

## Módulo Inovador

### Quem são os personagens da condução elétrica? (A condução elétrica nos metais e nos eletrólitos sólidos)

Alunos: Alexander Rodrigo Arakaki

Frank Ferrer Sene

João Wander

Silas Macedo

#### 1 - Cronograma de aulas (Roteiro do professor)

Este curso foi planejado para ser realizado em 8 aulas de 45 minutos

<b>Atividade</b>	<b>Momentos</b>	<b>Tempo</b>
<b>1. Condução e resistência elétrica nos materiais (tipo eletrônica)</b>	- Propor e explicar o conteúdo do curso - Atividade I - Medindo a resistência elétrica dos materiais - Leitura do texto I - Discussão da atividade I	2 aulas
<b>2 - Determinando a Resistência de um dispositivo resistivo planar</b>	- Realização do experimento da Atividade II - Determinando a resistência elétrica do desenho a lápis. - Discussão da atividade II	1 aula
<b>3 - O efeito da temperatura na condução elétrica em metais</b>	- Leitura e sistematização do texto II - Discussão das perdas de energia	1 aula
<b>4 - Análogo mecânico para a condução elétrica em metais utilizando um experimento</b>	- Realização do experimento II - Análogo mecânico da condutividade elétrica.	1 aula
<b>5 - Condutividade elétrica nos materiais cerâmicos. Bem vindo à condução iônica</b>	- Leitura do texto III seguida da apresentação e discussão dos Slides I. (histórico e teoria)	1 aula
<b>6 - Aplicações tecnológicas</b>	- Apresentação das principais aplicações tecnológicas associadas aos eletrólitos sólidos cerâmicos	1 aula
<b>7 - Determinando a Resistividade elétrica de um material cerâmico em função da temperatura.</b>	- Realização do experimento III - Determinando a resistividade elétrica de um material cerâmico em função da temperatura. - Desafio final - Uma simples avaliação	1 aula

## **2 - Apresentação do curso**

### **Objetivos Gerais**

- Estimular a aprendizagem efetiva dos conceitos da eletricidade relacionados à condução elétrica do tipo eletrônica enunciada pela Segunda Lei de Ohm
- Estimular a aprendizagem de conceitos correlacionados como a Primeira Lei de Ohm, potência elétrica e análise de circuitos elétricos
- Promover a compreensão dos mecanismos de condução elétrica do tipo iônica, presente predominantemente nos materiais cerâmicos e vítreos.
- Divulgar as principais aplicações tecnológicas relacionadas À condução iônica em materiais cerâmicos.

### **Conteúdo Físico**

- Condutividade elétrica e resistência elétrica em metais (eletrônica)
- Condutividade elétrica em sólidos cerâmicos (iônica)
- Estrutura da matéria (materiais cristalinos)

### **Indicações para leitura**

Material instrucional para aprendizagem, artigos científicos e de divulgação que podem auxiliar no aprofundamento do conhecimento sobre os assuntos tratados neste curso.

1. Pérez, C. A. S., O modelo do elétron livre de Drude completa 100 anos, *Cad.Cat.Ens.Fís.*, v.17, n.3: p.348-359, dez.2000.

2. Bagnato, V. S., Rodrigues, V., Análogo mecânico para condutividade elétrica dos metais: Efeito da temperatura, *Revista Brasileira de Ensino de física*, v. 28, n. 1, p. 35 - 39, (2006).

3. Condutores Iônicos: Chemkeys. Disponível em:  
<<http://www.chemkeys.com/bra/index.htm>> Acesso em 02 julho de 2008.

4. Células a combustível; Disponível em:  
<<http://celulasdecombustivel.planetaclix.pt/index.html>> Acesso em 02 julho de 2008.

## Roteiros

### Atividade I - Medindo a resistividade elétrica dos materiais.

**Objetivo:** Esta atividade tem por objetivo iniciar uma problematização relacionada à propriedades complementares de resistência elétrica e condutividade.

**Material utilizado:** multímetro (ohmímetro) xing ling, pedaços de fio elétrico, placas e bastões de diversos materiais (vidro, plástico, grafite, arame) e outros objetos pequeno.

#### Pequeno roteiro de atividades:

- 1 - Ligar o multímetro na função de medidor de resistência elétrica.
- 2 - Medir o valor da resistência elétrica entre as extremidades escolhidas de cada objeto e preencher a Tabela I com os resultados obtidos.

Tabela I – Valores de resistência elétrica de diversos materiais.

Material	Resistência elétrica ( $\Omega$ )	Condutividade elétrica ( $\Omega^{-1}$ )

3 - Organize os materiais em três grupos distintos em função dos valores das resistências elétricas medidas.

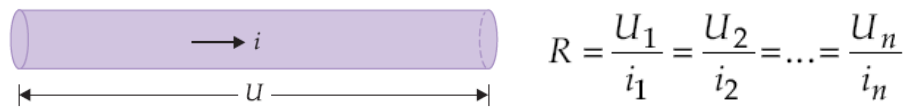
4 - Quais são os melhores condutores e quais são os piores condutores elétricos

5 - Discuta as possíveis aplicações tecnológicas tradicionais ou avançadas para estas duas categorias de materiais.

### Texto I - Aspectos históricos e práticos sobre a segunda lei de ohm

#### Primeira lei de Ohm

Aplicando uma diferença de potencial  $U$  nos extremos de um pedaço de um fio condutor, e mantendo a temperatura do mesmo, notamos que, quase sempre, essa tensão  $U$  será proporcional a corrente  $i$ .



**Ohm** definiu que a constante de proporcionalidade entre  $U$  e  $i$  seria a “resistência elétrica” do condutor normalmente simbolizado por  $R$ .

$$R = \frac{U}{i}$$

Portanto,  $U = R \cdot i$

$$\frac{\text{volt (V)}}{\text{ampère (A)}} = \text{ohm} (\Omega)$$

A unidade de medida da resistência é o ohm e é simbolizada pela letra grega  $\Omega$  (ômega maiúsculo).

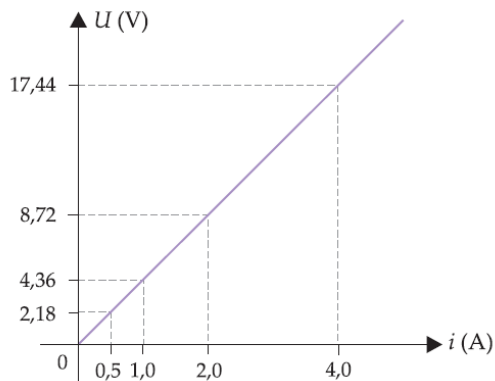
Ohm concluiu:

*“Mantendo-se a temperatura de um resistor constante, a diferença de potencial aplicada nos seus extremos é diretamente proporcional à intensidade da corrente elétrica”.*

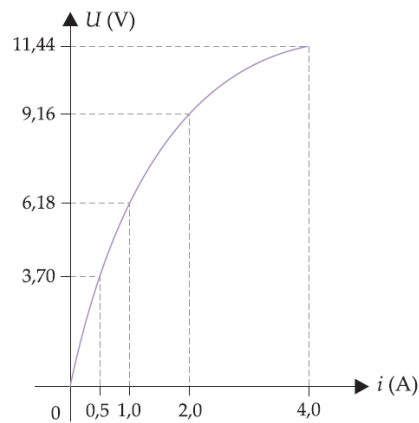
Condutores que mantêm sua resistência constante são chamados de **resistores ôhmicos**, e aqueles condutores que tem a sua resistência variante são chamados de **resistores não-ôhmicos**. Um exemplo do comportamento da tensão em função da corrente de um condutor ôhmico está ilustrado nos gráficos a seguir, ambos com referência à tabela abaixo.

$i$ (A)	$U_1$ (V)	$U_2$ (V)
0,0	0,00	0,00
0,5	2,18	3,70
1,0	4,36	6,18
2,0	8,72	9,16
4,0	17,44	11,44

**Tabela de valores de corrente e tensão para dois condutores distintos.**



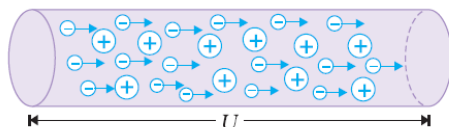
**Gráfico do comportamento da tensão em função da corrente em um condutor ôhmico**



**Gráfico do comportamento da tensão em função da corrente em um condutor não-ôhmico**

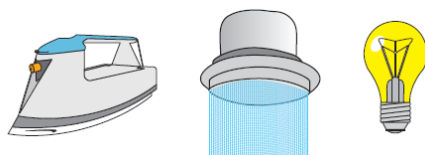
George Simon Ohm nasceu em Erlangen na Alemanha em 1787 e morreu em 1854 na cidade de Munique. Em 1827 ele estabeleceu teoricamente a lei que levaria seu nome.

Um condutor metálico de eletricidade é formado por uma rede de cátions fixos com uma nuvem de elétrons livres que transportam a carga. O movimento dos elétrons dentro do condutor é aleatório sem a presença de uma diferença de potencial. Ao se aplicar uma diferença de potencial  $U$  às extremidades do condutor, os elétrons passam a se deslocar em uma direção preferencial, conforme a ilustração:



### **Movimento dos elétrons dentro de um condutor metálico com a aplicação de uma diferença de potencial $U$**

A propriedade da resistividade elétrica exibida pelos materiais e o efeito Joule nos proporcionam certas utilidades e comodidades como a água aquecida pela resistência do chuveiro para o banho, a luz das lâmpadas incandescentes, ferro de passar, etc.



### **Algumas aplicações da resistência elétrica**

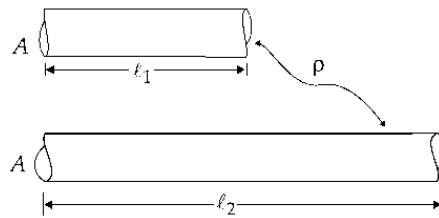
### **Segunda Lei de Ohm**

Analisando um condutor cilíndrico de comprimento  $l$  e de seção transversal  $A$ , observa-se que sua resistência elétrica será maior quando o comprimento  $l$  for maior e a seção  $A$  for menor, e a resistência elétrica será menor quando o comprimento  $l$  for menor e a seção  $A$  for maior, e depende do material do qual é constituído o condutor.

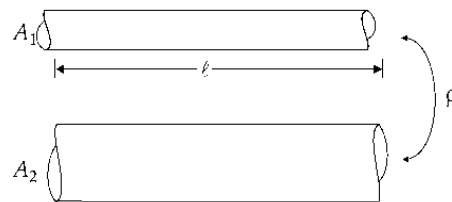


**Condutor de seção transversal  $A$  e comprimento  $l$**

Portanto, aumentando-se o comprimento de um condutor, aumenta-se a resistência elétrica;



Aumentando-se a área do condutor, diminui-se a resistência elétrica.



Portanto, a **2ª Lei de Ohm**, pode ser expressa da seguinte forma:

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{A}$$

$$\left. \begin{array}{l} u(R) = \text{ohm } (\Omega) \\ u(\ell) = \text{metro (m)} \\ u(A) = \text{m}^2 \end{array} \right\} u(\rho) = \Omega \cdot \text{m}$$

$\rho$  (letra grega Rô) representa a resistividade elétrica do condutor usado e a sua unidade de medida é dada em  $\Omega \cdot \text{m}$  no SI.

Ohm concluiu:

“A resistência elétrica de um condutor homogêneo de seção transversal constante é diretamente proporcional ao seu comprimento e inversamente proporcional à sua área de seção transversal e depende do material do qual ele é feito”.

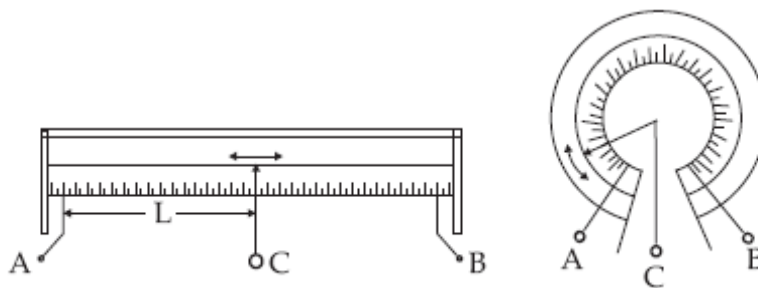
A resistividade é uma característica do material usado na constituição do condutor. Na tabela abaixo temos a resistividade de alguns metais mais utilizados nas indústrias eletroeletrônicas:

Alumínio	$2,8 \cdot 10^{-8}$	Âmbar	$5 \cdot 10^{14}$
Cobre	$1,7 \cdot 10^{-8}$	Enxofre	$1 \cdot 10^{15}$
Ferro	$10 \cdot 10^{-8}$	Germânio	0,45
Mercúrio	$96 \cdot 10^{-8}$	Silício	640
Carbono	$3\,500 \cdot 10^{-8}$		

#### Alguns valores de resistividade em $\Omega \cdot m$

Considera-se a resistividade elétrica do material como uma constante dele, porém ele varia com a temperatura.

Um dispositivo de resistência variável pode ser obtido simplesmente por variar o comprimento em que a corrente elétrica passa por ele, esse dispositivo chama-se potenciômetro.



**Figura ilustrativa de dois exemplos de potenciômetros. A resistência elétrica é modificada ao variar-se o comprimento do condutor de A a C através da mudança de posição do contato C.**



## AULA 2

### Atividade II - Determinando a resistência elétrica do desenho a lápis.

**Objetivo:** Aprendizagem efetiva dos conceitos relacionados à segunda lei de Ohm através da terminação dinâmica da resistência elétrica de um filme planar de grafite variando-se a espessura, e o comprimento deste elemento resistivo.

#### Material utilizado:

- folhas de papel (preferência para papel mais espesso que o das folhas de caderno)
- lápis de grafite mole (B6)
- um multímetro (xing ling)
- folha de papel milimetrado

#### Pequeno roteiro de atividades:

1 - Utilize uma folha de papel para desenhar os objetos planares apresentados na Figura 1.



Figura 1 – Traços a lápis em papel de espessuras diferentes.

2 - Com o multímetro na função de medidor de resistência elétrica (ordem de grandeza na escala de maiores valores), meça a resistência elétrica entre as duas extremidades do elemento resistivo A.



Figura 2 – Multímetro digital

3 - Varie a posição de uma das pontas de prova, anote na Tabela II, o valor da resistência elétrica e o comprimento do elemento resistivo em cada situação.

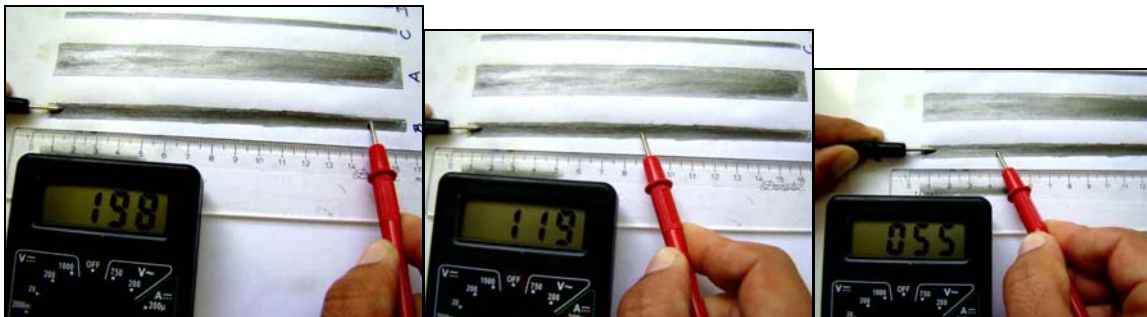
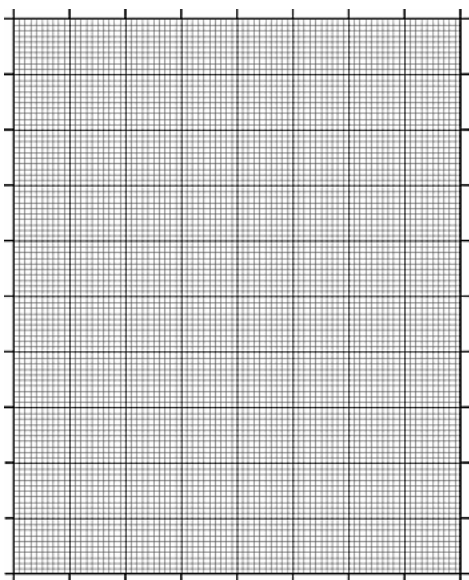


Figura 3. Variação da resistência elétrica com o comprimento do traço

Tabela II – Anotação dos valores de resistência elétrica e respectivo comprimento do traço A.

<b>Resistência elétrica (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Comprimento (cm)</b>

4 - Construa um gráfico relacionando o valor da resistência elétrica o elemento resistivo em função do seu comprimento.



5 – É possível estabelecer um modelo matemático que represente o fenômeno estudado?

6 - Meça o valor da resistência elétrica dos elementos resistivos B, C e D e anote os valores obtidos na Tabela III.

Tabela III - Anotação dos valores das resistências dos traços B, C e D.

<b>Resistência elétrica (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Espessura (cm)</b>

6 - Discuta se é possível estabelecer uma relação qualitativa entre a espessura dos elementos resistivos e a resistência elétrica.

### **AULA 3**

#### **Leitura do texto II - O efeito da temperatura na condução elétrica em metais**

Existem muitos efeitos a nível microscópico que contribuem para impedir o movimento dos elétrons num metal e, portanto limitam os valores possíveis para a condutividade. Dentre estes efeitos, está o fato de que, quando os elétrons são forçados a movimentarem-se pela ação do campo elétrico externo, eles colidem com os íons (átomos) que constituem o material, transferindo a esses toda a energia cinética adquirida pela ação do campo elétrico. O resultado destas colisões é uma transferência de energia dos elétrons para o material como um todo, criando movimento dos átomos, e isto corresponde ao aquecimento do material (Efeito Joule).

Existe um modelo matemático simples que permite calcular  $\sigma$  supondo uma rede de pontos com os quais os elétrons acelerados sofrerão colisões. Este é chamado de modelo de Drude. Neste modelo, um gás de elétrons livres, sofre ação de um campo na presença de um arranjo de obstáculos, que correspondem aos átomos que constituem o metal. As colisões ocorrem em média a cada decorrência de um certo intervalo de tempo e em cada encontro toda a energia adquirida é transferida aos obstáculos. O modelo de Drude é essencialmente mecânico, e lida com trajetos de elétrons de tamanhos compatíveis com as dimensões atômicas.

## AULA 4

### Atividade III - Análogo mecânico para a condução elétrica em metais

**Objetivo:** Aprendizagem efetiva dos conceitos relacionados à condução elétrica nos metais através da determinação do inverso do tempo de queda de uma bolinha em uma tábua de madeira inclinada com pregos distribuídos de forma homogênea, conforme a figura 1, situação análoga ao modelo de Drude.

#### Material utilizado:

- Tábua de madeira com guias laterais de 100 cm de comprimento
- Pregos
- Relógio ou cronômetro
- Bolinha de gude ou de rolamento
- Motor elétrico com placa fora de centro (fonte de oscilação)

#### Pequeno roteiro de atividades:

1 – Montagem da rampa simulando um condutor metálico (modelo mecânico de Drude), conforme figura 1.

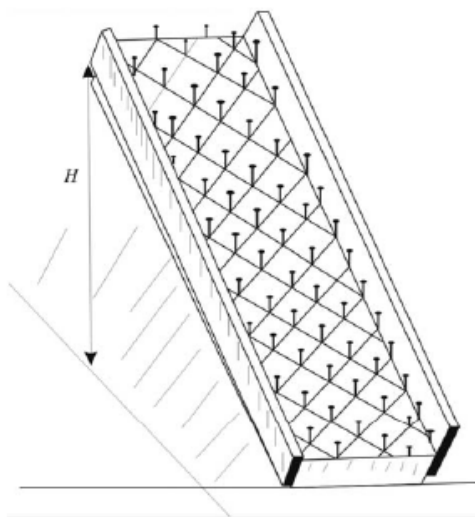


Figura 1 – Montagem experimental do plano inclinado

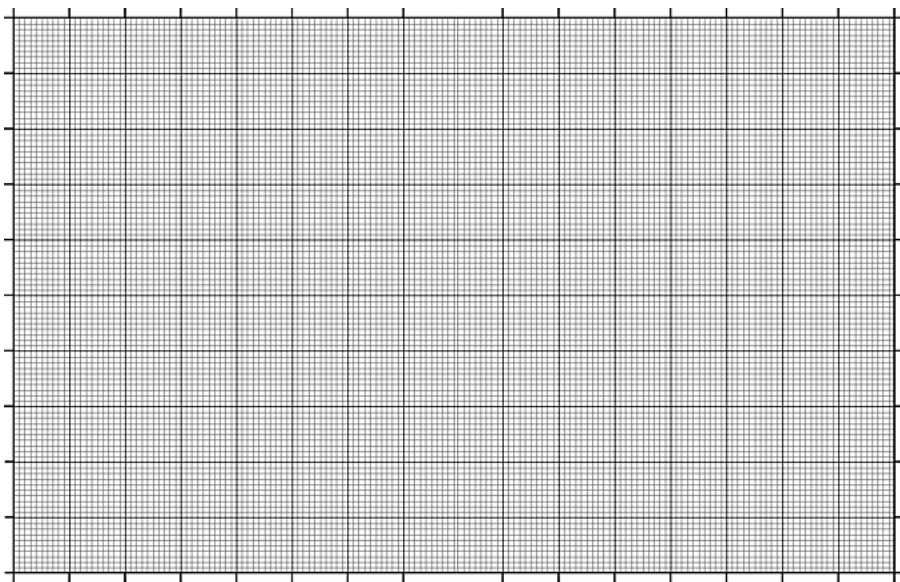
2 – Escolhendo uma altura  $H \sim 30$  cm, faça 3 lançamentos com a bolinha e anote os valores de  $1/\text{tempo}$  na tabela I.

3 – Escolhendo alturas  $H$  de 50 e 100cm, faça 3 lançamentos com a bolinha e anote os valores de  $1/\text{tempo}$  na tabela I.

Tabela I – Valores do tempo de queda da bolinha na rampa.

<b>Altura H (mm)</b>	<b>1/Tempo (s) (1)</b>	<b>1/Tempo (s) (2)</b>	<b>1/Tempo (s) (3)</b>
30			
50			
100			

4 - Construa um gráfico relacionando o valor das alturas  $H$  e o inverso do tempo de queda medido ( $1/\text{tempo}$ ).



5 – É possível estabelecer um modelo matemático que represente o fenômeno estudado?

6 – Comparando com um condutor metálico, o que representam a altura  $H$ , o inverso do tempo de queda ( $1/t$ ) e a inclinação da reta?

7 – Ligue o motor elétrico acoplado á tábua de lançamento em uma frequência baixa e faça 3 lançamentos da altura fixa de 100cm.

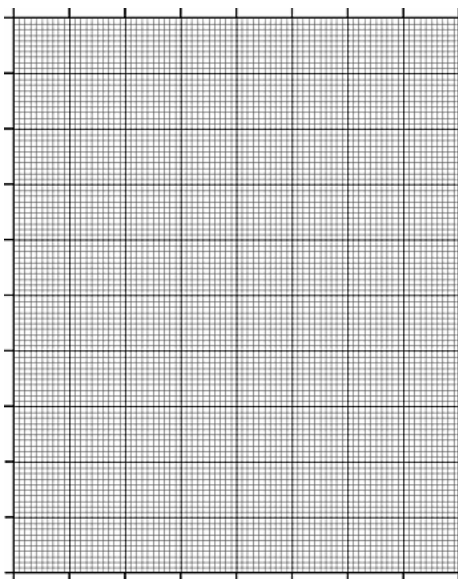
8 – Anote os valores do inverso do tempo ( $1/t$ ) na tabela II.

Tabela II – Valores do tempo de queda da bolinha na rampa com motor vibrador.

<b>Freqüência (Arbitrária)</b>	<b>1/Tempo (s) (1)</b>	<b>1/Tempo (s) (2)</b>	<b>1/Tempo (s) (3)</b>
baixa			
média			
alta			

9 – Utilize uma freqüência intermediária e uma freqüência alta, faça três medidas de tempo em cada freqüência para a altura de 100cm e anote os valores de  $1/\text{tempo}$  na tabela II.

10 – Construa um gráfico relacionando as freqüências de oscilação e o inverso do tempo de queda das bolinhas.



11 – O que acontece quando se aumenta a vibração do sistema?

## AULA 5

### Leitura do texto III - Condutividade elétrica nos materiais cerâmicos: "Bem vindos à condução iônica"

Quando iniciamos estudos sobre eletricidade em condutores metálicos, temos contato com três propriedades fundamentais: corrente elétrica (símbolo =  $i$ , unidade SI=A (ampére)), a resistência elétrica (símbolo= $R$ , unidade SI= $\Omega$  (ohm)) e potencial elétrico (símbolo  $U$ , unidade SI=V (volt)). O termo corrente elétrica está associado a um fluxo de carga através do condutor. No caso dos condutores metálicos este fluxo de carga está associado diretamente ao transporte de elétrons que são transferidos de um ponto de maior potencial elétrico para um de menor potencial. Ao atravessar um determinado material, a corrente de elétrons sofre resistência ao seu movimento e, curiosamente, cada material apresenta uma resistência diferenciada.

Estas três quantidades fundamentais estão relacionadas entre si pelo que conhecemos como Lei de Ohm, expressada matematicamente por:

$$U = R.i \quad (1)$$

Esta expressão nos diz que o fluxo de elétrons em um condutor ( $i$ ) é diretamente proporcional a diferença de potencial aplicada. A constante de proporcionalidade entre as duas quantidades será a resistência elétrica do material. Em outras palavras, para um condutor metálico, sob o efeito de uma diferença de potencial, quanto menor a resistência elétrica do material, maior será a corrente circulando através do mesmo e vice-versa.

Quando 1 A de corrente flui através de um material que apresenta uma resistência de 1  $\Omega$  temos uma diferença de potencial de 1 V.

Das três propriedades mencionadas acima, a resistência é a única que preserva as características elétricas do material e conseqüentemente pode ser utilizada como uma propriedade apropriada para classificar diferentes materiais como bons e maus condutores de eletricidade. Uma outra propriedade que pode ser empregada para classificar estas mesmas propriedades elétricas de materiais é a condutância elétrica. Esta propriedade corresponde única e exclusivamente ao inverso da resistência e pode ser entendida



fisicamente como a facilidade com que um determinado material permite a condução de corrente elétrica. Sua unidade é definida como  $\Omega^{-1}$ .

Uma questão interessante que surge no estudo da condução de eletricidade é que alguns materiais em determinadas condições físicas não conduzem eletricidade. Entretanto, alterando-se estas condições o mesmo material pode passar a conduzir eletricidade. Um exemplo simples a ser considerado é o sal de cozinha, NaCl. Este sal na temperatura ambiente é um péssimo condutor de eletricidade e é caracterizado como um isolante. Entretanto, basta fundi-lo ou dissolvê-lo em água que se percebe uma elevada taxa de condução de eletricidade. Fenômenos como este levaram cientistas do século passado a questionarem se o mecanismo de condução de eletricidade em metais era o mesmo observado, por exemplo, no NaCl.

O primeiro a sugerir que os mecanismos de condução eram completamente distintos foi Arrhenius. Entre 1880 e 1890, Arrhenius, estudando a condutividade elétrica de soluções ácidas, sugeriu que o mecanismo de condução elétrica em determinadas substâncias ocorria devido a migração de íons e não de elétrons como nos condutores metálicos. Esta hipótese abriu as portas para uma série de desenvolvimentos sobre a condutividade elétrica e deu o prêmio Nobel de química à Arrhenius. Apenas como curiosidade, embora os estudos de dissociação iônica tenham proporcionado reconhecimento internacional à Arrhenius, verifica-se em suas declarações profundas preocupações com o meio ambiente. Arrhenius sugeria já no início do século que o desenvolvimento industrial poderia alterar significativamente as condições climáticas do planeta.

Atualmente verifica-se que a condução elétrica ocorre pela migração, de elétrons ou íons, em distâncias da ordem do tamanho dos cristais. Geralmente predomina a condução por um ou outro carregador, mas em alguns materiais inorgânicos observa-se a condução eletrônica e iônica simultaneamente.

Valores de condutividade típicos estão na Tabela I . As condutividades são geralmente dependentes da temperatura e aumentam com o aumento da temperatura para todos os materiais, exceto os metais. Nesse caso, a maior condutividade é observada em baixas temperaturas. Em alguns metais ocorre ainda o fenômeno da supercondutividade em temperaturas próximas do zero absoluto, isto é,  $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$  ou  $0\text{ K}$ .

Tabela I Valores típicos de condutividade elétrica.

Condutores iônicos	Cristais iônicos	$< 10^{-16}-10^{-2}$
	Eletrólitos sólidos	$10^{-1}-10^3$
	Eletrólitos fortes (líquidos)	$10^{-1}-10^3$
Condutores Eletrônicos	Metais	$10^3-10^7$
	Semicondutores	$10^{-7}-10^5$
	Isolantes	$< 10^{-10}$

A condutividade iônica, derivada de migração de íons, não ocorre em grande extensão na maioria dos sólidos iônicos e covalentes, tal como os óxidos e haletos. Pode parecer controverso mencionar condutividade iônica em sólidos covalentes, entretanto, é preciso ter em mente que a expressão "sólidos covalentes" se refere à predominância da covalência, sem desprezar qualquer parcela de caráter iônico nas ligações. Nestes casos, os átomos tendem a permanecer essencialmente fixos em suas posições de retículo e só podem se mover através de defeitos no retículo cristalino. Somente em temperaturas altas, onde a concentração de defeitos torna-se realmente alta e onde os átomos adquirem energia térmica, essa condutividade iônica torna-se apreciável. Como exemplo, a condutividade iônica do NaCl em aproximadamente 1073 K (800 °C), pouco abaixo de sua fusão, é aproximadamente  $10^{-1} \text{ Sm}^{-1}$ , enquanto na temperatura ambiente o NaCl é um isolante. Existe, contudo, um grupo de sólidos chamado indistintamente de eletrólitos sólidos, condutores iônicos rápidos ou condutores superiônicos, nos quais um conjunto de íons, os ânions ou os cátions, podem se mover livremente. Tais materiais tem frequentemente estruturas cristalinas muito específicas, nas quais existem camadas ou túneis abertos, ao longo dos quais os íons podem se mover. Os valores de condutividade desses materiais são comparáveis aos observados para eletrólitos líquidos fortes. Um exemplo é o valor de condutividade de  $10^{-1} \text{ Sm}^{-1}$  apresentada pelo íon  $\text{Na}^+$  em  $\alpha$ -alumina, a 298 K (25 °C). Existe um grande interesse em estudar as propriedades desses eletrólitos sólidos, em desenvolver novos exemplos desse tipo de material, e em estender sua gama de aplicações em dispositivos eletroquímicos de estado sólido

## A condução iônica

Em um condutor de íons de oxigênio, a corrente flui pela condução dos íons através da rede cristalina. Este é um processo termicamente ativado, onde os íons pulam de uma posição da rede para outra (de um vale de potencial para outro) em um caminho randômico. Quando um campo elétrico é aplicado, há uma direção de arraste (movimento preferencial dos íons) que se sobrepõe no movimento térmico.

A condução iônica depende da mobilidade dos íons e conseqüentemente da temperatura. A altas temperaturas, a condutividade pode chegar a  $1 \text{ Scm}^{-1}$ , que é da mesma magnitude dos eletrólitos líquidos. Para que haja a condução, o cristal precisa conter posições atômicas ou sítios desocupados, que são as posições equivalentes dos íons de oxigênio na rede. A barreira de energia para migração de um sítio ocupado para um desocupado deve ser pequeno (menor que  $1 \text{ eV}$ ). Isto parece ser pouco comum, pois o tamanho dos íons de oxigênio é relativamente grande e parece mais razoável que íons menores de metais migrem com a aplicação de um campo elétrico. Isto ocorre porque algumas estruturas especiais tornam possível a migração de íons de oxigênio, e algumas delas possuem nomes especiais como: óxidos de estrutura fluorita, perovskitas, famílias LAMOX e BIMEVOX.

Os óxidos de estrutura fluorita são os mais comuns e clássicos materiais condutores de íons de oxigênio. A estrutura do cristal consiste em uma rede cúbica de oxigênio com centros alternados ocupados por cátions. Os cátions são arranjados em uma estrutura cúbica de faces centradas com ânions ocupando posições tetraédricas. Isto leva a uma estrutura aberta com largos espaços vazios.

A fórmula geral da estrutura fluorita é  $\text{AO}_2$ . Onde A é um cátion, por exemplo U, TH e Ce. Um material condutor iônico clássico é a zircônia ( $\text{ZrO}_2$ ) estabilizada com ítria ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ). Na zircônia o íon  $\text{Zr}^{4+}$  é muito pequeno para sustentar a estrutura fluorita em baixas temperaturas, por isso ele tem que ser parcialmente substituído por um cátion de raio atômico maior, chamado dopante. A dopagem envolve a substituição por cátions de valência menor na rede. A dopagem da zircônia com a ítria produz a zircônia estabilizada com ítria (YSZ). Para manter a neutralidade de carga, vacâncias de oxigênio são introduzidas, que permitem a migração dos íons de oxigênio.

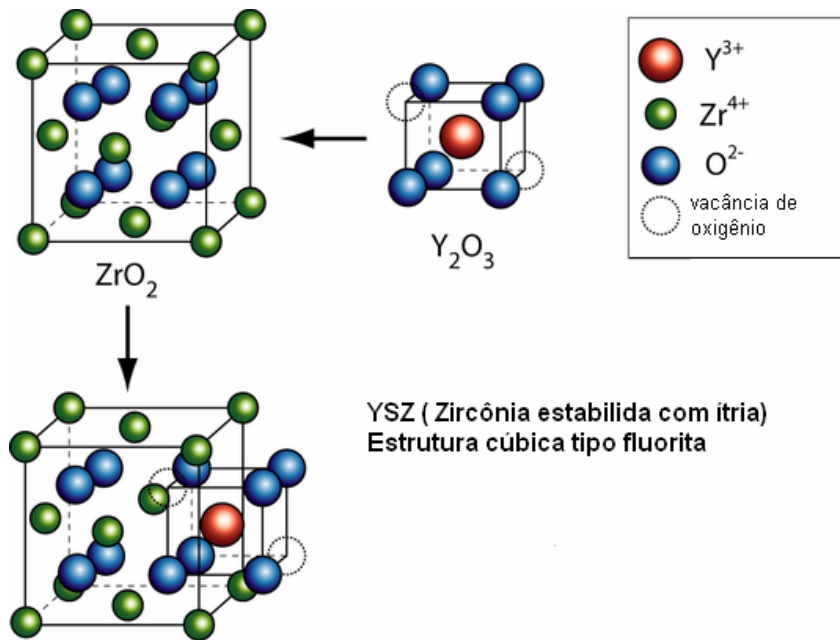


Figura ilustrando as estruturas da zircônia, da ítria e da YSZ.

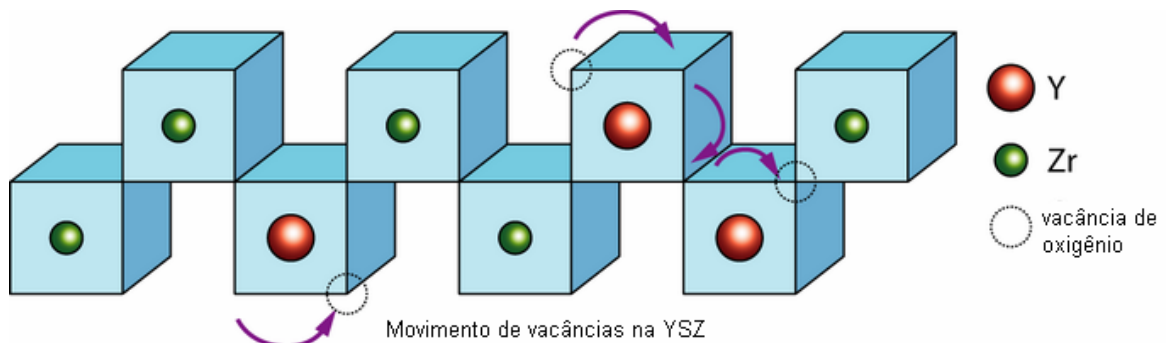


Figura ilustrativa da movimentação das vacâncias de oxigênio nos vértices dos cubos.

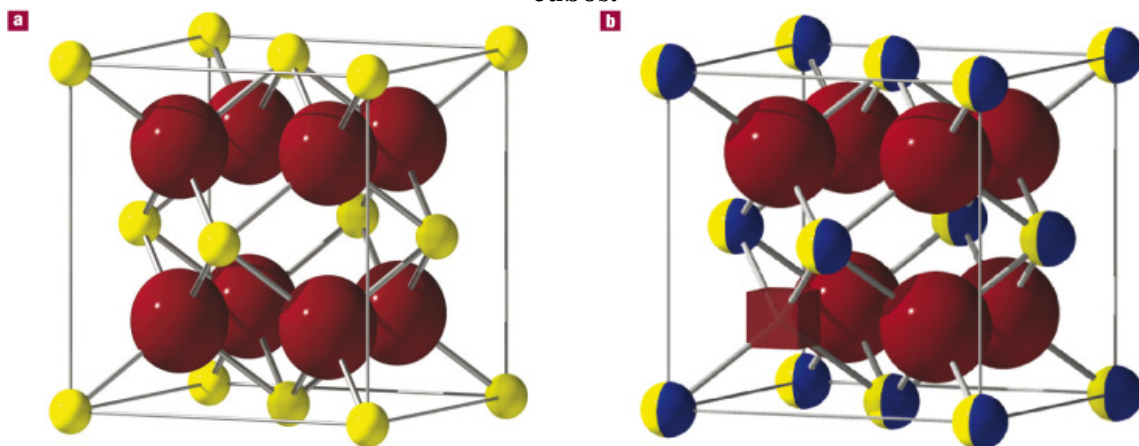


Figura ilustrando a estrutura fluorita. a) As esferas amarelas representam os cátions e as esferas vermelhas os ânions de oxigênio. b) As esferas azuis representam os cátions parcialmente substituídos por um dopante e o cubo vermelho representa uma vacância de oxigênio.

O movimento dos íons de oxigênio através da rede cristalina é termicamente ativado, pois quanto maior a temperatura, maior será a quantidade de defeitos produzidos no material e maior vibração da rede cristalina, diminuindo a barreira de potencial que dificulta a passagem dos íons de oxigênio de uma vacância para outra.

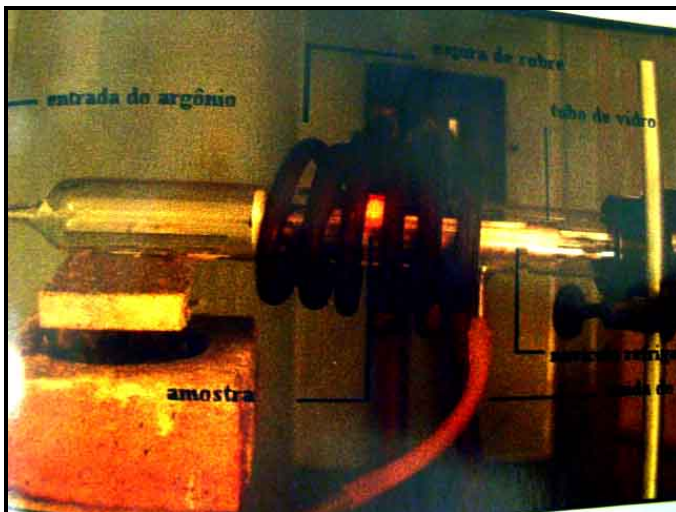
## AULA 6

### Texto IV - Aplicações tecnológicas dos condutores iônicos

Detector de oxigênio



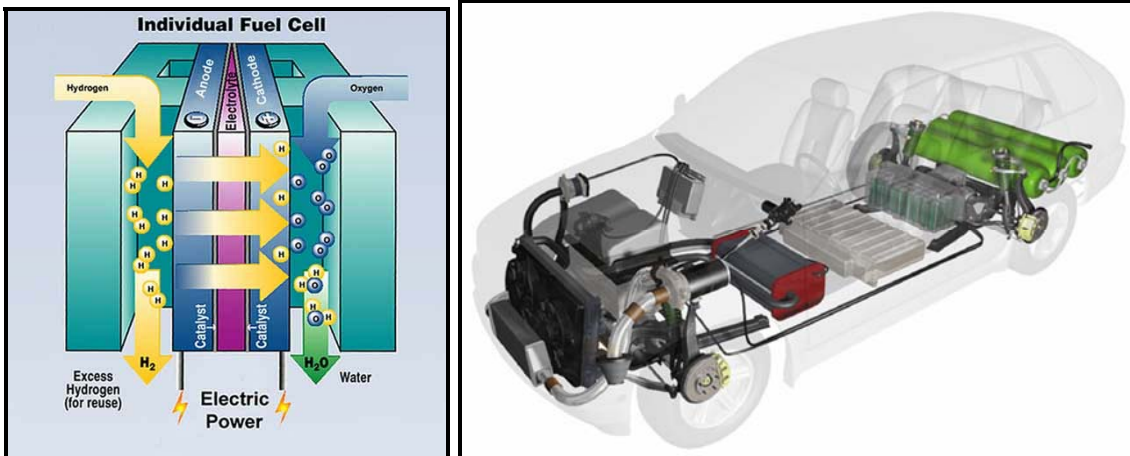
Cadinhos para fornos de auto-indução



## Varistores Cerâmicos



## Célula a combustível (Fuel Cell)

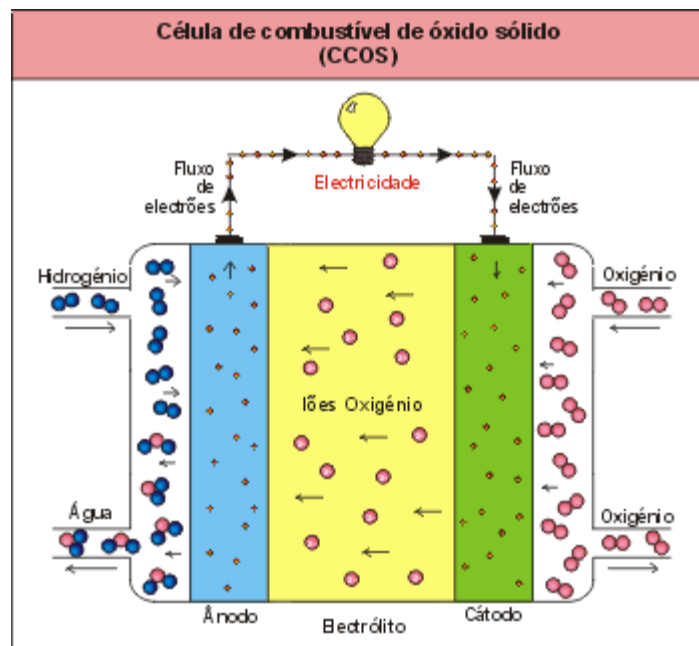


## A célula a combustível

Célula a combustível (Fuel Cells) é uma tecnologia que utiliza o hidrogênio e o oxigênio para gerar eletricidade com alta eficiência, e também vapor d'água quente resultante do processo químico na célula a combustível. A importância da célula está na sua alta eficiência e na ausência de emissão de poluentes quando se utiliza o hidrogênio puro, além de ser silenciosa.

O seu principal combustível, o hidrogênio, pode ser obtido a partir de diversas fontes renováveis e também a partir de recursos fósseis, mas com muito menor impacto ambiental. Será em breve uma solução para a geração de energia no próprio local de consumo, desde uma indústria, residência, centros comerciais, além de sua utilização em automóveis, aviões, motos, ônibus e equipamentos portáteis, tal como o telefone celular e os laptops.

As células de combustível de óxido sólido funcionam na gama de temperaturas entre os 600 e os 1000 °C, possibilitando assim velocidades de reação elevadas sem a utilização de catalisadores nobres. O eletrólito utilizado neste tipo de célula é um metal óxido, sólido e não poroso, usualmente  $ZrO_2$ -estabilizada com  $Y_2O_3$ . Na gama de temperaturas elevadas de funcionamento, os íons de oxigênio são transportados do ânodo para o cátodo.



**Figura ilustrativa de uma célula a combustível de óxido sólido.**

## AULA 7

### **Experimento VI - Determinando a Resistividade elétrica de um material cerâmico em função da temperatura.**

**Objetivos:** Verificar o comportamento do tipo Arrhenius da Resistividade elétrica do tipo iônica de um material cerâmico em função do aumento da temperatura.

#### **Material utilizado:**

- Uma amostra de zircônia estabilizada com itria ( $ZrO_2-Y_2O_3$ ) no formato de pastilha cilíndrica. ( $d=10mm$ )
- Uma chapa quente que atinge a temperatura de  $600^{\circ}C$  com ajuste de temperatura.
- Duas lâminas finas quadradas de aço inoxidável ou cobre ( $20x20mm$ )
- um multímetro (xing ling) na função ohmímetro
- dois fios de nicrotal ou de cobre descascados (comprimento de 5 cm)

#### **Procedimento Experimental**

<b>Temperatura (u.a)</b>	<b>Resistência elétrica (<math>\Omega</math>)</b>
<b>ambiente</b>	
<b>intermediária</b>	
<b>máxima</b>	

- 1 - Coloque a amostra cerâmica entre as duas lâminas de aço inoxidável
- 2 - Conecte as pontas de prova do multímetro aos terminais do fio de nicrotal.
- 3 - Mantenha o conjunto cerâmica-lâminas na superfície da chapa quente.
- 4 - Meça a resistência elétrica entre os terminais de nicrotal e anote o valor na Tabela IV.



- 5 - Ligue a chapa quente posicionando o controlador de temperatura para a posição intermediária. Espere a temperatura se estabilizar e meça a resistência elétrica entre os terminais de nicrotal. Anote o resultado.
- 6 - Posicione o controlador de temperatura para a posição máxima. Espere a temperatura se estabilizar. Meça o valor da resistência elétrica entre os terminais de nicrotal e anote os resultados na Tabela IV
- 7 - Discuta o que ocorre com a resistência elétrica em função da temperatura.
- 8 - Relacione os resultados obtidos com a condução elétrica do tipo eletrônica e iônica e aponte as discrepâncias.