

**GUALTER  
NEWTON  
HELOU**

**MANUAL DO  
PROFESSOR**

# FÍSICA 3

**ELETRICIDADE  
FÍSICA MODERNA**

COMPONENTE CURRICULAR
<b>FÍSICA</b>
3º ANO
ENSINO MÉDIO

 **Editora  
Saraiva**

### Gualter José Biscuola

- Engenheiro Eletricista formado pela Universidade de São Paulo
- Professor de Física na rede particular de ensino

### Newton Villas Bôas

- Licenciado em Física pela Universidade de São Paulo
- Professor de Física na rede particular de ensino

### Ricardo Helou Doca

- Engenheiro Eletricista formado pela Faculdade de Engenharia Industrial (FEI-SP)
- Professor de Física na rede particular de ensino

# FÍSICA

**ELETRICIDADE  
FÍSICA MODERNA**

**MANUAL DO  
PROFESSOR**

COMPONENTE CURRICULAR
<b>FÍSICA</b>
3º ANO
ENSINO MÉDIO



3ª edição | 2016 | São Paulo

 **Editora  
Saraiva**

Física 3  
 © Gualter José Biscuola, 2016  
 © Newton Villas Bôas, 2016  
 © Ricardo Helou Doca, 2016

Direitos desta edição:  
 Saraiva Educação Ltda., São Paulo, 2016  
**Todos os direitos reservados**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
 (Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Biscuola, Gualter José  
 Física, 3 : eletricidade : física moderna /  
 Gualter José Biscuola, Newton Villas Bôas,  
 Ricardo Helou Doca. -- 3. ed. -- São Paulo :  
 Saraiva, 2016.

Obra em 3 v.  
 Suplementado pelo manual do professor.  
 Bibliografia.  
 ISBN 978-85-472-0563-8 (aluno)  
 ISBN 978-85-472-0564-5 (professor)

I. Física (Ensino médio) I. Villas Bôas,  
 Newton. II. Doca, Ricardo Helou. III. Título.

16-03509

CDD-530.07

**Índices para catálogo sistemático:**

I. Física : Ensino médio 530.07

<b>Diretora editorial</b>	Lidiane Vivaldini Olo
<b>Gerente editorial</b>	Luiz Tonolli
<b>Editor responsável</b>	Viviane Carpegiani
<b>Editor</b>	Luís Felipe Porto Mendes
<b>Assistentes editoriais</b>	Aline dos Reis Neves, Erich Gonçalves da Silva, Rani de Oliveira e Souza
<b>Gerente de produção editorial</b>	Ricardo de Gan Braga
<b>Gerente de revisão</b>	Hélia de Jesus Gonsaga
<b>Coordenador de revisão</b>	Camilla Christi Gazzani
<b>Revisores</b>	Lilian Miyoko Kumai, Luciana Azevedo, Patrícia Cordeiro
<b>Produtor editorial</b>	Roseli Said
<b>Supervisor de iconografia</b>	Silvio Klugin
<b>Coordenador de iconografia</b>	Cristina Akisino
<b>Pesquisa iconográfica</b>	Fernando Cambetas
<b>Licenciamento de textos</b>	Marina Murphy Diniz
<b>Coordenador de artes</b>	Narjara Lara
<b>Design e capa</b>	Sergio Cândido com imagens de General-fmw/Shutterstock
<b>Edição de arte</b>	Alexandre Miasato Uehara
<b>Diagramação</b>	Setup
<b>Assistente</b>	Camilla Felix Cianelli
<b>Ilustrações</b>	CJT/Zapt, Luís Fernando R. Tucillo, Luciano da S. Teixeira, Paulo C. Ribeiro, Rodval Matias, Setup
<b>Tratamento de imagens</b>	Emerson de Lima
<b>Protótipos</b>	Magali Prado
<b>Impressão e acabamento</b>	

077727.003.001

O material de publicidade e propaganda reproduzido nesta obra está sendo utilizado apenas para fins didáticos,  
 não representando qualquer tipo de recomendação de produtos ou empresas por parte do(s) autor(es) e da editora.  
 Nos livros desta coleção são sugeridos vários experimentos. Foram selecionados experimentos seguros, que não oferecem riscos ao estudante.  
 Ainda assim, recomendamos que professores, pais ou responsáveis acompanhem sua realização atentamente.



**Editora  
 Saraiva**

SAC

0800-0117875

De 2ª a 6ª, das 8h às 18h

www.editorasaraiva.com.br/contato

Avenida das Nações Unidas, 7221 – 1º andar – Setor C – Pinheiros – CEP 05425-902

# Ao estudante

Elaboramos este trabalho com a certeza de proporcionar a você um caminho metódico e bem planejado para um início consistente no aprendizado de Física. Nem por um momento perdemos de vista a necessidade de despertar seu real interesse pela disciplina. Para alcançar esse objetivo, criamos uma obra rica em situações contextuais, baseadas em ocorrências do dia a dia. Muitos exemplos, ilustrações e outros recursos foram inseridos com o intuito de instigar sua curiosidade e seu desejo de saber mais e se aprofundar nos temas abordados.

A obra foi dividida em três volumes, um para cada ano do Ensino Médio. No primeiro volume, apresentamos a Mecânica, dividida em Cinemática, Dinâmica e Estática (dos sólidos e dos fluidos). No segundo, tratamos da Termologia, Ondulatória e Óptica Geométrica. E, no terceiro, abordamos a Eletricidade – composta de Eletrostática, Eletrodinâmica e Eletromagnetismo – e a Física Moderna.

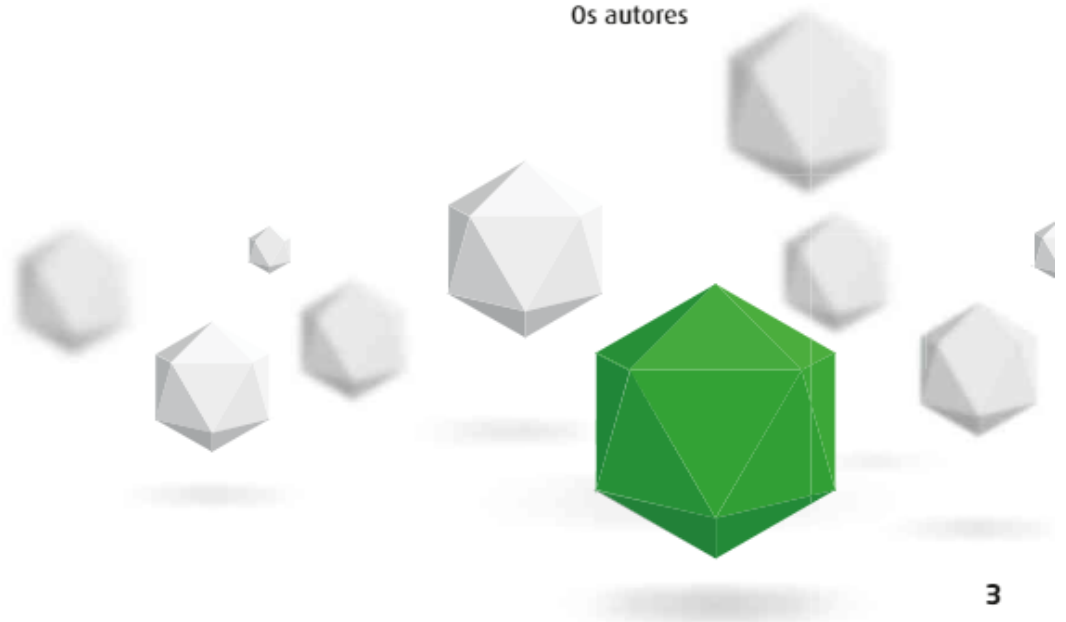
Os grandes ramos da disciplina, como a Dinâmica, a Cinemática e a Estática no volume 1, constituem unidades de cada livro. Estas, por sua vez, são divididas em capítulos que trazem, além do texto teórico, propostas de experimentos, textos complementares e leituras que muito irão colaborar para a boa compreensão do conteúdo.

Em todos os capítulos há duas seções de exercícios: as **Questões comentadas**, que, trazendo as resoluções, constroem a linguagem específica da disciplina e propõem uma primeira operacionalização com os conceitos apresentados; e as **Questões propostas**, destinadas às atividades de sala de aula e de casa.

E, ao término de cada volume, são dadas as respostas de todas as atividades apresentadas, exceto as do boxe **Descubra mais** e as do **Compreensão, pesquisa e debate** – que faz parte da seção **Intersaberes** –, pois tais questionamentos visam promover a pesquisa e propor desafios adicionais e deverão ser objeto de debates com colegas e professores.

Temos certeza de que seu percurso pelos capítulos e páginas deste trabalho contribuirá para que seu conhecimento, sua visão de mundo e seu senso crítico se ampliem em grande medida. Desejamos que você utilize esta obra com a mesma vibração e entusiasmo com que a escrevemos.

**Os autores**



# CONHEÇA ESTE LIVRO



### Já pensou nisto?

Neste boxe, você verá imagens fotográficas acompanhadas de títulos instigadores. Esses títulos são propostos quase sempre em forma de perguntas ou simples provocações, cujo objetivo é motivá-lo a fazer a leitura do conteúdo, estabelecendo conexões com situações do cotidiano.

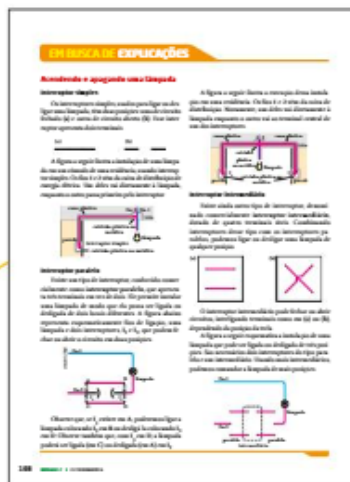


### Abertura de unidade

Na **Abertura de unidade** é feita uma breve apresentação da área da Física que será estudada e a maneira como a unidade foi estruturada, indicando-se os capítulos que a compõem.

### Abertura de capítulo

Na **Abertura de capítulo**, você poderá encontrar uma introdução ao tema e o início do estudo teórico. Na obra, a teoria é plena em abordagens históricas, seja no texto principal, seja em boxes e outros recursos, com o intuito de contribuir para a percepção da evolução das ideias, desde as eras antiga e clássica até os dias atuais.



### Em busca de explicações

Nos textos propostos nesta seção, você verá questionamentos e problematizações interessantes acompanhados de uma explicação da Física, ou de verificações matemáticas.



### Ampliando o olhar

Nesta seção, você encontrará textos complementares cuja intenção é propor outras referências fenomenológicas, históricas e tecnológicas, além de curiosidades e justificativas que poderão contribuir para a construção do conhecimento da Física e sua relação com outras áreas do conhecimento.

**Atividade** Distribuição de cargas elétricas pela superfície externa de condutores eletrizados.

Uma superfície esférica, condutora e plana, eletrizada. A carga se distribui pela superfície externa de maneira homogênea, ou seja, com uma mesma densidade superficial. A seguir, você vai estudar experimentalmente a distribuição de cargas elétricas em uma superfície curva.

**Objetivos**

- 1. Profundidade de papel eletrizado em função do tamanho do equipamento usado para eletrizá-lo.
- 2. Profundidade de papel eletrizado em função do tipo de equipamento usado para eletrizá-lo.
- 3. Profundidade de papel eletrizado em função do tipo de equipamento usado para eletrizá-lo.

**Procedimento**

1. Monte um circuito elétrico com uma fonte de tensão contínua e um resistor de 100 Ω. Ligue o circuito e deixe-o ligado por 10 minutos.
2. Ligue o equipamento usado para eletrizar o papel eletrizado. Observe a distribuição de cargas elétricas na superfície externa do equipamento.
3. Ligue o equipamento usado para eletrizar o papel eletrizado. Observe a distribuição de cargas elétricas na superfície externa do equipamento.
4. Ligue o equipamento usado para eletrizar o papel eletrizado. Observe a distribuição de cargas elétricas na superfície externa do equipamento.

**Análise e interpretação**

1. Como se comporta a distribuição de cargas elétricas na superfície externa de condutores?
2. De que fatores depende a distribuição de cargas elétricas na superfície externa de condutores?
3. Como se comporta a distribuição de cargas elétricas na superfície externa de condutores?
4. Como se comporta a distribuição de cargas elétricas na superfície externa de condutores?

**Faça você mesmo**  
A seção **Faça você mesmo** traz atividades experimentais ou de verificação simples que poderão auxiliá-lo na compreensão de fenômenos e conceitos importantes da Física.

**QUESTÕES COMENTADAS**

1. Uma carga elétrica positiva  $Q$  está localizada no centro de uma esfera condutora de raio  $R$ . Calcule o campo elétrico  $E$  em função da distância  $r$  do centro da esfera para o ponto considerado.

2. Uma carga elétrica positiva  $Q$  está localizada no centro de uma esfera condutora de raio  $R$ . Calcule o potencial elétrico  $V$  em função da distância  $r$  do centro da esfera para o ponto considerado.

3. Uma carga elétrica positiva  $Q$  está localizada no centro de uma esfera condutora de raio  $R$ . Calcule a energia potencial elétrica  $U$  em função da distância  $r$  do centro da esfera para o ponto considerado.

4. Uma carga elétrica positiva  $Q$  está localizada no centro de uma esfera condutora de raio  $R$ . Calcule a capacitância  $C$  em função do raio  $R$ .

5. Uma carga elétrica positiva  $Q$  está localizada no centro de uma esfera condutora de raio  $R$ . Calcule a densidade superficial de carga  $\sigma$  em função de  $Q$  e  $R$ .

6. Uma carga elétrica positiva  $Q$  está localizada no centro de uma esfera condutora de raio  $R$ . Calcule a densidade volumétrica de carga  $\rho$  em função de  $Q$  e  $R$ .

7. Uma carga elétrica positiva  $Q$  está localizada no centro de uma esfera condutora de raio  $R$ . Calcule a densidade linear de carga  $\lambda$  em função de  $Q$  e  $R$ .

8. Uma carga elétrica positiva  $Q$  está localizada no centro de uma esfera condutora de raio  $R$ . Calcule a densidade superficial de carga  $\sigma$  em função de  $Q$  e  $R$ .

9. Uma carga elétrica positiva  $Q$  está localizada no centro de uma esfera condutora de raio  $R$ . Calcule a densidade volumétrica de carga  $\rho$  em função de  $Q$  e  $R$ .

10. Uma carga elétrica positiva  $Q$  está localizada no centro de uma esfera condutora de raio  $R$ . Calcule a densidade linear de carga  $\lambda$  em função de  $Q$  e  $R$ .

**Questões comentadas**  
Em **Questões comentadas**, você terá um conjunto de atividades resolvidas em detalhes, que poderão auxiliá-lo como ponto de partida para a resolução de atividades semelhantes.

**QUESTÕES PROPOSTAS**

1. Uma carga elétrica positiva  $Q$  está localizada no centro de uma esfera condutora de raio  $R$ . Calcule o campo elétrico  $E$  em função da distância  $r$  do centro da esfera para o ponto considerado.

2. Uma carga elétrica positiva  $Q$  está localizada no centro de uma esfera condutora de raio  $R$ . Calcule o potencial elétrico  $V$  em função da distância  $r$  do centro da esfera para o ponto considerado.

3. Uma carga elétrica positiva  $Q$  está localizada no centro de uma esfera condutora de raio  $R$ . Calcule a energia potencial elétrica  $U$  em função da distância  $r$  do centro da esfera para o ponto considerado.

4. Uma carga elétrica positiva  $Q$  está localizada no centro de uma esfera condutora de raio  $R$ . Calcule a capacitância  $C$  em função do raio  $R$ .

5. Uma carga elétrica positiva  $Q$  está localizada no centro de uma esfera condutora de raio  $R$ . Calcule a densidade superficial de carga  $\sigma$  em função de  $Q$  e  $R$ .

6. Uma carga elétrica positiva  $Q$  está localizada no centro de uma esfera condutora de raio  $R$ . Calcule a densidade volumétrica de carga  $\rho$  em função de  $Q$  e  $R$ .

7. Uma carga elétrica positiva  $Q$  está localizada no centro de uma esfera condutora de raio  $R$ . Calcule a densidade linear de carga  $\lambda$  em função de  $Q$  e  $R$ .

8. Uma carga elétrica positiva  $Q$  está localizada no centro de uma esfera condutora de raio  $R$ . Calcule a densidade superficial de carga  $\sigma$  em função de  $Q$  e  $R$ .

9. Uma carga elétrica positiva  $Q$  está localizada no centro de uma esfera condutora de raio  $R$ . Calcule a densidade volumétrica de carga  $\rho$  em função de  $Q$  e  $R$ .

10. Uma carga elétrica positiva  $Q$  está localizada no centro de uma esfera condutora de raio  $R$ . Calcule a densidade linear de carga  $\lambda$  em função de  $Q$  e  $R$ .

**Questões propostas**  
Nesta seção, você encontrará atividades formuladas para resolução em sala de aula e em casa. Essas atividades estão dispostas conforme a sequência da teoria e em ordem crescente de dificuldade. As **Questões propostas** são, em sua maioria, ricas em temas transversais que possibilitarão discussões relacionadas a outras áreas do conhecimento, meio ambiente, cidadania etc.

**Descubra mais**  
No boxe **Descubra mais**, você encontra questões que o convidam a pesquisar e a conhecer um pouco mais sobre os assuntos estudados. Com isso, você poderá ampliar a abordagem do texto e descobrir temas correlatos enriquecedores.

**INTERSABERES**

**A competição "Café" da matemática**

Um grupo de matemáticos decidiu organizar uma competição de matemática. A competição foi realizada em um café e consistiu em resolver problemas de matemática. O grupo foi formado por alunos de diferentes níveis de ensino e a competição foi muito bem sucedida. Os problemas foram resolvidos e os alunos se divertiram muito. A competição foi muito bem sucedida e os alunos se divertiram muito.

**A competição de matemática**

Um grupo de matemáticos decidiu organizar uma competição de matemática. A competição foi realizada em um café e consistiu em resolver problemas de matemática. O grupo foi formado por alunos de diferentes níveis de ensino e a competição foi muito bem sucedida. Os problemas foram resolvidos e os alunos se divertiram muito. A competição foi muito bem sucedida e os alunos se divertiram muito.

**Compreendendo a competição de matemática**

1. O grupo de matemáticos decidiu organizar uma competição de matemática. A competição foi realizada em um café e consistiu em resolver problemas de matemática. O grupo foi formado por alunos de diferentes níveis de ensino e a competição foi muito bem sucedida. Os problemas foram resolvidos e os alunos se divertiram muito. A competição foi muito bem sucedida e os alunos se divertiram muito.
2. O grupo de matemáticos decidiu organizar uma competição de matemática. A competição foi realizada em um café e consistiu em resolver problemas de matemática. O grupo foi formado por alunos de diferentes níveis de ensino e a competição foi muito bem sucedida. Os problemas foram resolvidos e os alunos se divertiram muito. A competição foi muito bem sucedida e os alunos se divertiram muito.
3. O grupo de matemáticos decidiu organizar uma competição de matemática. A competição foi realizada em um café e consistiu em resolver problemas de matemática. O grupo foi formado por alunos de diferentes níveis de ensino e a competição foi muito bem sucedida. Os problemas foram resolvidos e os alunos se divertiram muito. A competição foi muito bem sucedida e os alunos se divertiram muito.
4. O grupo de matemáticos decidiu organizar uma competição de matemática. A competição foi realizada em um café e consistiu em resolver problemas de matemática. O grupo foi formado por alunos de diferentes níveis de ensino e a competição foi muito bem sucedida. Os problemas foram resolvidos e os alunos se divertiram muito. A competição foi muito bem sucedida e os alunos se divertiram muito.

**Intersaberes**  
Na seção **Intersaberes**, você terá acesso a textos que poderão ser explorados de maneira integrada com outras disciplinas. É uma oportunidade de complementar e aprofundar o conteúdo do capítulo, estabelecer conexões entre diferentes áreas do conhecimento, realizar pesquisas e promover um debate de opiniões envolvendo os colegas e o professor.



# SUMÁRIO



## ELETROSTÁTICA

### CAPÍTULO 1

#### CARGAS ELÉTRICAS ..... 10

##### 1 Introdução ..... 10

*Ampliando o olhar*

Benjamin Franklin ..... 11

##### 2 Noção de carga elétrica ..... 11

##### 3 Corpo eletricamente neutro e corpo eletrizado ..... 13

##### 4 Quantização da carga elétrica ..... 14

##### 5 Princípios da Eletrostática ..... 15

##### 6 Condutores e isolantes elétricos ..... 16

##### 7 Processos de eletrização ..... 17

*Faça você mesmo*

Solução iônica (condutora de eletricidade) ..... 20

##### 8 Lei de Coulomb ..... 21

*Ampliando o olhar*

Alguns exemplos de manifestações da eletricidade estática ..... 22

*Faça você mesmo*

Moléculas da água são polares... 24

#### Intersaberes

A composição "atual" da matéria .. 30

### CAPÍTULO 2

#### CAMPO ELÉTRICO ..... 32

##### 1 Conceito e descrição de campo elétrico ..... 32

##### 2 Definição do vetor campo elétrico... 33

##### 3 Campo elétrico de uma partícula eletrizada ..... 34

##### 4 Campo elétrico devido a duas ou mais partículas eletrizadas ..... 35

##### 5 Linhas de força ..... 35

##### 6 Densidade superficial de cargas ..... 37

##### 7 O poder das pontas ..... 37

##### 8 Campo elétrico criado por um condutor eletrizado ..... 38

##### 9 Campo elétrico criado por um condutor esférico eletrizado ..... 39

##### 10 Campo elétrico uniforme ..... 39

*Em busca de explicações*

Impressão a "jato de tinta" ..... 41

##### 11 Fenômenos eletrostáticos na atmosfera ..... 41

*Faça você mesmo*

Distribuição de cargas elétricas pela superfície externa de condutores eletrizados ..... 43

*Ampliando o olhar*

Mágica? Não, Física! ..... 44

#### Intersaberes

A blindagem eletrostática e a gaiola de Faraday ..... 52

### CAPÍTULO 3

#### POTENCIAL ELÉTRICO ..... 54

##### 1 Energia potencial eletrostática e o conceito de potencial em um campo elétrico ..... 54

*Ampliando o olhar*

Alessandro Giuseppe Antonio Volta ..... 55

##### 2 Potencial em um campo elétrico criado por uma partícula eletrizada ..... 56

##### 3 Potencial em um campo elétrico criado por duas ou mais partículas eletrizadas ..... 56

##### 4 Equipotenciais ..... 57

##### 5 Trabalho da força elétrica ..... 58

##### 6 Propriedades do campo elétrico ..... 59

##### 7 Diferença de potencial entre dois pontos de um campo elétrico uniforme ..... 60

##### 8 Potencial elétrico criado por um condutor eletrizado ..... 61

##### 9 Potencial elétrico criado por um condutor esférico eletrizado ..... 62

##### 10 Capacitância ..... 62

##### 11 Capacitância de um condutor esférico ..... 63

##### 12 Energia potencial eletrostática de um condutor ..... 63

##### 13 Condutores em equilíbrio eletrostático ..... 64

*Em busca de explicações*

Efeito piezoeletrico ..... 64

*Em busca de explicações*

O experimento de Millikan ..... 65

*Ampliando o olhar*

Precipitador eletrostático ..... 66

*Ampliando o olhar*

Gerador eletrostático de Van de Graaff ..... 67

##### 14 Indução eletrostática ..... 76

*Faça você mesmo*

Observando o fenômeno da indução eletrostática ..... 80

##### 15 O potencial da terra ..... 82

*Ampliando o olhar*

Emissão termoeletrica ..... 83

*Faça você mesmo*

Eletroscópio ..... 84

#### Intersaberes

Cuidado, os raios podem "cair" mais de uma vez no mesmo local. .... 88



## ELETRODINÂMICA

### CAPÍTULO 4

#### CORRENTE ELÉTRICA E RESISTORES

1	Introdução	92
2	Corrente elétrica	93
3	Causa da corrente elétrica	93
4	Gerador elétrico	94
5	Intensidade de corrente elétrica e seu sentido convencional	95
6	Circuito elétrico	97
7	Gráfico $i \times t$	97
8	Classificação das correntes elétricas quanto à forma do gráfico $i \times t$	97
9	Continuidade da corrente elétrica	99
10	Efeito Joule	99
11	Potência elétrica	99
12	O quilowatt-hora (kWh)	100
13	Valores nominais	101
14	Fusível e disjuntor	101
15	Primeira Lei de Ohm	104
	<i>Ampliando o olhar</i>	
	Efeitos fisiológicos da corrente elétrica	106
16	Condutor ideal	107
17	Interruptores	107

#### Em busca de explicações

	Acendendo e apagando uma lâmpada	108
--	----------------------------------	-----

18	Resistores	109
19	Segunda Lei de Ohm	110

### CAPÍTULO 5

#### ASSOCIAÇÃO DE RESISTORES E MEDIDAS ELÉTRICAS

1	Associação de resistores	114
2	Reostatos	116
3	Curto-circuito	117
	<i>Faça você mesmo</i>	
	Associação de lâmpadas em série e em curto-circuito	118
4	Medidas elétricas	123
	<i>Faça você mesmo</i>	
	Montando uma ponte de Wheatstone	127

### CAPÍTULO 6

#### CIRCUITOS ELÉTRICOS

1	Geradores de energia elétrica	130
	<i>Faça você mesmo</i>	
	Estudando lâmpadas associadas em paralelo	132
2	Circuito simples	135
3	Máxima transferência de potência	136

4	Receptores elétricos	142
	<i>Faça você mesmo</i>	
	Teste com um motor	145
5	Associação de geradores	145
6	Circuitos elétricos de "caminho" único, incluindo geradores, receptores e resistores	147

### CAPÍTULO 7

#### CAPACITORES

1	Introdução	151
2	Definição	151
3	O processo de carga de um capacitor	152
4	Capacitância	153
5	Energia potencial eletrostática de um capacitor	153
6	Estudo do capacitor plano	154
	<i>Ampliando o olhar</i>	
	Outros tipos de capacitores	155
7	Influência do dielétrico na capacitância	156
8	Rigidez dielétrica e tensão de ruptura	157
	<i>Ampliando o olhar</i>	
	Algumas aplicações dos capacitores	157



## ELETROMAGNETISMO

### CAPÍTULO 8

#### CAMPO MAGNÉTICO E SUA INFLUÊNCIA SOBRE CARGAS ELÉTRICAS

1	Introdução	162
2	Ímãs ou magnetos	162

#### Faça você mesmo

	Uma bússola rudimentar	165
--	------------------------	-----

3	O campo magnético de um ímã	166
4	Campo magnético uniforme	168
5	Ação do campo magnético sobre cargas elétricas	169
6	Efeito Hall	172

7	Campo magnético uniforme e constante	175
8	Movimento de portadores de carga elétrica lançados em um campo magnético uniforme e constante	175
	<i>Ampliando o olhar</i>	
	Auroras polares	177



**CAPÍTULO 9****A ORIGEM DO CAMPO MAGNÉTICO** ..... 180

- 1** Introdução ..... 180  
*Faça você mesmo*  
 Investigando a origem de um campo magnético ..... 181
- 2** Campo magnético gerado por um fio retilíneo muito longo (infinito) ..... 183
- 3** Campo magnético gerado por uma espira circular ..... 185  
*Faça você mesmo*  
 Investigando o campo magnético gerado por corrente percorrendo espiras ..... 186
- 4** Campo magnético gerado por um solenoide ..... 188  
*Em busca de explicações*  
 Direcionamento de um elétron em um tubo de imagem ..... 190
- 5** Origem das propriedades magnéticas dos materiais ..... 191
- 6** Materiais ferromagnéticos ..... 192
- 7** Ponto Curie ..... 193

*Faça você mesmo*

Análise do ferromagnetismo de um metal ..... 194

- 8** Permeabilidade relativa ..... 195
- 9** Eletroímã ..... 196

**CAPÍTULO 10****FORÇA MAGNÉTICA EM CORRENTES ELÉTRICAS** ..... 202

- 1** Introdução ..... 202
- 2** Força magnética ..... 202  
*Em busca de explicações*  
 Funcionamento de dispositivos ..... 206

**Intersaberes**

Entre as 100 invenções que mudaram a história do mundo ..... 213

**CAPÍTULO 11****INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA** ..... 215

- 1** Introdução ..... 215
- 2** Fluxo do vetor indução magnética ou fluxo de indução ( $\Phi$ ) ..... 215
- 3** Variação do fluxo de indução ..... 217

- 4** Indução eletromagnética ..... 217

*Faça você mesmo*

Verificando os efeitos da indução eletromagnética ..... 220

- 5** Lei de Lenz e o sentido da corrente induzida ..... 221

*Faça você mesmo*

Estudando a corrente induzida ..... 223

- 6** Correntes de Foucault ..... 224

*Ampliando o olhar*

Transdutores ..... 225

- 7** Movimento de um fio condutor em um campo magnético: força eletromotriz induzida ..... 231

- 8** Força contraeletromotriz de um motor ..... 232

- 9** Lei de Faraday-Neumann ..... 233

- 10** Noções de corrente alternada ..... 234

- 11** Transformador de tensão ..... 236

*Em busca de explicações*

Circuito de ignição dos motores a explosão ..... 238

**Intersaberes**

Indução eletromagnética e geração de energia elétrica ..... 243

**4 FÍSICA MODERNA****CAPÍTULO 12****NOÇÕES DE FÍSICA QUÂNTICA** ..... 246

- 1** Introdução ..... 246
- 2** Modelo ondulatório para as radiações eletromagnéticas ..... 246
- 3** A radiação térmica e o corpo negro ..... 247
- 4** Modelo quântico para as radiações eletromagnéticas ..... 250
- 5** Efeito fotoelétrico ..... 252  
*Em busca de explicações*  
 Células fotoelétricas ..... 255
- 6** A dualidade da luz ..... 256
- 7** O átomo de Bohr e as transições eletrônicas ..... 258

**Intersaberes**

Efeito Doppler luminoso ..... 266

**CAPÍTULO 13****MAIS DE FÍSICA MODERNA: RELATIVIDADE E OUTRAS NOÇÕES** ..... 268

- 1** Introdução ..... 268
- 2** O surgimento da Teoria da Relatividade ..... 268
- 3** Os postulados de Einstein ..... 268
- 4** A dilatação do tempo ..... 269
- 5** A contração do comprimento ..... 270
- 6** Composição de velocidades ..... 272
- 7** Massa relativística ..... 272
- 8** Equivalência entre massa e energia ..... 273

- 9** Relação entre a energia e a quantidade de movimento de um corpo ..... 274

- 10** Comportamento ondulatório da matéria ..... 274

- 11** De Broglie e o modelo de Bohr ..... 276

- 12** As quatro forças fundamentais da natureza ..... 276

**Intersaberes**

O tempo é relativo ..... 282

**RESPOSTAS DAS QUESTÕES PROPOSTAS** ..... 285**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS** ..... 288**MANUAL DO PROFESSOR – Orientações Didáticas** ..... 289

## UNIDADE

## 1

## ELETROSTÁTICA

A **Eletrostática** é a parte da Física que estuda as diversas situações de cargas elétricas em equilíbrio e os fenômenos que advêm dessas situações.

Você já atritou um pente de plástico nos cabelos e observou que ele atrai pequenos fragmentos de papel? Já reparou que depois de desligar a TV a tela do aparelho atrai intensamente os pelos de seu braço? Esses fatos se devem à eletrização do pente e da tela da TV. Quando perdem elétrons, esses corpos adquirem carga elétrica positiva e quando ganham elétrons, adquirem carga elétrica negativa.

Pente de plástico atraindo pequenos fragmentos de papel após ser atritado nos cabelos de uma pessoa.

NESTA  
UNIDADE

1

CARGAS ELÉTRICAS

2

CAMPO ELÉTRICO

3

POTENCIAL ELÉTRICO



# CARGAS ELÉTRICAS

## 1. INTRODUÇÃO



O relâmpago foi a primeira manifestação de **eletricidade** observada pelo ser humano. Envolto em medos e mistérios, demorou muito tempo para esse fenômeno natural começar a ser explicado. Na fotografia acima, chuva com raios na região central de Londrina-PR. Janeiro de 2015.

A história da eletricidade inicia-se no século VI a.C. com uma descoberta feita pelo matemático e filósofo grego **Tales de Mileto** (640-546 a.C.), um dos sete sábios da Grécia antiga. Ele observou que o atrito entre uma resina fóssil (o âmbar) e um tecido ou pele de animal produzia na resina a propriedade de atrair pequenos pedaços de palha e pequenas penas de aves. Como em grego a palavra usada para designar âmbar é *élektron*, dela vieram as palavras **elêtron** e **eletricidade**.



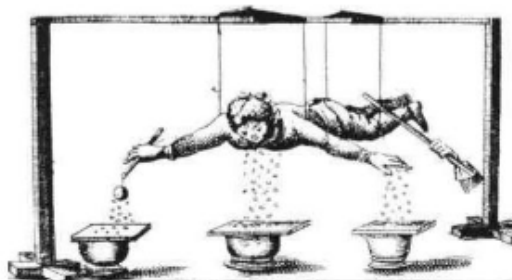
O âmbar é uma espécie de seiva vegetal petrificada, material fóssil cujo nome em grego é *élektron*.

Por mais de vinte séculos, nada foi acrescentado à descoberta de Tales de Mileto. No final do século XVI, William **Gilbert** (1540-1603), médico da rainha Elizabeth I, da Inglaterra, repetiu a experiência com o âmbar e descobriu que é possível realizá-la com outros materiais. Nessa época, fervilhavam novas ideias, e o **método científico** criado por Galileu Galilei começava a ser utilizado. Gilbert realizou outros experimentos e publicou o livro *De magnete*, que trazia ainda um estudo sobre ímãs. Nele, Gilbert fazia clara distinção entre a atração exercida por materiais eletrizados por atrito

e a atração exercida por ímãs. Propunha também um modelo segundo o qual a Terra se comportava como um grande ímã. Hoje sabemos que as agulhas das bússolas se orientam na direção norte-sul por causa dos polos magnéticos do planeta.

Por volta de 1729, o inglês **Stephen Gray** (1666-1736) descobriu que a propriedade de atrair ou repelir podia ser transferida de um corpo para outro mediante contato. Até então, acreditava-se que somente por meio de atrito conseguia-se tal propriedade. Nessa época, Charles François **Du Fay** (1698-1739) realizou um experimento em que atraía uma fina folha de ouro com um bastão de vidro atritado. Porém, ao encostar o bastão na folha, esta era repelida. Du Fay sugeriu a existência de duas espécies de "eletricidade", que denominou eletricidade **vítrea** e eletricidade **resinosa**.

Em 1747, o político e cientista norte-americano **Benjamin Franklin** (1706-1790), inventor do para-raios, propôs uma teoria que considerava a carga elétrica um único fluido elétrico que podia ser transferido de um corpo para outro: o corpo que perdia esse fluido ficava com falta de carga elétrica (negativo), e o que recebia, com excesso de carga elétrica (positivo). Hoje sabemos que os elétrons é que são transferidos. Um corpo com "excesso" de elétrons está eletrizado negativamente e um corpo com "falta" de elétrons encontra-se eletrizado positivamente.



Reprodução de gravura do século XVIII que mostra um experimento de eletricidade estática realizado pelo físico Stephen Gray. O garoto suspenso por fios isolantes foi eletrizado, passando a atrair pequenos pedaços de papel.

## Benjamin Franklin

Benjamin Franklin nasceu em 1706, em Boston, situada em Massachusetts, uma das 13 colônias que, após a independência, se constituíram nos Estados Unidos da América. Aos 12 anos, guiado por um de seus irmãos, aprendeu a profissão de tipógrafo em um jornal. Ainda jovem, brigou com esse irmão e mudou-se para a Inglaterra. Ao voltar para os Estados Unidos, iniciou a publicação (em 1732) do livro *Poor Richard's Almanack*, que o tornaria muito popular. Em 1731, com outros maçons, fundou a primeira biblioteca pública da Filadélfia. Esse ato provocou um aumento de novas bibliotecas por toda a colônia, sendo considerado um dos fatores que ajudaram na independência. Em 1748, vendeu seus negócios para se dedicar mais à vida pública e a seus estudos.

Joseph Smith Duplessis. *Portrait of Benjamin Franklin, c. 1766*. The Bridgman Art Library/Getty Images. Coleção particular.



Retrato de Benjamin Franklin. Óleo sobre tela de Joseph S. Duplessis, século XVIII, coleção particular.

Benjamin participou da fundação da Universidade de Nova York, criando a sociedade filosófica americana com o intuito de divulgar o conhecimento científico. Nessa época iniciou seus contatos com a Royal Society de Londres. Organizou a criação do corpo de bombeiros e do primeiro hospital de Massachusetts e reformou o serviço de correios.

Além de ser um homem público e um membro graduado da maçonaria, Benjamin Franklin se destacou no estudo da eletricidade, realizando o famoso experimento da pipa, quando provou que o relâmpago era uma manifestação de cargas elétricas na natureza. Foi ele quem construiu o primeiro para-raios e, com o intuito de fazer a previsão do tempo, iniciou o estudo da meteorologia.

Em 1776, Benjamin participou ativamente do movimento pela independência, fazendo parte do grupo de homens que fundaram os Estados Unidos da América. Tornou-se embaixador na França, onde, paralelamente, participou da depuração e da unificação da maçonaria. Em 1785 voltou à América e tornou-se abolicionista, sendo escolhido como presidente da sociedade promotora da abolição da escravatura. Benjamin Franklin morreu em 1790 aos 84 anos de idade.



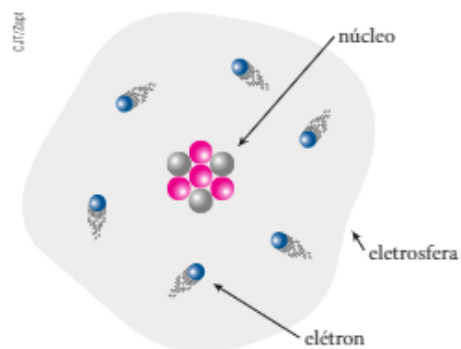
Gravura inspirada no experimento de Benjamin Franklin que originou a invenção do para-raios. Está no livro *Natural Philosophy for Common and High Schools* (1881), de Le Roy C. Cooley. Coleção particular.

## 2. NOÇÃO DE CARGA ELÉTRICA

Como sabemos, no núcleo de um átomo encontramos partículas denominadas **prótons** e **nêutrons**. Ao redor do núcleo, na região chamada **eletrosfera**, movem-se outras partículas, denominadas **elétrons**.

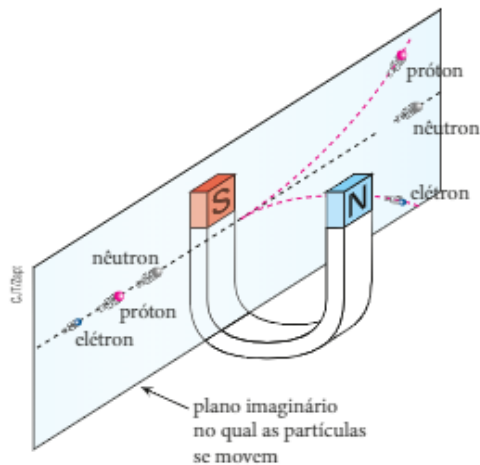
As massas de um próton e de um nêutron são praticamente iguais. A massa de um elétron, porém, é

$$\text{muito menor} \left( m_e \cong \frac{m_p}{1836} \right).$$



Representação esquemática de um átomo.

Se um próton, um nêutron e um elétron passarem entre os polos de um ímã em forma de U, como sugere a figura a seguir, constataremos que o próton desviará para cima, o elétron desviará para baixo e o nêutron não sofrerá desvio. (A teoria referente a esses desvios será apresentada na Unidade 3 deste volume em **Eletromagnetismo**.)



Esse resultado experimental revela que os prótons e os elétrons têm alguma propriedade que os nêutrons não têm. Essa propriedade foi denominada **carga elétrica**, e convencionou-se considerar **positiva** a carga elétrica do próton e **negativa** a carga elétrica do elétron. Entretanto, em valor absoluto, as cargas elétricas do próton e do elétron são iguais. Esse valor absoluto é denominado **carga elétrica elementar** e simbolizado por **e**. Recebe o nome de **elementar** porque é a menor quantidade de carga que podemos encontrar isolada na natureza.

A unidade de medida de carga elétrica no SI é o **coulomb (C)**, em homenagem ao físico francês Charles-Augustin de **Coulomb** (1736-1806).

Comparada com a unidade coulomb, a carga elementar é extremamente pequena. De fato, o valor de **e**, determinado experimentalmente pela primeira vez pelo físico norte-americano Robert Andrews **Millikan** (1868-1953), é:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Temos, então:

Carga elétrica do próton:  $+e = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$   
 Carga elétrica do elétron:  $-e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$   
 Carga elétrica do nêutron = 0

É preciso salientar ainda que 1 coulomb, apesar de corresponder a apenas uma unidade de carga elétrica, representa uma quantidade muito grande dessa grandeza física. Por isso, costumam-se usar submúltiplos do coulomb. Veja no quadro a seguir os principais submúltiplos.

Submúltiplo	Símbolo	Valor
milicoulomb	mC	$10^{-3} \text{ C}$
microcoulomb	$\mu\text{C}$	$10^{-6} \text{ C}$
nanocoulomb	nC	$10^{-9} \text{ C}$
picocoulomb	pC	$10^{-12} \text{ C}$

#### NOTAS

- Além dos prótons e dos elétrons, existem outras partículas elementares dotadas de carga elétrica de módulo igual a **e**. É o caso, por exemplo, dos pions ( $\pi^+$ ) e dos múons ( $\mu^-$ ), encontrados nos raios cósmicos.
- A definição da unidade coulomb depende da definição prévia da unidade **ampère (A)** de intensidade de corrente elétrica. Entretanto, essa unidade será definida apenas em **Eletromagnetismo**.

Um **coulomb (C)** é a quantidade de carga elétrica que atravessa, em um segundo (s), a secção transversal de um condutor percorrido por uma corrente contínua de intensidade igual a um ampère (A).

#### Uma convenção bem pensada

A convenção de sinais feita para as cargas elétricas do próton e do elétron é bastante adequada por dois motivos:

- 1ª) Ela leva em conta a existência de **dois tipos** de carga elétrica. De fato, prótons e elétrons sempre apresentam comportamentos opostos nas experiências, como naquela que descrevemos usando um ímã.
- 2ª) A presença de prótons e elétrons em **igual** quantidade em um mesmo corpo faz com que ele **não exiba** a propriedade carga elétrica: as cargas dos prótons e dos elétrons neutralizam-se e a carga total do corpo é igual a zero. Se um átomo, por exemplo, passar entre os polos do ímã da experiência descrita, ele não desviará, porque possui prótons e elétrons em quantidades iguais: sua carga total é igual a zero.

## Charles-Augustin de Coulomb

Charles-Augustin de Coulomb nasceu em 1736, em Angoulême, França. Estudou em bons colégios de Paris, formando-se em Engenharia Militar. Entrou para o exército francês, sendo destacado como engenheiro na Martinica (América Central), onde se dedicou, entre os anos de 1764 e 1772, à construção de fortes e outras edificações.

Luis Hierle, Charles-Augustin de Coulomb, 1894, Musée de la Ville de Paris, Château de Versailles, Grand Palais, Paris, França



Retrato de Charles-Augustin de Coulomb. Óleo sobre tela de Louis Hierle, 1894. Versailles, châteaux de Versailles et de Trianon

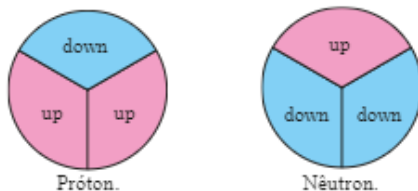
Entre 1781 e 1791 produziu sete importantes trabalhos sobre eletricidade e magnetismo, que foram apresentados à Academia de Ciências de Paris. Em 1785, estabeleceu a relação entre a força eletrostática e o inverso do quadrado da distância entre as cargas, que recebeu o nome de **Lei de Coulomb** em sua homenagem. Em 1802, foi nomeado para um cargo público que ocupou até sua morte, em 1806.

### Uma breve abordagem dos quarks

Até o início da década de 1970, os prótons e os nêutrons eram considerados partículas indivisíveis. Alguns experimentos, porém, levaram a acreditar que eles possuem uma estrutura interna e são constituídos por três unidades mais elementares, denominadas **quarks**. Entretanto, é importante saber que, apesar dos grandes esforços experimentais, até hoje não se conseguiu obter um *quark* isolado. Além disso, na comunidade científica, não há consenso a respeito da existência dessas unidades.

Entre 1969 e 1995, cientistas cogitaram a existência de seis tipos de *quarks*, dois dos quais participariam da composição dos prótons e dos nêutrons: o *quark up* e o *quark down*, com cargas elétricas respectivamente iguais a  $\left(+\frac{2}{3}e\right)$  e  $\left(-\frac{1}{3}e\right)$ , em que  $e$  é a carga elementar.

Veja, abaixo, uma representação esquemática da suposta composição do próton e do nêutron.



Conhecendo as cargas dos dois *quarks* citados, vamos conferir as cargas do próton e do nêutron:

$$\text{Carga do próton: } \left(+\frac{2}{3}e\right) + \left(+\frac{2}{3}e\right) + \left(-\frac{1}{3}e\right) = +e$$

$$\text{Carga do nêutron: } \left(+\frac{2}{3}e\right) + \left(-\frac{1}{3}e\right) + \left(-\frac{1}{3}e\right) = 0$$

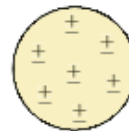
Note que encontramos os resultados esperados.

## 3. CORPO ELETRICAMENTE NEUTRO E CORPO ELETRIZADO

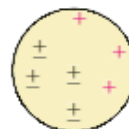
Um corpo apresenta-se eletricamente **neutro** quando a quantidade de prótons e elétrons é igual, ou seja, a soma algébrica de todas as cargas é igual a zero.

Quando, porém, o número de prótons é diferente do número de elétrons, dizemos que o corpo está **eletrizado positivamente** se o número de prótons for maior que o de elétrons, e **negativamente** se o número de elétrons for maior que o de prótons. É o caso, por exemplo, de um íon, isto é, um átomo que perdeu ou ganhou elétrons.

O modelo a seguir facilita a visualização do assunto que acabamos de abordar.



**Corpo eletricamente neutro:**  
para cada próton existe um elétron.



**Corpo eletrizado positivamente:**  
há mais prótons que elétrons.



**Corpo eletrizado negativamente:**  
há mais elétrons que prótons.

Podemos dizer, então, que **eletrizar** um corpo significa tornar diferentes suas quantidades de prótons e elétrons. No cotidiano, isso é feito por fornecimento ou extração de **elétrons**, uma vez que alterações no núcleo só podem ser produzidas em equipamentos altamente sofisticados: os aceleradores de partículas.

Para simplificar a linguagem, falamos frequentemente em “carga” quando deveríamos dizer “corpo eletrizado com determinada carga”. Assim, quando um texto informar que existe uma **carga** de, por exemplo,  $5 \mu\text{C}$  em determinado local, devemos entender que nesse local existe um **corpo eletrizado** com carga de  $5 \mu\text{C}$ . Quando se fala “cargas puntiformes” ou “partículas eletrizadas”, entende-se que se trata de corpos eletrizados cujas dimensões são desprezíveis em comparação com as distâncias consideradas na situação em estudo.

## 4. QUANTIZAÇÃO DA CARGA ELÉTRICA

A carga elétrica de um corpo é **quantizada**, isto é, ela sempre é um múltiplo **inteiro** da carga elétrica elementar. Isso é verdade porque um corpo, ao ser eletrizado, recebe ou perde um número **inteiro** de elétrons. Assim, um corpo pode ter, por exemplo, uma carga igual a  $9,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ , pois corresponde a um número inteiro (6) de cargas elementares (observe que  $6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C} = 9,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ ). Entretanto, sua carga não pode ser, por exemplo, igual a  $7,1 \cdot 10^{-19} \text{C}$ , pois esse valor não é um múltiplo inteiro da carga elementar.

Representando por **Q** a carga elétrica de um corpo eletrizado qualquer, temos:

$$Q = \pm ne \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

### Determinação da carga elementar

Em 1911, em uma de suas experiências iniciais, o físico norte-americano Robert Andrews **Millikan** encontrou os seguintes valores para a carga elétrica de várias gotículas de óleo previamente eletrizadas:

$$\begin{aligned} Q_1 &= 6,563 \cdot 10^{-19} \text{C} & Q_4 &= 13,13 \cdot 10^{-19} \text{C} \\ Q_2 &= 8,204 \cdot 10^{-19} \text{C} & Q_5 &= 16,48 \cdot 10^{-19} \text{C} \\ Q_3 &= 11,50 \cdot 10^{-19} \text{C} & Q_6 &= 18,08 \cdot 10^{-19} \text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_7 &= 19,71 \cdot 10^{-19} \text{C} & Q_9 &= 26,13 \cdot 10^{-19} \text{C} \\ Q_8 &= 22,89 \cdot 10^{-19} \text{C} \end{aligned}$$

Com base nesses valores, podemos obter um resultado razoável para a carga elementar **e**.

Para isso, vamos tomar a carga **Q<sub>1</sub>**, que é a menor de todas, e escrever:

$$Q_1 = ne$$

Dividindo **Q<sub>2</sub>** por **Q<sub>1</sub>**, obtemos 1,25  
( $8,204 : 6,563 = 1,25$ ).

$$\text{Logo: } Q_2 = 1,25 \cdot Q_1 = 1,25 n_1 e$$

Tem de ser um número inteiro.

O **menor** valor inteiro de **n** que torna 1,25 n também inteiro é 4: **n = 4**

Dividindo as demais cargas por **Q<sub>1</sub>**, constatamos que **n = 4** torna todas elas iguais a um número inteiro de **e**:

$$\begin{aligned} Q_3 &= 1,75 \cdot Q_1 = 1,75 ne = 7e \\ Q_4 &= 2,00 \cdot Q_1 = 2,00 ne = 8e \\ Q_5 &= 2,51 \cdot Q_1 = 2,51 ne = 10e \\ Q_6 &= 2,75 \cdot Q_1 = 2,75 ne = 11e \\ Q_7 &= 3,00 \cdot Q_1 = 3,00 ne = 12e \\ Q_8 &= 3,49 \cdot Q_1 = 3,49 ne = 14e \\ Q_9 &= 3,98 \cdot Q_1 = 3,98 ne = 16e \end{aligned}$$

Considerando **n = 4** na expressão de **Q<sub>1</sub>**, obtemos:

$$Q_1 = ne \Rightarrow 6,563 \cdot 10^{-19} = 4e$$

$$\text{Portanto: } e = 1,64 \cdot 10^{-19} \text{C}$$

Posteriormente, outros experimentos foram realizados e chegou-se ao melhor valor experimental para a carga elementar **e**, que é:

$$1,60217738 \cdot 10^{-19} \text{C}$$



### Matéria e antimatéria se aniquilam?

Na cabeça de muita gente, a antimatéria é apenas um integrante da ficção científica. Entretanto, ela existe.

A antimatéria é constituída de átomos formados por antielétrons ou pósitrons (elétrons com carga positiva) que orbitam o núcleo girando com rotação (*spin*) em sentido contrário ao do elétron. No núcleo, encontramos os antiprótons (prótons com carga negativa) e os antinêutrons (com carga nula, como os nêutrons). Quando a antimatéria se encontra com a matéria, ambas se aniquilam transformando-se em energia que é emitida em forma de um pulso de raios gama.

A antimatéria, quando aparece em nosso mundo, dura uma fração ínfima de tempo, pois ela é aniquilada rapidamente. Para mantermos a antimatéria precisamos construir um recipiente no qual suas paredes são campos magnéticos que evitam o contato desse material com a matéria existente.

Acredita-se que no *Big Bang*, na origem, o número de partículas de matéria gerada tenha sido um pouco maior do que o número de partículas de antimatéria. Assim, supõe-se que após o aniquilamento inicial, que gerou uma quantidade imensa de energia, tenha sobrado um pouco de matéria para iniciar o nosso Universo.

A atmosfera é bombardeada constantemente com pequenas quantidades de antimatéria proveniente dos raios cósmicos que atingem o nosso planeta.

Atenção: as bananas também emitem antimatéria! A explicação é que a banana contém uma pequena quantidade de potássio-40, um isótopo natural do potássio, que decai, emitindo um pósitron (elétron positivo) a cada 75 minutos.

## 5. PRINCÍPIOS DA ELETROSTÁTICA

A Eletrostática baseia-se em dois princípios fundamentais: o **princípio da atração e da repulsão** e o **princípio da conservação das cargas elétricas**.

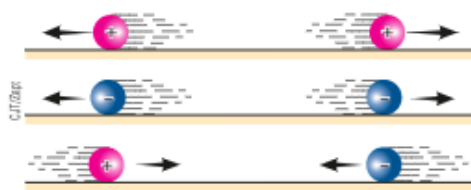
### Princípio da atração e da repulsão

Experimentalmente, ao serem aproximadas duas partículas eletrizadas com **cargas elétricas de mesmo sinal**, verifica-se que ocorre uma **repulsão** entre elas. Se essas partículas tiverem **cargas elétricas de sinais opostos**, ocorrerá uma **atração** entre elas.

Partindo desse fato, pode-se enunciar o **Princípio da atração e da repulsão** da seguinte forma:

Partículas eletrizadas com cargas de sinais iguais se repelem, enquanto as eletrizadas com cargas de sinais opostos se atraem.

Esquematicamente:



### Princípio da conservação das cargas elétricas

Inicialmente, devemos observar que a propriedade de carga elétrica existente nas partículas elementares é inerente a estas (como a massa, por exemplo), não podendo ser retirada delas ou nelas colocada. Assim, não

havendo alteração da quantidade e do tipo das partículas dotadas de carga elétrica, a carga total de um sistema permanece constante.

Fundamentados na noção de que:

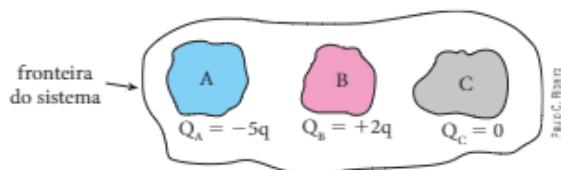
Sistema eletricamente isolado é aquele que não troca cargas elétricas com o meio exterior.

podemos enunciar o **Princípio da conservação das cargas elétricas**:

A soma algébrica das cargas elétricas existentes em um sistema eletricamente isolado é constante.

Portanto, se em um sistema eletricamente isolado houver **n** corpos com pelo menos um deles eletrizado, poderão ocorrer trocas de cargas elétricas entre eles, mas a soma algébrica dessas cargas será a mesma antes, durante e depois das trocas.

Como exemplo, considere os três corpos **A**, **B** e **C** representados abaixo.



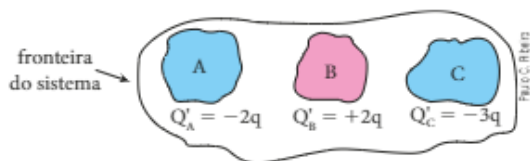
Note que a soma algébrica das cargas elétricas existentes nos corpos vale:

$$\Sigma Q = Q_A + Q_B + Q_C$$

$$\Sigma Q = (-5q) + (+2q) + (0) \Rightarrow \Sigma Q = -3q$$

Suponha agora que, por meio de um processo qualquer – por exemplo, por contato de **A** com **C** –, o sistema sofra uma alteração conforme representado na página seguinte.





Observe que houve passagem de cargas elétricas do corpo A para o corpo C. No entanto, a soma algébrica das cargas continuou a mesma:

$$\Sigma Q' = Q'_A + Q'_B + Q'_C$$

$$\Sigma Q' = (-2q) + (+2q) + (-3q) \Rightarrow \Sigma Q' = -3q$$

Assim, para um sistema eletricamente isolado, pode-se escrever:

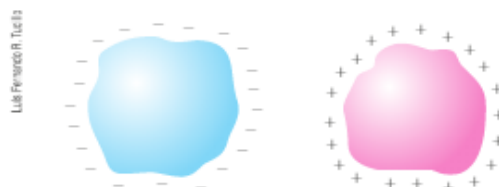
$$(\Sigma Q)_{\text{antes das trocas}} = (\Sigma Q)_{\text{após as trocas}}$$

## 6. CONDUTORES E ISOLANTES ELÉTRICOS

Em alguns corpos, podemos encontrar portadores de cargas elétricas com grande liberdade de movimentação. Esses corpos são denominados **condutores elétricos**. Nos demais, essa liberdade de movimentação praticamente não existe; esses corpos são denominados **isolantes elétricos** ou **dielétricos**.

Um material é chamado **condutor elétrico** quando há nele grandes quantidades de portadores de carga elétrica que podem se movimentar com grande facilidade. Caso contrário, ele será denominado **isolante elétrico**.

Tanto um condutor como um isolante podem ser eletrizados. É importante observar, porém, que, no isolante, a carga elétrica em excesso permanece exclusivamente no local onde se deu o processo de eletrização, enquanto no condutor essa carga busca uma situação de equilíbrio, distribuindo-se em sua superfície externa.



Em condutores eletrizados, as cargas elétricas distribuem-se na superfície externa. Por enquanto, pode-se dizer que isso ocorre devido à **repulsão** entre cargas elétricas de mesmo sinal, que buscam maior distanciamento entre si.

Os metais, a grafita, os gases ionizados e as soluções eletrolíticas são exemplos de **condutores elétricos**.

O ar, o vidro, a borracha, a porcelana, os plásticos, o algodão, a seda, a lã, as resinas, a água pura, o enxofre e a ebonite são exemplos de **isolantes elétricos**.

Quando se diz que um material é condutor, deve-se entender que se trata de um **bom** condutor. Do mesmo modo, quando se diz que um material é isolante, estamos nos referindo a um **bom** isolante.

Tanto os condutores como os isolantes podem ser encontrados nos estados sólido, líquido ou gasoso.

Em relação aos portadores de cargas elétricas que podem se movimentar com grande facilidade, os condutores classificam-se nos três casos: condutores de primeira, segunda e terceira espécies.

### Condutores de primeira espécie

São aqueles nos quais os portadores móveis são os **elétrons livres**. Embora a existência dos elétrons livres só possa ser justificada pela Física Quântica, pode-se dizer, de um modo mais simples, que esses elétrons têm grande liberdade de movimentação por estarem muito afastados dos núcleos dos átomos dos quais fazem parte e, além disso, por serem atraídos fracamente em várias direções e sentidos pelos núcleos existentes ao seu redor.

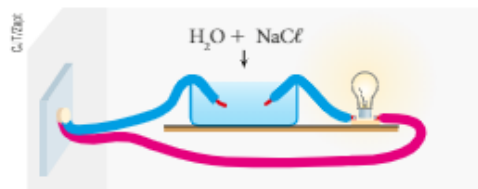


O fio de cobre, largamente utilizado nas instalações elétricas, é um condutor e a capa plástica que o envolve é um isolante.

São classificados como condutores de primeira espécie os **metais** e a **grafita**.

### Condutores de segunda espécie

Nos condutores de segunda espécie, os portadores móveis são **íons positivos** e **íons negativos**, isto é, átomos (ou grupos de átomos) que, por terem perdido ou recebido elétrons, passam a ter o número de prótons diferente do número de elétrons.



A solução aquosa de cloreto de sódio (sal de cozinha) é condutora. Nos fios, movimentam-se elétrons e, na solução, íons.

Íons são encontrados em soluções eletrolíticas, como soluções aquosas de **ácidos**, **bases** ou **sais**.

## Condutores de terceira espécie

Nos condutores de terceira espécie, os portadores de carga podem ser íons positivos, íons negativos e elétrons livres. Isso ocorre nos gases ionizados.



A tensão elétrica aplicada entre as extremidades da lâmpada fluorescente ioniza o gás existente em seu interior, tornando-o condutor.

## 7. PROCESSOS DE ELETRIZAÇÃO

Como vimos, um corpo estará eletrizado quando possuir mais elétrons do que prótons ou mais prótons do que elétrons. Um corpo neutro, por sua vez, tem igual número de prótons e de elétrons. Assim, para eletrizá-lo negativamente basta fornecer elétrons a ele. Por outro lado, para adquirir carga positiva, o corpo neutro deve perder elétrons, pois dessa forma ficará com mais prótons do que elétrons.

Denomina-se **eletrização** o fenômeno pelo qual um corpo neutro passa a eletrizado devido à alteração no número de seus elétrons.

Os processos mais comuns de eletrização são descritos a seguir.

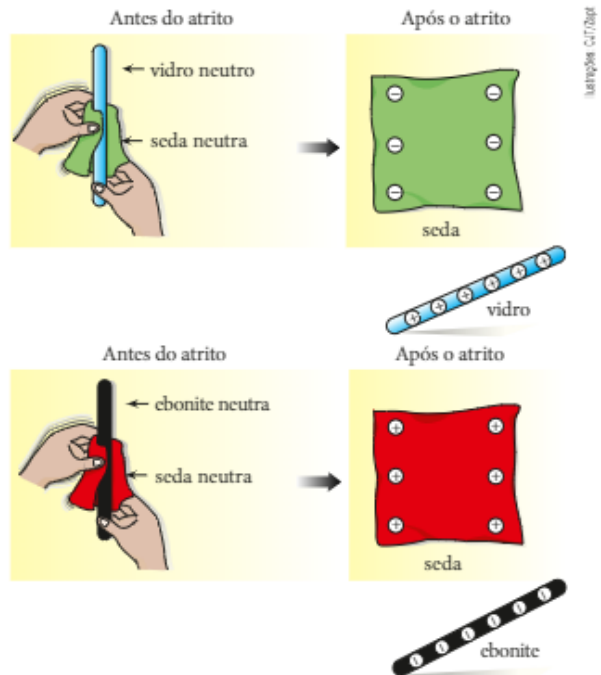
### Eletrização por atrito de materiais diferentes

Esse é o primeiro método de eletrização de que se tem conhecimento. Como vimos, data do século VI a.C., quando Tales de Mileto observou pela primeira vez que o âmbar, ao ser atritado com tecido ou pele de animal, adquiria a propriedade de atrair pequenos pedaços de palha.

Experimentalmente, comprova-se que, ao atritar entre si dois corpos neutros de materiais diferentes, um deles recebe elétrons do outro, ficando eletrizado com carga negativa, enquanto o outro – que perdeu elétrons – adquire carga positiva.

Ao se atritar, por exemplo, seda com um bastão de vidro, constata-se que o vidro passa a apresentar carga positiva, enquanto a seda passa a ter carga negativa. Entretanto, quando a seda é atritada com um bastão de ebonite, ela torna-se positiva, ficando a ebonite com carga negativa.

Os corpos atritados adquirem cargas de **mesmo módulo e sinais opostos**.



#### NOTA

A ebonite é obtida pela vulcanização da borracha com excesso de enxofre. Essa substância é um isolante elétrico-térmico, sendo, por isso, muito usada na confecção de cabos de panelas e invólucros de interruptores e tomadas.

A partir do experimento descrito, surgiu a conveniência de se ordenarem os materiais em uma lista chamada **série triboelétrica**. A elaboração dessa lista obedece a um critério bem definido: um elemento da relação, ao ser atritado com outro que o segue, fica eletrizado com carga elétrica positiva, e ao ser atritado com o que precede, fica eletrizado com carga elétrica negativa.

Série triboelétrica	
pele de coelho	
vidro	
cabelo humano	
mica	
lã	
pele de gato	
seda	
algodão	
âmbar	
ebonite	
poliéster	
isopor	
plástico	

Observe a série. Quando atritamos, por exemplo, um bastão de vidro com poliéster, o vidro torna-se positivo (perde elétrons) e o poliéster, negativo (recebe elétrons). No entanto, se atritarmos o bastão de vidro com pele de coelho, o vidro ficará eletrizado negativamente, e a pele de coelho, positivamente. Assim, quem está acima na série triboelétrica fica eletrizado positivamente quando atritado com quem está abaixo, que fica eletrizado negativamente.



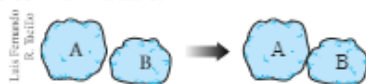
Após o atritamento com o cabelo de uma pessoa, o pente passou a apresentar cargas elétricas negativas em excesso, tornando-se eletrizado (consultar a série triboelétrica). Na aproximação, as bolinhas de isopor, muito leves, são atraídas. As cargas não são descarregadas para a mão da pessoa porque o material do pente é péssimo condutor. As cargas negativas, que apareceram em excesso, ficam localizadas, isto é, não se distribuem pela superfície, como ocorre em um material condutor.

### Eletrização por contato

Quando dois ou mais corpos condutores são colocados em contato, estando pelo menos um deles eletrizado, observa-se uma redistribuição de carga elétrica pelas suas superfícies externas.

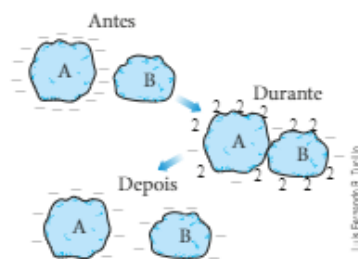
Considere, por exemplo, dois condutores A e B, estando A eletrizado negativamente e B neutro.

É importante observar que, ao se fazer contato entre esses dois condutores, obtém-se um novo condutor de superfície externa praticamente igual à soma das superfícies individuais.



Assim, a carga elétrica de A redistribui-se sobre a superfície total.

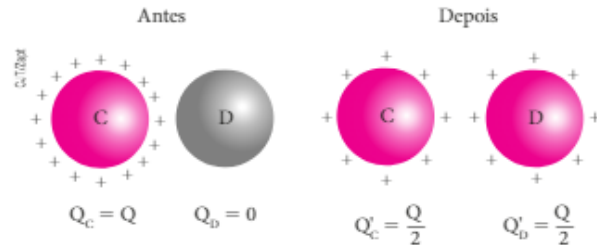
É importante também notar que o corpo neutro adquire carga de **mesmo sinal** da carga do corpo inicialmente eletrizado e que a soma algébrica das cargas elétricas deve ser a mesma antes, durante e depois do contato.



A quantidade de carga elétrica existente em cada um dos condutores no final do processo depende da forma e das dimensões deles.

Considere o caso particular de esferas condutoras de mesmo raio.

Nessas esferas, a redistribuição é feita de tal forma que temos, no final, cargas iguais em cada uma delas.

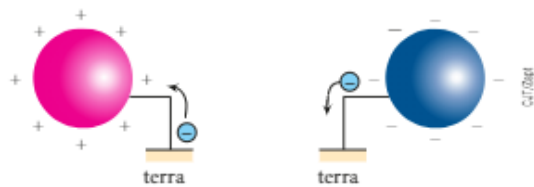


C e D são condutores esféricos de raios iguais, estando C carregado positivamente com carga igual a  $Q$ , e D, neutro. Depois do contato, cada um deles fica carregado com carga  $\frac{Q}{2}$ , metade da carga total.

No caso de haver contato simultâneo entre três esferas condutoras de mesmo raio, cada uma ficará, no final, com um terço da carga total do sistema. Assim, para o contato simultâneo de  $n$  esferas de mesmo raio e admitindo que a carga total do sistema seja igual a  $Q$ , tem-se, no final, a carga  $\frac{Q}{n}$  em cada condutor.

### Condutores em contato com a terra

Como será esclarecido no Capítulo 3, sempre que um condutor solitário eletrizado é colocado em contato com a terra, ele se neutraliza. Caso o condutor tenha excesso de elétrons, estes irão para a terra. No caso de excesso de prótons, ou seja, falta de elétrons, estes subirão da terra para **neutralizá-lo**. Assim, pode-se dizer que todo condutor eletrizado se “**descarrega**” ao ser ligado à terra.



Quando a carga do condutor é **positiva**, ele será “descarregado” pelos elétrons que subirão da terra.

Quando a carga do condutor é **negativa**, ele será “descarregado” porque seus elétrons em excesso descerão para a terra.



### Bactérias gerando energia elétrica?

A busca de novas fontes de geração de energia elétrica tem movimentado toda a comunidade científica e muito se tem avançado nesse campo. Atualmente, podemos encontrar na internet a boa notícia de que pesquisadores da Universidade de Ingeniería y Tecnología no Peru, desenvolveram uma nova maneira de gerar eletricidade usando as "geobactérias". Esses micro-organismos podem se desenvolver em ambientes bastante hostis, como em ausência de oxigênio, locais contaminados com radiação (depósitos de resíduos radioativos de usinas nucleares) ou mesmo em uma grande concentração de petróleo derramado (eles degradam o óleo). Nesse processo de "limpeza" absorvem energia e emitem elétrons que podem ser recebidos e armazenados em baterias para uso posterior.

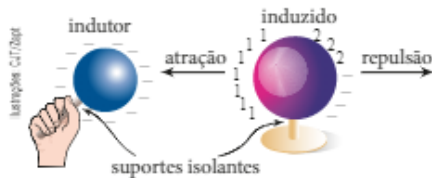
Os pesquisadores peruanos usaram uma grade de metal que, ao ser mergulhada na cultura desses micro-organismos, receberam e transferiram os elétrons liberados. Cada bateria carregada com esses elétrons pode alimentar uma lâmpada de LED por até duas horas por dia. Dez protótipos estão sendo testados por famílias de Nuevo Saposoa, aldeia que teve sua rede elétrica destruída por fortes chuvas.



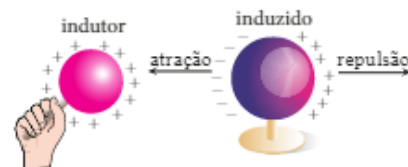
Iluminação alimentada por bateria carregada por meio do processo de geração de energia elétrica usando bactérias.

## Eletrização por indução eletrostática

Quando aproximamos (sem tocar) um condutor eletrizado de um neutro, provocamos no condutor neutro uma redistribuição de seus elétrons livres. Esse fenômeno, denominado **indução eletrostática**, ocorre porque as cargas existentes no condutor eletrizado podem atrair ou repelir os elétrons livres do condutor neutro. O condutor eletrizado é chamado de **indutor**, e o condutor neutro, de **induzido**.



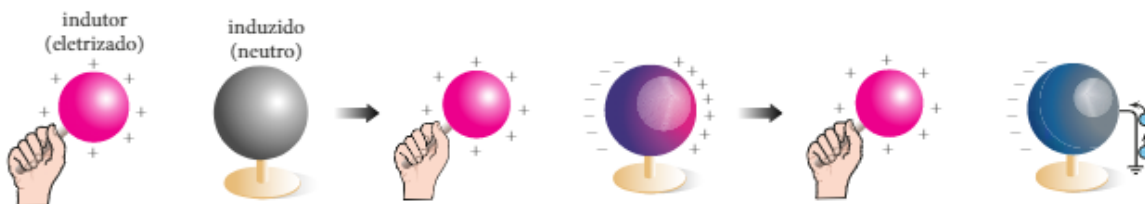
Quando o indutor possui carga negativa, elétrons livres do induzido procuram ficar o mais longe possível do indutor. Observe que as cargas positivas do induzido estão mais próximas do indutor, o que faz a atração ser maior do que a repulsão. Por isso, devido à indução, um condutor neutro é atraído por outro eletrizado.



Quando o indutor possui carga positiva, elétrons livres do induzido procuram ficar o mais perto possível do indutor e, mais uma vez, o condutor neutro é atraído pelo eletrizado.

Usando a indução eletrostática, podemos eletrizar um condutor. Para isso, devemos seguir o procedimento:

1. Aproximar o indutor (condutor eletrizado) do induzido (condutor neutro). Em seguida, na presença do indutor, ligar o induzido à terra.



2. Desligar o induzido da terra. Em seguida, afastar o indutor do induzido.



Observe que, após afastar o indutor, as cargas existentes no induzido se redistribuem por toda a sua superfície externa. Essa carga adquirida pelo induzido tem **sinal contrário** ao da carga do indutor. Note que a carga do indutor não se altera. Se o indutor estivesse eletrizado com carga negativa, após o procedimento descrito, a carga adquirida pelo induzido seria positiva.

Mais detalhes a respeito do fenômeno da **indução eletrostática** serão apresentados no Capítulo 3.

## FAÇA VOCÊ MESMO

### Solução iônica (condutora de eletricidade)

Você já deve ter ouvido falar de pessoas que, ao terminarem um banho, levaram choques ao fecharem a torneira metálica do chuveiro ou, ao lavar a cozinha descalças, foram abrir a geladeira e receberam uma descarga elétrica. Por que será que isso ocorreu?

Para entendermos esse fenômeno, podemos realizar uma atividade experimental bastante simples.

#### Material necessário

- 1 pilha média ou AA;
- 1 pequena lâmpada de 1,5 V;
- 1 m de fio de cobre, de diâmetro pequeno;
- 1 pires;
- água destilada, equivalente a uma xícara de chá;
- 1 porção de sal de cozinha (cloreto de sódio), equivalente a uma colher de chá.

#### Procedimento

I. Corte o fio de cobre e monte o circuito indicado a seguir.



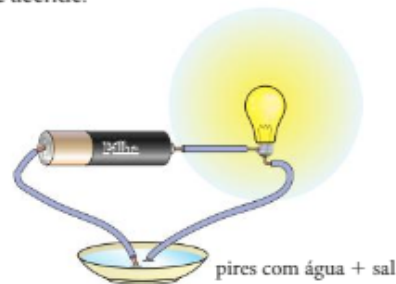
II. Encoste os terminais dos fios, fechando o circuito. Você verá que a lâmpada se acende.



III. Desencoste os terminais e veja que a lâmpada se apaga. Em seguida, mergulhe os terminais em um pires com água destilada. Observe que a lâmpada permanece apagada.



IV. Retire os fios do pires e dissolva um pouco de sal de cozinha na água. Volte a mergulhar os terminais na água com sal dissolvido. Note que a lâmpada se acende.



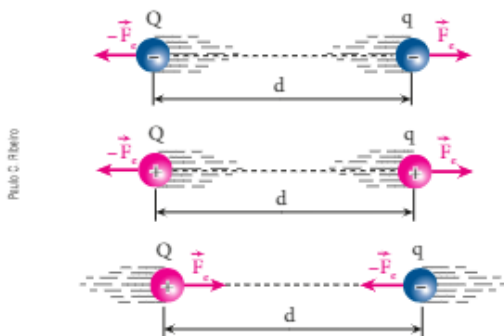
## Analizando o experimento

Discuta com seus colegas, levante hipóteses e responda às questões a seguir.

1. O que existe de diferente na água destilada e na água com sal dissolvido?
2. O que o sal de cozinha acrescenta na água ao ser dissolvido?
3. Como se processa a passagem da corrente elétrica através da solução água + sal de cozinha?
4. Em termos de condutibilidade elétrica, a água que recebemos nas torneiras de nossas casas é mais parecida com a água destilada ou com a solução água + sal de cozinha? Por que isso ocorre?
5. No início deste *Faça você mesmo* foram citadas duas situações que envolveram a água como solução iônica. Pesquise e procure outras situações em que a água aparece como condutora de eletricidade.

## 8. LEI DE COULOMB

Como visto anteriormente, foi o francês Charles-Augustin de **Coulomb** quem formulou, em 1785, a lei matemática que rege as interações entre partículas eletrizadas. Usando um modelo newtoniano, ele estabeleceu que a interação eletrostática entre essas partículas manifestava-se por meio de forças de atração e repulsão, dependendo dos sinais das cargas.



O enunciado da **Lei de Coulomb** pode ser apresentado da seguinte forma:

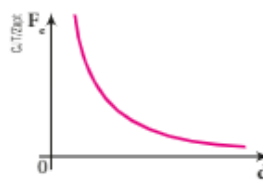
As forças de interação entre duas partículas eletrizadas possuem intensidades iguais e são sempre dirigidas segundo o segmento de reta que as une. Suas intensidades são diretamente proporcionais ao módulo do produto das cargas e inversamente proporcionais ao quadrado da distância entre as partículas.

Considere duas partículas eletrizadas com cargas  $Q$  e  $q$ , a uma distância  $d$  uma da outra. De acordo com a **Lei de Coulomb**, a intensidade da força de interação eletrostática (atração ou repulsão) entre as cargas é calculada por

$$F_e = K \frac{|Qq|}{d^2}$$

em que  $K$  é uma constante de proporcionalidade.

Observe a representação gráfica de  $F_e$  em função de  $d$ .



O valor da constante  $K$ , denominada **constante eletrostática**, depende do meio em que as cargas se encontram. Essa constante  $K$  é definida, no SI, por  $K = \frac{1}{4\pi\epsilon}$ ,

sendo  $\epsilon$  a **permissividade absoluta** do meio onde as cargas estão.

Como em nosso estudo geralmente o meio considerado é o vácuo, nesse dielétrico temos, no SI:

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ C}^2$$

Assim:

$$K_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = \frac{1}{4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}$$

$$K_0 \cong 9,0 \cdot 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$$

É comum encontrarmos os termos **permissividade relativa** ou **constante dielétrica**, denominações referentes a uma mesma grandeza, definida pela relação:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

Portanto, a **permissividade relativa** ( $\epsilon_r$ ) de um meio é o quociente da permissividade absoluta desse meio ( $\epsilon$ ) pela permissividade absoluta do vácuo ( $\epsilon_0$ ).

### NOTA

O significado da permissividade de um meio será estudado no Capítulo 7. Por enquanto, basta sabermos que permissividade é uma constante física associada ao meio onde as cargas elétricas se encontram.

## Alguns exemplos de manifestações da eletricidade estática

A eletricidade estática, obtida principalmente por atrito, pode manifestar-se em vários fenômenos do nosso cotidiano, às vezes de forma inofensiva, mas eventualmente de forma perigosa.

Uma dessas manifestações inofensivas pode ser observada em locais muito secos, de índices de umidade do ar muito baixos. Ao manusear um agasalho de lã sintética, podemos ouvir estalidos, devido a pequenas descargas elétricas entre seus fios. Se estivermos no escuro, poderemos até observar pequenas faíscas entre os fios que foram eletrizados por atrito.

Veja mais alguns exemplos.

### Exemplo 1:

Nas tecelagens e nas fábricas de papel-jornal, onde o tecido e o papel são enrolados em grandes bobinas, ocorre o atritamento desses materiais com as partes metálicas das máquinas e, em consequência, aparecem cargas elétricas que podem produzir faíscas quando um operário encosta um objeto – uma chave de fenda, por exemplo. Essas faíscas podem iniciar a combustão do tecido ou do papel. Para evitar que isso ocorra, o local deve ser fechado e mantido com umidade controlada, pois as gotículas de água que são borrifadas nas peças que se atrimam descarregam-nas, evitando os perigos de incêndio.

### Exemplo 2:

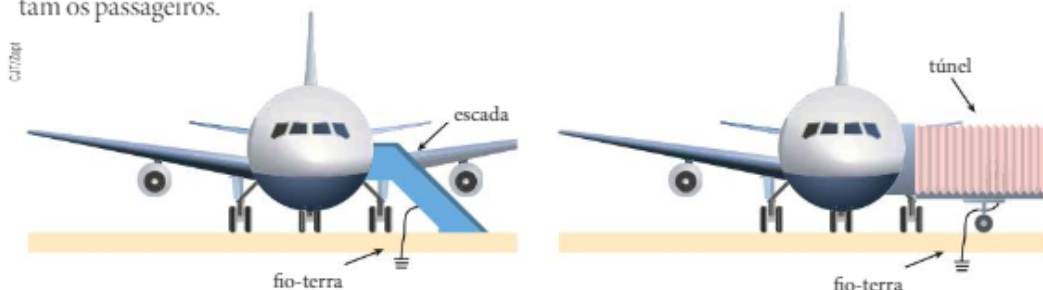
Faíscas indesejáveis podem também ocorrer onde existe material inflamável, como nas refinarias de petróleo, indústrias de certos produtos químicos e salas de cirurgia dos hospitais (onde a maioria dos anestésicos gera vapores altamente explosivos). Por isso, nesses locais, é necessário um controle para evitar possíveis acidentes provocados pela eletricidade estática.

### Exemplo 3:

O atrito da superfície externa de um avião com o ar produz a eletrização dessa superfície. Para o escoamento das cargas elétricas acumuladas durante o voo existem nas asas pequenos fios metálicos.

Durante o abastecimento de aviões, eles são conectados à terra para que possíveis cargas elétricas existentes na superfície externa sejam escoadas, evitando pequenas descargas elétricas que poderiam explodir o combustível que está sendo introduzido nos tanques.

A conexão com a terra também pode ser feita por meio da escada ou do túnel por onde transitam os passageiros.



Na fotografia, podemos observar a aparência pitoresca dos cabelos do menino. A explicação é que o garoto, ao manter suas mãos em contato com um gerador eletrostático, torna-se eletrizado e seus fios de cabelo se repelem, buscando o máximo distanciamento entre si, já que suas cargas estão com mesmo sinal.

**Exemplo 4:**

Os caminhões que transportam combustíveis também se eletrizam devido ao atrito com o ar. Assim, antes de iniciar o descarregamento, o terminal da mangueira é encaixado na boca do tanque. Essa boca possui um aterramento, isto é, uma conexão condutora com a terra. Um cabo metálico faz a ligação entre o tanque do caminhão e o terminal da mangueira para descarregamento de possíveis cargas elétricas existentes no caminhão. Só após essa operação, o abastecimento é efetuado.



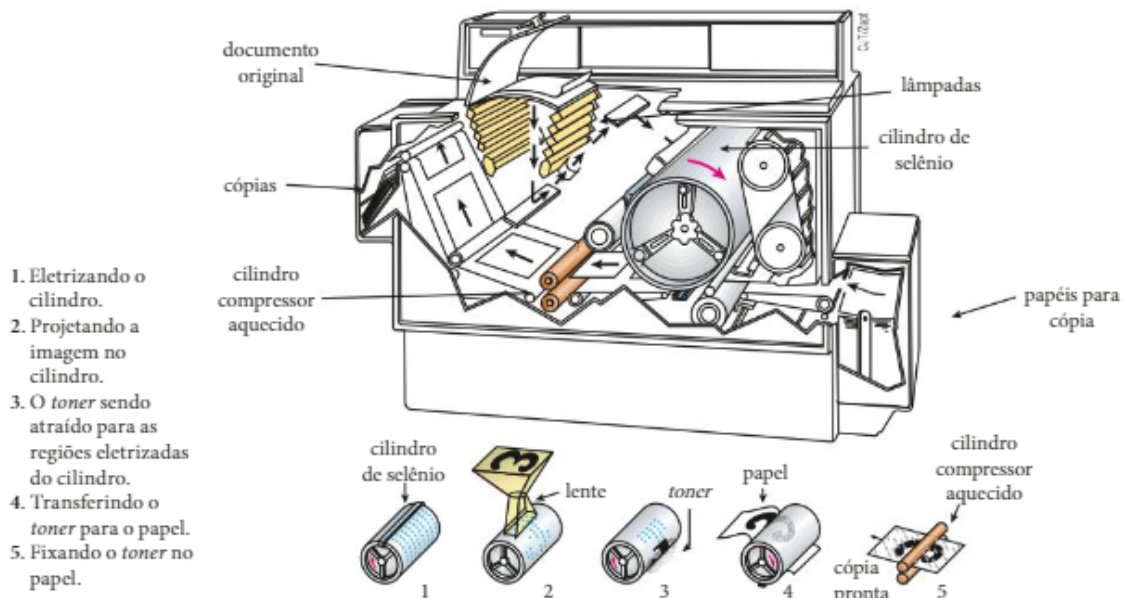
Os caminhões que transportam combustíveis precisam ter o tanque aterrado.

**Exemplo 5:**

Pessoa utilizando máquina copiadora.

A eletricidade estática tem, em alguns casos, caráter útil. As máquinas copiadoras, por exemplo, usam cargas eletrostáticas na reprodução de textos ou ilustrações de um original. A imagem desse original é projetada em um cilindro condutor revestido de selênio (fotocondutor – isolante nos locais não iluminados e condutor nos locais expostos à luz). Esse cilindro, inicialmente eletrizado, é descarregado na razão direta da intensidade da luz que nele incide a partir do original, permanecendo eletrizado nos locais das imagens projetadas. Em seguida, partículas de *toner* (tinta em pó) são atraídas pelas regiões ainda eletrizadas do cilindro. A tinta é, então, transferida para o papel da cópia e fundida por aquecimento, obtendo-se uma reprodução duradoura.

Veja, a seguir, um corte de uma máquina copiadora e os cinco passos para a reprodução de um original.





## FAÇA VOCÊ MESMO

### Moléculas da água são polares

Quando atritamos dois corpos de materiais diferentes, sabemos que um deles retira elétrons do outro. O que recebe elétrons fica negativo e o que perde fica positivo. Quando aproximamos um desses corpos eletrizados de um terceiro (condutor), mesmo que este esteja eletricamente neutro, podemos produzir uma separação de cargas em sua superfície externa usando a indução. Isso pode até provocar uma atração entre esses dois corpos.

O que propomos neste *Faça você mesmo* é a realização de uma atividade experimental bastante simples na qual podemos constatar o descrito no parágrafo anterior.

#### Material necessário

- 1 caneta esferográfica plástica simples com tampa;
- 1 torneira, de onde pode fluir um estreito filete de água.

#### Procedimento

- I. Durante alguns segundos esfregue o corpo da caneta em sua roupa; isso irá eletrizá-la. Abra um pouco a torneira e deixe cair um fino filete de água. Aproxime a caneta do filete. Você observará o curso da água mudar, sendo atraído pela caneta.
- II. Essa caneta eletrizada também pode atrair pequenos pedaços de papel ou os cabelos longos de um(a) colega. Experimente e observe a atração.



Na fotografia podemos observar a realização do *Faça você mesmo*. O bastão atritado adquiriu cargas elétricas em excesso, passando a atrair as moléculas de água, que são polares.



figura 1



figura 2



figura 3

#### Analisando o experimento

1. Em um corpo condutor sabemos que portadores de carga elétrica se deslocam em sua superfície externa durante o processo de indução. No caso da água, como ocorre sua eletrização quando aproximamos a caneta eletrizada?
2. Se em vez da caneta plástica usarmos uma haste metálica, segurando-a sem luvas, vamos conseguir manter essa haste eletrizada para realizarmos o experimento? Explique sua resposta.
3. Quando atritamos o corpo da caneta no tecido da nossa roupa, ele se eletriza. Qual é o sinal mais provável da carga elétrica adquirida pela caneta? Consulte a série triboelétrica da página 17.

## QUESTÕES COMENTADAS



**1** Determine o número de elétrons que deverá ser fornecido a um condutor metálico, inicialmente neutro, para que fique eletrizado com carga elétrica igual a  $-1,0\text{ C}$ .

**Dado:** carga elementar  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{ C}$

### RESOLUÇÃO

A carga elétrica de qualquer corpo pode ser expressa sempre da seguinte maneira:

$$Q = \pm ne$$

em que:  $n = 1, 2, 3, \dots$  e  $e$  é a carga elementar.

Assim:

$$-1,0 = -n \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \Rightarrow n = \frac{1,0}{1,6 \cdot 10^{-19}}$$

Logo:  $n = 0,625 \cdot 10^{19}$

$$n = 6,25 \cdot 10^{18} \text{ elétrons}$$

**Resposta:**  $6,25 \cdot 10^{18}$  elétrons

**2** Três pequenas esferas condutoras, **M**, **N** e **P**, idênticas estão eletrizadas com cargas  $+6q$ ,  $+q$  e  $-4q$ , respectivamente. Uma quarta esfera, **Z**, igual às anteriores, encontra-se neutra. Determine a carga elétrica adquirida pela esfera **Z**, após contatos sucessivos com **M**, **N** e **P**, nessa ordem.

### RESOLUÇÃO

Como os condutores são idênticos, após o contato entre dois deles cada um fica com metade da soma algébrica das suas cargas iniciais.

Assim, no contato entre **Z** e **M**, temos:

$$\text{antes } \begin{cases} Q_Z = 0 \\ Q_M = +6q \end{cases} \quad \text{após } \begin{cases} Q'_Z = +3q \\ Q'_M = +3q \end{cases}$$

No contato entre **Z** e **N**, temos:

$$\text{antes } \begin{cases} Q'_Z = +3q \\ Q_N = +q \end{cases} \quad \text{após } \begin{cases} Q''_Z = +2q \\ Q'_N = +2q \end{cases}$$

Finalmente, no contato entre **Z** e **P**, temos:

$$\text{antes } \begin{cases} Q''_Z = +2q \\ Q_P = -4q \end{cases} \quad \text{após } \begin{cases} Q'''_Z = -q \\ Q'_P = -q \end{cases}$$

Portanto, após os contatos sucessivos de **Z** com **M**, **N** e **P**, sua carga elétrica  $Q'''_Z$  é dada por:

$$Q'''_Z = -q$$

**Resposta:**  $-q$

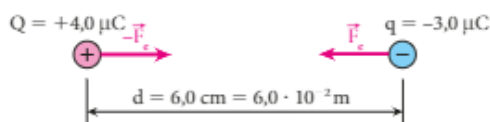
**3** Determine o módulo da força de interação entre duas partículas eletrizadas com  $+4,0\text{ C}$  e  $-3,0\text{ C}$ , estando elas no vácuo à distância de  $6,0\text{ cm}$  uma da outra.

**Dado:** constante eletrostática do vácuo

$$K_0 = 9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$$

### RESOLUÇÃO

Como as cargas têm sinais opostos, a interação entre elas é atrativa.



Aplicando a **Lei de Coulomb**, temos:  $F_e = K \frac{|Qq|}{d^2}$

Substituindo os valores conhecidos, temos:

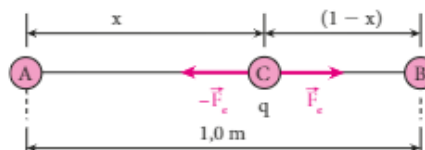
$$F_e = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{4,0 \cdot 10^{-6} \cdot 3,0 \cdot 10^{-6}}{(6,0 \cdot 10^{-2})^2} \Rightarrow F_e = 30 \text{ N}$$

**Resposta:**  $30\text{ N}$

**4** Duas partículas **A** e **B**, eletrizadas com cargas de mesmo sinal e respectivamente iguais a  $Q_A$  e  $Q_B$ , tal que  $Q_A = 9Q_B$ , são fixadas no vácuo a  $1,0\text{ m}$  de distância uma da outra. Determine o local, no segmento que une as cargas **A** e **B**, onde deverá ser colocada uma terceira carga **C**, para que ela permaneça em repouso.

### RESOLUÇÃO

Inicialmente, façamos um esquema da situação:



Como as cargas **A** e **B** têm o mesmo sinal, as forças de interação que agirão sobre a terceira carga terão a mesma direção, mas sentidos opostos, não importando qual o seu sinal. Uma vez que essa terceira carga deve ficar em repouso, os módulos das forças que agem sobre ela devem ser iguais (resultante nula).

$$\text{Assim: } K \frac{|Q_A q|}{x^2} = K \frac{|Q_B q|}{(1-x)^2}$$

$$\frac{9|Q_B|}{x^2} = \frac{|Q_B|}{(1-x)^2} \Rightarrow x^2 = 9(1-x)^2$$

$$\text{Logo: } x = 3(1-x) \Rightarrow x = 3 - 3x \Rightarrow 4x = 3$$

Portanto:  $x = 0,75\text{ m}$

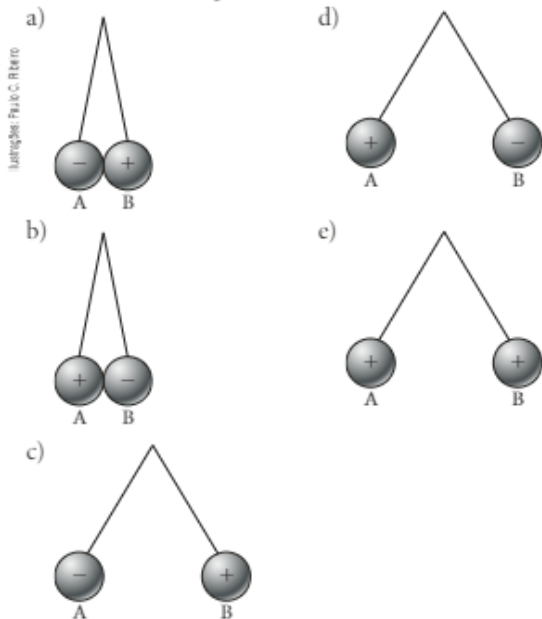
**Resposta:** A carga **C** deve ser colocada a  $0,75\text{ m}$  de **A** e a  $0,25\text{ m}$  de **B**.

### NOTA

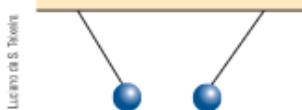
A equação  $x^2 = 9(1-x)^2$  admite uma outra solução, que não satisfaz às condições do problema. Ela corresponde a um ponto fora do segmento que une **A** e **B**, em que as forças têm mesmo módulo e mesmo sentido e, portanto, **não se equilibram**.



Decorridos alguns segundos, mantido o bastão à direita próximo da esfera **B**, a configuração que melhor representa o estado final do experimento é:



11. Em um experimento realizado em sala de aula, um professor de Física mostrou duas pequenas esferas metálicas idênticas, suspensas por fios isolantes, em uma situação de atração.



Na tentativa de explicar esse fenômeno, cinco alunos fizeram os seguintes comentários:

Maria — Uma das esferas pode estar eletrizada positivamente e a outra, negativamente.

José — Uma esfera pode estar eletrizada positivamente e a outra, neutra.

Roberto — O que estamos observando é simplesmente uma atração gravitacional entre as esferas.

Marisa — Essas esferas só podem estar funcionando como ímãs.

Celine — Uma esfera pode estar eletrizada negativamente e a outra, neutra.

Fizeram comentários corretos os alunos:

a) Marisa, Celine e Roberto. d) José, Roberto e Marisa.

b) Roberto, Maria e José. e) Marisa e Roberto.

c) Celine, José e Maria.

12. Considere os materiais a seguir:

- |             |               |             |
|-------------|---------------|-------------|
| a) madeira; | d) alumínio;  | g) platina; |
| b) vidro;   | e) ouro;      | h) náilon.  |
| c) algodão; | f) porcelana; |             |

Quais deles são bons condutores de eletricidade?

13. Durante uma aula de Física, uma aluna de longos cabelos começa a penteá-los usando pente de plástico. Após passar o pente pelos cabelos, nota que ele atrai pequenos pedaços de papel que se encontram sobre sua carteira. Admirada, ela pergunta ao professor qual a explicação para tal fato. O professor pede que os demais alunos se manifestem. Cinco deles deram respostas diferentes, qual acertou a explicação?  
 Aluno **A** — O pente é um bom condutor elétrico.  
 Aluna **B** — O papel é um bom condutor elétrico.  
 Aluno **C** — Os pedaços de papel já estavam eletrizados.  
 Aluna **D** — O pente ficou eletrizado por atrito no cabelo.  
 Aluno **E** — Entre o pente e os pedaços de papel ocorre atração gravitacional.

14. Dois corpos **A** e **B** de materiais diferentes, inicialmente neutros e isolados de outros corpos, são atritados entre si. Após o atrito, observamos que:

- um fica eletrizado positivamente e o outro continua neutro.
- um fica eletrizado negativamente e o outro continua neutro.
- ambos ficam eletrizados negativamente.
- ambos ficam eletrizados positivamente.
- um fica eletrizado negativamente e o outro, positivamente.

15. Três pequenas esferas metálicas **A**, **B** e **C** idênticas estão eletrizadas com cargas  $+3q$ ,  $-2q$  e  $+5q$ , respectivamente. Determine a carga de cada uma após um contato simultâneo entre as três.

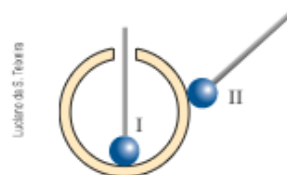
16. Em uma prova prática de Eletrostática, o professor entregou ao aluno três esferas metálicas de mesmo diâmetro. A primeira delas, a esfera **A**, estava inicialmente neutra. As outras duas, **B** e **C**, estavam respectivamente eletrizadas com cargas elétricas  $Q_B = +1,2 \mu\text{C}$  e  $Q_C = +1,8 \mu\text{C}$ . O professor pediu ao aluno que realizasse dois contatos entre essas esferas:

1ª) A esfera **A** toca a esfera **B**;

2ª) A esfera **A** toca a esfera **C**.

Que carga elétrica ficou em cada uma das esferas após esses contatos?

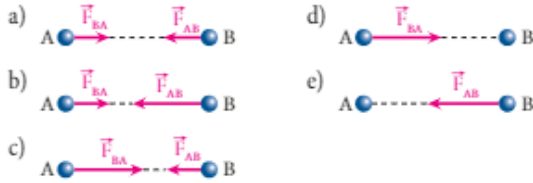
17. Em uma esfera metálica oca, carregada positivamente, são encostadas esferas metálicas menores, presas a cabos isolantes e inicialmente descarregadas.



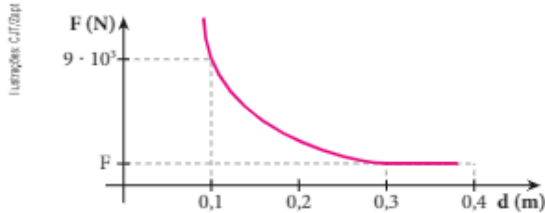
As cargas que passam para as esferas menores, **I** e **II**, são, respectivamente:

- zero e negativa;
- zero e positiva;
- positiva e negativa;
- positiva e zero;
- negativa e positiva.

18. Duas pequenas esferas metálicas, A e B, são colocadas de tal forma que ficam separadas a uma distância  $d$ . Elas possuem cargas elétricas diferentes e de sinais opostos. Nas alternativas a seguir são representadas as forças de atração entre elas. Qual das alternativas representa corretamente essas forças?



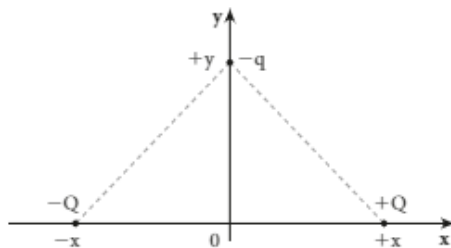
19. Em um experimento simples, duas partículas eletrizadas com cargas elétricas idênticas foram utilizadas para o estudo da intensidade da força de repulsão com a distância. O gráfico representado a seguir mostra como a intensidade da força de repulsão variou de acordo com a distância entre elas.



Como o experimento foi realizado no vácuo, a constante eletrostática a ser utilizada é  $K = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ .

Determine:  
 a) a intensidade da força de repulsão denominada  $F$  no gráfico;  
 b) o módulo da carga elétrica existente em cada partícula.

20. Em um sistema de eixos  $0xy$ , são colocadas três partículas eletrizadas. A partícula A, com carga elétrica  $+Q$ , é fixada na posição  $+x$ . A partícula B, com carga  $-Q$ , é fixada na posição  $-x$ , e a terceira partícula, com carga  $-q$ , é colocada na posição  $+y$ , como mostra a figura a seguir.



Reproduza esse gráfico em seu caderno e represente na partícula de carga elétrica  $-q$  as forças exercidas pelas outras duas cargas  $+Q$  e  $-Q$ ; obtenha o vetor força resultante na carga de prova  $-q$  e indique a alternativa correta.

a) A força eletrostática resultante na carga de prova  $-q$  tem direção horizontal e sentido da esquerda para a direita.

- b) A força eletrostática resultante na carga de prova  $-q$  tem direção horizontal e sentido da direita para a esquerda.
- c) A força eletrostática resultante na carga de prova  $-q$  tem direção vertical e sentido ascendente.
- d) A força eletrostática resultante na carga de prova  $-q$  tem direção vertical e sentido descendente.
- e) A força eletrostática resultante na carga de prova  $-q$  é um vetor nulo.

21. A distância  $d$  entre duas partículas eletrizadas é de 10 cm. Desejamos alterar essa distância de tal forma que a força de interação fique 4 vezes a força inicial. Qual deve ser o novo valor de  $d$ ?

22. Duas pequenas esferas idênticas e condutoras são eletrizadas com cargas  $+Q$  e  $-3Q$  e dispostas a uma distância  $d$  uma da outra. A força elétrica de atração entre elas apresenta módulo  $F$ . Se colocarmos essas esferas em contato, sem alteração da carga total, e, em seguida, elas forem levadas de volta para suas posições originais, o que podemos dizer da nova força de interação entre elas?

23. Considere duas cargas puntiformes  $q_1 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ C}$  e  $q_2 = 12 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ , separadas 1 m uma da outra no vácuo. Sendo  $K = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$  a constante eletrostática do vácuo, qual é a intensidade da força de interação entre elas?

24. Sabemos que a força de interação entre partículas eletrizadas depende do valor de suas cargas elétricas, da distância entre elas e do meio onde se encontram. Quando o meio é o vácuo, a constante eletrostática vale  $9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ . Assim, quando duas partículas eletrizadas com cargas de  $6 \mu\text{C}$  e  $3 \mu\text{C}$  são mergulhadas na água pura, a 3 cm uma da outra, passa a existir uma repulsão de intensidade 2,2 N entre elas. Determine a constante eletrostática da água, em  $\text{Nm}^2/\text{C}^2$ .

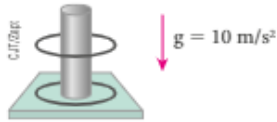
25. Duas partículas eletrizadas positivamente com cargas  $q_1$  e  $4q_1$  são fixadas a uma distância  $d$  uma da outra. Uma terceira partícula, com carga negativa  $Q$ , é colocada sobre a linha que une as partículas fixas a uma distância  $x$  da carga  $q_1$ , ficando livre para mover-se para a direita ou para a esquerda. Observe a figura fornecida.



Responda às questões propostas.

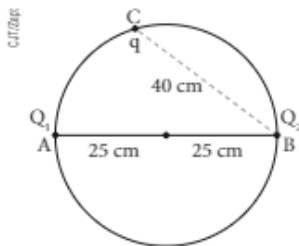
- a) Qual é o valor da distância  $x$  para que a carga livre  $Q$  não se mova ao longo do segmento?
- b) Verifique se existe um valor de  $Q$ , colocado conforme o item a, de modo que as três partículas possam manter-se em equilíbrio ao soltarmos  $q_1$  e  $4q_1$ .

26. Um professor de Física realizou um experimento de Eletrostática para uma turma de pré-vestibulandos. Usando luvas de material isolante, pegou dois pequenos anéis de alumínio, idênticos e de massa 3,6 gramas cada um. Um bastão foi atritado e colocado em contato com um dos anéis, que adquiriu uma carga elétrica de módulo  $Q$ . O outro anel permaneceu neutro. Em seguida, fez contato entre os dois anéis. Separou-os e, em um dispositivo de material isolante, os dois anéis foram depositados conforme a figura. Nessas condições, o anel superior flutua sobre o inferior, mantendo uma distância fixa de 1 cm. Qual foi a carga  $Q$ , em módulo, adquirida pelo primeiro anel no contato com o bastão eletrizado? Com os dados fornecidos, é possível saber o sinal da carga elétrica adquirida pelo anel?



**Dado:** constante eletrostática do ar =  $9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ .

27. No estudo das interações de partículas eletrizadas procuramos disponibilizá-las de várias maneiras diferentes. Em uma dessas configurações, duas partículas com cargas elétricas  $Q_1 = 3,0 \mu\text{C}$  e  $Q_2 = (64/9) \mu\text{C}$  são fixadas nos pontos A e B, diametralmente opostos, em uma circunferência de raio igual a 25 cm. Uma terceira partícula eletrizada  $q = 1,0 \mu\text{C}$  é fixada no ponto C da circunferência, situada a 40 cm de B. Observe a figura a seguir.



Dada a constante eletrostática do meio  $K = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ ,

determine a intensidade da força resultante que age na partícula de carga  $q$ , devido à ação das cargas  $Q_1$  e  $Q_2$ .

28. Considere o modelo clássico do átomo de hidrogênio, no qual existe um próton no núcleo e um elétron girando em órbita circular em torno desse núcleo.

Suponha conhecidos:

- carga do próton (em módulo) =  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ;
- carga do elétron (em módulo) =  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ;
- raio da órbita do elétron =  $1,0 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ ;
- massa do elétron =  $9,0 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ ;
- massa do próton =  $1,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ;
- constante eletrostática do meio:  $K = 9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ ;
- constante de gravitação universal:  $G = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ .

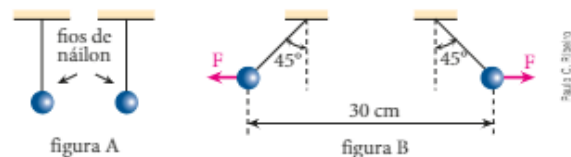
Admitindo apenas as interações devidas às cargas elétricas, determine:

- o módulo da força de interação entre o próton e o elétron;
- a velocidade escalar do elétron.

Se fossem consideradas também as interações gravitacionais, qual seria:

- o módulo da força resultante de interação entre próton e elétron?
- a velocidade escalar do elétron?

29. As duas esferas idênticas da figura A, uma eletrizada e a outra neutra, foram colocadas em contato e, em seguida, recolocadas em suas posições iniciais, aparecendo entre elas uma força elétrica de repulsão de intensidade  $F$ . As esferas estão em equilíbrio na posição indicada na figura B. Se a massa de cada esfera vale 10 g, o meio é o vácuo ( $K_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ ) e  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , qual é o módulo da carga de cada esfera, na figura B?



## DESCUBRA MAIS

- 1 Pesquise sobre a **força nuclear forte**. Qual é a diferença entre essa força e a **força nuclear fraca**?
- 2 Faça uma pesquisa sobre a **força eletromagnética**. Podemos encontrá-la em um átomo ou em uma molécula?
- 3 É comum uma pessoa, ao fechar a porta de um automóvel após tê-lo dirigido, receber um choque no contato com o puxador. Como você explica esse fato?
- 4 Você talvez já tenha visto na TV ou no cinema alguma cena em que uma pessoa se encontra em uma banheira ou piscina e cai na água, por exemplo, um ventilador ligado. Se a água é um isolante elétrico, por que a pessoa recebe um choque?

# INTERSABERES

## A composição "atual" da matéria

No início deste capítulo, dissemos que a matéria é constituída de moléculas. As moléculas, por sua vez, são formadas de átomos, e os átomos, de prótons, nêutrons e elétrons. No entanto, para os padrões atuais, essa é uma visão bastante simplista! Hoje, sabemos muito mais do que isso a respeito da constituição da matéria.

Há cerca de 13,7 bilhões de anos (esta é a idade estimada para o Universo), teria ocorrido o *big-bang*, momento primordial em que um certo "ovo cósmico", superaquecido, expandiu-se violentamente a partir de dimensões ínfimas. Teria havido nesse momento singular a liberação de uma quantidade gigantesca de energia que, com a redução da temperatura, transformou-se em parte na matéria hoje conhecida.

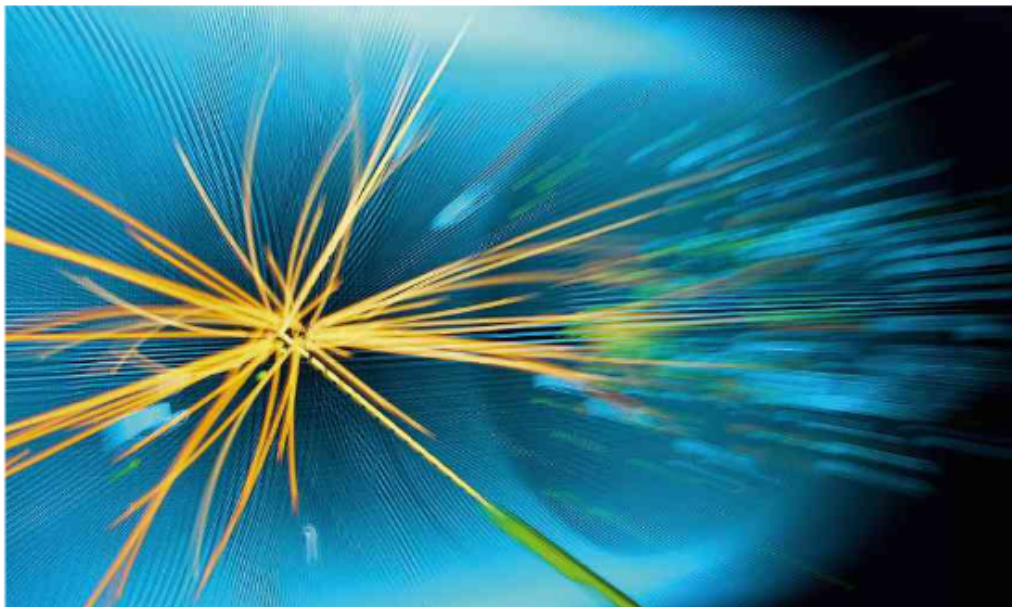
Muitos acreditam que antes do *big-bang* existia o "nada": um vazio absoluto. Não! Provavelmente, nunca tenha existido o vazio absoluto no Universo. Afinal, sempre se podem registrar partículas, mesmo que temporariamente, em todos os locais. Assim, os cientistas trabalham para desenvolver teorias para explicar esse "nada". Como teria sido antes da grande expansão, do *big-bang*?

A visão do que vem a ser matéria está em constante evolução. Em 1805, surgiu a ideia de átomo; em 1897, descobriu-se o elétron; em 1913, foi estabelecido o conceito de um núcleo com elétrons girando ao seu redor; em 1919, foi a vez do próton; e em 1932, do nêutron. Entre 1969 e 1995, surgiram as teorias dos *quarks* e dos *léptons*. Outras partículas elementares também foram detectadas, como os *mésons*, os *neutrinos*, os *pósitrons*, os *hádrons*, os *glúons*, os *bósons* etc.

Com o aumento da tecnologia, a Física experimental passou a registrar com maior frequência situações inusitadas e novas descobertas são sempre registradas. E essa é a razão da palavra "atual", presente em nosso título. Enfatizamos que daqui a alguns anos poderemos ter uma visão bastante diferente a respeito da composição da matéria. Só o tempo dirá.

Será, ainda, que com a descoberta do *bóson de Higgs* termina a construção da teoria sobre a composição da matéria? Será que o *Modelo Padrão* está mesmo finalizado?

A seguir, incluímos um artigo do professor de Física Marcelo Gleiser, publicado em abril de 2012 no jornal *Folha de S.Paulo*, a respeito desse assunto. Vale a pena ler.



Fotografia, com efeito de ampliação, de colisões na experiência *Compact Muon Solenoid (CMS)*. Os traços da imagem representam o resultado de colisões entre prótons no LHC. Maio de 2011.

### A composição atual da matéria

As partículas conhecidas hoje são combinações de doze partes; seriam elas o menor pedaço da matéria?

Os filósofos da Grécia Antiga foram os primeiros a refletir sobre a composição da matéria. Com incrível presciência, sugeriram que todas as formas de matéria são constituídas de pequenos tijolos indestrutíveis, que chamaram de átomos.

Em grego, a palavra “átomo” significa “o que não pode ser cortado”. Como os átomos eram supostamente eternos, constituíam a essência do ser. Das suas miríades combinações todas as formas da natureza emergiam, incluindo as transformações que vemos ocorrer no mundo e em nós mesmos. Com isso, os atomistas conseguiram unificar o ser e o devir, ou seja, as coisas que são e as coisas que se transformam.

Mesmo que o conceito moderno de átomos seja bem diferente do dos gregos de 24 séculos atrás, até hoje consideramos que a matéria seja composta por partículas minúsculas. Essa é a física de altas energias ou das partículas elementares, que busca justamente pelos menores pedaços de matéria.

Tudo começou com o inglês J. J. Thomson, em 1897. Em um experimento genial, Thomson demonstrou pela primeira vez que o átomo era divisível e que um de seus componentes era uma partícula cerca de 2000 vezes mais leve do que a mais leve da época, o íon de hidrogênio. (O hidrogênio é o elemento mais simples e leve que existe. Seu átomo tem apenas um próton no núcleo, circundado por um elétron. O íon é o átomo menos o elétron o que, nesse caso, significa um próton).

No século 20, a maior sofisticação dos experimentos levou à descoberta de centenas de partículas. Numa expressão clara da famosa equação de Einstein,  $E = mc^2$ , quanto maior a energia das partículas nos experimentos de colisão entre elas, mais tipos de partículas podem ser criadas, com massas maiores.

Essas transmutações materiais são controladas por uma série de “leis de conservação” que expressam a constância de uma grandeza durante uma colisão entre partículas. Por exemplo, a energia total e a carga elétrica total antes e depois de uma colisão é a mesma. Essas leis são a expressão do ser na Física Moderna, enquanto que as transmutações são a expressão do devir.

Após muito esforço, nos anos 80 os físicos obtiveram um modelo capaz de descrever toda a matéria que vemos no Universo: o chamado Modelo Padrão. Nele, fica claro que as centenas de partículas descobertas até então são combinações de apenas doze. Esse grupo, com seis *quarks* (dois deles aparecem no próton e no nêutron) e seis *léptons* (o elétron e seu neutrino são dois deles), constitui as partículas elementares.

Será que essas doze partículas são os menores pedaços de matéria? Ou será que essas doze são compostas por partículas ainda mais simples? Não temos indicação experimental de que existe esse outro nível. Por outro lado, o Modelo Padrão deixa em aberto muitas questões e é praticamente certo que novas partículas serão descobertas no futuro. Por exemplo, não conhecemos a composição da matéria escura seis vezes mais abundante do que a matéria comum.

Talvez o mais prudente seja chamar as partículas elementares de hoje como nossa versão atual da composição da matéria, certos de que a receita mudará no futuro. Questões científicas que buscam respostas finais são irrespondíveis.

MARCELO GLEISER é professor de Física Teórica no Dartmouth College, em Hanover (EUA), e autor de *Criação Imperfeita*. Disponível em: <[www1.folha.uol.com.br/fsp/ciencia/34527-a-composicao-atual-da-materia.shtml](http://www1.folha.uol.com.br/fsp/ciencia/34527-a-composicao-atual-da-materia.shtml)>. Acesso em: 10 fev. 2016.

### Compreensão, pesquisa e debate

1. Faça uma pesquisa sobre os *quarks* e tente explicar como eles se mantêm unidos para formar os prótons e os nêutrons.
2. Pesquise também os *léptons*. Seriam os *quarks* e os *léptons* os famosos “tijolinhos” que formam a matéria?
3. Se os prótons possuem cargas elétricas de sinais iguais e, portanto, se repelem, como essas partículas se mantêm estáveis no núcleo de um átomo?
4. Muito se falou de uma partícula que explicaria o porquê da massa dos corpos, o *bóson de Higgs* ou *partícula de Deus*. Pesquise e descubra mais a respeito dessa partícula.



## CAPÍTULO

## 2

## CAMPO ELÉTRICO

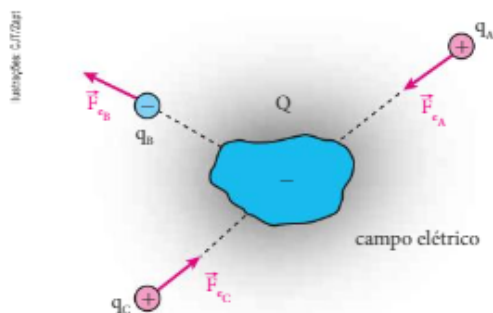
## 1. CONCEITO E DESCRIÇÃO DE CAMPO ELÉTRICO

Você já aprendeu que cargas elétricas de sinais opostos se atraem e cargas elétricas de sinais iguais se repelem. Essa interação a distância entre corpos eletrizados pode ser explicada usando-se o conceito de **campo elétrico**.

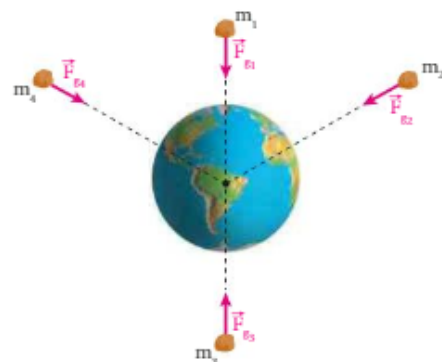
**Campo elétrico** é uma propriedade física estabelecida em todos os pontos do espaço que estão sob a influência de uma carga elétrica (carga fonte), tal que uma outra carga (carga de prova), ao ser colocada em um desses pontos, fica sujeita a uma força de atração ou de repulsão exercida pela carga fonte.

**Carga de prova** é uma carga elétrica de valor conhecido utilizada para detectar a existência de um campo elétrico. Ela é posicionada em um determinado local e, pelo efeito observado, pode-se saber se nele existe ou não um campo elétrico. Se confirmada a existência do campo elétrico, a carga de prova também auxilia a determinar sua intensidade.

Para tentarmos visualizar melhor, vamos encontrar a seguir duas representações esquemáticas. A primeira de uma carga elétrica  $Q$  gerando uma influência na região que a cerca e, na segunda, a Terra, com sua massa, também gerando uma influência no espaço que a circunda. Os conceitos de campo elétrico e de campo gravitacional explicam a atração e a repulsão (no caso de cargas elétricas) observadas nas situações representadas.



Representação esquemática do **campo elétrico**. A carga elétrica  $Q$  gera um campo elétrico no espaço que a envolve. Quando uma outra carga elétrica,  $q$  (carga de prova), é colocada em um ponto dessa região, ela recebe uma força  $\vec{F}_e$ , que pode ser de atração ou de repulsão em relação à carga fonte  $Q$ .



Representação esquemática do **campo gravitacional**, com elementos sem proporção entre si e em cores fantasia. O campo gravitacional é exclusivamente atrativo, como indicam as forças gravitacionais ( $\vec{F}_g$ ) representadas no esquema.

Como podemos observar nos esquemas, existe uma notável analogia entre os campos elétrico e gravitacional. Apesar disso, é importante notar que, no campo elétrico, as forças manifestadas podem ser de atração ou de repulsão, enquanto no campo gravitacional essas forças são exclusivamente de atração.

Foi Isaac **Newton** quem estabeleceu o conceito de interação a distância entre dois corpos. Michael **Faraday** utilizou e ampliou esse conceito estabelecendo a ideia de campo elétrico. Foi Faraday o primeiro a utilizar a ideia de campo para interações a distância.

Como sabemos, o campo gravitacional é descrito pelo vetor aceleração da gravidade ( $\vec{g}$ ). O campo elétrico, por sua vez, é descrito pelo vetor campo elétrico  $\vec{E}$ , que definiremos a seguir.

## 2. DEFINIÇÃO DO VETOR CAMPO ELÉTRICO

Para melhor compreensão, considere uma região do espaço inicialmente livre da influência de qualquer carga elétrica. Coloquemos nessa região um corpo eletrizado com carga elétrica  $Q$ . A presença desse corpo produz nos pontos da região uma propriedade física a mais: o **campo elétrico** gerado por  $Q$ .

Se uma carga de prova  $q$  for colocada em um ponto  $P$  desse campo, uma força elétrica  $\vec{F}_e$  atuará sobre ela. O vetor campo elétrico estabelecido no ponto  $P$  pela carga  $Q$  é então definido pelo quociente da força  $\vec{F}_e$  pela carga de prova  $q$ :

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{q}$$

Da definição, obtêm-se as características do vetor  $\vec{E}$ :

- **intensidade:**  $E = \frac{F_e}{|q|}$ ;
- **direção:** a mesma da força  $\vec{F}_e$ ;
- **sentido:** o mesmo da força  $\vec{F}_e$ , se  $q$  for positiva; contrário ao da força  $\vec{F}_e$ , se  $q$  for negativa.

Observe, a partir da definição, que a unidade de campo elétrico é o quociente da unidade de força pela unidade de carga elétrica.

No SI, a intensidade de força é expressa em newton (N) e a carga elétrica em coulomb (C). Por isso, tem-se como unidade de campo elétrico:

$$\text{unid. (E)} = \frac{\text{unid. (F)}}{\text{unid. (q)}} = \frac{\text{newton}}{\text{coulomb}} = \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

A intensidade do vetor campo elétrico fornece o valor da força elétrica atuante **por unidade de carga** da carga de prova  $q$  colocada no ponto  $P$ , não dependendo dessa carga de prova.

Suponha, por exemplo, que a intensidade do campo elétrico em determinado ponto do espaço seja  $E = 100 \text{ N/C}$ . Isso significa que atuará uma força elétrica de  $100 \text{ N}$  **em cada coulomb** de uma carga de prova colocada nesse ponto.

Portanto, se uma carga de prova  $q = 5 \text{ C}$  for colocada nesse mesmo local, atuará nela uma força elétrica cuja intensidade é calculada do seguinte modo:

$$E = \frac{F_e}{|q|} \Rightarrow F_e = |q|E$$

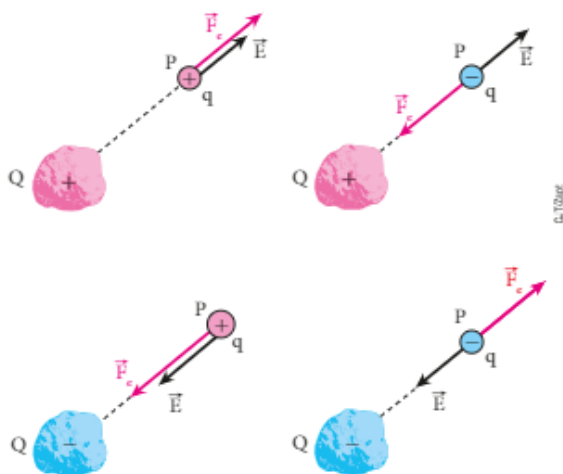
$$\text{Logo: } F_e = 5 \text{ C} \cdot 100 \frac{\text{N}}{\text{C}} \Rightarrow F_e = 500 \text{ N}$$

### NOTAS

- Por ser uma quantidade de carga extremamente grande, é impossível encontrarmos  $1 \text{ C}$  armazenado em corpos de pequenas dimensões.
- Apesar disso, por motivos didáticos, muitas vezes falamos até em partículas eletrizadas com carga de  $1 \text{ C}$  ou mais.

### Orientação do vetor campo elétrico

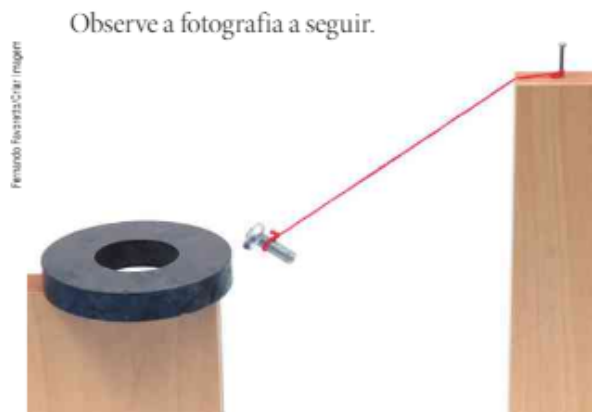
A seguir estão representadas as orientações do vetor campo elétrico  $\vec{E}$  devido a uma carga fonte  $Q$ .



Observe, nas figuras acima, que:

Quando a carga de prova  $q$  é **positiva**, os vetores força elétrica ( $\vec{F}_e$ ) e campo elétrico ( $\vec{E}$ ) têm a mesma direção e o mesmo sentido. Quando a carga de prova  $q$  é **negativa**, os vetores  $\vec{F}_e$  e  $\vec{E}$  têm a mesma direção, mas sentidos opostos.

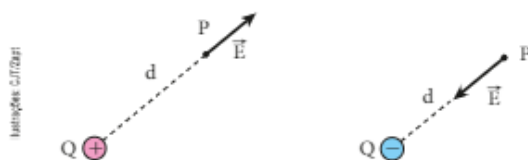
O vetor campo elétrico em um ponto  $P$  devido a uma carga  $Q$  **positiva** sempre tem sentido de **afastamento** em relação a ela, enquanto o vetor campo elétrico devido a uma carga  $Q$  **negativa** sempre tem sentido de **aproximação** em relação a ela, independentemente do sinal da carga de prova  $q$ .



Nesta fotografia observamos um parafuso pairando no ar. Nele encontramos três forças: o peso, a tração do fio e a força aplicada pelo campo magnético gerado pelo ímã. A resultante dessas três forças é nula, daí o equilíbrio do parafuso. Portanto, além do **campo gravitacional** e do **campo elétrico**, já estudados, ainda temos o **campo magnético**, alvo de estudo do Eletromagnetismo.

### 3. CAMPO ELÉTRICO DE UMA PARTÍCULA ELETRIZADA

Para melhor entendimento, imagine uma região do espaço onde não existam influências de massas ou de cargas elétricas. Colocando-se aí uma **partícula** eletrizada com carga  $Q$ , essa região ficará sob a influência dessa carga elétrica, existindo agora um campo elétrico  $\vec{E}$  gerado por  $Q$ . Em cada ponto dessa região podemos indicar o campo elétrico por meio do vetor  $\vec{E}$ .



Para calcularmos a intensidade do vetor campo elétrico em um ponto  $P$  situado a uma distância  $d$  da carga fonte  $Q$ , imagine uma carga de prova  $q$  nesse ponto. Nessa carga de prova atua uma força, cuja intensidade é dada pela **Lei de Coulomb**:

$$F_c = K \frac{|Qq|}{d^2} \quad (I)$$

O módulo do vetor campo elétrico no ponto  $P$  é dado por:

$$E = \frac{F_c}{|q|} \Rightarrow F_c = |q|E \quad (II)$$

Substituindo (I) em (II), obtemos:

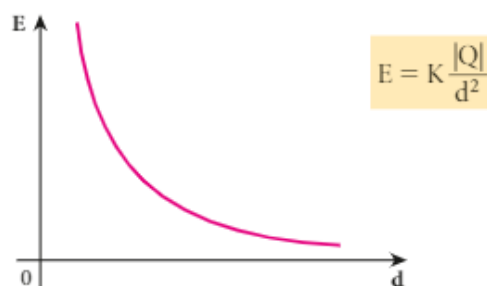
$$|q|E = K \frac{|Qq|}{d^2} \Rightarrow E = K \frac{|Q|}{d^2}$$

Observe, nessa expressão, que o módulo do vetor campo elétrico  $\vec{E}$  depende de três fatores:

- da carga elétrica  $Q$ , fonte do campo;
- da distância  $d$  do ponto considerado à carga fonte  $Q$ ;
- do meio (recorde-se de que  $K$  é a constante eletrostática, que depende do meio).

Observe mais uma vez que a intensidade do vetor  $\vec{E}$  não depende da carga de prova  $q$ .

A representação gráfica da intensidade do vetor campo  $\vec{E}$ , em função da distância entre o ponto considerado e a carga fonte  $Q$ , é a curva observada no diagrama a seguir.



O gráfico representa a intensidade do vetor campo  $\vec{E}$ , criado por uma partícula eletrizada com carga  $Q$ , em função da distância  $d$ .

É importante saber que a carga  $Q$  gera campo no espaço que a envolve, mas não gera campo no ponto onde se encontra. Se isso não fosse verdade,  $Q$  poderia acelerar a si mesma sob a ação do seu próprio campo, o que seria absurdo: um corpo não pode, por si só, alterar sua velocidade vetorial (**Princípio da Inércia**).

Portanto, não esqueça:

Uma partícula eletrizada gera campo elétrico na região do espaço que a circunda. Porém, no ponto onde ela foi colocada, o vetor campo, devido à própria partícula, é nulo.

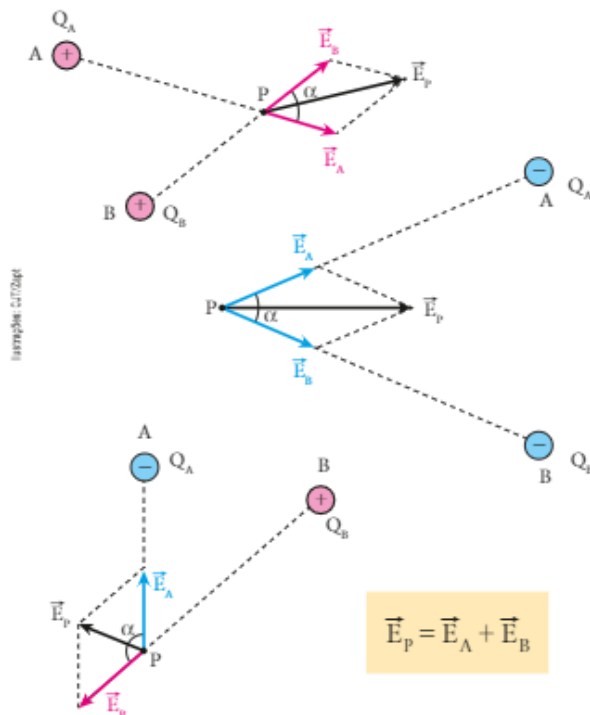
Essa afirmativa leva-nos a concluir que uma carga de prova, ao ser colocada num ponto qualquer de um campo elétrico, não altera o campo existente nesse ponto. Assim, o vetor campo elétrico, num ponto, depende da carga de prova que possa existir ali.

## 4. CAMPO ELÉTRICO DEVIDO A DUAS OU MAIS PARTÍCULAS ELETRIZADAS

Para determinar o campo elétrico resultante em um ponto de uma região onde existem duas ou mais partículas eletrizadas, devemos analisar separadamente a influência produzida por uma das cargas, depois pela outra, e assim por diante. Para entender melhor, imaginemos um ponto **P** dessa região. Em outros dois pontos, **A** e **B**, são colocadas duas partículas eletrizadas com cargas  $Q_A$  e  $Q_B$ , respectivamente.

O ponto **P** fica sob a influência simultânea de dois campos elétricos, um devido a  $Q_A$  e outro devido a  $Q_B$ .

O vetor campo elétrico resultante no ponto **P** é dado pela **soma dos vetores**  $\vec{E}_A$  e  $\vec{E}_B$ , devido a  $Q_A$  e  $Q_B$ , respectivamente, como ilustram as figuras a seguir:



Perceba que, se tivermos **n** partículas eletrizadas, em cada ponto do espaço que estiver sob a influência dessas cargas teremos **n** vetores, cada um representando o campo criado por uma das cargas. O vetor campo elétrico resultante será a soma desses **n** vetores:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n$$

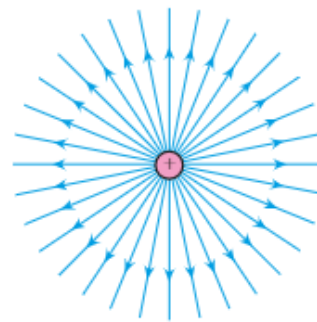
## 5. LINHAS DE FORÇA

Com a finalidade de indicar a presença de campo elétrico em certas regiões do espaço, criou-se uma forma geométrica de representação, denominada **linha de força**.

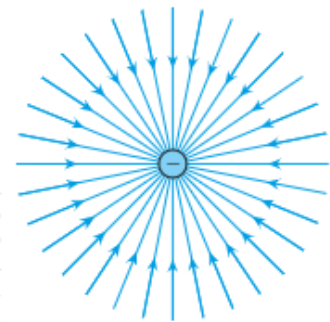
**Linha de força** de um campo elétrico é uma linha que tangencia, em cada ponto, o vetor campo elétrico resultante associado a esse ponto.

Por convenção, as linhas de força são orientadas no sentido do vetor campo. Assim, como o vetor campo tem sentido de **afastamento** em relação às cargas fontes positivas e de **aproximação** em relação às negativas, o mesmo acontece com as linhas de força.

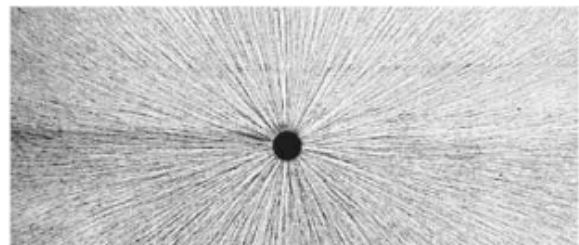
Para partículas pontuais (de dimensões desprezíveis), solitárias e eletrizadas, as linhas de força são radiais, como representam as figuras seguintes:



Linhas de força de **afastamento** representativas do campo elétrico criado por uma partícula eletrizada com carga **positiva**.

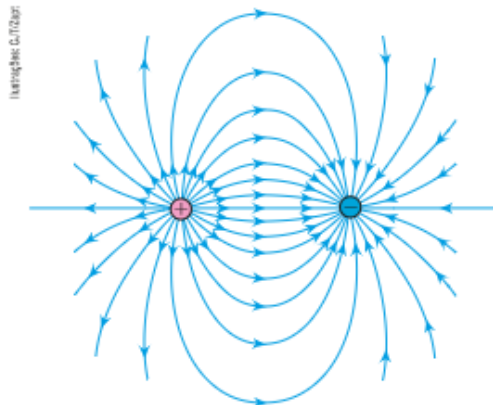


Linhas de força de **aproximação** representativas do campo elétrico criado por uma partícula eletrizada com carga **negativa**.

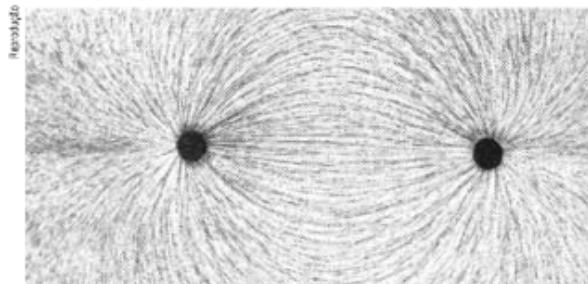


Pequenas fibras de tecido suspensas em óleo e submetidas ao campo elétrico criado por uma partícula eletrizada mostram a forma das linhas de força representativas desse campo.

Para duas partículas eletrizadas com cargas de módulos iguais, mas de sinais opostos, as linhas de força têm o seguinte aspecto:

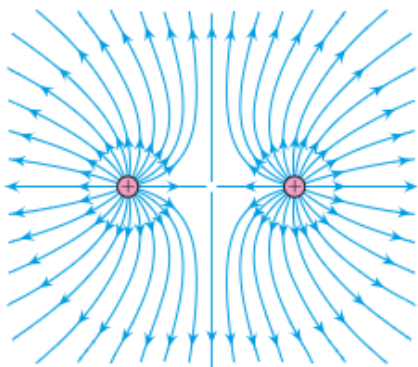


Observe a simetria das linhas de força representativas do campo elétrico resultante de dois campos criados por duas partículas eletrizadas com cargas de mesmo módulo, mas de sinais opostos.

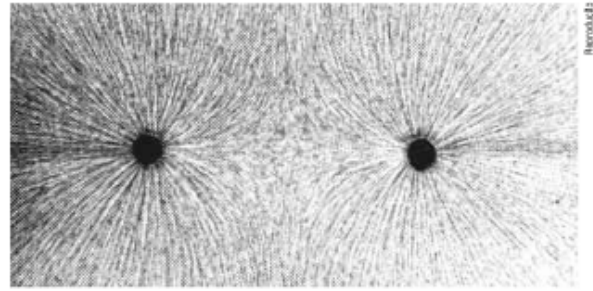


Pequenas fibras de tecido submetem-se ao campo elétrico resultante, criado por duas partículas eletrizadas com cargas de mesmo módulo, porém de sinais opostos. Podemos observar, ainda, a forma das linhas de força correspondentes.

Para duas partículas eletrizadas com cargas iguais, as linhas de força tomam o seguinte aspecto:

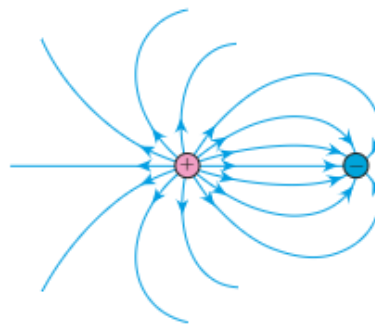


Observe a simetria das linhas de força representativas do campo elétrico resultante de dois campos criados por duas partículas eletrizadas com cargas iguais. No exemplo, ambas são positivas. Caso fossem negativas, mudaria apenas o sentido da orientação das linhas de força, sendo conservados os demais aspectos.



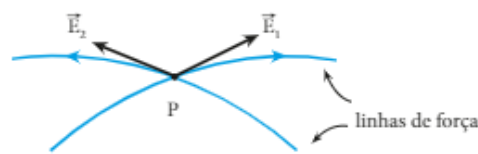
Pequenas fibras de tecido submetem-se ao campo elétrico resultante, criado por duas partículas eletrizadas com cargas iguais. É possível observar, também, a forma das linhas de força correspondentes.

Caso as cargas das partículas tenham módulos diferentes, não será mais observada a simetria das figuras anteriores. Como exemplo, podemos considerar duas partículas eletrizadas com cargas de sinais opostos, tendo a carga positiva o dobro do módulo da negativa. As linhas de força tomam o aspecto da figura seguinte.



Observe que o número de linhas de força que saem da carga positiva é o dobro do número que chega à negativa. Isso ocorre porque o número de linhas de força em cada partícula deve ser proporcional à sua carga.

Para finalizar, note que duas linhas de força **nunca se cruzam**, pois se isso acontecesse teríamos dois vetores campo elétrico definidos em um mesmo ponto, cada um tangenciando uma das linhas de força.



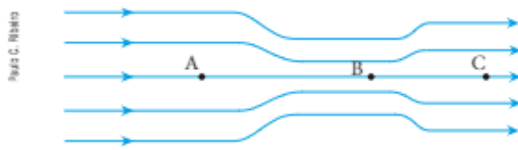
O cruzamento de duas ou mais linhas de força nunca ocorre.

Note que, em todas as configurações observadas anteriormente, a concentração das linhas de força (densidade de linhas de força) é maior nas vizinhanças das cargas, em que, evidentemente, a intensidade do campo elétrico é maior.

A seguir, vamos comparar a intensidade do vetor campo elétrico a partir das densidades de linhas de força em diferentes regiões desse campo.

## Densidade de linhas de força

Observe a figura a seguir, que representa, por meio de linhas de força, uma região onde existe um campo elétrico.

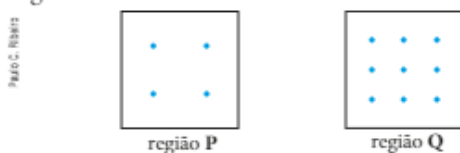


Partindo do exposto anteriormente, podemos concluir que a intensidade do vetor campo elétrico é maior no ponto **B** e menor no ponto **A**:

$$E_B > E_C > E_A$$

A intensidade do campo elétrico é maior na região de maior densidade de linhas de força e menor na região de menor densidade de linhas de força.

Deve-se entender **densidade** de linhas de força como a quantidade dessas linhas que “perfuram” cada unidade de área de um plano perpendicular a elas, na região considerada.



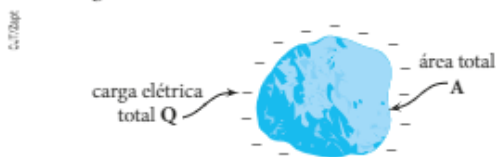
Nas imagens acima, considerando que os pontos indicados pertencem a linhas de força que perfuram o plano do papel, podemos concluir que:

$$E_Q > E_P$$

## 6. DENSIDADE SUPERFICIAL DE CARGAS

No processo de eletrização de um condutor, ocorre uma movimentação de portadores de carga elétrica até que o corpo atinja o chamado **equilíbrio eletrostático**, situação em que todos os portadores responsáveis pela eletrização acomodam-se na superfície externa do condutor.

Considere, então, um condutor de superfície externa de área total  $A$ , em equilíbrio eletrostático, eletrizado com carga  $Q$ .



Por definição, a **densidade superficial média de cargas** ( $\sigma_m$ ) desse condutor é dada pelo quociente da carga elétrica  $Q$  pela área  $A$ :

$$\sigma_m = \frac{Q}{A}$$

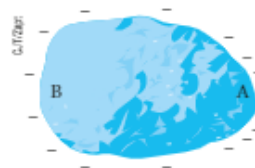
A densidade superficial de cargas é uma grandeza física escalar algébrica, dotada do mesmo sinal da carga  $Q$ , tendo por unidade, no SI,  $C/m^2$ .

Nesse exemplo, a densidade superficial média de cargas é **negativa**.

É usado o termo **média**, na densidade superficial de cargas, porque, em geral, as cargas elétricas não se distribuem de maneira uniforme sobre a superfície externa do condutor, já que isso depende da geometria do corpo.

## 7. O PODER DAS PONTAS

Experimentalmente, constata-se que o módulo da densidade superficial de cargas em um condutor eletrizado é **maior** nas regiões em que ele possui **menor** raio de curvatura (regiões de maior curvatura), como ilustra a figura a seguir.



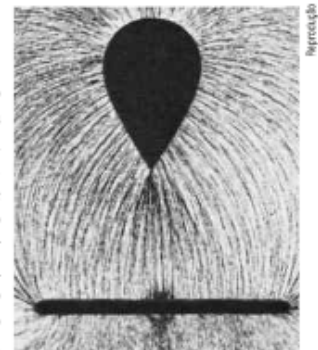
Nesse condutor eletrizado negativamente, a concentração de elétrons é maior na região **A** que na região **B**.

Essa densidade tem módulo ainda maior em regiões pontiagudas, o que lhes confere um comportamento conhecido por **poder das pontas**.

Assim, devido à maior concentração de cargas, o campo elétrico é mais intenso nas vizinhanças das regiões pontiagudas que nas vizinhanças das outras regiões do condutor. Esse campo mais intenso pode ionizar o meio (ar, por exemplo) no qual o condutor se encontra, tornando-o também condutor, como fazem os para-raios.

Linhas de força do campo elétrico criado por dois condutores eletrizados com cargas de sinais contrários.

A maior densidade de linhas de força na região pontiaguda do condutor superior e nas bordas da placa indica que o campo elétrico é mais intenso nessas regiões.





### Devemos ter cuidado com as pontas?

Em um condutor eletrizado, a maior concentração de cargas elétricas é encontrada nas regiões de maior curvatura, nas pontas. Assim, quando eletrizamos um condutor que exibe regiões pontiagudas, o campo elétrico é maior nessas pontas. Se a intensidade desse campo ultrapassar o ponto de ruptura do dielétrico (do meio, no caso o ar), cargas elétricas serão lançadas em forma de faíscas para o meio. Na fotografia, observamos descargas elétricas entre as pontas de dois pregos que estão altamente eletrizados.



## 8. CAMPO ELÉTRICO CRIADO POR UM CONDUTOR ELETRIZADO

Para um condutor eletrizado **em equilíbrio eletrostático**, são válidas as seguintes observações:

O vetor campo elétrico é nulo nos pontos internos do condutor.

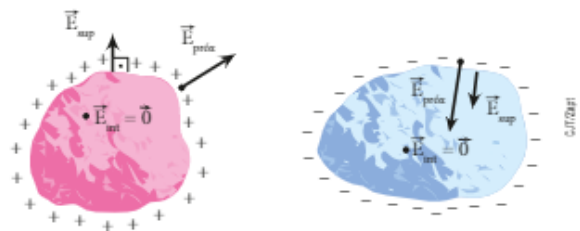
Se o campo não fosse nulo, surgiriam forças nos portadores de cargas elétricas livres existentes nessa região, provocando seu deslocamento de um local para outro, fato este que contraria a hipótese inicial de termos o condutor em equilíbrio eletrostático.

$$\vec{E}_{\text{int}} = \vec{0}$$

O vetor campo elétrico, em cada ponto da superfície externa do condutor, é perpendicular a ela, possuindo intensidade proporcional ao módulo da densidade superficial de cargas ( $\sigma$ ) da região considerada.

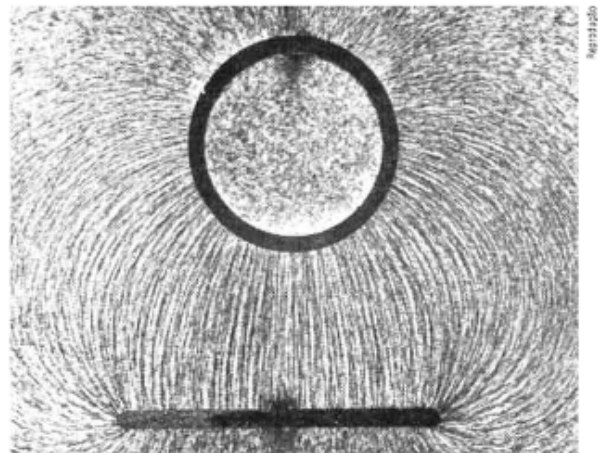
Observe que, se o vetor campo elétrico não fosse perpendicular à superfície do condutor, existiria uma componente desse vetor, tangenciando a superfície, o que provocaria o movimento de portadores de carga elétrica aí existentes, o que também contraria o fato de o condutor estar em equilíbrio eletrostático.

O campo elétrico nas vizinhanças externas da superfície também é perpendicular a ela, e sua intensidade é o dobro da intensidade do vetor campo elétrico nessa superfície.



$$E_{\text{sup}} = \frac{1}{2} E_{\text{próx}}$$

Nas ilustrações podemos observar a orientação do vetor campo elétrico na superfície e em um ponto próximo da superfície.



Linhas de força do campo elétrico criado por um cilindro oco e uma placa, eletrizados com cargas de sinais opostos. É importante observar que não existem linhas de força no interior do cilindro, levando-nos a concluir que, nesse local, o campo elétrico é nulo. Então, em pontos internos de um condutor em equilíbrio eletrostático, o campo elétrico é nulo tanto nos pontos do material como nos da cavidade. Note-se, ainda, que as linhas de força são perpendiculares às superfícies do cilindro e da placa.

## 9. CAMPO ELÉTRICO CRIADO POR UM CONDUTOR ESFÉRICO ELETRIZADO

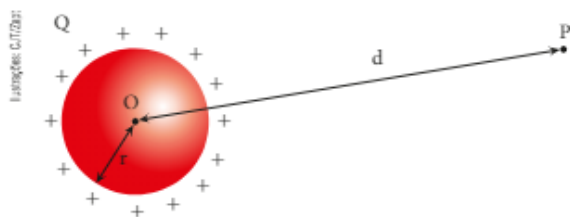
Uma superfície esférica tem a mesma curvatura em todos os seus pontos. Por isso, em um condutor esférico solitário e eletrizado, a densidade superficial de cargas é a mesma em todas as regiões de sua superfície externa, que se apresenta, portanto, uniformemente eletrizada.

As observações a respeito de campo elétrico feitas no item anterior também são válidas para condutores esféricos em equilíbrio eletrostático.

Dentre elas, interessa-nos destacar o fato de o campo elétrico ser nulo nos pontos internos:

$$\vec{E}_{\text{int}} = \vec{0}$$

Devido à simetria da esfera e à distribuição uniforme de cargas em sua superfície, para se calcular a intensidade do vetor campo elétrico em pontos externos, tudo se passa como se toda a carga estivesse concentrada no centro da esfera. Portanto, para uma esfera condutora de raio  $r$  eletrizada com carga  $Q$ , a intensidade do campo elétrico em um ponto  $P$  situado a uma distância  $d$  ( $d > r$ ) do seu centro fica determinada por:



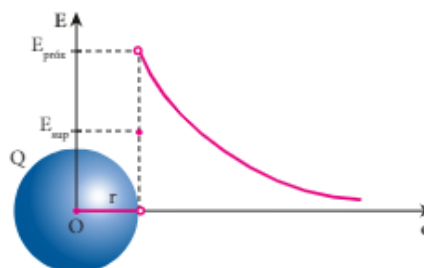
$$E_{\text{ext}} = K \frac{|Q|}{d^2}$$

Em um ponto muito próximo da superfície da esfera, a distância  $d$  torna-se praticamente igual ao raio  $r$  da esfera.

Assim, fazendo  $d = (r + \Delta r)$ , com  $\Delta r$  tendendo a zero, a intensidade do vetor campo elétrico fica determinada por:

$$E_{\text{próx}} = K \frac{|Q|}{(r + \Delta r)^2} \cong K \frac{|Q|}{r^2}$$

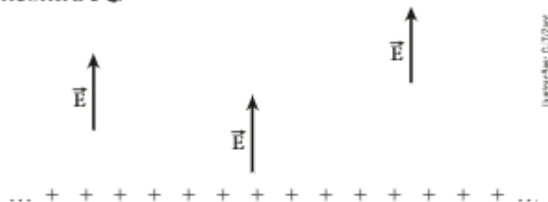
Veja a seguir a representação gráfica da intensidade  $E$  do campo elétrico em função da distância  $d$ , medida a partir do centro da esfera. O aspecto desse gráfico independe do sinal da carga da esfera.



Tudo o que foi descrito vale para um condutor esférico eletrizado maciço ou oco. Em ambos os casos, os portadores de cargas elétricas em excesso se distribuem apenas na superfície externa desse condutor, produzindo os mesmos efeitos nas duas situações.

## 10. CAMPO ELÉTRICO UNIFORME

Imagine uma superfície plana, ilimitada e uniformemente eletrizada. Sua densidade superficial de cargas é  $\sigma$ , e a permissividade absoluta do meio em que se encontra é  $\epsilon$ .



Pode-se demonstrar que essa superfície gera, em **todos** os pontos de cada semiespaço determinado por ela, um campo elétrico com as seguintes características:

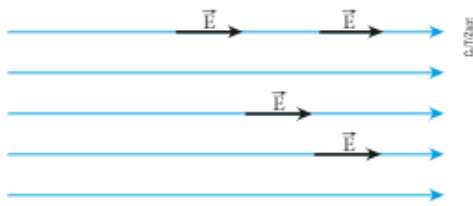
- **intensidade:**  $E = \frac{|\sigma|}{2\epsilon}$ ;
- **direção:** perpendicular à superfície;
- **sentido:** de afastamento ou de aproximação em relação à superfície, dependendo do sinal de sua carga elétrica.

Esse é um exemplo de campo elétrico uniforme, cuja definição é apresentada a seguir:

**Campo elétrico uniforme** é uma região do espaço onde o vetor representativo do campo ( $\vec{E}$ ) tem, em todos os pontos, a mesma intensidade, a mesma direção e o mesmo sentido.

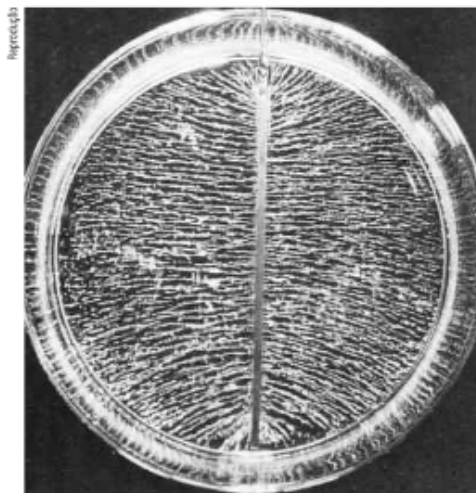


Em um campo elétrico uniforme, as linhas de força são representadas por segmentos de reta paralelos entre si, igualmente orientados e igualmente espaçados, como representa a figura a seguir.



Vamos agora retomar o exemplo apresentado na introdução deste assunto.

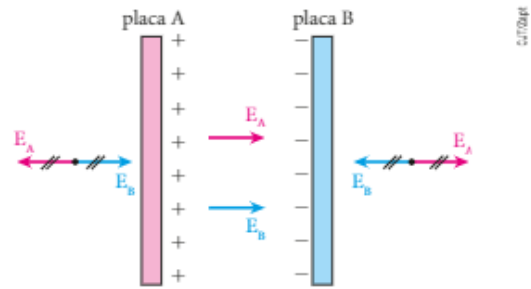
Embora não exista, na prática, uma superfície ilimitada, o campo elétrico gerado por uma superfície plana, **limitada** e uniformemente eletrizada é praticamente uniforme, com intensidade  $E = \frac{|\sigma|}{2\epsilon}$ , nos pontos situados nas proximidades de sua região central. Junto às bordas e nas regiões mais distantes, o campo sofre variações que não podem ser desprezadas.



Linhas de força do campo elétrico criado por uma placa plana, condutora e eletrizada. Observe que, na região central próxima à placa, o campo elétrico é praticamente uniforme.

A maneira mais comum de se conseguir um campo elétrico uniforme é utilizar duas placas condutoras planas e iguais, paralelas entre si e eletrizadas com cargas de mesmo módulo e sinais opostos.

Colocando uma placa muito próxima da outra, como representado na figura a seguir, ficam determinadas três regiões: uma entre as placas, onde o campo elétrico é praticamente uniforme, e duas externas a elas, onde o campo é praticamente nulo.

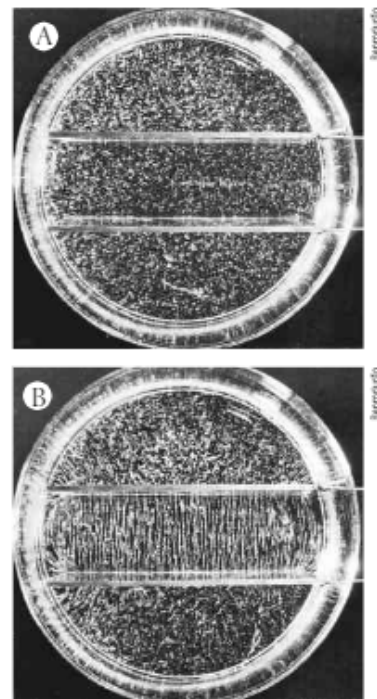


Como a densidade superficial de cargas tem o mesmo valor absoluto  $\sigma$  para as duas superfícies eletrizadas e, além disso, essas superfícies estão em um mesmo meio, os campos elétricos gerados por elas têm intensidades iguais, dadas pela seguinte expressão já vista:

$$E_A = E_B = \frac{|\sigma|}{2\epsilon}$$

Então, observando a figura anterior, podemos perceber que o campo elétrico resultante é praticamente nulo nas regiões externas às placas e que, entre elas, tem intensidade dada por:

$$E = E_A + E_B = \frac{|\sigma|}{2\epsilon} + \frac{|\sigma|}{2\epsilon} \Rightarrow E = \frac{|\sigma|}{\epsilon}$$



Em A, as placas ainda não foram eletrizadas. Em B, as placas estão eletrizadas com cargas de mesmo módulo, de sinais opostos. Podemos notar linhas de força de um campo elétrico praticamente uniforme na região entre elas. Nas regiões externas, entretanto, não há linhas de força porque o campo é praticamente nulo.

## EM BUSCA DE EXPLICAÇÕES

### Impressão a "jato de tinta"

Alguns trabalhos que fazemos no computador exigem a impressão de uma cópia. As impressoras mais comuns são as de "jato de tinta".

Mas como funciona o mecanismo dessa impressão?

O mais comum é o cabeçote de impressão vir no próprio cartucho. Isso faz com que a impressora tenha maior durabilidade, pois, cada vez que se troca o cartucho, renova-se o cabeçote de impressão.

Nesse cabeçote existe uma placa que comanda os jatos de tinta. Nela encontramos de 400 a 600 orifícios de diâmetros menores do que o de um fio de cabelo. Em cada um desses orifícios são lançadas até 36 000 gotas de tinta por segundo. Como os orifícios são extremamente pequenos, a tinta precisa passar por um processo de aquecimento para ficar mais fluida. Qualquer partícula de poeira pode entupir esses orifícios, impedindo que saia a tinta.



Fotografia de impressora do tipo "jato de tinta".

As pequenas gotas de tinta passam por um sistema de eletrização, no qual perdem elétrons, e, em seguida, por uma região onde existe um campo elétrico que desvia cada gota para que ela atinja o papel em um determinado local. O conjunto de pontos, cada ponto, uma gota, é que configura a imagem que vamos observar. A resolução da imagem pode atingir um número de  $1\,440 \times 720$  pontos por polegada quadrada.

No esquema representado a seguir podemos ter uma ideia do trajeto de cada gota de tinta.



## 11. FENÔMENOS ELETROSTÁTICOS NA ATMOSFERA

### O raio, o relâmpago e o trovão

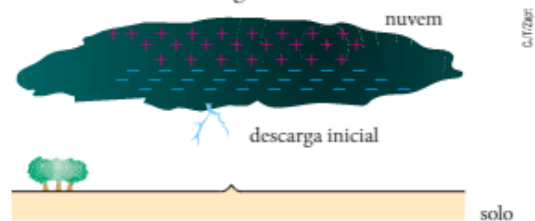
É durante uma tempestade que geralmente observamos uma das mais fantásticas manifestações da eletricidade: o **raio**. Esse acontecimento sempre intrigou o ser humano, chegando a ser considerado, em algumas comunidades primitivas, uma manifestação divina.

Somente no século XVIII, o diplomata e cientista estadunidense Benjamin Franklin (1706-1790) conseguiu provar que o raio era uma simples descarga elétrica ocorrida entre nuvens eletrizadas e a terra. Atualmente, sabe-se que essas descargas também podem ocorrer entre nuvens de potenciais diferentes, bem como entre partes diferentes de uma mesma nuvem, ou mesmo entre uma nuvem e o ar atmosférico.

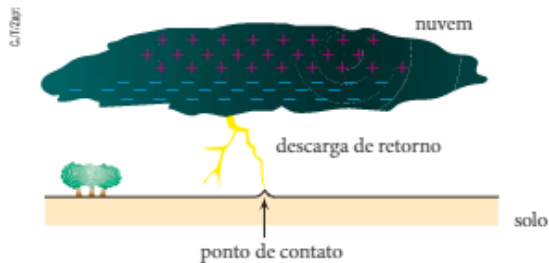
Graças à forte ionização das partículas de ar que estão no trajeto das cargas elétricas em movimento, essas descargas são acompanhadas de emissões de luz,

que constituem os **relâmpagos**. Além disso, o aquecimento brusco do ar provoca uma rápida expansão dessa massa gasosa, produzindo intensa onda de pressão, que se manifesta por meio de um forte estrondo: o **trovão**.

Os raios ocorrem quando o campo elétrico entre uma nuvem e a terra (ou entre duas nuvens) supera o limite da capacidade dielétrica do ar atmosférico, que normalmente varia entre 10 000 volts/cm e 30 000 volts/cm, dependendo das condições locais. É comum as descargas começarem com cargas elétricas negativas, liberadas pela nuvem em direção ao solo, que constituem a descarga inicial (*stepped leader*), a qual se ramifica a partir da base da nuvem, assemelhando-se a um galho de árvore.



Quando as cargas negativas da descarga inicial se aproximam do solo, o intenso campo elétrico formado em seu trajeto produz outra descarga elétrica, bem mais intensa, do solo para a nuvem, denominada descarga de retorno (*return stroke*).



A partir do encontro das duas descargas, ficam estabelecidos caminhos ionizados através do ar. Na sequência, cargas elétricas negativas saem das nuvens e dirigem-se para o solo, utilizando esses caminhos. Isso pode ocorrer várias vezes em um curto intervalo de tempo, enquanto essas condições perdurarem.

A duração de um raio é de aproximadamente meio segundo. Nesse breve intervalo de tempo, são transferidos cerca de  $10^{20}$  elétrons entre a base da nuvem e o solo. Em média, ocorrem 100 descargas elétricas por segundo entre as nuvens e a superfície da terra.

## O para-raios

Em razão do poder das pontas, as descargas elétricas entre uma nuvem e a terra ocorrem, geralmente, por meio de uma saliência condutora existente no solo, como, por exemplo, uma árvore.

Em regiões habitadas, costuma-se criar um caminho seguro para essas descargas a fim de se evitarem danos. Trata-se de um dispositivo criado originalmente por Benjamin Franklin, denominado **para-raios**. Esse dispositivo é formado por uma haste metálica de aproximadamente 1 metro de comprimento, com ápice em 4 pontas. A haste costuma ser fixada na parte superior das edificações ou de postes e ligada à terra por um cabo condutor isolado da construção.

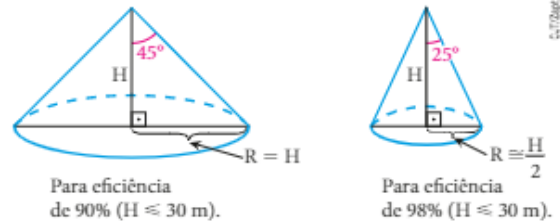


Fotografia de um para-raios.

Esquema de para-raios num edifício.



Para alturas de até 30 metros, um para-raios de Franklin, colocado no topo de um edifício, oferece uma área de proteção em forma de um cone. A geratriz desse cone estabelece um ângulo de  $45^\circ$  com a vertical para uma proteção com segurança de 90% e outro de  $25^\circ$  para uma segurança de 98%.



Para eficiência de 90% ( $H \leq 30$  m).

Para eficiência de 98% ( $H \leq 30$  m).

Observe que um para-raios não proporciona segurança total contra possíveis descargas elétricas. Seu grau de proteção depende de suas especificações; por exemplo, a condutividade do material utilizado em sua construção. Para alturas superiores a 30 metros, o para-raios de Franklin tem sua eficiência reduzida, sendo necessário usá-lo com outros sistemas para melhorar a proteção.

Em dias de tempestade, não se deve ficar sob árvores ou mesmo próximo de postes, da mesma forma que não se deve ficar em pé em locais descampados, porque as descargas elétricas ocorrem através das pontas e você pode se comportar como uma. Assim, durante uma tempestade, corra para um local seguro, que pode ser dentro de uma casa ou mesmo no interior de um automóvel. Não fique em terreno aberto, piscina ou na água do mar. Lembre-se de que o sal faz da água do mar uma solução eletrolítica, ou seja, boa condutora de eletricidade.

## O efeito corona

O **efeito corona** é um fenômeno relativamente comum em linhas de transmissão com sobrecarga em dias de grande umidade relativa do ar. Por causa do campo elétrico muito intenso nas vizinhanças dos condutores, as partículas de ar que os envolvem se tornam ionizadas e, como consequência, emitem luz quando íons e elétrons se recombinam.



A fotografia mostra o efeito corona ocorrendo em linhas de transmissão com sobrecarga.

## FAÇA VOCÊ MESMO

### Distribuição de cargas elétricas pela superfície externa de condutores eletrizados

Uma superfície metálica, condutora e plana é eletrizada. As cargas se distribuem pelas duas faces. Se curvamos a superfície, o que ocorre com as cargas elétricas?

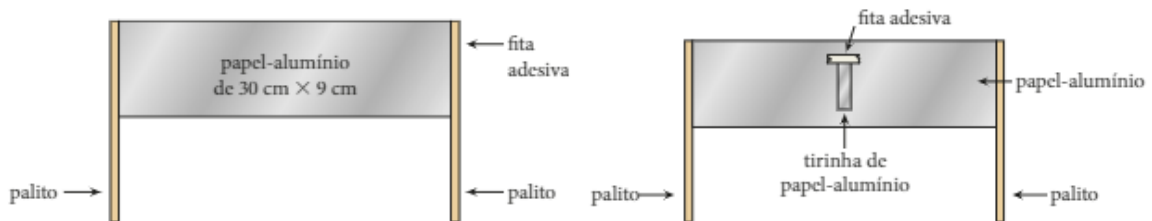
Apresentamos a seguir uma atividade experimental simples de ser realizada que comprovará a distribuição das cargas elétricas na face externa de uma superfície curva.

#### Material utilizado

- 1 pedaço de papel-alumínio, em forma de grande tira, de aproximadamente 30 cm por 9 cm;
- 2 pequenas tiras de 1 cm por 6 cm (também de papel-alumínio);
- 1 régua de plástico;
- 2 palitos de madeira de aproximadamente 30 cm;
- fita adesiva;
- 1 peça de roupa de lã.

#### Procedimento

- Prenda com fita adesiva as laterais (lados de 9 cm) do pedaço de papel-alumínio nos palitos de madeira.
- Fixe as tiras menores de papel-alumínio, usando as fitas adesivas, uma em cada face da grande tira.



- Atrite a régua na roupa de lã e encoste-a na grande tira de papel-alumínio. Repita várias vezes esse procedimento. Quanto mais cargas transferirmos para a tira de alumínio, mais afastadas ficarão as tirinhas.
- Sem tocar as partes de alumínio, provoque a curvatura da tira maior. Você observará que, na face convexa, a tirinha permanecerá afastada (por repulsão), enquanto a tirinha da face côncava irá se aproximar da tira maior. Isso ocorre porque, ao curvamos o papel-alumínio, as cargas que estavam distribuídas pelas duas superfícies se concentram apenas na superfície externa da curvatura da grande tira (face convexa), não sobrando cargas na face interna (face côncava).



#### Analisando o experimento

- Por que as cargas elétricas deslocam-se para as superfícies externas dos condutores?
- Na região interna de um condutor, em equilíbrio eletrostático, o que ocorre com a intensidade do campo elétrico?
- Forme um grupo com os colegas e pesquisem sobre a *gaiola de Faraday*. Após a pesquisa, cada um dos integrantes deve contar para os outros o que encontrou. Procurem fazer uma lista de situações em que são usadas essas blindagens elétricas.
- Faça uma conexão entre os condutores eletrizados e o poder das pontas.

### Mágica? Não, Física!

A internet é mesmo uma vasta fonte de possibilidades e informações! Na rede mundial de computadores é possível baixar imagens diversas, inclusive a que podemos observar ao lado. A pessoa que aparece na fotografia está demonstrando uma das aplicações de uma bobina de Tesla. Observe como as descargas elétricas atingem seu corpo, que está protegido por uma gaiola metálica. É mesmo um espetáculo muito interessante de se ver. Mas como funciona essa magnífica máquina de raios? Será que ela possui alguma utilidade prática ou é usada apenas para impressionar as pessoas? Receber essas descargas elétricas pode provocar lesões ao corpo e danos à saúde?



Re: Filarmônio São Paulo

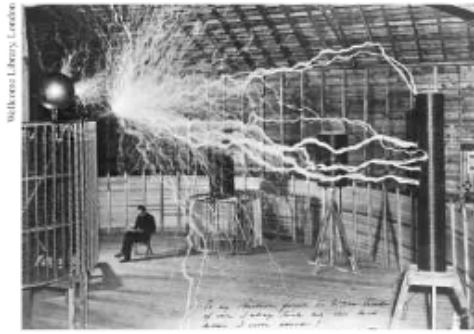
A visão dessa verdadeira profusão de raios pode também nos remeter à cena de um filme sobre um grande ilusionista. Para impressionar aqueles que presenciavam seus espetáculos, ele usava um objeto metálico, semelhante a uma espada, por onde recebia as descargas elétricas que pareciam brotar do nada.



Walt Disney Co./Event Collection/Universal Brand

Cena do filme *O aprendiz de feiticeiro*. O mágico se refugia no interior de uma gaiola de Faraday para não ser atingido pelas descargas elétricas.

A produção controlada de descargas elétricas foi desenvolvida pelo engenheiro Nikola Tesla, nascido em 1856, na aldeia de Smiljan, antigo Império Austríaco, atual Croácia. Tesla estudou engenharia e, apesar de não ter concluído seu curso de engenheiro eletrotécnico, foi trabalhar na companhia telefônica de Budapeste (Hungria). Em 1882, mudou-se para Paris, onde trabalhou na *Continental Edison Company*, cujo proprietário era Thomas Alva Edison, o inventor da lâmpada. Em 1884, foi convidado pelo patrão a mudar-se para Nova York. Nessa época, a empresa de Edison usava a corrente contínua para transmissão da energia elétrica utilizada para acender as lâmpadas de ruas e residências. Edison fez uma aposta com Tesla, duvidando que este pudesse desenvolver um projeto de corrente alternada mais interessante para transmissão da citada energia. Tesla ganhou a aposta, mas Edison não quis pagá-la. Assim, Tesla pediu demissão de seu emprego e vendeu sua patente para George Westinghouse, que convenceu o governo a adotar o projeto como padrão, prejudicando dessa forma a empresa de Edison.



Fotografia tirada em 1900, em Colorado Springs (EUA), no maior e mais produtivo laboratório de Tesla, onde foi desenvolvida a maioria de seus inventos. Nesse laboratório, Tesla elaborou vários projetos, entre os quais o dos motores de corrente alternada (CA), o da lâmpada fluorescente, o de geradores e transformadores, o do rádio receptor e o do controle remoto para esse rádio. No entanto, aquilo de que mais gostava era mesmo a bobina de energia (bobina de Tesla), uma máquina capaz de gerar uma grande quantidade de energia que, quando ligada, fazia jorrar raios (descargas elétricas) para todos os lados.

Tesla era um homem excêntrico, talvez em razão das alucinações que sofria de tempos em tempos. Nesses períodos, ele parecia encontrar as soluções para os problemas técnicos em que trabalhava. Com o dinheiro da venda de sua patente ele montou um grande laboratório, onde realizava seus experimentos. Era uma obsessão para o cientista encontrar uma forma de transmitir energia elétrica sem o uso de fios condutores – como em um sistema *wireless* – para que todos pudessem receber gratuitamente a energia necessária para o funcionamento de suas lâmpadas.

Tesla gostava de fazer apresentações públicas em que utilizava sua bobina. E ele o fazia de modo quase teatral, para impressionar a plateia. Gostava de aparecer caminhando entre raios, acendendo lâmpadas fluorescentes sem que estas estivessem ligadas a fios – ele usava o campo elétrico gerado por sua máquina para acendê-las. Em uma de suas apresentações o cientista “plantou” no chão algumas lâmpadas (fluorescentes) que foram acesas a distância com o uso de sua “fábrica de raios”. Essas apresentações, que mais pareciam espetáculos de um ilusionista, fizeram com que a comunidade científica se afastasse dele. No entanto, Tesla viveu o resto de sua vida com o que recebera pelas patentes de seus inventos. Em 1943, aos 86 anos, Nikola Tesla morreu em Nova York, deixando um grande legado científico.

## A bobina

A bobina de Tesla é um primitivo transmissor de rádio sem a antena. A finalidade desse dispositivo não é a transmissão de dados via ondas eletromagnéticas, mas, sim, a transferência da energia elétrica sem a utilização de fios. Quando em funcionamento, o equipamento é capaz de emitir uma grande quantidade de ondas eletromagnéticas que, devido à sua potência, conseguem interferir em estações de rádio, prejudicando sua recepção.

Numa descrição mais simples, uma bobina de Tesla (de uso escolar) é um dispositivo constituído de um capacitor carregado a uma tensão de até 30 kV, que se descarrega sobre uma bobina primária por meio de um faiscador. O circuito primário é colocado a ressoar com um circuito secundário, o que ocorre em frequências entre 50 e 500 Hz. Dessa forma, o circuito primário oscila em baixa tensão e alta corrente, enquanto o secundário o faz em alta tensão e baixa corrente. A finalidade desse sistema é gerar um forte campo elétrico, capaz de romper a rigidez dielétrica do ar, emitindo faíscas (descargas elétricas) através desse meio.

Nos primórdios do rádio, a bobina de Tesla foi utilizada como transmissor. Hoje, a aplicação mais comum do equipamento é a demonstração experimental de propriedades da eletricidade estática em alta tensão.

Mas atenção! Esses dispositivos que operam em alta frequência e alta tensão são muito perigosos, principalmente no sistema primário, onde as correntes elétricas podem ser fatais. O manuseio desses equipamentos só deve ser realizado com a orientação e a presença de um professor ou técnico habilitado. Eventualmente, a operação requer ainda o uso de luvas ou de roupas apropriadas. Uma simples corrente elétrica que percorra o corpo de uma pessoa pode provocar uma parada cardíaca que, não sendo revertida rapidamente, pode ter como desfecho graves sequelas ou até mesmo a morte.

## QUESTÕES COMENTADAS



**1** Determine a intensidade do campo elétrico criado por uma carga pontual  $Q$  de  $-8,0 \mu\text{C}$ , em um ponto  $A$  situado a  $6,0 \text{ cm}$  dessa carga. O meio é o vácuo, cuja constante eletrostática é igual a  $9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$ .

### RESOLUÇÃO

A intensidade do campo elétrico criado por uma partícula eletrizada é determinada pela relação:

$$E = K \frac{|Q|}{d^2}$$

Para o ponto  $A$ , temos  $d = 6,0 \text{ cm} = 6,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ .

Assim:

$$E_A = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{8,0 \cdot 10^{-6}}{(6,0 \cdot 10^{-2})^2} \Rightarrow E_A = 2,0 \cdot 10^7 \text{ N/C}$$

**Resposta:**  $2,0 \cdot 10^7 \text{ N/C}$

### Observação:

Para o cálculo da intensidade do vetor campo elétrico, usamos o **módulo** da carga fonte do campo. Assim, se a carga  $Q$  fosse igual a  $+8,0 \mu\text{C}$ , o resultado seria igual ao encontrado.

**2** Duas partículas eletrizadas com cargas iguais a  $+25 \mu\text{C}$  estão colocadas a  $1,0 \text{ m}$  uma da outra, no vácuo, onde a constante eletrostática vale  $9 \cdot 10^9$  unidades do Sistema Internacional. Não havendo influência de outras cargas, determine:

- a intensidade do campo eletrostático que cada carga cria no ponto  $P$ , situado a meia distância entre elas;
- a força resultante que age numa carga de prova de  $+2,0 \mu\text{C}$  colocada em  $P$ .

### RESOLUÇÃO

a) A intensidade do campo eletrostático criado por uma carga pontual é determinada por:

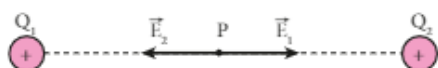
$$E = K \frac{|Q|}{d^2}$$

Como as cargas são iguais e a distância  $d$  de cada carga ao ponto é a mesma, as intensidades  $E_1$  e  $E_2$  dos campos gerados por elas são iguais:

$$E_1 = E_2 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{25 \cdot 10^{-6}}{(0,5)^2}$$

$$E_1 = E_2 = 9 \cdot 10^5 \text{ N/C}$$

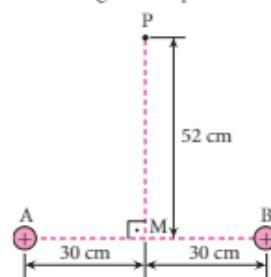
b) Uma vez que as cargas são positivas, temos o seguinte esquema para representar a situação indicada:



Observemos que  $\vec{E}_1 + \vec{E}_2 = \vec{0}$ . Assim, lembrando que  $\vec{F} = q\vec{E}$ , temos:  $\vec{F} = \vec{0}$

**Respostas:** a)  $9 \cdot 10^5 \text{ N/C}$ ; b)  $\vec{0}$

**3** Em um meio onde a constante eletrostática vale  $9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$ , são fixadas duas cargas puntiformes  $Q_A = 3,2 \mu\text{C}$  e  $Q_B = 2,4 \mu\text{C}$ . Observando a figura, determine a intensidade do campo elétrico resultante no ponto  $P$ , localizado na mediatriz do segmento que une as cargas  $Q_A$  e  $Q_B$ .



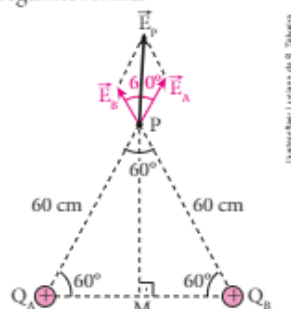
### RESOLUÇÃO

Inicialmente, aplicamos o teorema de Pitágoras no triângulo retângulo  $AMP$ :

$$(\overline{AM})^2 + (\overline{MP})^2 = (\overline{AP})^2$$

$$30^2 + 52^2 = (\overline{AP})^2 \Rightarrow AP \cong 60 \text{ cm}$$

Com isso, o triângulo  $ABP$  pode ser considerado equilátero, em que cada lado mede  $60 \text{ cm}$ . Como as cargas  $Q_A$  e  $Q_B$  são positivas, o campo elétrico criado por elas no ponto  $P$  é representado da seguinte forma:



Vamos calcular, agora, os módulos de  $\vec{E}_A$  e  $\vec{E}_B$ , aplicando a expressão do campo elétrico:

$$E = K \frac{|Q|}{d^2}$$

$$E_A = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{3,2 \cdot 10^{-6}}{(0,60)^2} \Rightarrow E_A = 8,0 \cdot 10^4 \text{ N/C}$$

$$E_B = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{2,4 \cdot 10^{-6}}{(0,60)^2} \Rightarrow E_B = 6,0 \cdot 10^4 \text{ N/C}$$

Para obter o módulo de  $\vec{E}_P$ , devemos usar a **Lei dos Cossenos**:

$$(E_P)^2 = (E_A)^2 + (E_B)^2 + 2 E_A E_B \cos \alpha$$

Uma vez que o triângulo ABP é equilátero, temos:

$$\alpha = 60^\circ \text{ e } \cos \alpha = \frac{1}{2}.$$

Assim:

$$(E_p)^2 = (8,0 \cdot 10^4)^2 + (6,0 \cdot 10^4)^2 + 2(8,0 \cdot 10^4) \cdot (6,0 \cdot 10^4) \cdot \frac{1}{2}$$

$$(E_p)^2 = 64 \cdot 10^8 + 36 \cdot 10^8 + 48 \cdot 10^8$$

$$(E_p)^2 = 148 \cdot 10^8 \Rightarrow E_p \cong 1,2 \cdot 10^5 \text{ N/C}$$

**Resposta:** Aproximadamente  $1,2 \cdot 10^5 \text{ N/C}$ .

**4** Uma esfera metálica, de raio igual a 20,0 cm, é eletrizada com uma carga de  $+6,28 \mu\text{C}$ . Determine a densidade superficial média de cargas na superfície da esfera (adotar  $\pi = 3,14$ ).

#### RESOLUÇÃO

A densidade superficial média de cargas é dada pela relação:

$$\sigma_m = \frac{Q}{A}$$

sendo  $A$  a área da superfície em que a carga elétrica  $Q$  está distribuída. Assim, sabendo-se que a superfície externa, para a esfera, tem área dada por  $A = 4\pi r^2$ , em que  $r$  é o raio, segue-se:

$$\sigma_m = \frac{+6,28 \mu\text{C}}{4\pi(0,200)^2 \text{ m}^2} = \frac{+6,28 \mu\text{C}}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,04 \text{ m}^2}$$

$$\sigma_m = +12,5 \mu\text{C/m}^2$$

**Resposta:**  $+12,5 \mu\text{C/m}^2$

**5** Um condutor esférico, de raio igual a 20 cm, recebe  $2,5 \cdot 10^{13}$  elétrons. Determine o módulo do vetor campo elétrico criado nos pontos **A** e **B**, distantes, respectivamente, 10 cm e 60 cm do centro do condutor.

**Dados:**  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ;

$$K_0 = 9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2.$$

#### RESOLUÇÃO

O ponto **A** é interno ao condutor, pois o raio da esfera é de 20 cm. Assim:

$$E_A = 0$$

O ponto **B** é externo à esfera eletrizada e o módulo do vetor campo, nesse ponto, é dado por:

$$E_B = K \frac{|Q|}{d^2} \Rightarrow E_B = K_0 \frac{ne}{d^2}$$

Portanto, tem-se:

$$E_B = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{2,5 \cdot 10^{13} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{(0,60)^2}$$

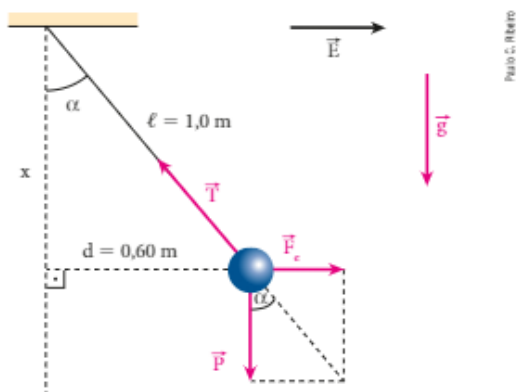
$$E_B = 1,0 \cdot 10^5 \text{ N/C}$$

**Resposta:** zero e  $1,0 \cdot 10^5 \text{ N/C}$ .

**6** Um pêndulo elétrico tem comprimento  $\ell = 1,0 \text{ m}$ . A esfera suspensa possui massa  $m = 10 \text{ g}$  e carga elétrica  $q$ . Na região em que se encontra o pêndulo, a aceleração da gravidade vale  $10 \text{ m/s}^2$  e existe um campo elétrico cujo vetor  $\vec{E}$  é horizontal, dirigido para a direita e de módulo  $7,5 \cdot 10^3 \text{ N/C}$ . O pêndulo estaciona com a esfera à distância  $d = 0,60 \text{ m}$  da vertical baixada do ponto de suspensão. Determine a carga  $q$ .

#### RESOLUÇÃO

A configuração descrita no exercício está representada no esquema a seguir:



Aplicando o teorema de Pitágoras, obtemos:

$$\ell^2 = d^2 + x^2$$

$$(1,0)^2 = (0,60)^2 + x^2$$

$$x = 0,80 \text{ m}$$

Da figura, obtém-se:  $\text{tg } \alpha = \frac{F_e}{P}$  (I)

Porém:  $F_e = |q|E$ ;  $P = mg$  e  $\text{tg } \alpha = \frac{d}{x}$  (II)

Comparando (I) e (II), temos:

$$\frac{d}{x} = \frac{|q|E}{mg} \Rightarrow |q| = \frac{dmg}{xE}$$

$$\text{Assim: } |q| = \frac{0,60 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 10}{0,80 \cdot 7,5 \cdot 10^3}$$

$$|q| = 10 \cdot 10^{-6} \text{ C} \Rightarrow |q| = 10 \mu\text{C}$$

Logo:  $q = \pm 10 \mu\text{C}$

**Resposta:**  $\pm 10 \mu\text{C}$

#### NOTA

A situação representada no esquema corresponde ao caso em que  $q$  é positiva. Se  $q$  fosse negativa, a posição de equilíbrio seria simétrica em relação à vertical baixada do ponto de suspensão.





## QUESTÕES PROPOSTAS



FAÇA NO CADERNO.

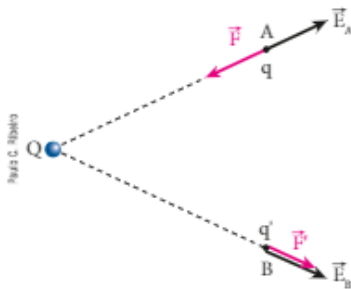
7. Considere as afirmativas a seguir:

- I. A direção do vetor campo elétrico, em determinado ponto do espaço, coincide sempre com a direção da força que atua sobre uma carga de prova colocada no mesmo ponto.
- II. Cargas negativas, colocadas em um campo elétrico, tenderão a se mover em sentido contrário ao do campo.
- III. A intensidade do campo elétrico criado por uma carga pontual é, em cada ponto, diretamente proporcional ao quadrado da carga que o criou e inversamente proporcional à distância do ponto à carga.
- IV. A intensidade do campo elétrico pode ser expressa em newton/coulomb.

São verdadeiras:

- a) somente I e II.
- b) somente III e IV.
- c) somente I, II e IV.
- d) todas.
- e) nenhuma.

8. A figura a seguir representa os vetores campo elétrico  $\vec{E}_A$  e  $\vec{E}_B$ , gerados nos pontos A e B por uma partícula eletrizada com carga Q, e as forças elétricas  $\vec{F}$  e  $\vec{F}'$  que Q exerce nas cargas de prova q e q' colocadas nesses pontos. Determine os sinais de Q, q e q'.



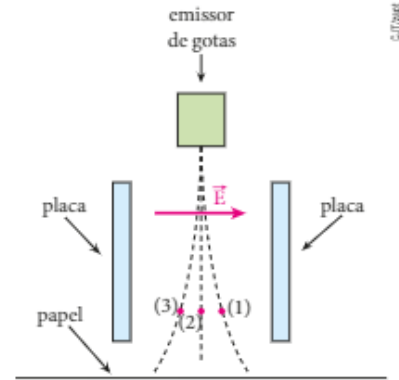
9. Um próton e um elétron movem-se na mesma direção e sentido de um campo elétrico constante. Suponha que na região não exista outro campo elétrico ou gravitacional que possa alterar o movimento dessas partículas. Responda às questões.

- a) As forças encontradas nas duas partículas possuem mesmo módulo, mesma direção e mesmo sentido?
- b) Tomando como referência a direção e o sentido do vetor campo elétrico, qual é a direção e o sentido da aceleração do próton? E do elétron?
- c) Comparando os módulos das acelerações do próton e do elétron, qual é maior? Justifique sua resposta.

10. A máquina copiadora e a impressora jato de tinta são aplicações tecnológicas modernas da Eletrostática. Na impressora, pequenas gotas de tinta são eletrizadas positiva ou negativamente e outras são mantidas neutras. As gotas são arremessadas, passando entre duas placas metálicas com

cargas que produzem um campo elétrico uniforme. Assim, antes de atingirem o papel, onde formarão as letras, essas gotas podem ser desviadas pelo campo elétrico.

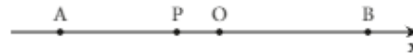
A figura a seguir mostra três gotas de tinta, lançadas para baixo, que atravessam o espaço entre as placas antes de serem absorvidas pelo papel.



Pelos desvios sofridos, pode-se dizer que as gotas 1, 2 e 3 estão, respectivamente:

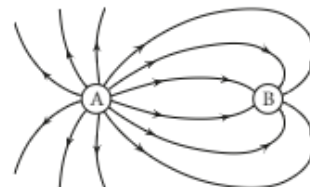
- a) carregada negativamente, neutra e carregada positivamente.
- b) neutra, carregada positivamente e carregada negativamente.
- c) carregada positivamente, neutra e carregada negativamente.
- d) carregada positivamente, carregada negativamente e neutra.

11. Imagine uma região do espaço onde não existe carga elétrica. Duas partículas eletrizadas A e B, sendo a carga de A positiva, são fixadas em dois pontos de um eixo x, ambas equidistantes da origem O. Agora a região do espaço passa a apresentar um campo elétrico resultante. Para melhor entendermos esse campo elétrico, uma partícula eletrizada negativamente é colocada, solta, sobre o eixo x, no ponto P, mais próximo da partícula A, como mostra a figura.

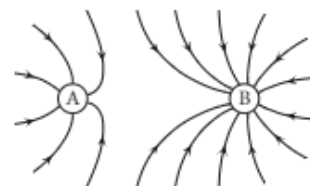


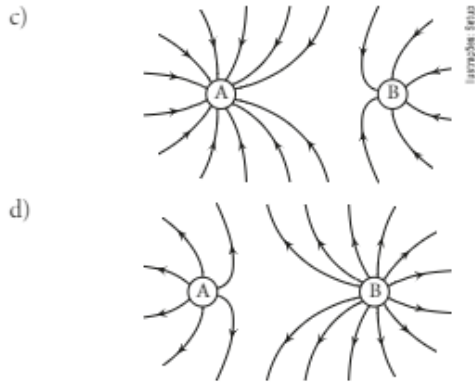
A partícula negativa fica em equilíbrio sobre o eixo. Retirando essa partícula do ponto P, como fica a representação das linhas de força do campo elétrico resultante das cargas A e B?

a)



b)





12. Em determinado local do espaço, existe um campo elétrico de intensidade  $E = 4 \cdot 10^3$  N/C. Colocando-se aí uma partícula eletrizada com carga elétrica  $q = 2 \mu\text{C}$ , qual é a intensidade da força que agirá sobre ela?

13. Os pontos de determinada região do espaço estão sob a influência única de uma carga positiva pontual  $Q$ . Sabe-se que em um ponto A, distante 2 m da carga  $Q$ , a intensidade do campo elétrico é igual a  $1,8 \cdot 10^4$  N/C. Determine:

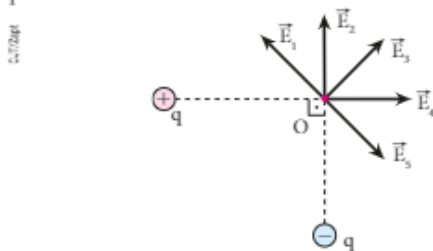
- o valor da carga elétrica  $Q$ ;
- a intensidade do campo elétrico num ponto B, situado a 30 cm da carga fonte  $Q$ .

Dado: constante eletrostática do meio =  $9 \cdot 10^9$  Nm<sup>2</sup>/C<sup>2</sup>.

14. Uma carga puntiforme de  $+3,0 \mu\text{C}$  é colocada em um ponto P de um campo elétrico gerado por uma partícula eletrizada com carga desconhecida  $Q$ , ficando sujeita a uma força de atração de módulo 18 N. Sabendo que o meio é o vácuo ( $K_0 = 9,0 \cdot 10^9$  Nm<sup>2</sup>C<sup>-2</sup>), determine:

- a intensidade do campo elétrico no ponto P;
- a carga fonte  $Q$ . O ponto P está a 30 cm dessa carga.

15. Duas cargas elétricas de módulos iguais,  $q$ , porém de sinais contrários, geram no ponto O um campo elétrico resultante  $\vec{E}$ . Qual é o vetor que melhor representa esse campo elétrico?



16. No vácuo, longe da ação de outras cargas elétricas, são fixadas duas partículas eletrizadas,  $Q_1$  e  $Q_2$ , a 20 cm uma da outra. Sabendo que as cargas das partículas são  $Q_1 = -9,0$  nC e  $Q_2 = -4,0$  nC, determine:

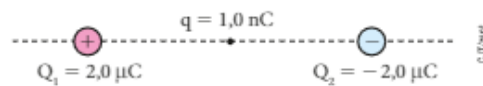
- a intensidade do vetor campo resultante  $\vec{E}$ , num ponto colocado a meio caminho entre as cargas;

b) a força a que uma carga de  $+2,0 \mu\text{C}$  ficaria sujeita, se fosse colocada no ponto referido no item anterior;

c) o ponto, entre as cargas, onde uma partícula eletrizada com carga  $q$  qualquer ficaria em repouso, se lá fosse colocada.

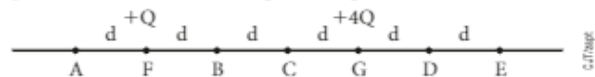
Dado: constante eletrostática do meio  $K_0 = 9,0 \cdot 10^9$  Nm<sup>2</sup>/C<sup>2</sup>.

17. Duas partículas com cargas  $Q_1$  e  $Q_2$  estão fixas nas posições indicadas na figura, distantes 2,0 m uma da outra. Uma terceira partícula, com carga igual a 1,0 nC e massa igual a  $1,8 \cdot 10^{-6}$  kg, é abandonada a meia distância entre  $Q_1$  e  $Q_2$ .



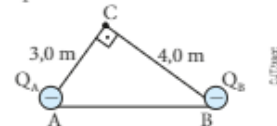
Sendo  $9 \cdot 10^9$  Nm<sup>2</sup>/C<sup>2</sup> a constante eletrostática do meio, calcule a aceleração inicial da terceira partícula.

18. Uma região do espaço isenta da ação de cargas elétricas foi usada para a realização de um experimento de Física. Ao longo de uma reta imaginária, dividida em partes iguais de valor  $d$ , foram fixadas duas partículas, de dimensões desprezíveis, eletrizadas com cargas  $+Q$  e  $+4Q$  nos pontos F e G. Observe a figura a seguir.



Em que ponto dessa reta pode-se colocar uma carga de prova eletrizada com  $-q$  e, ao ser abandonada, esta ficará em equilíbrio?

19. Nos vértices dos ângulos agudos de um triângulo retângulo são colocadas duas partículas eletrizadas, A e B, com cargas  $Q_A = -7,2 \mu\text{C}$  e  $Q_B = -9,6 \cdot 10^{-6}$  C. A situação descrita é representada na figura a seguir, onde encontramos os dados complementares:



Determine:

- a intensidade do campo elétrico resultante no ponto C;
- o módulo da força resultante, devido a esse campo, numa carga de prova de  $+2,0 \mu\text{C}$ , se esta fosse colocada no ponto C.

Dado: constante eletrostática do meio =  $1,0 \cdot 10^{10}$  (SI).

20. Uma esfera condutora possui uma densidade superficial de carga uniforme de  $-5,00 \mu\text{C}/\text{m}^2$ . Determine a carga existente nessa esfera, sabendo que seu raio é igual a 50,0 cm (adote  $\pi = 3,14$ ).

21. Determine o número de elétrons que deve ser retirado de um condutor, cuja área da superfície externa vale  $0,80$  m<sup>2</sup>, para que sua densidade superficial média de cargas seja igual a  $+6,0 \mu\text{C}/\text{m}^2$ .

Carga elementar:  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C.

**22.** Uma esfera metálica de raio  $R$  foi eletrizada com uma carga elétrica positiva  $Q$ . Para que uma outra esfera metálica de raio  $2R$  tenha a mesma densidade superficial de cargas da primeira esfera, é necessário eletrizá-la com que carga?

**23.** Um balão de borracha de forma esférica, de raio  $R$ , é eletrizado de tal forma que a carga elétrica  $Q > 0$  seja distribuída uniformemente em sua superfície. O balão é inflado até que o raio passe a ser  $2R$ .

- Qual é a intensidade do campo elétrico em pontos do interior do balão?
- Qual é a razão entre as intensidades do campo elétrico em um ponto à distância de  $4R$  do centro do balão, antes e depois de ele ter sido inflado?

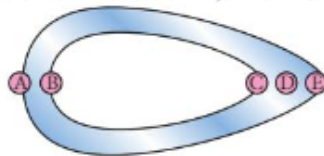
**24.** Que raio deve ter uma esfera condutora, para produzir nas vizinhanças de sua superfície externa um campo elétrico de intensidade  $1,0 \cdot 10^3$  N/C, quando recebe  $4,0 \cdot 10^{11}$  elétrons? Sabe-se que a constante eletrostática do meio vale  $1,0 \cdot 10^{10}$  unidades do SI.

**Dado:**  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C.

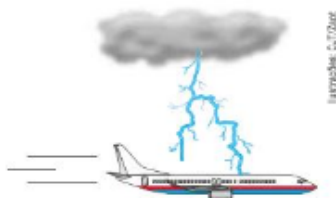
**25.** Quantos elétrons devemos retirar de uma esfera condutora de raio 40 cm para que, nas vizinhanças de sua superfície externa, o campo elétrico assuma a intensidade de  $1,0 \cdot 10^4$  N/C? Sabe-se que a constante eletrostática do meio vale  $1,0 \cdot 10^{10}$  unidades do SI e a carga do elétron tem módulo  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C.

**26.** A figura mostra, em corte longitudinal, um objeto metálico oco eletrizado.

Em qual das regiões assinaladas há maior concentração de cargas?



**27.** A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é uma linha contínua, paralela ao Equador, com aproximadamente mil quilômetros de extensão. No oceano Atlântico, as massas de ar mais quentes do Hemisfério Sul encontram as massas de ar mais frias vindas do Hemisfério Norte. Esse fato pode provocar grandes tempestades em alto-mar e muita chuva na região Nordeste do Brasil. Os aviões que partem do Brasil com destino à Europa, e vice-versa, em suas rotas, atravessam essa região, podendo ser atingidos por descargas elétricas (raios).



Quando um avião de passageiros é atingido por um raio em pleno voo, a tripulação e os passageiros:

- não serão atingidos, pois os aviões são obrigados a portar para-raios nas extremidades de sua fuselagem.
- serão atingidos, pois a fuselagem metálica é boa condutora de eletricidade.
- serão parcialmente atingidos, pois as cargas elétricas do raio ficarão distribuídas de maneira uniforme em todo o interior do avião, mesmo ele sendo oco.
- não sofrerão danos físicos, pois a fuselagem metálica atua como blindagem para o interior do avião.
- podem ser atingidos se o avião não for muito grande.

**28.** Quais das seguintes afirmações, referentes a um condutor eletrizado em equilíbrio eletrostático, estão corretas?

- Em todos os pontos do interior do condutor, o campo elétrico é nulo, independentemente de ele ser maciço ou oco.
- Na superfície do condutor e nas suas vizinhanças, o vetor campo elétrico é perpendicular à superfície.
- No caso de um condutor esférico, livre de influências de outros corpos, a intensidade do vetor campo elétrico em pontos externos é calculada considerando toda sua carga concentrada em seu centro.

**29.** Em certa região do espaço existe um campo elétrico uniforme de intensidade  $3,6 \cdot 10^3$  N/C. Uma carga elétrica puntiforme de  $1,0 \cdot 10^{-5}$  C, colocada nessa região, sofrerá a ação de uma força de que intensidade?

**30.** Entre duas placas planas horizontais, eletrizadas com cargas de mesmo módulo e sinais opostos, existe um campo elétrico uniforme de intensidade  $4,0 \cdot 10^3$  N/C. Uma partícula eletrizada com  $+5,0$   $\mu$ C, ao ser colocada entre as placas, permanece em repouso. Determine a massa da partícula.

**Dado:**  $g = 10$  m/s<sup>2</sup>.

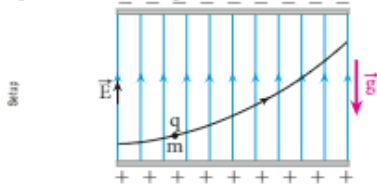
**31.** A figura abaixo mostra um elétron ( $e$ ) entrando com velocidade horizontal ( $v$ ) em uma região limitada por duas placas paralelas condutoras com cargas opostas.



Considerando que o peso do elétron é desprezível, e que o campo elétrico entre as placas é essencialmente uniforme e perpendicular a elas, é correto afirmar que:

- quanto maior a velocidade  $v$ , mais rapidamente o elétron se aproximará da placa positiva.
- quanto menor a velocidade  $v$ , mais rapidamente o elétron se aproximará da placa positiva.
- a velocidade de aproximação do elétron à placa positiva independe do valor da velocidade horizontal  $v$ .
- a direção da aceleração do elétron, na região limitada pelas placas, está mudando ao longo da sua trajetória.
- o elétron não está acelerado.

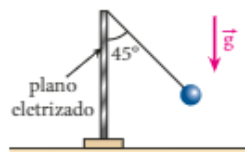
32. Em uma ação experimental foram utilizadas duas grandes placas planas condutoras dispostas paralelamente na horizontal e eletrizadas com cargas de mesmo valor e sinais opostos. Na região entre as placas surgiu um campo elétrico uniforme representado por suas linhas de força. No local do experimento existe também um campo gravitacional terrestre. Uma partícula de massa  $m$  e eletrizada com carga  $q$  positiva é lançada movimentando-se segundo a trajetória representada na figura.



Determine a direção, o sentido e a intensidade da força resultante que age na partícula enquanto ela se move entre as placas.

33. Uma pequena esfera de peso  $P = 5,0 \cdot 10^{-2}$  N, eletrizada com uma carga  $q = +0,20 \mu\text{C}$ , está suspensa por um fio isolante bastante leve, que na posição de equilíbrio forma um ângulo de  $45^\circ$  com um plano vertical uniformemente eletrizado com densidade superficial  $\sigma$ .

Qual é o módulo da densidade superficial de cargas  $\sigma$ ?  
 Dado: permissividade absoluta do meio:  $\epsilon = 8,85 \cdot 10^{-12}$  (SI).

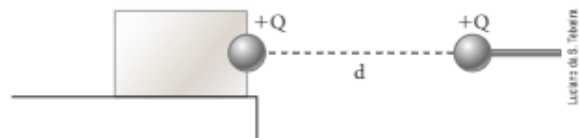


34. Em uma região do espaço, isenta da ação de massas e cargas elétricas, imagine um triângulo equilátero ABC, de lado igual a 20 cm. Agora, no vértice A, vamos colocar uma partícula eletrizada com carga  $+1,0$  nC e, no vértice B, outra partícula de carga  $-1,0$  nC. Determine o módulo do vetor campo elétrico resultante nos pontos:

- C, terceiro vértice do triângulo;
- M, ponto médio da base AB do triângulo;
- N, ponto simétrico de M em relação ao vértice A do triângulo.

Dado:  $K = 9 \cdot 10^9$  (SI).

35. Na figura dada a seguir encontramos um bloco, confeccionado com um material isolante elétrico, de massa 200 gramas em que observamos uma cavidade. Um segundo corpo, metálico, de massa 25 gramas, foi incrustado na cavidade. Esse conjunto foi depositado sobre uma superfície horizontal. A parte metálica foi eletrizada com carga de  $4,0 \mu\text{C}$ . O coeficiente de atrito estático entre a superfície e o bloco vale 0,25.



Qual é a mínima distância que um bastão eletrizado com carga igual à do bloco metálico poderá ser aproximado para que não ocorra movimento?

Dados:  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ;  $K = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ .



## DESCUBRA MAIS

1 Na fotografia ao lado, observamos um dispositivo, usado como enfeite, que chama muito a atenção das pessoas. Nele, encontramos uma esfera interna que é eletrizada de forma contínua e uma outra esfera externa de vidro transparente. Entre as superfícies esféricas, existe um gás sob baixa pressão. Os gases normalmente são isolantes elétricos. No entanto, quando ionizados deixam de ser isolantes e tornam-se condutores. Pesquise e tente explicar a emissão de luz observada nessa fotografia.



2 Pegue um rádio portátil pequeno, ligado e sintonizado em uma estação. Embrulhe esse rádio em uma folha de jornal. Depois, desembulhe e volte a embrulhá-lo em papel-alumínio, com várias voltas. O que ocorre de diferente? Como explicar os resultados desses dois experimentos?

## A blindagem eletrostática e a gaiola de Faraday

Michael Faraday (1791-1867) nasceu na Inglaterra, nos arredores de Londres, em 22 de setembro. Filho de um ferreiro, teve uma infância pobre, precisando trabalhar logo cedo, aos 13 anos. Começou como entregador de jornais e, mais tarde, assistente de encadernação de livros. Nos momentos vagos lia os livros que passavam pelas suas mãos, descobrindo um mundo que o cativava cada vez mais. Em 1812, fascinado após assistir a uma palestra sobre Física, na *Royal Institution*, passou a se dedicar ao estudo da Ciência. Ele descobriu, inventou e desenvolveu aparatos que propiciaram um grande avanço na eletricidade. É dele a invenção da **bobina de indução**, que comprova a geração de corrente elétrica contínua a partir da variação de campo magnético.

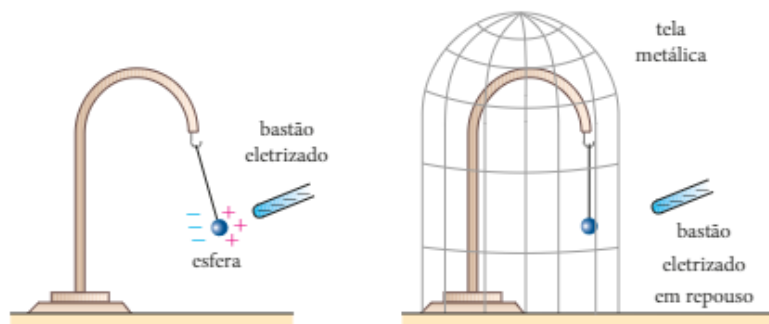
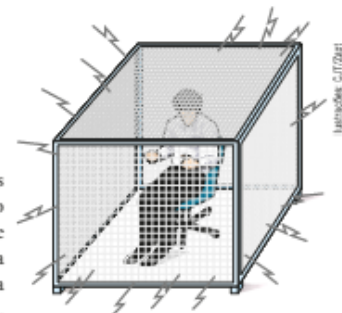
Em 1836, desejando demonstrar na prática que o campo elétrico é nulo no interior de um condutor eletrizado, Faraday construiu uma grande caixa usando telas metálicas condutoras e isolou-a da terra. Ele entrou na caixa, levando consigo vários dispositivos de detecção da presença de campos elétricos, e mandou que seus assistentes eletrizassem intensamente a caixa. Feito isso, observou que nenhum dos dispositivos acusava a existência de campo elétrico no interior da caixa. Faraday nada sentiu, apesar de a caixa estar altamente eletrizada, com grandes eflúvios elétricos saltando por vários pontos de sua superfície externa (**eflúvios** são descargas elétricas através de um gás).

A caixa recebeu o nome de **gaiola de Faraday** e é utilizada nos dias de hoje para isolar uma região de campos elétricos indesejáveis. Transformadores e geradores eletrostáticos são isolados assim. Sistemas eletrônicos muito sensíveis a campos elétricos, também. Em regiões de muitas tempestades com raios, as edificações são construídas de modo a isolar o seu interior da ação dessas descargas elétricas usando a concepção de Faraday.

Podemos concluir que uma região do espaço, quando totalmente envolta por um condutor, torna-se livre da ação de campos elétricos que possam ser criados por cargas estacionárias externas.



Michael Faraday, cientista e físico inglês, em retrato pintado por Thomas Phillips em 1841-1842. National Portrait Gallery, Londres.



A gaiola metálica produz uma blindagem impedindo que a esfera sofra influências do campo elétrico criado pelas cargas existentes no bastão.

Nos dias atuais, com o avanço da tecnologia, estamos cada vez mais “mergulhados” em uma grande quantidade de campos elétricos e magnéticos gerada por máquinas que estão muito próximas. Os televisores, por exemplo, estão se sofisticando tanto e aumentando de tamanho que não podemos deixar de pensar: será que toda essa radiação emitida pode provocar danos à saúde de algumas pessoas?

Em 21 de novembro de 2012 foi veiculada uma notícia interessante que pode estar ligada à situação que estamos apresentando. Não deixe de ler, pensar a respeito e discutir com seus colegas e professores de Física e de Biologia.

### **Alergia a tecnologia faz mulher viver em gaiola 18 horas por dia**

Velma Lyrae [...] passa até 18 horas por dia dentro de uma gaiola de Faraday por ser “alérgica à tecnologia moderna”. Ela sofre com a síndrome de hipersensibilidade eletromagnética (EHS, do inglês *electromagnetic hypersensitivity syndrome*), e a gaiola a protege filtrando as ondas eletromagnéticas. Ela diz ter dores agonizantes, perda de memória, zumbido, palpitações cardíacas, vertigem e dores nas articulações ao chegar perto de aparelhos tecnológicos – não pode usar celular ou *Wi-Fi*, nem mesmo um secador de cabelos. Dentro de sua gaiola, ela passa o tempo lendo livros, fazendo trabalhos artísticos e escrevendo cartas. As informações são do *Daily Mail*.

A britânica foge da influência dos campos eletromagnéticos permanecendo na gaiola feita com materiais de segunda mão (que lhe custaram 300 libras, equivalente a cerca de R\$ 1 mil) em seu apartamento em Blackheath, Londres. Sua debilidade apareceu com a chegada dos celulares 3G, embora ela acredite que um choque sofrido na adolescência a tenha tornado mais suscetível. Os sintomas, de início brandos, foram piorando com o passar do tempo.

Velma foi secretária em diversas empresas nos anos 80, mas teve que deixar o emprego e hoje está impedida de trabalhar. “Naquela época eu sentia uma agitação ao usar o computador, mas achava que era por não ter muita prática, hoje sei que estava começando a sentir os efeitos da EHS”. Para sair de casa, ela usa sempre uma echarpe blindada enrolada na cabeça para se proteger da radiação. “Isso tornou minha vida um inferno”, afirmou ao jornal. “Não posso fazer nada que as pessoas normais fazem sem que meus sintomas apareçam. Tenho que fazer tudo dentro da minha gaiola – comer, dormir, ler, escrever”.

A eletrossensibilidade é uma condição controversa, reconhecida na Espanha e na Suécia mas não no Reino Unido, onde a Agência para Proteção da Saúde diz que não há evidências científicas que liguem problemas de saúde a equipamentos eletrônicos. A doutora Erica Mallery-Blithe, consultora da ONG Electrosensitivity UK, diz que os sintomas da síndrome EHS podem cobrir uma ampla gama de sistemas e que muitas vezes podem ser confundidos com outras condições médicas. “Adultos e crianças de hoje estão expostos a níveis muito elevados de campos eletromagnéticos (CEM) que nenhum ser vivo no planeta testemunhou antes. Então não é surpresa que o número de pessoas com EHS ou outras condições relacionadas à exposição a CEM esteja subindo”.



Velma se alimenta, protegida pela gaiola de Faraday.

Disponível em: <<http://tecnologia.terra.com.br/eletronicos/alerxia-a-tecnologia-faz-mulher-viver-em-gaiola-18-horas-por-dia,4438138d3b35b310VgnCLD200000bbcccb0aRCRD.html>>  
Acesso em: 3 fev. 2016.

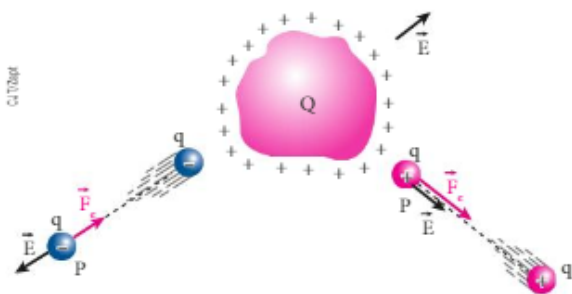
### **Compreensão, pesquisa e debate**

1. Michael Faraday é considerado um dos grandes nomes da Física e da Química. Pesquise e descubra mais sobre suas descobertas.
2. Quando um carro, com o rádio ligado, passa pelo interior de um túnel longo a recepção é prejudicada. Por que isso ocorre? Existe alguma diferença se o rádio estiver sintonizado em uma estação em AM ou em FM?
3. Faça um experimento simples com o uso de dois telefones celulares. Ligue de um para o outro e deixe tocar. Depois, embrulhe um deles em papel-alumínio, dando três voltas. Pegue o outro celular e ligue para aquele que está embrulhado. O que ocorre, ele toca? Procure explicar o fenômeno observado. Se necessário, peça ajuda ao professor.

# POTENCIAL ELÉTRICO

## 1. ENERGIA POTENCIAL ELETROSTÁTICA E O CONCEITO DE POTENCIAL EM UM CAMPO ELÉTRICO

Considere um condutor eletrizado positivamente, por exemplo, com carga  $Q$ , fixo em determinado local, livre da influência de outras cargas elétricas. Já sabemos que, na região do espaço que envolve esse corpo, existe um campo elétrico gerado pelas cargas nele existentes. Agora, vamos abandonar em um ponto  $P$  uma carga de prova  $q$ , também positiva, a uma distância  $d$  do condutor. Devido ao campo elétrico, a carga de prova será repelida e se afastará do condutor, ganhando velocidade e, conseqüentemente, adquirindo energia cinética (energia de movimento). Observe que a carga  $q$ , se fosse negativa, seria atraída, e não repelida.



Por adquirir energia cinética, podemos concluir que, no ponto  $P$ , a carga de prova  $q$  armazena uma energia potencial denominada **energia potencial eletrostática** ou **elétrica**, que vamos simbolizar por  $E_p$ . Essa energia potencial se transforma, na seqüência, em energia cinética. Assim, podemos dizer que a carga  $Q$  do condutor produz um campo elétrico que também pode ser descrito por uma grandeza escalar denominada **potencial eletrostático** (ou elétrico).

Esse potencial eletrostático no ponto  $P$  traduz a energia potencial elétrica armazenada por unidade de carga posicionada nesse local.

O potencial, simbolizado por  $v$ , é definido pela expressão:

$$v = \frac{E_p}{q} \Rightarrow E_p = qv$$

A energia potencial eletrostática e o potencial elétrico são grandezas escalares algébricas, podendo ser positivos, negativos ou nulos.

No SI, a unidade de potencial elétrico é o **volt**, de símbolo  $V$ , assim denominado em homenagem a Alessandro Volta (1745-1827).

Como vimos:

$$v = \frac{E_p}{q}$$

Então:

$$\text{volt} = \frac{\text{joule}}{\text{coulomb}}$$

Um ponto de um campo elétrico tem potencial elétrico igual a 1 volt quando uma partícula hipoteticamente eletrizada com carga de 1 coulomb adquire uma energia potencial igual a 1 joule ao ser colocada nele. Se esse ponto tiver potencial igual a 100 volts, por exemplo, cada coulomb de carga nele colocada adquirirá uma energia potencial igual a 100 joules.

É importante destacar que:

- Na verdade, a energia potencial é adquirida pelo sistema  $Q$  e  $q$ . Se essas duas cargas puderem se mover, elas irão adquirir energia cinética a partir dessa energia potencial. Quando, porém, a carga  $Q$  é fixa (o que ocorre na maioria das vezes), associamos à carga de prova  $q$  toda a energia potencial do sistema.

- O potencial elétrico (grandeza escalar) e o campo elétrico (grandeza vetorial) são propriedades de cada ponto, existindo independentemente de nele estar colocada uma carga ou não.
- O vetor campo elétrico  $\vec{E}$  e o potencial elétrico  $v$  são duas maneiras de se descrever o campo elétrico existente em uma região do espaço. Algumas vezes é mais conveniente usar o vetor  $\vec{E}$  e, em outras, o potencial  $v$ .

### Alessandro Giuseppe Antonio Volta

Alessandro Giuseppe Antonio Anastásio **Volta** (1745-1827) nasceu na cidade de Como, Itália, em 18 de fevereiro de 1745, em uma família de nobres. Desde muito cedo se interessou pela Física e, apesar de sua família desejar que seguisse carreira jurídica, passou a estudar Ciências. Em 1774, começou a lecionar Física na Scuola Reale de Como, e em 1775 inventou o eletróforo, aparelho que podia produzir cargas elétricas. Em 1778, descobriu e isolou o gás metano, fato que o introduziu na comunidade científica da época, quando então pôde se relacionar com outros cientistas. Foi nomeado catedrático de Física Experimental da Universidade de Pavia em 1779, sendo eleito reitor em 1785.

Em 1786, por mero acaso, o professor de Anatomia da Universidade de Bolonha, Luigi Galvani, observou que, ao dissecar uma rã, os músculos das pernas apresentavam movimentos espasmódicos que associou a descargas elétricas. Após estudos, Galvani explicou esse fenômeno pela existência de uma eletricidade animal, que foi denominada **fluido galvânico**. A partir de 1792, Alessandro Volta passou a estudar e a repetir os experimentos de Galvani e, em 1797, descobriu que o tecido animal não produzia eletricidade, apenas funcionava como condutor. A descarga elétrica ocorria por causa da conexão de dois terminais metálicos que eram colocados em contato com o tecido animal. Os metais eram os eletromotores. Percebeu ainda que, usando prata e zinco interligados por um condutor úmido, podia obter melhores descargas.

Em 1799, multiplicou o efeito usando várias camadas de zinco e prata (depois substituída por cobre) intercaladas e separadas por panos embebidos em água e sal. Nascia a pilha elétrica. No mês de março de 1800, Volta enviou uma carta (em francês) para Sir Joseph Banks, presidente da Royal London Society (Inglaterra), relatando suas descobertas no campo da eletricidade, dizendo que havia inventado uma garrafa de Leyden que não precisava ser carregada.



Modelo de pilha elétrica de volta.

Em 1801, recebeu a maior honraria do Instituto Nacional de Ciências da França, a Medalha de Ouro do Mérito Científico. Ao demonstrar seu invento ao imperador Napoleão Bonaparte, recebeu apoio para continuar com seus experimentos e foi agraciado com o título de Conde e Senador do Reino da Lombardia.

Depois de passar toda a vida dedicado ao estudo da Eletricidade, Volta morreu em 5 de maio de 1827, com 82 anos de idade, em sua cidade natal. Em 1881, por meio de um acordo internacional, seu nome passou a designar a unidade de medida de tensão elétrica — volt (V).

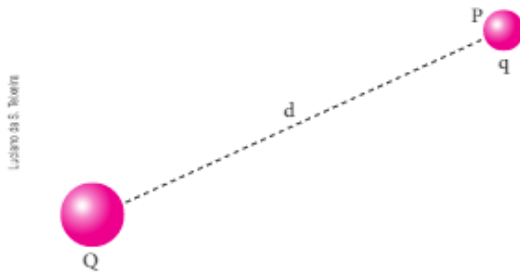


Em 1799, Alessandro **Volta** construiu a primeira pilha elétrica utilizando discos de prata e zinco. Essa invenção aproximou a Física da Química. Seus estudos abrangeram também a eletricidade em seres vivos.



## 2. POTENCIAL EM UM CAMPO ELÉTRICO CRIADO POR UMA PARTÍCULA ELETRIZADA

Considere o campo elétrico gerado por uma partícula eletrizada com carga  $Q$ . Vamos colocar uma carga de prova  $q$  em um ponto  $P$  desse campo, a uma distância  $d$  de  $Q$ .



A energia potencial elétrica armazenada no sistema constituído pelas duas cargas é dada por:

$$E_p = K \frac{Qq}{d}$$

em que  $K$  é a constante eletrostática do meio.

A demonstração dessa expressão requer conhecimento de cálculo diferencial e integral, assunto que será tratado nos anos iniciais dos cursos de exatas nas Universidades. No entanto, podemos usar uma forma simplificada para essa demonstração. Se imaginarmos que a carga  $Q$  se encontra fixa, a carga de prova  $q$ , ao se deslocar até o ponto  $P$ , estará sujeita a uma força elétrica de intensidade variável  $F$ , deslocando-se uma distância  $d$ . Considerando o valor médio da intensidade da força ( $F$ ) como constante ( $F_m$ ), o trabalho realizado por ela é responsável pela energia potencial adquirida pelo sistema.

Assim, vale:

$$E_p = \tau = F_m \cdot d \cdot \cos \theta$$

Como a carga  $q$  irá mover-se na direção e no sentido da força elétrica  $\vec{F}$ , teremos  $\theta = 0^\circ$  e  $\cos \theta = 1$ . Portanto:

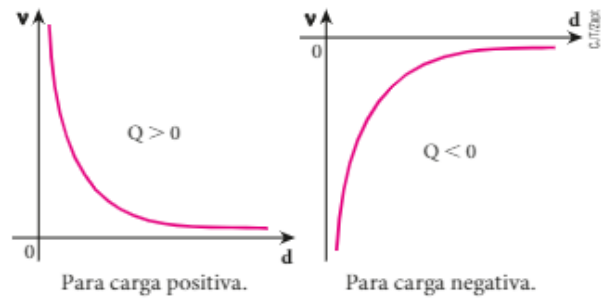
$$E_p = F_m \cdot d = K \frac{|Qq|}{d^2} \cdot d$$

$$E_p = K \frac{Qq}{d}$$

Sendo  $E_p = q v$ , obtemos a expressão do potencial elétrico no ponto  $P$ :

$$q v = K \frac{Qq}{d} \Rightarrow v = K \frac{Q}{d}$$

O gráfico representativo do potencial em função da distância à carga puntiforme geradora do campo elétrico é uma curva denominada **hipérbole equilátera**.



Observando os gráficos, percebe-se que o potencial tende a zero, quando a distância tende ao infinito. Isso acontece tanto para a carga positiva como para a negativa. Assim:

O nível zero do potencial criado por uma carga puntiforme está, geralmente, no "infinito".

Devemos entender por "infinito" um local suficientemente afastado da carga  $Q$ , de modo que suas influências em outras cargas sejam desprezíveis.

## 3. POTENCIAL EM UM CAMPO ELÉTRICO CRIADO POR DUAS OU MAIS PARTÍCULAS ELETRIZADAS

Suponha um local do espaço onde se encontram  $n$  partículas eletrizadas. Considere, agora, um ponto  $A$ , sujeito aos  $n$  campos elétricos criados pelas cargas. Uma vez que o potencial elétrico é uma grandeza escalar, teremos, no ponto  $A$ , um potencial resultante de valor igual à **soma algébrica** dos  $n$  potenciais criados individualmente pelas cargas.

Assim, vale a relação:

$$v_A = v_1 + v_2 + \dots + v_n$$

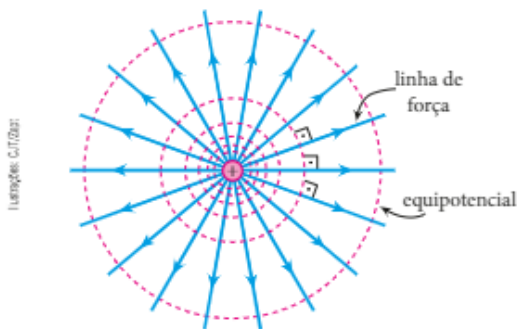
## 4. EQUIPOTENCIAIS

**Equipotenciais** são linhas (no plano) ou superfícies (no espaço) nas quais o potencial, em todos os pontos, assume o mesmo valor algébrico.

As equipotenciais, em um campo elétrico criado por uma partícula eletrizada e solitária, são circunferências (no plano) ou superfícies esféricas (no espaço). Tal afirmativa é facilmente constatável, bastando, para isso, analisar a expressão do potencial. Note que, para os mesmos  $Q$  e  $K$ , o potencial assumirá valores iguais nos pontos do espaço equidistantes da carga fonte:

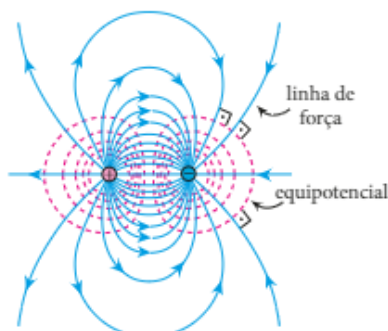
$$v = K \frac{Q}{d}$$

Tendo  $K$  e  $Q$  valores fixos, para distâncias  $d$  iguais temos o mesmo potencial  $v$ .



Na ilustração, vemos a representação de equipotenciais em um campo elétrico criado por uma carga puntiforme positiva. Observe que, se a carga fosse negativa, mudaria apenas o sentido das linhas de força, que passariam a ser de aproximação. Com relação às equipotenciais, nada se alteraria. No espaço, em vez de circunferências concêntricas, teríamos superfícies esféricas concêntricas.

Em um dipolo elétrico, isto é, no caso de duas partículas eletrizadas com cargas de mesmo módulo, porém de sinais opostos, as equipotenciais assumem o aspecto da figura a seguir.

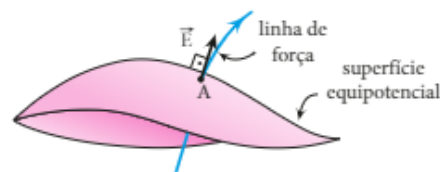


Representação de equipotenciais do campo criado por um dipolo elétrico.

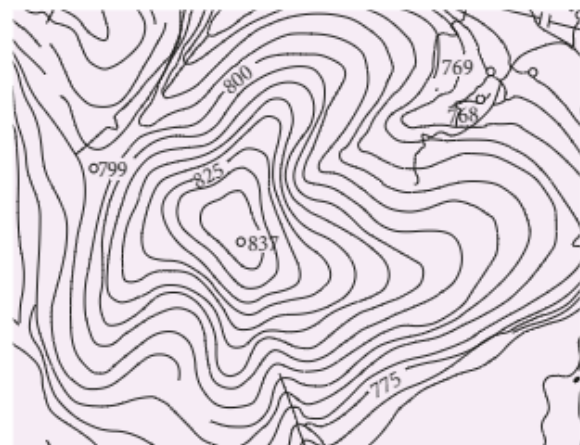
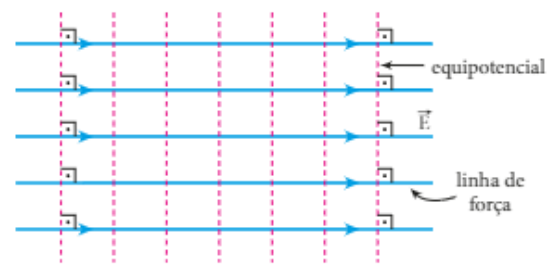
É importante observar o seguinte fato, que será justificado na seção 5:

As equipotenciais (linhas ou superfícies) são **perpendiculares** às linhas de força.

Como já vimos, o vetor campo elétrico  $\vec{E}$  é sempre tangente à linha de força, com sentido coincidindo com a orientação da linha. Assim, quando temos uma superfície equipotencial, tanto a linha de força como o vetor campo elétrico são perpendiculares a ela, em todos os seus pontos, como ilustra a figura abaixo.



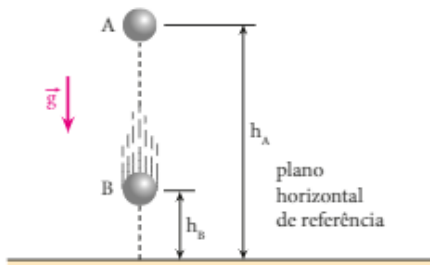
Em um campo elétrico uniforme, as equipotenciais são retas (no plano) ou superfícies planas (no espaço), também perpendiculares às linhas de força, como representa a figura:



No mapa topográfico, as linhas indicam altitudes. Ao percorrer uma mesma linha, temos uma mesma altitude. No campo elétrico, as linhas e as superfícies equipotenciais representam os potenciais elétricos nessa região. Ao percorrer uma mesma equipotencial, permanecemos em um mesmo potencial.

## 5. TRABALHO DA FORÇA ELÉTRICA

Considere um corpo de massa  $m$ , abandonado em um campo gravitacional uniforme, conforme mostra a figura a seguir.



Quando o corpo se encontra no ponto A indicado na figura, ele possui, em relação ao plano horizontal de referência, uma energia potencial de gravidade, que é dada pela expressão:

$$E_{PA} = m g h_A \quad (I)$$

Quando atinge o ponto B, no entanto, sua energia potencial de gravidade passa a valer:

$$E_{PB} = m g h_B \quad (II)$$

O trabalho que a força gravitacional (conservativa) realizou sobre o corpo no deslocamento de A para B, é calculado pela expressão:

$$\tau_{AB} = F d$$

em que  $F = P = m g$  e  $d = h_A - h_B$ .

Assim, temos:

$$\tau_{AB} = m g (h_A - h_B) \Rightarrow \tau_{AB} = m g h_A - m g h_B \quad (III)$$

Das expressões (I), (II) e (III), obtemos:

$$\tau_{AB} = E_{PA} - E_{PB}$$

Isso significa que o trabalho realizado pela força gravitacional sobre o corpo é igual à diferença entre a energia potencial inicial e a energia potencial final.

Analogamente, ao se deslocar uma carga puntiforme  $q$ , em um campo elétrico, de um ponto A até um ponto B, o trabalho que a força elétrica, também conservativa, realiza sobre a partícula é  $\tau_{AB}$ , dado por:

$$\tau_{AB} = E_{PA} - E_{PB}$$

A energia potencial eletrostática, porém, é calculada por  $E_p = q v$ . Assim, temos:

$$\tau_{AB} = q v_A - q v_B \Rightarrow \tau_{AB} = q (v_A - v_B)$$

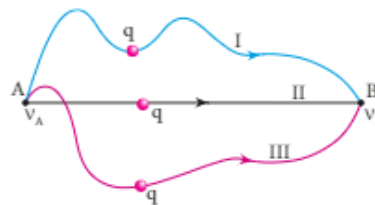
em que  $v_A$  é o potencial na **posição inicial** da carga  $q$  e  $v_B$ , o potencial na **posição final**.

A grandeza  $v_A - v_B$  é a **diferença de potencial (ddp)** ou **tensão elétrica** entre os pontos A e B.

Representando essa diferença por  $U$ , o trabalho da força elétrica entre A e B também pode ser expresso por:

$$\tau_{AB} = q U$$

É importante destacar que o trabalho realizado pela força elétrica sobre uma partícula eletrizada com carga  $q$ , quando esta se desloca do ponto A para o ponto B desse campo, **não depende** da trajetória seguida por ela.

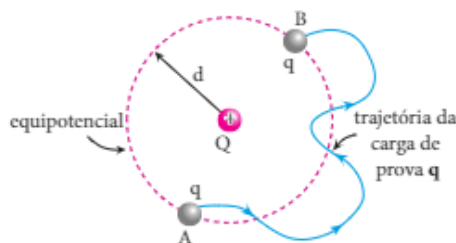


Para as trajetórias I, II e III descritas pela partícula de A até B, vale a mesma relação anterior:

$$\tau_{AB} = q (v_A - v_B)$$

Isso porque: **A força eletrostática é conservativa.**

É importante observar, também, que entre dois pontos de uma mesma equipotencial a diferença de potencial é nula. Assim, o trabalho que a força elétrica realiza sobre uma partícula eletrizada  $q$ , quando esta se desloca de um ponto a outro da **mesma** equipotencial, também é nulo, independentemente da trajetória seguida por essa partícula.

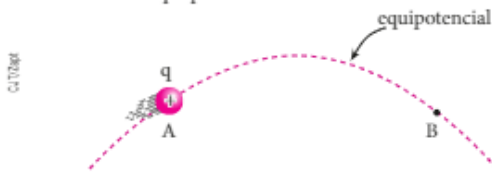


A partícula eletrizada  $q$  é transportada de A para B, que são pontos de uma mesma equipotencial. O trabalho realizado pela força elétrica, nesse caso, é nulo, qualquer que seja a trajetória:

$$\tau_{AB} = 0$$

Agora, vamos entender por que as equipotenciais são sempre perpendiculares às linhas de força.

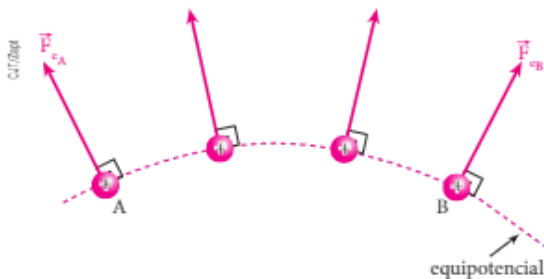
Para isso, considere dois pontos **A** e **B** quaisquer de uma mesma equipotencial:



Imagine o deslocamento de uma partícula de carga **q** de **A** para **B**, ao longo da equipotencial. O trabalho realizado pela força elétrica é nulo, pois  $v_A = v_B$ :

$$\tau_{AB} = q(v_A - v_B) \Rightarrow \tau_{AB} = 0$$

Isso será verdade, no entanto, somente se a força eletrostática se mantiver sempre perpendicular à trajetória seguida, como ilustra o esquema a seguir.



Como a força tem a mesma direção do campo elétrico e este, por sua vez, tem a mesma direção das linhas de força, concluímos que essas linhas também são **perpendiculares** à superfície equipotencial.

## 6. PROPRIEDADES DO CAMPO ELÉTRICO

### Variação do potencial em um campo elétrico

#### Carga fonte positiva

Observe, a seguir, uma partícula eletrizada com carga positiva **Q** e uma das linhas de força do campo elétrico criado por ela:



Usando a expressão do potencial elétrico, dada por  $v = K \frac{Q}{d}$ , vamos verificar, ao longo da linha de força, o que ocorre com o valor do potencial.

Note que, sendo a carga **Q** positiva, quando a distância **d** cresce, o potencial elétrico **v** decresce. Do mesmo modo, quando **d** decresce, **v** cresce.

Portanto, no sentido da linha de força de um campo elétrico gerado por carga positiva, o potencial decresce.

#### Carga fonte negativa

Considere, agora, uma partícula eletrizada com carga negativa **Q** e uma das linhas de força do campo elétrico criado por ela:



Utilizando a expressão do potencial elétrico, dada por  $v = K \frac{Q}{d}$ , vamos verificar o que ocorre com o valor do potencial ao longo da linha de força.

Note que, sendo a carga **Q** negativa, quando a distância **d** cresce, o potencial elétrico **v** também cresce, pois o termo negativo torna-se mais próximo de zero. Do mesmo modo, quando **d** decresce, **v** também decresce.

Assim, tanto para o campo elétrico gerado por uma carga positiva como para o gerado por uma carga negativa, temos que:

Ao longo de uma linha de força, e no sentido dela, o **potencial elétrico decresce**.

### Partícula eletrizada abandonada em um campo elétrico

#### Carga de prova positiva

Quando uma partícula eletrizada com **carga positiva** é abandonada sob a ação exclusiva de um campo elétrico, ela movimenta-se **no sentido da linha de força**, dirigindo-se para pontos de **menor potencial**.

Note que a carga positiva busca pontos de menor potencial para ficar com a mínima energia potencial possível, que é a tendência natural de qualquer sistema. Lembrando que  $E_p = qv$ , e sendo **q** positivo, se **v** diminuir,  $E_p$  também diminuirá.

Observe ainda que, se a carga positiva, abandonada sob a influência exclusiva do campo elétrico, mo-

vimentar-se de um ponto **A** para um ponto **B**, sempre teremos  $v_A > v_B$ . Desse modo, tanto a diferença de potencial  $U = v_A - v_B$  quanto o trabalho realizado pela força elétrica serão positivos:

$$\tau_{AB} = q U \Rightarrow \tau_{AB} > 0$$

(+)(+)

### Carga de prova negativa

Quando uma partícula eletrizada com **carga negativa** é abandonada sob ação exclusiva de um campo elétrico, ela movimenta-se **no sentido oposto ao da linha de força**, dirigindo-se para pontos de **maior potencial**.

Note que a carga negativa busca pontos de maior potencial para também ficar com a mínima energia potencial possível.

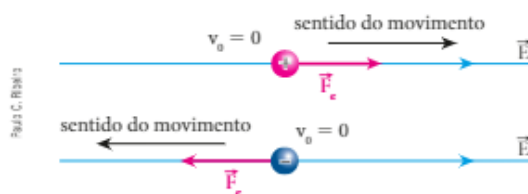
Observe ainda que, nesse caso, a diferença de potencial  $U$  é negativa, resultando em um trabalho também positivo realizado pela força elétrica:

$$\tau_{AB} = q U \Rightarrow \tau_{AB} > 0$$

(-)(-)

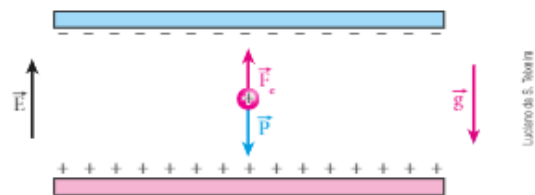
Resumindo:

- Quando abandonadas sob a ação exclusiva de um campo elétrico, as cargas positivas dirigem-se para potenciais menores, enquanto as negativas dirigem-se para potenciais maiores.
- Tanto as cargas positivas como as negativas buscam uma situação de energia potencial mínima.
- Quando partículas eletrizadas são abandonadas sob a ação exclusiva de um campo elétrico, o trabalho realizado pela força elétrica é sempre positivo.
- Essa última afirmativa pode ser comprovada de um modo diferente. Quando abandonamos uma partícula eletrizada em um campo elétrico, esta se movimenta no sentido da força eletrostática. Por isso, o trabalho realizado por essa força é positivo (motor), como mostra a figura a seguir.



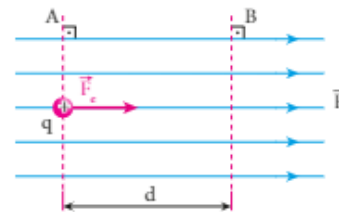
Partículas eletrizadas são abandonadas sobre uma linha de força. O sentido do movimento coincide com o da força eletrostática e o trabalho realizado por essa força é motor ( $\tau > 0$ ).

- É possível que um agente externo obrigue a carga elétrica a se movimentar no sentido oposto àquele que seria provocado pelo campo elétrico. Nesse caso, o trabalho realizado pela força elétrica será negativo (resistente). Como exemplo, considere uma partícula de carga positiva  $q$  e massa  $m$  abandonada em uma região sob a influência de dois campos, sendo um elétrico e outro gravitacional, conforme representado na figura abaixo. Se a força peso  $\vec{P}$  for mais intensa que a força eletrostática  $\vec{F}_e$ , a partícula se movimentará no sentido de  $\vec{P}$ , contrário ao de  $\vec{F}_e$ .



## 7. DIFERENÇA DE POTENCIAL ENTRE DOIS PONTOS DE UM CAMPO ELÉTRICO UNIFORME

Considere um campo elétrico uniforme, representado por suas linhas de força – retilíneas, paralelas e espaçadas igualmente – e duas equipotenciais **A** e **B**, sendo o potencial elétrico em **A** maior que em **B** ( $v_A > v_B$ ). Uma partícula eletrizada com carga positiva  $q$  é abandonada em **A**.



Supondo que essa partícula se submeta apenas ao campo elétrico existente na região, a força elétrica  $\vec{F}_e$  fará com que ela se desloque ao longo de uma linha de força e no sentido desta.

Uma vez que o campo elétrico é uniforme, a força  $\vec{F}_e$  é constante, pois  $\vec{F}_e = q \vec{E}$ . Assim, o trabalho realizado pela força elétrica, no deslocamento da carga  $q$  entre as equipotenciais **A** e **B**, pode ser calculado por:

$$\tau_{AB} = F_e d \quad (I)$$

Também pode ser usada, a expressão:

$$\tau_{AB} = q (v_A - v_B) \quad (II)$$

Sendo  $v_A - v_B = U$  e comparando-se (I) e (II), tem-se:

$$F_e d = q U \quad (\text{III})$$

Mas  $F_e = q E$ . Substituindo em (III), obtemos:

$$q E d = q U \Rightarrow E d = U$$

Em um campo elétrico uniforme, a diferença de potencial (ddp) entre duas equipotenciais é igual ao produto da intensidade do campo  $\vec{E}$  pela distância **entre as equipotenciais**.

É importante destacar, nessa expressão, que o valor de  $U$  deve sempre ser usado **em módulo**.

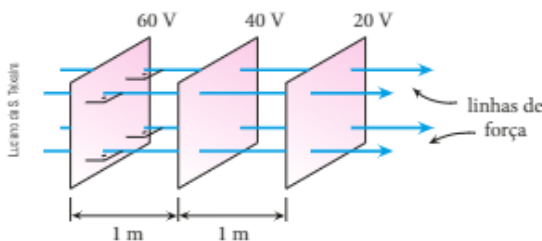
Da relação encontrada, percebe-se que, no SI, a unidade de campo elétrico é  $\frac{\text{volt}}{\text{metro}}$  (V/m), que equivale a  $\frac{\text{newton}}{\text{coulomb}}$  (N/C), já definida anteriormente.

De fato:

$$\frac{V}{m} = \frac{J/C}{m} = \frac{Nm/C}{m} = \frac{N}{C}$$

Então, podemos usar como unidade de campo elétrico N/C ou V/m.

Assim, um campo elétrico uniforme de 20 V/m, por exemplo, indica que, ao percorrermos uma linha de força, no sentido dela, o potencial elétrico diminui 20 V a cada metro percorrido.

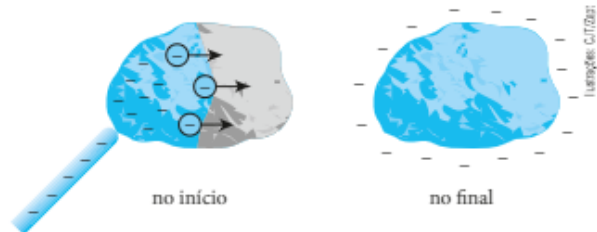


## 8. POTENCIAL ELÉTRICO CRIADO POR UM CONDUTOR ELETRIZADO

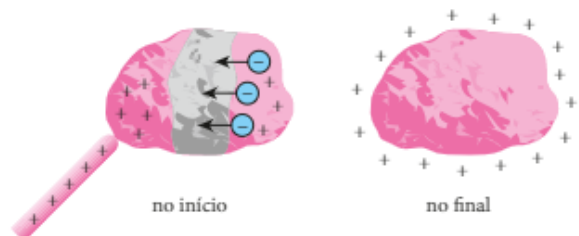
É importante lembrar que:

Partículas eletrizadas, abandonadas sob a influência exclusiva de um campo elétrico, movimentam-se espontaneamente entre dois pontos quaisquer somente se entre eles houver uma diferença de potencial (ddp) não nula.

Quando fornecemos elétrons a um condutor, eletrizamos inicialmente apenas uma região dele. Nessa região, as cargas negativas produzem uma diminuição no potencial, mais acentuada que a que ocorre no potencial de regiões mais distantes. A diferença de potencial estabelecida é responsável pela movimentação dos elétrons para regiões mais distantes, o que provoca um aumento no potencial do local onde se encontravam e uma diminuição no potencial do local para onde foram.



Na eletrização positiva, são tirados elétrons de uma região, provocando um aumento no potencial desse local. Como consequência, elétrons livres das regiões mais distantes movimentam-se para o local inicialmente eletrizado. Tal fato faz surgir cargas positivas nas regiões que estavam neutras, diminuindo a quantidade de cargas positivas na região eletrizada inicialmente. Tudo acontece como se as cargas positivas se movimentassem ao longo do condutor.



A movimentação das cargas no condutor ocorre durante um breve intervalo de tempo. Após isso, as partículas elementares atingem posições tais que a diferença de potencial entre dois pontos quaisquer do corpo torna-se nula. Dizemos, então, que o condutor atingiu o **equilíbrio eletrostático**.

Convém lembrar que a carga de um condutor eletrizado e em equilíbrio eletrostático acha-se distribuída em sua superfície externa.

A diferença de potencial (ddp) entre dois pontos quaisquer de um condutor em equilíbrio eletrostático é sempre nula.

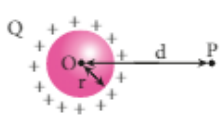
Do exposto, conclui-se que, tanto nos pontos internos como nos pontos da superfície de um condutor eletrizado em equilíbrio eletrostático, o potencial elétrico assume o mesmo valor. O potencial assume valores diferentes apenas nos pontos externos ao condutor.

$$V_{\text{interno}} = V_{\text{superfície}}$$

## 9. POTENCIAL ELÉTRICO CRIADO POR UM CONDUTOR ESFÉRICO ELETRIZADO

Suponha uma esfera condutora de raio  $r$  eletrizada com carga  $Q$ , solitária e em equilíbrio eletrostático.

Para pontos externos à esfera condutora, o potencial varia com a distância  $d$  do ponto considerado ao centro  $O$  da esfera.



Para efeito de cálculo desse potencial, considera-se como se toda a carga elétrica da esfera estivesse concentrada em seu centro. Isso, entretanto, só é possível devido à simetria que ela apresenta.

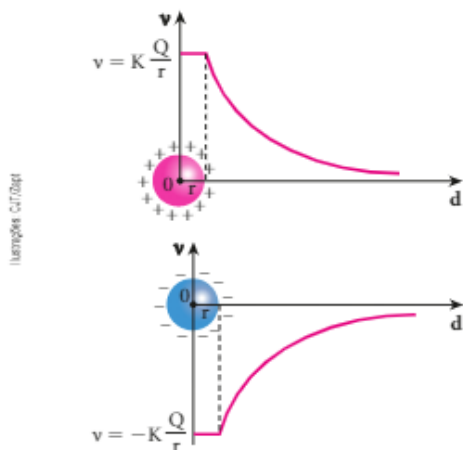
Assim, sendo  $K$  a constante eletrostática do meio, temos, para um ponto externo  $P$ :

$$V_{\text{externo}} = K \frac{Q}{d}$$

Fazendo  $d = r$  nessa expressão, obtemos o potencial na superfície da esfera que, como vimos, é igual ao potencial de seus pontos internos:

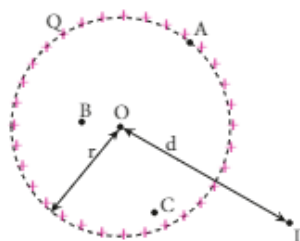
$$V_{\text{interno}} = V_{\text{superfície}} = K \frac{Q}{r}$$

Veja, a seguir, gráficos do potencial em função da distância ao centro da esfera eletrizada.



## Película esférica

Considere uma película esférica de raio  $r$  uniformemente eletrizada com carga  $Q$  (positiva ou negativa).



Com relação ao potencial elétrico e ao vetor campo elétrico devidos a essa película, é importante destacar que:

- o potencial é igual a  $\frac{KQ}{r}$  tanto nos pontos da própria película como nos pontos envolvidos por ela. Assim:

$$V_A = V_B = V_C = \frac{KQ}{r}$$

- a intensidade do vetor campo elétrico é nula nos pontos envolvidos pela película. Assim:

$$E_B = E_C = 0$$

- o potencial e a intensidade do vetor campo elétrico em um ponto externo  $D$  são calculados considerando-se toda a carga  $Q$  concentrada no centro  $O$  da película. Portanto:

$$V_D = K \frac{Q}{d} \text{ e } E_D = K \frac{|Q|}{d^2}$$

## 10. CAPACITÂNCIA

É de verificação experimental que o potencial adquirido por um condutor eletrizado é diretamente proporcional à sua carga elétrica. Assim, se um condutor eletrizado com carga  $Q$  apresenta um potencial  $v$ , ao adquirir uma carga  $2Q$ , apresentará um potencial  $2v$ . Dessa forma, a razão entre a carga elétrica  $Q$  recebida por um condutor e o potencial  $v$  atingido por ele é uma constante, denominada **capacitância**  $C$  do condutor.

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

A capacitância fornece uma indicação da capacidade do condutor de armazenar cargas. Assim, quando dois condutores isolados e inicialmente neutros atingem o mesmo potencial, o de maior capacitância armazena uma carga elétrica maior.

A capacitância de um condutor depende de suas características geométricas (forma e dimensão) e do meio em que se encontra.

No SI, a unidade de capacitância é o **farad** (F), nome dado em homenagem ao cientista inglês Michael **Faraday** (1791-1867).

$$1 \text{ farad} = 1 \frac{\text{coulomb}}{\text{volt}}$$

Assim, para cada **farad** de capacitância, o condutor terá de receber ou perder 1 coulomb de carga para ter seu potencial alterado de 1 volt. Para uma capacitância de 10 F, por exemplo, o condutor terá de receber ou perder 10 C de carga elétrica para variar de 1 V o seu potencial. Lembre-se de que a carga de 1 C é muito grande. Portanto, a capacitância de 1 F também é muito grande. Por isso, costumamos usar submúltiplos do farad, como, por exemplo, o microfarad ( $\mu\text{F}$ ).

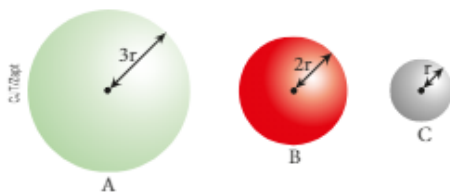
## 11. CAPACITÂNCIA DE UM CONDUTOR ESFÉRICO

Para um condutor esférico de raio  $r$ , valem as relações:

$$\begin{cases} v = K \frac{Q}{r} & \text{(I)} \\ C = \frac{Q}{v} \Rightarrow Q = C v & \text{(II)} \end{cases}$$

Substituindo (II) em (I), temos:  $C = \frac{r}{K}$

Observe que, uma vez estabelecida a forma esférica, a capacitância do condutor depende de sua dimensão e do meio que o envolve, sendo diretamente proporcional ao raio  $r$ .



Num mesmo meio, a capacitância da esfera A é a maior e a da esfera C é a menor:  $C_A = 3C_C$ ;  $C_B = 2C_C$ .

Fazendo o raio da Terra aproximadamente igual a  $6,3 \cdot 10^6$  m, podemos calcular a sua capacitância:

$$C = \frac{r}{K} = \frac{6,3 \cdot 10^6}{9 \cdot 10^9} \text{ (SI)} \Rightarrow C = 7 \cdot 10^{-4} \text{ F}$$

Observe que a Terra tem uma capacitância de, aproximadamente, sete décimos de milésimo de farad. Esse fato mostra que 1 F é realmente muito grande.

## 12. ENERGIA POTENCIAL ELETROSTÁTICA DE UM CONDUTOR

Considere um condutor inicialmente neutro. Para eletrizá-lo negativamente, por exemplo, devemos adicionar-lhe elétrons. Para que um novo elétron seja colocado no condutor, entretanto, precisaremos vencer as forças repulsivas exercidas pelos elétrons já adicionados. Em outras palavras, será preciso realizar um trabalho contra as forças de repulsão, e essa energia ficará armazenada no condutor sob a forma latente de energia potencial eletrostática (ou elétrica).

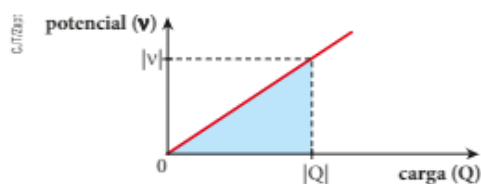
Seja um condutor neutro de capacitância  $C$ , ao qual fornecemos uma carga elétrica  $Q$ . Sendo  $v$  o potencial atingido pelo condutor, a energia potencial elétrica adquirida por ele é dada por:

$$E_p = \frac{Qv}{2}$$

Utilizando a expressão da capacitância, temos:

$$C = \frac{Q}{v} \text{ ou } |v| = \frac{1}{C} \cdot |Q|$$

Fazendo-se a representação gráfica dos valores absolutos da variação de potencial ( $v$ ) e da carga ( $Q$ ), temos:



Sendo a energia potencial armazenada numericamente igual à área sombreada (triângulo), temos:

$$E_p = \frac{|Q| \cdot |v|}{2}$$

Como essa expressão é válida tanto para cargas positivas como negativas, temos:

$$E_p = \frac{Qv}{2}$$

Note que para  $Q > 0$  temos  $v > 0$ , e para  $Q < 0$  temos  $v < 0$ . Assim, o produto  $Qv$  é sempre positivo ( $E_p > 0$ ).

Sendo  $Q = Cv$ , também podemos escrever:

$$E_p = \frac{Cv^2}{2} = \frac{Q^2}{2C}$$



### 13. CONDUTORES EM EQUILÍBRIO ELETROSTÁTICO

Considere  $n$  condutores eletrizados e isolados.

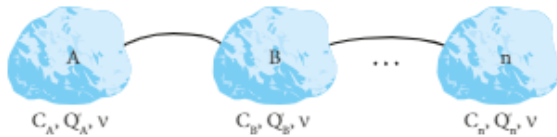
A capacitância ( $C$ ), a carga ( $Q$ ) e o potencial ( $v$ ) de cada um dos condutores estão indicados na figura:



Valem as relações:

$$Q_A = C_A v_A; Q_B = C_B v_B; \dots Q_n = C_n v_n$$

Por meio de fios de capacitâncias desprezíveis, podemos fazer a interligação desses condutores. Devido às diferenças de potencial existentes entre eles, há um deslocamento de cargas até que os potenciais se tornem iguais. Quando isso ocorre, os condutores atingem o **equilíbrio eletrostático**.



A nova carga ( $Q'$ ) e o potencial comum ( $v$ ) dos condutores estão indicados na figura anterior, valendo, agora, as relações:

$$Q'_A = C_A v; Q'_B = C_B v; \dots Q'_n = C_n v$$

Somando membro a membro as expressões, temos:

$$Q'_A + Q'_B + \dots + Q'_n = C_A v + C_B v + \dots + C_n v$$

Pelo **Princípio da Conservação das Cargas Elétricas**, entretanto, a soma das cargas antes e depois dos contatos é a mesma:

$$Q_A + Q_B + \dots + Q_n = Q'_A + Q'_B + \dots + Q'_n$$

$$\text{Assim: } Q_A + Q_B + \dots + Q_n = (C_A + C_B + \dots + C_n)v$$

$$v = \frac{Q_A + Q_B + \dots + Q_n}{C_A + C_B + \dots + C_n}$$

Portanto, o potencial de equilíbrio é o quociente do somatório das cargas elétricas existentes nos condutores pelo somatório das respectivas capacitâncias.

## EM BUSCA DE EXPLICAÇÕES

### Efeito piezoelétrico

Para acender a chama da boca do fogão, pode-se utilizar um acendedor que emite uma faísca ao se pressionar uma tecla. Dizem que esse aparelho pode durar mais de cem anos. Como será que ele funciona?



Acendedor de fogão.

O princípio de funcionamento desse tipo de acendedor é o fenômeno físico denominado **efeito piezoelétrico**. A palavra *piezo* vem do grego e significa apertar, exercer pressão. Alguns cristais, como o quartzo, a turmalina e o sal de Rochelle, ao receberem uma força mecânica de pressão, têm seu volume diminuído, o que provoca uma densidade de cargas elétricas maior em seu interior. Como essa densidade de cargas não é homogênea, diferentes locais do

cristal apresentarão potenciais diferentes. Se um fio condutor estiver ligando esses pontos, podemos observar um fluxo de elétrons entre eles, na tentativa de igualar os potenciais. Esse fluxo de elétrons provoca a faísca que acende a chama da boca do fogão.

Alguns microfones também funcionam a partir da pressão exercida em cristais piezoelétricos.

Na Universidade Estadual Paulista (Unesp), no departamento de Física e Química da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, estão sendo realizadas pesquisas, envolvendo esse material piezoelétrico, para transformar em energia elétrica a pressão (energia mecânica) que carros, ônibus e caminhões exercem sobre a superfície da estrada.

Imagine uma estrada muito movimentada, centenas de veículos passando por uma superfície que tem, logo abaixo da manta asfáltica, pequenos cubos de cristais piezoelétricos que, ao serem pressionados, liberam elétrons que poderão ser utilizados para a iluminação da estrada, por exemplo.

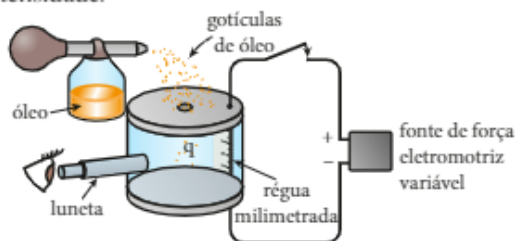
## EM BUSCA DE EXPLICAÇÕES

### O Experimento de Millikan

**Experimento de Millikan** é a denominação genérica de vários experimentos realizados pelo físico estadunidense Robert Andrews Millikan (1868-1953) e seus colaboradores de 1909 até 1911.

Vamos descrever aqui um desses experimentos, em que foi usado um dispositivo dotado de duas placas metálicas. Em uma delas havia um pequeno orifício por onde entravam algumas minúsculas gotas de óleo borrifadas e eletrizadas por atrito. Com uma pequena luneta, podiam ser observados os movimentos dessas gotículas caindo entre as placas, no interior do dispositivo.

Escolhia-se uma gotícula caindo com velocidade constante (velocidade-limite). Nessa situação, desprezando-se o empuxo do ar, o peso da gotícula ( $\vec{P}$ ) e a força de resistência viscosa do ar ( $\vec{R}$ ) tinham a mesma intensidade.



A intensidade dessa força de resistência é proporcional à velocidade de queda da gota.

O módulo  $v_1$  da velocidade da gotícula era calculado por meio da observação de seu deslocamento ao longo de uma escala, durante um intervalo de tempo cronometrado.

Conhecendo a intensidade  $g$  do campo gravitacional, e calculando a massa  $m$  da gotícula a partir da densidade do óleo e do volume da gota, determinava-se  $R$ .

Como  $R = k v_1$ , conhecendo  $R$  e  $\vec{v}_1$ , determinava-se a constante de proporcionalidade  $k$ .

Vamos supor a gota em observação eletrizada negativamente com carga elétrica  $q$ .

Estabelecendo-se uma diferença de potencial adequada entre as placas, de modo que a superior ficasse eletrizada positivamente e a inferior, negativamente, surgia, na região entre elas, um campo elétrico uni-

forme orientado para baixo e de intensidade  $E = \frac{U}{d}$ , em que a diferença de potencial  $U$  entre as placas era conhecida e a distância  $d$  que as separava era medida.

Com isso, a **mesma** gotícula escolhida para a análise ficava submetida a uma força eletrostática  $\vec{F}_e$  para cima, que a fazia parar de descer e, em seguida, subir em movimento acelerado até atingir novamente uma velocidade limite  $\vec{v}_2$ , cuja intensidade também era determinada. Quando isso ocorria, a força  $\vec{F}_e$  estava equilibrando o peso  $\vec{P}$  e a força de resistência viscosa do ar,  $\vec{R}$ :

$$(\vec{F}_e = \vec{R} + \vec{P} \Rightarrow \vec{R} = \vec{F}_e - \vec{P} \Rightarrow kv_2 = |q|E - mg)$$

$$\text{Assim: } |q| = \frac{k v_2 + m g}{E}$$

Essa expressão fornecia o módulo da carga elétrica da gotícula.

Tanto na queda como na subida, a velocidade da gotícula analisada era muito pequena, da ordem de  $10^{-2}$  cm/s, o que facilitava as observações. Assim, era possível acompanhar várias vezes a mesma gotícula descendo (campo elétrico desativado) ou subindo (campo elétrico ativado).

Millikan e seus colaboradores realizaram o experimento milhares de vezes, em vários níveis de sofisticação. Para tornar as gotículas mais eletrizadas, por exemplo, o ar entre as placas era submetido a raios X, uma radiação fortemente ionizante.

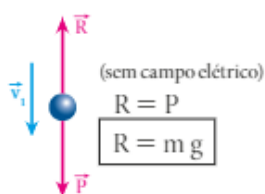
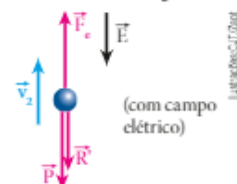
Com margem de erro inferior a 1%, concluíram que a carga elétrica  $q$  de cada gotícula analisada sempre era um múltiplo inteiro de  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C, que é a carga elementar  $e$ :  $q = \pm n e$  ( $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ).

Isso significa que a carga elétrica de um corpo é **quantizada**, ou seja, só pode ter determinados valores, no caso, múltiplos inteiros de  $e$ , e não um valor qualquer.

Hoje, o melhor valor experimental de  $e$  é:

$$1,60217738 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

O experimento de Millikan é considerado um dos dez mais belos de Física de todos os tempos. Millikan recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1923 por esse seu brilhante trabalho realizado na Universidade de Chicago.



## Precipitador eletrostático

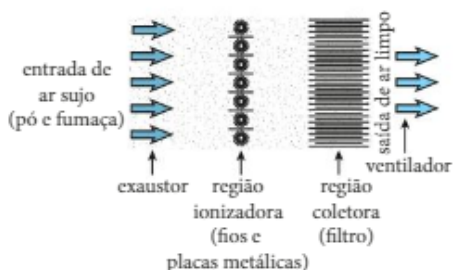
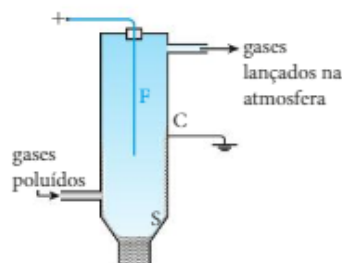
A industrialização foi uma grande conquista da espécie humana, que tem acarretado incontáveis benefícios a todos os seres vivos. Apesar disso, ela apresenta alguns inconvenientes. Um deles é o lançamento de grandes quantidades de partículas poluentes na atmosfera. Em uma tentativa de sanar ou diminuir esse problema, foi inventado o **precipitador eletrostático** – um dispositivo simples que pode reduzir substancialmente a emissão de partículas sólidas pelas chaminés.

Um dos tipos desse equipamento é constituído de um cilindro condutor aterrado **C**, de vários metros de altura, e de um fio condutor **F** instalado dentro do cilindro e isolado dele, como representado no esquema ao lado.

O fio **F** é mantido em um potencial de dezenas de milhares de volts acima do potencial da Terra, por isso o campo elétrico existente na região entre **F** e **C**, muito intenso, provoca a extração de elétrons das partículas sólidas (**S**) que passam pelo campo elétrico e se ionizam. Essas partículas, eletrizadas positivamente, são atraídas pelo cilindro e aderem a ele.

Esse processo consegue remover partículas extremamente pequenas, de até  $10\ \mu\text{m}$  ( $10 \cdot 10^{-6}\ \text{m}$ ).

Periodicamente, o cilindro precisa ser sacudido ou receber jatos de água para que o material sólido coletado seja retirado.



No comércio, podemos encontrar precipitadores eletrostáticos para a limpeza do ar de um ambiente.

Nesses aparelhos, destacam-se duas regiões: a ionizadora e a coletora.

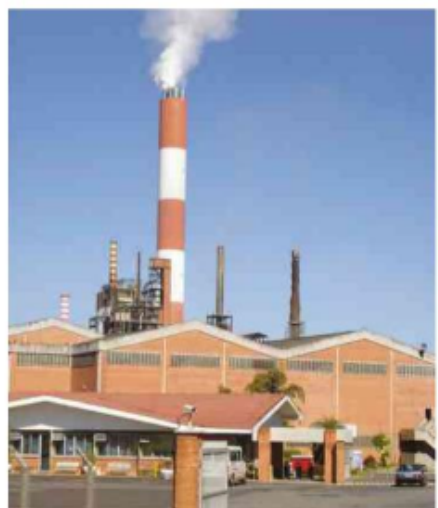
Na região ionizadora, o ar poluído aspirado passa por um conjunto de tiras e fios metálicos que se alternam. Entre as tiras e fios, existe um intenso campo elétrico que provoca a eletrização das partículas poluentes.

Em seguida, essas partículas, já eletrizadas, arrastadas pelo ar, vão para a região coletora (filtro). Na região coletora, a filtragem do ar é feita por um conjunto de placas metálicas que, por serem eletrizadas, atraem as partículas poluentes e as fixam, de forma que o ar volte limpo para o ambiente.

A eficiência desses aparelhos é bastante elevada, retirando do ar partículas de dimensões que variam entre  $10^{-6}\ \text{cm}$  e  $10^{-4}\ \text{cm}$ .

Após algum tempo de funcionamento, é preciso fazer a limpeza do filtro, removendo a sujeira depositada em suas placas.

A utilização de filtros adequados, entre eles precipitadores eletrostáticos, minimiza em muito a emissão de gases que podem comprometer o ambiente e a vida dos seres vivos. Na fotografia, observamos a chaminé de uma fábrica de papel lançando vapor de água e gases inócuos. Uma outra fábrica como esta, sem os referidos filtros, poderia ser notada a quilômetros de distância pelo mau cheiro dos gases emitidos. Além disso, a vegetação ao seu redor estaria maltratada pelas partículas tóxicas, pesadas, que, emitidas pelas chaminés, se precipitam sobre as folhas de árvores e arbustos.



## Gerador eletrostático de Van de Graaff

O gerador eletrostático foi imaginado originalmente em 1890 por Lorde Kelvin (William Thomson – 1824-1907). Entretanto, apenas em 1929 o físico estadunidense Robert Jemison **van de Graaff** (1901-1967) demonstrou o primeiro modelo desse aparelho. Era bastante simples e usava como correia de transporte de cargas uma fita de seda comprada em uma loja com poucos centavos de dólar. Em 1931, voltando a trabalhar no MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts), ele construiu um exemplar que podia produzir 1 milhão de volts. Nos aceleradores de partículas, usados em universidades e institutos de pesquisa nuclear, o potencial produzido é da ordem de 10 milhões de volts.



Robert J. van de Graaff.



Moderno gerador eletrostático do tipo Van de Graaff, que pode produzir milhões de volts. Museu de Ciências de Boston, EUA. Junho de 2012.



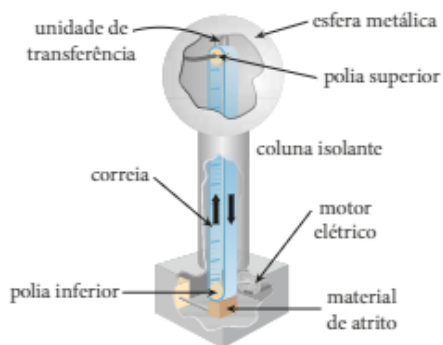
Um dos primeiros modelos de gerador eletrostático construídos por Van de Graaff no MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts). New Bedford, Massachusetts, EUA. Novembro de 1935. New Bedford, Massachusetts, EUA. Novembro de 1935.

Geradores de Van de Graaff de grande porte podem produzir diferenças de potencial da ordem de milhões de volts. Em pesquisas na área da Física, eles são utilizados em especial para acelerar partículas eletrizadas, elevando consideravelmente sua energia. Após o processo de aceleração, essas partículas são aproveitadas em várias experiências de bombardeamento de átomos, e os resultados obtidos são usados pelos físicos para desvendar os mistérios da Física Nuclear.

Modelos simplificados do gerador de Van de Graaff são muito utilizados nos laboratórios das escolas de Ensino Médio.

Basicamente, eles possuem uma esfera metálica condutora oca com suportes isolantes. Uma correia de material isolante, borracha, por exemplo, é movimentada por um pequeno motor entre duas polias: uma colocada no interior da esfera condutora e outra, na base do aparelho. A correia é eletrizada por atrito na parte inferior do aparelho. Quando a correia eletrizada atinge a polia superior, um pente metálico de pontas bem finas retira as cargas elétricas obtidas na eletrização e faz a transferência para a superfície externa da esfera.

Quando em funcionamento, a aproximação do dedo de uma pessoa pode provocar descargas elétricas entre o condutor esférico e o dedo, já que existe uma diferença de potencial entre eles.



Representação esquemática de um gerador eletrostático de Van de Graaff. A correia, que é acionada em alta velocidade por um motor, fica eletrizada ao ser atritada no material existente na base do aparelho.



Estudante toca na cúpula de um gerador de Van de Graaff, usado em laboratórios escolares. Por causa do potencial da esfera metálica, a jovem é eletrizada e os fios de seus cabelos se repelem, procurando o máximo distanciamento.

## QUESTÕES COMENTADAS



**1** Uma região isolada da ação de cargas elétricas recebe uma partícula eletrizada com carga de  $-2,0$  nC. Considere um ponto A, a  $20$  cm dessa partícula. Calcule:

- o potencial elétrico em A;
- a energia potencial adquirida por uma carga puntiforme de  $+3,0$   $\mu\text{C}$ , colocada em A.

**Dado:** constante eletrostática do meio =  $9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2 \text{ C}^{-2}$ .

### RESOLUÇÃO

- a) No ponto A, o potencial é dado por:

$$v_A = K \frac{Q}{d_A}$$

Substituindo os valores fornecidos, temos:

$$v_A = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{(-2,0 \cdot 10^{-9})}{0,20}$$

$$v_A = -90 \text{ V}$$

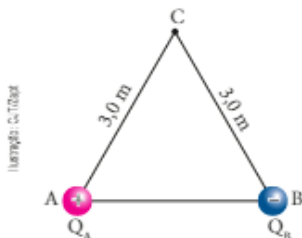
- b) A energia potencial adquirida pela carga colocada em A é dada por:

$$E_{p_A} = q \cdot v_A = 3,0 \cdot 10^{-6} \cdot (-90)$$

$$E_{p_A} = -2,7 \cdot 10^{-4} \text{ J}$$

**Respostas:** a)  $-90$  V; b)  $-2,7 \cdot 10^{-4}$  J

**2** Na figura, tem-se um triângulo equilátero de lados iguais a  $3,0$  m. Nos vértices A e B foram fixadas as cargas elétricas de  $+5,0$   $\mu\text{C}$  e  $-5,0$   $\mu\text{C}$ , respectivamente:



Determine:

- a intensidade do campo elétrico resultante no vértice C;
- o valor do potencial resultante em C.

**Dado:** constante eletrostática do meio =  $9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2 \text{ C}^{-2}$ .

### RESOLUÇÃO

- a) Vamos calcular, inicialmente, os módulos dos vetores campo elétrico  $\vec{E}_A$  e  $\vec{E}_B$  criados em C, por meio da relação:

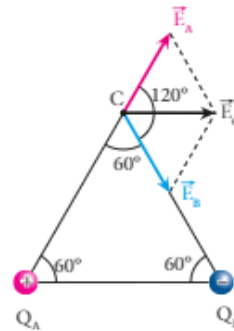
$$E = K \frac{|Q|}{d^2}$$

Da observação dos dados, tem-se que  $E_A = E_B$ .

$$\text{Assim: } E_A = E_B = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{5,0 \cdot 10^{-6}}{(3,0)^2}$$

$$E_A = E_B = 5,0 \cdot 10^3 \text{ N/C}$$

Vamos, agora, representar os vetores  $\vec{E}_A$  e  $\vec{E}_B$ :



Para calcular o módulo de  $\vec{E}_C$  deve-se aplicar a Lei dos Cossenos:

$$(E_C)^2 = (E_A)^2 + (E_B)^2 + 2E_A E_B \cdot \cos 120^\circ$$

Já que  $E_A = E_B = E$ , temos:

$$(E_C)^2 = E^2 + E^2 + 2E^2 \left(-\frac{1}{2}\right)$$

$$(E_C)^2 = E^2 \Rightarrow E_C = 5,0 \cdot 10^3 \text{ N/C}$$

- b) O cálculo do potencial em C é bem mais simples, pois o potencial é uma grandeza escalar. Assim, podem-se calcular os potenciais  $v_A$  e  $v_B$  criados em C usando a relação:

$$v = K \frac{Q}{d}$$

Desse modo, temos:

$$v_A = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{(+5,0 \cdot 10^{-6})}{3,0}$$

$$v_A = +1,5 \cdot 10^4 \text{ V}$$

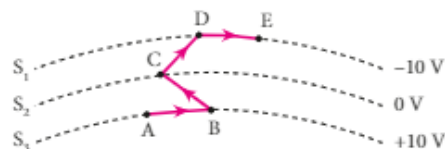
$$v_B = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{(-5,0 \cdot 10^{-6})}{3,0}$$

$$v_B = -1,5 \cdot 10^4 \text{ V}$$

Como  $v_C = v_A + v_B$ , obtemos:  $v_C = 0$

**Respostas:** a)  $5,0 \cdot 10^3$  N/C; b) zero

- 3** Considere as superfícies equipotenciais abaixo,  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$ , com seus respectivos potenciais elétricos indicados, e determine o trabalho realizado pela força elétrica que atua em uma carga de  $2$  C quando ela se desloca do ponto A ao ponto E, percorrendo a trajetória indicada:



**RESOLUÇÃO**

O trabalho realizado pela força elétrica não depende da trajetória percorrida pela carga elétrica, e sim do valor dessa carga e da diferença de potencial (ddp) entre os pontos de saída e chegada.

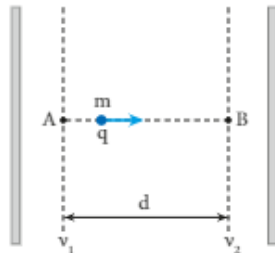
$$\tau_{AE} = q(v_A - v_E)$$

Substituindo os valores, temos:

$$\tau_{AE} = 2 [10 - (-10)] \Rightarrow \tau_{AE} = 40 \text{ J}$$

**Resposta:** 40 J

**4** Entre duas placas condutoras eletrizadas com cargas elétricas que diferem apenas no sinal existe uma região do espaço onde encontramos um campo elétrico uniforme (CEU). Os efeitos do campo gravitacional podem ser desprezados.



Se abandonarmos do repouso uma partícula de massa  $m$  e carga elétrica  $q$  a partir do ponto  $A$  da superfície equipotencial  $v_1$ , com que velocidade ela atinge o ponto  $B$  na equipotencial  $v_2$ ? Observe que a distância entre  $v_1$  e  $v_2$  é  $d$ .

**RESOLUÇÃO**

O trabalho da força elétrica é determinado pela expressão:

$$\tau_{AB} = q(v_1 - v_2)$$

Mas o teorema da energia cinética (TEC) garante que:

$$\tau_{AB} = \frac{m(v_B)^2}{2} - \frac{m(v_A)^2}{2}$$

Como a partícula parte do repouso, temos  $v_A = 0$ .

$$\text{Assim: } q(v_1 - v_2) = \frac{m(v_B)^2}{2}$$

$$v_B = \sqrt{\frac{2q(v_1 - v_2)}{m}}$$

**Resposta:**  $v_B = \sqrt{\frac{2q(v_1 - v_2)}{m}}$

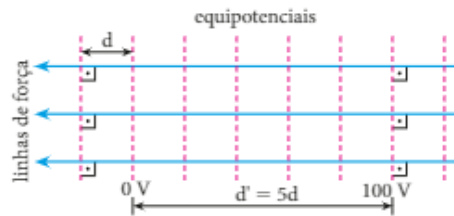
**5** Na figura a seguir, estão representadas as superfícies equipotenciais, planas, paralelas e separadas pela distância  $d = 2 \text{ cm}$ , referentes a um campo elétrico uniforme:



Determine a intensidade, a direção e o sentido do referido campo elétrico.

**RESOLUÇÃO**

As linhas de força de um campo elétrico têm sempre direção perpendicular às equipotenciais e sentido que vai do maior para o menor potencial. Assim, a representação esquemática do referido campo elétrico pode ser:



A intensidade desse campo elétrico uniforme pode ser calculada por:

$$E d' = U \Rightarrow E = \frac{U}{d'} = \frac{U}{5d}$$

Como  $d = 2 \text{ cm} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ , temos:

$$E = \frac{100 \text{ V}}{5 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}} \Rightarrow E = 1,0 \cdot 10^3 \text{ V/m}$$

**Resposta:**  $1,0 \cdot 10^3 \text{ V/m}$ ; ver desenho acima.

**6** Nesta questão, vamos analisar algumas particularidades a respeito do **potencial elétrico** produzido por cargas existentes em condutores em **equilíbrio eletrostático**.

Observe as figuras para saber se mostram situações verdadeiras ou falsas. Dê como resposta a soma dos números associados às situações verdadeiras.

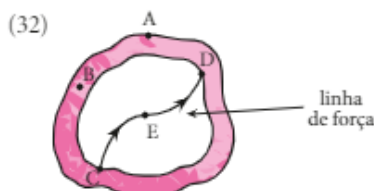
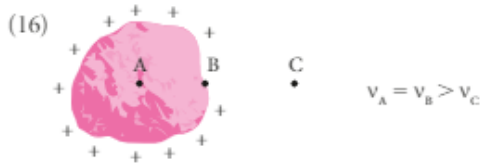
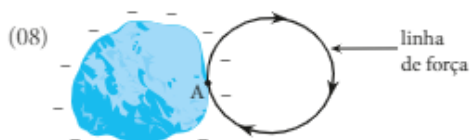
(01) linha de força

(02)  $v_B = v_C = 0$   
 $v_A > v_B = v_C$

(03)  $v_B = v_C = 0$   
 $v_A > v_B = v_C$

(04)

Ilustrações: C. F. Zast



**RESOLUÇÃO**

- (01) **Falsa.**  
Uma linha de força não pode partir de um ponto do condutor e retornar ao mesmo condutor. De fato, como o potencial decresce no sentido da linha de força, teríamos  $v_A > v_B$ , o que não é verdade, pois os potenciais são iguais em todos os pontos do condutor.
- (02) **Falsa.**  
O potencial é igual e positivo em todos os pontos do condutor:  $v_A = v_B = v_C$ .
- (04) **Verdadeira.**  
A superfície externa de um condutor é uma superfície equipotencial. Por isso, as linhas de força e os vetores campo elétrico  $\vec{E}$  são perpendiculares a ela.
- (08) **Falsa.**  
Em nenhuma situação uma linha de força pode ser fechada, pois o potencial decresce no sentido dela.
- (16) **Verdadeira.**  
Em A e B, os potenciais são iguais. Quando nos afastamos do condutor (ponto C), o potencial diminui, já que a carga dele é positiva. Se fosse negativa, o potencial aumentaria.
- (32) **Falsa.**  
Em uma região onde o campo elétrico é nulo ( $\vec{E} = \vec{0}$ ), o potencial elétrico é igual em todos os pontos. Por isso, na cavidade de um condutor oco eletrizado não pode haver linhas de força, pois o potencial elétrico é igual tanto onde existe o material condutor como na região oca:  $v_C = v_E = v_D$ .

**Resposta:** (04 + 16) = 20

**7** Uma esfera condutora de 30 cm de raio é eletrizada com uma carga de  $8,0 \mu\text{C}$ . Supondo atingido o equilíbrio eletrostático, determine:  
 a) o potencial da esfera;  
 b) o potencial de um ponto externo localizado a 60 cm da superfície da esfera.  
**Dado:** constante eletrostática do meio:  $K_0 = 9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$ .

**RESOLUÇÃO**

a) O potencial da esfera condutora é calculado pela relação:

$$v_c = K \frac{Q}{r}$$

$$\text{Assim: } v_c = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{8,0 \cdot 10^{-6}}{0,30}$$

$$v_c = 2,4 \cdot 10^5 \text{ V}$$

b) Para pontos externos à esfera, a expressão do potencial passa a ser:  $v_{\text{ext}} = K \frac{Q}{d}$ , em que  $d$  é a distância do ponto considerado ao centro da esfera.

Nesse caso, temos:

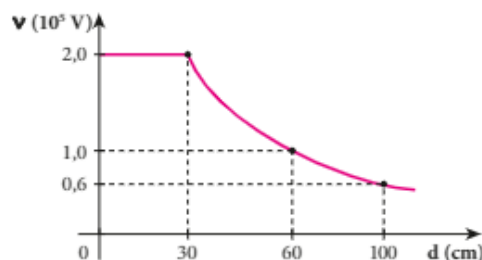
$$d = 60 \text{ cm} + 30 \text{ cm} \Rightarrow d = 0,90 \text{ m}$$

$$\text{Assim: } v_{\text{ext}} = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{8,0 \cdot 10^{-6}}{0,90}$$

$$v_{\text{ext}} = 8,0 \cdot 10^4 \text{ V}$$

**Respostas:** 2,4 · 10<sup>5</sup> V; b) 8,0 · 10<sup>4</sup> V

**8** O gráfico a seguir representa o potencial criado por uma esfera condutora eletrizada em função da distância ao seu centro:



Considerando a constante eletrostática do meio igual a  $1,0 \cdot 10^{10} \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$ , determine:

- a) o raio da esfera;
- b) a carga elétrica existente na esfera.

**RESOLUÇÃO**

a) O raio da esfera é lido diretamente no gráfico:

$$r = 30 \text{ cm}$$

Observe que o potencial começa a variar apenas em pontos externos à esfera.

b) Da expressão do potencial da esfera,

$$v_c = K \frac{Q}{r}, \text{ tem-se: } Q = \frac{v_c r}{K}$$

Assim, do gráfico, obtemos:

$$Q = \frac{2,0 \cdot 10^5 \cdot 0,30}{1,0 \cdot 10^{10}} \Rightarrow Q = 6,0 \mu\text{C}$$

**Respostas:** a) 30 cm; b) 6,0 μC

**9** Uma esfera condutora neutra de 7,2 cm de raio encontra-se no vácuo, onde a constante eletrostática vale  $9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$ . Determine:

- a) a capacitância da esfera;
- b) o potencial atingido pela esfera quando recebe uma carga igual a 1,6 μC.

**RESOLUÇÃO**

- a) A capacitância de um condutor esférico pode ser calculada pela relação:

$$C = \frac{r}{K}$$

Sendo  $r = 7,2 \text{ cm} = 7,2 \cdot 10^{-2} \text{ m}$  e  $K_0 = 9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2 \text{ C}^{-2}$ , temos:

$$C = \frac{7,2 \cdot 10^{-2}}{9,0 \cdot 10^9} \Rightarrow C = 8,0 \cdot 10^{-12} \text{ F} \Rightarrow C = 8,0 \text{ pF}$$

- b) Para qualquer condutor, vale a expressão:

$$C = \frac{Q}{v} \Rightarrow v = \frac{Q}{C}$$

Sendo  $Q = 1,6 \mu\text{C} = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ C}$  e  $C = 8,0 \cdot 10^{-12} \text{ F}$ , obtemos:

$$v = \frac{1,6 \cdot 10^{-6}}{8,0 \cdot 10^{-12}} \Rightarrow v = 2,0 \cdot 10^5 \text{ volts}$$

**Respostas:** a) 8,0 pF; b)  $2,0 \cdot 10^5$  volts

**10** Qual será a energia potencial eletrostática armazenada em um condutor de capacitância igual a 5,0 nF se ele for eletrizado com uma carga de 6,0  $\mu\text{C}$ ?

**RESOLUÇÃO**

A energia potencial eletrostática armazenada em um condutor eletrizado pode ser calculada pelas expressões:

$$E_p = \frac{Qv}{2} = \frac{C v^2}{2} = \frac{Q^2}{2C}$$

Utilizando os dados fornecidos, temos:

$$E_p = \frac{Q^2}{2C} = \frac{(6,0 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 5,0 \cdot 10^{-9}} \Rightarrow E_p = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ J}$$

**Resposta:**  $3,6 \cdot 10^{-3} \text{ J}$

**11** Dois condutores A e B, de capacitâncias  $C_A = 1,0 \text{ nF}$  e  $C_B = 4,0 \text{ nF}$ , estão eletrizados com cargas  $Q_A = 6,0 \mu\text{C}$  e  $Q_B = 4,0 \mu\text{C}$ . Colocam-se os dois condutores em contato, isolando-os após a separação. Determine:

- o potencial de cada condutor antes do contato;
- o potencial comum após o contato;
- as cargas existentes em cada condutor após o contato.

**RESOLUÇÃO**

- a) Usando a definição de capacitância, temos:

$$C = \frac{Q}{v} \Rightarrow v = \frac{Q}{C}$$

Para o condutor A:

$$v_A = \frac{Q_A}{C_A} = \frac{6,0 \cdot 10^{-6} \text{ C}}{1,0 \cdot 10^{-9} \text{ F}}$$

$$v_A = 6,0 \cdot 10^3 \text{ V}$$

Para o condutor B:

$$v_B = \frac{Q_B}{C_B} = \frac{4,0 \cdot 10^{-6}}{4,0 \cdot 10^{-9}}$$

$$v_B = 1,0 \cdot 10^3 \text{ V}$$

- b) O potencial comum de equilíbrio eletrostático é dado por:

$$v = \frac{Q_A + Q_B}{C_A + C_B}$$

Assim, temos:

$$v = \frac{6,0 \cdot 10^{-6} + 4,0 \cdot 10^{-6}}{1,0 \cdot 10^{-9} + 4,0 \cdot 10^{-9}} = \frac{10 \cdot 10^{-6}}{5,0 \cdot 10^{-9}}$$

$$v = 2,0 \cdot 10^3 \text{ V}$$

- c) A carga existente nos condutores A e B, após o contato, é calculada por:

$$C = \frac{Q}{v} \Rightarrow Q = C v$$

Assim, para o condutor A,  $Q'_A = C_A v$

$$Q'_A = 1,0 \cdot 10^{-9} \cdot 2,0 \cdot 10^3$$

$$Q'_A = 2,0 \mu\text{C}$$

Para o condutor B, pode-se aplicar o **Princípio da Conservação das Cargas Elétricas**:

$$Q_A + Q_B = Q'_A + Q'_B$$

$$6,0 \mu\text{C} + 4,0 \mu\text{C} = 2,0 \mu\text{C} + Q'_B \Rightarrow Q'_B = 8,0 \mu\text{C}$$

**Respostas:** a)  $6,0 \cdot 10^3 \text{ V}$ ;  $1,0 \cdot 10^3 \text{ V}$ ; b)  $2,0 \cdot 10^3 \text{ V}$ ;  
c)  $2,0 \mu\text{C}$ ;  $8,0 \mu\text{C}$

**QUESTÕES PROPOSTAS**

FAÇA NO CADERNO.

**12.** Examine as afirmativas a seguir:

- Se  $F$  é a intensidade da força eletrostática que atua sobre uma carga  $q$  colocada em certo ponto, o produto  $Fq$  representa a intensidade do campo elétrico nesse ponto.
- O vetor campo elétrico em um ponto tem sempre a mesma direção e o mesmo sentido da força que atua sobre uma carga positiva colocada nesse ponto.
- O potencial elétrico é uma grandeza vetorial, cuja intensidade obedece à lei do inverso do quadrado das distâncias.

**IV.** O potencial elétrico é uma grandeza escalar e corresponde à energia potencial elétrica adquirida por unidade de carga colocada em um ponto de um campo elétrico.

Para a resposta, use o código a seguir:

- Se somente **I** e **II** estiverem corretas.
- Se somente **II** e **IV** estiverem corretas.
- Se somente **I** e **III** estiverem corretas.
- Se todas estiverem corretas.
- Se todas estiverem incorretas.



13. Em um meio de constante eletrostática igual a  $9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$ , encontra-se uma partícula solitária eletrizada com carga de  $+5,0 \mu\text{C}$ . Qual é o valor do potencial elétrico em um ponto P situado a  $3,0 \text{ m}$  dessa partícula?

14. Em um ponto A distante  $45 \text{ cm}$  de uma carga elétrica puntiforme Q, o potencial assume o valor  $5,0 \cdot 10^4 \text{ V}$ . Sabendo que o meio que envolve a carga é o vácuo, determine o valor de Q.

Dado: constante eletrostática do vácuo:  $K_0 = 9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$ .

15. Um estudante do último ano do Ensino Médio está resolvendo uma prova de Física. No texto de uma das questões ele encontra o seguinte enunciado:

"No vácuo ( $K = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ ), uma carga puntiforme Q gera, à distância D, um campo elétrico de intensidade  $360 \text{ N/C}$  e um potencial elétrico de  $180 \text{ V}$ , em relação ao infinito".

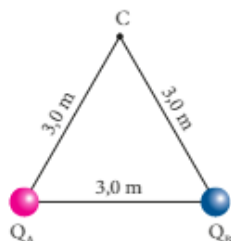
Usando seus conhecimentos de Eletricidade e os dados fornecidos, o aluno determinou o valor da carga elétrica Q. Qual foi esse valor?

16. Em um meio de constante eletrostática igual a  $9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$ , são colocadas duas cargas puntiformes  $Q_A$  e  $Q_B$  distantes  $40 \text{ cm}$  uma da outra. A carga  $Q_A$  é positiva, enquanto a carga  $Q_B$  é negativa. Sabe-se que, no ponto médio de AB, o campo elétrico resultante tem intensidade igual a  $1,8 \cdot 10^3 \text{ N/C}$  e que o potencial elétrico vale  $-90 \text{ V}$ . Determine os valores de  $Q_A$  e  $Q_B$ .

17. Em uma região onde a constante eletrostática vale  $1,0 \cdot 10^{10} \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$ , são fixadas duas partículas eletrizadas positivamente com cargas  $Q_A$  e  $Q_B$ , distantes entre si  $1,0 \text{ m}$ . Uma carga de prova de  $2,0 \mu\text{C}$  é colocada no segmento AB, a  $60 \text{ cm}$  de  $Q_A$ , permanecendo em repouso apesar de adquirir uma energia potencial elétrica igual a  $1,0 \text{ J}$ . Quais são os valores de  $Q_A$  e de  $Q_B$ ?

18. Nos vértices A e B do triângulo equilátero representado a seguir, foram fixadas duas partículas eletrizadas com cargas  $Q_A = +6,0 \mu\text{C}$  e  $Q_B = -4,0 \mu\text{C}$ :

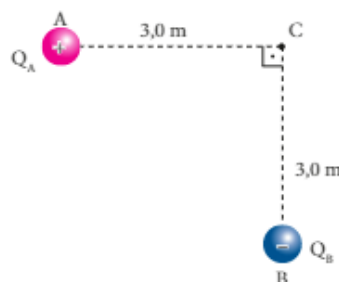
Ilustrações: Luiz Fernando S. Tullio



Considerando a constante eletrostática do meio igual a  $9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$ , determine:

- a energia potencial elétrica armazenada no sistema;
- o potencial elétrico resultante no vértice C;
- a energia potencial adquirida por uma carga de prova  $q = +2,0 \text{ mC}$ , ao ser colocada no vértice C.

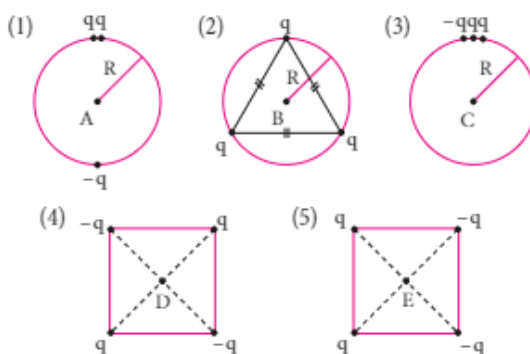
19. No esquema a seguir,  $Q_A = +3,0 \mu\text{C}$  e  $Q_B = -4,0 \mu\text{C}$ . O meio é o vácuo, de constante eletrostática igual a  $9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$ .



Determine:

- a intensidade do campo elétrico em C;
- o valor do potencial elétrico em C.

20. Nas figuras a seguir, as cargas elétricas utilizadas possuem o mesmo módulo e são puntiformes. Quando a carga é negativa, o sinal está indicado.



Levando em conta a posição das cargas em cada situação e considerando os pontos A, B e C centros das circunferências e D e E centros dos quadrados, determine:

- em quais desses pontos o vetor campo elétrico é nulo;
- em quais desses pontos o potencial elétrico é nulo.

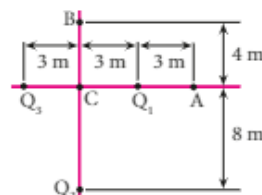
21. Qual é o trabalho realizado pela força elétrica que atua em uma partícula eletrizada com carga de  $+3,0 \mu\text{C}$  quando esta se desloca  $5,0 \text{ m}$  ao longo de uma equipotencial de  $100 \text{ V}$ ? Justifique.

22. A figura ao lado representa uma distribuição discreta de cargas elétricas  $Q_1 = 15 \text{ nC}$ ,  $Q_2 = 60 \text{ nC}$  e  $Q_3 = -45 \text{ nC}$  no vácuo.

Dado:  $K_0 = 9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ .

Responda:

- Qual é a diferença de potencial entre os pontos A e B?
- Qual é o trabalho necessário para levar uma carga elétrica de  $10 \text{ mC}$  do ponto A para o ponto B?



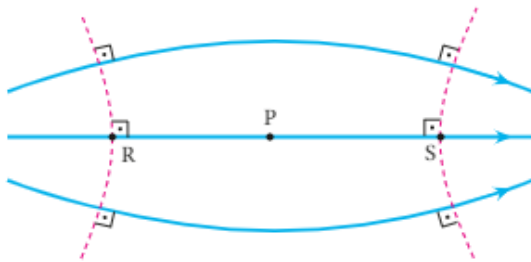
23. Um próton penetra com energia cinética de  $2,4 \cdot 10^{-16}$  J em uma região extensa de campo elétrico uniforme de intensidade  $3,0 \cdot 10^4$  N/C. A trajetória descrita é retilínea, com a partícula invertendo o sentido de movimento após percorrer uma distância  $d$ . Qual é o valor de  $d$ , sabendo-se que o próton se moveu no vácuo?

Dado: carga do próton =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C.

24. Um próton é acelerado no vácuo por uma diferença de potencial de 1 MV. Qual é o aumento da sua energia cinética?

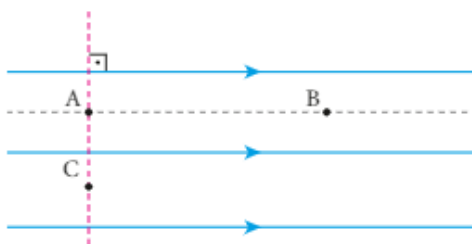
Dado: carga do próton =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C.

25. Determinada região submete-se exclusivamente a um campo elétrico, estando algumas de suas linhas de força representadas por linhas cheias na figura a seguir.



- O que as linhas tracejadas representam?
- O potencial do ponto R é maior que o potencial do ponto S, menor que ele ou igual a ele?
- Se uma carga de prova positiva for abandonada no ponto P, em que sentido ela se moverá? O que ocorrerá com sua energia potencial?
- Repita o item c, empregando, agora, uma carga de prova negativa.

26. Considere uma região do espaço onde existe apenas um campo elétrico uniforme (CEU). Lembrando que a representação de um CEU é feita com linhas de força paralelas e igualmente espaçadas, com equipotenciais perpendiculares a essas linhas de força, podemos representá-las conforme a figura a seguir.



Observe os três pontos A, B e C indicados na figura. É correto afirmar que:

- A e B têm o mesmo potencial elétrico, que é maior que o de C.
- A e B têm o mesmo potencial elétrico, que é menor que o de C.

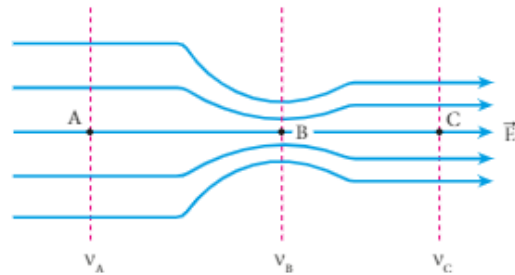
c) A e C têm o mesmo potencial elétrico, que é maior que o de B.

d) os potenciais elétricos dos pontos A, B e C guardam a relação  $v_A < v_B < v_C$ .

e) os potenciais elétricos dos pontos A, B e C guardam a relação  $v_A > v_B > v_C$ .

Este enunciado refere-se às questões 27 e 28.

Ao se mapear uma região do espaço onde existe um campo elétrico produzido por determinada distribuição de carga, encontrou-se o seguinte conjunto de linhas de força:



27. A respeito das intensidades do campo elétrico nos pontos A, B e C, podemos afirmar que:

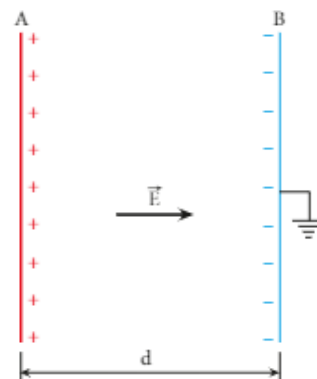
- $E_A = E_B$
- $E_C > E_A$
- $E_A = E_C$
- $E_C > E_B$
- $E_B > E_C$

28. A respeito dos potenciais  $v_A$ ,  $v_B$  e  $v_C$  das equipotenciais que passam pelos pontos A, B e C, podemos afirmar que:

- $v_A = v_B$
- $v_C > v_B$
- $v_C > v_A$
- $v_A > v_C$
- $v_B > v_A$

29. Determine a intensidade de um campo elétrico uniforme sabendo que a diferença de potencial entre duas de suas equipotenciais, separadas por 20 cm, é de 300 V.

30. Entre duas placas condutoras, eletrizadas com cargas de mesmo módulo, mas de sinais opostos, existe um campo elétrico uniforme de intensidade 500 V/m.



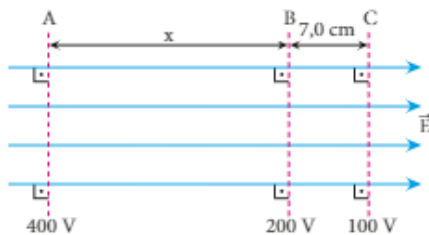
Sabendo que a distância entre as placas A e B vale  $d = 5,0$  cm e que B está ligada à terra, calcule o potencial elétrico da placa A.

**31.** Diversos fatores, como descargas elétricas, podem provocar a quebra de moléculas existentes na atmosfera, fazendo surgir íons que são responsáveis pela existência de um campo elétrico permanente. Em um local, longe de concentrações urbanas, próximo do solo, vamos encontrar um campo elétrico praticamente uniforme, vertical e voltado para baixo, com intensidade próxima de 150 V/m. Uma pessoa em pé, com o braço direito levantado, tem a extremidade do seu dedo a uma distância de 2,10 m do solo.



Qual é o potencial desse ponto imaginário A em relação ao solo?

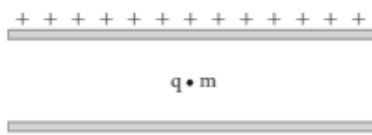
**32.** A figura mostra linhas de força e equipotenciais de um campo elétrico uniforme:



Com os dados fornecidos, determine a distância  $x$  entre as equipotenciais A e B.

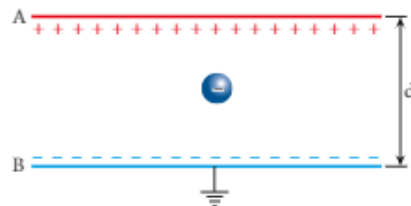
- 33.** Quando duas partículas eletrizadas, que se repelem, são aproximadas, a energia potencial do sistema formado por elas:
- aumenta.
  - diminui.
  - fica constante.
  - diminui e logo depois aumenta.
  - aumenta e logo depois permanece constante.

**34.** Na figura representada a seguir encontramos um sistema de duas placas paralelas, horizontais, eletrizadas com cargas de mesma intensidade e sinais opostos, gerando entre elas um campo elétrico uniforme. A distância entre as placas é de 1,0 cm.



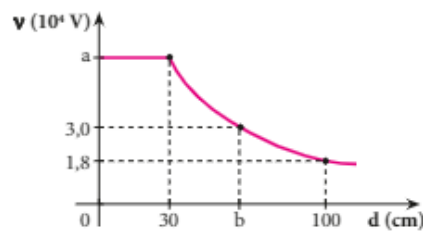
Para determinar a intensidade desse campo elétrico uniforme, uma partícula de massa 1 grama e eletrizada com carga igual a  $-1 \mu\text{C}$  é colocada entre as placas, permanecendo em repouso. Se a aceleração da gravidade no local vale  $10 \text{ m/s}^2$ , determine a intensidade do campo elétrico e a diferença de potencial entre as placas.

**35.** Entre duas placas eletrizadas dispostas horizontalmente existe um campo elétrico uniforme. Uma partícula com carga de  $-3,0 \mu\text{C}$  e massa  $m$  é colocada entre as placas, permanecendo em repouso.

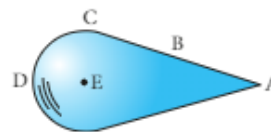


Sabendo que o potencial da placa A é de 500 V, que a placa B está ligada à Terra, que a aceleração da gravidade no local vale  $10 \text{ m/s}^2$  e que a distância  $d$  entre as placas vale 2,0 cm, determine a massa  $m$  da partícula.

**36.** No campo elétrico criado por uma esfera eletrizada com carga  $Q$ , o potencial varia com a distância ao centro dessa esfera, conforme o gráfico a seguir. Sabendo que o meio que envolve a esfera tem constante eletrostática igual a  $9,0 \cdot 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$ , determine os valores de  $a$  e de  $b$ , indicados no gráfico, bem como o da carga  $Q$  da esfera.



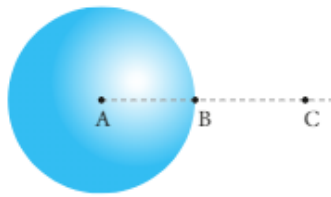
**37.** A figura representa um objeto metálico, eletrizado e em equilíbrio eletrostático, em que se distinguem as regiões A, B, C e D, na superfície, e E, no interior.



Representando os potenciais elétricos das mencionadas regiões, respectivamente, por  $V_A, V_B, V_C, V_D$  e  $V_E$ , é correto afirmar que:

- $V_A > V_D > V_C > V_B > V_E$
- $V_E > V_B > V_C > V_D > V_A$
- $V_E = 0$  e  $V_A = V_B = V_C = V_D \neq 0$
- $V_A = V_B = V_C = V_D = V_E \neq 0$
- $V_E > V_A > V_D$

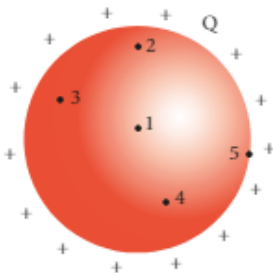
38. Considere um condutor esférico eletrizado negativamente e em equilíbrio eletrostático. Sejam  $v_A, v_B$  e  $v_C$  os potenciais elétricos nos pontos A, B e C indicados na figura a seguir.



Pode-se afirmar que:

- $v_A > v_B > v_C$
- $v_A = v_B < v_C$
- $v_A = v_B = v_C$
- $v_A = v_B > v_C$
- $v_A > v_B = v_C$

39. A figura a seguir representa uma esfera metálica eletrizada com uma carga positiva  $Q$ , em equilíbrio eletrostático.



A respeito da intensidade do campo elétrico  $E$  e do potencial elétrico  $v$  nos pontos indicados, podemos afirmar que:

- $E_1 = E_2 = E_3 = E_4 = E_5 = 0$
- $v_1 = v_2 = v_3 = v_4 = v_5 > 0$
- $E_1 < E_5$  e  $v_1 < v_5$
- $v_1 = v_2 = v_3 = v_4 = v_5 = 0$
- $E_1 = E_2 = E_3 = E_4 = 0$
- $E_5 > 0$

Dê como resposta a soma dos números associados às afirmações corretas.

40. Que carga elétrica deve possuir uma esfera condutora de 60 cm de raio para que, no vácuo, adquira um potencial igual a  $-120$  kV?

Dado: constante eletrostática do vácuo  $= 9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$ .

41. Uma esfera condutora em equilíbrio eletrostático possui raio de 20 cm e uma carga elétrica  $Q = +4,0 \mu\text{C}$ . Qual é a intensidade do campo elétrico e qual é o valor do potencial elétrico em um ponto situado a 10 cm do centro da esfera?

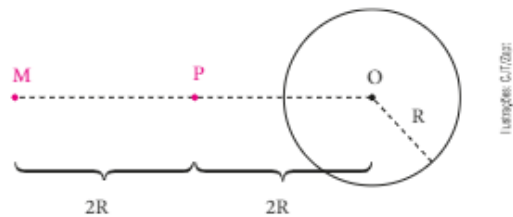
Dado:  $K_0 = 9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$ .

42. Uma esfera metálica oca possui diâmetro de 2,0 m e é eletrizada com carga elétrica positiva de  $8,0 \cdot 10^{-8} \text{ C}$ . O meio que a envolve é o vácuo ( $K = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$ ) e não existem outras cargas elétricas provocando influências nessa região.

Atingido o equilíbrio eletrostático, determine o potencial elétrico:

- da esfera;
- em um ponto distante 12 m do centro da esfera;
- em um ponto situado a 10 cm do centro da esfera.

43. Uma esfera condutora de raio  $R$ , eletrizada com carga igual a  $2\pi R^2 \cdot 10^{-9} \text{ C}$ , gera um campo elétrico à sua volta. O campo tem intensidade  $E$  no ponto P representado na figura.



Responda:

- Sendo a constante eletrostática igual a  $9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ , qual é o potencial eletrostático no ponto P, em volts?
- Aumentando-se a carga da esfera até que ela fique com densidade superficial de carga igual a  $2,0 \cdot 10^{-9} \text{ C/m}^2$ , o campo elétrico gerado no ponto M, também representado, terá qual intensidade?

44. Analise as proposições seguintes:

- A capacitância de um condutor depende do material de que ele é feito.
- Num condutor esférico, a capacitância é tanto maior quanto maior for o seu raio.
- Dois condutores esféricos, um de cobre e outro de alumínio, de mesmo raio e em um mesmo meio, possuem capacitâncias iguais.

Responda de acordo com o código.

- Se todas estiverem corretas.
- Se apenas I estiver correta.
- Se apenas II e III estiverem corretas.
- Se apenas III estiver correta.
- Se todas estiverem incorretas.

45. Um condutor esférico, ao ser eletrizado com uma carga de  $3,0 \mu\text{C}$ , adquire um potencial de 5,0 kV. Determine:

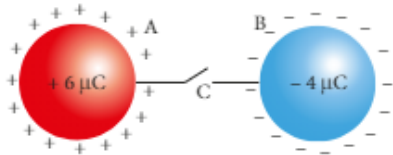
- a capacitância do condutor;
- o seu raio.

Dado: constante eletrostática do meio  $= 9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$ .

46. Se a Terra for considerada um condutor esférico ( $R = 6400 \text{ km}$ ), situado no vácuo, qual será sua capacitância?

Dado:  $K_0 = 9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$ .

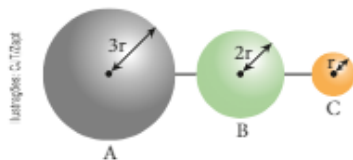
47. Duas esferas condutoras de iguais dimensões, A e B, estão eletricamente carregadas como indica a figura a seguir, sendo unidas por um fio condutor no qual há uma chave C inicialmente aberta.



Sabe-se que em um segundo momento a chave C é fechada. Responda às questões:

- Elétrons passarão de A para B ou de B para A?
- Qual é a nova carga da esfera A?
- Qual é a nova carga da esfera B?
- Após a chave ser fechada, o que se pode dizer a respeito do potencial das esferas A e B?

48. Três esferas condutoras de raios  $3r$ ,  $2r$  e  $r$  encontram-se ligadas por fios condutores:



Antes das ligações, a esfera A tinha carga  $Q$  e as esferas B e C tinham carga nula. No equilíbrio eletrostático do sistema, as superfícies esféricas:

- estão em um mesmo potencial;
  - têm a mesma carga  $\frac{Q}{3}$ ;
  - de maior carga têm maior potencial;
  - têm o mesmo potencial; logo, suas cargas são diferentes.
- Quais dessas quatro afirmações estão corretas?

49. Analise as proposições seguintes:

- Um condutor somente possui energia potencial elétrica quando está eletrizado.

- Dois condutores eletrizados com cargas elétricas iguais possuem iguais quantidades de energia potencial elétrica.
- Dois condutores A e B de capacitâncias  $C_A$  e  $C_B$ , tal que  $C_A = 2C_B$ , eletrizados com cargas  $Q_A$  e  $Q_B$ , tal que  $Q_A = 2Q_B$ , armazenam energias potenciais elétricas  $E_A$  e  $E_B$ , tal que  $E_A = E_B$ .

Responda de acordo com o código:

- Se todas estiverem corretas.
- Se somente I estiver correta.
- Se somente II e III estiverem corretas.
- Se somente II estiver correta.
- Se todas estiverem incorretas.

50. Que carga elétrica deve ser fornecida a um condutor de capacitância igual a  $4,0 \text{ pF}$  para que ele adquira uma energia potencial eletrostática de  $5,0 \cdot 10^5 \text{ J}$ ?

51. Qual é a capacitância de um condutor que, quando eletrizado com uma carga de  $4,0 \text{ μC}$ , adquire  $1,0 \cdot 10^{-3} \text{ J}$  de energia potencial eletrostática?

52. Dois condutores A e B, eletrizados com cargas  $Q_A = 12 \text{ μC}$  e  $Q_B = 9,0 \text{ μC}$ , têm potenciais  $V_A = 300 \text{ V}$  e  $V_B = 450 \text{ V}$ , respectivamente. Faz-se contato entre os condutores, após o qual eles são colocados a uma grande distância um do outro. Determine:

- as capacitâncias dos condutores;
- o potencial comum de equilíbrio eletrostático;
- a carga de cada condutor após o contato.

53. Uma esfera condutora de raio  $r_1 = 5 \text{ cm}$  está eletrizada com uma carga  $Q_1 = 2 \cdot 10^{-9} \text{ C}$ . Uma segunda esfera, de raio  $r_2 = 10 \text{ cm}$ , inicialmente neutra, é colocada em contato com a primeira, sendo afastada em seguida. Determine:

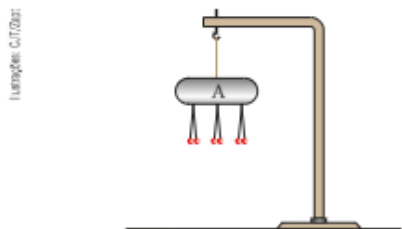
- o potencial elétrico da primeira esfera antes do contato;
- seu novo potencial elétrico após o contato com a segunda esfera.

Dado: constante eletrostática do meio =  $9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$ .

## 14. INDUÇÃO ELETROSTÁTICA

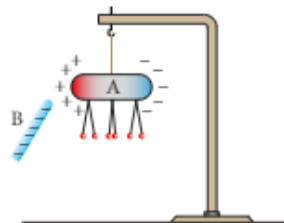
### Apresentação do fenômeno

Considere o condutor A, neutro, representado a seguir.



As bolinhas e os fios que as mantêm presas ao corpo A são condutores. O fio que prende o corpo A ao suporte é isolante.

Agora, aproximamos de A um bastão B, eletrizado com carga negativa, sem que haja contato entre eles.



O condutor **A** passa, então, a apresentar características de eletrização em suas extremidades. É importante observar que, na região central, não existem indícios de eletrização.

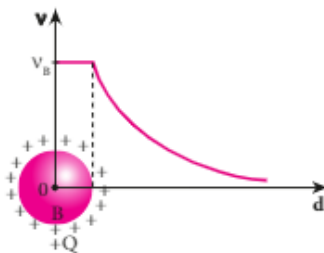
O bastão **B**, cujas cargas criaram o campo elétrico que influenciou a separação de cargas no condutor **A**, recebe o nome de **indutor**. O condutor **A**, que foi influenciado, é denominado **induzido**.

Denomina-se **indução** ou **influência eletrostática** o fenômeno que consiste na separação ou redistribuição de cargas em um corpo provocada por um campo elétrico criado por cargas existentes em outro corpo.

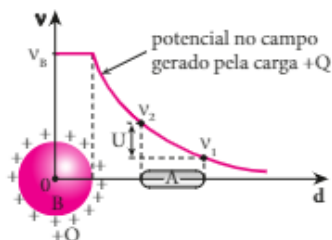
A indução eletrostática em um condutor neutro, como o condutor **A**, provoca o surgimento de cargas de mesmo módulo e de sinais opostos nas extremidades desse condutor. Lembremos que, em um condutor neutro, o número de prótons é igual ao de elétrons. Assim, para cada elétron que surge em uma das extremidades eletrizadas, existe, na outra, um próton que “faz par” com ele.

### Explicação do fenômeno da indução eletrostática

Para melhor entendimento, considere um condutor esférico maciço **B** eletrizado com carga positiva  $+Q$  e o campo elétrico criado em sua volta. A partir do centro desse condutor, o potencial varia com a distância, conforme a ilustração a seguir:



Imagine, agora, um condutor neutro e isolado **A** nas proximidades de **B**:



Note que existe uma diferença de potencial entre as extremidades do condutor **A**, determinada pela carga do condutor **B**. Assim, haverá um movimento de elétrons da direita para a esquerda no condutor **A**, pois os elétrons movimentam-se no sentido de potenciais crescentes.

Conseqüentemente, após um curto intervalo de tempo, a extremidade direita de **A** se apresentará eletrizada positivamente, enquanto a extremidade esquerda ficará eletrizada negativamente.

As cargas positivas da extremidade direita aumentam o potencial nesse local, enquanto os elétrons da esquerda diminuem o potencial nessa extremidade. O equilíbrio ocorre quando não há mais diferença de potencial (ddp) entre as extremidades do condutor **A**.

É importante observar a nova curva do potencial devido aos campos das cargas  $+Q$ ,  $-q$  e  $+q$ .

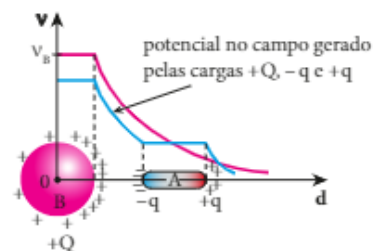
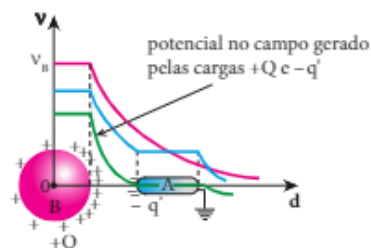


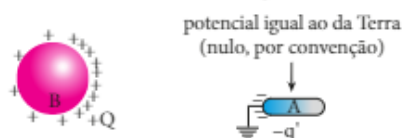
Ilustração: C. T. Zapp

As cargas  $-q$  e  $+q$  que aparecem no induzido **A** são iguais em módulo, pois esse condutor continua neutro.

Ligando-se o induzido à Terra – cujo potencial é nulo, por convenção –, sobem elétrons para o condutor **A**, motivados pelo fato de o potencial desse condutor ser maior que o da Terra. À medida que esses elétrons da Terra vão subindo, o potencial do condutor **A** vai diminuindo, até anular-se. Temos, no final, uma carga total negativa  $-q'$  em **A**.

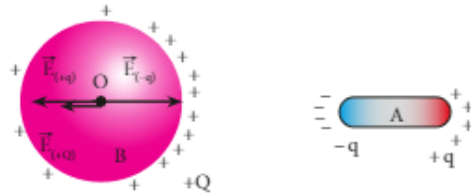


A ligação do induzido à terra pode ser feita em **qualquer** um de seus pontos, pois o que determina a subida dos elétrons **não é o ponto de ligação**, e sim o fato de o potencial do condutor ser maior que o da Terra.



Se o indutor estivesse eletrizado com carga negativa, o procedimento seria análogo ao desenvolvido.

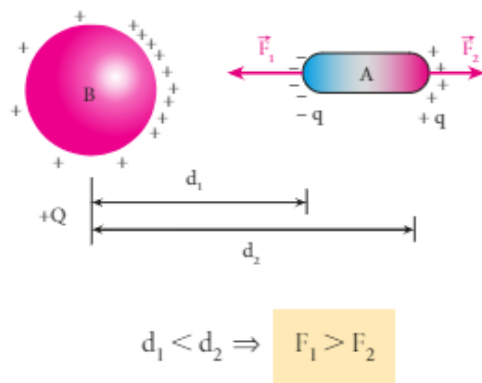
Observe que o processo de indução eletrostática é mútuo, sendo a carga existente em **B** redistribuída devido à influência das cargas induzidas no condutor **A**. Essa redistribuição visa manter o campo elétrico nulo em seu interior.



No centro da esfera **B**, por exemplo, temos os campos elétricos criados pelas cargas  $+q$  e  $-q$ , induzidas no condutor **A**. Sendo  $|+q| = |-q|$ , porém com  $-q$  mais próxima do ponto **O**, centro da esfera **B**, tem-se  $E_{(-q)} > E_{(+q)}$ . Isso justifica uma concentração maior de cargas na face direita de **B**, para que exista um campo  $\vec{E}_{(+Q)}$ , agora não nulo, tal que:

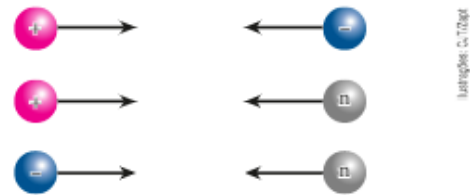
$$\vec{E}_{(+Q)} + \vec{E}_{(-q)} + \vec{E}_{(+q)} = \vec{0}$$

Em virtude da indução eletrostática, induzido e indutor se atraem, mesmo antes da citada ligação à Terra. Isso ocorre porque a intensidade da força  $\vec{F}_1$  que a carga indutora **Q** exerce sobre a carga  $-q$  é maior que a intensidade da força  $\vec{F}_2$ , de repulsão sobre  $+q$ , pois a carga induzida  $-q$  encontra-se mais próxima de **Q**.



Como já vimos, para haver atração eletrostática entre dois corpos, **não é necessário estarem ambos eletrizados** com cargas de sinais opostos. Basta que apenas um deles esteja eletrizado, podendo o outro estar neutro.

Então, as possíveis atrações eletrostáticas entre dois corpos são:



Se o induzido é de material isolante, o processo de indução continua ocorrendo, mas de maneira um pouco diferente.

No isolante, o indutor não provoca a efetiva separação das cargas, mas apenas um deslocamento da eletrosfera de cada átomo em relação ao núcleo. Isso polariza o isolante, de modo que a atração continua ocorrendo.



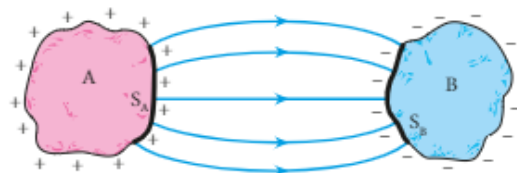
$$F_1 > F_2$$

Mais detalhes sobre polarização de isolantes serão vistos no Capítulo 7 da unidade **Eletrodinâmica**.

### Elementos correspondentes

Considere dois condutores **A** e **B**, eletrizados com cargas de sinais opostos. Imagine uma superfície  $S_A$ , de **A**, tal que o tubo de força determinado pelo contorno das linhas de força intersecte, sobre **B**, uma superfície  $S_B$ .

As superfícies  $S_A$  e  $S_B$ , interligadas pelo mesmo tubo de força, são denominadas **elementos correspondentes**. Nessas superfícies, as cargas existentes são iguais em módulo.



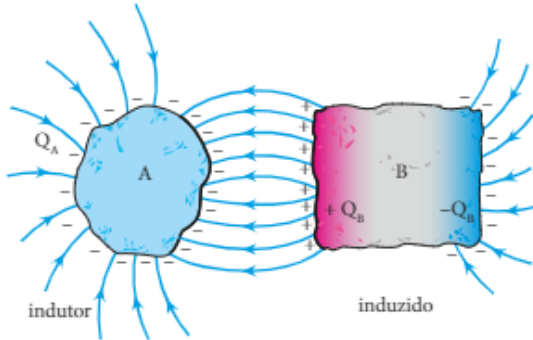
As cargas elétricas encontradas em elementos correspondentes são iguais em módulo, mas de sinais opostos.

## Tipos de indução eletrostática

Apesar de ocorrer indução também entre condutores eletrizados, costuma-se dar mais ênfase ao caso em que um deles está neutro, estando apenas o outro eletrizado. Quando isso ocorre, temos duas situações a considerar: **indução parcial** e **indução total**.

### Indução parcial

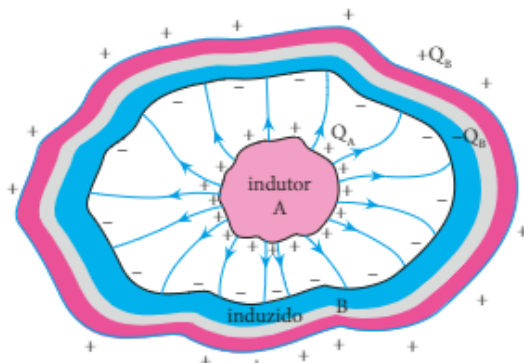
A indução eletrostática é dita **parcial** quando o módulo da carga indutora é maior que o módulo da carga induzida.



$$|Q_A| > |Q_B|$$

### Indução total

A indução **total** ocorre somente quando todas as linhas de força que "nascem" no indutor terminam no induzido ou vice-versa. Normalmente, isso ocorre quando o indutor é totalmente envolvido pelo induzido.



$$|Q_A| = |-Q_B| = |+Q_B|$$

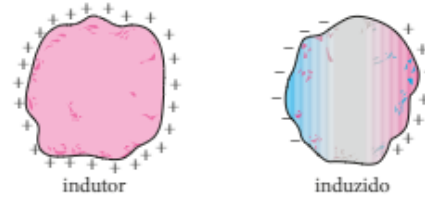
## Eletrização por indução

Como vimos no Capítulo I, o processo de eletrização por indução é realizado em três etapas:

### 1ª etapa:

Aproxima-se do condutor neutro que se quer eletrizar (induzido) um outro corpo eletrizado (indutor).

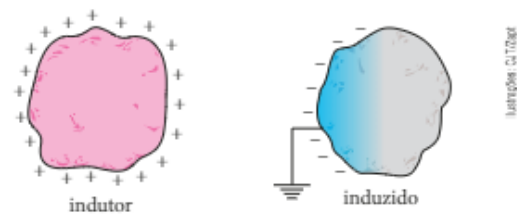
O sinal da carga do indutor deve ser oposto ao da carga que se deseja obter no induzido.



### 2ª etapa:

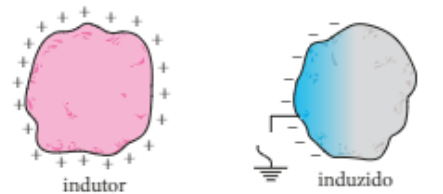
Liga-se o induzido à terra ou a outro condutor neutro. A ligação pode ser feita em qualquer ponto do induzido.

Com a ligação, aparecerão no induzido cargas de sinal contrário ao da carga do indutor.

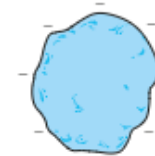


### 3ª etapa:

Na presença do indutor, desliga-se o induzido da terra.



Levando o indutor para longe do induzido, já eletrizado, as cargas deste se distribuem pela sua superfície externa.



Se na 2ª etapa o induzido fosse ligado a outro condutor neutro, e não à terra, teríamos dois condutores eletrizados com cargas de igual módulo, porém de sinais opostos.



$$|+Q| > |-Q'| = |+Q'|$$



## FAÇA VOCÊ MESMO

### Observando o fenômeno da indução eletrostática

A realização deste experimento bastante simples pode nos proporcionar uma boa ideia prática da indução eletrostática. Os materiais utilizados são fáceis de serem obtidos e a realização não envolve cuidados maiores.

#### Material necessário

- 1 lata (alumínio) de refrigerante vazia;
- 1 pedaço de barbante de 50 cm, aproximadamente;
- 1 balão de borracha (bexiga) de tamanho médio;
- 1 camiseta de algodão.

#### Procedimento

I. Sopre o balão para enchê-lo de ar. Sua abertura deve ser fechada para que não escape o gás existente em seu interior. Coloque a lata de alumínio sobre uma mesa horizontal, de modo que o recipiente não role pela superfície.



II. Atrite o balão de borracha na camiseta. Em seguida, aproxime o balão de borracha (eletrizado) da lata, sem tocá-la. Ela irá rolar indo de encontro ao balão. Ao perceber o início do movimento, afaste lentamente o balão.



III. Usando o barbante, pendure a latinha de modo que ela fique parada na vertical. Amarre o barbante na alça que foi usada para a abertura do recipiente. Ao aproximar o balão de borracha, já eletrizado, sem tocar na lata, esta será atraída, aproximando-se do balão.



Fotos: Fernando Novaes/CC-BY-Imagem

#### Analisando o experimento

1. Ao atritar o balão de borracha (bexiga) com o algodão da camiseta, o que ocorre, em termos de eletrização?
2. Se a lata de alumínio encontrava-se neutra, como você explica ela ser atraída pelo balão de borracha eletrizado?
3. O que ocorre com a lata de alumínio se você encostar nela o balão eletrizado?
4. Pode um condutor em estado neutro ser atraído por outro condutor eletrizado? Pode também ocorrer repulsão entre os condutores citados?

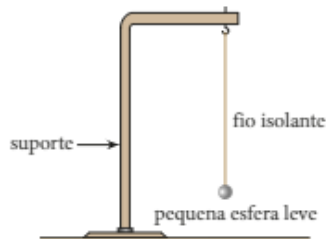
## Eletroscópio

Para saber se determinado corpo está ou não eletrizado, sem alterar sua possível carga, podemos usar um aparelho denominado **eletroscópio**.

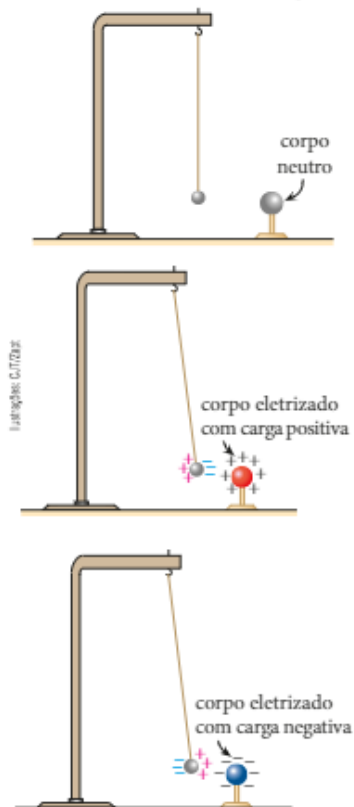
Existem vários tipos de eletroscópio, porém os mais usados são o **pêndulo eletrostático** e o **eletroscópio de folhas**.

### Pêndulo eletrostático

O pêndulo eletrostático é constituído de uma pequena esfera de material leve, como cortiça ou isopor, suspensa por um fio leve, flexível e isolante. Essa esfera costuma ser envolvida por uma folha fina de alumínio. O ideal seria usar uma folha fina de ouro.



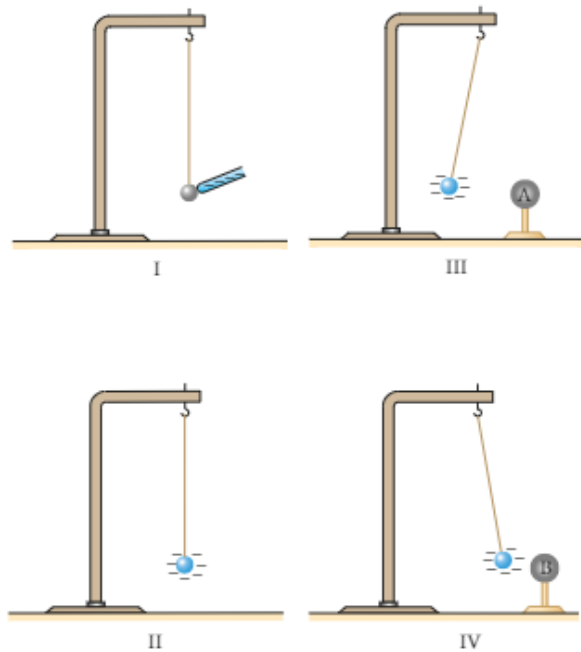
Estando inicialmente neutra, essa pequena esfera não interage eletricamente com um corpo neutro, mas será atraída por indução se aproximarmos dela um corpo eletrizado, como mostrado a seguir.



Esse simples procedimento é capaz de detectar a existência ou não de carga no corpo, mas ainda não é capaz de especificar o sinal dessa carga.

Suponhamos que tenha sido constatado, por meio do método descrito, que determinado corpo está eletrizado. Queremos, agora, identificar o sinal de sua carga. Para tanto, tomemos outro corpo, eletrizado com carga de sinal conhecido, e o encostemos na esfera do pêndulo a fim de eletrizá-la com carga de mesmo sinal desse corpo.

Assim, se houver atração quando aproximarmos da esfera pendular um corpo eletrizado qualquer, é porque o sinal de sua carga é oposto ao da esfera. Já a ocorrência de repulsão indicará que o sinal da carga do corpo é igual ao da carga da esfera.

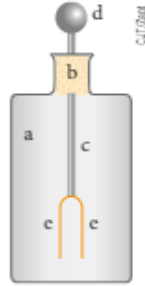


A sequência mostra o procedimento do uso do pêndulo eletrostático para se descobrir o sinal da carga elétrica de um corpo eletrizado.

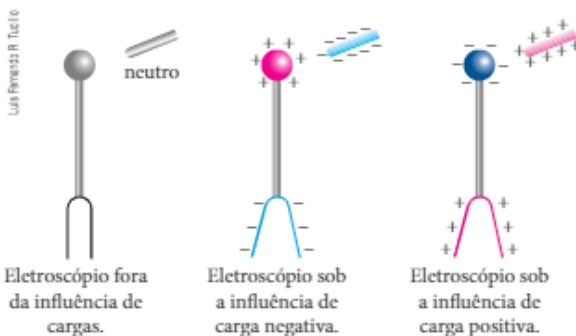
- I. Eletriza-se a esfera do pêndulo com carga de sinal conhecido. No exemplo, foi usada carga negativa.
- II. A esfera do pêndulo já está eletrizada.
- III. Se a esfera é repelida quando aproximamos dela um corpo eletrizado, podemos concluir que esse corpo está eletrizado com carga de sinal igual ao da esfera. Na figura III, o corpo A possui carga elétrica negativa.
- IV. Se a esfera é atraída quando aproximamos dela um corpo eletrizado, podemos concluir que esse corpo está eletrizado com carga de sinal oposto ao da esfera. Na figura IV, o corpo B possui carga elétrica positiva.

## Eletroscópio de folhas

Esse dispositivo consiste em um recipiente transparente (vidro ou plástico), que permita ver seu interior (a), e provido de uma abertura na qual é fixado um tampão de material isolante (b) (borracha ou cortiça). No centro do tampão, existe um orifício pelo qual passa uma haste metálica (c). Na extremidade externa dessa haste, é fixada uma esfera condutora (d) e, na interna, são suspensas, lado a lado, duas folhas metálicas (e) extremamente finas. Essas folhas devem ser, de preferência, de ouro, pois com esse material pode-se obter lâminas de até  $10^{-3}$  mm de espessura. Na falta de ouro, entretanto, pode-se usar alumínio.

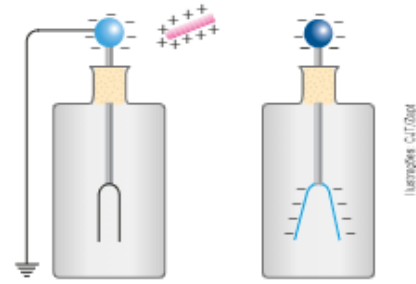


Para verificar se um corpo está ou não eletrizado, basta aproximá-lo da esfera do eletroscópio sem que haja contato entre eles. Se o corpo estiver neutro, nada ocorrerá no eletroscópio, mas, se estiver eletrizado, a esfera ficará, por indução, carregada com carga de sinal oposto ao da carga desse corpo. As lâminas localizadas na outra extremidade, por sua vez, se eletrizarão com cargas de mesmo sinal que a do corpo. Isso provocará repulsão entre elas, fazendo com que se afastem uma da outra.



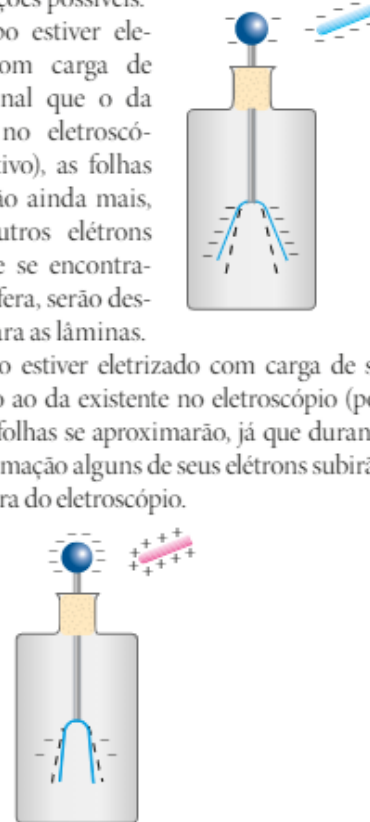
Note que, por meio do processo descrito, sabemos apenas se o corpo está ou não eletrizado, mas não identificaremos o sinal de sua carga. Para essa identificação, deveremos ligar a esfera do eletroscópio à terra e aproximar, dessa esfera, um corpo com carga de sinal conhecido. Devido à ligação com a terra, a esfera fica eletrizada com carga de sinal oposto ao da carga do corpo. Em seguida, desligamos a esfera da terra e afastamos o corpo.

Sabemos, agora, que o eletroscópio está eletrizado com carga de sinal conhecido, que, no caso do exemplo ilustrado a seguir, é **negativo**.



Quando aproximamos da esfera do eletroscópio um corpo eletrizado com carga de sinal desconhecido, temos duas situações possíveis:

- 1ª) Se o corpo estiver eletrizado com carga de mesmo sinal que o da existente no eletroscópio (negativo), as folhas se afastarão ainda mais, já que outros elétrons livres, que se encontravam na esfera, serão deslocados para as lâminas.
- 2ª) Se o corpo estiver eletrizado com carga de sinal oposto ao da existente no eletroscópio (positivo), as folhas se aproximarão, já que durante sua aproximação alguns de seus elétrons subirão para a esfera do eletroscópio.



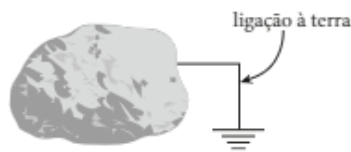
## 15. O POTENCIAL DA TERRA

A atmosfera terrestre é permanentemente ionizada por raios cósmicos, radiações ultravioleta, chamas de fogos e materiais radioativos existentes na crosta. Isso faz que nela predominem as cargas positivas, num valor estimado em  $+6 \cdot 10^5$  C, e que na superfície terrestre haja uma distribuição de cargas negativas de igual valor absoluto.

Essas duas distribuições de carga – a da crosta e a da atmosfera – determinam, num ponto da terra, um potencial que, a rigor, é negativo. Como, no entanto, esse potencial é utilizado como referência, atribui-se a ele o

valor zero. Portanto, o potencial de um corpo em relação à terra é a diferença de potencial (ddp) entre ele e a terra.

A seguir, temos a representação simbólica de um corpo ligado à terra:



Por convenção:  $V_{\text{terra}} = 0$

O aterramento da caixa de entrada de energia elétrica é feito para evitar que pessoas tomem choques elétricos, caso uma das fases entre em contato com a caixa. O fio-terra passa por dentro do cano plástico A que o protege. Uma das pontas desse fio está ligada na caixa metálica C e a outra está ligada em B, que é uma das extremidades de uma haste metálica enterrada.



### Emissão termoelétrica

Sabemos que os metais são bons condutores de eletricidade por possuírem elétrons livres. Quando aplicamos uma diferença de potencial entre dois pontos de um corpo metálico, esses elétrons livres tendem a sair das órbitas externas de seus átomos movendo-se em busca de locais onde o potencial é maior. Em temperatura ambiente, esses elétrons não possuem energia suficiente para escapar das forças de atração que os mantêm na superfície do corpo. Porém, se esse metal é bastante aquecido, como nos filamentos de uma lâmpada incandescente (de 2000 K a 7000 K), alguns elétrons adquirem energia suficiente para serem ejetados ao encontro de uma superfície próxima.

Um experimento que comprova esse fenômeno pode ser realizado utilizando-se uma lâmpada incandescente de valores nominais 110 V-100 W, um pedaço de papel-alumínio e um eletroscópio.

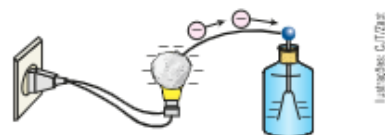
Esse fenômeno é chamado também de **efeito Edison** por ter sido descoberto, em 1883, pelo cientista estadunidense Thomas Alva **Edison** (1847-1931). Edison detectou a existência de cargas elétricas emitidas pelo filamento de uma lâmpada, porém não sabia se essas cargas eram elétrons, já que somente em 1897 o físico inglês J. J. **Thompson** (1856-1940) propôs o modelo de carga elétrica que foi denominada **elétron**.



Inicialmente, cobre-se uma parte do bulbo da lâmpada com o papel-alumínio e liga-se a lâmpada à tomada.

Thomas Edison desenvolveu a primeira lâmpada incandescente que podia ser comercializada (1879), cujo filamento era feito de carbono.

A partir do fenômeno observado por Thomas Edison, muitos estudiosos puderam desenvolver experimentos benéficos para a humanidade. É o caso, por exemplo, do engenheiro eletrônico e físico britânico John Ambrose **Fleming** (1849-1945), que, em 1904, inventou e patenteou uma válvula termoiônica que daria início à Eletrônica. Ela possibilitou a construção de rádios, radares e televisores que revolucionaram as transmissões de ondas eletromagnéticas que “levavam” sons e imagens.



Em seguida, conecta-se o eletroscópio à superfície do papel-alumínio. Observa-se que as lâminas do eletroscópio se afastam, comprovando a existência de cargas elétricas nessa superfície.



Fotografia de Thomas Alva Edison. Quando morreu, Edison deixou mais de mil invenções, algumas das quais mudaram a forma de viver de grande parte da humanidade.

## FAÇA VOCÊ MESMO

### Eletroscópio

Neste capítulo, em que estudamos **potencial elétrico**, você entrou em contato com um dispositivo interessante denominado **eletroscópio**. Esse aparelho é utilizado para detectarmos a presença de cargas elétricas em um corpo ou em determinado local. Você se lembra se com ele podemos descobrir o sinal dessas cargas?

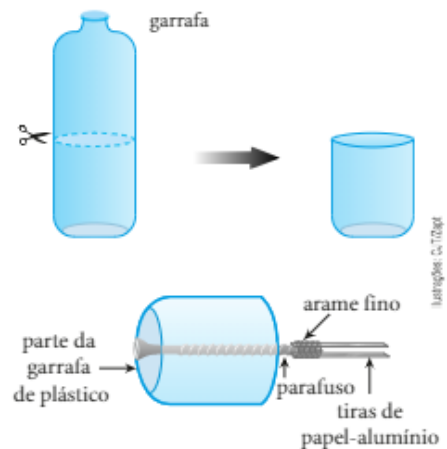
Vamos agora aprender a construir um eletroscópio utilizando materiais simples que podem ser encontrados facilmente.

#### Material necessário

- 1 garrafa plástica vazia, de detergente, refrigerante ou água mineral;
- 1 parafuso metálico longo, de 15 cm a 20 cm;
- 2 tiras estreitas, de 5 cm cada, de papel-alumínio;
- 1 pedaço de arame fino de aproximadamente 20 cm.

#### Procedimento

- I. Corte a garrafa plástica como sugere a figura ao lado. Utilize a parte do fundo para montar o eletroscópio.
- II. Faça um pequeno orifício na base do recipiente e introduza o parafuso, de modo que a cabeça fique na parte externa. Usando o arame, fixe as tiras de papel-alumínio na ponta do parafuso; as tiras devem ficar bem próximas uma da outra, porém sem se tocarem.
- III. Vamos agora testar o dispositivo. Pegue uma caneta esferográfica e atrite-a em sua roupa. Em seguida, aproxime-a da cabeça do parafuso. Você verá que, na outra extremidade, as tiras de papel-alumínio se movem.



#### Analisando o experimento

1. Qual foi o deslocamento observado para as tiras de papel-alumínio no teste realizado? Elas se aproximaram ou se afastaram? Por que isso ocorreu?
2. Um eletroscópio é normalmente utilizado para sabermos se determinado corpo está ou não eletrizado. É possível descobrir o sinal da carga do corpo utilizando esse aparelho?
3. O eletroscópio de folhas é o mais conhecido. Faça uma pesquisa e descubra outros tipos de eletroscópio.

## QUESTÕES COMENTADAS



**54** O professor de Física descreveu um interessante experimento para os alunos do último ano do Ensino Médio. Ele disse que, se atritarmos um bastão de vidro com lã, o bastão irá eletrizar-se com carga positiva. Ao aproximar o bastão eletrizado de uma esfera metálica, inicialmente neutra, vamos observar o fenômeno da indução eletrostática. Alguns "pares" elétron-próton se separam, ocorrendo um excesso de elétrons na face próxima do bastão e um excesso de prótons na face oposta da esfera. A situação final é mostrada na figura a seguir.

A partir dessa explanação, o professor fez algumas perguntas aos alunos.

- 1) No atrito, o bastão de vidro fica mesmo eletrizado positivamente? Explique.
- 2) O que provoca a separação dos "pares" elétron-próton? Explique.
- 3) Como fica a intensidade do vetor campo elétrico no interior da esfera após a indução?
- 4) Como fica o valor do potencial elétrico no interior da esfera após a indução?

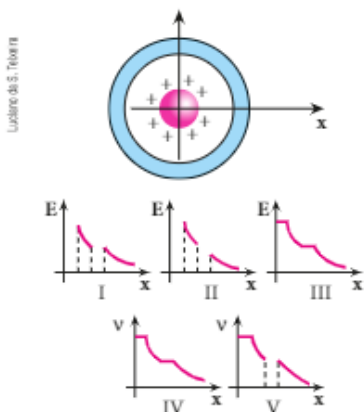


**RESOLUÇÃO**

- 1) No Capítulo I, Cargas elétricas, encontramos uma tabela denominada **série triboelétrica**, em que consta uma relação de materiais, em sequência, pela capacidade de receber elétrons. Nela observamos que o vidro perde elétrons para a lã, isto é, a lã é mais "ávida" por elétrons do que o vidro. Assim, no atrito a lã retira elétrons do vidro e o bastão torna-se eletrizado positivamente.
- 2) A atração exercida pelas cargas positivas do bastão sobre os elétrons da esfera condutora provocará o acúmulo de cargas negativas na face próxima ao bastão. Em contrapartida, a repulsão sobre as cargas positivas da esfera provocará um acúmulo delas na face oposta.
- 3) No interior da esfera, quando em equilíbrio eletrostático, a intensidade do campo elétrico resultante é sempre nula. No interior da esfera, encontramos três vetores campo elétrico em cada ponto: um deles produzido pelas cargas positivas do bastão; outro pelas cargas negativas de uma das faces da esfera; e outro pelas cargas positivas da outra face da esfera. A resultante desses três vetores é nula.
- 4) No início, o potencial da esfera é nulo. Com a aproximação do bastão eletrizado, pontos diferentes da esfera passam a apresentar potenciais diferentes. Isso provoca a movimentação de cargas na esfera para tornar o potencial igual em todos os pontos; é a indução. Assim, o potencial da esfera, após a indução, quando o equilíbrio já está restabelecido, é positivo. Note que as cargas do bastão provocam esse potencial na esfera.

**Resposta:** Ver resolução.

**55** No dispositivo observado a seguir, encontramos uma esfera condutora, oca, de raio interno  $R_1$  e externo  $R_2$ , contendo em seu interior uma segunda esfera, também condutora, de raio  $r$ , sendo  $r < R_1$ . A esfera interna encontra-se eletrizada com carga positiva e a externa (oca) é neutra. No centro da esfera interna estabelecemos a origem de um eixo  $x$ . Quais dos gráficos fornecidos melhor representam a variação da intensidade do campo elétrico  $E$  e do potencial eletrostático  $V$  ao longo do eixo?



**RESOLUÇÃO**

As cargas elétricas positivas, que se encontram na superfície do condutor interno, irão provocar, por indução, uma redistribuição de cargas na esfera externa.

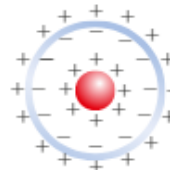
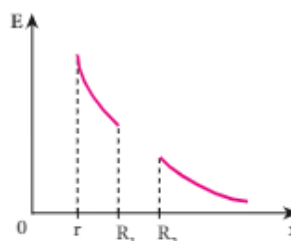


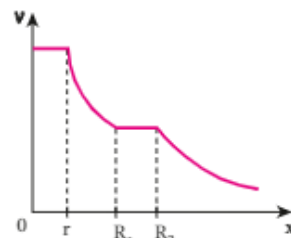
Ilustração: C/2004

No interior de um condutor eletrizado e em equilíbrio eletrostático, o campo elétrico é nulo. Observe que, na parte em que existe o material condutor, as cargas elétricas podem se dispor para anular o campo interno.

Assim, o diagrama da variação do campo elétrico  $E$  é mais bem representado por:



O potencial elétrico varia na parte vazia e é constante na parte em que existe o material condutor. Assim, o diagrama da variação do potencial elétrico é mais bem representado por:



**Respostas:** Gráficos II e IV.

- 56** No interior de uma esfera metálica oca, isolada, de raio interno de 60 cm e externo de 80 cm e eletrizada com carga  $Q = +8,0 \mu\text{C}$ , é colocada, concentricamente com ela, outra esfera condutora, de 20 cm de raio, eletrizada com carga  $q = -4,0 \mu\text{C}$ . Atingido o equilíbrio eletrostático, determine:
- a) as cargas elétricas nas superfícies interna e externa da esfera oca;
  - b) a intensidade do campo elétrico num ponto A distante 40 cm do centro das esferas;
  - c) a intensidade do campo elétrico num ponto B distante 70 cm do centro das esferas;
  - d) a intensidade do campo elétrico num ponto C distante 100 cm do centro das esferas.

**Dado:** constante eletrostática do meio:  $K = 1,0 \cdot 10^{10} \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$ .

**RESOLUÇÃO**

- a) A esfera menor, de carga  $q = -4,0 \mu\text{C}$ , está totalmente envolvida pela esfera oca. Assim, **por indução total**, a carga induzida na superfície interna da esfera oca é:

$$q_1 = -q = +4,0 \mu\text{C}$$

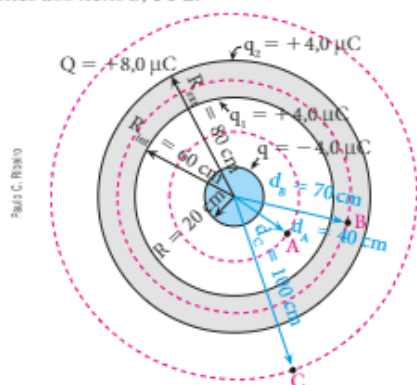
A soma da carga  $q_2$ , distribuída na superfície externa da esfera oca, com a carga  $q_1$ , distribuída na superfície interna da esfera oca, deve ser igual à carga total  $Q = +8,0 \mu\text{C}$  dessa esfera.

Então:

$$q_1 + q_2 = Q \Rightarrow +4,0 \mu\text{C} + q_2 = +8,0 \mu\text{C}$$

Logo:  $q_2 = +4,0 \mu\text{C}$

Esses resultados estão representados na figura a seguir, em que também estão indicados os pontos **A**, **B** e **C** referentes aos itens **b**, **c** e **d**.



- b) O ponto **A** é externo à esfera menor, porém interno à esfera maior. Assim, o campo, nesse ponto, é devido apenas às cargas da esfera menor. Logo, sua intensidade é dada por

$$E_A = K \frac{|q|}{(d_A)^2}, \text{ sendo } q = -4,0 \mu\text{C}, d_A = 40 \text{ cm} = 0,40 \text{ m},$$

$K = 1,0 \cdot 10^{10} \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$ . Assim, temos:

$$E_A = 1,0 \cdot 10^{10} \cdot \frac{4,0 \cdot 10^{-6}}{(0,40)^2} \Rightarrow E_A = 2,5 \cdot 10^5 \text{ N/C}$$

- c) O ponto **B** está no interior do metal da esfera maior. Assim, o campo resultante nesse ponto é nulo, pois se trata de um ponto interno a um material condutor em equilíbrio eletrostático. Logo:  $E_B = 0$

- d) Para o cálculo do campo elétrico num ponto externo à esfera maior, tudo se passa como se a carga total, dada pela soma algébrica das cargas das esferas, estivesse no centro comum das esferas. Assim, temos:

$$E_C = K \frac{|q_1 + q_2 + q|}{d_C^2} = K \frac{|Q + q|}{d_C^2}$$

Substituindo os valores fornecidos, obtemos:

$$E_C = 1,0 \cdot 10^{10} \cdot \frac{|8,0 \cdot 10^{-6} - 4,0 \cdot 10^{-6}|}{1^2}$$

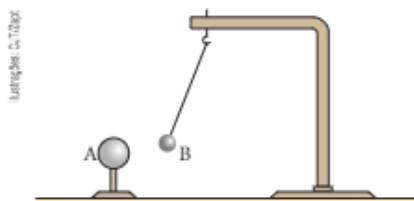
$$E_C = 4,0 \cdot 10^4 \text{ N/C}$$

**Respostas:** a)  $+4,0 \mu\text{C}$ ; b)  $2,5 \cdot 10^5 \text{ N/C}$ ; c) zero; d)  $4 \cdot 10^4 \text{ N/C}$

**QUESTÕES PROPOSTAS**

FAÇA NO CADERNO.

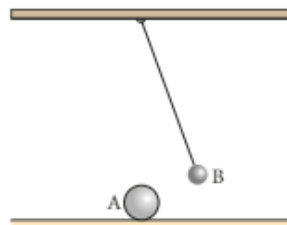
57. Uma pequena esfera de isopor **B**, recoberta por uma fina lâmina de alumínio, é atraída por outra esfera condutora **A**. Tanto **A** como **B** estão eletricamente isoladas.



Tal experimento permite afirmar que:

- a esfera **A** possui carga positiva.
- a esfera **B** possui carga negativa.
- a esfera **A** não pode estar neutra.
- as cargas elétricas existentes em **A** e **B** têm sinais opostos.
- a esfera **B** pode estar neutra.

58. Na figura a seguir, **A** é uma esfera condutora e **B** é uma pequena esfera de isopor, ligada a um fio flexível.



Supondo que a situação indicada seja de equilíbrio, analise as afirmativas a seguir:

- É possível que somente a esfera **B** esteja eletrizada.
- As esferas **A** e **B** devem estar eletrizadas.
- A esfera **B** pode estar neutra, mas a esfera **A** certamente está eletrizada.

Para a resposta, utilize o código:

- A afirmação **I** está correta.
- Somente a afirmação **II** está correta.
- As afirmações **II** e **III** estão corretas.
- Somente a afirmação **III** está correta.
- Todas as afirmações estão corretas.

59. Em um experimento de eletrização por indução, dispõe-se de duas esferas condutoras iguais e neutras, montadas sobre bases isolantes, e de um bastão de vidro carregado negativamente. Os itens de I a IV referem-se a operações que visam eletrizar as esferas por indução.

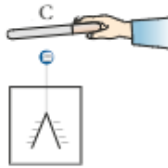
- I. Aproximar o bastão de uma das esferas.
- II. Colocar as esferas em contato.
- III. Separar as esferas.
- IV. Afastar o bastão.

Qual é a opção que melhor ordena as operações?

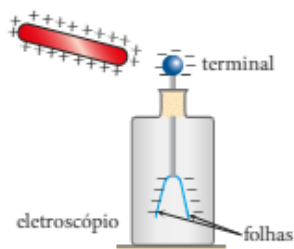
- a) I, II, IV, III.      c) IV, II, III, I.      e) II, I, III, IV.  
b) III, I, IV, II.      d) II, I, IV, III.

60. A figura ao lado representa um eletroscópio carregado negativamente. Pode-se afirmar que, aproximando-se do eletroscópio um corpo C carregado:

- a) positivamente, as lâminas se afastam.
- b) positivamente, as lâminas não se alteram.
- c) negativamente, as lâminas se aproximam.
- d) negativamente, as lâminas se afastam.



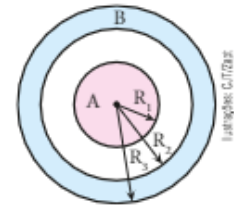
61. Durante uma aula de Física, o professor apresentou aos alunos um bastão metálico e um eletroscópio de folhas. E, após várias demonstrações, dividiu a classe em grupos e estabeleceu a discussão de um procedimento experimental. Disse ele: "Vamos eletrizar o bastão com carga  $+Q$  e o eletroscópio com carga  $-Q$ . Agora vou fazer quatro afirmativas que podem ocorrer, e cada grupo deve discutir e escrever em uma folha de papel se cada uma delas é verdadeira ou falsa, justificando cada resposta".



- I. Antes de aproximarmos o bastão da esfera do eletroscópio, já existe carga negativa nas folhas.
- II. À medida que o objeto se aproxima do eletroscópio, as folhas vão se abrindo além do que já estavam.
- III. À medida que o objeto se aproxima, as folhas permanecem como estavam.
- IV. Se o objeto tocar o terminal externo (esfera) do eletroscópio, as folhas devem necessariamente se fechar.

62. Na figura ao lado, estão representados dois condutores esféricos A e B, concêntricos.

Os raios indicados medem:  $R_1 = 30$  cm;  $R_2 = 60$  cm;  $R_3 = 90$  cm. Suas cargas valem:  $Q_A = +1,6 \mu\text{C}$  e  $Q_B = -6,0 \mu\text{C}$ .

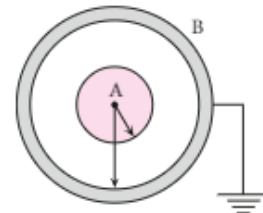


Determine a intensidade do campo elétrico no ponto:

- a) M, distante 40 cm do centro das esferas;
- b) N, distante 80 cm do centro das esferas;
- c) S, distante 120 cm do centro das esferas.

Use, como constante eletrostática do meio, o valor  $9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$ .

63. Na figura ao lado, há dois condutores esféricos, sendo um maciço, A, de 30 cm de raio, e outro oco, B, de raio interno igual a 80 cm e externo igual a 100 cm. O condutor A está eletrizado com carga igual a  $+4,0 \mu\text{C}$ , enquanto B está ligado à terra.



Determine:

- a) o potencial na esfera A;
- b) o potencial na esfera B;
- c) o potencial num ponto P, a 50 cm do centro das esferas;
- d) o esboço do gráfico do potencial em função da distância do centro das esferas.

Dado: constante eletrostática do meio  $= 9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$ .



## DESCUBRA MAIS

- 1 As lâmpadas **fluorescentes** são mais econômicas que as de **incandescência**. Por quê? Como as lâmpadas fluorescentes emitem luz? É possível acender uma lâmpada fluorescente sem ligá-la à rede elétrica? Quais são os cuidados que devemos ter no descarte de lâmpadas **fluorescentes**?
- 2 Nas propagandas de jornais e revistas podemos encontrar televisores de **plasma** e televisores de **LCD**. O que é **plasma**? Qual é a diferença entre esses dois tipos de televisor?





### Cuidado, os raios podem “cair” mais de uma vez no mesmo local

O Cristo Redentor (no Rio de Janeiro, Brasil) é atingido, em média, por seis raios ao ano, o edifício Empire State Building (em Nova York, EUA) por dez, e a Torre Eiffel (em Paris, França), por quarenta. O número médio de raios no planeta Terra é de 8 milhões/dia.

Os raios são descargas elétricas que ocorrem entre o solo e as nuvens. Essa movimentação de cargas elétricas é proporcionada pela diferença de potencial (ddp) existente, naquele momento, entre uma nuvem e um local no solo (de 100 milhões a 1 bilhão de volts).

Nas nuvens que se formam, precedendo uma tempestade, minúsculos cristais de gelo ficam à deriva, colidindo entre si, ocorrendo sua ionização. As partículas, então eletrizadas, são deslocadas por grandes movimentações de massas de ar ascendentes e descendentes. Essas cargas se espalham em três camadas. Na parte superior, encontramos muitas cargas positivas (quase 90% das positivas); na parte intermediária, muitas cargas negativas; e, na parte inferior, poucas cargas positivas (quase 10% das positivas). Geralmente o raio inicia-se entre a região intermediária e a inferior. Um conjunto de faíscas entre essas regiões realiza uma ionização do ar, tornando-o condutor. Como o solo torna-se eletrizado por indução, provocando a tensão citada acima, uma corrente de elétrons busca o solo. A descarga inicial ocorre entre a nuvem e o solo porque a distância entre essas regiões (aproximadamente 3 000 m) é muito menor que a distância entre a parte inferior e a superior da nuvem (aproximadamente 20 000 m). Aberto o caminho, as descargas ocorrem entre solo e nuvem, conforme descrito no Capítulo 2.

Estima-se que, anualmente, 60 milhões de descargas elétricas ocorram no Brasil. A grande maioria, na Amazônia. Nas cidades, a poluição, que mantém muitas partículas em suspensão no ar, pode facilitar essas descargas. Por isso, é sempre conveniente que exista um para-raios nas proximidades do local onde se mora ou trabalha. Os para-raios são caminhos seguros para as descargas elétricas, evitando a ocorrência de fatos desagradáveis que possam colocar as nossas vidas em perigo.

A luz emitida pela ionização das partículas do ar por onde as descargas elétricas (raios) passam é denominada **relâmpago**. Já o som emitido pela brusca expansão do ar ionizado é chamado de **trovão**.



Raio iluminando o céu noturno da cidade de São Paulo. Janeiro de 2015.

### Cuidados em caso de tempestade com alto índice de descargas

Se você estiver fora de casa:

- evite ser o ponto mais alto da região onde você se encontra;
- evite campos abertos;
- não se aproxime dos pontos mais altos;
- afaste-se de bons condutores de eletricidade: canos de água, postes, antenas etc.

Se você estiver em casa (a melhor opção):

- afaste-se de bons condutores de eletricidade: canalizações metálicas, telefones etc.;
- não tome banho (lembre-se de que a água que sai do chuveiro é uma solução iônica – condutora de eletricidade);
- não use eletrodomésticos;
- desligue o telefone (se a trovoadas for intensa, desligue a energia no quadro geral).

Se você vive em uma zona de tempestades frequentes, contrate um técnico especializado para instalar um para-raios em sua residência.

No dia 16 de janeiro de 2013, a revista *Veja* apresentou em sua seção Clima um artigo muito interessante sobre raios que atingem a superfície terrestre. Infelizmente, o mote desse artigo foi a morte de um casal que passava pela praia de Bertioga (região litorânea no sul de São Paulo), atingidos por um raio. O artigo assinado pelo jornalista Alexandre Salvador pode ajudar a salvar muitas vidas. Leia-o com atenção, vale a pena.

### Fulminados a 30 000 GRAUS

A morte de um casal atingido por um raio no litoral paulista mostra o risco que os brasileiros correm por viver no país campeão em tempestades elétricas

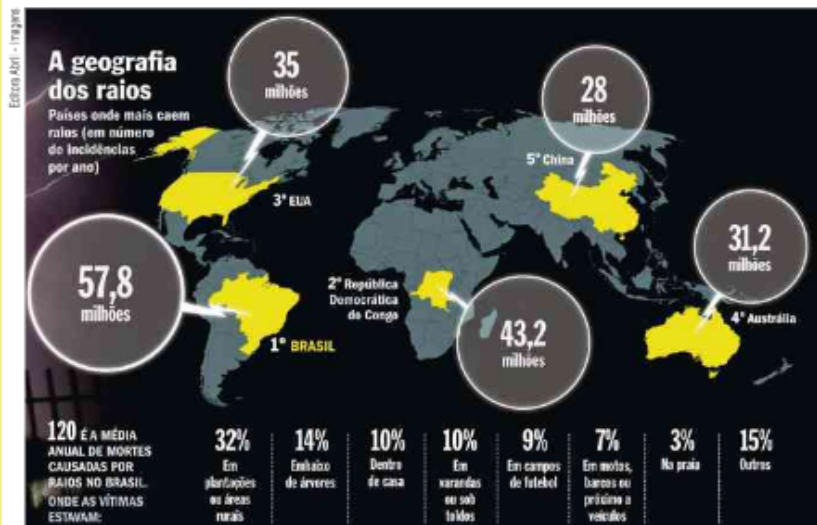
ALEXANDRE SALVADOR

Na última década, 1574 pessoas morreram no Brasil vítimas de raios. Isso significa, em média, uma morte a cada três dias. No domingo (6 de janeiro), uma tragédia desse tipo repetiu-se no litoral de São Paulo. Um casal caminhava de mãos dadas pela areia da praia de Bertioga quando foi surpreendido por uma tempestade de raios. Uma das descargas atingiu os dois matando-os instantaneamente.

No mesmo domingo, numa usina de cana-de-açúcar na cidade de Ourinhos, no interior de São Paulo, um reservatório repleto de etanol foi atingido por um raio. A descarga foi tão violenta que o sistema de para-raios instalado não foi suficiente para evitar uma explosão no tanque de 12 metros de altura. A tampa do reservatório foi arremessada a uma distância de 70 metros e ergueram-se enormes labaredas. Segundo o Inpe [Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais], é provável que o raio que atingiu o reservatório tenha alcançado a intensidade de 62 000 ampères — a intensidade média dos raios é de 25 000 ampères. Apenas como referência, a corrente de um chuveiro elétrico é de 20 ampères. Um dia antes, em Miradouro, na Zona da Mata mineira, um raio fulminou um homem que pescava e tentou se esconder da chuva sob uma árvore.

Desde 2000, o Grupo de Eletricidade Atmosférica do Inpe monitora as tempestades de raios no Brasil e no mundo. Há três anos, o órgão concluiu um estudo que aponta o Brasil como o país com a maior incidência de raios em todo o planeta (veja o infográfico na página seguinte).

A liderança brasileira no *ranking* dos raios se dá, em parte, pela grande extensão territorial do país. A República Democrática do Congo, na região central da África, tem um quarto do tamanho do Brasil, mas aparece em segundo lugar nessa classificação. A Rússia e o Canadá são os países de maior área territorial do mundo, mas não figuram entre os primeiros na lista de raios. A explicação para isso é que as descargas elétricas ocorrem com maior frequência na faixa central do globo, na região entre os trópicos. “O calor e as diferenças bruscas de temperatura das regiões intertropicais são os fatores que provocam as instabilidades que geram as tempestades”, diz Pinto Junior, do Inpe.



Países onde mais caem raios (em número de incidências por ano). Publicado pela revista *Veja*, edição 2304, 16 de janeiro de 2013, página 85.

O estudo do Inpe apurou que 10% das vítimas fatais de raios no Brasil são atingidas dentro de casa. Parte delas vivia em residência simples, com chão de terra batida, que favorece a propagação da descarga elétrica mesmo que o raio caia fora da casa. No caso de moradias em que o chão é feito de material isolante, como o cimento, o raio penetra através de fiações de luz, telefone ou antenas de TV, e as vítimas, invariavelmente, se encontram perto de aparelhos elétricos.

Numa tempestade de raios, o melhor local para se abrigar é dentro de um veículo fechado, como carro ou ônibus. Mesmo que o raio atinja diretamente o veículo, ele não penetrará em seu interior — ficará circulando pela lataria até se dissipar. Chama-se esse fenômeno de “gaiola de Faraday”, em referência ao físico inglês Michael Faraday, que no século XIX descobriu que os campos elétricos se anulam no interior de objetos eletrificados. Por esse mesmo motivo os aviões são imunes aos efeitos dos raios, embora sejam bombardeados por eles quando cruzam nuvens carregadas. Ficar ao lado de um veículo durante uma tempestade de raios, no entanto, é uma atitude de alto risco. O material metálico atrai as descargas elétricas, que acabam alcançando quem está por perto. Ser atingido por um raio, como ocorreu com o casal na praia de Bertioiga, é receber um jato de calor de 30000 graus durante um décimo de segundo.

SALVADOR, Alexandre. Revista *Veja*, ed. 2304, ano 46, n. 3, p. 84-85.

## Compreensão, pesquisa e debate

1. Pesquise e descubra como surgem cargas elétricas nas nuvens.
2. Por que ocorre descarga elétrica entre nuvens e entre nuvem e terra?
3. Cite pelo menos dois sistemas que podem proteger as pessoas e os animais de descargas elétricas que ocorrem durante as tempestades.
4. Quais são as limitações dos para-raios? Discuta com seus colegas as maneiras de tornar os para-raios mais eficientes.
5. Pesquise e monte um grupo de colegas para discutir os cuidados que devemos ter para não ficarmos expostos a possíveis descargas elétricas, em dia de tempestade.
6. Por que um raio pode levar uma pessoa à morte? Pesquise e discuta com seus colegas.

UNIDADE

2

## ELETRODINÂMICA

A Eletrodinâmica é a parte da Física que estuda corrente elétrica – movimento ordenado de cargas elétricas – e suas manifestações ao percorrer circuitos e aparelhos elétricos em geral.

Imagem de satélite mostrando distribuição de luzes no continente americano. Novembro de 2000.

NESTA UNIDADE

4

CORRENTE ELÉTRICA E RESISTORES

5

ASSOCIAÇÃO DE RESISTORES E MEDIDAS ELÉTRICAS

6

CIRCUITOS ELÉTRICOS

7

CAPACITORES



# CORRENTE ELÉTRICA E RESISTORES

## 1. INTRODUÇÃO

Na Unidade 1, **Eletrostática**, estudamos condutores em **equilíbrio eletrostático**, isto é, condutores cujos portadores de carga elétrica livres não se movimentam em nenhum sentido preferencial. O único movimento possível desses portadores é a agitação térmica, um movimento desordenado, sem direção e sentido privilegiados. Nessa agitação, todas as direções e sentidos são igualmente prováveis. Lembre-se de que o campo elétrico no interior de um condutor em equilíbrio eletrostático é nulo, e o potencial elétrico é igual em todos os seus pontos. Não há, portanto, nesse caso, diferença de potencial entre dois pontos do condutor, quaisquer que sejam eles.

Neste capítulo, porém, vamos estudar situações em que os portadores de carga elétrica se movem em um sentido preferencial. Dizemos, nessas situações, que os condutores são percorridos por **correntes elétricas**.

A **Eletrodinâmica** é o estudo das correntes elétricas, suas causas e os efeitos que produzem no “caminho” por onde passam os portadores de carga elétrica livres.

As correntes elétricas têm papel fundamental no mundo moderno, estando presentes nos sistemas de iluminação residenciais e urbanos, nos eletrodomésticos em geral, na indústria, nos computadores, nos aparelhos de comunicação, nos veículos automotores etc.

Para percebermos a importância do assunto, é só imaginar o caos que ocorreria se as fontes de energia elétrica parassem de funcionar e, conseqüentemente, não pudéssemos mais gerar correntes elétricas.

Essa dependência tecnológica teve início no final do século XIX, quando as primeiras lâmpadas iluminavam, lânguidas, algumas poucas vias de centros mundiais importantes. Eram lâmpadas caras, perigosas e pouco duráveis. Foi o pesquisador e empresário estadunidense Thomas Alva Edison quem, depois de anos de abnegada busca, construiu, em 1879, uma lâmpada constituída de uma ampola de vidro dentro da qual se produzia alto vácuo. O filamento era de bambu carbonizado, o que proporcionava razoável durabilidade e um brilho intenso e constante. Posteriormente, essa concepção foi substituída por lâmpadas com filamento de tungstênio, um metal que trabalha incandescente em temperaturas próximas de 3000 °C, sem se fundir. Imediatamente esse dispositivo tomou conta dos mais diversos rincões, prolongando o dia das pessoas, que se tornaram, de fato, reféns da eletricidade.

Mas, apesar de a lâmpada incandescente com filamento de tungstênio ter sido uma ideia literalmente luminosa, seu rendimento era muito ruim. Apenas 5%



Vista noturna da cidade do Rio de Janeiro-RJ. Março de 2015. Sem a energia elétrica fornecida pelas usinas e pelas baterias, este cenário seria muito diferente.

da energia elétrica que lhe era oferecida se transformava em luz; o restante, 95%, virava energia térmica sem nenhuma serventia. Hoje, embora ainda utilizemos lâmpadas incandescentes em larga escala, há sistemas bem melhores que oferecem rendimentos maiores, como as lâmpadas fluorescentes, de vapor de mercúrio e sódio, de *LED* e plasma. Essas últimas tendem a causar uma grande revolução em iluminação nos próximos anos.

Às vezes, porém, as correntes elétricas causam também desagradáveis surpresas. Por exemplo, no caso de choques elétricos – que nada mais são que efeitos produzidos por correntes elétricas estabelecidas em alguma região do nosso corpo – ou no caso de correntes excessivas eventuais, que danificam nossos eletrodomésticos.

Os raios que vemos no céu – exuberantes, porém perigosos – e os trovões que ouvimos durante as tempestades também são consequências de intensas correntes elétricas que ocorrem na atmosfera.

## 2. CORRENTE ELÉTRICA

Podemos definir corrente elétrica da seguinte maneira:

**Corrente elétrica** é o movimento ordenado, isto é, com direção e sentido preferenciais, de portadores de carga elétrica.

Na ilustração a seguir, a corrente elétrica é o movimento ordenado de elétrons ou de íons negativos.



Agora, a corrente elétrica é o movimento ordenado de íons positivos:



A definição apresentada evidencia que, para gerar uma corrente elétrica apreciável em um material, ele precisa ser um **condutor elétrico**.

Como foi visto em Eletrostática, existem três tipos de condutores:

- os metais e a grafita, em que os portadores móveis de carga elétrica são os elétrons livres;
- as soluções eletrolíticas, em que os portadores móveis são íons positivos e negativos;

- os gases ionizados, em que os portadores móveis podem ser íons positivos, íons negativos e elétrons livres.

Em Eletrostática não falamos de corrente elétrica porque naquela unidade enfatizamos situações de **equilíbrio eletrostático**. Entretanto, para esse equilíbrio ser atingido, correntes elétricas tiveram de existir, apesar de transitórias.

Quando, por exemplo, um condutor eletrizado foi colocado em contato com um condutor neutro, este se eletrizou em virtude da movimentação de portadores de carga elétrica, ou seja, de uma corrente elétrica que fluiu de um dos condutores para o outro.

### Corrente elétrica no vácuo?

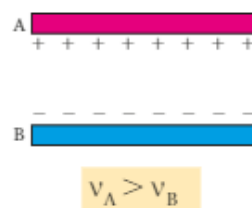
É possível haver corrente elétrica considerável no vácuo, produzida não por portadores do meio, evidentemente, mas por portadores lançados no meio.

É o caso, por exemplo, de se provocar no vácuo uma rajada de elétrons (raios catódicos). É o que acontece nos antigos tubos de imagem de televisão analógica (cinescópios) e nos osciloscópios catódicos.

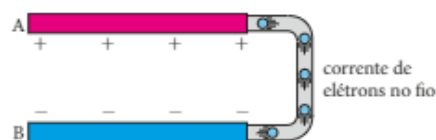
## 3. CAUSA DA CORRENTE ELÉTRICA

Agora que já sabemos o que é uma corrente elétrica, vamos ver o que provoca o movimento dos portadores de carga elétrica nos materiais condutores, ou seja, o que gera uma corrente elétrica.

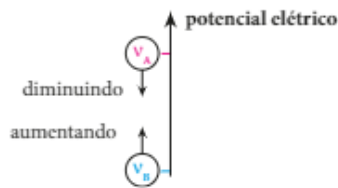
Para isso, considere duas placas metálicas **A** e **B**, eletrizadas de modo que o potencial elétrico de **A** ( $v_A$ ) seja maior que o de **B** ( $v_B$ ).



Em seguida, vamos ligar **A** a **B** por meio de um fio também metálico. Com isso, os elétrons livres passam a se deslocar de **B** para **A**, ou seja, do potencial menor para o maior. Assim, geramos uma corrente elétrica no fio.



À medida que saem elétrons de **B**, o potencial  $v_B$  vai crescendo; e à medida que chegam elétrons em **A**, o potencial  $v_A$  vai diminuindo. Simbolicamente, temos o esquema abaixo.



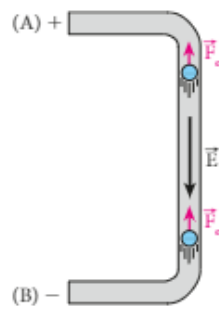
Quando os potenciais  $v_A$  e  $v_B$  tornam-se iguais, cessa o deslocamento dos elétrons de **B** para **A**, cessando, portanto, a corrente elétrica através do fio.

Assim, podemos afirmar que:

A corrente elétrica é causada por **uma diferença de potencial elétrico (ddp) ou tensão elétrica**.

A explicação para o aparecimento da corrente elétrica também pode ser dada com base no conceito de campo elétrico.

Quando o fio é ligado entre as placas **A** e **B**, um campo elétrico  $\vec{E}$  é estabelecido no interior do fio, orientado do potencial maior para o menor. Como a carga elétrica dos elétrons é negativa, surgem neles forças elétricas  $\vec{F}_e$  de sentido oposto ao do campo. Dessa forma, os elétrons livres passam a se deslocar de **B** para **A**, criando-se, então, a corrente elétrica no fio.



É importante observar que esse fio **não está** em equilíbrio eletrostático. Por isso, o campo elétrico em seu interior não é nulo.

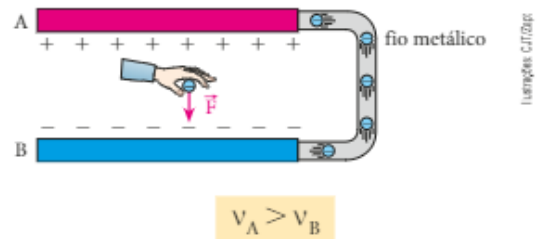
Quando a diferença de potencial  $U$  entre **A** e **B** se anula, o mesmo acontece com o campo elétrico  $\vec{E}$ , pois, como vimos em Eletrostática,  $E d = U$ . Anulando-se o campo, o condutor entra em equilíbrio eletrostático: a **corrente cessa**.

## 4. GERADOR ELÉTRICO

A corrente elétrica gerada no fio pelas placas **A** e **B**, como vimos no item anterior, só existe em um curto intervalo de tempo, cessando em seguida, quando se anula a diferença de potencial entre elas. Na prática,

entretanto, a corrente elétrica deve perdurar pelo tempo que for necessário. Para isso, é preciso manter diferentes os potenciais elétricos nas extremidades do fio.

Imagine que, na situação apresentada no item anterior, fosse possível acontecer o seguinte: todo elétron que chegasse à placa **A** fosse transportado por alguém até a placa **B**, como representa a figura abaixo.



Dessa forma, os potenciais elétricos das placas **A** e **B** nunca se igualariam e a corrente elétrica no fio seria mantida. Esse agente transportador de elétrons de **A** para **B** exerceria neles uma força  $\vec{F}$ , e essa força realizaria um trabalho. Assim, nesse transporte haveria um fornecimento de energia aos elétrons.

Para falar dessa energia, é preciso recordar que a energia potencial eletrostática (ou elétrica)  $E_p$  de uma partícula eletrizada com carga elétrica  $q$ , situada em uma posição em que o potencial elétrico é  $v$ , é dada por:

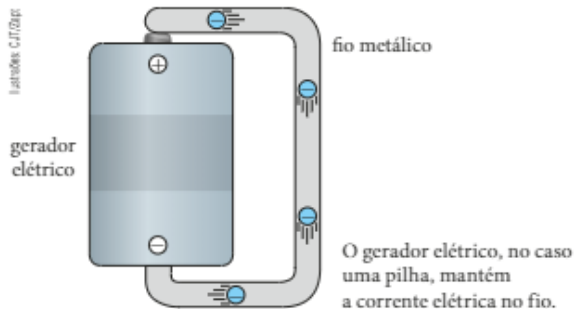
$$E_p = q v$$

No caso de elétrons,  $q$  é negativa (leia o box a seguir). Então, quando os elétrons vão da placa **B** para a placa **A** ( $v_A > v_B$ ), eles perdem energia potencial elétrica; e, quando o agente transportador os leva de volta para a placa **B**, eles ganham energia potencial elétrica: o agente citado repõe nos elétrons a energia potencial elétrica que perderam. Como veremos mais adiante, a energia potencial elétrica que os elétrons perdem quando se deslocam de uma extremidade do fio até a outra é fornecida ao fio na forma de energia térmica.

Em uma função do tipo  $y = kx$ , em que  $k$  é uma constante diferente de zero, nem sempre é correto afirmar que se  $x$  aumenta,  $y$  também aumenta. De fato, se a constante  $k$  for negativa, o aumento de  $x$  implicará a diminuição de  $y$ . Por exemplo, considere a função  $y = -2x$ . Para  $x = 1$ , temos  $y = -2$ , e para  $x = 2$ , temos  $y = -4$ .

Portanto, quando  $x$  **aumenta** de 1 para 2,  $y$  **diminui** de  $-2$  para  $-4$ .

Na realidade, quem faz essa reposição de energia potencial elétrica não é esse agente imaginário, mas um dispositivo denominado **gerador elétrico**. Para isso, o gerador elétrico deve dispor de alguma modalidade de energia e transformá-la em energia potencial elétrica. É o caso, por exemplo, das pilhas comuns de lanterna e das baterias usadas em automóveis, nas quais a energia química é convertida em energia potencial elétrica.



Assim, substituindo as placas A e B por um gerador elétrico, podemos manter a corrente no fio metálico, já que esse gerador **mantém** uma diferença de potencial entre seus terminais.

Observe, na ilustração acima, que o gerador tem dois terminais. O terminal de potencial mais alto é denominado **polo positivo (+)** e o de potencial mais baixo, **polo negativo (-)**.



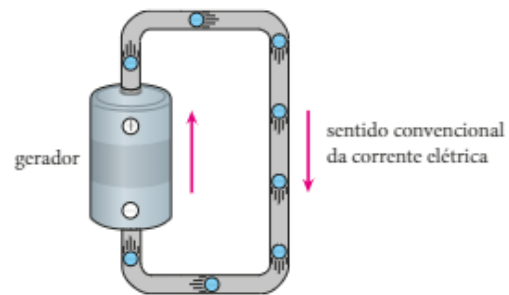
Observe na fotografia as indicações dos polos positivo e negativo de uma pilha comum. Observe também a inscrição 1,5 V. Ela significa que existe uma diferença de potencial igual a 1,5 V entre os dois polos: o potencial do polo positivo está 1,5 V acima do potencial do polo negativo.

No processo de geração de uma corrente elétrica, não interessam os reais valores dos potenciais dos polos do gerador, mas a **diferença** entre esses potenciais, pois é ela que determina a intensidade da corrente elétrica estabelecida em um determinado condutor.

## 5. INTENSIDADE DE CORRENTE ELÉTRICA E SEU SENTIDO CONVENCIONAL

Agora que já vimos a definição e a causa da corrente elétrica, vamos ver seu sentido convencional e como se calcula sua intensidade.

Considere, por exemplo, um fio metálico ligado aos terminais de uma pilha, como mostra a figura a seguir.



Convencionou-se orientar a corrente elétrica, externamente ao gerador, no sentido dos potenciais decrescentes, ou seja, do polo positivo para o negativo. Então, esse **sentido convencional** é oposto ao movimento dos elétrons livres. Se a carga elétrica dos elétrons fosse positiva, eles se deslocariam no mesmo sentido convencionado para a corrente elétrica.

É importante saber que essa convenção não causa qualquer problema, pois, com exceção de um fenômeno denominado efeito Hall, que será estudado em Eletromagnetismo, um fluxo de partículas com cargas positivas, num determinado sentido, sempre produz o mesmo efeito que produziria se as cargas dessas partículas fossem negativas e se deslocassem em sentido contrário.

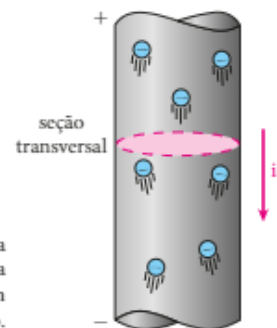
É importante saber, também, que a expressão "sentido da corrente" sempre se refere ao sentido convencional.

O sentido da corrente elétrica é, por convenção, oposto ao sentido preferencial em que se movem os portadores de carga elétrica negativa.

Veja novamente a figura anterior e observe que, **dentro do gerador**, o sentido convencionado para a corrente elétrica é do polo negativo para o positivo.

Vamos, finalmente, definir a intensidade  $i$  da corrente elétrica.

A figura ao lado representa uma ampliação de um pedaço do fio da figura anterior.



Nesta figura está destacada uma seção transversal do fio. Essa seção pode ser considerada em qualquer posição.



Durante certo intervalo de tempo  $\Delta t$ , passa pela seção considerada um número  $n$  de elétrons, que totalizam uma carga  $Q$  negativa de módulo  $|Q| = n e$ , em que  $e$  é a carga elétrica elementar ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ).

Define-se, então, que:

A **intensidade média de corrente elétrica** através da seção considerada é o quociente do módulo da carga elétrica que atravessa a seção pelo intervalo de tempo em que isso ocorre. Assim:

$$i_m = \frac{|Q|}{\Delta t} \text{ com } |Q| = n e$$

Se, em intervalos de tempo arbitrariamente pequenos e iguais, a quantidade de carga que atravessa a seção for sempre a mesma, teremos uma corrente de intensidade **constante**. Nesse caso, a intensidade média de corrente  $i_m$ , em um intervalo de tempo qualquer, coincidirá com a intensidade instantânea de corrente  $i$  em qualquer instante:

$$i = \frac{|Q|}{\Delta t}$$

No SI, a unidade de medida da intensidade de corrente elétrica é o **ampère** (símbolo: A), nome dado em homenagem ao físico francês André Marie **Ampère** (1775-1836). A definição dessa unidade será apresentada na Unidade 3. Contudo, no momento, podemos dizer que uma corrente constante tem intensidade igual a 1 A (um ampère), se em cada segundo passar pela seção transversal considerada uma carga elétrica de módulo igual a 1 C (um coulomb). Isso só não pode ser aceito como definição de ampère porque esta é unidade fundamental, sendo o coulomb uma unidade derivada do ampère.

Fazendo  $\Delta t = 1 \text{ s}$  e  $|Q| = 1 \text{ C}$ , na expressão de  $i$ , obtemos:

$$i = \frac{1 \text{ C}}{1 \text{ s}} = 1 \text{ A} \Rightarrow 1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$$

Se em um fio da parte elétrica de um automóvel, por exemplo, passa uma corrente de 15 A, isso significa que passam 15 C de carga elétrica por uma seção transversal desse fio em cada segundo.

Alguns submúltiplos da unidade ampère costumam aparecer com frequência:

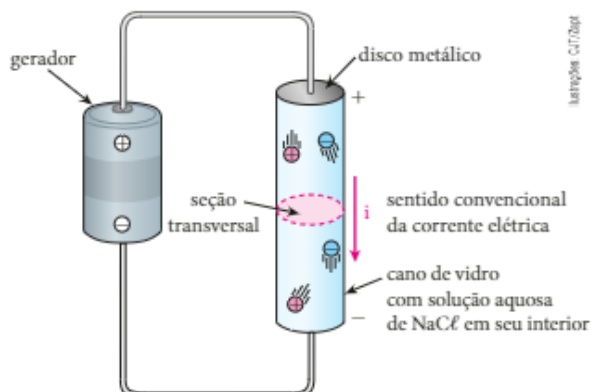
miliampère (mA)	$10^{-3} \text{ A}$
microampère ( $\mu\text{A}$ )	$10^{-6} \text{ A}$
nanoampère (nA)	$10^{-9} \text{ A}$
picoampère (pA)	$10^{-12} \text{ A}$

André Marie **Ampère**, grande físico e matemático francês, foi um dos fundadores da Eletrodinâmica e do Eletromagnetismo. Dentre outras contribuições, foi o introdutor do conceito de corrente elétrica e o elaborador da primeira teoria explicativa das propriedades magnéticas dos materiais. Ele construiu o primeiro eletroímã, o que possibilitou a invenção de muitos aparelhos, por exemplo, a campainha elétrica e os relés.

Até aqui, estudamos a corrente elétrica nos materiais em que os portadores de carga livres são elétrons (metais e grafite). Vamos agora tratar de correntes elétricas em soluções eletrolíticas e em gases ionizados.

Como sabemos, nesses casos os portadores livres podem ter carga positiva ou negativa.

Veja o exemplo, na figura a seguir, em que um cano de vidro contém uma solução aquosa de  $\text{NaCl}$ , (cloreto de sódio ou, em linguagem comum, sal de cozinha). As extremidades desse cano estão fechadas por discos metálicos, que são ligados aos terminais de uma pilha por meio de fios também metálicos.



Quando o  $\text{NaCl}$  é dissolvido em água, aparecem na solução muitos íons livres positivos e negativos. Feita a ligação esquematizada na figura, os íons positivos deslocam-se no sentido dos potenciais decrescentes; e os negativos, no sentido dos potenciais crescentes.

Observe que, fora do gerador, o sentido convencional para a corrente elétrica continua sendo o dos potenciais decrescentes. Assim:

O sentido convencional para a corrente elétrica coincide com o sentido do movimento das cargas positivas, mas opõe-se ao sentido do movimento das cargas negativas.

Com relação à intensidade de corrente na solução, observe que, durante um intervalo de tempo  $\Delta t$ , passa por uma seção transversal do cano um certo número de íons positivos (totalizando uma carga positiva  $Q_+$ ) e um certo número de íons negativos (totalizando uma carga negativa  $Q_-$ ). Assim, temos:

$$|Q| = |Q_+| + |Q_-|$$

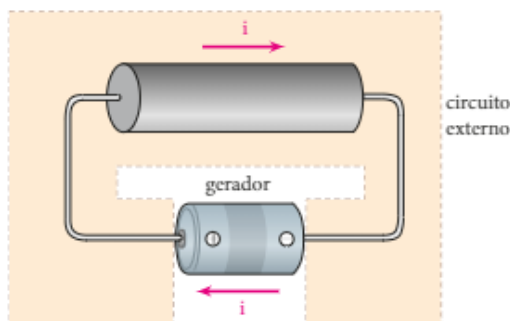
A intensidade média de corrente elétrica através da seção continua definida por:

$$i_m = \frac{|Q|}{\Delta t}$$

## 6. CIRCUITO ELÉTRICO

O “caminho” total onde se pode estabelecer uma corrente elétrica é chamado **circuito elétrico**. A parte do circuito elétrico situada fora do gerador será chamada de **circuito externo**.

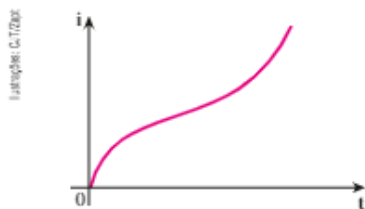
É importante observar que, qualquer que seja o condutor ligado ao gerador, a corrente no circuito externo flui do polo positivo (+) para o negativo (-). Consequentemente, no gerador, a corrente flui do polo negativo para o positivo.



## 7. GRÁFICO $i \times t$

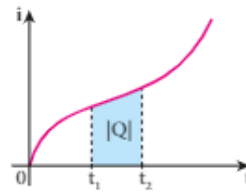
Às vezes, temos de analisar as correntes elétricas a partir de um gráfico, que também permite classificá-las.

Veja, a seguir, a representação gráfica da intensidade  $i$  de uma corrente elétrica qualquer em função do tempo  $t$ .



Essa representação gráfica possui a seguinte propriedade:

A “área” compreendida entre o gráfico e o eixo dos tempos, calculada em certo intervalo de tempo  $\Delta t$ , fornece o módulo da carga elétrica que atravessou uma seção transversal do condutor no citado intervalo.



No gráfico  $i \times t$ , tem-se: “área” =  $|Q|$   
( $A \cdot s = C$ )

## 8. CLASSIFICAÇÃO DAS CORRENTES ELÉTRICAS QUANTO À FORMA DO GRÁFICO $i \times t$

No gráfico  $i \times t$ , quando a corrente inverte seu sentido, convencionou-se considerá-la positiva em um sentido e negativa no sentido contrário. Quando usamos essa convenção, devemos chamar  $i$  de **valor algébrico** da corrente elétrica, em vez de **intensidade**.

Quanto à forma do gráfico  $i \times t$ , as correntes classificam-se em **contínuas** e **alternantes** (ou alternadas).

Vamos ver, a seguir, os casos mais comuns de corrente **contínua** e corrente **alternante**.

### Corrente contínua constante

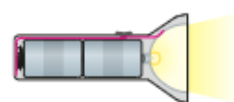
Uma corrente elétrica é **contínua constante** quando mantém intensidade e sentido constantes no decorrer do tempo. Seu gráfico  $i \times t$  é um segmento de reta paralelo ao eixo dos tempos.



Corrente contínua constante.

No caso de corrente contínua constante, sua intensidade média coincide com a intensidade instantânea.

Um bom exemplo de corrente elétrica contínua constante é a gerada por pilhas, na lâmpada de uma lanterna ligada.



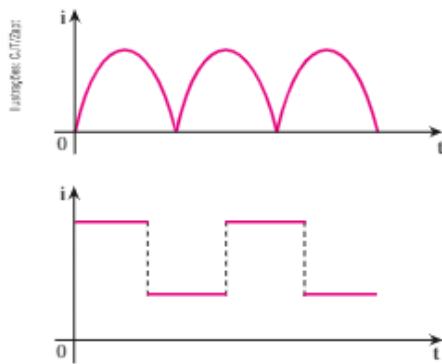
**Lanterna a pilha:** após ser ligada, a corrente elétrica no circuito assume uma intensidade praticamente constante com o tempo (evidentemente, não por muito tempo).



Bateria de dispositivo eletrônico sendo carregada. O aparelho ligado na tomada é alimentado por corrente alternada. Entretanto, dentro dele, a corrente alternada é convertida em corrente contínua e praticamente constante. É ela que carrega a bateria do dispositivo. Esse processo, usado em muitos outros aparelhos, é comumente chamado "eliminador de pilhas".

## Corrente contínua pulsante

Chamamos **contínua pulsante** a corrente cuja intensidade passa, em geral periodicamente, por máximos e mínimos, embora tenha sentido constante.

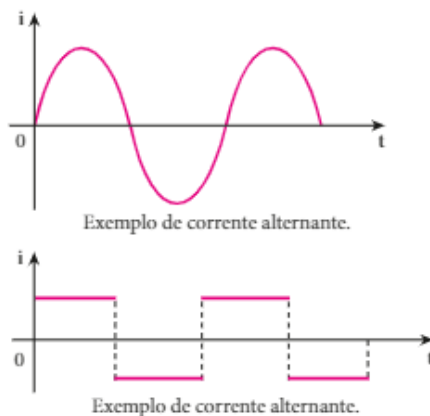


Exemplos de corrente contínua pulsante.

No penúltimo estágio dos circuitos retificadores, a corrente elétrica é pulsante, como veremos no Capítulo II da Unidade 3.

## Corrente alternante

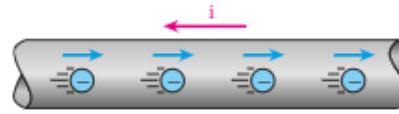
Denominamos de **alternante** ou **alternada** a corrente cujo sentido se inverte, em geral, periodicamente.



Exemplo de corrente alternante.

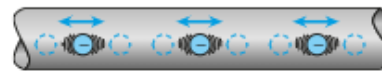
Exemplo de corrente alternante.

Observe que, em um condutor metálico percorrido por corrente contínua, o movimento ordenado dos elétrons livres ocorre sempre no mesmo sentido.



Corrente contínua.

Caso o condutor seja percorrido por corrente alternante, esses elétrons simplesmente oscilam em torno de determinadas posições, executando movimentos de vaivém.



Corrente alternante.

É alternante, por exemplo, a corrente que se estabelece em uma rede elétrica residencial quando algum aparelho é ligado a ela.

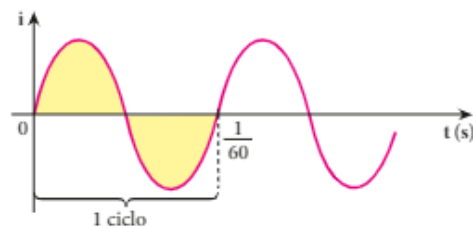


A corrente elétrica em cabos de alta-tensão geralmente é alternante.

Na Eletrodinâmica, manteremos nossas atenções concentradas quase exclusivamente no estudo da corrente contínua constante.

## Frequência da rede elétrica

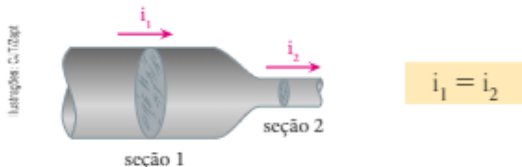
Provavelmente você tem a informação de que a rede elétrica no Brasil é de 60 Hz (sessenta hertz). Isso significa que, por exemplo, em um chuveiro elétrico ligado, o valor algébrico da corrente estabelecida varia com o tempo conforme um gráfico do tipo:



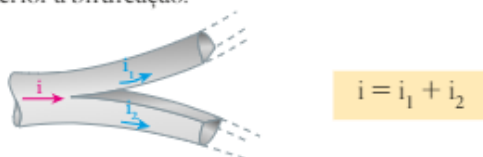
Note que uma variação completa de  $i$ , ou seja, um ciclo, dura  $\frac{1}{60}$  s. Assim, ocorrem 60 ciclos em cada segundo. Dizemos, então, que a frequência da rede elétrica é igual a 60 ciclos/segundo ou 60 Hz.

## 9. CONTINUIDADE DA CORRENTE ELÉTRICA

Em um condutor, a intensidade de corrente elétrica é a mesma em qualquer seção, ainda que ele tenha seção transversal variável. A isso damos o nome de **continuidade da corrente elétrica**.



Como consequência, se no "caminho" da corrente elétrica ocorrer uma bifurcação, a soma das correntes nas derivações será igual à corrente total, isto é, àquela anterior à bifurcação.



## 10. EFEITO JOULE

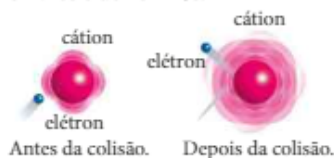
Como já vimos, quando um fio condutor, de cobre, por exemplo, é ligado a um gerador, ele se submete a uma diferença de potencial, e um campo elétrico se estabelece em seu interior.

As forças elétricas devidas a esse campo aceleram os elétrons livres em determinado sentido, fazendo com que eles ganhem velocidade nesse mesmo sentido. Acontece que, logo em seguida, esses elétrons colidem com cátions do retículo cristalino do metal e perdem velocidade. Entretanto, como as forças elétricas continuam atuando, os elétrons livres ganham novamente velocidade naquele sentido; em seguida, colidem com outros cátions, e assim sucessivamente.

Portanto, o condutor permite que os elétrons livres se movam através dele, mas oferece grande resistência a esse movimento. É como se uma pessoa saísse correndo desesperadamente no meio de uma multidão.

Ao serem bombardeados pelos elétrons livres, os cátions do metal passam a oscilar com amplitudes maiores, o que se traduz em uma elevação da temperatura do fio.

Entre duas colisões, a velocidade média típica dos elétrons livres é de  $10^6$  m/s.



Representação com elementos sem proporção entre si e em cores fantasia.

Entretanto, o movimento da nuvem de elétrons livres é tão dificultado pela presença dos cátions que ele se dá com velocidade muito baixa, tipicamente da ordem de décimos de milímetro por segundo ( $10^{-4}$  m/s). Como essa velocidade é atingida imediatamente após a ligação do fio ao gerador e se mantém estável, toda energia potencial elétrica perdida pelos elétrons livres é convertida em energia térmica: dizemos que a energia potencial elétrica é **dissipada** no condutor. Essa transformação de energia potencial elétrica em energia térmica recebe o nome de **efeito Joule** ou **efeito térmico**.



Duas das aplicações do efeito Joule: (A) a energia potencial elétrica converte-se em energia térmica no filamento da lâmpada, aquecendo-o; (B) essa mesma conversão de energia acontece no aquecedor de ambiente.

### NOTAS

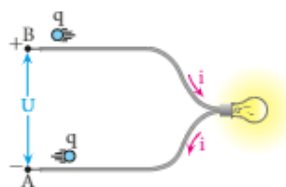
- Vimos que a nuvem de elétrons se desloca no fio com velocidade típica muito baixa, da ordem de  $10^{-4}$  m/s. Dessa maneira, essa nuvem demora cerca de 1 minuto para percorrer 1 cm de fio. Essa lentidão pode causar estranheza e nos levar à seguinte questão: por que, então, o farol de um automóvel, por exemplo, acende quase instantaneamente quando é ligado à bateria?

Para entender isso precisamos saber que o movimento citado é lento, mas se inicia quase instantaneamente em **todos** os pontos dos fios de ligação e do filamento da lâmpada, porque a velocidade de propagação do campo elétrico é muito alta, chegando a ser próxima da velocidade da luz.

- As colocações feitas são superficiais em relação à realidade, mas representam um modelo adequado às nossas necessidades.

## 11. POTÊNCIA ELÉTRICA

Para entender o conceito de potência elétrica, considere uma lâmpada ligada a um gerador, submetendo-se a uma diferença de potencial  $U$ , suposta constante, e sendo percorrida por uma corrente elétrica de intensidade  $i$ .



Durante um intervalo de tempo  $\Delta t$ , essa lâmpada recebe uma quantidade de energia térmica  $E$ , equivalente à energia potencial elétrica perdida por uma carga  $q$  que passou por ela. A potência recebida pela lâmpada é dada por:

$$\text{Pot} = \frac{E}{\Delta t}$$

No SI, a energia é medida em J (joule) e o intervalo de tempo, em s (segundo). Assim, a potência é medida na já conhecida unidade J/s, denominada **watt** (símbolo: W).

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$$

Então, se a lâmpada opera com potência igual a 48 W, por exemplo, ela recebe 48 J de energia por segundo.

Vamos buscar agora uma expressão que relacione potência, diferença de potencial e intensidade de corrente. Para isso, observe novamente a figura anterior.

A energia  $E$  recebida pela lâmpada no intervalo de tempo  $\Delta t$  é a diferença entre a energia potencial elétrica que a carga  $q$  tem em  $A$  ( $E_{pA}$ ) e a que ela tem em  $B$  ( $E_{pB}$ ):

$$E = E_{pA} - E_{pB}$$

Como  $E_p = qv$ , temos:

$$E = qv_A - qv_B = q(v_A - v_B)$$

Sendo  $q$  e  $(v_A - v_B)$  quantidades negativas, o produto delas é positivo. Por isso, podemos também escrever:

$$E = |q| \cdot |v_A - v_B|$$

Representando por  $U$  o módulo da diferença de potencial entre os pontos  $A$  e  $B$ , a energia  $E$  fica dada por:

$$E = |q| U$$

Lembrando que  $\text{Pot} = \frac{E}{\Delta t}$  e que  $i = \frac{|q|}{\Delta t}$ , temos:

$$\text{Pot} = \frac{E}{\Delta t} = \frac{|q|U}{\Delta t} = U i$$

Portanto:  $\text{Pot} = U i$

Obtivemos, então, a expressão desejada, que relaciona  $\text{Pot}$ ,  $U$  e  $i$ .

Podemos entender de modo bem simples essa última expressão. Suponha  $U$  igual a 12 V, que equivale a 12 J/C. Isso significa que cada coulomb de carga, ao passar pela lâmpada, fornece a ela 12 J de energia. Suponha também que  $i$  seja igual a 4 A, o que significa que 4 C de carga elétrica passam pela lâmpada em cada segundo. Então, se cada coulomb de carga fornece 12 J de energia à lâmpada e, em cada segundo, 4 coulombs a percorrem, ela recebe  $4 \cdot 12$  J, ou seja, 48 J em cada segundo. Assim, a potência recebida pela lâmpada é 48 J/s ou 48 W, que é justamente o produto de  $U$  por  $i$ :

$$U i = 12 \text{ V} \cdot 4 \text{ A} = \frac{12 \text{ J}}{\text{C}} \cdot \frac{4 \text{ C}}{\text{s}} = 48 \text{ J/s} = 48 \text{ W}$$

Note que, para a lâmpada, a potência significa a energia **recebida** por unidade de tempo. Para o gerador, entretanto, essa potência significa a quantidade de energia **fornecida** à lâmpada por unidade de tempo.

Se a potência for variável, mesmo com  $U$  constante, seu cálculo em um intervalo de tempo  $\Delta t$  fornecerá uma potência **média**:

$$\text{Pot}_m = \frac{E}{\Delta t} \text{ e } \text{Pot}_m = U i_m$$

em que  $i_m$  é a intensidade média da corrente elétrica no intervalo de tempo  $\Delta t$ .

## 12. O QUILOWATT-HORA (kWh)

Suponha que um ferro elétrico de passar roupa, de potência igual a 1 000 W, tenha ficado ligado durante 1 h. Vamos calcular a energia elétrica  $E$  consumida por ele.

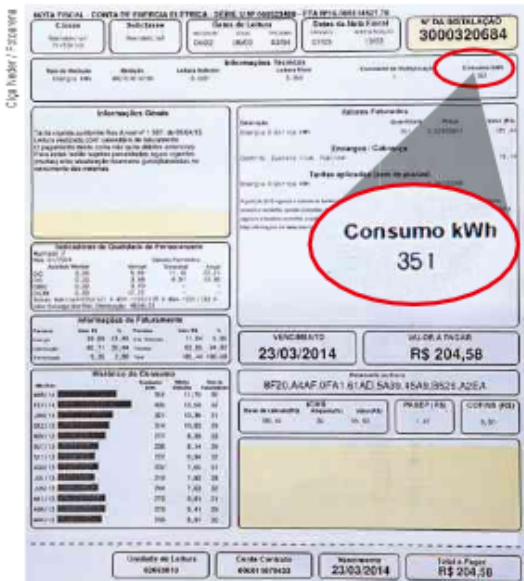
Sendo  $\text{Pot} = 1000 \text{ W}$  e  $\Delta t = 1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$ , temos:

$$\text{Pot} = \frac{E}{\Delta t} \Rightarrow E = \text{Pot} \Delta t = 1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s}$$

$$\text{Logo: } E = 3600000 \text{ J} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

Observando que o número de joules consumidos é muito grande, imagine então como seria enorme o número de joules de energia elétrica consumidos em sua casa ou em uma indústria durante um mês.

Assim, fica evidente que o joule, embora seja a unidade de medida de energia do SI, não é uma unidade adequada para medir o consumo mensal de energia elétrica em residências ou em indústrias, por exemplo. Por isso, foi estabelecida uma unidade prática de energia, que é o **quilowatt-hora (kWh)**.



Na conta de energia elétrica, o consumo mensal é indicado em kWh.

Para calcular o consumo de energia em kWh, a potência deve estar em **quilowatts** (1 kW = 1 000 W) e o intervalo de tempo de consumo, em **horas**.

No caso citado do ferro elétrico, temos:

$$Pot = 1000 \text{ W} = 1 \text{ kW}$$

$$\Delta t = 1 \text{ h}$$

$$E = Pot \Delta t = 1 \text{ kW} \cdot 1 \text{ h} \Rightarrow E = 1 \text{ kWh}$$

Então, em vez de dizer que o ferro elétrico consumiu 3 600 000 J, podemos dizer, de modo mais simples, que ele consumiu 1 kWh.

Observe que: **1 kWh = 3,6 · 10<sup>6</sup> J**

### 13. VALORES NOMINAIS

Os fabricantes de lâmpadas, ferros elétricos de passar roupa, chuveiros elétricos etc. especificam em seus produtos pelo menos dois valores, denominados **valores nominais**. Um deles é a **tensão nominal**, que é a tensão da rede elétrica para a qual o produto foi fabricado, e o outro é a **potência nominal**, que é a potência elétrica consumida pelo produto quando submetido a tensão nominal.

Considere, por exemplo, uma lâmpada com as seguintes especificações: 100 W–110 V. Esses valores nominais informam ao usuário que essa lâmpada opera com potência igual a 100 W, desde que seja submetida a uma diferença de potencial igual a 110 V.

Se a lâmpada for ligada a uma tensão menor que a nominal, a potência dissipada também será menor que a nominal, e a lâmpada iluminará menos. Entretanto, se for ligada a uma tensão maior que a nominal, a lâmpada dissipará potência maior e iluminará mais, mas sua vida útil será reduzida.



### 14. FUSÍVEL E DISJUNTOR

O fusível é um condutor (geralmente de cobre, estanho, chumbo ou alumínio) que protege os circuitos elétricos contra correntes excessivas. Ele é projetado de modo a não permitir que a corrente elétrica perdure no circuito, quando ultrapassa um determinado valor.



Alguns tipos de fusível.

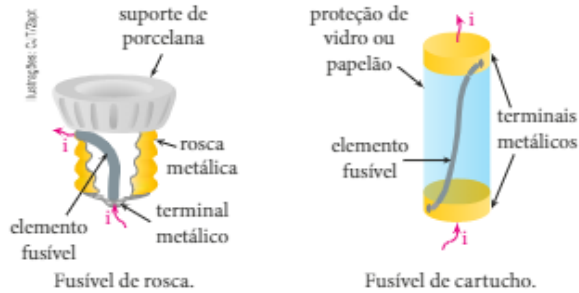
Em condições normais de funcionamento, isto é, enquanto a corrente não ultrapassa o valor máximo admitido, a temperatura atingida pelo fusível é inferior ao seu ponto de fusão. Entretanto, se a corrente se eleva acima do máximo, a temperatura do fusível aumenta e atinge seu ponto de fusão. Fundindo-se, o circuito se abre e a corrente cessa. Dessa maneira, o fusível protege aparelhos e instalações elétricas.

Esse excesso de corrente pode ser resultado de sobrecarga na rede elétrica (excesso de aparelhos ligados simultaneamente) ou de curto-circuito (contato direto entre dois fios da rede elétrica). Se não fosse a intervenção dos fusíveis (e disjuntores), os riscos de incêndio nas instalações seriam muito maiores.

O símbolo dos fusíveis, nos esquemas de circuitos elétricos, é:



Observe a seguir o esquema de dois tipos de fusível.



É importante salientar, no entanto, que não é só o fusível que garante a segurança de circuitos elétricos.

Um dispositivo muito usado atualmente na proteção de circuitos é o **disjuntor**, que abre o circuito automaticamente quando a corrente elétrica ultrapassa determinado limite. O disjuntor tem uma grande vantagem sobre os fusíveis: uma vez eliminada a causa da corrente excessiva, ele é novamente ligado, e o circuito volta às condições normais de operação, enquanto o fusível, uma vez fundido, tem de ser trocado. Muito raramente um disjuntor precisa ser substituído por outro. Por isso, é cada vez mais raro o uso de fusíveis nas instalações elétricas residenciais e industriais.



### O que significam os 220 V ou os 110 V em sua casa?

Como você sabe, no ferro elétrico ligado a uma tomada em sua casa, por exemplo, a corrente elétrica é alternada, com frequência igual a 60 Hz. Isso acontece porque a diferença de potencial (ddp)  $U$  entre os terminais A e B da tomada também é alternada.

Vamos simbolizar por  $v_A$  e  $v_B$  os potenciais desses terminais e definir a ddp  $U$  entre eles por  $U = v_A - v_B$ .

Durante  $\frac{1}{120}$  s,  $v_A$  é maior que  $v_B$  e  $U$  é positiva. No próximo intervalo de  $\frac{1}{120}$  s, a situação se inverte:  $v_A$  se torna menor que  $v_B$  e  $U$  passa a ser negativa.

O gráfico de  $U$  em função do tempo, no caso de uma tomada de 220 V, é conforme o representado ao lado.

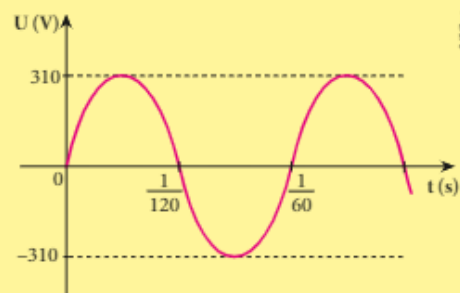
Observe, então, que a ddp  $U$  disponível na tomada varia entre  $-310$  V e  $+310$  V, aproximadamente. Mas, então, o que significa dizer que essa tomada é de 220 V?

Significa que, se um ferro elétrico, por exemplo, em vez de ser ligado nessa tomada, se submetesse a uma ddp  $U$  constante e igual a 220 V, como se fosse ligado a uma superbateria, ele esquentaria de modo exatamente igual.

Note, então, que os 220 V na realidade não existem, significando apenas uma tensão constante e fictícia (denominada **tensão eficaz**) que produziria no ferro o mesmo efeito produzido pela tensão real, que varia entre  $-310$  V e  $+310$  V.

No caso de uma tomada de 110 V, a situação é análoga. Agora, a ddp real varia entre  $-155$  V e  $+155$  V, aproximadamente.

Voltaremos ao assunto (valor eficaz) no Capítulo 11.

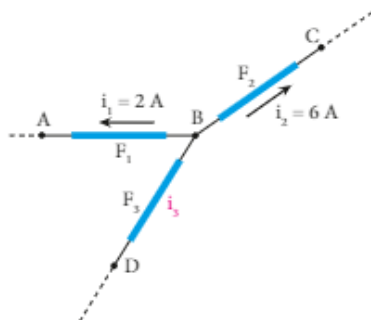


## QUESTÕES COMENTADAS



**1** Três fios condutores de cobre,  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$ , estão interligados por solda, como mostra a figura, e são percorridos por correntes elétricas de intensidades  $i_1$ ,  $i_2$  e  $i_3$ , respectivamente, sendo  $i_1 = 2 \text{ A}$  e  $i_2 = 6 \text{ A}$  nos sentidos indicados.

Paulo C. Ribeiro



Determine:

- o sentido e a intensidade da corrente elétrica no fio  $F_3$ ;
- o sentido em que os elétrons livres percorrem o fio  $F_3$ ;
- a quantidade de elétrons livres que passa por uma seção transversal do fio  $F_3$  em cada segundo, sabendo que  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  é a carga elétrica elementar.

### RESOLUÇÃO

- Como as duas correntes indicadas estão saindo do ponto **B**, a corrente no fio  $F_3$  tem de estar chegando a esse ponto. Então:

O sentido da corrente no fio  $F_3$  é de **D para B**.

Além disso, a intensidade da corrente que chega a **B** tem de ser igual à soma das intensidades das correntes que saem desse ponto.

$$i_3 = i_1 + i_2 \Rightarrow i_3 = 2 \text{ A} + 6 \text{ A} \Rightarrow i_3 = 8 \text{ A}$$

- Como o sentido da corrente elétrica, sempre convencional, é oposto ao sentido do movimento dos elétrons livres:

Os elétrons livres percorrem o fio  $F_3$  de **B para D**.

- Como  $i_3 = 8 \text{ A}$ , concluímos que passam  $8 \text{ C}$  por qualquer seção transversal de  $F_3$  em cada segundo:  $|Q| = 8 \text{ C}$ . Mas:  $|Q| = n e$ , em que  $n$  é o número de elétrons pedido. Então:  $8 = n \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \Rightarrow n = 5 \cdot 10^{19}$  elétrons livres

- Respostas:** a) O sentido da corrente no fio  $F_3$  é de **D para B**.  
 b) Os elétrons livres percorrem o fio  $F_3$  de **B para D**.  
 c)  $5 \cdot 10^{19}$  elétrons livres.

**2** Por um chuveiro elétrico circula uma corrente de  $20 \text{ A}$  quando ele é ligado a uma tensão de  $220 \text{ V}$ .

Determine:

- a potência elétrica recebida pelo chuveiro;
- a energia elétrica consumida pelo chuveiro em 15 minutos de funcionamento, expressa em kWh;
- a elevação da temperatura da água ao passar pelo chuveiro com vazão igual a  $50$  gramas por segundo, supondo que ela absorva toda a energia dissipada. Use: calor específico da água =  $4,0 \text{ J/g}^\circ\text{C}$ .

### RESOLUÇÃO

- A potência elétrica recebida é calculada por:

$$\text{Pot} = U i$$

Assim, substituindo os valores fornecidos, temos:

$$\text{Pot} = 220 \cdot 20$$

$$\text{Pot} = 4400 \text{ W} \text{ ou } \text{Pot} = 4,4 \text{ kW}$$

- A potência é, por definição:  $\text{Pot} = \frac{E}{\Delta t}$ .

Logo,  $E = \text{Pot} \cdot \Delta t$ , em que  $E$  é a energia recebida pelo chuveiro nesse intervalo de tempo  $\Delta t$ .

Assim, sendo  $\text{Pot} = 4,4 \text{ kW}$  e  $\Delta t = 15 \text{ min} = \frac{1}{4} \text{ h}$ , temos:

$$E = 4,4 \text{ kW} \cdot \frac{1}{4} \text{ h}$$

$$E = 1,1 \text{ kWh}$$

**Nota:**

Como  $1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$ , a resposta, no SI, seria:

$$E = 1,1 \cdot 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

$$E = 3,96 \cdot 10^6 \text{ J}$$

- Em cada segundo, passa pelo chuveiro uma massa  $m$  de água:  $m = 50 \text{ g}$ .

A potência do chuveiro é  $4400 \text{ W}$ , o que equivale a  $4400 \text{ J/s}$ . Isso significa que, em cada segundo, o chuveiro consome  $4400 \text{ J}$  de energia elétrica, que é entregue aos  $50 \text{ g}$  de água, na forma de energia térmica:  $Q = 4400 \text{ J}$ .

Usando a equação do calor sensível,  $Q = m c \Delta\theta$ , em que  $Q = 4400 \text{ J}$ ,  $m = 50 \text{ g}$  e  $c = 4,0 \text{ J/g}^\circ\text{C}$ , temos:

$$4400 \text{ J} = 50 \text{ g} \cdot \frac{4,0 \text{ J}}{\text{g}^\circ\text{C}} \cdot \Delta\theta$$

$$\Delta\theta = 22^\circ\text{C}$$

- Respostas:** a)  $4400 \text{ W}$  ou  $4,4 \text{ kW}$ ;  
 b)  $1,1 \text{ kWh}$ ;  
 c)  $22^\circ\text{C}$ .





## QUESTÕES PROPOSTAS



FAÇA NO CADERNO.

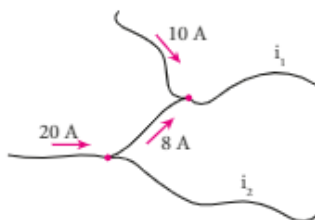
3. Quando as extremidades do fio metálico indicado na figura são submetidas a uma diferença de potencial  $U = v_B - v_A$ , em que  $v_A = 20 \text{ V}$  e  $v_B = 60 \text{ V}$ , em que sentido se movem seus elétrons livres? Qual é o sentido convencional da corrente elétrica gerada?

Langgêre  
Luis Fernando P. Tosta



4. Cerca de  $10^6$  ions de  $\text{Na}^+$  penetram em uma célula nervosa, em um intervalo de tempo de 1 ms, atravessando sua membrana. Calcule a intensidade da corrente elétrica através da membrana, sendo  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  a carga elétrica elementar.

5. A figura ilustra fios de cobre interligados:



Considerando as intensidades e os sentidos das correntes elétricas indicadas, calcule  $i_1$  e  $i_2$ .

6. A diferença de potencial  $U$  entre os terminais de um fio metálico ligado a uma pilha é igual a 1,2 V e a intensidade da corrente que o percorre é 5 A.

Analise, então, as seguintes afirmações:

- I. Os portadores de carga elétrica que percorrem o fio são elétrons.
- II. A soma dos módulos das cargas dos portadores que passam por uma seção transversal do fio, em cada segundo, é igual a 5 coulombs.
- III. O fio recebe 1,2 J de energia de cada coulomb de carga que o percorre de um terminal ao outro.
- IV. A potência elétrica consumida pelo fio é igual a 6 W e isso significa que o fio recebe 6 joules de energia por segundo, na forma de energia térmica.

São corretas as seguintes afirmações:

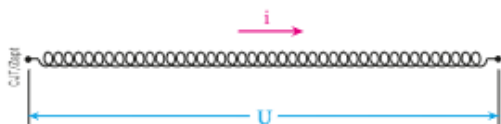
- a) Nenhuma.
- b) Apenas I, II e IV.
- c) Apenas I, III e IV.
- d) Apenas II e III.
- e) Todas.

7. Um aquecedor elétrico de imersão, ligado a uma tomada de 110 V, eleva de  $20^\circ\text{C}$  a  $100^\circ\text{C}$  a temperatura de 660 gramas de água, em 4,0 minutos. Supondo que a água aproveite toda a energia térmica produzida e sendo  $1,0 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$  o seu calor específico, calcule:

- a) a potência do aquecedor (use  $1,0 \text{ cal} = 4,2 \text{ J}$ );
- b) a corrente elétrica no aquecedor.

## 15. PRIMEIRA LEI DE OHM

Vamos procurar, agora, uma relação entre a diferença de potencial aplicada em um condutor e a intensidade da corrente causada por ela. Para isso, considere o seguinte experimento: um fio metálico de tungstênio, por exemplo, é submetido a uma diferença de potencial (ddp)  $U$ , estabelecendo-se nele uma corrente elétrica de intensidade  $i$ . Suponha que um sistema de refrigeração mantenha constante a temperatura do fio.



Usando uma pilha comum, de modo a se ter  $U$  igual a 1,5 V, vamos admitir que  $i$  seja igual a 0,1 A.

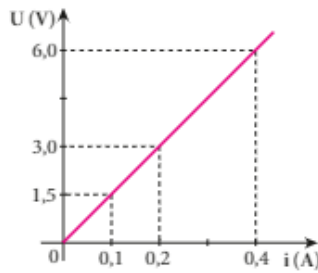
Usando duas pilhas comuns, convenientemente interligadas, temos  $U$  igual a 3,0 V e, nesse caso, constataremos uma corrente de intensidade  $i$  igual a 0,2 A. Note que  $U$  dobrou, de 1,5 V para 3,0 V, o mesmo ocorrendo com  $i$ , que também dobrou, de 0,1 A para 0,2 A. Se for usada uma bateria de 6,0 V, verificaremos que a corrente passará a valer 0,4 A. Note, novamente, que  $U$  quadruplicou, de 1,5 V para 6,0 V, o mesmo ocorrendo com  $i$ .

Esse resultado experimental, que também pode ser demonstrado por teoria, revela que a ddp  $U$  e a intensidade de corrente  $i$  são grandezas diretamente proporcionais, ou seja:

$$\frac{U}{i} = \frac{1,5 \text{ V}}{0,1 \text{ A}} = \frac{3,0 \text{ V}}{0,2 \text{ A}} = \frac{6,0 \text{ V}}{0,4 \text{ A}} = 15 \text{ V/A}$$

Note, então, que:  $\frac{U}{i} = \text{constante}$

A proporcionalidade entre  $U$  e  $i$  também pode ser visualizada por meio do gráfico a seguir, construído a partir dos valores citados no texto.



O gráfico que relaciona  $U$  com  $i$  é um segmento de reta passando pela origem dos eixos.

Se repetirmos a experiência usando um fio de outro metal, como o nicromo (liga que contém níquel e cromo), de mesmas dimensões que o fio de tungstênio e na mesma temperatura constante, obteremos os seguintes resultados:

$$U = 1,5 \text{ V} \Rightarrow i = 0,005 \text{ A} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

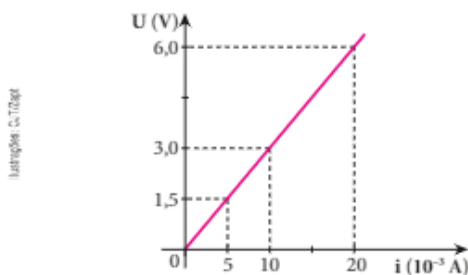
$$U = 3,0 \text{ V} \Rightarrow i = 0,010 \text{ A} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

$$U = 6,0 \text{ V} \Rightarrow i = 0,020 \text{ A} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

Novamente concluímos que  $U$  e  $i$  são diretamente proporcionais:

$$\frac{U}{i} = \frac{1,5 \text{ V}}{0,005 \text{ A}} = \frac{3,0 \text{ V}}{0,010 \text{ A}} = \frac{6,0 \text{ V}}{0,020 \text{ A}} = 300 \text{ V/A}$$

Mais uma vez:  $\frac{U}{i} = \text{constante}$



A constante encontrada recebe o nome de **resistência elétrica** do condutor, que vamos simbolizar por  $R$ . Note que essa denominação é sugestiva, pois no condutor que tem resistência  $R$  maior será mais difícil estabelecer uma mesma intensidade de corrente: nos experimentos descritos, o fio de nicromo precisa de 300 V para que se estabeleça uma corrente de 1 A, ao passo que o de tungstênio precisa de apenas 15 V.

Os condutores para os quais vale a proporcionalidade entre  $U$  e  $i$ , caso dos metais, são chamados **condutores ôhmicos**, e a expressão  $\frac{U}{i} = R$ , com  $R$  constante em temperatura constante, é a **Primeira Lei de Ohm**, fruto de trabalhos do físico alemão Georg Simon Ohm (1787-1854).

Essa lei é enunciada da seguinte maneira:

Em um condutor ôhmico mantido a temperatura constante, a intensidade de corrente elétrica é proporcional à diferença de potencial aplicada entre seus terminais:

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

No SI, a unidade de medida da resistência elétrica é o **ohm**, cujo símbolo é  $\Omega$ .

Então, para os fios de tungstênio e de nicromo citados nas experiências, temos:

$$R_{\text{tungstênio}} = 15 \text{ V/A} = 15 \Omega$$

$$R_{\text{nicromo}} = 300 \text{ V/A} = 300 \Omega$$

Os fatores que influem na resistência elétrica de um condutor serão analisados adiante, quando estudaremos a **Segunda Lei de Ohm**. Podemos adiantar, porém, que um deles é a temperatura. Por isso, para  $R$  ser uma constante, na **Primeira Lei de Ohm**, temos de considerar a temperatura constante.

Com certa frequência, vamos observar o uso de dois múltiplos da unidade ohm. São eles:

quilo-ohm (k $\Omega$ )	$10^3 \Omega$
megaohm (M $\Omega$ )	$10^6 \Omega$

Às vezes também aparece o submúltiplo miliohm (m $\Omega$ ), que equivale a  $10^{-3} \Omega$ .

Georg Simon Ohm estabeleceu a noção de **resistência elétrica** e publicou suas observações, em 1827, no trabalho intitulado *O circuito galvânico matematicamente analisado*. Nesse trabalho, apresentou os fundamentos das futuras teorias dos circuitos elétricos.



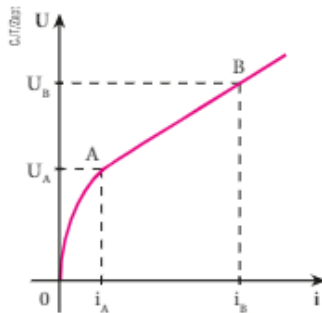
Retrato de Georg Simon Ohm. Museu de Ciências de Londres, Inglaterra.

## Resistência elétrica de condutores não ôhmicos

A expressão  $R = \frac{U}{i}$  pode também definir a resistência elétrica de um condutor qualquer, mesmo os não ôhmicos. Mas, no caso dos condutores não ôhmicos, o quociente  $\frac{U}{i}$  já não será uma constante, mesmo que a temperatura seja. Assim, para cada par de

valores de tensão e corrente, teremos uma resistência elétrica diferente.

O gráfico a seguir, por exemplo, relaciona  $U$  com  $i$  em um diodo semiconductor, componente eletrônico fundamental na conversão de corrente alternada em corrente contínua.



Suas resistências elétricas nas condições correspondentes aos pontos A e B são  $R_A = \frac{U_A}{i_A}$  e  $R_B = \frac{U_B}{i_B}$ , sendo  $R_A$  diferente de  $R_B$ , pois  $U$  e  $i$  não são diretamente proporcionais.

#### NOTAS

- A **condutância elétrica** de um condutor, simbolizada por  $G$ , é o inverso da resistência elétrica:

$$G = \frac{1}{R}$$

- No SI, a condutância elétrica é medida em **siemens** (símbolo: S):

$$1 \text{ S} = \frac{1}{\Omega} = 1 \Omega^{-1}$$

### Efeitos fisiológicos da corrente elétrica

Quando se estabelece uma diferença de potencial entre dois pontos do corpo humano, flui através dele uma corrente elétrica, cuja intensidade depende dessa diferença de potencial e da resistência elétrica entre os pontos citados. A sensação de choque e suas consequências são devido à corrente elétrica que circula através do corpo.

A resistência elétrica entre dois pontos do corpo depende dos pontos considerados e, também, da umidade da pele. Excluindo a resistência da pele, a resistência entre as orelhas, por exemplo, vale cerca de  $100 \Omega$ ; entre a mão e o pé, seu valor aproximado é de  $500 \Omega$ . A resistência da pele seca tem valor próximo de  $500000 \Omega$ , ao passo que a da pele úmida aproxima-se de  $1000 \Omega$ .



Placas como a da fotografia advertem quanto aos riscos de choques elétricos.

As **correntes fatais** são aquelas cujas intensidades situam-se entre  $100 \text{ mA}$  e  $200 \text{ mA}$ . Por volta de  $100 \text{ mA}$ , as paredes ventriculares do coração passam a executar contrações descontroladas, o que se denomina **fibrilação**. Correntes acima de  $200 \text{ mA}$  já não são tão perigosas, pois as contrações musculares são tão violentas que o coração fica travado, não ocorrendo a fibrilação, aumentando, assim, as possibilidades de sobrevivência.

Observe que, ao contrário do que se pensa comumente, as correntes elétricas mais perigosas têm intensidades relativamente baixas ( $100 \text{ mA}$  a  $200 \text{ mA}$ ), que podem ser produzidas acidentalmente quando usamos eletrodomésticos comuns de  $110 \text{ V}$  ou  $220 \text{ V}$ . As correntes mais intensas, embora provoquem desmaios e fortes queimaduras, não causam a morte, se o socorro for imediato. Pessoas acometidas de choques causados por altas-tensões reagem, em geral, mais rapidamente à respiração artificial do que aquelas afetadas por choques motivados por baixas tensões.

O socorro a uma vítima de choque começa pelo corte da tensão elétrica que o causou. Isso deve ser feito interrompendo-se o circuito. Na impossibilidade dessa interrupção, sugere-se puxar ou empurrar a pessoa com um material isolante, como, por exemplo, uma corda, um pedaço de madeira seca etc. Esse primeiro socorro deve ser feito o mais rápido possível, pois a resistência da pele na região do contato elétrico diminui, o que provoca elevação da intensidade de corrente.

Entretanto deve-se tomar o cuidado de não provocar contatos indevidos com a pessoa afetada pelo choque, pois a reação instintiva de puxá-la manualmente pode fazer mais uma vítima.

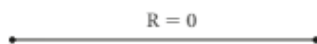
Se, após livrar-se da corrente, a pessoa estiver inconsciente e sem respirar, a respiração artificial deverá iniciar-se imediatamente. O processo de ressuscitação não deve ser interrompido, até que um médico admita não haver mais esperanças. Isso pode durar até oito horas. Saiba que a eventual ausência de pulso não significa, necessariamente, que se esgotaram as possibilidades de salvar a vítima do choque elétrico.

## 16. CONDUTOR IDEAL

Em Mecânica, lidamos com várias situações em que corpos são ligados por fios considerados ideais, cuja massa é igual a zero. Embora esses fios não existam, trata-se de um modelo útil. De fato, em muitos casos reais, a massa do fio é tão pequena em comparação com as massas dos corpos ligados a ele que pode ser desprezada.

Veja, agora, um modelo semelhante usado em Eletrodinâmica: um condutor hipotético, cuja resistência elétrica é igual a zero, recebe o nome de **condutor ideal**. Não considerando o fenômeno da supercondutividade, nenhum condutor tem resistência igual a zero. Entretanto, como veremos na **Segunda Lei de Ohm**, muitos condutores reais têm resistência tão baixa que podem ser considerados ideais. É o caso, por exemplo, dos fios de cobre, usados na instalação elétrica de uma casa, dos interruptores utilizados para ligar ou desligar uma lâmpada, dos fusíveis e disjuntores, que protegem circuitos contra excessos de corrente etc.

O símbolo de um condutor ideal em esquemas de circuitos elétricos é um simples traço contínuo:



Note que a diferença de potencial entre os terminais de um condutor ideal percorrido por corrente elétrica é igual a zero.

De fato, como  $U = Ri$  e  $R = 0$ , temos:

$$U = Ri = 0 \cdot i \Rightarrow U = 0$$

Entretanto, nos casos reais, como o de um fio de cobre em uma instalação elétrica residencial,  $U$  não é exatamente igual a zero, mas é **desprezível**, já que sua resistência  $R$  não é igual a zero, mas é também desprezível. Retomaremos essa discussão quando abordarmos a **Segunda Lei de Ohm**.

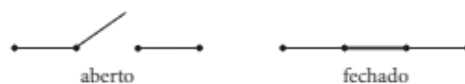
## 17. INTERRUPTORES

Os **interruptores** são dispositivos por meio dos quais abrimos ou fechamos um circuito elétrico.

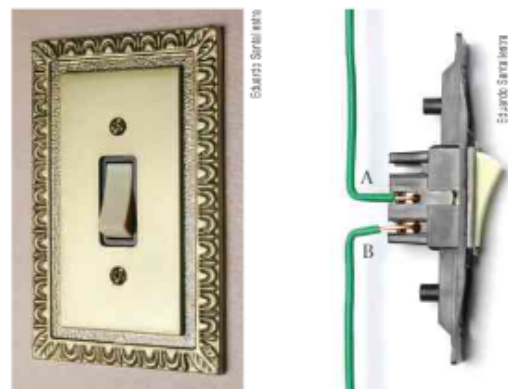


Interruptor simples aberto. Interruptor simples fechado.

Em esquemas de circuitos elétricos, o símbolo dos interruptores simples é:



Feitos de latão ou cobre, os interruptores possuem resistência elétrica tão baixa que pode ser desprezada. Funcionam de modo análogo os interruptores instalados nas paredes de uma casa para, de um único local, acender ou apagar uma lâmpada.



Quando a tecla é acionada, os terminais **A** e **B** são interligados, acendendo a lâmpada, ou desligados, apagando a lâmpada.

## EM BUSCA DE EXPLICAÇÕES

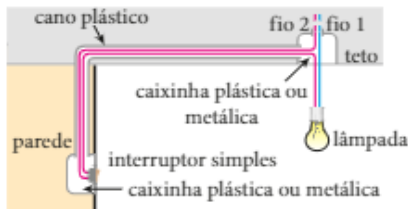
### Acendendo e apagando uma lâmpada

#### Interruptor simples

Os interruptores simples, usados para ligar ou desligar uma lâmpada, têm duas posições: uma de circuito fechado (a) e outra de circuito aberto (b). Esse interruptor apresenta dois terminais.

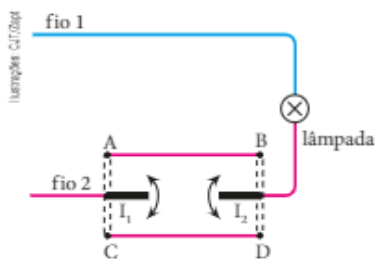


A figura a seguir ilustra a instalação de uma lâmpada em um cômodo de uma residência, usando interruptor simples. Os fios 1 e 2 vêm da caixa de distribuição de energia elétrica. Um deles vai diretamente à lâmpada, enquanto o outro passa primeiro pelo interruptor.



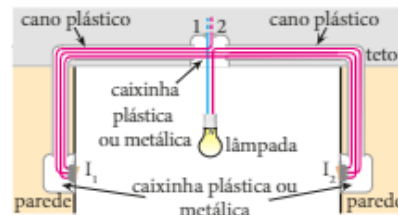
#### Interruptor paralelo

Existe um tipo de interruptor, conhecido comercialmente como **interruptor paralelo**, que apresenta três terminais em vez de dois. Ele permite instalar uma lâmpada de modo que ela possa ser ligada ou desligada de dois locais diferentes. A figura abaixo representa esquematicamente fios de ligação, uma lâmpada e dois interruptores,  $I_1$  e  $I_2$ , que podem fechar ou abrir o circuito em duas posições.



Observe que, se  $I_1$  estiver em A, poderemos ligar a lâmpada colocando  $I_2$  em B ou desligá-la colocando  $I_2$  em D. Observe também que, com  $I_2$  em D, a lâmpada poderá ser ligada (em C) ou desligada (em A) em  $I_1$ .

A figura a seguir ilustra a execução dessa instalação em uma residência. Os fios 1 e 2 vêm da caixa de distribuição. Novamente, um deles vai diretamente à lâmpada enquanto o outro vai ao terminal central de um dos interruptores.



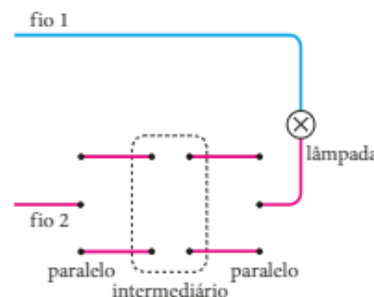
#### Interruptor intermediário

Existe ainda outro tipo de interruptor, denominado comercialmente **interruptor intermediário**, dotado de quatro terminais úteis. Combinando interruptores desse tipo com os interruptores paralelos, podemos ligar ou desligar uma lâmpada de qualquer posição.



O interruptor intermediário pode fechar ou abrir circuitos, interligando terminais como em (a) ou (b), dependendo da posição da tecla.

A figura a seguir esquematiza a instalação de uma lâmpada que pode ser ligada ou desligada de três posições. São necessários dois interruptores do tipo paralelo e um intermediário. Usando mais intermediários, podemos comandar a lâmpada de mais posições.



## 18. RESISTORES

### Função e curva característica do resistor

Na seção 10 deste capítulo, estudamos o efeito Joule. Há situações em que esse efeito é indesejável porque provoca desperdícios de energia elétrica e também pode danificar condutores.

É o caso das instalações elétricas e das linhas de transmissão de energia elétrica, em que são usados fios de cobre ou alumínio, que minimizam o efeito Joule por serem excelentes condutores. Ou o de motores elétricos, em que os enrolamentos também são feitos de fios de cobre, para minimizar o aquecimento.

Existem também condutores fabricados com a finalidade exclusiva de converter energia elétrica em energia térmica, ou seja, de aproveitar o efeito Joule. Esses condutores são denominados **resistores**.

O filamento de uma lâmpada de incandescência, por exemplo, é um resistor. Encontramos também resistores nos aquecedores elétricos de ambiente, nos ferros elétricos de passar roupa, nos chuveiros elétricos, nos soldadores elétricos etc. Os fusíveis usados para a proteção de circuitos e instalações também são resistores. Veja nas imagens a seguir alguns exemplos de resistores.



Resistor de um aquecedor de ambiente, feito da liga metálica micromo.



Resistor de chuveiro, feito também de micromo.

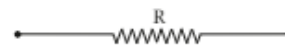


Resistor de uma lâmpada de incandescência: um fino fio de tungstênio (esticado).

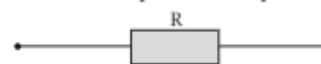


Resistor usado, por exemplo, no circuito de um aparelho de som, que é mais comumente constituído de uma película de grafite depositada em um pequeno bastão isolante. Veja que na imagem de baixo a tinta do resistor foi raspada, e podemos notar duas partes metálicas (terminais) e uma parte preta (grafite).

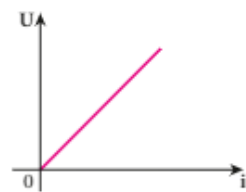
Em um circuito elétrico, o resistor é representado pelo símbolo de sua resistência:



podendo também ser representado por:



Estudaremos os resistores considerando-os condutores ôhmicos. Como vimos ao estudar a **Primeira Lei de Ohm**, o gráfico que relaciona a diferença de potencial  $U$  entre os terminais de um resistor com a intensidade de corrente  $i$  nele estabelecida é um segmento de reta, como o representado na figura ao lado.



Esse gráfico é denominado **curva característica** do resistor.



Resistores também estão presentes nas placas de circuitos de computadores.

### Potência dissipada em um resistor: outras expressões

Como já vimos, a potência elétrica dissipada em um resistor, como no filamento de uma lâmpada, por exemplo, pode ser calculada pela expressão  $Pot = U i$ . Entretanto, usando a **Primeira Lei de Ohm** nessa expressão, obtemos outras que, em muitos casos, agilizam cálculos e conclusões. Fazendo  $U = R i$ , obtemos:

$$Pot = U i = R i i \Rightarrow Pot = R i^2$$

Fazendo  $i = \frac{U}{R}$ , obtemos outra expressão:

$$Pot = U i = U \frac{U}{R} \Rightarrow Pot = \frac{U^2}{R}$$

O quadro abaixo fornece potências e outras informações referentes aos resistores de lâmpadas e alguns aparelhos eletrodomésticos.

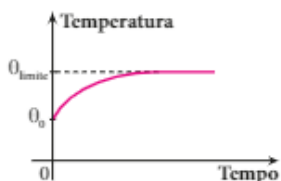
Aparelho	Valores nominais		Valores aproximados	
	Tensão	Potência	Corrente	Resistência
Chuveiro	110 V	4 400 W	40 A	2,8 Ω
Chuveiro	220 V	4 400 W	20 A	11 Ω
Ferro de passar	110 V	1 000 W	9 A	12 Ω
Ferro de passar	220 V	1 000 W	4,5 A	48 Ω
Lâmpada	110 V	100 W	0,9 A	121 Ω
Lâmpada	220 V	100 W	0,45 A	484 Ω

### Temperatura-limite de operação dos resistores

Vamos analisar, aqui, resistores que nunca devem atingir a temperatura de fusão e outros que, em algumas situações, devem se fundir.

Considere um resistor à temperatura ambiente  $\theta_0$ . Ligando esse resistor a um gerador, estabelecemos nele uma corrente elétrica  $i$ , com isso, sua temperatura começa a subir.

À medida que sua temperatura aumenta, o fluxo de energia do resistor para o ambiente (por condução, convecção ou radiação) também aumenta. Desse modo, se não ocorrer a fusão do resistor, sua temperatura acabará se estabilizando num valor-limite  $\theta_{limite}$ , que é atingido quando a potência transferida para o ambiente se iguala à potência dissipada no resistor.



Suponha que a potência dissipada no resistor seja igual a 20 W, o que significa que ele está recebendo 20 J de energia térmica por segundo. Então, sua temperatura-limite é atingida quando ele também estiver perdendo 20 J de energia por segundo para o ambiente.

É isso que ocorre no resistor de um chuveiro, por exemplo, que é projetado para atingir uma temperatura-limite inferior à temperatura de fusão do metal de que é feito.

O mesmo acontece com o filamento de tungstênio de uma lâmpada de incandescência. A temperatura desse filamento eleva-se a um limite situado por volta de 2 500 °C, de modo que sua temperatura de fusão (3 380 °C) não é atingida.

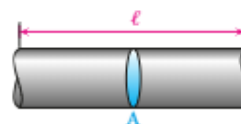
Já os fusíveis de proteção são projetados para que a temperatura-limite seja inferior à de fusão quando a corrente elétrica tiver valores normais, mas supere a de fusão quando houver corrente excessiva.

## 19. SEGUNDA LEI DE OHM

Prosseguindo em seus trabalhos, Ohm procurou identificar as grandezas que influem na resistência elétrica, chegando, então, a outra lei.

A **Segunda Lei de Ohm** fornece a resistência elétrica de um condutor em função do material de que ele é feito, de seu comprimento e da área de sua seção transversal.

Considere o fio condutor representado na figura ao lado. Ele tem comprimento  $\ell$  e seção transversal uniforme de área  $A$ .



Pode-se demonstrar que a resistência elétrica desse fio é tanto maior quanto maior é seu comprimento e menor a área da seção transversal, dependendo ainda do material de que é feito e da temperatura.

Todas essas variáveis estão contidas na **Segunda Lei de Ohm**.

A resistência elétrica  $R$  de um condutor homogêneo de seção transversal uniforme é proporcional ao seu comprimento  $\ell$ , inversamente proporcional à área  $A$  de sua seção transversal e depende do material e da temperatura:  $R = \frac{\rho \ell}{A}$  em que a grandeza  $\rho$  é característica do material e da temperatura, sendo denominada **resistividade elétrica** do material.

Observe que  $R$  é característica do condutor (material e dimensões) e da temperatura, enquanto  $\rho$  é característica apenas do material e da temperatura, não importando as dimensões.

A unidade de resistividade elétrica, no SI, é o **ohm-metro** (símbolo: Ωm).

Um material homogêneo e isotrópico (mesmo comportamento elétrico em qualquer direção) terá resistividade igual a 1 Ωm se um cubo de 1 m de aresta, feito desse material, apresentar resistência elétrica de 1 Ω entre faces opostas:

$R = 1 \Omega$

$$\rho = \frac{RA}{\ell}$$

$$\rho = \frac{1 \Omega \cdot 1 \text{ m}^2}{1 \text{ m}}$$

$$\rho = 1 \Omega \text{ m}$$

Na prática, mede-se  $\rho$  em  $\frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}$ , porque a unidade mais adequada para medir a área da seção transversal de um fio condutor é o  $\text{mm}^2$ , e não o  $\text{m}^2$ .

$$1 \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} = 10^{-6} \Omega \text{m}$$

Destaquemos que nos metais puros, quando a temperatura aumenta, a resistividade também aumenta. Isso ocorre devido ao aumento das amplitudes de oscilação dos cátions do retículo cristalino, o que aumenta a probabilidade de choques entre estes e os elétrons livres.

#### NOTAS

- Denomina-se **condutividade elétrica** de um material a grandeza, que simbolizamos por  $\sigma$ , definida pelo inverso da resistividade:  $\sigma = \frac{1}{\rho}$
- No SI, a unidade de condutividade elétrica é o siemens por metro (símbolo: S/m):  $\frac{1}{\Omega \text{m}} = \frac{\Omega^{-1}}{\text{m}} = \frac{\text{S}}{\text{m}}$

## QUESTÕES COMENTADAS



- 8** Considere uma lâmpada de incandescência com as seguintes especificações (valores nominais): 100 W–220 V.
- Calcule a resistência elétrica dessa lâmpada operando corretamente.
  - Ignorando a variação da resistência elétrica com a temperatura, calcule a potência dissipada pela lâmpada se for ligada a uma rede de 110 V.

#### RESOLUÇÃO

- a) Conhecendo  $\text{Pot} = 100 \text{ W}$  e  $U = 220 \text{ V}$ , é mais imediato usar:

$$\text{Pot} = \frac{U^2}{R} \Rightarrow R = \frac{U^2}{\text{Pot}} = \frac{220^2}{100} \Rightarrow R = 484 \Omega$$

- b) Quando a lâmpada está ligada corretamente ( $U = 220 \text{ V}$ ), temos:

$$\text{Pot} = \frac{U^2}{R} = 100 \text{ W}$$

Na nova situação ( $U' = 110 \text{ V} = \frac{U}{2}$ ), a potência dissipada será:

$$\text{Pot}' = \frac{(U')^2}{R} = \frac{\left(\frac{U}{2}\right)^2}{R} = \frac{1}{4} \cdot \frac{U^2}{R} = \frac{\text{Pot}}{4} = \frac{1}{4} \cdot 100 \text{ W}$$

Logo:  $\text{Pot}' = 25 \text{ W}$

Com a redução da potência dissipada, reduz-se também a potência luminosa irradiada, que é uma **pequena** fração da potência dissipada, já que o rendimento dessa lâmpada é muito baixo. Consequentemente, ela passa a iluminar menos.

Você também pode resolver o item **b** usando  $\text{Pot} = U i$ . Entretanto, essa expressão requer mais cuidado porque **todas** as grandezas presentes nela são **variáveis**. De fato, sendo  $R$  constante,  $U$  e  $i$  são diretamente proporcionais. Então, se  $U$  cai à metade, o mesmo acontece com  $i$ , de modo que a potência passa a ser:

$$\text{Pot}' = U' i' = \frac{U}{2} \cdot \frac{i}{2} = \frac{U i}{4} = \frac{\text{Pot}}{4}$$

Mais uma vez concluímos que a nova potência é um quarto da potência nominal. Verifique você mesmo que a expressão  $\text{Pot} = R i^2$  também o levaria à mesma conclusão.

**Respostas:** a) 484  $\Omega$ ; b) 25 W

- 9** Um chuveiro opera com potência igual a 4400 W, alimentado por dois fios de cobre de seção transversal de área igual a  $4,0 \text{ mm}^2$ . Suponha que a corrente elétrica nesses fios seja de 20 A. Sabendo que os fios de cobre estão praticamente na temperatura ambiente e que, nessa temperatura, a resistividade do cobre é igual a  $1,7 \cdot 10^{-2} \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}$ , determine:

- a resistência elétrica de um trecho AB de um desses fios, de 80 cm de comprimento;
- a diferença de potencial entre os extremos A e B do trecho a que se refere o item anterior;
- a potência elétrica dissipada em 80 cm de fio.

#### RESOLUÇÃO

- a) Para o trecho AB, temos:  $\rho = 1,7 \cdot 10^{-2} \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}$ ;  $\ell = 80 \text{ cm} = 0,80 \text{ m}$ ;  $A = 4,0 \text{ mm}^2$ .

Então, usando a **Segunda Lei de Ohm**, calculamos sua resistência:

$$R = \frac{\rho \ell}{A} = \frac{1,7 \cdot 10^{-2} \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot 0,80 \text{ m}}{4,0 \text{ mm}^2}$$

Logo:  $R = 3,4 \cdot 10^{-3} \Omega$

Observe que essa resistência é extremamente pequena (3,4 milésimos de ohm). Isso explica por que os fios de ligação em uma instalação elétrica residencial podem ser considerados aproximadamente condutores ideais.



b)



Sendo  $i = 20 \text{ A}$  e  $R = 3,4 \cdot 10^{-3} \Omega$ , temos, pela **Primeira Lei de Ohm**:

$$U = R i = 3,4 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \Rightarrow U = 68 \cdot 10^{-3} \text{ V}$$

**NOTA**

A ddp obtida (68 milésimos de volt) é insignificante quando comparada com a ddp que alimenta um chuveiro, razão pela qual normalmente é desprezada. Observe, porém, que, embora essa ddp seja muito pequena, ela consegue manter no trecho do fio uma corrente elevada, de 20 A, porque a resistência desse trecho também é muito pequena.

$$i = \frac{U_{(\text{desprezível})}}{R_{(\text{desprezível})}} = \frac{68 \cdot 10^{-3}}{3,4 \cdot 10^{-3}} \Rightarrow i = 20 \text{ A}$$

Entretanto, essa ddp é totalmente inofensiva para uma pessoa, pois a resistência, principalmente da pele, é muitíssimo mais alta.

c) A resistência elétrica de 80 cm desse fio de cobre é:  
 $R_g = 3,4 \cdot 10^{-2} \Omega$

A potência dissipada nele é:  $Pot_g = R_g i^2 = 3,4 \cdot 10^{-2} \cdot (20)^2$

Logo:  $Pot_g = 13,6 \text{ W}$

O fato de 13,6 W ser muito menor que 4400 W explica por que o aquecimento dos fios de ligação também é muito menor que o do chuveiro.

**Respostas:** a)  $3,4 \cdot 10^{-3} \Omega$ ; b)  $68 \cdot 10^{-3} \text{ V}$ ; c) 13,6 W.

**10** Desprezando influências da temperatura na resistividade e no calor específico, justifique as seguintes afir-

mações a respeito de um mesmo chuveiro submetido a uma diferença de potencial  $U$  constante.

- a) Sem fazer nenhuma alteração no sistema elétrico do chuveiro, a redução da vazão faz com que a elevação  $\Delta\theta$  da temperatura da água seja maior.
- b) Para uma mesma vazão, a elevação  $\Delta\theta$  da temperatura da água torna-se maior se for cortado um pedaço do resistor do chuveiro (operação, em geral, desaconselhável).

**RESOLUÇÃO**

a) Como  $U$  e  $R$  (resistência elétrica do chuveiro) são constantes, a expressão  $Pot = \frac{U^2}{R}$  nos faz concluir que a potência do chuveiro também é constante. Isso significa que, em cada segundo, é constante a quantidade de energia térmica  $Q$  entregue à massa de água  $m$  que passa pelo chuveiro.

Como  $Q = m c \Delta\theta$ , temos:  $\Delta\theta = \frac{Q}{m c}$

Sendo  $Q$  e  $c$  constantes, quanto menor for  $m$ , maior será  $\Delta\theta$ . Então, quanto menor a vazão, maior a elevação da temperatura da água.

b) Pela **Segunda Lei de Ohm**:  $R = \frac{\rho \ell}{A}$

Cortando um pedaço do resistor, seu comprimento  $\ell$  diminui e, com isso, diminui sua resistência  $R$ , pois  $\rho$  e  $A$  são constantes. Como  $Pot = \frac{U^2}{R}$  e  $U$  é constante, a redução de  $R$  implica um aumento da potência do chuveiro. Assim, para uma vazão constante, uma mesma massa  $m$  de água recebe, por segundo, maior quantidade de energia térmica  $Q$ .

Sendo  $Q = m c \Delta\theta$ , temos:  $\Delta\theta = \frac{Q}{m c}$

Como  $m$  e  $c$  são constantes, um aumento de  $Q$  implica maior elevação de temperatura  $\Delta\theta$ .

**Resposta:** Ver resolução.

**QUESTÕES PROPOSTAS** FAÇA NO CADERNO.

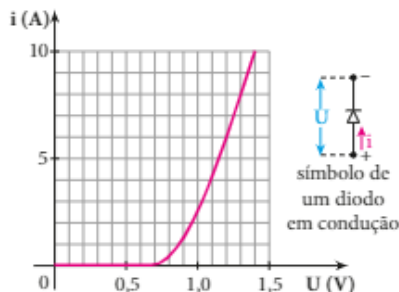
**11.** As unidades C/s, J/C, J/s e V/A receberam as seguintes denominações:

- a) watt, volt, ampère e ohm;
- b) ampère, volt, watt e ohm;
- c) watt, ampère, volt e ohm;
- d) ampère, volt, coulomb e ohm;
- e) ampère, ohm, watt e coulomb.

**12.** Um soldador elétrico de baixa potência, de especificações 26 W–127 V, está ligado a uma rede elétrica de 127 V. Calcule:

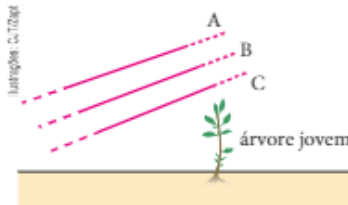
- a) a resistência elétrica desse soldador em funcionamento;
- b) a intensidade de corrente nele estabelecida;
- c) a energia dissipada em 5,0 minutos de operação, em quilojoules.

**13.** O diodo semicondutor é um componente eletrônico usado, por exemplo, na conversão de corrente alternada em corrente contínua. A curva característica de um determinado diodo de silício está representada a seguir.



- a) A partir de que valor de  $U$  esse diodo começa a conduzir corrente elétrica?  
 b) Qual é o valor  $R_1$  de sua resistência quando  $U$  é igual a 1,2 V, e o valor  $R_2$  quando  $U$  é igual a 1,4 V?

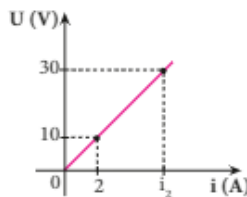
14. Tomando como referência o potencial elétrico da Terra (zero volt), os potenciais dos fios nus A, B e C de uma linha de transmissão valem 200 V, -250 V e -300 V, respectivamente. O corpo de uma pessoa situada no alto de uma escada isolante será percorrido por corrente elétrica mais intensa quando tocar .... com uma das mãos e .... com a outra mão. Indique a alternativa que preenche corretamente as lacunas:



- a) a árvore; o fio C.  
 b) o fio B; o fio A.  
 c) o fio B; o fio C.  
 d) o fio A; o fio C.  
 e) o fio C; o fio C.

15. No gráfico a seguir está representada a curva característica de um resistor mantido em temperatura constante. Analise as seguintes afirmações:

- I. O resistor em questão é ôhmico.  
 II. A resistência elétrica do resistor é igual a 5  $\Omega$  e isso significa que são necessários 5 volts para produzir nele 1 ampère de corrente.  
 III. A intensidade de corrente  $i_2$  indicada no diagrama é igual a 6 A.



IV. Se esse resistor for percorrido por uma corrente de 2 A durante 20 s, consumirá 400 J de energia.

São corretas as seguintes afirmações:

- a) Apenas I, II e III. d) Todas.  
 b) Apenas I e IV. e) Apenas I e II.  
 c) Apenas I, II e IV.

16. A área  $A$  de um círculo de raio  $r$  é dada por:  $A = \pi r^2$ . Calcule, então, quantos metros deve ter um fio de cobre com 2,0 mm de diâmetro, para que sua resistência elétrica seja igual a 1,0  $\Omega$ . Considere a resistividade do cobre igual a  $1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}$ . Use  $\pi = 3,1$ .

17. O resistor de determinado chuveiro é um fio de nicromo, de 2 m de comprimento e 11  $\Omega$  de resistência, enrolado em forma de hélice cilíndrica.

a) Faça uma estimativa do comprimento que deveria ter um fio de cobre, de mesma área de seção transversal, para se obter um resistor também de 11  $\Omega$ . Para isso, considere:

$$\rho_{\text{nicromo}} = 1 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ m}; \rho_{\text{cobre}} = 2 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}.$$

b) Seria viável usar o cobre na confecção do resistor desse chuveiro? Ignore problemas relacionados com a oxidação.

18. Em uma lâmpada de incandescência, especificada por 220 V–100 W, o filamento de tungstênio tem comprimento igual a 20 cm. Em funcionamento normal, a temperatura do filamento é de cerca de 2500  $^{\circ}\text{C}$  (evidentemente menor que a temperatura de fusão do tungstênio, que é superior a 3000  $^{\circ}\text{C}$ ). Qual é a área da seção transversal do filamento, sendo de  $6,2 \cdot 10^{-1} \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$  sua resistividade elétrica nessa temperatura?



## DESCUBRA MAIS

- 1 Descreva algumas causas da queima de uma lâmpada de incandescência.
- 2 Os semicondutores **dopados** são largamente utilizados na microeletrônica.
  - a) O que são semicondutores? Dê exemplos de alguns materiais semicondutores.
  - b) O que são semicondutores **dopados**? Do ponto de vista da condutibilidade elétrica, o que os diferencia dos semicondutores intrínsecos (puros)?
  - c) O que é um diodo semicondutor? Mencione algumas de suas aplicações.
  - d) O que é um transistor de potência? Qual é a sua função em um circuito como o de um aparelho de som, por exemplo?
- 3 Pesquise a teoria das **bandas** de valência e de condução. Veja como é feita, com base nessa teoria, a distinção entre condutores, isolantes e semicondutores.
- 4 O que é o fenômeno da supercondutividade? Quando ele foi descoberto? Por quem? Os supercondutores sempre são metálicos?
- 5 O elétron foi descoberto antes ou depois de toda a formulação da Eletrodinâmica Clássica?



# ASSOCIAÇÃO DE RESISTORES E MEDIDAS ELÉTRICAS

## 1. ASSOCIAÇÃO DE RESISTORES

Nas decorações natalinas, por exemplo, é comum encontrarmos cordões de lâmpadas interligadas:



Cada lâmpada é um resistor, e seu conjunto interligado é um caso de **associação de resistores**.

Em circuitos, como os de receptores de rádio, também podemos encontrar resistores associados.

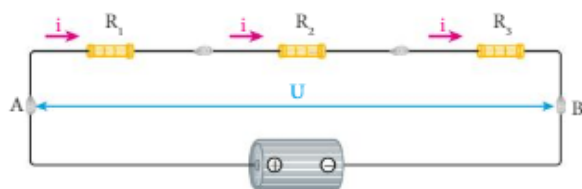
Veremos a seguir que existem três tipos de associação de resistores: **em série**, **em paralelo** e **mista**. O exemplo das lâmpadas decorativas apresentado acima é um caso de associação de resistores em série.

### Associação em série

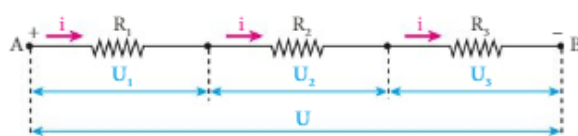
Podemos conceituar a associação de resistores em série do seguinte modo:

Dois ou mais resistores estão **associados em série** quando são interligados de modo a constituir um único trajeto condutor, isto é, sem bifurcações. Assim, se eles forem percorridos por corrente elétrica, esta terá a **mesma intensidade** em todos eles (continuidade da corrente elétrica).

A figura a seguir representa três resistores, de resistências  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$ , associados em série, sendo **A** e **B** os terminais da associação. Um gerador estabelece uma diferença de potencial  $U$  entre esses terminais e os resistores são percorridos por uma corrente elétrica que tem a mesma intensidade  $i$  em todos eles.



Esquemáticamente, essa associação pode ser representada assim:

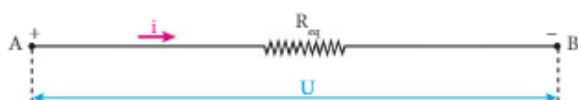


Observe que  $U_1$ ,  $U_2$  e  $U_3$  são as diferenças de potencial nos resistores de resistências  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$ , respectivamente. Como  $U$  significa a energia que cada coulomb de carga entrega à associação, quando a percorre de um terminal ao outro, podemos escrever:

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

em que, pela **Primeira Lei de Ohm**,  $U_1 = R_1 i$ ,  $U_2 = R_2 i$  e  $U_3 = R_3 i$ . Então:  $U = R_1 i + R_2 i + R_3 i$  (I)

Imagine, agora, que os três resistores da associação dada fossem substituídos por um **único** resistor e que, submetendo-se esse resistor à mesma tensão  $U$ , nele fosse estabelecida a mesma corrente de intensidade  $i$  da associação. A resistência elétrica desse resistor é a **resistência equivalente** ( $R_{eq}$ ) à da associação ou a resistência equivalente entre os pontos **A** e **B**.



Vamos ver, agora, como se calcula a resistência equivalente à de uma associação em série.

Para a resistência equivalente, temos:

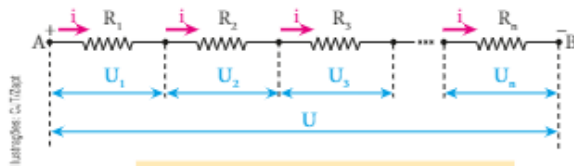
$$U = R_{eq} i \quad (\text{II})$$

Substituindo (II) em (I), obtemos:

$$R_{eq} i = R_1 i + R_2 i + R_3 i$$

Portanto:  $R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$

Observe que a resistência equivalente é igual à soma das resistências dos resistores associados em série. Generalizando, para uma quantidade qualquer ( $n$ ) de resistores em série, temos:



$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n$$

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

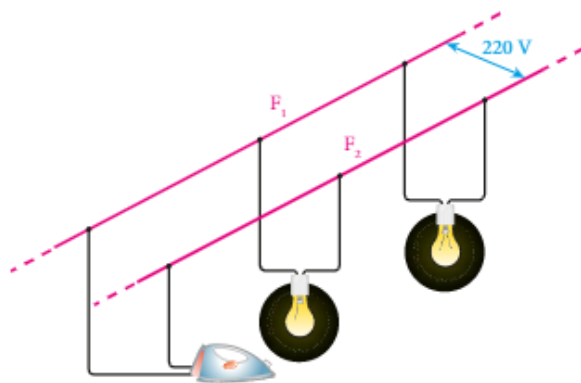
No caso particular de  $n$  resistores de mesma resistência  $R$ , associados em série, temos:

$$R_{eq} = \underbrace{R + R + R + \dots + R}_{n \text{ vezes}} \Rightarrow R_{eq} = n R$$

### Associação em paralelo

Imagine uma pessoa que more em uma cidade onde a tensão da rede elétrica seja de 220 V. Sempre que ela resolver adquirir um eletrodoméstico para ser ligado à rede elétrica de sua casa, exigirá que ele tenha sido fabricado para se submeter a 220 V.

A figura a seguir representa dois fios,  $F_1$  e  $F_2$ , da rede elétrica da casa dessa pessoa, com duas lâmpadas e um ferro elétrico ligados neles.



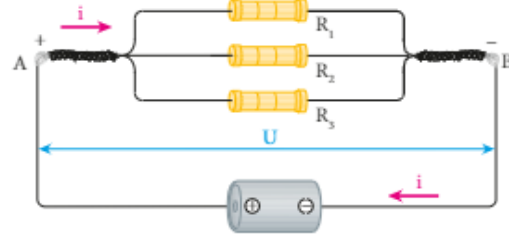
Observe que tanto as lâmpadas quanto o ferro estão submetidos à mesma ddp de 220 V.

A situação ilustrada é uma associação de resistores em paralelo. Podemos dizer, então, que:

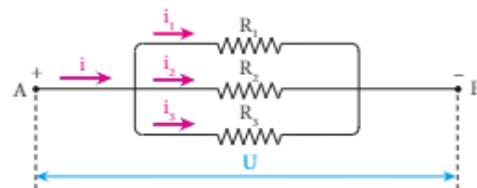
Dois ou mais resistores estão **associados em paralelo** quando são interligados de tal maneira que fiquem todos submetidos à **mesma diferença de potencial**.

Vamos agora analisar com mais detalhes esse novo tipo de associação, que também pode acontecer em outros circuitos, como em um receptor de rádio.

A figura a seguir representa três resistores, de resistências  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$ , associados em paralelo, sendo A e B os terminais da associação. Um gerador estabelece uma ddp  $U$  entre esses terminais, que é igual para todos os resistores. Com isso, a corrente no gerador tem intensidade  $i$ .



Esquemáticamente, essa associação pode ser representada assim:

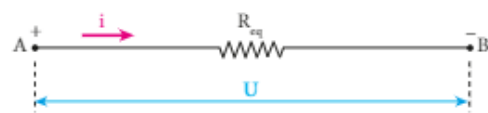


Observe que  $i_1$ ,  $i_2$  e  $i_3$  são as intensidades das correntes nos resistores de resistências  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$ , respectivamente. Pela continuidade da corrente elétrica, a intensidade  $i$  da corrente total é igual à soma das intensidades das correntes nos três resistores:

$$i = i_1 + i_2 + i_3$$

em que, pela **Primeira Lei de Ohm**,  $i_1 = \frac{U}{R_1}$ ,  $i_2 = \frac{U}{R_2}$  e  $i_3 = \frac{U}{R_3}$ . Então:  $i = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}$  (I)

Imagine, agora, que os três resistores da associação fossem substituídos por um **único** resistor e que, submetendo esse resistor à mesma tensão  $U$ , se estabelecesse nele uma corrente de intensidade  $i$ , igual à intensidade da corrente total na associação. Novamente, a resistência elétrica desse resistor é a **resistência equivalente** ( $R_{eq}$ ) à da associação ou entre os pontos A e B.



Vamos ver, então, como se calcula a resistência equivalente à de uma associação em paralelo.

Para a resistência equivalente, temos:  $i = \frac{U}{R_{eq}}$  (II)

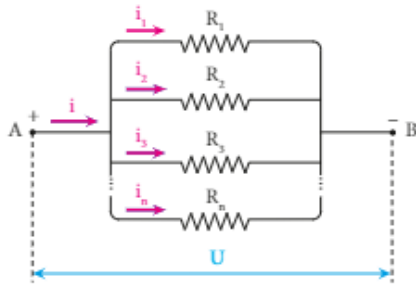
Substituindo (II) em (I), obtemos:

$$\frac{U}{R_{eq}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}$$

Portanto:  $\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$

Observe, então, que o inverso da resistência equivalente é igual à soma dos inversos das resistências dos resistores associados em paralelo.

Generalizando para uma quantidade qualquer (n) de resistores em paralelo, temos:



$i = i_1 + i_2 + i_3 + \dots + i_n$

$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}$

É importante destacar que as intensidades das correntes elétricas estabelecidas em resistores associados em paralelo são inversamente proporcionais às suas resistências.

De fato,  $i = \frac{U}{R}$  e a tensão U é igual em todos os resistores da associação.

O cálculo da resistência equivalente à de uma associação de resistores em paralelo pode ser agilizado nos casos particulares a seguir:

- Se tivermos apenas **dois** resistores associados em paralelo, então:

$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}$

$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{\text{produto das resistências}}{\text{soma das resistências}}$

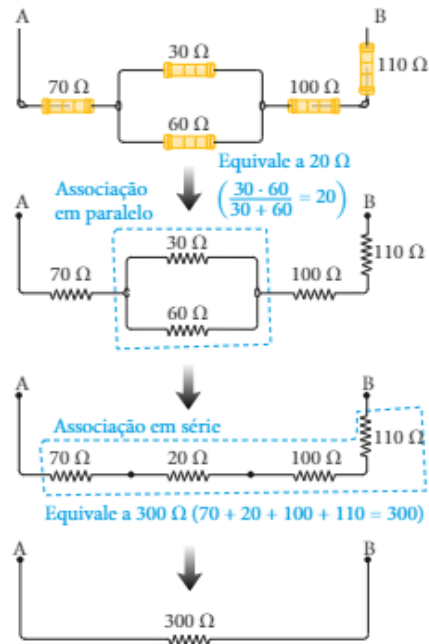
- Se tivermos **n** resistores de resistências iguais a R, associados em paralelo, então:

$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \dots + \frac{1}{R} \Rightarrow R_{eq} = \frac{R}{n}$

**Associação mista**

Às vezes identificamos, em uma mesma associação, alguns resistores associados em série e outros, em paralelo. Nesse caso, a associação é **mista**.

Veja a seguir um exemplo de associação mista e a determinação de sua resistência equivalente.

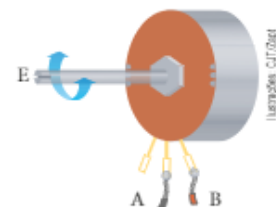


Exemplo de cálculo da resistência equivalente de uma associação mista de resistores, isto é, em que existem resistores associados em paralelo e em série.

**2. REOSTATOS**

Quando você gira o controle de volume (potenciômetro) do seu rádio, por exemplo, está alterando a resistência elétrica de um resistor “escondido” e, com isso, também a intensidade de uma corrente elétrica no circuito do aparelho.

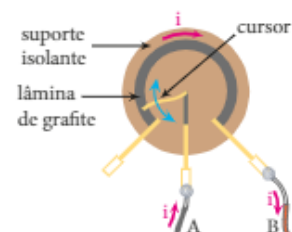
Veja, na ilustração ao lado, o aspecto desse controle de volume.



A e B são os terminais usados, E é o eixo que você gira e I é um invólucro metálico.

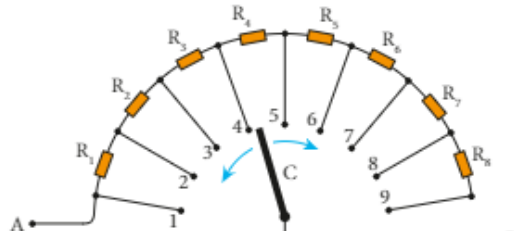
Retirando o invólucro metálico do controle, podemos observar o seguinte:

O cursor é uma haste metálica que gira juntamente com o eixo E, deslizando ao longo da lâmina de grafite, sempre em contato com ela. A mudança de posição do cursor altera o comprimento útil da lâmina de grafite entre A e B. Com isso, a resistência se altera. O mesmo ocorre com a intensidade de i da corrente elétrica.



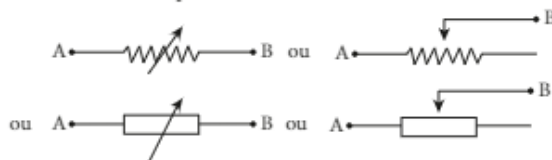
Note que, girando o cursor no sentido horário, diminui-se a resistência da lâmina de grafite percorrida pela corrente. Assim, a intensidade dessa corrente aumenta e, como consequência, aumenta também a intensidade (“volume”) do som que recebemos.

Um resistor de resistência variável como esse é denominado **reostato**. Existem outros tipos de reostato, como, por exemplo, o reostato de pontos:



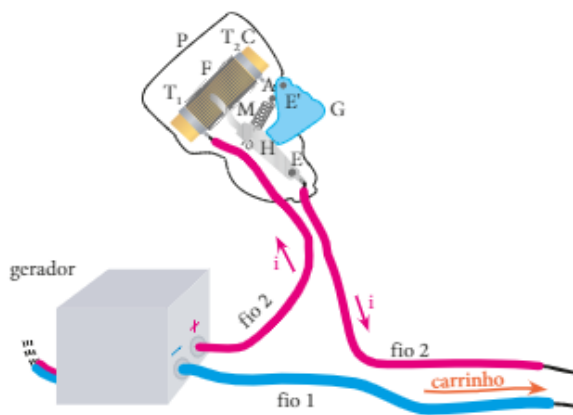
Reostato de pontos. Para cada posição da chave C, temos uma resistência diferente entre A e B.

Os reostatos podem ser simbolizados assim:



Os pontos A e B são os terminais do reostato.

Observe na figura abaixo um sistema de alimentação de um carrinho de brinquedo cuja velocidade é controlada por um reostato:



P: carcaça plástica para alojar o sistema.

C: cilindro isolante.

F: fio de nicromo enrolado em C e ligado aos terminais  $T_1$  e  $T_2$ .

H: haste metálica que gira em torno do eixo E, quando acionamos o gatilho G. Apertando o gatilho, ele gira em torno do eixo E e empurra a haste, cuja extremidade desliza no fio de nicromo, diminuindo a resistência elétrica do circuito e, consequentemente, aumentando a intensidade da corrente no carrinho, que está em série com o reostato.

M: mola com uma extremidade fixa em A e a outra presa na haste. Ela faz a haste voltar quando soltamos o gatilho.

Fio 1: liga um dos polos do gerador diretamente ao carrinho.

Fio 2: primeiro passa pelo reostato para depois alimentar o carrinho.

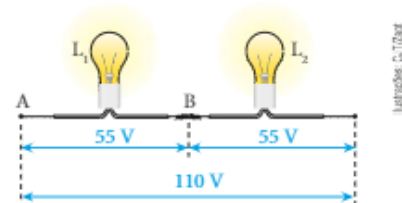
### 3. CURTO-CIRCUITO

Antes de iniciarmos este assunto, é importante retomar a questão comentada 9 do capítulo anterior. Nela verificamos que os fios de cobre das instalações elétricas residenciais têm resistências desprezíveis.

Considere agora uma lâmpada especificada, por exemplo, pelos valores nominais 100 W—110 V. Em funcionamento normal, a intensidade de corrente nessa lâmpada é aproximadamente igual a 1 A, e sua resistência elétrica é de 121  $\Omega$ .

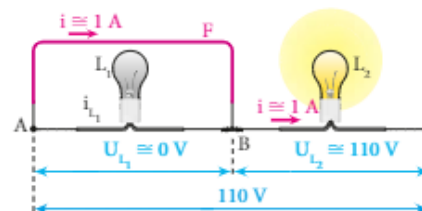
Na análise que faremos a seguir, é desnecessário se preocupar com a influência da temperatura na resistência da lâmpada.

Vamos associar em série duas dessas lâmpadas,  $L_1$  e  $L_2$ , e aplicar uma ddp de 110 V entre os terminais da associação:



Evidentemente, nenhuma das duas lâmpadas terá brilho normal porque a ddp em cada uma delas será de apenas 55 V.

Suponha, agora, que os terminais A e B da lâmpada  $L_1$  sejam interligados por meio de um fio de cobre F, cuja resistência  $R_F$ , como já sabemos, é desprezível ( $R_F \cong 0$ ). Sendo também desprezível a ddp  $U_F$  entre as pontas do fio F, sua introdução praticamente anulou a ddp entre os pontos A e B. E como a lâmpada  $L_1$  está ligada em A e B, a ddp  $U_{L_1}$  entre seus terminais também se tornou praticamente nula. E o que acontece com essa lâmpada?



A intensidade de corrente  $i_{L_1}$  em  $L_1$  será:

$$i_{L_1} = \frac{U_{L_1}}{R_{L_1}} \cong \frac{0}{121} \Rightarrow i_{L_1} \cong 0$$

Portanto a lâmpada  $L_1$  se apaga e tudo se passa como se ela fosse retirada da associação. A lâmpada  $L_2$ , por sua vez, passa a brilhar normalmente porque os 110 V estão agora aplicados nela. A corrente em  $L_2$  valerá, então, aproximadamente 1 A.

Note que essa corrente de 1 A também passa pelo fio F. Não há nenhum problema nisso porque  $U_F$  é desprezível, mas  $R_F$  também é (lembre-se da questão comentada 9 do capítulo anterior).

Mas, afinal, o que é o **curto-circuito**?

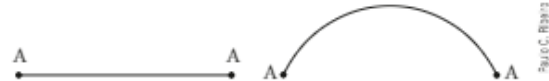
Na associação analisada, é o que fizemos com a lâmpada  $L_1$ , quando interligamos seus terminais por meio do fio F.

Genericamente dois pontos estão em curto-circuito (ou curto-circuitados) quando estão interligados por um fio de resistência desprezível, praticamente anulando a diferença de potencial entre eles.

Quando dois fios da rede elétrica de uma casa entram em contato elétrico, também dizemos que ocorre um curto-circuito. De fato, quando isso acontece, tudo se passa como se esses dois fios fossem interligados por um terceiro fio, de resistência desprezível.

Na análise de circuitos, frequentemente associamos letras aos diversos pontos do circuito. Veja, por exemplo, os pontos **A** e **B** que associamos aos terminais da lâmpada  $L_1$ .

Quando dois pontos estão curto-circuitados, podemos associar a eles uma **mesma letra**, pois estão no mesmo potencial elétrico, ou seja, são **pontos eletricamente equivalentes**. Isso facilita a análise de muitas situações, a princípio complicadas, como veremos. Fica mais fácil também perceber se dois resistores estão ou não em paralelo.



Traços como esses, em representações esquemáticas, simbolizam condutores ideais, isto é, de resistências elétricas desprezíveis. Por não haver diferença de potencial entre suas extremidades, associamos a elas a mesma letra.

## FAÇA VOCÊ MESMO

### Associação de lâmpadas em série e em curto-circuito

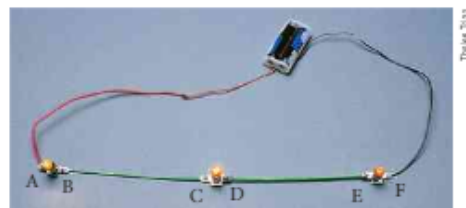
Agora que você aprendeu o que é resistor e como fazer associações com resistores, podemos realizar algumas atividades simples, com material de baixo custo. Para tanto, devemos adquirir os itens que se encontram na lista a seguir.

#### Material necessário

- 5 pequenas lâmpadas de lanterna, **iguais** e com rosca em sua base. Cada uma delas deve ser apropriada para funcionar com duas pilhas em série (cerca de 3 V);
- 5 soquetes com rosca para instalar as lâmpadas;
- 2 pilhas comuns de 1,5 V (tamanho AA, C ou D);
- 1 suporte adequado para acomodar as pilhas **em série**;
- 2 m de fio fino de cobre, com isolamento plástico.

#### Procedimento

- Corte 4 pedaços do fio, cada um com aproximadamente 20 cm, e desencape cerca de 2 cm das duas extremidades de todos eles.
- Instale as pilhas no suporte, associando-as em série (polo positivo de uma ligado ao polo negativo da outra) e, sem precisar ainda usar soquete, ligue uma das lâmpadas aos terminais do suporte. Essa operação, temporária e rápida, tem como objetivo perceber o que vamos chamar de brilho normal de cada lâmpada.
- Em seguida, interligue os terminais de três soquetes, instale neles três lâmpadas e conecte os terminais **A** e **F** (ver fotografia) aos do suporte.



#### Analisando o experimento

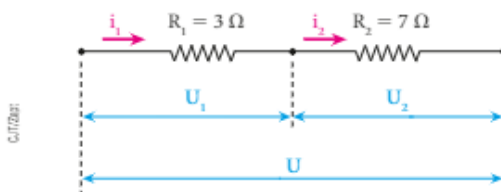
- Se as lâmpadas forem de boa qualidade e realmente iguais, você observará que as três apresentarão o mesmo brilho. Com relação à intensidade da corrente elétrica em cada lâmpada, o que isso prova? Explique.
- O brilho observado em cada lâmpada é normal? Por quê?

3. Caso as lâmpadas não apresentem o mesmo brilho, o que você, com base na teoria, concluirá a respeito da resistência elétrica da que brilhar menos?
4. Usando outro pedaço de fio, com extremidades desencapadas e comprimento suficiente para interligar os terminais A e F, interligue os terminais A e B da primeira lâmpada. O que ocorre com ela? O que acontece com o brilho das outras duas lâmpadas? Explique.
5. Em seguida, interligue com o mesmo fio os terminais A e D. O que ocorre com as lâmpadas que estão entre esses terminais? O que acontece com a terceira lâmpada? Ela agora apresenta o seu brilho normal, ou seja, aquele que teve quando foi ligada sozinha nas pilhas? Explique.
6. Interligue (durante um tempo muito pequeno) os terminais A e F. O que ocorre com as três lâmpadas? Por que o intervalo de tempo dessa ligação deve ser muito pequeno? Isso afeta as pilhas? Pesquise e explique.

## QUESTÕES COMENTADAS



- 1** A figura representa a associação de dois resistores em série, em que a ddp  $U_1$  é igual a 12 V:



Determine:

- a) as intensidades de corrente  $i_1$  e  $i_2$ ;
- b) a ddp  $U_2$  e a ddp  $U$ ;
- c) a potência dissipada em cada resistor.

### RESOLUÇÃO

- a) Aplicando a **Primeira Lei de Ohm** ao resistor de resistência  $R_1$ , temos:

$$U_1 = R_1 i_1 \Rightarrow 12 = 3i_1 \Rightarrow i_1 = 4 \text{ A}$$

Como os dois resistores estão associados em série, tem-se:

$$i_2 = 4 \text{ A}$$

- b) Aplicando a **Primeira Lei de Ohm** a  $R_2$ , obtemos:

$$U_2 = R_2 i_2 \Rightarrow U_2 = 7 \cdot 4 \Rightarrow U_2 = 28 \text{ V}$$

A ddp  $U$  é dada por:

$$U = U_1 + U_2 = 12 + 28 \Rightarrow U = 40 \text{ V}$$

### NOTA

A resistência equivalente da associação é igual a 10  $\Omega$ . A aplicação da **Primeira Lei de Ohm** à resistência equivalente também fornece a ddp  $U$ :

$$U = R_{eq} i = 10 \cdot 4 \Rightarrow U = 40 \text{ V}$$

- c) Usando, por exemplo,  $Pot = U i$  nos resistores de resistências  $R_1$  e  $R_2$ , obtemos, respectivamente:

$$Pot_1 = U_1 i_1 = 12 \cdot 4 \Rightarrow Pot_1 = 48 \text{ W}$$

$$Pot_2 = U_2 i_2 = 28 \cdot 4 \Rightarrow Pot_2 = 112 \text{ W}$$

Observe que, em uma associação em série, a potência dissipada é **maior** no resistor de **maior** resistência. A melhor expressão para comparar as potências dissipadas em resistores **em série** é  $Pot = Ri^2$ , pois  $i$  é uma **constante**. Assim,  $Pot$  será tanto **maior** quanto **maior** for  $R$ .

**Respostas:** a) 4 A e 4 A; b) 28 V e 40 V; c) 48 W e 112 W.

- 2** Para iluminar uma árvore de Natal, são associadas em série lâmpadas iguais, especificadas por: 5 W–5 V. A associação é ligada a uma tomada de 110 V. Determine:

- a) o número de lâmpadas que devem ser associadas, para que cada uma opere de acordo com suas especificações;
- b) a resistência de cada lâmpada;
- c) o que acontecerá com as outras lâmpadas, se uma delas queimar, abrindo o circuito.

### RESOLUÇÃO

- a) A intensidade de corrente é a mesma em todas as lâmpadas. Como essas lâmpadas são iguais, elas têm a mesma resistência elétrica. Portanto, a ddp  $u$  também é igual em todas elas:  $u = 5 \text{ V}$ . Sendo  $n$  o número de lâmpadas associadas e  $U = 110 \text{ V}$ , temos:

$$U = n u \Rightarrow 110 = n \cdot 5 \Rightarrow n = 22$$

- b) Usando, por exemplo,  $Pot = \frac{U^2}{R}$  em uma das lâmpadas, temos:

$$5 = \frac{5^2}{R} \Rightarrow R = 5 \Omega$$

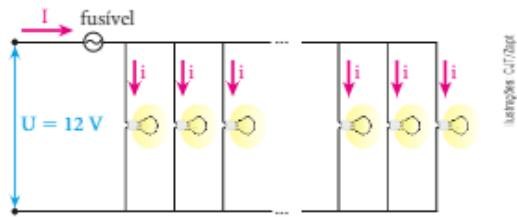
- c) Se uma lâmpada queimar, isto é, se seu filamento for destruído ou pelo menos se partir, as outras lâmpadas se apagarão.

**Respostas:** a) 22 lâmpadas; b) 5  $\Omega$ ;

c) As outras lâmpadas se apagarão.



**3** Lâmpadas iguais, especificadas por 18 W–12 V, são associadas em paralelo, e os terminais da associação são submetidos a uma ddp  $U = 12$  V, rigorosamente constante, como mostra a figura a seguir.



O fusível indicado queima quando a intensidade  $I$  da corrente que o atravessa ultrapassa 20 A.

- Calcule o máximo número de lâmpadas que podem ser associadas sem queimar o fusível.
- O que acontece com as outras lâmpadas se uma delas queimar?

**RESOLUÇÃO**

a) Como as lâmpadas são iguais e se submetem à mesma ddp, a corrente tem a mesma intensidade  $i$  em qualquer uma delas. Usando  $Pot = U i$  em uma das lâmpadas, vamos calcular  $i$ :

$$Pot = U i \Rightarrow 18 = 12 \cdot i \Rightarrow i = 1,5 \text{ A}$$

Sendo  $n$  o número de lâmpadas, temos:

$$I = n i = n \cdot 1,5$$

Como  $I$  deve ser menor ou igual a 20 A:

$$n \cdot 1,5 \leq 20 \Rightarrow n \leq 13,3 \Rightarrow n_{\text{máx}} = 13$$

Podemos resolver o item *a* de outra maneira. Pensando na associação como um todo, temos  $U = 12$  V e  $I_{\text{máx}} = 20$  A. Portanto, a potência máxima que pode ser dissipada é:

$$Pot_{\text{máx}} = U I_{\text{máx}} = 12 \cdot 20 \Rightarrow Pot_{\text{máx}} = 240 \text{ W}$$

Sendo  $n$  o número de lâmpadas, cada uma operando com potência  $Pot = 18$  W, temos:

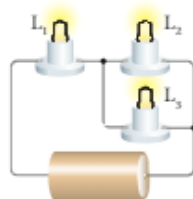
$$n Pot \leq Pot_{\text{máx}} \Rightarrow n \cdot 18 \leq 240 \Rightarrow n_{\text{máx}} = 13$$

b) Nada. Continuam sendo percorridas pela mesma corrente de intensidade  $i$ , uma vez que permanecem submetidas à ddp  $U = 12$  V. Assim, seus brilhos também não se alteram.

**Respostas:** a) 13 lâmpadas.

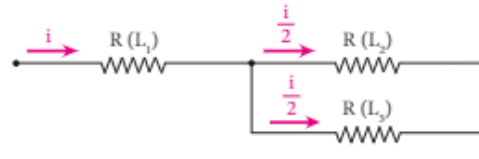
b) Nada. Continuam sendo percorridas por correntes de mesma intensidade  $i$ .

**4** Três lâmpadas iguais,  $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_3$ , estão associadas como indica a figura ao lado. Sendo  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  as potências com que operam as lâmpadas  $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_3$ , respectivamente, compare  $P_2$  com  $P_3$  e  $P_1$  com  $P_2$ .



**RESOLUÇÃO**

Sendo  $R$  a resistência elétrica de cada lâmpada, a associação pode ser representada esquematicamente assim:



Temos, então:

$$P_1 = R i^2; P_2 = R \left(\frac{i}{2}\right)^2 = \frac{1}{4} R i^2; P_3 = R \left(\frac{i}{2}\right)^2 = \frac{1}{4} R i^2$$

Portanto:  $P_2 = P_3$  e  $P_1 = 4P_2$

**Resposta:**  $P_2 = P_3$  e  $P_1 = 4P_2$ .

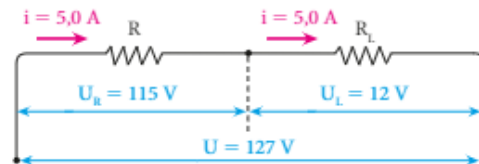
**5** Em uma emergência, surgiu a necessidade de usar uma lâmpada, especificada por 60 W–12 V, em uma tomada de 127 V. Para não queimar a lâmpada, associou-se a ela um resistor de potência adequada, e os terminais dessa associação foram ligados em 127 V. Calcule a resistência  $R$  desse resistor para que a lâmpada funcione conforme suas especificações. Ignore a influência da temperatura na resistividade.

**RESOLUÇÃO**

Para a lâmpada, temos:  $Pot_L = 60$  W e  $U_L = 12$  V. Vamos, então, calcular a intensidade  $i$  da corrente na lâmpada:

$$Pot_L = U_L i \Rightarrow 60 = 12 i \Rightarrow i = 5,0 \text{ A}$$

O resistor pedido precisa estar em série com a lâmpada, para termos a seguinte situação, em que  $U_R + U_L$  é igual a 127 V:

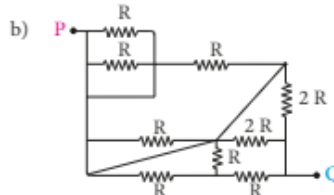
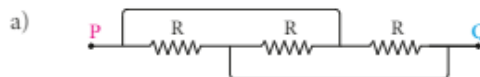


Note que:  $115 \text{ V} + 12 \text{ V} = 127 \text{ V}$

Então:  $U_R = R i \Rightarrow 115 = R \cdot 5,0 \Rightarrow R = 23 \Omega$

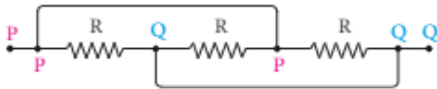
**Resposta:** 23  $\Omega$

**6** Determine a resistência equivalente entre os pontos P e Q nos seguintes casos:

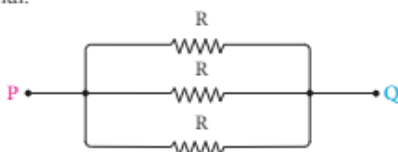


**RESOLUÇÃO**

- a) Os pontos do circuito onde três ou mais terminais estão juntos denominam-se **nós** e cada nó deve ser identificado com uma letra. Os nós localizados nas extremidades de um fio ideal estão no mesmo potencial. Por isso, podemos identificá-los com uma mesma letra:



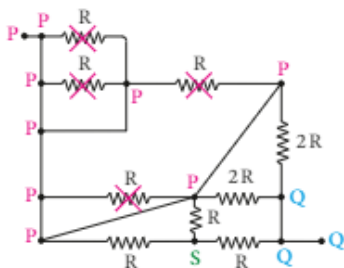
Em seguida, posicionamos todos os nós eletricamente diferentes em diferentes pontos do papel e remontamos o circuito, mantendo os **mesmos terminais** do circuito original:



Concluimos, assim, que os três resistores estão associados em paralelo.

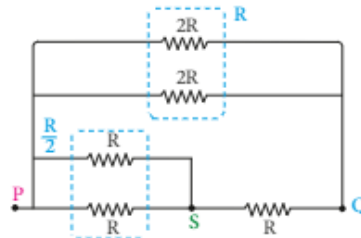
Portanto:  $R_{eq} = \frac{R}{3}$

- b) Repetindo o procedimento anterior, temos:

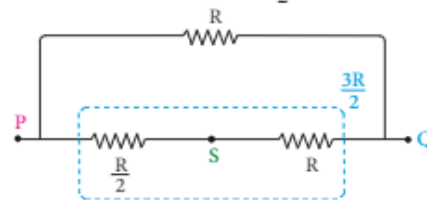


Os resistores que têm a mesma letra nos dois terminais devem ser retirados da associação: eles não "funcionam" porque não se submetem a uma diferença de potencial. Note que o nó identificado pela letra **S** está em um potencial diferente dos potenciais dos nós **P** e **Q**, porque nenhum fio ideal liga **S** a **P** ou a **Q**.

Remontando o circuito, temos:



Temos  $2R$  em paralelo com  $2R$ , o que equivale a  $R$ , e  $R$  em paralelo com  $R$ , o que equivale a  $\frac{R}{2}$ . Assim, temos:



Agora temos  $\frac{R}{2}$  em série com  $R$ , o que equivale a  $\frac{3R}{2}$ .

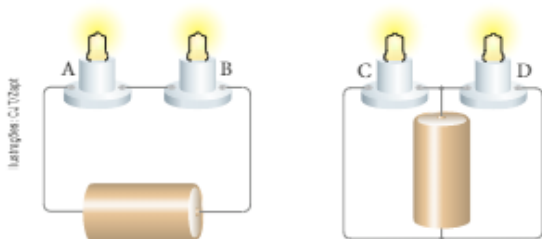
Finalmente, temos  $\frac{3R}{2}$  em paralelo com  $R$ :

$$R_{eq} = \frac{\frac{3R}{2} \cdot R}{\frac{3R}{2} + R} \Rightarrow R_{eq} = \frac{3R}{5}$$

**Respostas:** a)  $\frac{R}{3}$ ; b)  $\frac{3R}{5}$ .

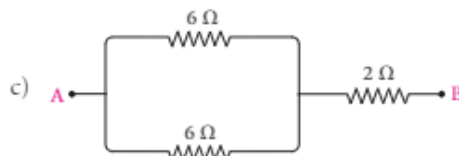
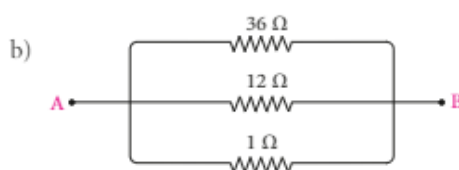
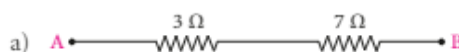
**QUESTÕES PROPOSTAS** FAÇA NO CADERNO.

7. Considere as associações a seguir.



Responda: Como estão associadas as lâmpadas:  
a) A e B?                      b) C e D?

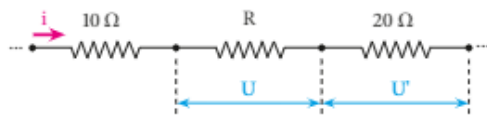
8. Em cada uma das associações ao lado, determine a resistência equivalente entre os pontos A e B:



9. Com relação à associação de resistores em série, indique a alternativa **incorreta**:

- A resistência equivalente à da associação é sempre maior que a de qualquer um dos resistores componentes.
- A intensidade de corrente elétrica é igual em todos os resistores.
- A soma das tensões nos terminais dos resistores componentes é igual à tensão nos terminais da associação.
- A tensão é necessariamente a mesma em todos os resistores.
- A potência elétrica dissipada é maior no resistor de maior resistência.

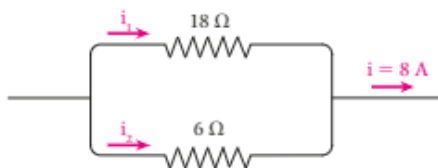
10. No trecho de circuito, temos  $i = 2 \text{ A}$  e  $U = 100 \text{ V}$ . Calcule  $R$  e  $U'$ .



11. Com relação à associação de resistores em paralelo, indique a alternativa **incorreta**.

- A resistência equivalente à da associação é sempre menor que a de qualquer um dos resistores componentes.
- As intensidades de corrente elétrica nos resistores componentes são inversamente proporcionais às resistências desses resistores.
- A tensão é necessariamente igual em todos os resistores componentes.
- A resistência equivalente à da associação é sempre dada pelo quociente do produto de todas as resistências componentes pela soma delas.
- A potência elétrica dissipada é maior no resistor de menor resistência.

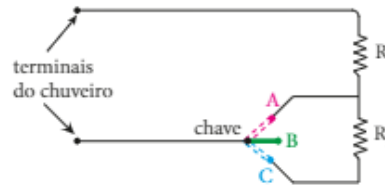
12. Sendo  $i = 8 \text{ A}$ , calcule as intensidades de corrente  $i_1$  e  $i_2$  na associação de resistores a seguir:



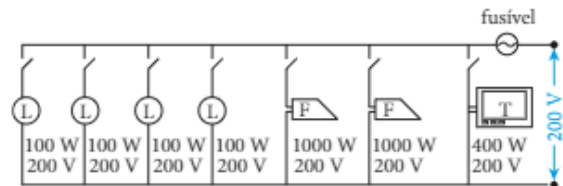
13. Deseja-se montar um aquecedor elétrico de imersão, que será ligado em uma tomada em que a ddp  $U$  é constante. Para isso, dispõe-se de três resistores: um de  $30 \Omega$ , um de  $20 \Omega$  e outro de  $10 \Omega$ . Para o aquecedor ter a máxima potência possível, deve-se usar:

- apenas o resistor de  $10 \Omega$ .
- apenas o resistor de  $30 \Omega$ .
- os três resistores associados em série.
- os três resistores associados em paralelo.
- apenas os resistores de  $10 \Omega$  e  $20 \Omega$ , associados em paralelo.

14. A figura representa esquematicamente a parte elétrica de um chuveiro, cuja chave oferece três opções: **desligado**, **verão** e **inverno**. Associe essas opções às possíveis posições (A, B ou C) da chave.



15. Considere o circuito a seguir, em que L significa lâmpada, F significa ferro de passar roupa e T significa televisor. Junto a cada elemento estão seus valores nominais:

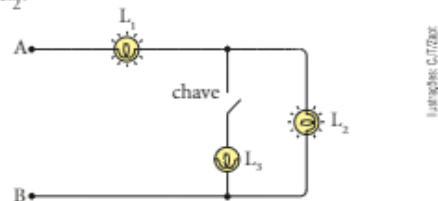


- Determine a corrente máxima que passará pelo fusível, em condições normais de funcionamento.
- Se todo o sistema funcionar durante 2 horas, qual será o consumo de energia elétrica, em kWh?

16. Os terminais de um cordão de 20 lâmpadas iguais, associadas em série, estão ligados em uma tomada de  $120 \text{ V}$ , e cada lâmpada funciona com potência igual a  $5 \text{ W}$ . Uma dessas lâmpadas queimou-se e, em seu lugar, será colocado um pedaço de fio de nicromo. Calcule a resistência desse fio para que as demais lâmpadas continuem operando sem alteração de potência e, portanto, de brilho.

17. Três lâmpadas iguais ( $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_3$ ) são associadas e os terminais A e B da associação são submetidos a uma ddp constante  $U$ , suficiente para que as lâmpadas acendam. Inicialmente, a chave está aberta.

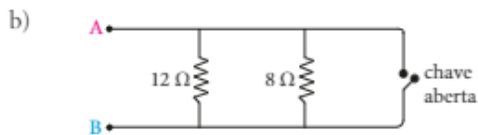
Fechando-se a chave, o que acontece com o brilho das lâmpadas  $L_1$  e  $L_2$ ?



18. Em duas lâmpadas de incandescência A e B encontramos, respectivamente, as seguintes inscrições:  $60 \text{ W}-115 \text{ V}$  e  $100 \text{ W}-115 \text{ V}$ . Essas lâmpadas são associadas em série e os terminais da associação são ligados a uma tomada de  $115 \text{ V}$ . Responda:

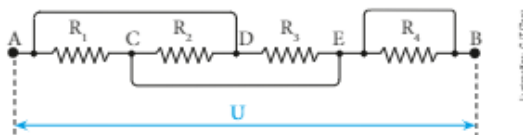
- Qual delas iluminará melhor, comparativamente?
- E se estivessem associadas em paralelo, qual iluminaria melhor?

19. Nos esquemas a seguir, calcule a resistência equivalente entre os pontos A e B:



c) Mesmo esquema do item b, com a chave fechada.

20. Entre os terminais A e B do circuito esquematizado a seguir, há uma diferença de potencial constante e igual a U:



Indique a alternativa correta:

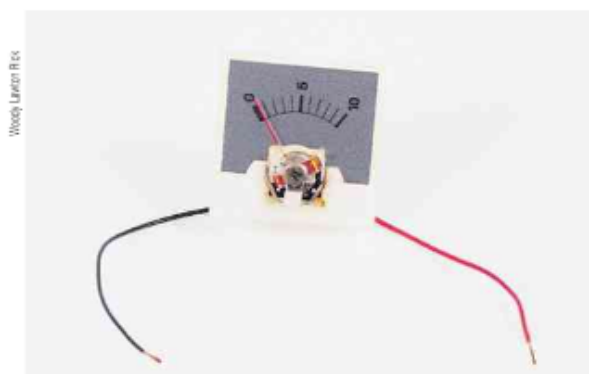
- a) Uma parte da corrente total passa por  $R_4$ .
- b) Não passa corrente em  $R_1$  e em  $R_2$ , porque não há diferença de potencial entre A e D.
- c) Não passa corrente em  $R_2$  e em  $R_3$ , porque não há diferença de potencial entre C e E.
- d) Entre A e C, C e D e D e E, a diferença de potencial é diferente de zero.
- e)  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  estão associados em série.

## 4. MEDIDAS ELÉTRICAS

Já temos informações teóricas suficientes para **calcular** intensidades de corrente, diferenças de potencial e resistências elétricas em diversas situações.

Nos laboratórios e nas oficinas, porém, é muito importante conhecer e saber usar alguns instrumentos que **medem** essas grandezas.

Os medidores analógicos, isto é, aqueles em que um ponteiro se deflete ao longo de escalas graduadas, consistem em um elemento básico denominado **galvanômetro**, ao qual são convenientemente associados resistores adequados. Não é necessário, por enquanto, compreender o princípio de funcionamento do galvanômetro, mesmo porque isso só será possível quando estudarmos **Eletromagnetismo**, na Unidade 3. Basta saber que esse instrumento consegue detectar correntes elétricas de baixíssimas intensidades e que a deflexão de seu ponteiro é proporcional à intensidade da corrente que passa por ele.



Galvanômetro.

O valor máximo indicado na escala de um medidor (galvanômetro com resistores associados) denomina-se **valor de fundo de escala**.

A seguir, vamos ver como os medidores devem ser usados e as condições necessárias para que não provoquem modificações significativas nas grandezas dos circuitos quando neles são introduzidos.

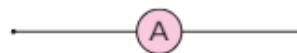
### Medição de intensidade de corrente elétrica

Para medir a intensidade de uma corrente elétrica, usamos um instrumento denominado **amperímetro**.



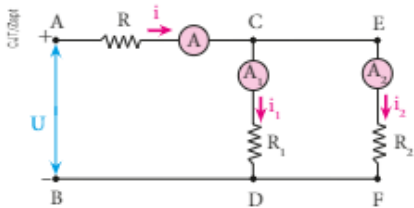
A fotografia mostra um amperímetro cujo valor de fundo de escala é 5 A.

Nos esquemas de circuitos elétricos, o amperímetro é simbolizado assim:



Para medir a intensidade da corrente elétrica em um trecho de um circuito, é necessário que o amperí-

metro “sinta” essa corrente, ou seja, é necessário que a corrente passe por ele. Portanto, o amperímetro deve ser introduzido **em série** com o trecho considerado.



O amperímetro A, em série com o trecho AC, o amperímetro A<sub>1</sub>, em série com o trecho CD, e o amperímetro A<sub>2</sub>, em série com o trecho EF, medem as intensidades das correntes nesses trechos: i, i<sub>1</sub> e i<sub>2</sub>, respectivamente.



O amperímetro indica a intensidade da corrente no circuito.

Vamos ver agora que um amperímetro modifica a intensidade da corrente em um circuito quando é incluído nele, porque esse medidor, como todo condutor, possui uma resistência elétrica, que vamos chamar de **resistência interna** e simbolizar por R<sub>i</sub>.

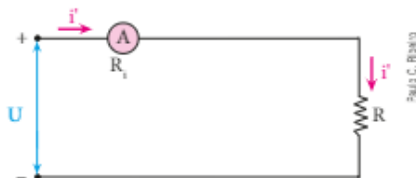
Veja a figura a seguir, em que um resistor de resistência R está submetido a uma diferença de potencial constante U.



Para **calcular** a intensidade i da corrente nesse resistor, fazemos:

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

Vamos, agora, **medir** a intensidade dessa corrente. Para isso, introduzimos o amperímetro em série com o resistor, de modo que a corrente passe por ele.



Pelo fato de ter uma resistência interna R<sub>i</sub>, o amperímetro modifica a intensidade da corrente no resistor, que passa a ter um valor i' diferente de i e dado por:

$$i' = \frac{U}{R + R_i}$$

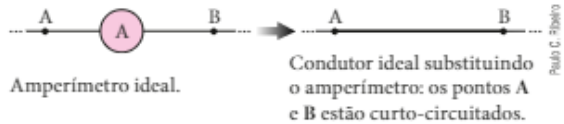
Note, então, que o amperímetro registra um valor i', e não o valor i que queríamos medir, ou seja, sua inclusão no circuito acarreta um erro no resultado experimental, que precisa ser minimizado.

Observe que, na expressão de i', esse valor tenderá a i se R<sub>i</sub> tender a zero, ou seja, quanto **menor** for a resistência interna do amperímetro, mais próxima da corrente original estará a sua indicação. Assim, um bom amperímetro deve ter resistência interna baixa, isto é, desprezível em comparação com a resistência do circuito em que foi introduzido.

Em termos teóricos, podemos falar em **amperímetro ideal**:

Denomina-se **amperímetro ideal** um medidor hipotético em que R<sub>i</sub> é igual a zero. Um amperímetro com essa característica mediria a intensidade de corrente original sem modificá-la.

Então, na resolução de exercícios, um amperímetro ideal pode ser substituído pelo símbolo de um condutor ideal:



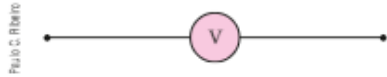
### Medição de diferença de potencial (ddp) ou tensão elétrica

Para medir a diferença de potencial, usamos um instrumento denominado **voltímetro**.

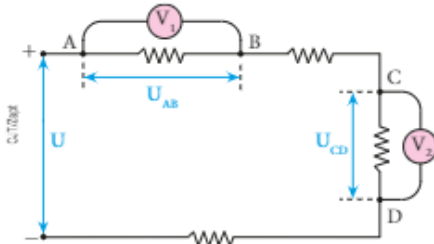


A fotografia mostra um voltmímetro, cujo valor de fundo de escala é 15 V.

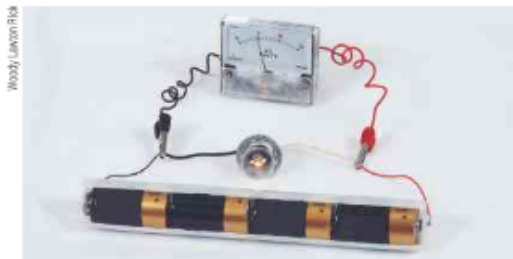
Nos esquemas de circuitos elétricos, o voltímetro é simbolizado assim:



Para medir a diferença de potencial entre dois pontos de um circuito, é necessário que os terminais do voltímetro "sintam" os potenciais desses pontos. Para isso, o voltímetro deve ser ligado **em paralelo** com o trecho do circuito compreendido entre os dois pontos.



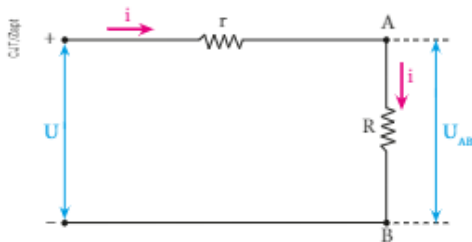
O voltímetro  $V_1$  mede a ddp entre os pontos A e B, e o voltímetro  $V_2$  mede a ddp entre os pontos C e D.



O voltímetro indica a ddp entre os terminais da lâmpada.

Vamos ver agora que a inclusão do voltímetro também acarreta um erro no resultado experimental, ou seja, modifica a ddp entre os dois pontos em que é ligado.

Observe, na figura a seguir, uma associação de dois resistores de resistências  $R$  e  $r$ , submetidos a uma ddp constante  $U$ :



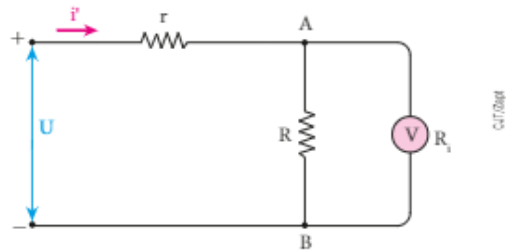
A intensidade  $i$  da corrente nesse circuito é dada por:

$$U = (R + r) i \Rightarrow i = \frac{U}{R + r}$$

Para **calcular** a ddp entre os pontos A e B, por exemplo, fazemos:

$$U_{AB} = R i \Rightarrow U_{AB} = \frac{RU}{R + r}$$

Vamos, agora, **medir** a ddp entre A e B. Para isso, ligamos o voltímetro, que possui uma resistência interna  $R_i$ , em paralelo com o trecho AB:



Fazendo essa ligação, a resistência total do circuito se modifica e, conseqüentemente, a ddp entre A e B também. Assim, o voltímetro vai medir uma ddp diferente daquela que queríamos medir.

O voltímetro só mediria corretamente a ddp original  $U_{AB}$  se a sua inclusão não modificasse a resistência entre os pontos A e B, que, com a presença dele, é dada por:

$$R_{AB} = \frac{R R_i}{R + R_i}$$

Vamos dividir por  $R_i$  o numerador e o denominador dessa expressão:

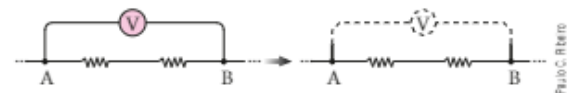
$$R_{AB} = \frac{\frac{R R_i}{R_i}}{\frac{R}{R_i} + \frac{R_i}{R_i}} \Rightarrow R_{AB} = \frac{R}{\frac{R}{R_i} + 1}$$

Observe nessa última expressão que, se  $R_i$  for muito maior que  $R$ , o quociente  $\frac{R}{R_i}$  será desprezível e  $R_{AB}$  será praticamente igual a  $R$ , que é o que queremos. Concluímos, então, que um bom voltímetro deve ter resistência interna elevada, isto é, muito maior que a resistência que está em paralelo com ele.

Em termos teóricos, podemos falar em **voltímetro ideal**.

Denomina-se **voltímetro ideal** um medidor hipotético em que a resistência interna  $R_i$  é infinitamente grande. Esse medidor indicaria a tensão original entre os pontos considerados sem modificá-la.

Então, na resolução de exercícios, um voltímetro ideal equivale a um **circuito aberto**:

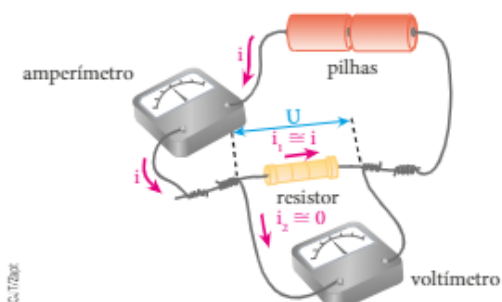


Um voltímetro ideal equivale a um circuito aberto, ou seja, a corrente nele tem intensidade nula porque sua resistência é infinitamente grande.

Note que esse voltímetro hipotético é ideal apenas no que se refere à perturbação provocada no circuito. Se existisse, esse instrumento não funcionaria, pois nenhuma corrente passaria por ele. E é justamente essa corrente que provoca a deflexão do ponteiro, como veremos na Unidade 3.

### Medição de resistência elétrica

Observe a montagem a seguir e suponha que os medidores usados sejam bons: em comparação com a resistência  $R$  do resistor, a resistência interna do amperímetro é desprezível e a do voltímetro é muito maior.



Assim, a intensidade  $i_1$  da corrente que passa pelo resistor é praticamente igual à intensidade  $i$  da corrente no amperímetro. Lendo, então, o valor de  $i$  no amperímetro e a ddp  $U$  no voltímetro, calculamos  $R$ :  $R = \frac{U}{i}$

Existe um instrumento apropriado para medir resistências, denominado **ohmímetro**. Para isso, basta ligar os terminais desse instrumento aos terminais do resistor. Existem, ainda, instrumentos conhecidos como **multímetros**, que servem para medir corrente, tensão e resistência, bastando posicionar adequadamente uma chave seletora para o exercício de cada função.

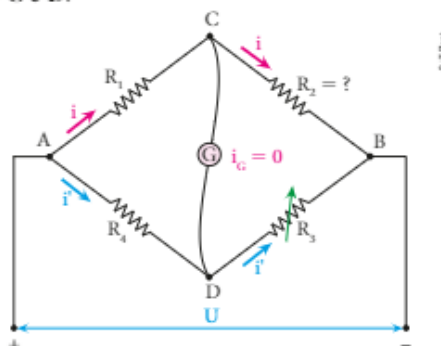


Multímetro analógico.

### Ponte de Wheatstone

A associação de quatro resistores representada na figura a seguir é denominada **ponte de Wheatstone**, e ela é útil na determinação experimental da resistência de um resistor. Recebe esse nome porque foi idealizada pelo físico inglês Charles **Wheatstone** (1802-1875).

Nesta montagem,  $R_1$  e  $R_4$  são resistências conhecidas,  $R_3$  é uma resistência variável, porém conhecida, e  $R_2$  é uma resistência desconhecida, que queremos determinar. Observe, também, a presença de um galvanômetro,  $G$ , com os terminais ligados nos pontos C e D.



Com a intenção de determinar  $R_2$ , variamos  $R_3$  até o galvanômetro indicar zero, ou seja, até que deixe de passar corrente por ele. Quando isso acontecer, os potenciais em C e D serão iguais ( $v_C = v_D$ ) e diremos que a ponte estará em **equilíbrio**. Note que, não havendo corrente no galvanômetro,  $R_1$  e  $R_2$  são percorridas por uma mesma corrente de intensidade  $i$ , enquanto  $R_4$  e  $R_3$  são percorridas por uma mesma corrente de intensidade  $i'$ .

Então, podemos escrever:

$$\begin{cases} U_{AC} = R_1 i \\ U_{AD} = R_4 i' \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} v_A - v_C = R_1 i \\ v_A - v_D = R_4 i' \end{cases}$$

Como  $v_C = v_D$ , temos:

$$R_1 i = R_4 i' \quad (I)$$

Além disso:

$$\begin{cases} U_{CB} = R_2 i \\ U_{DB} = R_3 i' \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} v_C - v_B = R_2 i \\ v_D - v_B = R_3 i' \end{cases}$$

Lembrando novamente que  $v_C = v_D$ , obtemos:

$$R_2 i = R_3 i' \quad (II)$$

Dividindo membro a membro a expressão (I) pela expressão (II), obtemos:

$$\frac{R_1 i}{R_2 i} = \frac{R_4 i'}{R_3 i'} \Rightarrow R_1 R_3 = R_2 R_4$$

Em uma ponte de Wheatstone em equilíbrio, os produtos das resistências de ramos opostos são iguais:

$$R_1 R_3 = R_2 R_4$$

Veja, então, que, conhecendo  $R_1$ ,  $R_3$  e  $R_4$ , podemos usar a expressão obtida para calcular  $R_2$ .

Normalmente, a ponte de Wheatstone é colocada em prática de uma maneira mais simples, substituindo-se dois dos resistores por um fio homogêneo AB, de seção transversal uniforme. Veja isso na figura ao lado, em que os resistores de resistências  $R_3$  e  $R_4$  foram substituídos pelo fio.

Nesse circuito,  $R_1$  é conhecida,  $R_2$  é desconhecida,  $R_3$  é a resistência do trecho DB do fio e  $R_4$  é a resistência do trecho AD.

Para determinar  $R_2$ , deslizamos o cursor (contato móvel) ao longo do fio até ser atingido o equilíbrio da ponte:  $i_G = 0$ .

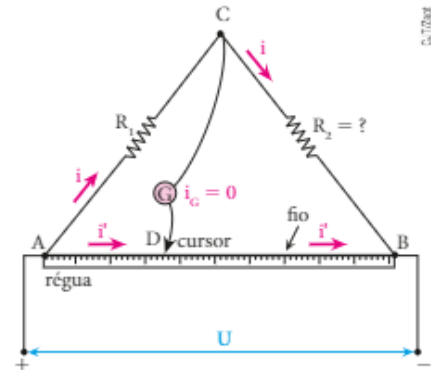
No equilíbrio, sabemos que:  $R_1 R_3 = R_2 R_4$ .

Entretanto, pela **Segunda Lei de Ohm**, as resistências  $R_3$  e  $R_4$  são proporcionais aos comprimentos de fio  $\overline{DB}$  e  $\overline{AD}$ , respectivamente.

Então, podemos escrever:

$$R_1 \overline{DB} = R_2 \overline{AD} \Rightarrow R_2 = \frac{R_1 \overline{DB}}{\overline{AD}}$$

Portanto, conhecendo  $R_1$ , basta medir  $\overline{DB}$  e  $\overline{AD}$  com uma régua para calcular  $R_2$ .



## FAÇA VOCÊ MESMO

### Montando uma ponte de Wheatstone

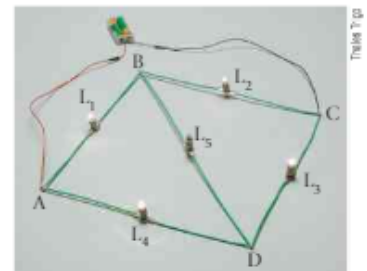
#### Material necessário

- O mesmo material adquirido para o experimento da página 118.

#### Procedimento

I. Monte o circuito da fotografia ao lado.

A lâmpada  $L_5$  não acenderá porque as outras quatro lâmpadas constituem uma ponte de Wheatstone equilibrada (lembre-se de que as resistências das lâmpadas são todas iguais). Assim, não há ddp entre os pontos C e D e, por isso, não há corrente em  $L_5$ .



#### Analisando o experimento

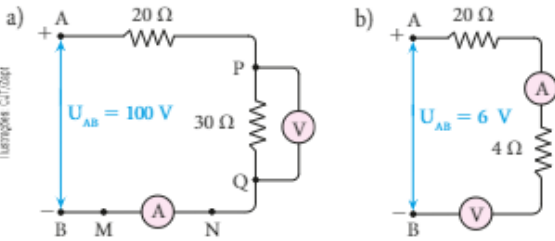
1. Por que a lâmpada  $L_5$  (da diagonal) permanece apagada? Explique.
2. Qual é o valor da tensão entre os pontos C e D?
3. Qual é a intensidade da corrente elétrica na lâmpada  $L_5$ ?
4. Se trocarmos a lâmpada  $L_5$  por outra de resistência diferente, ela acenderá? Explique.
5. Se trocarmos uma das lâmpadas ( $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  ou  $L_4$ ) por outra qualquer, poderemos garantir que a lâmpada  $L_5$  irá acender? Por quê?



# QUESTÕES COMENTADAS

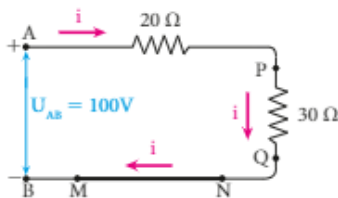


**21** Nos circuitos a seguir, determine as indicações fornecidas pelos medidores, supostos ideais:



**RESOLUÇÃO**

a) Sendo o amperímetro ideal, sua resistência interna é nula. Assim, o amperímetro estabelece um curto-circuito entre os pontos M e N. O voltmímetro, sendo ideal, tem resistência interna infinita e, por isso, nenhuma corrente passa por ele, comportando-se como um ramo aberto do circuito. Temos, então, o seguinte circuito equivalente:



Como  $U_{AB} = R_{AB} i$ , temos:  $100 = 50 i \Rightarrow i = 2 \text{ A}$

O amperímetro indica a intensidade da corrente que o atravessa, ou seja, 2 A.

O voltmímetro mede a diferença de potencial entre os pontos P e Q, que vale:  $U_{PQ} = R_{PQ} i = 30 \cdot 2 \Rightarrow U_{PQ} = 60 \text{ V}$

O voltmímetro indica 60 V.

b) Nesse caso, tanto o voltmímetro como o amperímetro foram ligados em série no circuito. Então, por ser infinita a resistência do voltmímetro ideal, não há corrente no circuito: o circuito está aberto.

Então: O amperímetro indica zero.

Sendo nula a corrente, temos:

$U_{AD} = 20 i = 0 \text{ e}$

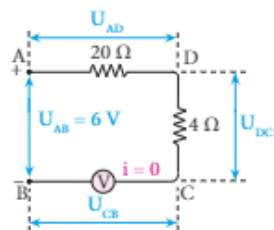
$U_{DC} = 4 i = 0$

Como  $U_{AB} = U_{AD} + U_{DC} + U_{CB}$ , temos:

$6 = 0 + 0 + U_{CB}$

$U_{CB} = 6 \text{ V}$

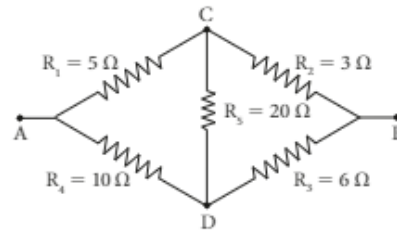
O voltmímetro indica  $U_{CB}$ , ou seja, 6 V.



**Respostas:** a) O amperímetro indica 2 A. O voltmímetro indica 60 V.

b) O amperímetro indica zero. O voltmímetro indica 6 V.

**22** Na associação de resistores dada abaixo, calcule a resistência elétrica equivalente entre os pontos A e B.



**RESOLUÇÃO**

Como  $R_1 R_3 = R_2 R_4$ , concluímos que  $R_1, R_2, R_3$  e  $R_4$  constituem uma ponte de Wheatstone equilibrada. Logo, não há diferença de potencial entre os pontos C e D e não há corrente elétrica em  $R_5$ . Assim,  $R_5$  pode ser eliminada da montagem. Diante disso, temos:

$R_1$  em série com  $R_2 \Rightarrow R_{1,2} = R_1 + R_2 \Rightarrow R_{1,2} = 8 \Omega$

$R_4$  em série com  $R_3 \Rightarrow R_{4,3} = R_4 + R_3 \Rightarrow R_{4,3} = 16 \Omega$

As resistências  $R_{1,2}$  e  $R_{4,3}$  estão em paralelo:

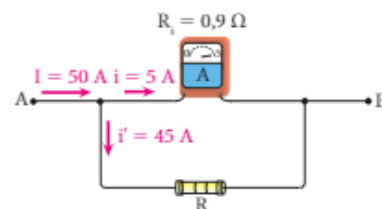
$R_{AB} = \frac{R_{1,2} R_{4,3}}{R_{1,2} + R_{4,3}} = \frac{8 \cdot 16}{8 + 16} \Rightarrow R_{AB} \cong 5,3 \Omega$

**Resposta:** Aproximadamente 5,3  $\Omega$ .

**23** Um técnico possui um amperímetro de 0,9  $\Omega$  de resistência interna e 5 A de fundo de escala. Então, esse amperímetro pode medir correntes de, no máximo, 5 A. Determine como um resistor deve ser associado a ele, bem como a resistência desse resistor, para que se torne capaz de medir intensidades de corrente de até 50 A.

**RESOLUÇÃO**

Para que o fundo de escala desse medidor passe a valer 50 A, devemos associar a ele um resistor de resistência **R em paralelo**. Desse modo, quando uma corrente de 50 A atingir a associação, 5 A deverão passar pelo amperímetro original e 45 A, pelo resistor associado a ele:



Note que **A** e **B** passam a ser os terminais do amperímetro com fundo de escala alterado para 50 A.

Como  $R_1$  e  $R$  estão em paralelo, temos:

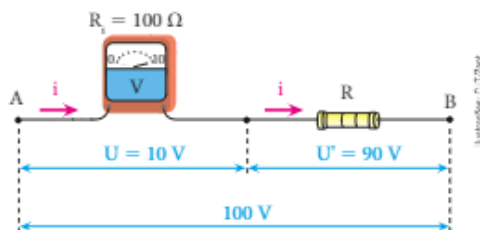
$$Ri' = R_1i \Rightarrow R \cdot 45 = 0,9 \cdot 5 \Rightarrow R = 0,1 \Omega$$

**Resposta:** O resistor deve ser associado em paralelo com o amperímetro e ter resistência igual a  $0,1 \Omega$ .

**24** Um voltímetro de resistência interna igual a  $100 \text{ k}\Omega$  tem fundo de escala de  $10 \text{ V}$ . Um resistor de resistência  $R$  deve ser associado a esse medidor, para que ele se torne capaz de medir até  $100 \text{ V}$ . Calcule  $R$  e diga como deve ser feita a associação.

**RESOLUÇÃO**

Para que o fundo de escala desse medidor passe para  $100 \text{ V}$ , devemos associar a ele um resistor **em série**. Assim, quando aplicarmos  $100 \text{ V}$  entre os terminais da associação, devemos ter  $10 \text{ V}$  no voltímetro original e  $90 \text{ V}$  em  $R$ :



Note que **A** e **B** passam a ser os terminais do voltímetro com fundo de escala alterado para  $100 \text{ V}$ .

Como a intensidade  $i$  da corrente é igual em  $R_1$  e em  $R$ , temos:

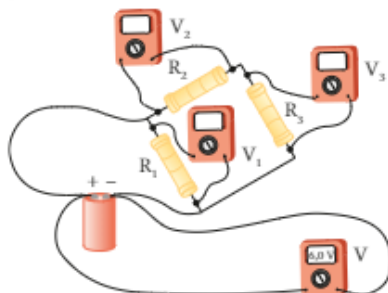
$$\left. \begin{aligned} i &= \frac{U}{R_1} \\ i &= \frac{U'}{R} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{U'}{R} = \frac{U}{R_1} \Rightarrow \frac{90}{R} = \frac{10}{100}$$

Portanto:  $R = 900 \text{ k}\Omega$

**Resposta:**  $900 \text{ k}\Omega$ ; associação em série.

**QUESTÕES PROPOSTAS** FAÇA NO CADERNO.

**25.** No circuito representado na figura, os voltímetros  $V_1, V_2$  e  $V_3$  são digitais e considerados ideais.

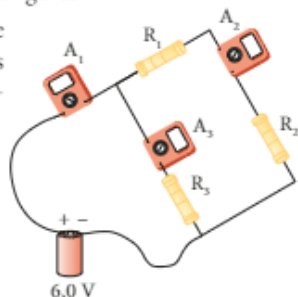


Sabendo que o voltímetro  $V$  indica  $6,0 \text{ V}$  e que as resistências  $R_1, R_2$  e  $R_3$  dos três resistores são respectivamente iguais a  $1,0 \Omega, 0,5 \Omega$  e  $2,5 \Omega$ , determine as indicações dos voltímetros  $V_1, V_2$  e  $V_3$ .

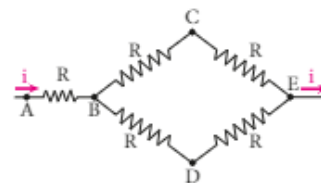
**26.** Uma bateria fornece uma ddp de  $6,0 \text{ V}$  à associação de resistores representada na figura.

Os amperímetros  $A_1, A_2$  e  $A_3$  são digitais e supostos ideais. Determine suas indicações, sabendo que:

- $R_1 = 1,0 \Omega;$
- $R_2 = 3,0 \Omega;$
- $R_3 = 5,0 \Omega.$



**27.** Os cinco resistores representados na figura ao lado têm a mesma resistência elétrica  $R$ .

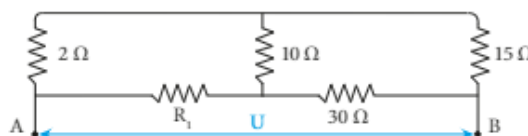


Estando com os pés sobre um piso isolante, vamos segurar um dos pontos (**A, B, C, D** ou **E**) com uma mão e outro ponto com a outra mão. Em que par de pontos certamente não há perigo de "choque"?

**28.** Um medidor de intensidade de corrente, cuja resistência interna vale  $0,18 \Omega$ , pode medir, no máximo,  $1 \text{ A}$ . Calcule a resistência do resistor que deve ser associado a esse medidor para que ele se torne capaz de medir intensidades de corrente de até  $10 \text{ A}$ . Especifique como deve ser feita a associação do resistor com o medidor.

**29.** O fundo de escala de um voltímetro de  $1 \text{ M}\Omega$  de resistência interna é igual a  $50 \text{ V}$ . Determine a resistência do resistor que deve ser associado a ele, de modo que se torne capaz de medir tensões de até  $1000 \text{ V}$  e especifique como deve ser feita a associação.

**30.** No circuito representado a seguir, calcule  $R_1$  para que a potência dissipada no resistor de  $10 \Omega$  seja nula.





# CIRCUITOS ELÉTRICOS

## 1. GERADORES DE ENERGIA ELÉTRICA

Como já vimos, a função do gerador de energia elétrica é fornecê-la ao circuito que ele alimenta. Essa energia é fruto da conversão de alguma modalidade de energia não elétrica em energia elétrica.

A seguir, veremos diversas denominações que esses geradores podem receber, de acordo com a modalidade de energia de que dispõem para produzir energia elétrica.

### Geradores mecânicos

São os que convertem energia mecânica em energia elétrica. É o caso dos geradores das usinas hidrelétricas.

Olivier Rousseaux



Os geradores das usinas hidrelétricas usam a energia mecânica da água para produzir energia elétrica. Itaipu, Foz do Iguaçu – PR. Novembro de 2015.

### Geradores químicos

São os que convertem energia potencial química em energia elétrica. Podemos citar como exemplo as pilhas e as baterias.



Woody Jansen / iStock

Pilhas e baterias são o tipo mais comum de geradores químicos.

### Geradores luminosos

São os que convertem energia luminosa em energia elétrica. É o que ocorre, por exemplo, com os fotômetros de máquinas fotográficas, nos quais surge um sinal elétrico em conformidade com a intensidade luminosa do ambiente visado.



CRESESb

Este veículo dotado de células solares, nas quais a energia solar é convertida em energia elétrica, foi desenvolvido pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (Cresesb), instituição sediada no Rio de Janeiro que busca o desenvolvimento e uso das fontes de energia solar e eólica no Brasil.

## Geradores térmicos

São os que convertem energia térmica diretamente em energia elétrica (efeito termoelétrico).



O termopar é usado para medir temperaturas que podem variar em uma faixa muito ampla. Por exemplo, aquecendo a junção de dois fios de metais diferentes (no caso, cobre e constantan), surge uma ddp entre as outras extremidades, que estão em temperatura mais baixa.

Toda a teoria que vamos desenvolver a seguir, em Eletrodinâmica, tratará apenas de geradores químicos de corrente contínua.

## Elementos que caracterizam um gerador

Quando um gerador não é percorrido por corrente elétrica, ou seja, quando ele não está ligado a nada, existe entre seus terminais uma diferença de potencial denominada **força eletromotriz (fem)** ou **tensão em vazio**, que vamos simbolizar por  $\mathcal{E}$ .

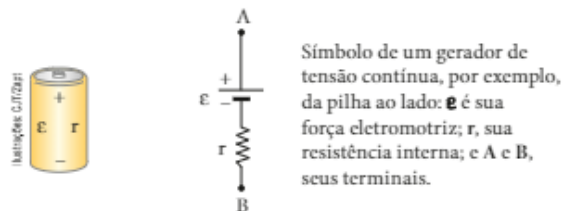
Entretanto, ao ser percorrido por corrente elétrica, a ddp  $U$  entre os terminais de um gerador torna-se menor que  $\mathcal{E}$ . Isso acontece porque o gerador, como todo condutor, possui uma resistência elétrica.

Essa resistência é denominada **resistência interna** do gerador, que vamos simbolizar por  $r$ . Evidentemente, não se trata de um resistor colocado dentro do gerador pelo seu fabricante, mas da resistência própria dos materiais de que ele é composto.



Em uma pilha comum, a força eletromotriz é igual a 1,5 V. Isso significa que a diferença de potencial entre seus terminais é igual a 1,5 V quando ela está, por exemplo, dentro de sua embalagem, ou seja, desligada.

Um gerador de tensão contínua é representado nos esquemas de circuitos pelo símbolo a seguir:

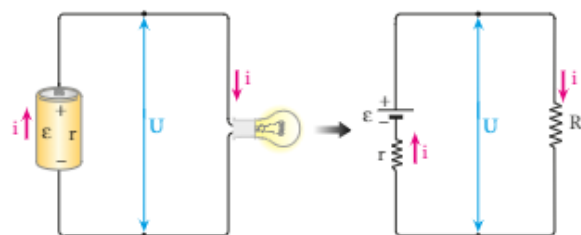


Embora a grandeza  $\mathcal{E}$  seja chamada (impropriamente) de força eletromotriz, é importante destacar que não se trata de uma força, mas de uma diferença de potencial.

## Equação do gerador

Vamos, agora, determinar a expressão que fornece a tensão  $U$  entre os terminais do gerador em função da intensidade  $i$  da corrente que o percorre, expressão conhecida como **equação do gerador**.

Para isso, observe a figura a seguir, em que temos uma pilha ligada a uma lâmpada e a correspondente representação esquemática.



Suponha  $\mathcal{E} = 1,5 \text{ V}$ ,  $r = 0,1 \Omega$  e  $i = 2 \text{ A}$ . O valor de  $\mathcal{E}$  (1,5 V) significa que a pilha produz 1,5 J de energia elétrica por coulomb de carga que passa por ela. A diferença de potencial na resistência interna é dada pelo produto  $ri$ :

$$ri = 0,1 \Omega \cdot 2 \text{ A} = 0,2 \text{ V}$$

Isso significa que a energia elétrica dissipada dentro da própria pilha é igual a 0,2 J por coulomb que passa por ela. Portanto, o filamento da lâmpada recebe 1,3 J (1,5 J - 0,2 J) de cada coulomb que passa por ele, ou seja, recebe uma ddp  $U$  igual a 1,3 V.

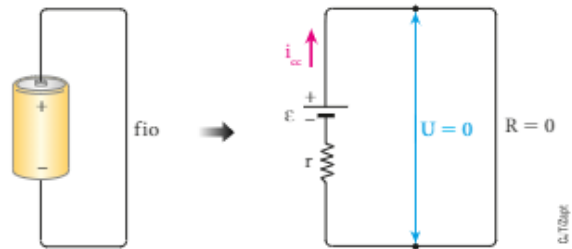
Dessa análise podemos perceber que a ddp  $U$  disponível entre os terminais do gerador é a diferença entre a fem  $\varepsilon$  e o produto  $ri$ , o que nos leva à seguinte expressão, que é a **equação do gerador**:

$$U = \varepsilon - ri$$

Observe que a ddp  $U$  só será igual a  $\varepsilon$  se  $i$  for igual a zero, ou seja, se o gerador estiver desligado (circuito aberto).

### Gerador em curto-circuito

Dizemos que um gerador está curto-circuitado quando seus terminais estão interligados por um fio de resistência elétrica desprezível, como podemos ver na figura a seguir.



Nessa situação, a ddp entre os terminais do gerador é nula. Isso significa que toda a força eletromotriz que ele produz fica aplicada em sua resistência interna.

Fazendo  $U = 0$  na equação do gerador, obtemos a intensidade da corrente que o percorre quando curto-circuitado, chamada **corrente de curto-circuito** ( $i_{cc}$ ):

$$U = \varepsilon - ri \Rightarrow 0 = \varepsilon - ri_{cc} \Rightarrow i_{cc} = \frac{\varepsilon}{r}$$

A resistência interna de um gerador em bom estado é muito pequena e, portanto,  $i_{cc}$  é muito grande. Por isso, uma pilha ou bateria curto-circuitada pode se aquecer tanto a ponto de ocorrerem vazamentos e sérios acidentes.

## FAÇA VOCÊ MESMO

### Estudando lâmpadas associadas em paralelo

#### Material necessário

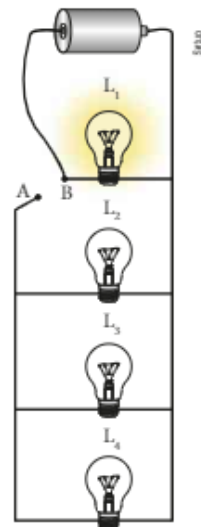
- 1 metro de fio de cobre;
- 4 pequenas lâmpadas iguais de lanterna, com rosca na base e apropriadas para funcionar com 3 V;
- 4 soquetes com rosca para instalar as lâmpadas;
- 1 pilha de 1,5 V.

#### Procedimento

- Associe em paralelo três das quatro lâmpadas. Com relação à quarta lâmpada, conecte um dos terminais à associação e deixe o outro desligado (ver esquema).
- Interligue os terminais A e B e observe as lâmpadas  $L_2$ ,  $L_3$  e  $L_4$ , que estavam apagadas. Note que elas acendem e há uma alteração do brilho de  $L_1$ .

#### Analisando o experimento

- Quando os terminais A e B foram interligados, o brilho de  $L_1$  aumentou ou diminuiu? Explique por quê.



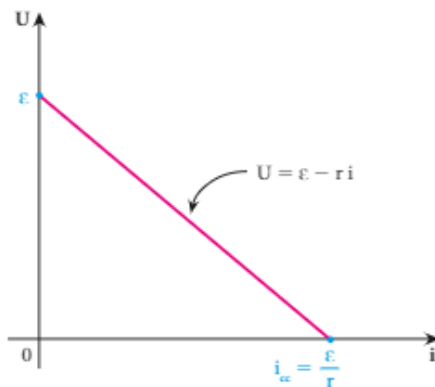
## Curva característica do gerador

Vamos fazer agora uma análise do gráfico da ddp ( $U$ ) entre os terminais do gerador, em função da intensidade da corrente que o percorre. Esse gráfico é a **curva característica do gerador**.

Note que a função  $U = \varepsilon - r i$  é do primeiro grau em  $i$ . Portanto, sua representação gráfica é um segmento de reta e bastam os dois pontos para que o gráfico fique determinado:

- 1º ponto (gerador em circuito aberto):  $U = \varepsilon$ , e  $i = 0$
- 2º ponto (gerador curto-circuitado):  $U = 0$ , e  $i_{cc} = \frac{\varepsilon}{r}$

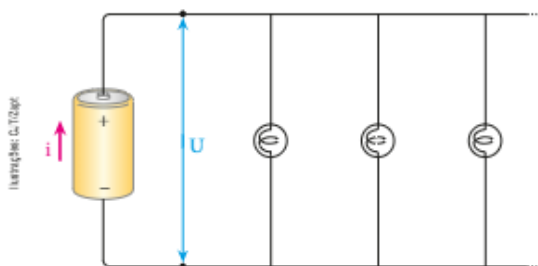
Veja esses pontos marcados no diagrama a seguir, bem como o gráfico obtido.



Curva característica de um gerador.

Note nesse gráfico que, quanto maior é a intensidade da corrente no gerador, menor é a ddp  $U$  entre seus terminais.

Para facilitar o entendimento, imagine uma pilha ligada a uma associação de lâmpadas em paralelo, conforme figura a seguir.



Quanto mais lâmpadas forem ligadas, mais intensa será a corrente na pilha e, portanto, maior será

a queda  $r i$  em seu interior. Com isso, menor será a ddp  $U$  ( $U = \varepsilon - r i$ ) disponível entre seus terminais. Você pode concluir então que, quanto maior a quantidade de lâmpadas ligadas, menor será o brilho de **cada uma** delas.

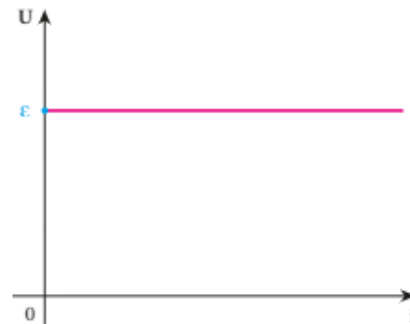
Talvez você já tenha observado o seguinte fato: uma pessoa ligou o chuveiro elétrico de sua casa e o brilho das lâmpadas acesas diminuiu. Esse fenômeno é análogo ao da figura anterior. De fato, quando o chuveiro é ligado, a corrente elétrica aumenta consideravelmente nos fios que trazem energia elétrica até a casa. E, quando esses fios são bastante longos, suas resistências já não são tão desprezíveis!

## Gerador ideal

O gerador ideal é um gerador hipotético em que a resistência interna é **nula**. Assim, a ddp  $U$  disponível entre seus terminais sempre é igual à sua força eletromotriz  $\varepsilon$ :

$$U = \varepsilon - r i = \varepsilon - 0 \cdot i \Rightarrow U = \varepsilon$$

Por isso, a curva característica de um gerador ideal tem o seguinte aspecto:



Em esquemas de circuitos, um gerador ideal é simbolizado por:

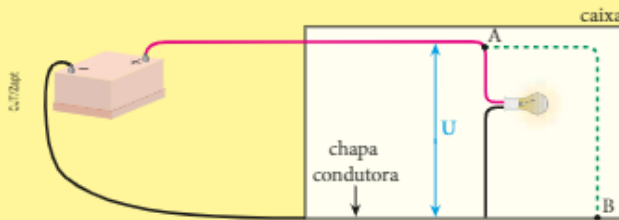


É importante saber que, em geral, considerar ideal um determinado gerador é uma aproximação muito boa. De fato, em ótimas condições, as baterias dos automóveis têm resistência interna menor que  $0,01 \Omega$  e as pilhas comuns, da ordem de  $0,1 \Omega$ .



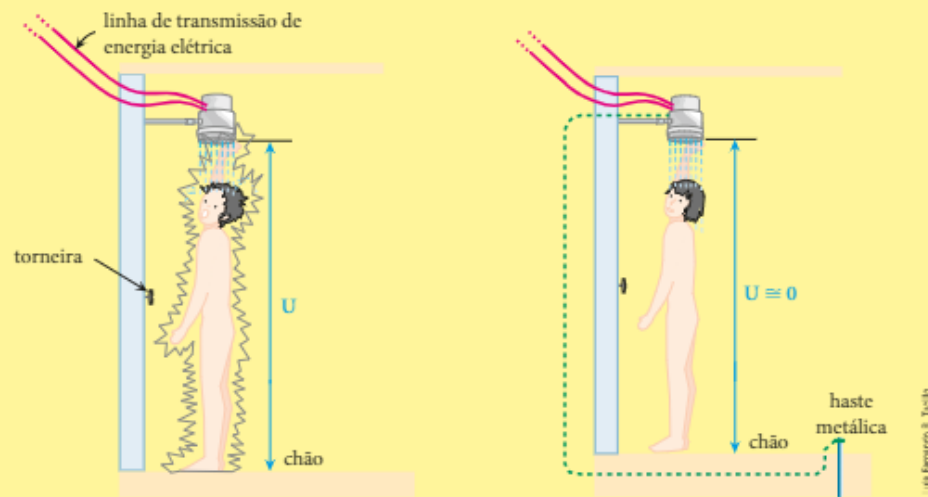
### Para que "aterrar" o chuveiro elétrico?

Imagine uma lâmpada acesa dentro de uma caixa, cuja base inferior é uma chapa condutora. Essa lâmpada é alimentada por uma bateria situada fora da caixa.



Se um fio de cobre for ligado entre os pontos A e B, como indica o tracejado verde, a lâmpada será curto-circuitada e apagará porque a ddp  $U$  entre seus terminais irá se tornar desprezível. Com isso, a ddp  $U$  que estava submetida a lâmpada antes de se ligar o fio estará aplicada na resistência interna da bateria, que irá se aquecer bastante.

Imagine, agora, que uma pessoa esteja tomando banho e que ocorra o seguinte acidente: um dos fios (fase) que alimentam o chuveiro encosta no invólucro metálico do aparelho. Se essa pessoa, com os pés no chão (o chão corresponde à chapa condutora da situação anterior), encostar a mão no chuveiro, levará um perigoso choque, porque entre o invólucro metálico e o solo existe uma ddp capaz de provocar esse efeito. Se os canos da rede hidráulica forem metálicos, isso também ocorrerá se a pessoa tocar a torneira.



Suponha, porém, que exista um fio de cobre ligando o invólucro do chuveiro a uma haste metálica de alguns metros enterrada (esse fio está indicado pelo tracejado verde). Nesse caso, a pessoa, que corresponde à lâmpada da situação anterior, estará curto-circuitada e não levará choque algum, já que a ddp entre sua mão e seus pés será desprezível.

A ddp que estaria aplicada na pessoa, se não houvesse o fio de cobre, é transferida para a linha de transmissão, que faz aqui o papel da bateria.

Esse fio de cobre que acabou de salvar a pessoa é o que chamamos de fio-terra.

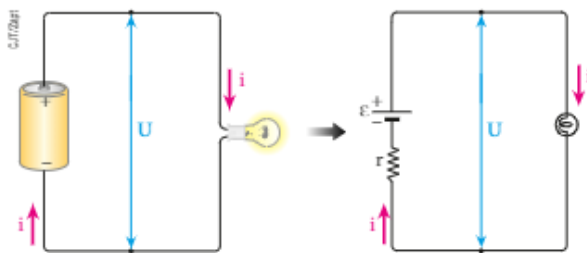
#### NOTAS:

- Para evitar complicações desnecessárias, consideramos o chuveiro ligado diretamente à linha de transmissão, o que não é normal.
- O fio-terra também evita pequenos choques, na torneira do chuveiro, decorrentes da condução elétrica através da própria água, que contém íons.

## Potências elétricas no gerador: total, útil e desperdiçada

Antes de iniciar este novo assunto, é preciso entender uma diferença bastante significativa. Quando determinada quantidade de energia é dissipada num resistor, sabe-se que ela foi transformada em energia térmica. Acontece que essa dissipação pode ser útil, como no caso de um chuveiro, ou inútil e indesejável, como quando ocorre em fios de ligação ou no interior de uma pilha. Por isso preferimos chamar a energia inutilmente dissipada de **energia desperdiçada**.

Vamos, agora, analisar a potência elétrica no gerador. Para isso, veja a figura a seguir, em que uma pilha alimenta uma lâmpada:



A potência elétrica que a pilha entrega à lâmpada é a potência elétrica **útil** ( $Pot_u$ ) do gerador. Essa potência que a lâmpada está recebendo e que é dissipada nela pode ser expressa por:

$$Pot_u = U i$$

À potência elétrica dissipada na resistência interna da pilha vamos dar o nome de potência elétrica **desperdiçada** pelo gerador ( $Pot_d$ ), que pode ser expressa em função da intensidade da corrente  $i$  e da sua resistência interna  $r$  por:

$$Pot_d = r i^2$$

Se você adicionar a potência útil com a desperdiçada, encontrará a potência elétrica **total** produzida pelo gerador ( $Pot_t$ ):

$$Pot_t = Pot_u + Pot_d \Rightarrow Pot_t = U i + r i^2$$

$$\text{Logo: } Pot_t = (U + r i) i$$

$$\text{Como } U = \varepsilon - r i, \text{ temos: } U + r i = \varepsilon.$$

$$\text{Portanto: } Pot_t = \varepsilon i$$

## Rendimento elétrico do gerador

Quando um gerador alimenta um dispositivo qualquer, parte da potência elétrica total que ele gera é transferida a esse dispositivo, sendo a outra parte desperdiçada, isto é, dissipada inutilmente em sua própria resistência interna.



Assim, denomina-se **rendimento elétrico** com que um gerador está operando o número  $\eta$  que corresponde à fração da potência elétrica total que está sendo transferida para o dispositivo que ele alimenta:

$$\eta = \frac{Pot_u}{Pot_t}$$

Como  $Pot_u = U i$  e  $Pot_t = \varepsilon i$ , temos também:

$$\eta = \frac{U i}{\varepsilon i} \Rightarrow \eta = \frac{U}{\varepsilon}$$

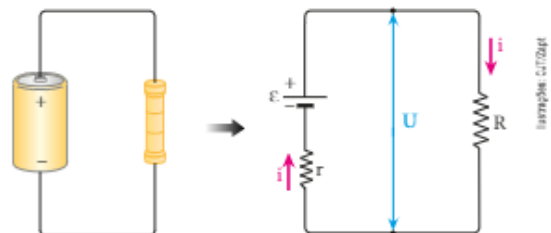
Note que, em um gerador real, a potência útil é menor que a potência total. Entretanto, no gerador ideal, a potência útil é igual à total. Assim, englobando o caso teórico e o caso real, temos:

$$0 \leq \eta \leq 1 \quad \text{ou} \quad 0 \leq \eta \leq 100\%$$

(em porcentagem)

## 2. CIRCUITO SIMPLES

Damos o nome de **circuito simples** a qualquer circuito no qual um gerador alimenta um resistor de resistência  $R$ . Na figura a seguir, podemos observar a representação de um circuito simples:





Olhando para o gerador, podemos escrever:

$$U = \varepsilon - r i \quad (\text{I})$$

Olhando, agora, para o resistor, temos:

$$U = R i \quad (\text{II})$$

Das expressões (I) e (II), obtemos:

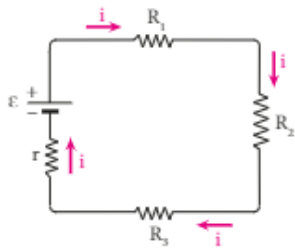
$$\varepsilon - r i = R i \Rightarrow \varepsilon = (R + r) i$$

Chamando a soma de todas as resistências ( $R + r$ ) de **resistência equivalente do circuito** ( $R_{\text{eq}}$ ), temos:

Em um circuito simples, a força eletromotriz (ddp total) é igual ao produto da resistência elétrica total do circuito pela intensidade da corrente elétrica:

$$\varepsilon = R_{\text{eq}} i$$

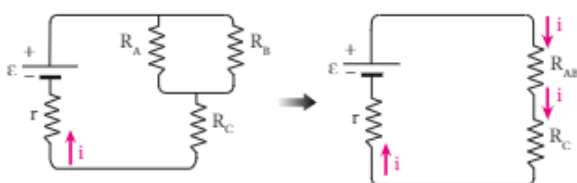
É importante saber que a equação  $\varepsilon = R_{\text{eq}} i$  não vale apenas para o caso de um circuito simples, tal como foi definido. Ela continua válida quando o gerador alimenta uma quantidade **qualquer** de resistores, desde que eles estejam em série (circuito de “caminho” único), como representado a seguir.



Para esse circuito, temos:

$$\varepsilon = R_{\text{eq}} i \Rightarrow \varepsilon = (R_1 + R_2 + R_3 + r) i$$

Já no próximo exemplo, você só poderá usar a equação  $\varepsilon = R_{\text{eq}} i$  depois de transformar o circuito dado em um circuito de “caminho” único. Para isso, terá de substituir  $R_A$  e  $R_B$ , que estão em paralelo, pela resistência equivalente  $R_{AB} = \frac{R_A R_B}{R_A + R_B}$ .

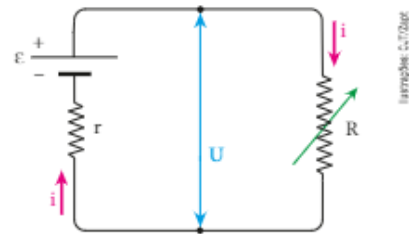


Agora, também poderá escrever:

$$\varepsilon = R_{\text{eq}} i \Rightarrow \varepsilon = (R_{AB} + R_C + r) i$$

### 3. MÁXIMA TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA

Veja, na figura a seguir, a representação esquemática de um gerador alimentando um reostato (resistor de resistência variável).



A potência elétrica transferida pelo gerador ao reostato (potência útil) é dada por:  $\text{Pot}_u = U i$

Como  $U = \varepsilon - r i$ , obtemos:

$$\text{Pot}_u = (\varepsilon - r i) i \Rightarrow \text{Pot}_u = \varepsilon i - r i^2$$

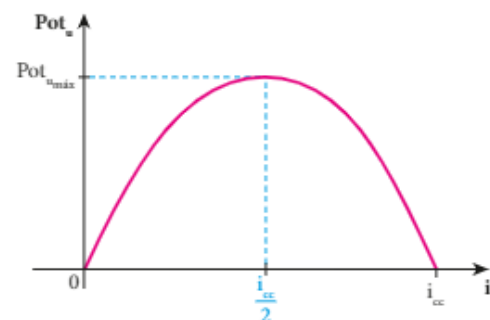
Note que  $\text{Pot}_u$  depende da intensidade da corrente conforme uma função do 2º grau em  $i$ . Portanto, o gráfico de  $\text{Pot}_u$  em função de  $i$  é um arco de parábola.

Observe que, se o gerador estiver em circuito aberto, teremos  $i = 0$  e, conseqüentemente,  $\text{Pot}_u = 0$ . E, se o gerador for curto-circuitado, teremos  $i = i_{\text{cc}} = \frac{\varepsilon}{r}$  e, conseqüentemente:

$$\text{Pot}_u = \varepsilon i - r i^2 = \varepsilon \cdot \frac{\varepsilon}{r} - r \cdot \frac{\varepsilon^2}{r^2} = 0$$

Assim, a potência útil será nula tanto no circuito aberto ( $i = 0$ ) como no curto-circuito ( $i = i_{\text{cc}}$ ). No caso do curto-circuito, toda potência elétrica gerada é desperdiçada no próprio gerador.

Vamos traçar, agora, o gráfico da potência útil em função da intensidade de corrente.



Da simetria do gráfico, concluímos que, quando o gerador transfere máxima potência ao reostato ( $\text{Pot}_{u_{\text{max}}}$ ), a intensidade de corrente elétrica no circuito é a metade da corrente de curto-circuito.

Nesse caso, temos:

$$i = \frac{i_{cc}}{2} = \frac{\epsilon}{2r} \Rightarrow i = \frac{\epsilon}{2r} \quad (\text{Pot}_{u_{\max}})$$

Vamos ver qual é o valor de U nessa situação:

$$U = \epsilon - ri = \epsilon - r \frac{\epsilon}{2r} \Rightarrow U = \frac{\epsilon}{2} \quad (\text{Pot}_{u_{\max}})$$

Assim, quando o gerador transfere máxima potência, a ddp U entre seus terminais é a metade da sua força eletromotriz.

Vamos calcular, agora, a resistência elétrica do reostato, na mesma situação:

$$\epsilon = (R + r) i \Rightarrow \epsilon = (R + r) \frac{\epsilon}{2r}$$

$$R = r \quad (\text{Pot}_{u_{\max}})$$

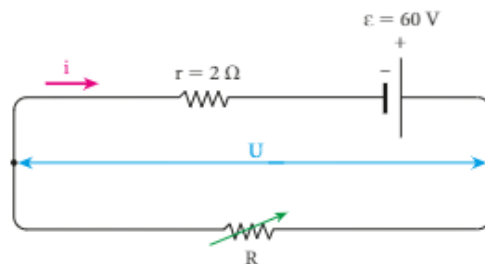
Veja, então, que a condição para o gerador transferir máxima potência ao reostato é que a resistência do reostato seja igual à resistência interna do gerador. Quando isso acontece, dizemos que o gerador e o circuito externo (no caso, o reostato) estão "casados".

Finalizando, vamos calcular o rendimento elétrico do gerador quando ele está transferindo máxima potência:

$$\eta = \frac{U}{\epsilon} = \frac{\frac{\epsilon}{2}}{\epsilon} \Rightarrow \eta = 0,5 \text{ ou } \eta = 50\% \quad (\text{Pot}_{u_{\max}})$$

Observe que a máxima transferência de potência ocorre com um rendimento apenas razoável. Por isso a condição de máxima transferência de potência raramente é imposta a sistemas de grande potência, pois as perdas são muito grandes: perde-se uma quantidade igual à que é transferida.

No exemplo apresentado a seguir, você pode conferir tudo o que foi visto sobre máxima transferência de potência.



Como  $\epsilon = (R + r) i$ , temos:  $i = \frac{\epsilon}{R + r}$

Usando as equações  $i = \frac{\epsilon}{R + r}$ ,  $U = Ri$ ,  $\text{Pot}_t = \epsilon i$ ,  $\text{Pot}_u = U i$  e  $\eta = \frac{U}{\epsilon}$ , para R igual a 0 Ω, 1 Ω, 2 Ω, 3 Ω e 4 Ω, vamos preencher o quadro a seguir:

R (Ω)	i (A)	U (V)	Pot <sub>t</sub> (W)	Pot <sub>u</sub> (W)	η (%)
0	30	0	1800	0	0
1	20	20	1200	400	33
2	15	30	900	450	50
3	12	36	720	432	60
4	10	40	600	400	67

Na linha (I), temos o caso de gerador curto-circuitado ( $i_{cc} = 30 \text{ A}$ ).

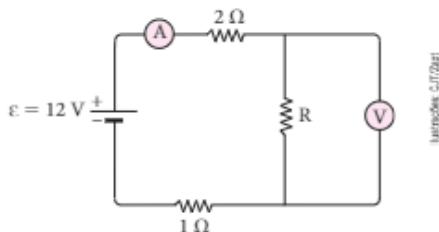
Na linha (III), temos o caso de máxima potência útil. Observe que  $R = r = 2 \Omega$ ;

$$i = \frac{i_{cc}}{2} = 15 \text{ A}; U = \frac{\epsilon}{2} = 30 \text{ V e } \eta = 50\%.$$

Nas linhas (IV) e (V), temos potência útil um pouco menor do que a máxima, mas com a vantagem de o rendimento ser maior.

## QUESTÕES COMENTADAS

**1** No circuito abaixo, considere ideais o gerador, o amperímetro A e o voltímetro V.

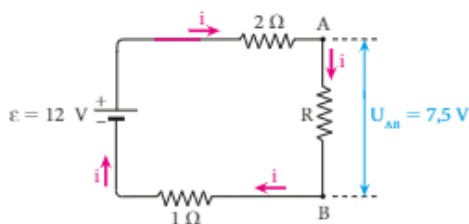


Sabendo que a leitura no voltímetro é igual a 7,5 V, determine:

- a) a resistência R do resistor em paralelo com o voltímetro;
- b) a leitura no amperímetro.

### RESOLUÇÃO

a) Lembrando que um amperímetro ideal equivale a um condutor ideal (resistência nula) e que o voltímetro ideal equivale a um circuito aberto (resistência infinita), vamos redesenhar o circuito.



Temos, então, um circuito de “caminho” único e, por isso, podemos escrever:

$$\varepsilon = R_{eq} i \Rightarrow 12 = (2 + R + 1) i \Rightarrow 12 = (3 + R) i \quad (I)$$

A leitura do voltímetro é a ddp entre os pontos A e B. Então, para o resistor de resistência R, temos:

$$U_{AB} = R i \Rightarrow 7,5 = R i \Rightarrow i = \frac{7,5}{R} \quad (II)$$

Substituindo (II) em (I), obtemos:

$$12 = (3 + R) \cdot \frac{7,5}{R} \Rightarrow 12 R = 22,5 + 7,5 R$$

$$\text{Logo: } 4,5 R = 22,5 \Rightarrow R = 5 \Omega$$

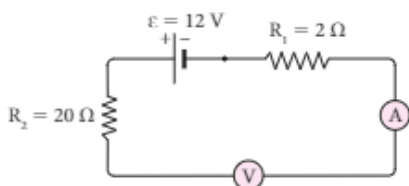
b) A leitura no amperímetro é a intensidade i da corrente que passa por ele.

Então, substituindo em (II) o valor de R, temos:

$$i = \frac{7,5}{5} \Rightarrow i = 1,5 \text{ A}$$

**Respostas:** a) 5 Ω; b) 1,5 A.

**2** No circuito a seguir, determine as indicações do amperímetro A e do voltímetro V, ambos supostos ideais.

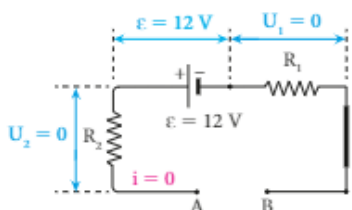


**RESOLUÇÃO**

Como o voltímetro ideal equivale a um circuito aberto, a corrente no circuito é nula.

Portanto: O amperímetro indica zero.

Sendo nula a corrente, também são nulas as diferenças de potencial nos resistores ( $U_1 = R_1 i = 0$  e  $U_2 = R_2 i = 0$ ):



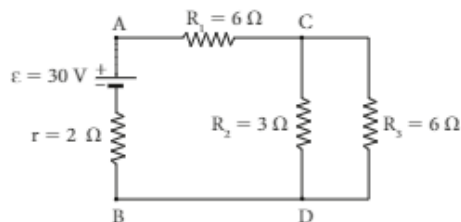
O voltímetro indica a ddp  $U_{AB}$  entre os pontos A e B, que é dada por:

$$U_{AB} = U_1 + \varepsilon + U_2 = 0 + 12 + 0 \Rightarrow U_{AB} = 12 \text{ V}$$

Portanto: O voltímetro indica a força eletromotriz do gerador, ou seja, 12 V.

**Resposta:** O amperímetro indica zero. O voltímetro indica a força eletromotriz do gerador, ou seja, 12 V.

**3** No circuito a seguir, tem-se um gerador ligado a um conjunto de resistores.



Determine:

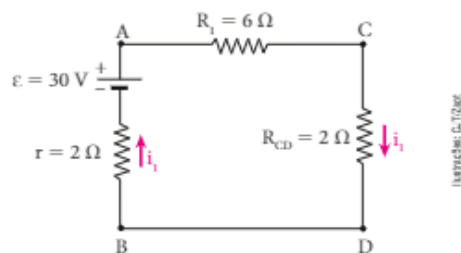
- a) a intensidade de corrente elétrica que percorre o gerador AB;
- b) a diferença de potencial entre os pontos C e D;
- c) a intensidade de corrente nos resistores de resistências  $R_2$  e  $R_3$ .

**RESOLUÇÃO**

a) Os resistores de resistências  $R_2$  e  $R_3$  estão em paralelo.

$$\text{Assim: } R_{CD} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{3 \cdot 6}{3 + 6} \Rightarrow R_{CD} = 2 \Omega$$

Podemos, então, redesenhar o circuito, como segue:



Como os elementos do circuito estão todos em série (circuito de “caminho” único), podemos usar a equação do circuito simples:  $\varepsilon = R_{eq} i_1$

Como  $\varepsilon = 30 \text{ V}$  e  $R_{eq} = 2 \Omega + 6 \Omega + 2 \Omega = 10 \Omega$  (série), temos:  $30 = 10 i_1 \Rightarrow i_1 = 3 \text{ A}$

b) A diferença de potencial entre C e D é obtida aplicando-se a **Primeira Lei de Ohm** a  $R_{CD}$ :

$$U_{CD} = R_{CD} i_1 = 2 \cdot 3 \Rightarrow U_{CD} = 6 \text{ V}$$

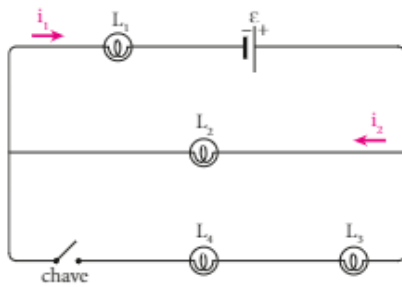
c) Aplicando a **Primeira Lei de Ohm** aos resistores de resistências  $R_2$  e  $R_3$  do circuito original, temos:

$$U_{CD} = R_2 i_2 \Rightarrow 6 = 3 i_2 \Rightarrow i_2 = 2 \text{ A}$$

$$U_{CD} = R_3 i_3 \Rightarrow 6 = 6 i_3 \Rightarrow i_3 = 1 \text{ A}$$

**Respostas:** a) 3 A; b) 6 V; c) 2 A e 1 A.

**4** No esquema, temos um gerador de resistência interna desprezível e força eletromotriz  $\mathcal{E}$  e quatro lâmpadas iguais ( $L_1, L_2, L_3$  e  $L_4$ ), cada uma delas com resistência  $R$ .

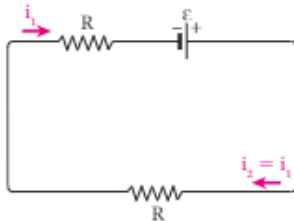


Fechando a chave:

- determine o que acontece com as intensidades  $i_1$  e  $i_2$  das correntes em  $L_1$  e  $L_2$ , respectivamente.
- quais as lâmpadas que iluminarão igualmente?
- entre as lâmpadas  $L_2$  e  $L_3$ , qual iluminará melhor?

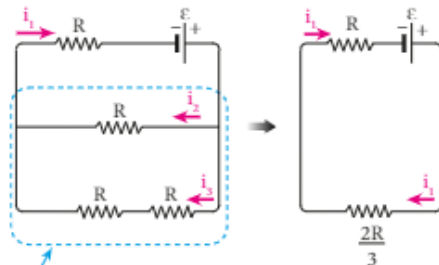
**RESOLUÇÃO**

a) Com a chave aberta, temos:



$$\mathcal{E} = R_{eq} i_1 \Rightarrow \mathcal{E} = 2R i_1 \Rightarrow i_1 = \frac{\mathcal{E}}{2R} \quad \text{e} \quad i_2 = \frac{\mathcal{E}}{2R}$$

Vamos, agora, analisar o circuito com a chave fechada.



Equivale a  $\frac{2R \cdot R}{2R + R} = \frac{2R}{3}$  e  $i_3 = \frac{i_2}{2}$

$$\mathcal{E} = R_{eq} i_1 = \left( R + \frac{2R}{3} \right) i_1 \Rightarrow i_1 = \frac{3\mathcal{E}}{5R}$$

Note que o novo valor de  $i_1$  é maior que o anterior.

Como  $i_3 = \frac{i_2}{2}$  e  $i_1 = i_2 + i_3$ , temos:

$$i_1 = i_2 + \frac{i_2}{2} = \frac{3i_2}{2} \Rightarrow i_2 = \frac{2i_1}{3} = \frac{2}{3} \cdot \frac{3\mathcal{E}}{5R}$$

Logo:  $i_2 = \frac{2\mathcal{E}}{5R}$

Então, o novo valor de  $i_2$  é menor que o anterior.

Portanto, podemos responder:  $i_1$  aumenta e  $i_2$  diminui.

Com isso, a potência dissipada em  $L_1$  ( $R i_1^2$ ) aumenta e ela passa a iluminar mais que antes. Em  $L_2$ , porém, a potência dissipada ( $R i_2^2$ ) diminui e ela passa a iluminar menos.

b) A intensidade da corrente é igual ( $i_3$ ) nas lâmpadas  $L_3$  e  $L_4$ , o mesmo ocorrendo com a potência dissipada.

Então: As lâmpadas que iluminarão igualmente são  $L_3$  e  $L_4$ .

c) A intensidade da corrente em  $L_2$  é  $i_2$  e, em  $L_3$ , é  $i_3 = \frac{i_2}{2}$ .

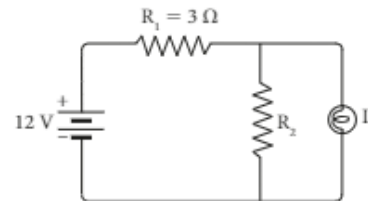
Portanto:  $L_2$  iluminará melhor que  $L_3$ .

**Respostas:** a)  $i_1$  aumenta e  $i_2$  diminui.

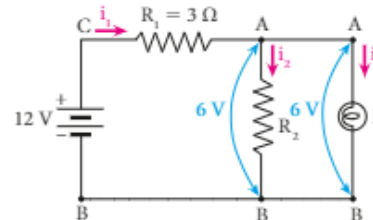
b) As lâmpadas que iluminarão igualmente são  $L_3$  e  $L_4$ .

c)  $L_2$  iluminará melhor que  $L_3$ .

**5** Considere ideal a bateria presente no circuito a seguir e calcule a resistência  $R_2$  para que a lâmpada  $L$  opere conforme suas especificações, que são: 3 W-6 V.



**RESOLUÇÃO**



Em  $L$ , temos:

$$Pot_L = U_L i_L \Rightarrow 3 = 6 i_L \Rightarrow i_L = 0,5 \text{ A}$$

Para calcular  $i_1$ , note que  $U_{CB} = U_{CA} + U_{AB}$ .

$$\text{Então: } 12 = U_{CA} + 6 \Rightarrow U_{CA} = 6 \text{ V}$$

Em  $R_1$ , calculamos  $i_1$ :

$$U_{CA} = R_1 i_1 \Rightarrow 6 = 3 i_1 \Rightarrow i_1 = 2 \text{ A}$$

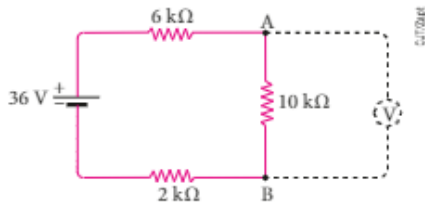
Para calcular  $R_2$ , podemos fazer:

$$i_1 = i_2 + i_L \Rightarrow 2 = i_2 + 0,5 \Rightarrow i_2 = 1,5 \text{ A}$$

$$U_{AB} = R_2 i_2 \Rightarrow 6 = R_2 \cdot 1,5 \Rightarrow R_2 = 4 \Omega$$

**Resposta:** 4  $\Omega$

- 6** No circuito a seguir, a resistência interna do gerador é desprezível em comparação com as demais resistências:



Determine:

- a diferença de potencial entre os pontos A e B;
- a resistência interna de um voltmetro que indica 18 V quando é ligado aos pontos A e B.

#### RESOLUÇÃO

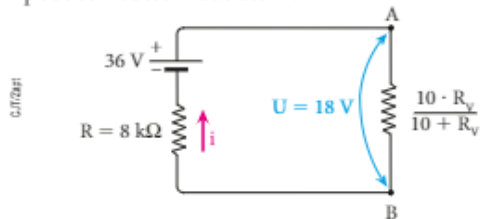
- a) Temos que:  $\varepsilon = R_{eq} i$

$$36 = (6 + 10 + 2) \cdot 10^3 i \Rightarrow i = 2 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 2 \text{ mA}$$

A ddp entre A e B é dada pela **Primeira Lei de Ohm**:

$$U_{AB} = R_{AB} i = 10 \text{ k}\Omega \cdot 2 \text{ mA} \Rightarrow U_{AB} = 20 \text{ V}$$

- b) Temos, nessa situação, um voltmetro real, isto é, um voltmetro em que a resistência interna não é infinita. Sendo  $R_V$  a resistência interna do voltmetro, o circuito original pode ser redesenhado assim:



Tudo se passa como se  $R$  fosse a resistência interna do gerador. Então, podemos escrever, para o gerador:  $U = \varepsilon - Ri$

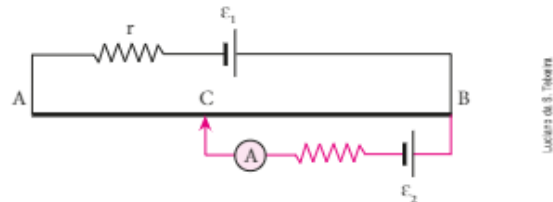
$$18 = 36 - 8i \Rightarrow i = \frac{18}{8} \text{ mA}$$

Entre A e B temos, também:  $U_{AB} = R_{AB} i$

$$18 = \frac{10 R_V}{10 + R_V} \cdot \frac{18}{8} \Rightarrow R_V = 40 \text{ k}\Omega$$

**Respostas:** a) 20 V; b) 40 kΩ.

- 7** O circuito apresentado a seguir é útil na determinação da força eletromotriz de um gerador. Nesse circuito, um gerador de força eletromotriz  $\varepsilon_1 = 9 \text{ V}$  e resistência interna  $r = 2 \Omega$  está ligado a um fio homogêneo AB de seção transversal uniforme. O comprimento do fio AB é igual a 100 cm e sua resistência elétrica é de 16 Ω. Um outro gerador, de força eletromotriz desconhecida  $\varepsilon_2$ , tem um terminal ligado em B e o outro ligado a um amperímetro, que, por sua vez, faz contato com o fio AB por meio de um cursor C, que pode deslizar ao longo desse fio.



Quando o trecho CB do fio mede 25 cm, a indicação do amperímetro anula-se. Calcule a força eletromotriz  $\varepsilon_2$ .

#### RESOLUÇÃO

Na situação descrita, calculemos a intensidade de corrente no fio AB:

$$\varepsilon_1 = R_{eq} i \Rightarrow \varepsilon_1 = (R_{AB} + r) i \quad (\text{I})$$

Como  $\varepsilon_1 = 9 \text{ V}$ ,  $R_{AB} = 16 \Omega$  e  $r = 2 \Omega$ , de (I), temos:

$$9 = (16 + 2) i \Rightarrow i = 0,5 \text{ A}$$

Quando a corrente no amperímetro se anula, a diferença de potencial entre os pontos B e C é igual a  $\varepsilon_2$ . Então, a queda de potencial do ponto B ao ponto C, determinada pela corrente de intensidade  $i = 0,5 \text{ A}$ , também é igual a  $\varepsilon_2$ . Assim, temos:

$$\varepsilon_2 = U_{BC} = R_{BC} i \quad (\text{II})$$

Se a resistência elétrica de 100 cm de fio é de 16 Ω, concluímos que nos 25 cm correspondentes ao trecho BC ela vale 4 Ω. Assim, de (II), temos:

$$\varepsilon_2 = 4 \cdot 0,5 \Rightarrow \varepsilon_2 = 2 \text{ V}$$

**Resposta:** 2 V



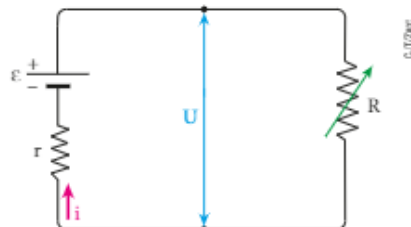
## QUESTÕES PROPOSTAS



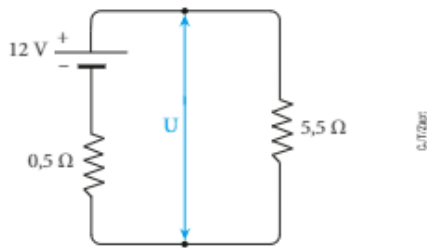
FAÇA NO CADERNO.

- 8.** Um gerador de corrente contínua, de fem  $\varepsilon = 12 \text{ V}$  e resistência interna  $r = 0,1 \Omega$ , é ligado a um resistor de resistência variável  $R$ .

- Trace a curva característica desse gerador, ou seja, o gráfico de  $U$  em função de  $i$ .
- Calcule a intensidade de corrente no circuito quando  $R = 1,9 \Omega$ .



9. No circuito representado na figura, calcule:



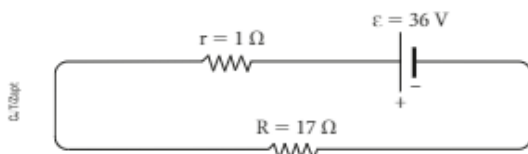
- a) a intensidade de corrente elétrica;  
b) a tensão  $U$  entre os terminais do gerador.

10. Faça o que se pede a seguir.

- a) Determine a força eletromotriz de um gerador de resistência interna igual a  $0,2 \Omega$ , sabendo que a sua corrente de curto-circuito vale  $30 \text{ A}$ .  
b) Qual é a diferença de potencial entre os terminais desse mesmo gerador, em circuito aberto?

11. Uma pilha tem fem igual a  $1,5 \text{ V}$  e resistência interna igual a  $0,1 \Omega$ . Se ela for ligada a uma lâmpada de resistência igual a  $0,4 \Omega$ , qual será a ddp entre seus terminais?

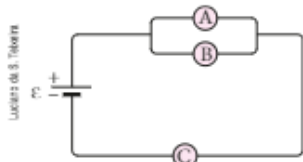
12. No circuito representado a seguir, temos um gerador de força eletromotriz  $\mathcal{E}$  e resistência interna  $r$ , alimentando um resistor de resistência  $R$ :



Determine:

- a) a potência elétrica útil do gerador, isto é, a potência elétrica que ele fornece ao resistor;  
b) a potência elétrica desperdiçada na resistência interna do gerador;  
c) o rendimento do gerador.

13. No circuito a seguir, A, B e C são lâmpadas iguais e iluminam alimentadas por um gerador de resistência interna desprezível.



Verifique o que acontece com o brilho da lâmpada A:  
a) se a lâmpada C se queimar;  
b) se, em vez de C, a lâmpada B se queimar.

14. Ligando os terminais de uma bateria por um cabo curto e grosso de cobre, a corrente que percorre o cabo tem intensidade de  $100 \text{ A}$ . Sabendo que a diferença de potencial entre os terminais da bateria quando em circuito aberto vale  $12 \text{ V}$ , calcule sua resistência interna.

15. Na figura a seguir, está representado um elemento de circuito elétrico:



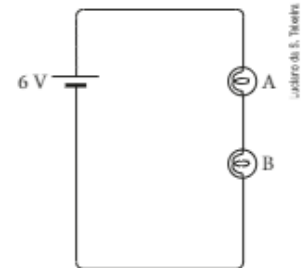
Sabendo que os potenciais em A e B valem, respectivamente,  $2 \text{ V}$  e  $13 \text{ V}$ , calcule a intensidade de corrente nesse elemento, especificando seu sentido.

16. Fios de alumínio são usados na transmissão de energia elétrica de uma usina hidrelétrica até uma cidade. Esses fios, apesar de excelentes condutores, apresentam determinada resistência elétrica.

- a) Quando a demanda de energia elétrica na cidade aumenta (mais aparelhos ligados), o que acontece com a tensão  $U$  recebida pela cidade? Justifique.  
b) Qual é a vantagem de se fazer a transmissão de energia elétrica em altas tensões?

17. No circuito representado na figura, as lâmpadas A e B, que estavam acesas, em um certo momento se apagam.

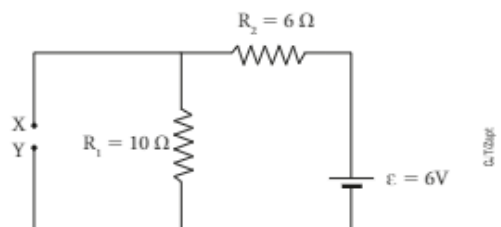
Mantendo as lâmpadas em seus respectivos soquetes e usando um voltímetro, verificou-se que a ddp entre os terminais da lâmpada A é  $6 \text{ V}$ , mas é nula entre os terminais da lâmpada B. Identifique a(s) lâmpada(s) queimada(s).



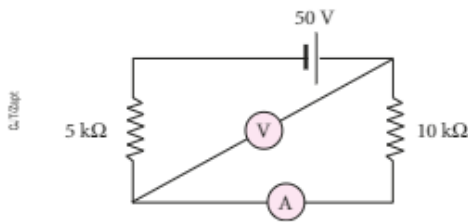
18. Um gerador de  $12 \text{ V}$  de força eletromotriz deve alimentar um aquecedor para levar determinada quantidade de água à temperatura de ebulição no **menor tempo possível**. O aquecedor poderá ser constituído de um ou mais dos seguintes resistores:  $R_1 = 6 \Omega$ ,  $R_2 = 3 \Omega$ ,  $R_3 = 2 \Omega$ . Esquematize o circuito apropriado, nos seguintes casos:

- a) o gerador tem resistência interna igual a  $3 \Omega$ ;  
b) o gerador tem resistência interna desprezível.

19. Determine a resistência elétrica do resistor que deve ser ligado entre os pontos X e Y, para que a intensidade de corrente elétrica em  $R_1$  seja de  $0,3 \text{ A}$ :

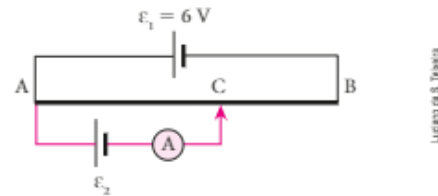


20. No circuito esquematizado a seguir, as resistências do gerador e do amperímetro são desprezíveis. A resistência interna do voltímetro é igual a  $10\text{ k}\Omega$ .



Determine as indicações do amperímetro e do voltímetro.

21. Os geradores que comparecem no circuito esquematizado na figura são considerados ideais. O fio homogêneo AB tem seção transversal uniforme e  $100\text{ cm}$  de comprimento:



Quando o cursor C está em uma posição tal que  $AC = 75\text{ cm}$ , o amperímetro não registra corrente. Calcule a força eletromotriz  $\varepsilon_2$ .

## 4. RECEPTORES ELÉTRICOS

Como já vimos, um resistor ligado a um gerador recebe energia elétrica e a converte integralmente em energia térmica.

Agora vamos estudar os **receptores elétricos**: dispositivos que recebem energia elétrica de um gerador e convertem uma parte dela em energia **não térmica**.

O motor elétrico é um bom exemplo de receptor. Ele recebe energia elétrica do gerador ao qual está ligado e transforma uma parte dessa energia em energia mecânica. Inevitavelmente outra parte é desperdiçada termicamente, por efeito Joule, nos enrolamentos e nos contatos.



Motor elétrico: um exemplo de receptor.

Muitas vezes, é possível fazer um gerador funcionar como receptor e vice-versa. A bateria dos automóveis, por exemplo, quando opera como gerador, converte energia química em energia elétrica. Entretanto, por ser recarregável, a bateria, no processo de recarga feito pelo alternador, funciona como receptor, recebendo energia elétrica e armazenando-a em forma de energia química. A pilha de Daniell é outro exemplo, mas o mesmo não ocorre com a pilha seca, pelo fato de não ser recarregável.

Os motores das locomotivas elétricas são receptores que também funcionam como geradores. Quando funcionam como receptores, transformam energia elétrica em energia mecânica. Quando funcionam como geradores, precisam receber energia mecânica para transformá-la em energia elétrica.

O motor mostrado na fotografia ao lado funciona como receptor quando estabelecemos uma determinada ddp contínua entre seus terminais (fios preto e vermelho).

Se, em vez disso, fixarmos uma pequena hélice em seu eixo e a fizermos girar – posicionando-a de frente para o vento produzido por um ventilador, por exemplo –, surgirá uma ddp também contínua entre os terminais do motor, que, então, passará a funcionar como gerador.

### Elementos que caracterizam um receptor

Quando se estabelece uma ddp  $U$  entre os terminais de um receptor, uma parte dela é aproveitada para fins não térmicos, por exemplo, para um motor produzir energia mecânica. Essa parte útil da ddp  $U$  é denominada **força contraeletromotriz (fcm)** do receptor, e vamos simbolizá-la por  $\varepsilon'$ .

A outra parte da ddp  $U$  é desperdiçada no receptor, porque ele, como todo condutor, tem uma resistência elétrica, que vamos chamar de **resistência interna** do receptor e simbolizar por  $r'$ . No caso dos motores elétricos,  $r'$  é a resistência dos enrolamentos e dos contatos.

Em esquemas de circuitos elétricos, os receptores que funcionam com corrente contínua têm o mesmo símbolo dos geradores, como está representado na figura ao lado. Entretanto, como veremos adiante, o sentido da corrente é oposto ao da corrente em geradores.



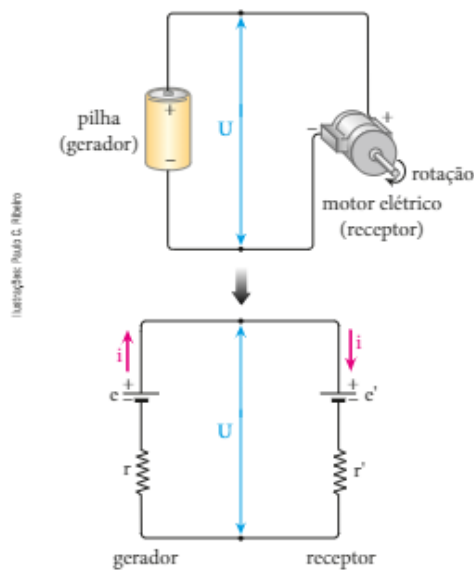
Símbolo de um receptor:  $\varepsilon'$  é a força contraeletromotriz,  $r'$  é a resistência interna e A e B são seus terminais.

Embora a grandeza  $\mathcal{E}'$  seja chamada (impropriamente) de força contraeletromotriz, devemos destacar que não se trata de uma força, mas de uma diferença de potencial.

## Equação do receptor

Vamos, agora, determinar a equação do receptor, isto é, a expressão que relaciona a ddp  $U$  aplicada entre seus terminais com a intensidade  $i$  da corrente que o percorre.

Para isso, veja na figura a seguir uma pilha alimentando um pequeno motor elétrico de corrente contínua, como esses que podemos encontrar em diversos brinquedos. Observe, também, a correspondente representação esquemática:



Na verdade, esse motorzinho não tem polos positivo e negativo próprios: os sinais (+) e (-) indicados em seus terminais apenas significam que eles estão ligados, respectivamente, nos polos positivo e negativo da pilha.

Com isso, é fundamental observar que:

A corrente elétrica tem sentido de (-) para (+) no gerador, e de (+) para (-) no receptor.

Para encontrar a equação do receptor, suponha  $U = 1,3 \text{ V}$ ,  $r' = 5 \Omega$  e  $i = 0,08 \text{ A}$ .

A grandeza  $U = 1,3 \text{ V}$  indica que cada coulomb de carga entrega  $1,3 \text{ J}$  de energia elétrica ao motor (receptor) quando passa por ele. A diferença de potencial na resistência interna do motor é dada pelo produto  $r'i$ :

$$r'i = 5 \Omega \cdot 0,08 \text{ A} = 0,4 \text{ V}$$

Isso significa que a energia elétrica nele dissipada inutilmente é de  $0,4 \text{ J}$  por coulomb que o atravessa.

O motor aproveita  $0,9 \text{ J}$  ( $1,3 \text{ J} = 0,9 \text{ J} + 0,4 \text{ J}$ ), então, de cada coulomb que passa por ele para produzir energia mecânica. Em outras palavras, esse motor está operando com uma força contraeletromotriz  $\mathcal{E}'$  igual a  $0,9 \text{ V}$ .

Dessa análise podemos perceber que a ddp  $U$  aplicada entre os terminais do receptor é a soma da fcm  $\mathcal{E}'$  com o produto  $r'i$ , o que nos leva à **equação do receptor**:

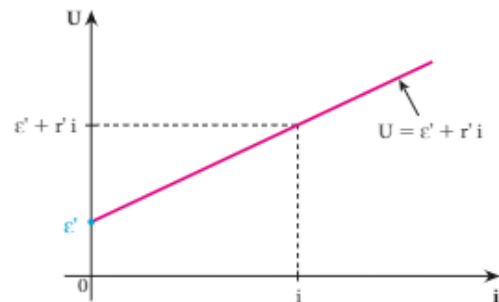
$$U = \mathcal{E}' + r' i$$

### NOTA

Como já foi dito, um motor elétrico não possui polos positivo e negativo próprios. Você pode, então, estar questionando por que existem indicações desses polos nos motores dos brinquedos a pilha, por exemplo (normalmente, as isolações dos fios ligados aos "polos positivo e negativo" são vermelha e preta, respectivamente). De fato, essas indicações existem, mas servem apenas para informar em quais polos do gerador os terminais devem ser ligados para que a rotação do motor se dê no sentido correto.

## Curva característica de alguns receptores

Para alguns receptores, como uma bateria de automóvel em processo de carga, por exemplo, em que  $\mathcal{E}'$  é uma constante, a representação gráfica da equação  $U = \mathcal{E}' + r' i$ , ou seja, a curva característica é um segmento de reta, como mostra o gráfico a seguir.



Curva característica de alguns receptores.

Note que  $i$  aumenta quando  $U$  aumenta e que  $U = \mathcal{E}'$  quando  $i = 0$ .

Nos motores elétricos, mesmo nos de corrente contínua, a curva característica que você acabou de ver não é válida, porque a fcm  $\mathcal{E}'$  (cuja origem será estudada em **Eletromagnetismo**, no Capítulo 11) depende da frequência de rotação, que aumenta quando  $U$  aumenta. Portanto,  $\mathcal{E}'$  deixa de ser uma constante.



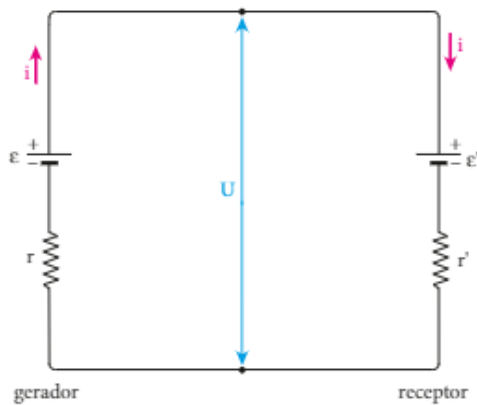
### Receptor ideal

O receptor ideal é um receptor hipotético em que a resistência interna é **nula**. Nesse caso, temos  $U = \epsilon'$  e a curva característica passa a ser do tipo:



### Potências elétricas no receptor: total, útil e desperdiçada

A figura a seguir representa um gerador alimentando um receptor:



A potência elétrica que o gerador fornece ao receptor é a já estudada potência útil do gerador ( $U i$ ). Para o re-

ceptor, porém, essa mesma potência  $U i$  é a potência total que ele recebe. Desse total, uma parte é útil e a outra é desperdiçada na resistência interna ( $r' i^2$ ).

Então, para o receptor, a potência total recebida ( $Pot_t$ ) e a potência desperdiçada ( $Pot_d$ ) são dadas por:

$$Pot_t = U i$$

$$Pot_d = r' i^2$$

Para obter a potência útil basta lembrar que:

$$Pot_t = Pot_u + Pot_d$$

$$\text{Então: } U i = Pot_u + r' i^2 \Rightarrow Pot_u = (U - r' i) i$$

$$\text{Como } U = \epsilon' + r' i, \text{ temos que } U - r' i = \epsilon'.$$

$$\text{Portanto: } Pot_u = \epsilon' i$$

### Rendimento elétrico do receptor

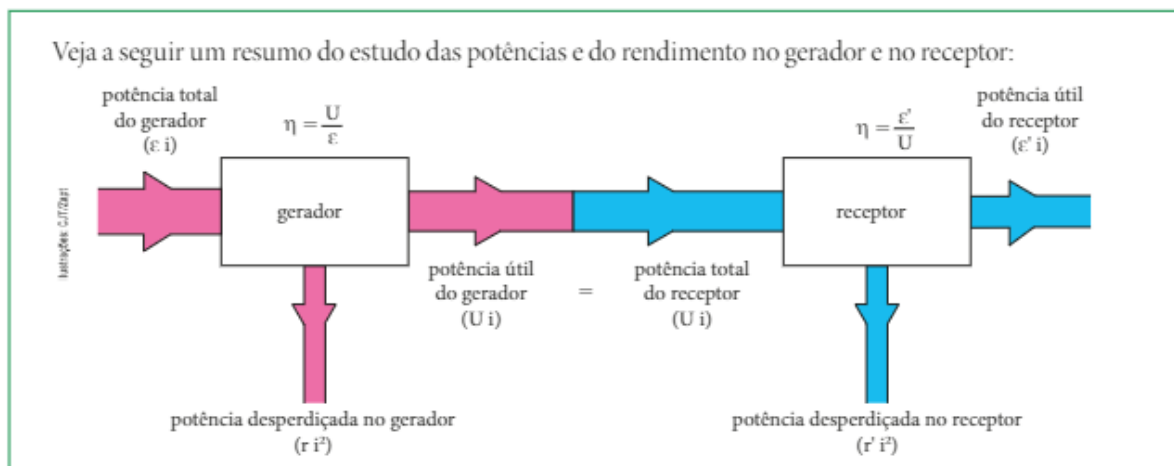
O rendimento continua definido por:

$$\eta = \frac{Pot_u}{Pot_t}$$

Como, no receptor,  $Pot_u = \epsilon' i$  e  $Pot_t = U i$ , obtemos, englobando o caso teórico e o caso real:

$$\eta = \frac{\epsilon' i}{U i} \Rightarrow \eta = \frac{\epsilon'}{U}$$

$$(0 \leq \eta \leq 1 \text{ ou } 0 \leq \eta \leq 100\%)$$



## FAÇA VOCÊ MESMO

### Teste com um motor

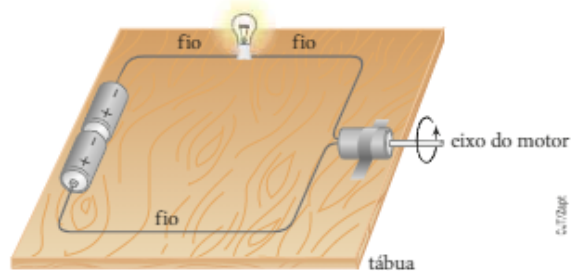
Procure entre seus brinquedos velhos um que funcionava a pilha. Desmonte-o e retire o pequeno motor. Agora, vamos realizar uma atividade experimental muito simples, em que observaremos o que ocorre quando, em um circuito, o motor é bloqueado, ou seja, seu eixo é impedido de girar.

#### Material necessário

- 1 tábua de madeira com aproximadamente 15 cm por 15 cm;
- 1 pequeno motor que pode ser retirado de um brinquedo velho ou de uma escova de dente elétrica que já não está mais sendo usada;
- 1 lâmpada de lanterna adequada para funcionar com cerca de 3 V;
- 1 soquete para a lâmpada;
- 2 pilhas comuns de 1,5 V (tamanho AA, C ou D);
- 1 suporte adequado para acomodar as pilhas em série;
- 1 metro de fio fino de cobre, com isolamento plástica.

#### Procedimento

- I. Tendo como base a madeira, monte o circuito em série mostrado na figura ao lado. Ao fechar o circuito, vamos observar que a lâmpada acende e o eixo do motor passa a girar.



#### Analisando o experimento

1. Segure o eixo do motor, impedindo-o de girar por alguns segundos. O que ocorre com a luminosidade da lâmpada? Explique por que isso acontece.
2. Qual conversão de energia deixa de ocorrer e qual conversão de energia se intensifica enquanto o motor está bloqueado? Explique.
3. O bloqueio do motor afeta o desgaste das pilhas? Justifique.
4. Procure saber se o citado bloqueio, principalmente em altas potências, pode danificar um motor elétrico, mesmo se durar um intervalo de tempo relativamente curto.

## 5. ASSOCIAÇÃO DE GERADORES

Até o momento, vimos uma grande quantidade de situações envolvendo **resistores** constituindo associações em série, em paralelo ou mistas.

Vamos estudar, agora, a associação de **geradores**, que também pode ser feita em série, em paralelo ou de forma mista.

É muito comum, por exemplo, encontrarmos lanternas, rádios, máquinas fotográficas e outros aparelhos que funcionam com mais de uma pilha. A interligação dessas pilhas nada mais é que uma associação de geradores.

A seguir, analisaremos as associações de geradores em série e em paralelo.

#### Associação em série

Se tivermos geradores associados de tal modo que o polo positivo de cada gerador seja ligado ao polo negativo do gerador seguinte, como representado na figura, diremos que eles estão associados **em série**.

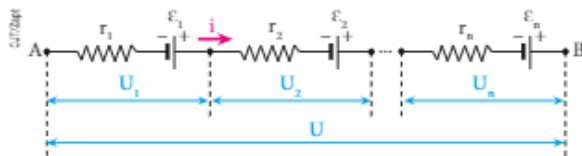


Note que, se essa associação participar de um circuito fechado, a corrente elétrica terá a mesma intensidade em todos os geradores.



As pilhas que você vê na fotografia estão associadas em série.

A seguir, estão representados  $n$  geradores em série.  $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots, \mathcal{E}_n$  são suas forças eletromotrizes,  $r_1, r_2, \dots, r_n$  são suas resistências internas, e **A** e **B** são os terminais da associação:



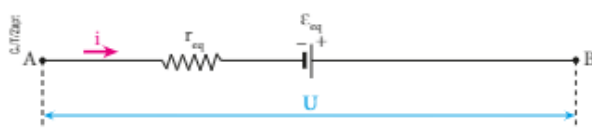
Sendo  $i$  a intensidade da corrente na associação, podemos escrever, para os  $n$  geradores, as seguintes equações:

$$\begin{aligned} U_1 &= \mathcal{E}_1 - r_1 i \\ U_2 &= \mathcal{E}_2 - r_2 i \\ &\vdots \\ U_n &= \mathcal{E}_n - r_n i \end{aligned}$$

Adicionando todas essas equações, membro a membro, obtemos:

$$\begin{aligned} U_1 + U_2 + \dots + U_n &= (\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \dots + \mathcal{E}_n) - (r_1 + r_2 + \dots + r_n) i \\ \text{ou} \\ U &= (\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \dots + \mathcal{E}_n) - (r_1 + r_2 + \dots + r_n) i \quad (\text{I}) \end{aligned}$$

Vamos pensar, agora, no **gerador equivalente** à associação, isto é, em um gerador único que, ao ser percorrido por uma corrente de mesma intensidade  $i$ , apresente entre seus terminais a mesma ddp  $U$  que existe entre os terminais da associação:  $\mathcal{E}_{\text{eq}}$  é a força eletromotriz e  $r_{\text{eq}}$  é a resistência interna desse gerador.



Para o gerador equivalente, temos:

$$U = \mathcal{E}_{\text{eq}} - r_{\text{eq}} i \quad (\text{II})$$

Comparando as expressões (I) e (II), obtemos:

$$\mathcal{E}_{\text{eq}} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \dots + \mathcal{E}_n$$

e

$$r_{\text{eq}} = r_1 + r_2 + \dots + r_n$$

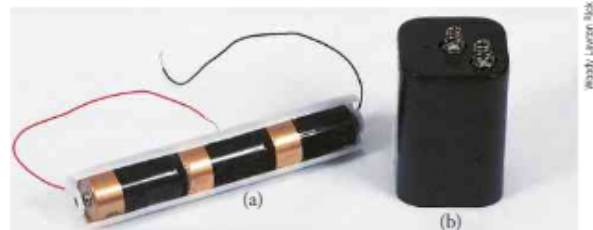
Observe, então, que:

Na associação de geradores em série, a grande vantagem está no fato de a força eletromotriz equivalente ser a soma das forças eletromotrizes de todos os geradores. Em contrapartida, a resistência interna equivalente também é a soma das resistências internas de todos eles.

Se os  $n$  geradores associados forem idênticos, cada um com fem igual a  $\mathcal{E}$  e resistência interna igual a  $r$ , teremos:

$$\mathcal{E}_{\text{eq}} = n \mathcal{E} \quad \text{e} \quad r_{\text{eq}} = n r$$

Veja, a seguir, alguns exemplos de associação de geradores em série.



Em **a**, você vê três pilhas, cada uma com fem igual a 1,5 V, associadas em série. A diferença de potencial entre os terminais da associação, em circuito aberto, é igual a 4,5 V.

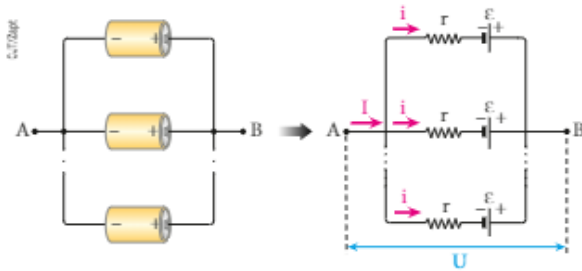
Em **b**, você vê uma bateria de 6 V. Dentro dela existem quatro pilhas de 1,5 V associadas em série.

## Associação em paralelo

Nesse tipo de associação, analisaremos apenas o caso em que os geradores associados são iguais, por ser essa a única situação de real interesse e a única conveniente.

Dizemos que dois ou mais geradores estão associados em paralelo quando seus polos positivos estão ligados juntos, o mesmo ocorrendo com os polos negativos. Nessa situação, a ddp  $U$  entre os terminais é a mesma para todos os geradores.

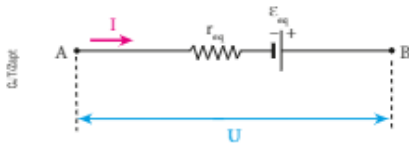
Veja, na figura a seguir,  $n$  geradores associados em paralelo e a correspondente representação esquemática. Todos eles têm força eletromotriz  $\varepsilon$  e resistência interna  $r$ , e os pontos **A** e **B** são os terminais da associação.



Para cada um dos  $n$  geradores dessa associação, temos:

$$U = \varepsilon - r i \quad (I)$$

Mais uma vez, o **gerador equivalente** à associação é aquele gerador único que, ao ser percorrido por uma corrente de mesma intensidade  $I$ , apresenta entre seus terminais a mesma ddp  $U$  que existe entre os terminais da associação. Sendo  $\varepsilon_{eq}$  a força eletromotriz e  $r_{eq}$  a resistência interna desse gerador, temos:



Para o gerador equivalente, podemos escrever:

$$U = \varepsilon_{eq} - r_{eq} I$$

E como  $I = i + i + \dots + i \Rightarrow I = n i$ , temos:

$$U = \varepsilon_{eq} - r_{eq} n i \quad (II)$$

Comparando as expressões (I) e (II), obtemos:

$$\varepsilon_{eq} = \varepsilon \quad \text{e} \quad r_{eq} n = r \Rightarrow r_{eq} = \frac{r}{n}$$

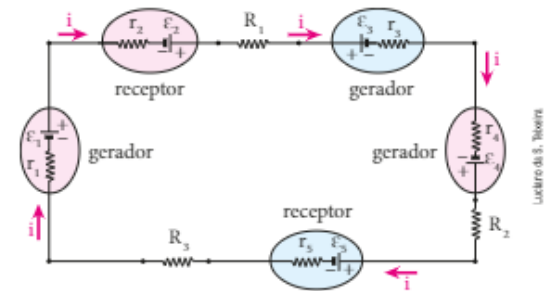
Observe, então, que:

Na associação de geradores iguais em paralelo, uma das vantagens está no fato de a corrente que passa em cada um deles ser apenas uma fração da corrente total, o que prolonga sua vida útil. Outra vantagem é a redução da resistência interna, o que proporciona maior estabilidade na tensão de operação. Em contrapartida, a fem equivalente é a mesma de cada gerador.

## 6. CIRCUITOS ELÉTRICOS DE "CAMINHO" ÚNICO, INCLUINDO GERADORES, RECEPTORES E RESISTORES

Considere resistores, geradores e receptores compondo um circuito de "caminho" único, isto é, um circuito em que todos os componentes estão em série. Desse modo, a intensidade de corrente elétrica é a mesma em todos os elementos do circuito.

Na figura a seguir, temos um desses circuitos, em que supomos **dado** o sentido da corrente:



Lembrando que o sentido da corrente é de (-) para (+) nos geradores, e de (+) para (-) nos receptores, concluímos que:  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  e  $\varepsilon_4$  são forças eletromotrices;  $\varepsilon_3$  e  $\varepsilon_5$  são forças contraeletromotrices.

Quando percorremos o circuito **no sentido da corrente**, as fem representam elevações de potencial, e as fcem representam quedas não ôhmicas (úteis) de potencial. Além dessas quedas, entretanto, existem as quedas ôhmicas nas resistências do circuito, nas quais cada queda ôhmica é o produto de uma resistência pela intensidade da corrente.

Observe que, se partirmos de um ponto e percorreremos o circuito todo até voltarmos ao ponto de partida, deveremos encontrar:

$$\text{Soma das elevações de potencial} = \text{Soma das quedas não ôhmicas} + \text{Soma das quedas ôhmicas}$$

ou, simbolicamente:  $\Sigma \text{fem} = \Sigma \text{fcem} + R_{eq} i$

em que  $R_{eq}$  significa a soma de todas as resistências do circuito. Então, podemos calcular a intensidade da corrente no circuito representado na figura anterior, a partir da seguinte expressão:

$$(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_4) = (\varepsilon_3 + \varepsilon_5) + (R_1 + R_2 + R_3 + r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5) i$$

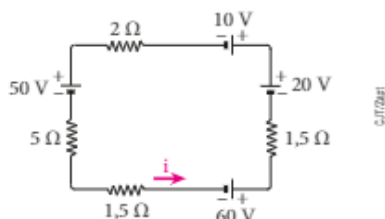
Na análise que fizemos nesta seção, o sentido da corrente elétrica foi supostamente dado. Entretanto, no cálculo da intensidade da corrente elétrica em circuitos de “caminho” único em que são fornecidos os valores de todas as forças eletromotrizes e contraeletromotrizes, o sentido da corrente geralmente não é dado, mas é fácil determiná-lo.

Para isso, basta lembrar que a soma das fem tem de ser maior que a soma das fcem.

Portanto, o sentido correto da corrente no circuito é aquele para o qual  $\Sigma \text{fem}$  é maior que  $\Sigma \text{fcem}$ .

Para exemplificar, vamos calcular a intensidade da corrente elétrica no circuito esquematizado a seguir.

Vamos supor que o sentido da corrente seja anti-horário:



Se o sentido indicado para a corrente está correto:

- os componentes de 60 V e 20 V são geradores:  $\Sigma \text{fem} = 80 \text{ V}$ .
- os componentes de 10 V e 50 V são receptores:  $\Sigma \text{fcem} = 60 \text{ V}$ .

Como  $\Sigma \text{fem}$  é maior que  $\Sigma \text{fcem}$ , o sentido da corrente está correto.

Vamos calcular a intensidade dessa corrente:

$$\Sigma \text{fem} = \Sigma \text{fcem} + R_{\text{eq}} i$$

Assim:  $80 = 60 + 10i \Rightarrow i = 2 \text{ A}$

Se houver equívoco na escolha do sentido da corrente – que nesse exemplo seria, incorretamente, horário –, teremos:  $\Sigma \text{fem} = 60 \text{ V}$ ;  $\Sigma \text{fcem} = 80 \text{ V}$ .

$$\Sigma \text{fem} = \Sigma \text{fcem} + R_{\text{eq}} i$$

Assim:  $60 = 80 + 10i \Rightarrow i = -2 \text{ A}$

O resultado negativo indica que o sentido correto da corrente é oposto ao escolhido, ou seja, é anti-horário, mas seu módulo (2 A) continua correto.

## QUESTÕES COMENTADAS

**22** As baterias chumbo-ácido dos automóveis são constituídas de seis células geradoras, cada uma com cerca de 2,0 V de força eletromotriz e cerca de 0,005 Ω de resistência interna, associadas em série.

- Determine a força eletromotriz e a resistência interna de uma dessas baterias.
- Quando se dá a partida, a corrente na bateria é muito elevada, podendo atingir cerca de 200 A de intensidade. Para uma corrente com esse valor, calcule a ddp entre os seus terminais.

### RESOLUÇÃO

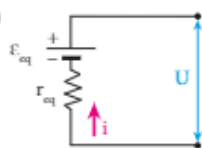
- Como  $\varepsilon_{\text{eq}} = n \varepsilon$ , em que  $n = 6$  e  $\varepsilon = 2,0 \text{ V}$ , temos:

$$\varepsilon_{\text{eq}} = 6 \cdot 2,0 \Rightarrow \varepsilon_{\text{eq}} = 12 \text{ V}$$

Como  $r = 0,005 \text{ } \Omega$  e  $r_{\text{eq}} = n r$ , temos:

$$r_{\text{eq}} = 6 \cdot 0,005 \Rightarrow r_{\text{eq}} = 0,03 \text{ } \Omega$$

b)



$$U = \varepsilon_{\text{eq}} - r_{\text{eq}} i$$

Como  $i = 200 \text{ A}$ , temos:

$$U = 12 - 0,03 \cdot 200$$

$$U = 6 \text{ V}$$

Esse resultado explica por que o brilho de lâmpadas eventualmente acesas diminui quando se dá a partida.

**Respostas:** a) 12 V e 0,03 Ω; b) 6 V.

**23** A partida de um automóvel é acionada durante 5 s e, nesse intervalo de tempo, a corrente elétrica que circula pela bateria tem intensidade 200 A. Quanto tempo a bateria leva para se recuperar da descarga, se nesse processo a corrente elétrica tem intensidade 20 A?

### RESOLUÇÃO

Quando a bateria é acionada na partida do automóvel, dizemos que ela se descarrega um pouco. Isso significa que uma parte de sua energia química se transforma em energia elétrica. Nesse processo de descarga, reações químicas acontecem em seus eletrodos, enquanto uma certa quantidade de carga  $Q$  passa por ela em determinado sentido (a bateria está operando como um gerador). Recuperar a bateria dessa descarga não significa acumular cargas dentro dela, mas sim inverter as reações químicas que ocorreram – essas reações são reversíveis – de modo que haja a reposição da energia química que havia perdido. E, para isso acontecer, é preciso que passe pela bateria, em sentido oposto ao anterior (agora ela está operando como receptor), a mesma quantidade de carga  $Q$ . É isso que significa recarregar a bateria. A seguir apresentamos os cálculos.

**Na partida:**

Como  $i = 200 \text{ A}$  e  $\Delta t = 5 \text{ s}$ , temos:

$$i = \frac{|Q|}{\Delta t} \Rightarrow 200 = \frac{|Q|}{5} \Rightarrow |Q| = 1000 \text{ C}$$

**Na recuperação:**

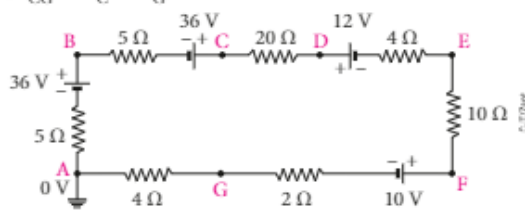
Como  $i' = 20 \text{ A}$  e  $|Q| = 1000 \text{ C}$ , calculamos o novo  $\Delta t$ :

$$i' = \frac{|Q|}{\Delta t} \Rightarrow 20 = \frac{1000}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = 50 \text{ s}$$

**Resposta:** 50 s

**24** Com relação ao circuito dado a seguir, determine:

- a intensidade e o sentido da corrente elétrica;
- os potenciais nos pontos A, B, C, D, E, F e G, supondo nulo o potencial da Terra (potencial de referência);
- a diferença de potencial entre os pontos C e G ( $U_{CG} = v_C - v_G$ ).

**RESOLUÇÃO**

- O sentido da corrente deve ser **horário**, pois só assim a soma das forças eletromotrizes supera a soma das forças contraeletromotrizes (se o sentido da corrente, por acaso, estiver errado, a intensidade da corrente resultará negativa, porém seu módulo será o mesmo).

$$\sum \text{fem} = \sum \text{fcm} + R_{\text{eq}} i$$

$$(36 + 36) = (12 + 10) + 50i \Rightarrow i = 1 \text{ A}$$

- O potencial, em A, é nulo:  $v_A = 0 \text{ V}$

Partimos, então, de A, no sentido da corrente, e chegamos em B. Encontramos uma queda de potencial na resistência de  $5 \Omega$ , igual a  $5 \text{ V}$  ( $5i = 5 \cdot 1 = 5$ ), e uma elevação de  $36 \text{ V}$  correspondente à força eletromotriz. Assim, o potencial, em B, é:

$$v_B = v_A - 5 \text{ V} + 36 \text{ V} = 0 - 5 \text{ V} + 36 \text{ V} \Rightarrow v_B = 31 \text{ V}$$

Seguindo de B até C (sempre no sentido da corrente), encontramos uma queda de  $5 \text{ V}$  ( $5i = 5 \cdot 1 = 5$ ) e uma elevação de  $36 \text{ V}$ . Sendo  $v_B = 31 \text{ V}$ , temos:

$$v_C = 31 \text{ V} - 5 \text{ V} + 36 \text{ V} \Rightarrow v_C = 62 \text{ V}$$

De C a D, ocorre uma queda igual a  $20 \text{ V}$  ( $20i = 20 \cdot 1 = 20$ ) na resistência. Então, temos, em D:

$$v_D = 62 - 20 \Rightarrow v_D = 42 \text{ V}$$

De D a E, ocorre uma queda de  $12 \text{ V}$  na força contraeletromotriz e uma queda de  $4 \text{ V}$  ( $4i = 4 \cdot 1 = 4$ ) na resistência. Então:

$$v_E = 42 - 12 - 4 \Rightarrow v_E = 26 \text{ V}$$

De E a F há uma queda de  $10 \text{ V}$  ( $10i = 10 \cdot 1 = 10$ ). Assim:

$$v_F = 26 - 10 \Rightarrow v_F = 16 \text{ V}$$

De F a G ocorrem duas quedas: uma de  $10 \text{ V}$ , na força contraeletromotriz, e outra de  $2 \text{ V}$  ( $2i = 2 \cdot 1 = 2$ ), na resistência. Assim:

$$v_G = 16 - 10 - 2 \Rightarrow v_G = 4 \text{ V}$$

Observemos que de G a A ocorre mais uma queda, de  $4 \text{ V}$  ( $4i = 4 \cdot 1 = 4$ ), o que nos leva de volta ao potencial zero do qual partimos.

- $U_{CG} = v_C - v_G = 62 - 4 \Rightarrow U_{CG} = 58 \text{ V}$

Se aterrássemos outro ponto do circuito, que não o ponto A, os potenciais de todos os pontos seriam alterados. As diferenças de potencial, porém, ficariam inalteradas.  $U_{CG}$ , por exemplo, continuaria igual a  $58 \text{ V}$ .

Portanto para calcular **diferenças** de potencial em um circuito, você pode considerar o potencial zero em **qualquer** um de seus pontos.

**Respostas:** a) 1 A; sentido horário.

b) 0 V; 31 V; 62 V; 42 V; 26 V; 16 V e 4 V.

c) 58 V

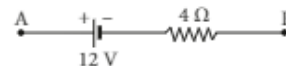
**QUESTÕES PROPOSTAS**

FAÇA NO CADERNO.

**25.** A equação característica que fornece a tensão ( $U$ ) em função da intensidade de corrente ( $i$ ) nos terminais de um receptor é  $U = 30 + 6i$  (SI). Determine, para esse receptor:

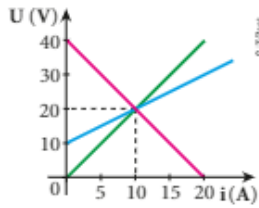
- a força contraeletromotriz e a resistência interna;
- o rendimento, quando a corrente elétrica que o atravessa tem intensidade de  $5 \text{ A}$ .

**26.** Na figura, está representado um elemento de circuito elétrico:



Sabendo que os potenciais em A e B valem, respectivamente,  $25 \text{ V}$  e  $5 \text{ V}$ , calcule a intensidade de corrente nesse elemento, especificando seu sentido.

27. A figura ao lado representa as curvas características de um gerador, um receptor e um resistor. Determine:

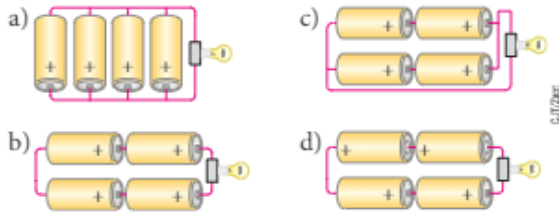


- as resistências elétricas do resistor ( $R_1$ ), do gerador ( $R_2$ ) e do receptor ( $R_3$ );
- os rendimentos elétricos do gerador e do receptor, quando estiverem operando sob corrente de 5 A.

28. Considere três pilhas iguais, cada uma com força eletromotriz de 1,5 V e resistência interna de 0,3  $\Omega$ . Determine a força eletromotriz e a resistência elétrica resultantes, quando essas pilhas são associadas:

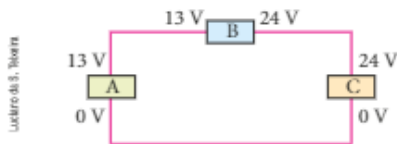
- em série;
- em paralelo.

29. Uma lâmpada é ligada a uma associação de quatro pilhas de 1,5 V, supostas ideais, de quatro maneiras, representadas nas figuras seguintes:



Qual é a ddp  $U$  entre os terminais da lâmpada em cada ligação?

30. Observe os elementos A, B e C do circuito representado a seguir. Um deles é gerador, outro é receptor e um terceiro, resistor. Os números que você vê são os potenciais elétricos nos terminais desses elementos.

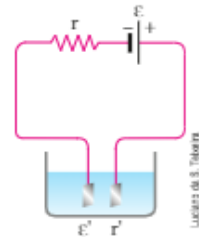


Sabendo que a força contraeletromotriz do receptor é igual a 12 V, identifique cada elemento.

31. Quatro geradores, cada um com fem igual a 6 V e corrente de curto-circuito igual a 30 A, são associados em paralelo. Determine a fem e a resistência interna equivalentes a essa associação.

32. Quantas pilhas de 1,5 V de força eletromotriz e 0,3  $\Omega$  de resistência interna devem ser associadas em série para que um pequeno motor de corrente contínua, ligado aos terminais da associação, se submeta a uma ddp de 6 V? Saiba-se que esse motor, quando recebe 6 V, é percorrido por uma corrente de intensidade igual a 1 A.

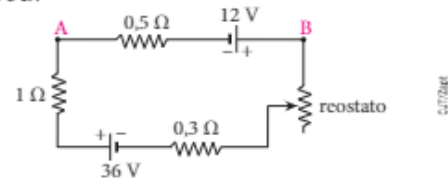
33. A figura ao lado representa uma bateria de força eletromotriz  $\epsilon$  igual a 12 V e resistência interna  $r$  igual a 0,1  $\Omega$  alimentando uma cuba eletrolítica de força contraeletromotriz  $\epsilon'$  igual a 4 V e resistência interna  $r'$  igual a 3,9  $\Omega$ . Calcule a intensidade da corrente no circuito.



34. Um gerador de 48 V e resistência interna igual a 0,7  $\Omega$  está carregando uma bateria de 12 V e 0,3  $\Omega$  de resistência interna. Em série com eles foi colocado um resistor de 5  $\Omega$ . Calcule a intensidade da corrente elétrica no circuito.

35. Uma bateria de 12 V de força eletromotriz e 0,3  $\Omega$  de resistência interna foi ligada a um motor de resistência interna igual a 3  $\Omega$ . Em paralelo com o motor foi instalado um resistor de resistência  $R$ . Sabendo que a intensidade de corrente no motor é igual a 1 A e que ele opera com força contraeletromotriz igual a 6 V, calcule  $R$ .

36. No circuito representado a seguir, calcule a resistência do reostato para que se anule a diferença de potencial entre os pontos A e B:



### DESCUBRA MAIS

- Uma bateria participa de um circuito elétrico, operando como gerador, e o potencial elétrico de seu polo positivo é **menor** que o potencial elétrico de seu polo negativo. Dê um exemplo de um circuito em que isso acontece. Como fica, nesse caso, a equação do gerador?
- Em que situações a diferença de potencial entre os terminais de uma bateria é, em valor absoluto, maior que sua força eletromotriz?

## CAPÍTULO

## 7

## CAPACITORES

## 1. INTRODUÇÃO

Quando você liga o *flash* de uma máquina fotográfica, precisa aguardar algum tempo até que ele possa ser acionado, para iluminar o que quer fotografar. Durante esse intervalo de tempo de espera, as pilhas instaladas na máquina estão armazenando energia em um componente eletrônico denominado **capacitor**. Essa energia é lançada em uma lâmpada de xenônio quando o *flash* é acionado.

Thibaut/Daily Images



Quando o *flash* desta máquina é disparado, a energia armazenada num capacitor é lançada na lâmpada, durante um intervalo de tempo da ordem de  $10^{-2}$  s.

Ao girar o botão de sintonia (*tuning*) de um rádio, procurando ouvir determinada emissora, você também está utilizando um capacitor, no caso, um capacitor variável.

Razaf - iStock.com/COMBISURFRENCO



Na busca de determinada emissora de rádio, é utilizado um capacitor variável.

O capacitor é um componente eletrônico de grande utilidade. Além das que já vimos, existem muitas outras aplicações importantes, algumas das quais veremos mais adiante.

## 2. DEFINIÇÃO

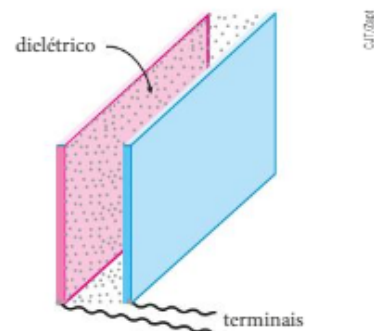
**Capacitor** é um componente eletrônico constituído de duas peças condutoras denominadas **armaduras**. Entre elas geralmente existe um material **dielétrico**, isto é, um material isolante, que pode ser, por exemplo, papel, óleo ou o próprio ar. Sua função básica é armazenar cargas elétricas e, conseqüentemente, energia potencial eletrostática (ou elétrica).



Woody Luvato/Flux

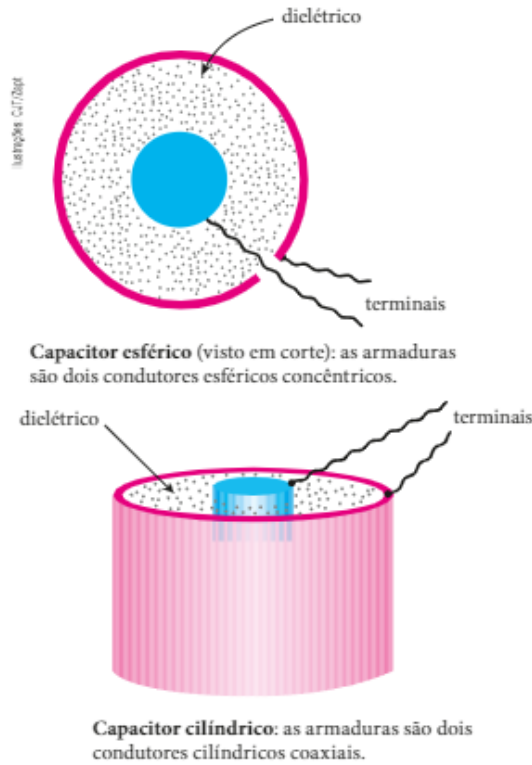
Aspecto físico de diversos capacitores.

As figuras a seguir representam algumas das possíveis formas geométricas de um capacitor:



**Capacitor plano:** as armaduras são duas placas planas condutoras e paralelas.



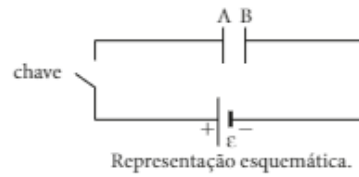
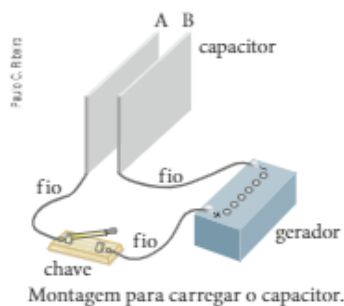


Em esquemas de circuitos elétricos, os capacitores mais simples, qualquer que seja a forma geométrica, são simbolizados por dois traços retos de mesmo comprimento, como vemos a seguir:

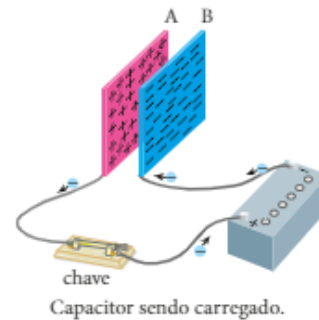


### 3. O PROCESSO DE CARGA DE UM CAPACITOR

Veja na figura a seguir um capacitor, cujas armaduras **A** e **B** estão inicialmente neutras, que será ligado a um gerador (bateria) por meio de fios condutores e de uma chave. O capacitor representado é plano, mas poderia ter qualquer outra forma geométrica.



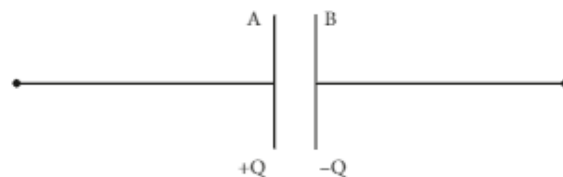
Imagine agora que a chave seja fechada. Com isso, o gerador passa a retirar elétrons da armadura **A**, que vai se eletrizando positivamente, e a introduzir elétrons na armadura **B**, que vai se eletrizando negativamente.



O processo de carga do capacitor se encerra quando o potencial da armadura **A** iguala-se ao potencial do polo positivo do gerador e o potencial da armadura **B** iguala-se ao potencial do polo negativo, ou seja, quando o equilíbrio eletrostático é atingido. Por isso, encerrado o processo de carga, a diferença de potencial **U** entre as armaduras é igual à força eletromotriz  $\mathcal{E}$  do gerador, e a corrente elétrica no circuito tem intensidade igual a zero.

Vamos representar por  $+Q$  a carga positiva armazenada na armadura **A** e por  $-Q$  a carga negativa armazenada na armadura **B**.

Evidentemente a soma dessas cargas é igual a zero. Entretanto, vamos chamar de **carga do capacitor** o valor absoluto da carga de **uma** de suas armaduras. Assim, a carga do capacitor é igual a **Q**:



**NOTA**

Quando um capacitor é submetido a uma tensão **alternada**, sempre existe corrente no circuito, porque são retirados elétrons ora de uma armadura, ora de outra.

## 4. CAPACITÂNCIA

Imagine que dois capacitores, 1 e 2, sejam ligados sucessivamente a um mesmo gerador (pilha ou bateria) e que as cargas armazenadas neles – com os processos de carga já encerrados – sejam  $Q_1 = 5 \mu\text{C}$  e  $Q_2 = 10 \mu\text{C}$ , respectivamente.

Percebe-se que o capacitor 2 tem maior capacidade de armazenar carga que o capacitor 1. De fato, ambos foram submetidos à mesma diferença de potencial, mas a carga armazenada em 2 foi maior.

Essa capacidade de armazenar carga é medida por uma grandeza denominada **capacitância** do capacitor, que vamos simbolizar por  $C$ .

Sendo  $Q$  a carga do capacitor e  $U$  o módulo da ddp entre suas armaduras, sua capacitância  $C$  é definida pela seguinte expressão:

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

Observe nessa expressão que, para um mesmo valor de  $U$ , a capacitância será tanto maior quanto maior for a carga  $Q$  armazenada.

Como vimos em Eletrostática, a unidade de medida da capacitância no SI é o **farad (F)**:

$$1\text{F} = \frac{1\text{C}}{\text{V}}$$

Então, a capacitância de um capacitor será igual a 1 F se ele armazenar uma carga igual a 1 C, ao ser submetido a uma ddp de 1 V.

Como veremos, 1 F corresponde a uma capacitância muito grande. Por isso, é muito mais frequente o uso de submúltiplos do farad, como o milifarad (mF), o microfarad ( $\mu\text{F}$ ), o nanofarad (nF) e o picofarad (pF).

É importante saber que a capacitância é uma constante característica de cada capacitor, que depende de sua forma, de suas dimensões e do dielétrico presente entre suas armaduras. Não depende, porém, do material condutor de que as armaduras são feitas.



Estúdio Soruê/IBR

O capacitor da fotografia tem 21000  $\mu\text{F}$  de capacitância. A inscrição 15 V significa que esse capacitor não deve ser submetido a uma ddp maior que 15 V para não ser danificado.

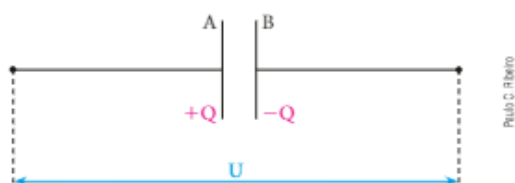
## 5. ENERGIA POTENCIAL ELETROSTÁTICA DE UM CAPACITOR

Vimos, em Eletrostática, que se um **condutor** está em um potencial  $v$ , eletrizado com carga  $Q$ , armazena uma energia potencial eletrostática (ou elétrica) dada por:

$$E_p = \frac{Qv}{2}$$

No caso de um **capacitor**, porém, temos **dois condutores** armazenando energia potencial eletrostática.

Veja o capacitor simbolizado na figura a seguir, de capacitância  $C$  e carregado com carga  $Q$ .



Pablo C. Ribeiro

Os potenciais de suas armaduras **A** e **B** são  $v_A$  e  $v_B$ , respectivamente, e o valor absoluto da diferença de potencial entre elas é  $U$ .

A **energia potencial eletrostática** do capacitor ( $E_p$ ) é a soma das energias potenciais calculadas em suas armaduras:

$$E_p = E_{p_A} + E_{p_B} = \frac{Qv_A}{2} + \frac{(-Q)v_B}{2} + \frac{Q(v_A - v_B)}{2}$$

$$\text{Logo: } E_p = \frac{QU}{2}$$

Se você usar  $Q = C U$  nessa expressão, obterá também:

$$Q = CU \Rightarrow E_p = \frac{(CU)U}{2}$$

$$\text{Logo: } E_p = \frac{CU^2}{2}$$

Ou ainda, se usar a relação  $U = \frac{Q}{C}$  na expressão

$E_p = \frac{QU}{2}$ , obterá:

$$U = \frac{Q}{C} \Rightarrow E_p = \frac{Q}{2} \cdot \frac{Q}{C}$$

$$\text{Logo: } E_p = \frac{Q^2}{2C}$$

## 6. ESTUDO DO CAPACITOR PLANO

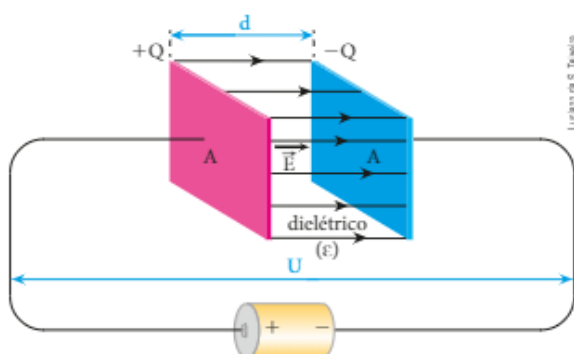
### Cálculo da capacitância do capacitor plano

Você já foi informado de que a capacitância de um capacitor depende de sua forma, de suas dimensões e do dielétrico.

Vamos ver, então, como é possível calcular a capacitância de um capacitor **plano** a partir do conhecimento de suas dimensões e do dielétrico presente entre suas armaduras, que são placas planas, paralelas e iguais.

Na figura a seguir, temos um capacitor plano em que  $A$  é a área de uma face de cada placa,  $d$  é a distância entre as placas e  $\epsilon$  é a permissividade do dielétrico.

Lembre-se: entre as placas, já eletrizadas, existe um campo elétrico aproximadamente uniforme  $\vec{E}$ .



Em Eletrostática, vimos que a intensidade desse campo é dada por:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

em que  $|\sigma|$  é o módulo da densidade superficial de cargas de cada placa.

Como  $|\sigma| = \frac{Q}{A}$ , em que  $Q$  é a carga do capacitor, temos:

$$E = \frac{Q}{\epsilon A}$$

Por se tratar de um campo elétrico uniforme, podemos usar a expressão  $E d = U$ , em que  $U$  é o valor absoluto da ddp entre as placas.

$$\text{Então: } U = E d \Rightarrow U = \frac{Q d}{\epsilon A}$$

Usando, finalmente, a definição de capacitância, temos:

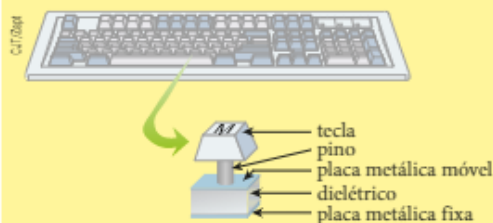
$$C = \frac{Q}{U} = \frac{Q}{\frac{Q d}{\epsilon A}} \Rightarrow C = \frac{\epsilon A}{d}$$

Observe, nessa expressão, que a capacitância de um capacitor plano será tanto maior quanto maiores forem a permissividade  $\epsilon$  e a área  $A$ , e quanto menor for a distância  $d$ .



### Capacitor plano em teclado de computador

Existe um tipo de teclado de computador em que cada tecla é acoplada a uma placa metálica móvel. Entre essa placa móvel e uma outra, fixa, existe um dielétrico compressível: as placas e o dielétrico constituem um capacitor plano. Quando a tecla é pressionada, a distância entre as placas desse capacitor diminui e, com isso, sua capacitância aumenta. Essa alteração da capacitância é, então, detectada por um circuito eletrônico, que envia ao processador um pulso com uma informação digital.



### Um farad (1 F) é uma capacitância grande demais!

Imagine um capacitor plano, de placas quadradas, cujos lados medem  $\ell$ , separadas por uma distância  $d$  igual a 1 mm ( $10^{-3}$  m). Suponha que exista ar entre as placas. No SI o valor de  $\epsilon$  para o ar é da ordem de  $10^{-11}$ .

Vamos, então, estimar o comprimento  $\ell$  que os lados das placas precisariam ter para que a capacitância desse capacitor fosse igual a 1 F:

$$C = \frac{\epsilon A}{d} = \frac{\epsilon \ell^2}{d} \Rightarrow \ell = \sqrt{\frac{C d}{\epsilon}}$$

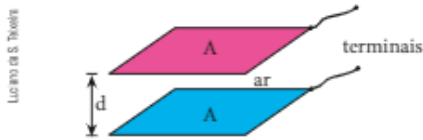
$$\text{Assim: } \ell = \sqrt{\frac{1 \cdot 10^{-3}}{10^{-11}}} \Rightarrow \ell = 10^4 \text{ m} = 10 \text{ km}$$

Portanto, cada placa deveria ter cerca de 10 km de lado!

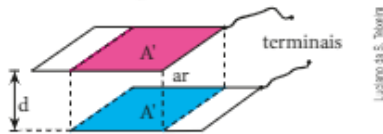
Note, então, que não é simples conseguir uma capacitância de 1 F. Entretanto, como veremos, ela pode ser viabilizada com o uso de capacitores especiais, denominados **capacitores eletrolíticos**.

## Capacitor de capacitância variável

Já sabemos que o capacitor representado abaixo tem capacitância  $C = \frac{\epsilon A}{d}$ , em que  $\epsilon$ , no caso, é a permissividade do ar.



Vamos, agora, deslocar uma placa em relação à outra, mantendo, porém, a distância e o paralelismo entre elas, como podemos ver na próxima figura. Note que a nova área útil do capacitor passa a ser  $A'$ , que é menor que  $A$ . Então, a capacitância também diminui, passando a ser  $C' = \frac{\epsilon A'}{d}$ .

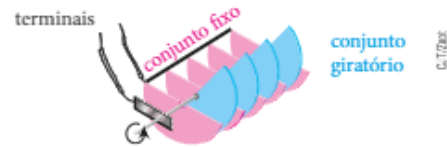


Logo, se uma placa for deslocável em relação à outra, teremos um capacitor de **capacitância variável**, que,

em esquemas de circuitos elétricos, é simbolizado assim:



Na ilustração e na fotografia a seguir você vê um tipo de capacitor de capacitância variável usado em rádio para sintonizar as diversas emissoras:



O conjunto fixo está isolado do conjunto giratório, mas as lâminas de cada conjunto estão ligadas entre si.



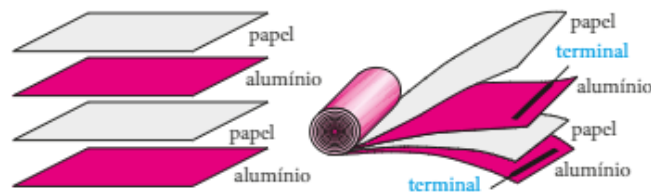
Capacitor de capacitância variável usado em circuitos elétricos.

## Outros tipos de capacitores

### Capacitores tubulares

Não é só nos capacitores planos que grandes áreas das armaduras e pequenas distâncias entre elas contribuem para o aumento da capacitância.

Para aumentar consideravelmente a área, mantendo reduzidas as dimensões do capacitor, é comum utilizar, como armaduras, duas longas fitas metálicas muito finas – de alumínio, por exemplo – para construir capacitores. Essas fitas, isoladas entre si por tiras de papel, são enroladas, constituindo um capacitor **tubular**.



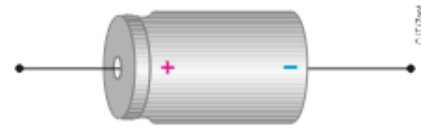
### Capacitores eletrolíticos

Os capacitores comuns precisam ter dimensões exageradamente grandes para que se possam obter grandes capacitâncias. Capacitores especiais, entretanto, denominados **capacitores eletrolíticos**, apresentam grandes capacitâncias, com dimensões relativamente reduzidas.

Nesses capacitores, uma das armaduras é um cilindro oco de alumínio, e a outra é um eletrólito (fluido condutor) situado dentro da armadura de alumínio. O dielétrico é uma camada muito fina de óxido de alumínio, formada por processos eletroquímicos e situada na superfície interna do cilindro

de alumínio, entre o alumínio e o eletrólito. A espessura dessa camada, ou seja, a distância entre as armaduras, é inferior a  $0,7 \mu\text{m}$  ( $0,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ ), sendo este o fator preponderante para a obtenção de altas capacidades. É possível construir capacitores eletrolíticos com capacidades de até 1 F, com dimensões relativamente pequenas.

Ao contrário do que acontece com os capacitores mais simples, os eletrolíticos só funcionam corretamente quando é respeitada uma polarização indicada neles: uma determinada armadura (+) tem de ser ligada no potencial mais alto, e a outra (-), consequentemente, no potencial mais baixo.



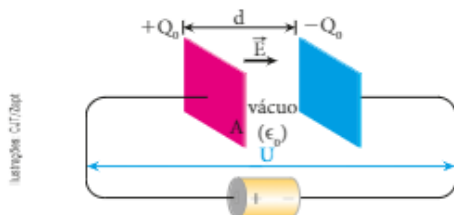
Aspecto físico de um capacitor eletrolítico.

## 7. INFLUÊNCIA DO DIELÉTRICO NA CAPACITÂNCIA

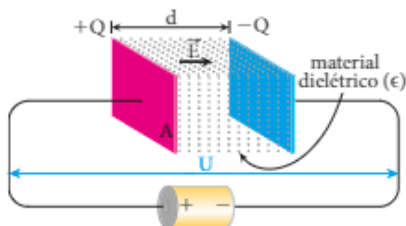
Vamos analisar, aqui, a influência do dielétrico (isolante) na capacitância.

Embora a conclusão final seja válida para todos os capacitores, desenvolveremos esse assunto tomando como referência o capacitor plano.

Veja, na figura seguinte, um capacitor plano a vácuo, isto é, em que o meio entre as placas é o vácuo. Vamos simbolizar por  $C_0$  a sua capacitância, por  $\epsilon_0$  a permissividade do vácuo e por  $Q_0$  a carga armazenada:



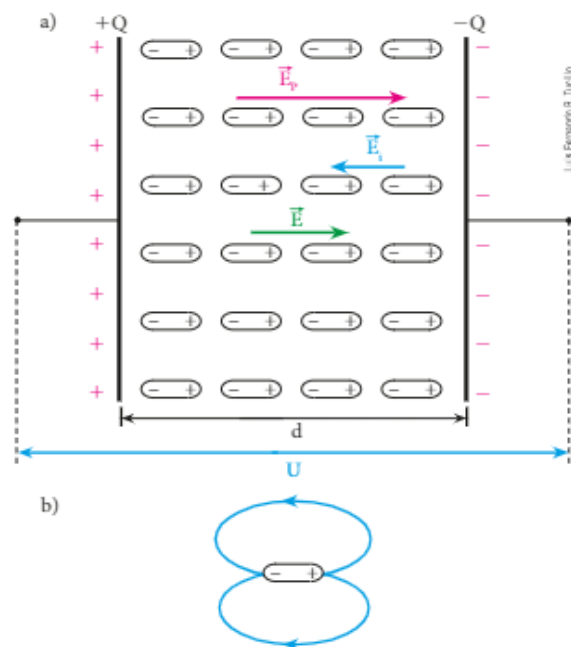
Suponha, agora, que a região entre as placas desse mesmo capacitor seja preenchida com um material dielétrico de permissividade  $\epsilon$ , como está representado na próxima figura. Com isso, a capacitância desse capacitor passa a ser  $C$  e a carga armazenada passa a ser  $Q$ :



Nosso problema é comparar  $C$  com  $C_0$ , ou seja, perceber a influência do material dielétrico. Para isso, note que, nas duas situações, a ddp  $U$  entre os terminais do capacitor é a mesma, igual à força eletromotriz

do gerador que o carregou plenamente. Assim, como  $U$  e  $d$  são iguais nas duas situações e lembrando que  $E = \frac{U}{d}$ , concluímos que o vetor campo elétrico  $\vec{E}$  tem a mesma intensidade nos dois casos.

Na primeira figura anterior (capacitor a vácuo), esse campo é devido exclusivamente às cargas das placas ( $+Q_0$  e  $-Q_0$ ). Na segunda (capacitor com material dielétrico), porém, a situação é mais complicada porque, além de um campo  $\vec{E}_p$  devido às cargas das placas ( $+Q$  e  $-Q$ ), existe outro. De fato, as moléculas do dielétrico, sujeitas à indução eletrostática das placas, organizam-se como na figura **a** a seguir, dando origem a um campo induzido  $\vec{E}_i$ . Veja, em **b**, as linhas de força do campo criado por uma das moléculas do dielétrico:



Então, o campo elétrico  $\vec{E}$  entre as placas é a resultante dos dois campos,  $\vec{E}_p$  e  $\vec{E}_r$ , sendo  $E = E_p - E_r$ . Portanto, para o campo resultante  $\vec{E}$  continuar igual ao do capacitor a vácuo, o campo  $\vec{E}_p$  criado pelas placas deve ser mais intenso que o campo  $\vec{E}$  que elas criaram na primeira situação.

Note que, para isso ser possível, a carga  $Q$  tem de ser maior que  $Q_0$ , ou seja, o capacitor com material dielétrico armazena mais carga que o capacitor a vácuo. Isso significa que a **presença do material dielétrico aumenta a capacitância**. De fato, como  $C = \frac{Q}{U}$  e  $U$  é uma constante,  $Q > Q_0$  implica  $C > C_0$ .

Observe que  $\vec{E}_p$  terá de ser tanto mais intenso quanto mais intenso for  $\vec{E}_r$ , ou seja, quanto mais intensa for a polarização das moléculas do dielétrico. Para  $\vec{E}_p$  ser mais intenso, maior terá de ser a carga  $Q$  e, portanto, maior será a capacitância  $C$ .

Se uma polarização mais intensa implica aumento da capacitância, a expressão  $C = \frac{\epsilon A}{d}$  permite concluir que a permissividade  $\epsilon$  é uma "medida" da intensidade da polarização das moléculas do dielétrico:

$\epsilon$  maior (polarização mais intensa)  $\Rightarrow$   $C$  maior

Vamos, finalmente, estabelecer uma relação quantitativa entre  $C$  e  $C_0$ .

No capacitor a vácuo, temos:  $C_0 = \frac{\epsilon_0 A}{d}$

Introduzindo o material dielétrico, a capacitância altera-se para:

$$C = \frac{\epsilon A}{d}$$

Lembrando que a **permissividade relativa** ou **constante dielétrica** do dielétrico é dada por  $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ , temos que  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ .

$$\text{Então: } C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \Rightarrow C = \epsilon_r C_0$$

Assim, a introdução do material dielétrico faz a capacitância  $C_0$  ficar multiplicada por  $\epsilon_r$ .

## 8. RIGIDEZ DIELÉTRICA E TENSÃO DE RUPTURA

Imagine, por exemplo, um capacitor que tenha o ar como dielétrico.

Embora o ar normalmente seja um isolante, ele pode tornar-se condutor se for ionizado por campos elétricos suficientemente intensos.

Denomina-se **rigidez dielétrica** de um dielétrico o mais intenso campo elétrico a que ele pode ser submetido, sem que ocorra sua ionização. Caso essa ionização aconteça, o dielétrico irá se tornar condutor e uma faísca saltará através dele, danificando o capacitor e podendo comprometer também outros componentes do circuito de que o capacitor participa.

A máxima diferença de potencial que se pode aplicar entre os terminais de um capacitor, sem que sua rigidez dielétrica seja ultrapassada, chama-se **tensão de ruptura**.

Ao adquirir um capacitor para determinado fim, devemos nos preocupar não apenas com sua capacitância, mas também com a tensão máxima a que ele poderá ser submetido, ou seja, com a tensão de ruptura.

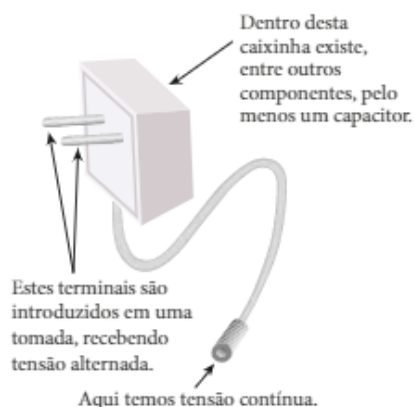
### Algumas aplicações dos capacitores

#### Circuitos retificadores

Os capacitores têm papel importante em diversos circuitos eletrônicos. Eles participam, por exemplo, dos circuitos retificadores, isto é, circuitos destinados à conversão de tensão alternada em tensão contínua. É o que acontece nas fontes de alimentação comumente usadas na substituição de pilhas, como ilustramos ao lado.

#### NOTA

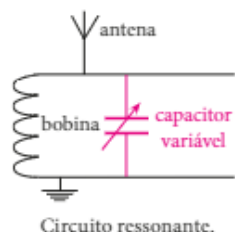
Há outras informações sobre circuitos retificadores no Capítulo 11.



### Circuitos ressonantes

Em um receptor de rádio, por exemplo, a antena capta as ondas emitidas pelas estações transmissoras: cada estação opera em uma frequência determinada.

O receptor consegue sintonizar as diversas estações, graças a um circuito denominado **circuito ressonante**.

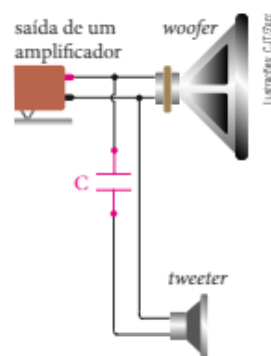


O circuito ressonante é constituído por um capacitor variável, em paralelo com uma bobina (enrolamento de fio em forma cilíndrica). Para cada valor da capacitância, o receptor sintoniza ondas de determinada frequência, ou seja, sintoniza determinada estação.

### Divisor de frequências

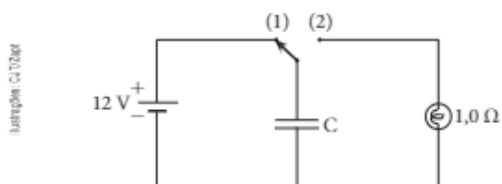
Os capacitores têm a importante propriedade de bloquear correntes contínuas e correntes alternadas de baixas frequências e de facilitar a passagem de correntes alternadas de altas frequências. Isso é usado, por exemplo, para separar os agudos (sons de frequências mais altas) de uma música, canalizando-os para um alto-falante adequado à reprodução desses sons (*tweeter*).

A figura ao lado ilustra um divisor de frequências rudimentar. Nesse sistema, o *woofer* é um alto-falante que reproduz bem os graves (sons de frequências baixas) e razoavelmente os sons de frequências médias. O capacitor, de capacitância e tipo adequados, bloqueia a passagem de baixas e médias frequências, mas facilita a chegada das frequências mais elevadas (agudos) ao *tweeter*.



## QUESTÕES COMENTADAS

**1** No instante  $t_0 = 0$ , um capacitor de  $2\,500\ \mu\text{F}$ , descarregado, é ligado a uma fonte de  $12\ \text{V}$ , por meio de uma chave colocada na posição **1**. Em um determinado instante  $t_1$ , o capacitor atinge plena carga.



Em um instante  $t_2$ , posterior a  $t_1$ , passa-se a chave para a posição **2**, e o capacitor se descarrega através de uma lâmpada de  $1,0\ \Omega$  de resistência, durante  $0,020\ \text{s}$ .

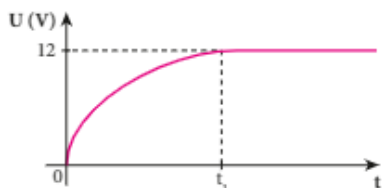
- Calcule a carga  $Q$  do capacitor no instante  $t_1$ , em milicoulombs.
- Calcule a energia potencial  $E_p$  armazenada no capacitor no instante  $t_1$ , em joules.
- Calcule a intensidade média  $i_m$  da corrente na lâmpada, durante a descarga do capacitor, em ampère.

- Esboce o gráfico da tensão  $U$  no capacitor, em função do tempo  $t$ , durante o processo de carga.
- Esboce o gráfico da intensidade  $i$  da corrente na lâmpada, em função do tempo  $t$ , durante o processo de descarga do capacitor.

### RESOLUÇÃO

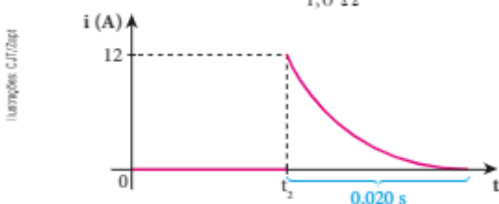
- Atendida a plena carga, a ddp  $U$  entre os terminais do capacitor é igual à fem do gerador:  $U = 12\ \text{V}$ .  
Sendo  $C = 2\,500\ \mu\text{F}$  a capacitância do capacitor, temos:  
 $Q = C U \Rightarrow Q = 2\,500\ \mu\text{F} \cdot 12\ \text{V} = 2\,500 \cdot 10^{-6}\ \text{F} \cdot 12\ \text{V}$   
Logo:  $Q = 30 \cdot 10^{-3}\ \text{C}$  ou  $Q = 30\ \text{mC}$
- Sendo  $C = 2\,500 \cdot 10^{-6}\ \text{F}$  e  $U = 12\ \text{V}$ , podemos escrever:  
 $E_p = \frac{C U^2}{2} = \frac{2\,500 \cdot 10^{-6} \cdot 12^2}{2} \Rightarrow E_p = 0,18\ \text{J}$
- Sendo  $Q = 30 \cdot 10^{-3}\ \text{C}$  e  $\Delta t = 0,020\ \text{s}$ , temos:  
 $i_m = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{30 \cdot 10^{-3}}{0,020} \Rightarrow i_m = 1,5\ \text{A}$

d) Durante o processo de carga, a ddp  $U$  no capacitor cresce de zero até 12 V, quando se estabiliza:



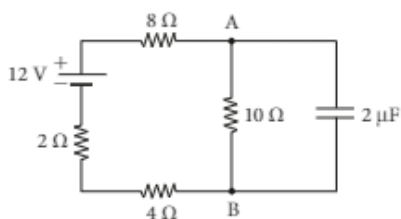
e) Durante a descarga do capacitor, a ddp  $U$  entre os seus terminais, que é igual à ddp aplicada na lâmpada, diminui. Por isso, a intensidade da corrente na lâmpada decresce com o tempo a partir do instante  $t_2$ , até anular-se.

Em  $t_2$ , o valor de  $i$  é igual a  $\frac{12 \text{ V}}{1,0 \Omega}$ , ou seja, 12 A.



**Respostas:** a) 30 mC c) 1,5 A e) Ver resolução.  
b) 0,18 J d) Ver resolução.

**2** Considere o circuito a seguir:

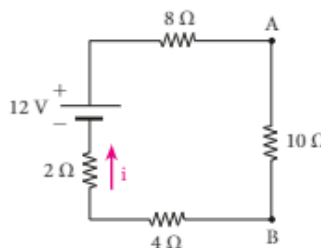


Supondo encerrado o processo de carga do capacitor, determine:

- a) a diferença de potencial entre os pontos A e B;
- b) a carga elétrica armazenada no capacitor.

**RESOLUÇÃO**

a) Em um circuito de corrente contínua, só há corrente no ramo em que se encontra o capacitor durante o seu processo de carga (ou descarga). Assim, encerrado esse processo, anula-se a corrente no citado ramo, que pode ser eliminado para efeito do cálculo da intensidade de corrente no resto do circuito:



Calculamos a intensidade de corrente no circuito:

$$\varepsilon = R_{eq} i \Rightarrow 12 = 24i \Rightarrow i = 0,5 \text{ A}$$

A diferença de potencial entre A e B é dada por:

$$U_{AB} = R_{AB} i = 10 \cdot 0,5 \Rightarrow U_{AB} = 5 \text{ V}$$

b) A carga elétrica do capacitor é dada por:

$$Q = C U_{AB}$$

Sendo  $C = 2 \mu\text{F} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ F}$  e  $U_{AB} = 5 \text{ V}$ , obtemos:

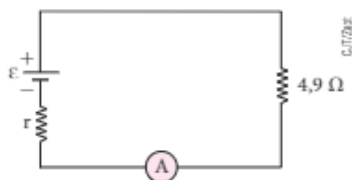
$$Q = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \Rightarrow Q = 10 \mu\text{C}$$

**Respostas:** a) 5 V; b) 10  $\mu\text{C}$ .

**QUESTÕES PROPOSTAS** FAÇA NO CADERNO.

**3.** Um capacitor de 10  $\mu\text{F}$  é ligado aos terminais da associação em série de duas pilhas de 1,5 V. Determine:  
a) a carga elétrica armazenada no capacitor;  
b) a energia potencial elétrica armazenada no capacitor.

**4.** A ddp entre os terminais de um capacitor ligado há muito tempo em um gerador, isto é, plenamente carregado, é igual a 9 V. Esse mesmo gerador participa agora do circuito esquematizado na figura, em que o amperímetro A, suposto ideal, indica 1,8 A. Determine a força eletromotriz e a resistência interna desse gerador.



**5.** Um capacitor plano a ar é ligado a uma bateria, carregando-se plenamente. Mantendo-o ligado à citada bateria, aumenta-se um pouco a distância entre suas placas. Consequentemente:

- a) a diferença de potencial entre as placas aumenta.
- b) a diferença de potencial entre as placas diminui.
- c) a capacitância do capacitor aumenta.
- d) a carga elétrica do capacitor diminui.
- e) a intensidade do campo elétrico entre as placas aumenta.

**6.** Um capacitor plano é ligado a uma bateria e, após ser carregado, é desconectado. Em seguida, aumenta-se um pouco a distância entre as suas armaduras. Em virtude dessa última operação:

- a) a capacitância do capacitor aumenta.



- b) a diferença de potencial entre as armaduras do capacitor não se altera.  
 c) a carga elétrica do capacitor diminui.  
 d) a intensidade do campo elétrico entre as armaduras do capacitor aumenta.  
 e) a energia potencial elétrica armazenada no capacitor aumenta.

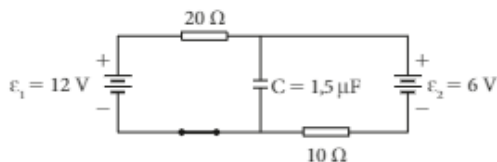
**7.** Um capacitor plano a vácuo (vácuo entre as armaduras) é ligado a um gerador. Mantendo-o ligado ao citado gerador, introduz-se uma placa de um material dielétrico entre as suas armaduras. Consequentemente:

- a) a capacitância do capacitor diminui.  
 b) a diferença de potencial entre as armaduras do capacitor aumenta.  
 c) a carga elétrica do capacitor aumenta.  
 d) a intensidade do campo elétrico entre as armaduras do capacitor aumenta.  
 e) a energia potencial elétrica armazenada no capacitor diminui.

**8.** Um capacitor plano a vácuo é carregado por um gerador e, em seguida, desconectado. Introduce-se, então, uma placa de um dielétrico entre as armaduras do capacitor. Consequentemente:

- a) a capacitância do capacitor diminui.  
 b) a diferença de potencial entre as armaduras do capacitor diminui.  
 c) a carga elétrica do capacitor aumenta.  
 d) a intensidade do campo elétrico entre as armaduras do capacitor aumenta.  
 e) a energia potencial elétrica armazenada no capacitor aumenta.

**9.** Considere o circuito a seguir.

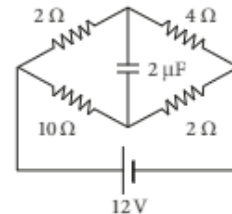


Sabe-se que esse circuito está fechado há muito tempo, o que significa que o capacitor já está plenamente carregado.

Sendo desprezíveis as resistências internas das baterias, calcule:

- a) a carga do capacitor;  
 b) a potência dissipada no resistor de 10 Ω.

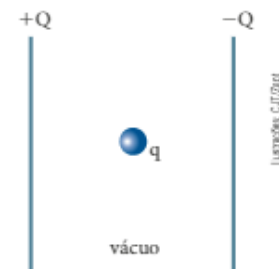
**10.** No circuito esquematizado na figura, o gerador é considerado ideal e o capacitor já está carregado:



Determine:

- a) a carga elétrica do capacitor;  
 b) a resistência do resistor que deveria substituir o resistor de 10 Ω, para que o capacitor não se carregasse.

**11.** A figura representa duas placas planas, isoladas, uniformemente eletrizadas com cargas constantes  $+Q$  e  $-Q$ , e situadas no vácuo. Uma carga de prova  $q$ , colocada entre as placas, submete-se a uma força elétrica de intensidade  $F_0$ . Se a região entre as placas for preenchida por um material isolante de constante dielétrica  $\epsilon_r$ , a intensidade da força elétrica atuante na mesma carga de prova passa a ser  $F$ .



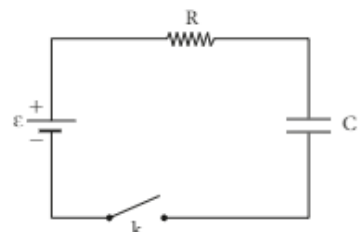
- a)  $F$  é maior, menor ou igual a  $F_0$ ? Justifique sua resposta.  
 b) Expresse  $F$  em função de  $F_0$ .



## DESCUBRA MAIS

O circuito ao lado é constituído de uma pilha de resistência interna desprezível e força eletromotriz  $\epsilon$ , de um resistor de resistência  $R$ , de um capacitor de capacitância  $C$ , inicialmente descarregado, e de uma chave  $k$ , aberta.

Fechando a chave, mostre que, após muito tempo, a energia armazenada no capacitor é igual à energia dissipada no resistor.



UNIDADE

3

## ELETROMAGNETISMO

O **Eletromagnetismo** é a parte da Física que estuda as inter-relações entre eletricidade e magnetismo e baseia-se em três fenômenos físicos fundamentais: **(I)** Correntes elétricas criam em seu entorno campos magnéticos; **(II)** Condutores percorridos por corrente elétrica, imersos em campo magnético, podem ficar sujeitos à ação de forças; e **(III)** A variação do fluxo magnético através de um condutor pode induzir corrente elétrica nesse condutor.



Eletromagneto criado na década de 1990 para um *workshop* no Museu de Ciências, em Londres.

NESTA UNIDADE

8

CAMPO MAGNÉTICO E SUA INFLUÊNCIA SOBRE CARGAS ELÉTRICAS

9

A ORIGEM DO CAMPO MAGNÉTICO

10

FORÇA MAGNÉTICA EM CORRENTES ELÉTRICAS

11

INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA



# CAMPO MAGNÉTICO E SUA INFLUÊNCIA SOBRE CARGAS ELÉTRICAS

## 1. INTRODUÇÃO

Em **Eletrodinâmica**, estudamos as cargas elétricas em movimento ordenado (corrente elétrica) e os efeitos produzidos por elas nos condutores, por exemplo, no filamento de uma lâmpada, que se aquece quando elétrons fluem através dele.

Vamos iniciar, agora, o estudo do **Eletromagnetismo**. Veremos, por exemplo, que a corrente elétrica, além de produzir efeitos em um fio, também afeta o espaço ao redor dele.

A tecnologia disponível no mundo atual está em grande parte alicerçada no Eletromagnetismo. Por exemplo, motores em geral, dos mais delicados, que fazem funcionar tocadores de CD, até aqueles de grande porte, que acionam indústrias e locomotivas, têm seu princípio de funcionamento relacionado a fenômenos eletromagnéticos.

Esse assunto é bem abrangente. Para termos uma ideia, abordaremos, por exemplo, o princípio de funcionamento da campainha elétrica, dos galvanômetros analógicos, dos microfones dinâmicos, das usinas geradoras de energia elétrica (hidrelétrica, termelétrica, nuclear), dos transformadores de tensão, dos cartões magnéticos, das antigas fitas magnéticas de áudio e vídeo, dos espectrômetros de massa (equipamentos usados na determinação de massas atômicas e na separação dos isótopos dos elementos químicos) e dos aceleradores de partículas (destinados ao bombardeamento de núcleos atômicos, o que causa o aparecimento de novas partículas que ajudam a desvendar os mistérios da estrutura da matéria).

O estudo do Eletromagnetismo também nos possibilita entender o comportamento dos ímãs e a ocorrência das auroras polares. Na Medicina moderna, sua aplicação no diagnóstico por imagem, como a ressonância magnética nuclear, é muito importante.



HASHIMOTO KEIICHI/GETTY IMAGES

A levitação magnética reduz o atrito, as vibrações e os ruídos nesse trem em circulação no Japão. Ele flutua em um campo magnético e atinge velocidades superiores a 500 km/h. Os sistemas de levitação e de propulsão são eletromagnéticos.

## 2. ÍMÃS OU MAGNETOS

### Polos magnéticos

Provavelmente você já manuseou um **ímã** e pôde observar que ele atrai alguns materiais, como, por exemplo, o ferro.

As regiões de um ímã em que as ações magnéticas são mais intensas denominam-se **polos magnéticos**.

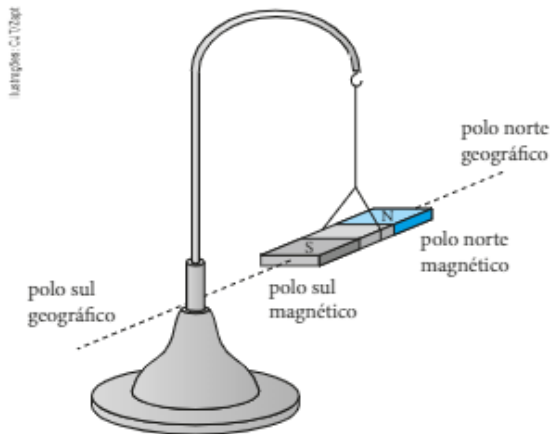
Em geral, um ímã tem dois polos. Os polos dos ímãs em forma de barra, por exemplo, localizam-se, mais comumente, em suas extremidades.



O ímã da foto entrou em contato com limalha de ferro. Observe a maior quantidade de limalha acumulada em suas extremidades, nas quais se localizam os seus polos magnéticos.

Quando um desses ímãs é suspenso pelo seu centro de gravidade, como no caso da agulha magnética da bússola, ele se alinha aproximadamente na direção norte-sul geográfica do local.

Observe a ilustração abaixo: a extremidade do ímã que se volta para o polo norte geográfico recebe o nome de **polo norte magnético**. Da mesma forma, a extremidade que aponta para o polo sul geográfico chama-se **polo sul magnético**.

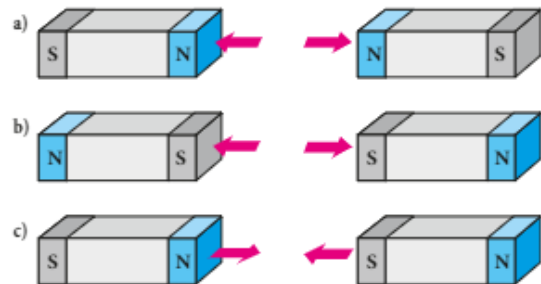


A magnetita, um dos minérios de óxido de ferro ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), é um ímã natural, ou seja, é encontrada na natureza com os polos magnéticos norte e sul.

## Atração e repulsão

Se você manusear dois ímãs de polos magnéticos conhecidos, facilmente descobrirá que:

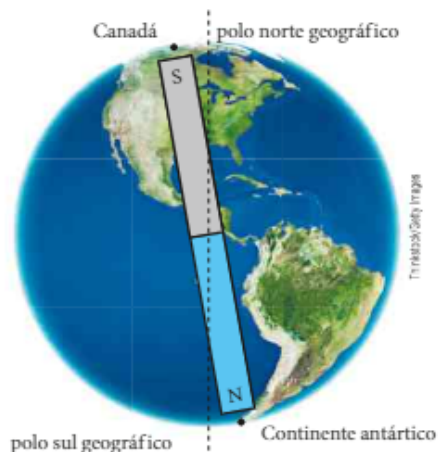
Polos magnéticos de mesmo nome se repelem e polos magnéticos de nomes diferentes se atraem.



Em **a** e **b**, os ímãs se repelem, pois polos de mesmo nome estão próximos: norte-norte e sul-sul, respectivamente. Em **c**, os ímãs se atraem, já que polos de nomes diferentes estão próximos.

Esse fato leva-nos a concluir que, se o polo norte magnético da agulha da bússola aponta para o polo norte geográfico, é porque **no polo norte geográfico existe um polo sul magnético**. Da mesma forma, **no polo sul geográfico existe um polo norte magnético**.

Salientamos ainda que, na verdade, os polos geográficos e os polos magnéticos da Terra não estão exatamente no mesmo local. Foi por isso que dissemos anteriormente que a agulha da bússola indica **aproximadamente** a direção norte-sul geográfica.

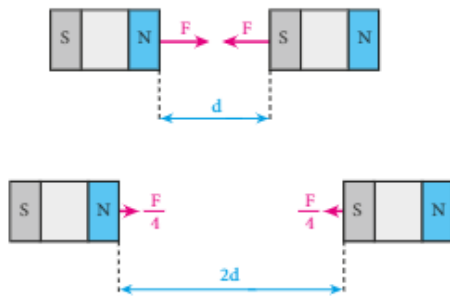


O polo sul magnético da Terra encontra-se no Canadá, a cerca de 1300 km do polo norte geográfico, e seu polo norte magnético está na costa do continente antártico. Dessa maneira, a Terra se comporta aproximadamente como o ímã representado, que forma cerca de  $11^\circ$  com a direção norte-sul geográfica. (Ilustração com elementos sem proporção entre si e em cores fantasia).

## Lei das interações entre polos magnéticos

Em 1750, o geólogo e astrónomo inglês John Michell (1724-1793) usou uma balança de torção, que ele mesmo inventou, para investigar as forças de campo entre polos magnéticos de ímãs e elaborou a seguinte lei:

Dois polos magnéticos se atraem ou se repelem na razão inversa do quadrado da distância que os separa.

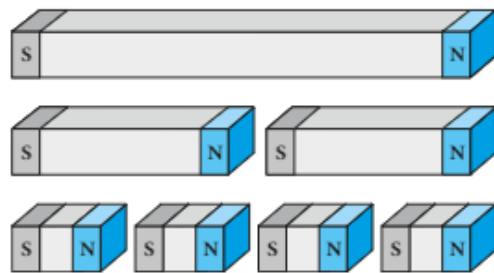


Dobrando a distância entre os polos, a intensidade das forças reduz-se a um quarto do valor inicial.

## Inseparabilidade dos polos de um ímã

A experiência mostra que é impossível separar os polos magnéticos de um ímã. Isso significa que é impossível obter um pedaço de ímã que tenha só o polo norte magnético ou só o polo sul magnético. De fato, quando dividimos um ímã ao meio, obtemos dois outros ímãs, cada um com seus próprios polos norte e sul.

Se dividirmos ao meio esses dois novos ímãs, obteremos quatro ímãs também com seus próprios polos norte e sul e assim sucessivamente, o que será estudado no capítulo seguinte. Observe as figuras:



Ilustrações: G. T. Z. B. B.

É impossível separar os polos magnéticos de um ímã. Cada pedaço continuará sendo sempre um **dipolo** magnético.



### No futuro usaremos somente carros elétricos?



O pior desses vilões é o  $\text{CO}_2$  (gás carbônico), um dos gases responsáveis pelo efeito estufa. Uma alternativa viável seria que os carros de pequeno porte fossem movidos a energia elétrica. A fotografia acima mostra um desses veículos em uma rua da cidade de Hamburgo, Alemanha.

Observe que o automóvel está "ligado na tomada", sendo abastecido em um dos muitos terminais lá encontrados.

O grande desafio, porém, será produzir baterias melhores e mais leves que as atuais. Estas são muito grandes, têm massa de quase meia tonelada (500 kg) e autonomia que não chega a 100 km, dependendo, portanto, de uma ampla rede de pontos que permitam a recarga de maneira fácil e rápida.

## FAÇA VOCÊ MESMO

### Uma bússola rudimentar

Neste primeiro capítulo de Eletromagnetismo, vamos fazer algumas investigações a respeito das bases do magnetismo. Vamos começar construindo uma bússola rudimentar.

As investigações devem ser feitas longe (a pelo menos uns 30 cm) de materiais ferromagnéticos que possam afetá-las, como utensílios de ferro ou aço.

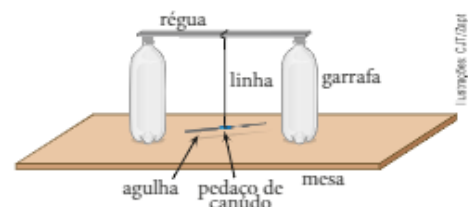
#### Material necessário

- 1 canudo de refrigerante (dos mais finos);
- 1 m de linha para pipa ou de linha de costura;
- 2 agulhas de crochê, de aço;
- 2 garrafas PET de 1,5 L ou 2 L;
- 1 régua de 30 cm;
- 1 ímã em forma de barra reta, com polos nas extremidades.

#### Procedimento

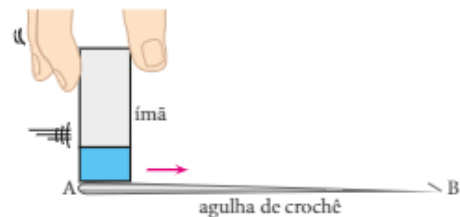
**I.** Corte um pedaço do canudo, com cerca de 4 cm de comprimento. Amarre no pedaço de canudo uma das extremidades da linha, dando um nó apertado, sem, entretanto, obstruir o canal interno ao pedaço de canudo, no qual será introduzida uma das agulhas. Introduza no pedaço de canudo uma das agulhas de crochê, posicionando-a de modo que, suspensa pela linha, fique disposta horizontalmente.

**II.** Coloque as duas garrafas em pé sobre uma mesa (que não pode ser de ferro) e apoie as extremidades da régua em suas tampas. Amarre a linha mais ou menos no meio da régua, de modo que a agulha fique a uns 3 cm da superfície da mesa.



**III.** Segurando com a mão a outra agulha de crochê, aproxime cada uma de suas extremidades de cada uma das extremidades da agulha suspensa. Você observou alguma interação magnética (atração ou repulsão)? Por quê?

**IV.** Retire do pedaço de canudo a agulha suspensa. Agora você vai precisar do ímã. É fundamental identificar qual polo dele você vai usar. Não importa saber se é norte ou sul, mas é necessário sempre saber se está ou não usando o mesmo polo. Se não houver cores ou letras identificando os polos, escolha qualquer um deles e marque-o com fita adesiva, tinta ou qualquer outra coisa. Na agulha que estava suspensa, deslize algumas vezes o polo marcado no ímã, sempre no mesmo sentido. Vamos escolher, por exemplo, o seguinte sentido: da extremidade mais grossa (A) para a extremidade mais fina (B) da agulha.



**V.** Reintroduza a agulha no pedaço de canudo. Novamente, segure com a mão a outra agulha – aquela que não se submeteu ao ímã – e aproxime, sem encostar, cada uma de suas extremidades de cada uma das extremidades da agulha suspensa. Você observou alguma interação magnética? Se observou, descreva de que tipo foi (atração ou repulsão). O que aconteceu com a agulha na qual você deslizou o ímã?

**VI.** Usando a outra agulha e o ímã, repita exatamente a mesma operação realizada com a agulha que está suspensa, ou seja, deslize algumas vezes o **mesmo polo** (polo marcado) do ímã no sentido da extremidade mais grossa (A) para a mais fina (B). Mais uma vez, segurando essa agulha com a mão, aproxime-a da agulha suspensa e observe que tipo de interação magnética ocorre entre as extremidades finas, entre as extremidades grossas e entre a extremidade fina de uma e a extremidade grossa da outra. Descreva o que observou. O que você pode concluir sobre os polos magnéticos das extremidades grossas e os das extremidades finas das duas agulhas?

**VII.** Mantenha na mesma posição a agulha que já está suspensa e, usando o mesmo polo do ímã (polo marcado), deslize-o algumas vezes sobre a outra agulha, mas agora em sentido contrário, isto é, da extremidade mais fina (B) para a mais grossa (A).

Aproxime essa agulha da que está suspensa e observe as interações magnéticas entre as extremidades das duas agulhas. O que aconteceu com a polaridade magnética da agulha em que o ímã deslizou em sentido contrário?

### Analisando o experimento

1. Após submeter-se ao ímã, como foi descrito, a agulha suspensa busca estabilizar-se em alguma direção especial? Que direção é essa?
2. Em relação a cada um de nós, o Sol nasce e se põe em lugares que mudam ao longo do ano. Entretanto, costumamos dizer que o Sol nasce no “lado leste” e se põe no “lado oeste”. Com base nisso, podemos identificar os polos magnéticos, norte e sul, da agulha imantada suspensa? Como?
3. Sabe-se que no material da agulha utilizada e em alguns outros materiais já existem, naturalmente, minúsculos ímãs. Quando a agulha não está imantada, esses minúsculos ímãs estão dispostos aleatoriamente. Entretanto, sob a influência do campo magnético do ímã que desliza na agulha, esses pequenos ímãs ficam organizados e ela se imanta. Supondo que o polo do ímã que desliza na agulha, da extremidade grossa (A) para a fina (B), seja do tipo norte magnético, que tipo de polaridade magnética as extremidades da agulha adquirem?
4. Existem agulhas de crochê feitas de alumínio. Usando uma das agulhas, você obteria os mesmos resultados experimentais que obteve com a agulha de aço?

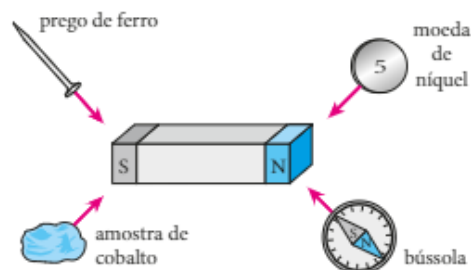
## 3. O CAMPO MAGNÉTICO DE UM ÍMÃ

Vimos que uma massa cria uma região de influências sobre outras massas, denominada **campo gravitacional**, que é descrito pelo vetor campo gravitacional  $\vec{g}$ .

Vimos, também, que uma carga elétrica estática cria uma região de influências sobre outras cargas, denominada **campo eletrostático**, que é descrito pelo vetor campo elétrico  $\vec{E}$ .

Um ímã, por sua vez, também cria uma região de influências que são significativas tanto em outros ímãs como em alguns materiais, como o ferro, o cobalto, o níquel e algumas ligas. Essa região é denominada **campo magnético**, que também será descrita por um vetor, como veremos adiante.

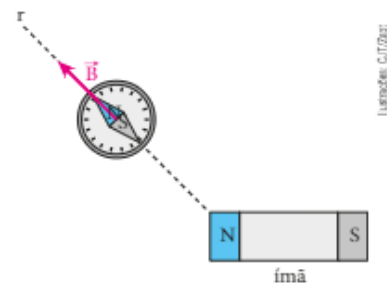
Veja, na ilustração a seguir, alguns corpos submetidos ao campo magnético de um ímã.



### Vetor indução magnética

O campo magnético de um ímã também é descrito por um vetor. Esse vetor é denominado **vetor indução magnética** e simbolizado por  $\vec{B}$ .

Por enquanto, veremos apenas a direção e o sentido de  $\vec{B}$ . Na seção 5, abordaremos sua intensidade.



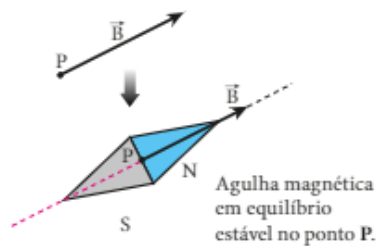
Na ilustração acima, uma bússola se encontra sob a ação do campo magnético de um ímã. Suponha desprezíveis outros eventuais campos magnéticos na região, inclusive o da Terra.

O vetor indução magnética  $\vec{B}$ , criado pelo ímã, na posição em que a bússola está, com sua agulha em equilíbrio estável, tem a seguinte orientação:

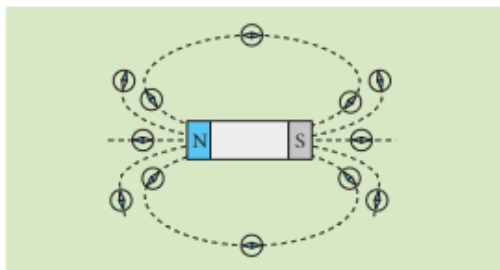
**Direção:** da reta  $r$  com a qual a agulha se alinha.  
**Sentido:** para onde aponta o polo norte magnético da agulha.

Então, se conhecermos o vetor indução magnética em determinado local, saberemos também como a agulha da bússola vai se estabilizar naquele local:

Vetor indução magnética no ponto P.



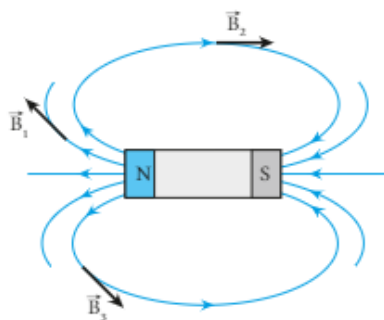
Suponhamos, agora, um ímã e várias bússolas bem pequenas ao seu redor, todas sobre uma mesa de madeira, como mostra a ilustração a seguir. Podemos traçar linhas de um polo a outro do ímã, de modo que elas tangenciem as agulhinhas das bússolas.



Mesa vista de cima.

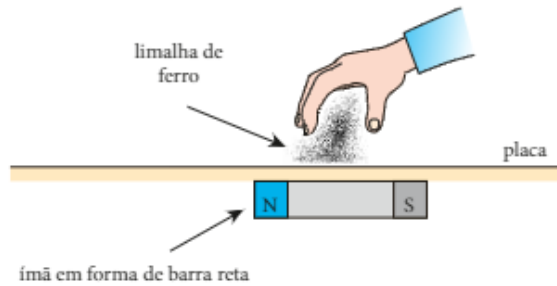
Essas linhas são denominadas **linhas de indução** do campo magnético do ímã; na região externa ao ímã, elas são orientadas convencionalmente do polo norte para o polo sul, como mostra a figura a seguir.

Desse modo, o vetor  $\vec{B}$ , que tangencia essas linhas em cada um de seus pontos, tem sentido concordando com o das linhas.

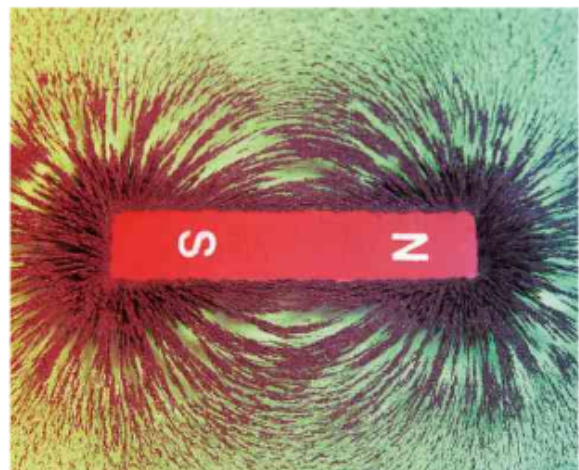


Na região externa a um ímã, as linhas de indução orientam-se do polo norte para o polo sul.

Para a visualização das linhas de indução, também podemos utilizar limalha de ferro: coloque um ímã de baixo de uma placa de papelão, plástico ou madeira fina e, em seguida, pulverize limalha de ferro por toda a placa, como sugere a figura a seguir.



Você verá, então, a configuração de linhas de indução mostrada a seguir, denominada **padrão** do campo magnético.



Fotografia mostrando o padrão do campo magnético de um ímã em forma de barra reta, obtido com limalha de ferro.

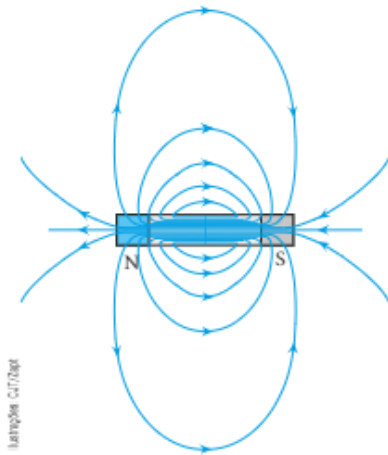
Nessa verificação experimental, cada fragmento da limalha de ferro imanta-se na presença do campo magnético do ímã, comportando-se como uma minúscula agulha magnética.

A limalha de ferro também é útil para observarmos o padrão do campo magnético de ímãs com outros formatos.

### Outras características das linhas de indução

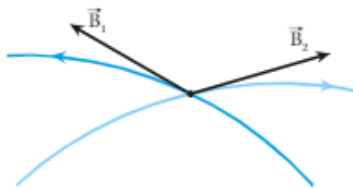
- As linhas de indução do campo magnético de um ímã não existem apenas na região externa a ele, mas também em seu interior. Portanto, essas linhas são fechadas.





Observe que, como na região externa ao ímã a orientação dessas linhas foi convencionada de norte para sul, elas se orientam de sul para norte na região interna.

- As linhas de indução de um campo magnético não podem se cruzar. Se isso acontecesse, o vetor  $\vec{B}$  teria duas orientações possíveis no cruzamento, o que é absurdo.



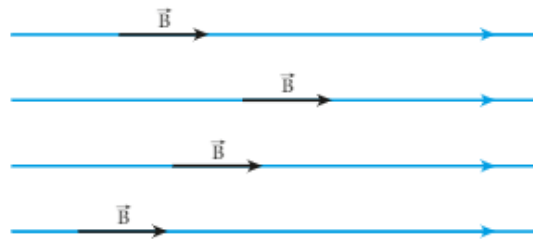
Você deve se lembrar de que essa mesma proibição existe com relação às linhas de força de um campo elétrico.

- Ao representar um conjunto de linhas de indução, a concentração dessas linhas (densidade de linhas) é maior onde o campo magnético é mais intenso. Confirme isso, observando a concentração das linhas de indução nas proximidades dos polos do ímã.

## 4. CAMPO MAGNÉTICO UNIFORME

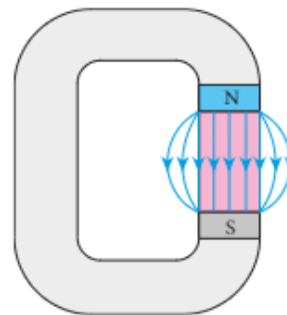
**Campo magnético uniforme** é aquele em que o vetor indução magnética  $\vec{B}$  tem o mesmo módulo, a mesma direção e o mesmo sentido em todos os pontos do meio.

Embora possam ser desenhadas em todos os pontos do campo, as linhas de indução de um campo magnético uniforme são representadas por algumas linhas retas paralelas entre si e igualmente orientadas. Além disso, elas são traçadas com espaçamentos iguais para indicar que a intensidade do campo é igual em toda a região:



Em um campo magnético uniforme, as linhas de indução são representadas por linhas retas paralelas, igualmente espaçadas e com a mesma orientação.

O campo magnético na região destacada na figura abaixo, entre os polos de um ímã em forma de U, é aproximadamente uniforme.



Padrão do campo magnético criado por um ímã em forma de U, obtido com limalha de ferro.

### Outra representação

Imaginemos um campo magnético uniforme em que as linhas de indução são perpendiculares ao plano da página, como representado a seguir.

Se o sentido do campo for para fora do papel, ele será representado por um conjunto de pontos uniformemente distribuídos, como representa a figura a seguir.



Campo magnético uniforme "saindo do papel".

Se ocorrer o contrário, isto é, se o sentido do campo for para dentro do papel, ele será representado por um conjunto de "cruzinhas" também uniformemente distribuídas, conforme a figura a seguir.



Campo magnético uniforme "entrando no papel".

Esses pontos (•) e essas "cruzinhas" (×) também podem ser usados para representar um campo magnético não uniforme e quaisquer outras grandezas vetoriais, e até mesmo correntes elétricas "saindo" ou "entrando" no papel.

## 5. AÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO SOBRE CARGAS ELÉTRICAS

Elétrons, prótons e outros portadores de carga elétrica, **por possuírem essa propriedade física**, podem interagir com campos magnéticos, submetendo-se a uma **força magnética**  $\vec{F}_m$ .

Vamos supor, neste capítulo, que as partículas eletrizadas se submetam a **campos magnéticos estacionários**, isto é, a campos magnéticos em que o vetor  $\vec{B}$  é, em cada ponto do campo, invariável no tempo.

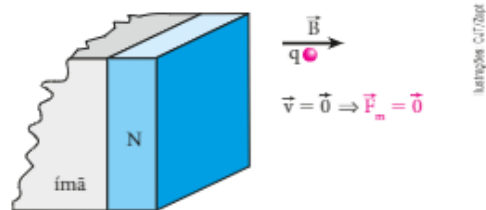
As fontes desses campos, também denominados **campos magnetostáticos**, podem ser **ímãs permanentes** e **correntes elétricas contínuas e constantes** (essa segunda possibilidade será abordada no Capítulo 9).

Para estudar a força magnética  $\vec{F}_m$  numa partícula eletrizada com carga  $q$ , vamos supor que ela esteja com velocidade  $\vec{v}$  em relação a um referencial  $R$ , numa posição em que se submete a um campo magnético estacionário, cujo vetor indução magnética, nesse mesmo referencial  $R$ , é igual a  $\vec{B}$ .

Descreveremos a seguir alguns resultados que podem ser obtidos experimentalmente. Ficaremos sabendo que  $\vec{F}_m$  só se manifesta quando a velocidade  $\vec{v}$  do portador de carga elétrica não é nula e, além disso, tem direção diferente da do vetor indução magnética  $\vec{B}$ .

### Carga elétrica com velocidade nula

Se tivermos um ímã em repouso em um laboratório (referencial  $R$ ) e uma partícula com carga elétrica  $q$  for abandonada em suas proximidades, com velocidade nula em relação ao ímã (e, portanto, também nula em relação ao laboratório), não surgirá força magnética na partícula, independentemente do sinal de sua carga:



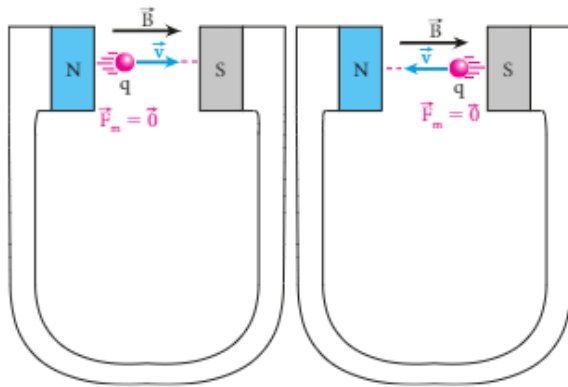
Ímã em repouso no laboratório. A força magnética na partícula de carga  $q$  e  $\vec{v} = \vec{0}$  é nula. Assim, se ela também estivesse livre de outras forças, permaneceria **em repouso** na posição em que foi abandonada.

Portanto, dentro das condições estabelecidas na introdução desta seção, podemos afirmar que:

Um campo magnético estacionário não atua em portadores de carga elétrica que estejam com velocidade nula.

### Carga elétrica em movimento na mesma direção do campo

Partículas com carga  $q$ , movendo-se entre os polos de um ímã em repouso no laboratório, na mesma direção do campo uniforme de indução magnética  $\vec{B}$  e com velocidade  $\vec{v}$  em relação ao laboratório (ou ímã), também não se submetem a forças magnéticas, independentemente do sinal da carga e do sentido do movimento:



A força magnética na partícula de carga  $q$  é nula. Assim, enquanto nenhuma outra força relevante atuar nessa partícula, ela realizará um **movimento retilíneo e uniforme**.

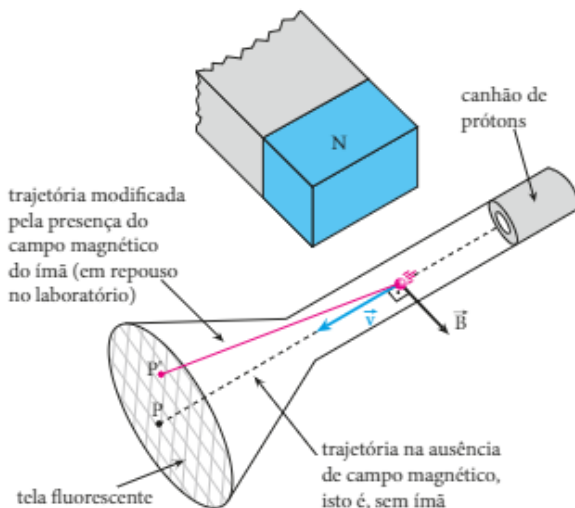
Portanto, dentro das condições estabelecidas, podemos afirmar que:

Um campo magnético estacionário não atua em cargas elétricas que se movem na mesma direção desse campo.

### Carga elétrica em movimento de direção diferente da do campo

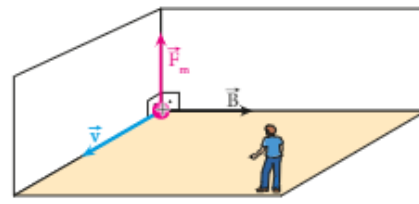
#### Carga movendo-se perpendicularmente ao campo

Na figura a seguir, um canhão de prótons está acoplado a um tubo de vidro em que se fez o vácuo. Sua extremidade mais larga é uma tela recoberta internamente com material fluorescente, de modo que o ponto atingido pelos prótons se torna luminescente.



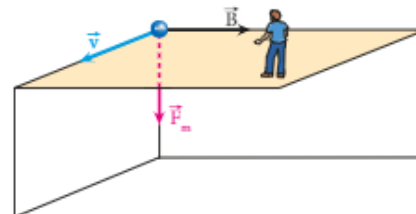
Na ausência do ímã representado na figura, e de outras forças relevantes, os prótons emitidos pelo canhão movem-se sensivelmente em linha reta, com velocidade  $\vec{v}$  em relação ao laboratório, atingindo o ponto **P** da tela. Na presença do ímã, entretanto, a trajetória modifica-se, e os prótons desviam-se para cima, atingindo **P'** em vez de **P**. Concluimos, então, que o campo magnético **atuou** nos prótons.

Esse experimento revela que, embora os prótons se desviem verticalmente para cima, o módulo de suas velocidades permanece o mesmo. Assim, a força magnética  $\vec{F}_m$  que o campo magnético faz surgir em cada próton deve ter direção perpendicular ao plano definido pelos vetores  $\vec{B}$  e  $\vec{v}$  e sentido para cima.



A força magnética tem direção perpendicular ao plano definido por  $\vec{B}$  e  $\vec{v}$ .

Se substituirmos o canhão de prótons por um de elétrons e repetirmos o experimento descrito anteriormente, vamos observar que os elétrons se desviam para baixo. Isso significa que a força magnética  $\vec{F}_m$  tem sentido para baixo.



Na carga negativa, a força magnética continua com direção perpendicular ao plano definido por  $\vec{B}$  e  $\vec{v}$ , mas com sentido invertido.

A intensidade da força magnética que atua numa partícula eletrizada pode ser obtida a partir do desvio sofrido pela partícula. Experimentos mostram que, em determinado campo magnético, a intensidade dessa força é proporcional ao módulo da carga elétrica e ao módulo da velocidade da partícula (quando  $\vec{v}$  é perpendicular a  $\vec{B}$ ). A intensidade de  $\vec{B}$ , nesse caso, pode ser definida pela expressão:

$$B = \frac{F_m}{|q|v}$$

Se  $|q| = 2 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ ,  $v = 3 \cdot 10^6 \text{ m/s}$  e  $F_m = 60 \text{ N}$ , por exemplo, temos:

$$B = \frac{60 \text{ N}}{2 \cdot 10^{-6} \text{ C} \cdot 3 \cdot 10^6 \text{ m/s}} = 10 \frac{\text{N}}{\text{C} \cdot \text{m/s}}$$

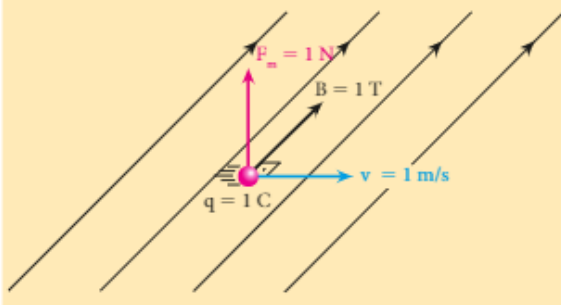
Observemos, então, que a intensidade do vetor indução magnética expressa a intensidade de força magnética por unidade de carga e por unidade de velocidade perpendicular a  $\vec{B}$ .

A unidade  $\frac{\text{N}}{\text{C} \cdot \text{m/s}}$  é denominada **tesla** (símbolo: T), em homenagem ao físico e inventor iugoslavo Nikola **Tesla** (1856-1943).

Portanto, no SI, a unidade de medida da intensidade de  $\vec{B}$  é o tesla, e podemos dizer que:

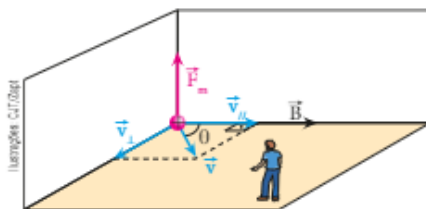
Um tesla (1 T) é a intensidade de um campo magnético uniforme em que uma partícula hipoteticamente eletrizada com carga igual a 1 C, movendo-se com velocidade de 1 m/s, perpendicularmente ao campo, submete-se a uma força magnética de 1 N de intensidade.

$$B = \frac{F_m}{|q|v} \Rightarrow 1\text{T} = \frac{1\text{N}}{1\text{C} \cdot 1\text{ m/s}}$$



### Carga movendo-se em uma direção qualquer

Se a velocidade  $\vec{v}$  da partícula eletrizada formar com o vetor indução magnética  $\vec{B}$  um ângulo  $\theta$  qualquer, podemos determinar as componentes de  $\vec{v}$  na direção de  $\vec{B}$  e na direção perpendicular a  $\vec{B}$ .



$\vec{v}_{//}$  é a componente de  $\vec{v}$  na direção de  $\vec{B}$  (paralela a  $\vec{B}$ ).

$\vec{v}_{\perp}$  é a componente de  $\vec{v}$  na direção perpendicular a  $\vec{B}$ .

A componente  $\vec{v}_{//}$  tem a mesma direção de  $\vec{B}$  e, como já vimos, não provoca o surgimento de força magnética. A componente  $\vec{v}_{\perp}$  é perpendicular a  $\vec{B}$  e, portanto, faz surgir uma força magnética tal que:

$$B = \frac{F_m}{|q|v_{\perp}} \Rightarrow F_m = |q|v_{\perp}B \quad (\text{I})$$

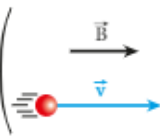
Como  $v_{\perp} = v \sin \theta$ , temos, de (I):

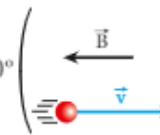
$$F_m = |q|vB \sin \theta$$

em que  $\theta$  é o menor ângulo entre  $\vec{v}$  e  $\vec{B}$ .

Observe, na expressão que acabamos de obter, alguns fatos já descritos nesta seção:

- Se  $v = 0$ , então  $F_m = 0$ .

- Se  $\theta = 0^\circ$  , então  $\sin \theta = 0$  e  $F_m = 0$ .

- Se  $\theta = 180^\circ$  , então  $\sin \theta = 0$  e  $F_m = 0$ .

- Se  $\theta = 90^\circ$ , então  $\sin \theta = 1$  e  $F_m = |q|vB$ .

Além disso, se  $q = 0$  (partícula eletricamente neutra),  $F_m = 0$ .

### Regra da mão direita espalmada

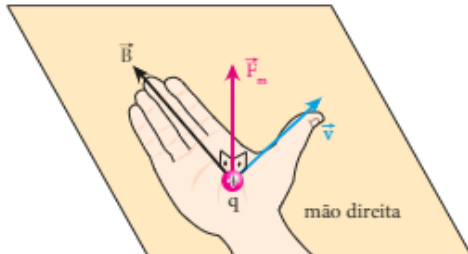
Até aqui, vimos como calcular a intensidade  $F_m$  da força magnética estudada, e conhecemos também a direção dessa força, que é perpendicular ao plano definido pelos vetores  $\vec{B}$  e  $\vec{v}$ .

Agora, vamos ver como determinar o **sentido** da força magnética. Para isso, usaremos uma regra prática, denominada **regra da mão direita espalmada**, que está de acordo com as observações experimentais.

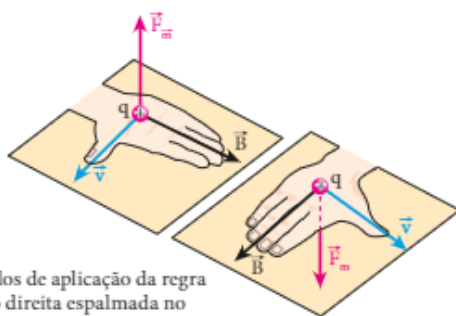
#### Para carga positiva

Considere uma partícula dotada de carga positiva  $q$ , movimentando-se com uma velocidade  $\vec{v}$  num campo de indução magnética  $\vec{B}$  e submetendo-se a uma força magnética  $\vec{F}_m$ .

Para determinar o sentido dessa força, aponte, com a mão direita espalmada, o polegar no sentido da velocidade  $\vec{v}$  e os outros dedos no sentido de  $\vec{B}$ . A força  $\vec{F}_m$  será, então, perpendicular à palma da mão, "saindo" dela.



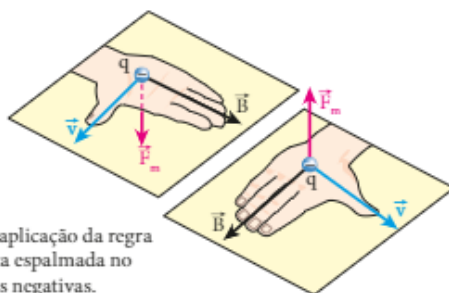
O polegar aponta no sentido de  $\vec{v}$ . Os outros dedos apontam no sentido de  $\vec{B}$ . A força "sai" da palma da mão.



Exemplos de aplicação da regra da mão direita espalmada no caso de cargas positivas.

#### Para carga negativa

Se a carga for negativa, a força magnética terá sentido oposto ao que teria se a carga fosse positiva. Nesse caso, a força também é perpendicular à palma da mão, mas "entrando" nela.



Exemplos de aplicação da regra da mão direita espalmada no caso de cargas negativas.

### Regra de Fleming ou regra da mão esquerda

Esta é uma regra prática alternativa para determinar a **orientação da força magnética** atuante em uma partícula eletrizada. Para usá-la, devemos dispor o dedo indicador na direção e no sentido de  $\vec{B}$ , e o dedo médio na direção e no sentido de  $\vec{v}$ . Assim, o polegar indicará a direção e o sentido da força magnética  $\vec{F}_m$ ,

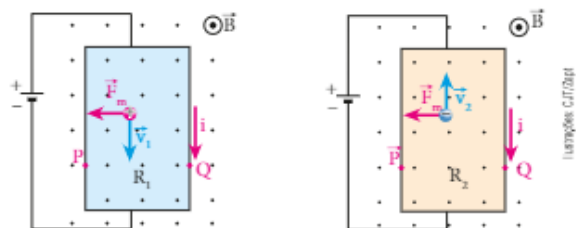
como ilustra a figura, caso a carga da partícula seja positiva. Se for negativa, o sentido da força  $\vec{F}_m$  será oposto ao previsto pela regra.



## 6. EFEITO HALL

Em 1879, o físico norte-americano Edwin Hall (1855-1938) realizou um experimento para descobrir o sinal, positivo ou negativo, da carga das partículas que constituem a corrente elétrica em um condutor qualquer.

Veja, nas ilustrações a seguir, duas regiões retangulares,  $R_1$  e  $R_2$ , condutoras, percorridas por correntes elétricas no sentido indicado. Essas regiões estão imersas num campo magnético "saindo" desta página, perpendicularmente a ela.



Note que a corrente tem o sentido indicado, quer os portadores móveis tenham carga positiva e velocidade  $\vec{v}_1$  (região  $R_1$ ), quer tenham carga negativa e velocidade  $\vec{v}_2$  (região  $R_2$ ). E, nas duas situações, os portadores se submetem a forças magnéticas orientadas para a esquerda.

Desse modo, na região  $R_1$  haverá um acúmulo de cargas positivas no lado esquerdo, o que torna o potencial elétrico do ponto P,  $v_P$ , maior que o do ponto Q,  $v_Q$ .

Na região  $R_2$ , por sua vez, haverá um acúmulo de cargas negativas, também no lado esquerdo, o que torna  $v_P$  menor que  $v_Q$ .

Medindo, então, a diferença de potencial entre P e Q, podemos descobrir se os portadores móveis têm carga positiva ou negativa. A conclusão experimental de que  $v_P$  é maior que  $v_Q$  revela-nos que os portadores têm carga positiva. Se, porém, concluirmos que  $v_P$  é menor que  $v_Q$ , saberemos que os portadores têm carga negativa.

## QUESTÕES COMENTADAS



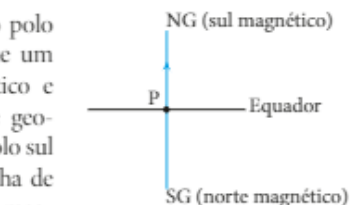
**1** Suponha coincidentes os polos geográficos e os polos magnéticos da Terra e considere um ponto **P** no Equador do planeta.



- Desenhe o vetor indução magnética  $\vec{B}_i$  criado pela Terra, no ponto **P**.
- Se um ímã criar em **P** um campo magnético  $\vec{B}_i$ , orientado de oeste para leste e com a mesma intensidade de  $\vec{B}_i$ , como se estabilizará a agulha de uma bússola posicionada na região circular tracejada?

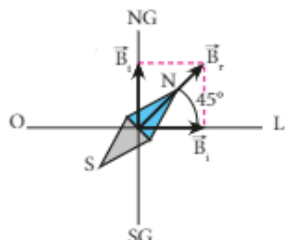
### RESOLUÇÃO

- Lembrando que no polo sul geográfico existe um polo norte magnético e que no polo norte geográfico existe um polo sul magnético, uma linha de indução do campo magnético terrestre cruza o Equador com o seguinte sentido: Então, o vetor  $\vec{B}_i$ , no ponto **P**, pode ser representado por:



- A agulha se estabilizará na direção do campo magnético resultante  $\vec{B}_r$  ( $\vec{B}_r = \vec{B}_i + \vec{B}_i$ ), com seu polo norte apontando no sentido de  $\vec{B}_r$ .

**Respostas:** Ver resolução.



**2** Julgue falsa ou verdadeira cada uma das seguintes afirmações:

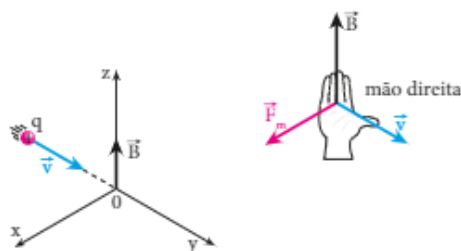
- Um portador de carga elétrica imerso em um **campo magnético** sempre fica submetido a uma força, devido a esse campo.
- Um portador de carga elétrica imerso em um **campo elétrico** sempre fica submetido a uma força, devido a esse campo.
- A força magnética atuante em um portador de carga elétrica não modifica o módulo de sua velocidade, porque a força e a velocidade são perpendiculares. Assim, essa força não realiza trabalho.

### RESOLUÇÃO

- Falsa**, porque a força magnética só existirá se o portador estiver **em movimento** e, além disso, se a direção do movimento for diferente da direção do campo.
- Verdadeira**, porque a força elétrica ( $\vec{F}_e = q\vec{E}$ ) independe da velocidade do portador.
- Verdadeira**, porque, sendo perpendicular à velocidade, a força magnética só pode alterar a **direção** da velocidade do portador. Note, então, que essa força não realiza trabalho.

**Respostas:** Ver resolução.

**3** Na figura à esquerda a seguir, temos um sistema cartesiano triortogonal  $0xyz$ . Na região existe um campo magnético uniforme  $\vec{B}$ , de intensidade  $B = 0,25$  T. Uma partícula eletrizada com carga  $q = 4,0 \cdot 10^{-9}$  C é lançada perpendicularmente ao campo, com velocidade  $\vec{v}$ , de módulo  $5,0 \cdot 10^6$  m/s, como representado na figura.



Caracterize a força magnética  $\vec{F}_m$  atuante na partícula, ao ser lançada.

### RESOLUÇÃO

- A força magnética é perpendicular a  $\vec{B}$  e a  $\vec{v}$ . Então, ela tem a **direção do eixo  $0x$** .
- Seu sentido é dado pela regra da mão direita espalmada (veja a figura acima à direita). Então, a força  $\vec{F}_m$  tem o **sentido do eixo  $0x$** .

Convém lembrar que, se a carga  $q$  fosse negativa, a força magnética teria a direção do eixo  $0x$ , porém, sentido oposto ao desse eixo.

A intensidade de  $\vec{F}_m$  é dada por:  $F_m = |q| v B \sin \theta$  em que  $\theta$  é o menor ângulo entre  $\vec{v}$  e  $\vec{B}$ , no caso,  $90^\circ$ .

Substituindo, nessa expressão, os valores fornecidos e lembrando que  $\sin 90^\circ = 1$ , obtemos:

$$F_m = (4,0 \cdot 10^{-9}) \cdot (5,0 \cdot 10^6) \cdot (0,25) \cdot (1)$$

Logo:  $F_m = 5,0 \cdot 10^{-3}$  N

**Respostas:** Ver resolução.

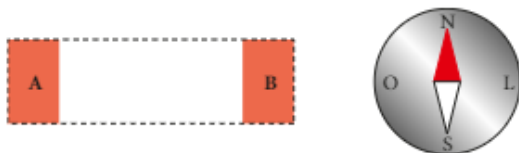


## QUESTÕES PROPOSTAS



FAÇA NO CADERNO.

4. A figura a seguir representa uma bússola em repouso sobre uma mesa de madeira, vista de cima:



Como ficará estabilizada a agulha dessa bússola se um ímã em forma de barra reta for encaixado no retângulo tracejado, com seus polos magnéticos ocupando as regiões A e B do retângulo? Considere o campo magnético da Terra desprezível em comparação ao do ímã.

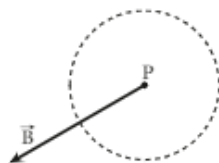
5. Indique a alternativa correta.

- Nas proximidades do polo norte geográfico da Terra encontra-se o polo norte magnético.
- Os polos norte geográfico e sul magnético da Terra encontram-se exatamente no mesmo local.
- Polos magnéticos de mesmo nome (norte e norte ou sul e sul) se atraem.
- Os polos magnéticos norte e sul de um ímã são regiões eletrizadas com carga positiva e negativa, respectivamente.
- Quando um ímã é quebrado em dois ou mais pedaços, cada um deles continua tendo dois polos magnéticos: o norte e o sul.

6. Uma pessoa encontra-se na superfície da Terra, mas desconhece sua posição. Suponhamos que ela esteja a meia distância entre o polo norte geográfico (NG) e o polo sul magnético (SM) e resolva caminhar para o polo norte geográfico, confiando na indicação de sua bússola, como está habituada a fazer. Ela se deslocará no sentido correto?



7. O vetor indução magnética em um determinado ponto P está representado na figura. Indique a posição de equilíbrio estável assumida pela agulha de uma bússola colocada na região circular tracejada.



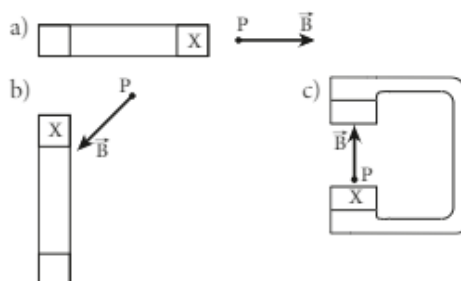
8. A figura representa algumas linhas de indução de um campo magnético:

- Copie a figura e desenhe o vetor indução magnética nos pontos A e B.
- Em qual desses pontos o campo magnético é mais intenso? Justifique.

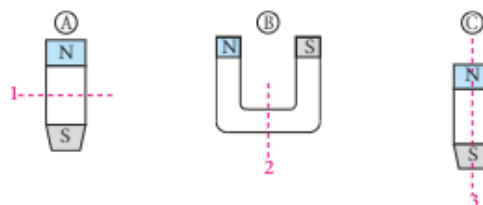


Imagem: GETZEX

9. Dado o vetor indução magnética  $\vec{B}$  que um ímã cria em um ponto P, identifique o polo magnético X nos seguintes casos:



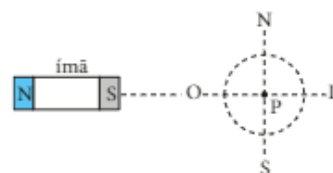
10. Os ímãs A, B e C representados na figura a seguir foram serrados nas regiões 1, 2 e 3, obtendo-se assim duas partes de cada um.



Em que caso as partes de um mesmo ímã **não** podem se unir magneticamente após o corte, de modo a mantê-lo com a aparência que tinha antes do corte?

11. A figura mostra os pontos cardeais (N, S, L e O), um ímã em forma de barra reta e um ponto P nas proximidades do Equador terrestre.

Sabendo que a intensidade do vetor indução magnética criado pelo ímã no ponto P é  $\sqrt{3}$  vezes a do vetor indução criado pela



Terra nesse ponto, determine a posição de equilíbrio estável da agulha de uma bússola colocada na região circular tracejada. Suponha coincidentes as direções norte-sul geográfica e magnética.

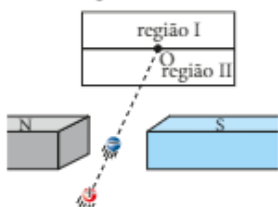
12. Considere as seguintes situações:

- Um elétron move-se em relação a um ímã, nas vizinhanças de um de seus polos.
- Um próton está nas proximidades de um ímã, com velocidade nula em relação ao ímã.
- Um nêutron está em movimento em relação a um ímã, nas vizinhanças de um de seus polos.

Em qual (ou quais) delas a partícula citada **poderá** submeter-se a uma força magnética?

13. A imagem produzida na tela de um televisor antigo (com tubo de imagem) é devida à luminescência causada por elétrons que a bombardeiam. Quando um ímã é colocado perto da imagem, esta deforma-se. Explique por quê. (Não se deve experimentar isso na tela de um televisor em cores, porque ela ficará ligeiramente magnetizada. Por tratar-se de um sistema de alta precisão, as imagens ficarão “borradas”.)

14. Na figura ao lado, um elétron e um próton são atirados perpendicularmente a uma placa retangular, disposta verticalmente e dividida em duas regiões. Antes de atingir a placa, porém, as duas partículas passam entre os polos de um ímã.

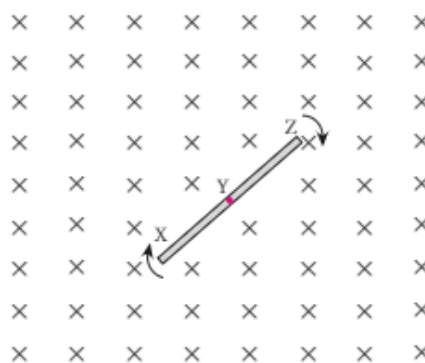


Na ausência do campo magnético do ímã, as partículas atingiram o centro O da placa. Na presença do ímã, determine a região (I ou II) atingida:

- a) pelo elétron;
- b) pelo próton.

15. A figura abaixo mostra um bastão de cobre XYZ inteiramente mergulhado em um campo magnético uniforme e constante. O bastão, sempre mantido perpendicularmente ao campo, rota em torno do ponto Y, com velocidade angular constante, no sentido indicado.

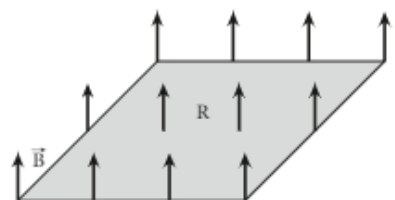
Quais são os sinais das cargas elétricas adquiridas pelas regiões X, Y e Z do bastão, respectivamente?



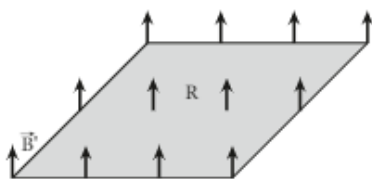
## 7. CAMPO MAGNÉTICO UNIFORME E CONSTANTE

Em um campo magnético uniforme, o vetor  $\vec{B}$  é igual em todos os pontos. Entretanto, esse vetor pode ser variável com o tempo, como ilustra a figura a seguir:

Ilustração: C. T. Zago



Campo magnético na região R, no instante t.



Campo magnético na região R, no instante t'.

O campo magnético na região R é uniforme, mas não é constante, pois varia com o tempo.

Portanto, um campo magnético é **uniforme e constante** quando o vetor  $\vec{B}$ , além de ser igual em todos os pontos, não apresenta variações com o passar do tempo.

É importante saber que, com grande frequência, encontramos textos classificando um campo sim-

plesmente como uniforme, em situações em que também é necessário dizer que ele é constante. Nesses casos, somos forçados a considerá-lo uniforme e constante.

## 8. MOVIMENTO DE PORTADORES DE CARGA ELÉTRICA LANÇADOS EM UM CAMPO MAGNÉTICO UNIFORME E CONSTANTE

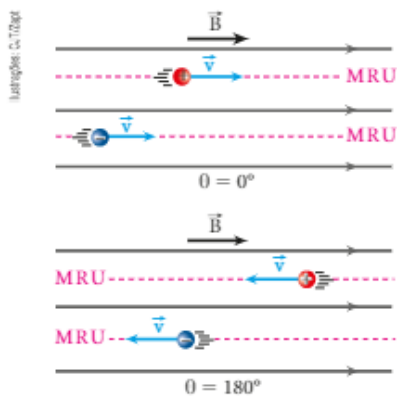
Vamos estudar, agora, os tipos de movimento que uma partícula dotada de carga elétrica pode realizar em um campo magnético uniforme e constante.

Supondo que, após a partícula ser lançada com velocidade  $\vec{v}$  no interior do campo magnético, a única força possível de atuar nela seja devida a esse campo, vamos acompanhar as análises seguintes.

### Quando a velocidade $\vec{v}$ tem mesma direção de $\vec{B}$

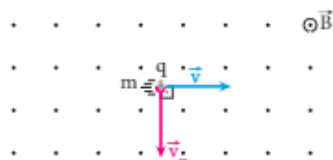
Como vimos, se a partícula é lançada na mesma direção do campo magnético, o ângulo  $\theta$ , entre  $\vec{v}$  e  $\vec{B}$ , é igual a  $0^\circ$  ou  $180^\circ$ . Assim,  $\sin \theta$  é igual a zero, e a força magnética também é nula. Conseqüentemente, a partícula realiza um movimento retilíneo e uniforme (MRU):





### Quando a velocidade $\vec{v}$ tem direção perpendicular a $\vec{B}$

Veja, na figura abaixo, a representação de um campo magnético uniforme e constante, perpendicular a esta página e apontando para você. Uma partícula de massa  $m$ , dotada de carga positiva  $q$ , é lançada perpendicularmente ao campo.



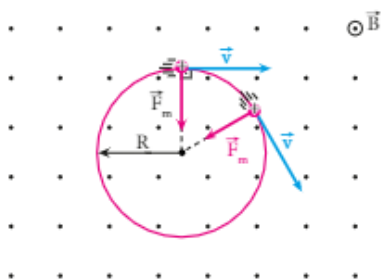
Como a força magnética  $\vec{F}_m$  é perpendicular à velocidade  $\vec{v}$ , o movimento da partícula é **uniforme**:  $\vec{F}_m$  só pode modificar a direção de  $\vec{v}$  fazendo a partícula descrever uma trajetória curvilínea plana.

Sendo  $\vec{F}_m$  uma força centrípeta, e o ângulo  $\theta$ , entre  $\vec{B}$  e  $\vec{v}$ , igual a  $90^\circ$ , podemos escrever:

$$F_m = F_{cp} \Rightarrow |q| v B \text{ sen } 90^\circ = \frac{mv^2}{R}$$

$$\text{Logo: } |q| B = \frac{mv}{R} \Rightarrow R = \frac{mv}{|q|B}$$

Como os valores de  $m$ ,  $v$ ,  $q$  e  $B$  são os mesmos em todos os pontos da trajetória da partícula, o raio de curvatura  $R$  dessa trajetória também é igual em todos os pontos. Por isso, a curva plana descrita pela partícula é uma **circunferência**.



Concluimos, então, que:

Quando um portador de carga elétrica é lançado perpendicularmente a um campo magnético uniforme e constante, ele realiza um movimento circular e uniforme de raio  $R$ , dado por:

$$R = \frac{mv}{|q|B}$$

Vamos, agora, determinar o período  $T$  desse movimento.

Para isso, temos que:

$$R = \frac{mv}{|q|B} \Rightarrow v = \frac{|q|BR}{m} \quad (I)$$

Sabemos, também, que:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \Rightarrow v = \frac{2\pi R}{T} \quad (II)$$

Igualando as expressões (I) e (II), obtemos:

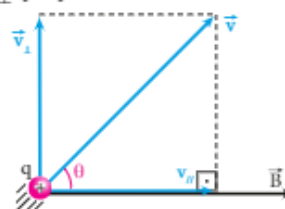
$$\frac{2\pi R}{T} = \frac{|q|BR}{m} \Rightarrow T = \frac{2\pi m}{|q|B}$$

**Atenção:** observe, na expressão obtida, que o período desse movimento **não depende** do valor da velocidade da partícula nem do raio da circunferência. Isso acontece porque a alteração de  $v$  (veja a expressão I) acarreta uma alteração proporcional em  $R$  e, consequentemente, no perímetro  $2\pi R$  da circunferência. Assim, quanto maior for  $v$ , maior será o comprimento da circunferência a ser percorrida pela partícula, mas o período será o mesmo.

Esse fato tem grande importância nos aceleradores de partículas para bombardeamento de núcleos atômicos.

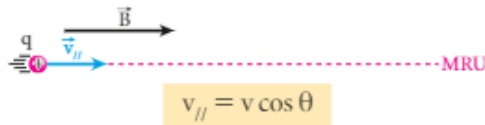
### Quando a velocidade $\vec{v}$ forma com $\vec{B}$ um ângulo $\theta$ , tal que $0^\circ < \theta < 90^\circ$

Como já vimos, a velocidade  $\vec{v}$  com que a partícula é lançada admite a componente  $\vec{v}_{||}$  paralela a  $\vec{B}$ , e a componente  $\vec{v}_{\perp}$ , perpendicular a  $\vec{B}$ .



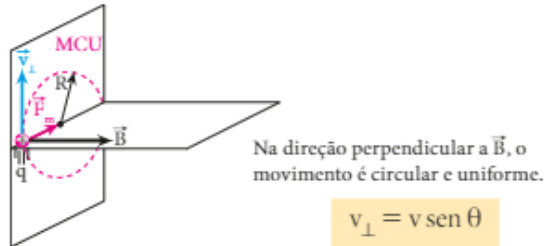
A componente  $\vec{v}_{||}$  não se altera, pois o campo magnético não influi em movimentos de mesma direção que a sua.

Assim, teremos, na direção de  $\vec{B}$ , um movimento retilíneo e uniforme (MRU), com velocidade  $\vec{v}_{//}$  de módulo igual a  $v \cos \theta$ :



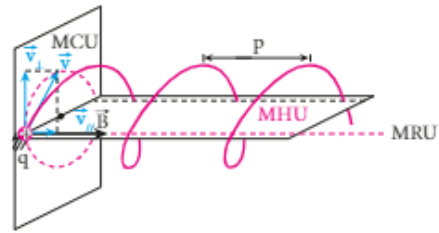
Na direção de  $\vec{B}$ , o movimento é retilíneo e uniforme.

A componente  $\vec{v}_{\perp}$ , igual, em módulo, a  $v \sin \theta$ , gera um movimento circular e uniforme (MCU), estando a circunferência contida em um plano perpendicular a  $\vec{B}$ :



Logo:  $R = \frac{m v_{\perp}}{|q|B} = \frac{m v \sin \theta}{|q|B}$

O movimento resultante é, então, a composição do MRU com o MCU, que dá origem a um movimento helicoidal e uniforme (MHU).



Ao mesmo tempo em que descreve o MCU, a partícula desloca-se para a direita em MRU. Portanto, o movimento resultante é helicoidal e uniforme.

A curva descrita pela partícula é denominada **hélice cilíndrica**, e o comprimento  $p$  indicado na figura anterior é o **passo** da hélice, isto é, a distância que a partícula percorre na direção de  $\vec{B}$ , em MRU, durante um período  $T$  do MCU.

Para determinar o passo  $p$ , devemos lembrar que:

$T = \frac{2\pi m}{|q|B}$  e  $v_{//} = v \cos \theta$

Com relação ao MRU, temos:

$\Delta s = v_{//} t \Rightarrow p = v_{//} T \Rightarrow p = v \cos \theta \cdot \frac{2\pi m}{|q|B}$

Logo:  $p = \frac{2\pi m v \cos \theta}{|q|B}$

AMPLIANDO O OLHAR

**Auroras polares**

Além de ondas eletromagnéticas, a atmosfera terrestre recebe do Sol partículas dotadas de carga elétrica (o “vento solar”), com predominância de elétrons.

Esses elétrons interagem com o campo magnético da Terra, dirigindo-se para os polos.

Veja, na representação esquemática ao lado, o que acontece aproximadamente com dois dos muitos elétrons que estão chegando do Sol.

Esses elétrons excitam o oxigênio (que então emite luz azul-esverdeada) e o nitrogênio (que emite luz avermelhada).

Nas proximidades dos polos, isso dá origem a espetaculares colorações no céu, denominadas **auroras boreais**, quando acontecem no Hemisfério Norte, e **austrais**, quando acontecem no Hemisfério Sul.

Esse fenômeno é mais frequente e mais intenso nas épocas em que aumenta a atividade solar, pois isso acentua o “vento solar”.

Os elétrons do “vento solar” também excitam outros gases. Entretanto, as porcentagens desses gases são muito pouco significativas em comparação às do nitrogênio e do oxigênio.

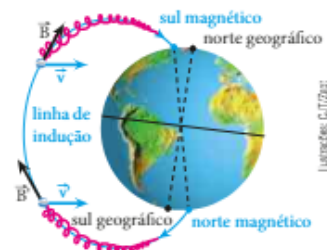


Ilustração com elementos sem proporção entre si e em cores fantasia.



Aurora boreal. Rússia, 2015.

## QUESTÕES COMENTADAS



**16** Um elétron é lançado, com velocidade de módulo  $3,2 \cdot 10^4$  m/s, perpendicularmente às linhas de indução de um campo magnético uniforme e constante, de  $9,1 \cdot 10^{-6}$  T. Sendo a massa do elétron igual a  $9,1 \cdot 10^{-31}$  kg e  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C o módulo de sua carga, caracterize a trajetória descrita por ele. Suponha que a força magnética seja a única atuante no elétron.

### RESOLUÇÃO

Quando o elétron é lançado perpendicularmente ao campo, seu movimento é circular e uniforme. A força magnética é a própria resultante centrípeta. Assim:  $F_{cp} = F_m$

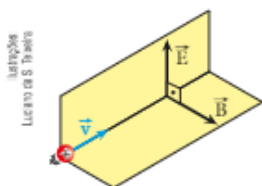
$$\frac{mv^2}{R} = |q|vB \Rightarrow R = \frac{mv}{|q|B}$$

Como  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  kg,  $v = 3,2 \cdot 10^4$  m/s,  $|q| = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C e  $B = 9,1 \cdot 10^{-6}$  T, calculemos R:

$$R = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 3,2 \cdot 10^4}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 9,1 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow R = 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

**Resposta:** O elétron descreve trajetória circular, de raio igual a  $2,0 \cdot 10^{-2}$  m.

**17** A figura a seguir representa uma partícula de carga positiva  $q$  penetrando em uma região onde existem dois campos uniformes e constantes, perpendiculares entre si: um campo elétrico  $\vec{E}$  e um campo de indução magnética  $\vec{B}$ .



A velocidade  $\vec{v}$  é perpendicular aos vetores  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$ . Considerando que as forças devidas a  $\vec{E}$  e a  $\vec{B}$  sejam as únicas atuantes na partícula, responda:

- a) Como será o seu movimento, após penetrar nos campos, se a intensidade de  $\vec{v}$  for igual a  $\frac{E}{B}$ ? E se a carga da partícula for negativa?

- b) Qual é a condição para que a partícula, com carga positiva, desvie para cima?

### RESOLUÇÃO

- a) As forças atuantes na partícula são: a força elétrica  $\vec{F}_e$ , no sentido de  $\vec{E}$  porque a carga é positiva, e a força magnética  $\vec{F}_m$ , cujo sentido é dado pela regra da mão direita espalmada.



Como  $\vec{F}_e = q\vec{E}$ , temos:  $F_e = |q|E$

A intensidade da força magnética é dada por:

$$F_m = |q|vB \sin 90^\circ = |q|vB$$

Fazendo  $v = \frac{E}{B}$ , obtemos:  $F_m = |q| \cdot \frac{E}{B} \cdot B = |q|E$

Como  $\vec{F}_e$  e  $\vec{F}_m$  têm mesma intensidade, mesma direção e sentidos opostos, a força resultante na partícula é nula. Portanto:

O movimento da partícula será retilíneo e uniforme, com velocidade  $\vec{v}$ .

Se a carga da partícula fosse negativa, as duas forças que atuam nela sofreriam apenas inversão de sentido. Assim, a força resultante continuaria nula, e o movimento também seria retilíneo e uniforme, com velocidade  $\vec{v}$ .

- b) Para a partícula com carga positiva desviar-se para cima, é necessário reduzir a intensidade de  $\vec{F}_m$ , o que se consegue reduzindo o módulo da velocidade. Então, devemos ter:

$$v < \frac{E}{B}$$

### NOTA

Para  $v > \frac{E}{B}$ ,  $\vec{F}_m$  é mais intensa que  $\vec{F}_e$ , e a partícula desvia-se para baixo.

- Respostas:** a) O movimento das partículas será retilíneo e uniforme nos dois casos.  
b) Reduzir a intensidade de  $\vec{F}_m$ , fazendo  $v < \frac{E}{B}$ .



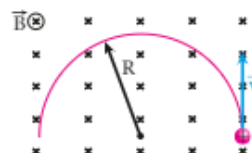
## QUESTÕES PROPOSTAS



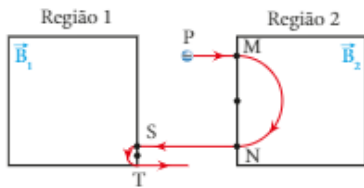
FAÇA NO CADERNO.

**18.** Um próton (carga  $q$  e massa  $m$ ) penetra numa região do espaço onde existe exclusivamente um campo de indução magnética  $\vec{B}$ , uniforme e constante, conforme a figura ao lado. Determine o módulo de  $\vec{B}$  para que a carga lançada com velocidade  $\vec{v}$ , de módulo  $1 \cdot 10^6$  m/s, descreva a trajetória circular indicada, de raio  $R = 2$  m.

Dado:  $\frac{m}{q} = 1 \cdot 10^{-8}$  kg/C.



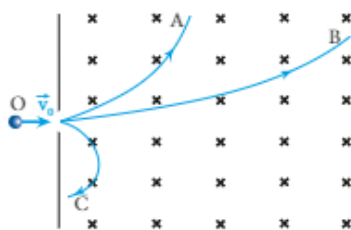
19. Uma partícula com carga negativa é lançada do ponto P, passando pelas regiões 2 e 1, onde existem campos magnéticos  $\vec{B}_2$  e  $\vec{B}_1$ , perpendiculares ao papel, uniformes e constantes.



Supondo que as únicas forças atuantes na partícula sejam devidas aos campos  $\vec{B}_1$  e  $\vec{B}_2$ , responda:

- Quais são os sentidos de  $\vec{B}_1$  e  $\vec{B}_2$ : "entrando" ou "saindo" do papel?
- Qual campo é mais intenso,  $\vec{B}_1$  ou  $\vec{B}_2$ ?
- Compare os tempos para a partícula percorrer os arcos MN e ST,  $\Delta t_{MN}$  e  $\Delta t_{ST}$ . Qual é o maior?

20. A figura mostra as trajetórias seguidas por três partículas (elétron, próton e deuteron) lançadas de um mesmo ponto O, perpendicularmente às linhas de indução de um campo magnético uniforme e constante  $\vec{B}$ , todas com a mesma velocidade inicial  $\vec{v}_0$ :



Quais são, respectivamente, as trajetórias descritas pelo próton, pelo deuteron (partícula constituída por um nêutron e um próton) e pelo elétron?

21. Considere uma região onde o campo gravitacional tem módulo  $g = 10 \text{ m/s}^2$ . Um elétron, movendo-se nessa região a  $2,0 \cdot 10^3 \text{ m/s}$ , penetra num campo magnético uniforme e constante de  $2,0 \text{ T}$ , perpendicularmente às linhas de indução. Calcule os módulos das forças magnética e gravitacional atuantes no elétron nessa situação. Compare os dois valores.

Dados: massa do elétron =  $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ ;  
módulo da carga do elétron =  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

22. O espectrômetro de massa é um instrumento usado na determinação de massas atômicas e também na separação de isótopos de um mesmo elemento químico. A figura mostra esquematicamente um tipo de espectrômetro. A fonte produz íons que emergem dela com carga  $+e$  e são acelerados por um campo elétrico não indicado na figura. As fendas  $F_1$  e  $F_2$  servem para colimar o feixe de íons, isto é, para que prossigam apenas íons que se movem em uma determinada direção.

Os íons que passam pela fenda  $F_2$  invadem o seletor de velocidade, que é uma região onde existem um campo elétrico e um campo magnético, ambos uniformes e constantes, perpendiculares entre si e perpendiculares ao feixe de íons. Só prosseguem na mesma trajetória retilínea os íons que têm determinada velocidade  $\vec{v}$ . Os íons que atravessam a fenda  $F_3$  entram em movimento circular e uniforme de raio  $R$ . Considerando  $E = 4,0 \cdot 10^3 \text{ N/C}$ ,  $B = 2,0 \cdot 10^{-1} \text{ T}$  e  $R = 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}$  e sendo  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ , determine a massa do íon.

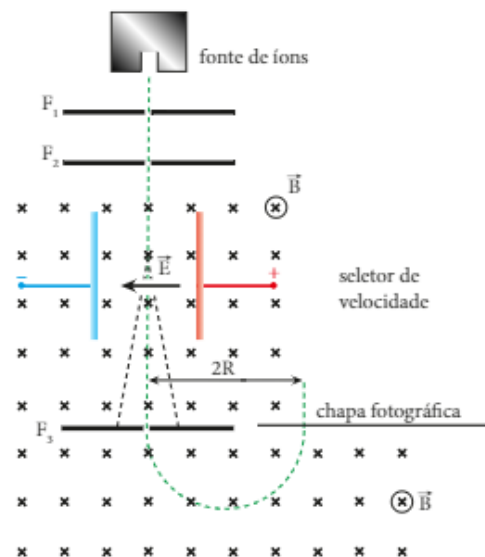


Ilustração: C. Tizabi

## DESCUBRA MAIS

- 1
 Por que as auroras polares acontecem predominantemente nos polos?
- 2
 Em Eletrostática, você estudou as **linhas de força** de um campo elétrico. Por que essa denominação (linhas de força) não é adequada para as linhas de indução de um campo magnético?



# A ORIGEM DO CAMPO MAGNÉTICO

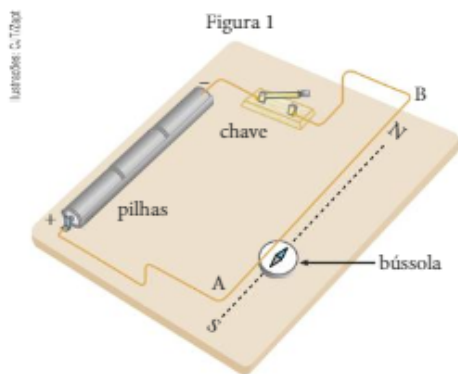
## 1. INTRODUÇÃO

Já conhecemos as origens dos campos gravitacional e eletrostático: uma massa cria um campo gravitacional, e uma carga elétrica estacionária cria um campo eletrostático.

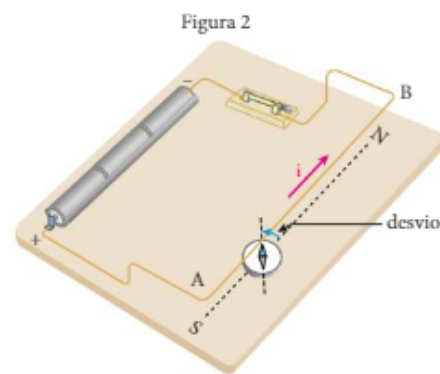
Vamos, agora, estudar a origem do campo magnético.

Em 1820, o físico dinamarquês Hans Christian **Oersted** (1777-1851), professor de Física da Universidade de Copenhague, mostrou experimentalmente que os fenômenos elétricos e os magnéticos não eram tão independentes como se supunha até então. Oersted descobriu que um fio percorrido por corrente elétrica, colocado nas proximidades de uma bússola, era capaz de provocar desvio na agulha magnética. Dessa maneira, comprovou-se a relação existente entre eletricidade e magnetismo.

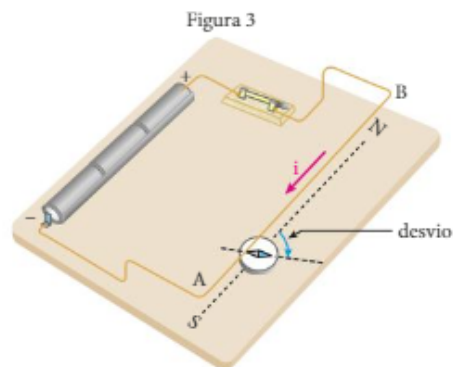
As três figuras a seguir ilustram a experiência de Oersted:



Nesta figura, a agulha da bússola já se estabilizou na direção norte-sul. A chave está aberta e, portanto, não circula corrente no fio condutor AB (de cobre), disposto paralelamente à agulha e acima dela.



Fechando-se a chave, o condutor AB é percorrido por uma corrente  $i$ , no sentido indicado. A agulha sofre um desvio, estabilizando-se em uma direção diferente da anterior. Abrindo-se a chave, a agulha volta a se estabilizar na direção norte-sul.



Invertendo-se o sentido da corrente, a agulha sofre um desvio no sentido oposto.

Para interpretar o resultado desse experimento, é preciso lembrar que a agulha da bússola se estabiliza na direção do campo magnético no local em que ela se encontra, com seu polo norte magnético apontando no sentido desse campo.

Na primeira das três figuras, a agulha estava alinhada com o campo magnético da Terra. Nas outras duas figuras, porém, a agulha se estabilizou em direções diferentes, alinhando-se, portanto, com um campo magnético diferente do da Terra.

Constata-se, então, que **a corrente elétrica** no fio AB **criou um campo magnético** que, composto com o da Terra, produziu um campo magnético resultante, com o qual a agulha passou a se alinhar.

Portanto:

Cargas elétricas em movimento, ou seja, correntes elétricas, criam um campo magnético na região do espaço que as circunda, sendo, portanto, fontes de campo magnético.



Réplica do equipamento usado por Oersted em seu experimento.

Algumas semanas após o experimento de Oersted, Ampère mostrou, também experimentalmente, que um fio de cobre enrolado em forma de hélice cilíndrica, chamado solenoide (ou bobina), produzia externamente os mesmos efeitos que um ímã em forma de barra reta quando nesse fio era estabelecida uma corrente elétrica.

O campo magnético estacionário gerado por uma corrente elétrica constante poderá atuar em cargas elétricas em movimento de maneira análoga à atuação exercida pelo campo de um ímã, conforme vimos no Capítulo 8.

A partir do que já sabíamos e do que acabamos de expor, podemos concluir que qualquer corpo eletrizado e em movimento em relação a um determinado referencial cria, nesse referencial, um campo elétrico  $\vec{E}$ , por estar **eletrizado**, e um campo magnético  $\vec{B}$ , por estar **eletrizado e em movimento**, ou seja, por gerar uma corrente elétrica.

Neste momento, podemos questionar a origem do campo magnético de um ímã.

Para um ímã produzir seu campo magnético, ele não precisa ser ligado a uma pilha ou a uma bateria, ou seja, não precisamos fazer uma corrente elétrica passar por ele.

Do ponto de vista clássico, a causa do campo magnético de um ímã, entretanto, continua sendo as correntes elétricas: são pequeníssimas correntes decorrentes do movimento dos elétrons dos átomos que constituem o ímã, como veremos na seção 5 deste capítulo.

## FAÇA VOCÊ MESMO

### Investigando a origem de um campo magnético

Nesta atividade, você constatará a origem de um campo magnético e irá um pouco além.

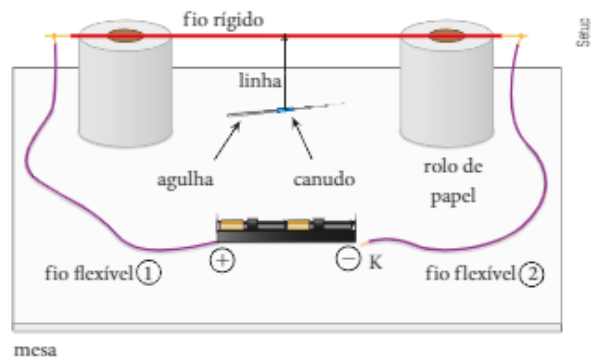
Mais uma vez, as investigações devem ser feitas longe (a pelo menos 30 cm) de materiais ferromagnéticos que possam afetá-las, como utensílios de ferro ou aço.

#### Material necessário

- 1 canudo de refrigerante (dos mais finos);
- 30 cm de linha para pipa ou de linha de costura;
- 1 agulha de crochê, de aço;
- 1 ímã em forma de barra reta, com polos nas extremidades;
- 50 cm de fio rígido de cobre, com isolamento plástico (bitola, em  $\text{mm}^2$ , igual a 1,5; 2,5; 4 ou 6);
- 2 pedaços de fio de cobre com isolamento plástico, flexível e fino, cada um com cerca de 50 cm e bitola menor ou igual a  $0,75 \text{ mm}^2$ ;
- 2 rolos de papel higiênico (ou outros dois objetos não ferromagnéticos, com cerca de 10 cm de altura, que possibilitem apoiar o fio rígido de modo que este fique paralelo a uma mesa);
- 2 pilhas comuns de 1,5 V (tamanho AA, C ou D);
- 1 suporte adequado para acomodar as pilhas em série.

## Procedimento

- I. Remova cerca de 3 cm da isolamento plástica de cada uma das extremidades do fio rígido e cerca de 4 cm de isolamento de cada extremidade dos dois pedaços de fio flexível. Cuide para que o fio rígido fique o mais retilíneo possível, como na figura ao lado. Apoie o fio rígido nos dois rolos de papel higiênico (ou outros objetos) colocados sobre uma mesa.
- II. Conecte uma extremidade de cada fio flexível às extremidades do fio rígido. Conecte a outra extremidade de um dos fios flexíveis (1) ao terminal positivo do suporte (com as pilhas já instaladas).
- III. Corte um pedaço do canudo, com cerca de 4 cm de comprimento, e amarre nele uma das extremidades da linha, dando um nó apertado, sem, entretanto, obstruir seu canal interno, no qual será introduzida a agulha de crochê.
- IV. Imante a agulha de modo que se estabeleça um polo norte magnético em sua extremidade mais fina. Introduza a agulha no canudo e posicione-a de maneira que, suspensa pela linha, fique disposta horizontalmente, ou seja, fique paralela à mesa. Peça a uma pessoa que mantenha a agulha suspensa e estabilizada, segurando a linha com a mão. Enquanto isso, movimente sobre a mesa o conjunto já montado, procurando fazer com que o fio rígido fique paralelo à agulha.
- V. Amarre a linha mais ou menos no meio do fio rígido – ver figura anterior – fazendo a agulha ficar bem perto dele (2 ou 3 cm). Talvez você precise fazer pequenas mudanças de posição do fio rígido para que a agulha estabilizada fique bem paralela a ele.
- VI. O circuito está aberto e a agulha, estabilizada paralelamente ao fio rígido. Segurando o fio flexível 2 pela sua isolamento plástica – para evitar possíveis queimaduras nos dedos –, encoste sua extremidade K no terminal negativo do suporte (ver figura) e mantenha o circuito fechado até a agulha se estabilizar novamente. Observe, e anote à sua maneira, para que lado o polo norte da agulha (extremidade mais fina) se deslocou. Abra o circuito e verifique a direção em que a agulha volta a se estabilizar.
- VII. Desligue do suporte o fio flexível 1 e conecte-o ao terminal negativo. Segurando o fio flexível 2 pela sua isolamento plástica, encoste sua extremidade K ao terminal positivo do suporte e, novamente, mantenha o circuito fechado até a agulha estabilizar-se mais uma vez. Observe e anote para que lado o polo norte da agulha se deslocou.



## Analisando o experimento

1. Antes de fechar o circuito, qual era a orientação da agulha suspensa na linha? Utilizando os pontos cardeais (NG, SG, L e O) como referência, faça uma figura esquemática de uma vista de cima, ilustrando, por meio de um esboço, essa situação.
2. Por que, antes de suspender a agulha no fio rígido, foi tomada uma providência para que ele já estivesse, pelo menos aproximadamente, paralelo à agulha?
3. Com o circuito fechado, conforme descrito no procedimento VI, faça uma representação esquemática de uma vista de cima, mostrando o fio rígido, a agulha estabilizada, o sentido da corrente  $i$  e o vetor indução magnética  $\vec{B}$  ao qual a agulha passou a se submeter. Pode-se concluir que a corrente no fio rígido gerou um campo magnético  $\vec{B}_F$  voltado para o "lado leste" ou para o "lado oeste"?
4. Com relação ao procedimento descrito no procedimento VII, realize o que foi solicitado na questão 3.
5. Supondo conhecida a intensidade de  $\vec{B}_F$  e sabendo que, tanto no procedimento VI como no procedimento VII,  $\vec{B}_F$  (criado pela corrente no fio) e  $\vec{B}_T$  (criado pela Terra) são perpendiculares, proponha uma maneira de se estimar a intensidade de  $\vec{B}_T$ .

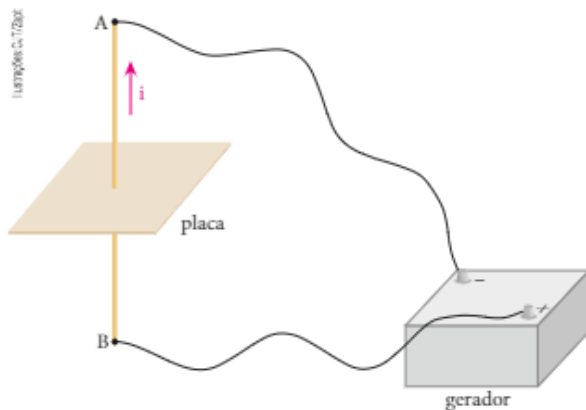
## 2. CAMPO MAGNÉTICO GERADO POR UM FIO RETILÍNEO MUITO LONGO (INFINITO)

### Linhas de indução

Na prática, quando nos referimos a “fio muito longo” ou “fio infinito”, estamos considerando as regiões próximas do fio e bem afastadas de suas extremidades.

A figura a seguir sugere um experimento em que será gerado um campo magnético supostamente intenso o suficiente para podermos ignorar o campo magnético da Terra.

Um fio retilíneo AB perfura uma placa, de papelão, madeira ou plástico, perpendicularmente. Esse fio está ligado a um gerador capaz de produzir nele uma corrente elétrica de grande intensidade  $i$ .



Se pulverizarmos limalha de ferro sobre a placa, poderemos observar a configuração das linhas de indução do campo magnético gerado pelo fio.



Padrão do campo magnético gerado pela corrente elétrica em um fio retilíneo. Cada partícula de ferro comporta-se como uma minúscula agulha imantada.

Observamos que as linhas de indução desse campo são **circunferências** dispostas em um plano perpendicular ao fio, todas com centro nesse fio.

Para descobrir o sentido dessas linhas de indução, usamos uma bússola em vez de limalha de ferro. Deslocamos a bússola sobre a placa, mantendo-a sempre à mesma distância do fio. Para facilitar essa operação, poderíamos, inicialmente, traçar na placa uma circunferência e, depois disso, fazer o fio perfurar a placa no centro da circunferência traçada. Veja, na ilustração a seguir, os posicionamentos da agulha.

Lembrando que a agulha se alinha com o vetor  $\vec{B}$ , criado pelo fio, com seu polo norte magnético apontando no sentido de  $\vec{B}$ , descobrimos a orientação das linhas de indução indicada na figura A:

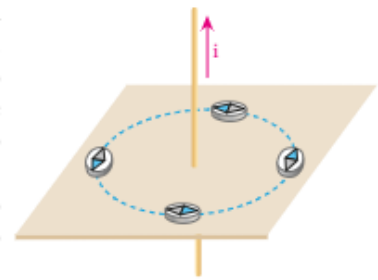
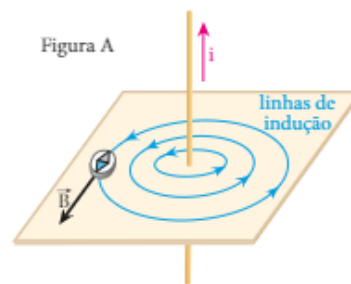


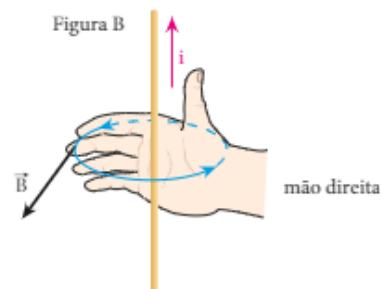
Figura A



O vetor  $\vec{B}$  é, em cada ponto, tangente a uma linha de indução e tem o sentido indicado por ela.

Na figura B, observamos uma regra prática para orientar as linhas de indução: a **regra da mão direita envolvente**.

Figura B

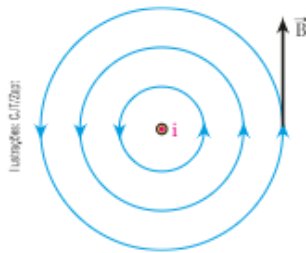


Regra da mão direita envolvente.

Para aplicar essa regra, “segure” o fio com a mão direita, de modo que seu dedo polegar aponte no sentido da corrente elétrica  $i$ , como mostra a figura. Os outros dedos darão, automaticamente, o sentido das linhas de indução.

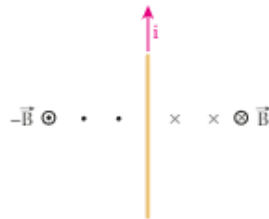


Usando essa regra, confirme os sentidos indicados para as linhas de indução nas ilustrações a seguir:

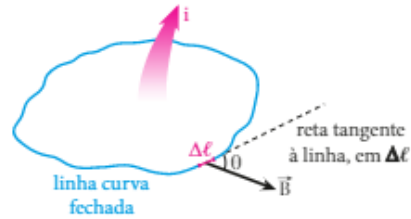


À esquerda, temos a representação de um fio perpendicular ao plano do papel, com a corrente "saindo" desse plano.

À direita, temos a representação de fio estendido no plano do papel. À direita do fio, as linhas de indução têm sentido entrando no papel e, à esquerda do fio, saindo do papel.



Para as nossas necessidades, ela pode ser apresentada da seguinte maneira:



Consideremos uma linha curva qualquer, fechada, contida em um meio em que existe um campo magnético  $\vec{B}$ . Vamos representar por  $\Delta\ell$  o comprimento de um trecho elementar ("pedacinho") dessa linha e por  $i$  a intensidade constante da corrente elétrica que atravessa a região envolvida pela linha, como mostra a figura acima.

A **Lei de Ampère** é dada pela seguinte expressão:

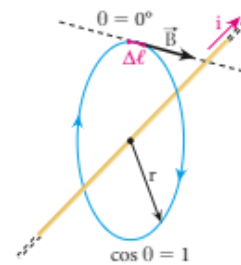
$$\sum B \Delta\ell \cos \theta = \mu i$$

em que o somatório deve ser feito ao longo de toda a linha curva fechada.

A grandeza  $\mu$ , que apareceu nessa expressão, é denominada **permeabilidade absoluta** do meio em que a linha curva foi traçada. Trata-se de uma característica do meio, e sua unidade, no SI, é  $\frac{Tm}{A}$  (tesla · metro / ampère).

Vamos, então, usar a lei apresentada e determinar a intensidade do vetor  $\vec{B}$  gerado por um condutor retilíneo.

Para isso, aplicaremos essa lei, ao longo de uma linha de indução, já que pode ser usada qualquer curva fechada.



Temos que:

$$\sum B \Delta\ell \cos \theta = \mu i \Rightarrow \sum B \Delta\ell = \mu i$$

Por simetria, a intensidade de  $B$  é a **mesma** em todos os pontos da linha de indução.

$$Ent\tilde{a}o: B \sum \Delta\ell = \mu i \quad (I)$$

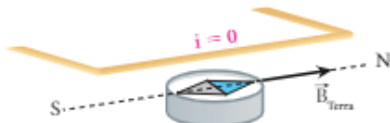
Note que o somatório de todos os  $\Delta\ell$  é o perímetro da linha de indução, ou seja:

$$\sum \Delta\ell = 2\pi r \quad (II)$$

### Entendendo a experiência de Oersted

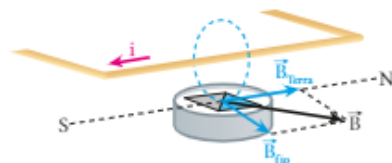
Agora, podemos entender melhor o desvio da agulha da bússola na experiência de Oersted.

Na ausência de corrente no fio, a agulha se alinha com o vetor indução magnética da Terra,  $\vec{B}_{Terra}$ , suposto horizontal, como representado na figura:



A agulha alinha-se com  $\vec{B}_{Terra}$ , com seu polo norte apontando no sentido de  $\vec{B}_{Terra}$ .

Quando o fio é percorrido por uma corrente de intensidade  $i$ , ela cria um campo  $\vec{B}_{fio}$  e a agulha se alinha com o campo  $\vec{B}$ , resultante de  $\vec{B}_{Terra}$  com  $\vec{B}_{fio}$ , como ilustra a figura abaixo.



A agulha alinha-se com  $\vec{B}$  e seu polo norte aponta no sentido de  $\vec{B}$ .

### Intensidade do vetor indução magnética

O cálculo da intensidade do vetor  $\vec{B}$ , criado por um condutor retilíneo muito longo, requer o conhecimento da **Lei de Ampère**.

Substituindo (II) em (I), obtemos:

$$B \cdot 2\pi r = \mu i \Rightarrow B = \frac{\mu i}{2\pi r}$$

### Permeabilidade absoluta do vácuo

Suponha que o meio ao redor do condutor seja o vácuo. A **permeabilidade absoluta do vácuo**, cujo símbolo é  $\mu_0$ , tem, no SI, o seguinte valor, simplesmente adotado:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Tm}{A}$$

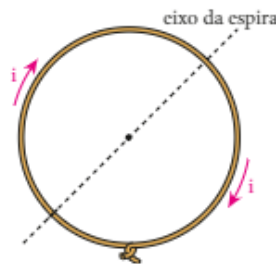
O fato de o valor de  $\mu_0$  ter sido **adotado** causa estranheza. Entretanto, você vai entender por que foi feita essa adoção ao estudar a definição do **ampère** no Capítulo 10.

Mais adiante, veremos que o valor da permeabilidade absoluta  $\mu$  de muitos outros meios, como o ar, a água e o óleo, por exemplo, são praticamente iguais a  $\mu_0$ .

## 3. CAMPO MAGNÉTICO GERADO POR UMA ESPIRA CIRCULAR

### Linhas de indução

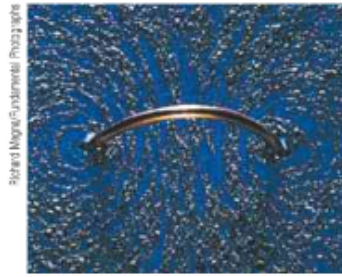
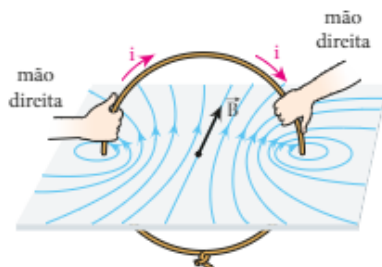
Veja, na figura ao lado, uma espira circular percorrida por uma corrente elétrica de intensidade constante  $i$ .



Se repetirmos os experimentos sugeridos para o fio retilíneo, obteremos os resultados a seguir.

Observe, na figura abaixo, a configuração das linhas de indução, em um plano que contém o eixo da espira.

O sentido das linhas de indução é, também, dado pela regra da mão direita envolvente. Observe que, no centro da espira, o vetor indução é perpendicular ao plano definido por ela.

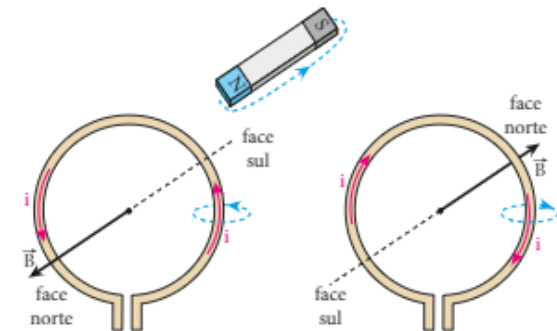


Padrão, obtido com limalha de ferro, do campo magnético gerado pela corrente elétrica em uma espira circular.

### Polos magnéticos da espira

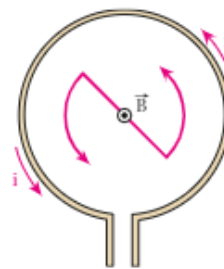
Como vimos no Capítulo 8, externamente aos ímãs as linhas de indução orientam-se do polo magnético norte para o sul.

O mesmo acontece em uma espira percorrida por corrente elétrica, na qual uma face é polo norte magnético e a outra é polo sul.

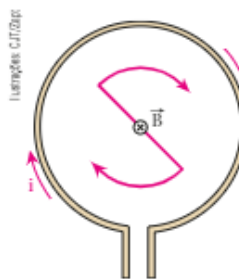


Em todos os casos, as linhas de indução vão, **externamente**, do norte para o sul.

Veja, agora, uma regra prática para a identificação dos polos magnéticos das faces das espiras:



**Face norte:** você "vê" a corrente circulando no sentido **anti-horário**. O vetor indução magnética, no centro da espira, está "saindo" do papel. Observe a orientação das "pernas" do N (de norte), concordando com o sentido da corrente.



**Face sul:** você "vê" a corrente circulando no sentido **horário**. O vetor indução magnética, no centro da espira, está "entrando" no papel. Observe a orientação das "pernas" do S (de sul), concordando com o sentido da corrente.

## FAÇA VOCÊ MESMO

### Investigando o campo magnético gerado por corrente percorrendo espiras

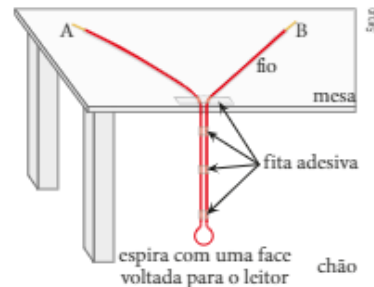
Nesta atividade, investigaremos o campo magnético gerado por uma espira e por um pequeno enrolamento, ambos percorridos por corrente contínua e constante.

#### Material necessário

- 2 metros de fio de cobre com isolamento plástica, flexível e fino, de bitola menor ou igual a  $0,75 \text{ mm}^2$  (quanto mais fino, melhor);
  - fita adesiva transparente;
  - 1 m de linha para pipa ou de linha de costura;
  - 1 bom ímã, com polos magnéticos norte e sul identificados (se não estiverem, identifique-os);
  - 2 pilhas comuns de 1,5 V (tamanho AA, C ou D)
- associadas em série e acomodadas em um suporte adequado;
- 1 agulha de crochê de aço, já imantada e introduzida em um pedaço de canudo de refrigerante, dos mais finos, com cerca de 4 cm de comprimento (pode ser a mesma já utilizada na atividade anterior, em cuja extremidade mais fina foi estabelecido um polo norte magnético).

#### Procedimento

- Remova cerca de 4 cm da isolamento plástica das extremidades do fio. Dobre o fio ao meio e procure fazer na dobra uma espira circular com cerca de 1,5 cm de diâmetro (na verdade, ela será apenas arredondada). Essa operação fica mais fácil se você envolver o fio em um de seus dedos. Para a espira não se desfazer, use fita adesiva, dando algumas voltas em torno dos dois ramos de fio (veja a parte inferior da figura ao lado, fora de escala). Passe fita adesiva em mais duas regiões dos ramos de fio e, também com fita adesiva, fixe o fio em uma mesa (ver figura), de modo que a espira fique a uns 15 cm do chão. Coloque o suporte com pilhas sobre a mesa, perto das extremidades A e B do fio.
- Conecte as extremidades A e B do fio respectivamente aos terminais negativo e positivo do suporte. As observações que você fará não devem ser muito demoradas, para evitar aquecimentos excessivos e minimizar o desgaste das pilhas.
  - Vá aproximando o polo norte do ímã da face da espira voltada para o leitor (ver figura anterior) até perceber alguma interação magnética (de atração ou repulsão). Anote o tipo de interação que você observou. Aproximando da mesma face da espira o polo sul do ímã, repita a observação e anote o resultado.
  - Refaça as duas observações aproximando os polos do ímã da outra face da espira e anote os resultados.
- Inverta as conexões das extremidades A e B do fio, ligando A no terminal positivo e B, no negativo. Realize novamente o que foi pedido no procedimento II e anote os resultados.
- Remova todos os pedaços de fita adesiva que você usou. Dobre o fio ao meio e, a partir de uns 30 cm da dobra, comece a enrolar o fio em um de seus dedos até formar umas dez espiras parecidas com a da situação anterior. Você obtém, então, uma bobina simples (ou um enrolamento de fio). Passe fita adesiva, dando algumas voltas em torno dos dois ramos de fio, bem perto do enrolamento. Além disso, para o enrolamento não se abrir e continuar compacto, amarre-o em algumas regiões usando pedaços de linha envolvendo-as. Conecte suas extremidades aos terminais do suporte de pilhas, que continua sobre a mesa, de modo que fique suspenso e o mais perto possível do chão. Com o ímã, observe a polaridade magnética do enrolamento. Compare a intensidade das interações com a situação em que havia uma só espira. Anote os resultados.
- Use, agora, o fio inteiro para fazer um enrolamento com maior número de voltas (espiras), deixando apenas pedaços de tamanhos suficientes para conectar suas extremidades aos terminais do suporte com pilhas.



Faça essas conexões. Aproxime, do meio de uma das faces do enrolamento, os polos da agulha de crochê, imantada e suspensa por uma linha com cerca de 50 cm de comprimento, de modo que uma pequena parte da agulha atravesse o interior do enrolamento. Observe a direção em que a agulha se dispõe e anote o resultado.

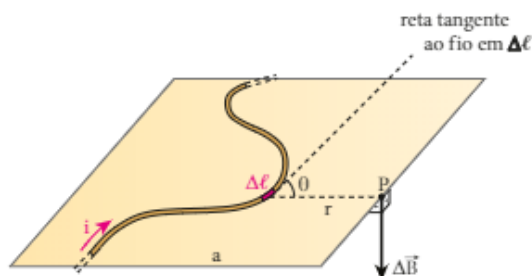
### Analizando o experimento

1. Descreva as observações que você fez no procedimento II e faça uma representação esquemática da espira, indicando o sentido da corrente nela, justificando as polaridades magnéticas de suas faces.
2. Repita a proposta do item anterior, na situação descrita no procedimento III.
3. No procedimento IV, você observou interações mais intensas que no caso de uma só espira? Procure explicações.
4. No procedimento V, como a agulha se dispôs? Que indícios você pôde perceber a respeito do vetor indução magnética no centro do enrolamento?

## Intensidade do vetor indução magnética

O cálculo da intensidade do vetor  $\vec{B}$ , criado por uma espira circular, requer o conhecimento de uma lei, a **Lei de Biot-Savart-Laplace**, apresentada a seguir.

Consideremos um fio percorrido por uma corrente elétrica de intensidade constante  $i$ . Vamos representar por  $\Delta\ell$  o comprimento de um trecho elementar ("pedacinho") desse fio e por  $P$  um ponto a uma distância  $r$  desse trecho elementar:



O trecho de comprimento  $\Delta\ell$  cria, em  $P$ , um vetor indução magnética  $\Delta\vec{B}$ , com as seguintes características:

**Intensidade:**  $\Delta B = \frac{\mu i \Delta\ell \sin \theta}{4\pi r^2}$ , em que  $\theta$  é o menor ângulo formado pela reta tangente em  $\Delta\ell$  e pelo segmento de reta que liga  $P$  ao trecho elementar.

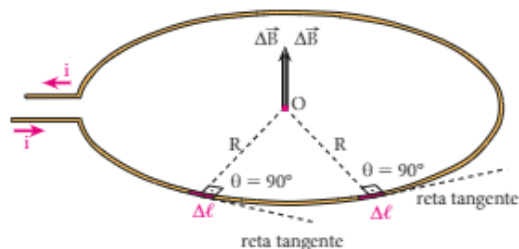
**Direção:** perpendicular ao plano  $\alpha$ , definido pela reta tangente ao trecho elementar e pelo ponto  $P$ .

**Sentido:** dado pela regra da mão direita envolvente.

Para obter o vetor indução magnética criado em  $P$  pelo fio inteiro, devemos determinar a resultante das contribuições  $\Delta\vec{B}$  de todos os trechos elementares que constituem o fio.

Vamos, então, usar a lei apresentada e determinar a intensidade do vetor  $\vec{B}$  gerado por uma espira circular, **em seu centro**.

Na figura a seguir, temos uma espira circular de raio  $R$  e centro  $O$ , percorrida por uma corrente elétrica de intensidade  $i$ .



Cada trecho elementar de comprimento  $\Delta\ell$  cria, em  $O$ , um vetor indução  $\Delta\vec{B}$ , de intensidade:

$$\Delta B = \frac{\mu i \Delta\ell \sin 90^\circ}{4\pi R^2} = \frac{\mu i \Delta\ell}{4\pi R^2}$$

A intensidade do vetor indução magnética resultante  $\vec{B}$ , em  $O$ , é dada pelo somatório das contribuições de todos os trechos elementares.

Então, como todos os  $\Delta\vec{B}$  têm mesma direção e mesmo sentido, temos:

$$B = \sum \Delta B = \sum \frac{\mu i \Delta\ell}{4\pi R^2}$$

Como  $\mu$ ,  $i$  e  $R$  são constantes, podemos escrever:

$$B = \frac{\mu i}{4\pi R^2} \sum \Delta\ell \quad (I)$$

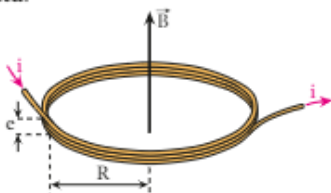
Note que o somatório de todos os  $\Delta \ell$  é o perímetro da espira, ou seja:

$$\Sigma \Delta \ell = 2\pi R \quad (II)$$

Substituindo (II) em (I), obtemos:

$$B = \frac{\mu i}{4\pi R^2} \cdot 2\pi R \Rightarrow B = \frac{\mu i}{2R}$$

Quando fazemos um enrolamento condutor cilíndrico constituído de  $n$  espiras, em que a espessura  $e$  é bem menor que o diâmetro  $2R$ , obtemos a chamada **bobina chata**.



Cada espira cria, no centro dessa bobina, um vetor indução magnética de intensidade praticamente igual a  $\frac{\mu i}{2R}$ .

Assim, a intensidade do vetor indução magnética resultante no centro da bobina pode ser expressa por:

$$B = n \frac{\mu i}{2R} \quad \text{ou} \quad B = \frac{n\mu i}{2R}$$

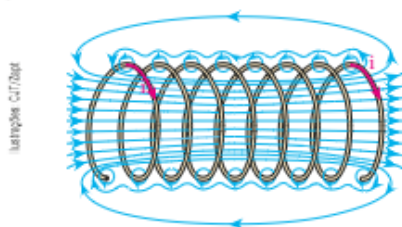
## 4. CAMPO MAGNÉTICO GERADO POR UM SOLENOIDE

### Linhas de indução

**Solenóide**, mais conhecido como **bobina**, é um fio condutor enrolado em forma de hélice cilíndrica, parecendo uma mola comum.

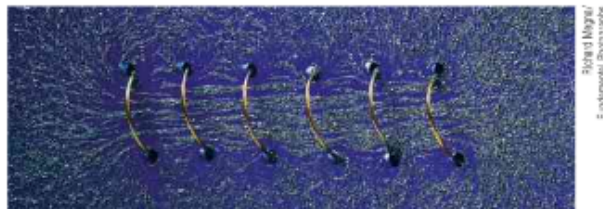
Fazendo com o solenóide os mesmos experimentos sugeridos para o fio retilíneo, obteremos os resultados apresentados a seguir.

Na figura abaixo, um solenóide é percorrido por uma corrente elétrica de intensidade  $i$ , que entra pela sua extremidade esquerda e sai pela direita. Observe a configuração das linhas de indução do campo magnético gerado por essa corrente.



A orientação dessas linhas continua dada pela regra da mão direita envolvente.

Note que, no interior do solenóide, em pontos não muito próximos do fio condutor ou das extremidades, as linhas de indução são representadas aproximadamente por linhas retas, paralelas, igualmente espaçadas e orientadas. Isso significa que, nessa região, o campo magnético é praticamente **uniforme**.



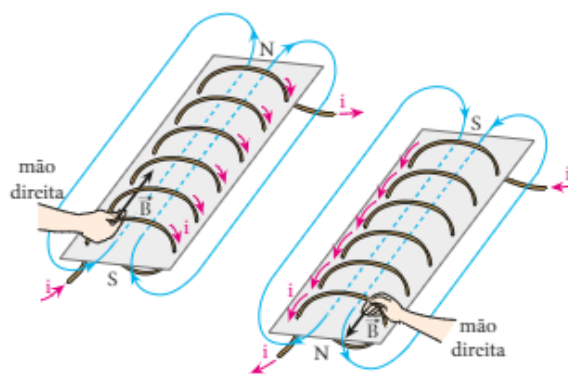
Padrão, obtido com liminha de ferro, do campo magnético gerado pela corrente elétrica num solenóide. Note que esse campo é sensivelmente uniforme no interior do solenóide e que, fora dele, com exceção dos pontos situados próximos e diante das extremidades, as linhas de indução estão praticamente ausentes. Nessa região, o campo magnético é praticamente nulo.

Caso o solenóide seja longo (comprimento algumas vezes maior que o diâmetro) e suas espiras estejam bem juntas, o campo na região interna é acentuadamente mais uniforme.

### Polos magnéticos de um solenóide

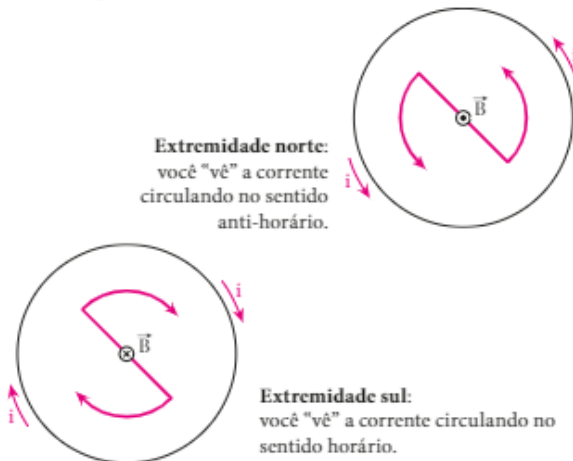
Do mesmo modo que aconteceu com as espiras, em um solenóide também surgem polos magnéticos quando uma corrente passa por ele.

Nas regiões externas ao solenóide, as linhas de indução orientam-se, como sempre, do polo norte para o polo sul. Observe ainda que, nessas regiões, existe grande semelhança entre as linhas de indução do campo do solenóide e as do ímã em forma de barra reta.



A regra da mão direita envolvente, aplicada a uma espira qualquer do solenóide, fornece o sentido das linhas de indução e, conseqüentemente, também a polaridade magnética de suas extremidades.

A identificação dos polos magnéticos do solenoide também pode ser feita por meio da regra prática apresentada para o caso das espiras circulares. Se você, situado evidentemente fora do solenoide, olhar para uma de suas extremidades, poderá “ver” a corrente no sentido horário ou anti-horário, como nas ilustrações a seguir:

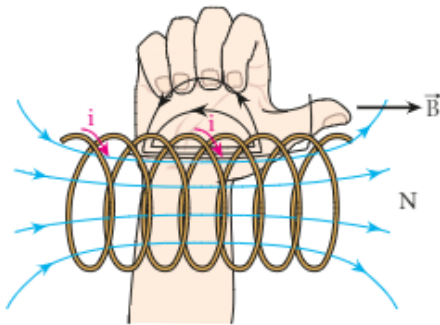


### Outra regra prática

Podemos determinar o sentido do campo magnético de um solenoide e, conseqüentemente, identificar seus polos por meio de outra regra.

Imagine que você pegue o solenoide com a mão direita de modo que, excluindo o polegar, os outros dedos indiquem o sentido da corrente nas diversas espiras.

Ilustração: C.7720a

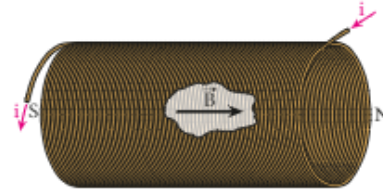


O polegar indicará, então, o sentido do vetor  $\vec{B}$  no interior do solenoide, mostrando também em que extremidade está seu norte magnético para um observador externo.

### Intensidade do vetor indução magnética

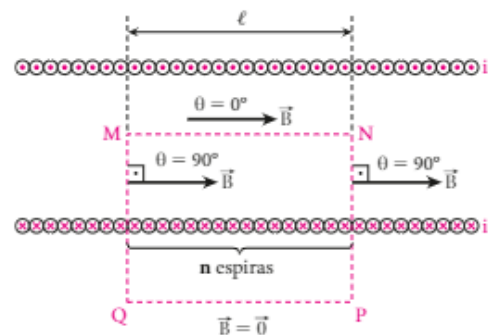
Veja, na figura a seguir, um solenoide cilíndrico compacto em que as espiras encontram-se encostadas (evi-

dentemente, o fio utilizado deve apresentar isolamento). Se o comprimento do solenoide for pelo menos quatro vezes seu diâmetro, o campo magnético em seu interior será sensivelmente uniforme, variando apenas em pontos bem próximos do fio condutor ou das extremidades.



Para determinar a intensidade do vetor  $\vec{B}$  na região interna em que o campo é sensivelmente uniforme, vamos usar novamente a **Lei de Ampère**, apresentada no estudo do campo de fio retilíneo.

Abaixo, observamos um corte longitudinal do solenoide da figura anterior.



O símbolo  $\odot$ , na região superior, representa seções do fio em que a corrente “sai” do plano do papel, enquanto o símbolo  $\otimes$ , na região inferior, representa seções do fio em que a corrente “entra” no plano do papel.

Vamos aplicar a **Lei de Ampère** ao longo da linha MNPQ, indicada na figura. Essa linha envolve um trecho de comprimento  $\ell$  em que  $n$  espiras são percorridas por corrente de intensidade constante  $i$ . Temos, então:

- no trecho MN:  $\sum B \Delta \ell \cos \theta = B \cdot MN \cdot \cos \theta = B \ell$ ;
- nos trechos MQ e NP:  $\sum B \Delta \ell \cos \theta = 0$ , pois  $\cos 90^\circ = 0$  e, além disso, o campo é nulo na região externa ao solenoide (ver nota a seguir);
- no trecho QP:  $\sum B \Delta \ell \cos \theta = 0$ , pois o campo é nulo nessa região (ver nota a seguir).

Assim, ao longo de toda a linha, obtemos:

$\sum B \Delta \ell \cos \theta = \mu i_{\text{envolvida}} \Rightarrow B \ell = \mu n i$ , já que a corrente total envolvida pela linha é  $n \cdot i$ , pois  $n$  espiras são percorridas pela corrente  $i$ .

Portanto:  $B = \mu \frac{n}{\ell} i$

Essa expressão também pode ser usada nos casos em que se considera  $n$  o número **total** de espiras e  $\ell$  o comprimento **total** do solenoide.

Observe que  $\frac{n}{\ell}$  é o número de espiras por uni-

dade de comprimento do solenoide ou densidade linear de espiras.

**NOTA**

O campo magnético é nulo na região externa a um solenoide compacto infinito (caso ideal). Entretanto, um solenoide real com comprimento muito maior que o diâmetro é uma boa aproximação do caso ideal.

## EM BUSCA DE EXPLICAÇÕES

### Direcionamento de um elétron em um tubo de imagem

Na parte de trás do tubo de imagem de um televisor existem emissores de elétrons, denominados **canhões eletrônicos**. Esses canhões emitem elétrons que, após serem acelerados em um intenso campo elétrico, vão atingir a tela, repleta de pequenas regiões revestidas de materiais fluorescentes.

As regiões atingidas pelos elétrons são excitadas e emitem luz. Dessa maneira, fica definida na tela uma imagem.

Para que essa imagem tenha boa definição, os elétrons precisam incidir em pontos bem determinados da tela.

Os campos magnéticos gerados por bobinas (de deflexão) que envolvem o tubo de imagem direcionam os elétrons, desviando-os verticalmente ou horizontalmente.

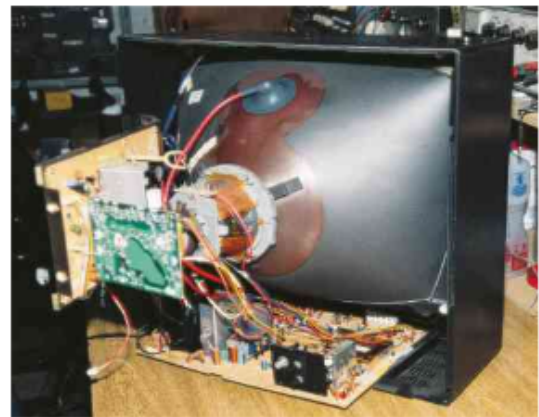
As ilustrações a seguir foram elaboradas com a finalidade exclusiva de dar uma ideia de como operam as bobinas de deflexão.

As bobinas  $B_1$  e  $B_2$  criam no interior do tubo de imagem um campo de indução magnética horizontal e variável  $\vec{B}_{1,2}$ , que deflete os elétrons verticalmente. Já as bobinas  $B_3$  e  $B_4$  geram um campo de indução magnética vertical e variável  $\vec{B}_{3,4}$ , que deflete os elétrons horizontalmente.

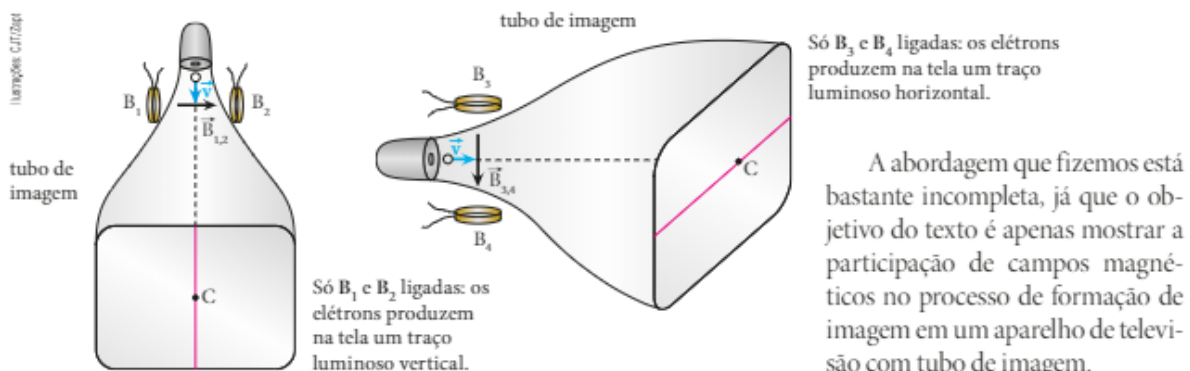
Se todas as bobinas estivessem desligadas, os elétrons atingiriam o centro  $C$  da tela.

Se só  $B_1$  e  $B_2$  ou  $B_3$  e  $B_4$  estivessem ligadas, os elétrons descreveriam na tela um segmento de reta vertical ou horizontal.

Com o tubo em funcionamento normal, isto é, com todas as bobinas operando, os elétrons varrem a tela horizontal e verticalmente ao mesmo tempo, formando as imagens:



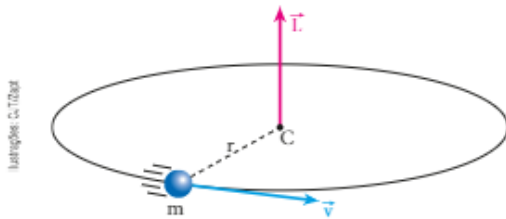
Tubo de imagem e outros componentes de um antigo televisor.



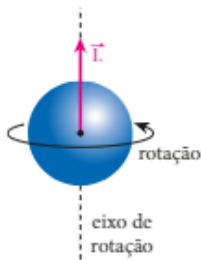
A abordagem que fizemos está bastante incompleta, já que o objetivo do texto é apenas mostrar a participação de campos magnéticos no processo de formação de imagem em um aparelho de televisão com tubo de imagem.

## Momento angular

Define-se, na Mecânica, uma grandeza vetorial denominada **momento angular** de um corpo. No caso de uma partícula de massa  $m$ , movendo-se com velocidade  $\vec{v}$  em uma circunferência de raio  $r$  e centro  $C$ , como na figura a seguir, seu momento angular  $\vec{L}$  em relação a  $C$  tem a orientação indicada e intensidade dada por  $L = m v r$ .



Um corpo em movimento de rotação em torno de um eixo que passa por ele também possui um momento angular em relação a esse eixo. Sua orientação está indicada na próxima figura e a determinação de sua intensidade está fora dos propósitos deste texto.



Só para se ter uma ideia da importância do momento angular, vamos citar algumas das muitas situações em que ele comparece.

A 2ª Lei de Kepler da Gravitação, por exemplo, é explicada pela conservação do momento angular da Terra em relação ao Sol.

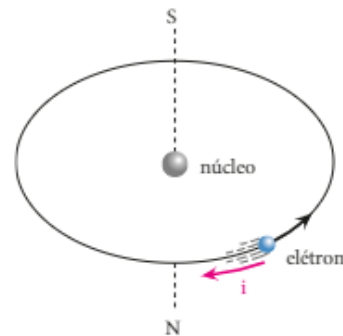
Uma bailarina com os braços abertos, em rotação em torno de um eixo que passa pelo seu próprio corpo, aumenta sua velocidade angular quando fecha os braços. Isso é consequência da conservação do momento angular da bailarina em relação ao seu eixo de rotação.

O momento angular também explica o comportamento dos giroscópios.

## 5. ORIGEM DAS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS MATERIAIS

A análise das propriedades magnéticas dos materiais é bastante complexa, requerendo, para uma correta interpretação, conceitos de Teoria Quântica que não serão abordados neste estudo. Entretanto o **modelo atômico clássico**, que considera o átomo como sendo constituído de um núcleo central de carga positiva, ao redor do qual giram elétrons, satisfaz razoavelmente uma das nossas necessidades.

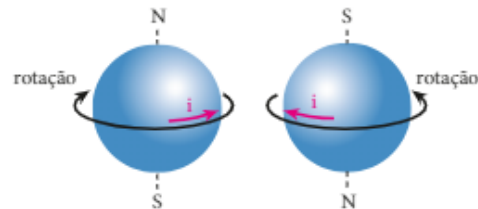
Um elétron em uma órbita suposta circular comporta-se como uma espira circular de corrente. Esta, como já vimos, apresenta polos magnéticos, comportando-se como um ímã.



Movimento orbital de um elétron. Lembre-se de que o sentido (convencional) da corrente elétrica é oposto ao sentido do movimento do elétron.

Um elétron, assim como muitas outras partículas, possui um momento angular intrínseco denominado *spin*, graças ao qual ele produz um outro campo magnético ainda mais significativo que o produzido pelo movimento orbital.

Embora a concepção correta do *spin* seja estabelecida pela Física Quântica, vamos, sem rigor, adotar um modelo clássico imaginando o elétron em rotação mecânica em torno de um eixo que passa por ele. A corrente elétrica associada a essa rotação confere polos magnéticos aos elétrons, acarretando o aparecimento deste outro campo magnético:



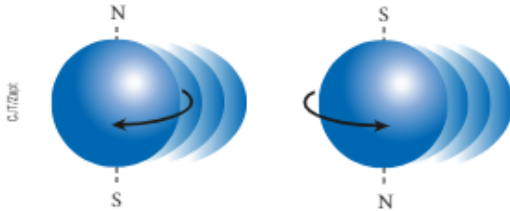
Neste momento, é inevitável fugirmos um pouco do modelo atômico clássico e nos apoiarmos em um conceito mais moderno: o de **orbital**.

Orbitais são regiões da eletrosfera, de diversas formas geométricas, em que há maior probabilidade de se encontrarem elétrons. Como cada orbital pode conter no máximo dois elétrons, quando ele já tem os dois elétrons dizemos que está completo.

É fundamental saber que os dois elétrons de um orbital completo sempre possuem *spins* opostos. Por isso, esses dois elétrons não contribuem para o campo magnético do átomo a que pertencem.



Por outro lado, os elétrons não emparelhados, isto é, aqueles que estão solitários em orbitais incompletos, dão uma contribuição magnética não nula ao átomo, sendo essa a principal causa do campo magnético de um átomo.



Os dois elétrons de um orbital completo.

Concluimos que:

O campo magnético de um átomo é gerado pelo movimento orbital de seus elétrons e, principalmente, pelo *spin* dos elétrons de orbitais incompletos.

### Orbitais, subníveis e níveis

As figuras a seguir simbolizam um orbital completo e um orbital incompleto. As setinhas representam a orientação do *spin* de cada elétron:



Orbital completo: dois elétrons com *spins* opostos.

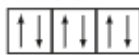


Orbital incompleto.

Grupos de orbitais recebem o nome de **subníveis** eletrônicos. Eles são designadas pelas letras **s**, **p**, **d** e **f**:



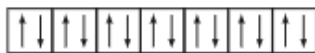
Subnível **s**: possui um orbital e, portanto, pode ter no máximo dois elétrons.



Subnível **p**: possui três orbitais, podendo ter no máximo seis elétrons.



Subnível **d**: possui cinco orbitais, podendo ter no máximo dez elétrons.



Subnível **f**: possui sete orbitais, podendo ter no máximo catorze elétrons.

Grupos de subníveis formam os **níveis** eletrônicos de um átomo. Elétrons pertencentes a um determinado nível encontram-se à mesma distância média do núcleo.

As três primeiras camadas, a partir do núcleo, são:

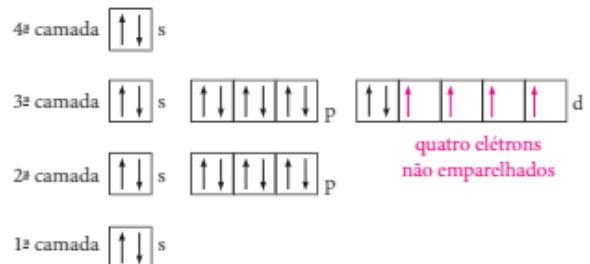
- **1ª** camada ou camada **K**: só possui um subnível **s**.
- **2ª** camada ou camada **L**: possui um subnível **s** e um subnível **p**.
- **3ª** camada ou camada **M**: possui um subnível **s**, um **p** e um **d**.

## 6. MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS

São denominados **ferromagnéticos** os materiais que se imantam consideravelmente quando submetidos a um campo magnético. Além disso, esses materiais são fortemente atraídos pelos ímãs. São ferromagnéticos o ferro, o cobalto, o níquel e algumas ligas como o *alnico* (liga que contém alumínio, níquel e cobalto), o *permalloy* e outras, além do disprósio e do gadolínio, quando em temperaturas abaixo da temperatura ambiente.

Nos materiais ferromagnéticos, cada átomo apresenta um campo magnético relativamente grande, causado principalmente pela presença de elétrons não emparelhados em orbitais incompletos. É o caso do ferro, que apresenta quatro elétrons não emparelhados no terceiro nível. Esses quatro elétrons possuem *spins* em concordância porque isso minimiza a energia do átomo.

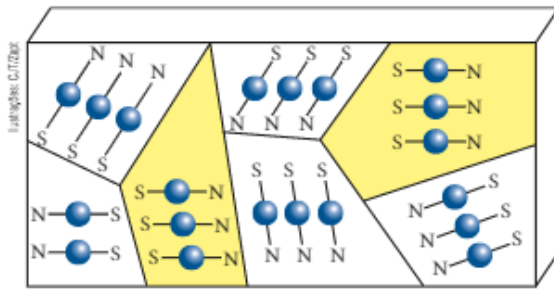
Veja, no esquema a seguir, a distribuição eletrônica do átomo de ferro, em que as setas indicam os sentidos dos *spins* e as letras **s**, **p** e **d** simbolizam os subníveis eletrônicos existentes nesse átomo:



Existem forças interatômicas que obrigam tais átomos a se disporem de modo que seus campos magnéticos fiquem paralelos e concordantes, formando os chamados **domínios magnéticos** (Teoria de Weiss). Essa organização do conjunto de átomos em cada domínio minimiza a energia do conjunto e acontece apesar da agitação térmica, desde que esta não ultrapasse determinados limites.

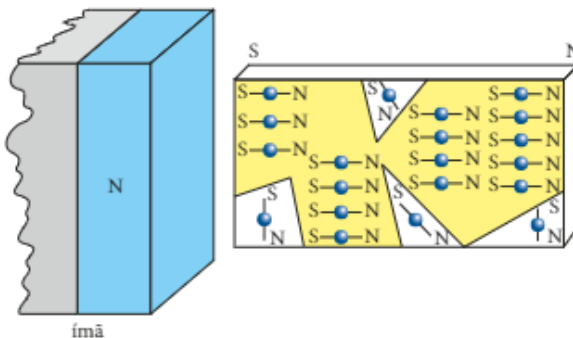
Em geral, cada domínio é microscópico, com volume da ordem de  $10^{-9} \text{ cm}^3$  e um grande número de átomos.

Nos materiais ferromagnéticos virgens, isto é, que nunca foram imantados, os domínios estão dispostos de maneira tão desorganizada que o campo magnético resultante de todos eles é nulo. Por isso, dois pregos de ferro, por exemplo, não interagem magneticamente.



Representação simbólica de sete domínios de uma barra de material ferromagnético não imantado. Dentro de cada um deles estão representados alguns de seus átomos com os respectivos polos magnéticos.

Entretanto, quando o material ferromagnético virgem é submetido a um campo magnético externo, os domínios em concordância com esse campo tendem a crescer à custa da captura de átomos de domínios vizinhos. E os domínios que não estão em concordância com o campo externo deformam-se, tendendo à concordância. Assim, o material passa a se apresentar imantado.

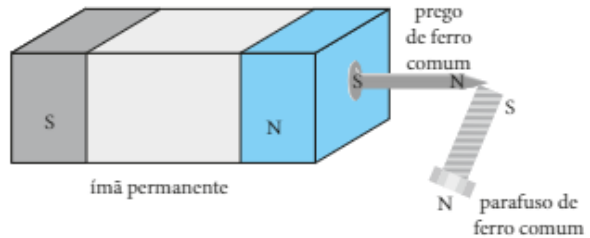


Representação simbólica de alguns domínios de uma barra de material ferromagnético imantada, por indução magnética, pelo campo magnético do ímã. Observe que essa barra passou a ter polos definidos: norte na extremidade direita e sul na esquerda. Por isso, a barra é atraída pelo ímã.

Retirando o campo magnético externo, as fronteiras dos domínios magnéticos não voltam exatamente às suas posições originais. Desse modo, persiste no material uma imantação residual.

Essa imantação residual é desprezível no caso do ferro doce (ferro praticamente puro), mas é significativa no caso do aço e pode até ser muito intensa no caso do *alnico*, do *permalloy* etc.

Essa retenção de campo magnético, que possibilita a fabricação de ímãs permanentes, é denominada **histerese magnética**.



O material do ímã permanente tem alta histerese. O ferro do prego e do parafuso, entretanto, tem histerese muito baixa. Por isso, o prego, imantado por indução magnética, é um ímã temporário, isto é, ele só consegue manter suspenso o parafuso enquanto o ímã permanente está perto dele.

## 7. PONTO CURIE

Quando aumentamos a temperatura de um material ferromagnético, a agitação térmica provoca o desagregamento dos domínios magnéticos, até que, em uma temperatura denominada **ponto Curie**, em homenagem ao físico francês Pierre Curie (1859-1906), o material deixa de ser ferromagnético.

Veja, no quadro a seguir, o ponto Curie de alguns materiais.

Material ferromagnético	Ponto Curie (°C)
Disprósio	-168
Gadolínio	16
Nicromo	300
Níquel	358
Magnetita	580
Ferro	770
Cobalto	1130

É importante acrescentar que a *performance* de um ímã pode ser comprometida por altas temperaturas. Outro fator que reduz a imantação dos ímãs é o choque mecânico. Por isso, devem-se evitar quedas e pancadas, para que a imantação de um ímã permanente continue forte por muito tempo.

## FAÇA VOCÊ MESMO

### Análise do ferromagnetismo de um metal

O objetivo desta atividade é constatar experimentalmente que, por aquecimento, um material pode perder o ferromagnetismo e que, por resfriamento, pode recuperá-lo.

Para isso, vamos utilizar um material fácil de ser obtido – o nicromo – e que tem ponto Curie relativamente baixo ( $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), uma temperatura que pode ser atingida com a chama de uma vela.

O nicromo é uma liga metálica constituída de níquel, cromo e outros elementos, que pode ser encontrada em lojas de componentes eletrônicos. Entretanto, como o resistor de um chuveiro e de outros aquecedores elétricos é constituído de um fio dessa liga – normalmente enrolado em forma de hélice cilíndrica –, você pode retirá-lo, por exemplo, de uma “resistência” já inutilizada de um chuveiro.

#### Material necessário

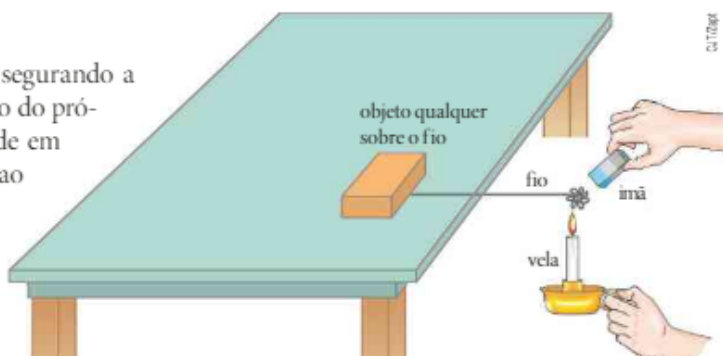
- 1 pedaço de fio de nicromo com cerca de 30 cm de comprimento;
- 1 ímã;
- 1 vela presa em um suporte adequado;
- 1 caixa de fósforos para acender a vela (para isso, você também pode usar a chama de uma das bocas de um fogão);
- 1 alicate com ponta bem fina.

#### ATENÇÃO!

Este experimento envolve fogo. Realize-o apenas com a supervisão do professor.

#### Procedimento

- Em uma das extremidades do fio, segurando a ponta com o alicate, faça um rolinho do próprio fio. Prenda a outra extremidade em uma mesa, como mostra a figura ao lado, usando qualquer objeto suficientemente pesado.
- Aproxime do rolinho de fio qualquer um dos polos do ímã. Observe o que aconteceu e anote.
- Com cuidado para não provocar nem sofrer acidentes, acenda a vela e aqueça o rolinho até ele ficar rubro. Mantendo a chama aquecendo o rolinho, aproxime dele qualquer um dos polos do ímã. Observe o que aconteceu e anote.
- Mantendo o ímã na mesma posição, afaste a chama do rolinho e espere alguns segundos. Verifique o que ocorreu e anote.



#### Analisando o experimento

1. Descreva o que você observou em cada procedimento, justificando.
2. Se o procedimento fosse repetido com um fio de arame (ferro), os resultados seriam os mesmos? E se o fio de arame, em vez de ser aquecido pela chama da vela, fosse aquecido por outra chama, a cerca de  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?
3. O ponto Curie do gadolínio é igual a  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Em que região do Brasil é mais provável que uma amostra desse elemento tenha comportamento ferromagnético?
4. Para preservar a boa imantação de um ímã permanente, além de não submetê-lo a altas temperaturas, por que se deve evitar que participem de impactos ou recebam pancadas?



### Qual é a origem do campo magnético terrestre?

O campo magnético da Terra, em sua superfície, tem ordem de grandeza de  $10^{-5}$  T a  $10^{-4}$  T. Esse campo é pouco intenso quando comparado com o gerado por ímãs artificiais, que pode ter ordem de grandeza de 10 T.

O mecanismo que origina o campo magnético da Terra e de outros astros ainda não está esclarecido. Certamente o campo magnético da Terra não é gerado por um grande ímã existente em seu interior, pois a alta temperatura dessa região desagregaria seus domínios magnéticos.

Para que um astro possua campo magnético, é preciso que tenha um núcleo líquido e realize um movimento de rotação. Na Lua, por exemplo, que não possui núcleo líquido, não existe campo magnético. O planeta Vênus tem dimensões comparáveis às da Terra e possui núcleo líquido, mas seu campo magnético é menos intenso que o do nosso planeta, por rotar com velocidade angular menor.

Acredita-se que o campo magnético de um astro seja gerado por correntes elétricas existentes em seu núcleo líquido.

## 8. PERMEABILIDADE RELATIVA

Denomina-se **permeabilidade relativa** ( $\mu_r$ ) de um material o quociente de sua permeabilidade absoluta ( $\mu$ ) pela permeabilidade absoluta do vácuo ( $\mu_0$ ):

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Para os materiais não ferromagnéticos, ou seja, **para a grande maioria dos materiais**, temos  $\mu_r$  muito aproximadamente igual a 1, já que, para eles,  $\mu \cong \mu_0$ . Em outras palavras, esses materiais apresentam um comportamento magnético muito semelhante ao do vácuo.

Veja os valores de  $\mu_r$  para alguns materiais não ferromagnéticos.

Material	Valor de $\mu_r$
Bismuto	0,999830
Cobre	0,999991
Ar	1,0000004
Alumínio	1,000022

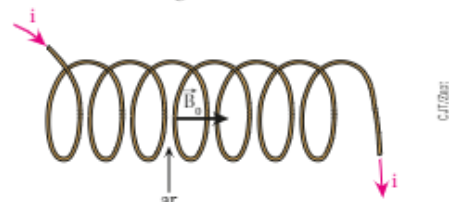
Com relação aos materiais **ferromagnéticos**, porém, a situação é muito diferente. De fato, suas permeabilidades relativas são muito maiores que 1.

Veja alguns valores de  $\mu_r$  para esses materiais:

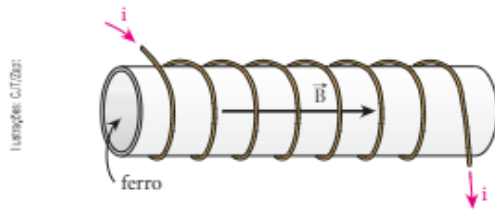
Material	Valor de $\mu_r$
Níquel	até 1 000
Ferro	até 5 500
Ferro-silício (96% de ferro e 4% de silício)	até 7 000
Permalloy 78 (22% de ferro e 78% de níquel)	até 100 000
Supermalloy (15% de ferro, 79% de níquel e 5% de molibdênio)	até 800 000

Esses elevados valores de  $\mu_r$  conferem aos materiais ferromagnéticos uma grande utilidade prática, no que diz respeito a sistemas magnéticos.

Se o interior de um solenoide, por exemplo, for preenchido por um bastão ferromagnético, o vetor indução magnética  $\vec{B}$  em seu interior e em suas extremidades se tornará muito mais intenso do que se existisse, em seu interior, material não ferromagnético.



O vetor indução  $\vec{B}_0$  foi criado pela corrente de intensidade  $i$ .



O vetor  $\vec{B}_0$  organiza os domínios magnéticos do ferro, dando origem a outro vetor indução magnética, no mesmo sentido de  $\vec{B}_0$  e muito mais intenso que este.  $\vec{B}$  é o vetor indução magnética resultante.

Se o solenoide das ilustrações fosse compacto, com comprimento  $\ell$  e  $n$  espiras, poderíamos escrever:

$$\text{Preenchido por ar } (\mu \equiv \mu_0): B_0 = \mu_0 \frac{n}{\ell} i \quad (\text{I})$$

$$\text{Preenchido por ferro } (\mu \gg \mu_0): B = \mu \frac{n}{\ell} i \quad (\text{II})$$

Dividindo, membro a membro, a expressão (II) pela expressão (I), obtemos:

$$\frac{B}{B_0} = \frac{\mu}{\mu_0} = \mu_r \Rightarrow B = \mu_r B_0$$

Considerando que o bastão de ferro tenha  $\mu_r$  igual a 5 500, note que  $B$  será 5 500 vezes  $B_0$ !

Assim, as extremidades de um solenoide com o bastão de ferro (núcleo de ferro) atraem materiais ferromagnéticos muito mais intensamente do que se o solenoide estivesse preenchido por ar.



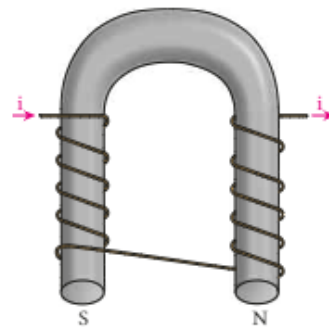
Um solenoide com núcleo ferromagnético.

## 9. ELETROÍMÃ

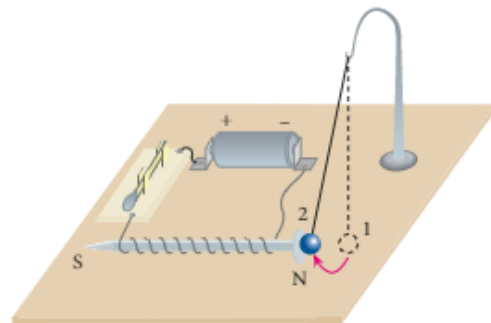
O **eletroímã** é uma barra de ferro doce envolvida por um enrolamento de fio de cobre esmaltado. Em outras palavras, é uma barra de ferro doce no interior de um solenoide. Quando esse solenoide é percorrido por corrente elétrica, a barra de ferro imanta-se na presença do campo gerado, tornando-se um ímã. Interrompendo-se a corrente, a barra de ferro deixa de ser um ímã, uma vez que o ferro doce praticamente não retém imantação. Isso não acontece, por exemplo, com o aço, pois este se mantém imantado, e não desprezivelmente, mesmo cessada a corrente no solenoide.



Eletroímã em forma de barra reta.



Eletroímã em forma de ferradura.



Com a chave fechada, o prego imanta-se e atrai a bola de ferro, que se desloca da posição 1 para a posição 2. Abrindo-se a chave, a esfera abandona a posição 2 e volta ao repouso, na posição 1, após algumas oscilações.

Um eletroímã atrai materiais ferromagnéticos quando é percorrido por corrente contínua, mas também pode fazê-lo quando percorrido por corrente alternada. Por isso, é usado, por exemplo, em campanhas elétricas de residências.

No caso de operar em corrente alternada, os polos magnéticos das extremidades de um eletroímã sofrem inversões ao longo do tempo.



O guindaste eletromagnético retira da sucata os materiais ferromagnéticos. Carson, Califórnia.

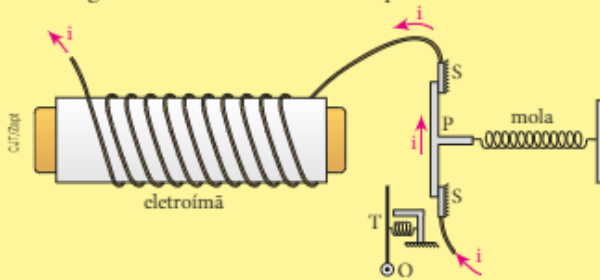


### Como funcionam os disjuntores?

Os disjuntores, como já visto no Capítulo 4, são dispositivos que protegem instalações elétricas, evitando que os fios sejam percorridos por correntes excessivas, que podem aquecê-los o suficiente para derreterem suas capas isolantes e causar um curto-circuito.

A grande vantagem dos disjuntores em relação aos fusíveis é que estes se queimam e precisam, então, ser substituídos, enquanto os disjuntores simplesmente desligam, funcionando como uma chave. Eliminada a causa da corrente excessiva, basta ligá-los novamente.

Você pode entender o princípio de funcionamento de um disjuntor eletromagnético por meio do seguinte modelo, bastante simplificado:



A peça **P** é ferromagnética e condutora; os suportes **S** são condutores e **T** é uma trava.

**Nota:** Muitos disjuntores operam segundo outros princípios, ou seja, não são eletromagnéticos.

Quando a intensidade **i** da corrente elétrica excede determinado valor, o eletroímã desloca a peça **P**, que se desencosta dos suportes **S**, abrindo o circuito. Ao se deslocar ao encontro do eletroímã, a peça **P** passa pela trava **T**, que gira para a esquerda em torno do eixo **O** e depois retorna à posição inicial, impedindo que a peça **P** volte a se encostar nos suportes **S**.

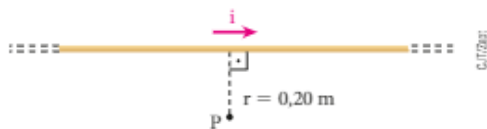
Corrigido o problema que causou o excesso de corrente, a peça **P** é destravada e uma mola a leva de volta aos suportes **S**.

## QUESTÕES COMENTADAS



**1** Um fio retilíneo muito longo, situado num meio de permeabilidade absoluta  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}}$ , é percorrido por uma corrente elétrica de intensidade  $i = 5,0 \text{ A}$ . Considerando o fio no plano do papel, caracterize o vetor indução magnética no ponto **P**, situado nesse plano.

### RESOLUÇÃO



A direção do vetor indução magnética no ponto **P** é perpendicular ao plano definido pelo ponto e pelo condutor, ou seja, é perpendicular ao plano do papel. O sentido desse vetor, dado pela regra da mão direita envolvente, é entrando no plano do papel, e seu módulo é dado por:  $B = \frac{\mu i}{2\pi r}$

Temos:  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}}$ ;  $i = 5,0 \text{ A}$ ;  $r = 0,20 \text{ m}$ .

Assim:  $B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5,0}{2\pi \cdot 0,20} \Rightarrow B = 5,0 \cdot 10^{-6} \text{ T}$

**Resposta:** Direção perpendicular ao plano do papel, sentido entrando nesse plano e módulo igual a  $5,0 \cdot 10^{-6} \text{ T}$ .

**2** Dois longos fios retilíneos, estendidos no plano do papel, se cruzam perpendicularmente sem que haja contato elétrico entre eles.

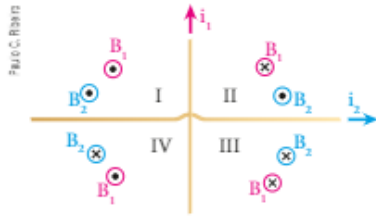


Esses fios são percorridos pelas correntes de intensidades  $i_1$  e  $i_2$ , cujos sentidos estão indicados na figura.

- Em quais das regiões é possível ser nulo o campo magnético resultante dos dois fios?
- Caracterize o campo magnético resultante  $\vec{B}$  no ponto **P**, supondo  $i_1 = 10 \text{ A}$ ,  $i_2 = 40 \text{ A}$ ,  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}}$ ,  $r_1 = 10 \text{ cm}$  e  $r_2 = 20 \text{ cm}$ .

**RESOLUÇÃO**

- a) Usando a regra da mão direita envolvente, determinamos, nas quatro regiões, os sentidos dos campos  $\vec{B}_1$  e  $\vec{B}_2$ , criados por  $i_1$  e  $i_2$ , respectivamente.



Para o campo resultante ser nulo,  $\vec{B}_1$  e  $\vec{B}_2$  precisam ter sentidos opostos, o que só acontece nas regiões II e IV.

- b) Vamos calcular  $B_1$  e  $B_2$ , lembrando que  $r_1 = 0,10$  m e  $r_2 = 0,20$  m:

$$B_1 = \frac{\mu i_1}{2\pi r_1} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10}{2\pi \cdot 0,10}$$

$$B_1 = 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

$$B_2 = \frac{\mu i_2}{2\pi r_2} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 40}{2\pi \cdot 0,20}$$

$$B_2 = 4,0 \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

Observe que o ponto P pertence à região IV, em que  $\vec{B}_1$  e  $\vec{B}_2$  têm sentidos opostos. Então, a intensidade do campo resultante, sendo  $B_2$  maior que  $B_1$ , é dada por:

$$B = B_2 - B_1 = 4,0 \cdot 10^{-5} - 2,0 \cdot 10^{-5} \Rightarrow B = 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

Portanto as características do vetor  $\vec{B}$  são:

Intensidade:  $2,0 \cdot 10^{-5} \text{ T}$ .

Direção: perpendicular ao plano do papel.

Sentido: entrando no papel, pois  $B_2 > B_1$ .

**Respostas:** a) Regiões II e IV.

b) Intensidade:  $2,0 \cdot 10^{-5} \text{ T}$ .

Direção: perpendicular ao plano do papel.

Sentido: entrando no papel, pois  $B_2 > B_1$ .

- 3** Uma espira circular de raio  $R = 20$  cm é percorrida por uma corrente  $i = 40$  A. Sabe-se que o meio onde a espira se encontra tem permeabilidade absoluta  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}}$ .

- a) Calcule a intensidade do vetor indução magnética no centro O da espira.
- b) Considerando uma partícula eletrizada com carga  $q = 2 \mu\text{C}$  deslocando-se ao longo de um diâmetro da espira, calcule a intensidade da força magnética que atuará nessa partícula ao passar por O, sabendo que sua velocidade, nesse ponto, vale 1000 m/s.

**RESOLUÇÃO**

- a) A intensidade do vetor indução magnética no centro da espira é dada por:  $B = \frac{\mu_0 i}{2R}$

$$\text{Como } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}},$$

$i = 40$  A e  $R = 0,20$  m, calculemos B:

$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 40}{2 \cdot 0,20} \Rightarrow B = 4\pi \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

- b) A intensidade da força magnética é dada por:

$$F_m = |q| v B \sin \theta$$

Sendo:

$$q = 2 \cdot 10^{-6} \text{ C};$$

$$v = 1000 \text{ m/s};$$

$$B = 4\pi \cdot 10^{-5} \text{ T};$$

$\theta = 90^\circ$ , calculemos  $F_m$ .

$$F_m = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 \cdot 4\pi \cdot 10^{-5} \cdot \sin 90^\circ$$

$$F_m = 8\pi \cdot 10^{-8} \text{ N}$$

**Respostas:** a)  $4\pi \cdot 10^{-5} \text{ T}$ ;

b)  $8\pi \cdot 10^{-8} \text{ N}$

- 4** Um solenoide compacto de 20 cm de comprimento contém 1000 espiras e é percorrido por uma corrente elétrica de 5,0 A. Sendo  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}}$  a permeabilidade absoluta do meio existente em seu interior, calcule o módulo do vetor indução magnética criado pelo solenoide nessa região. Use  $\pi = 3,1$ .

**RESOLUÇÃO**

O módulo do vetor indução magnética que o solenoide cria em seu interior é dado por:  $B = \frac{\mu n i}{\ell}$

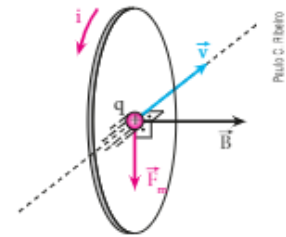
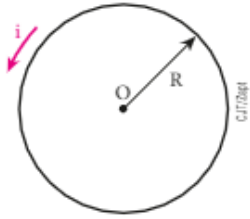
Como  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}}$ ,  $n = 1000$ ,  $i = 5,0$  A e  $\ell = 0,20$  m, calculamos B:

$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000 \cdot 5,0}{0,20} \Rightarrow B = 3,1 \cdot 10^{-2} \text{ T}$$

Se o interior desse mesmo solenoide fosse preenchido por um núcleo ferromagnético de permeabilidade relativa igual a 5500, por exemplo, e a corrente estabelecida nele continuasse igual a 5,0 A, a intensidade do vetor indução magnética aumentaria muito, tanto em seu interior quanto em suas extremidades, passando a valer  $B'$ , dada por:

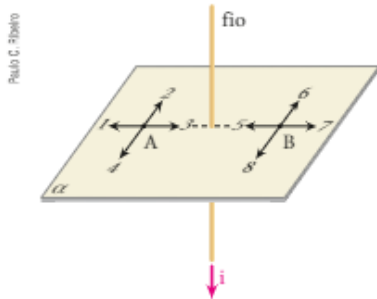
$$B' = \mu_r B = 5500 \cdot 3,1 \cdot 10^{-2} \Rightarrow B' = 1,7 \cdot 10^2 \text{ T}$$

**Resposta:**  $3,1 \cdot 10^{-2} \text{ T}$



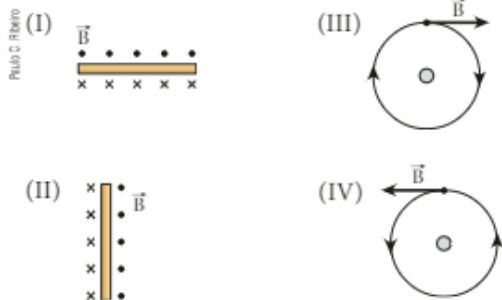
**QUESTÕES PROPOSTAS** FAÇA NO CADERNO.

5. Por um fio condutor retilíneo passa uma corrente contínua de intensidade  $i$  no sentido indicado na figura.



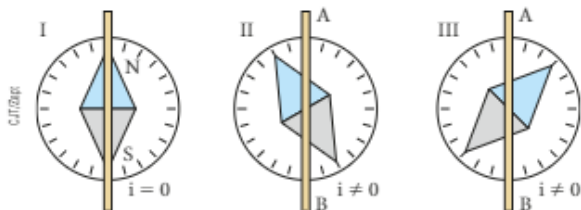
Quais dos vetores, numerados de 1 a 8, podem representar o vetor indução magnética criado pela corrente nos pontos A e B, pertencentes a um plano  $\alpha$  perpendicular ao fio?

6. Nas figuras I e II, temos condutores retilíneos estendidos no plano desta página e, nas figuras III e IV, temos interseções, também com o plano desta página, de condutores retilíneos perpendiculares a ela.



Em cada caso, observe o sentido do campo magnético devido ao fio e determine o sentido da corrente que passa por ele.

7. Observe as figuras seguintes. Em I, a agulha de uma bússola está em equilíbrio estável na direção norte-sul e não passa corrente pelo fio de cobre situado acima dela. Em II e III, entretanto, a corrente nesse fio não é nula e a agulha também está em equilíbrio estável.



Tomando como referência os pontos A e B, determine o sentido da corrente no fio:

- a) em II;                      b) em III.

8. Uma corrente elétrica necessariamente produz:

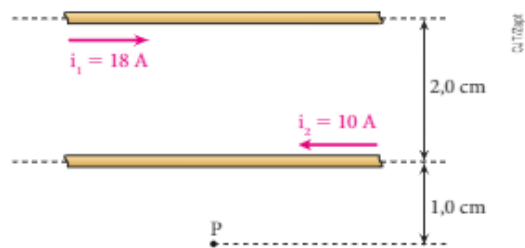
- a) efeito fisiológico;
- b) efeito magnético;
- c) efeito Joule;
- d) efeito químico;
- e) efeito magnético e efeito Joule.

9. Um fio condutor retilíneo e longo, situado no vácuo, é percorrido por uma corrente elétrica de 100 A. Um elétron encontra-se a 10 cm do fio e move-se com velocidade escalar igual a  $5 \cdot 10^6$  m/s. Calcule a intensidade da força magnética que atua no elétron, quando a direção do seu movimento é:

- a) radial, afastando-se do fio;
- b) paralela ao fio, no sentido da corrente;
- c) perpendicular ao fio e tangente a uma linha de indução.

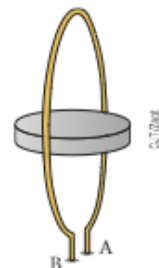
Dados:  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Tm}{A}$ ;  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} C$ .

10. Na figura, temos trechos de dois fios paralelos muito longos, situados no vácuo, percorridos por correntes elétricas de módulos e sentidos indicados:



Determine o módulo do vetor indução magnética no ponto P, situado no mesmo plano dos fios, sendo  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Tm}{A}$ .

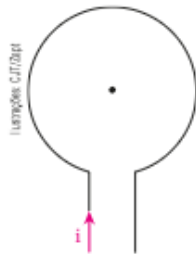
11. Em uma espira circular disposta verticalmente como representa a figura, é estabelecida uma corrente constante que a percorre de A para B.



Uma bússola, com sua agulha livre para girar em um plano horizontal, é colocada no centro da espira. Considerando o campo magnético da Terra desprezível, em comparação com o criado pela espira, qual é a orientação assumida pela agulha da bússola?

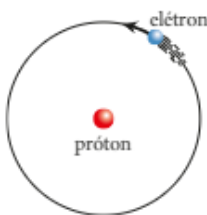


12. Uma espira circular de raio  $2p$  cm situa-se no plano do papel e é percorrida por corrente de intensidade igual a  $5,0$  A, no sentido indicado.



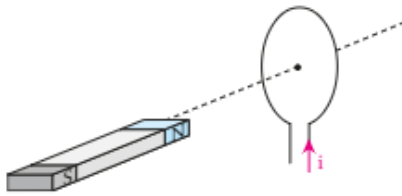
Caracterize o vetor indução magnética criado pela espira em seu centro, sendo  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Tm}{A}$ .

13. No modelo clássico do átomo de hidrogênio, um elétron realiza um movimento circular ao redor de um próton, como representa a figura.



Considerando o sentido adotado para o movimento do elétron, determine a orientação do campo magnético gerado por ele no centro da circunferência.

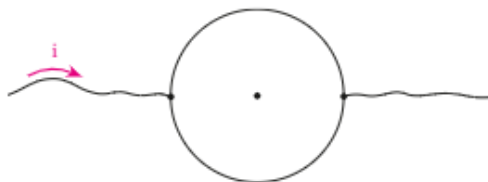
14. Na figura a seguir, temos uma espira circular de raio  $R = 0,10\pi$  m, percorrida por uma corrente elétrica de intensidade igual a  $10$  A, no sentido indicado. Um ímã está nas proximidades da espira e em repouso em relação a ela.



Se  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Tm}{A}$  a permeabilidade absoluta do meio ambiente:

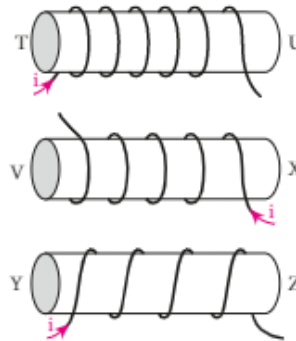
- calcule o módulo do vetor indução magnética criado pela espira, em seu centro;
- informe se a interação entre a espira e o ímã é atrativa ou repulsiva.

15. Com um pedaço de fio comum de cobre foi feita uma espira circular. Outros dois pedaços de fio de cobre foram soldados em pontos diametralmente opostos da espira, como representado na figura.



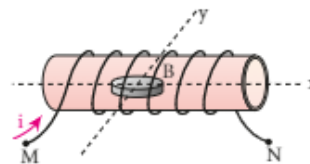
Determine a intensidade do campo magnético no centro da espira, quando uma corrente constante de intensidade  $i$  passa pelo fio.

16. Nos solenoides representados nas figuras a seguir, T, U, V, X, Y e Z são polos magnéticos produzidos pela corrente  $i$ . Em relação a um observador situado fora dos solenoides, determine quais são os polos norte e sul dos solenoides.



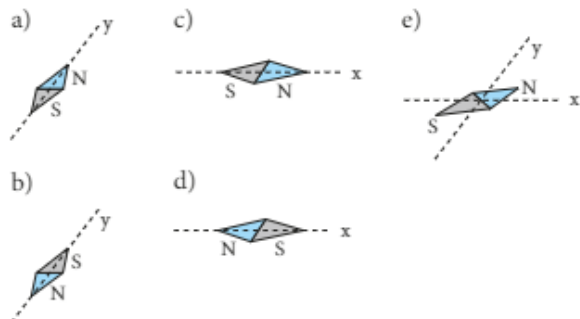
17. Um solenoide de  $15\,000$  espiras por metro é percorrido por uma corrente de intensidade igual a  $10$  A. Determine o módulo da indução magnética em seu interior, onde a permeabilidade magnética vale  $4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Tm}{A}$ . Use  $\pi = 3,1$ .

18. A figura representa um canudo plástico e transparente no qual foi enrolado um fio de cobre de extremidades M e N. Dentro do canudo está uma bússola B.

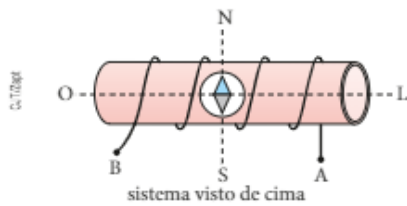


As retas  $x$  e  $y$  são perpendiculares entre si e estão no mesmo plano da agulha da bússola.

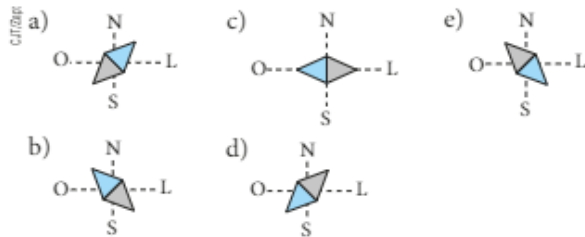
A posição em que a agulha se estabiliza quando estabelecemos no fio uma corrente elétrica com sentido de M para N, supondo desprezível o campo magnético terrestre, está mais bem representada na alternativa:



19. Uma bússola é colocada no interior de um solenoide, como ilustra a figura. Sua agulha encontra-se estabilizada na direção norte-sul.



Qual das alternativas representa uma possível posição de equilíbrio estável da agulha, quando uma corrente contínua passa pelo solenoide, de A para B?



20. Mostre que a unidade  $\frac{N}{A^2}$  é equivalente a  $\frac{Tm}{A}$ .

21. Duas barras metálicas aparentemente idênticas, muito distantes de outros corpos, foram posicionadas como mostra a figura, verificando-se uma atração entre elas:



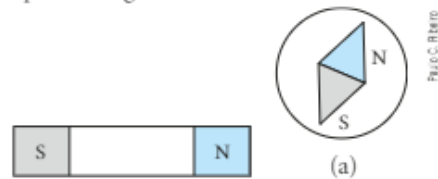
Sabendo-se que não estão eletrizadas, é correto afirmar que:

- a) As duas barras podem ser ímãs permanentes, cujas extremidades B e C são polos magnéticos de nomes diferentes.
- b) As duas barras são ímãs permanentes, necessariamente.
- c) Uma barra pode ser ímã permanente e a outra, um ímã temporário, isto é, imantada por indução magnética.
- d) Nenhuma das barras precisa ser um ímã permanente.
- e) As alternativas a e c estão corretas.

22. Na figura a seguir, temos duas bússolas a e b. Porém, por engano, a bússola b foi construída com uma agulha de ferro não imantada.



Colocando-se a bússola a nas proximidades de um forte ímã, observa-se que sua agulha se estabiliza na posição indicada na próxima figura.



Se, no mesmo lugar onde está a bússola a, estivesse a bússola b, em que posição se estabilizaria sua agulha de ferro?

## DESCUBRA MAIS

1 Em um ímã, existe um local denominado **zona neutra**, que não atrai magneticamente, por exemplo, um prego de ferro. Elabore um modelo para explicar a existência da zona neutra.

2 Um longo fio de cobre, estendido paralelamente a um terreno plano e horizontal, é percorrido por uma corrente elétrica constante de intensidade  $i$ .

Em uma pessoa P, em repouso na posição indicada na figura (vista de cima), o vetor indução magnética devido ao fio é  $\vec{B}$  ( $\vec{B} \neq \vec{0}$ ).



Suponha que essa pessoa passe a caminhar ao longo da reta MN, paralela ao fio, dirigindo-se de M para N, com velocidade de módulo igual ao da velocidade média dos elétrons livres presentes no fio. As duas velocidades são relativas ao terreno.

Qual é, nessa nova situação, o vetor indução magnética na pessoa, devido ao fio? Explique.



# FORÇA MAGNÉTICA EM CORRENTES ELÉTRICAS

## 1. INTRODUÇÃO

O assunto deste capítulo possibilitará a compreensão do princípio de funcionamento dos motores elétricos, dos galvanômetros analógicos, dos alto-falantes etc.

Em 1822, o físico e químico inglês Michael **Faraday** (1791-1867) fez passar uma corrente contínua através de um condutor colocado entre os polos de um ímã. Como consequência, esse condutor executou um movimento de rotação. Esse movimento de rotação foi provocado pela interação entre o campo magnético do ímã e o campo magnético gerado pela corrente no fio. Assim, estava praticamente inventado o motor elétrico.

## 2. FORÇA MAGNÉTICA

### Força magnética atuante em um trecho elementar de um fio condutor

No Capítulo 8, vimos que a força magnética  $\vec{F}_m$  em uma carga elétrica, movendo-se com velocidade  $\vec{v}$  em relação a um referencial  $R$ , submetida a um campo magnético estacionário cuja indução magnética, nesse mesmo referencial, é igual a  $\vec{B}$ , tem intensidade dada por  $F_m = |q| v B \sin \theta$ , em que  $\theta$  é o menor ângulo entre  $\vec{v}$  e  $\vec{B}$ . Então, se nas condições estabelecidas um fio metálico é percorrido por uma corrente elétrica e está imerso em um campo magnético, como ilustra a figura 1, uma força magnética  $\vec{F}_m$  atua em cada um de seus elétrons livres.

Usando a regra da mão direita espalmada e lembrando que a carga do elétron é negativa, determinamos a orientação dessa força.

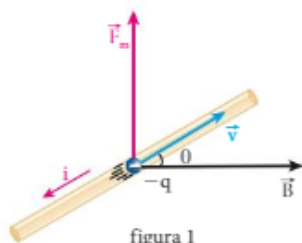


figura 1

Sabemos que o sentido convencional da corrente elétrica é oposto ao sentido em que se movem os elétrons livres.

Entretanto, para efeito de cálculo, podemos, ficticiamente, substituir os elétrons livres por cargas positivas de mesmo módulo, movendo-se no sentido da corrente, com velocidade de mesmo módulo e mesma direção, como está representado na figura 2.

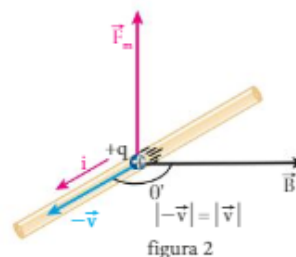


figura 2

Vemos que a orientação da força magnética realmente não se modifica e a intensidade dessa força também não se altera. De fato, em 1 essa intensidade é  $q v B \sin \theta$  e, em 2,  $q v B \sin \theta'$ . Como a soma de  $\theta$  e  $\theta'$  é igual a  $180^\circ$ , seus senos são iguais, o mesmo ocorrendo, então, com as intensidades das forças.

O artifício que acabamos de usar simplifica nosso próximo passo, que é determinar a força magnética, não em um elétron, mas em um trecho elementar ("pedacinho") do fio.

Na figura 3, a seguir, está representado um fio condutor percorrido por uma corrente de intensidade  $i$  e situado em uma região onde existe um campo magnético  $\vec{B}$ . A intensidade dessa corrente é  $i$ , em relação ao mesmo referencial em que o vetor indução magnética é  $\vec{B}$ .

Usando o artifício apresentado, podemos considerar que existe, no trecho elementar de comprimento  $\Delta\ell$ , uma carga total  $Q$  positiva. Nesse trecho, então, atua uma força magnética  $\vec{f}_m$ , cuja intensidade é dada por  $f_m = Q v B \sin \theta$ .

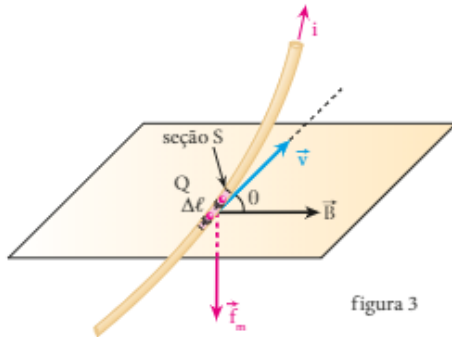


figura 3

Imagens: C. J. Zang

Após um intervalo de tempo  $\Delta t$

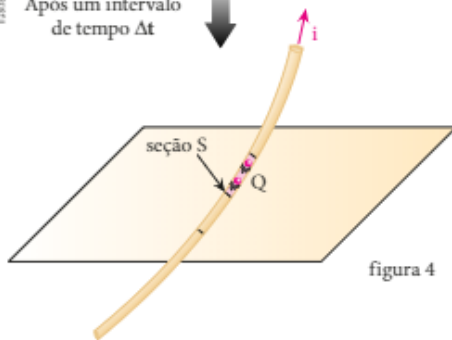


figura 4

Durante certo intervalo de tempo  $\Delta t$  essa carga fictícia  $Q$  escoou pela seção transversal  $S$  do fio, com velocidade de módulo  $v$ , e passamos para a situação representada na figura 4.

Substituindo  $v = \frac{\Delta\ell}{\Delta t}$  na expressão de  $f_m$ , obtemos:  $f_m = Q \frac{\Delta\ell}{\Delta t} B \sin \theta$

Note que  $\frac{Q}{\Delta t}$  é a intensidade  $i$  da corrente no fio.

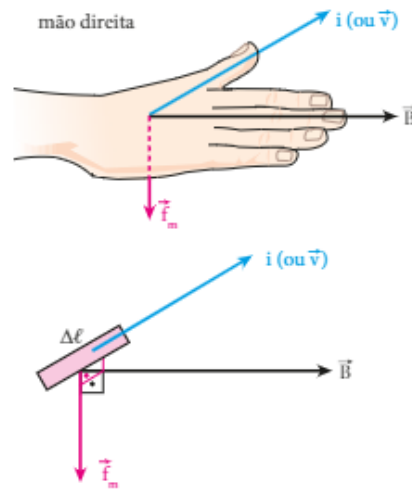
Então:  $f_m = i \Delta\ell B \sin \theta$  ou

$$f_m = B i \Delta\ell \sin \theta$$

Essa expressão é conhecida como **Lei Elementar de Laplace**.

A direção de  $\vec{f}_m$  é perpendicular ao plano definido por  $\vec{v}$  e  $\vec{B}$ . O sentido de  $\vec{f}_m$ , por sua vez, pode ser dado pela **regra da mão direita espalmada**, fazendo o polegar apontar no sentido da corrente, que é o mesmo da ve-

locidade  $\vec{v}$  (já que estamos lidando com cargas fictícias positivas), e os demais dedos, no sentido de  $\vec{B}$ . A força  $\vec{f}_m$  tem direção perpendicular à palma da mão e sentido saindo dela:

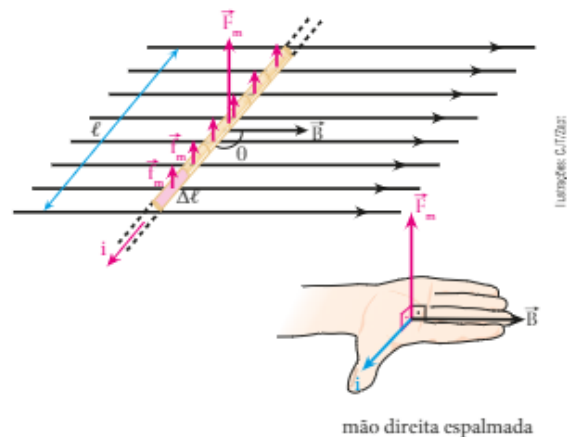


Para determinar a força magnética que atua no fio inteiro, o procedimento é determinar as forças exercidas em todos os seus trechos elementares e, então, somar vetorialmente todas elas.

### Força magnética sobre um condutor retilíneo imerso em um campo magnético uniforme

Considere o pedaço de um fio condutor retilíneo, de comprimento  $\ell$ , imerso em um campo uniforme de indução magnética  $\vec{B}$  e percorrido por uma corrente elétrica de intensidade  $i$ .

Como vimos na seção anterior, em cada trecho elementar, de comprimento  $\Delta\ell$ , desse fio atua uma força magnética de intensidade  $f_m = B i \Delta\ell \sin \theta$ .



Imagens: C. J. Zang

Note que as forças  $\vec{f}_m$  têm a mesma direção e o mesmo sentido em todos os trechos elementares. Então, a intensidade da força magnética  $\vec{F}_m$  que atua no pedaço de fio de comprimento  $\ell$  pode ser calculada assim:  $F_m = \sum f_m = \sum B i \Delta \ell \sin \theta$ .

Como  $B$ ,  $i$  e  $\theta$  são iguais em todos os trechos elementares, temos:  $F_m = B i \sin \theta (\sum \Delta \ell)$ .

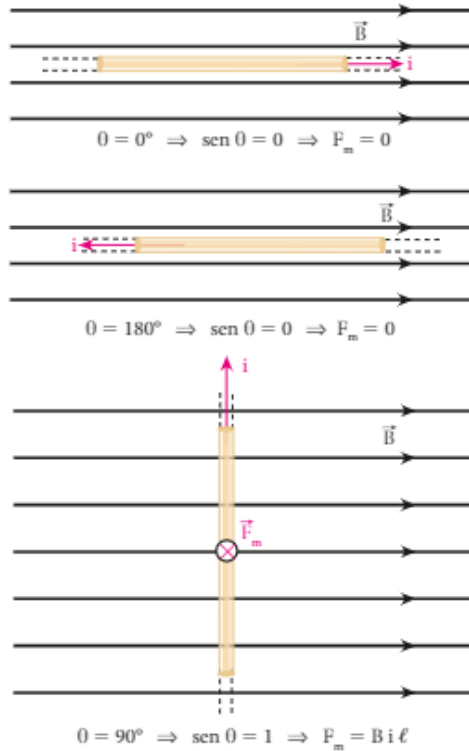
Finalmente, como  $\sum \Delta \ell = \ell$ , encontramos:

$$F_m = B i \ell \sin \theta$$

Resumindo, a força magnética que atua em um pedaço de fio retilíneo de comprimento  $\ell$ , imerso em um campo magnético uniforme, tem as seguintes características:

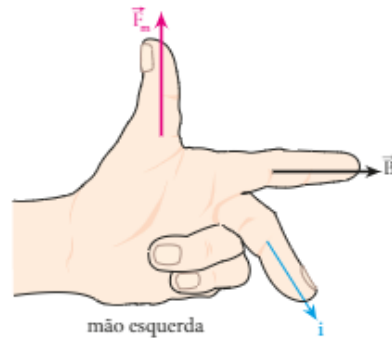
- Intensidade:**  $F_m = B i \ell \sin \theta$ , em que  $\theta$  é o menor ângulo entre o fio (orientado no sentido da corrente) e o vetor  $\vec{B}$ .
- Direção:** perpendicular ao plano determinado pelo vetor  $\vec{B}$  e pelo fio.
- Sentido:** dado pela regra da mão direita espalmada, trocando  $\vec{v}$  por  $i$ .

Veja, a seguir, alguns casos particulares, em que os pedaços de fio têm comprimentos iguais a  $\ell$ :



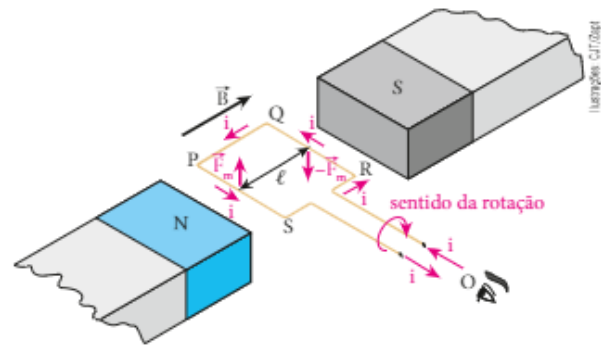
### Regra de Fleming ou regra da mão esquerda

Para determinar a orientação da força magnética atuante em um fio percorrido por uma corrente elétrica, também podemos usar a regra da mão esquerda. Para isso, dispomos o dedo indicador no sentido do vetor indução magnética  $\vec{B}$  e o dedo médio no sentido da corrente. A direção e o sentido da força magnética  $\vec{F}_m$  ficam indicados pelo polegar, como ilustra a figura.



### Espira retangular imersa em campo magnético uniforme

Veja, na figura a seguir, uma espira retangular condutora, imersa num campo magnético uniforme, com seu plano paralelo ao vetor indução magnética  $\vec{B}$ :

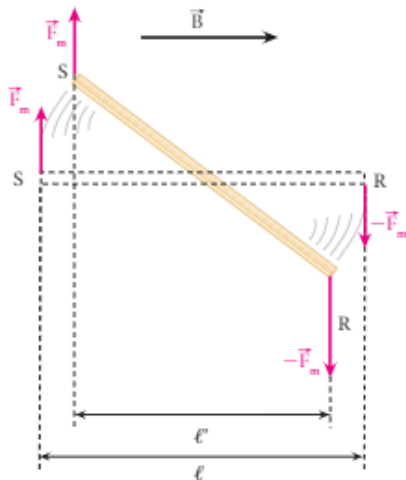


Suponha que, em relação ao observador  $O$ , a espira possa girar tanto no sentido horário quanto no anti-horário.

Fazendo passar uma corrente contínua pela espira, surgem forças opostas nos lados  $PS$  e  $QR$ , que formam um binário de braço  $\ell$ . Nos lados  $SR$  e  $PQ$  não surgem forças, pois os valores do ângulo  $\theta$  formado entre o fio e o vetor  $\vec{B}$  são iguais a  $0^\circ$  e  $180^\circ$ , respectivamente. Como  $\sin 0^\circ = 0$  e  $\sin 180^\circ = 0$ ,  $F_m = B i \ell \sin \theta = 0$ .

O binário surgido provoca a rotação da espira no sentido indicado, sendo esse o **princípio de funcionamento** do motor elétrico e de vários outros aparelhos.

À medida que a espira gira a partir da posição representada na figura anterior, o braço do binário constituído pelas forças  $\vec{F}_m$  e  $-\vec{F}_m$  vai diminuindo, como você pode observar na figura abaixo, que representa a espira vista pelo observador O, indicado na figura anterior.

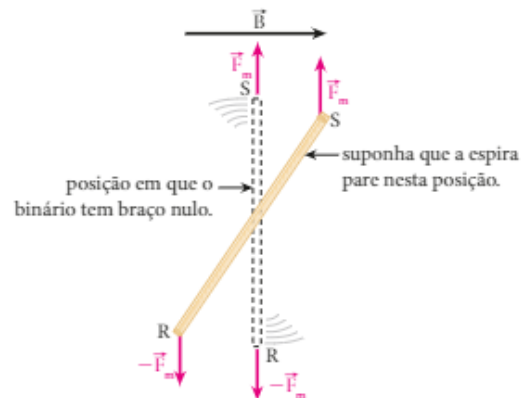


O novo braço,  $l'$ , é menor que o braço inicial  $l$ .

Com a diminuição do braço, diminui também a eficiência dessas forças em produzir rotação.

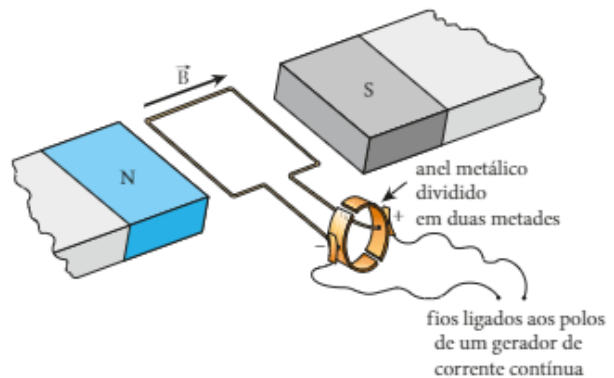
Quando o plano da espira se torna perpendicular às linhas de indução, o binário citado tem braço nulo, pois as forças  $\vec{F}_m$  e  $-\vec{F}_m$  se alinham. Portanto, essa é a posição em que a espira deveria ficar em equilíbrio.

Entretanto, por estar em movimento, a espira avança além dessa posição. Com isso, o citado binário passa a atuar contra a rotação da espira, fazendo com que ela pare e volte, passando a executar, em seguida, um movimento oscilatório.



Da posição em que o binário tem braço nulo até a posição em que a espira para, seu movimento é retardado.

Para que a rotação da espira continue favorecida pelo binário, ao passar pela posição de equilíbrio (forças magnéticas alinhadas), o sentido da corrente deve inverter-se. É o que acontece em um motor elétrico de corrente contínua:



Quando a espira passa pela posição de equilíbrio, isto é, quando o plano da espira torna-se perpendicular a  $\vec{B}$ , o sentido da corrente que passa por ela é invertido. Assim, os sentidos das duas forças representadas nas figuras anteriores também se invertem e o binário constituído por elas continua favorecendo a rotação.

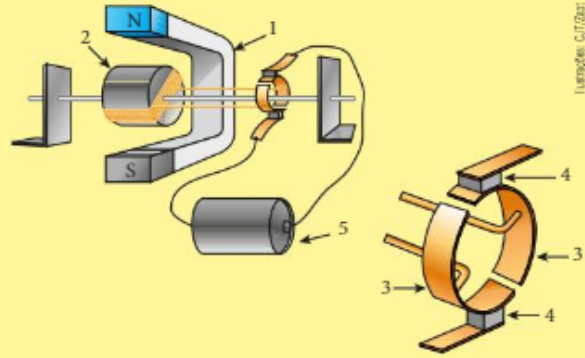


### Princípio de funcionamento de um motor de corrente contínua

No motor esquematizado na figura a seguir, o **estator** (1) é o ímã permanente que cria o campo magnético. O **rotor** (2) é um núcleo de ferro laminado, envolvido por um enrolamento de fio de cobre esmaltado. O núcleo é feito de ferro para que se possa aproveitar a alta permeabilidade magnética desse material, que intensifica o vetor indução magnética através do enrolamento. O **comutador** (3) é um anel condutor dividido em duas metades, e as **escovas** (4) são condutores em contato com ele. A **pilha** (5) gera uma corrente contínua no enrolamento.

Quando esse enrolamento passa pela posição de equilíbrio estável, o comutador provoca a inversão do sentido da corrente, fazendo a rotação prosseguir, favorecida, no mesmo sentido.

Na verdade, um motor de corrente contínua não é apenas isso. Para melhor aproveitamento dos efeitos máximos de rotação e para dar maior uniformidade a esse movimento, por exemplo, são feitos vários enrolamentos, em planos diferentes.



## EM BUSCA DE EXPLICAÇÕES

### Funcionamento de dispositivos

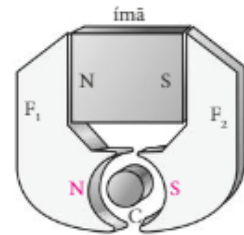
#### O galvanômetro de quadro móvel

Vamos analisar o galvanômetro de quadro móvel, que é a unidade fundamental na construção de amperímetros e voltímetros analógicos. Em razão de sua grande sensibilidade, só permite a medição de correntes e tensões muito pequenas. Entretanto, associando-se a ele resistores convenientes, podemos torná-lo capaz de medir correntes e tensões muito maiores.

#### Sistema magnético

Um ímã retangular é encaixado entre duas peças de ferro,  $F_1$  e  $F_2$ , como mostra a figura ao lado. A polaridade magnética do ímã estende-se pelas peças de ferro e, desse modo, surge um campo magnético na região cilíndrica oca, determinada pelas duas peças. Veja a região inferior da figura ao lado.

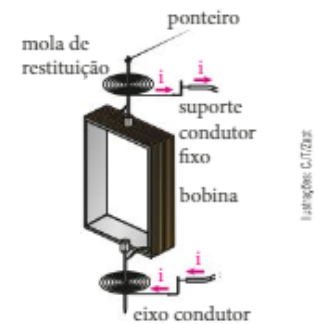
Na região oca, é fixado um cilindro  $C$ , de ferro doce. Sua função é intensificar o campo magnético nessa região.



#### Sistema elétrico

Uma bobina retangular constituída de fino fio de cobre esmaltado, em cujo eixo está fixado um ponteiro, é montada envolvendo o cilindro  $C$  (veja as duas figuras ao lado).

Por estar imersa em um campo magnético, essa bobina gira ao ser percorrida por corrente elétrica. Ao girar, o ponteiro fixado em seu eixo também gira, deslocando-se sobre uma escala. Esse deslocamento é proporcional à intensidade  $i$  da corrente elétrica.

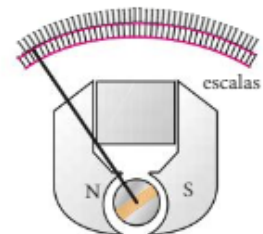


Cada terminal da bobina está conectado eletricamente a uma mola de restituição.

Quando a corrente cessa, as molas de restituição fazem o ponteiro voltar ao zero.

A figura ao lado representa o galvanômetro com a bobina já instalada.

Da maneira como foi descrito, o galvanômetro é útil apenas para participar de medidores de correntes e tensões **contínuas**. De fato, se a corrente fosse alternada, as forças nas espiras da bobina sofreriam inversões periódicas de sentido e, assim, não haveria deflexão do ponteiro. Entretanto, as correntes alternadas podem ser medidas com esse galvanômetro, bastando para isso transformá-las antes em correntes contínuas, por meio de um circuito retificador (veja a seção 10 do Capítulo 11). Esse circuito é acionado por meio de uma chave seletora existente nos medidores.



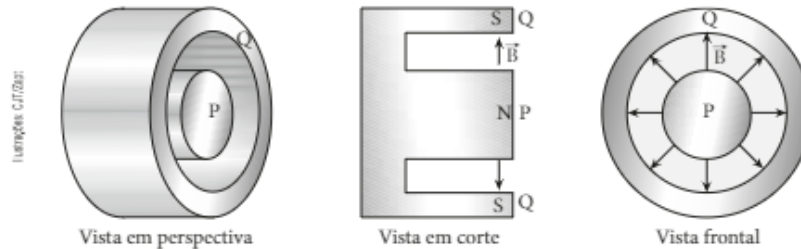
### Alto-falante de bobina móvel

O alto-falante é um transdutor eletromecânico, isto é, um sistema que converte sinais elétricos em sinais sonoros (mecânicos).

Vamos analisar seu funcionamento.

#### Sistema magnético

Na região traseira, o alto-falante possui um ímã permanente, que pode ser do seguinte tipo:



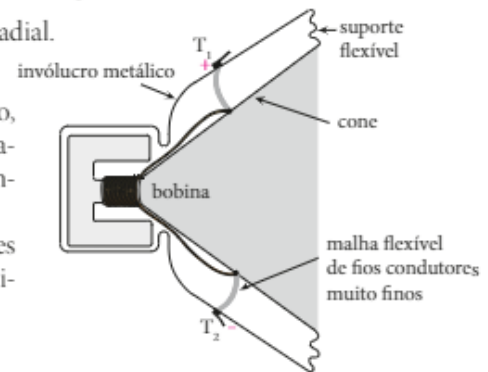
Se a região P é um polo norte magnético, a região Q é um polo sul.

Na região oca, situada entre P e Q, existe um campo magnético radial.

#### Sistema elétrico

Uma bobina constituída de um canudo muito leve, de alumínio, por exemplo, e de um enrolamento de fio muito fino de cobre esmaltado envolve a região P do sistema magnético e prende-se ao cone (membrana que vibra) do alto-falante.

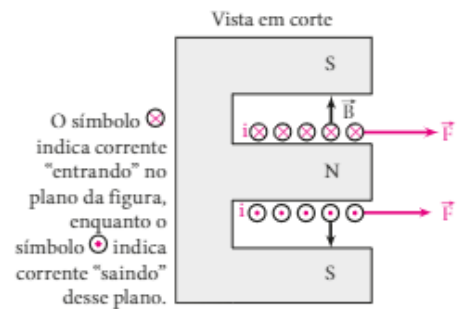
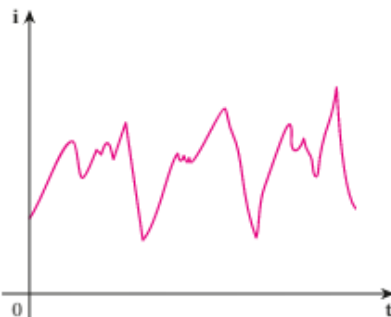
Os terminais da bobina são fixados em dois locais do cone e, desses locais, partem malhas de fios bastante flexíveis, que vão até os terminais  $T_1$  e  $T_2$ , indicados na figura ao lado.



Ligando esses terminais à saída de um amplificador em funcionamento, a bobina é percorrida por uma corrente elétrica e, por estar imersa em um campo magnético, ela recebe forças que a deslocam da posição de equilíbrio. O alto-falante está ligado corretamente quando essas forças empurram o cone para fora. Por isso, existem indicações de polaridade tanto nos terminais de saída do amplificador quanto nos do alto-falante.

A figura ao lado ilustra o aparecimento de forças na bobina:

Para entender por que o cone vibra, é preciso saber que, durante a audição de uma música ou de uma notícia, por exemplo, a intensidade  $i$  da corrente elétrica na bobina varia com o tempo  $t$ . O gráfico a seguir ilustra uma situação em que isso está acontecendo.



Então, como o valor da corrente varia, a intensidade da força na bobina e, conseqüentemente, no cone também varia. Por isso, o cone vibra acompanhando as variações da corrente.

A vibração do cone produz no ar compressões e rarefações que se propagam, ou seja, produz ondas sonoras.



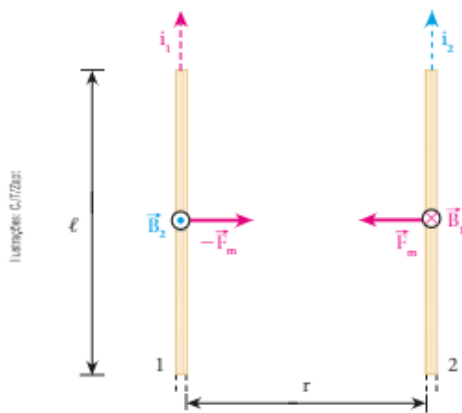
## Forças magnéticas entre dois condutores retilíneos e paralelos

Consideremos dois longos fios retilíneos, dispostos paralelamente um ao outro, em um meio de permeabilidade absoluta  $\mu$ . Se houver corrente elétrica em ambos, surgirá uma força magnética em cada um deles, pois um se submeterá ao campo magnético criado pelo outro.

Como veremos a seguir, essas forças podem ser de **atração** ou de **repulsão**.

### Correntes de mesmo sentido

Na figura abaixo, estão representados trechos de dois fios paralelos, de comprimento  $\ell$ , distantes  $r$  um do outro, percorridos por correntes de mesmo sentido.



Para facilitar o entendimento, representamos com a mesma cor cada corrente e o campo magnético gerado por ela.

O condutor 1 cria  $\vec{B}_1$ , que atua no condutor 2 fazendo surgir nele a força  $\vec{F}_m$ . O condutor 2, por sua vez, cria  $\vec{B}_2$ , que atua no condutor 1, causando-lhe a força  $-\vec{F}_m$ . Quando as correntes **têm o mesmo sentido**, as forças entre os condutores são de **atração**.

A intensidade da força que atua no trecho de comprimento  $\ell$  pode ser calculada a partir de qualquer um dos condutores. Considerando, por exemplo, o condutor 2, temos:

$$F_m = B_1 i_2 \ell \sin 90^\circ = B_1 i_2 \ell \quad (\text{I})$$

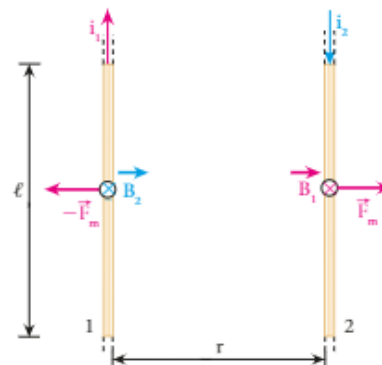
$$\text{Mas } B_1 = \frac{\mu i_1}{2\pi r} \quad (\text{II})$$

Substituindo (II) em (I), obtemos:

$$F_m = \frac{\mu i_1 i_2 \ell}{2\pi r}$$

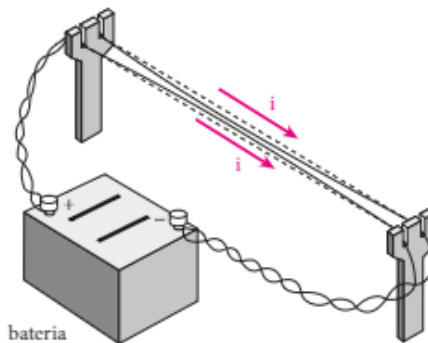
### Correntes de sentidos contrários

Vamos analisar, agora, a situação em que os fios são percorridos por correntes de sentidos contrários, como mostra a figura abaixo.

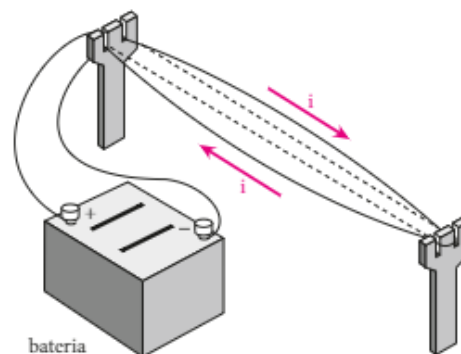


Como você pode concluir, nesse caso, as forças entre os condutores são de **repulsão** e seu módulo é calculado, no trecho de comprimento  $\ell$ , pela mesma expressão deduzida para a situação anterior.

As ilustrações a seguir sugerem experimentos que confirmam os dois tipos de interação estudados. Bastam, para isso, fios passando por fendas, feitas em dois suportes isolantes, e ligados a uma bateria.



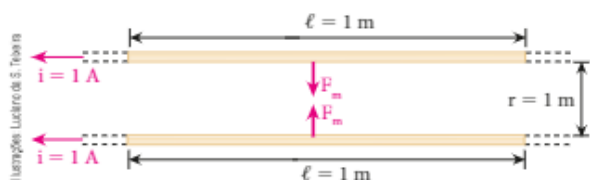
Os fios **atraem-se**: as correntes possuem mesmo sentido.



Os fios **repelem-se**: as correntes possuem sentidos contrários.

### A definição da unidade ampère

Neste momento de nosso estudo sobre Eletromagnetismo, podemos apresentar a definição da unidade **ampère** (símbolo **A**), de intensidade de corrente elétrica. Para isso, considere dois condutores no vácuo, separados pela distância de 1 metro e percorridos por correntes iguais, conforme a figura:



As intensidades dessas correntes serão iguais a 1 A (um ampère) se surgir uma força magnética de intensidade igual a  $2 \cdot 10^{-7}$  N por metro de condutor:

$$F_m = \frac{\mu_0 i i \ell}{2\pi r} \Rightarrow F_m = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1}{2\pi \cdot 1}$$

Logo:  $F_m = 2 \cdot 10^{-7}$  N

**Um ampère** é a intensidade de uma corrente elétrica constante que, mantida em dois condutores retilíneos, paralelos, de comprimento infinito e de área de secção transversal desprezível, situados no vácuo e separados pela distância de um metro, provoca entre esses condutores uma força de intensidade igual a  $2 \cdot 10^{-7}$  N por metro de condutor.

A unidade ampère pode ser obtida experimentalmente por meio do uso de um instrumento de laboratório denominado **balança de corrente**. Nesse processo, a intensidade **i** da corrente elétrica é **ajustada** até se obter uma força magnética de intensidade igual a  $2 \cdot 10^{-7}$  N por metro de condutor.

Na expressão  $F_m = \frac{\mu_0 i i \ell}{2\pi r}$ , o valor de  $\mu_0$  foi **adotado** igual a  $4\pi \cdot 10^{-7}$  (no SI), de modo a tornar verdadeira aquela igualdade.

De fato:

$$F_m = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2} \cdot 1A \cdot 1A \cdot 1 m}{2\pi \cdot 1 m} = 2 \cdot 10^{-7} N$$

O **coulomb**, por sua vez, a unidade de medida de quantidade de carga elétrica no SI, é definido a partir do ampère:

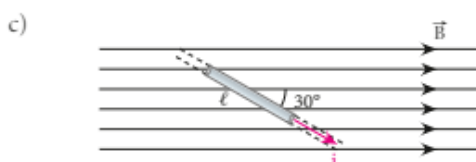
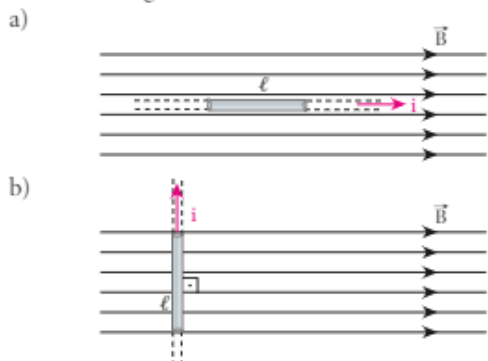
**Um coulomb** (1 C) é a quantidade de carga elétrica que atravessa, durante um segundo (1 s), uma secção transversal de um condutor percorrido por uma corrente elétrica constante de intensidade igual a um ampère (1 A).

Note, então, que o coulomb é uma unidade **derivada** da unidade ampère, que é uma unidade **fundamental**.

## QUESTÕES COMENTADAS



**1** Um condutor retilíneo, percorrido por uma corrente elétrica de intensidade **i** igual a 2,0 A, está imerso em um campo magnético uniforme de intensidade **B**, igual a  $2,0 \cdot 10^{-4}$  T. Determine a intensidade da força magnética em um trecho desse condutor, de comprimento **ℓ** igual a 0,20 m, nos seguintes casos:



**RESOLUÇÃO**  
 A intensidade da força magnética que atua em um trecho do condutor é dada por:  $F_m = B i \ell \sin \theta$ , em que  $\theta$  é o menor ângulo formado pelo condutor, orientado no sentido da corrente, e pelo vetor  $\vec{B}$ .

A direção dessa força é perpendicular ao plano determinado pelo condutor e pelo vetor  $\vec{B}$ , e seu sentido é dado pela regra da mão direita espalmada.

a) Nesse caso, o ângulo  $\theta$  é igual a zero.

Como  $\sin 0^\circ = 0$ :  $\vec{F}_m = \vec{0}$

- b) Agora, o ângulo  $\theta$  é igual a  $90^\circ$ .  
 Fazendo  $B = 2,0 \cdot 10^{-4} \text{ T}$ ;  $i = 2,0 \text{ A}$ ,  $\ell = 0,20 \text{ m}$  e  $\text{sen } \theta = \text{sen } 90^\circ = 1$ , obtemos:  
 $F_m = 2,0 \cdot 10^{-4} \cdot 2,0 \cdot 0,20 \cdot 1$

$$F_m = 8,0 \cdot 10^{-5} \text{ N}$$

Essa força é perpendicular ao plano da figura e tem sentido "entrando" nesse plano:  $\otimes \vec{F}_m$ .

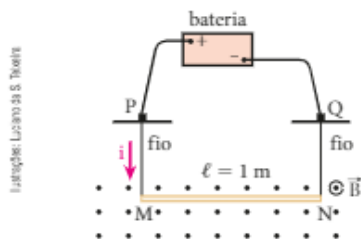
- c) Nessa situação,  $\theta$  é igual a  $30^\circ$ . Como  $\text{sen } 30^\circ = \frac{1}{2}$ , temos:  
 $F_m = 2,0 \cdot 10^{-4} \cdot 2,0 \cdot 0,20 \cdot \frac{1}{2}$

$$F_m = 4,0 \cdot 10^{-5} \text{ N}$$

A força, nesse caso, é perpendicular ao plano da figura e tem sentido "saindo" desse plano:  $\odot \vec{F}_m$ .

**Respostas:** a) 0; b)  $8,0 \cdot 10^{-5} \text{ N}$ ; c)  $4,0 \cdot 10^{-5} \text{ N}$

**2** A barra condutora MN, cilíndrica e homogênea, de 200 N de peso e 1 m de comprimento, é suspensa por fios condutores leves e flexíveis aos pontos P e Q. A barra, disposta horizontalmente, é percorrida por uma corrente elétrica de intensidade  $i$  igual a 100 A no sentido indicado, e encontra-se num campo magnético uniforme e horizontal de intensidade constante e igual a  $2 \text{ T}$ , perpendicular à barra.

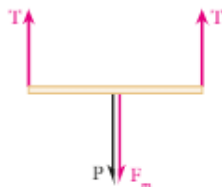


- Supondo que apenas a barra se submeta ao citado campo:  
 a) calcule a intensidade da força magnética atuante na barra;  
 b) calcule a intensidade da tração em cada fio de suspensão;  
 c) qual seria a intensidade da tração em cada fio, se a barra fosse disposta paralelamente ao campo magnético?

**RESOLUÇÃO**

- a) A intensidade da força magnética atuante na barra é dada pela expressão:  $F_m = B i \ell \text{sen } \theta$   
 Sendo  $B = 2 \text{ T}$ ,  $i = 100 \text{ A}$ ,  $\ell = 1 \text{ m}$  e  $\text{sen } \theta = \text{sen } 90^\circ = 1$ , temos:  $F_m = 2 \cdot 100 \cdot 1 \cdot 1 \Rightarrow F_m = 2 \cdot 10^2 \text{ N}$

- b) Pela regra da mão direita espalmada, concluímos que a força magnética na barra é vertical e para baixo. Como o campo magnético é uniforme, essa força deve ser posicionada no centro da barra (simetria).



Na barra atuam ainda as duas forças de tração e o peso, este posicionado também no centro da barra, por ela ser cilíndrica e homogênea. As duas forças de tração têm a mesma intensidade  $T$ , o que também pode ser justificado pela situação de simetria.  
 Do equilíbrio da barra, temos:

$$T + T = P + F_m \Rightarrow 2T = 200 + 200$$

Logo:  $T = 2 \cdot 10^2 \text{ N}$

- c) Nesse caso, teríamos  $F_m = 0$ , pois o ângulo  $\theta$  seria igual a  $0^\circ$  ou  $180^\circ$  e  $\text{sen } 0^\circ = \text{sen } 180^\circ = 0$ .  
 Assim, no equilíbrio:  $T + T = P \Rightarrow 2T = 200$

Logo:  $T = 1 \cdot 10^2 \text{ N}$

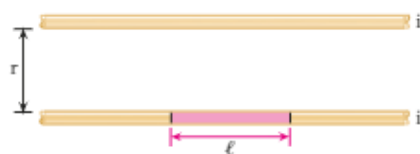
**Respostas:** a)  $2 \cdot 10^2 \text{ N}$ ; b)  $2 \cdot 10^2 \text{ N}$ ; c)  $1 \cdot 10^2 \text{ N}$

**3** Dois fios metálicos retilíneos, paralelos e muito longos distam 1,5 m entre si, no vácuo. Calcule a intensidade da força que age no comprimento  $\ell = 2,0 \text{ m}$  de um dos fios, quando em cada um deles circula uma corrente elétrica  $i = 0,51 \text{ A}$  ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  unidades do SI). Determine ainda se essa força é de atração ou de repulsão.

**RESOLUÇÃO**

A intensidade da força solicitada é calculada pela expressão:

$$F_m = \frac{\mu_0 i_1 i_2 \ell}{2\pi r}$$



Sendo  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ (SI)}$ ,  $i_1 = i_2 = 0,51 \text{ A}$ ,  $\ell = 2,0 \text{ m}$  e  $r = 1,5 \text{ m}$ , calculamos  $F_m$ :

$$F_m = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,51 \cdot 0,51 \cdot 2,0}{2\pi \cdot 1,5}$$

Logo:  $F_m = 6,9 \cdot 10^{-8} \text{ N}$

**NOTA**

O enunciado não fornece a informação que permitiria concluir se a força é de atração ou de repulsão, isto é, o sentido de cada corrente. Assim, podemos dizer apenas que, se as correntes tiverem o mesmo sentido, a força será de atração e, se elas tiverem sentidos contrários, a força será de repulsão.

**Resposta:**  $6,9 \cdot 10^{-8} \text{ N}$ . Se as correntes tiverem o mesmo sentido, a força será de atração; se tiverem sentidos contrários, a força será de repulsão.

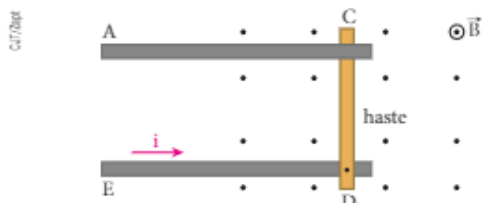


## QUESTÕES PROPOSTAS



FAÇA NO CADERNO.

4. Na figura a seguir, dois condutores paralelos, AC e ED, são interligados por meio de uma haste também condutora, que pode girar no plano da figura em torno do ponto D.



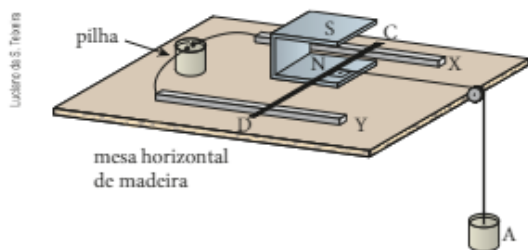
Na região em que se situa a haste, existe um campo magnético perpendicular ao plano dos condutores e apontando para o leitor:

Se uma corrente elétrica de intensidade  $i$  percorrer os três condutores no sentido indicado, a tendência da haste será:

- manter-se na posição inicial.
- girar no sentido horário.
- girar no sentido anti-horário.
- subir.
- descer.

5. No rotor de um motor elétrico de corrente contínua, os fios conduzem uma corrente de 5 A e dispõem-se perpendicularmente a um campo de indução magnética, suposto uniforme, de módulo constante e igual a 1 T. Determine o módulo da força magnética atuante em cada centímetro de fio.

6. Na figura a seguir, o condutor CD está em repouso, apoiado em duas barras condutoras fixas X e Y. Despreze atritos.

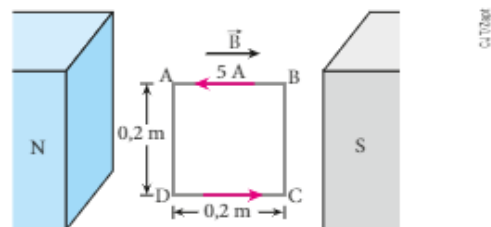


O módulo do vetor indução magnética entre os polos do ímã é  $B = 1 \text{ T}$  e o comprimento da parte do condutor imersa no campo é  $\ell = 10 \text{ cm}$ . Sabendo que o corpo A pesa 2 N e que o fio que o suspende ao condutor pode ser considerado ideal, determine:

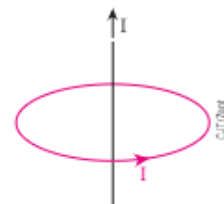
- o sentido da corrente no condutor;
- a intensidade dessa corrente.

7. Entre os polos magnéticos representados na figura, temos um campo magnético uniforme, com  $B = 5 \cdot 10^{-2} \text{ T}$ .

Calcule a força magnética que atua em cada lado da espira condutora quadrada, percorrida por uma corrente constante de 5 A, quando disposta com seu plano paralelo às linhas de indução, como mostra a figura:



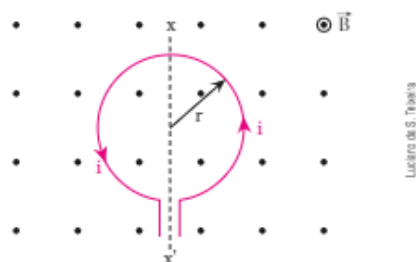
8. Um fio longo e reto é percorrido por uma corrente de intensidade  $I$ . Uma espira circular, também percorrida por corrente de intensidade  $I$ , é colocada em um plano perpendicular ao fio. O fio passa pelo centro da espira.



Devido ao campo magnético criado pelo fio:

- a espira fica sujeita a um binário.
- a espira não fica sujeita a força alguma.
- a força resultante desloca a espira ao longo do fio, no sentido da corrente que o percorre.
- a força resultante desloca a espira ao longo do fio, em sentido contrário ao da corrente que o percorre.
- Nenhuma das proposições anteriores se aplica.

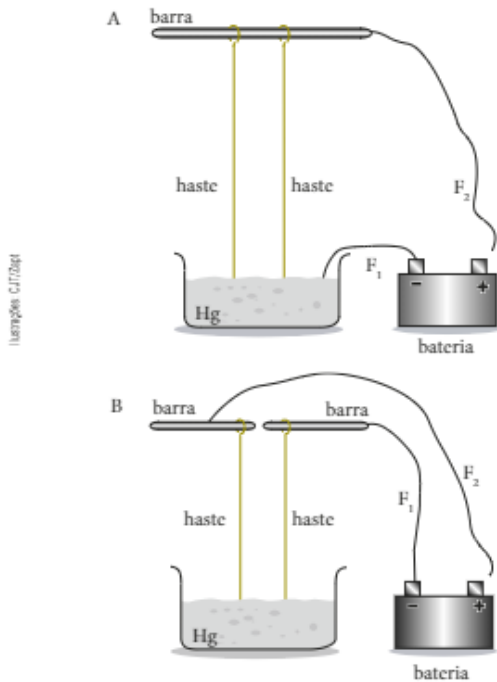
9. Em uma espira circular de raio  $r$ , situada no plano do papel, flui uma corrente elétrica de intensidade constante  $i$ . Essa espira está imersa em um campo magnético de indução  $\vec{B}$ , estacionário, perpendicular ao plano do papel e dirigido para o leitor.



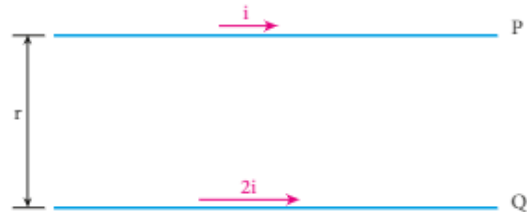
As forças que atuam na espira tendem a produzir nela:

- um encolhimento.
- um alargamento.
- uma rotação no sentido horário, em torno do eixo  $xx'$ .
- uma rotação no sentido anti-horário, em torno do eixo  $xx'$ .
- uma rotação em torno de um eixo perpendicular ao papel.

10. Nas ilustrações A e B, a seguir, temos um recipiente contendo mercúrio (Hg), barras metálicas horizontais fixas e hastes também metálicas dependuradas nas barras e mergulhadas no mercúrio, sem tocar o fundo do recipiente. Em A, o fio condutor  $F_1$  está em contato com o mercúrio. Já em B, o fio  $F_1$  está ligado a uma das barras. Considerando, em cada caso, uma haste bem perto da outra, determine o tipo de interação observado entre elas (atração ou repulsão) quando o fio condutor  $F_2$  é conectado ao polo positivo da bateria.



11. A figura a seguir representa trechos P e Q, de mesmo comprimento, de dois longos fios retilíneos dispostos paralelamente um ao outro e percorridos por correntes elétricas de intensidades constantes respectivamente iguais a  $i$  e  $2i$ , nos sentidos indicados.



O trecho Q submete-se a um campo magnético  $\vec{B}_P$ , criado pelo trecho P. O trecho P, por sua vez, submete-se a um campo magnético  $\vec{B}_Q$ , criado pelo trecho Q. Devido a esses campos, no trecho Q atua uma força  $\vec{F}_{PQ}$  e, no trecho P, atua uma força  $\vec{F}_{QP}$ .

São feitas as seguintes afirmações:

- I. A intensidade de  $\vec{B}_Q$  é maior que a de  $\vec{B}_P$ .
- II. A intensidade de  $\vec{F}_{QP}$  é maior que a de  $\vec{F}_{PQ}$ .
- III. A intensidade de  $\vec{F}_{QP}$  é igual à de  $\vec{F}_{PQ}$ .
- IV. Os dois fios estão se atraindo.

Quais dessas afirmações estão corretas?

12. O que deve acontecer com o comprimento da mola metálica, relaxada, indicada na figura, se suas extremidades A e B forem ligadas a uma bateria de automóvel por meio de fios condutores flexíveis e longos?



## DESCUBRA MAIS

Em todos os questionamentos a seguir, atenha-se ao Sistema Internacional de Unidades.

- 1 Para que um corpo de massa  $m$  adquira uma aceleração de módulo  $a$ , é necessário que a resultante das forças que atuam nele tenha um módulo  $F$  proporcional a  $m$  e a  $a$ , ou seja:

$$F = k m a$$

em que  $k$  é uma constante de proporcionalidade.

Entretanto, a expressão usual do Princípio Fundamental da Dinâmica é, em módulo,  $F = m a$ . Portanto, a constante  $k$  é igual a 1.

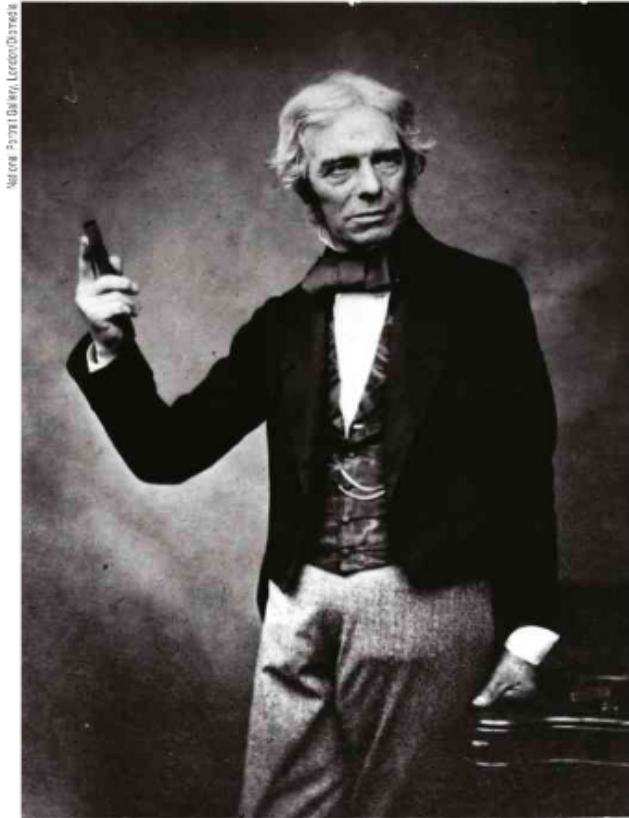
Esse valor de  $k$  foi medido ou, de alguma forma, escolhido? Explique.

- 2 O valor da constante de proporcionalidade  $G$ , que aparece na Lei da Gravitação, de Newton, foi medido ou adotado? Explique.
- 3 Vimos que o valor da permeabilidade magnética do vácuo ( $\mu_0$ ) foi adotado. Isso também aconteceu com a permissividade elétrica do vácuo ( $\epsilon_0$ )? Explique.

## Entre as 100 invenções que mudaram a história do mundo

Você seria capaz de imaginar um mundo sem motores elétricos? Que proporções assumiriam os transtornos provocados pela falta desses equipamentos, tendo-se em conta as demandas atuais? Não haveria eletrodomésticos, como liquidificadores, batedeiras e ventiladores, nem ferramentas, como furadeiras, nem brinquedos, como os muitos tipos de carrinhos elétricos, nem, tampouco, várias modalidades de máquinas industriais e meios de transporte, como carros e trens elétricos.

Os motores elétricos têm seu funcionamento baseado no fenômeno eletromagnético, que consiste de um fio percorrido por corrente elétrica, imerso em campo magnético, poder sujeitar-se a uma força de natureza magnética. Tal fenômeno foi descrito pelo físico-químico inglês Michael Faraday (1791-1867), um dos maiores experimentadores da história da ciência. Os trabalhos de Faraday passaram a constituir, a partir de então, a pedra filosofal de todas as tecnologias relacionadas à eletricidade.



Michael Faraday.  
Fotografia de  
Maul & Polyblank,  
publicada em 1857.

Aos 22 anos, Faraday tornou-se assistente do químico inglês Humphry Davy, importante figura científica pertencente à tradicional Royal Institution. A partir dessa época, Faraday conseguiu a liquefação de quase todos os tipos de gases conhecidos até então. Também isolou o benzeno, elaborou um tratado sobre eletrólise e aumentou os domínios de aproveitamento da energia eletrostática. O grande legado desse contumaz experimentador, porém, está relacionado ao Eletromagnetismo. Além dos fundamentos para o funcionamento do motor elétrico, Faraday descobriu a indução eletromagnética, fenômeno que serve de base para a construção de dínamos e geradores.

Leia a seguir um trecho do livro *100 invenções que mudaram a história do mundo*, de Bill Yenne. Nesse texto, o autor justifica a rotação de um motor de maneira diferente da que fizemos na teoria deste capítulo. Ele o faz por meio da análise das interações entre polos magnéticos (atrações e repulsões).

### Motor Elétrico – 1838

O motor elétrico é baseado no princípio de que polos iguais de um ímã se repelem. Um modelo simples de motor elétrico consiste em uma bobina, na qual um campo magnético pode ser induzido por corrente elétrica, montada sobre uma base rotatória equilibrada próxima a um ímã (o magneto do “campo”). Enquanto um polo do ímã repele o polo induzido e igual da bobina, o polo oposto da bobina também será repelido pelo polo similar do ímã. Essa repulsão produzirá um torque na bobina e ela começará a girar. A repulsão de polos iguais é ampliada pela atração entre polos opostos; e a bobina continua a girar num esforço para alinhar seu polo norte com o polo sul do campo magnético. Quando essa conjunção é alcançada, a ação do comutador – um interruptor na haste da bobina – reverte a corrente na bobina. O que antes era polo norte vira polo sul, e vice-versa. O impulso move o equipamento para além desse ponto morto, e as forças revertidas de atração e repulsão o levam de volta à posição inicial, quando novamente o comutador inverte a corrente, e assim por diante, indefinidamente.

Em 1838, Moritz Hermann von Jacobi (1801-1874), físico alemão que trabalhava na Rússia, construiu o que talvez seja o primeiro motor elétrico, que foi usado para mover um pequeno barco a remo. Em 1844, Paul Gustave Froment (1815-1865) começou a construir pequenos motores de corrente elétrica contínua, na França, que foram usados para fazer circular diversas máquinas. Seu conterrâneo, Hippolyte Fontaine (1833-1917), construiu o primeiro motor elétrico em grande escala, em 1873, e, por volta de 1885, tais motores eram empregados para movimentar bondes.

Em 1878, Fontaine, trabalhando com o belga Zénobe Gramme (1826-1901), inventou o alternador – aparelho que transforma corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA), que pode ser transmitida mais facilmente que a CC. O alemão Ernst Werner von Siemens (1816-1892) começou a fabricar alternadores na Alemanha naquele mesmo ano. Em 1885, o físico italiano Galileo Ferraris (1847-1897) descobriu o campo magnético giratório e inventou o motor síncrono polifásico, que tem capacidade de velocidade variável.



Drew J. Green/amy-fozarella

Fotografia de um motor elétrico. Quando de pequeno porte, esses dispositivos podem acionar os motorzinhos de dentistas. Já os com dimensionamento avantajado prestam-se à indústria e aos meios de transporte.

YENNE, Bill. *100 Invenções que mudaram a história do mundo*. São Paulo: Edlouro, 2002.

### Compreensão, pesquisa e debate

1. Dado seu grande senso prático, Michael Faraday pode ser considerado um exemplo de interface entre ciência e tecnologia. Você saberia explicar onde “termina” a ciência e “começa” a tecnologia? E que diferentes atribuições cabem a cientistas e engenheiros?
2. Mesmo com o avanço da tecnologia, os motores elétricos atuais obedecem aos mesmos princípios dos motores elétricos do século XIX. Porém, o que mudou de lá para cá na fabricação desses motores?
3. A nanotecnologia constrói sistemas operacionais que utilizam grupos de moléculas, e até mesmo de átomos, visando à miniaturização em larga escala. Nesse campo, trabalha-se com dimensões da ordem de  $10^{-10}$  m, sendo utilizados fundamentos da Mecânica Quântica e da Teoria das Cordas, além de vários outros conhecimentos. Pesquise se é possível, com a nanotecnologia, a construção de nanomotores.

# INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

## 1. INTRODUÇÃO

Depois de constatado que as correntes elétricas criavam campo magnético, os cientistas começaram a pesquisar o fenômeno inverso, ou seja, se o campo magnético era capaz de criar correntes elétricas. Em agosto de 1831, na Inglaterra, Michael **Faraday** conseguiu provar experimentalmente que esse fenômeno inverso é possível, depois de muitas tentativas sem sucesso desde 1825. Em 24 de novembro de 1831, a descoberta de Faraday foi comunicada à Royal Society.

Esse fenômeno, chamado **indução eletromagnética**, é o princípio de funcionamento do gerador mecânico de energia elétrica.

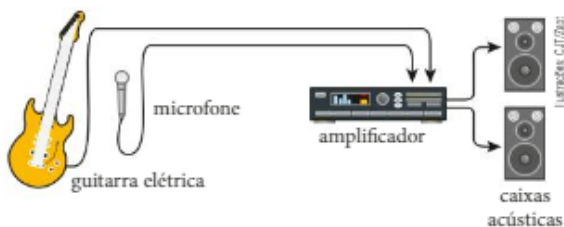


A indução eletromagnética torna possível a conversão de energia mecânica em energia elétrica nesses geradores de uma usina hidrelétrica.

Em 1832, o físico norte-americano Joseph **Henry** (1797-1878) publicou um resultado experimental semelhante ao obtido por Faraday. Isso pode significar que Henry, independentemente de Faraday, também tenha descoberto a indução eletromagnética.

A descoberta da indução eletromagnética talvez tenha sido o passo mais útil dado pelo homem até hoje na Física. Basta lembrar que, até aquela época, a energia elétrica não podia ser utilizada em larga escala, pois era obtida por meio da transformação de energia química em acumuladores. Com a nova descoberta, o uso da energia elétrica generalizou-se, já que se tornou possível obtê-la a partir da energia mecânica proveniente das quedas de água, como ocorre nas usinas hidrelétricas.

Os captadores de som das guitarras elétricas, os microfones dinâmicos e as bobinas que geram faíscas nas velas dos motores dos automóveis são outros exemplos de aplicação da indução eletromagnética.



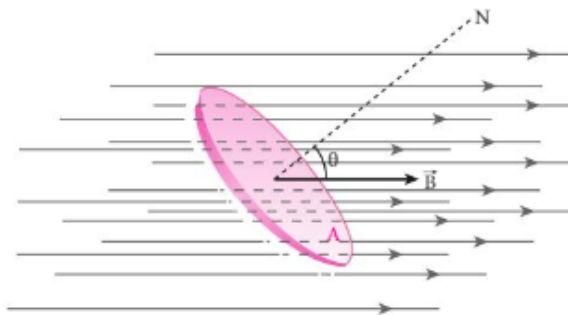
Os captadores de som da guitarra e o microfone operam por indução eletromagnética.

## 2. FLUXO DO VETOR INDUÇÃO MAGNÉTICA OU FLUXO DE INDUÇÃO ( $\Phi$ )

Para estudar a indução eletromagnética, é necessário definir uma grandeza denominada **fluxo do vetor indução magnética**, **fluxo de indução** ou **fluxo magnético**.

Como só precisamos saber calcular essa grandeza em condições especiais, vamos defini-la para um caso particular.

Veja, na figura a seguir, uma linha fechada envolvendo uma superfície **plana** de área  $A$  e imersa em um campo magnético **uniforme**:





Na figura,  $N$  é uma reta normal à superfície citada e forma um ângulo  $\theta$  com o vetor indução magnética  $\vec{B}$ .

O fluxo do vetor indução magnética,  $\phi$ , através da superfície plana de área  $A$  é definido pela expressão:

$$\phi = B A \cos \theta$$

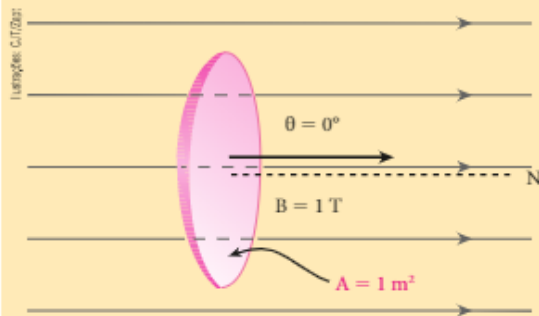
O fluxo de indução que atravessa a superfície é também denominado **fluxo concatenado** com essa superfície.

No SI, a unidade de fluxo de indução é o **weber** (símbolo: **Wb**), nome dado em homenagem ao físico alemão Wilhelm Eduard **Weber** (1804-1891).

Um weber é o fluxo de indução através de uma superfície plana de área igual a um metro quadrado, disposta perpendicularmente a um campo uniforme de indução magnética de intensidade igual a um tesla (T).

Como  $\phi = B A \cos \theta$  e  $\cos \theta = \cos 0^\circ = 1$ , temos:

$$\phi = B A \Rightarrow 1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot 1 \text{ m}^2$$



Se  $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot 1 \text{ m}^2$ , temos:

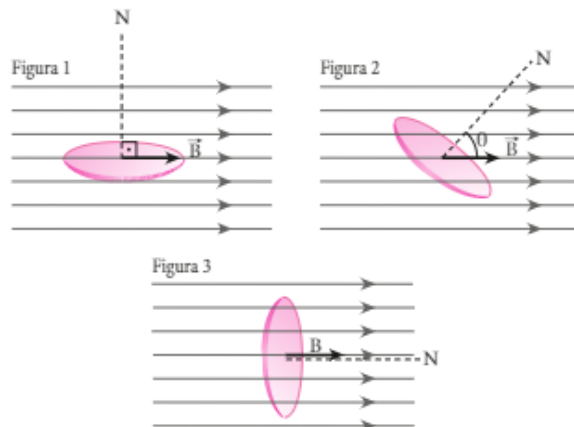
$$1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$$

Então, a intensidade do vetor  $\vec{B}$  pode ser medida em **weber por metro quadrado**, que equivale à unidade de tesla. Por isso, o vetor indução magnética  $\vec{B}$  também é denominado **densidade de fluxo magnético**, o que significa "fluxo magnético por unidade de área".

### Uma sugestão de Faraday

Faraday sugeriu associar o fluxo de indução à **quantidade de linhas de indução** que atravessa a superfície considerada.

Veja, nas figuras a seguir, uma mesma espira imersa em um campo magnético uniforme, em três posições diferentes:



Na figura 1, temos  $\theta = 90^\circ$  e  $\phi = B A \cos 90^\circ = 0$ . Nesse caso, então, **o fluxo é nulo**, o que está perfeitamente de acordo com a ideia de Faraday, já que nenhuma linha de indução atravessa a espira.

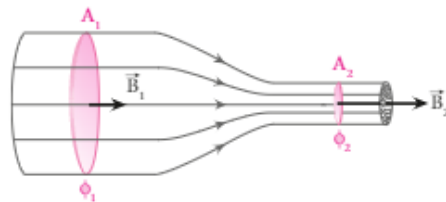
Na figura 2, o fluxo vale  $\phi = B A \cos \theta$  e não é nulo. Observe, nesse caso, que existem linhas de indução atravessando a espira.

Na figura 3, a espira está posicionada perpendicularmente às linhas de indução. Por isso,  $\theta = 0^\circ$ . Nesse caso, **o fluxo é máximo**, pois  $\cos 0^\circ = 1$ , e 1 é o máximo valor possível para o cosseno:  $\phi_{\text{máx}} = B A$ . Isso ocorre, de acordo com Faraday, pois o número de linhas de indução que atravessa a espira também é máximo.

### Fluxo de indução ao longo de um tubo de linhas

Veja, na figura a seguir, um conjunto de linhas de indução de um campo magnético.

Essas linhas determinam um **tubo de linhas**, e o fluxo de indução é igual em qualquer secção transversal do tubo.



De fato, de acordo com a ideia de Faraday, o fluxo através das superfícies de áreas  $A_1$  e  $A_2$ , por exemplo, deve ser o mesmo, já que essas superfícies são atravessadas pela mesma quantidade de linhas de indução.

Os fluxos  $\phi_1$ , em  $A_1$ , e  $\phi_2$ , em  $A_2$ , são dados por  $B_1 A_1$  e  $B_2 A_2$ , respectivamente.

Como  $\phi_1$  é igual a  $\phi_2$ :

$$B_1 A_1 = B_2 A_2$$

Sendo  $A_2$  menor que  $A_1$ , concluímos que:

$$B_2 > B_1$$

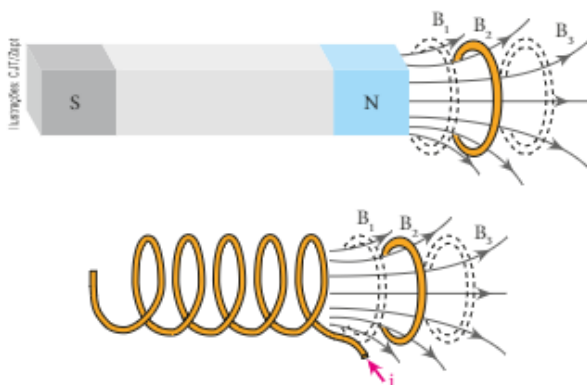
Portanto, quanto **mais juntas** estiverem as linhas de indução, **maior** será a intensidade de  $\vec{B}$ , ou seja, a intensidade de  $\vec{B}$  está associada à densidade de linhas de indução, fato já mencionado no Capítulo 8.

### 3. VARIAÇÃO DO FLUXO DE INDUÇÃO

Dado pela expressão  $\phi = B A \cos \theta$ , o fluxo de indução ( $\phi$ ) depende de três grandezas:  $B$ ,  $A$  e  $\theta$ . Se pelo menos uma dessas três grandezas variar, teremos uma variação de fluxo através da superfície considerada. Verifique isso nas seguintes análises de algumas situações em que ocorre essa variação.

#### Variação de fluxo causada pela variação de $B$

Veja, abaixo, um anel imerso no campo magnético de um ímã e de um solenoide.



Quanto menor é a distância entre o anel e o ímã (ou o solenoide), mais intenso é o campo magnético através do anel. Assim, as intensidades indicadas,  $B_1$ ,  $B_2$  e  $B_3$ , satisfazem a relação:

$$B_1 > B_2 > B_3$$

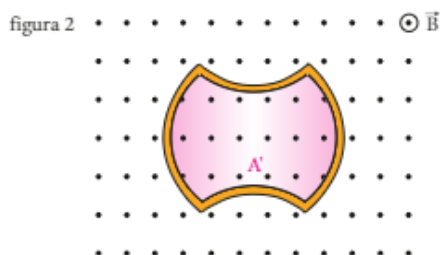
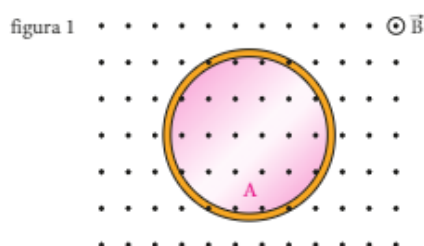
Note, então, que um movimento relativo de **aproximação** entre o anel e o ímã (ou solenoide) acarreta aumento da intensidade de  $\vec{B}$  através do anel. Com isso, o fluxo através dele também aumenta.

Havendo movimento relativo de **afastamento**, entretanto, a intensidade de  $\vec{B}$  diminui, o mesmo ocorrendo com o fluxo através do anel.

Observe que, na aproximação, mais linhas de indução passam a atravessar o anel e que, no afastamento, algumas linhas deixam de atravessá-lo.

#### Variação de fluxo causada pela variação da área $A$

Veja, na figura 1 a seguir, uma espira circular imersa em um campo magnético. Se ela for deformada, como mostra a figura 2, a área através da qual ocorre o fluxo diminuirá, o mesmo acontecendo com ele. Observe, mais uma vez, que a quantidade de linhas de indução através da espira também diminuirá.



Como a área  $A'$  é menor que a área  $A$ , o fluxo na figura 2 é menor que o fluxo na figura 1.

#### Variação de fluxo causada pela variação do ângulo $\theta$

A influência do ângulo já foi abordada em "Uma sugestão de Faraday" (p. 216). É conveniente rever.

## 4. INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Imagine um contorno fechado, imerso em um campo magnético, e que esse contorno seja **condutor**, como um anel metálico, por exemplo.

Sempre que houver **variação** do fluxo de indução através desse contorno, surgirá nele uma corrente elétrica. A esse fenômeno damos o nome de **indução eletromagnética**.

É preciso acrescentar que essa corrente também pode surgir em um condutor que não forme um “caminho” fechado, ou seja, em um circuito aberto (um exemplo disso aparecerá na análise que faremos na seção 7).

A corrente que surge é denominada **corrente induzida**, e o fluxo que a produziu, **fluxo indutor**.

É preciso salientar que a corrente induzida só existe enquanto o fluxo indutor está **variando**.

Na seção seguinte, você entenderá por que esse fenômeno acontece.

Acompanhe, agora, a descrição de alguns experimentos que confirmam a indução eletromagnética.

### Experimento 1: Variação de fluxo causada pela variação de $B$

Veja, na figura abaixo, um ímã e uma espira condutora, conectada a um galvanômetro.



O zero desse galvanômetro está no centro de sua escala. Ao aproximar ou afastar o ímã da espira condutora, o ponteiro do galvanômetro defletirá para um lado ou para o outro, dependendo do sentido da corrente que passar por ele.

Com essa montagem, pode-se verificar que:

- Se o ímã está em repouso em relação à espira, o galvanômetro não registra corrente na espira. Nesse caso, não está havendo variação de fluxo.
- Quando o ímã aproxima-se da espira, o galvanômetro registra corrente. Nesse caso, está havendo variação de fluxo.
- Quando o ímã se afasta da espira, novamente surge corrente. Mais uma vez ocorre variação de fluxo.
- Se o ímã, após mover-se, é levado novamente ao repouso, a corrente volta a valer zero. Nesse caso, não está mais havendo variação de fluxo.



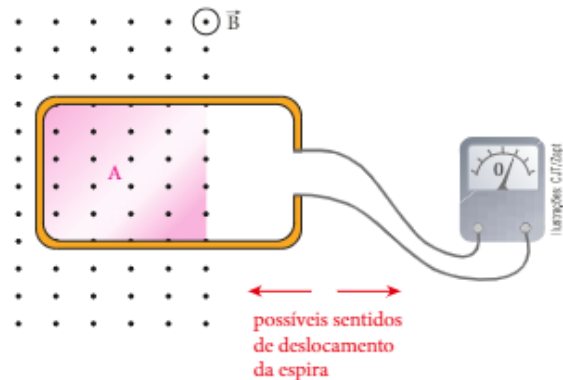
Esse experimento mostra que as correntes induzidas na aproximação e no afastamento do ímã têm sentidos contrários. Constatou-se, ainda, que os módulos assumidos pela corrente induzida são tanto maiores quanto maior é a rapidez de aproximação ou afastamento do ímã. Isso significa que a corrente induzida não depende apenas de  $B$ , mas também da rapidez com que  $B$  varia em relação ao tempo.

É importante salientar que a indução eletromagnética pode ser provocada pelo afastamento ou pela aproximação tanto do ímã como da espira. Basta, para tanto, que haja movimento relativo, não importando qual dos dois o causou.

A deflexão do ponteiro do galvanômetro é mais acentuada quando, em vez de usar uma única espira, usamos um enrolamento de várias espiras.

### Experimento 2: Variação de fluxo causada pela variação de $A$

Considere uma espira retangular condutora, disposta sempre perpendicularmente a um campo magnético uniforme e constante, e conectada a um galvanômetro, como representado na figura a seguir.

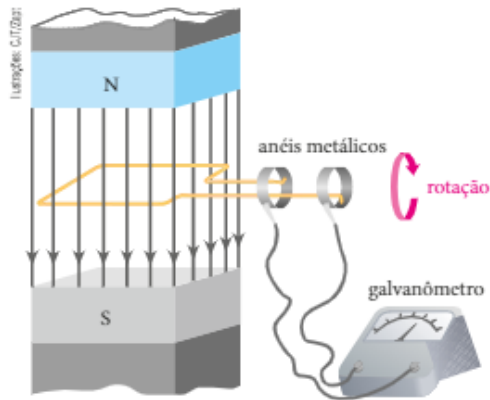


Observe que a área  $A$ , através da qual ocorre o fluxo, varia quando fazemos a espira penetrar mais ou penetrar menos no campo. Quando  $A$  aumenta, surge corrente em determinado sentido. Quando  $A$  diminui, surge corrente em sentido contrário. Quando a espira está em repouso ou totalmente mergulhada no campo, não surge corrente, porque não há variação de fluxo através dela.

Mais uma vez, a corrente induzida surge em virtude da variação de fluxo, causada, no caso, pela variação de  $A$ . Além disso, constata-se, também nesse caso, que, quanto mais rápida for a variação de  $A$ , maior será o módulo da corrente induzida.

### Experimento 3: Variação de fluxo causada pela variação de $\theta$

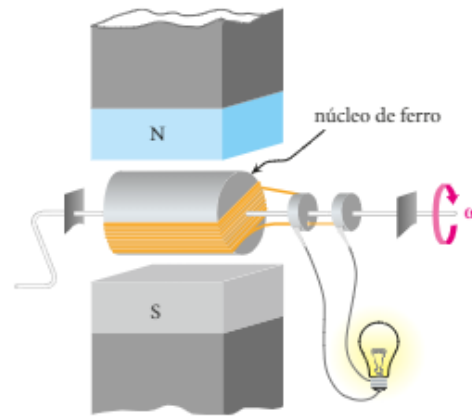
Veja, na figura abaixo, uma espira retangular girando em um campo magnético uniforme, totalmente mergulhada nele. Também nesse caso, a corrente surge em virtude da variação de fluxo, causada agora pela



Fazendo a espira girar, variamos o ângulo  $\theta$  entre  $\vec{B}$  e a reta normal a ela. Como consequência, varia o fluxo através da espira e surge uma corrente induzida. Por outro lado, se a espira permanecer em repouso, não haverá variação de fluxo nem corrente induzida.

variação de  $\theta$ . Observa-se mais uma vez que, quanto mais rapidamente  $\theta$  variar, isto é, quanto maior for a velocidade de rotação da espira, maior será o módulo da corrente induzida.

Veja a seguir uma representação de uma aplicação prática do esquema anterior.



Quanto maior a velocidade angular  $\omega$ , mais intensa a luz emitida pela lâmpada. Esse é o princípio de funcionamento dos geradores mecânicos de energia elétrica: os dínamos (que geram corrente contínua) e os alternadores (que geram corrente alternada).



#### Produzindo sua própria energia elétrica

Esta fotografia foi tirada em uma pequena comunidade em Friburgo, na Alemanha. Nela, observamos nos telhados das casas vários painéis, que transformam energia solar em energia elétrica para consumo local.

Com o crescimento da população mundial, está cada vez mais difícil atender à demanda de energia elétrica. Em países como o Brasil, grandes usinas hidrelétricas são construídas, represando-se rios caudalosos e formando-se enormes reservatórios. Já em regiões onde não são encontrados grandes rios, instalações nucleares e termoelétricas substituem as usinas hidrelétricas, mas com riscos às pessoas e ao meio ambiente.

A matriz energética constituída por usinas hidrelétricas, nucleares e termoelétricas inevitavelmente polui e agride a natureza. Por isso, há uma busca no sentido de ampliar as modalidades de obtenção de energia elétrica consideradas limpas, como o aproveitamento da energia do vento (eólica), da energia solar, da energia das marés e da energia geotérmica (proveniente do interior da Terra).



Casas com painéis solares instalados nos telhados. Friburgo, Alemanha. Maio de 2009.

## FAÇA VOCÊ MESMO

### Verificando os efeitos da indução eletromagnética


Nesta atividade, você constatará a ocorrência da indução eletromagnética por meio de uma montagem muito simples e bastante semelhante à que Faraday fez quando descobriu esse fenômeno.

Além disso, investigará maneiras de se alterar a intensidade da percepção da indução.


#### Material necessário

- 20 m de fio fino de cobre esmaltado ou de fio cabinho (bitola 0,14 mm<sup>2</sup>, que equivale a Nº 26 AWG). O fio cabinho é encontrado em lojas de componentes eletrônicos e o fio esmaltado pode ser encontrado em lojas que fazem enrolamentos de motores elétricos e em fábricas de transformadores;
- 1 fone de ouvido (monofônico ou estereofônico);
- 1 pilha comum de 1,5 V (tipo AA, C ou D);
- fita adesiva transparente;
- 1 alicate comum.

#### Procedimento

- Em dois dedos, faça um enrolamento de vinte espiras de fio, como sugere a figura ao lado. Corte o fio, retire o enrolamento dos dedos e use fita adesiva para evitar que ele se desfaça (principalmente, se você usou o fio cabinho). Vamos chamar esse enrolamento de bobina  $B_1$ . Remova cerca de 4 cm de isolamento de cada terminal de  $B_1$  (retire a capa plástica, se usou cabinho, ou raspe o esmalte, se usou fio esmaltado).
- 
- Repita todo o procedimento anterior e faça mais dois enrolamentos: um também de vinte espiras, que chamaremos de bobina  $B_2$ , e outro com cem espiras, que chamaremos de bobina  $B_3$  (no final desta atividade, guarde a bobina  $B_3$  para utilizá-la na próxima).
- Ligue os terminais de  $B_3$  aos do fone de ouvido, como indicado ao lado. Se o fone for estereofônico, ele terá três terminais. Nesse caso, use os dois terminais mais afastados um do outro.
 

Disponha  $B_1$  (ou  $B_2$ ) de frente para  $B_3$ , de modo que uma das faces de  $B_1$  fique paralela e bem próxima a uma das faces de  $B_3$ . Melhor que isso é colocar  $B_3$  sobre uma mesa com  $B_1$  apoiada em  $B_3$ , coaxialmente. Coloque o(s) alto-falante(s) auricular(es) na(s) orelha(s), segure a pilha, ligue um dos terminais de  $B_1$  a um de seus polos e mantenha-o ligado.

    - Ligue o outro terminal de  $B_1$  ao outro polo da pilha e anote se ouviu ou não algum ruído em uma das orelhas.
    - Mantenha a última ligação por alguns segundos e anote se ouviu algum ruído na orelha durante esse tempo.
    - Desfaça a última ligação e anote se percebeu ou não algum ruído.
  - Repita o procedimento III substituindo a bobina  $B_3$  pela bobina  $B_2$ . Compare a intensidade dos novos ruídos percebidos com a dos que você ouviu no procedimento III e anote o resultado.
  - Repita o procedimento IV, introduzindo o bico do alicate em  $B_1$  e  $B_2$ , de modo que essas duas bobinas o envolvam. Compare a intensidade dos ruídos percebidos com a dos que você ouviu no procedimento IV e anote o resultado.
- 

#### Analisando o experimento

- No procedimento III, descreva as situações em que você ouviu ruído em um dos alto-falantes e explique a origem desse ruído.
- No procedimento IV, você ouviu um ruído mais intenso, menos intenso ou de mesma intensidade que o percebido no procedimento III? Explique por quê.
- No procedimento V, como foi a intensidade do ruído em comparação com a percebida no procedimento IV? Explique.

## 5. LEI DE LENZ E O SENTIDO DA CORRENTE INDUZIDA

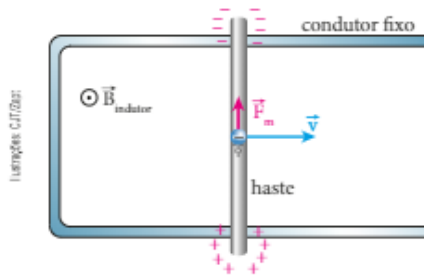
Até aqui vimos que a variação de fluxo em um circuito fechado induz uma corrente elétrica nesse circuito. Vamos, agora, discutir o sentido dessa corrente.

Alguns resultados experimentais levaram o físico russo Heinrich **Lenz** (1804-1865) à descoberta da lei que leva o seu nome. A **Lei de Lenz** pode ser enunciada da seguinte maneira:

A corrente induzida surge em um sentido tal que produz um fluxo induzido em oposição à **variação** do fluxo indutor que lhe deu origem.

Vamos, agora, “redescobrir” essa lei numa situação particular.

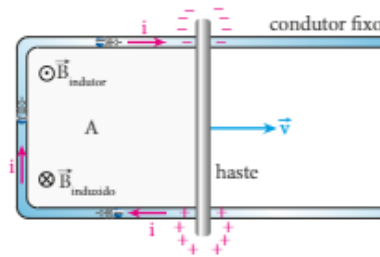
Para isso, imagine um condutor metálico fixo, dobrado em forma de U e situado no plano desta página, como representa a figura a seguir. Suponha também que esse plano seja “perfurado” pelas linhas de indução de um campo magnético uniforme e constante, com sentido “saindo do papel”, que chamaremos de  $\vec{B}_{\text{indutor}}$



Uma haste metálica, sempre em contato com o condutor em forma de U, é colocada em movimento com velocidade  $\vec{v}$ , como está indicado. Usando a regra da mão direita espalmada, você vai concluir que os elétrons livres existentes na haste se submetem a forças magnéticas que os deslocam para uma de suas extremidades.

Observe que as extremidades da haste ficam eletricamente polarizadas, ou seja, surge uma diferença de potencial entre elas. Consequentemente, na parte do condutor fixo, à esquerda da haste, elétrons livres passam a se deslocar no sentido indicado na próxima figura.

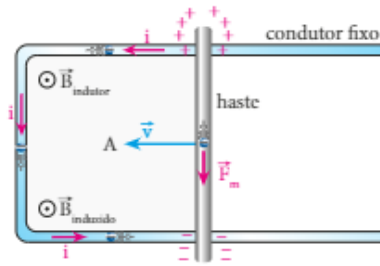
Então, na espira de área  $A$  formada pelo condutor fixo e pela haste, passa a existir uma **corrente elétrica induzida**, de intensidade  $i$ , no sentido indicado:



Usando a regra da mão direita envoltiva, concluímos que essa corrente gera, no interior da espira, um outro campo magnético, “entrando no papel”, que simbolizamos por  $\vec{B}_{\text{induzido}}$ .

Agora, podemos perceber que a **Lei de Lenz** se confirma. Enquanto a haste é movimentada, o fluxo do vetor  $\vec{B}_{\text{indutor}}$  (fluxo indutor) através da espira, “saindo do papel”, está **aumentando**, pois a área  $A$  da espira também aumenta. A corrente induzida surge, então, num sentido tal que gera um fluxo induzido “para dentro do papel”, contrariando assim a **variação** (crescimento) do fluxo indutor que lhe deu origem.

Suponha, agora, que a velocidade da haste tivesse sentido oposto ao que teve na situação que acabamos de analisar. Nessa nova situação, a polarização da haste se inverte, dando origem a uma corrente induzida no sentido indicado na figura a seguir.



Note que o fluxo indutor, “para fora do papel”, está **diminuindo**, pois a área  $A$  da espira está sendo reduzida. A corrente induzida surge, então, em um sentido tal que gera um fluxo induzido “para fora do papel”, contrariando assim a **variação** (diminuição) do fluxo indutor que lhe deu origem, o que continua de acordo com a **Lei de Lenz**.

É importante perceber que, para contrariar a diminuição de um fluxo, é preciso criar outro fluxo a favor dele.

As representações seguintes facilitam a aplicação da **Lei de Lenz**:

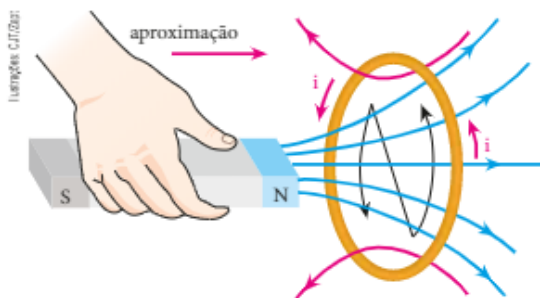




Veja, agora, outros exemplos em que a **Lei de Lenz** é aplicada.

**Exemplo 1**

Quando o polo norte de um ímã é aproximado de uma espira, o fluxo indutor através dela aumenta. Para contrariar essa **variação** (aumento) do fluxo indutor, surge, na espira, uma corrente induzida que gera um **fluxo induzido** contrário ao indutor. Nessa situação, a espira fica polarizada magneticamente.



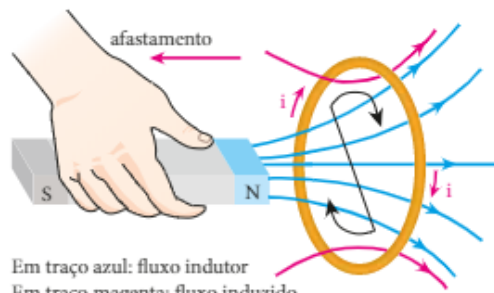
Em traço azul: fluxo indutor  
Em traço magenta: fluxo induzido

Quando o polo norte do ímã se aproxima da espira, a corrente induzida opõe-se à variação de fluxo (no caso, aumento), polarizando a espira de modo que repila o ímã.

Surge, então, na face da espira voltada para o ímã, um polo norte (o ímã “vê” um polo norte na espira). Isso nos faz concluir que o operador tem de exercer força contra a força magnética repulsiva para conseguir aproximar o ímã da espira. O trabalho motor útil, realizado pela força que o operador exerce, corresponde à energia entregue ao sistema e que se converte em energia elétrica, como previsto pelo Princípio da Conservação da Energia.

**Exemplo 2**

Considere, agora, o polo norte do ímã afastando-se da espira. Nesse caso, o fluxo indutor através da espira diminui. Para contrariar essa **variação** (diminuição) do fluxo indutor, surge uma corrente induzida na espira que gera um **fluxo induzido** a favor do indutor. Esse fluxo induzido soma-se, então, ao indutor, “tentando evitar” a variação. Em outras palavras, a corrente induzida “luta” sempre para que o fluxo total através da espira não se altere. E, mais uma vez, a espira polariza-se magneticamente.

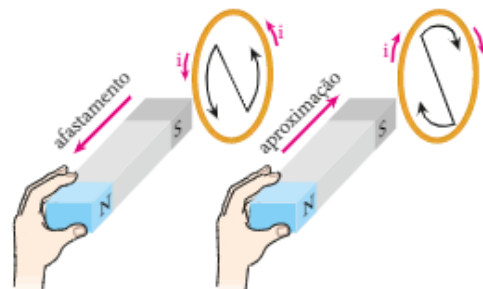


Em traço azul: fluxo indutor  
Em traço magenta: fluxo induzido

Quando o polo norte do ímã se aproxima da espira, a corrente induzida opõe-se à variação de fluxo (no caso, diminuição), polarizando a espira de modo que atraia o ímã.

Na face da espira voltada para o ímã surge, agora, um polo sul para contrariar o afastamento do ímã. Novamente, a força do operador precisa realizar um trabalho, que corresponde à energia fornecida ao sistema e que se converte em energia elétrica.

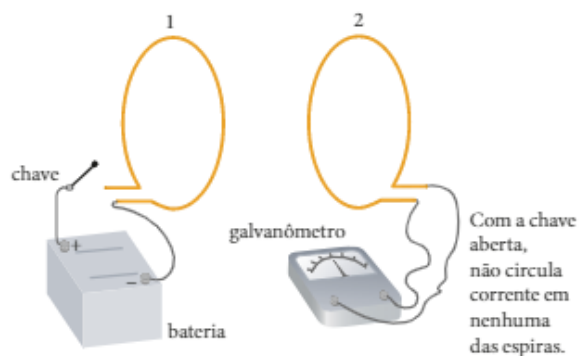
Veja, na figura a seguir, a polarização magnética da face da espira, voltada para o ímã, quando seu polo sul se aproxima ou se afasta dela.



A espira polariza-se magneticamente, de modo que contrarie a causa (aproximação ou afastamento) da variação do fluxo indutor.

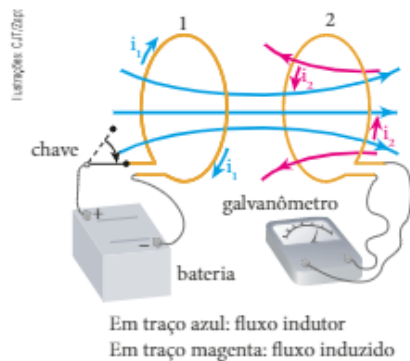
**Exemplo 3**

Considere duas espiras circulares **1** e **2** montadas uma de frente para a outra, conforme indica a figura abaixo:



Fechando-se a chave, surge uma corrente  $i_1$ , na espira **1**, que bruscamente introduz um **fluxo indutor** na espira **2**. Em outras palavras, nesse momento a espira **2** “percebe” uma variação de fluxo, que inicialmente

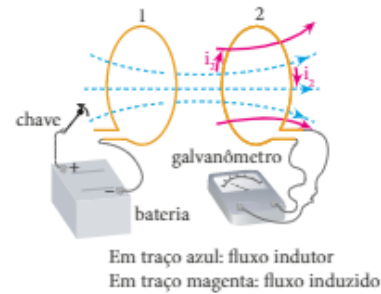
era zero e de repente cresceu. Surge então, na espira 2, uma corrente induzida  $i_2$ , que gera um fluxo induzido contrário ao fluxo indutor que cresceu. Essa corrente é detectada por um salto do ponteiro do galvanômetro.



Fechando-se a chave, surge uma corrente induzida na espira 2.

Em um lapso de tempo, após o fechamento da chave, a corrente induzida volta a valer zero. Isso ocorre porque a corrente, na espira 1, assume um valor constante, o mesmo acontecendo com o fluxo indutor. Assim, não mais havendo variação do fluxo indutor, a corrente induzida também deixa de existir e o ponteiro do galvanômetro volta a marcar zero.

Abrindo-se a chave, cessa a corrente na espira 1.



Abrindo-se a chave, surge uma corrente induzida na espira 2.

Novamente, a espira 2 “percebe” uma variação do fluxo indutor, que não era nulo e, de repente, diminuiu para zero. Surge então, na espira 2, uma nova corrente induzida, que gera um fluxo induzido a favor do fluxo indutor, para contrariar sua diminuição. Essa corrente também é detectada por um salto do ponteiro do galvanômetro.

Pouco tempo depois da abertura da chave, o ponteiro retorna ao zero e aí permanece.

Em todos os exemplos apresentados, o fluxo induzido na espira, isto é, o fluxo que a própria corrente induzida na espira produz nela mesma, é dito **fluxo autoconcatenado** com a espira.

## FAÇA VOCÊ MESMO

### Estudando a corrente induzida

Nesta atividade, você vai constatar que aumentos ou reduções do fluxo magnético influem no sentido das correntes induzidas.

Além disso, verificará que a rapidez com que ocorrem as variações de fluxo afetam o módulo dessas correntes, assunto que será estudado mais adiante, na seção 9.

Você vai usar um multímetro **digital** principalmente porque sua sensibilidade é bem maior que a de um analógico.

Para tirar conclusões corretas, você precisa das seguintes informações básicas a respeito desse medidor:

- Quando o multímetro é percorrido por corrente que entra em seu terminal “positivo” (vermelho) e sai pelo “negativo” (preto), ele indica um valor positivo (sem sinal) em seu visor LCD.
- Quando é percorrido por corrente de sentido oposto, porém, indica um valor negativo (nesse caso, o sinal de menos aparece no visor).

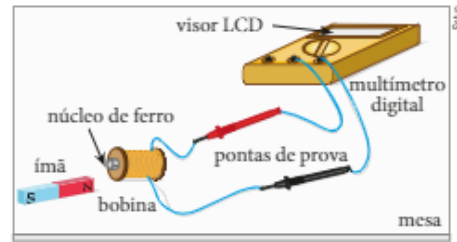
#### Material necessário

- 1 bobina de 100 espiras de fio fino de cobre esmaltado ou de fio cabinho (bitola 0,14 mm<sup>2</sup>, que equivale a N<sup>o</sup> 26 AWG);
- 1 multímetro digital;
- 1 alicate comum;
- 1 ímã em forma de barra reta, com polos nas extremidades.



## Procedimento

- I. Introduza na bobina o bico do alicate, que vai corresponder ao núcleo de ferro indicado na ilustração ao lado. Ligue os terminais da bobina às pontas de prova do multímetro digital. Ligue o multímetro e, usando seu botão giratório, selecione uma "escala" em microampère ou em miliampère, no setor de corrente contínua. Nesse setor, você lê DCA ou  $A_{\text{DC}}$  ( $\text{---}$  é o símbolo internacional de corrente ou tensão contínua;  $\sim$  é o símbolo internacional de corrente ou tensão alternada).
- II. a) Marque um dos polos do ímã. Com uma das mãos, segure o alicate e, com a outra, segure o ímã. De olho no visor, aproxime do bico do alicate o polo marcado do ímã, até que entrem em contato. Anote o sinal (positivo ou negativo) do valor lido no visor.
  - b) Mantenha o ímã "grudado" no bico do alicate durante alguns segundos. Anote o valor indicado no visor durante esse tempo.
  - c) Em seguida, de olho no visor e segurando o alicate, puxe o ímã, afastando do alicate seu polo marcado. Anote o sinal (positivo ou negativo) do valor lido no visor.
- III. Mantenha o ímã fixo e movimente o conjunto alicate-bobina, aproximando-o e, após alguns segundos, afastando-o do polo marcado do ímã. Anote os sinais dos valores lidos na aproximação e no afastamento.
- IV. Repita o procedimento II, realizando aproximação e afastamento bem lentos de um polo qualquer do ímã. Observe os módulos dos valores indicados no visor. Em seguida, realize aproximação e afastamento muito rápidos. Novamente, observe os módulos dos valores indicados no visor e compare-os com os da operação lenta. Anote o resultado.
- V. Disponha a bobina, com o alicate nela introduzido, sobre uma folha de papel estendida na mesa. Olhando de cima para o conjunto, marque aproximadamente no papel a posição **P** da extremidade do bico do alicate e observe, mais uma vez, os módulos indicados no visor quando o ímã é aproximado até **P** e depois afastado. Em seguida, mantendo a bobina na mesma posição, retire o alicate e repita as observações, procurando fazê-las com a mesma rapidez anterior, aproximando o ímã até a posição **P** e, depois, afastando-o a partir de **P**. Compare e anote os resultados obtidos sem a participação do alicate e com a participação dele.



## Analisando o experimento

1. Nos itens **a** e **c** do procedimento II, as correntes induzidas tiveram o mesmo sentido ou sentidos opostos? E no item **b**, o que você observou? Explique.
2. No procedimento III, os resultados foram os mesmos – ou, pelo menos, semelhantes – aos do procedimento II? A que conclusão você pôde chegar?
3. No procedimento IV, o que você pôde concluir a respeito dos módulos atingidos pelas correntes induzidas na operação rápida em comparação com os atingidos na operação lenta?
4. O que você percebeu ao realizar o procedimento V? Explique.

## 6. CORRENTES DE FOUCAULT

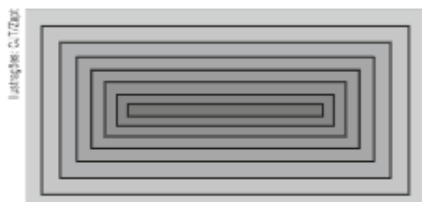
Sabemos que a variação de fluxo de indução através de uma espira condutora fechada induz nela uma corrente elétrica.

Considere, agora, a placa metálica maciça representada na figura ao lado.



Placa metálica maciça.

Podemos imaginar que essa placa seja constituída por uma justaposição de várias espiras, como sugere a próxima figura.



Placa imaginada como uma justaposição de espiras.

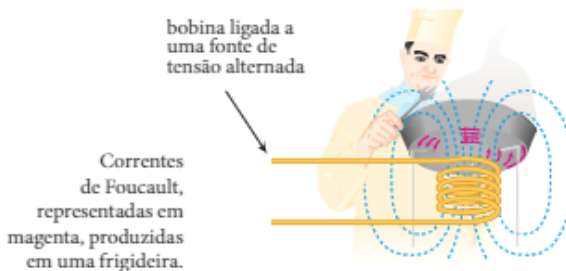
Portanto, uma variação de fluxo através da placa também induz correntes em suas “espiras”.

Quem mostrou, pela primeira vez, a existência dessas correntes foi o físico e astrônomo francês Léon **Foucault** (1819-1868); por isso, elas são denominadas **correntes de Foucault**.

Evidentemente, essas correntes provocam dissipações de energia por efeito Joule.

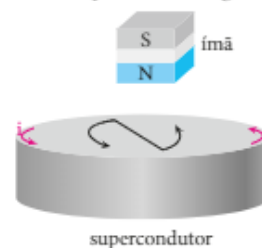
Essas dissipações são indesejáveis em muitas situações. Entretanto são úteis em outras, como no caso do forno de indução.

O forno de indução é, basicamente, uma bobina percorrida por corrente alternada, envolvendo um recipiente dentro do qual serão colocadas peças metálicas a serem fundidas. A corrente alternada produz um fluxo variável através dessas peças, induzindo nelas as correntes de Foucault.



### Indução eletromagnética em um supercondutor

Supercondutor é um material cuja resistência elétrica se anula abaixo de determinada temperatura. Nessa situação, se um polo de um ímã se aproxima do supercondutor, induz nele uma corrente elétrica. Mesmo que o ímã, após a aproximação, fique em repouso em relação ao supercondutor, a corrente continua circulando, já que a resistência deste é nula. Essa corrente induzida polariza magneticamente o supercondutor e, se a força magnética de repulsão for capaz de equilibrar o peso do ímã, ele ficará levitando.



Note que a corrente induzida surgiu em obediência à **Lei de Lenz**.

## AMPLIANDO O OLHAR

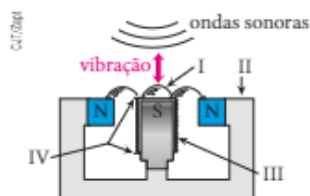
### Transdutores

#### Transdutores mecânico-elétricos

Os transdutores mecânico-elétricos são sistemas que transformam vibrações mecânicas em sinais elétricos. Só nos interessam, aqui, aqueles que executam essa transformação por meio da indução eletromagnética. É o caso, por exemplo, dos microfones dinâmicos e das cápsulas magnéticas dos toca-discos de vinil, que abordaremos a seguir.

#### Microfones dinâmicos

O **microfone dinâmico**, em termos de construção, é bastante semelhante a um alto-falante de bobina móvel. A diferença está no princípio de funcionamento deste, que é inverso ao daquele. No alto-falante, são os sinais elétricos que produzem as vibrações mecânicas do cone, enquanto, nos microfones dinâmicos, os sinais elétricos são gerados, por indução eletromagnética, pelas vibrações mecânicas de um diafragma. A figura abaixo, à direita, ilustra, esquematicamente, um microfone dinâmico.



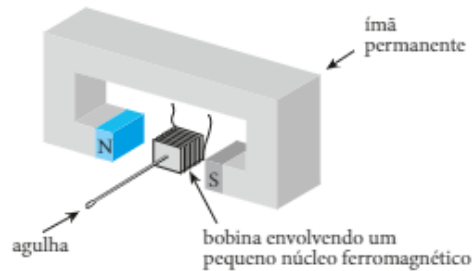
- I – Diafragma preso em uma bobina móvel.
- II – Ímã permanente fixo.
- III – Bobina móvel envolvendo um polo do ímã.
- IV – Terminais da bobina.

Inicialmente, as ondas sonoras fazem o diafragma vibrar e, conseqüentemente, a bobina móvel, presa a ele, também vibra. Com isso, há uma variação de fluxo magnético nessa bobina e o conseqüente surgimento de uma corrente induzida. Essa corrente induzida é o sinal elétrico que deve ser amplificado em seguida, por um circuito projetado para isso.

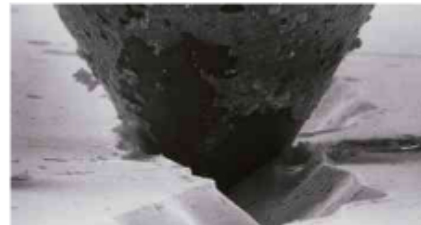
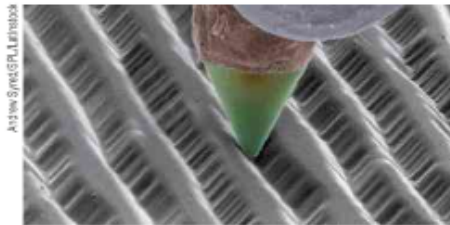
### Cápsulas magnéticas

Em um toca-discos, a cápsula magnética constitui, juntamente com a agulha, a unidade de leitura e transdução das informações gravadas no disco de vinil.

Quando o sulco do disco passa pela agulha, ela vibra, fazendo com que a bobina também vibre. Uma corrente elétrica é induzida nela. Essa corrente é o sinal elétrico que será, em seguida, amplificado.



Transdutor de energia mecânica em energia elétrica: as vibrações percebidas pela agulha sacodem a bobina, ocorrendo nesta uma variação do fluxo originado pelo ímã. Surge, então, nos terminais da bobina, um sinal elétrico induzido.



Potomicrografias de sulco do disco de vinil: as informações sonoras estão gravadas nas paredes do sulco, em suas saliências e reentrâncias. Durante a reprodução dessas informações, a agulha, em contato com essas irregularidades, vibra, transmitindo os sinais gravados.

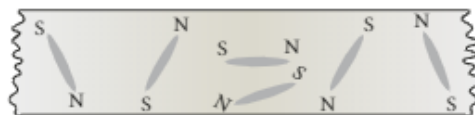
### Transdutores magnetoelétricos

Transdutores magnetoelétricos são sistemas que transformam informações magnéticas em sinais elétricos. É o caso de uma fita magnética durante sua **reprodução**.

Em uma fita magnética, utilizada para a gravação de sinais sonoros e de vídeo, existem partículas ferromagnéticas dispersas em uma base (fita) não ferromagnética. As fitas cassetes têm uma base de poliéster, celulose de acetato ou mylar. Nessa base é aplicada uma fina camada de partículas ferromagnéticas (óxido de ferro, dióxido de cromo etc.) que se prendem à fita, graças ao uso de um adesivo plástico.

No processo de gravação da fita, essas partículas são organizadas pelo campo magnético de uma pequena bobina, campo este variável de acordo com os sinais que estão sendo gravados.

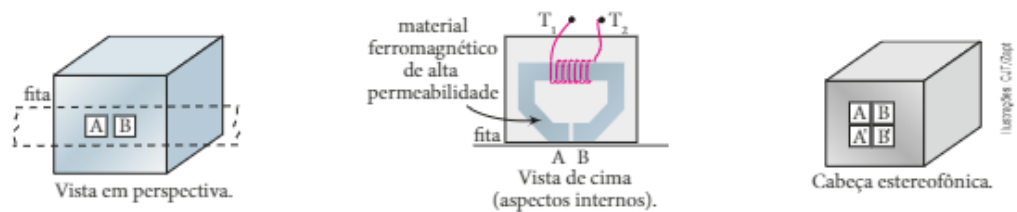
Na reprodução da fita, ela passa pela mesma bobina, produzindo nesta uma variação de fluxo magnético que gera uma corrente elétrica induzida. Em seguida, essa corrente elétrica é amplificada para gerar sinais sonoros em um alto-falante.



Representação simbólica de uma **fita não gravada**.



Representação simbólica de uma **fita gravada**: as partículas imantadas estão adequadamente posicionadas (conforme os sinais gravados).



**Cabeça de gravação/reprodução monofônica:** na gravação, um sinal elétrico variável é aplicado entre  $T_1$  e  $T_2$ , provocando um campo magnético variável entre A e B. Esse campo posiciona adequadamente as partículas ferromagnéticas da fita, registrando nela os sinais recebidos. Na reprodução, as partículas imantadas da fita produzem uma variação de fluxo entre A e B, induzindo uma corrente elétrica na bobina. Essa corrente é, em seguida, amplificada. Numa cabeça estereofônica temos dois sistemas monofônicos independentes.

A gravação e a leitura dos cartões magnéticos e bilhetes de metrô são feitas conforme esses mesmos princípios.

Os disquetes que eram usados em computadores são discos magnéticos inventados em 1971, quando tinham 8 polegadas de diâmetro. Os da década de 90 tinham 3,5 polegadas de diâmetro.

Nos disquetes, os processos de gravação e reprodução também são eletromagnéticos, como acontece nas fitas magnéticas. Bobinas produzem o campo magnético para gravar dados e, por indução eletromagnética, reproduzem-nos. A vida útil de um disquete é de 5 a 6 anos, bem menor que a de um CD, que dura cerca de 20 anos.



### Como é gravado o som estereofônico?

As vibrações produzidas pelos sons que um microfone recebe são convertidas em pequenos sinais elétricos, que são depois amplificados.

Uma gravação estereofônica é feita com dois microfones que captam sons em locais diferentes. Na fotografia ao lado, o artista Kid Rock (à esquerda) canta mais perto do microfone esquerdo (E), enquanto o artista Stevie Wonder (à direita) canta e toca mais perto do direito (D).

Vamos admitir que os sons captados pelos microfones E e D serão gravados em uma fita, em gravação estereofônica. Nesse tipo de gravação, os sons são registrados em duas regiões da fita (canais). Em um dos canais, ficará gravado mais intensamente o som de Kid Rock; no outro, o som de Stevie Wonder.

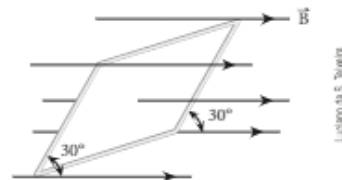
Na reprodução, em aparelho também estereofônico, o som de um aparecerá mais intensamente em um dos alto-falantes, enquanto o do outro aparecerá mais intensamente no outro alto-falante. Assim, ao ouvir a gravação, teremos a percepção das posições dos artistas cantando e tocando.



Kid Rock e Stevie Wonder em uma gravação estereofônica.

## QUESTÕES COMENTADAS

- 1 Uma espira retangular de 10 cm de largura por 30 cm de comprimento é colocada, totalmente imersa, em um campo de indução magnética uniforme e constante, de módulo igual a 2,0 T. As linhas de indução formam um ângulo de  $30^\circ$  com o plano da espira.

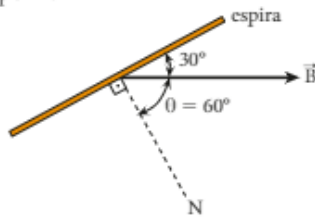


Calcule:

- a) o fluxo do vetor indução magnética concatenado com a espira;
- b) o fluxo citado, supondo o plano da espira perpendicular às linhas de indução e admitindo que a espira continue totalmente imersa no campo.

**RESOLUÇÃO**

- a) O fluxo de indução é dado pela expressão:  $\phi = B A \cos \theta$ , em que  $\theta$  é o ângulo formado entre as linhas de indução e a reta normal ao plano da espira. Vamos traçar, então, uma reta normal à espira e olhar a espira de perfil:



Temos, portanto,  $\theta = 60^\circ$ .  
 Vamos calcular a área  $A$  da espira:  
 $A = \text{comprimento} \cdot \text{largura}$   
 $A = (30 \cdot 10^{-2}) \cdot (10 \cdot 10^{-2}) \Rightarrow A = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$   
 Fazendo  $B = 2,0 \text{ T}$ ,  $A = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$  e  $\cos \theta = \cos 60^\circ = \frac{1}{2}$ , determinamos  $\phi$ :  
 $\phi = 2,0 \cdot 3,0 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{1}{2} \Rightarrow \phi = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}$

- b) Nesse caso,  $\theta = 0^\circ$ :

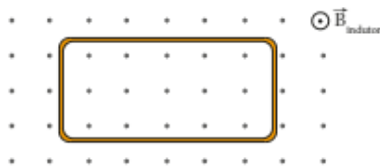


Fazendo  $B = 2,0 \text{ T}$ ,  $A = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$  e  $\cos \theta = \cos 0^\circ = 1$  na expressão do fluxo, obtemos:  
 $\phi = 2,0 \cdot 3,0 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \Rightarrow \phi = 6,0 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}$

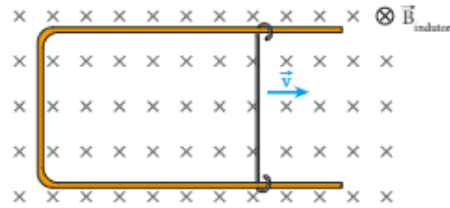
**Respostas:** a)  $3,0 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}$ ; b)  $6,0 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}$

**2** Nas situações descritas a seguir, determine o sentido da corrente elétrica induzida.

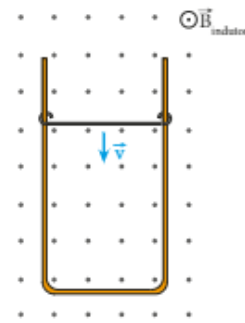
- a) Uma espira condutora retangular fixa está em repouso, imersa em um campo magnético de intensidade crescente:



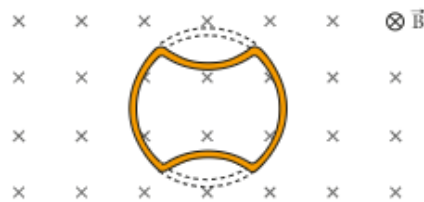
- b) Dentro de um campo magnético uniforme e constante, uma haste condutora desliza, com velocidade  $\vec{v}$ , sobre um fio condutor fixo, dobrado em forma de U:



- c) Dentro de um campo magnético uniforme e constante, uma haste condutora desliza, com velocidade  $\vec{v}$ , sobre um fio condutor fixo, dobrado em forma de U:



- d) Uma espira condutora circular está sendo achatada dentro de um campo magnético uniforme e constante:



**RESOLUÇÃO**

- a) O fluxo indutor cresce "saindo do papel" e por isso a corrente induzida surge, criando um fluxo induzido "entrando no papel". Para que isso aconteça, a corrente deve circular no sentido horário:

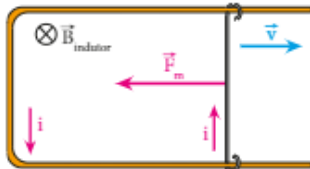


- b) A área da espira está aumentando. Então, como  $\phi = B A$ , concluímos que o fluxo indutor "entrando no papel" está aumentando. Para contrariar esse crescimento, a corrente induzida surge, criando um fluxo induzido "saindo do papel". Assim, a corrente deve circular no sentido anti-horário:



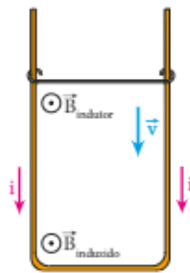
**Comentário:**

Poderíamos chegar ao mesmo resultado, de outra maneira: sempre que a variação de fluxo é causada por movimento, surge uma força magnética  $\vec{F}_m$  oposta a esse movimento:



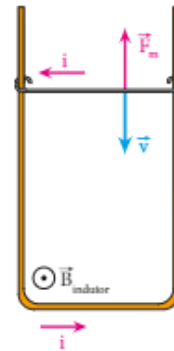
O sentido de  $i$  é dado, então, pela regra da mão direita espalmada.

- c) A área da espira está diminuindo e por isso o fluxo indutor "saindo do papel" também diminui. Para contrariar essa diminuição, a corrente induzida surge de modo que crie um fluxo induzido também "saindo do papel". Para isso, a corrente deve circular no sentido anti-horário.

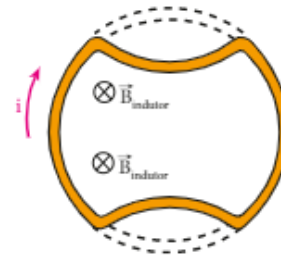


**Comentário:**

Usando a força magnética contrária ao movimento, obtemos o sentido de  $i$  pela regra da mão direita espalmada.



- d) Como a área da espira está diminuindo, o fluxo indutor "entrando no papel" também diminui. Por isso, surge uma corrente induzida que gera um fluxo também "entrando no papel" e, para tanto, a corrente deve ter sentido horário.



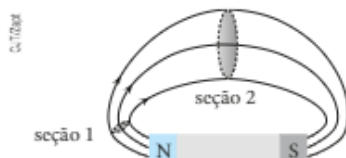
Lançamento Livro 5. Toront

- Respostas:** a) Horário.                      c) Anti-horário.  
 b) Anti-horário.                              d) Horário.

**QUESTÕES PROPOSTAS** FAÇA NO CADERNO.

- 3. Uma espira quadrada de 20 cm de lado está totalmente imersa em um campo de indução magnética uniforme e constante, de intensidade 4,0 T. Calcule o fluxo de indução através dessa espira, nos seguintes casos:
  - a) o plano da espira é perpendicular às linhas de indução;
  - b) o plano da espira é paralelo às linhas de indução.

- 4. A figura a seguir mostra um tubo de linhas de indução do campo magnético que um ímã gera fora dele:



Nas seções 1 e 2 desse tubo, compare:

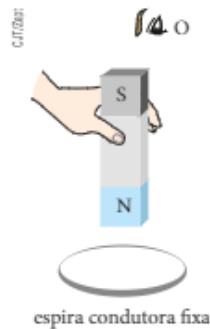
- a) os fluxos de indução magnética,  $\phi_1$  e  $\phi_2$ ;
- b) as intensidades,  $B_1$  e  $B_2$ , do vetor indução magnética.

- 5. Um anel circular de raio  $R = \frac{2,0}{\sqrt{\pi}}$  m é introduzido em um campo magnético uniforme, ficando totalmente imerso nele. Sendo  $B = 1,5 \text{ Wb/m}^2$ , calcule o fluxo de indução através do anel, nos seguintes casos:

- a) quando o plano do anel é paralelo às linhas de indução;
- b) quando o plano do anel é perpendicular às linhas de indução;
- c) quando a normal ao plano do anel forma um ângulo  $\theta$  ( $\cos \theta = 0,60$ ) com as linhas de indução.

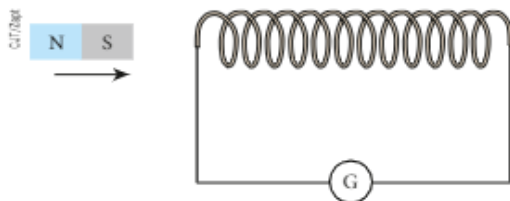
**6.** Um ímã em forma de barra reta, inicialmente em repouso em relação a uma espira circular, é abandonado acima dela e cai, atravessando-a.

Para o observador **O**, qual é o sentido da corrente induzida na espira:



- a) enquanto o ímã está em repouso em relação a ela?
- b) um pouco antes de o ímã começar a atravessá-la?
- c) logo após a passagem completa do ímã através dela?

**7.** Na figura, o polo sul de um ímã aproxima-se rapidamente de um solenoide, que se acha ligado em série a um galvanômetro.



Durante essa aproximação:

- a) o galvanômetro não indica passagem de corrente.
- b) a extremidade do solenoide voltada para o ímã comporta-se como um polo norte magnético.
- c) o galvanômetro detecta uma corrente de sentido variável periodicamente.
- d) a extremidade do solenoide voltada para o ímã comporta-se como um polo sul magnético.
- e) só passaria corrente no galvanômetro se o solenoide fosse dotado de núcleo de ferro.

**8.** Uma espira condutora retangular, situada no plano do papel, está penetrando em um campo magnético uniforme e constante, com velocidade  $\vec{v}$ , como indica a figura.



Em relação ao leitor, qual é o sentido da corrente induzida na espira:

- a) enquanto ela está penetrando no campo, isto é, antes de estar totalmente dentro dele?
- b) enquanto ela está totalmente dentro do campo?
- c) quando a espira está saindo do campo?

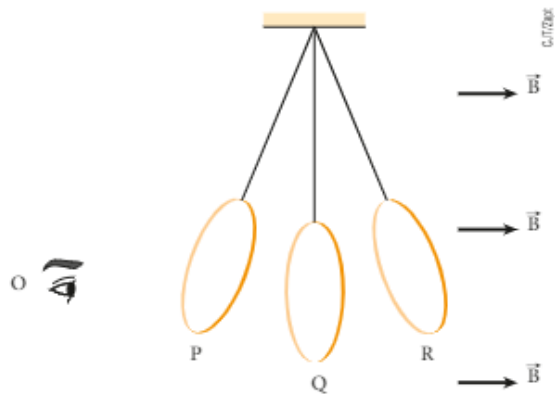
**9.** Um anel metálico circular, de raio **R**, está imerso em uma região onde existe um campo de indução magnética uniforme  $\vec{B}$ , perpendicular ao plano da figura e apontando para dentro do papel:



Determine o sentido da corrente elétrica induzida na espira (horário ou anti-horário, em relação ao leitor) quando a intensidade de  $\vec{B}$ :

- a) crescer;
- b) diminuir;
- c) for constante.

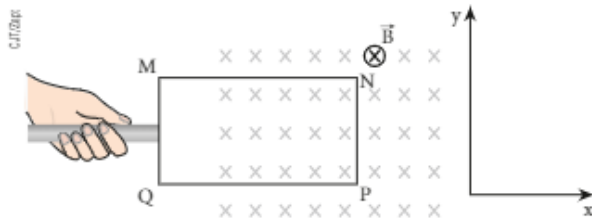
**10.** Um aro de cobre, preso em um barbante e situado totalmente dentro de um campo magnético uniforme e constante  $\vec{B}$ , oscila entre as posições **P** e **R**, mantendo uma mesma face voltada para o observador **O**.



Determine, em relação a **O**, o sentido da corrente elétrica induzida no aro enquanto ele se desloca:

- a) de **P** até **Q**;
- b) de **Q** até **R**.

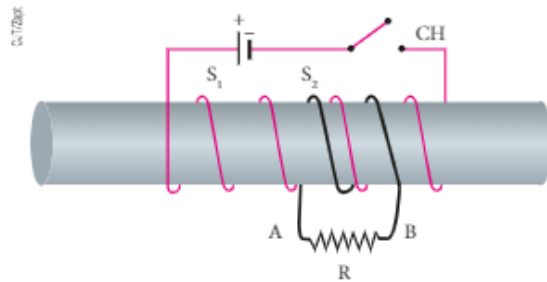
11. A figura representa uma espira retangular, MNPQ, parcialmente dentro de um campo magnético uniforme e constante,  $\vec{B}$ , perpendicular ao plano da espira (plano xy) e entrando nele.



Tomando como referência os eixos x e y indicados, determine o sentido da força magnética atuante no lado NP da espira se ela, mantida no plano xy, estiver:

- saindo do campo;
- entrando no campo;
- movendo-se no campo, já totalmente dentro dele.

12. Na figura a seguir, temos dois solenoides,  $S_1$  e  $S_2$ , de fio de cobre isolado, feitos em um mesmo núcleo de ferro:



Determine o sentido da corrente elétrica no resistor R, ligado aos terminais de  $S_2$ , nas seguintes situações:

- imediatamente após o fechamento da chave CH;
- decorrido tempo suficiente para se estabelecer corrente constante na chave ligada;
- imediatamente após a abertura da chave.

13. Um aro de alumínio é abandonado no topo de uma rampa, no instante  $t_0 = 0$ , e desce rolando até chegar ao solo, o que ocorre no instante  $t_1$  (veja a figura I).



figura 1

Depois, esse experimento é refeito com uma **única** alteração: o aro passa por um campo magnético uniforme  $\vec{B}$ , perpendicular ao plano da figura (veja a figura 2), chegando ao solo no instante  $t_2$ .

Responda:  $t_2$  é menor, maior ou igual a  $t_1$ ?

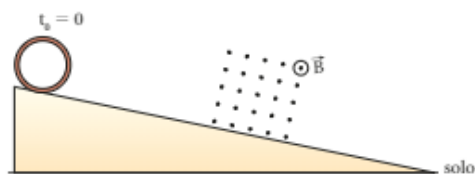
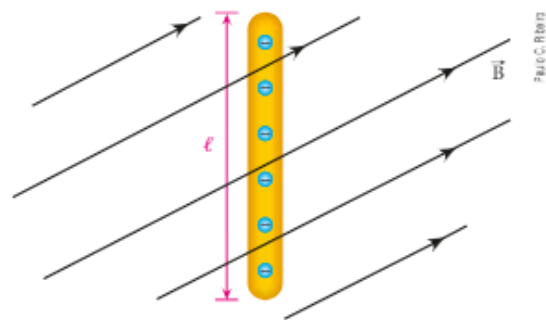


figura 2

## 7. MOVIMENTO DE UM FIO CONDUTOR EM UM CAMPO MAGNÉTICO: FORÇA ELETROMOTRIZ INDUZIDA

Nas seções anteriores, ficamos sabendo que a variação do fluxo de indução pode produzir correntes elétricas.

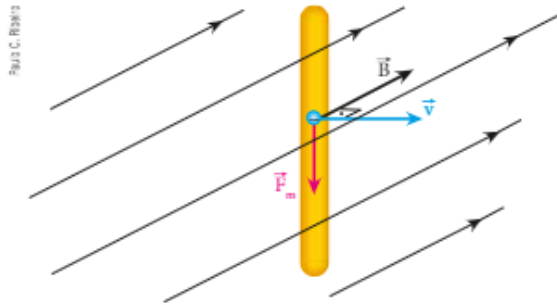
Em **Eletrodinâmica**, entretanto, vimos que uma corrente elétrica é gerada por uma diferença de potencial (ddp). Portanto, conclui-se que a variação do fluxo de indução deve gerar uma ddp, que, por sua vez, gera a corrente. Considere agora a situação seguinte: um fio condutor retilíneo de comprimento  $\ell$  está em repouso, disposto perpendicularmente a um campo magnético uniforme e constante.



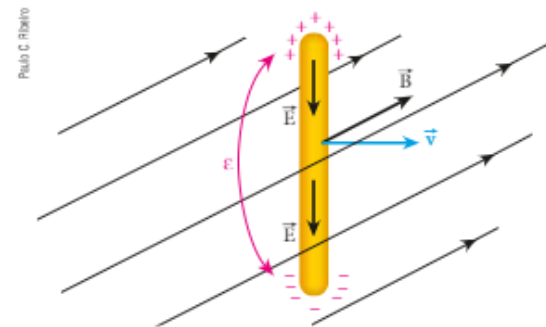
Fio condutor em repouso e alguns dos seus elétrons livres.

Suponha, agora, que o fio condutor seja arrastado em movimento de translação, com velocidade  $\vec{v}$ , perpendicular às linhas de indução e ao fio. Como consequência, surgirá uma força magnética em cada elétron livre (ver a figura a seguir).





Essa força fará que os elétrons livres se desloquem para a extremidade inferior do condutor. Assim, o fio ficará eletricamente polarizado.



Essa polarização elétrica estabelece, entre as extremidades do fio, uma diferença de potencial denominada **força eletromotriz induzida**, que simbolizaremos por  $\mathcal{E}$ . Em consequência dessa diferença de potencial, temos, no interior do fio, o aparecimento de um campo elétrico  $\vec{E}$ .



À medida que mais elétrons descem para a extremidade inferior do fio, mais intenso torna-se o campo  $\vec{E}$ . Esse campo elétrico provoca, nos elétrons livres, uma força elétrica  $\vec{F}_e$  para cima. Assim, à medida que  $\vec{E}$  se torna mais intenso, a intensidade de  $\vec{F}_e$  também aumenta.

Quando a intensidade de  $\vec{F}_e$  torna-se igual à da força magnética  $\vec{F}_m$ , o movimento ordenado dos elétrons no interior do fio – que constitui uma corrente elétrica nele induzida – cessa. Temos, então:

$$F_m = F_e \Rightarrow |q|vB \sin 90^\circ = |q|E \Rightarrow vB = E \quad (I)$$

Como  $E d = |U|$ , fazendo  $d = \ell$  e  $|U| = |\mathcal{E}|$ , obtemos:  $E \ell = |\mathcal{E}| \Rightarrow E = \frac{|\mathcal{E}|}{\ell} \quad (II)$

Substituindo (II) em (I), obtemos:

$$vB = \frac{|\mathcal{E}|}{\ell} \Rightarrow |\mathcal{E}| = B \ell v$$

Essa expressão fornece o módulo da força eletromotriz induzida no fio, que é a causa da corrente induzida estudada em itens anteriores.

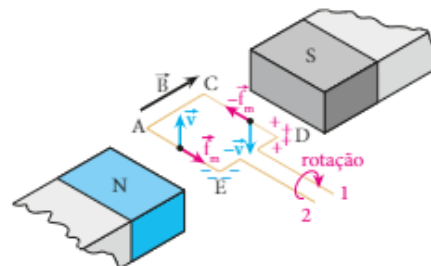
**NOTA**

Se o fio, posicionado como nas ilustrações anteriores, fosse movimentado, ora com a velocidade  $\vec{v}$ , ora com a velocidade  $-\vec{v}$ , teríamos nele uma corrente induzida alternada.

## 8. FORÇA CONTRAELETROMOTRIZ DE UM MOTOR

Para simplificar a análise que faremos a seguir, vamos considerar um motor de corrente contínua com apenas uma espira, ACDE, retangular.

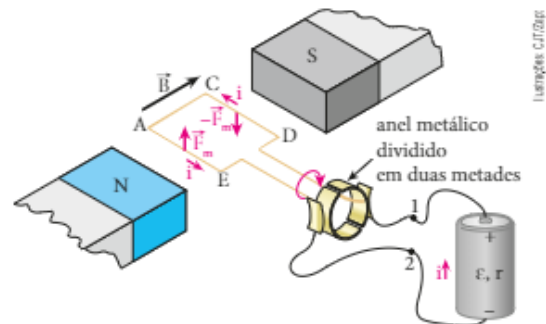
As regiões A, C, D e E da espira vão se eletrizar, como mostra a figura a seguir, se ela girar no sentido indicado.



Isso é causado pelas forças magnéticas que atuam nos elétrons livres existentes nos lados AE e CD.

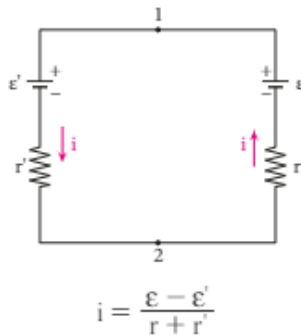
Surge, então, entre os terminais 1 e 2 da espira, uma diferença de potencial induzida  $\mathcal{E}$ , sendo  $v_1 > v_2$ .

Vamos rever agora como a espira (motor) precisa ser ligada a um gerador (pilha ou bateria) para adquirir rotação no sentido indicado na figura anterior:



Aquela diferença de potencial induzida  $\mathcal{E}'$ , “em oposição” à força eletromotriz  $\mathcal{E}$  do gerador, é a **força contraeletromotriz** do motor, e seu aparecimento também pode ser justificado pela **Lei de Faraday-Neumann**, apresentada no próximo item.

O motor e o gerador podem ser representados de modo simplificado como no esquema a seguir:

**NOTA**

Se o motor for bloqueado, isto é, impedido de rotar,  $\mathcal{E}'$  será nula e  $i$  aumentará consideravelmente, podendo danificá-lo.

## 9. LEI DE FARADAY-NEUMANN

Suponha estabelecido um fluxo de indução através de um condutor. A força eletromotriz média induzida nesse condutor, em determinado intervalo de tempo  $\Delta t$ , é dada pela seguinte expressão, que traduz a **Lei de Faraday-Neumann**:

$$\mathcal{E}_m = - \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

em que  $\Delta\phi$  é a variação do fluxo indutor durante o intervalo de tempo  $\Delta t$ .

Essa expressão mostra que a força eletromotriz induzida é tanto mais intensa quanto mais rápida for a variação do fluxo indutor. Isso está plenamente coerente com todos os exemplos vistos anteriormente na seção 4, nos quais a corrente elétrica foi gerada pela força eletromotriz induzida.

Se, na expressão de  $\mathcal{E}_m$ , fizermos  $\Delta t$  tender a zero, obteremos a expressão da força eletromotriz induzida instantânea  $\mathcal{E}$ , dada por:

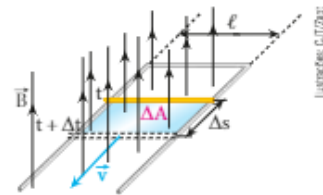
$$\mathcal{E} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} - \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

No caso em que  $\phi$  variar com o tempo  $t$  segundo uma função de primeiro grau em  $t$ ,  $\mathcal{E}$  coincidirá com  $\mathcal{E}_m$  em qualquer instante do intervalo  $\Delta t$ , o que permitirá escrever:

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

O sinal de menos ( $-$ ) que aparece na **Lei de Faraday-Neumann** significa que nela está implícita a **Lei de Lenz**. Esse sinal indica que a força eletromotriz induzida surge com a “intenção” de criar um fluxo induzido “contra” a **variação** do fluxo indutor, o que está de acordo com a **Lei de Lenz**.

A **Lei de Faraday-Neumann** pode ser confirmada de modo simples, num caso particular. Para isso, considere um condutor em forma de U, em repouso e disposto perpendicularmente às linhas de indução de um campo magnético uniforme e constante. Considere, também, outro condutor retilíneo de comprimento  $\ell$ , deslizando com velocidade constante  $\vec{v}$  sobre o primeiro, de modo que ambos delimitem sempre uma espira retangular fechada.



No intervalo de tempo  $\Delta t$ , a área da espira retangular delimitada pelo condutor em forma de U e pelo condutor retilíneo móvel sofre uma variação  $\Delta A$ , ocorrendo na espira uma variação de fluxo  $\Delta\phi$ .

Nessa situação, temos:

$$\phi = B A \Rightarrow \Delta\phi = B \Delta A \quad (I)$$

Mas  $\Delta A = \ell \Delta s$ , em que  $\Delta s$  é a distância percorrida pelo fio retilíneo durante o intervalo de tempo  $\Delta t$ .

Assim, substituindo em (I), obtemos:

$$\Delta\phi = B \ell \Delta s$$

Dividindo essa expressão por  $\Delta t$ , obtemos:

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{B \ell \Delta s}{\Delta t}$$

Com  $\frac{\Delta s}{\Delta t} = v$ , temos que:  $\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = B \ell v$ .

Conforme vimos na seção 7,  $B \ell v = |\mathcal{E}|$ .

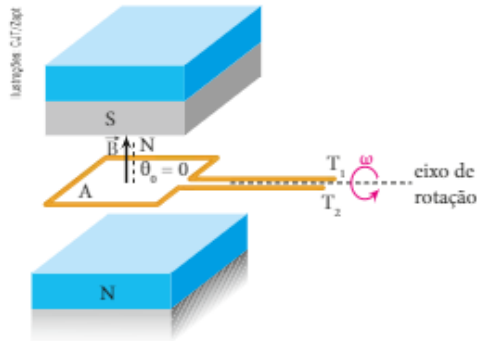
Assim, verificamos, pelo menos em valor absoluto, que, de fato:

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = |\mathcal{E}|$$

## 10. NOÇÕES DE CORRENTE ALTERNADA

### Princípio de obtenção de corrente alternada

Veja, na figura a seguir, uma espira plana de área  $A$ , imersa em um campo magnético uniforme  $\vec{B}$ .



Imagine que a espira seja colocada em movimento de rotação em torno do eixo indicado, com velocidade angular constante  $\omega$  e que, no instante  $t_0 = 0$ , o ângulo  $\theta_0$ , entre o vetor  $\vec{B}$  e a reta normal  $\vec{N}$ , seja nulo.

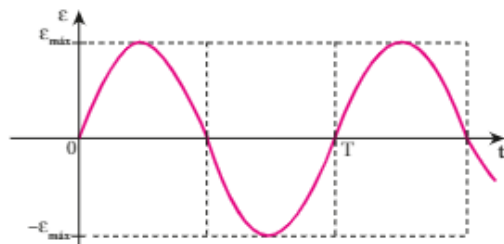
Durante a rotação, o ângulo  $\theta$  varia, ocorrendo assim uma variação do fluxo de indução através da espira. Consequentemente surge, entre os terminais  $T_1$  e  $T_2$ , uma força eletromotriz induzida  $\mathcal{E} = v_1 - v_2$ , em que  $v_1$  e  $v_2$  são os potenciais elétricos em  $T_1$  e  $T_2$ , respectivamente.

Essa força eletromotriz induzida  $\mathcal{E}$  varia com o tempo  $t$  de acordo com a função:

$$\mathcal{E} = B A \omega \cdot \sin \omega t$$

em que  $B A \omega$  é o valor máximo (ou valor de pico) de  $\mathcal{E}$ , que vamos simbolizar por  $\mathcal{E}_{\text{máx}}$ .

Veja a representação gráfica dessa função, em que  $T$  é seu período ( $T = 2\pi/\omega$ ):



A tensão gerada é alternada, isto é, a polaridade elétrica dos terminais  $T_1$  e  $T_2$  inverte-se periodicamente, de modo que  $\mathcal{E} = v_1 - v_2$  ora é positiva, ora é negativa. Essa alternância acontece porque o fluxo através da espira ora aumenta, ora diminui.

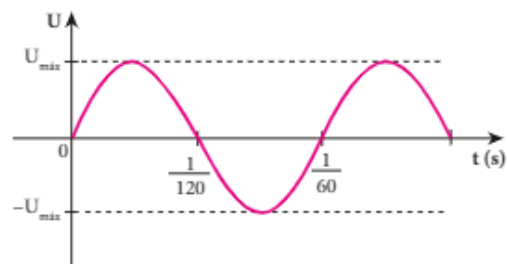
### Corrente alternada em resistores

A ddp  $U$  entre os terminais de uma tomada de energia elétrica da sua casa, por exemplo, é dada por uma expressão do tipo:

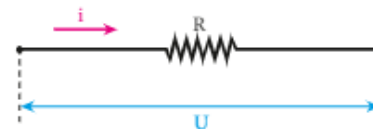
$$U = U_{\text{máx}} \sin \omega t$$

em que  $\omega = 2\pi f$  e  $f$  é a frequência da rede elétrica (60 Hz, para nós, no Brasil).

Veja a representação gráfica dessa função, lembrando que seu período  $T$ , dado por  $T = \frac{1}{f}$ , é igual a  $\frac{1}{60}$  s:



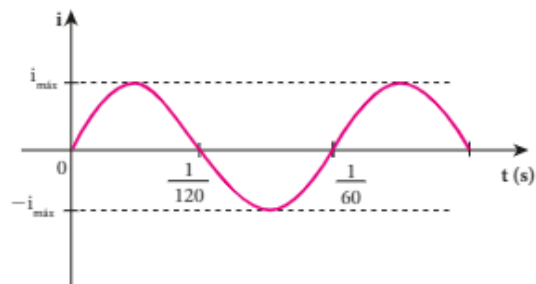
Suponha, agora, que um resistor de resistência elétrica  $R$  seja submetido a essa tensão:



Em cada instante, vale a expressão  $U = R i$ . Assim, temos:

$$i = \frac{U}{R} = \frac{U_{\text{máx}} \sin \omega t}{R}, \text{ em que } \frac{U_{\text{máx}}}{R} = i_{\text{máx}}$$

Podemos, então, escrever  $i = i_{\text{máx}} \sin \omega t$ , cuja representação gráfica também é do tipo:



Denomina-se **valor eficaz** de uma corrente alternada o valor de uma corrente constante que, percorrendo um resistor durante o mesmo intervalo de tempo, causa a mesma dissipação de energia que a primeira.

Demonstra-se que, no caso de correntes sinusoidais, como a representada no gráfico, a **corrente eficaz** é dada por:

$$i_{ef} = \frac{i_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}}$$

Estende-se o conceito também à tensão. Desse modo, a **tensão eficaz** é dada por:

$$U_{ef} = \frac{U_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}}$$

Quando dizemos que a tensão da rede elétrica numa determinada cidade é, por exemplo, de 220 V, estamos nos referindo ao seu valor eficaz. Na realidade, a tensão da rede é variável com o tempo, e seu valor máximo (valor de pico)  $U_{m\acute{a}x}$  é:

$$U_{m\acute{a}x} = U_{ef} \sqrt{2} = 220 \cdot \sqrt{2} \Rightarrow U_{m\acute{a}x} \cong 310 \text{ V}$$

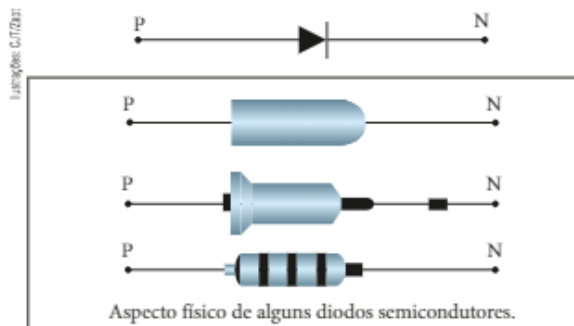
Assim, nesse caso, a tensão entre os terminais da tomada varia, aproximadamente, entre +310 V e -310 V.

A potência elétrica dissipada num resistor submetido a uma tensão alternada (ferro elétrico de passar roupa, lâmpada, chuveiro etc.) é variável com o tempo. Demonstra-se que o valor médio dessa potência dissipada no resistor é dado por:

$$Pot_{m\acute{e}dia} = U_{ef} i_{ef}$$

### Estágio de um circuito retificador

Os circuitos retificadores destinam-se à conversão de tensão alternada em tensão contínua. Exemplificamos aqui o primeiro estágio de um circuito retificador. Para isso, é preciso ter algumas informações sobre um componente eletrônico denominado **diodo semicondutor**, cujo símbolo é:



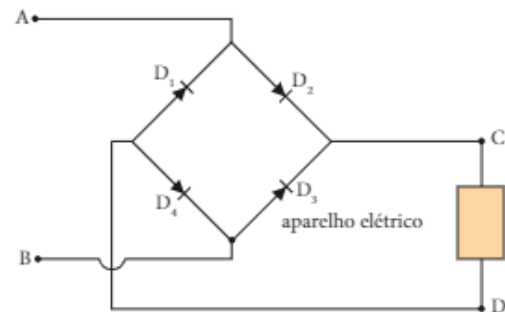
Esse componente conduz bem corrente elétrica quando o polo positivo de um gerador elétrico é ligado ao ponto **P** e o polo negativo, ao ponto **N**. Se a ligação for invertida, o diodo praticamente não conduzirá corrente elétrica.



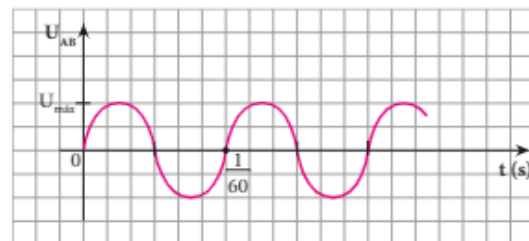
Considerando o diodo operando de modo ideal, ele será equivalente a um curto-circuito na condução e a um circuito aberto na não condução.



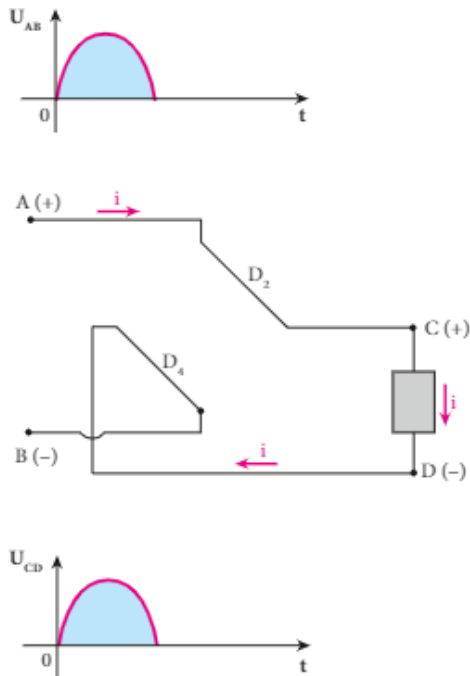
No circuito esquematizado a seguir, temos quatro diodos ( $D_1, D_2, D_3$  e  $D_4$ ), fios de ligação e um aparelho elétrico que deverá funcionar com corrente contínua, ligado entre os pontos **C** e **D**.



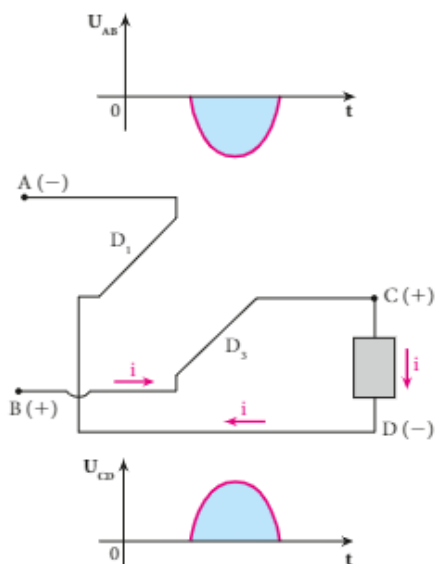
Vamos, então, aplicar uma diferença de potencial  $U_{AB}$  entre os pontos **A** e **B**, definida por  $U_{AB} = v_A - v_B$ . Essa tensão é alternada e está representada graficamente a seguir:



Vamos ver o que acontece com a diferença de potencial  $U_{CD}$  entre os pontos C e D, definida por  $U_{CD} = v_C - v_D$ . Quando  $v_A$  é maior que  $v_B$ , ou seja, quando  $U_{AB}$  é positiva, só  $D_2$  e  $D_4$  conduzem corrente, o que está representado a seguir:

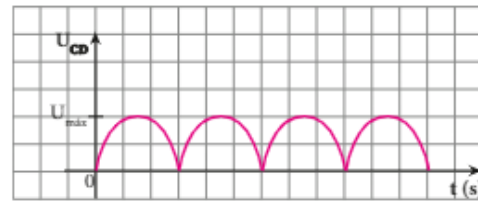


Assim, o potencial positivo de A é repetido em C e o negativo de B é repetido em D, obtendo-se  $U_{CD}$  positiva. Por outro lado, quando  $v_A$  é menor que  $v_B$ , ou seja, quando  $U_{AB}$  é negativa, só  $D_1$  e  $D_3$  conduzem corrente, o que representamos a seguir:



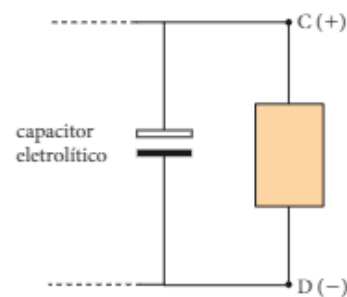
Assim, o potencial de C continua sendo maior que o de D, e  $U_{CD}$  continua sendo positiva. Concluímos, então, que a tensão  $U_{CD}$  é pulsante e não alternada, apesar de  $U_{AB}$  ser alternada. Observe que, como consequência, a corrente elétrica no aparelho tem sempre o mesmo sentido, não sendo, portanto, alternada.

A tensão  $U_{CD}$  está representada a seguir:



Na prática, esse último gráfico apresenta algumas alterações na forma. Uma delas acontece no valor de  $U_{máx}$ , que é um pouco menor que em  $U_{AB}$ , porque os diodos, na condução, não são condutores perfeitos, o que provoca perdas. A tensão  $U_{CD}$ , entretanto, não deixa de ser pulsante.

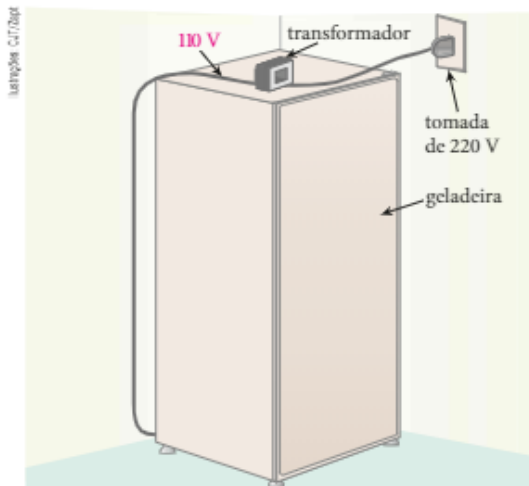
Os aparelhos que precisam de tensão contínua e constante não funcionam bem recebendo a tensão  $U_{CD}$ , que é contínua e pulsante. Por isso, para eliminar satisfatoriamente as variações de  $U_{CD}$ , tornando-a muito aproximadamente constante, é necessário acrescentar um segundo estágio ao circuito, o qual consiste de um capacitor eletrolítico adequado ligado com polaridade correta entre os pontos C e D, com capacitância geralmente alta (da ordem de milhares de microfarads).



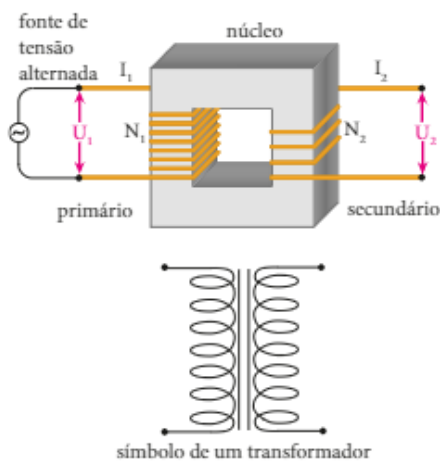
## 11. TRANSFORMADOR DE TENSÃO

Imagine uma geladeira, por exemplo, fabricada para funcionar em 110 V e que precisa ser ligada em uma tomada de 220 V, por ser a única disponível.

A maneira mais viável de fazer isso, sem queimar a geladeira, é usar um aparelho de baixíssimas perdas, denominado **transformador** de tensão. Ele deve receber os 220 V, transformá-los em 110 V e, então, alimentar a geladeira.



Os transformadores possuem dois enrolamentos de fio de cobre esmaltado, isolados eletricamente um do outro. Esses enrolamentos envolvem um bloco de lâminas ferromagnéticas justapostas, denominado núcleo do transformador, como mostra a figura a seguir.



O enrolamento ligado à fonte, cuja tensão alternada (ou, pelo menos, variável) queremos transformar, é denominado **primário**. O outro enrolamento, que vai nos fornecer a tensão alternada desejada, chama-se **secundário**.

A corrente alternada, por ser variável, gera no primário um fluxo de indução também variável. Esse fluxo propaga-se pelo núcleo e atinge o secundário, onde induz uma força eletromotriz também alternada.

Vamos, agora, relacionar a tensão eficaz no secundário,  $U_2$ , com a tensão eficaz no primário,  $U_1$ , para o caso de um transformador ideal, isto é, um transformador que entrega ao secundário toda a potência que recebe no primário, sem nenhuma perda.

Se  $N_1$  e  $N_2$  são as quantidades de espiras do primário e do secundário, respectivamente, pode-se demonstrar que:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Note, então, que as tensões são proporcionais às quantidades de espiras.

Assim, se  $U_1 = 220$  V,  $N_1 = 500$  espiras e  $N_2 = 250$  espiras, por exemplo, temos  $U_2 = 110$  V.

Por outro lado, se tivermos  $U_1 = 110$  V,  $N_1 = 250$  espiras e  $N_2 = 500$  espiras,  $U_2$  será igual a 220 V.

Embora muito baixas, nos transformadores reais existem perdas de energia. Uma das causas dessas perdas é o efeito Joule nos enrolamentos. Outra causa são as correntes de Foucault induzidas no núcleo. Para minimizá-las, o núcleo é feito de uma liga denominada **ferro-silício**, que tem duas características importantes: alta permeabilidade magnética e alta resistividade elétrica. Além disso, o núcleo não é um bloco único, mas sim uma justaposição de lâminas envernizadas, o que também contribui para a redução das correntes de Foucault.

Como estamos tratando de transformador ideal, podemos igualar as potências ( $Pot = U i$ ) no primário e no secundário, obtendo:

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

em que  $I_1$  e  $I_2$  são as correntes eficazes no primário e no secundário, respectivamente.

O quociente  $\frac{N_1}{N_2}$  é denominado **razão de transformação** do transformador. Quando  $N_2$  é maior que  $N_1$ ,  $U_2$  também é maior que  $U_1$  e temos um transformador **elevador** de tensão. Por outro lado, quando  $N_2$  é menor que  $N_1$ ,  $U_2$  é menor que  $U_1$  e o transformador é **abaixador** de tensão.

É importante destacar que um transformador só funciona quando a tensão aplicada no primário é **variável**. De fato, se estabelecermos no primário uma tensão constante, ligando-o a uma bateria, por exemplo, o fluxo de indução também será constante e, como vimos, não ocorrendo variação de fluxo, não haverá indução eletromagnética. Desse modo, a tensão no secundário será nula.

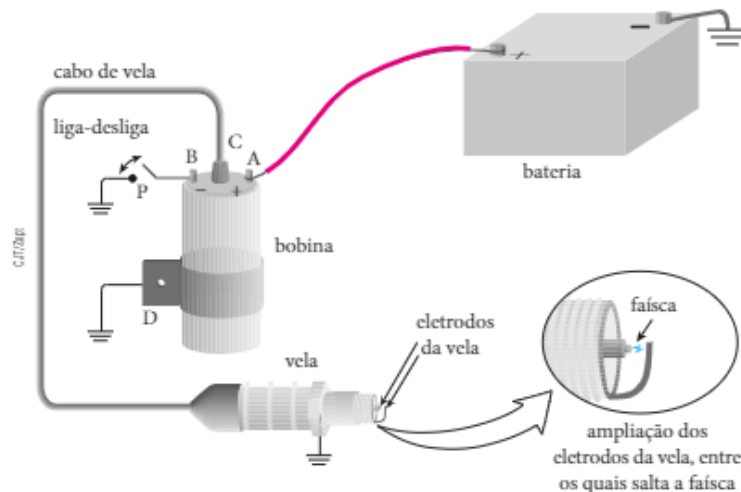
## EM BUSCA DE EXPLICAÇÕES

### Circuito de ignição dos motores a explosão

A bobina, um dos componentes do circuito de ignição dos motores a explosão, tem o mesmo princípio de funcionamento dos transformadores.

No primário, a bobina recebe, de modo **intermitente**, isto é, num “liga-desliga”, os 12 V fornecidos pela bateria. Esse “liga-desliga”, que pode ser produzido por um componente denominado platinado e que é acionado pelo motor, gera no primário uma corrente, também intermitente, de variações bruscas. Consequentemente, o fluxo de indução gerado por esse enrolamento também sofre variações bruscas.

Chegando ao secundário, esse fluxo induz picos de alta-tensão, usualmente de 5 a 10 kV, podendo ser ainda maiores. Esses picos produzem faíscas entre os terminais da vela de ignição e essas faíscas, por sua vez, provocam a combustão da mistura ar-combustível. Note que, se o primário ficasse permanentemente ligado à bateria, recebendo uma tensão constante de 12 V, sem o “liga-desliga”, não haveria indução, como vimos no estudo dos transformadores.



O esquema acima representa, de modo muito simplificado, o circuito descrito. Para entendê-lo, você precisa saber que o polo negativo da bateria de um automóvel, chamado comumente de “terra” e simbolizado por  $\perp$ , é ligado diretamente na estrutura metálica do veículo. Assim, para usar esse polo em determinado local do automóvel, você não precisa de um fio interligando o polo negativo da bateria com esse local, uma vez que esse polo está disponível em qualquer ponto da estrutura metálica.

Na ilustração, A e B são os terminais do enrolamento primário da bobina. O terminal A, identificado com o sinal +, é ligado no polo positivo da bateria, e o terminal B, identificado com o sinal –, é ligado, de modo intermitente, no polo negativo (estrutura metálica ou “terra”) por meio do platinado, que está simbolizado pela chave P.

O terminal C do enrolamento secundário da bobina é ligado, pelo cabo de vela, no eletrodo central da vela. O outro terminal do secundário (D) está ligado à estrutura metálica do veículo e, portanto, ao outro eletrodo da vela.

O “liga-desliga” em P, produzido pela própria rotação do motor, provoca, então, as faíscas entre os eletrodos da vela.

#### NOTA

Nos automóveis modernos não se usa mais o platinado. Neles, o “liga-desliga” é comandado pelo circuito eletrônico do sistema de ignição eletrônica.

## QUESTÕES COMENTADAS



**14** Do instante  $t_1 = 1,0$  s ao instante  $t_2 = 1,2$  s, o fluxo de indução magnética através de uma espira variou de  $\phi_1 = 2,0$  Wb a  $\phi_2 = 8,0$  Wb. Determine a força eletromotriz média induzida na espira, no intervalo de tempo entre  $t_1$  e  $t_2$ .

**RESOLUÇÃO**

O intervalo de tempo considerado é dado por:  $\Delta t = t_2 - t_1$   
Fazendo  $t_1 = 1,0$  s e  $t_2 = 1,2$  s, calculamos  $\Delta t$ :

$$\Delta t = 1,2 - 1,0 \Rightarrow \Delta t = 0,2 \text{ s}$$

A variação de fluxo, nesse intervalo, é dada por:  $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$

Fazendo  $\phi_1 = 2,0$  Wb e  $\phi_2 = 8,0$  Wb, obtemos:

$$\Delta\phi = 8,0 - 2,0 \Rightarrow \Delta\phi = 6,0 \text{ Wb}$$

A força eletromotriz média induzida vem da expressão:

$$\epsilon_m = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

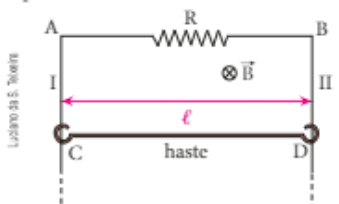
Fazendo  $\Delta\phi = 6,0$  Wb e  $\Delta t = 0,2$  s, calculamos  $\epsilon_m$ :

$$\epsilon_m = -\frac{6,0}{0,2} \Rightarrow \epsilon_m = -30 \text{ V}$$

O sinal negativo do resultado do cálculo da força eletromotriz induzida pode ser interpretado da seguinte forma: por ter ocorrido um aumento do fluxo de indução, a força eletromotriz induzida surgiu para criar fluxo induzido "contra o fluxo indutor" (Lei de Lenz).

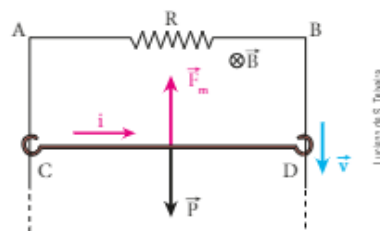
**Resposta:**  $-30$  V

**15** O sistema esquematizado na figura está disposto em um plano vertical. O resistor de resistência  $R = 5 \Omega$  está ligado aos fios I e II, verticais, supostos ideais e muito longos. Uma haste condutora ideal CD de comprimento  $\ell = 1$  m, pesando  $P = 10$  N, é abandonada do repouso e passa a mover-se sem atrito, sempre disposta perpendicularmente aos fios I e II, e sem perder contato com eles. Determine a velocidade máxima atingida pela haste, sabendo que existe um campo magnético uniforme e constante perpendicular ao plano do sistema, como mostra a figura, e de intensidade  $B = 1$  T. Despreze a influência do ar.



**RESOLUÇÃO**

Inicialmente, devido à força peso, a barra é acelerada para baixo. Enquanto a barra se move, a área da espira retangular definida pelos pontos A, B, C e D varia, o que causa uma variação de fluxo e, conseqüentemente, uma fem induzida de módulo  $B \ell v$ , entre C e D.



Surge, então, na espira, uma corrente induzida  $i$  no sentido indicado, dada por:

$$i = \frac{|\epsilon|}{R} = \frac{B \ell v}{R}$$

Como  $B = 1$  T,  $\ell = 1$  m e  $R = 5 \Omega$ , temos:

$$i = \frac{1 \cdot 1 \cdot v}{5} \Rightarrow i = \frac{v}{5}$$

Na haste, atua uma força magnética  $\vec{F}_m$  vertical para cima, de intensidade dada por:  $F_m = B i \ell$

Sendo  $B = 1$  T,  $i = \frac{v}{5}$  e  $\ell = 1$  m, obtemos:

$$F_m = 1 \cdot \frac{v}{5} \cdot 1 \Rightarrow F_m = \frac{v}{5}$$

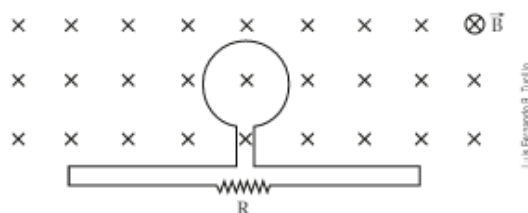
Note que, enquanto a velocidade da haste aumenta, o módulo  $F_m$  da força magnética também aumenta. Assim, quando  $F_m$  torna-se igual a  $P$ , a força resultante na haste é nula e sua velocidade não pode mais crescer. Nesse instante, a velocidade da haste atinge seu valor máximo. Portanto, quando a velocidade é máxima, temos:  $F_m = P$

Como  $F_m = \frac{v_{\text{máx}}}{5}$  e  $P = 10$  N, obtemos:

$$\frac{v_{\text{máx}}}{5} = 10 \Rightarrow v_{\text{máx}} = 50 \text{ m/s}$$

**Resposta:** 50 m/s

**16** O fluxo magnético que atravessa a espira da figura, perpendicularmente ao seu plano e dirigido para o papel, varia com o tempo  $t$  de acordo com a expressão  $\phi = 2 \cdot 10^{-2} t$  (unidades SI).



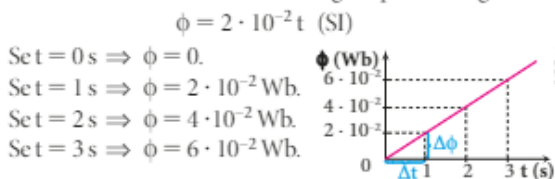
A resistência elétrica da espira é desprezível, mas ela está ligada a um resistor de resistência  $R = 5 \Omega$ . Determine:

- o gráfico do fluxo em função do tempo;
- a força eletromotriz induzida no circuito;
- o sentido da corrente no circuito;
- a intensidade dessa corrente.



**RESOLUÇÃO**

a) Vamos determinar, inicialmente, alguns pontos do gráfico:



Obviamente, dois pontos seriam suficientes, pois  $\phi$  é função do primeiro grau em  $t$ .

b) Analisando o gráfico, percebemos que o fluxo varia em uma taxa constante, dada por:

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Wb/s}$$

Usando a **Lei de Faraday-Neumann**, temos:

$$\epsilon = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} \Rightarrow \epsilon = -2 \cdot 10^{-2} \text{ V}$$

c) Como o fluxo indutor “entrando no papel” está crescendo, a corrente induzida cria fluxo “saindo do papel”. Para isso, essa corrente deve percorrer **R** da esquerda para a direita.

d) Temos que:  $|\epsilon| = R i \Rightarrow i = \frac{|\epsilon|}{R}$

Fazendo  $|\epsilon| = 2 \cdot 10^{-2}$  V e  $R = 5 \Omega$ , calculamos  $i$ :

$$i = \frac{2 \cdot 10^{-2}}{5} \Rightarrow i = 4 \cdot 10^{-3} \text{ A} \text{ ou } i = 4 \text{ mA}$$

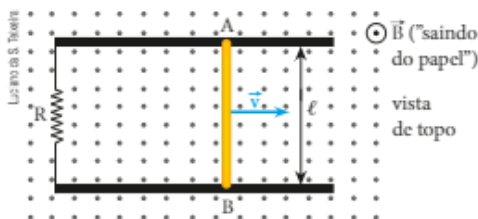
**Respostas:** a) Ver resolução.

b)  $-2 \cdot 10^{-2}$  V.

c) Da esquerda para a direita.

d)  $4 \cdot 10^{-3}$  A ou 4 mA.

**17** Uma barra metálica AB de comprimento  $\ell = 50$  cm desliza, sem atrito e com velocidade constante de módulo  $v = 5,0$  m/s, apoiando-se em dois trilhos condutores paralelos interligados por um resistor de resistência  $R = 2,0 \cdot 10^{-2} \Omega$ . A barra e os trilhos têm resistência elétrica desprezível. O conjunto está imerso em um campo de indução magnética uniforme e constante, de módulo  $B = 2,0 \cdot 10^{-2}$  T, perpendicular ao plano dos trilhos, que é horizontal:



Determine:

- a) o módulo da força eletromotriz induzida no circuito;
- b) o sentido da corrente induzida, em relação ao leitor;
- c) a intensidade da corrente induzida;
- d) a intensidade e o sentido da força magnética que atua na barra;

- e) a intensidade e o sentido da força que um operador deve aplicar na barra, na mesma direção da força magnética, para manter sua velocidade constante;
- f) a energia dissipada no circuito, enquanto a barra percorre 5,0 m;
- g) o trabalho realizado pela força aplicada pelo operador, nesse percurso de 5,0 m.

**RESOLUÇÃO**

a) Em situações como esta, o módulo da fem induzida é dado por:  $|\epsilon| = B \ell v$

Sendo  $B = 2,0 \cdot 10^{-2}$  T,  $\ell = 50$  cm =  $50 \cdot 10^{-2}$  m e  $v = 5,0$  m/s, calculamos  $|\epsilon|$ :

$$|\epsilon| = 2,0 \cdot 10^{-2} \cdot 50 \cdot 10^{-2} \cdot 5,0 \Rightarrow |\epsilon| = 5,0 \cdot 10^{-2} \text{ V}$$

b) Com o movimento da barra aumenta o fluxo de indução “saindo do papel”. Esse aumento ocorre devido ao aumento gradativo da área da espira constituída. Portanto, a corrente induzida deve surgir num sentido tal que gere um fluxo induzido “contrário” ao fluxo indutor, ou seja, um fluxo induzido “entrando no papel”. Para isso, a corrente induzida deve circular no sentido horário.

c) A fem induzida é que determina o aparecimento da corrente induzida. Assim:

$$|\epsilon| = R i \Rightarrow i = \frac{|\epsilon|}{R}$$

Fazendo  $|\epsilon| = 5,0 \cdot 10^{-2}$  V e  $R = 2,0 \cdot 10^{-2} \Omega$ , calculamos  $i$ :

$$i = \frac{5,0 \cdot 10^{-2}}{2,0 \cdot 10^{-2}} \Rightarrow i = 2,5 \text{ A}$$

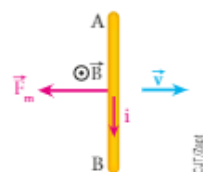
d) A força magnética  $\vec{F}_m$  tem sua intensidade dada por:

$$F_m = B i \ell \sin \theta$$

Como  $B = 2,0 \cdot 10^{-2}$  T,  $i = 2,5$  A,  $\ell = 50$  cm =  $50 \cdot 10^{-2}$  m e  $\sin \theta = \sin 90^\circ = 1$ , calculamos  $F_m$ :

$$F_m = 2,0 \cdot 10^{-2} \cdot 2,5 \cdot 50 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \Rightarrow F_m = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ N}$$

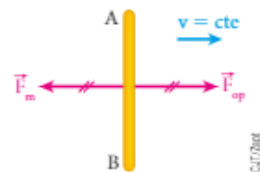
Aplicando a regra da mão direita espalmada, concluímos que  $\vec{F}_m$  está orientada da direita para a esquerda. Observe, mais uma vez, que a força magnética surge de modo que contrarie o movimento que causa a variação do fluxo. Assim, também poderíamos partir desse fato para determinar o sentido da corrente induzida.



e) Como a barra está em MRU, a força resultante nela deve ser nula. Assim, a força  $\vec{F}_{op}$  aplicada pelo operador deve ter a mesma intensidade e sentido oposto ao de  $\vec{F}_m$ . Portanto,  $\vec{F}_{op}$  está orientada da esquerda para a direita e sua intensidade é dada por:

$$F_{op} = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ N}$$

Se a força  $\vec{F}_{op}$  deixar de atuar, o movimento da barra passará a ser retardado.



f) A energia dissipada em **R** é dada por:

$$E_d = \text{Pot} \cdot \Delta t = R i^2 \Delta t$$

Fazendo  $R = 2,0 \cdot 10^{-2} \Omega$ ,  $i = 2,5 \text{ A}$  e  $\Delta t = 1,0 \text{ s}$  (intervalo de tempo para a barra percorrer 5,0 m, movendo-se a 5,0 m/s), calculamos  $E_d$ :

$$E_d = 2,0 \cdot 10^{-2} \cdot (2,5)^2 \cdot 1,0 \Rightarrow E_d = 1,25 \cdot 10^{-1} \text{ J}$$

g) 

O trabalho realizado pela força do operador é dado por:

$$\tau_{op} = F_{op} d \cos \theta$$

Fazendo  $F_{op} = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ N}$ ,  $d = 5,0 \text{ m}$  e  $\cos \theta = \cos 0 = 1$ , calculamos  $\tau_{op}$ :

$$\tau_{op} = 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot 5,0 \cdot 1 \Rightarrow \tau_{op} = 1,25 \cdot 10^{-1} \text{ J}$$

**Importante:**

Podemos constatar, nos itens **f** e **g**, a conservação da energia. De fato, concluímos que a energia elétrica dissipada na resistência é igual ao trabalho realizado pela força exercida pelo operador. Esse trabalho é a energia que o operador fornece ao sistema e que se converte em energia elétrica.

**Respostas:** a)  $5,0 \cdot 10^{-2} \text{ V}$

b) Sentido horário.

c) 2,5 A

d)  $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ N}$ , da direita para a esquerda.

e)  $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ N}$ , da esquerda para a direita.

f)  $1,25 \cdot 10^{-1} \text{ J}$

g)  $1,25 \cdot 10^{-1} \text{ J}$

**18** Para reduzir uma tensão alternada, de 120 V para 12 V, usa-se um transformador, suposto ideal. Sabendo que o número de espiras do primário é 800 e que a intensidade da corrente no secundário é igual a 2 A, calcule:

a) o número de espiras do secundário;

b) a intensidade da corrente no primário.

**RESOLUÇÃO**

No primário, temos:

$$N_1 = 800, U_1 = 120 \text{ V e } I_1 = ?$$

No secundário, temos:  $N_2 = ?$ ,  $U_2 = 12 \text{ V e } I_2 = 2 \text{ A}$

a) Sabemos que:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow \frac{120}{12} = \frac{800}{N_2} \Rightarrow N_2 = 80 \text{ espiras}$$

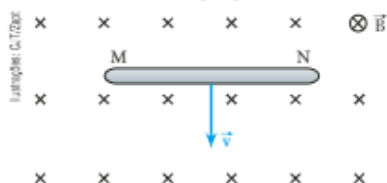
b) Vamos igualar as potências no primário e no secundário:

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 \Rightarrow 120 \cdot I_1 = 12 \cdot 2 \Rightarrow I_1 = 0,2 \text{ A}$$

**Respostas:** a) 80 espiras. b) 0,2 A

**QUESTÕES PROPOSTAS** FAÇA NO CADERNO.

**19.** Uma barra de cobre MN, disposta perpendicularmente às linhas de indução de um campo magnético uniforme  $\vec{B}$ , move-se com velocidade  $\vec{v}$  perpendicular a  $\vec{B}$ .



Sendo  $B = 0,50 \text{ T}$ ,  $v = 100 \text{ m/s}$  e  $\ell = 1,0 \text{ m}$  o comprimento da barra:

a) calcule o módulo da força eletromotriz induzida entre suas extremidades;

b) determine a polaridade elétrica das extremidades M e N.

**20.** Um avião encontra-se em movimento retilíneo e horizontal, a 250 m/s, em um local onde o campo magnético terrestre possui uma componente vertical de  $2,0 \cdot 10^{-5} \text{ T}$  de intensidade. Sabendo que a distância entre as extremidades das asas desse avião é igual a 20 m, estime o módulo da força eletromotriz induzida entre esses pontos. As asas desse avião são metálicas e estão em contato elétrico com a fuselagem também metálica. Veja a ilustração a seguir.

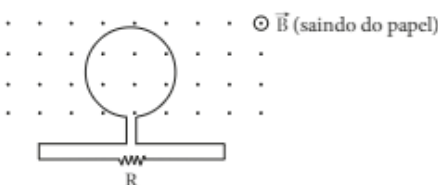


**21.** Durante um intervalo de tempo de duração igual a  $5 \cdot 10^{-2} \text{ s}$ , uma espira percebe uma redução de fluxo de 5 Wb para 2 Wb.

a) Calcule a força eletromotriz média induzida.

b) Interprete o sinal do resultado.

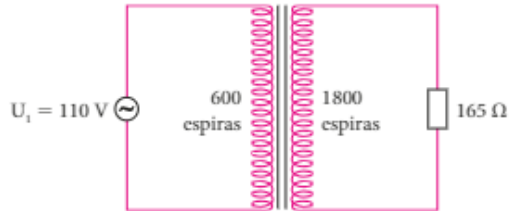
**22.** A figura a seguir mostra uma espira circular perfeitamente condutora, de área igual a  $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$ , imersa em um campo magnético uniforme, perpendicular ao plano da espira.



No instante  $t_1 = 1,0 \text{ s}$ , o módulo do vetor indução magnética vale 0,20 T. Em seguida, o módulo desse vetor aumenta e, no instante  $t_2 = 3,0 \text{ s}$ , passa a valer 1,4 T. Ligado à espira, existe um resistor de resistência igual a 2,0 mΩ. Determine:

- a) os fluxos, nos instantes  $t_1$  e  $t_2$ ;  
 b) a força eletromotriz média induzida;  
 c) o sentido da corrente elétrica no resistor, durante o crescimento do módulo de  $\vec{B}$ ;  
 d) a intensidade da corrente elétrica média.

23. Na figura a seguir, considere o transformador ideal.

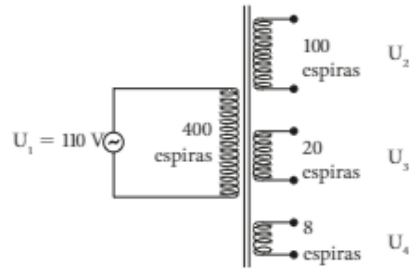


Calcule a intensidade da corrente:

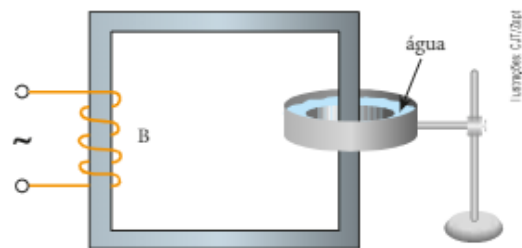
- a) no secundário;      b) no primário.

24. Uma bateria de 12 V é mantida ligada entre os terminais do primário de um transformador. Quanto indica um voltímetro conectado entre os terminais do secundário?

25. Existem transformadores que possuem um primário e vários secundários, como exemplificamos na figura. Considerando o transformador ideal, calcule os valores  $U_2$ ,  $U_3$  e  $U_4$  das tensões nos três secundários.



26. A armação a seguir é constituída por lâminas de ferro delgadas coladas umas nas outras. A bobina B é ligada a uma fonte de tensão, passando a ser percorrida por uma corrente alternada (fonte de 110 V–60 Hz). O aro de alumínio, em forma de calha, contém água a 20 °C e é atravessado pela armação, conforme indica a figura a seguir:



O que passará a ocorrer com a temperatura da água?



## DESCUBRA MAIS

- 1 Nas guitarras elétricas, as vibrações das cordas geram pequenos sinais elétricos que, depois de amplificados, chegam aos alto-falantes, onde são produzidos os sons que ouvimos. Como funcionam os captadores das vibrações das cordas?
- 2 Em uma situação de emergência, um electricista usou uma lâmpada especificada por 150 W–220 V, em um local em que a tensão da rede elétrica é de 110 V. Ele dispunha de fios de cobre com isolamento, de vários plugues ("macho" e "fêmea") e de um transformador especificado por:
  - potência: 300 W;
  - tensão de entrada (primário): 220 V;
  - tensão de saída (secundário): 110 V.
 O que esse electricista fez para usar a lâmpada com seu brilho normal?
- 3 Entre os geradores em que ocorre conversão de energia mecânica em energia elétrica há os **alternadores**, que produzem tensão alternada, e os **dinamos**, que produzem tensão contínua praticamente constante.
  - a) Como os dinamos produzem esse tipo de tensão?
  - b) Um motor elétrico de corrente contínua pode operar como dinamo?
- 4 Qual é o papel do reator no funcionamento de lâmpadas fluorescentes?

## Indução eletromagnética e geração de energia elétrica

Praticamente todos os equipamentos da moderna tecnologia precisam de eletricidade para funcionar. Mas de onde vem a energia elétrica que as pessoas obtêm simplesmente plugando seus utensílios às tomadas?

A resposta é: de usinas produtoras que utilizam diversas concepções técnicas para promover o intercâmbio energético. As hidrelétricas utilizam a energia mecânica disponível nas águas de imensas represas, as termelétricas promovem a queima de derivados do petróleo, carvão e outros insumos para produzir a energia térmica que vai se converter em energia elétrica, e as instalações nucleares baseiam-se na fissão nuclear de elementos como o urânio enriquecido ( $U^{235}$ ). Já as usinas eólicas aproveitam a energia dos ventos.

Entretanto em todas essas fontes produtoras de energia elétrica há algo em comum: eficientes geradores que, por processos eletromagnéticos, convertem a energia mecânica do giro de seus rotores em energia elétrica.

Geradores elétricos têm como princípio de funcionamento o fenômeno da indução eletromagnética descoberto em 1831 por Michael Faraday.



Nessa fotografia vê-se um conjunto de geradores em uma usina produtora de energia elétrica. Eles convertem a energia mecânica disponível em seus eixos em energia elétrica. O processo de conversão é fundamentado no fenômeno da indução eletromagnética.

Vamos conhecer um pouco da saga de Faraday rumo à indução eletromagnética lendo o texto a seguir.

[...] No laboratório, o despreocupado Faraday trabalhava agora mais arduamente do que nunca para encontrar a resposta a uma questão que o intrigava desde a descoberta do motor elétrico. Se a eletricidade podia produzir o magnetismo, por que não seria o inverso verdadeiro – por que não poderia o magnetismo produzir eletricidade?

Muitos cientistas se puseram a mesma questão, mas não conseguiram encontrar uma resposta, nem mesmo Oersted teve sucesso, apesar de ter trabalhado dia e noite para descobrir o complemento lógico da sua descoberta original.

A 29 de agosto de 1831, Faraday encontrou o filão. Começou a enrolar um comprido fio metálico à volta de um segmento de um anel de ferro e em seguida fez o mesmo em torno de outro segmento do anel. Se os fios metálicos fossem ligaduras, o braço circular do anel aparentaria possuir feridas em dois pontos opostos.

Como sempre, o plano de ação de Faraday era bastante simples: faria passar uma corrente elétrica pela primeira ligadura de fio, produzindo um vento magnético que percorreria todo o anel. Se a dita tempestade magnética produzisse uma corrente elétrica na outra ligadura de fio, Faraday teria encontrado aquilo que todos procuravam: o magnetismo teria criado eletricidade.

Se tal acontecesse, antevia Faraday, provavelmente a corrente elétrica produzida seria extremamente débil; caso contrário, quase que certeza de que outros já a teriam detectado há muito. Assim, ligou à segunda ligadura um amperímetro capaz de detectar o menos intenso vestígio de corrente elétrica; estava pronto para tudo – ou para nada...

Ao eletrificar a primeira ligadura por meio de uma pilha voltaica, olhou esperançoso para o amperímetro. O ponteiro moveu-se! “Oscilou e voltou à posição de repouso”, escreveu histericamente no registro.

Durante alguns momentos, Faraday olhou estupefato para o ponteiro. Voltaria ele a mover-se? Após alguns minutos de espera em vão, desistiu. Todavia, ao desligar a pilha ficou surpreendido ao observar “mais uma vez uma perturbação no amperímetro”.

Durante o resto da noite, Faraday continuou a ligar e a desligar o anel da pilha; de cada vez que tal acontecia, o ponteiro do amperímetro movia-se em espasmos. Finalmente, fez-se a luz no seu espírito e nesse momento sentiu-se como o jovem que saltara de alegria numa véspera de um Natal quase vinte anos antes.

A corrente elétrica na primeira ligadura produzia um tornado magnético; por sua vez esse redemoinho produzia uma corrente elétrica na outra ligadura – mas tal acontecia apenas quando a intensidade do tornado **aumentava** ou **diminuí**a. Estavam explicados então os saltos do ponteiro: de cada vez que Faraday ligava/desligava a pilha, o tornado magnético surgia/desaparecia, produzindo o efeito. Entre esses dois momentos, desde que os ventos magnéticos se mantivessem estáveis ao longo do anel de ferro, nada acontecia.

Assemelhava-se a alguém que tivesse vivido toda a vida perto de um farol e um dia notasse que a sirene do nevoeiro não emitia o som habitual, ou começava a funcionar passado um longo período de inatividade. Porém, desde que a sirene continuasse a funcionar sem alterações, essa pessoa não teria reação alguma.

Durante os meses seguintes, Faraday passou em revista e refinou o equipamento, chegando sempre às mesmas conclusões que confirmavam a descoberta original. Em 1831, finalmente, o prodígio do Royal Institution, então com a idade de 40 anos, resumia sua descoberta histórica numa frase:

“Sempre que uma força magnética aumenta ou diminui, produz eletricidade; quanto mais depressa se dá esse aumento ou diminuição, mais eletricidade se produz”. [...]

GUILLIEN, Michael. *Cinco equações que mudaram o mundo*. Lisboa: Gradiva, 1998.



Com esse aparato experimental, é possível verificar o fenômeno da indução eletromagnética. Ligando-se a chave, ocorre a variação, durante um breve intervalo de tempo, do fluxo magnético no enrolamento da direita (indutor). Isso faz surgir no enrolamento da esquerda (induzido), durante o mesmo intervalo de tempo, uma corrente elétrica que, ao percorrer os fios colocados sobre a agulha magnética, provoca sua deflexão.

### Compreensão, pesquisa e debate

1. O aumento da população, aliado aos utensílios que a tecnologia coloca à disposição das pessoas, incrementa cada vez mais o consumo de energia elétrica. Que fontes alternativas de energia podem ser cogitadas para suprir essa demanda crescente?
2. Fundamentado em seus conhecimentos sobre Eletromagnetismo, elabore um esquema simplificado mostrando como funciona um dispositivo capaz de converter energia mecânica em energia elétrica.
3. Se Michael Faraday não tivesse existido, como seria, na sua opinião, a tecnologia de hoje?

UNIDADE

4

## FÍSICA MODERNA

A Física Moderna é a parte da ciência física que se estende além das teorias clássicas, construídas principalmente entre os séculos XVII e XIX. Esse novo saber teve sua gênese no final do século XIX e notável desenvolvimento na primeira metade do século passado, estendendo-se aos dias atuais.



Cientista usando *laser* para operar um relógio atômico. O *laser* está presente hoje em vasta gama de aparelhos, como tocadores de CD, de DVD e de blu-ray, além de equipamentos médicos e industriais.

NESTA  
UNIDADE

12

NOÇÕES DE  
FÍSICA QUÂNTICA

13

MAIS DE FÍSICA MODERNA:  
RELATIVIDADE E OUTRAS  
NOÇÕES



# NOÇÕES DE FÍSICA QUÂNTICA

## 1. INTRODUÇÃO

Praticamente tudo o que você estudou até agora constitui a chamada **Física Clássica**.

Apesar de sua extraordinária utilidade, a Física Clássica não consegue explicar um grande número de fenômenos físicos extremamente importantes.

De fato, no final do século XIX e início do século XX, várias questões continuavam sem resposta. Grandes foram os esforços de muitos físicos experimentais e teóricos para explicar o comportamento da matéria nas escalas atômica e subatômica, utilizando a Física Clássica. Entretanto, algum fato sempre ficava sem explicação.

Em 1900, porém, iniciou-se o desenvolvimento da **Física Quântica**, uma teoria que só ficou “pronta” cerca de trinta anos depois.

Como veremos, essa nova teoria foi capaz de explicar satisfatoriamente muitos dos problemas que pareciam não ter solução. Mais do que isso: desenvolvida originalmente para explicar a matéria nas escalas atômica e subatômica, ela se mostrou aplicável também a sistemas macroscópicos.

A seguir, estudaremos mais dois itens da Física Clássica, muito importantes por si só e necessários para introduzirmos noções de Física Quântica.

## 2. MODELO ONDULATÓRIO PARA AS RADIAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS

O físico escocês James Clerk **Maxwell** (1831-1879) estabeleceu, por volta de 1860, quatro equações que sintetizaram as grandes leis que regem os fenômenos elétricos e magnéticos.

Essas equações implicavam a possibilidade da propagação conjunta de campo elétrico e campo

magnético. De fato, a partir delas pode-se concluir que:

- um campo elétrico  $\vec{E}$ , variável com o tempo, induz o surgimento de um campo magnético  $\vec{B}$ ;
- um campo magnético  $\vec{B}$ , variável com o tempo, induz o surgimento de um campo elétrico  $\vec{E}$ .

Então, se em um determinado local forem gerados um campo elétrico e um campo magnético, ambos variáveis com o tempo, um poderá sustentar a existência do outro, tornando possíveis a coexistência e a propagação de ambos.

Esses dois campos, ao se propagarem, constituem as chamadas **radiações eletromagnéticas**, como as ondas de rádio, a luz visível, as micro-ondas, os raios X, os raios  $\gamma$  etc.



Prata 12 - Arquivo Domínio Público

**James Clerk Maxwell.** Físico escocês, desenvolveu a teoria ondulatória eletromagnética e a teoria cinética dos gases.

Essas radiações, por apresentarem comportamento ondulatório nos fenômenos relacionados à **propagação** – por exemplo, elas sofrem interferência e difração –, também são denominadas **ondas eletromagnéticas**.

A previsão teórica da possibilidade da existência dessas ondas foi confirmada experimentalmente pelo físico alemão Heinrich **Hertz** (1857-1894) em 1887, quando gerou e detectou ondas eletromagnéticas de rádio em laboratório.



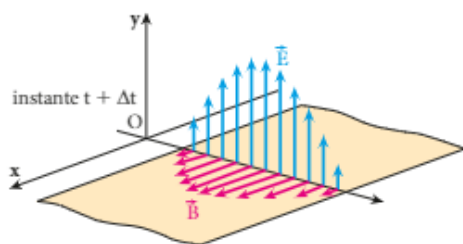
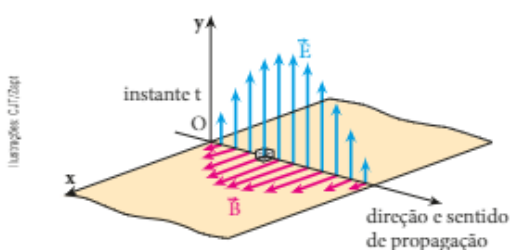
Henry Guttmann/Arquivo Domínio Público

**Heinrich Rudolf Hertz.** A unidade de medida de frequência *hertz* recebeu esse nome em sua homenagem.

Segundo a teoria eletromagnética de Maxwell, as ondas eletromagnéticas são geradas por cargas elétricas dotadas de aceleração de qualquer tipo. Ondas eletromagnéticas são geradas, por exemplo, por elétrons oscilantes. É dessa maneira que a antena de uma emissora de rádio emite suas ondas. Hertz, na confirmação experimental que fez, também gerou ondas eletromagnéticas a partir de elétrons oscilantes.

Quando um elétron (ou outra partícula dotada de carga elétrica) realiza um movimento de frequência  $f$ , a onda eletromagnética emitida também tem frequência  $f$ .

Veja, na ilustração a seguir, a representação esquemática de um pulso eletromagnético propagando-se (no caso particular de uma onda eletromagnética **plano-polarizada**).



Note que os campos elétrico ( $\vec{E}$ ) e magnético ( $\vec{B}$ ) são variáveis com o tempo e a posição. Observe também que esses campos são perpendiculares entre si e, além disso, à direção de propagação.

Aprende-se em **Ondulatória** que uma onda eletromagnética não requer a presença de um meio material para se propagar, podendo, portanto, propagar-se no vácuo. A velocidade de propagação dessas ondas no vácuo,  $c$ , foi calculada por Maxwell por meio da seguinte relação advinda de suas equações, antes de saber que a luz é uma onda eletromagnética:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

Nessa expressão,  $\epsilon_0$  e  $\mu_0$  são, respectivamente, a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética do vácuo.

Sendo  $\epsilon_0 = 8,85418 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$  e

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Tm}{A}$ , obtemos  $c$  aproximadamente igual a  $2,99792 \cdot 10^8$  m/s.

Esse resultado, válido tanto no vácuo como no ar, coincidiu com a velocidade de propagação da luz no ar, determinada experimentalmente. Maxwell, então, concluiu, corretamente, que a luz visível também é uma onda eletromagnética.

Uma característica notável das ondas eletromagnéticas é o fato de elas não **interagirem com campos elétricos nem com campos magnéticos** eventualmente presentes no meio por onde passam. Então, a luz, por exemplo, não sofre desvios quando passa perto de um corpo eletrizado ou de um polo magnético.

#### NOTA

Na época de Maxwell, falava-se em cargas elétricas, mas não em elétrons, uma vez que eles só foram descobertos mais tarde, em 1897.

## 3. A RADIAÇÃO TÉRMICA E O CORPO NEGRO

### A radiação térmica

A superfície de todo corpo, em qualquer temperatura acima do zero absoluto, emite energia na forma de radiações eletromagnéticas. Por estar relacionada com a temperatura do corpo que a emite, essa energia é denominada **radiação térmica**.

Quando a superfície do corpo está na temperatura ambiente, a radiação térmica emitida por ele é predominantemente infravermelha. Como sabemos, essa radiação não é visível. Usando um binóculo especial, entretanto, esse corpo pode ser "visto" mesmo na mais completa escuridão, pois esse binóculo funciona graças à recepção da radiação infravermelha emitida pelo corpo.

Elevando a temperatura do corpo – uma chapa metálica, por exemplo – até cerca de  $600^\circ\text{C}$ , a radiação térmica continua sendo predominantemente infravermelha, porém mais intensa.

Se a temperatura da chapa for elevada a cerca de  $700^\circ\text{C}$ , além de radiações infravermelhas mais intensas, será observada a emissão de uma tênue luz avermelhada.

Elevando a temperatura da chapa gradualmente a partir dos  $700^\circ\text{C}$  e supondo que sua temperatura de fusão não seja atingida, serão percebidas radiações infravermelhas cada vez mais intensas e a chapa ficará cada



vez mais luminosa. Além disso, a cor predominante da luz emitida por ela passará gradualmente do vermelho para o alaranjado, do alaranjado para o amarelo, e assim por diante, tendendo à coloração branca.

Uma boa versão da “cor branca” ocorre quando a luz **azul** passa a ser emitida: sua mistura com as outras, que também continuam sendo emitidas, nos dá a sensação do branco, como ocorre no filamento de uma lâmpada de incandescência acesa.

Aumentando ainda mais a temperatura de um corpo que já atingiu a coloração branca, ele passará a apresentar uma coloração azulada. É por isso que as estrelas mais quentes são azuladas.

### Lei de Stefan-Boltzmann

O físico austríaco Josef **Stefan** (1835-1893) obteve, em 1879, empiricamente, a seguinte expressão, que outro físico austríaco, Ludwig **Boltzmann** (1844-1906), demonstrou matematicamente em 1884:

$$\text{Pot} = e \sigma A T^4 \quad (\text{Lei de Stefan-Boltzmann})$$

Nessa expressão, Pot é a **potência total** irradiada pela superfície externa de um corpo (energia total da radiação emitida por unidade de tempo) que se encontra a uma temperatura absoluta T; e é a **emissividade** ou poder de emissão do corpo, uma grandeza adimensional que depende da natureza da superfície emissora e que pode assumir valores entre 0 e 1;  $\sigma$  é uma constante universal denominada **constante de Stefan-Boltzmann**:

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}; A \text{ é a área da superfície emissora.}$$

Observe na lei apresentada que, se a temperatura absoluta da superfície de um corpo, por exemplo, dobrar, a potência irradiada por ele ficará multiplicada por  $2^4$ , ou seja, por 16.

A Lei de Stefan-Boltzmann também pode ser expressa assim:

$$I = e \sigma T^4$$

em que I é a intensidade total da radiação térmica emitida por um corpo – quantidade total de energia emitida por unidade de tempo e por unidade de área da superfície externa do corpo – cuja superfície externa encontra-se a uma temperatura

$$T \left( I = \frac{\text{Pot}}{A} \right).$$

Segundo a **teoria eletromagnética clássica** (modelo ondulatório de Maxwell), a radiação térmica é

emitida por cargas elétricas do corpo, oscilando nas mais variadas frequências perto de sua superfície, em virtude da agitação térmica. Desse modo, a radiação é emitida numa faixa **contínua** de frequências (espectro contínuo).



Parte visível do espectro da radiação térmica emitida pelo filamento de uma lâmpada de incandescência. Esse espectro é contínuo e pode ser obtido fazendo-se um estreito feixe da radiação atravessar um prisma óptico ou um conjunto de fendas muito estreitas, paralelas entre si e próximas umas das outras (rede de difração).

Pela mesma teoria, quando a radiação térmica incide num corpo, ela agita as cargas elétricas situadas perto da sua superfície. Com isso, parte da energia incidente no corpo é absorvida por ele.

A superfície de cada corpo tem uma **absorvidade** ou poder de absorção **a**.

Em 1859, Gustav Robert **Kirchhoff** (1824-1887), físico alemão, concluiu que o poder de absorção de um corpo é igual ao seu poder de emissão, ou seja:

$$a = e$$

Isso significa que um corpo **bom absorvedor** de radiação térmica (mau refletor) também é um **bom emissor** e que um **mau absorvedor** (bom refletor) é um **mau emissor**.

Todo corpo está emitindo e absorvendo energia na forma de radiação térmica. Quando, em cada unidade de tempo, o corpo absorve mais energia do que emite, sua temperatura tende a aumentar. Quando, porém, emite mais do que absorve, sua temperatura tende a diminuir.

No equilíbrio térmico (temperatura constante e igual à do ambiente), as quantidades de energia absorvida e emitida na forma de radiação térmica, por unidade de tempo, são iguais.

### Radiação do corpo negro

**Corpo negro** é um corpo ideal que absorve **toda** a radiação térmica que incide nele. Assim, ele é um absorvedor perfeito, ou seja, seu poder de absorção **a** é igual a 1.

Embora se trate de uma idealização, existem maneiras de obter, na prática, corpos que se comportam aproximadamente como um corpo negro. Uma delas é revestir um corpo qualquer com uma camada irregular de pigmentos pretos.

Lembrando que  $\epsilon = e$ , temos que a emissividade de um corpo negro também é igual a 1 ( $e = 1$ ). Assim, ele é um absorvedor ideal e um emissor ideal.

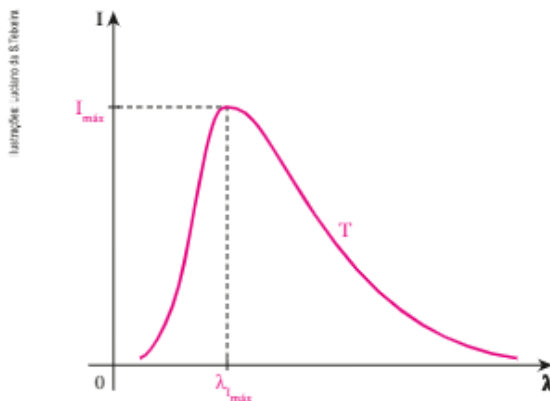
Fazendo  $e = 1$  numa das expressões apresentadas para a Lei de Stefan-Boltzmann, temos:

$$I = \sigma T^4$$

Portanto, **qualquer corpo negro**, na mesma temperatura, emite radiação térmica com a mesma intensidade total. Além disso, na mesma temperatura, cada radiação de determinado comprimento de onda  $\lambda$  também é emitida com a mesma intensidade por qualquer corpo negro, independentemente do material de que ele é feito.

Os corpos negros ganharam grande interesse teórico devido às características universais da radiação térmica que emitem. A partir da análise do espectro de emissão desses corpos, nasceu a ideia da **quantização da energia**, como veremos adiante.

Veja, a seguir, a representação gráfica da intensidade  $I$  da radiação emitida por um corpo negro em função do comprimento de onda  $\lambda$ , obtida experimentalmente numa determinada temperatura  $T$ .



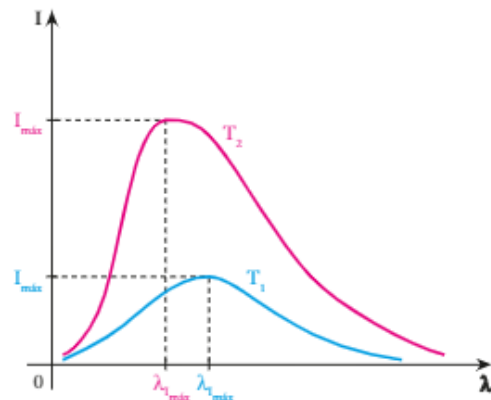
Nesse gráfico, é importante observar que:

- a radiação térmica emitida é constituída de muitas radiações distribuídas em uma faixa contínua de comprimentos de onda;
- existe uma radiação, de determinado comprimento de onda, que é emitida com intensidade

máxima,  $I_{\text{máx}}$ . O símbolo que adotamos para esse comprimento de onda,  $\lambda_{I_{\text{máx}}}$ , deve ser entendido assim: comprimento de onda da radiação que é emitida com intensidade máxima.

## Lei de deslocamento de Wien

Veja, na figura a seguir, o aspecto dos gráficos da intensidade  $I$  das radiações emitidas no ar por um corpo negro, em duas temperaturas,  $T_1$  e  $T_2$  ( $T_2 > T_1$ ), em função do comprimento de onda  $\lambda$ .



Quando a temperatura do corpo passa de  $T_1$  para  $T_2$ , é importante observar que:

- a intensidade de **cada** radiação emitida, de um dado comprimento de onda  $\lambda$ , aumenta. Assim, a intensidade **total** da radiação emitida também aumenta, e o mesmo ocorre com a potência total irradiada;
- o ponto de máximo da curva se desloca de modo que  $\lambda_{I_{\text{máx}}}$  **diminui**, o que equivale a dizer que a frequência correspondente aumenta.

Em 1893, o físico alemão Wilhelm **Wien** (1864-1928) demonstrou que o ponto de máximo da curva  $I \times \lambda$  se desloca de acordo com a seguinte expressão:

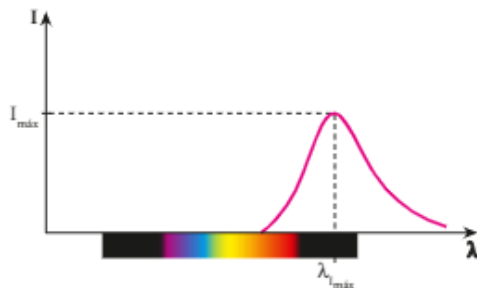
$$\lambda_{I_{\text{máx}}} = \frac{b}{T} \quad (\text{Lei de deslocamento de Wien})$$

em que  $b$  é uma constante dada por:

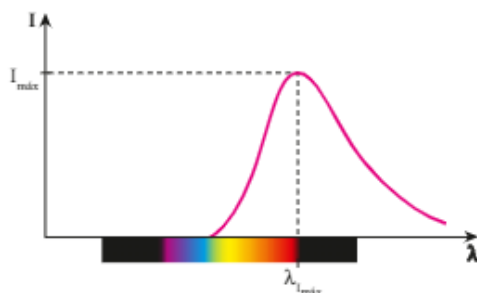
$$b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

Na sequência de imagens a seguir, podemos notar que, com a elevação da temperatura, as intensidades  $I$  de todas as radiações emitidas aumentam e  $\lambda_{I_{\text{máx}}}$  se desloca para valores menores.

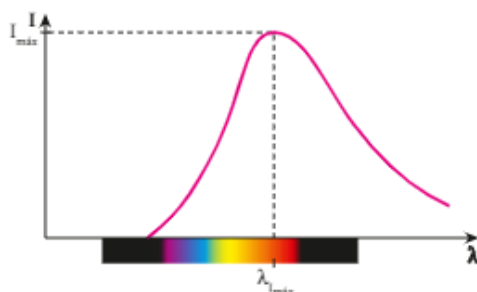
A extremidade direita da barra foi aquecida a cerca de 700 °C, emitindo com maior intensidade o infravermelho e, com menor intensidade, luz na região do vermelho.



A extremidade direita da barra foi aquecida a cerca de 1 200 °C. Nessa situação é emitida uma parte mais ampla do espectro visível, mas o infravermelho ainda predomina.



A extremidade direita da barra foi aquecida a cerca de 1 500 °C. Agora, todo o espectro visível já é emitido. Por isso começamos a ter a sensação da “cor branca”.

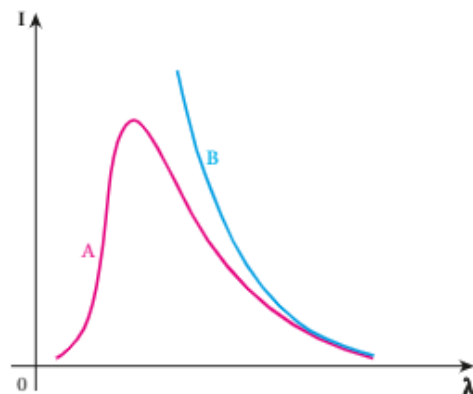


## 4. MODELO QUÂNTICO PARA AS RADIAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS

Embora a teoria eletromagnética de Maxwell tenha se mostrado correta no que se refere a fenômenos relacionados com a propagação das radiações eletromagnéticas, o mesmo não aconteceu com relação a alguns fenômenos que ocorrem na **interação** dessas radiações com a matéria e com relação a alguns fatos importantes referentes a sua emissão.

O espectro de emissão do corpo negro, exaustivamente analisado na segunda metade do século XIX, foi o primeiro exemplo da incompatibilidade entre os resultados experimentais e as previsões decorrentes daquela teoria, como será comentado a seguir.

O gráfico da intensidade  $I$  da radiação do corpo negro em função do comprimento de onda  $\lambda$ , previsto pela teoria eletromagnética de Maxwell (modelo ondulatório), é muito diferente do gráfico obtido por meio de experimentos, principalmente na região dos comprimentos de onda menores.



A é a curva obtida a partir de resultados experimentais e B é a curva prevista pela teoria clássica.

Essa discrepância foi um grande transtorno para os físicos no final do século XIX e ficou conhecida como “a catástrofe do ultravioleta”.

Em dezembro de 1900, o físico alemão Max **Planck** (1858-1947) apresentou uma teoria para contornar o problema. Além de audaciosa, ela conflitava drasticamente com a teoria clássica.

Nela, Planck considerou que, na superfície do corpo negro, existem osciladores harmônicos simples (cargas elétricas oscilantes) que só podem ter determinados valores  $E$  de energia, dados pela expressão:

$$E = n h f \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

Nessa expressão, o número inteiro  $n$  é denominado **número quântico**,  $h$  é uma constante que recebeu o nome de **constante de Planck** e  $f$  é a frequência do oscilador.

Para cada valor de  $n$ , o oscilador está em um determinado **estado quântico**. Assim, no estado quântico  $n = 1$  sua energia é  $1 h f$ ; no estado quântico  $n = 2$  sua energia é  $2 h f$ , e assim por diante. Isso significa que a energia do oscilador é **quantizada**, ou seja, só pode ter determinados valores, no caso múltiplos inteiros de  $h f$ .

É importante destacar que essa teoria de fato contraria totalmente a Física Clássica, segundo a qual um determinado oscilador harmônico simples pode ter qualquer quantidade de energia  $e$ , além disso, essa energia não depende da frequência, mas apenas da amplitude de suas oscilações.

Em sua teoria, Planck também considerou que os osciladores existentes na superfície do corpo só emitem ou absorvem energia quando passam de um estado quântico para outro. Se um oscilador passa, por exemplo, de  $n = 2$  para  $n = 1$ , **emite** uma porção discreta de energia igual a  $h f$ , que é a diferença entre  $2 h f$  e  $1 h f$ . Se passa de  $n = 1$  para  $n = 2$ , **absorve** uma porção discreta de energia  $h f$ . Portanto, a emissão e a absorção de energia também se dão em quantidades quantizadas.

Cada porção discreta de energia recebeu o nome de *quantum*, uma palavra do latim cujo plural é *quanta*. Por isso a teoria de Planck é conhecida por **teoria dos quanta**.

A partir da teoria dos *quanta* foi obtida uma função  $I(\lambda)$  para a radiação do corpo negro, em excelente concordância com os resultados experimentais – um alívio para os físicos da época.

Surgiu, entretanto, uma nova dúvida: se a energia só é emitida em quantidades determinadas e, portanto, em determinadas frequências ou comprimentos de onda, como o espectro da radiação térmica emitida por um corpo pode ser contínuo?

Planck, ao ser questionado sobre isso, argumentou que existem tantos osciladores, com tantas energias diferentes, que torna muito grande a probabilidade de serem emitidas radiações de qualquer frequência.

É necessário destacar que, apesar de ser o criador da teoria dos *quanta*, Planck nunca propôs que as radiações eletromagnéticas **se propagassem** na forma de porções discretas de energia (*quanta*). No processo de propagação, ele continuava acreditando e defendendo o modelo ondulatório de Maxwell.

Pela teoria dos *quanta*, os osciladores existentes na superfície de um corpo **emitem** porções discretas de energia quando passavam de um estado quântico para outro. Em seguida, essas porções de energia se diluíam em frentes de onda comuns. Quando as frentes de onda incidiam num corpo, seus osciladores absorviam energia, coletando também porções discretas, desde que correspondessem a alterações de seus estados quânticos.

Portanto, quantizados eram os **osciladores**, e não a radiação eletromagnética.

A concepção do *quantum*, que em 1926 também passou a ser chamado de **fóton**, foi tão bem-sucedida que, como veremos, possibilitou resolver outras questões insolúveis por conceitos clássicos.



Max Planck, por descobrir que a energia é quantizada, recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1918.  
Retrato de Tita Binz.

Se você está estranhando a teoria de Planck, saiba que ela é mesmo estranha a todos nós. O motivo é que ela foge ao nosso senso comum, fundamentado em conceitos da Física Clássica.

De fato, convivemos principalmente com fenômenos macroscópicos. Assim, familiarizamo-nos com eles e nossa intuição se forma a partir de conceitos clássicos.

Conseqüentemente, a teoria quântica – uma parte da Física Moderna que foi o embrião da chamada Mecânica Quântica –, que lida principalmente com fenômenos nas escalas atômica e subatômica, está longe de nos parecer intuitiva. O físico norte-americano Richard **Feynman** (1918-1988), Prêmio Nobel de Física em 1965, disse um dia: “Ninguém compreende a Mecânica Quântica”.

Quando Planck propôs sua teoria, nem ele acreditava que o *quantum* fosse algo real, chegando a confessar que concebeu essa ideia em um “ato de desespero”.

Referindo-se ao problema da radiação do corpo negro, afirmou: “[...] era uma hipótese puramente formal, e não lhe dei muita atenção, adotando-a porque era preciso, a qualquer preço, encontrar uma explicação teórica”.

## 5. EFEITO FOTOELÉTRICO

Um outro exemplo muito marcante da incompatibilidade dos resultados experimentais com a teoria de Maxwell é o **efeito fotoelétrico**, constatado experimentalmente no final do século XIX.

Trata-se de um fenômeno de grande importância, principalmente por sua vasta aplicação prática.

A primeira observação relacionada com esse fenômeno foi feita pelo físico russo Alexander **Stoletov** (1839-1896), em 1872.

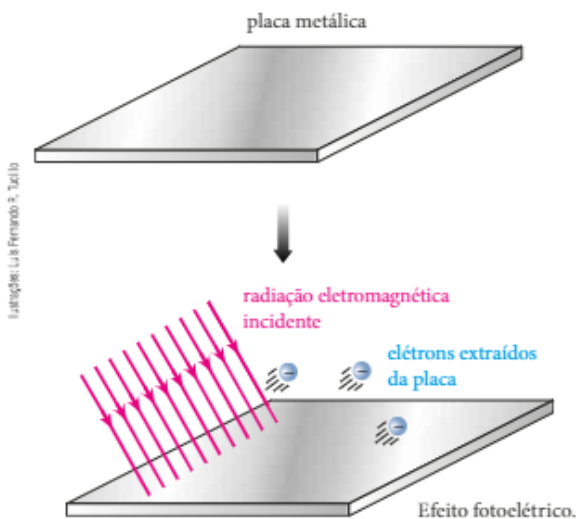
Enquanto retirava ar de um pequeno frasco dentro do qual havia duas placas metálicas, isoladas eletricamente uma da outra e ligadas aos terminais de uma bateria, ele detectou o surgimento de uma corrente elétrica na bateria, quando uma das placas foi atingida pela luz de uma lâmpada de mercúrio. Stoletov também percebeu que essa corrente cessava quando a placa deixava de ser iluminada.

O fenômeno observado por Stoletov, e que Hertz também constatou em 1887, foi interpretado assim:

Quando radiações eletromagnéticas incidem numa placa metálica, cargas elétricas podem absorver energia suficiente para escaparem dela: a esse fato se dá o nome de **efeito fotoelétrico**.

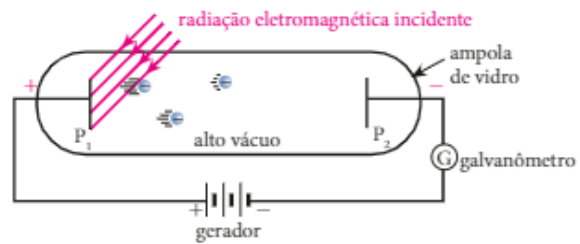
Na observação de Stoletov, as cargas elétricas extraídas de uma placa dirigiam-se até a outra, fechando o circuito.

Mais tarde, com a descoberta do elétron, os físicos ficaram sabendo que as cargas extraídas da placa metálica são elétrons. Os elétrons extraídos receberam o nome de **fotolétrons** ou **fotelétrons**.



## Investigação do efeito fotoelétrico

O experimento esquematizado na figura seguinte permite constatar e investigar o efeito fotoelétrico.



Quando uma radiação eletromagnética adequada incide na placa metálica  $P_1$ , o galvanômetro registra a passagem de uma corrente elétrica. Portanto, a energia que os elétrons da placa  $P_1$  absorvem da radiação é destinada, em parte, para extraí-los da placa e, em parte, para que tenham energia cinética suficiente para chegarem até a placa metálica  $P_2$ .

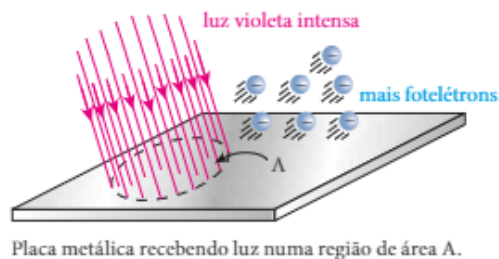
Note que o polo do gerador ligado na placa  $P_1$  é o **positivo**. Há duas razões para isso:

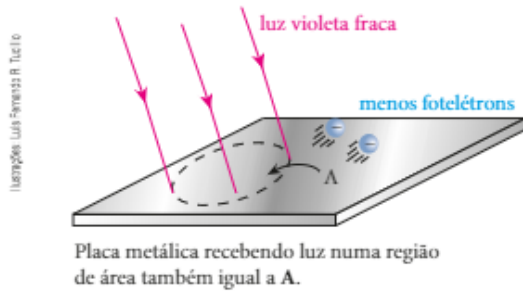
- descartar a participação do campo elétrico entre as placas no processo de extração dos elétrons;
- criar um campo elétrico entre as placas que dificulte o deslocamento dos fotolétrons de  $P_1$  a  $P_2$ . Isso permite relacionar a energia cinética com que os elétrons escapam de  $P_1$  com o tipo de radiação eletromagnética incidente nessa placa.

Contribuíram para a descoberta (sem a explicação) das leis que regem o efeito fotoelétrico o próprio Stoletov e o físico alemão Philipp **von Lenard** (1862-1947). Entretanto, os resultados experimentais obtidos não puderam ser explicados pela teoria eletromagnética de Maxwell.

Veja quais foram esses resultados:

- As energias cinéticas dos fotolétrons **não dependem da intensidade** da radiação incidente. Isso significa, por exemplo, que, se o efeito foi produzido por uma determinada luz violeta, as energias cinéticas médias dos fotolétrons não dependem do fato de essa luz violeta ser forte ou fraca. É verdade, porém, que, no caso de se usar a luz violeta **mais intensa**, será produzida **maior quantidade** de fotolétrons.





Nas duas situações representadas anteriormente, as energias cinéticas médias dos fotoelétrons são **iguais**.

#### Comentário:

O resultado descrito não pode ser explicado pela teoria ondulatória de Maxwell. De fato, no caso da luz violeta mais intensa, a mesma população de elétrons é atingida, em um mesmo intervalo de tempo, por uma energia total maior do que no caso da luz violeta fraca. Então, como os elétrons, segundo essa teoria, absorvem continuamente a energia incidente, eles deveriam escapar com energias cinéticas maiores quando recebem a luz mais intensa, o que não acontece.

- Por menor que seja a intensidade da radiação causadora do efeito fotoelétrico, o intervalo de tempo de espera para que elétrons sejam ejetados é totalmente desprezível. O fenômeno é quase instantâneo: a radiação incide na placa e, imediatamente, elétrons são extraídos. Experimentos realizados em 1928 levaram à conclusão de que  $10^{-9}$  s é o limite superior do tempo de espera.

#### Comentário:

Pela Teoria Ondulatória, se uma radiação de intensidade muito baixa produzisse o fenômeno, os elétrons deveriam demorar um tempo considerável para acumular a energia necessária à extração. Cálculos mostram que esse tempo poderia ser até de algumas horas, o que conflita radicalmente com as observações experimentais.

- As energias cinéticas dos fotoelétrons **dependem da frequência** da radiação incidente. Quanto maior é essa frequência, maiores são as energias cinéticas dos fotoelétrons. Assim, se o efeito ocorrer com luz azul, por exemplo, os fotoelétrons terão determinadas energias cinéticas. Repetindo a experiência com uma radiação de frequência mais elevada, como a ultravioleta, por exemplo, as energias cinéticas dos fotoelétrons serão maiores.

#### Comentário:

Isso também não pode ser explicado com a teoria de Maxwell. De fato, o fenômeno não deveria ser

influenciado pela frequência da radiação, já que o importante é o elétron acumular energia suficiente para escapar do metal, o que está relacionado com a intensidade da radiação, e não com a sua frequência.

- O efeito fotoelétrico só ocorre se a **frequência** da radiação incidente estiver **acima de certo valor mínimo**, que depende do metal utilizado. Se isso não for respeitado, o efeito não ocorrerá, por mais intensa que seja a radiação.

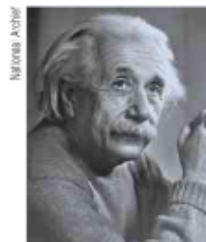
Com exceção dos metais alcalinos (sódio, potássio, lítio etc.), todos os outros requerem frequências iguais ou superiores à da radiação ultravioleta para que o fenômeno ocorra.

#### Comentário:

Também não é possível explicar esse fato por meio da teoria de Maxwell.

### Explicação do efeito fotoelétrico

Em 1905, o físico alemão Albert Einstein (1879-1955) explicou o efeito fotoelétrico. Para isso, ele estendeu a teoria de Planck às radiações eletromagnéticas, considerando que **a energia dessas radiações também é quantizada**. Assim, uma radiação eletromagnética passou a ser tratada como um feixe de partículas denominadas fótons propagando-se.



Albert Einstein, Prêmio Nobel de Física em 1921 pela explicação do efeito fotoelétrico e por suas contribuições para a Física teórica.

Einstein supôs que a energia de um fóton (*quantum*) é dada por:

$$E = h f$$

em que **h** é a constante de Planck e **f** é a frequência da radiação.

No SI, a constante de Planck tem o seguinte valor:

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Quando uma radiação eletromagnética de frequência **f** incide em uma placa metálica, ocorrem colisões entre fótons da radiação e elétrons do metal. Em cada uma dessas colisões, um fóton pode fornecer **toda** a sua energia ( $hf$ ) a um **único** elétron. Absorvendo o fóton, o elétron será extraído se a energia  $hf$ , que

depende da frequência da radiação, e não da sua intensidade, for suficiente. Caso contrário, o elétron permanecerá no metal.

É importante destacar que Einstein adotou um novo modelo para a luz e as demais radiações eletromagnéticas contrapondo-se ao modelo ondulatório. Como um fóton é um concentrado de energia, podemos chamá-lo de “corpúsculo” ou “partícula” de energia. Por isso, o novo modelo é denominado **modelo corpuscular** das radiações eletromagnéticas.

**NOTA**

É importante registrar que Philipp von Lenard, em 1902, realizou investigações decisivas para que Einstein pudessem interpretar o efeito fotoelétrico.

**Equação do efeito fotoelétrico**

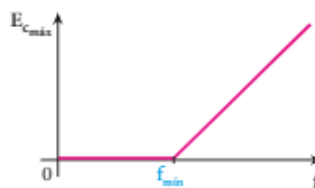
No efeito fotoelétrico, parte da energia do fóton absorvido por um elétron é usada para livrá-lo dos cátions do metal na extração. A energia que resta é a energia cinética do fotolétron.

A energia cinética máxima do fotolétron relaciona-se com a energia do fóton por meio da expressão:

$$E = E_{c_{\max}} + A$$

em que:  $E$  é a energia do fóton absorvido pelo elétron ( $E = hf$ );  $A$  é uma característica do metal, denominada **função trabalho**. Essa grandeza significa a energia mínima necessária para extrair um elétron situado na superfície do metal, ou seja, é a mínima energia para extrair um elétron “mais fácil” de ser extraído. Se um elétron absorver um fóton com apenas essa energia  $A$ , ele sairá do metal, porém com energia cinética igual a zero. Elétrons mais internos nem sairão, pois precisam de mais energia para escapar. Ao fóton de energia igual a  $A$  está associada uma frequência mínima  $f_{\min}$ , tal que  $A = hf_{\min}$ ;  $E_{c_{\max}}$  é a energia cinética máxima dos fotolétrons ( $E_{c_{\max}} = \frac{(v_{\max})^2}{2}$ ). Essa é a energia cinética de um elétron da superfície do metal, que absorveu um fóton de energia  $hf$  maior que  $A$ , “gastou” o mínimo na extração, sobrando o máximo de energia cinética.

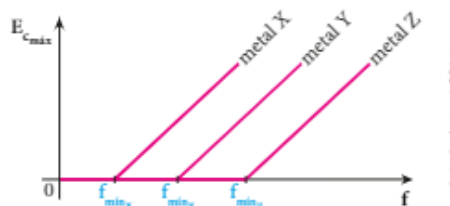
Veja, a seguir, a representação gráfica da energia cinética  $E_{c_{\max}}$  do fotolétron em função da frequência  $f$  associada ao fóton que ele absorve.



Como  $E = E_{c_{\max}} + A$ , temos que  $hf = E_{c_{\max}} + A$ .

Portanto:  $E_{c_{\max}} = hf - A$  (equação da reta para  $f \geq f_{\min}$ )

O coeficiente angular dessa reta é a constante de Planck  $h$ . Portanto, se o gráfico for construído para vários metais, em um mesmo par de eixos, os trechos inclinados serão paralelos entre si:



Esse gráfico foi confirmado experimentalmente pelo físico estadunidense Robert Andrews Millikan (1868-1953), em 1916. O valor do coeficiente angular foi calculado, confirmando ser de fato a constante de Planck da teoria do corpo negro.

**O elétron-volt**

Como a energia de um fóton é pequena demais em comparação com as unidades de energia que estamos habituados a usar, frequentemente lidamos com a unidade **elétron-volt (eV)**, também útil na Física Atômica e na Física Nuclear.

Em relação ao joule (J), a unidade de energia elétron-volt (eV) pode ser expressa assim:

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

**NOTAS**

- O quadro a seguir mostra os valores, em eV, da função trabalho  $A$  de alguns metais.

Metal	K	Na	Zn	Fe	Pt
A (eV)	2,24	2,28	4,31	4,50	6,35

- Os elétrons ejetados por radiações que tenham frequências até o ultravioleta são **elétrons de condução** (os chamados elétrons livres), que precisam de apenas alguns elétrons-volt para serem extraídos. Elétrons fortemente ligados aos átomos, entretanto, requerem raios X ou raios  $\gamma$  para que a extração ocorra.

## EM BUSCA DE EXPLICAÇÕES

### Células fotoelétricas

O efeito fotoelétrico tem aplicação, por exemplo, na contagem do número de pessoas que passam por determinado local, na abertura e no fechamento automático de portas, na leitura de trilhas sonoras em projetores cinematográficos, em sistemas de alarme, nos dispositivos que ligam e desligam automaticamente sistemas de iluminação e na medição da concentração de fumaça em chaminés. Tudo isso é conseguido por meio das **células fotoelétricas** ou **fotocélulas**, entre as quais destacamos dois tipos: as **fotoemissivas** e as **fotocondutivas**.

#### Célula fotoemissiva

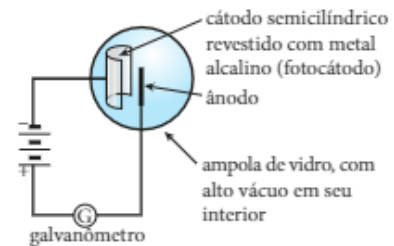
A figura ao lado ilustra uma célula fotoemissiva.

Como desejamos que aconteça uma emissão de elétrons **causada pela incidência de luz**, a diferença de potencial entre o cátodo e o ânodo deve ser pequena o suficiente para não provocar essa emissão. Além disso, a emissão de elétrons não ocorrerá pelo efeito termiônico (liberação de elétrons por corpos aquecidos), uma vez que estamos considerando o fotocátodo na temperatura ambiente.

Assim, apenas quando incide luz no fotocátodo, elétrons são extraídos dele. Esses elétrons dirigem-se, então, para o ânodo, e uma corrente elétrica é detectada pelo galvanômetro **G**.

Quando a incidência de luz no fotocátodo é bloqueada, a corrente elétrica se anula.

Mais adiante nesta leitura, você entenderá como o fato de haver ou não corrente elétrica na fotocélula pode ser utilizado para acionar outros sistemas.



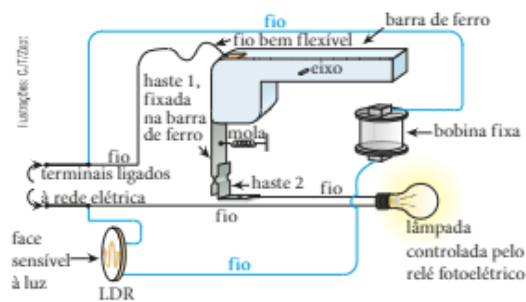
#### Célula fotocondutiva

Quando a luz incide em determinados materiais, como o sulfeto de cádmio, por exemplo, elétrons que participam das ligações entre seus átomos podem absorver energia suficiente para que essas ligações sejam quebradas. Com isso, esses elétrons, em vez de serem extraídos do material, permanecem nele na condição de elétrons **livres**, diminuindo sua resistência elétrica e, portanto, tornando-o mais condutor.

Nesse fenômeno, denominado **efeito fotoelétrico interno**, a **quantidade** de elétrons liberados para a condução também é tanto maior quanto maior é a intensidade da luz incidente. Por isso materiais como o sulfeto de cádmio apresentam resistência elétrica muito **alta** em ambientes **escuras** e muito **baixa** em ambientes **bem iluminados**. Esses materiais constituem os chamados fotorresistores, também conhecidos por LDR (*light dependent resistor*), que admitem o símbolo ao lado.



Veja, agora, como funciona o relé fotoelétrico que liga e desliga automaticamente sistemas de iluminação.



- Quando o LDR está na escuridão, sua resistência é muito elevada e, conseqüentemente, a corrente que passa através dele é muito baixa. Por isso, nessa situação podemos ignorar todas as ligações representadas por fios azuis.
- Uma mola mantém a haste 1 em contato com a haste 2. Dessa maneira, o circuito está fechado e a lâmpada está acesa.
- Quando a face do LDR, sensível à luz, está num ambiente suficientemente iluminado, a resistência do LDR torna-se muito baixa e a bobina passa a ser percorrida por uma corrente significativa. A bobina, por sua vez, atrai a barra de ferro, que gira em torno do eixo indicado, fazendo a haste 1 desencostar da haste 2. Com isso, a lâmpada se apaga.

Observe, então, que, se o sistema descrito for corretamente utilizado, poderemos ter uma lâmpada que se acende ao cair da noite e se apaga ao clarear do dia.

Com relação ao efeito fotoelétrico interno, os elétrons liberados podem retornar às ligações que foram quebradas, reconstituindo-as e deixando então de ser livres. Entretanto, se a luz continuar incidindo no material, outros elétrons serão liberados, mantendo-se, assim, uma população determinada de elétrons livres para cada intensidade da luz incidente.



## 6. A DUALIDADE DA LUZ

Após estudar o **modelo ondulatório** de Maxwell, segundo o qual a luz (e qualquer outra radiação eletromagnética) é uma onda eletromagnética, e o **modelo quântico**, em que a luz (e qualquer outra radiação eletromagnética) é constituída de partículas denominadas **fótons**, é natural que surja a seguinte pergunta: afinal, a luz é onda ou partícula?

A resposta atual a essa pergunta é a seguinte: dependendo do fenômeno, a luz **se comporta** como onda ou partícula. Então, não se diz o que a luz é, mas como ela **se comporta** em cada fenômeno.

A interferência e a difração da luz, por exemplo, só podem ser explicadas pelo modelo ondulatório. Já o efeito fotoelétrico, por exemplo, só pode ser explicado pelo modelo quântico das partículas denominadas **fótons**. Portanto, os dois modelos são necessários e se complementam: usando um ou outro, nenhum fenômeno deixa de ser explicado.

A esse duplo comportamento da luz dá-se o nome de **dualidade onda-partícula**.

É importante destacar que a luz, assim como as demais radiações eletromagnéticas, nunca exhibe os dois comportamentos **ao mesmo tempo**. Esse é o **Princípio da Complementaridade** proposto pelo físico dinamarquês Niels Bohr (1885-1962).

### QUESTÕES COMENTADAS



**1** A potência total irradiada pelo Sol ( $P_{\text{ot}}$ ) é aproximadamente igual a  $3,8 \cdot 10^{26}$  W, e seu raio ( $R$ ) mede cerca de  $7,0 \cdot 10^8$  m. Adote ainda as seguintes aproximações:

$$\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \text{ (Constante de Stefan-Boltzmann)}$$

$$\pi = 3,14$$

$$b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ mK (Constante da Lei de Wien)}$$

$$c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s (velocidade da luz no vácuo)}$$

- Estime a temperatura na superfície do Sol, considerando-a um corpo negro (emissividade  $\epsilon$  igual a 1).
- Estime a frequência  $f_{\text{máx}}$  da radiação solar emitida com a máxima intensidade.

#### RESOLUÇÃO

- Para  $\epsilon$  igual a 1, a **Lei de Stefan-Boltzmann** é expressa por:  $P_{\text{ot}} = \sigma A T^4$  em que  $A = 4\pi R^2$  é a área da superfície emissora, que se encontra a uma temperatura absoluta  $T$ . Isolando  $T$  na expressão acima, temos:

$$T = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{ot}}}{\sigma A}} \Rightarrow T = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{ot}}}{\sigma \cdot 4\pi R^2}}$$

Substituindo os valores fornecidos, calculamos  $T$ :

$$T = \sqrt[4]{\frac{3,8 \cdot 10^{26}}{(5,7 \cdot 10^{-8}) \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot (7,0 \cdot 10^8)^2}}$$

$$\text{Logo: } T \cong 5,7 \cdot 10^3 \text{ K}$$

- Pela **Lei de Wien**, temos:  $\lambda_{\text{máx}} = \frac{b}{T}$

Substituindo nela o valor de  $b$  (dado) e o valor de  $T$  (estimado no item  $a$ ), temos:

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{5,7 \cdot 10^3} \Rightarrow \lambda_{\text{máx}} \cong 5,1 \cdot 10^{-7}$$

Lembrando que  $v = \lambda f$ , obtemos:

$$f = \frac{v}{\lambda} \Rightarrow f_{\text{máx}} = \frac{c}{\lambda_{\text{máx}}} = \frac{3,0 \cdot 10^8}{5,1 \cdot 10^{-7}}$$

$$\text{Logo: } f_{\text{máx}} \cong 5,9 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

A radiação com essa frequência está na região central do espectro visível.

- Respostas:** a) Aproximadamente  $5,7 \cdot 10^3$  K;  
b) Aproximadamente  $5,9 \cdot 10^{14}$  Hz.

**2** A mínima frequência que uma radiação precisa ter para extrair elétrons de uma placa de tungstênio é igual a  $1,1 \cdot 10^{15}$  Hz. Sendo  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Js a constante de Planck,  $c = 3,0 \cdot 10^8$  m/s a velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo e  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  kg a massa do elétron, calcule:

- a função trabalho para o tungstênio, em joules e em elétron-volts;
- a energia cinética máxima e a velocidade máxima dos elétrons emitidos pelo tungstênio, no vácuo, quando nele incide uma radiação de comprimento de onda igual a  $0,18 \mu\text{m}$ .

#### RESOLUÇÃO

- A função trabalho é dada por:

$$A = h f_{\text{máx}} = (6,63 \cdot 10^{-34}) \cdot (1,1 \cdot 10^{15})$$

$$\text{Logo: } A \cong 7,3 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Como  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ , temos:

$$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \rightarrow 1 \text{ eV}$$

$$7,3 \cdot 10^{-19} \text{ J} \rightarrow A \quad \text{Logo: } A \cong 4,6 \text{ eV}$$

- Vamos calcular a energia  $E$  de um fóton da radiação incidente.

Da Ondulatória temos que a relação entre  $v$  (velocidade de propagação),  $\lambda$  (comprimento de onda) e  $f$  (frequência), para qualquer onda periódica é  $v = \lambda f$ .

Fazendo  $v = c$ , temos que  $f = \frac{c}{\lambda}$ . Então:  $E = hf = \frac{hc}{\lambda}$ .

Sendo  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Js,  $c = 3,0 \cdot 10^8$  m/s e

$\lambda = 0,18 \mu\text{m} = 0,18 \cdot 10^{-6}$  m, temos:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6,63 \cdot 10^{-34}) \cdot (3,0 \cdot 10^8)}{0,18 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow E \cong 11 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Vamos, agora, usar a equação do efeito fotoelétrico:

$$E = E_{\text{cmax}} + A$$

$$11 \cdot 10^{-19} = E_{\text{cmax}} + 7,3 \cdot 10^{-19} \Rightarrow E_{\text{cmax}} \cong 3,7 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Conhecida a energia cinética máxima dos elétrons, calculamos a velocidade máxima:

$$E_{\text{cmax}} = \frac{mv_{\text{máx}}^2}{2} \Rightarrow v_{\text{máx}} = \sqrt{\frac{2E_{\text{cmax}}}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (3,7 \cdot 10^{-19})}{9,1 \cdot 10^{-31}}}$$

Logo:  $v_{\text{máx}} \cong 9,0 \cdot 10^5$  m/s

**Respostas:** a) Aproximadamente  $7,3 \cdot 10^{-19}$  J e aproximadamente 4,6 eV.

b) Aproximadamente  $3,7 \cdot 10^{-19}$  J e aproximadamente  $9,0 \cdot 10^5$  m/s.

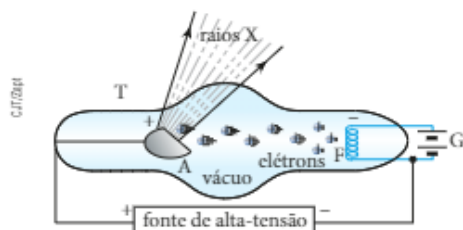


## QUESTÕES PROPOSTAS



FAÇA NO CADERNO.

3. Raios X são radiações eletromagnéticas cujos comprimentos de onda, no vácuo, podem variar de  $10^{-9}$  m a  $10^{-11}$  m, ou seja, de  $10 \text{ \AA}$  a  $0,1 \text{ \AA}$ . A figura a seguir representa um equipamento para a produção de raios X, em que T é um tubo de vidro, G é um gerador que aquece o filamento de tungstênio F (cátodo) e A é um alvo metálico que também pode ser de tungstênio. O filamento aquecido libera elétrons (efeito termiônico), que são acelerados pela fonte de alta-tensão e, em seguida, bombardeiam o alvo A, ocorrendo aí a produção dos raios X. Do ponto de vista da teoria de Maxwell, como se explica essa produção?



4. Faça uma estimativa da temperatura do filamento de uma lâmpada de incandescência, supondo que:

- a potência total irradiada seja  $P_{\text{ot}} = 60$  W;
- a emissividade do filamento seja  $\epsilon = 0,30$ ;
- o filamento seja um fio cilíndrico de comprimento  $\ell = 20$  cm e seção transversal de raio  $r = 50 \mu\text{m}$ .

Constante de Stefan-Boltzmann:  $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}$  (SI)

5. A radiação cósmica de fundo detectada atualmente no espaço é, segundo a teoria do *big-bang*, a radiação de corpo negro emitida naquela grande explosão, "esfriada" ao longo do tempo em virtude da expansão do Universo. Hoje, a temperatura associada a essa radiação pela Lei de Wien é de  $2,7$  K.

Na Lei de Wien ( $\lambda_{\text{máx}} = \frac{b}{T}$ ), considere a constante  $b$  igual a  $2,9 \cdot 10^{-3}$  mK e calcule o comprimento de onda correspondente ao pico de intensidade da radiação cósmica de fundo. Verifique que esse pico está na faixa das micro-ondas, conforme medidas obtidas pelo satélite Cobe (*Cosmic*

*Background Explorer*), em 1989, e outras obtidas desde 1965.

**Informação adicional:** as micro-ondas são radiações eletromagnéticas com comprimentos de onda entre  $1$  mm e  $30$  cm, aproximadamente.

6. Suponha que a pele de uma pessoa esteja na temperatura de  $35^\circ\text{C}$ . Calcule a frequência da radiação mais intensa emitida pela pele. Use: constante da Lei de Wien =  $2,9 \cdot 10^{-3}$  mK e velocidade da luz =  $3,0 \cdot 10^8$  m/s.

7. Considerando a constante de Planck igual a  $6,6 \cdot 10^{-34}$  Js, calcule, em joules, a energia do fóton:

- de luz violeta de frequência igual a  $7,7 \cdot 10^{14}$  Hz.
- de radiação  $\gamma$  de frequência igual a  $5,0 \cdot 10^{21}$  Hz (essa radiação é emitida por núcleos instáveis de átomos radiativos, quando se desintegram).

8. A potência luminosa ( $P_{\text{ot}}$ ) irradiada por uma lâmpada que emite, no ar, luz de comprimento de onda ( $\lambda$ ) igual a  $5500 \text{ \AA}$  é igual a  $40$  W.

Determine o número de fótons emitidos por essa lâmpada durante  $1,0$  minuto.

**Dados:** velocidade da luz no ar:  $c = 3,0 \cdot 10^8$  m/s;

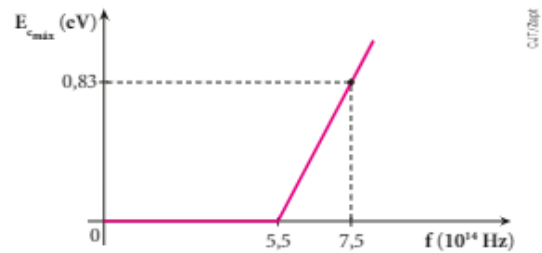
Constante de Planck:  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Js.

9. Com relação ao efeito fotoelétrico, julgue as seguintes afirmações:

- (01) A ocorrência desse efeito depende da frequência, e não da intensidade da radiação utilizada.
  - (02) É possível que esse efeito ocorra com luz azul fraca e não ocorra com luz vermelha intensa.
  - (04) A velocidade com que um elétron é ejetado depende da frequência da radiação usada, mas não de sua intensidade.
  - (08) Supondo que o fenômeno ocorre em uma determinada região de uma placa metálica, o número de elétrons extraídos depende da intensidade da luz utilizada.
  - (16) Para uma determinada radiação incidente, a velocidade dos elétrons ejetados depende do metal usado na experiência.
- Dê como resposta a soma dos números associados às afirmações corretas.

10. A mínima energia necessária para extrair um elétron de uma chapa de ferro é igual a 4,5 eV. Quando fótons de radiação ultravioleta incidem nessa chapa, a energia cinética máxima dos elétrons ejetados dela é igual a 1,5 eV. Determine a frequência dos fótons incidentes na chapa (Constante de Planck =  $6,63 \cdot 10^{-34}$  Js).

11. O gráfico a seguir fornece dados extraídos de um experimento em que se investigou o efeito fotoelétrico no metal sódio. Nesse gráfico,  $E_{c_{\text{máx}}}$  é a energia cinética máxima dos fotoelétrons e  $f$  é a frequência da luz que incidiu no metal.



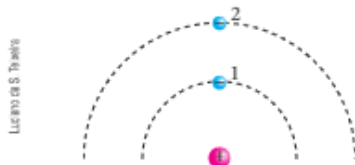
Com base nos valores indicados no gráfico:

- calcule a constante de Planck, em unidades do SI;
- calcule a função trabalho do sódio, em eV.

## 7. O ÁTOMO DE BOHR E AS TRANSIÇÕES ELETRÔNICAS

Num dado átomo, os elétrons encontram-se em diversos níveis de energia. Os que estão mais próximos do núcleo encontram-se nos níveis mais baixos, enquanto os que estão mais afastados dele encontram-se em níveis mais altos de energia.

Para entender isso, veja a figura abaixo, em que estão representados o núcleo de um átomo e um de seus elétrons em dois níveis de energia diferentes:



Na posição 1, o elétron encontra-se em um determinado nível de energia. Para que ele passe para a posição 2, é necessário fornecer energia ao elétron, já que o núcleo o atrai. Portanto, na posição 2, o elétron está em um nível de energia maior do que quando está na posição 1.

### O modelo atômico de Bohr

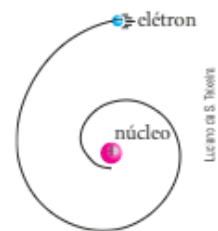
Por não se ter acesso visual à estrutura de um átomo, ele sempre foi estudado por meio de modelos propostos pelos cientistas. Cada modelo descreve o átomo de acordo com suposições feitas por seu autor, baseado em resultados experimentais, e esse modelo é aceito enquanto não falhar na explicação dos fenômenos. A partir da primeira falha, compete aos físicos o aperfeiçoamento do modelo ou até mesmo sua substituição.

Neste estudo, interessa-nos abordar apenas dois modelos atômicos, sem nos aprofundarmos em nenhum deles. Um desses modelos foi proposto pelo físico neozelandês Ernest Rutherford (1871-1937), em 1911. Rutherford descrevia o átomo como semelhante a um

sistema planetário, tendo um núcleo central de carga positiva com elétrons em órbita ao seu redor.

O modelo de Rutherford foi, sem dúvida, um marco importante no desenvolvimento da Física Atômica. Entretanto mostrou-se inadequado para explicar alguns fatos.

Pela teoria eletromagnética de Maxwell, qualquer carga dotada de alguma aceleração emite radiação eletromagnética e, portanto, perde energia. Um elétron do átomo de Rutherford, descrevendo, por exemplo, uma circunferência em torno do núcleo, possui uma aceleração: a centrípeta. Então, esse elétron deveria estar permanentemente emitindo radiação à custa de uma redução de seu nível de energia. Com isso, deveria descrever uma trajetória espiralada até cair no núcleo, como sugere a figura ao lado. Isso, entretanto, **não ocorre**, pois as eletrosferas dos átomos são estáveis.



Com relação ao que acabamos de abordar, existe ainda outro problema no modelo de Rutherford. De acordo com a teoria eletromagnética de Maxwell, a radiação emitida pelo elétron tem frequência igual à do seu movimento. Então, como a frequência do movimento do elétron seria variável **continuamente** durante sua ida até o núcleo, o elétron deveria emitir radiação com frequência variável também continuamente.

Entretanto, como veremos, a radiação emitida por um átomo só pode ter frequências de **determinados** valores, ao contrário da radiação térmica emitida por um corpo, cujo espectro é contínuo.

Evidenciou-se, então, a necessidade de se criar um novo modelo atômico, que foi proposto, em 1913, pelo físico dinamarquês Niels Bohr (1885-1962), baseado em ideias quânticas.

Bohr postulou que, para a eletrosfera de um átomo manter-se estável, os elétrons desse átomo só podem ter determinados níveis de energia, denominados **estados estacionários** ou **quânticos**: a cada um desses estados corresponde uma determinada energia.

Em seu modelo, Bohr propôs que, **em um estado estacionário, o átomo não emite radiação**. Assim, sua eletrosfera mantém-se estável.

Experimentos realizados a partir de 1914 por James **Franck** (1882-1964) e Gustav **Hertz\*** (1887-1975), ambos físicos alemães, confirmaram a existência dos estados estacionários.

Em termos de nomenclatura, também é importante saber que o estado estacionário, no qual os elétrons estão nos níveis mais baixos de energia, é denominado **estado fundamental**; os demais estados permitidos são denominados **estados excitados**.

Note, então, que só são permitidos o estado fundamental e outros estados excitados muito bem determinados: qualquer outro estado é proibido.

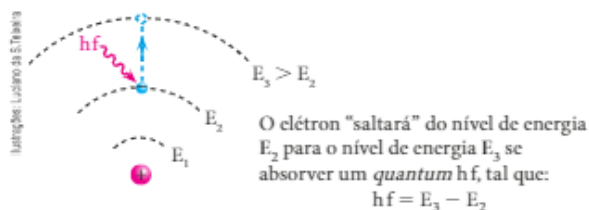
Para o caso particular do átomo de hidrogênio, que possui um único elétron, os níveis de energia possíveis são dados pela seguinte expressão, decorrente da teoria de Bohr:

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV}$$

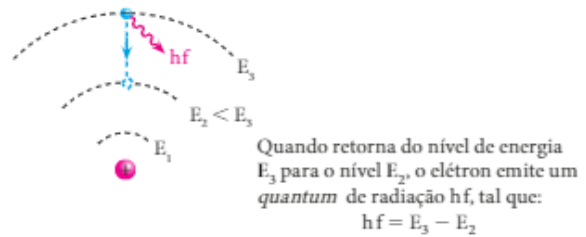
em que  $n = 1, 2, 3, \dots$  é o **número quântico principal**, que chamaremos simplesmente de número quântico, e  $E_n$  é a energia correspondente a cada número quântico. O estado fundamental corresponde a  $n = 1$ , e os estados excitados correspondem a  $n = 2, 3, \dots$

Observe que os valores de  $E_n$  são negativos. Isso significa que o elétron precisa receber energia para chegar ao nível zero, situação em que ele está deixando de interagir com o núcleo, ou seja, desvinculando-se do átomo.

Bohr também postulou que todo átomo, ao passar de um estado estacionário para outro, emite ou absorve um *quantum* de energia igual à diferença entre as energias correspondentes aos dois estados, como exemplificam as figuras seguintes:



\* Observe que não se trata de Heirinch Hertz, o também físico alemão (1857-1894), que gerou e detectou ondas de rádio.



Esse fato também não pode ser explicado pela teoria de Maxwell, pois, segundo ela, a frequência da radiação emitida está relacionada com a frequência do movimento do elétron, o que não é verdade, já que a frequência da radiação emitida está relacionada apenas com a diferença de energia entre os estados inicial e final.

No modelo de Bohr, os elétrons descrevem órbitas circulares em torno de um núcleo positivo, submetidos à força de atração dada pela **Lei de Coulomb**, que desempenha o papel de força resultante centrípeta. Os raios ( $r$ ) dessas órbitas só podem ter determinados valores.

No caso do átomo de hidrogênio e de íons com apenas um elétron (como hélio ionizado e lítio duplamente ionizado), os raios permitidos obedecem à seguinte relação:

$$r_n = n^2 r_1$$

em que  $r_n$  é o raio da órbita correspondente ao número quântico  $n$  e  $r_1$  é o raio correspondente ao estado fundamental ( $n = 1$ ).

Embora a teoria quântica de Bohr tenha explicado corretamente o espectro de emissão do átomo de hidrogênio e de íons dotados de apenas um elétron, ela não conseguiu esclarecer o espectro de emissão de átomos ou íons com mais de um elétron. Falhou grotescamente até no caso do átomo de hélio, um átomo simples em que existem apenas **dois** elétrons.

Outros fatos experimentais importantes também não puderam ser explicados por essa teoria. Evidenciava-se, portanto, a necessidade de se buscar uma nova abordagem do átomo. Depois de muito esforço dos físicos, surgiu uma teoria satisfatória: a **Mecânica Quântica**. Essa teoria foi desenvolvida em 1925 pelo físico austríaco Erwin **Schrödinger** (1887-1961), que contou com vários colaboradores, e não será tratada neste livro. Schrödinger recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1933.

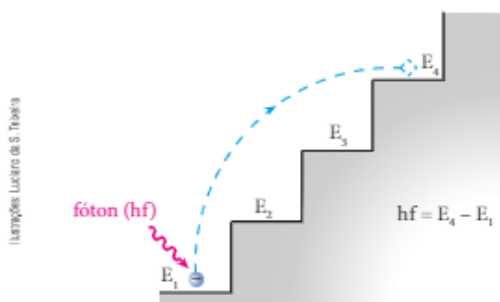
É importante destacar que uma teoria, embora considerada ótima hoje, também poderá vir a sofrer modificações ou, até mesmo, ser substituída por outra.

## Transições eletrônicas causadas pela incidência de radiação eletromagnética

Os estados estacionários (níveis permitidos de energia) de um átomo, citados anteriormente, podem ser comparados aos degraus de uma escada. Essa comparação só não é perfeita porque as diferenças de energia entre os diversos estados possíveis são bastante irregulares.

No caso de uma radiação eletromagnética incidir em um átomo, um elétron dele só pode absorver um fóton (*quantum* de energia) se a energia deste ( $hf$ ) for **exatamente** a quantidade de energia necessária para o elétron “saltar” de um nível permitido para outro também permitido. Caso contrário, ele não o absorve.

Observe, na figura a seguir, um elétron que absorve um fóton e salta do estado fundamental, de energia  $E_1$ , para o estado excitado, de energia  $E_4$ .



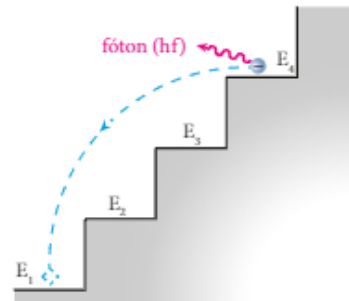
Quando um elétron absorve um fóton, ele pode “saltar” para qualquer um dos níveis superiores permitidos de energia, dependendo da energia do fóton absorvido.

Estando o átomo já excitado, o elétron retornará ao estado fundamental, pois o estado excitado é instável.

Existe uma probabilidade de esse retorno acontecer num único “salto”, caso em que o elétron devolve a energia que havia absorvido, emitindo um único fóton. Nesse caso, considerando a situação ilustrada na figura anterior, o fóton emitido tem a mesma energia ( $E_4 - E_1$ ) do fóton incidente, isto é, do fóton que causou a excitação.

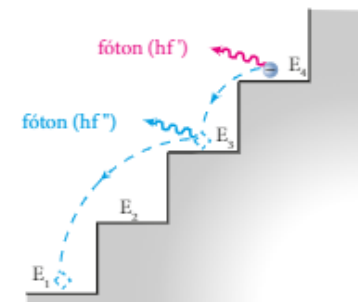
Como a energia do fóton é igual a  $hf$ , podemos concluir que a frequência associada ao fóton absorvido é igual à associada ao fóton emitido. Em outras palavras, se o fóton incidente é de luz violeta, por exemplo, o fóton emitido será da mesma luz violeta.

Existe também uma probabilidade de o elétron retornar **por etapas** do estado excitado para o estado fundamental. Quando isso ocorre, ele dá mais de um “salto”, passando por níveis intermediários permitidos.



Em cada “salto”, o elétron emite um fóton de energia menor que a do fóton que ele havia absorvido na excitação e, portanto, de frequência associada menor que a daquele fóton. A soma das energias de todos os fótons emitidos é igual à energia do fóton incidente (absorvido).

Com relação à situação ilustrada na figura anterior, suponha que o elétron retorne ao estado fundamental por meio dos dois “saltos” representados na figura abaixo.



Como  $hf' + hf'' = hf$ , concluímos que as frequências  $f'$  e  $f''$  são menores que  $f$ . Isso significa que um átomo pode ser excitado por luz de determinada frequência e emitir luzes de frequências mais baixas, como acontece, por exemplo, nas lâmpadas fluorescentes (falaremos disso mais adiante).

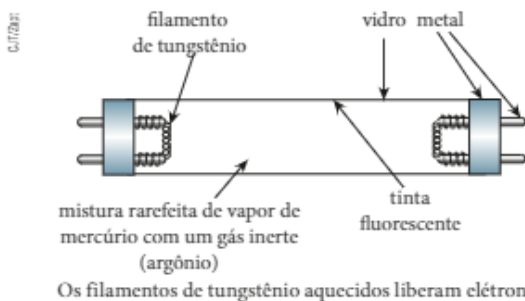
### NOTAS

- Normalmente, a luz emitida por um átomo excitado é consequência das transições de seus elétrons mais **externos**, uma vez que a excitação de elétrons mais internos requer fótons mais energéticos, como de radiação ultravioleta ou até mesmo de raios X.
- Um elétron pode ser excitado, atingindo um nível de energia tão alto que se liberta do átomo. Nesse caso, o átomo fica ionizado. É o que ocorre, por exemplo, no efeito fotoelétrico.

## Outras causas das transições eletrônicas

As transições eletrônicas podem ocorrer por outros processos, além da incidência de radiações eletromagnéticas. Um desses outros processos é o **aquecimento**.

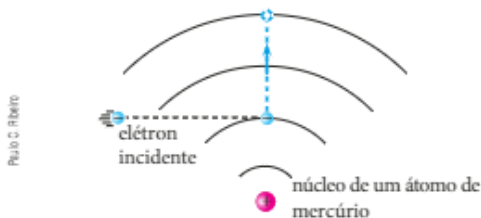
Você sabe que os átomos de um corpo estão tanto mais agitados quanto mais elevada é a sua temperatura. Átomos que se agitam intensamente, ao colidirem com átomos vizinhos, podem fornecer energia a seus elétrons, causando transições eletrônicas. Como consequência dessas transições, o átomo pode emitir radiações eletromagnéticas ou até mesmo perder elétrons. No caso da perda de elétrons, o fenômeno recebe o nome de **efeito termiônico**, que ocorre, por exemplo, nos filamentos de tungstênio existentes nas extremidades de uma lâmpada fluorescente.



É interessante notar que, no efeito termiônico, elétrons são extraídos devido ao recebimento de **energia térmica**, enquanto, no efeito fotoelétrico, isso ocorre devido à absorção de **fótons** de radiações eletromagnéticas.

Vamos explorar mais um pouco a lâmpada fluorescente, sem, contudo, detalhar seu funcionamento do ponto de vista elétrico.

Os elétrons liberados nos filamentos quentes são acelerados em virtude de uma diferença de potencial aplicada entre as extremidades da lâmpada. Esses elétrons atingem átomos de uma mistura rarefeita de mercúrio (no estado de vapor) com um gás inerte (argônio), provocando ionizações e excitações. Note que estamos diante de mais um processo de transição eletrônica: é a transição causada pela **colisão de elétrons**.



Um elétron incide em um átomo de mercúrio e fornece energia a um de seus elétrons, que realiza, então, uma transição para um nível de energia maior.

A radiação emitida pelos átomos de mercúrio e do gás inerte é mais rica em luz violeta e, principalmente, em radiação ultravioleta.

Se a parede interna do tubo de vidro não fosse revestida por uma tinta fluorescente, você veria a lâmpada emitir uma luz violeta e fraca, uma vez que a radiação ultravioleta não é visível.

Nessa tinta, acontece uma segunda excitação, causada pela radiação ultravioleta que nela incide. Elétrons dos átomos da tinta absorvem fótons da radiação ultravioleta (não visível) e sofrem transições. No retorno desses elétrons, que se dá **por etapas**, ocorre a emissão de fótons de **luz visível**, já que as frequências associadas a eles são menores que a da radiação ultravioleta incidente. Essa emissão de luz visível a partir da radiação ultravioleta denomina-se **fluorescência**.

As lâmpadas de "luz negra" também emitem radiação ultravioleta, que produz fluorescência principalmente em roupas brancas e nos dentes das pessoas.

### NOTAS

- Em anúncios luminosos, como os de gás neônio, por exemplo, que emitem uma luz avermelhada, as transições eletrônicas também são causadas por bombardeamento de elétrons. O mesmo acontece na tela do tubo de imagem de um televisor anterior aos das eras plasma, LCD e LED.
- Na **fluorescência**, o material só emite luz visível **enquanto** está sendo excitado. Cessada a excitação, o material fluorescente deixa de emitir luz visível. Quando um átomo desse material é excitado, ele retorna muito rapidamente ao estado fundamental. Esse retorno ocorre em cerca de  $10^{-8}$  s.
- A **fosforescência** é um fenômeno diferente: o material recebe luz, é excitado e continua emitindo luz visível, mesmo após ter sido encerrado o processo de excitação. É o que acontece, por exemplo, em teclas de interruptores e em tintas depositadas em ponteiros de relógios: esses materiais recebem luz durante o dia e continuam brilhando durante a noite porque neles o tempo de retorno do estado excitado ao estado fundamental é longo, muito maior que nos materiais fluorescentes.

A excitação causada por um fóton só acontece se a energia do fóton for exatamente aquela que o elétron precisa para realizar um salto quântico para outro nível permitido de energia.

Entretanto essa restrição não existe quando a excitação é causada por incidência de elétron. Se, por exemplo, um elétron com 11,3 eV de energia bombardeia um átomo de hidrogênio no estado fundamental ( $n = 1$ ), atingindo seu elétron, este absorve 10,2 eV e

realiza um salto quântico para o estado  $n = 2$ . O elétron incidente continua em movimento com a energia cinética que restou, ou seja, com 1,1 eV.

## Análise espectral

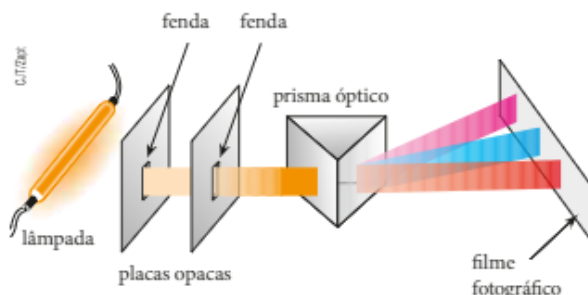
### Espectro de emissão

Átomos de um elemento químico no estado gasoso atômico (não molecular) só podem emitir um conjunto de radiações eletromagnéticas de determinadas frequências, característico do elemento, como se fosse sua impressão digital.

Esse conjunto de radiações possíveis de serem emitidas pelo átomo do elemento chama-se **espectro de emissão** do elemento.

Considerando apenas as radiações visíveis, um átomo de gás hélio, por exemplo, só pode emitir sete radiações, todas com frequências bem definidas, independentemente da causa da emissão. Dizemos, então, que o espectro de emissão do átomo de hélio, bem como dos átomos de outros elementos químicos no estado gasoso atômico, é **descontínuo**. Podemos dizer, também, que é um **espectro de linhas** ou **de raios**.

A figura a seguir dá uma ideia de como se pode obter o espectro de emissão de um elemento químico.



No interior do tubo de vidro transparente de uma lâmpada existe um determinado elemento químico no estado gasoso atômico. Os átomos desse elemento são excitados e emitem luz, que atravessa duas estreitas fendas existentes nas placas opacas, gerando um estreito pincel de luz.

Esse pincel se decompõe ao atravessar o prisma, e as linhas (ou raios) espectrais características da luz emitida pelo elemento ficam registradas no filme fotográfico.

Se incidisse no prisma a luz "branca completa", isto é, composta de todas as frequências correspondentes às radiações visíveis, o espectro registrado seria contínuo: veríamos no filme, em vez de linhas, uma faixa contínua, com cores variando gradualmente do vermelho ao violeta.

Veja, a seguir, os espectros de emissão de alguns elementos químicos, na região visível do espectro eletromagnético (os elementos também emitem radiações não visíveis):



Como o espectro de emissão de um átomo é uma característica dele, a análise desse espectro permite identificá-lo. A **análise espectral** tem aplicação na metalurgia, pois permite controlar a composição dos materiais. A composição química dos minerais também pode ser determinada por essa análise.

### Espectro de absorção

Vamos ver agora o **espectro de absorção** de um elemento químico no estado gasoso atômico.

Para isso, vamos considerar um experimento em que é usada uma fonte de luz de espectro de emissão contínuo do vermelho ao violeta. Essa fonte pode ser o filamento de uma lâmpada de incandescência.

Como na montagem experimental proposta para se obter o espectro de emissão, neste caso, a luz proveniente da fonte também passa por duas fendas, obtendo-se um estreito pincel de luz.

Antes de passar por um prisma óptico, esse pincel atravessa uma ampola de vidro dentro da qual existe um elemento químico no estado gasoso atômico.

Em seguida, o pincel passa pelo prisma, onde é decomposto, e incide em um filme fotográfico. Nesse filme fica registrado um espectro composto de cores que variam gradualmente do vermelho ao violeta, mas com algumas linhas escuras que correspondem às frequências das radiações que desapareceram do espectro contínuo original, por terem sido absorvidas e espalhadas pelos átomos do interior da ampola.

As linhas escuras observadas constituem o espectro de absorção (na região visível) do elemento e também permitem identificá-lo.



Em 1814, o físico alemão Joseph von **Fraunhofer** (1787-1826), usando um prisma óptico, observou linhas escuras no espectro (contínuo) da luz produzida pelo Sol. Essas linhas receberam o nome de **linhas de Fraunhofer** e correspondem às frequências das luzes absorvidas e dispersadas pela cromosfera solar, que é gasosa e rarefeita.

Por meio desse espectro de absorção foi possível descobrir elementos químicos existentes no Sol. O hélio, por exemplo, foi descoberto primeiramente no Sol, depois na Terra.

A análise dos espectros de absorção também possibilitou identificar elementos químicos em outras estrelas. Foi ela que levou o astrônomo estadunidense Edwin Powell **Hubble** (1889-1953) a propor, em 1929, a Teoria do Universo em Expansão.

Hubble observou que as linhas espectrais de elementos químicos identificados na luz das galáxias eram recebidas na Terra com frequências diminuídas, ou, como se costuma dizer, “deslocadas para o vermelho”. Ele atribuiu esse deslocamento, conhecido por *red shift*, ao efeito Doppler da luz (esse fenômeno foi estudado em Ondulatória, mas sua equação para o caso das radiações eletromagnéticas é diferente da que foi vista): como as linhas espectrais da luz das galáxias são recebidas aqui com **frequências reduzidas**, ele concluiu que há um movimento relativo de **afastamento** entre as galáxias e a Terra.

Obviamente Hubble não propôs um novo modelo geocêntrico, com a Terra no centro do Universo, e to-

das as galáxias se afastando dela, mas sim que todas as galáxias estão se afastando umas das outras.

#### NOTA

A cada linha do espectro de absorção do átomo de um elemento químico existe uma linha de mesma frequência em seu espectro de emissão. Entretanto não é verdade que toda linha presente no espectro de emissão aparece no de absorção. Apenas determinadas linhas do espectro de emissão estão presentes no espectro de absorção.

#### A Lei de Hubble

Usando a equação do efeito Doppler para a luz (dedutível na Teoria da Relatividade Restrita), Hubble mediu os valores  $v$  das velocidades relativas de afastamento entre diversas galáxias e a Terra. Tomando como base o brilho dessas galáxias, estimou a distância  $d$  entre elas e nosso planeta.

Analisando os resultados experimentais, verificou que  $v$  e  $d$  são proporcionais. Assim, quanto mais afastadas da Terra estão as galáxias, mais velozes elas são em relação a nós.

A expressão a seguir traduz a **Lei de Hubble**:

$$v = H d$$

Nessa expressão,  $H$  é uma constante que recebeu o nome de **constante de Hubble**.

O valor mais recente obtido para  $H$  é:

$$H = \frac{(71 \pm 4) \text{ km/s}}{\text{Mpc}}$$

1 Mpc (lê-se: megaparsec) =  $10^6$  pc; e 1 pc (lê-se parsec)  $\cong$  3,26 anos-luz.



#### Como medir a expansão do Universo?

Leia o texto a seguir e reflita sobre as questões nele propostas.

#### Opa! Acho que voltamos para o centro do Universo!

Para medirmos a expansão do Universo não deveríamos necessariamente estar no centro dele? Se vemos as coisas se afastando, não somos com certeza o centro desse movimento de afastamento? A comprovação experimental da expansão do Universo não recoloca o homem no centro de tudo?

Definitivamente, não! Para entender melhor a ideia, vamos imaginar que o Universo seja um panetone. Quando a massa é preparada, as passas e frutas cristalizadas são misturadas na massa crua e o panetone é colocado numa fôrma. Durante o processo em que a massa é assada, temos a expansão do nosso “universo panetone”.

Se você se posicionar no referencial de qualquer uva-passa ou pedacinho de fruta cristalizada, vai detectar afastamentos, não vai? Não é preciso estar no centro do panetone para dizer que o “universo panetone” está em expansão, concorda?

Então conforme-se: você mora num pequenino planeta que gira ao redor de uma insignificante estrela que está na periferia de uma galáxia que por sua vez está na periferia de um dos inúmeros aglomerados de galáxias...

Definitivamente, não somos o centro!

BRAZ JÚNIOR, Dulcídio. *Física moderna: tópicos para o Ensino Médio*. Campinas: Companhia da Escola, 2002. p. 84.



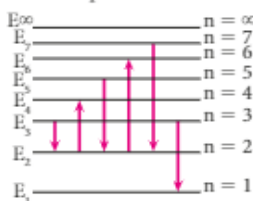
## QUESTÕES COMENTADAS



**12** O esquema a seguir representa possíveis transições do átomo de hidrogênio. Nesse esquema,  $n = \infty$  significa que o elétron foi removido do átomo, ou seja, o átomo está ionizado.

**Dado:** constante de Planck:  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Js

- Calcule, em elétron-volt, a energia  $E_n$  associada a cada nível quântico  $n$  indicado no esquema.
- Observe os sentidos das transições indicadas e determine quais indicam que o elétron absorve energia.
- Considerando as transições indicadas, calcule a menor frequência que uma radiação emitida pelo átomo pode ter.
- Estando o elétron no estado fundamental, calcule a mínima energia necessária para ionizar o átomo.



### RESOLUÇÃO

- a) Os níveis de energia possíveis são dados pela expressão:

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV}$$

Substituindo nela os valores  $n = 1, n = 2, n = 3, n = 4, n = 5, n = 6, n = 7$  e  $n = \infty$ , obtemos:

$E_1 = -13,6 \text{ eV}$	$E_5 = -0,54 \text{ eV}$
$E_2 = -3,40 \text{ eV}$	$E_6 = -0,38 \text{ eV}$
$E_3 = -1,51 \text{ eV}$	$E_7 = -0,28 \text{ eV}$
$E_4 = -0,85 \text{ eV}$	$E_\infty = 0 \text{ eV}$

- b) Quando o elétron absorve energia, ele passa para um nível de energia maior. Isso ocorre nas transições:

de  $n = 2$  para  $n = 4$  e de  $n = 2$  para  $n = 6$ .

- c) Para haver emissão de radiação, a transição deve ocorrer de um nível de energia mais alto para um mais baixo.

Vamos calcular as energias  $E$  possíveis dos fótons emitidos:

Transição	$E$
De $n = 3$ para $n = 2$	$E = E_3 - E_2 = (-1,51 \text{ eV}) - (-3,40 \text{ eV}) = 1,89 \text{ eV}$
De $n = 5$ para $n = 2$	$E = E_5 - E_2 = (-0,54 \text{ eV}) - (-3,40 \text{ eV}) = 2,86 \text{ eV}$
De $n = 7$ para $n = 2$	$E = E_7 - E_2 = (-0,28 \text{ eV}) - (-3,40 \text{ eV}) = 3,12 \text{ eV}$
De $n = 3$ para $n = 1$	$E = E_3 - E_1 = (-1,51 \text{ eV}) - (-13,6 \text{ eV}) = 12,09 \text{ eV}$

Observe que a **menor** energia possível para o fóton emitido é igual a 1,89 eV e, como  $E = hf$ , a frequência correspondente também é a menor.

Precisamos converter 1,89 eV em J:

$$E = 1,89 \text{ eV} = 1,89 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 3,02 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{Então: } E = hf \Rightarrow f = \frac{E}{h} = \frac{3,02 \cdot 10^{-19}}{6,63 \cdot 10^{-34}}$$

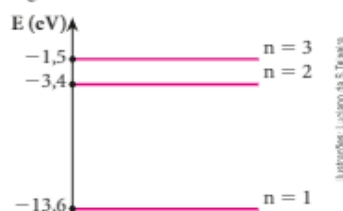
$$\text{Logo: } f = 4,6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

- d) O elétron precisa receber, no mínimo, a energia necessária para passar de  $n = 1$  ( $E_1 = -13,6 \text{ eV}$ ) para  $n = \infty$  ( $E = 0$ ).

Portanto: A mínima energia necessária é igual a +13,6 eV.

- Respostas:** a)  $E_1 = -13,6 \text{ eV}$ ,  $E_2 = -3,40 \text{ eV}$ ,  $E_3 = -1,51 \text{ eV}$ ,  $E_4 = -0,85 \text{ eV}$ ,  $E_5 = -0,54 \text{ eV}$ ,  $E_6 = -0,38 \text{ eV}$ ,  $E_7 = -0,28 \text{ eV}$ ,  $E_\infty = 0 \text{ eV}$ .  
 b) De  $n = 2$  para  $n = 4$  e de  $n = 2$  para  $n = 6$ .  
 c)  $4,6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$  d) +13,6 eV

- 13** A figura a seguir representa os níveis de energia  $E$  para o estado fundamental ( $n = 1$ ), para o primeiro estado excitado ( $n = 2$ ) e para o segundo estado excitado ( $n = 3$ ) do átomo de hidrogênio.



Considere um átomo de hidrogênio no estado fundamental ( $n = 1$ ).

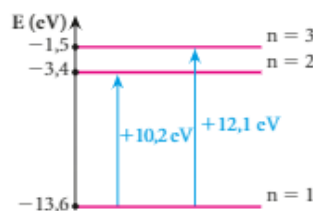
- Se o elétron desse átomo receber um fóton de energia igual a 12,1 eV, o átomo será excitado para qual estado?
- Repita o item **a** para o caso de o elétron receber um fóton de energia igual a 11,4 eV.
- Se o elétron do átomo de hidrogênio, ainda no estado fundamental, for atingido por outro elétron de energia cinética igual a 11,4 eV, que bombardeia o átomo, para que estado esse átomo será excitado?

### RESOLUÇÃO

- a) Observe que a excitação de  $n = 1$  para  $n = 2$  requer um acréscimo de energia igual a:

$$(-3,4 \text{ eV}) - (-13,6 \text{ eV}) = 10,2 \text{ eV}$$

Já a excitação de  $n = 1$  para  $n = 3$  requer uma energia dada por:  $(-1,5 \text{ eV}) - (-13,6 \text{ eV}) = 12,1 \text{ eV}$ .



Portanto, o fóton de 12,1 eV é absorvido pelo elétron e o átomo passa para o segundo estado excitado ( $n = 3$ ).

- b) Como 11,4 eV não corresponde à energia exata para ocorrer a transição de  $n = 1$  para  $n = 2$ , nem de  $n = 1$  para  $n = 3$ , o fóton **não será absorvido** pelo elétron e o átomo permanecerá no estado fundamental ( $n = 1$ ).
- c) Nesse caso, a excitação não será causada por um fóton, mas por um **elétron** que bombardeia o átomo. Assim,

não existe mais aquela restrição à absorção de energia como no item **b**: a interação elétron-elétron segue as teorias da Física Clássica.

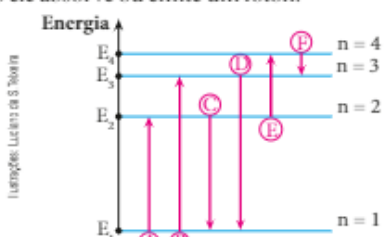
Da energia do elétron incidente (11,4 eV), a parcela de 10,2 eV será absorvida pelo elétron do átomo, que passará para o primeiro estado excitado ( $n = 2$ ).

Ao elétron incidente restará uma energia cinética igual a 1,2 eV após a colisão.

**Respostas:** Ver resolução.

**QUESTÕES PROPOSTAS** FAÇA NO CADERNO.

14. A figura a seguir representa algumas transições possíveis (A, B, C, D, E e F) de um elétron de determinado átomo quando ele absorve ou emite um fóton.

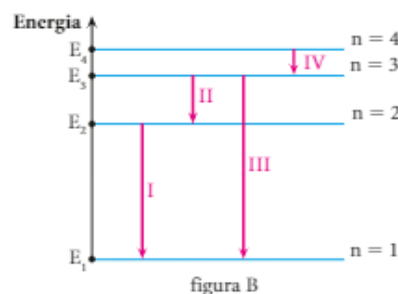


- a) Em quais das transições indicadas o elétron absorve energia?
- b) Em qual dessas transições é absorvido um fóton de **menor** comprimento de onda?
- c) Em qual das transições é emitido um fóton com o **maior** comprimento de onda?

15. Uma ampola de vidro contém um elemento químico no estado gasoso atômico. Quando esse gás é excitado ele emite luz, e um estreito feixe dessa luz atravessa um prisma óptico, decompondo-se em estreitos feixes cujas cores estão indicadas na figura A.



A figura B representa as transições (I, II, III e IV) responsáveis pela emissão dos feixes da figura A.



A cada cor representada na figura A associe a transição correspondente indicada na figura B.

16. Sejam  $n = 1, n = 2$  e  $n = 3$  alguns dos níveis de energia em que um elétron de determinado átomo pode estar, correspondentes às energias  $E_1, E_2$  e  $E_3$ , respectivamente.

Na transição de  $n = 3$  para  $n = 2$ , esse elétron emite um fóton de comprimento de onda igual a 570 nm.

Dado que  $E_2 = 5E_1$  e  $E_3 = 7E_1$ , determine o comprimento de onda do fóton emitido pelo elétron na transição:

- a) de  $n = 3$  para  $n = 1$ ;
- b) de  $n = 2$  para  $n = 1$ .

17. De que tipo é o espectro da luz emitida pela chama de uma vela: contínuo ou de linhas?

**DESCUBRA MAIS**

- 1) Faça uma pesquisa sobre a descoberta, a explicação e algumas aplicações do efeito Cherenkov.
- 2) Em um determinado local da superfície interna do bulbo de vidro de uma lâmpada de incandescência, instalada em um soquete fixo, surge, após muito tempo de uso, uma mancha escura e com certo espelhamento. Qual é a origem dessa mancha?
- 3) Pode-se falar em temperatura do vácuo? O que um termômetro abandonado no espaço, solitário em uma região de vácuo, vai indicar em sua escala?
- 4) Um corpo negro precisa ser necessariamente um corpo escuro?
- 5) Como ocorre a emissão de *laser*?

## Efeito Doppler luminoso

O fenômeno sonoro, estudado no Volume 2, que consiste de um som apresentar uma frequência aparente diferente de sua frequência real em virtude de haver movimento relativo entre a fonte de ondas e o observador é o **efeito Doppler**. Esse efeito também pode ser notado com a luz, sendo descrito, nesse caso, por equações diferentes daquelas apresentadas para o som.

Na situação da luz, devido às grandes velocidades envolvidas, fazem-se necessárias considerações relativísticas. Uma informação luminosa pode ser observada mais avermelhada (luz "grave" ou de menor frequência) ou mais azulada (luz "aguda" ou de maior frequência) em função de estar ocorrendo, respectivamente, afastamento da fonte de ondas em relação ao observador ou aproximação da fonte de ondas em relação ao observador.

O astrônomo estadunidense Edwin Powell **Hubble** (1889-1953) se notabilizou por descobrir que as nebulosas – galáxias situadas fora da Via Láctea – afastam-se umas das outras com velocidades diretamente proporcionais às distâncias que as separam. Essa constatação deu forte amparo à teoria do *big-bang*, segundo a qual o Universo teria surgido a partir de uma grande explosão, encontrando-se desde essa singularidade em franca expansão. As nebulosas foram observadas por Hubble avermelhadas em vez de brancas, como se deveria esperar. Esse deslocamento detectado no espectro luminoso emitido por elas no sentido dos tons avermelhados foi chamado de *red shift* (desvio para o vermelho). Hubble explicou suas observações com base no efeito Doppler luminoso, segundo o qual, em processo de afastamento do nosso planeta, a luz proveniente de fontes estelares deve ser notada mais "grave" (com menor frequência), de maneira semelhante ao que ocorre com o som da sirene de uma ambulância que se afasta de um observador em repouso.

A explicação de Hubble para o *red shift*, que sugere que o tom avermelhado observado nas nebulosas se deve ao fato de elas estarem se afastando entre si e da Terra, é um dos pilares que sustentam a teoria do *big-bang*. Segundo essa visão, o Universo teria se iniciado há cerca de 13,8 bilhões de anos a partir de uma grande explosão.

Naquele instante primordial (singularidade), toda a matéria e energia do Universo estaria compactada em um único ambiente de dimensões quase atômicas. Desde então, a matéria e a energia ali contidas afastam-se desse "epicentro" com velocidades que se intensificam na razão direta da distância (lei de Hubble).

Selecionamos um dos artigos de Marcelo Gleiser, publicado no jornal *Folha de S.Paulo*, sobre o efeito Doppler luminoso e a concepção do Universo em Expansão.

### O Universo está em constante expansão

Se conseguirmos escapar das luzes da cidade grande, em uma noite sem nuvens e sem Lua, podemos distinguir uma faixa difusa de luz se estendendo pelo céu, uma névoa que brilha por si só, decorada aqui e ali por estrelas. Essa faixa de luz, como nós sabemos, é parte da Via Láctea, a galáxia onde vivemos.



Universo Imagem © 2012 Universal History Archive/Corbis

Uma galáxia é um aglomerado de estrelas e gás atraídos pela gravidade. Na Via Láctea, existem centenas de bilhões de outras estrelas além do Sol. E no Universo existem centenas de bilhões de outras galáxias, cada uma contendo desde milhões até centenas de bilhões de estrelas.

Por incrível que pareça, até o início da década de 20 do século passado, não sabíamos ao certo se existiam outras galáxias no Universo. Astrônomos debatiam se as “nebulosas” vistas com seus telescópios eram outras galáxias (conhecidas na época como “universos-ilha”), distantes da Via Láctea, ou se eram apenas nuvens de gás interestelar fazendo parte da nossa galáxia.

Em 1924, o jovem astrônomo norte-americano Edwin Hubble resolveu de vez essa questão, provando que algumas nebulosas não faziam parte da Via Láctea, mas eram outros “universos-ilha”. O Universo se tornou muito maior do que muitos até então suspeitavam.

Mas a maior descoberta de Hubble ainda estava por vir. Entre 1929 e 1931, Hubble demonstrou que o Universo não só era muito maior do que se suspeitava, mas que ele era uma entidade dinâmica, em expansão. Para demonstrar sua tese, Hubble usou o chamado “efeito Doppler”, proposto pelo físico austríaco Johann Christian Doppler em 1842. Nós somos muito familiarizados com a versão auditiva do efeito Doppler. Quando uma sirene ou uma buzina viajam em nossa direção, ouvimos seus tons sempre mais agudos do que quando a mesma sirene ou buzina estão em repouso. Já quando a sirene ou buzina se afastam, ouvimos seus tons sempre mais graves.

Esse é um efeito típico da propagação de ondas. No caso da sirene ou buzina que se afastam, a distância entre duas cristas consecutivas (ou “comprimento de onda”) aumenta, causando o som mais grave. É como se o movimento da fonte “esticasse” a onda. No caso contrário, quando a fonte se aproxima, o comprimento de onda diminui e ouvimos o tom mais agudo. O mesmo efeito acontece com ondas de luz emitidas por alguma fonte, como uma estrela ou uma galáxia.

Examinando a luz emitida por várias galáxias em um aparelho chamado espectroscópio, Hubble observou que, geralmente, essa luz apresentava um desvio para maiores comprimentos de onda. Como o vermelho é a cor com maior comprimento de onda, esse efeito ficou conhecido como “desvio para o vermelho”.

Baseado no efeito Doppler, Hubble concluiu que as galáxias estavam se afastando de nós com velocidades proporcionais a sua distância. Portanto, uma galáxia duas vezes mais distante se afasta duas vezes mais rápido. A expansão do Universo obedece a uma lei extremamente simples! A noção de que o Universo está em expansão incita uma série de perguntas. No decorrer dos próximos meses, teremos a oportunidade de discutir algumas delas em detalhe. Eis aqui as cinco perguntas mais populares:

- 1) Se o Universo está em expansão, onde fica seu centro?
- 2) Essa expansão implica que o Universo deve ter tido um começo. Qual é a sua idade?
- 3) Qual é o seu tamanho?
- 4) Será que existe um “outro” universo lá fora?
- 5) Se o Universo teve um começo, qual será seu fim?

A curiosidade da humanidade em conhecer sua origem e destino é tão antiga quanto sua história. Por meio do casamento da Física com a Astronomia, cosmólogos estão, pela primeira vez, conseguindo desvendar alguns desses mistérios. Mas outros sempre aparecem em seu lugar.

GLEISER, Marcelo. Disponível em: <[www1.folha.uol.com.br/fsp/1997/11/30/mais/46.html](http://www1.folha.uol.com.br/fsp/1997/11/30/mais/46.html)>. Acesso em: 1º fev. 2016.

## Compreensão, pesquisa e debate

1. Se o Universo tem idade finita, de aproximadamente 13,8 bilhões de anos, o que existiu antes do *big-bang*? Leve essa discussão para sua escola e promova debates com colegas e professores.
2. A lei de Hubble a respeito da expansão do Universo estabelece que a velocidade  $v$  de afastamento das galáxias é diretamente proporcional à distância  $d$  entre elas, isto é,  $v$  e  $d$  relacionam-se conforme uma expressão do tipo  $v = H \cdot d$ , em que  $H$  é a constante de Hubble, cujo valor aproximado é  $60 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}/\text{megaparsec}$ . Pesquise a definição da unidade de comprimento **parsec**, usada em Astronomia, e estime o raio máximo que poderia adquirir o Universo.
3. Seria possível a existência de outros universos além do “nosso”?
4. Pesquise sobre Astronomia, Astrofísica e Cosmologia e se inteire das atuais conjecturas a respeito do Universo.



# MAIS DE FÍSICA MODERNA: RELATIVIDADE E OUTRAS NOÇÕES

## 1. INTRODUÇÃO

Como se estuda em Mecânica Clássica, a velocidade, por exemplo, é uma grandeza **relativa**, isto é, uma grandeza que depende do referencial em relação ao qual é determinada. Consequentemente, também são relativas outras grandezas que dependem da velocidade, como a energia cinética e a quantidade de movimento.

A energia potencial de gravidade é outra grandeza cujo caráter relativo é evidente. De fato, o valor dessa energia ( $mgh$ ) depende do nível de referência adotado para medir alturas.

As grandezas **comprimento**, **tempo** e **massa**, entretanto, sempre foram tratadas como **absolutas**, isto é, independentes do referencial em que são medidas.

Se alguém afirmar que o comprimento de uma ponte, o tempo de duração de uma aula e a massa de uma pessoa dependem do referencial, você certamente achará absurdas essas afirmações. Entretanto, como veremos nesta breve exposição, comprimento, massa e tempo, grandezas consideradas absolutas na Mecânica Clássica, também são grandezas **relativas**! A relatividade dessas grandezas, porém, só fica evidenciada quando estudamos situações em que as velocidades são muito altas, isto é, não desprezíveis em comparação com a velocidade da luz no vácuo, que é de 300000 km/s, aproximadamente.

O motivo da nossa perplexidade diante do caráter relativo do comprimento, do tempo e da massa é estarmos habituados a situações em que as velocidades são insignificantes em comparação com a da luz no vácuo. Mesmo a velocidade de 2000 km/h de um avião supersônico e a velocidade de 30 km/s da Terra em seu movimento de translação ao redor do Sol são desprezíveis em comparação com 300000 km/s.

## 2. O SURGIMENTO DA TEORIA DA RELATIVIDADE

Entre o final do século XIX e o princípio do século XX, vários fatos importantes não estavam explicados. Como vimos, alguns foram esclarecidos pela Física Quântica. Entretanto, outras questões continuavam sem respostas. Estas só foram dadas por outra teoria: a Teoria da Relatividade, de Einstein.

Essa teoria, que introduziu profundas transformações em conceitos básicos, é composta de duas partes.

Uma delas é a Teoria da Relatividade Restrita (ou Especial), publicada por Einstein em 1905, quando ele tinha 26 anos de idade. Nessa parte, todos os fenômenos são analisados em relação a referenciais necessariamente **inerciais**.

A outra parte é a Teoria da Relatividade Geral, publicada em 1915, que aborda fenômenos do ponto de vista de referenciais **não inerciais**.

Neste livro, só trataremos de alguns pontos da **Teoria da Relatividade Restrita**.

É importante destacar que a Teoria da Relatividade não destruiu a Mecânica Newtoniana, que continua válida para velocidades muito pequenas em comparação com a velocidade da luz no vácuo.

## 3. OS POSTULADOS DE EINSTEIN

Einstein construiu a Teoria da Relatividade Restrita a partir de dois postulados:

- <sup>1º)</sup> As leis da Física são as mesmas, expressas por equações que têm a mesma forma, em qualquer referencial inercial. Não existe um referencial inercial privilegiado.

- 2ª) A velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor  $c$  ( $c \cong 300\,000$  km/s) em relação a qualquer referencial inercial.

Note que o segundo postulando contraria radicalmente a maneira newtoniana de compor velocidades. Para confirmar isso, considere uma nave em repouso em relação às estrelas e recebendo a luz emitida por uma lanterna, como ilustra a figura a seguir.



A velocidade da citada luz em relação à nave é de aproximadamente 300000 km/s.

Imagine, agora, que a nave entre em movimento retilíneo e uniforme para a direita, a 100000 km/s. Se a composição de velocidades da Mecânica Clássica continuasse valendo, a velocidade da luz emitida pela lanterna seria, em relação à nave, de 400000 km/s. Entretanto, por mais absurdo que pareça, essa velocidade continua igual a 300000 km/s!

Vale dizer que, na Teoria da Relatividade, nenhuma composição de velocidades poderá resultar em um valor superior a  $c \cong 300\,000$  km/s, que é, pelos conhecimentos atuais, a maior velocidade possível no Universo.

É importante destacar também que, a partir de seus dois postulados, Einstein elaborou uma teoria que esclareceu muitas dúvidas e que, acima de tudo, foi constatada experimentalmente.

Observe que esses postulados – os pilares da Teoria da Relatividade Restrita – se aplicam a referenciais **inerciais**, que podem ser satisfatoriamente entendidos como sendo referenciais não dotados de qualquer tipo de aceleração em relação às estrelas. A Terra, então, não é um referencial inercial porque seus movimentos possuem acelerações em relação às estrelas (especialmente o movimento de rotação em torno de seu eixo).

Entretanto, as intensidades dessas acelerações são pequenas o suficiente para podermos tratar a Terra como referencial inercial em fenômenos de curta duração em relação a 24 horas.

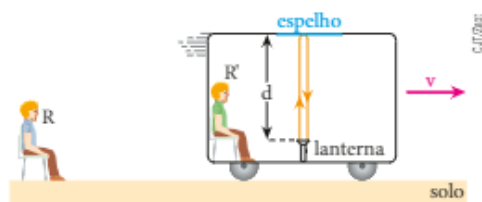
É preciso destacar que, para elaborar a Teoria da Relatividade, Einstein contou não só com sua grande genialidade, mas também com trabalhos de outros físicos, como os estadunidenses Albert A. Michelson (1852-1931) e E. W. Morley (1838-1923) e o holandês H. A. Lorentz (1853-1928).

## 4. A DILATAÇÃO DO TEMPO

Vamos agora estudar a relatividade do tempo.

Constataremos que o intervalo de tempo decorrido entre dois eventos, isto é, entre dois acontecimentos, depende do referencial que observa esses eventos.

Para isso, considere um vagão em movimento retilíneo e uniforme, com velocidade  $v$  em relação ao solo. Um espelho plano está colado no teto do vagão e uma lanterna está colada em seu piso, a uma distância  $d$  do espelho, como representa a figura a seguir.



A lanterna emite do piso um pulso de luz que vai até o espelho no teto e retorna à lanterna. Vamos definir dois eventos:

- **Primeiro evento:** a lanterna emitindo o pulso de luz.
- **Segundo evento:** o pulso de luz chegando de volta à lanterna.

Vamos analisar o intervalo de tempo, decorrido entre esses dois eventos, em relação a dois referenciais assim definidos:

- **R':** referencial em repouso **em relação ao local onde ocorreram os eventos**. Para esse referencial, o intervalo de tempo entre os eventos será representado por  $\Delta t'$ .
- **R:** referencial em movimento **em relação ao local onde ocorreram os eventos**. Para esse referencial, o intervalo de tempo entre os eventos será representado por  $\Delta t$ .

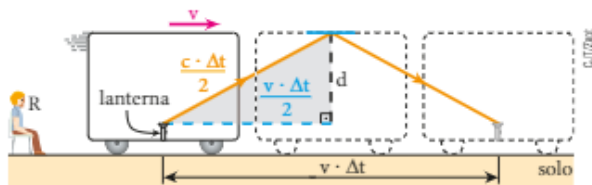
Observe que, na situação representada na figura acima, **R'** é um referencial no vagão e **R** é um referencial no solo.

**Do ponto de vista do referencial R'**, a luz faz o trajeto indicado naquela figura, propagando-se com velocidade  $c$  e percorrendo a distância  $2d$  durante o intervalo de tempo  $\Delta t'$ .

Então, lembrando que  $v = \frac{\Delta S}{\Delta t}$ , em relação a **R** podemos escrever:

$$c = \frac{2d}{\Delta t'} \Rightarrow \Delta t' = \frac{2d}{c}$$

Veja, agora, como foi o trajeto da luz, entre os dois eventos citados, em relação ao referencial **R**, estacionário no solo (mas **em movimento em relação ao local dos eventos**):



Do ponto de vista de **R**, nesse trajeto, a luz, também com velocidade  $c$  (não depende do referencial), percorreu durante um intervalo de tempo  $\Delta t$  a distância  $c \cdot \Delta t$  ( $\Delta s = v_{\text{luz}} \cdot \Delta t = c \cdot \Delta t$ ):  $\frac{c \cdot \Delta t}{2}$  na ida e  $\frac{c \cdot \Delta t}{2}$  na volta. Enquanto isso, **R** viu o vagão, com velocidade  $v$ , se deslocar  $v \cdot \Delta t$ .

No triângulo retângulo destacado na figura acima, podemos usar o teorema de Pitágoras:

$$\begin{aligned} \left(\frac{c \cdot \Delta t}{2}\right)^2 &= d^2 + \left(\frac{v \cdot \Delta t}{2}\right)^2 \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{c^2 \cdot \Delta t^2}{4} &= d^2 + \frac{v^2 \cdot \Delta t^2}{4} \Rightarrow \\ \Rightarrow c^2 \cdot \Delta t^2 &= 4d^2 + v^2 \cdot \Delta t^2 \Rightarrow \\ \Rightarrow (c^2 - v^2)\Delta t^2 &= 4d^2 \Rightarrow \Delta t^2 = \frac{4d^2}{c^2 - v^2} \Rightarrow \\ \Rightarrow \Delta t^2 &= \frac{4d^2}{c^2\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} \Rightarrow \Delta t = \frac{2d}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{aligned}$$

Como  $\frac{2d}{c} = \Delta t'$ , temos:  $\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

Como a expressão  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$  é menor do que 1, concluímos que  $\Delta t$  é maior que  $\Delta t'$ .

Note que isso tinha de acontecer, pois, como a velocidade da luz é a mesma para os dois referenciais, o intervalo de tempo entre os dois eventos tem de ser maior para o referencial **R**, que vê a luz percorrer a maior distância.

Para um referencial **R**, que se move **em relação ao local onde ocorrem eventos**, o intervalo de tempo  $\Delta t$  entre os eventos é **maior** que o intervalo  $\Delta t'$  medido pelo referencial **R'**, em repouso **em relação ao local dos eventos**. A isso se dá o nome de **dilatação do tempo**.

**Exemplo:**

Considerando a situação anterior, suponha que um relógio, no pulso de **R'**, registre, entre dois eventos quaisquer ocorridos dentro do vagão, um intervalo de tempo  $\Delta t' = 12$  minutos e que a velocidade do vagão seja  $v = 0,8c$  (80% da velocidade da luz no vácuo).

Vamos então calcular quanto tempo registra, entre esses eventos, um relógio no pulso de **R**:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{12}{\sqrt{1 - \frac{(0,8c)^2}{c^2}}} = \frac{12}{\sqrt{1 - 0,64}}$$

Logo:  $\Delta t = 20$  min

Note que, para **R'**, o tempo passa mais devagar. Qualquer processo físico, reação química ou processo biológico que ocorre dentro do vagão é mais lento para **R'** do que para **R**. Incluem-se nesse caso os batimentos cardíacos e a rapidez com que o mecanismo de um relógio opera.

**NOTAS**

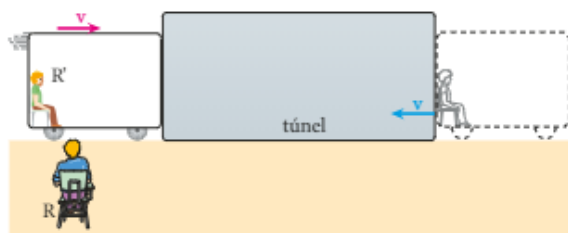
- Se  $v$  for desprezível em relação a  $c$ ,  $\frac{v^2}{c^2}$  será praticamente igual a zero e  $\Delta t$  será praticamente igual a  $\Delta t'$ . Por isso, podemos dizer que a Mecânica Clássica, para a qual  $\Delta t$  é igual a  $\Delta t'$ , é um caso particular da Teoria da Relatividade em que as velocidades são muito baixas, impossibilitando a detecção dos efeitos relativísticos.
- Se, na situação analisada na exposição desta seção, os eventos, em vez de ocorrerem no vagão, **ocorressem no solo** (lanterna e espelho fixos em relação ao solo), o referencial **R'** estaria no solo (referencial em repouso **em relação ao local dos eventos**) e **R** estaria no vagão (referencial em movimento em relação ao local dos eventos). O intervalo de tempo  $\Delta t$ , medido por **R**, continuaria **maior** que  $\Delta t'$ , medido por **R'**, e a expressão deduzida para  $\Delta t$  continuaria exatamente a mesma.

## 5. A CONTRAÇÃO DO COMPRIMENTO

Nesta seção, vamos estudar a relatividade do comprimento. Constatemos que o comprimento de um corpo depende do referencial em que é medido.

Para isso, considere o mesmo vagão da seção anterior, nas mesmas condições lá estabelecidas.

Vamos supor que o vagão vai passar por um túnel, como ilustra a figura abaixo. Apesar da desproporcionalidade dessa figura, despreze o comprimento do vagão em comparação com o do túnel.



A medida do comprimento do túnel será analisada em relação a dois referenciais assim definidos:

- **R**: referencial em repouso em relação ao corpo cujo comprimento será medido (no caso, o corpo é o túnel). Para esse referencial, o comprimento do túnel é  $\ell$ .
- **R'**: referencial móvel em relação ao corpo (túnel) cujo comprimento será medido. Para esse referencial, o comprimento do túnel é  $\ell'$ .

Para o referencial **R**, o comprimento do túnel mede  $\ell$ . Então, enquanto o vagão passa completamente pelo túnel, esse referencial **R** o vê percorrer uma distância  $\ell$  durante um intervalo de tempo  $\Delta t$ , medido em um relógio em seu pulso. Assim, em relação a **R**, podemos escrever:

$$v = \frac{\ell}{\Delta t} \Rightarrow \ell = v \cdot \Delta t$$

Para o referencial **R'**, o túnel tem comprimento igual a  $\ell'$  e se move para a esquerda, com velocidade de módulo  $v$ , indicada em azul na figura acima.

Assim, **R'** vê o túnel passar completamente por ele, percorrendo uma distância  $\ell'$  durante um intervalo de tempo  $\Delta t'$ , medido em um relógio em seu pulso. Então, em relação a **R'**, temos:

$$v = \frac{\ell'}{\Delta t'} \Rightarrow \ell' = v \cdot \Delta t'$$

Como  $\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ , então:  $\Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$

Substituindo  $\Delta t'$  na expressão de  $\ell'$ , temos:

$$\ell' = v \cdot \Delta t' \Rightarrow \ell' = \underbrace{v \cdot \Delta t}_{\ell} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Como  $v \cdot \Delta t$  é igual a  $\ell$ , temos:  $\ell' = \ell \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$

Como  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$  é menor do que 1, temos  $\ell'$  menor que  $\ell$ . Então:

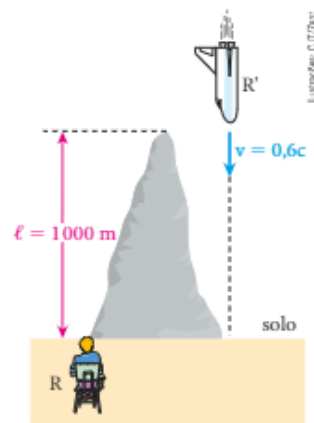
Para um referencial **R**, que está em repouso em relação a um corpo, esse corpo tem comprimento  $\ell$ , e para um referencial **R'**, que se move em relação ao mesmo corpo, o comprimento desse corpo é  $\ell'$ , sendo  $\ell'$  menor que  $\ell$ . A isso se dá o nome de **contração do comprimento**.

É preciso destacar que essa contração só acontece na direção do movimento.

**Exemplo:**

Uma nave dirige-se verticalmente de encontro ao solo, com velocidade  $v$  igual a  $0,6c$  em relação a ele. Em certo instante, ela está começando a passar por um pico de  $1000\text{ m}$  de altura, medida por um observador fixo no solo. Vamos determinar a que altura a nave se encontra nesse mesmo instante, medida por um de seus tripulantes.

Como é **R'** que se move em relação ao pico (corpo em estudo), a altura do pico para **R'**,  $\ell'$ , tem de ser **menor** que a altura  $\ell = 1000\text{ m}$  medida por **R**, que está em repouso em relação ao pico.



De fato:

$$\ell' = \ell \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 1000 \sqrt{1 - \frac{(0,6c)^2}{c^2}}$$

$$\ell' = 800\text{ m}$$

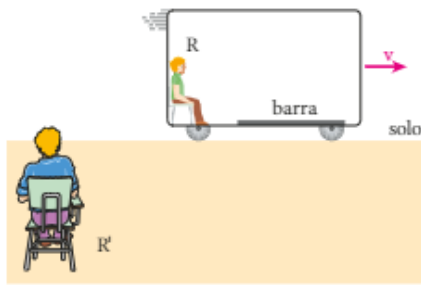
Observe que no caso de  $v$  ser desprezível em relação a  $c$ , teremos:

$$\frac{v^2}{c^2} \cong 0 \Rightarrow \ell' \cong \ell$$

Lembre-se de que, na Mecânica Clássica,  $\ell'$  é igual a  $\ell$ . Se o corpo em estudo estivesse dentro do vagão e fixado nele, o referencial **R**, em repouso em relação ao corpo, estaria no vagão. O referencial **R'**, por sua vez, em movimento em relação ao corpo, estaria no solo. Nessa situação, a contração do comprimento do corpo ocorreria para **R'**.



Veja o exemplo a seguir, em que uma barra foi fixada no piso do vagão, alinhada na direção de seu movimento.



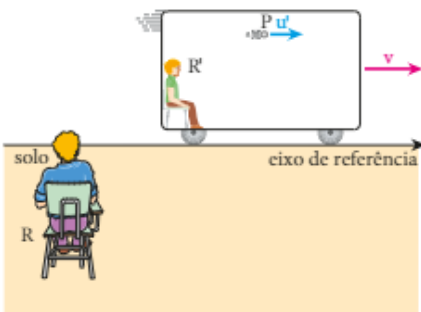
O comprimento  $\ell'$  que a barra tem em relação a  $R'$  é **menor** que o comprimento  $\ell$  que ela tem em relação a  $R$ :

$$\ell' = \ell \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \Rightarrow \ell' < \ell$$

## 6. COMPOSIÇÃO DE VELOCIDADES

Como já dissemos, a maneira de compor velocidades na Teoria da Relatividade é bem diferente do que se faz na Mecânica Newtoniana.

Retomando o vagão analisado anteriormente, vamos considerar a seguinte situação particular, em que as velocidades têm a mesma direção:



O vagão move-se com velocidade  $v$  em relação ao solo, e um objeto  $P$  move-se com velocidade  $u'$  em relação ao vagão. Pode-se demonstrar que a velocidade  $u$  do objeto  $P$  em relação ao solo é dada por:

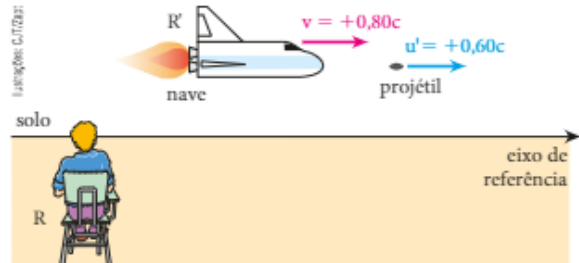
$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{vu'}{c^2}}$$

Ao usar essa expressão, cada velocidade terá um valor algébrico: positivo, quando tem o mesmo sentido

do eixo de referência (ver figura anterior), e negativo, quando tem sentido oposto ao desse eixo.

### Exemplo:

Uma nave move-se com velocidade  $0,80c$  em relação ao solo quando lança um projétil com velocidade  $0,60c$  em relação a ela, como ilustra a figura a seguir.



Observe que as duas velocidades têm valor algébrico positivo porque estão no mesmo sentido do eixo de referência.

Vamos calcular, então, a velocidade  $u$  do projétil em relação ao solo:

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{vu'}{c^2}} = \frac{0,60c + 0,80c}{1 + \frac{0,80c \cdot 0,60c}{c^2}} = \frac{1,40c}{1,48}$$

$$u = 0,95c$$

Imagine, agora, que fosse possível termos  $v = c$  e  $u' = c$ ; vamos calcular o novo valor de  $u$ :

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{vu'}{c^2}} = \frac{c + c}{1 + \frac{cc}{c^2}} = \frac{2c}{1+1} \Rightarrow u = c$$

Note que jamais obteremos uma velocidade superior a  $c$ , que é o valor-limite.

Se  $v$  e  $u'$  forem desprezíveis em relação a  $c$ , cairemos mais uma vez na Mecânica Clássica:

$$\frac{vu'}{c^2} \cong 0 \Rightarrow u \cong u' + v$$

De fato, na Mecânica Clássica,  $u$  é igual a  $u' + v$ .

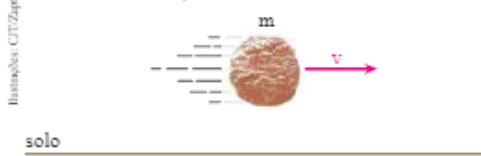
## 7. MASSA RELATIVÍSTICA

Considere, por exemplo, uma pedra em repouso em relação ao solo:



Vamos simbolizar por  $m_0$  a massa da pedra medida nessa situação ( $m_0$  chama-se **massa de repouso**).

Suponha, agora, que essa mesma pedra esteja em movimento em relação ao solo, com velocidade  $v$ :

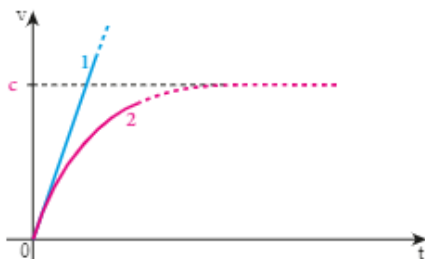


Pode-se demonstrar que, nessa nova situação, a massa da pedra passa a ser  $m$ , dada pela expressão:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{em que } m \text{ se chama } \mathbf{massa \textit{ relativística}}.$$

Note que, sendo  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$  menor que 1,  $m$  é **maior** que  $m_0$ , ou seja, a massa da pedra em movimento é maior que sua massa de repouso. Note também que, quanto maior for  $v$ , maior será a massa  $m$ .

Evidentemente esse aumento de massa não significa um aumento da quantidade de partículas que constituem a pedra, mas um aumento da sua **inércia**. Por exemplo, se a pedra estiver em movimento retilíneo acelerado, sob ação de uma força resultante **constante**, sua aceleração **não será constante**, mas diminuirá à medida que sua velocidade aumentar, conforme ilustra a seguinte figura:



O gráfico 1 representa a previsão da mecânica clássica: a aceleração da pedra é constante e sua velocidade cresce **indefinidamente**.

O gráfico 2 representa a previsão relativística: a aceleração da pedra diminui com o tempo, em virtude do aumento de sua inércia, e sua velocidade é limitada pelo valor  $c$ .

Nos aceleradores de partículas, em que elétrons, por exemplo, atingem velocidades próximas de  $c$ , a variação da massa com a velocidade é plenamente comprovada.

#### Exemplo:

Vamos calcular a massa que teria uma pessoa se pudesse se mover com velocidade  $0,8c$ , considerando sua massa de repouso igual a  $60 \text{ kg}$ .

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{60}{\sqrt{1 - 0,64}} \text{ V } m = 100 \text{ kg}$$

#### NOTAS

r Quando  $v$  tende a  $c$ ,  $\frac{v^2}{c^2}$  tende a 1. Assim,  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$  tende a zero e  $m$  tende a infinito. Como nenhum corpo pode ter massa infinita, sua velocidade sempre será menor que  $c$ .

• Se  $v$  for muito menor que  $c$ , teremos:  $\frac{v^2}{c^2} \approx 0 \Rightarrow m \approx m_0$ . Como sabemos, na Mecânica Clássica, em que as velocidades são muito menores que a da luz no vácuo,  $m$  é igual a  $m_0$ .

## 8. EQUIVALÊNCIA ENTRE MASSA E ENERGIA

Considere, novamente, uma pedra em repouso em relação ao solo.

Sendo  $m_0$  sua massa de repouso, pode-se demonstrar que essa massa equivale a uma energia intrínseca

$$E_0, \text{ dada por: } E_0 = m_0 c^2$$

Por exemplo, se fosse possível aniquilar uma pedra de massa de repouso igual a  $1 \text{ g}$ , transformando-a totalmente em energia, obteríamos:

$$E_0 = m_0 c^2 = (1 \cdot 10^{-3}) \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \Rightarrow E_0 = 9 \cdot 10^{13} \text{ J}$$

Essa energia seria suficiente para manter acesas 1000 lâmpadas (de incandescência, em desuso) 100 W por quase 30 anos! Portanto, uma pequeníssima massa equivale a uma enorme quantidade de energia.

Todas as reações que liberam energia, inclusive as reações químicas exotérmicas, fazem-no devido a uma perda de massa, que se transforma em energia.

A energia solar, por exemplo, provém de uma reação nuclear denominada  **fusão nuclear**. Nessa reação, núcleos de hidrogênio se unem produzindo um núcleo de hélio. A massa do núcleo de hélio, porém, é ligeiramente menor que a soma das massas dos núcleos de hidrogênio, e essa perda de massa corresponde à energia liberada. Nesse processo, o Sol perde cerca de 4 milhões de toneladas de massa a cada segundo! A fusão nuclear também ocorre na explosão de uma bomba de hidrogênio. Do exposto, concluímos que massa é uma forma de energia.

Se um corpo estiver em movimento em relação a um referencial no qual ele possui uma massa de repouso igual a  $m_0$ , sua energia total  $E$  será dada por:

$$E = m c^2$$

em quem  $m$  é a massa relativística do corpo.

Essa energia total  $E$  é a soma da energia de repouso do corpo,  $E_0$ , com sua energia cinética  $E_c$ :

$$E = E_0 + E_c$$

### Exemplos curiosos

Nos três exemplos seguintes, faça os cálculos e confira as variações de massa.

1. Quando você aquece 1 kg de água, de 0 °C a 100 °C, a água absorve cerca de  $4 \cdot 10^5$  J de energia. Com isso, sua massa de repouso sofre um acréscimo de  $4 \cdot 10^{-12}$  kg, aproximadamente.
2. Se você deformar uma mola, armazenando nela 180 J de energia potencial elástica, sua massa aumentará de  $2 \cdot 10^{-15}$  kg.
3. A reação do hidrogênio com o oxigênio, para formar água, é exotérmica, ou seja, libera energia térmica. Para cada mol de água formada, é liberada uma energia de 68 kcal, o que equivale a uma perda de massa dos reagentes aproximadamente igual a  $3 \cdot 10^{-9}$  g.

## 9. RELAÇÃO ENTRE A ENERGIA E A QUANTIDADE DE MOVIMENTO DE UM CORPO

Considere um corpo movendo-se com velocidade  $v$  em relação a um determinado referencial.

A energia total  $E$  desse corpo, isto é, a soma de sua energia de repouso com sua energia cinética, é dada por:

$$E = m c^2 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot c^2 \quad (\text{I})$$

A intensidade  $Q$  da quantidade de movimento (momento linear ou **momentum**) do corpo é dada pela expressão a seguir:

$$Q = m v = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot v \quad (\text{II})$$

É oportuno constatar que um corpo com massa de repouso  $m_0 \neq 0$  **não** pode atingir a velocidade da luz no vácuo ( $c$ ). De fato, se fizermos  $v$  tender a  $c$ , nas expressões (I) e (II),  $E$  e  $Q$  tenderão a infinito, o que é absurdo.

Se elevarmos ao quadrado as expressões I e II, isolarmos  $v^2$  em uma das novas expressões obtidas e substituímos  $v^2$  na outra, obteremos, após algum trabalho algébrico, o seguinte resultado, que relaciona  $E$  com  $Q$ :

$$E^2 = Q^2 c^2 + (m_0 c^2)^2$$

Se a massa de repouso for nula ( $m_0 = 0$ ), teremos:

$$E^2 = Q^2 c^2 + 0 \Rightarrow E = Q c \quad (\text{III})$$

Fazendo  $m = \frac{E}{c^2}$  na expressão  $Q = m v$ , obtemos:

$$Q = \frac{E}{c^2} v \Rightarrow v = \frac{Q c^2}{E} \quad (\text{IV})$$

Substituindo III em IV, obtemos:

$$v = \frac{Q c^2}{Q c} \Rightarrow v = c$$

Portanto uma partícula com massa de repouso igual a **zero** move-se com velocidade igual a  $c$ . É o que acontece com os **fótons**.

Na realidade, dizer que os fótons têm "massa de repouso nula" equivale a dizer que não existem fótons em repouso.

É importante destacar que a quantidade de movimento dos fótons **não é nula** e pode ser calculada a partir da expressão III:

$$E = Q c$$

## 10. COMPORTAMENTO ONDULATÓRIO DA MATÉRIA

Já estudamos a dualidade onda-partícula para as radiações eletromagnéticas, como a luz. Em alguns fenômenos, essas radiações comportam-se como ondas e, em outros, como partículas, o que implica a necessidade da adoção de dois modelos: o ondulatório e o corpuscular (quântico).

O físico francês Louis **de Broglie** (1892-1987) propôs, em 1924, que essa dualidade também poderia ser válida para entidades normalmente tratadas como corpos, ou seja, como porções de matéria (elétrons, prótons, partículas  $\alpha$ , bolas de bilhar etc.). De Broglie estava propondo que haveria uma **onda** associada, por exemplo, a um elétron.

Ele embasava sua suspeita em fortes questionamentos, como:

- A energia de uma partícula de radiação eletromagnética (fóton) é  $E = h f$ . Como encaixar, num modelo puramente corpuscular, a grandeza **frequência**, que é típica do modelo ondulatório?
- No modelo atômico de Bohr apareceram **números inteiros** ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) associados aos níveis de energia permitidos a um elétron. Por que isso acontecia com elétrons se, até então, números inteiros eram típicos de fenômenos ondulatórios, como a interferência e os modos de vibração (de uma corda de violão, por exemplo)?

Como vimos na seção 9, a energia  $E$  de um fóton relaciona-se com a intensidade  $Q$  de sua quantidade de movimento por meio da expressão:

$$E = Q c$$

Então, usando  $E = h f$ , e  $c = \lambda f$ , temos:

$$Q = \frac{E}{c} = \frac{h f}{\lambda f} = \frac{h}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{Q}$$

Note que a dualidade onda-partícula está presente nessa expressão: a quantidade de movimento, uma grandeza típica de partículas, está relacionada com um comprimento de onda, que é uma grandeza típica de ondas.

Assim, a cada comprimento de onda de um fóton está associada uma intensidade de sua quantidade de movimento.

Baseado meramente na intuição, De Broglie acreditou que isso também valesse para qualquer corpo de massa relativística  $m$  e velocidade  $v$ . Propôs, então, que para qualquer corpo em movimento existe um comprimento de onda  $\lambda$  associado, ou seja, qualquer corpo em movimento pode comportar-se como uma onda.

Usou, então, a expressão  $\lambda = \frac{h}{Q}$  para esse corpo e

obteve: 
$$\lambda = \frac{h}{m v}$$

que é o **comprimento de onda de De Broglie** para o corpo em questão.

Fazendo isso, De Broglie também estendeu à matéria a relação  $E = h f$ , de Einstein.

Veja, agora, como fica o comprimento de onda de De Broglie em casos não relativísticos.

Sendo  $m_0$  a massa de repouso de um corpo com velocidade  $v$  e  $m$  a sua massa relativística, seu comprimento de onda de De Broglie pode ser expresso assim:

$$\lambda = \frac{h}{m v} = \frac{h}{m_0 v \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Para  $v \ll c$ ,  $\frac{v^2}{c^2} \cong 0$ , e temos a situação não relativística.

Nesse caso: 
$$\lambda = \frac{h}{m_0 v}$$

Em 1927, a teoria de De Broglie foi confirmada pela primeira vez, em um experimento no qual se determinou o comprimento de onda de elétrons que sofreram difração. Assim, elétrons, que até então se acreditava terem comportamento exclusivamente corpuscular, revelaram um comportamento ondulatório (dualidade onda-partícula).

Como exemplo de aplicação dessa teoria, podemos citar o microscópio eletrônico, cujo poder de resolução é muito maior que o do microscópio óptico e que tem como princípio de funcionamento o comportamento ondulatório dos elétrons.

Anos depois, a teoria também foi confirmada para átomos de sódio, de hidrogênio e de hélio, e para nêutrons.

### Cálculo do comprimento de onda de De Broglie para um elétron e para uma pessoa

Sendo  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Js a constante de Planck, vamos calcular o comprimento de onda de De Broglie para um elétron que se move com velocidade  $v = 3,0 \cdot 10^6$  m/s. Essa velocidade é baixa o suficiente para podermos considerar a massa relativística  $m$  do elétron praticamente igual à sua massa de repouso  $m_0$  ( $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31}$  kg). Dizemos, por isso, que esse elétron é um elétron não relativístico.

Temos, então:

$$\lambda = \frac{h}{m v} = \frac{h}{m_0 v} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{(9,1 \cdot 10^{-31}) \cdot (3,0 \cdot 10^6)}$$

Logo: 
$$\lambda = 2,4 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

Os sólidos cristalinos são formados por átomos distribuídos em planos regularmente espaçados (redes cristalinas). A distância entre planos adjacentes é

da ordem de grandeza do comprimento de onda que obtivemos para o elétron. Assim, essas redes possibilitam uma acentuada difração de elétrons que incidem nelas.

Vamos determinar agora o comprimento de onda de De Broglie para uma pessoa com massa igual a 60 kg, correndo a 10 m/s:

$$\lambda = \frac{h}{m v} = \frac{h}{m_0 v} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{60 \cdot 10}$$

Logo:  $\lambda = 1,1 \cdot 10^{-36} \text{ m}$

Para essa pessoa difratar, como acontece com elétrons e outras partículas atômicas e subatômicas, ela teria de passar por frestas da ordem de  $10^{-36} \text{ m}$ , o que, obviamente, é um absurdo.

Mesmo que isso pudesse ocorrer, não teríamos tecnologia capaz de propiciar a medição de um comprimento de onda tão pequeno.

Portanto, não é possível observar o comportamento ondulatório de corpos macroscópicos.

## 11. DE BROGLIE E O MODELO DE BOHR

De Broglie justificava as órbitas permitidas no modelo de Bohr, considerando que o elétron, em cada uma dessas órbitas, tinha um comprimento de onda tal que formava uma onda estacionária, lembrando, por exemplo, os modos de vibração de uma corda de violão.

O perímetro de cada órbita deveria conter um número inteiro de comprimentos de onda: 1 na primeira órbita ( $n = 1$ ), 2 na segunda ( $n = 2$ ) e assim por diante.

Vamos ver como De Broglie pôde concluir isso.

Na quantização do momento angular orbital do elétron, Bohr usou a seguinte expressão:

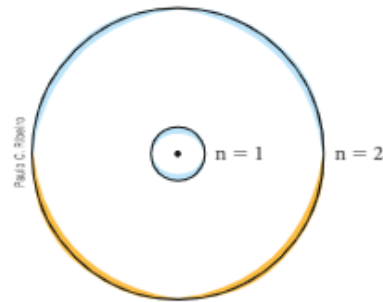
$$m v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}$$

A partir dela, temos que:

$$2\pi r_n = n \frac{h}{m v_n} \quad \text{ou} \quad 2\pi r_n = n \lambda_n \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

Portanto, em cada órbita permitida, o perímetro  $2\pi r_n$  é, de fato, igual a um número inteiro de comprimentos de onda ( $n \lambda_n$ ).

Na figura a seguir, em que a bolinha central representa o núcleo do átomo, estão simbolizadas as ondas estacionárias correspondentes às duas primeiras órbitas permitidas ( $n = 1$  e  $n = 2$ ).



Para  $n = 1$  e  $n = 2$ , temos, respectivamente,  $2\pi r_1 = 1 \lambda_1$  e  $2\pi r_2 = 2 \lambda_2$ .

## 12. AS QUATRO FORÇAS FUNDAMENTAIS DA NATUREZA

Grande parte da comunidade científica concorda que o Universo e tudo que nele existe é regido por quatro forças, denominadas fundamentais. Em ordem decrescente de intensidade, tais forças são: a **nuclear forte**, a **eletromagnética**, a **nuclear fraca** e a **força gravitacional**.



Nessa fotografia de uma região rural, pode-se ver, ao mesmo tempo, um raio prenunciando tempestade (à esquerda), e a luz do sol ultrapassando as nuvens (à direita).

A **força nuclear forte** é responsável pela estabilidade de núcleos atômicos, permitindo, por exemplo, que prótons – partículas dotadas de carga elétrica positiva –, a despeito da extraordinária repulsão eletrostática existente entre eles, mantenham-se coesos dentro do núcleo do átomo.

Nos processos de fusão nuclear, em que núcleos leves se aderem para formar elementos mais massivos, e nos processos de fissão nuclear, em que núcleos pesados são desmantelados e dão origem a isótopos menores, ocorre liberação de enormes quantidades de energia e, em ambos os casos, as forças nucleares fortes exercem papel preponderante. Essas forças, no entanto, restringem-se aos núcleos atômicos, manifestando-se apenas em distâncias da ordem de  $10^{-15} \text{ m}$ . Acredita-se que a força nuclear forte atue também nos *quarks*, os supostos componentes de prótons e nêutrons. Nessas últimas interações tal força recebe a denominação de **carga de cor**, que nada tem a ver com carga elétrica ou cor.



Em estrelas como o Sol, a energia emana de reações de fusão nuclear, em que átomos de hidrogênio se associam para produzir átomos de hélio. As forças nucleares fortes constituem o principal veículo para a liberação dessas enormes quantidades de energia.

A **força eletromagnética** explica as atrações e repulsões entre polos magnéticos, entre partículas dotadas de carga elétrica e entre essas partículas e campos elétricos e magnéticos. É por causa da força eletromagnética que o elétron de um átomo se mantém em órbita em torno do respectivo núcleo. Em um âmbito mais amplo, é ela que assegura a estabilidade e a própria existência de átomos em geral.

A emissão e a absorção de luz, além de outras radiações, podem ser relacionadas à força eletromagnética que está presente em saltos quânticos e na produção de ondas eletromagnéticas por partículas eletrizadas em processo de aceleração. Forças de adesão e coesão também têm origem eletromagnética. Essas interações englobam as forças de contato presentes no dia a dia, como trações, compressões, flexões, atritos etc.



Nessa demonstração, faz-se passar corrente elétrica por um fio enrolado ao longo de um parafuso de ferro. Cria-se dessa maneira um eletroímã capaz de manter suspensos fragmentos de limalha de ferro. As forças de atração entre o eletroímã e a limalha são de natureza eletromagnética. Esse mesmo princípio de funcionamento pode ser utilizado na construção de grandes guindastes magnéticos, que conseguem erguer e sustentar pesadas e volumosas cargas.

As forças eletromagnéticas são de longo alcance, podendo, teoricamente, manifestar-se em distâncias infinitas.

A **força nuclear fraca**, de descrição estritamente quântica, é responsável pela degradação radioativa de certos núcleos atômicos. Em particular, essa força rege o processo de **decaimento beta** (beta-menos ou beta-mais). No caso do decaimento beta-menos, um nêutron divide-se espontaneamente em um próton, um elétron e um antineutrino. Se um nêutron dentro do núcleo de um átomo decai dessa maneira, em razão da emissão do elétron (partícula  $\beta$ ), ele se converte em um próton. Isso acrescenta um novo próton ao núcleo, transformando um elemento químico em outro, como ocorre no interior de estrelas e em explosões de supernovas. Nesses casos, há captura e decaimento de nêutrons.

As forças nucleares fracas têm raio de ação ainda menor que o das forças nucleares fortes, sendo notadas em dimensões bastante restritas, da ordem de  $10^{-18}$  m.

Quando se trata de intensidade, a **força gravitacional** é a menos expressiva dentre as quatro, mas sua importância é suprema, já que, por meio dela, é possível explicar a queda de corpos e a aglomeração de poeira cósmica para a formação de estrelas e de outros corpos celestes. Explica-se também a gravitação de planetas e satélites, a formação de galáxias, buracos negros e a provável Expansão do Universo. Diferentemente da força eletromagnética, a gravitacional é exclusivamente atrativa, podendo ser sentida a distâncias muito grandes da massa que a produz.

As modernas teorias da Física têm abandonado o conceito de “ação a distância” e apontam no sentido de que cada uma das quatro forças da natureza é “transmitida por partículas virtuais”, denominadas **mediadoras**. Assim, a força nuclear forte teria como mediadoras os **glúons**; a eletromagnética, os **fótons**; a nuclear fraca, os **bósons** ( $W^{\pm}$  e  $Z^0$ ); e a gravitacional, os **grávitons**.

No quadro a seguir, resumimos algumas características importantes das quatro forças fundamentais da natureza.

Força (ou interação)	Intensidade relativa	Principal teoria em que é estudada	Partícula mediadora	Raio de ação (m)
Nuclear forte	$10^{38}$	Cromodinâmica quântica	Glúon	$10^{-15}$
Eletromagnética	$10^{36}$	Eletrodinâmica	Fóton	“infinito”
Nuclear fraca	$10^{25}$	Flavordinâmica	Bóson	$10^{-18}$
Gravitacional	1	Geometrodinâmica	Gráviton	“infinito”



O número de asteroides, cometas, satélites, planetas, estrelas e galáxias do Universo é indeterminado. Esses elementos astronômicos, no entanto, estão sujeitos a forças de origem gravitacional que lhes garantem relativa estabilidade dentro do sistema a que pertencem. (Ilustração com elementos sem proporção entre si e em cores fantasia.)

Nos atuais níveis de energia e temperatura reinantes no Universo (a temperatura média hoje admitida é de 2,7 K), as quatro forças fundamentais – nuclear forte, eletromagnética, nuclear fraca e gravitacional – apresentam características bem dis-

tintas, manifestando-se em “ambientes” diferentes. Nas situações que envolvem níveis mais elevados de energia e temperatura, entretanto, a situação muda, como pode ser verificado em certos aceleradores de partículas. Nesses casos, as forças eletromagnética e nuclear fraca perdem suas identidades, aglutinando-se em uma única força, chamada **eletrofraca**. As forças nuclear forte e eletromagnética terão caráter unificado em energias e temperaturas ainda maiores.

Embora uma teoria completa e satisfatória que reúna as quatro forças em uma única ainda não tenha sido alcançada, muitos cientistas acreditam que, em energias e temperaturas extremamente altas, isso pode ocorrer. Nesse caso, a força gravitacional se juntaria às outras três constituindo uma espécie de **superforça**.

Se a hipótese da unificação estiver correta, então, durante os primeiros instantes que se sucederam ao *big-bang*, o Universo teria sido governado pela superforça, já que as temperaturas nesse momento primordial são estimadas em  $10^{33}$  K, com toda a energia existente já plenamente manifestada.

## QUESTÕES COMENTADAS



**1** Raios cósmicos incidentes na alta atmosfera produzem partículas instáveis, denominadas mésons  $\mu$  (ou múons). Sabe-se que a vida média de um méson  $\mu$ , **medida em um referencial em repouso em relação a ele**, é de 2,2  $\mu$ s, aproximadamente. Após esse curtíssimo intervalo de tempo, o méson  $\mu$  desintegra-se, dando origem a outras partículas (um elétron, um antineutrino do elétron e um neutrino do múon). Muitos múons produzidos na alta atmosfera movem-se a uma velocidade igual a  $0,998c$ , aproximadamente. Vamos calcular a distância que poderiam percorrer antes de se desintegrarem:

$$\Delta s = vt = (0,998 \cdot 3 \cdot 10^8) \cdot (2,2 \cdot 10^{-6}) \Rightarrow \Delta s \cong 660 \text{ m}$$

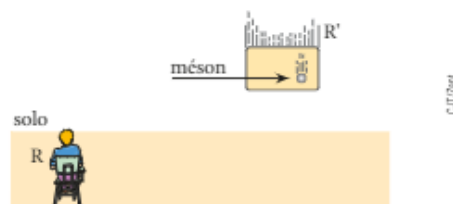
Como a altitude da região em que são produzidas é muito maior que 660 m, essas partículas não deveriam chegar à superfície da Terra. No entanto, chegam em abundância. Note que estamos diante de um problema concreto. Como a velocidade dos mésons é muito alta, os efeitos relativísticos não podem ser ignorados, e o problema deve ser resolvido pela Teoria da Relatividade.

Elucide a questão:

- considerando a dilatação do tempo;
- considerando a contração do comprimento.

### RESOLUÇÃO

- A vida média do méson é o intervalo de tempo decorrido entre dois eventos: seu “nascimento” e sua desintegração.



Esse intervalo será medido por dois referenciais estabelecidos exatamente como fizemos no estudo da dilatação do tempo, que é conveniente rever.

O referencial  $R'$ , viajando junto com o méson e, portanto, em repouso **em relação ao local dos eventos**, mede  $\Delta t' = 2,2 \mu$ s.

O referencial  $R$ , por sua vez, em movimento **em relação ao local dos eventos**, mede  $\Delta t$  (dilatado em relação a  $\Delta t'$ ), dado por:

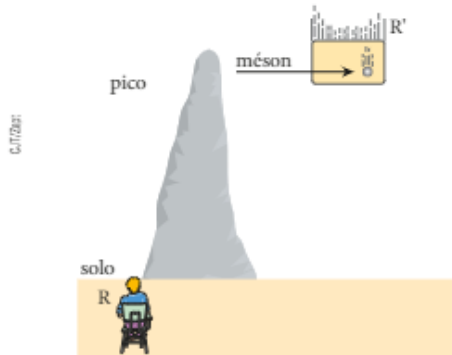
$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2,2}{\sqrt{1 - \frac{(0,998c)^2}{c^2}}} \Rightarrow \Delta t \cong 35 \mu\text{s}$$

Então, em relação a  $R$ , o méson, ainda “vivo”, é capaz de percorrer uma distância  $\ell$  dada por:

$$\ell = v \cdot \Delta t = (0,998 \cdot 3 \cdot 10^8) (35 \cdot 10^{-6}) \Rightarrow \ell \cong 10500 \text{ m}$$

Dessa forma, fica explicado por que os mésons conseguem chegar à superfície da Terra.

- b) A altura em que o méson é gerado será medida por dois referenciais, também estabelecidos exatamente como fizemos no estudo da contração do comprimento, que é conveniente rever. Para facilitar, imagine que o méson seja gerado ao lado do topo de um pico.



Para o referencial  $R$ , em repouso em relação ao pico, a altura do pico é  $l = 10\,500$  m.

Para o referencial  $R'$ , móvel em relação ao pico e viajando junto com o méson, a vida média do méson é  $\Delta t' = 2,2 \mu\text{s}$ , mas a altura do pico é  $l'$  (contraída em relação a  $l$ ), dada por:

$$l' = l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 10\,500 \sqrt{1 - 0,998^2}$$

Logo:  $l' \cong 660$  m

Então, para o méson, a distância a ser percorrida é de 660 m e não de 10 500 m, o que também esclarece a questão.

**Resposta:** Ver resolução.

**2** A equação  $E = m_0 c^2$ , em que  $m_0$  é a massa de repouso de um corpo e  $c$  é a velocidade da luz no vácuo (aproximadamente 300 000 km/s), possibilita calcular a quantidade de energia  $E$  que seria obtida se um corpo de massa  $m_0$  fosse aniquilado.

- Calcule a quantidade de energia que seria disponibilizada se fosse possível aniquilar 1 g (um grama) de areia.
- Qual é a massa de repouso equivalente à energia de 1 kWh (um quilowatt-hora)?
- A energia emanada do Sol provém de reações nucleares em que núcleos de hidrogênio, por fusão nuclear, se transformam em um núcleo de hélio. A massa do núcleo

de hélio produzido é ligeiramente menor que a soma das massas dos núcleos de hidrogênio que deram origem a ele. Essa perda de massa explica a liberação de energia.

Em cada segundo, cerca de 4,3 milhões de toneladas de matéria do Sol são aniquiladas, transformando-se em energia. Estime a potência **Pot** irradiada pelo Sol.

- Sabendo que a massa atual do Sol é cerca de  $2 \cdot 10^{30}$  kg e supondo que a perda de 4,3 milhões de toneladas por segundo pudesse ocorrer até nossa estrela acabar, estime o tempo que ela ainda duraria. Considere 1 ano igual a  $3,2 \cdot 10^7$  s.

#### RESOLUÇÃO

- Sendo  $m_0 = 1 \text{ g} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$  e  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ , temos:  
 $E = m_0 c^2 = 1 \cdot 10^{-3} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \Rightarrow E = 9 \cdot 10^{13} \text{ J}$
- $E = 1 \text{ kWh} = 1 \cdot 10^3 \text{ W} \cdot 3\,600 \text{ s} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$   
 $E = m_0 c^2 \Rightarrow 3,6 \cdot 10^6 = m_0 (3 \cdot 10^8)^2 \Rightarrow m_0 = 4 \cdot 10^{-11} \text{ kg}$
- Em cada segundo, a energia irradiada pelo Sol é dada por  $E = m_0 c^2$ , em que  $m_0 = 4,3 \cdot 10^9 \text{ kg}$ .  
 $E = 4,3 \cdot 10^9 \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \Rightarrow E \cong 3,9 \cdot 10^{26} \text{ J}$   
 Portanto: **Pot**  $\cong 3,9 \cdot 10^{26} \text{ W}$
- Se a perda de massa pudesse perdurar até o Sol acabar, ele ainda duraria  $N$  segundos:

$$2 \cdot 10^{30} \text{ kg} = N \left( 4,3 \cdot 10^9 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) \Rightarrow N = 4,7 \cdot 10^{20} \text{ s}$$

Sendo  $n$  o número correspondente de anos, temos:

$$n = \frac{N}{1 \text{ ano}} = \frac{4,7 \cdot 10^{20}}{3,2 \cdot 10^7} \Rightarrow n \cong 15 \cdot 10^{12} \text{ anos}$$

Portanto, o Sol ainda duraria cerca de 15 trilhões de anos. Entretanto, o tempo real estimado para continuar ocorrendo a fusão de núcleos de hidrogênio no Sol é cerca de 10 bilhões de anos – bem menor que o valor que calculamos – porque o hidrogênio ainda disponível para essa reação vai acabar e, além disso, a citada fusão só acontece com o hidrogênio que está no núcleo do Sol – relativamente pequeno – onde as temperaturas e as densidades são suficientemente elevadas para essa reação nuclear poder ocorrer.

**Respostas:** a)  $9 \cdot 10^{13} \text{ J}$ ; b)  $4 \cdot 10^{-11} \text{ kg}$ ; c) Aproximadamente  $3,9 \cdot 10^{26} \text{ W}$ ; d) Cerca de  $15 \cdot 10^{12}$  anos.



## QUESTÕES PROPOSTAS



FAÇA NO CADERNO.

**3.** Resolva as situações a seguir.

- O pêndulo de um relógio da casa de João realiza oscilações, e cada oscilação, medida por João, dura 2,0 s. Qual é o tempo de duração de cada oscilação desse pêndulo para José, que é um astronauta dentro de uma nave que se move em linha reta, com velocidade constante e igual a  $0,60c$  em relação à casa de João? ( $c$  é a velocidade da luz no vácuo.)

- Considere a ocorrência de um evento dentro da nave, de 2,0 s de duração, medidos por José. Qual é a duração desse evento para João?

- Imagine um trem de 200 m de comprimento (medido em um referencial  $A$  em repouso em relação ao trem), viajando a uma velocidade  $v$  constante e igual a  $0,8c$  em relação a um túnel retilíneo que ele irá atravessar ( $c$  é a velocidade da luz no vácuo).



Para um referencial **B**, em repouso em relação ao túnel, seu comprimento é igual a 150 m. Em relação a **B**, o trem chegará a “sumir” completamente dentro do túnel durante a travessia?

5. Os mésons  $\pi$  (ou píons) são partículas de vida média igual a  $2,60 \cdot 10^{-8}$  s, medida por um referencial **R'** em relação ao qual esses mésons estão em repouso. Cada méson  $\pi$  decai em um méson  $\mu$  (ou múon) e em um neutrino muônico.

Considere uma grande população de mésons  $\pi$  movendo-se em relação a um referencial **R** com velocidade  $v$  igual a  $\sqrt{0,190} c$ , em que  $c$  é a velocidade da luz no vácuo ( $c = 3,00 \cdot 10^8$  m/s).

- Determine a vida média dos mésons  $\pi$  em relação ao referencial **R**.
- Calcule, em relação ao referencial **R**, a distância percorrida por um méson  $\pi$  que, após ser gerado, “viveu” durante o tempo calculado no item **a** ( $\sqrt{0,190} = 0,436$ ).
- Retome o item **b** e calcule a distância percorrida pelo méson lá citado, em relação ao referencial **R'**.

6. O condutor de um automóvel que percorre, com velocidade de módulo  $v$ , um trecho retilíneo de uma rodovia acende os faróis e afirma que: “A velocidade da luz emitida pelos faróis avança com velocidade de valor igual a  $c + v$  em relação ao solo”.

Considerando a velocidade da luz no ar igual a  $c$ , comente essa afirmação.

7. O consumo mensal de energia elétrica de uma certa indústria é aproximadamente igual a 2,25 GWh. Se essa indústria pudesse obter energia elétrica a partir da conversão de matéria em energia, em um processo com rendimento igual a 100%, que massa precisaria consumir por ano? Use  $c = 3,00 \cdot 10^8$  m/s.

8. Nas expressões relativísticas da massa, da dilatação do tempo, da contração do comprimento e outras, aparece o fator  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ , em que  $c$  é a velocidade da luz no vácuo e  $v$  é a velocidade de um corpo em relação a um determinado referencial. O quadro relaciona alguns valores do referido fator com a velocidade  $v$ :

$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$	$v$
1,000	0,000c
0,999	0,040c
0,995	0,100c
0,600	0,800c
0,436	0,900c

O que esse quadro permite concluir a respeito dos efeitos relativísticos?

9. A energia total  $E$  de um corpo em movimento, com momento linear (quantidade de movimento) de intensidade  $p$  em relação a um referencial inercial no qual sua massa de repouso é  $m_0$ , satisfaz a equação:  $E^2 = p^2 c^2 + (m_0 c^2)^2$ , em que  $c$  é a velocidade da luz no vácuo.

Um fóton tem massa de repouso igual a zero e energia  $E = h f$ , em que  $h$  é a constante de Planck e  $f$  é a frequência do fóton.

Para um fóton, expresse  $p$  em função de  $h$ ,  $c$  e  $f$ .

10. (UFMG) Observe esta figura:



Paulo Sérgio, viajando em sua nave, aproxima-se de uma plataforma espacial, com velocidade de  $0,7c$ , em que  $c$  é a velocidade da luz. Para se comunicar com Paulo Sérgio, Priscila, que está na plataforma, envia um pulso luminoso em direção à nave.

Com base nessas informações, é **correto** afirmar que a velocidade do pulso medida por Paulo Sérgio é de:

- $0,7c$
- $1,0c$
- $0,3c$
- $1,7c$

11. (ITA-SP) No modelo proposto por Einstein, a luz se comporta como se sua energia estivesse concentrada em pacotes discretos, chamados de *quanta* de luz, e atualmente conhecidos por fótons. Estes possuem momento  $p$  e energia  $E$  relacionados pela equação  $E = pc$ , em que  $c$  é a velocidade da luz no vácuo. Cada fóton carrega uma energia  $E = hf$ , em que  $h$  é a constante de Planck e  $f$  é a frequência da luz. Um evento raro, porém possível, é a fusão de dois fótons, produzindo um par elétron-pósitron, sendo a massa do pósitron igual à massa do elétron. A relação de Einstein associa a energia da partícula à massa do elétron ou pósitron, isto é,  $E = m_e c^2$ . Indique a frequência mínima de cada fóton, para que dois fótons, com momentos opostos e de módulos iguais, produzam um par elétron-pósitron após a colisão:

- $f = (4m_e c^2)/h$
- $f = (2m_e c^2)/h$
- $f = (m_e c^2)/4h$
- $f = (m_e c^2)/2h$

12. (UFPI) O comprimento de onda de De Broglie para uma partícula  $\alpha$  com velocidade  $v_\alpha = 6,0 \cdot 10^6$  m/s é dado aproximadamente por:

(massa do próton =  $1,6 \cdot 10^{-27}$  kg;  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Js)

- $6,8 \cdot 10^{-14}$  m
- $3,4 \cdot 10^{-14}$  m
- $1,7 \cdot 10^{-14}$  m
- $8,0 \cdot 10^{-15}$  m
- $4,0 \cdot 10^{-15}$  m

13. (UFRN) Em um aparelho de televisão, existem três funções básicas (cor, brilho e contraste), que podem ser controladas continuamente, para se obter uma boa imagem. Ajustar uma dessas funções depende essencialmente do controle da diferença de potencial que acelera os elétrons emitidos pelo tubo de raios catódicos e que incidirão na tela fluorescente. Assim, no tubo de imagem do televisor, os elétrons podem ter qualquer valor de energia, dependendo da diferença de potencial aplicada a esses elétrons.

A Física Quântica, quando aplicada ao estudo de átomos isolados, constata que a energia dos elétrons nesses átomos é uma grandeza **discreta** ao invés de **contínua**, como estabelecido pela Física Clássica.

Essas afirmações, valores contínuos de energia para os elétrons emitidos pelo tubo e energias discretas para os elétrons do átomo, não são contraditórias, porque os elétrons emitidos pelo tubo de raios catódicos:

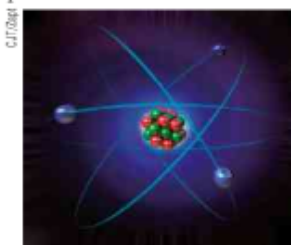
- são livres e os elétrons que estão nos átomos são confinados.
- são em grande quantidade, diferentemente dos elétrons que estão nos átomos.
- perdem a carga elétrica, transformando-se em fótons, e os elétrons que estão nos átomos permanecem carregados.
- têm comprimento de onda de De Broglie associado igual ao dos elétrons que estão nos átomos.

**14.** (UFPE) Um microscópio eletrônico pode ser usado para determinar o tamanho de um vírus que pode variar entre 0,01 mm a 0,3 mm. Isto é possível porque o comprimento de onda de De Broglie,  $\lambda$ , associado aos elétrons é controlado variando-se a diferença de potencial que permite acelerar o feixe eletrônico. Considerando que os elétrons são acelerados a partir do repouso sujeitos à diferença de potencial  $V = 12,5 \cdot 10^3$  volts, determine o valor de  $\lambda$  quando os elétrons atingem a placa coletora onde é colocado o vírus. Expresse a resposta em unidades de  $10^{-12}$  m.

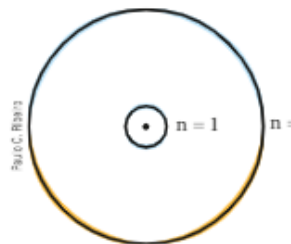
**Dados:** Carga do elétron =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C;  
 Massa do elétron =  $9 \cdot 10^{-31}$  kg;  
 Constante de Planck =  $6,6 \cdot 10^{-34}$  Js

**15.** (UFPE) No modelo planetário do átomo, o núcleo tem carga positiva e pequena dimensão, e os elétrons circulam em volta dele. De acordo com a Mecânica Clássica de Newton, o equilíbrio da órbita depende de que a força de atração entre núcleo e elétron faça o papel de força centrípeta. Desse modo, os raios das órbitas atômicas poderiam ter qualquer valor. Na prática, observa-se que só algumas órbitas são permitidas. Conforme a Teoria Eletromagnética, de Maxwell, cargas elétricas aceleradas irradiam. O elétron girando tem aceleração centrípeta e, como carga acelerada, perde energia. Assim, o

modelo atômico de Bohr seria inviável. Entretanto, várias evidências apoiam esse modelo. Para preservar a concepção do átomo, propôs-se que, em determinadas órbitas, o elétron não irradiaria energia, contrariando o eletromagnetismo. Essas órbitas especiais atenderiam à condição de quantização da quantidade de movimento angular ou, equivalentemente, do perímetro de cada órbita eletrônica.



Modelo planetário: o equilíbrio da órbita ocorre quando a força centrípeta é a atração elétrica entre o núcleo e o elétron.



Modelo quântico: elétrons têm comprimento de onda associado. Quando o perímetro da órbita contém um número inteiro de comprimentos de onda, ela é estável.

Sejam:  $Z$  o número atômico;  $m$  a massa do elétron;  $e$  a carga do elétron;  $K$  a constante elétrica;  $r$  o raio da órbita;  $h$  a constante de Planck;  $v$  o módulo da velocidade do elétron na órbita;  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Quais das seguintes proposições são verdadeiras?

- A condição clássica para estabilidade da órbita é:  $m v^2 r = K Z e^2$ .
- A condição quântica para estabilidade da órbita é:  $2\pi r m v = n h$ .
- A condição quântica para estabilidade da órbita é:  $2\pi n r = m v h$ .
- A condição clássica para estabilidade da órbita é:  $m \omega^2 r^3 = K Z e^2$ .
- A condição quântica para estabilidade da órbita é:  $m v r = K Z e^2$ .



## DESCUBRA MAIS

- Outro fenômeno que só pode ser explicado pelo modelo quântico da radiação eletromagnética é o **efeito Compton**. O que é o efeito Compton?
- Existe uma técnica de diagnóstico médico por imagem denominada **tomografia por emissão de pósitron** e conhecida por PET (*positron emission tomography*). Como a imagem é obtida por esse processo?



# INTERSABERES

## O tempo é relativo

De acordo com a visão clássica, o tempo flui inexoravelmente, fazendo com que passado, presente e futuro fiquem perfeitamente situados em uma escala linear e absoluta, orientada do passado para o futuro. O psiquismo humano e o próprio ritmo biológico do nosso metabolismo e envelhecimento estão condicionados a essa escala. Sabemos e sentimos que ontem já passou, que hoje representa o agora e que amanhã traduz o que ainda está por vir. Sabemos e sentimos que uma hora corresponde a  $\frac{1}{24}$  do dia e que um mês equivale a  $\frac{1}{12}$  do ano.

Mas o conceito de tempo, utilizado de maneira óbvia e inconsequente nas primeiras teorias, é algo muito complexo, para o qual ainda não se encontrou uma definição satisfatória. A noção de simultaneidade, por exemplo, que faculta a descrição de fenômenos que ocorrem concomitantemente, deve ser descartada por completo se levarmos em conta as concepções atuais sobre a grandeza física tempo...

Selecionamos um trecho de uma matéria de Paul Davies, físico teórico do Centro Australiano de Astrobiologia da Universidade Macquarie, em Sidney, em que o autor faz uma reflexão sobre a não pertinência do conceito de simultaneidade, tendo em vista o caráter relativo do tempo.

[...] Uma pergunta banal, como: "O que está acontecendo em Marte agora?", não tem uma resposta única. A questão central é que a Terra e Marte estão muito distantes entre si – até 20 minutos-luz. Como a informação não é capaz de viajar com velocidade superior à da luz, um observador na Terra é incapaz de conhecer a situação em Marte no mesmo instante. Ele precisa inferir a resposta após o evento, depois que a luz tiver cruzado a distância entre os dois planetas. A inferência sobre o evento será diferente, conforme a velocidade do observador. Por exemplo, durante a expedição tripulada enviada a Marte, os controladores da missão aqui na Terra poderiam perguntar: "O que será que o comandante Jones está fazendo na Base Alfa, agora?" Olhando para seus relógios e vendo que são 12:00 em Marte, a resposta deles poderia ser: "Almoçando". Mas, um astronauta passando pela Terra no mesmo momento a uma velocidade próxima à da luz poderia, ao olhar para seu relógio, dizer que o horário em Marte era anterior ou posterior a 12:00, dependendo do sentido de seu movimento. A resposta desse astronauta à pergunta sobre as atividades do comandante Jones seria "Preparando o almoço" ou "Lavando a louça". Esse tipo de desencontro torna cômica qualquer tentativa de conferir um *status* especial ao momento presente. Se você e eu estivéssemos em movimento relativo, um evento que eu poderia considerar como parte do futuro ainda não decidido poderia já existir para você no passado fixo. A conclusão mais imediata disso é que tanto o passado quanto o futuro são fixos. Por essa razão, os físicos preferem pensar o tempo como inteiramente mapeado – uma paisagem temporal (*timescape*), em analogia com uma paisagem espacial (*landscape*) – contendo todos os eventos passados e futuros. É um conceito algumas vezes chamado de "tempo bloqueado". Essa descrição sobre um aspecto da natureza nada contém que defina um momento especial, que o privilegie como sendo "o presente", nem qualquer processo que transforme os eventos futuros em acontecimentos presentes e, em seguida, em eventos passados. Em suma, o tempo físico não passa nem flui. [...]

DAVIES, Paul. Esse fluxo maravilhoso. *Scientific American Brasil*, ano 1, n. 5, p. 55-56, out. 2002.

Visando ainda dar mais sustentação ao conceito de tempo e à noção de tempo relativo, selecionamos também uma matéria escrita pelo físico Adilson de Oliveira, professor da Universidade Federal de São Carlos (Ufscar), publicada na coluna "Física Sem Mistério", da revista *Ciência Hoje*, em julho de 2006 e atualizada em dezembro de 2009.

### Um novo tempo

Colunista mostra como esse conceito evoluiu ao longo da história e foi revolucionado no século 20

"O que é o tempo? Se ninguém me perguntar, eu sei; se o quiser explicar a quem me fizer a pergunta, já não sei."  
(Santo Agostinho, 354-430)

O atual estilo de vida que levamos, principalmente nas grandes cidades, repleto de compromissos e atividades, nos transforma em escravos do tempo. Sobra pouco tempo para algumas das coisas que mais apreciamos, como ficarmos com as pessoas que amamos ou fazermos o que realmente gostamos. Sem dúvida, ansiamos por mais tempo. Tentamos nos libertar da opressão dos relógios, aprendendo a otimizar as nossas atividades e a priorizar o que é realmente importante para nós. Afinal de contas, sabemos realmente o que é o tempo?

Analisada do ponto de vista humano, a noção de tempo varia de indivíduo para indivíduo. Dependendo da idade ou do momento de vida, sentimos sua passagem de maneira diferente. Nos primeiros anos da infância, temos a sensação de que ele passa muito devagar, quase como se fosse imóvel. Algumas crianças reclamam que demora muito para chegar o aniversário, ou que os minutos durante os quais são colocadas de castigo parecem uma eternidade. Conforme passamos pela adolescência e chegamos à fase adulta, aumentam nossos compromissos e a sensação é que o tempo começa a passar mais depressa. Para algumas pessoas, principalmente as solitárias, ao atingir a velhice, o tempo também passa lentamente.

Nossa noção de tempo não está ligada apenas ao nosso íntimo – o tempo psicológico –, mas está relacionada também à cultura e à sociedade em que estamos inseridos. Percebemos sua passagem também a partir dos pontos de referência demarcados por outras pessoas. Esses pontos de referência evoluíram muito desde o início da humanidade. O tempo tem, portanto, uma história.

### Relógios de areia e clepsidra

As primeiras formas de marcar o tempo estavam relacionadas ao movimento dos corpos celestes. Em particular, os movimentos do Sol, da Lua e das estrelas foram os primeiros relógios. Outros instrumentos como os relógios de areia e a clepsidra (uma espécie de concha furada para vazar a água) eram utilizados para medir intervalos mais curtos.

De maneira mais objetiva, o tempo começou a ser medido com maior precisão na época das Grandes Navegações, pois seu conhecimento era de fundamental importância para orientar os navegantes. A diferença entre o tempo medido no relógio e aquele associado com a posição do Sol permitia que os navegantes determinassem a longitude, ou seja, quanto eles tinham viajado na direção oeste-leste. A medida da latitude – quanto eles tinham viajado na direção norte-sul – era determinada a partir da posição das estrelas no céu.

Por volta do ano de 1762 foi inventado um relógio que tinha a precisão de um segundo em um mês, mesmo em um barco em movimento. O relógio era acertado com a hora do ponto de partida da embarcação e a longitude do ponto era calculada comparando a diferença entre a hora local (medida pela altura solar, por exemplo) com a hora que o relógio marca. Cada hora de diferença para mais ou para menos corresponde a um deslocamento de 15 graus de longitude leste ou oeste, respectivamente.

### De Galileu a Einstein

Galileu Galilei, um dos maiores gênios da história, preocupou-se em medir e utilizar o tempo como uma maneira de compreender a natureza. Ao determinar equações de movimento da queda dos corpos, Galileu começou a mostrar que ele faz parte da natureza, pois era possível prever os movimentos conforme o tempo passava. Posteriormente, Isaac Newton, que construiu as bases da física clássica, apresentou o conceito de tempo absoluto, como se fosse um rio que fluísse sempre para frente e de maneira uniforme, seja qual fosse o ponto de vista – o tempo simplesmente passa.



Relógio de bolso, muito usado até início do século passado.



Gravura feita por Alexis Clerc, no final do século 19, retratando um relógio de água – clepsidra – em Atenas, na Grécia.

Entretanto, no começo do século 20, o conceito de tempo, principalmente na Física, mudou radicalmente. Para explicar novas descobertas e ideias, como o fato de a luz ser uma onda eletromagnética que viaja sempre na mesma velocidade de 300 000 km/s (1 080 000 000 km/h), independentemente de quem a esteja observando, Albert Einstein, o cientista mais importante do século passado, introduziu o conceito de que o tempo e o espaço não são coisas distintas, mas formam uma unidade e não são apenas o palco no qual ocorrem os eventos da natureza, mas também os protagonistas dessa história.

Ao postular que a velocidade da luz é a velocidade limite do Universo, Einstein demonstrou que o tempo depende da velocidade com a qual nos movemos. Quando nos aproximamos da velocidade da luz o tempo flui mais vagarosamente. Para entendermos melhor, imagine que estamos viajando para um planeta distante a dezenas de anos-luz da Terra (um ano-luz tem aproximadamente 10 trilhões de quilômetros) e que a viagem foi feita com uma velocidade bem próxima à da luz. Quando voltamos da viagem, para as pessoas que ficaram na Terra se passaram dezenas de anos, mas para quem viajou se passaram apenas alguns meses.



A persistência da memória, tela de 1931 do catalão Salvador Dalí (1904-1989).

### Aceleradores de partículas e GPS

Esse efeito, conhecido como dilatação temporal, é uma consequência do fato de a velocidade da luz ser uma constante universal. Ainda não podemos realizar a experiência descrita acima com seres humanos, mas algo similar já é realizado com partículas atômicas. As máquinas chamadas de aceleradores de partículas, que chegam a custar bilhões de dólares, aceleram prótons e elétrons para velocidades muito próximas à da luz.

Essas máquinas funcionam com altíssima precisão, pois levam em conta os efeitos de dilatação do tempo. Todos os experimentos realizados até hoje comprovaram que a Teoria da Relatividade está correta. Einstein mostrou ainda que a gravidade também altera a passagem do tempo. Relógios atômicos como os que existem nos satélites utilizados no sistema GPS (sistema de posicionamento global, na sigla em inglês), que trabalham com precisão maior do que um nanossegundo, são calibrados para levarem em conta as diferenças de campo gravitacional da Terra devido à variação da altura da órbita desses satélites.

Dessa forma, vemos que o tempo é relativo a quem está medindo e não existe um tempo universal. O tempo não é apenas uma impressão dos nossos sentidos ou uma invenção humana, mas realmente existe e faz parte da natureza. Um novo tempo foi descoberto pelo homem e todos os seus mistérios ainda não foram desvendados.

OLIVEIRA, Adilson de. Um novo tempo. *Ciência Hoje*, 21 jul. 2006. Disponível em: <<http://cienciahoje.uol.com.br/colunas/fisica-sem-misterio/um-novo-tempo/>>. Acesso em: 24 mar. 2016.

### Compreensão, pesquisa e debate

1. Você teria alguma definição satisfatória para o conceito de tempo? Elabore uma e discuta com seus colegas e professores.
2. Pesquise na literatura, sobretudo na linguagem poética, referências à noção de tempo. Letras de música também podem ser objeto de sua pesquisa e reflexão.
3. O tempo é considerado a quarta dimensão, ao lado das coordenadas de localização espacial: abscissa, ordenada e altura. Além dessas quatro, há outras dimensões na natureza?
4. São possíveis viagens no tempo, em que uma pessoa é deslocada de sua época para o passado ou para o futuro, como mostram alguns filmes de ficção?



# RESPOSTAS DAS QUESTÕES PROPOSTAS

## UNIDADE 1

### Eletrostática

#### CAPÍTULO 1

##### Cargas elétricas

6.  $+8,0 \cdot 10^{-6} \text{ C}$   
7. a) Positivamente.  
b)  $+0,8 \text{ C}$   
8. a)  $+3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C}$   
b)  $-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$   
9. a) Sinais opostos.  
b) Negativo.  
10. d  
11. c  
12. d, e, g  
13. Aluna D.  
14. c  
15.  $+2q$   
16. Esfera A:  $+1,2 \mu\text{C}$ ;  
esfera B:  $+0,6 \mu\text{C}$ ;  
esfera C:  $+1,2 \mu\text{C}$ .  
17. b  
18. a  
19. a)  $1 \cdot 10^3 \text{ N}$   
b)  $1 \cdot 10^{-4} \text{ C}$   
20. a  
21.  $5,0 \text{ cm}$   
22. Repulsiva,  $\frac{F}{3}$   
23.  $0,54 \text{ N}$   
24.  $1,1 \cdot 10^8 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}$   
25. a)  $\frac{d}{3}$   
b)  $\frac{4|q_1|}{9}$   
26.  $4,0 \cdot 10^{-8} \text{ C}$ .  
Não.  
27.  $5,0 \cdot 10^{-1} \text{ N}$   
28. a)  $2,3 \cdot 10^{-8} \text{ N}$   
b) Aproximadamente  $1,6 \cdot 10^6 \text{ m/s}$ .  
c)  $F_r = 2,3 \cdot 10^{-8} \text{ N}$   
d) Aproximadamente  $1,6 \cdot 10^6 \text{ m/s}$ .  
29.  $1 \mu\text{C}$

#### CAPÍTULO 2

##### Campo elétrico

7. c  
8.  $Q > 0, q < 0$  e  $q' > 0$   
9. a) Mesmo módulo, mesma direção e sentidos opostos.  
b) Próton – mesma direção e mesmo sentido.  
Elétron – mesma direção e sentido oposto.  
c) A aceleração do elétron (cerca de 1800 vezes maior do que a do próton).  
10. a  
11. d  
12.  $8 \cdot 10^{-3} \text{ N}$   
13. a)  $+8 \mu\text{C}$   
b)  $8 \cdot 10^5 \text{ N/C}$   
14. a)  $6,0 \cdot 10^6 \text{ N/C}$   
b)  $-6,0 \mu\text{C}$   
15.  $\vec{E}_5$   
16. a)  $4,5 \cdot 10^{-3} \text{ N/C}$   
b)  $9,0 \cdot 10^{-3} \text{ N}$   
17.  $20 \text{ m/s}^2$   
18. Ponto B.  
19. a)  $1,0 \cdot 10^4 \text{ N/C}$   
b)  $2,0 \cdot 10^{-2} \text{ N}$   
20.  $-15,7 \cdot 10^{-6} \text{ C}$   
21.  $3,0 \cdot 10^{13}$  elétrons  
22.  $4Q$   
23. a) Zero. b) 1

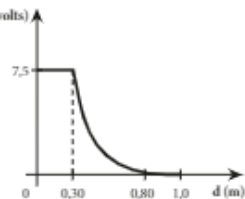
24.  $0,80 \text{ m}$   
25.  $1,0 \cdot 10^{12}$  elétrons  
26. E  
27. d  
28. Todas.  
29.  $3,6 \cdot 10^{-2} \text{ N}$   
30.  $2,0 \text{ g}$   
31. c  
32. Direção: vertical; sentido: para cima; módulo:  $(qE - mg)$   
33. Aproximadamente  $4,4 \mu\text{C/m}^2$ .  
34. a)  $225 \text{ N/C}$   
b)  $1800 \text{ N/C}$   
c)  $800 \text{ N/C}$   
35.  $16 \text{ mm}$

#### CAPÍTULO 3

##### Potencial elétrico

12. b  
13.  $1,5 \cdot 10^4 \text{ V}$   
14.  $2,5 \mu\text{C}$   
15.  $10 \text{ nC}$   
16.  $+3,0 \text{ nC}$ ;  $-5,0 \text{ nC}$   
17.  $18 \mu\text{C}$ ;  $8,0 \mu\text{C}$   
18. a)  $-7,2 \cdot 10^{-2} \text{ J}$   
b)  $6,0 \cdot 10^3 \text{ V}$   
c)  $12 \text{ J}$   
19. a)  $5,0 \cdot 10^3 \text{ N/C}$   
b)  $-3,0 \cdot 10^3 \text{ V}$   
20. a) (2) e (4)  
b) (4) e (5)  
21. Zero. A força elétrica é perpendicular à equipotencial.  
22. a)  $63 \text{ V}$   
b)  $0,63 \text{ J}$   
23.  $5 \text{ cm}$   
24.  $1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$   
25. a) Equipotenciais.  
b) Maior.  
c) De P para S. Diminuirá.  
d) De P para R. Diminuirá.  
26. c  
27. d  
28. b  
29.  $1,5 \cdot 10^3 \text{ V/m}$   
30.  $25 \text{ V}$   
31.  $315 \text{ V}$   
32.  $14 \text{ cm}$   
33. a  
34.  $1 \cdot 10^4 \text{ N/C}$ ;  
 $100 \text{ V}$   
35.  $7,5 \text{ g}$   
36.  $6,0 \cdot 10^4 \text{ V}$ ;  
 $60 \text{ cm}$ ;  $2,0 \mu\text{C}$   
37. d  
38. b  
39.  $50$   
40.  $-8,0 \mu\text{C}$   
41. Zero;  $1,8 \cdot 10^5 \text{ V}$

42. a)  $720 \text{ V}$   
b)  $60 \text{ V}$   
c)  $720 \text{ V}$   
43. a)  $9\pi R$  (V)  
b) E  
44. c  
45. a)  $0,6 \text{ nF}$   
b)  $5,4 \text{ m}$   
46. Aproximadamente  $711 \mu\text{F}$ .  
47. a) De B para A.  
b)  $1 \mu\text{C}$   
c)  $1 \mu\text{C}$   
d)  $V_A = V_B$   
48. I e IV  
49. e  
50.  $2,0 \text{ mC}$   
51.  $8,0 \text{ nF}$   
52. a)  $40 \text{ nF}$  e  $20 \text{ nF}$   
b)  $350 \text{ V}$   
c)  $14 \mu\text{C}$  e  $7,0 \mu\text{C}$   
53. a)  $360 \text{ V}$   
b)  $120 \text{ V}$   
57. e  
58. b  
59. e  
60. d  
61. I) V  
II) F  
III) F  
IV) V  
62. a)  $9,0 \cdot 10^4 \text{ N/C}$   
b) Zero.  
c) Aproximadamente  $2,8 \cdot 10^4 \text{ N/C}$ .  
63. a)  $7,5 \cdot 10^4 \text{ V}$   
b) Zero.  
c)  $2,7 \cdot 10^4 \text{ V}$   
d)  $V$  ( $10^4$  volts)



## UNIDADE 2

### Eletrodinâmica

#### CAPÍTULO 4

##### Corrente elétrica e resistores

3. Os elétrons livres se movem de A para B, e o sentido convencional da corrente é de B para A.  
4.  $1,6 \cdot 10^{-10} \text{ A}$   
5.  $i_1 = 18 \text{ A}$ ;  $i_2 = 12 \text{ A}$   
6. e  
7. a)  $924 \text{ W}$   
b)  $8,4 \text{ A}$   
11. b  
12. a)  $620 \Omega$   
b)  $205 \text{ mA}$   
c)  $7,8 \text{ kJ}$   
13. a)  $0,7 \text{ V}$   
b)  $R_1 = 0,2 \Omega$ ;  $R_2 = 0,14 \Omega$   
14. d  
15. d

16. Aproximadamente 182 m.

17. a) 100 m  
b) Não.

18.  $2,6 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2$

### Capítulo 5

#### Associação de resistores e medidas elétricas

7. a) Em série.  
b) Em paralelo.

8. a)  $10 \Omega$   
b)  $0,9 \Omega$   
c)  $5 \Omega$

9. d

10.  $R = 50 \Omega$   
 $U' = 40 \text{ V}$

11. d

12.  $i_1 = 2 \text{ A}$  e  $i_2 = 6 \text{ A}$

13. d

14. A: inverno, B: desligado e C: verão.

15. a) 14 A  
b) 5,6 kWh

16. 7,2  $\Omega$

17. Aumenta e diminui, respectivamente.

18. a) A  
b) B

19. a) 200  $\Omega$   
b) 4,8  $\Omega$   
c) Zero.

20. d

25.  $V_1: 6,0 \text{ V}; V_2: 1,0 \text{ V}; V_3: 5,0 \text{ V}.$

26.  $A_1: 2,7 \text{ A}; A_2: 1,5 \text{ A}; A_3: 1,2 \text{ A}.$

27. C e D

28.  $0,02 \Omega$ , em paralelo com o medidor.

29.  $19 \text{ M}\Omega$ , em série com o voltímetro.

30.  $4 \Omega$

### Capítulo 6

#### Circuitos elétricos



8. a)  $6,0 \text{ A}$   
b)  $2,0 \text{ A}$   
c)  $11 \text{ V}$

9. a)  $6 \text{ V}$   
b)  $6 \text{ V}$

11.  $1,2 \text{ V}$

12. a)  $68 \text{ W}$   
b)  $4 \text{ W}$   
c)  $94\%$

13. a) A lâmpada A apaga.

b) O brilho de A aumenta.

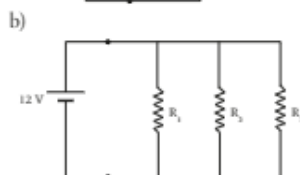
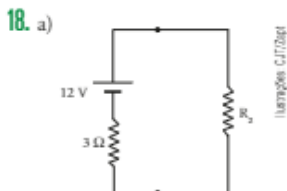
14.  $0,12 \Omega$

15. 2 A, de A para B.

16. a) Diminui porque aumenta a perda ( $r i$ ) nos fios.

b) Consegue-se transmitir a mesma potência ( $U i$ ) com correntes mais baixas, reduzindo-se assim a potência dissipada nos fios ( $r i^2$ ).

17. A lâmpada A.



19. 15  $\Omega$

20. 2,5 mA e 25 V

21. 4,5 V

25. a) 30 V e 6  $\Omega$   
b) 50%

26. 2 A, de A para B.

27. a)  $R_1 = 2 \Omega, R_2 = 2 \Omega, R_3 = 1 \Omega$   
b) 75% e 67%, respectivamente.

28. a) 4,5 V e 0,9  $\Omega$   
b) 1,5 V e 0,1  $\Omega$

29. a) 1,5 V  
b) Zero.  
c) 3 V  
d) 6 V

30. A: receptor, B: resistor, C: gerador.

31. 6 V e 0,05  $\Omega$

32. 5 pilhas.

33. 2 A

34. 6 A

35. 1  $\Omega$

36.  $i_A = 0,1 \text{ A}; i_B = 1 \text{ A}; i_{MN} = 0$

### Capítulo 7

#### Capacitores

3. a)  $30 \mu\text{C}$   
b)  $45 \mu\text{J}$

4.  $9 \text{ V e } 0,1 \Omega$

5. d

6. e

7. c

8. b

9. a)  $12 \mu\text{C}$   
b)  $0,4 \text{ W}$

10. a)  $12 \mu\text{C}$   
b)  $1 \Omega$

11. a) Menor.

b)  $F = \frac{F_0}{\epsilon_r}$

## UNIDADE 3

### Eletromagnetismo

#### Capítulo 8

#### Campo magnético e sua influência sobre cargas elétricas



4.

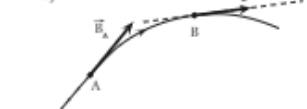
5. c

6. Não.

7.



8. a)



b) Em A, porque nessa região as linhas de indução estão mais concentradas.

9. a) Polo norte magnético.

b) Polo sul magnético.

c) Polo norte magnético.

10. C

11.



12. Apenas na situação I.

13. O campo magnético do ímã altera a direção do movimento dos elétrons, que passam a bombardear a tela em outras posições.

14. a) Região I.

b) Região II.

15. Positivo, negativo e positivo.

18.  $5 \cdot 10^{-3} \text{ T}$

19. a)  $\vec{B}_1$ : "saindo";  $\vec{B}_2$ : "entrando"

b)  $\vec{B}_1$

c)  $\Delta t_{ST} < \Delta t_{MN}$

20. A, B e C.

21.  $6,4 \cdot 10^{-16} \text{ N}$  e  $9,1 \cdot 10^{-30} \text{ N}$ , respectivamente. A força magnética é  $7,0 \cdot 10^{13}$  vezes mais intensa que a força gravitacional.

22.  $3,2 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$

## Capítulo 9

### A origem do campo magnético

5. Em A: 2; em B: 8.
6. I. Para a direita ( $\rightarrow$ );  
II. Para baixo ( $\downarrow$ );  
III. Entrando no papel ( $\otimes$ );  
IV. Saindo do papel ( $\odot$ ).
7. a) De B para A.  
b) De A para B.
8. b
9. a)  $1,6 \cdot 10^{-16}$  N  
b)  $1,6 \cdot 10^{-16}$  N  
c) Zero.
10.  $8,0 \cdot 10^{-5}$  T
11. A agulha dispõe-se perpendicularmente ao plano da espira, com seu polo norte magnético apontando para a direita.
12. Perpendicular ao plano do papel, entrando nele, de intensidade igual a  $5,0 \cdot 10^{-5}$  T.
13. Perpendicular ao plano da circunferência, entrando nesse plano.
14. a)  $2,0 \cdot 10^{-5}$  T  
b) Repulsiva.
15. Zero.
16. Norte: U, V e Y.  
Sul: T, X e Z.
17. 0,19 T
18. d
19. a
20. Demonstração.
21. e
22. Na mesma posição em que se estabilizou a agulha da bússola a.

## Capítulo 10

### Força magnética em correntes elétricas

4. b
5.  $5 \cdot 10^{-2}$  N
6. a) De C para D.  
b) 20 A
7.  $F_{AB} = 0$ ;  $F_{DC} = 0$ ;  
 $F_{AD} = F_{BC} = 5 \cdot 10^{-2}$  N
8. b
9. b
10. Em A: atração; em B: repulsão.
11. I, III e IV.
12. Seu comprimento deve diminuir.

## Capítulo 11

### Indução eletromagnética

3. a) 0,16 Wb  
b) Zero.
4. a)  $\phi_1 = \phi_2$   
b)  $B_1 > B_2$
5. a) Zero.  
b) 6,0 Wb  
c) 3,6 Wb
6. a) Não existe corrente induzida.  
b) Anti-horário.  
c) Horário.
7. d
8. a) Horário.  
b) Não há corrente induzida.  
c) Anti-horário.
9. a) Anti-horário.  
b) Horário.  
c) Não há corrente induzida.
10. a) Anti-horário.  
b) Horário.
11. a) Sentido do eixo x.  
b) Sentido oposto ao do eixo x.  
c) A força magnética é nula.
12. a) Percorre R e A para B.  
b) Não há corrente induzida.  
c) Percorre R e B para A.
13.  $t_2$  é maior que  $t_1$ .
19. a) 50 V  
b) M: negativa;  
N: positiva.
20. 100 mV
21. a) 60 V  
b) A força eletromotriz induzida surge para gerar fluxo induzido "a favor do indutor": a fem é positiva.
22. a)  $2,0 \cdot 10^{-3}$  Wb e  $1,4 \cdot 10^{-2}$  Wb, respectivamente.  
b) -6,0 mV  
c) Da direita para a esquerda.  
d) 3,0 A
23. a) 2 A  
b) 6 A
24. Zero.
25.  $U_2 = 27,5$  V  
 $U_3 = 5,5$  V  
 $U_4 = 2,2$  V
26. A temperatura da água passará a aumentar.

## UNIDADE 4

### Física Moderna

#### Capítulo 12

#### Noções de física quântica

3. Quando atingem o alvo, os elétrons sofrem grande desaceleração. Com isso, perdem energia cinética e emitem ondas eletromagnéticas, no caso, raios X.
4.  $2,7 \cdot 10^3$  K
5. 1,1 mm (dentro da faixa das micro-ondas)
6.  $3,2 \cdot 10^{13}$  Hz
7. a)  $5,1 \cdot 10^{-19}$  J  
b)  $3,3 \cdot 10^{-12}$  J
8.  $6,6 \cdot 10^{21}$  fótons
9. 31
10.  $1,45 \cdot 10^{15}$  Hz
11. a)  $6,6 \cdot 10^{-34}$  Js  
b) 2,3 eV
14. a) A, B e E.  
b) B  
c) F
15. Violeta: III  
Azul: I  
Verde: II  
Vermelha: IV
16. a) 190 nm  
b) 285 nm
17. Contínuo.

## Capítulo 13

### Mais de Física Moderna: relatividade e outras noções

3. a) 2,5 s  
b) 2,5 s
4. Sim, e ainda haverá uma folga de 30 m dentro do túnel.
5. a)  $2,89 \cdot 10^{-8}$  s  
b) 3,78 m  
c) 3,40 m
6. O condutor fez uma composição newtoniana de velocidades, que o levou a um valor absurdo do ponto de vista relativístico, já que obteve uma velocidade maior que c. Além disso, não é cabível fazer essa composição (nem newtoniana nem relativística). De fato, a velocidade de propagação de **qualquer** onda independe da velocidade da fonte que a emite. Assim, tratando a luz conforme o modelo ondulatório, isso também vale para ela.
7. 1,08 g
8. Os efeitos relativísticos só são realmente significativos para valores de v que não sejam muito menores que c.
9.  $p = \frac{hf}{c}$
10. b
11. b
12. c
13. a
14.  $11 \cdot 10^{-12}$  m
15. 1, 2 e 4.





## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALONSO, M. S.; FINN, E. J. *Física*. São Paulo: Blucher, 2014. v. 1 e 2.
- \_\_\_\_\_. *Física: um curso universitário*. São Paulo: Blucher, 2014.
- \_\_\_\_\_. *Fundamentos cuánticos y estadísticos*. Cidade do México: Addison Wesley, 1999.
- BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Básica. Diretoria de Currículos e Educação Integral. Diretrizes Curriculares Nacionais da Educação Básica, Brasília: MEC/SEB/DICEI, 2013.
- BRAZ JR., Dulcídio. *Física Moderna: tópicos para o Ensino Médio*. Campinas: Companhia da Escola, 2002.
- CANIATO, Rodolpho. *O céu*. Campinas: Átomo, 2011.
- CHAVES, Alaor. *Física básica*. Rio de Janeiro: LTC/LAB, 2007.
- CUTNELL, John D.; JOHNSON, Kenneth W. *Física*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. v. 1, 2 e 3.
- EINSTEIN, Albert. *Como vejo o mundo*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2015.
- EISBERG, Robert; RESNICK, Robert. *Física quântica*. Rio de Janeiro: Campus, 1994.
- FLEMING, Phyllis J. *Physics*. Reading (MA): Addison Wesley, 1978.
- GAMOW, George. *Gravidade*. São Paulo: Edart, 1973.
- GARCIA, Eduardo A. C. *Biofísica*. São Paulo: Sarvier, 2015.
- GIANCOLI, Douglas C. *Física, principios con aplicaciones*. Cidade do México: Prentice Hall Hispanoamericana, 2007.
- GROUEFF, S.; CARTEIR, J. P. *O enigma do cosmo*. Rio de Janeiro: Primor, 1978.
- GUAYDIER, Pierre. *História da Física*. São Paulo: Martins Fontes, 1983.
- GUIMBAL, Roger. *Le problème de la Physique*. Paris: Bordas, 1972.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos da física*. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- HAYT, W. H. *Eletromagnetismo*. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- HECHT, E. *Óptica*. Lisboa: Fund. Calouste Gulbekian, 2002.
- HESSEB, Boris. *Las raíces socioeconómicas de la Mecánica de Newton*. Havana: Academia, 1985.
- KOESTLER, Arthur. *Os sonâmbulos*. São Paulo: Ibrasa, 1971.
- KÓSEL, S. *Problemas de Física*. Moscou: Mir, 1986.
- LANDAU, L.; KITAIGORODSKI, A. *Física para todos*. Moscou: Mir, 1967.
- LANDAU, L.; RUMER, Y. *Aprenda a Teoria da Relatividade brincando*. São Paulo: Hemus, 1970.
- LUCIE, Pierre. *Física básica*. Rio de Janeiro: Campus, 1979.
- MATVEEV, A. N. *Electricidad y magnetismo*. Moscou: Mir, 1988.
- NUSSBAUM, Allen. *Comportamento eletrônico e magnético dos materiais*. São Paulo: Blucher, 1971.
- NUSSENZVEIG, Herch Moysés. *Curso de Física básica*. São Paulo: Blucher, 2013.
- OKUNO, E.; CALDAS, L. L.; CHOW, C. *Física para ciências biológicas e biomédicas*. São Paulo: Harbra, 1986.
- OREAR, Jay. *Física*. Rio de Janeiro: LTC, 1991.
- OSADA, Jun'ichi. *Evolução das ideias da Física*. São Paulo: Blucher/USP, 1972.
- PAIS, Abraham. *A ciência e a vida de Albert Einstein*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995.
- PERELMAN, Y. *Física recreativa*. Moscou: Mir, 1987.
- PURCELL, E. M. *Curso de Física de Berkeley: eletricidade e magnetismo*. São Paulo: Blucher, 1981. v. 2.
- RONAN, Colin A. *História ilustrada da Ciência da Universidade de Cambridge*. São Paulo: Jorge Zahar, 1991.
- ROZEMBERG, I. M. *O sistema internacional de unidades (SI)*. São Paulo: Instituto Mauá de Tecnologia, 2006.
- SAVELYEV, I. V. *Physics: a general course*. Moscou: Mir, 1980. v. 1 e 2.
- SERWAY, Raymond; JEWETT JR., John W. *Principios de Física*. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.
- THE Visual Dictionary of Physics*. Toronto: Stoddart, 1995.
- TIPLER, Paul A. *Física*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978. v. 1 e 2.
- VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E. *Fundamentos da Termodinâmica clássica*. 2. ed. São Paulo: Blucher, 1995.
- WALKER, Jearl. *O grande circo da Física*. Lisboa: Gradiva, 2001.
- WESTFALL, Richard S. *A vida de Isaac Newton*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1993.
- WHITE, Harvey E. *Física Moderna*. Barcelona: Montaner y Simón, 1979. v. 1 e 2.
- WILSON, Jerry. *Física*. Nova Jersey: Prentice Hall, 1996.
- WOLF, Jonathan S. *Physics*. Nova York: Barron's Educational Series, 1996.
- YOUNG, Hugh D. *Sears and Zemansky's University Physics*. Reading (MA): Addison Wesley, 2008.