$2,80 \times 10^{-8}$
Ouro	$2,45 \times 10^{-8}$
Carbono	$4,00 \times 10^{-5}$
Germânio	$47 \times 10^{-2}$
Silício	$6,4 \times 10^2$
Papel	1010
Mica	$5 \times 10^{11}$
Vidro	1012
Teflon	$3 \times 10^{12}$

16



## Resistência elétrica de um material

- É dada por:

$$R = \rho \frac{l}{A} [\Omega]$$

- E, deve valer a Lei de Ohm, que estabelece a relação entre a intensidade da corrente elétrica ( $I$ ) e a diferença de potencial aplicada ( $V$ ).

$$V = R \cdot I$$

17

## Materiais elétricos e suas aplicações

18

# Condutores

19

## Cobre (Cu)

- Tem destaque dentre os condutores elétricos;
- Características:
  - boas características mecânicas;
  - oxida lentamente, mesmo em condições em que o ambiente é úmido;
  - fácil de ser moldado a quente.
- No estado duro (encruado), é utilizado onde se exige dureza, resistência à tração e ao desgaste mecânico, como em cabos de linhas aéreas, anéis coletores,...
- Se recozido (processo de tratamento térmico) se torna mais maleável, sendo utilizado em condutores elétricos encapados, bobinas, e também em barramentos;
- Pode ser utilizado em ligas, como o bronze (cobre, estanho,...) que tem maior resistência ao desgaste mecânico (uso em trilhos de contato,...).

20

## Alumínio (Al)

- Em eletricidade, é o segundo metal mais utilizado;
- Características:
  - apresenta preço mais atrativo, quando comparado ao cobre;
  - as peças de alumínio, para serem empregadas no lugar do cobre, precisar ser maiores; no entanto, o peso da peça pode chegar a ser 50% mais leve do que a original em cobre;
  - o Brasil possui várias jazidas de alumínio, já parte do cobre utilizado no país é importado;
  - o alumínio apresenta problemas de fragilidade mecânica, além de oxidar mais rápido.
- Sua fragilidade mecânica faz com que seja utilizado em aplicações onde os esforços são pequenos (ex.: barras condutoras dos rotores dos motores do tipo gaiola de esquilo). Pode ser utilizado em ligas para diversas aplicações.

21

## Chumbo (Pb)

- É utilizado na liga das soldas para eletrônica (para agregar maleabilidade) e também é utilizado na blindagem de condutores elétricos.



22

## Estanho (Sn)

- Utilizado como material de solda ou isolamento;
- Possui alta resistividade e ponto de fusão baixo.



23

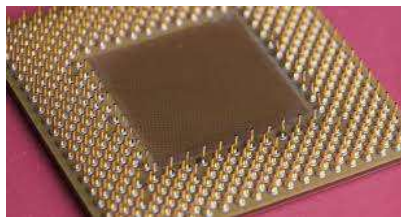
## Prata (Ag)

- Dos metais nobres, é o mais utilizado;
- Apresenta alta resistência à oxidação;
- Utilizado em eletrodos para eletroencefalografia, formando ligas metálicas com outros elementos.

24

## Ouro (Au)

- Metal nobre, de altíssima condutividade elétrica e alta resistência à oxidação;
- Boas características mecânicas;
- Preço (muito) alto;
- Utilizados onde a perda de contato elétrico por oxidação é crítica, como por exemplo, nos pinos dos microprocessadores e equipamentos de telecomunicações (sinais muito fracos).



25

## Platina (Pt)

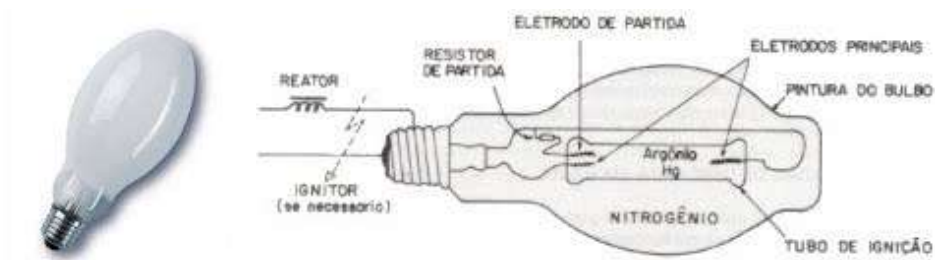
- Tem as mesmas características do ouro;
- Utilizada em termo resistências PT-100 (sensores de temperatura utilizados em automação industrial).



26

## Mercúrio (Hg)

- Em temperatura ambiente, é um metal líquido;
- É utilizado em retificadores, relógios e, em lâmpadas halógenas (de vapor de mercúrio!).



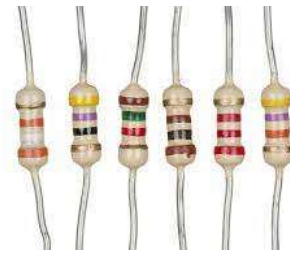
27

## Semicondutores

28

## Carbono (C)

- Utilizado em escovas de máquinas elétricas rotativas (ex.: motores de corrente contínua);
- Utilizado na fabricação de resistores.



29

## Silício (Si)

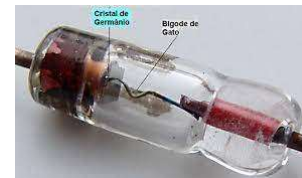
- É o elemento básico da indústria de semicondutores;
- Segundo elemento mais facilmente encontrado na natureza (atrás apenas no Hidrogênio).



30

## Germânio (Ge)

- Também utilizado em semicondutores;
- Porém, para ser utilizado para este fim, precisa ter um alto grau de pureza;
- O alto grau de pureza é conseguido por processos em altas temperaturas. Isto o torna mais caro;
- Vale observar que os semicondutores de Germânio possuem tensão de barreira em torno de 0,3 V, enquanto os de Silício, em torno de 0,7 V.



31

## Isolantes

32



## Isolantes gasosos

- Temos:

- Ar — O ar é utilizado principalmente na isolação de condutores sem isolamento, como nas linhas de transmissão de alta tensão. O ar, quando seco, apresenta em temperatura ambiente uma rigidez dielétrica de 45kV/mm, que decai rapidamente com o aumento da umidade.
- Hexafluoreto de enxofre — é um gás transparente, inodoro e não inflamável. Sua aplicação está em transformadores em subestações e como extintor de arcos elétricos.

33

## Isolantes líquidos

- Temos:

- Óleo mineral — Composto por metana, nafta e pela combinação dos dois. Após um processo de purificação o uso dos óleos de minerais como isoladores se dá no interior de transformadores, capacitores e chaves a óleo.
- Askarel — É um líquido quimicamente composto por pentaclorodifenil. Devido à presença do cloro em sua composição, o askarel é um elemento que precisa de certos cuidados. Em determinadas situações onde a temperatura pode ser muito alta, o askarel decomposto pode liberar cloro na forma de gás. O askarel vem sendo substituído pelo óleo de silicone.
- Óleos de silicone — são líquidos incolores e transparentes com uma grande gama de viscosidade e pontos de ebulição. O preço do óleo de silicone é maior do que o do óleo mineral.



34

## Isolantes sólidos, pastosos e ceras

- Temos:

- Parafina — material pastoso de aparência branca. A sua constante dielétrica se reduz bastante com o aumento da temperatura. É indicado como elemento de recobrimento de outros isoladores.
- Pasta de silicone — Semelhante à estrutura do óleo de silicone, a pasta de silicone é aplicada na proteção de partes de contatos e articulações condutoras e para o recobrimento de partes isolantes expostas.
- Verniz — É um líquido que se solidifica depois de aplicado, passando para a fase sólida. Exemplo de aplicação de verniz na eletricidade é a isolação de fios condutores em bobinas ou no recobrimento de trilhas condutoras em circuitos impressos.
- Papel — matéria-prima da celulose, é empregado em capacitores junto do óleo mineral.

35

## Isolantes sólidos, pastosos e ceras (continuação)

- Temos:

- Cerâmica — a porcelana pode ser utilizada em isoladores, capacitores e porosos:
  - Porcelana de isoladores: destinada à fabricação de isoladores de linhas aéreas de baixa, média ou alta tensão, em transformadores ou em quadros de comando.
  - Porcelana em capacitores: devido ao alto valor de sua constante dielétrica, a porcelana pode ser utilizada em capacitores de baixa ou alta tensão.
  - Porcelana porosa: utilizada para receber os fios resistivos destinados a fornos elétricos, muflas e câmaras de extinção.
- Vidro — Com aplicações semelhantes às cerâmicas, o vidro ainda pode ser utilizado na forma de fibra de vidro, que apresenta baixa condutividade térmica.

36

# Testes

37

## Testes

1. Supondo um material que apresenta as seguintes dimensões: largura de 2mm, altura de 2mm e comprimento de 1,0m, e utilizando um ohmímetro, verificou-se que a resistência do material é de  $0,1\Omega$ . Determine a resistividade ( $\rho$ ) do material em  $\Omega\cdot\text{cm}$ .
  - a)  $5 \times 10^2 \Omega\cdot\text{cm}$ .
  - b)  $5 \times 10^{-2} \Omega\cdot\text{cm}$ .
  - c)  $40 \times 10^{-6} \Omega\cdot\text{cm}$ .
  - d)  $40 \times 10^6 \Omega\cdot\text{cm}$ .
  - e)  $50 \times 10^{-8} \Omega\cdot\text{cm}$ .

38

## Testes

**2.** Um fio de seção circular feito de prata possui um raio de 0,1mm e tem 50cm de comprimento. Assumindo  $\pi = 3,14$ , determine a resistência desse pedaço de fio.

- a)** 0,26  $\Omega$ .
- b)** 0,30  $\Omega$ .
- c)** 0,16  $\Omega$ .
- d)** 10  $\Omega$ .
- e)** 1  $\Omega$ .

39

## Testes

**3.** Supondo que um fio de ouro com raio de 0,15mm tenha 10cm de comprimento. A este fio é aplicada uma diferença de potencial (tensão) de 9 Volts. Determine qual a corrente que atravessa esse fio. Assuma  $\pi = 3,14$  e que a relação entre a tensão, a corrente e a resistência do material é dada pela lei de Ohm:  $U = R.I$ .

- a)** 1000A.
- b)** 10,5A.
- c)** 5239,3A.
- d)** 259,59A.
- e)** 3,6A.

40

## Testes

4. Supondo um cristal de silício intrínseco, esse cristal é considerado um material:
- a) Condutor.
  - b) Semicondutor.
  - c) Isolante.
  - d) Todas as alternativas anteriores.
  - e) Nenhuma das alternativas anteriores.

41

## Testes

5. Das alternativas abaixo, determine aquela que apresente apenas elementos condutores.
- a) Cristal de germânio, prata, ouro.
  - b) Prata, papel, vidro.
  - c) Vidro, papel, chumbo.
  - d) Alumínio, ouro, cobre.
  - e) Tipo-P, Tipo-N, cerâmica.

42

## Para as próximas aulas!

Ler a Unidade 2 do nosso livro texto (ROCHA, M.F. et al. Materiais Elétricos. Porto Alegre: SAGAH, 2018. Disponível na Biblioteca A, acessível via AVA), que trata dos Materiais Magnéticos e Aplicações e dos Dielétricos, páginas 51 a 78.

43

## Fim

44