

# INTRODUÇÃO ÀS CIÊNCIAS FÍSICAS 2

Módulo 4  
Volume 4

Maria Antonieta T. de Almeida







Fundação

**CECIERJ**

Consórcio **cederj**

Centro de Educação Superior a Distância do Estado do Rio de Janeiro

## Introdução às Ciências Físicas 2

Volume 4 - Módulo 4

Maria Antonieta T. de Almeida



**GOVERNO DO  
Rio de Janeiro**

**SECRETARIA DE  
CIÊNCIA E TECNOLOGIA**

**Ministério  
da Educação**



Apoio:



**FAPERJ**

Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo  
à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro

# Fundação Cecierj / Consórcio Cederj

Rua Visconde de Niterói, 1364 - Mangueira - Rio de Janeiro, RJ - CEP 20943-001  
Tel.: (21) 2299-4565 Fax: (21) 2568-0725

## Presidente

Masako Oya Masuda

## Coordenação do Curso de Física

Luiz Felipe Canto

## Material Didático

### ELABORAÇÃO DE CONTEÚDO

Maria Antonieta T. de Almeida

### EDITORA

Tereza Queiroz

### COORDENAÇÃO EDITORIAL

Jane Castellani

### COORDENAÇÃO DE DESENVOLVIMENTO INSTRUCIONAL

Cristine Costa Barreto

### COORDENAÇÃO DE LINGUAGEM

Maria Angélica Alves

### DESENVOLVIMENTO INSTRUCIONAL E REVISÃO

Alexandre Rodrigues Alves

Márcia Pinheiro

Nilce P. Rangel Del Rio

### REVISÃO TIPOGRÁFICA

Equipe CEDERJ

### COORDENAÇÃO GRÁFICA

Jorge Moura

### PROGRAMAÇÃO VISUAL

Katy Araújo

### ILUSTRAÇÃO

Fábio Muniz de Moura

Morvan de Araujo Neto

### CAPA

Bruno Gomes

Fábio Muniz de Moura

Reinaldo Lee

### EDITORIAÇÃO DE FÓRMULAS

Giuseppe Luigi Toscano

### PRODUÇÃO GRÁFICA

Andréa Dias Fiães

Fábio Rapello Alencar

Copyright © 2005, Fundação Cecierj / Consórcio Cederj

Nenhuma parte deste material poderá ser reproduzida, transmitida e gravada, por qualquer meio eletrônico, mecânico, por fotocópia e outros, sem a prévia autorização, por escrito, da Fundação.

A447i

Almeida, Maria Antonieta T. de.

Introdução às ciências físicas 2. v.4 / Maria Antonieta T. de Almeida. — Rio de Janeiro : Fundação CECIERJ, 2007.

181p.; 21 x 29,7 cm.

ISBN 85-89200-22-1

1. Eletrostática. 2. Energia elétrica. 3. Circuitos elétricos. 4. História da eletricidade. I. Título.

CDD: 530.1



# Governo do Estado do Rio de Janeiro

**Governador**  
Sérgio Cabral Filho

**Secretário de Estado de Ciência e Tecnologia**  
Alexandre Cardoso

## Universidades Consorciadas

**UENF - UNIVERSIDADE ESTADUAL DO  
NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO**  
Reitor: Raimundo Braz Filho

**UERJ - UNIVERSIDADE DO ESTADO DO  
RIO DE JANEIRO**  
Reitor: Nival Nunes de Almeida

**UFF - UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE**  
Reitor: Cícero Mauro Fialho Rodrigues

**UFRJ - UNIVERSIDADE FEDERAL DO  
RIO DE JANEIRO**  
Reitor: Aloísio Teixeira

**UFRRJ - UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL  
DO RIO DE JANEIRO**  
Reitor: Ricardo Motta Miranda

**UNIRIO - UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESTADO  
DO RIO DE JANEIRO**  
Reitora: Malvina Tania Tuttman



## SUMÁRIO

### MÓDULO 4 – Resultados experimentais versus modelos: os fenômenos elétricos

<b>Recomeçando .....</b>	<b>9</b>
<b>Aula 1 – Interação eletrostática</b>	
Introdução .....	11
Que sei sobre a interação eletrostática? .....	12
Produção, transmissão e utilização de energia elétrica .....	13
"Blackout na sexta-feira" .....	13
Leituras e exercícios 1 .....	17
Cargas elétricas, isolantes e condutores.....	18
Cargas elétricas .....	18
"Um dia seco de inverno" .....	18
Leituras e exercícios 2 .....	26
Isolantes e condutores .....	27
"A descoberta dos condutores" .....	27
Leituras e exercícios 3 .....	31
Forças elétricas .....	32
A Lei de Coulomb .....	32
"Saudades do professor Edmundo" .....	32
Leituras e exercícios 4 .....	42
<b>Aula 2 – Campos elétricos</b>	
Introdução .....	45
Que sei sobre campo elétrico? .....	46
Campo elétrico .....	47
"Uma varinha mágica" .....	47
Leituras e exercícios 5 .....	54

### **Aula 3 – Potencial elétrico**

Introdução .....	57
Que sei sobre potencial elétrico? .....	58
Potencial elétrico .....	59
Princípio da conservação da energia.....	59
"O defeito na lâmpada" .....	59
Leituras e exercícios 6 .....	73
Potencial elétrico.....	74
"Uma aula e voltagem para vestibulandos" .....	74
Leituras e exercícios 7 .....	81

### **Aula 4 – Mapeando equipotenciais**

Prática 1 .....	83
Experimento 1- Mapeamento do campo em uma cuba eletrolítica com eletrodos retos.....	85
Experimento 2- Mapeamento do campo em uma cuba eletrolítica com eletrodos circulares.....	88

### **Aula5 – Corrente elétrica e suas fontes**

Introdução .....	91
Que sei sobre correntes elétricas e suas fontes? .....	92
Correntes elétricas .....	93
"Um curto-circuito" .....	93
Fontes de correntes elétricas.....	100
"Arrombando um armário mágico".....	100
Leituras e exercícios 8 .....	104

### **Aula 6 – Lei da malhas e lei dos nós**

Prática 2 .....	105
Experimento 3 – A lei de Ohm .....	106
Experimento 4 – A voltagem nos terminais da fonte .....	112
Experimento 5 – A lei dos nós.....	114
Experimento 6 – A lei das malhas .....	116

### **Aula 7 – Distribuição de energia em um circuito, aspectos teóricos**

Introdução.....	119
Que sei sobre a distribuição de energia em um circuito elétrico? .....	120
Modelo clássico de condução.....	121
"Nem tanto ao mar nem tanto à terra" .....	121
Leituras e exercícios 9.....	132
Distribuição de energia em circuitos elétricos .....	133
"Feriado em Teresópolis" .....	133
Leituras e exercícios 10.....	138

<b>Aula 8 – Distribuição de energia em um circuito, aspectos experimentais</b>	
Pratica 3 .....	<b>139</b>
Experimento 7 – Medindo resistências.....	<b>141</b>
Experimento 8 – A luminosidade de uma lâmpada e a corrente elétrica.....	<b>145</b>
Experimento 9 – Distribuição de energia em resistores ligados em série no quadro de luz I (corrente contínua).....	<b>147</b>
Experimento 10 – Distribuição de energia em resistores ligados em paralelo no quadro de luz I (corrente contínua).....	<b>149</b>
Experimento 11 – Distribuição de energia em resistores ligados em série no quadro de luz II (corrente alternada) .....	<b>151</b>
Experimento 12 – Distribuição de energia em resistores ligados em paralelo no quadro de luz II (corrente alternada) .....	<b>154</b>
<b>E para terminar...</b> .....	<b>157</b>
<b>Complemento 1</b>	
Historia da eletricidade .....	<b>159</b>
<b>Complemento 2</b>	
Medindo grandezas elétricas com o multímetro .....	<b>171</b>
<b>Referências Bibliográficas</b> .....	<b>179</b>
<b>Agradecimentos</b> .....	<b>181</b>



## Recomeçando...

### Resultados experimentais *versus* modelos: os fenômenos elétricos

Você está recebendo agora o material referente ao quarto módulo de nosso curso. Neste momento, entraremos no mundo da eletricidade. Nele, serão apresentadas a interação entre cargas elétricas, a distribuição de correntes elétricas e de energia em um circuito elétrico. Algumas das leis associadas aos fenômenos elétricos serão verificadas experimentalmente.

As principais dúvidas e conceitos de eletricidade são apresentados na forma de histórias e experiências entre os membros da família Silva e entre eles e professores e colegas de escola.

Inicialmente, analisaremos os fenômenos associados ao aparecimento de cargas elétricas. Caracterizaremos a matéria de acordo com a mobilidade das cargas elétricas no seu interior. Descreveremos a interação entre cargas elétricas como uma ação a distância e através de campos elétricos. Introduziremos o conceito de potencial elétrico, que será utilizado para entender a distribuição de correntes elétricas e de energia nos circuitos.

As aulas deste módulo devem ser complementadas por leituras e exercícios dos livros de Antonio Máximo e Beatriz Alvarenga: Física - volume único, e do Gref: Física 3.

Este módulo foi previsto para ter duração média de quatro semanas. É constituído de oito *aulas*, e iniciado por este texto, *Recomeçando...* (que você está lendo) e acaba no *E para terminar...*

As aulas são:

1. *Interação eletrostática*
2. *Campos elétricos*
3. *Potencial elétrico*
4. *Mapeando eqüipotenciais*
5. *Corrente elétrica*
6. *Lei das malhas e lei dos nós*
7. *Distribuição de energia em um circuito - aspectos teóricos*
8. *Distribuição de energia em um circuito - aspectos experimentais*

Ao final do módulo você encontrará também complementos sobre a história da eletricidade, sobre a utilização de um multímetro e a bibliografia.

Este módulo é acompanhado também por um cd-rom e um vídeo. O cd-rom contém vários dos experimentos descritos nas aulas 1 e 2. O vídeo apresenta o fenômeno da blindagem eletrostática e do aterramento. Como são partes integrantes do material didático, você deve assistir a eles com atenção.

*Cd-rom: Eletricidade*

*Vídeo 3: Blindagem eletrostática*

O material para os experimentos a serem realizados no pólos já está disponível, e os tutores conhecem bem o material.

Os principais conceitos abordados são:

- carga elétrica;
- isolantes e condutores;
- força elétrica;
- campo elétrico;
- voltagem;
- corrente elétrica;
- potência elétrica.

Para acompanhar as discussões feitas, você precisa conhecer as idéias básicas de trigonometria, saber manipular funções trigonométricas simples e dominar a mecânica da partícula, apresentada no Módulo 3.



## Interação eletrostática

### Objetivos

Discutir a interação entre cargas elétricas em repouso.

### Introdução

Esta aula tem como finalidade discutir a interação entre cargas elétricas em repouso. Será apresentado o modelo de ação a distância proposto por Coulomb.

Esta aula é constituída de oito partes:

**Que sei sobre a interação eletrostática?** É um questionário que organiza os conhecimentos que você já tem sobre a interação eletrostática.

**Produção, transmissão e utilização da energia elétrica** contém o texto “*Blackout na sexta-feira*” que apresenta a família Silva e ressalta a importância da energia elétrica em uma residência. O dia-a-dia da família Silva é o ambiente de discussão informal dos conceitos abstratos da eletricidade.

O item **Cargas elétricas isolantes e condutores** contém textos que resumem as principais propriedades das cargas elétricas e dos materiais isolantes e condutores, além de uma atividade.

A parte **Forças elétricas** contém um texto que resume as principais propriedades das forças elétricas, e também uma atividade.

Nas **Leituras e exercícios** de 1 até 4 há indicações de leituras, pequenas atividades experimentais, vídeos e exercícios. As leituras tratam dos mesmos assuntos dos textos, nos livros *Física - volume único*, de Beatriz Alvarenga e Antonio Máximo, e *Física 3 (Eletromagnetismo)*, do GREF.

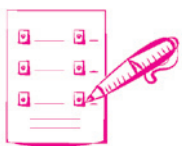
Faça as leituras de forma sistemática, realizando as atividades (exercícios e leituras extras) sugeridas ao longo do texto. Use seu caderno para anotações e comentários, além de resolução de atividades.

Não deixe de refazer nenhum dos exemplos sugeridos, nem os exercícios.

Bom trabalho!

## Que sei sobre interação eletrostática?

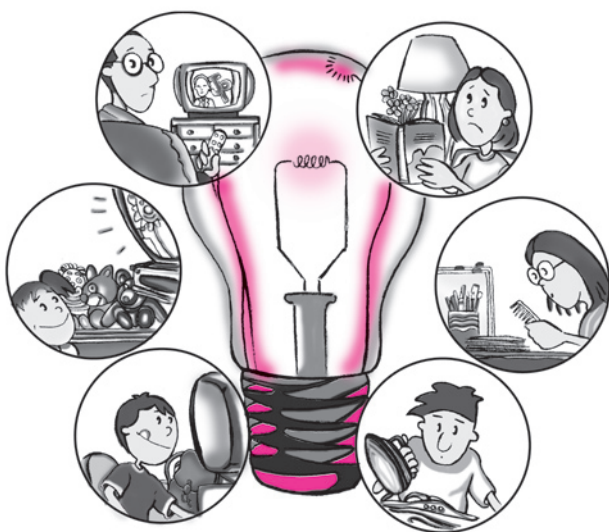
As questões apresentadas a seguir têm como finalidade investigar e organizar as idéias que você já tem sobre interação eletrostática. Escreva as respostas às questões de forma organizada em seu caderno. Não consulte livros nem notas de aulas e responda a todas elas. A comparação entre as suas idéias e os conhecimentos sobre a interação eletrostática, antes e depois de trabalhar este módulo, é importante para o seu aprendizado.



## Questionário 1

1. O que são *cargas elétricas*?
2. Quais os *tipos de cargas elétricas* que existem?
3. Marque a alternativa correta:  
( ) Cargas elétricas de *mesmo tipo se atraem* e de *tipos diferentes se repelem*.  
( ) Cargas elétricas de *tipos diferentes se atraem* e do *mesmo tipo se repelem*.
4. O que são *isolantes*?
5. O que são *condutores*?
6. Quais são os *processos que eletrizam isolantes*?
7. Quais os processos que *eletrizam condutores*?
8. Enuncie o *princípio da conservação da carga elétrica*.
9. Descreva o *modelo de ação a distância* que descreve a *interação entre cargas elétricas em repouso* (interação eletrostática). Você sabe quem propôs esse modelo?
10. Enuncie o *princípio da superposição para forças elétricas*.

## Produção, transmissão e utilização da energia elétrica.



### “Blackout na sexta-feira”

São oito horas da noite de uma sexta-feira. A família Silva segue a sua rotina. Paula, a mãe, lê um livro policial na sala. Roberto, o pai, assiste ao noticiário na TV. Ana, a filha com oito anos, vê no quarto um desenho animado no vídeo-cassete. Fátima, a filha de 19, estuda para uma prova de eletromagnetismo do seu curso de Física. André, o filho de 14, joga no seu computador. Ronaldo, o filho de 17 anos, passa a roupa que vestirá à noite para ir à discoteca. Os sons da lava-louça e da máquina de lavar roupa tomam toda a casa.

De repente, a casa fica escura e silenciosa. Ouvem-se gritos e correrias. Paula procura velas, encontra-as e com elas ilumina a sala. Todos os seus filhos, como mariposas, juntam-se a ela. Roberto, com sua lanterna, se dirige à caixa de disjuntores e grita: “Os disjuntores estão ligados. Dêem uma olhada pela janela para ver se a falta de luz foi geral!” Ronaldo responde: “A rua está toda apagada!”. Ao ouvir isso, Roberto pede: “Desliguem todos os aparelhos elétricos!” e se reúne à família.

Ana choraminga, lamentando a interrupção do seu desenho, e pede para alguém consertar o seu vídeo-cassete.

André explica, com jeito de quem sabe tudo: “Ana, o vídeo-cassete não funciona quando está faltando luz”.

A menina não aceita a explicação: Mas quando a luz do quarto está apagada, o vídeo-cassete funciona do mesmo jeito... Quero ver a continuação do meu desenho!”

Paula explica à filha que a luz apagou porque faltou energia elétrica, e o vídeo-cassete só funciona quando recebe essa energia.

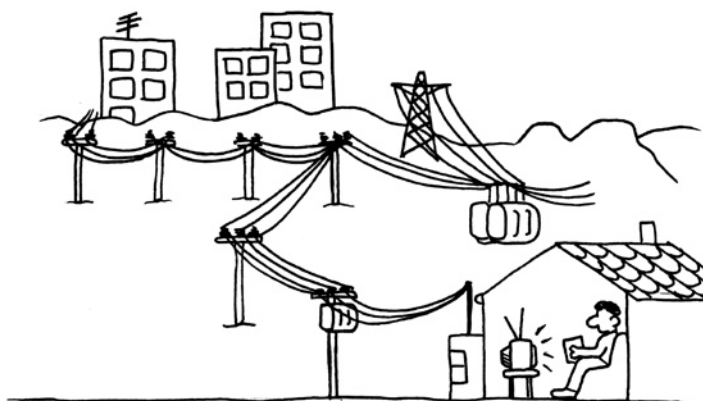


Figura 1 - Transmissão de energia pela rede elétrica.

– Mãe, o que é **energia elétrica**? Quem pode arranjar um pouco dessa energia para colocar no vídeo-cassete, só para ver o finalzinho do desenho?

Roberto entra na história: “Ana, a energia elétrica é produzida muito longe daqui, não dá para trazê-la numa caixinha, viu? Ela chega até nossa casa pelos fios que estão presos nos postes da rua. Quando você liga o vídeo-cassete na tomada, a energia elétrica entra pelo fio que vem da rua para nossa casa, sai pela tomada e aciona o vídeo-cassete”.

Ana reclama que continua sem entender por que o seu desenho animado tinha sumido: “Mas eu não desliguei nenhuma tomada...”

Com paciência, Paula comenta que o fio da rua deve ter quebrado e que alguém já devia estar fazendo o conserto. Dali a pouco a luz deve voltar. Ronaldo pega o telefone para tentar descobrir quanto tempo vai demorar o conserto.

André está estudando Ciências na escola, e aprendeu que uma lâmpada também precisa de energia elétrica para acender. Lembra-se da lanterna que o pai utilizou para ver a caixa de luz, na cozinha. Curioso, ele também passa a perguntar: “Por que a energia elétrica que acende a luz da lanterna pode ser guardada na pilha e transportada e a que vem da tomada não pode? Elas são diferentes?”

Fátima, que até então estava alheia àquela conversa, explica: “Os aparelhos para funcionarem precisam ser ligados a uma fonte de energia elétrica. A pilha e a rede elétrica são fontes de energia elétrica. A energia elétrica que a pilha fornece e a energia elétrica que vem pela tomada são iguais. Mas as pilhas fornecem pouca energia e perdem a carga rapidamente.”



– É mesmo, meus amigos que têm *walkman*<sup>®</sup> gastam uma “nota” comprando pilhas, diz Ana.

– A rede elétrica pode fornecer grandes quantidades de energia – continua Fátima. Então, seria necessária uma caixa muito grande para guardar a energia elétrica suficiente para abastecer uma casa. Vocês lembram? Antes de a luz apagar, as lâmpadas, a geladeira, o *freezer*, os televisores, o vídeo-cassete, o computador, as máquinas de lavar louça e de lavar roupa e o ferro de passar estavam consumindo energia elétrica!

Empolgada, ela continua: “A energia produzida em uma fonte de energia elétrica pode estar guardada em uma represa, sob a forma de energia potencial gravitacional, em uma pilha sob a forma de energia química ou pode estar na forma de energia nuclear etc. Ela é produzida continuamente. Nas represas, quando as comportas são abertas, fazendo a água movimentar as turbinas; nas pilhas ao se iniciar uma reação química; nas usinas nucleares, ao iniciar uma reação nuclear.”

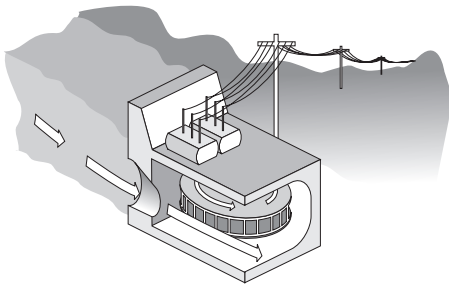


Figura 2 - Usina hidroelétrica.

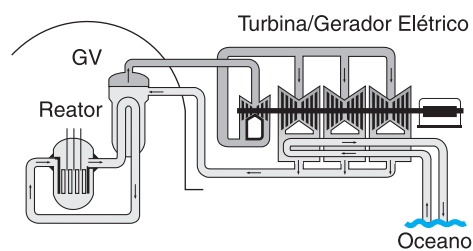


Figura 3 - Usina nuclear.

André comenta, com ar de ironia e enfado: “Lá vem a sabichona com as suas palavras incompreensíveis: energia química, energia elétrica, energia nuclear etc. etc.”

Ronaldo intervém em favor da irmã dizendo que André está exagerando, como sempre. “Outro dia vi você estudando o capítulo sobre energia no seu livro de Ciências. Logo você já deveria saber que existem vários tipos de energia na natureza: a energia do movimento, a energia térmica, a energia química... Sempre é possível transformar um tipo de energia em outro. Por exemplo, quando aquecemos água e produzimos vapor e esse vapor é utilizado para movimentar um catavento estamos transformando energia térmica em energia do movimento. As fontes de energia elétrica transformam outros tipos de energia em energia elétrica.

André resmunga: “O meu professor já falou de energia e eu já estudei a matéria. Mas ainda não consegui compreender direito o que é energia.”

A luz volta. Ana corre para ligar o vídeo-cassete. Todos retomam suas atividades. Menos André e Fátima, que continuam conversando.

– Mas como é possível que a mesma energia seja responsável pelo funcionamento de coisas tão diferentes, como um ferro elétrico, um televisor e um liquidificador?”

Ver discussão sobre o princípio de conservação da energia na Aula 3

– Não tem nada estranho nisso. A energia é a mesma, mas os aparelhos são diferentes. Para entender melhor o assunto podemos dividir os aparelhos elétricos em três grupos utilizando como critério o tipo de energia produzido por eles. O grupo de aparelhos cuja função principal é transformar energia elétrica em energia térmica será denominado de resistivo. Os aparelhos do grupo resistivo possuem em geral um pedaço de fio, quase sempre em forma de espiral, denominado resistor. Quando ligado à tomada o resistor aquece transformando energia elétrica em energia térmica. Esse é o caso do chuveiro elétrico.

– Quer dizer que o ferro elétrico é resistivo?

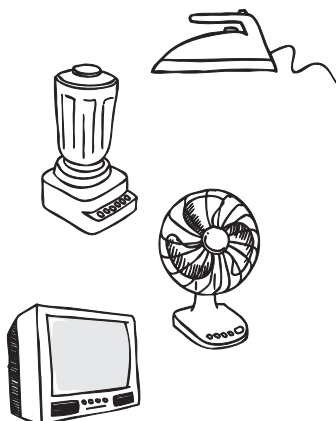
– Sim. Outros aparelhos elétricos têm como função principal produzir movimentos, ou seja, transformar a maior parte da energia elétrica em energia de movimento (em geral energia de rotação). São os do grupo de motores elétricos.

– O liquidificador e o ventilador fazem parte desse grupo?

– Sim. O terceiro grupo é formado pelos elementos do sistema de comunicação e informação, ou seja, aparelhos elétricos que permitem comunicação entre as pessoas, como a televisão, ou permitem armazenar informações, tais como a fita magnética e o cd-rom, ou processam informações, como os computadores. A TV é um aparelho do sistema de comunicação que recebe energia da rede elétrica para amplificar e transformar em imagens os sinais elétricos emitidos pelas emissoras de televisão.

– E os rádios? Também são elementos de comunicação? A máquina de lavar roupa é um motor?

– Sim! Muito bem, você entendeu a classificação. Mas agora chega de perguntas. Vou continuar a estudar, que a prova de amanhã não vai ser fácil.



.....

1. Existem várias fontes de energia elétrica. Entre elas podemos citar as pilhas, as usinas hidrelétricas, as usinas nucleares etc.

2. Os aparelhos elétricos podem ser classificados em três grupos utilizando como critério o tipo de energia produzido por eles: o grupo dos resistivos, onde a energia elétrica é transformada em energia térmica; o grupo dos motores elétricos, onde a energia elétrica é transformada em energia de movimento; e o grupo dos aparelhos de comunicação e informação, onde a energia elétrica é transformada em imagens, sons e informações.

.....

## Leituras e exercícios 1

### Exercício 1

Marque na lista abaixo com um R os elementos resistivos, com um C os elementos de comunicação e informação e com um M os motores.

chuveiro ( )	calculadora ( )	microfone ( )
ventilador ( )	tomada ( )	faca elétrica ( )
filmadora ( )	barbeador ( )	lâmpadas incandescentes ( )
lâmpadas fluorescentes ( )		

### Leituras

Leia os textos das páginas 25 a 31 do livro *Física 3 (Eletromagnetismo)* – GREF.



## Cargas elétricas, isolantes e condutores e forças elétricas

### Cargas elétricas

“Um dia seco no inverno”



Este é um dia de inverno. A umidade do ar está baixa. Ana está se penteando para sair com Roberto, seu pai. Ela está irritada porque não consegue deixar seu cabelo arrumado. Seu pente parece diferente, está atraindo os seus cabelos. Chama Fátima, sua irmã, para socorrê-la.

– Fátima, este pente está enfeitado! Ele está despen-teando o meu cabelo, me ajude!

Fátima sorri, pois sabe que não existe feitiço nenhum. O dia está seco e o pente está eletrizado. Qualquer corpo eletrizado pode atrair um corpo neutro leve.

Roberto grita por Ana, para irem logo. Ela esquece o pente e os seus cabelos arrepiados e sai correndo.



Figura 4 - O pente que foi utilizado para pentear os cabelos atrai pequenos pedaços de papel.

André, que vinha passando, se interessa pela conversa e tenta, com o pente de Ana, atrair pequenos pedaços de papel.

– Que estranho! Você tem razão! O pente está diferente mesmo. O que aconteceu com ele?

#### CORPO ELETRIZADO

– Ele ficou eletrizado – disse Fátima. Corpos atritados são capazes de atrair outros corpos leves; já se sabe disso há muito tempo. Dizemos que eles adquirem cargas elétricas.

– Cargas elétricas? Não estou vendo nenhuma carga elétrica.

– É claro que você não pode vê-las. Os nossos olhos não são capazes de vê-las.

– Então como é possível você afirmar, com tanta certeza, que elas existem?

– Há muitas coisas que existem apesar de nossos olhos não as enxergarem. Um bom exemplo disso são os átomos. Você tem alguma dúvida da existência deles?



– Não! Meu professor de Ciências me convenceu de que é possível explicar vários fenômenos químicos supondo-se que os átomos existem. Ele disse que depois, com os microscópios eletrônicos, foi possível mesmo ver um átomo... Mas você pode me mostrar fatos que podem ser explicados supondo-se a existência de cargas elétricas?

Nesse instante, a campainha da porta toca. Fátima escuta a voz do seu namorado e percebe que está na hora de sair para o cinema, e deixa André com muita curiosidade.

Na manhã seguinte, para surpresa de André, o professor Edmundo, de Ciências, anuncia que vai discutir cargas elétricas e suas propriedades.

Ele inicia a aula mostrando que um bastão de PVC não é capaz de atrair uma bolinha de isopor que está pendurada em um suporte por um fio de seda.

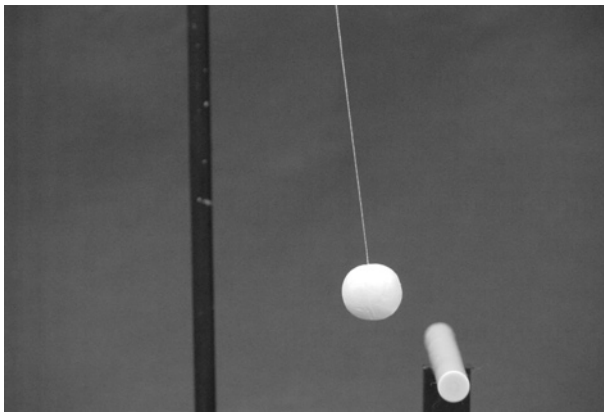


Figura 5 - Bolinha de isopor neutra sendo atraída por bastão de PVC atritado com flanela.

A seguir, ele esfrega o bastão de PVC com um pedaço de flanela e mostra que o bastão fica diferente: agora ele é capaz de atrair a bolinha. O professor diz que o bastão ficou eletrizado, isto é, adquiriu cargas elétricas.

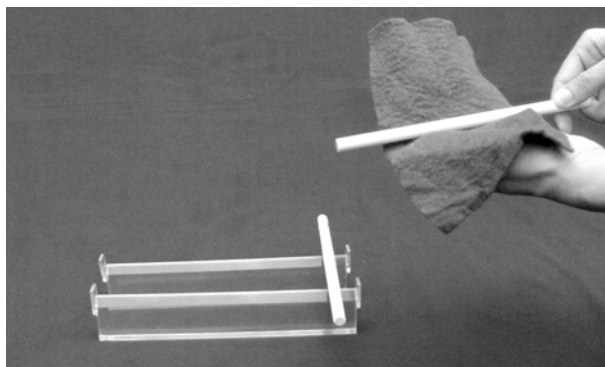


Figura 6a - Bastões de PVC atritados com flanela.

Esfrega então um segundo bastão de PVC com outro pedaço de flanela, coloca-o sobre dois trilhos de acrílico. Aproxima dele o primeiro bastão de PVC eletrizado, que o repele.



Veja este  
experimento no cd-rom  
Eletricidade.

### FORÇAS ELÉTRICAS



Leia a respeito  
da evolução  
das idéias sobre  
forças elétricas no  
complemento a História  
da eletricidade.

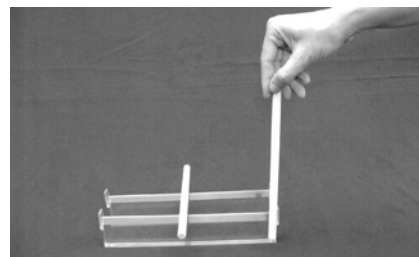
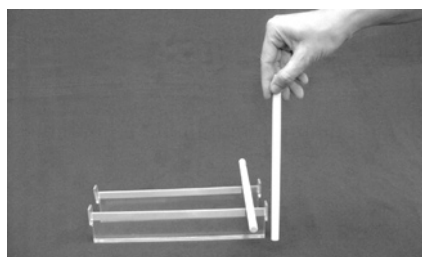


Figura 6b - Bastões de PVC se repelindo.

O professor explica que os dois bastões devem ter o mesmo tipo de carga elétrica, porque eles são iguais e foram esfregados com flanelas iguais. As cargas elétricas dos bastões de PVC são iguais e se repelem. As forças de repulsão entre os bastões são chamadas **forças elétricas**.

- Professor Edmundo, isso só acontece com o PVC?

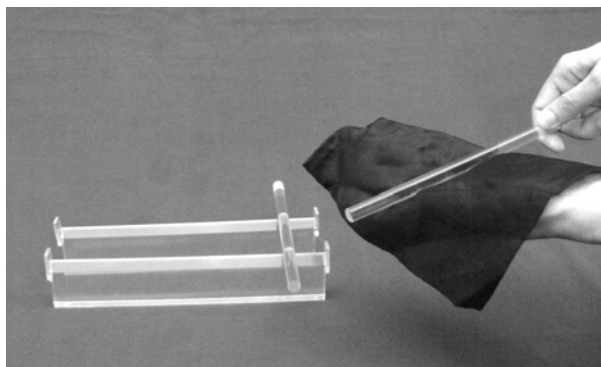


Figura 7a - Bastões de acrílico atritados com seda.

- Existem muitos corpos que se eletrizam por atrito. Como ilustração, vou atritar com seda dois bastões de acrílico.



Veja este  
experimento no cd-rom  
Eletricidade.

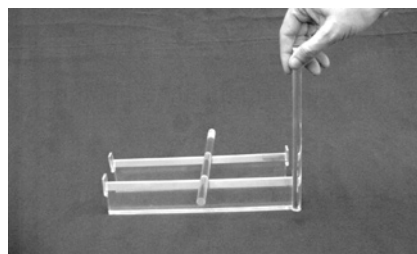
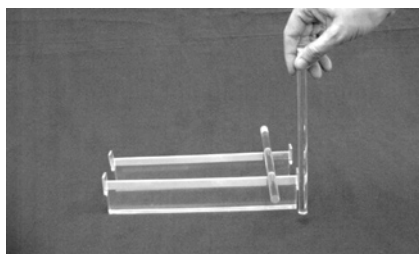


Figura 7b - Bastões de acrílico se repelindo.

Edmundo substitui o bastão de PVC que estava sobre o trilho por um dos bastões de acrílico, e aproxima dele o segundo bastão de acrílico. Os dois bastões de acrílico também se repelem.

– Professor, as cargas elétricas do bastão de PVC e do bastão de acrílico são do mesmo tipo?

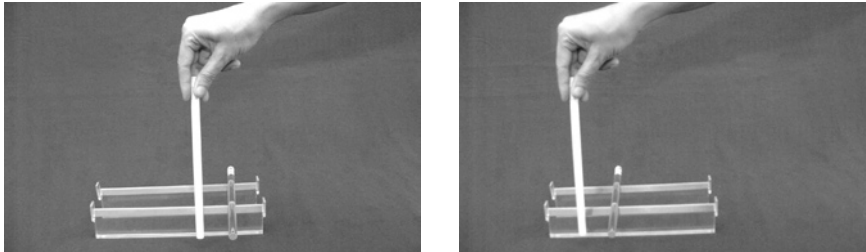


Figura 8 - Acrílico e PVC se atraindo.



Veja este experimento no cd-rom Eletricidade.

– Podemos verificar se as cargas elétricas do bastão de PVC atritado com flanela e do bastão acrílico atritado com seda são de tipos diferentes colocando o bastão de acrílico sobre o trilho e aproximando dele o bastão de PVC. Vejam, eles se atraem. Portanto, as cargas elétricas deles são de tipos diferentes.

– Professor Edmundo, como se chama a carga elétrica do bastão de PVC e a carga elétrica do de acrílico?

– Faz muito tempo que resolveram chamar de positiva a carga elétrica que aparece em um bastão de vidro atritado com seda e de negativa aquela que aparece em bastão de âmbar atritado com lã. Vou utilizar um bastão de vidro atritado com seda para descobrir que tipo de carga elétrica existe no bastão de PVC e que tipo de carga elétrica existe no bastão de acrílico.

CARGAS ELÉTRICAS  
POSITIVAS

CARGAS ELÉTRICAS  
NEGATIVAS

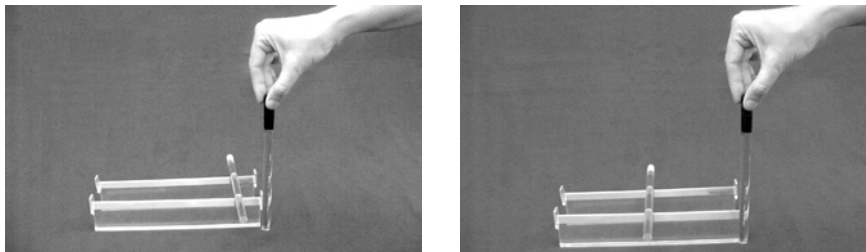


Figura 9 - Bastões de acrílico e vidro se repelindo.

O bastão de acrílico eletrizado é repelido pelo bastão de vidro eletrizado.

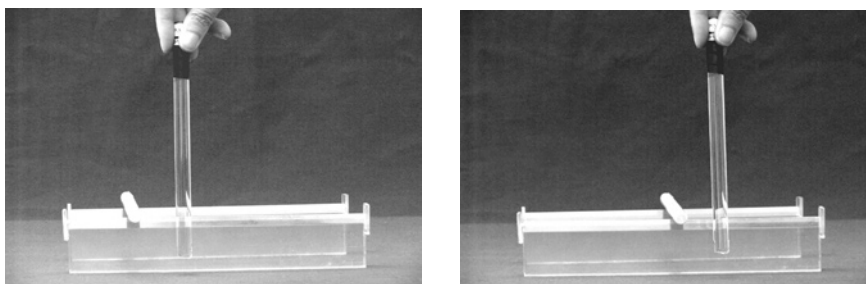


Figura 10 - Bastões de PVC e vidro se atraindo.

## CARGA ELÉTRICA

O bastão de PVC eletrizado é atraído pelo bastão de vidro eletrizado.

Alguém pode me dizer o tipo das cargas elétricas do PVC e do acrílico?

– O acrílico tem carga positiva, porque foi repelido pela carga elétrica do bastão de vidro; o PVC tem carga elétrica negativa, porque foi atraído pela carga positiva do vidro.

– Professor Edmundo, afinal de contas, o que é uma **carga elétrica**?, perguntou André, ansioso pela resposta.

– É uma propriedade da matéria responsável pelas forças entre dois corpos eletrizados. Quando as quantidades de carga elétrica dos corpos eletrizados são grandes, as forças são grandes.

– Professor, quer dizer que a carga elétrica desempenha nas forças elétricas o papel desempenhado pela massa na força de atração gravitacional?

– Isso mesmo. As forças entre cargas elétricas em repouso são muito parecidas com as forças gravitacionais entre massas.

Marina, que estava atenta à discussão, comenta: “As cargas elétricas podem se repelir e podem se atrair, mas as massas sempre se atraem. Então as propriedades de massa e carga elétrica não são iguais”.

– Por isso eu não disse que elas eram iguais. Disse apenas que elas apresentavam alguns aspectos parecidos, tal como o fato de estarem relacionadas com as intensidades das forças. Você acabou de perceber uma das diferenças importantes entre cargas elétricas e massas. Só existe um tipo de massa, e elas sempre se atraem.

Alguém resmunga: “que confusão!”

Outro aluno pergunta: “De onde vieram as cargas elétricas que apareceram nos bastões? Elas foram criadas do nada?”

– Não é possível modificar a carga elétrica total de um sistema que esteja isolado. Esse resultado experimental é denominado **Princípio da Conservação da Carga Elétrica**. Logo, não podemos criar cargas elétricas positivas sem criar cargas elétricas negativas com o mesmo valor.

– Continuo sem entender por que apareceu carga elétrica nos bastões.

Hoje em dia já sabemos que os átomos são compostos de prótons, nêutrons e elétrons. Os prótons têm cargas elétricas positivas, os elétrons têm cargas elétricas negativas e os nêutrons têm carga elétrica nula. Todo átomo tem carga elétrica total nula, porque o número de prótons e elétrons de um átomo é igual. As moléculas são formadas de átomos, e os corpos são formados por moléculas. Portanto, na maioria das vezes a carga elétrica total de um corpo é nula. Um corpo com carga elétrica total nula é chamado de **corpo neutro**. Quando dois corpos são atritados, não existe criação de carga elétrica. Parte dos elétrons de um dos corpos passa para o outro. Simplificando, podemos dizer que os elétrons passam para o corpo que tem uma estrutura com maior capacidade de atraí-los. O corpo que fica com excesso de elétrons torna-se negativo, e o que perdeu os elétrons fica positivo.

## PRINCÍPIO DA CONSERVAÇÃO DA CARGA ELÉTRICA

## CORPO NEUTRO

– Quer dizer que a flanela que foi esfregada no bastão de PVC ficou com carga elétrica positiva e a seda que foi atritada com o acrílico ficou com carga elétrica negativa?

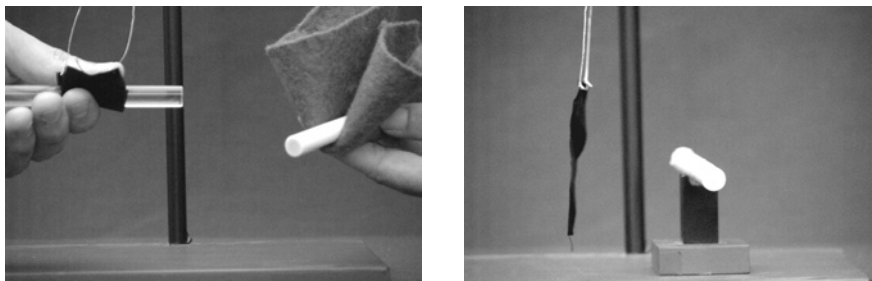


Figura 11 - Seda com carga elétrica negativa sendo repelida pelo bastão de PVC negativo.



Veja este experimento no cd-rom Eletricidade.

O professor atrita o bastão de acrílico com um pedaço de seda que está pendurado em um suporte por um fio de seda. Esfrega o bastão de PVC com a flanela. Aproxima da seda pendurada o bastão de PVC eletrizado e mostra que ela é repelida.

– Veja, a seda foi repelida pelo bastão de PVC. Portanto, ela tem carga elétrica negativa.

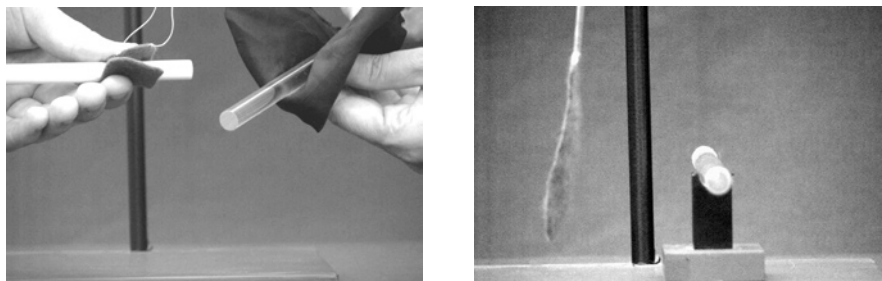


Figura 12 - Lã com carga elétrica positiva sendo repelida pelo bastão acrílico positivo.



Veja este experimento no cd-rom Eletricidade.

Repete a experiência com um pedaço de flanela pendurado e mostra que ele está com carga elétrica positiva.

– Professor, a carga elétrica do acrílico é sempre positiva?

– Nem sempre. A carga elétrica que é produzida em um corpo depende do par de materiais que está sendo atritado.

Nesse momento, o professor esfrega o bastão de acrílico no cabelo e mostra que ele se eletriza com carga elétrica negativa.

– Por que o acrílico fica com carga elétrica negativa quando é atritado com o cabelo e com carga elétrica positiva quando é atritado com a seda? Perguntou Edmundo.

– Porque o acrílico deve exercer sobre os elétrons uma atração maior do que aquela exercida pelo cabelo. Por isso, ao serem colocados em contato através do atrito parte dos elétrons do cabelo se transferem para o acrílico. Já a seda deve exercer sobre os elétrons uma atração maior do que o acrílico, dando-se a passagem de elétrons do acrílico para a seda quando existe contato entre eles, respondeu Marina.

- Correto, Marina.

O sinal toca, anunciando o recreio. Toda a turma sai em polvorosa.

André permanece na sala atritando os bastões. Aproxima o bastão de PVC eletrizado da bolinha de isopor e percebe que ela é atraída (Figura 13a). A seguir aproxima o bastão de acrílico da bolinha de isopor e verifica que ela também é atraída. Reflete alguns minutos e fala em voz alta:

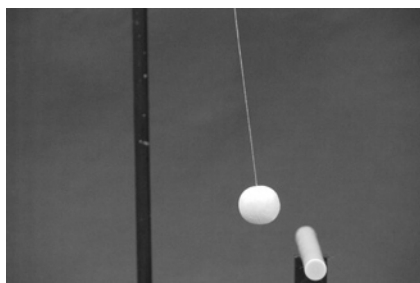


Figura 13a - Bolinha de isopor neutra sendo atraída pelo bastão de PVC negativo.

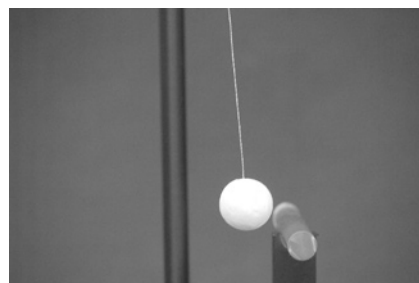


Figura 13b - Bolinha de isopor neutra sendo atraída pelo bastão de acrílico positivo.

– A bola de isopor é atraída pelo bastão de PVC eletrizado negativamente. Portanto, ela tem carga elétrica positiva. A bolinha de isopor também é atraída pelo bastão de acrílico positivo. Portanto, ela tem carga elétrica negativa. Tem alguma coisa errada!!! Um corpo não pode ter carga elétrica positiva e negativa ao mesmo tempo.

Edmundo, que ainda estava na sala arrumando seu material, ouve e responde:

- André, você está certo e errado ao mesmo tempo. A soma das cargas elétricas de um corpo (carga elétrica total) não pode ser positiva e negativa ao mesmo tempo. Mas todo corpo tem igual quantidade de cargas elétricas positivas e negativas. Para entender o que está acontecendo, é importante você conhecer dois fatos:



Veja este  
experimento no cd-rom  
Eletricidade.

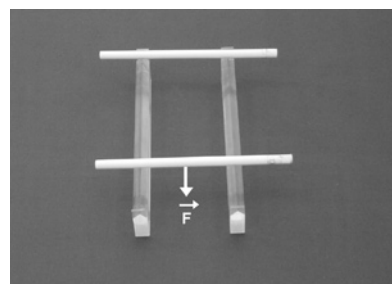
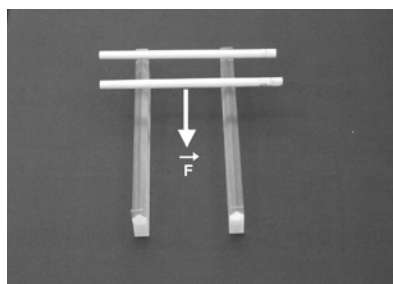


Figura14 – A força entre os bastões eletrizados diminui quando a distância entre eles aumenta.



- A força entre duas cargas elétricas diminui quando a distância aumenta, e aumenta quando a distância diminui. Isso pode ser observado facilmente analisando o comportamento de dois bastões de PVC eletrizados, quando eles são colocados sobre o trilho de acrílico e separados por distâncias diferentes. Observe, quanto mais próximos estiverem os bastões, maior é a força entre eles.

- Apesar de a bolinha de isopor ser neutra, ela deve apresentar algum tipo de eletrização, pois ela é atraída pelos dois bastões. Um bastão eletrizado, por exemplo, o bastão de PVC negativo, repele os elétrons da bolinha, criando uma concentração de cargas elétricas negativas na região da bolinha mais afastada do bastão. A região mais próxima do bastão passa a ter ausência de elétrons, ficando positiva. Conseqüentemente, apesar de ter carga elétrica total nula, as cargas elétricas positivas e negativas ficam ligeiramente separadas. Quando está na presença de cargas elétricas, a bolinha de isopor, do ponto de vista elétrico, fica diferente.

André faz cara de quem está entendendo e espera a conclusão do professor.

– Portanto, o bastão eletrizado exerce força elétrica sobre a bolinha de isopor, pois a força elétrica que o bastão exerce sobre as cargas elétricas positivas da bolinha é maior do que a força que exerce sobre as cargas elétricas negativas, porque as cargas elétricas positivas da bolinha estão mais próximas do bastão do que as negativas.

Satisfeito com as explicações, André sai para o recreio.

– Tchau, professor!

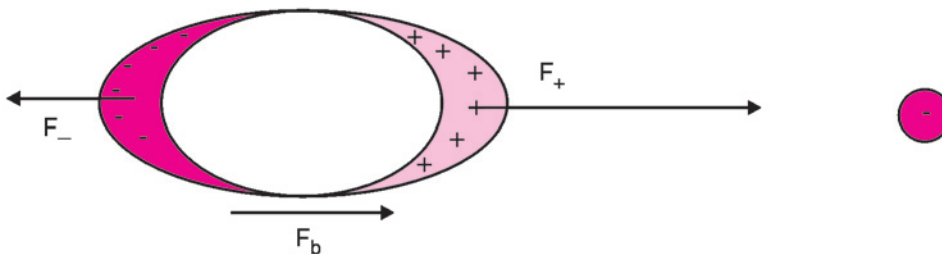


Figura 15 – O bastão eletrizado separa as cargas elétricas positivas e negativas da bolinha de isopor neutra.

.....

1. Existem dois tipos de cargas elétricas: positivas e negativas.
2. Lei de Du Fay: Cargas elétricas do mesmo tipo se repelem e cargas elétricas de tipos diferentes se atraem.
3. Princípio da conservação da carga: A carga elétrica total (soma de todas as cargas) de um sistema isolado é constante.
4. A força elétrica entre duas cargas elétricas diminui quando a distância aumenta e aumenta quando a distância diminui.

.....

## Leituras e exercícios 2

### Leituras

Leia sobre os assuntos *Eletrização - Carga elétrica, Carga elétrica positiva e carga elétrica negativa, Carga elétrica e estrutura da matéria* na seção 9.1 do Capítulo 12 do livro *Física - volume único*, de Antonio Máximo e Beatriz Alvarenga.

Desse mesmo Capítulo 9, resolva os exercícios de fixação de 1 até 4, a atividade I e questões de revisão de 1 até 2.

Não se esqueça de verificar se as suas soluções estão corretas. Em caso de dúvida, procure o tutor no pólo.

### Atividade 1

Veja os experimentos dos capítulos 1 e 2 (Cargas elétricas e Forças elétricas em corpos neutros) do cd-rom *Eletricidade*. Ele está disponível no pólo.

### Atividade 2

Descubra que tipos de cargas elétricas aparecem em um canudo de refrigerante quando ele é atritado por panos diversos.



## Isolantes e condutores

### “A descoberta dos condutores”



André ainda está impressionado com a aula de Ciências sobre cargas elétricas. Já tinha vivido uma situação parecida quando aprendeu que a matéria era feita de átomos, invisíveis a olho nu. Agora apareciam as cargas elétricas, que também eram invisíveis... Até aquele momento tinha construído o seu mundo baseado nos seus cinco sentidos. Em que acreditar, a partir de agora? Resolve procurar confirmação para a informação que seu professor deu em sala, de que os corpos ficam carregados com cargas positivas ou com cargas negativas quando se atritam. Lembra-se de ter visto um pedaço de cano de PVC perto do tanque e pedaços de flanela na despensa. Esfrega um canudo de refrigerante com um pedaço de flanela e verifica que ele está eletrizado: ele se torna capaz de atrair os pedacinhos de papel que estão sobre a sua escrivaninha. Depois eletriza o bastão de PVC com cargas negativas atritando-o com a flanela. O bastão de PVC repele o canudo! A carga elétrica do canudo é negativa! Fica feliz. Parece que existe alguma ordem naquela confusão. Os “fantasmas invisíveis” são regidos por leis! Olha em torno de si, à procura de outro material para atritar, e encontra um bastão de alumínio. Esfrega o bastão de alumínio com a flanela, mas, para sua decepção, nada acontece. Tenta eletrizar o bastão de alumínio com seda, algodão e outros panos, mas não consegue eletrizá-lo. O que está acontecendo?

Fátima entra no quarto do André procurando o seu *walkman*<sup>®</sup>.

- Por favor, me ajude, irmãzinha! Tentei eletrizar este bastão de alumínio por atrito para atrair pedacinhos de papel e não consegui nada. Como é que pode?

Fátima, após observar que o irmão está com um sapato com sola de borracha, comenta: “É simples, a maior parte das cargas elétricas produzidas no bastão de alumínio por atrito passaram para o seu corpo de tal forma que elas ficaram mais afastadas dos pedacinhos de papel, produzindo assim forças elétricas imperceptíveis sobre eles.



Veja este experimento no cd-rom Eletricidade.

Figura 16 – O bastão de alumínio conduz a carga elétrica do bastão de PVC para a folha de alumínio.

## CONDUTOR

Condutores são os materiais que permitem o deslocamento de cargas elétricas no seu interior.

– Por que isso só aconteceu com o tubo de alumínio?

Fátima convida o irmão para ir ao seu quarto. Retira do seu armário de experimentos um suporte de acrílico onde prende o bastão de alumínio. Pendura em outro suporte um fio de seda onde está preso um pedaço de papel de alumínio. Encosta uma das pontas do bastão de alumínio no papel de alumínio. Eletriza um bastão de PVC com um pedaço de flanela. Toca várias vezes a extremidade do bastão de alumínio que não está em contato com o papel de alumínio, com o bastão de PVC. André observa surpreso o papel de alumínio ser repelido pelo bastão de alumínio. Fátima explica: “O alumínio é um **condutor** metálico. Os condutores metálicos contêm alguns elétrons que se deslocam com facilidade no seu interior (elétrons livres). Os elétrons em excesso no PVC fluem através do tubo de alumínio se distribuindo entre ele e o papel de alumínio. O papel de alumínio adquire a mesma carga elétrica do tubo de alumínio, sendo repelido por ele.”

André reflete um pouco e em voz alta tenta explicar por que não conseguiu eletrizar o bastão de alumínio segurando-o com a mão? “Entendi: o meu corpo deve ser um condutor, por isso há passagem de cargas elétricas do bastão de alumínio para ele. Toca com a mão a folha e o bastão de alumínio e verifica feliz que a folha de alumínio se descarrega”.

– Perfeito!

Surgem novas dúvidas em André. “Por que as cargas elétricas do bastão de alumínio não atravessaram o suporte de acrílico e as cargas elétricas do papel de alumínio não atravessaram o fio de seda?”.

## ISOLANTES

Isolantes são os materiais que não permitem o deslocamento de cargas elétricas no seu interior.

Fátima substitui o bastão de alumínio por um bastão de acrílico e repete o experimento. O papel de alumínio não se carrega. “O acrílico e a seda são **isolantes**. Os isolantes não possuem elétrons livres, o que impede o movimento de cargas elétricas no seu interior. Por isso, a carga elétrica não pode ser transportada do bastão de PVC até o papel de alumínio, através do bastão de acrílico; as cargas elétricas do bastão de alumínio não escaparam através do suporte de acrílico e as cargas elétricas do papel de alumínio não escaparam pelo fio de seda”.

– André retira o bastão de acrílico do suporte e tenta atrair os pedacinhos de papel. Nada acontece. Reflete alguns instantes e resume: “Os isolantes não se eletrizam por contato com um corpo eletrizado nem permitem a passagem de cargas elétricas no seu interior. Provavelmente, se eu tivesse segurado o bastão de alumínio com um pano isolante quando tentei eletrizá-lo por atrito teria conseguido.”

Fátima comenta: “É claro que sim. O material isolante evitaria que a carga elétrica produzida no bastão escapasse através da sua mão para o seu corpo.”

– Por que a maior parte da carga elétrica produzida no bastão de alumínio passou para o meu corpo?

– Quando dois condutores são colocados em contato, eles se transformam em um único condutor. Em um condutor, quando as cargas elétricas em excesso entram em equilíbrio (cessam de se movimentar na massa condutora), as seguintes condições são satisfeitas:

- as cargas do mesmo tipo ficam o mais afastadas possível;
- as forças elétricas exercidas nos elétrons livres que estão no interior do condutor são nulas.

Portanto, os elétrons livres tendem a se dividir entre os dois condutores, eletrizando aquele que estava descarregado. O condutor maior retém a maior quantidade de cargas elétricas, porque nele as cargas elétricas têm um espaço maior onde se distribuir.

André reflete em voz alta: “A primeira condição é fácil de entender, porque as cargas de mesmo nome se repelem e, portanto, é razoável que elas tentem se afastar o máximo que podem.” Por que é preciso satisfazer uma segunda condição?

– Para que as cargas elétricas entrem em equilíbrio, as forças elétricas exercidas por elas no interior do condutor devem se anular, porque a existência de uma força no interior do condutor colocaria os elétrons em movimento e eles não ficariam em equilíbrio.

– Já vimos que é possível eletrizar condutores por atrito e por contato. Existe alguma outra forma de eletrizar os condutores?

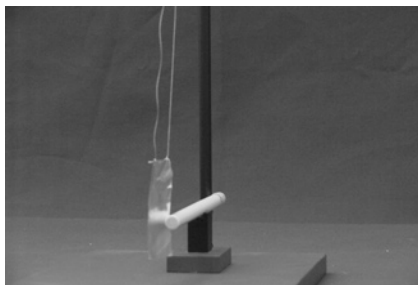


Figura 17a- Bastão de PVC eletrizado atrai o papel de alumínio.

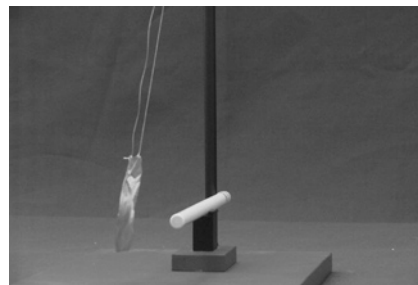


Figura 17b - O papel de alumínio se eletriza por contato e é repelido pelo bastão.



Veja este experimento no cd-rom Eletricidade.

Fátima toca o papel de alumínio pendurado no suporte com o bastão de PVC eletrizado. Ele se carrega e é repelido pelo bastão de PVC. “Observe novamente o papel de alumínio sendo carregado por contato com um corpo eletrizado. É possível carregar condutores por atrito, por contato e pelo processo de indução”.



Figura 18 - Eletrização por indução.

No processo de indução se utiliza a separação das cargas elétricas produzida em um condutor neutro por um corpo eletrizado para eletrizá-lo.

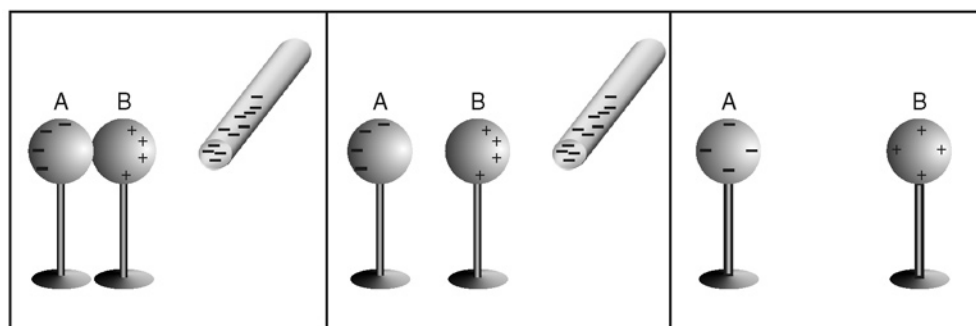


Figura 19 - Eletrização por indução.

Por exemplo, se desejarmos carregar o condutor A com carga elétrica negativa podemos encostá-lo em um condutor neutro B, transformando-os em um único condutor. Aproxima-se de B um corpo carregado com cargas negativas. As cargas negativas do corpo carregado repelem os elétrons do corpo B, produzindo o aparecimento de cargas elétricas negativas em A. Separa-se A e B mantendo o corpo carregado na sua posição. A seguir, afasta-se o corpo carregado. O condutor A fica com carga negativa e o condutor B com carga positiva.

– É possível eletrizar um isolante por indução?

Fátima olha o relógio e vê que já está atrasada para a universidade. Apanha o seu walkman® sobre a cama de André e sai rapidamente.

Apesar do cansaço físico e mental, André ainda encontra disposição para fazer outro experimento: encosta duas esferas neutras e tenta carregá-las por indução com um bastão de PVC eletrizado; o resultado é negativo.

Conclui que os isolantes não se eletrizam por contato ou por indução porque os elétrons dos isolantes não se deslocam com facilidade.

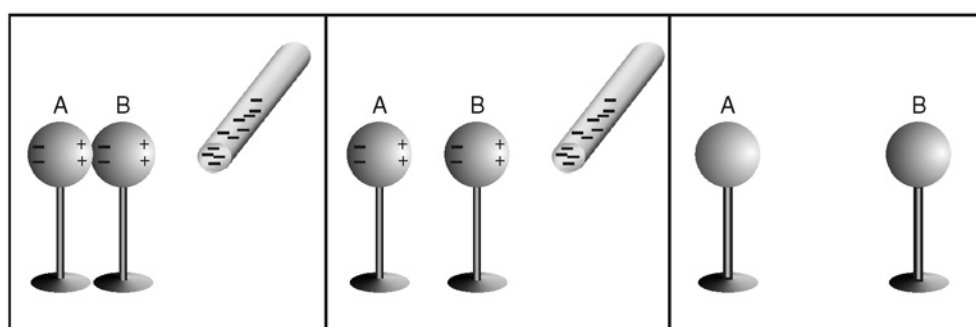


Figura 20 - As esferas isolantes não se eletrizam por indução.

.....

- **Isolantes** são materiais que se eletrizam facilmente por atrito com outro isolante. Neles as cargas elétricas têm dificuldade de se deslocar.
- **Condutores** são materiais nos quais as cargas elétricas se deslocam com facilidade. Eles podem ser eletrizados por atrito, contato e indução.

.....

## Leituras e exercícios 3

### Leituras

Leia sobre os assuntos *Condutores e isolantes*, *Por que um corpo eletrizado atrai um corpo neutro?*, *Eletroscópios*, *Medida de carga elétrica*, na seção 9.1 do Capítulo 9 do livro de Antonio Máximo e Beatriz Alvarenga, *Física - volume único*.

Desse mesmo Capítulo 9, resolva os exercícios de fixação do número 5 até 15.

### Atividade 3

Veja os experimentos do Capítulo 3 (Isolantes e condutores) do cd-rom Eletricidade. Ele está disponível no pólo.

### Atividade 4

Numa lâmpada incandescente, identifique seus componentes isolantes e condutores. Caso seja necessário, solicite a alguém com a devida competência para quebrar uma lâmpada queimada. Isso permitirá que você a observe detalhadamente.

## Forças elétricas



### A Lei de Coulomb

#### “Saudades do professor Edmundo”

Ronaldo está esperando a aula de Física. E está preocupado: o vestibular está próximo e ele ainda tem muitas dúvidas. Vai começar hoje o estudo da eletricidade. Lembra dos conceitos de cargas elétricas, forças elétricas e campos elétricos que aprendeu na oitava série. Que conceitos abstratos! Certamente teria dificuldades nessa disciplina do ensino médio, até porque sua escola não tem laboratório de Física. O professor está colocando no quadro uma grande quantidade de problemas e não tem tempo nem boa vontade para discutir os conceitos com a turma.

As aulas de Física em Ciências, na oitava série, tinham sido muito mais interessantes. O professor Edmundo tinha uma coleção de pequenos experimentos que ajudavam muito na compreensão dos fenômenos físicos. Ronaldo lembrava-se da aula em que o professor levou muitos bastões, panos, bolinhas de isopor e outras coisas para introduzir o conceito de cargas elétricas, da aula em que o professor apresentou o conceito de campo elétrico passando uns vídeos com fadas e fantasmas e discutindo as forças de contato e de ação a distância.

A presença do professor de Física na sala de aula tira Ronaldo de suas recordações.

A matéria de eletricidade ensinada na oitava série é revista em dez minutos, sem nenhuma demonstração experimental. Cargas elétricas, forças elétricas, isolantes e condutores são lembrados como velhos conhecidos. A descrição da balança de torção utilizada pelo físico C. Coulomb para estudar a interação entre cargas elétricas é apresentada rapidamente.

O professor enuncia a **Lei de Coulomb**: “As forças elétricas entre duas cargas elétricas pontuais  $q$  e  $q_0$  são diretamente proporcionais ao produto das cargas elétricas, inversamente proporcionais ao quadrado da distância entre elas e têm a direção da reta que as une. As forças entre cargas elétricas do mesmo tipo são repulsivas e as de tipos diferentes são atrativas”.



Ler  
complemento  
sobre a História da  
eletricidade.

#### LEI DE COULOMB

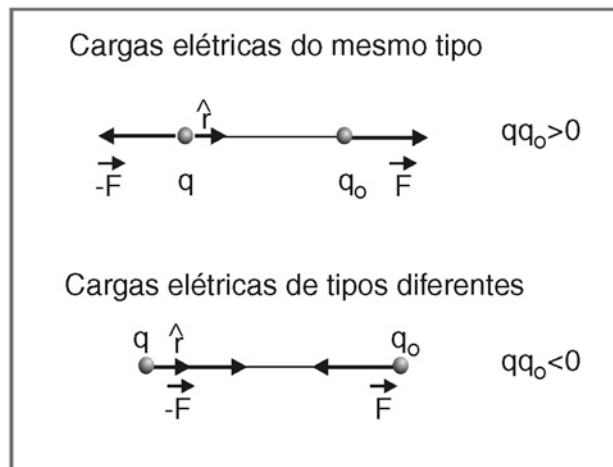


Figura 21- Forças elétricas entre cargas elétricas pontuais.

Lei de Coulomb  
Forças entre cargas  
pontuais.

O módulo da força elétrica é

$$F_c = k \frac{|qq_c|}{r^2}.$$

A expressão vetorial da força elétrica é

$$\vec{F}_c = k \frac{|qq_c|}{r^2} \hat{r}.$$

A constante  $k$  depende do sistema de unidades e do meio onde se encontram as cargas elétricas. No vácuo e no sistema MKSA (sistema cujas unidades fundamentais são o metro, o quilograma, o segundo, o Ampere) ela vale  $9,0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$ .  $r$  é a distância entre as cargas e  $\hat{r}$  é o vetor unitário na direção da reta que une as duas cargas e que aponta para a carga elétrica  $q_0$ .

O professor enuncia o **princípio da superposição** para as forças: “A força elétrica entre duas cargas elétricas pontuais não é alterada pela presença de outras cargas elétricas pontuais”, e ressalta que esse princípio é experimental.

Ronaldo já não consegue acompanhar o que o professor está fazendo. Percebe que a expressão matemática da Lei de Coulomb é muito parecida com a da Lei de Gravitação Universal, de Newton. A diferença está apenas na troca de massas por cargas e no valor da constante  $k$ . Sabe que a força gravitacional é sempre atrativa e que a força entre as cargas elétricas pode ser de repulsão e de atração. Não consegue perceber as duas possibilidades na expressão escrita pelo professor. Deve ser a sua constante dificuldade com os vetores que está atrapalhando. Fica curioso a respeito da Balança de Coulomb. Não tem certeza sobre o conceito de carga elétrica pontual. Não entende o princípio da superposição. Copia sem entender o que está sendo escrito no quadro. Saudades do professor Edmundo! Naquela noite, vai ter que pedir ajuda à Fátima.

PRINCÍPIO DA  
SUPERPOSIÇÃO PARA  
FORÇAS ELÉTRICAS.

A Lei da Gravitação  
Universal está na Aula 6  
do Módulo3.

Já em casa, Ronaldo fica ansioso até escutar a voz de Fátima. Pega o papel em que anotou as suas dúvidas e corre para o quarto da irmã, para mostrar a ela as suas dúvidas.

Ao ver as questões, Fátima não fala nada. Amarra um haltere formado por um canudo e duas bolinhas de isopor em um fio de *nylon* e torce o fio, aplicando uma força em sua extremidade.

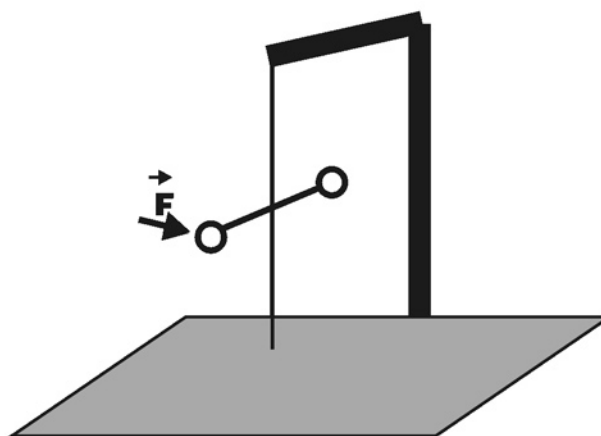


Figura 22 - Aplicando uma força no halteres.

Então ela solta o haltere e observa sua oscilação. O fio de *nylon* só permanece torcido quando uma força é aplicada sobre ele. O ângulo de torção do fio é medido pelo deslocamento do haltere em relação à sua posição original. Ela começa a explicar.

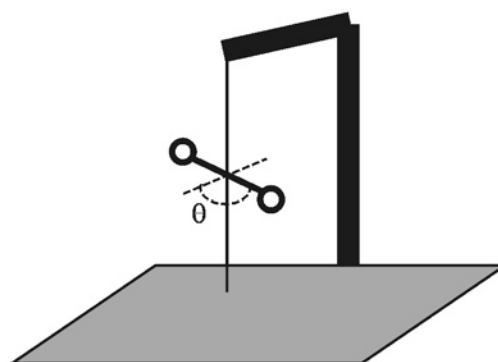
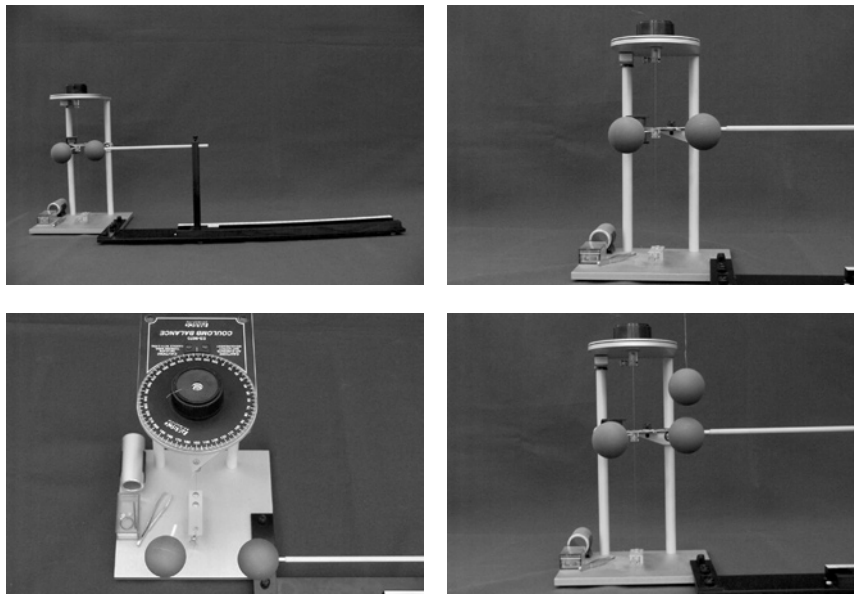


Figura 23 - Ângulo de torção.

– O ângulo de torção aumenta quando a força aplicada aumenta. O conhecimento das propriedades elásticas do fio e da medida desse ângulo permitem obter o valor do módulo da força aplicada. Esse é o princípio de funcionamento da balança de torção utilizada por Coulomb. Fátima mostra ao irmão algumas fotos, que estão a seguir.





Figuras 24 - Balança de torção Coulomb.

Fátima continua a explicar:

– A balança de Coulomb foi construída para estudar a dependência da força elétrica com as cargas e com a distância entre elas. Ela contém três bolinhas condutoras. A primeira bolinha está ligada em um fio vertical, a segunda está ligada em uma haste que pode se deslocar sobre um trilho, e a terceira que é livre, é utilizada para variar a carga elétrica das outras bolinhas. Existe também um transferidor, que serve para medir o ângulo de torção do fio.

Ronaldo pergunta:

– Qual deve ser o procedimento experimental para chegar à Lei de Coulomb?

– Inicialmente, as duas bolinhas devem receber cargas elétricas. Para exemplificar, vamos supor que as cargas das bolinhas são do mesmo tipo. Elas se repelem. O fio é torcido. Com o transferidor, o fio é destorcido e lê-se diretamente na escala o valor da força. Esse procedimento pode ser repetido para várias distâncias. Uma análise dos resultados experimentais mostra que um modelo razoável para a força elétrica entre cargas elétricas pontuais é aquele que supõe que a força é proporcional ao inverso do quadrado da distância entre as cargas.

– Como isso pode ser representado em uma fórmula?

Fátima escreve a fórmula em um papel e explica que  $C$  é uma constante

$$F = C \frac{1}{r^2}$$

Ronaldo continua olhando para as fotos da balança de Coulomb, e acha que as esferas não parecem pontos. Pergunta à irmã:

– Não estou vendo nenhuma esfera pontual nessas fotos. De que você está falando?

– Em um condutor, os elétrons se movimentam com facilidade. Isso faz com que a distribuição de cargas elétricas nas duas esferas condutoras dependa da distância entre elas. As forças elétricas entre as bolinhas também dependem da distribuição de cargas. Isso significa que um modelo mais rigoroso da interação entre as esferas da balança de Coulomb tem que levar em consideração a dependência da força elétrica com a distribuição de cargas nas bolinhas.



Figura 25 - Distribuição de cargas nas esferas.

Fátima segue explicando; mostra um gráfico que trouxe da universidade e que relaciona a força elétrica com o inverso do quadrado da distância entre os centros das esferas.

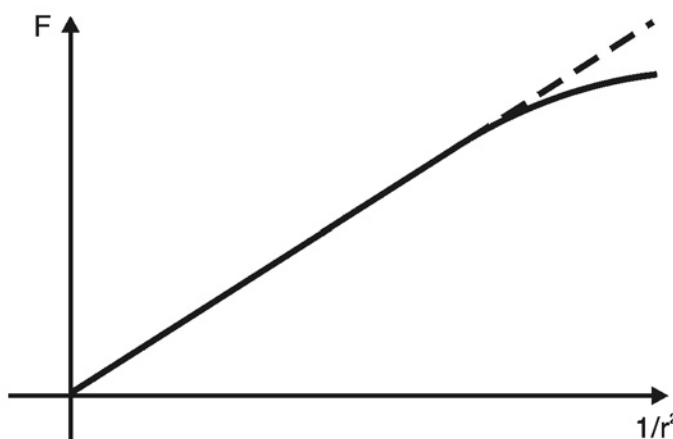


Figura 26 - Gráfico que relaciona a força com o inverso do quadrado da distância entre as esferas.

Ela segue comentando o gráfico:

– Observe que, quando as esferas estão próximas, a variação da força com a distância não é proporcional ao inverso do quadrado da distância entre elas. O cálculo é mais complicado. À medida que a distância aumenta, a proporcionalidade se faz presente.

Olhando para um gráfico desse tipo, um cientista pode extrapolar os resultados experimentais e imaginar que a proporcionalidade deve ocorrer sempre que a distância entre as esferas for muito maior do que as suas dimensões. Quando as esferas são pontos, a distância entre elas é sempre muito maior do que as suas dimensões, e a extrapolação da proporcionalidade é sempre verdadeira. Nesse caso, as cargas elétricas estariam concentradas em pontos: isto é, seriam pontuais.

- Quer dizer que a carga elétrica pontual não existe?
- Isso mesmo. A carga pontual é um modelo matemático que é utilizado nas condições que acabei de descrever: distâncias grandes, dimensões pequenas.
- Como posso obter a dependência da força elétrica com a carga elétrica?

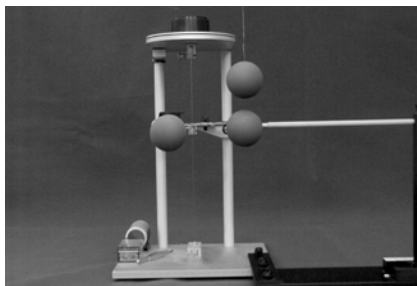


Figura 27- Variando a carga elétrica da segunda bolinha.

– Mantenha fixa a distância entre as bolinhas e varie a carga elétrica da segunda bolinha, que é modificada com a ajuda da terceira bolinha. A terceira bolinha é encostada na segunda bolinha. A segunda bolinha tem carga elétrica  $q$ . As duas bolinhas são condutoras e absolutamente iguais. Nesse caso, a carga elétrica que estava na segunda bolinha se divide igualmente entre ela e a terceira bolinha. A segunda bolinha fica com carga elétrica  $q/2$ . Mede-se a força entre elas. A terceira bolinha é descarregada. Ao repetir esse processo várias vezes, é possível medir as forças para cargas elétricas  $q/2$ ,  $q/4$ ... A carga da primeira bolinha pode ser variada da mesma forma. A análise dos resultados experimentais indica que o módulo da força elétrica é proporcional ao produto das cargas elétricas.

– De que adianta esse modelo nos casos em que as dimensões dos objetos carregados são grandes?

– O princípio da superposição resolve esse problema. Veja só o desenho destas três cargas pontuais,  $q_0$ ,  $q_1$  e  $q_2$ .

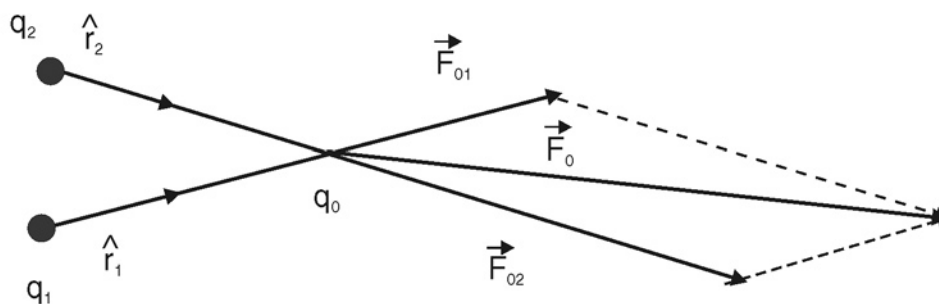


Figura 28 – Diagrama de forças.

E começa a explicar o diagrama:

– A força,  $\vec{F}_{c1}$  exercida por  $q_1$  em  $q_0$ , é a mesma força que existiria no caso em que as duas cargas elétricas estivessem sozinhas, quer dizer, ela é calculada pela Lei de Coulomb. O mesmo acontece com a força entre as cargas elétricas  $q_2$  e  $q_0$ . A força resultante em  $q_0$  é  $\vec{F}_c = \vec{F}_{c1} + \vec{F}_{c2}$ . Esse resultado é válido para um número qualquer de cargas elétricas.

– Entendi. Podemos calcular as forças entre dois objetos carregados dividindo a distribuição de cargas de cada um deles em cargas pontuais e somando todas as forças entre os pares de cargas!

Fátima está cansada. Teve um dia duro na universidade. Lembra-se das suas aulas de Instrumentação para o Ensino da Física. Quantas vezes tinham enfatizado a importância das discussões em sala de aula e da necessidade de se utilizar os diversos materiais didáticos (vídeos, programas etc.). A escola e o professor do irmão não estavam fazendo um bom trabalho em Física. “Irmãozinho, podemos deixar a última pergunta para amanhã? Estou cansada”.

– Por favor, é só mais uma dúvida... você esquece que eu sou vestibulando?

– Tudo bem, vamos lá.

– Eu sei que as cargas elétricas de mesmo tipo se repelem e cargas elétricas de tipos diferentes se atraem. Mas não consigo perceber essas duas possibilidades na expressão que o meu professor escreveu para a Lei de Coulomb.

$$\vec{F}_c = k \cdot \frac{qq_c}{r^2} \hat{r}$$

– A Lei de Coulomb foi escrita como a multiplicação de um vetor por um número real. Espere aí. Vai ao quarto e apanha no armário três metros de pedreiro. Os metros contêm em uma das extremidades uma seta de papelão. Coloca os três metros completamente dobrados sobre a mesa.

A utilização do metro de pedreiro para representar vetores foi apresentada nas Aulas 1 e 2 do Módulo 3.



Figura 29a – Metros de pedreiro e a representação de vetores.

– Imagine que este primeiro metro representa um vetor  $\vec{A}$ . Multiplicar o vetor  $\vec{A}$  por 2 significa dobrar o seu tamanho mantendo sua direção original e seu sentido. Você sabe como representar o vetor  $2\vec{A}$  utilizando o segundo metro?

Ronaldo começa a se animar: “Estou lembrando agora como se opera com vetores!” Coloca o segundo metro paralelo ao primeiro, dobra seu comprimento e mantém o mesmo sentido do primeiro.

– Represente agora o vetor  $-2\vec{A}$ .

Ele faz com o terceiro metro um vetor com o mesmo tamanho do segundo, mas com sentido contrário.

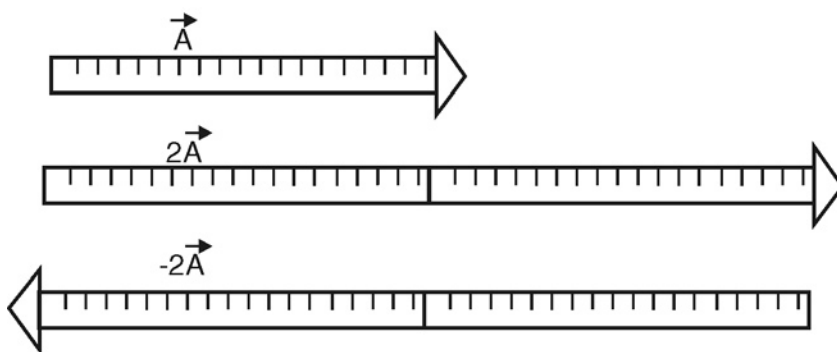


Figura 29b – Metros de pedreiro e a representação de vetores.

Isso eu sei: multiplicar um vetor por um número negativo é multiplicar o seu tamanho pelo módulo do número, mantendo a direção e invertendo o sentido. Espera aí! Os vetores são representados por uma letra com uma seta. Não estou vendo nenhum vetor na expressão que o meu professor escreveu...

– Os vetores que têm comprimento unitário são representados por uma letra com um acento circunflexo. O seu professor representou a força elétrica utilizando o vetor unitário  $\hat{r}$ . Ele tem a direção da reta que une as cargas elétricas, módulo unitário e aponta para a carga elétrica  $q_0$  (ver Figura 28).

Ronaldo olha novamente para a expressão da força elétrica. Agora consegue ver uma força repulsiva quando as cargas são do mesmo tipo (as duas positivas ou as duas negativas). Nesse caso, o número real  $k\frac{q_1q_2}{r^2}$  é positivo e  $\vec{F}_c$  tem a mesma direção e o mesmo sentido de  $\hat{r}$ . A força é atrativa quando as cargas são de tipos diferentes (uma positiva e outra negativa). Nesse caso, o número real é negativo e o sentido de  $\vec{F}_c$  é contrário ao sentido de  $\hat{r}$ . O módulo da força elétrica é o mesmo nos dois casos:  $F_c = k\frac{|q_1q_2|}{r^2}$ . Pede à irmã um exemplo sobre a Lei de Coulomb e o princípio da superposição.

Fátima pega, no seu fichário, um exemplo. Passa para o irmão.

**Exemplo1**

Um sistema é formado por duas cargas elétricas positivas iguais  $q$  separadas por uma distância  $d$ . Calcule a força elétrica exercida por esse sistema em uma carga elétrica  $Q$  colocada sobre a linha perpendicular à reta que une as duas cargas e passa pelo ponto médio  $O$  (veja a figura).

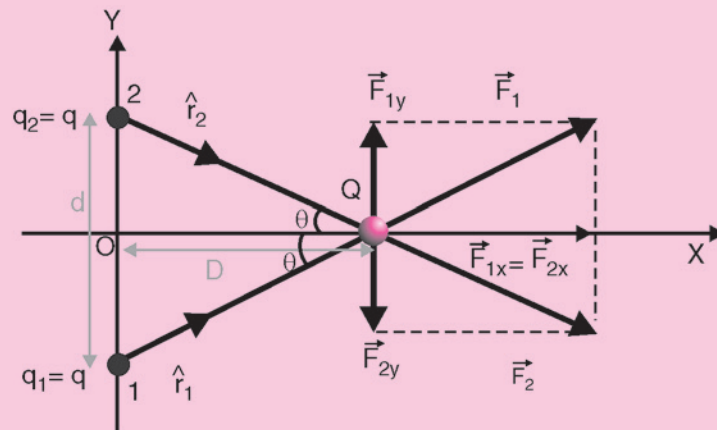


Figura 30 - Força elétrica resultante sobre a carga  $Q$ .

A força que atua em  $Q$  é

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2.$$

Como vale o princípio da superposição, a força entre  $q_1$  e  $Q$  não é alterada pela presença de  $Q_2$ . O mesmo vale para a força entre  $q_2$  e  $Q$ .

$$\vec{F}_1 = k \frac{qQ}{\left(\left(\frac{d}{2}\right)^2 + D^2\right)} \hat{r}_1 \quad \text{e} \quad \vec{F}_2 = k \frac{qQ}{\left(\left(\frac{d}{2}\right)^2 + D^2\right)} \hat{r}_2$$

Como os ângulos entre as direções das forças  $\vec{F}_1$  e  $\vec{F}_2$  e a reta  $OQ$  são iguais, temos que  $\vec{F}_{1y} + \vec{F}_{2y} = \vec{0}$ . Portanto a força resultante  $\vec{F}$  não tem componente vertical, isso é,

$$\vec{F} = \vec{F}_{1x} + \vec{F}_{2x}.$$

O módulo da força resultante é

$$F = 2F_1 \cos(\theta) = 2k \frac{qQ}{\left(\left(\frac{d}{2}\right)^2 + D^2\right)} \frac{D}{\left(\left(\frac{d}{2}\right)^2 + D^2\right)^{\frac{1}{2}}} = 2k \frac{qQD}{\left(\left(\frac{d}{2}\right)^2 + D^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

O vetor força resultante é  $\vec{F} = 2k \frac{qQD}{\left(\left(\frac{d}{2}\right)^2 + D^2\right)^{\frac{3}{2}}} \hat{i}.$

O vetor  $\hat{i}$  é o vetor unitário no eixo  $OX$ .

O rosto de Ronaldo se desanuvia:

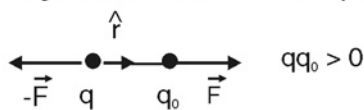
- Eu sabia que você ia me tirar essas dúvidas! Dá um beijo agradecido na irmã e volta rápido para o seu quarto. Sabe que precisa se distrair urgentemente. Liga para sua namorada.

.....

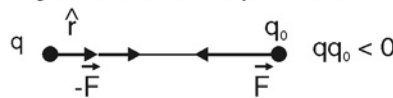
## 1. A LEI DE COULOMB

“As forças elétricas entre duas cargas elétricas pontuais  $q$  e  $q_0$  são diretamente proporcionais ao produto das cargas elétricas, inversamente proporcionais ao quadrado da distância entre elas e têm a direção da reta que as une. As forças entre cargas elétricas do mesmo tipo são repulsivas e as de tipos diferentes são atrativas.”

Cargas elétricas do mesmo tipo



Cargas elétricas de tipos diferentes



$$\vec{F}_C = k \frac{qq_0}{r^2} \hat{r}$$

## 2. O PRINCÍPIO DA SUPERPOSIÇÃO

“A força elétrica entre duas cargas elétricas pontuais não é alterada pela presença de outras cargas elétricas pontuais.”

$$\vec{F}_C = k \frac{q_C q_1}{r_{C1}^2} \hat{r}_{C1} + k \frac{q_C q_2}{r_{C2}^2} \hat{r}_{C2} + \dots + k \frac{q_C q_N}{r_{CN}^2} \hat{r}_{CN} = \sum_{i=1}^N k \frac{q_C q_i}{r_{Ci}^2} \hat{r}_{Ci}$$

.....

## Leituras e exercícios 4

## Leituras

Leia sobre os assuntos *Medida de carga elétrica e Lei de Coulomb* na seção 9.1, do Capítulo 9 do livro de Antonio Máximo e Beatriz Alvarenga, *Física - volume único*.

Desse mesmo Capítulo 9, resolva os exercícios de fixação do número 11 até 15 e a questão de revisão 6.

## Exercício 2

Estime a aceleração que teria um próton do átomo de hélio se a única força que atuasse sobre ele fosse a força elétrica exercida pelo outro próton. A distância média entre os prótons é da ordem de  $10^{-15}\text{m}$ . A carga e a massa do próton são respectivamente iguais a  $1,6 \times 10^{-19}\text{C}$  e  $1,67 \times 10^{-31}\text{kg}$ . Que outra força garante a estabilidade do átomo de hélio?

## Exercício 3

Um dipolo elétrico é um sistema formado por uma carga elétrica positiva  $q$  e por uma carga elétrica negativa  $-q$  separadas por uma distância  $d$ . Calcule a força elétrica exercida pelo dipolo elétrico em uma carga elétrica  $Q$ :

- colocada sobre o seu eixo do dipolo a uma distância  $D$  do seu centro (Figura 31a);
- colocada sobre a reta perpendicular ao eixo do dipolo a uma distância  $d$  do seu centro (Figura 31b);

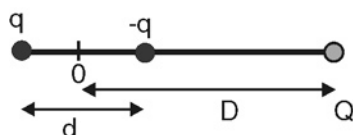


Figura 31a

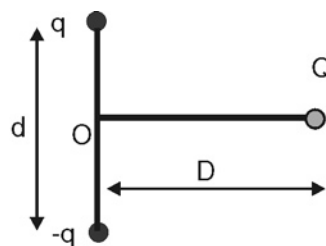


Figura 31b



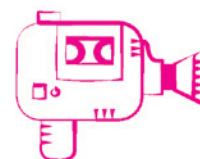
As propriedades de um dipolo elétrico são importantes porque vários sistemas neutros se comportam a longas distâncias como dipolos elétricos. Esse é o caso das moléculas polares.

#### Atividade 5

Refaça o questionário 1 **O que sei sobre a interação eletrostática?**

#### Atividade 6

Assista o vídeo Blindagem eletrostática.



Nesta aula, aprendemos os conceitos de cargas elétricas, isolantes e condutores e forças elétricas. Foi apresentada a interação entre as cargas elétricas como uma ação a distância descrita pela Lei de Coulomb e o Princípio da Superposição.



## Campo elétrico

### Objetivos

Introduzir o conceito de campo elétrico na descrição da interação elétrica.

### Introdução

Esta aula tem como finalidade discutir o conceito de campo elétrico e é constituída de três partes:

Que sei sobre campo elétrico? é um questionário que organiza seus conhecimentos prévios sobre o campo elétrico.

**Campo elétrico** contém um texto e atividades. O texto discute o conceito de campo elétrico e suas propriedades.

Nas **Leituras e exercícios** há indicações de leituras e exercícios. As leituras são sobre os assuntos abordados; os textos estão nos livros *Física - Volume único*, de Beatriz Alvarenga e Antonio Máximo, e *Física 3 (Eletromagnetismo)*, do GREF.

Faça a leitura de forma sistemática, realizando as atividades (exercícios e leituras extras) sugeridas ao longo do texto. Use seu caderno para anotações e comentários, e para registrar a resolução das atividades.

Não deixe de refazer nenhum dos exemplos sugeridos, nem os exercícios.

Bom trabalho!

## Que sei sobre campo elétrico?

As questões apresentadas abaixo têm como finalidade investigar e organizar as idéias que você já tem sobre campo elétrico. Escreva as respostas em seu caderno, de forma organizada. Não consulte livros nem notas de aulas, mas não deixe de responder às questões.

A comparação entre suas idéias e conhecimentos sobre o campo elétrico antes e depois de trabalhar esta unidade é importante para o seu aprendizado.



## Questionário 2

1. A introdução do conceito de *campo elétrico* privilegia uma visão de *ação a distância* ou de *contato*? Por quê?
2. O que são *linhas de campo elétrico*? Como podemos utilizá-las para ter uma idéia quantitativa do campo elétrico?
3. Existe alguma analogia entre as *linhas de campo elétrico* e as *linhas que vemos em um rio* quando existe uma correnteza?
4. Qual a definição do *campo elétrico de uma carga elétrica pontual*? Descreva as *principais características do campo elétrico* de uma *carga elétrica positiva* e o de uma *carga elétrica negativa*.
5. Enuncie o *princípio da superposição* para os *campos elétricos*. Esse princípio tem natureza teórica ou experimental?
6. O que deve ser feito para calcular o *campo elétrico de uma distribuição qualquer de cargas elétricas*? Dê exemplos.
7. Quais as principais propriedades do *campo elétrico na superfície de um condutor em equilíbrio eletrostático*?
8. Qual a lei que fornece a *força exercida* por um *campo elétrico em uma carga elétrica pontual*?
9. Quais as principais propriedades do *campo elétrico no interior de um condutor em equilíbrio eletrostático*?
10. Você sabe como produzir um *campo elétrico constante*?

## Campo elétrico

### “Uma varinha mágica”



Ana está no seu quarto, vendo o filme *Bela Adormecida*, de Walt Disney. Neste momento passa exatamente sua parte preferida: com suas varinhas mágicas, as fadas-madrinhas da princesa estão atraindo e dando vida aos objetos inanimados. Os ovos caminham sozinhos para a panela do bolo.

Exatamente quando Paula grita: “O jantar está servido!!!”

Contrariada, Ana vai para a sala de jantar penteando os cabelos. Ao sentar-se, começa a dar ordens ao seu pente para que ele faça os alimentos caminharem felizes para o seu prato.

Todos riem.

– Querida, só em filmes os alimentos caminham. Na vida real isso não é possível.

Ana contra-argumenta: “outro dia este meu pente parecia uma varinha mágica. Ele mandava os meus cabelos se arrepiarem sem tocar neles”.

André, com grande autoridade, explica: “Que pente mágico que nada. Quem atraiu os seus cabelos foram as cargas elétricas que o atrito produziu no pente.”

– Isso é só outro nome para o meu pente mágico. Essas suas cargas elétricas também são mágicas, se elas também podem fazer os meus cabelos se mexerem sem tocá-los”. Mas quando percebe que sua mãe fez o seu prato preferido, Ana começa a comer e esquece a discussão.

Após alguns momentos de reflexão, André comenta: “Não é que ela tem razão?! Como é possível um corpo exercer força sobre outros corpos sem tocar neles?”

Fátima entra na história para concordar com o irmão: “É muito difícil aceitar que um corpo possa puxar ou empurrar outro corpo sem tocá-lo, mas isso acontece: a Terra atrai os corpos mesmo quando eles não estão em contato com ela, como uma pessoa que pula do trampolim e cai na piscina.”



Ler  
complemento sobre a  
História da eletricidade.

Empolgada com seus conhecimentos, Fátima esbanja: “Os corpos eletrizados atraem e repelem outros corpos mesmo sem tocá-los. Os ímãs também conseguem puxar objetos sem tocar neles. Newton criou a Teoria da Gravitação Universal para estudar a força gravitacional. Ele descreveu a força gravitacional como uma força a distância. Outro cientista, Coulomb, descobriu a lei que descreve a força entre cargas elétricas. De acordo com essa teoria, a força elétrica também é descrita como uma força a distância. Todavia, ninguém aceita com facilidade a idéia de forças a distância, porque não é isso que observamos na maioria dos casos do nosso cotidiano. Forças a distância parecem mágica.”

André continua confuso, e Ronaldo se interessa pela conversa.

O interfone toca. Chegou o pai do amigo de André, que vai levá-los para participar de um campeonato de basquete. Ele pede desculpas e sai rápido, para não perder a carona.

No dia seguinte, Ronaldo é surpreendido pela informação de que o professor de Física está doente. Quem está na sala é o professor substituto, que pergunta aos estudantes se é possível puxar ou empurrar um corpo sem tocá-lo.

Risada geral. “Só mágicos fazem isso!”

Ronaldo lembra da discussão da noite anterior, discorda dos colegas e dá exemplos: “a Terra puxa os corpos sem tocá-los. O bastão eletrizado negativamente empurra o outro bastão negativo sem tocá-lo. Os ímãs puxam e empurram outros ímãs sem tocar neles. Nem a Terra nem o bastão são mágicos. Mágica é alguma coisa que não ocorre no nosso cotidiano”.

Silêncio geral. Apesar de ficar surpreso com o nível de reflexão do Ronaldo, o novo professor continua:

– Na nossa infância, apenas os mágicos e os fantasmas conseguiam mover objetos sem tocar. Por essa razão é difícil aceitar que isso aconteça na natureza. Um físico chamado Faraday certamente não gostava da idéia de ação a distância, e apresentou outro modelo para explicar essas forças, porque não se deixou enganar pelos seus sentidos. Imaginou que as cargas elétricas e os ímãs deviam criar, na sua vizinhança, uma espécie de ‘fantasma’, invisível, inodoro e imperceptível ao seu tato. Os puxões e empurrões sobre objetos, outras cargas elétricas e outros ímãs seriam da responsabilidade desse ‘fantasma’. Para isso, o ‘fantasma’ deve ocupar todo o espaço: só assim ele poderia estar sempre em contato com outras cargas e outros ímãs.



Ler  
complemento sobre a  
História da eletricidade.

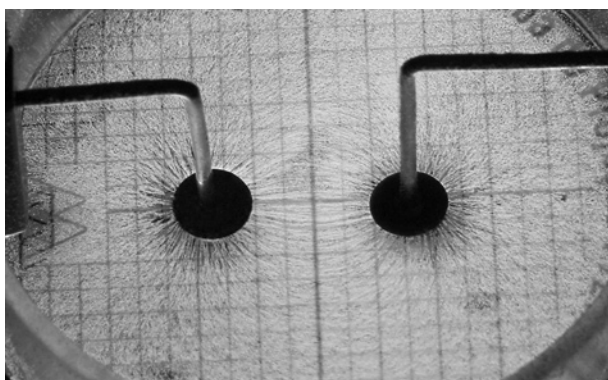


Figura 32a - Terminais circulares com cargas  $q$  e  $-q$  imersos em óleo coberto com fubá.

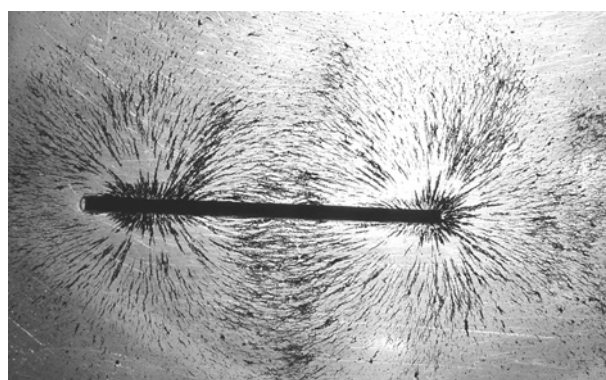


Figura 32b - Limalha de ferro espalhada sobre uma placa de acrílico colocada sobre um ímã.

O professor dá as soluções: “Para visualizar o ‘fantasma elétrico’, imergimos as cargas elétricas em óleo e jogamos fubá sobre ele (Figuras 32a); para visualizar o ‘fantasma magnético’, é só jogar limalha de ferro na vizinhança dos ímãs (veja a Figura 32b). Faraday chamou as linhas observadas **de linhas de força elétrica e linhas de força magnética**. Para ele, essas linhas tinham as propriedades de elásticos reais.

LINHAS DE FORÇA

– Vamos com calma, professor, não estou entendendo nada!

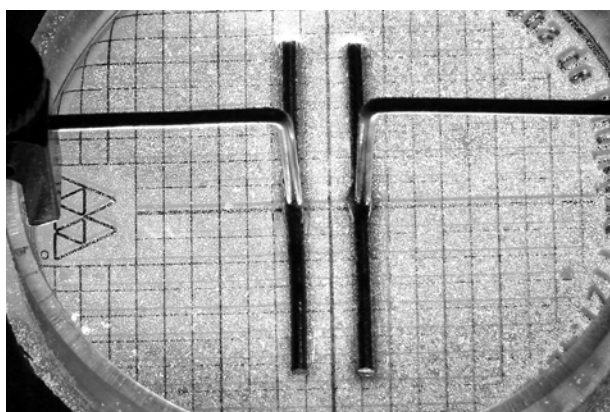


Figura 33a - Terminais lineares descarregados imersos em óleo coberto com fubá.

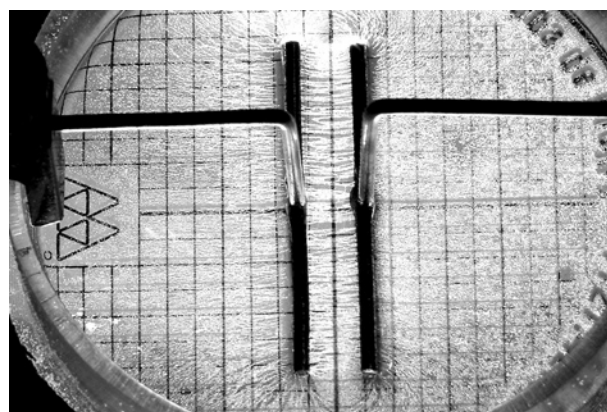


Figura 33b - Terminais lineares com cargas  $q$  e  $-q$  imersos em óleo coberto com fubá.

O professor mostra para turma essas duas imagens. “O fubá se organiza sobre as linhas de força quando é colocado sobre um óleo viscoso. A força viscosa que o óleo exerce sobre o fubá evita que ele seja completamente arrastado na direção das cargas elétricas. Na Figura 33a temos uma camada de óleo coberta por fubá e dois terminais metálicos lineares paralelos e descarregados. O fubá está igualmente distribuído na superfície do óleo. Na Figura 33b, temos uma camada de fubá e dois terminais metálicos lineares carregados. O terminal da direita está com carga elétrica positiva e o da esquerda, com carga elétrica negativa. As distribuições do fubá nas duas imagens são diferentes. Na Figura 33b existem linhas paralelas entre os terminais, linhas curvas nas extremidades dos terminais e nenhuma linha atrás dos terminais.

## CAMPO ELÉTRICO

Para Faraday, as linhas que vocês estão vendo eram elásticos que atuavam nas cargas elétricas. Os terminais positivo e negativo se atraem porque são puxados pelos elásticos. Os terminais não se aproximam porque estão presos na cuba que contém o óleo. A interação entre as linhas e os terminais é de contato. Hoje em dia não se fala mais sobre elásticos e sim em campo elétrico. O **campo elétrico** é um conjunto de vetores responsáveis pelas forças elétricas. Eles são criados pelas cargas elétricas em todo o espaço. São os vetores do campo elétrico que estão em contato com os terminais que exercem forças sobre eles. E continua:

Os vetores do campo elétrico são sempre tangentes às linhas de força, e são mais intensos onde existe uma concentração maior de linhas de força. Os módulos desses vetores são proporcionais ao número de linhas de força por unidade de área perpendicular a elas. Na nossa figura, na região central, entre os terminais, a concentração de linhas de força é aproximadamente constante e as linhas são perpendiculares aos terminais. Isso significa que nessa região os vetores do campo elétrico são praticamente constantes e perpendiculares aos terminais. As linhas curvas nas extremidades dos terminais indicam que os vetores do campo elétrico são variáveis. A inexistência de linhas atrás dos terminais está associada a vetores do campo elétrico muito fracos ou nulos.

“Essas idéias foram estendidas à força gravitacional. Dizemos que as massas criam um campo gravitacional; são os vetores do campo gravitacional que, em contato com outras massas, exercem forças sobre elas”.

A turma está atônita:

– Professor, você não acha que o Faraday trocou o modelo que utiliza o conceito de ação a distância por outro tão difícil de aceitar quanto esse?

– É difícil aceitar as idéias dos dois modelos. A opção por um modelo em Física está na simplicidade dos seus conceitos e na facilidade com que se explicam os fenômenos associados a eles. A dificuldade de explicar a interação das cargas elétricas em repouso é equivalente nos dois modelos. A diferença entre eles aparece quando se deseja estudar sistemas que têm cargas elétricas ou/e ímãs em movimento. Foi graças às idéias do Faraday que se descobriram os princípios que permitem que você escute o seu walkman®, veja a sua televisão etc. Hoje em dia, a maioria dos físicos aceita a idéia de campo elétrico sem muita dificuldade.

– Quer dizer que tudo que aprendemos sobre forças elétricas na aula passada está errado?

– De maneira nenhuma. Uma teoria não pode ser incompatível com os resultados experimentais. Apenas os modelos matemáticos vão ser diferentes. É preciso definir o campo elétrico de tal forma que os resultados experimentais sejam respeitados. Quer dizer: a força que os vetores do campo elétrico exercem sobre as cargas elétricas tem que respeitar a Lei de Coulomb e o princípio da superposição.

A turma se inquieta. Esse professor substituto, apesar de discutir o assunto sem dificuldades, está falando de coisas muito complicadas. Ele percebe a movimentação dos alunos.



– Calma, meninos, não é tão difícil quanto parece. Vamos definir inicialmente o vetor campo elétrico criado por uma carga elétrica pontual  $q$ .

O professor desenha no quadro a carga elétrica  $q$ . Escolhe um ponto P qualquer do espaço para calcular o vetor campo elétrico. Localiza a carga elétrica  $q_0$  (denominada carga de prova) no ponto P. Desenha a força de interação entre as cargas elétricas, supondo inicialmente que a carga elétrica de prova é positiva.

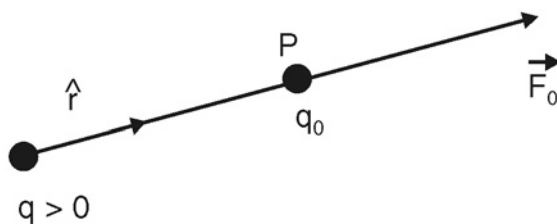


Figura 34 - Força sobre a carga de prova  $q_0$ .

Depois escreve no quadro a expressão da força elétrica.

$$\vec{F}_c = k \frac{qq_c}{r^2} \hat{r}$$

– Temos que definir o vetor do campo elétrico criado por  $q$  a partir dessa expressão da força elétrica. Ele não pode depender da carga elétrica de prova. Além disso, temos que dizer como é a força elétrica exercida pelo vetor do campo elétrico na carga de prova  $q_0$ . Essas duas condições são satisfeitas pelas seguintes definições:

$$\begin{aligned} \vec{E}_c &= \frac{\vec{F}_c}{q_c} = k \frac{qq_c}{q_c r^2} \hat{r} = k \frac{q}{r^2} \hat{r} \\ \vec{F}_c &= q_c \vec{E} \end{aligned}$$

A turma não resiste e reclama:

– Que complicação!

– Toda idéia nova é difícil de entender e aceitar. Observem que o vetor do campo elétrico só depende da carga elétrica  $q$ . Ele não depende da carga elétrica de prova  $q_0$ . Ele não muda se utilizarmos uma carga elétrica de prova negativa.

Ronaldo observa a expressão aliviado. Graças às explicações de Fátima e ao seu estudo em casa, já consegue entender a notação vetorial utilizada pelo professor. Reflete em voz alta:

CAMPO ELÉTRICO DE  
UMA CARGA PONTUAL

FORÇA EXERCIDA PELO  
CAMPO SOBRE A CARGA

– Em cada ponto do espaço, o vetor do campo elétrico criado por uma carga elétrica positiva tem a mesma direção e o mesmo sentido do vetor unitário  $\hat{r}$ , isto é, aponta no sentido contrário ao ponto onde se encontra a carga  $q$ . Já o vetor do campo elétrico criado pela carga negativa tem a mesma direção e o sentido contrário ao do vetor unitário, isto é, aponta para o ponto onde a carga se encontra.

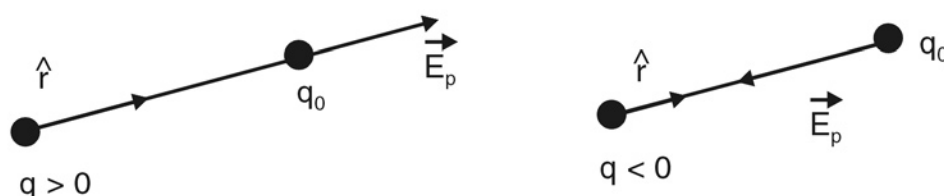


Figura 35 - Campo elétrico de uma carga pontual.

– Sua observação está perfeita. Apesar de os vetores do campo elétrico não dependerem da carga elétrica de prova, podemos utilizá-la para relembrar as suas direções e os seus sentidos com facilidade. Em qualquer ponto do espaço, a direção e o sentido do vetor do campo elétrico são iguais aos da força elétrica que atuaria em uma carga de prova positiva colocada no ponto.

Ronaldo ainda não está certo de estar entendendo tudo.

– Qual é a expressão do campo elétrico criado por várias cargas pontuais?

– A definição para o vetor do campo elétrico de duas cargas pontuais é igual àquela para uma carga pontual, isto é, é a força que atua na carga elétrica de prova por unidade de carga (vai para o quadro-negro, desenha e coloca a fórmula):

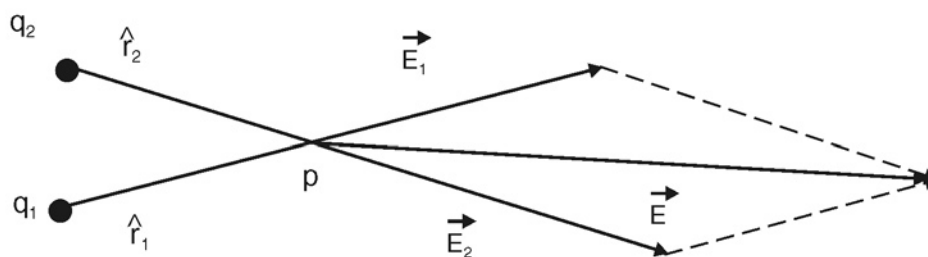


Figura 36 - Princípio da superposição para o campo elétrico.

PRINCÍPIO DA  
SUPERPOSIÇÃO PARA O  
CAMPO ELÉTRICO

$$\begin{aligned}\vec{E} &= \frac{\vec{F}_c}{q_c} = \frac{\left(k \frac{q_c q_1}{r_{c1}^2} \hat{r}_{c1} + k \frac{q_c q_2}{r_{c2}^2} \hat{r}_{c2}\right)}{q_c} = \\ &= k \frac{q_1}{r_{c1}^2} \hat{r}_{c1} + k \frac{q_2}{r_{c2}^2} \hat{r}_{c2} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2\end{aligned}$$

– Esse resultado pode ser generalizado para um número qualquer de cargas elétricas?

– Pode sim. Nesse caso, o campo elétrico é dado por:

$$\begin{aligned}\vec{E} &= \frac{\vec{F}_c}{q_c} = \frac{\left(k \frac{q_c q_1}{r_{c1}^2} \hat{r}_{c1} + k \frac{q_c q_2}{r_{c2}^2} \hat{r}_{c2} + \dots + k \frac{q_c q_N}{r_{cN}^2} \hat{r}_{cN}\right)}{q_c} = \\ &= k \frac{q_1}{r_{c1}^2} \hat{r}_{c1} + k \frac{q_2}{r_{c2}^2} \hat{r}_{c2} + \dots + k \frac{q_N}{r_{cN}^2} \hat{r}_{cN} = \\ &= \sum_{i=1}^N \vec{E}_i\end{aligned}$$

O professor alerta: “Observem que o campo elétrico criado por várias cargas elétricas é a soma dos campos elétricos de cada uma das cargas. O campo elétrico de uma carga elétrica pontual não é alterado pela presença de outras cargas pontuais”.

- Quer dizer que o princípio da superposição vale para o campo elétrico?
- Perfeito!
- Por favor, professor, faça um exemplo.

### Exemplo 2

– Um dipolo elétrico é um sistema formado por duas cargas elétricas de mesmo módulo e sinais contrários (veja a Figura 37 ). As cargas elétricas estão separadas por uma distância  $2d$ . Calcule o campo elétrico no ponto médio da reta que une as duas cargas.

Ele continua:

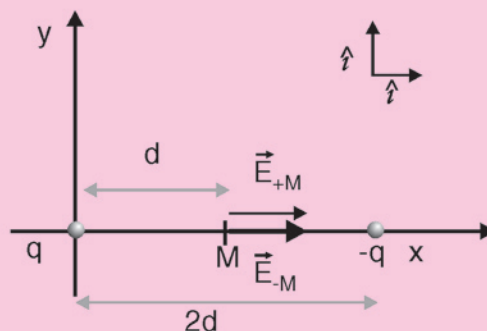


Figura 37

– O campo elétrico criado pela carga elétrica positiva quando ela está sozinha, é  $\vec{E}_+ = \frac{kq}{d^2} \hat{i}$ . O campo elétrico criado pela carga elétrica negativa, quando ela está sozinha, é  $\vec{E}_- = \frac{kq}{d^2} \hat{i}$ . O campo elétrico que é criado em M pelas duas cargas elétricas é  $\vec{E}_M = \vec{E}_- + \vec{E}_+ = \frac{2kq}{d^2} \hat{i}$ . Entenderam?

O sinal para o recreio toca. A turma permanece sentada, ainda atônita. A aula de hoje ultrapassou todos os limites. O professor chegou a inventar uma entidade imperceptível para os sentidos: o campo elétrico. E mais: criou para o campo elétrico uma definição matemática através da sua interação com uma carga de prova. No fim, a definição escolhida independe da carga de prova. Foi demais! O professor tranquiliza os alunos:

– Meninos e meninas, não fiquem tão chocados. O recreio os espera. Aos poucos vocês se acostumarão com essas novas idéias.

– Façam os exercícios que vocês compreenderão melhor tudo isso.

.....

1. As cargas elétricas criam no espaço um campo elétrico. O campo elétrico é o conjunto de todos os vetores elétricos que existem em cada um dos pontos do espaço. É o vetor do campo elétrico que está em contato com a carga elétrica que atua sobre ela. O vetor do campo elétrico de uma carga pontual é

$$\vec{E} = k \frac{q}{r^2} \hat{r} .$$

2. Vale o princípio da superposição para o campo elétrico. O campo elétrico de uma carga elétrica pontual não é alterado pela presença de outras cargas elétricas.

.....

## Leituras e exercícios 5

### Leituras

Leia sobre os assuntos *O que é campo elétrico, Linhas de força, Distribuição de cargas em um condutor, Blindagem eletrostática, Poder das Pontas, Relâmpago e trovão, O pára-raios, O vetor campo elétrico* nas seções 9.2 e 9.6, do capítulo 9 do livro *Física- volume único* de A. Máximo e B. Alvarenga.

Deste mesmo capítulo faça os exercícios de fixação de 16 até 20, questões de revisão de 7 a 9 e problemas e questões de vestibulares de 1 até 10.

Leia sobre os assuntos *A carga elétrica e suas propriedades, A formulação da Lei de Coulomb* nas seções 3.3.3 e 3.3.4 do livro *Física 3 (eletromagnetismo)*, do GREF.

### Pergunta 1

Do seu ponto de vista, qual dos modelos de interação elétrica é mais fácil de entender: o de ação a distância ou o de campo elétrico? Justifique.

### Exercício 4

Um dipolo elétrico está em uma região onde existe um campo elétrico constante.

- Calcule a força em cada uma das cargas elétricas.
- Calcule a força resultante.
- Descreva o movimento do dipolo elétrico.

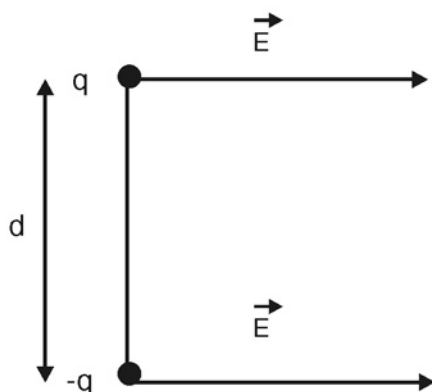


Figura 38 - Dipolo elétrico em campo elétrico constante.

- Suponha que o campo elétrico que atua em  $q$  tenha um módulo igual a duas vezes o módulo do campo elétrico que atua em  $-q$ . Qual é a força resultante? Como é o movimento do dipolo elétrico?
- As moléculas do fubá são polares. Elas se comportam como dipolos elétricos. Depois de resolver os itens de (a) até (d) você é capaz de dizer por que se formam linhas no fubá?

### Exercício 5

As imagens a seguir representam fubá sobre óleo na presença de um terminal descarregado e de um terminal carregado. Responda:

Em qual das imagens o terminal está carregado? Por quê?

Você consegue descobrir a carga elétrica do terminal? Justifique.

Descreva o campo elétrico no interior no terminal e na região externa ao terminal. Onde o campo elétrico é mais intenso?

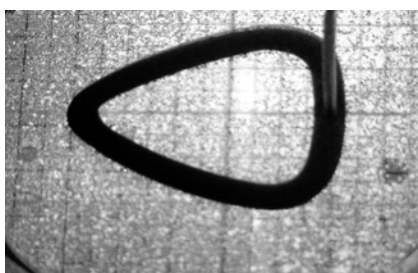


Figura 39 - Terminais condutores descarregados.

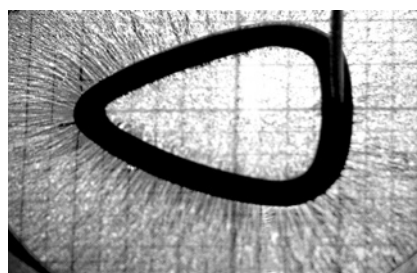


Figura 40 - Terminais condutores carregados.

## Exercício 6

Um sistema é formado por duas cargas elétricas iguais  $+q$  e  $-q$  (veja a Figura 41). As cargas elétricas estão separadas pela distância  $d$ . Calcule o campo elétrico no ponto A que dista  $2d$  de uma das cargas elétricas (ver Figura).

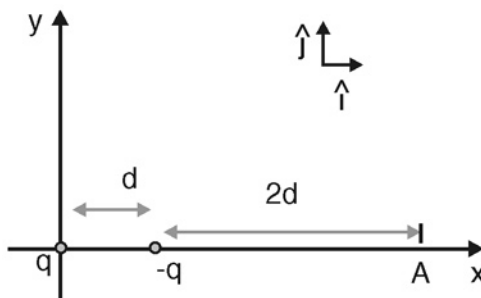
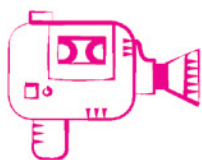


Figura 41



## Atividade 6

Assista novamente ao vídeo Blindagem eletrostática. Tente explicar as seqüências do vídeo com o conceito de campo elétrico.

## Atividade 7

Refaça o questionário **Que sei sobre o campo elétrico?**

Nesta aula, introduzimos o conceito de campo elétrico e descrevemos a sua ação sobre as cargas elétricas.

## Potencial elétrico

### Objetivos

Discutir o conceito de potencial elétrico.

### Introdução

Esta aula tem como finalidade discutir o conceito de potencial elétrico e é constituída de quatro partes:

Que sei sobre potencial elétrico? é um questionário que organiza seus conhecimentos prévios sobre o potencial elétrico.

**Potencial elétrico** contém dois textos e atividades. O primeiro texto discute o princípio da conservação da energia; o segundo é um resumo sobre potencial elétrico e suas propriedades.

Nas **Leituras e Exercícios** de 6 até 7 há indicações de leituras e exercícios. As leituras são sobre os assuntos abordados; os textos estão nos livros *Física - volume único*, de Beatriz Alvarenga e Antonio Máximo, e *Física 3 (Eletromagnetismo)*, do GREF. Existem exercícios indicados e propostos. Os exercícios indicados são dos livros-texto *Física-volume único* e *Física 3 (Eletromagnetismo)* do Gref.

Faça a leitura de forma sistemática, realizando as atividades (exercícios e leituras extras) sugeridas ao longo do texto. Use seu caderno para anotações e comentários, e para registrar resolução das atividades.

Não deixe de refazer nenhum dos exemplos sugeridos, nem os exercícios.

Bom trabalho!

## Que sei sobre Potencial elétrico?

As questões apresentadas a seguir têm como finalidade investigar e organizar as idéias que você já tem sobre potencial elétrico. Escreva as respostas em seu caderno, de forma organizada. Não consulte livros nem notas de aulas, mas não deixe de responder às questões.

A comparação entre suas idéias e conhecimentos sobre potencial elétrico antes e depois de trabalhar esta unidade é importante para o seu aprendizado.



### Questionário 3

1. Escreva, com suas palavras, o *princípio de conservação da energia*.
2. É possível definir uma *energia potencial elétrica*? Por quê?
3. Qual *energia potencial elétrica* associada a uma carga elétrica localizada em uma região do espaço onde existe um *campo elétrico constante*?
4. A *energia potencial elétrica* associada a um *campo elétrico* tem alguma *arbitrariedade* na sua definição? Qual?
5. Qual o valor da *energia potencial elétrica* no ponto que é escolhido como a *origem da energia potencial elétrica*?
6. A *energia potencial elétrica muda* quando a sua *origem é deslocada* para outro ponto? E a *diferença de energia potencial elétrica*?
7. O que é *potencial elétrico*?
8. Qual a expressão do *potencial elétrico* criado por um *campo elétrico constante*? Ele tem alguma *arbitrariedade* na sua definição?
9. O que é *origem do potencial*?
10. O potencial elétrico muda quando a *origem do potencial elétrico é deslocada* para outro ponto? E a *diferença de potencial*?
11. Marque a alternativa correta:  
( ) As cargas elétricas positivas e negativas se deslocam espontaneamente para as regiões em que o potencial elétrico é menor.  
( ) As cargas elétricas positivas se deslocam espontaneamente para as regiões em que o potencial elétrico é menor, e as cargas elétricas negativas se deslocam espontaneamente para regiões em que o potencial elétrico é maior.
12. O que é uma *superfície equipotencial*?
13. Qual a *direção do campo elétrico* na superfície equipotencial?
14. É possível calcular o *campo elétrico* quando se conhece o potencial elétrico em todo o espaço? De que forma?



## Potencial elétrico

### Princípio da conservação da energia



#### “ O defeito na lâmpada ”

São nove horas da noite. André, Ronaldo e Fátima estão no escritório estudando, cada um para a sua prova. A lâmpada do escritório queima. Fátima dá as determinações:

– André, apanhe uma lâmpada na despensa; Ronaldo, pegue a escada no seu quarto.

– E você, *chefa*, o que vai fazer?

– Apanhar uma lanterna no banheiro.

A lâmpada é trocada e o interruptor é ligado. Surpresa geral. Parece que a lâmpada está com defeito. A luz é muito fraca.

Após uma rápida pausa para pensar, Fátima entende o que aconteceu. “André, você apanhou uma daquelas lâmpadas que o papai comprou em Brasília?

– Isso mesmo.

– Ela só funciona bem quando é ligada em rede de 220 volts (V).

Fátima vai à despensa e volta com uma lâmpada de 100 watts e 110 volts. Ronaldo pergunta:

– O que aconteceu, Fátima?

– A lâmpada que o André trouxe para acender precisa de uma quantidade de energia maior do que a fornecida pela rede daqui, que é de 110 volts.

– Desde menino escuto falar sobre voltagem. Pilhas de 1,5V, baterias de 9V, máquinas de 110V ou 220V. Até hoje não sei o que significa isso. Você pode me explicar o que é voltagem?

Fátima entrega para Ronaldo um texto do físico Richard P. Feynman sobre os princípios de conservação e uma lista de exercícios de Mecânica. E determina: “Já é muito tarde. A conversa sobre voltagem é longa. Leia esse texto e faça esta lista de exercícios para iniciarmos nossa discussão amanhã”.

Ronaldo perde a paciência e resmunga em voz alta: “Por que as coisas neste mundo não são mais simples? Tenho um professor de Física que não explica nada e uma irmã que explica demais”. Dirige seu protesto para a irmã: “Preciso mesmo ler esse texto e resolver esta lista de exercícios?”

– Paciência, Ronaldo. Antes de explicar a você o que é voltagem, é preciso saber se as idéias que você tem sobre energia estão bem claras. Fátima volta aos seus estudos e esquece os irmãos. André continua calado, sem nada entender mas com medo de perguntar.

No dia seguinte, Ronaldo procura a irmã com os exemplos resolvidos.

– Irmãzinha, o Feynman é fantástico! Confesso que não estava com a menor vontade de fazer o que você me pediu. Mas hoje o meu simpático professor de eletricidade informou que em breve vai ensinar voltagem e por isso mudei de idéia rapidinho. Já te contei? Ele está interessado em só resolver problemas típicos. Podemos discutir o texto do Feynman?

Fátima começa a falar lendo trechos do texto do Feynman. “Quando estudamos as leis da Física, descobrimos que elas são numerosas, complicadas e pormenorizadas. Existem leis da gravitação, da eletricidade e do magnetismo, das interações nucleares etc. Mas todas essas leis particulares parecem obedecer a grandes princípios gerais, como os princípios de conservação”.

Os físicos usam palavras correntes com um sentido particular. Para eles, o fato de existir uma lei de conservação significa que se pode calcular uma grandeza física em um determinado momento, obter um número e, embora a natureza passe por uma profusão de mudanças, se a operação for realizada novamente o resultado é o mesmo. Esse número é, pois, invariante.

– Você pode me dar um exemplo simples do que é uma grandeza física invariante?

– Imagine que você está estudando o movimento de um bloco sobre um plano inclinado. Antes de colocar o bloco sobre o plano inclinado você mede a massa do bloco em uma balança e encontra um valor  $m$ . Depois que o bloco desce o plano inclinado você mede novamente a massa do bloco e encontra  $m$  também. Apesar de não termos medido a massa do bloco enquanto ele descia o plano inclinado, sabemos que a sua massa não muda durante o seu movimento. Dizemos que a massa do bloco é um invariante durante o seu movimento.

– Isso é óbvio. Para que tanta complicação?

– Nesse caso é óbvio, porque alguém já descobriu a conservação da massa e ensinou. A dificuldade é descobrir pela primeira vez as grandezas conservadas. Para você ter uma noção dessa dificuldade, imagine que a natureza é um grande jogo de xadrez, com milhões de peças, e que estamos tentando descobrir as leis desse jogo, jogado muito rapidamente por grandes deuses.

– Como assim?

– Conseguimos apreender com mais facilidade algumas regras, especialmente aquelas que não exigem a observação de todos os movimentos. Por exemplo, suponhamos que só exista um bispo branco sobre o tabuleiro. Como o bispo se move nas diagonais, quer dizer, sempre em casas da mesma cor, se deixarmos de observar o “jogo dos deuses” por uns momentos e voltarmos depois a prestar atenção ao jogo, esperamos encontrar ainda um bispo branco – talvez numa outra posição, mas numa casa da mesma cor.

Ronaldo presta atenção. Fátima continua:

– Essa é a essência das leis de conservação. Não precisamos ver todos os pormenores para sabermos alguma coisa sobre o jogo. Claro que, no xadrez, essa lei particular não é necessariamente válida em todas as circunstâncias. Se deixarmos de olhar o tabuleiro por muito tempo, pode acontecer que o bispo seja capturado, que um peão seja promovido a rainha ou que um deus decida que é preferível que esse peão seja promovido a bispo, ficando o novo bispo numa casa preta.

– Você pode citar uma lei de conservação que seja simples de entender?

– A lei de conservação da carga elétrica. Existe um número que não varia, aconteça o que acontecer: a carga elétrica total no universo. Se eu perder carga num lugar, acabo por encontrá-la noutro. A conservação se refere ao conjunto de todas as cargas elétricas. Esse fato foi descoberto experimentalmente por Faraday.

– Essas leis são eternas, quer dizer, valerão para sempre?

– Infelizmente pode acontecer que algumas das leis de conservação que conhecemos hoje não sejam perfeitamente exatas, mas enquanto não aparecerem fatos experimentais que as neguem podemos considerá-las válidas. Há algumas dessas leis que não funcionam totalmente; são só aproximadamente verdadeiras, o que não impede que muitas vezes sejam úteis. Podemos chamá-las “pequenas” leis de conservação.

– Você pode dar um exemplo?

– Uma lei desse tipo é aquela na qual se acreditou durante um bom tempo, que afirmava que a massa total de um objeto é invariável. A validade dessa lei depende da maneira como é definida a massa e se ela é relacionada ou não com a energia.

– Dá para explicar melhor?

– Hoje já se sabe que, nas reações nucleares, a massa total do sistema contido no reator não se conserva. Se considerarmos que massa também é energia, a lei de conservação da massa está incluída na lei de conservação da energia.

– Como assim?

– A conservação da energia é um pouco mais complexa e mais difícil de explicar, porque há um número associado a uma propriedade cuja variação não é facilmente visível, como é o caso da massa de objeto particular. Vou usar uma analogia um pouco grosseira para explicar o que se passa. Começa a contar uma história:

Imaginemos que uma mãe deixa o seu filho sozinho num quarto brincando com 28 cubos absolutamente indestrutíveis. A criança brinca com os cubos durante todo o dia e a mãe, quando regressa a casa, verifica que estão lá todos os cubos, constatando assim a conservação dos cubos. A cena repete-se por vários dias, até que uma vez, ao voltar, a mãe encontra só 27 cubos; encontrou também um cubo caído fora do quarto, que a criança tinha atirado pela janela.

– Ou seja, continuam os 28 cubos.

– Isso. Mas a primeira coisa que é necessário compreender numa lei de conservação é que é preciso verificar se a matéria observada não passa para o outro lado da parede. O inverso também poderia ter acontecido: por exemplo, um amigo podia ter vindo brincar com a criança trazendo alguns cubos consigo.

É óbvio que essas questões têm de ser consideradas quando se discutem leis de conservação. Suponhamos que um dia, ao contar os cubos, a mãe nota que só há 25, mas suspeita de que a criança escondeu três numa caixa de brinquedos. “Vou abrir a caixa”, diz ela. “Não”, responde a criança, “você não pode abrir a caixa”. Como a mãe é inteligente, pensaria: “Sei que a caixa vazia pesa 600g e que cada cubo pesa 100g. Sendo assim, basta pesar a caixa”. Dessa maneira, a mãe sabe que para obter o número total de cubos basta calcular a diferença entre o peso da caixa atual e o peso da caixa vazia e dividir pelo peso de um cubo, e somar ao número de cubos que ela já encontrou, ou

$$\text{Número total de cubos} = \text{Número de cubos visíveis} + \frac{(\text{Peso da caixa} - \text{Peso da caixa vazia})}{\text{Peso de um cubo}}$$

sendo o resultado 28. Podemos acrescentar alguns complicadores. Esse método funciona bem durante algum tempo, mas um dia a soma não dá certo. A mãe verifica, porém, que o nível de água suja numa bacia mudou. Sabe que a profundidade da água é de 6cm, se não houver cubos no fundo, e que o nível subiria 0,5cm se um cubo estivesse dentro da água. Junta então um novo termo, ficando agora com

$$\text{Número total de cubos} = \text{Número de cubos visíveis} + \frac{(\text{Peso da caixa} - \text{Peso da caixa vazia})}{\text{Peso de um cubo}} + \frac{\text{Variação da altura da água suja}}{0,5}$$

chegando novamente ao total de 28. À medida que aumenta o engenho do garoto, aumenta também o da mãe, que a cada vez tem de somar mais termos, todos representando cubos. Do ponto de vista matemático, trata-se de cálculos abstratos, uma vez que os cubos estão escondidos.

– Mas, Fátima, o que isso tem a ver com energia?

– Calma, espere que eu conclua a minha analogia, para dizer o que há de semelhante e de diferente entre a conservação dos cubos e a conservação da energia. Em primeiro lugar, suponhamos que em nenhuma das situações a mãe viu cubos. O termo “número de cubos visíveis” nunca aparece. Então a mãe estaria sempre a calcular termos como “cubos na caixa”, “cubos na água” etc. O mesmo se passa com a energia: pelo que sabemos, não existem cubos. Além disso, ao contrário do caso dos cubos, no caso da energia os números que aparecem não são inteiros.

Pense no que poderia acontecer à pobre mãe se, ao calcular, uma vez encontrasse 6 cubos e 1/8; ao calcular um outro, obtivesse 7/8 de cubo, sendo o resto 21, o que ainda totaliza 28. É o que acontece no caso da conservação da energia.

Precisamos identificar cada tipo de energia e definir uma regra para calculá-la. A partir de cada conjunto de regras podemos calcular um número para cada tipo diferente de energia. Quando adicionamos todos os números referentes a todas as diferentes formas de energia, o resultado é sempre o mesmo. Todavia, tanto quanto sabemos, a energia não é um múltiplo de uma unidade. O seu valor não é expresso por um número inteiro. É expresso por um número real.

– E aí, como é que fica?

– Trata-se de uma abstração puramente matemática: há apenas um número invariável, qualquer que seja o modo como é calculado. Não é possível dar uma interpretação melhor. Essa energia assume várias formas, à semelhança dos cubos na caixa, na água etc. Existe energia devida ao movimento, chamada energia cinética; energia devido à interação gravitacional, chamada energia potencial gravitacional; energia térmica; energia elétrica; energia da luz; energia elástica, por exemplo, numa mola; energia química; energia nuclear – e existe também a energia que qualquer partícula tem pelo simples fato de existir, energia que depende diretamente da respectiva massa. A descoberta desta última se deve a Einstein, como, com certeza, todos sabem.  $E=mc^2$  é a famosa equação que representa a lei de que estou falando. As regras para calcular alguns tipos de energia são simples. Podemos citar a **energia cinética** de uma partícula, que é calculada pela expressão  $E_c = \frac{mv^2}{2}$ .

#### ENERGIA CINÉTICA

Em outros casos a expressão é mais complicada, como para aquilo que chamamos energia térmica. Todavia sabemos que ela é, em grande medida, a energia cinética do movimento das partículas no interior de um objeto.

A energia elástica e a energia química têm a mesma origem: as forças interatômicas. Quando os átomos se rearranjam segundo uma nova estrutura, verifica-se que há uma variação de energia; essa mudança significa que algo mais tem de acontecer. Por exemplo, na combustão de qualquer coisa a energia química varia; ocorre aí um fluxo de calor: o balanço de energia tem de estar certo. As energias elástica e química provêm de interações entre os átomos. Sabemos hoje que essas interações são uma combinação de duas coisas, a energia elétrica e a energia cinética, embora esta última seja descrita por uma fórmula quântica.

– E a energia da luz?

– A energia da luz não é mais do que energia elétrica, uma vez que a luz é hoje interpretada como uma onda eletromagnética. A energia nuclear não pode ser representada em função das outras; neste momento só posso dizer que é o resultado das forças nucleares; e não estou falando apenas da energia produzida. No núcleo de urânio existe uma determinada quantidade de energia; quando ele se desintegra, a quantidade de energia nuclear muda, mas a quantidade total de energia no mundo não varia: no decurso da desintegração, portanto, são liberados calor e matéria, a fim de que a energia seja conservada.

– Por favor, Fátima, dê um exemplo simples de como é possível identificar um novo tipo de energia e definir uma regra para ela.

– A energia cinética de uma pedra que é arremessada verticalmente para cima diminui durante a subida da pedra. A responsável pela diminuição da energia cinética da pedra é a força peso, porque ela desacelera a pedra. A pedra atinge sua altura máxima e inicia a sua descida. Quando ela retorna ao seu ponto de partida, a sua energia cinética é igual à energia cinética inicial. Diante desses fatos podemos fazer a seguinte conjectura: na subida, a energia cinética da pedra foi transformada em outro tipo de energia e, na descida, essa nova energia foi transformada novamente em energia cinética. A conjectura se transforma em realidade, se for possível definir a regra que define uma maneira de calcular esse novo tipo de energia.

– Posso dizer que a energia cinética seria o cubo do exemplo da mãe e da criança e a nova energia potencial seria o cubo que foi escondido na água suja?

– Isso mesmo. Resta agora descobrir a regra para calcular a nova energia. Vamos utilizar os problemas que você fez para obtê-la.

Fátima observa a resolução do primeiro exemplo.

### Exemplo 3

Uma pedra massa  $m$  é arremessada verticalmente para cima com velocidade inicial  $v_1$ . A resistência do ar é desprezível em relação à força peso. Calcule:

- a) a variação da energia cinética da massa em função das coordenadas dos pontos 1 e 2 e da aceleração da gravidade  $g$ .
- b) as grandezas invariantes no movimento de subida da pedra.

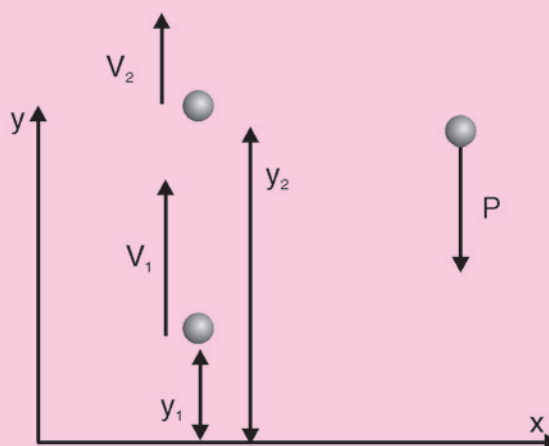


Figura 42 - Invariantes na queda livre

**Resolução**

Pela aplicação da segunda Lei de Newton temos que:

$$m\vec{a} = m\vec{g} \Rightarrow \vec{a} = \vec{g}$$

Movimento é uniformemente acelerado com aceleração  $g$ .

Equação de Torricelli

$$a) \quad v_2^2 = v_1^2 - 2g(y_2 - y_1) \Rightarrow \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = -mg(y_2 - y_1)$$

b) A massa da pedra não varia durante o seu movimento. Por isso, ela é um invariante do seu movimento.

Fátima opera a expressão que fornece a variação da energia cinética entre os pontos 1 e 2, colocando do lado esquerdo da equação todos os termos com grandezas associadas ao ponto 2 e do lado direito todos os termos com grandezas associadas ao ponto 1. A seguir adiciona uma constante  $C$  aos dois lados da equação.

$$\frac{mv_2^2}{2} + mgy_2 = \frac{mv_1^2}{2} + mgy_1 \Rightarrow \frac{mv_2^2}{2} + mgy_2 + C = \frac{mv_1^2}{2} + mgy_1 + C$$

Fátima então dá o seu veredicto: O seu cálculo da variação da energia cinética está correto. No entanto, a sua lista de invariantes está incompleta. Durante a subida da pedra existe uma outra grandeza invariante (constante, conservada) além da massa: a soma  $\frac{mv_2^2}{2} + mgy + C$  é constante nos pontos 1 e 2 e em qualquer ponto da trajetória da pedra enquanto ela não colide com a Terra. Observe que a energia cinética está diminuindo, enquanto a função  $mgy + C$  está aumentando. Por isso a soma é invariante durante o movimento de subida e de descida da pedra. Portanto, a expressão que permite calcular nova energia é

$$mgy + C.$$

Após a explicação da irmã, Ronaldo consegue entender como fora possível identificar o novo tipo de energia e definir uma regra para ela. No curso de Mecânica, já tinha aprendido que todo corpo nas vizinhanças da Terra tinha uma energia potencial gravitacional igual a  $mgy$ . A irmã obtivera para a nova energia uma expressão muito parecida com aquela da energia potencial gravitacional. Elas diferiam apenas por uma constante  $C$ .

ENERGIA POTENCIAL  
GRAVITACIONAL

– Essa nova energia que você obteve é a energia potencial gravitacional? Que  $C$  é esse aí que você colocou na energia potencial gravitacional?

– O novo tipo de energia é denominado **energia potencial gravitacional**. A expressão mais geral da energia potencial tem a arbitrariedade de uma constante:

$$E_p = mgy + C.$$

Na realidade, para que a energia de um sistema fechado permaneça constante basta que a variação da energia de um tipo seja compensada pela variação de outro tipo de energia. Assim, a variação da energia potencial é única. Ela não pode ter arbitrariedade. A definição que escolhi para a energia potencial gravitacional não fornece nenhuma arbitrariedade na sua variação, uma vez que ela independe da constante  $C$ .

$$E_{p2} - E_{p1} = mgy_2 + C - (mgy_1 + C) = mg(y_2 - y_1)$$

ORIGEM DA  
ENERGIA POTENCIAL  
GRAVITACIONAL

Quando são utilizados valores diferentes para essa constante, o que muda é o ponto onde se coloca um valor nulo para a energia potencial. Esse ponto é denominado **origem da energia potencial**.

– Não entendi nada.

– Vou exemplificar. Imagine que  $C$  é nulo. O ponto que tem energia potencial nula é aquele que tem a coordenada  $y$  nula. Atribua agora para  $C$  um valor diferente de zero. Nesse caso, o ponto que tem energia potencial nula tem coordenada  $y = -\frac{C}{mg}$ . É comum utilizar a constante  $C$  nula para simplificar a expressão da energia potencial gravitacional.

– Nesse movimento a energia mecânica se conserva. Quem está transformando a energia potencial gravitacional em energia cinética?

– A força peso.

– É isso aí.

Ronaldo pára de falar. Reflete alguns instantes. Continua a perguntar:

– É assim que se descobre a fórmula da energia potencial gravitacional? Minha professora de Física, na primeira série, colocou essa fórmula no quadro sem nenhuma explicação! Você não, você gosta de explicar tudo em detalhes... E acabou de deduzir pra mim a expressão da energia potencial gravitacional para aquele problema...

– Foi assim que se descobriu a energia potencial gravitacional. São os cubos que o Feynman utilizou. Um dos cubos (a energia cinética) foi escondido e parece que foi destruído. Na realidade, ele continua a existir, mas com outra aparência (como energia potencial gravitacional).



**Exemplo 4:**

Uma massa  $m$  está descendo um plano inclinado sem atrito. Calcule:

- a) a variação de energia cinética da massa em função das coordenadas dos pontos 1 e 2 e da aceleração da gravidade  $g$ .
- b) os invariantes do movimento

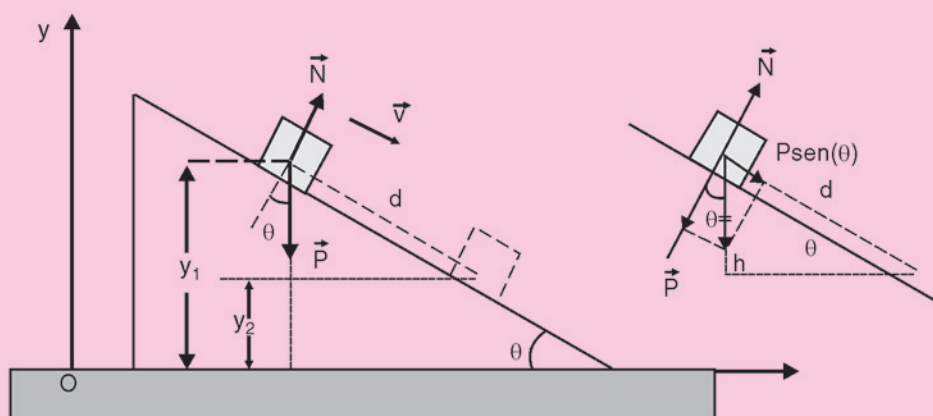


Figura 43 - Invariantes em um plano inclinado liso.

- a) Aplicação da segunda Lei de Newton fornece:

$$\vec{N} + \vec{P} = m\vec{a}$$

A componente da força resultante na direção perpendicular ao plano é nula porque a massa se mantém sobre o plano. A força normal não tem componente na direção paralela ao plano. A componente da força peso paralela ao plano é  $P \text{sen}(\theta)$ . Portanto, a aceleração da massa pode ser calculada da seguinte forma:

$$P \text{sen}(\theta) = ma \Rightarrow mg \text{sen}(\theta) = ma \Rightarrow a = g \text{sen}(\theta)$$

$$\text{onde } \text{sen}(\theta) = \frac{h}{d}.$$

O movimento é uniformemente acelerado. De acordo com a equação de Torricelli, temos:

$$v_2^2 - v_1^2 = 2g \text{sen}(\theta) d = -2gh = -2g(y_2 - y_1)$$

- b) A massa é um invariante do movimento.

Ronaldo observa a sua resolução do segundo exemplo, faz com a variação da energia cinética a mesma manipulação matemática que Fátima fizera no exemplo 4 e comenta: “Nesse caso, a energia mecânica também é constante. Até aí, tudo bem. Mas por que a presença da força normal não modificou a energia mecânica?”

TRABALHO DE UMA  
FORÇA CONSTANTE.

Fátima explica:

– Porque ela não tem componente na direção da velocidade da massa. Assim, não pode modificar o módulo da velocidade. Uma força só transforma um tipo de energia em outro quando ela tem uma componente na direção da velocidade do corpo, isto é, quando ela realiza trabalho.

– O que é trabalho?

– **Trabalho de uma força constante** é, por definição, o produto da componente da força na direção do seu deslocamento pelo seu deslocamento.

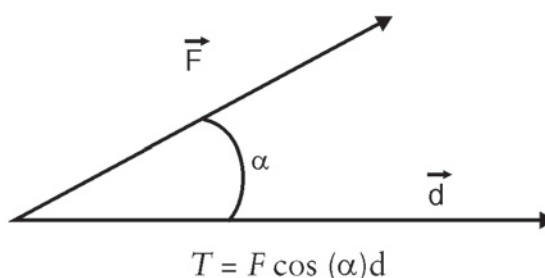


Figura 44 – Trabalho de uma força constante

O trabalho da força normal é nulo porque ela é perpendicular ao vetor deslocamento.

O trabalho da força peso é  $T_p = mgd \cos(90^\circ - \theta) = mg(y_1 - y_2)$ .

Ronaldo observa que o trabalho da força peso é menos a variação de potencial. “Fátima, o trabalho da força peso é menos a variação de energia potencial. Isso significa que, quando o trabalho da força peso é positivo, a energia potencial diminui e, quando ele é negativo, a energia potencial aumenta. Isso sempre vai acontecer?”

– Sua observação está correta. É possível demonstrar que a energia potencial associada a uma força é sempre menos o trabalho dessa força. Quando o trabalho da força é positivo, a força tem uma componente que aumenta a velocidade do corpo. Esse aumento de velocidade se faz às custas da energia potencial. Por isso, aparece o sinal negativo.

Ronaldo pensa em voz alta: “Quando o bloco estiver subindo o plano inclinado, o trabalho da força peso é negativo, porque o ângulo entre a força peso e o vetor deslocamento é maior do que  $90^\circ$ . O cosseno de um ângulo maior do que  $90^\circ$  é negativo. Nesse caso, a componente da força peso diminui a velocidade do corpo. A energia cinética que desaparece se transforma em energia potencial gravitacional: ela aumenta. O trabalho é negativo e a variação de energia potencial é positiva. O sinal negativo é realmente necessário!” Fica empolgado, e lança uma pergunta para a irmã:

– Já utilizei a fórmula  $mgy$  quando a trajetória do corpo era mais complicada. Por exemplo, na situação em que a massa desce uma superfície curva sem atrito. Por que ela também é válida nesse caso?

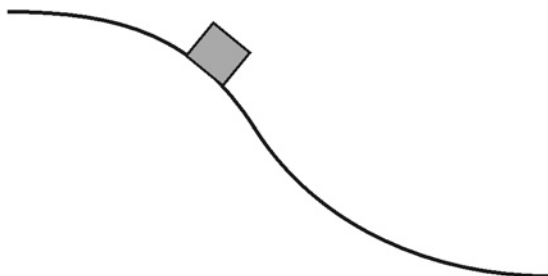


Figura 45- Invariantes em uma superfície lisa

– É possível demonstrar que a expressão da energia potencial gravitacional é sempre a mesma, isto é, ela não depende da forma da trajetória só depende da altura inicial e da altura final do corpo. Vou utilizar um argumento geométrico aproximado para convencer você disso. Uma demonstração rigorosa desse fato só pode ser feita com cálculo diferencial e integral. Sempre é possível construir uma trajetória poligonal muito parecida com a trajetória curva real. Nessa trajetória poligonal (linha azul da Figura 39) a massa se desloca em planos inclinados.

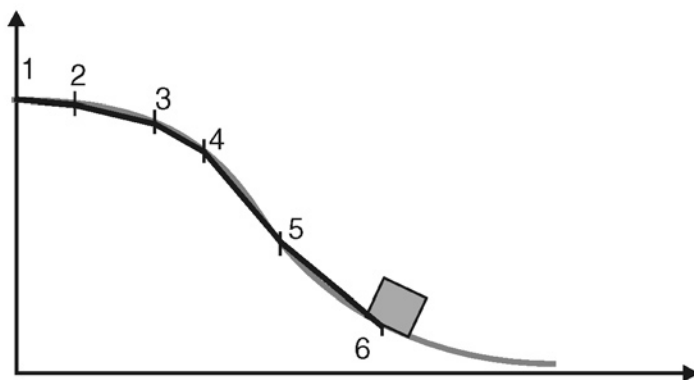


Figura 46 - Trabalho de uma força constante em uma superfície lisa

Fátima se empolga e continua:

– A variação da energia cinética da massa, quando o corpo se desloca do ponto 1 ao ponto 6 pela poligonal, é a soma das variações das energias cinéticas em cada um dos planos, isto é:

$$\begin{aligned} \frac{mv_6^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} &= \frac{mv_6^2}{2} - \frac{mv_5^2}{2} + \frac{mv_5^2}{2} - \frac{mv_4^2}{2} + \frac{mv_4^2}{2} - \frac{mv_3^2}{2} + \\ &+ \frac{mv_3^2}{2} - \frac{mv_2^2}{2} + \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\frac{mv_e^2}{2} - \frac{mv_l^2}{2} = -mg(y_e - y_e) - mg(y_e - y_A) - mg(y_A - y_3) -$$

$$-mg(y_3 - y_2) - mg(y_2 - y_l) \quad \text{Simplificando:}$$

$$\frac{mv_e^2}{2} - \frac{mv_l^2}{2} = -mg(y_e - y_l) \Rightarrow \frac{mv_e^2}{2} + mgy_e = \frac{mv_l^2}{2} + mgy_l$$

Portanto, na trajetória poligonal, a energia mecânica do sistema se conserva e a energia potencial tem a expressão igual àquela obtida para o plano inclinado liso. Ela só depende das coordenadas do ponto inicial e do ponto final da trajetória. É claro que a poligonal que desenhei não é igual à trajetória real. Ela ficará igual à trajetória real quando o número de planos inclinados utilizados for muito grande. Você pode aumentar o número de planos inclinados e demonstrar que o resultado será o mesmo, isto é, a energia mecânica se conserva e a **energia potencial gravitacional** é

$$E_p = mgy + C.$$

Quando existe uma energia potencial associada a uma força dizemos que essa **força é conservativa**. Ela não dissipa a energia mecânica. Ela apenas transforma a energia potencial em outro tipo de energia ou transforma outro tipo de energia em energia potencial.

– Irmãzinha, às vezes você consegue ser simples. Mas como fica a conservação da energia mecânica no caso em que existe atrito?

ENERGIA POTENCIAL  
GRAVITACIONAL

FORÇA CONSERVATIVA

**Exemplo 5**

Uma massa  $m$  está descendo um plano inclinado com atrito. Calcule:

- a) a variação de energia cinética da massa em função das coordenadas dos pontos 1 e 2 e da distância  $d$  percorrida pela massa, da força de atrito e da aceleração da gravidade  $g$ ;
- a) as constantes do movimento.

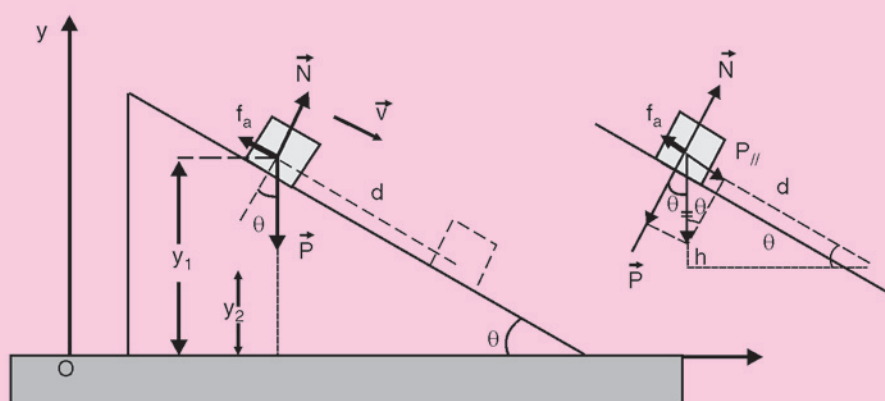


Figura 48- Plano inclinado com atrito

Pela segunda Lei de Newton temos que

$$\vec{N} + \vec{P} + \vec{f}_a = m\vec{a}$$

A componente da força resultante na direção perpendicular ao plano é nula porque a massa permanece sobre o plano. A força normal não tem componente na direção paralela ao plano. A figura acima mostra que a componente  $P_{||}$  da força peso paralela ao plano satisfaz a seguinte relação:

$$\text{sen}(\theta) = \frac{P_{||}}{P}.$$

Portanto,  $P_{||}$  é  $P\text{sen}(\theta)$ . A componente da força de atrito paralela ao plano é  $-f_a$ . Portanto, a aceleração da massa pode ser calculada da seguinte forma:

$P\text{sen}(\theta) - f_a = ma \Rightarrow mg\text{sen}(\theta) - f_a = ma \Rightarrow a = g\text{sen}(\theta) - \frac{f_a}{m}$ , em que  $\text{sen}(\theta) = \frac{h}{d}$ . Esse movimento é uniformemente acelerado. Pela equação de Torricelli temos:

$$v_2^2 = v_1^2 = -2\left(g\text{sen}(\theta) - \frac{f_a}{m}\right)d = -2gh - 2\frac{f_a}{m}d = -2g(y_2 - y_1) - 2\frac{f_a}{m}d \Rightarrow \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = -mg(y_2 - y_1) - 2f_a d$$

A massa do corpo é uma constante do movimento.

Fátima obtém a variação da energia mecânica do bloco a partir da variação da energia cinética deduzida por Ronaldo.

$$\frac{mv_2^2}{2} + mgy_2 - \left( \frac{mv_1^2}{2} + mgy_1 \right) = -f_a d$$

– Observe que a energia mecânica do corpo varia à medida que ele desce o plano inclinado. A energia mecânica que desapareceu foi transformada em energia calorífica, distribuída entre a superfície do plano e a massa.

– Desapareceu energia mecânica e apareceu energia calorífica. Mais um cubo foi escondido. É necessária uma nova regra para calcular a energia calorífica. A energia calorífica é uma energia potencial?

– Não. A energia potencial depende somente do ponto onde a massa se encontra. Ela não depende da maneira com que a massa chegou àquele ponto. A energia calorífica é uma energia cinética associada ao movimento de agitação térmica das moléculas, e depende da trajetória que a massa percorreu antes de atingir o ponto. É a força de atrito que transforma energia mecânica em energia calorífica.

– Não entendi nada.

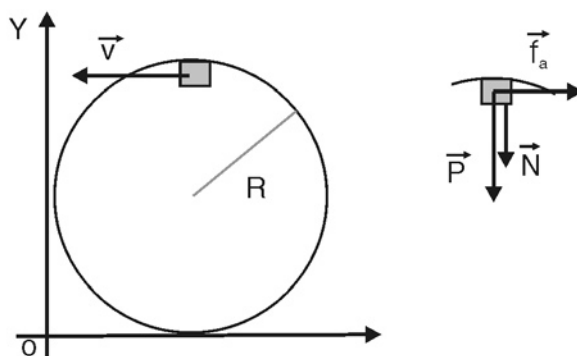


Figura 49 – Círculo vertical com atrito

– É complicado mesmo. Vou dar um exemplo: imagine uma massa se deslocando em uma superfície circular vertical com atrito (veja *Figura 41*). A velocidade da massa vai diminuindo à medida que a massa percorre a superfície. Finalmente ela pára. Suponhamos que a massa tenha energia cinética suficiente para fazer 15 voltas completas. Cada vez que ela estiver na parte mais alta de sua trajetória, sua energia potencial será  $2mgR$ , não importa se ela está na primeira ou na décima volta.

Em contrapartida, a energia calorífica que ela recebe a cada vez que está no ponto mais alto da sua trajetória depende da volta: certamente ela recebeu mais energia calorífica na décima volta do que na primeira. Isto é, a energia calorífica depende da trajetória da massa, mas a energia potencial gravitacional não. Por isso, a energia calorífica não é uma energia potencial. Não existe uma energia potencial associada à força de atrito. A força de atrito dissipa energia. Por isso, ela não é conservativa.

Fátima escuta o anúncio do noticiário das onze horas na televisão. Não tinha percebido a hora passar. “É muito tarde. Discutiremos voltagem outro dia”. Beija o irmão e vai para o seu quarto.

Ronaldo permanece parado, tentando absorver as idéias que tinham sido discutidas.

.....

1. A energia de um sistema isolado se conserva.
2. A energia potencial gravitacional nas vizinhanças da superfície da Terra é

$$E_{PG} = mgy + C.$$

A constante C não tem significado físico e pode assumir qualquer valor. Utilizaremos  $C=0$ .

.....

## Leituras e exercícios 6

### Leituras

Leia sobre os assuntos *Trabalho de uma força*, *Potência*, *Unidade de Potência*, *Trabalho de uma força não paralela ao deslocamento*, *Energia cinética e Energia potencial-conservação da energia* nas seções 6.1, 6.2, 6.4 e 6.5 do capítulo 6 do livro *Física-- volume único* de A. Máximo e B. Alvarenga.

Deste mesmo capítulo faça os exercícios de fixação de 1 até 15, de 26 até 44, as atividades I, II, III, VI, VII, VIII, os exercícios de revisão de 1 até 5, de 7 até 9, de 11 até 14 e problemas de vestibulares de 1 a 8, de 13 a 22.



## Potencial elétrico

### “Uma aula de voltagem para vestibulandos”

Ronaldo está refletindo sobre o texto *Os grandes princípios de conservação*, de Feynman. A idéia de que a energia do mundo se conservava era muito diferente e abstrata. Quantas novas formas de energia ele ainda iria encontrar na sua vida escolar?

O professor de Física entra em sala anunciando que vai discutir voltagem e começa a aula lembrando o conceito de energia potencial gravitacional.

– Uma massa localizada nas proximidades da Terra tem uma energia potencial gravitacional  $mgy$ , em que  $g$  é a aceleração da gravidade e  $y$  é a altura da massa em relação a uma origem escolhida arbitrariamente.

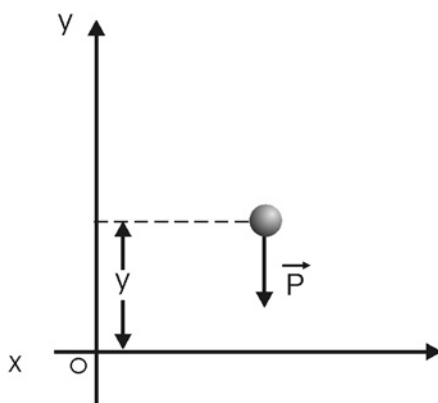


Figura 50 - Massa em queda livre

A energia potencial de uma massa varia quando a força peso tem uma componente na direção da velocidade da partícula. Por exemplo, quando a massa está em queda livre, a força peso transforma energia potencial gravitacional em energia cinética. Quando uma massa é arremessada verticalmente para cima, a força peso transforma energia cinética em energia potencial gravitacional.

Marina só tinha visto referência a voltagens em aparelhos eletrodomésticos, e está estranhando aquela discussão sobre energia potencial gravitacional em uma aula de eletricidade.

– Professor, encontramos referências a voltagem somente nos aparelhos elétricos. Por que você está falando de energia potencial gravitacional?

– Boa pergunta! As forças entre cargas elétricas em repouso (forças eletrostáticas) são muito parecidas com as forças gravitacionais entre massas. Isso faz com que as propriedades das forças elétricas sejam parecidas com as propriedades das forças gravitacionais. Por exemplo, também existe uma energia potencial elétrica associada às forças elétricas.



Ronaldo se agita. Um cubo foi escondido e ficou com aparência diferente e agora se chama energia potencial elétrica. Ronaldo se lembra dos exercícios que fez com a Fátima, sua irmã, para entender o cálculo da energia potencial associada à força peso. Sabe que a força peso nas proximidades da Terra é constante e que a força eletrostática entre cargas elétricas depende da distância entre elas. Nesse caso, o cálculo da energia potencial elétrica deve ser bem mais complicado.

– Professor, nós vamos calcular a energia potencial elétrica de uma carga elétrica que sofre a ação de uma força elétrica variável no espaço?

– É claro que não podemos obter a expressão da energia potencial elétrica nesse caso. A matemática necessária para calculá-la não é conhecida de vocês. Por isso é que vocês só aprenderam a calcular a energia potencial gravitacional nas vizinhanças da superfície terrestre. Não se esqueçam de que a força gravitacional que a Terra exerce sobre os corpos também não é constante. Ela varia de acordo com a distância da massa ao centro da Terra e só pode ser considerada constante quando a altura da massa em relação ao planeta é muito menor do que o raio da Terra (6.400km). Isso ocorre na maioria dos problemas que vocês estudam em Mecânica. Nestas aulas nós só vamos calcular a energia potencial de uma carga elétrica que sofre a ação de uma força constante, isto é, de uma carga elétrica que se encontra em uma região onde o campo elétrico é constante.

Ronaldo lembra da complicada expressão do campo elétrico produzido pelas cargas elétricas pontuais. Não consegue imaginar a distribuição de cargas que produz um campo elétrico constante.

– Professor, que distribuição de cargas produz um campo elétrico constante?

O professor recorre às suas fotografias de linhas de campo elétrico, do fubá alinhado pelo campo elétrico criado por dois terminais lineares com cargas  $q$  e  $-q$ , para mostrar que o campo elétrico longe das bordas dos terminais é praticamente constante.

– Placas retangulares condutoras e paralelas (capacitor plano) carregadas com cargas  $q$  e  $-q$  produzem um campo elétrico muito parecido com este da fotografia. Ele é praticamente constante no interior das placas, sempre que as dimensões das placas forem bem maiores do que a distância entre elas.

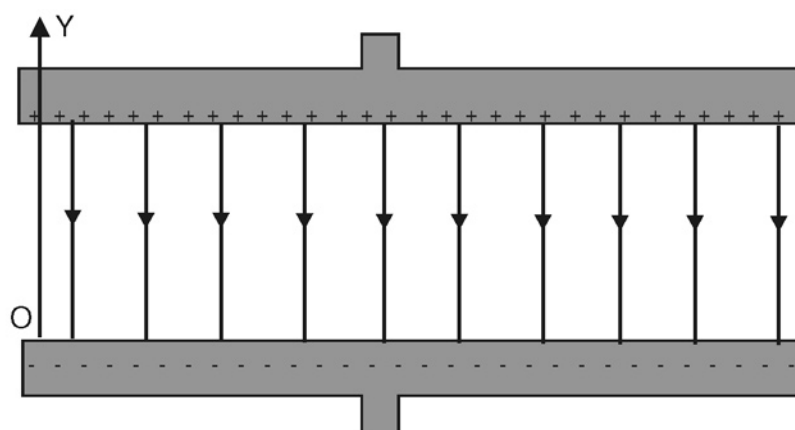


Figura 51 - Capacitor plano

O professor continua a aula.

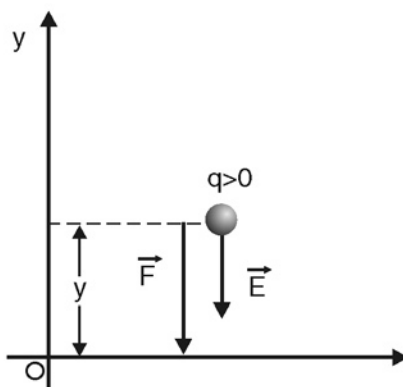


Figura 52- Deslocamento de uma carga elétrica positiva em uma região onde existe um campo elétrico constante.

– Quando uma carga elétrica positiva se desloca com um sentido contrário ao da força elétrica, esta transforma energia cinética em energia potencial elétrica. Por isso, a energia potencial da carga elétrica positiva deve aumentar quando ela é deslocada no sentido contrário ao da força elétrica.

E continua:

– Quando uma carga elétrica positiva se desloca no mesmo sentido da força elétrica, esta transforma energia potencial elétrica em energia cinética. Por isso, a energia potencial da carga elétrica positiva, se deslocada no mesmo sentido da força elétrica, deve diminuir.

Utilizando a analogia sugerida pelas expressões das forças elétricas e das forças gravitacionais, podemos obter energia potencial elétrica associada a uma carga pontual que está em uma região onde exista um campo elétrico constante. Trocamos a força gravitacional pela força elétrica na expressão que fornece a energia potencial gravitacional

$$mg \rightarrow qE$$

$$E_{PG} = mgy \rightarrow E_{PE} = qEy$$

Essa expressão mostra que a energia potencial elétrica de uma carga elétrica positiva é, nesse caso, uma função crescente de  $y$ . Uma carga elétrica positiva caminha espontaneamente para as regiões onde a energia potencial elétrica é menor.

Ronaldo lembra-se da constante que a irmã introduziu na energia potencial gravitacional. E pergunta:

– Professor, posso definir a energia potencial elétrica adicionando uma constante à sua expressão?

– É claro que pode. Você vai mudar apenas a origem da energia potencial elétrica, isto é, o ponto onde a energia potencial elétrica é nula. É comum utilizar-se a constante  $C$  nula para simplificar a expressão da energia potencial elétrica.

– A notação  $E_{PE}$  que você utilizou para representar a energia potencial elétrica é muito parecida com a notação que representa o campo elétrico  $E$ . É possível usar outra letra para denominar a energia potencial elétrica e evitar confusões futuras?

– Vou denominar a energia potencial elétrica de  $U_E$ .

Marina sabe que a interação eletrostática é parecida com a interação gravitacional, mas existe uma importante diferença entre elas: as massas sempre se atraem e as cargas elétricas podem se repelir.

– Professor, essa expressão da energia potencial vale também quando a carga elétrica  $q$  é negativa?

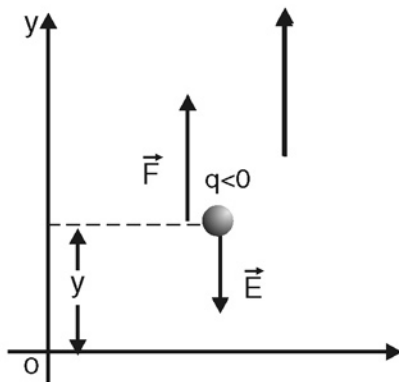


Figura 53- Deslocamento de uma carga elétrica negativa em uma região onde existe um campo

– Vale, sim. Observe que, nesse caso, a energia potencial elétrica também aumenta quando nos deslocamos no sentido contrário ao da força elétrica e diminui quando nos deslocamos no sentido da força elétrica. Então, é de se esperar que a energia potencial seja uma função decrescente de  $y$ . Esse fato é contemplado pela expressão anterior, pois  $q$  é um número negativo.

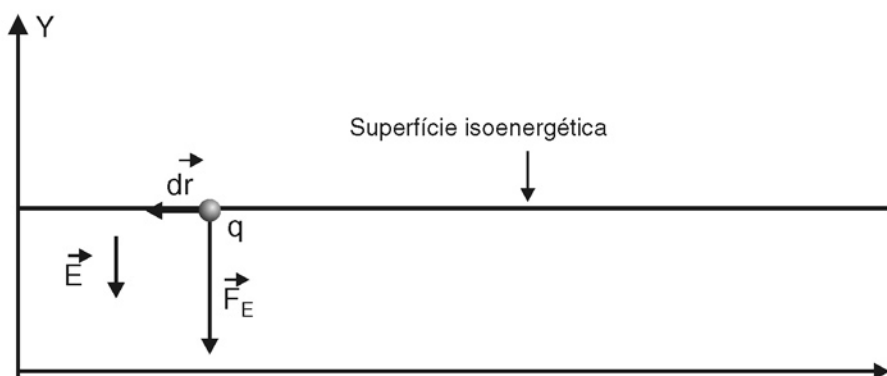


Figura 54 - Superfície isoenergética

O trabalho realizado pela força elétrica que atua em uma carga elétrica que se desloca em um plano perpendicular à direção do campo elétrico é nulo porque

$$T = F_E dr \cos(90^\circ) = 0.$$

Por isso, a energia potencial elétrica sobre esse plano é constante. Denominamos as superfícies onde a energia potencial é constante de superfícies isoenergéticas. Esse plano é um plano isoenergético.

– Professor, o campo elétrico é sempre perpendicular às superfícies isoenergéticas?

– Claro que é! As forças elétricas têm que ser perpendiculares às superfícies isoenergéticas porque elas não podem realizar trabalho sobre as cargas elétricas que se deslocam sobre as superfícies isoenergéticas.

Ronaldo lembra da irmã com carinho. A discussão da noite anterior estava permitindo que ele acompanhasse as explicações superficiais do seu professor, mas ele está cada vez mais ansioso para entender o que é voltagem. Será que o professor vai demorar muito para explicar isso?

A aula continua em ritmo acelerado.

– A energia elétrica da carga  $q$  depende do campo elétrico, do ponto do espaço onde se encontra a carga elétrica e do valor da carga. A energia potencial elétrica por unidade de carga é denominada **potencial elétrico**  $V$ .

$$V = \frac{U_E}{q} = E\eta$$

A unidade de potencial elétrico é Joule/Coulomb, que é denominada Volt. O potencial elétrico é uma função apenas do campo elétrico e do ponto do espaço. Dizemos que o potencial elétrico é uma propriedade do campo elétrico. As superfícies que têm o mesmo valor do potencial elétrico são denominadas superfícies equipotenciais.

– Professor, as superfícies isoenergéticas são também equipotenciais?

– As superfícies isoenergéticas são equipotenciais também porque o potencial elétrico é a energia potencial por unidade de carga elétrica. Se a energia se mantém constante sobre a superfície o potencial também se manterá.

Ao analisar o potencial  $V = E\eta$ , podemos chegar a algumas conclusões:

1. As cargas elétricas positivas se deslocam espontaneamente para as regiões de menor potencial elétrico (verifique Figura 52) e as negativas, para as regiões de maior potencial elétrico (verifique Figura 53).
2. O potencial elétrico é maior nas regiões próximas às cargas positivas (verifique Figura 51)
3. O campo elétrico aponta para as regiões onde o potencial elétrico é menor.
4. O campo elétrico é perpendicular às superfícies equipotenciais (verifique Figura 54)

POTENCIAL ELÉTRICO

SUPERFÍCIES  
EQUIPOTENCIAIS

5. A relação entre o módulo do campo elétrico e a variação da energia potencial na sua direção é

$$E = \frac{|\Delta V|}{|\Delta y|},$$

onde  $|\Delta y|$  é o deslocamento na direção do campo elétrico.

Alguém pergunta: “Essas conclusões são válidas para um campo elétrico que não é constante”?

– As conclusões de 1 até 5 são verdadeiras também para campos elétricos que não são constantes. Quem trazer uma justificativa qualitativa para isso na próxima aula ganha um ponto na média.

A aula continua: “O campo elétrico criado por cargas elétricas em repouso está associado às forças eletrostáticas que são conservativas. Por isso, dizemos que ele também é conservativo. “

O que comumente é denominado **voltagem** é a diferença de potencial entre dois pontos. Por exemplo, quando se diz que uma pilha tem 1,5V significa que a diferença de potencial entre os terminais da pilha vale  $V_+ - V_- = 1,5V$ . Isso significa que uma carga elétrica positiva  $q > 0$  irá ganhar uma energia  $1,5q$  quando se desloca do terminal positivo para o negativo, e uma carga elétrica negativa  $q < 0$  vai ganhar uma energia  $-1,5q$  quando se desloca do terminal negativo para o positivo.

VOLTAGEM

Finalmente surgiu a explicação do que era voltagem!

Toca o sinal de fim das aulas. Todos saem correndo. Ronaldo arruma sua mochila com calma. Um sorriso surge nos seus lábios, pois acabara de compreender o que a irmã quis dizer quando explicou a razão pela qual a primeira lâmpada parecia estar com defeito: as cargas elétricas do fio da lâmpada tinham recebido uma quantidade de energia menor do que a planejada pelo fabricante. Afinal de contas, as lâmpadas foram construídas para uma voltagem de 220V.

- .....
1. O potencial elétrico é a energia potencial elétrica por unidade de carga

$$\Delta V = \frac{\Delta E_{PE}}{q}.$$

2. O potencial elétrico só depende do campo elétrico e do ponto do espaço.
3. As cargas elétricas positivas se deslocam espontaneamente para as regiões onde o potencial elétrico diminui e as cargas elétricas negativas se deslocam espontaneamente para as regiões onde o potencial elétrico aumenta.
4. O potencial elétrico é maior nas regiões próximas às cargas positivas.
5. O campo elétrico aponta para as regiões onde o potencial elétrico é menor.
6. Superfície equipotencial é uma superfície onde o potencial elétrico é constante.
7. O campo elétrico é perpendicular às superfícies equipotenciais.
8. A relação entre o módulo do campo elétrico e a variação do potencial elétrico na sua direção é

$$E = \frac{|\Delta V|}{|\Delta y|},$$

onde  $|\Delta y|$  é o deslocamento na direção do campo elétrico.

.....

## Leituras e exercícios 7

Leia sobre o assunto “Voltagem em um campo uniforme” na seção 9.6 do capítulo 9 do livro de A. Máximo e B. Alvarenga - volume único.

Desse mesmo capítulo faça o exercício de fixação de 61, e problemas e questões de vestibulares 13.

Leia sobre os assuntos “A tensão elétrica” na seção 1.5.3 do livro Física 3 (eletromagnetismo), do GREF.

### Exercício 7

Utilize argumentos qualitativos para se convencer da validade geral das conclusões de 1 até 6 enunciadas no texto “Uma aula de voltagem para vestibulandos”.

### Exercício 8

Escreva a expressão do potencial elétrico associada a um campo elétrico constante  $E=1000\text{V/m}$  representado na figura abaixo nos seguintes casos:

- a) A origem do potencial elétrico está em  $y=0\text{ m}$ .
- b) A origem do potencial elétrico está em  $y=1\text{ m}$ .

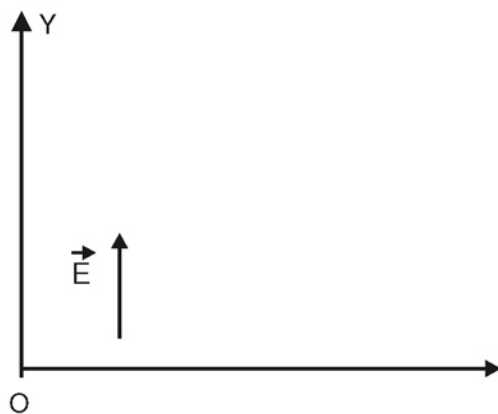


Figura 55

Verifique, neste exercício, as propriedades listadas na página 78 (1 a 5).

## Exercício 9

Na fotografia abaixo, sementes de grama foram colocadas sobre óleo na presença de dois terminais carregados com cargas opostas. Um dos terminais é um disco com raio pequeno e o outro é uma coroa circular (não aparece na fotografia). O centro do disco coincide com o centro da coroa circular. Desenhe uma linha equipotencial. Justifique a sua resposta?

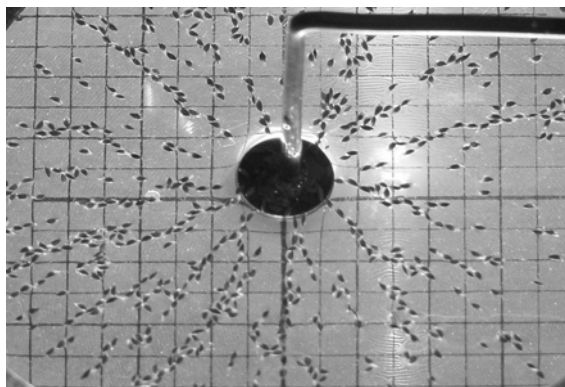


Figura 56 – Terminais carregados imersos em óleo coberto por sementes de grama.

Nesta aula apresentamos o princípio da conservação da energia, definimos energia potencial e calculamos a energia potencial de uma força constante. Foram obtidos a energia potencial elétrica e o potencial elétrico associados a um campo elétrico constante.



## Prática 1 - Mapeamento de equipotenciais



Esta prática tem como objetivo desenvolver sua capacidade de investigar a configuração do campo elétrico, através da medida do potencial elétrico, e deve ser realizada no pólo. Ela contém somente um experimento.

**Experimento 1 - Mapeamento do campo em uma cuba eletrolítica com eletrodos retos.**

**Experimento 2 - Mapeamento do campo em uma cuba eletrolítica com eletrodos circulares.**

*Antes de iniciá-la, leia o manual de utilização do voltímetro digital que está disponível no pólo (multímetro).*

***Cuidado!!!*** Os painéis que aparecem no texto são do multímetro digital ET-2041 da Minipa. O multímetro do seu pólo pode ser diferente.

*Material da Prática 1*

- 1 cuba de acrílico, com papel milimetrado colado externamente ao seu fundo.
- 1 nível de bolha circular.
- 1 par de eletrodos retos iguais.
- 1 par de eletrodos circulares (um grande e um pequeno).
- 1 par de presilhas dos eletrodos à cuba.
- 1 fonte de C.C. 12V.
- 1 voltímetro digital.
- fios com garras.

*Informações preliminares*

Nesse experimento, ao se ligar a fonte de corrente elétrica contínua aos terminais dos eletrodos, aparece uma corrente elétrica na solução aquosa que é fracamente condutora. No interior da solução se estabelece campo elétrico conservativo que dá origem a uma distribuição de potencial elétrico. Essa distribuição será investigada com um voltímetro com elevada impedância permitindo o mapeamento do campo elétrico.

## Experimento 1 - Mapeamento do campo em uma cuba eletrolítica com eletrodos retos



### Material do experimento 1

- 1 cuba de acrílico, com papel milimetrado colado externamente ao seu fundo.
- 1 nível de bolha circular.
- 1 par de eletrodos retos iguais.
- 1 par de presilhas dos eletrodos à cuba.
- 1 fonte de C.C. 12V.
- 1 voltímetro digital.
- fios com garras.

### Atividades experimentais

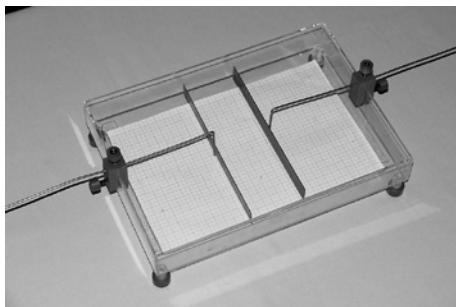


Figura 57 - Cuba com eletrodos retos

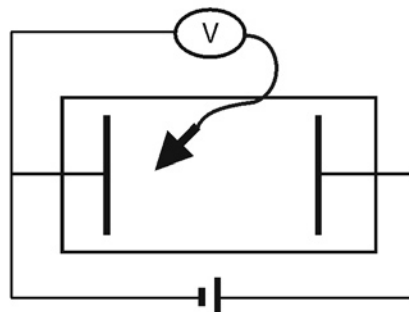


Figura 58

1. Desenhe em uma folha de papel milimetrado os dois eletrodos retos como mostra a Figura 51. Marque os pontos onde o potencial elétrico vai ser medido (1, 2, 3 etc) . Pregue o papel milimetrado no fundo da cuba pelo lado de fora.

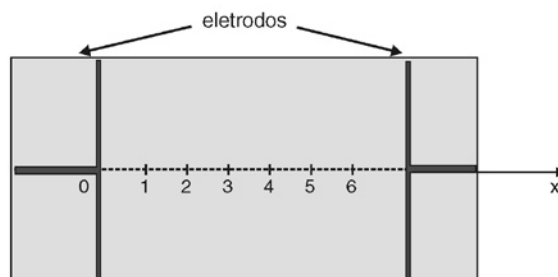


Figura 59 - Papel milimetrado para eletrodos retos.

2. Instale os eletrodos retos sobre o seu desenho no papel milimetrado (Figura 57) e efetue as conexões mostradas na Figura 58.

3. A cuba deve ser inicialmente nivelada, com o auxílio de um nível de bolha circular, ajustando-se seus suportes reguláveis. O mau nivelamento torna não uniforme a profundidade da água, criando uma não homogeneidade nas propriedades elétricas do meio (a resistência elétrica entre dois pontos depende da área da secção reta do volume que os separa).

4. Utilize água comum da torneira. Ela fornece uma solução com a condutividade adequada.

5. A água não deve encobrir os eletrodos utilizados, devendo ter uma profundidade de cerca de  $1/2$  a  $2/3$  da altura dos mesmos.

6. Os eletrodos devem ser colocados de modo que, uma vez fixados às presilhas laterais, tenham bom contato mecânico com o fundo da cuba. Se não ficarem bem encostados ao fundo, haverá linhas de corrente espúrias passando sob eles.

7. Ligue o multímetro na escala de 20V para corrente contínua como na Figura 60. Ligue a ponta de prova preta do multímetro no conector aterrado(COM) e a ponta de prova vermelha no conector para medir voltagens.



Figura 60 - Escala de 20V para corrente contínua.

**Cuidado!!! O modelo do seu multímetro pode ser diferente!!!**

8. Pondo a ponta de prova de referência do voltímetro em contato com o eletrodo da esquerda (Figura 58) e a outra ponta de prova na água, meça o valor da diferença de potencial entre esse ponto e o eletrodo, a cada 1 ou 2 cm ao longo de segmento de reta perpendicular aos eletrodos e que passe próximo aos seus centros. Coloque os dados na Tabela 1.

Tabela 1

Distância $x$	$\delta x$	$(V_x - V_0)$	$\delta(V_x - V_0)$

Construa um gráfico de  $V$  *versus* a distância ao eletrodo da esquerda (Figura 58). Qual o resultado esperado? O que você obteve? Que informação fornece a inclinação do gráfico?

Veja o Complemento 3 do Módulo 3 “Construção de um gráfico”.



## Experimento 2 - Mapeamento do campo em uma cuba eletrolítica com eletrodos circulares

### Material do experimento 1

- 1 cuba de acrílico, com papel milimetrado colado externamente ao seu fundo.
- 1 nível de bolha circular.
- 1 par de eletrodos retos circulares.
- 1 par de presilhas dos eletrodos à cuba.
- 1 fonte de C.C. 12V.
- 1 voltímetro digital.
- fios com garras.

### Atividades experimentais

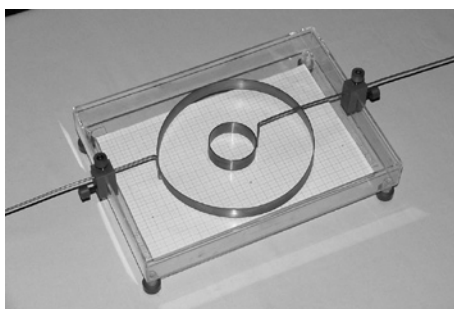


Foto 61 - Cuba com eletrodos circulares

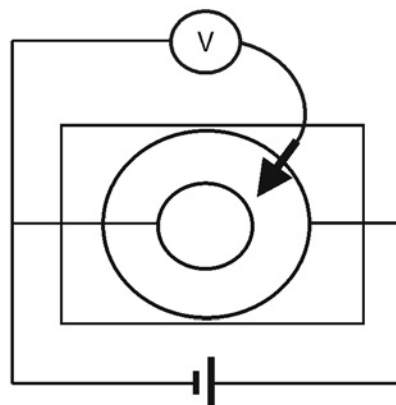


Figura 62

1. Estime os raios dos círculos dos eletrodos. Desenhe em uma folha de papel milimetrado os dois eletrodos circulares como mostra a Figura 61. Marque os pontos onde o potencial elétrico vai ser medido (representados na Figura 63 por traços verticais |). Pregue o papel milimetrado no fundo da cuba pelo lado de fora.

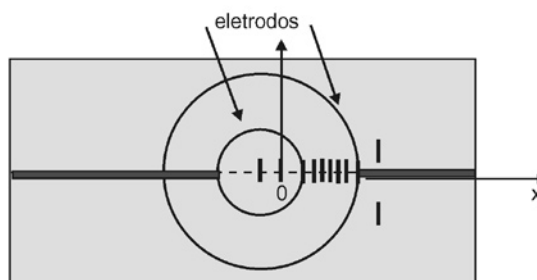


Figura 63 - Desenho no papel milimetrado dos eletrodos circulares.

2. Instale os eletrodos circulares sobre as figuras desenhadas no papel milimetrado. Efetue as conexões mostradas na Figura 62. Ligue o multímetro como na Figura 60 (igual ao experimento 1).

3. Pondo a ponta de prova de referência do voltímetro (multímetro) em contato com o eletrodo interno (aquele que tem o menor raio-fig 61) e a outra ponta de prova na água, meça o valor da diferença de potencial, em vários pontos ao longo de uma linha radial que vai do centro do eletrodo central menor, passando pela região entre os dois eletrodos e pegando alguns pontos externos ao eletrodo maior.

Tabela 2

Distância $x$	$\delta x$	$(V_x - V_0)$	$\delta(V_x - V_0)$

A incerteza na voltagem tem que ser lida no manual do fabricante do multímetro.

5. Construa um gráfico de  $V$  *versus* a distância  $x$  ao centro do eletrodo menor. Qual o resultado esperado? O que você obteve? Que informação fornece a inclinação do gráfico em cada região?

6. Inverta a polaridade dos eletrodos e repita as medidas utilizando os mesmos pontos da Tabela 2. Coloque o resultado na Tabela 3. As diferenças de potencial entre os dois primeiros pontos das Tabelas 2 e 3 são iguais? Comente o resultado.

Tabela 3

Distância $x$	$\delta x$	$(V_x - V_0)$	$\delta(V_x - V_0)$

A incerteza na voltagem tem que ser lida no manual do fabricante do multímetro.





## A corrente elétrica e as suas fontes

### Objetivos

Discutir a corrente elétrica e as suas fontes.

### Introdução

Esta unidade tem como finalidade discutir as correntes elétricas e suas fontes e é constituída de três partes:

**Que sei sobre correntes elétricas e suas fontes?** é um questionário que organiza seus conhecimentos prévios sobre as correntes elétricas e suas fontes.

A parte **Correntes elétricas e suas fontes** contém dois textos e atividades. O primeiro texto discute a corrente elétrica; o segundo é um resumo das fontes de corrente elétrica.

Na **Leituras e exercícios 8** há indicações de leituras e exercícios. As leituras são sobre os assuntos abordados; os textos estão nos livros *Física - volume único*, de Beatriz Alvarenga e Antonio Máximo, e *Física 3 (Eletromagnetismo)*, do GREF.

Faça a leitura de forma sistemática, realizando as atividades (exercícios e leituras extras) sugeridas ao longo do texto. Use seu caderno para anotações e comentários e para registrar resolução das atividades.

Não deixe de refazer nenhum dos exemplos sugeridos, nem os exercícios.

Bom trabalho!

## Que sei sobre correntes elétricas e as suas fontes?

As questões apresentadas abaixo têm como finalidade investigar e organizar as suas idéias prévias sobre correntes elétricas e as suas fontes. Escreva as respostas às questões de forma organizada em seu caderno. Não consulte livros nem notas de aulas. Não deixe de respondê-las. A comparação entre as suas idéias e conhecimentos sobre correntes elétricas e as suas fontes antes e depois de trabalhar este módulo é importante para o seu aprendizado.



### Questionário 4

1. O que é *corrente elétrica*?
2. Quais são os *transportadores de corrente elétrica* nos condutores metálicos?
3. Quais são os *transportadores de corrente elétrica* nos eletrólitos?
4. O que é a *corrente elétrica convencional*?
5. O que é uma *corrente elétrica contínua*?
6. O que é uma *corrente elétrica alternada*?
7. Cite algumas *fontes de corrente elétrica contínua*.
8. Cite uma *fonte de corrente alternada*.
9. O que é um campo elétrico motor?
10. O que é o *efeito Joule* ?
11. O que é *resistência elétrica*?
12. Qual é a *lei de Ohm*?

## Correntes elétricas

### “Um curto-circuito”



Fátima está no seu quarto, descansando. Ronaldo, a seu lado, se diverte lendo revistas em quadrinhos. O resto da família não está em casa.

Fátima observa que Ronaldo está com pouca luz para ler e liga o abajur. A tomada do abajur solta faíscas e a luz do quarto se apaga. Na escuridão, Ronaldo se junta a Fátima.

- O que houve, irmãzinha?
- A tomada do abajur está em curto.
- Continuo não entendendo nada.
- Vamos resolver primeiro o problema da luz; depois te explico o que aconteceu.

Fátima abre a sua escrivaninha para apanhar uma pequena lanterna, desliga o abajur da tomada e vai até a cozinha. Ronaldo vai atrás dela. Fátima acende a luz da cozinha e desliga a lanterna.

- A luz consertou sozinha?
- Não é bem assim. O disjuntor do circuito da cozinha é um; o disjuntor do quarto é outro.
- Disjuntor! Como funciona isso?

Fátima ignora a pergunta do irmão e vai até a caixa de disjuntores. Liga o disjuntor que estava desligado. Volta para o seu quarto Ronaldo segue a irmã. Ela abre seu livro de eletricidade no capítulo de correntes elétricas e começa a falar, com aquele jeito de quem sabe tudo:

– Um átomo de um metal qualquer, isolado, é eletricamente neutro. Por exemplo, um átomo de cobre é constituído por um núcleo que contém 29 prótons cercados por 29 elétrons; o da prata contém 47 prótons e 47 elétrons. Já um fio metálico contém um número muito grande de partículas; por isso a sua estrutura é diferente. No interior do metal, cada átomo perde, em geral, um ou dois elétrons, tornando-se, portanto, um íon positivo. Os íons se arranjam de modo regular, constituindo uma rede cristalina tridimensional, (Figura 64). E mostra a figura ao irmão.

Esses elétrons perdidos ficam vagando pelos espaços vazios entre os íons.

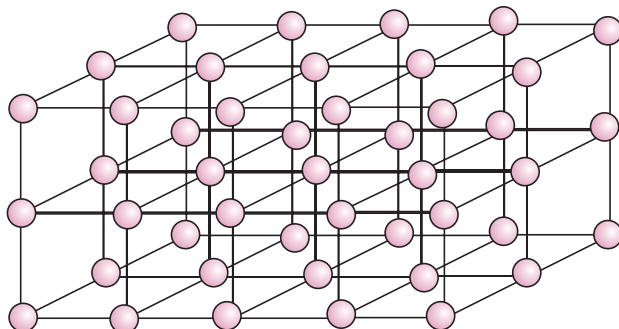


Figura 64 - Rede de íons de um metal

## ELÉTRONS LIVRES

Desse modo, o fio metálico fica eletricamente neutro. A distância entre dois íons da rede cristalina é da ordem de três vezes o raio do íon. Quer dizer, apenas cerca de 15% do volume total de um fio são ocupados pelos íons; o restante do espaço está disponível para o movimento de parte dos elétrons. Em outras palavras, num metal a grande maioria dos elétrons está presa na vizinhança dos núcleos, enquanto outros podem se deslocar livremente e por isso são denominados **elétrons livres**.

– Qual a ordem de grandeza do número de elétrons livres em um metal?

– É um número muito grande. Podemos fazer uma estimativa para um fio de cobre. Se considerarmos que há um elétron livre por átomo de cobre, a densidade dos elétrons livres por unidade de volume é igual à densidade dos átomos. A densidade volumétrica de átomos de cobre à temperatura ambiente é da ordem de  $8,92\text{g/cm}^3$ . O átomo-grama de cobre é  $63,5\text{ g/mol}$ . Portanto, o número de elétrons livres por unidade de volume é

$$n = \frac{6,02 \times 10^{23} \text{ átomos / mol}}{63,5 \text{ g / mol}} = 8,46 \times 10^{23} \text{ átomos / cm}^3.$$

– Que número enorme! Os elétrons livres podem sair do metal?

– Não. Eles são livres para se movimentarem apenas no interior do metal. Esse livre significa que as interações entre eles e os núcleos da rede iônica são fracas. As interações entre as superfícies dos metais e os elétrons livres são fortes. Por isso eles não conseguem sair dos metais.

– Quer dizer que as superfícies de um metal funcionam como as paredes de uma caixa?

– A idéia é essa. À temperatura ambiente, na região do espaço confinada pelas superfícies do metal, tanto os elétrons quanto os íons estão em movimento de origem térmica. Enquanto cada íon oscila em torno da sua posição de equilíbrio, o movimento de um elétron livre é do tipo térmico desordenado ou aleatório, como o de moléculas gasosas em recipientes fechados (ver Figura 65).

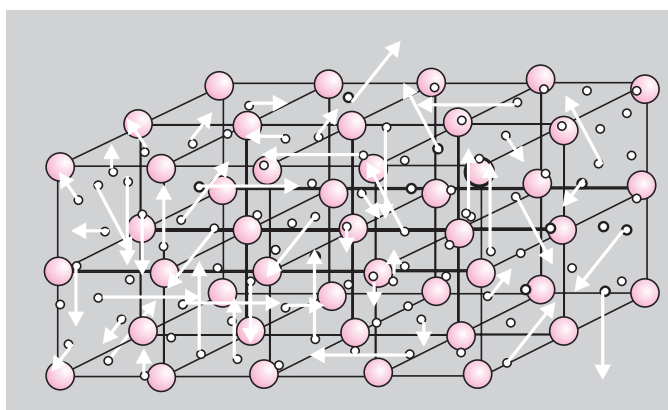


Figura 65 - Os elétrons têm um movimento caótico no interior do metal.

– Devido à interação dos elétrons livres com os íons, há equilíbrio térmico entre eles. Assim, a energia cinética dos elétrons livres é, em média, igual à dos íons da rede cristalina, e ambas dependem da temperatura do material. A velocidade média de um elétron livre em um metal é da ordem de 100.000m/s. A velocidade dos íons, na mesma temperatura, é muito menor, porque os íons são mais pesados do que os elétrons.

– O que isso tudo que você está falando tem a ver com o que aconteceu com o abajur?

– As lâmpadas só acendem quando os filamentos de tungstênio são percorridos por uma corrente elétrica.

– O que é a **corrente elétrica**?

– São **cargas elétricas em movimento**.

– Espere aí. Sei que existe corrente elétrica quando as cargas elétricas estão em movimento. O fio metálico tem elétrons livres que se deslocam com uma velocidade média de 100.000m/s e que uma lâmpada acende quando é atravessada por uma corrente elétrica. De acordo com esses fatos, as lâmpadas acenderiam mesmo quando desligadas: você acabou de dizer que uma lâmpada acende quando é atravessada por uma corrente elétrica.

– Você está fazendo confusão. Só existe corrente elétrica quando o movimento dos elétrons é ordenado (Figura 66a), isto é, quando o número de elétrons que atravessam uma área imaginária *A* aberta localizada no interior do metal em um sentido é maior do que o número de elétrons que atravessam a mesma área em sentido contrário. Veja só este esquema (*mostra o papel*):

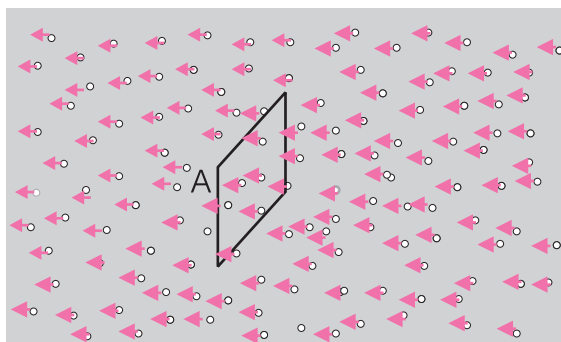


Figura 66a - Quando o movimento dos elétrons é ordenado, a corrente elétrica não é nula.

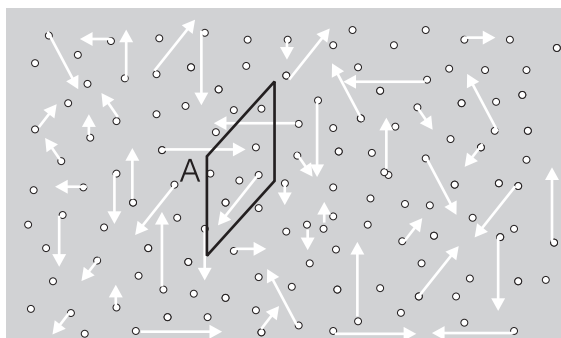


Figura 66b - Quando o movimento dos elétrons é caótico, a corrente elétrica é nula.

#### CORRENTE ELÉTRICA

Quando o movimento dos elétrons é caótico (Figura 66b), o número de elétrons que atravessam a área A em um sentido é igual ao número de elétrons que atravessam A em sentido contrário. Portanto, a corrente elétrica é nula.

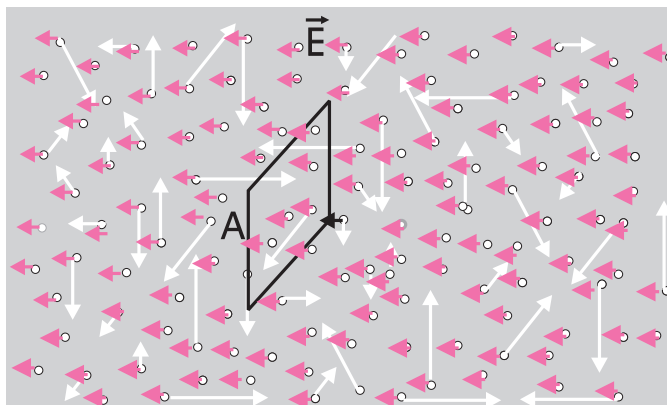


Figura 67 - Na presença de um campo elétrico externo, os elétrons adquirem uma velocidade média no sentido contrário ao do campo elétrico.

– Quer dizer que quando ligamos um fio condutor em uma tomada ou em uma pilha, os elétrons passam a ter um sentido preferencial de movimento? Por quê?

– Quando um metal é ligado a uma tomada ou a uma pilha, isto é, quando ele é ligado a uma fonte de energia elétrica, aparece um campo elétrico que atua sobre os elétrons livres e sobre os íons. Como os íons possuem grande massa e interagem entre si, eles praticamente não se movem; os elétrons livres, por sua vez, ao serem acelerados pelo campo elétrico acabam adquirindo um movimento que se adiciona ao movimento térmico (Figura 67). Esse movimento adicional se faz com uma velocidade que tem em média a mesma direção do campo elétrico criado pela fonte e sentido contrário ao dele. Essa velocidade é denominada **velocidade de avanço** (também denominada **velocidade de migração** ou **velocidade de deslocamento**). A velocidade de avanço está representada na Figura 67 pelas setas cinza. A representação das velocidades no desenho não está na escala correta.

– Quer dizer que, à medida que o tempo passa, os elétrons do metal que foi ligado a uma fonte de corrente elétrica ficam com uma velocidade de deslocamento maior?

– Não é bem assim. Não se esqueça de que os elétrons livres estão dentro da rede de íons e podem interagir entre si e com ela. Quando o metal é ligado a uma fonte de energia elétrica, a força elétrica que acelera os elétrons livres na direção do campo elétrico está sempre presente, fazendo com que a energia cinética desses elétrons aumente no intervalo de tempo entre duas colisões (com a rede ou com outros elétrons). Com a ocorrência de um choque, essa energia é em parte transferida aos íons da rede. Em outras palavras, o campo elétrico causa um aumento na energia cinética dos elétrons livres. Essa energia é transferida à rede cristalina por meio de choques, fazendo com que ela vibre mais intensamente, representando um aumento de sua energia interna.

VELOCIDADE DE AVANÇO  
OU VELOCIDADE DE  
DESLOCAMENTO

Esse aumento de vibração é percebido macroscopicamente como aumento da temperatura do fio, que passa a se comportar como uma fonte de calor para o meio. **O aquecimento de um condutor pela passagem de corrente elétrica é denominado efeito Joule.** No caso das lâmpadas incandescentes, os íons das redes reemitem parte da energia adquirida na colisão na forma de luz.

## EFEITO JOULE

– Que complicação!

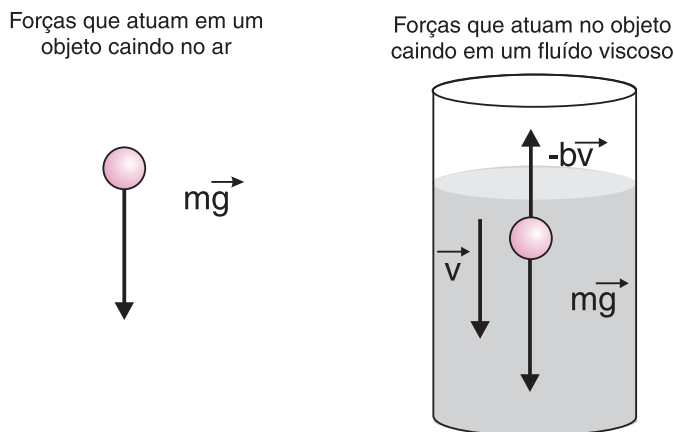


Figura 68 - Movimento de um objeto em um fluido viscoso.

– Para você entender melhor, vou fazer uma analogia com um sistema mecânico simples. Quando um objeto pequeno está em queda livre, toda a sua energia potencial gravitacional é transformada pela força peso em energia cinética do corpo. Quando o objeto cai no interior de um fluido viscoso contido em um tubo vertical, a força viscosa ( $\vec{F}_{\text{viscosa}} = -b\vec{v}$ ) exercida pelo fluido sobre o objeto é contrária ao movimento do objeto e proporcional à sua velocidade. A constante de proporcionalidade  $b$  depende da forma do objeto, do fluido e da temperatura. No início do movimento, a força peso e a força viscosa são diferentes. A força peso transforma energia potencial em energia cinética do objeto e a força viscosa transforma parte da energia cinética em energia calorífica. Com o aumento da velocidade do objeto, a força viscosa aumenta e a força resultante diminui. Depois de algum tempo a força viscosa se iguala à força peso e o objeto passa a se deslocar com uma velocidade constante e igual a  $\vec{v}_{\text{limite}} \cong \frac{m \cdot \vec{g}}{b}$ . Quando a viscosidade do líquido é alta, o objeto adquire rapidamente a velocidade limite. Na situação limite, toda a energia potencial gravitacional é transformada em energia calorífica. O movimento médio de um elétron no interior de um condutor percorrido por uma corrente elétrica é análogo ao movimento de um objeto sólido no interior de um fluido com viscosidade alta.

– Quem é o responsável, no caso dos elétrons, pelo aparecimento de uma força viscosa em nível macroscópico?

– São as colisões entre os elétrons e entre os elétrons e a rede de íons. O modelo matemático que trata a corrente elétrica como um fluido viscoso é capaz de prever e explicar a distribuição de correntes elétricas e de energia nos circuitos.

Ronaldo está exausto. Faz um grande esforço para compreender o que sua irmã está falando. Tenta resumir:

– Já entendi. A força elétrica exercida pelo campo elétrico da fonte transforma energia elétrica em energia cinética dos elétrons, da mesma forma que a força gravitacional transforma energia potencial gravitacional em energia cinética do objeto. As forças de interação que aparecem na colisão dos elétrons com a rede transformam parte da energia cinética dos elétrons em energia térmica dos íons, da mesma maneira que a força de atrito viscosa transforma a energia cinética do objeto em energia calorífica.

– Muito bem! Sua dedução está perfeita. É isso aí.

– Mas, afinal de contas, o que isso tudo tem a ver com o que aconteceu aqui?

– As interações dos elétrons livres com a rede de íons dependem do número de elétrons livres por unidade de volume, da temperatura do condutor e da tensão aplicada. O número de elétrons livres por unidade de volume varia de condutor para condutor. Por isso, as correntes elétricas que atravessam dois condutores diferentes ligados a uma mesma fonte de tensão são diferentes. Dizemos que o condutor que é atravessado pela corrente elétrica maior tem uma resistência elétrica menor e aquele com a menor corrente elétrica têm uma resistência elétrica maior.

– É possível medir experimentalmente a resistência elétrica de um condutor?

#### RESISTÊNCIA

– A **resistência** de um condutor é definida como sendo a razão entre a diferença de potencial aplicada nos terminais do condutor e a corrente elétrica, isto é:  $R = \frac{\Delta V}{i}$ .

A unidade de resistência elétrica é o Ohm ( $\Omega$ ). Portanto, para medir a resistência de um condutor é necessário medir a diferença de potencial entre os seus terminais e a corrente elétrica.

Ronaldo já está cansado, mas não consegue desligar do que a irmã está falando. Apesar do grande número de informações que recebeu, está certo de que vai entender pelo menos uma parte delas. Ela continua:

– Correntes altas podem produzir excesso de calor. Excesso de calor danifica lâmpadas, aparelhos eletrodomésticos etc. Por isso, em toda residência existem dispositivos que bloqueiam a passagem de corrente elétrica quando ela se torna muito alta.

Ronaldo deduz: “Aqui em casa são os disjuntores?”



– Isso mesmo. Em alguns aparelhos eletrodomésticos são os fusíveis que bloqueiam. Não importa agora como eles funcionam. Numa residência, os disjuntores bloqueiam a passagem de corrente elétrica quando ela atinge um valor maior do que aquele que pode danificar a instalação elétrica e os aparelhos eletrodomésticos. Para cada tipo de sistema existe uma corrente elétrica máxima permitida.

– Quer dizer que quando você ligou o abajur apareceu no disjuntor uma corrente elétrica maior do que ele suportava e ele desligou? Por que isso aconteceu?

– Os fios que conduzem a corrente elétrica para o abajur são de cobre. Eles são recobertos por um material isolante que evita a passagem de corrente elétrica de um fio para o outro. Depois de algum tempo de uso, o aquecimento produzido nos fios, devido ao efeito Joule, pode degradar o isolante que recobre os fios. Deve ter sido isso que ocorreu com os fios da base da tomada. Quando liguei o interruptor do abajur, foi estabelecida uma diferença de potencial de 110V entre os fios. A resistência entre os dois fios de cobre em contato é muito pequena, por isso a corrente elétrica que se estabeleceu entre eles foi muito grande. Ela ultrapassou o valor da corrente elétrica suportada pelo disjuntor e ele desligou. Quando ligamos, através de um condutor com resistência nula, dois pontos com potenciais elétricos diferentes, provocamos um **curto-circuito**. Fátima abre a tomada do abajur e mostra ao irmão os dois fios de cobre fundidos pelo calor produzido pelo efeito Joule, pela corrente elétrica.

## CURTO-CIRCUITO

Ronaldo sorri. Antes que a irmã resolva explicar mais alguma coisa, sai correndo para seu quarto com a sua coleção de revistas em quadrinhos, gritando:

– Chega, tá!

Mas ele ainda ouve Fátima dizer:

– A unidade de corrente elétrica no sistema MKSA é o *Ampère* (A).

.....

1. A resistência elétrica  $R$  de um condutor é  $R = \frac{\Delta V}{i}$ .
2. O efeito Joule é o aquecimento de um condutor que é percorrido por uma corrente elétrica.

.....

## Fontes de corrente elétrica

### “Arrombando um armário mágico”



Fátima está na universidade. Ana invade o quarto da irmã e abre seu armário de experimentos. Olha com curiosidade e resolve apanhar um circuito elétrico que contém várias lâmpadas pequenas e alguns fios. Começa a ligar os fios de várias formas e não consegue acender as lâmpadas. Apesar de ficar irritada, continua tentando. Estava tão concentrada que se assusta com as risadas de Fátima e Ronaldo, que tinham acabado de entrar no quarto. Apesar do medo de ser chamada à atenção por ter mexido no armário da irmã, resmunga. “Não consigo acender estas lâmpadas. Já liguei os fios de várias formas!”

– Você não sabe que não pode mexer no meu armário?

– Não brigue comigo. Os meus brinquedos já não têm nenhuma surpresa. Mas o seu armário...

– Brigo sim. Você pode se machucar ou quebrar alguma coisa.

Ronaldo fica com pena da irmãzinha e resolve distrair Fátima para desviar a discussão. Apanha um bastão de PVC que estava caído no chão e esfrega-o com lã. Aproxima o bastão do circuito utilizado por Ana anunciando que vai acender a luz. A luz continua apagada. Fátima, irritada, comenta.

– O campo criado pelas cargas do bastão não cria corrente elétrica, porque ele é conservativo.

Ana escapa rapidamente. Ronaldo sorri. Conseguira distrair Fátima. Agora tinha que ouvir sem reclamar as explicações detalhadas da irmã.

– Não entendi nada, explica melhor.

– A luz só acende quando existe uma corrente elétrica. Você já sabe que um condutor aquece quando é percorrido por uma corrente elétrica. Esse aquecimento se dá devido à perda de energia dos elétrons através dos processos de colisão com a rede cristalina ou entre elétrons. O campo elétrico criado pelas cargas elétricas do bastão não consegue repor a energia perdida.

– Continuo sem entender por que o campo eletrostático não pode criar uma corrente elétrica...

– A energia fornecida pelo campo eletrostático é a variação de energia potencial elétrica. Quando o elétron percorre todo o circuito, ele sai de um ponto e retorna a ele. Portanto, a variação de energia potencial é nula.

– Quer dizer que, nesse caso, a energia que o campo elétrico fornece ao elétron em uma parte do circuito é retirada do elétron pelo campo na outra parte do circuito?

– Isso mesmo. Então o campo eletrostático não pode fornecer a energia que foi perdida na forma de calor e manter a corrente elétrica circulando. Somente as chamadas **fontes de corrente elétricas** são capazes de manter uma corrente elétrica. Elas criam um campo elétrico que não é conservativo. Eles fornecem aos elétrons que percorrem o circuito completo a energia que foi perdida na forma de calor.

Fátima retira pilhas da sua gaveta e coloca-as no circuito. As lâmpadas acendem.

– O campo elétrico criado pelas cargas elétricas acumuladas nos terminais das pilhas e nos condutores é de natureza eletrostática. Ele existe em todo o espaço e força os elétrons dos condutores externos a caminhar para os pontos de maior potencial elétrico. O campo elétrico de natureza química criado pela pilha só existe no interior da pilha. É denominado **campo elétrico motor**. Ao fornecer energia para as cargas elétricas, o campo elétrico motor força as cargas elétricas positivas a caminhar para as regiões de maior potencial elétrico e as negativas para as regiões de menor potencial elétrico. É ele o responsável pela reposição da energia perdida na forma de calor.

– Estudei em Química que nos terminais das pilhas existem reações de óxido-redução e acúmulo de cargas elétricas. No eletrólito existe movimento dos íons. O campo elétrico que atua nos íons é o campo elétrico motor, o campo eletrostático ou ambos?

– O campo elétrico que atua nos íons é o campo elétrico resultante. Veja o exemplo da pilha de Daniel (Figura 69). Nela temos um terminal de zinco e um terminal de cobre. O terminal de zinco fica imerso na solução de sulfato de zinco ( $\text{ZnSO}_4$ ), e o de cobre na solução de sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ). O contato elétrico entre as soluções é mantido por uma ponte salina que contém uma solução de sulfato de potássio ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ).



Quando o terminal de zinco é colocado na solução de sulfato de potássio, o Zn se oxida passando para a solução deixando elétrons na placa de zinco. O cobre se reduz e adere à placa de cobre, criando sobre ela uma carga elétrica positiva. A passagem do zinco para a solução e a aderência do cobre à placa de cobre continuam até que o campo eletrostático criado pelas cargas elétricas dos terminais anule o campo elétrico motor. Como o campo que atua nos íons é o campo resultante, o movimento dos íons é interrompido.

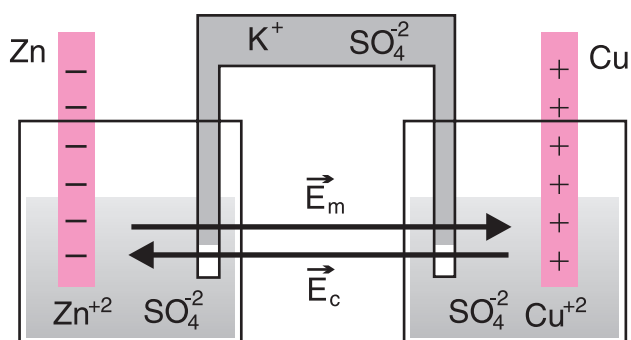


Figura 69 - Pilha de Daniel aberta.

FONTES DE CORRENTE ELÉTRICAS

CAMPO ELÉTRICO MOTOR

Essa situação que você descreveu corresponde à pilha aberta?

– Isso mesmo. Na pilha aberta, o campo eletrostático em módulo é igual ao campo elétrico motor. Será que você consegue refletir um pouco e concluir o que acontece quando fechamos o circuito, isto é, quando ligamos os terminais da lâmpada aos terminais da pilha por condutores?

– Os condutores criam um caminho natural para que os elétrons que estão na placa de zinco se desloquem para a placa de cobre. O acúmulo de cargas elétricas nos terminais da pilha diminui, tornando o campo elétrico motor maior do que o campo eletrostático. O campo elétrico resultante passa a ter o sentido do campo elétrico motor. Ele força os íons da solução a se deslocarem em sentidos opostos. As reações de óxido-redução se reiniciam e a corrente elétrica se estabelece.

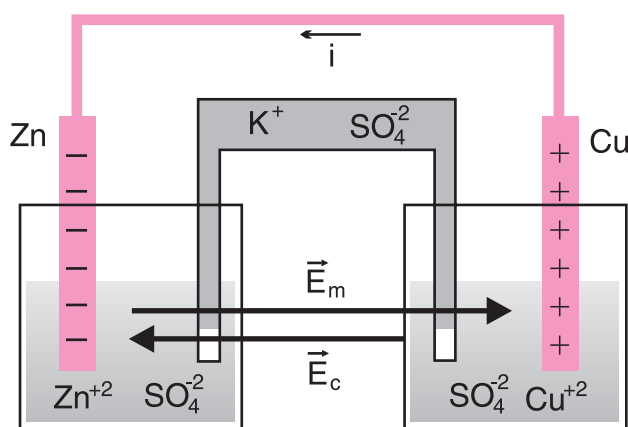


Figura 70 - Pilha de Daniel fechada.

– Sua conclusão está correta.

– Para que serve a ponte salina?

– O zinco oxidado passa para a solução, aumentando o número de cargas positivas na solução de sulfato de zinco. O cobre que se reduz sai da solução de sulfato de cobre, diminuindo o número de cargas elétricas positivas na solução de sulfato de cobre. A ponte salina garante a neutralidade das soluções. Ela fornece íons sulfato para a solução de sulfato de zinco e íons potássio para a solução de sulfato de cobre.

– Por que a pilha não produz corrente elétrica na lâmpada quando o circuito está aberto?

– Nesse caso, a lâmpada passa a fazer parte do terminal a que ela é ligada. Só vai existir uma corrente até o momento em que o campo motor ficar igual ao campo eletrostático. Essa corrente elétrica é pequena e não acende a luz.

A ponte salina é uma solução aquosa de um sal.

– Resumindo: só existe corrente elétrica em circuitos fechados se existir uma fonte de corrente elétrica. O campo elétrico da fonte (campo elétrico motor) não é conservativo. É ele que garante a manutenção da corrente elétrica, ao repor a energia dissipada na forma de calor, por efeito Joule.

– Seu raciocínio está perfeito.

– Sei também que as pilhas criam uma corrente elétrica, denominada corrente contínua, que é constante e tem apenas um sentido. A corrente elétrica fornecida pela rede elétrica também é uma corrente contínua?

– A fonte de corrente elétrica da rede elétrica é diferente daquela da bateria e das pilhas. O campo elétrico motor varia em módulo e em sentido com uma frequência de 60Hz. Portanto, a corrente elétrica que aparece nesse caso não é constante. Ela varia em intensidade e em sentido com a mesma frequência do campo elétrico motor.

Fátima se cala por alguns segundos. Gostava tanto de falar de Física para os outros que só agora percebera a manobra de Ronaldo para livrar a irmã de suas repreensões. Sorri, comenta com o irmão que só agora percebera sua manobra.

– Pronto, já falei demais. Agora vai se distrair um pouco.

.....

1. O campo elétrico que atua nas cargas elétricas de uma corrente elétrica é a soma do campo elétrico motor com o campo elétrico criado pelas cargas elétricas em repouso que se localizam nos terminais e nas superfícies dos condutores.

$$\vec{E} = \vec{E}_m + \vec{E}_c$$

O campo elétrico motor não é conservativo

.....

## Leituras e exercícios 8

Leia sobre os assuntos *Corrente elétrica, Sentido convencional da corrente, Intensidade de corrente, “Medida da intensidade de corrente, Diferença de potencial, Associação de Pilhas, Corrente contínua e alternada, O que é um curto circuito* nas seções 9.3 e 9.5 do capítulo 9 do livro *Física- volume único* de A. Máximo e B. Alvarenga.

Deste mesmo capítulo, faça os exercícios de fixação de 25 até 32, atividades VIII, IX, X, XI e questões de revisão de 10 até 20.

Leia sobre os assuntos *A Seqüência, Aparelhos Elétricos: Condições de Funcionamento, Fusíveis, Lâmpadas e Chuveiros: Estudo dos aparelhos resistentes, As partes metálicas dos Aparelhos elétricos, Modelo clássico da corrente elétrica, O metal sem corrente, A corrente elétrica e a sua causa, A tensão elétrica, O aquecimento nos condutores, As Diferentes Linguagens descrevendo o mesmo fenômeno*, nas seções 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.5.1 do livro *Física 3 (eletromagnetismo)*, do GREF.

Nesta aula, definimos o conceito de corrente elétrica. Aprendemos que somente os campos elétricos não conservativos são capazes de produzir uma corrente elétrica. Os campos elétricos não conservativos são produzidos pelas fontes de corrente elétrica.

## Prática 2 - Lei das malhas e lei dos nós



Esta prática tem como objetivo desenvolver sua capacidade de entender a distribuição de voltagens e de correntes elétricas em um circuito elétrico. Ela é composta de quatro experimentos:

Experimento 3 - A Lei de Ohm.

Experimento 4 - A voltagem nos terminais da fonte.

Experimento 5 - As Leis das Malhas.

Experimento 6 - A Lei dos Nós.

*Antes de realizar esta prática você deve ler o manual de utilização do multímetro que existe no seu pólo.*

**Cuidado!!!** Os painéis que aparecem no texto são do multímetro digital ET-2041 da Minipa. O multímetro do seu pólo pode ser diferente.

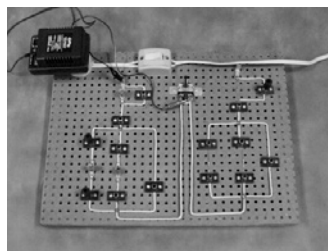


Figura 71 - Quadro de luz I

### Material necessário à Prática 2

- Eliminador de pilhas
- Quadro de luz I
- Multímetros (2)

Faça suas medidas com cuidado, mesmo que para isso você aparentemente perca muito tempo. Seja caprichoso. Sua atenção e seu cuidado na realização dos experimentos facilitarão seu trabalho mais tarde.

Bom trabalho!



## RESISTÊNCIA ELÉTRICA

### Experimento 3 - A Lei de Ohm

#### Informações preliminares

**Resistência elétrica** é a razão entre a voltagem aplicada aos terminais de um resistor e a corrente elétrica que atravessa o resistor.

$$R = \frac{\Delta V}{i}$$

Em geral, a resistência elétrica depende da corrente elétrica que percorre o resistor.

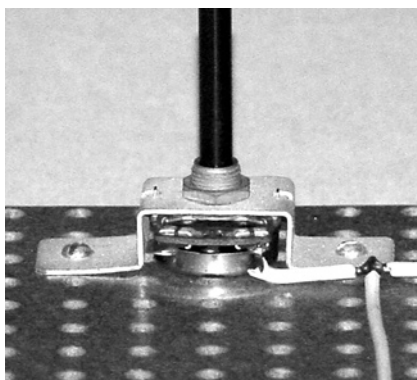


Figura 72a - Potenciômetro

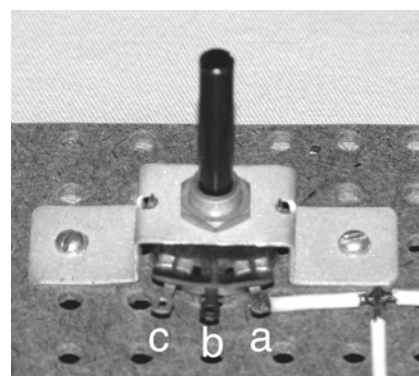


Figura 72b - Terminais do potenciômetro

O potenciômetro é uma resistência variável. O potenciômetro utilizado no quadro de luz I tem uma resistência que varia de  $0$  até  $400 \pm 4\Omega$  (ver Figuras 72a e b) e tem três terminais (*a*, *b* e *c*). Quando o potenciômetro é ligado ao circuito através dos terminais mais externos (*a* e *c*), a resistência é fixa e igual a  $400\Omega$ . Para obter uma resistência variável, é preciso utilizar um terminal externo e um interno (*a* e *b*, ou *c* e *b*). O terminal *a* do potenciômetro está soldado a um fio condutor que pertence aos circuitos do Quadro I. O terminal *b* deverá ser ligado a um dos terminais da fonte.

Uma ligação entre dois elementos de um circuito é dita em paralelo quando os dois elementos estão submetidos à mesma voltagem.

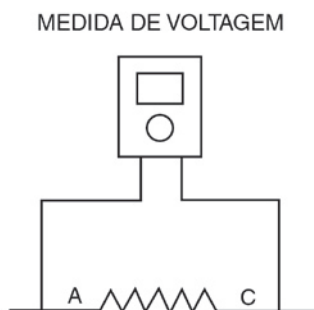


Figura 73

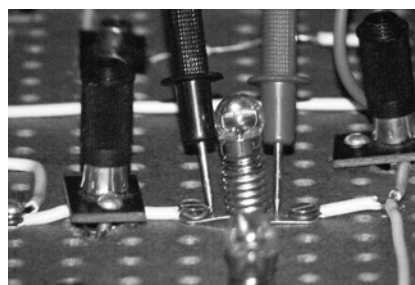


Figura 74

Para medir voltagens, é necessário colocar o multímetro em paralelo com o elemento do circuito. Por exemplo, na Figura 73, o multímetro foi colocado em paralelo com o resistor. Na Figura 74, as pontas do multímetro estão medindo a voltagem nos terminais da lâmpada.



## MEDIDA DE CORRENTE ELÉTRICA

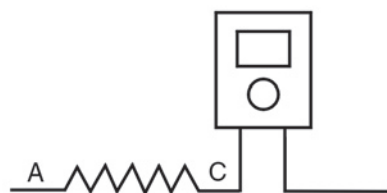


Figura 75

Uma ligação entre dois elementos de um circuito é denominada em série quando eles são percorridos pela mesma corrente elétrica.

Para medir a corrente elétrica que percorre um elemento de um circuito, é necessário ligar o multímetro *em série com o elemento*. Na Figura 75, o multímetro foi colocado em série com o resistor AC. No Quadro de luz I existem pontos em que o contato elétrico é realizado através de um conector RCA (macho e fêmea) (veja a Figura 76). O contato elétrico entre as partes interna e externa do conector macho foi realizado com um pedaço de fio de cobre. Para medir a corrente elétrica que atravessa um ponto C do circuito próximo ao conector RCA deve-se retirar o conector macho, encostar uma das pontas do multímetro na parte interna da tomada fêmea e a outra na sua parte externa (veja figura 77).

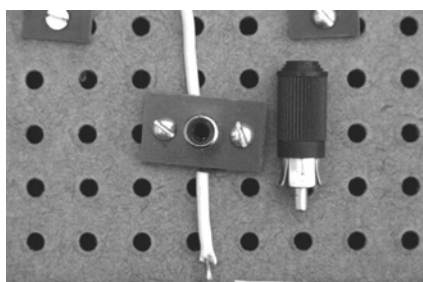


Figura 76 - Conectores macho e fêmea.

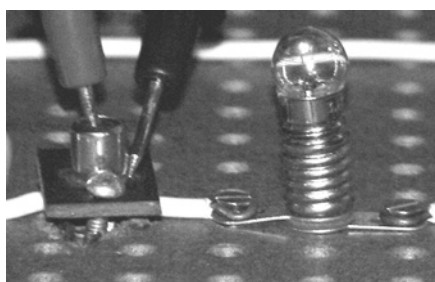


Figura 77 - Pontas do multímetro no interior e no exterior do conector fêmea.

### Objetivo

Obter a curva característica (que relaciona voltagem aplicada à corrente elétrica) de um resistor.

### Material necessário ao experimento

- Multímetros (2)
- Quadro de luz I
- Lâmpada de lanterna 3,9V/0,3A
- Eliminador de pilha

Atividade experimental

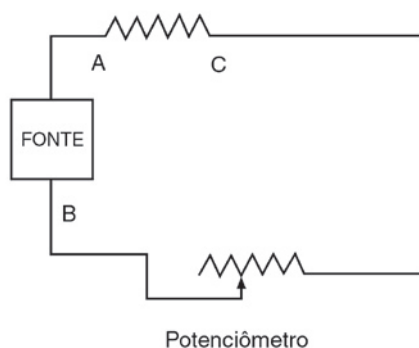


Figura 78

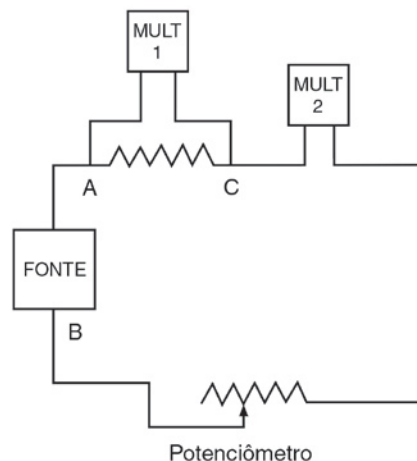


Figura 79

Monte o circuito da figura 78. Para ligar os elementos do circuito, utilize os conectores RCA. Coloque o botão da fonte em 12V.



Figura 80 - Primeiro multímetro



Figura 81 - Segundo multímetro

**Cuidado!!!**  
O modelo do seu  
multímetro pode  
ser diferente!!!

- Coloque o multímetro 1 na escala de 200V (DC) (Figura 80). Ligue o conector preto no terminal COM de referência e o conector vermelho ao terminal V/ $\Omega$  (ver Figura 80).
- Coloque o segundo multímetro na escala de 200mA (DC) (Figura 81). Ligue o conector preto no terminal COM de referência e o conector vermelho ao terminal A (veja Figura 81).

**Cuidado!!!!** Não trabalhe com os multímetros juntos. Separe-os fisicamente sobre a bancada. É fácil se confundir e utilizar o multímetro ligado na escala de corrente elétrica para medir voltagem ou o multímetro que está na escala de voltagem para medir corrente elétrica.

- Introduza os multímetros 1 e 2 como na figura 79. Feche o circuito com as pontas do multímetro 2 colocado como na figura 77.
- Gire o potenciômetro de forma a produzir a menor corrente elétrica. Meça o valor da corrente elétrica e o valor da voltagem ( $V_A - V_C$ ) nos terminais do resistor e anote na Tabela 1.
- Repita as medidas de correntes e voltagens variando a corrente elétrica de 0,4mA em 0,4mA até atingir o valor máximo da corrente elétrica. Anote todos os valores na Tabela 2

Tabela 1

$i$ [mA]	$\delta i$ [mA]	Voltagem ( $V_A - V_C$ ) [V]	$\delta(V_A - V_C)$ [V]

- Construa, em papel milimetrado, o gráfico de  $\Delta V$  contra a corrente elétrica  $I$ . A curva obtida dessa forma é denominada *curva característica do resistor*.

CURVA CARACTERÍSTICA  
DO RESISTOR

Marque as respostas corretas:

- ( ) A resistência do resistor utilizado depende da corrente elétrica que atravessa o circuito. Ela não é uma resistência ôhmica.
- ( ) A resistência do resistor utilizado não depende da corrente elétrica que atravessa o circuito. Ela é uma resistência ôhmica.
- ( ) A corrente elétrica diminui com o aumento da voltagem.
- ( ) A corrente elétrica aumenta com o aumento da voltagem.

Justifique as suas respostas.

---

---

---

---

---

---

---

---

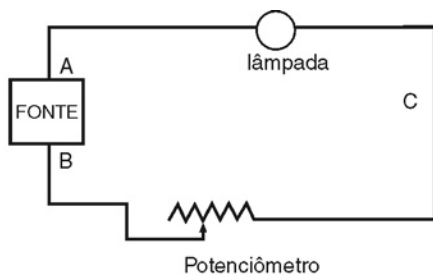


Figura 82

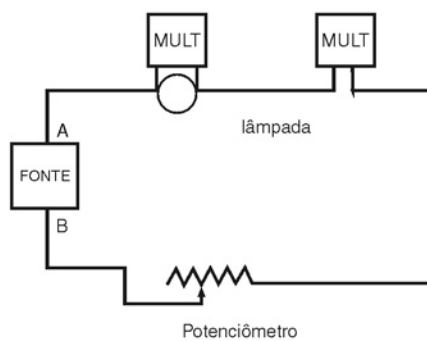


Figura 83

- Monte o circuito da Figura 82. Para ligar os elementos do circuito, utilize os conectores RCA. Coloque o botão da fonte em 12V.
- Coloque o multímetro 1 na escala de 200V (DC) (Figura 80). Ligue o conector preto no terminal COM de referência e o conector vermelho ao terminal V/ $\Omega$  (ver Figura 80).

O modelo do seu multímetro pode ser diferente!!!



Figura 84

- Coloque o segundo multímetro na escala de 20A (DC).

**CUIDADO!!!!** Se você utilizar a escala errada pode queimar o multímetro!

Ligue o conector preto no terminal COM de referência e o conector vermelho ao terminal 20A (veja Figura 84).

- Introduza o multímetro na tomada fêmea do conector RCA próxima ao ponto C, como mostra a Figura 77, e meça a corrente elétrica.
- Gire o potenciômetro de forma a produzir a menor corrente elétrica. Registre o valor da corrente elétrica e o valor da voltagem  $V_A - V_C$  na Tabela 2.

• Repita o procedimento variando a corrente elétrica de 0,4A em 0,4A até atingir o valor máximo da corrente elétrica. Anote todos os valores na tabela a seguir.

Tabela 2

$i$ [A]	$\delta i$ [A]	Voltagem ( $V_A - V_C$ ) [V]	$\delta(V_A - V_C)$ [V]

• Construa em papel milimetrado o gráfico de  $\Delta V$  contra a corrente elétrica  $I$ . A curva obtida dessa forma é denominada curva característica do resistor.

Marque as respostas corretas:

( ) A resistência da lâmpada utilizada depende da corrente elétrica que atravessa o circuito. Ela não é uma resistência ôhmica.

( ) A resistência da lâmpada utilizada não depende da corrente elétrica que atravessa o circuito. Ela é uma resistência ôhmica.

( ) A corrente elétrica diminui com o aumento da voltagem.

( ) A corrente elétrica aumenta com o aumento da voltagem.

Justifique as suas respostas.

---



---



---



---



---



---



---



---



---



---



---



---



---



---



---



---



---



---



---



---



---



---



## Experimento 4 - A voltagem nos terminais de uma fonte de corrente elétrica

### Objetivo

Investigar a voltagem fornecida por uma fonte de corrente elétrica.

### Informações preliminares

Denominamos fonte ideal aquela que fornece uma voltagem que independe da corrente elétrica produzida por ela.

### Material necessário ao experimento

- Multímetro (2)
- Quadro de luz  $I$
- Eliminador de pilhas

### Atividade experimental

• Abra o circuito da Figura 82 e meça a diferença de potencial  $V_A - V_B$  nos terminais da fonte. Feche o circuito e meça a corrente elétrica em  $C$ . Coloque os resultados na Tabela 3.

Com o circuito fechado, repita o procedimento anterior variando a corrente elétrica de 0,4mA em 0,4mA. Registre novamente na Tabela 3

Tabela 3

$i$ [A]	$\delta i$ [A]	Voltagem ( $V_A - V_B$ ) [V]	$\delta(V_A - V_B)$ [V]

1) Marque as alternativas corretas:

( ) A diferença de potencial fornecida por uma fonte não depende da corrente elétrica que atravessa a fonte.

( ) A diferença de potencial fornecida por uma fonte depende da corrente elétrica que atravessa a fonte.

( ) A diferença de potencial nos terminais de uma fonte é menor quando a corrente elétrica é menor.

( ) A diferença de potencial nos terminais de uma fonte é maior quando a corrente elétrica é menor.

( ) O eliminador de pilhas é uma fonte ideal.

( ) O eliminador de pilhas não é uma fonte ideal.

Justifique as suas respostas.

---



---



---



---



---



---

Repita a experiência com o circuito da figura 78 e complete a Tabela 4.

Tabela 4

$i$ [A]	$\delta i$ [A]	Voltagem ( $V_A - V_B$ ) [V]	$\delta(V_A - V_B)$ [V]

O eliminador de pilhas se comporta como fonte ideal neste experimento? Justifique.

---



---



---



---



---



---



## Experimento 5 - Leis das malhas.

### Objetivo

Investigar as variações de potencial elétrico em um circuito elétrico.

### Informações preliminares

#### MALHA

**Malha** é qualquer subcircuito fechado em um circuito. O circuito desenhado a seguir tem três malhas: ACDGBA, ACFGBA e CDGFC.

### Material do experimento

- Multímetro
- Quadro de luz I
- Eliminador de pilhas

### Atividade experimental

- Monte o circuito da figura abaixo.

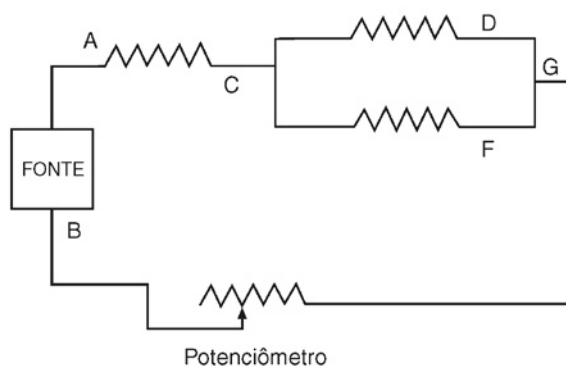


Figura 81

- Meça as diferenças de potencial nos terminais dos elementos que compõem a malha ACDGBA e coloque na tabela a Tabela 5.

*É importante lembrar que o multímetro mede a diferença de potencial entre as suas duas pontas de prova e atribui à ponta de prova ligada ao terminal de referência o potencial nulo. Por exemplo, para medir a diferença de potencial  $V_A - V_C$  é necessário colocar a ponta ligada ao terminal de referência em C e a outra ponta em A.*



Tabela 5

Elemento	$\Delta V$ [V]	$\delta (\Delta V)$ [V]
Resistor AC	$V_A - V_C =$	$\delta (V_A - V_C) =$
Resistor CD	$V_C - V_D =$	$\delta (V_C - V_D) =$
Potenciômetro	$V_G - V_B =$	$\delta (V_G - V_B) =$
Fonte	$V_B - V_A =$	$\delta (V_B - V_A) =$
Soma algébrica		

Meça as diferenças de potencial nos terminais dos elementos que compõem a malha CDGFC e coloque na Tabela 6.

Tabela 6

Elemento	$\Delta V$ [V]	$\delta (\Delta V)$ [V]
Resistor CD	$V_C - V_G =$	$\delta (V_C - V_D)$
Resistor CG	$V_G - V_C =$	$\delta (V_D - V_C)$

## Conclusão

A soma algébrica das diferenças de potencial em uma malha é \_\_\_\_\_.

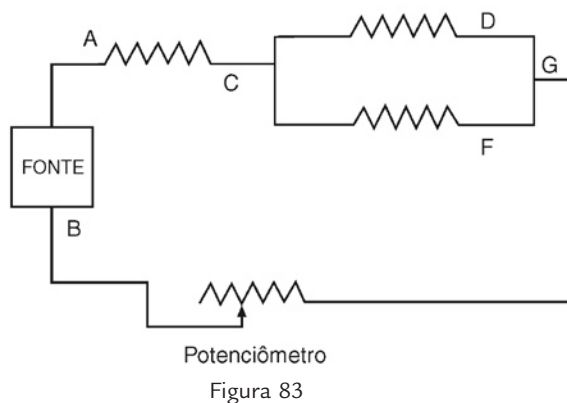
LEI DAS MALHAS



## Experimento 6 - A Lei dos Nós

### Objetivo

Investigar a distribuição de correntes elétricas em um circuito.



### Informações preliminares

NÓ

Nó é um ponto do circuito em que existe divisão ou soma de correntes elétricas. O circuito acima contém dois nós: os pontos C e G.

### Material do experimento

- Multímetro (1)
- Quadro de luz  $I$
- Substituidor de pilhas

### Atividade experimental

- Monte o circuito da Figura 83.
- Coloque o multímetro para medir corrente elétrica contínua (DC) na escala de 20mA.
- Meça as correntes elétricas nos pontos A, C, D, G e B e coloque seus valores na tabela a seguir.

Tabela 6

Ponto	Corrente I em [mA]	$\delta I$ [mA]
A		
B		
C		
D		
F		
G		

## Conclusões

1) A corrente elétrica que sai da fonte é \_\_\_\_\_ à corrente elétrica que entra na fonte.

1) As correntes elétricas nos pontos A e C são \_\_\_\_\_. Por isso, podemos concluir que a corrente elétrica \_\_\_\_\_ é consumida quando percorre uma resistência.

2) Se atribuirmos valores positivos às correntes elétricas que chegam a um nó e valores negativos àquelas que saem do nó, podemos afirmar que a soma algébrica das correntes elétricas que chegam a um nó é \_\_\_\_\_.

## LEI DOS NÓS



## Distribuição de energia em um circuito: aspectos teóricos

### Objetivos

Discutir o Modelo Clássico de Condução e a distribuição de energia em circuitos elétricos.

### Introdução

Esta aula tem como finalidade discutir o Modelo Clássico de Condução e a distribuição de energia em circuitos elétricos. Ela é constituída de quatro partes.

**Que sei sobre a distribuição de energia em um circuito elétrico?** é um questionário que organiza seus conhecimentos prévios sobre a distribuição de energia elétrica em circuitos elétricos.

**Modelo Clássico de Condução** é um texto que discute o modelo clássico de condução e a obtenção teórica da Lei de Ohm.

**Distribuição de energia em circuitos elétricos** contém um texto que discute distribuição de energia em um circuito.

Nas **Leituras e exercícios**, de 9 até 10, há indicações de leituras e exercícios. As leituras são sobre os assuntos abordados; os textos estão nos livros *Física-volume único*, de Beatriz Alvarenga e Antonio Máximo, e *Física 3 (Eletromagnetismo)*, do GREF.

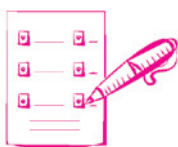
Faça a leitura de forma sistemática, realizando as atividades (exercícios e leituras extras) sugeridas ao longo do texto. Use seu caderno para anotações e comentários, e para registrar resolução das atividades.

Não deixe de refazer nenhum dos exemplos sugeridos, nem os exercícios.

Bom trabalho!

## Que sei sobre distribuição de energia em circuitos elétricos?

As questões apresentadas abaixo têm como finalidade investigar e organizar as suas idéias prévias sobre distribuição de energia em circuitos elétricos. Escreva as respostas às questões de forma organizada em seu caderno. Não consulte livros nem notas de aulas. Não deixe de respondê-las. A comparação entre as suas idéias e conhecimentos sobre distribuição de energia em circuitos elétricos antes e depois de trabalhar este módulo é importante para o seu aprendizado.



### Questionário 5

1. Escreva a expressão da *potência* fornecida por uma *fonte ideal* de corrente contínua em função da *corrente elétrica*  $i$  que atravessa a fonte e a *voltagem*  $\Delta V$  fornecida por ela.
2. Qual a expressão da *energia dissipada em um resistor*  $R$  atravessado por uma *corrente elétrica*  $i$  e submetido a uma *diferença de potencial*  $\Delta V$ ?
3. O que influencia mais a *potência dissipada em um resistor*, a *corrente elétrica* ou a *resistência*?
4. Se você quiser *minimizar as perdas de energia na fiação* da sua residência, você deve utilizar *fios grossos ou finos*? Por quê?
5. Descreva qualitativamente a *distribuição de energia* em um *circuito de corrente contínua* alimentado por uma *fonte ideal*.
6. Descreva qualitativamente a *distribuição de energia* em um circuito de *corrente contínua* alimentado por uma *fonte real*.
7. Você pode explicar por que ao *ligarmos muitos aparelhos* a uma mesma tomada a *fiação pode queimar*?
8. Você pode explicar por que quando ligamos o *chuveiro elétrico* o *brilho das lâmpadas diminui*?
9. A *potência elétrica dissipada* em um *chuveiro elétrico* pode ser modificada alterando-se a *resistência do chuveiro*? No *inverno*, a resistência deve ser *maior ou menor*? Por quê?
10. Uma lâmpada de 60W vai *brilhar* sempre mais do que uma lâmpada de 5W? Dê exemplos.
11. A *resistência* de uma *lâmpada apagada* é igual à *resistência de uma lâmpada acesa*? Justifique.

## Modelo Clássico e Condução



“Nem tanto ao mar, nem tanto à terra.”

Ronaldo espera a sua aula de Física. Lembra-se das explicações da irmã sobre o curto-circuito no abajur. Gostaria de aprender mais eletricidade para entender melhor o funcionamento e os problemas dos dispositivos elétricos.

Nesse momento, entra na sala um professor desconhecido, informando que substituirá definitivamente o professor de Física, que acabara de se aposentar. Ronaldo fica surpreso, assim como a turma toda. O novo professor inicia a aula de uma forma completamente diferente: mostra um resistor ligado a uma fonte de corrente contínua; mede a corrente que atravessa o resistor para vários valores de tensão; constrói o gráfico de  $\Delta V$  contra  $i$  com os valores obtidos; interpola os pontos com a melhor reta. Pára, volta-se para a turma e pergunta:

– A **resistência** de um material é a razão entre a diferença de potencial aplicada e a corrente elétrica que atravessa o material. Alguém sabe me dizer se a resistência desse resistor depende da voltagem aplicada?

Interpolar os pontos de um gráfico é passar por eles uma curva.

RESISTÊNCIA

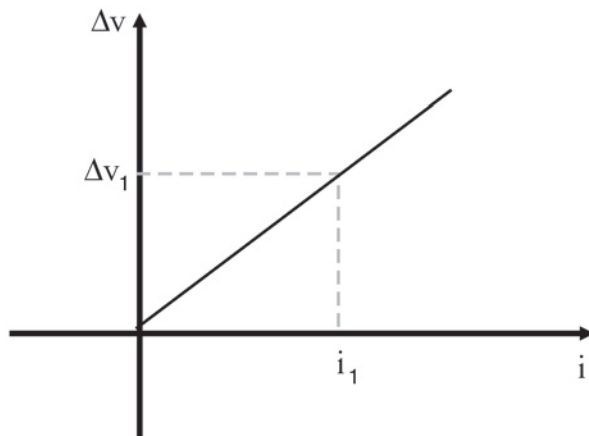


Figura 84 - Curva característica de um resistor ôhmico.

Curva característica de um resistor.

Diante do silêncio da turma, ele continua:

– A razão entre a diferença de potencial aplicada no resistor e a corrente elétrica é o coeficiente angular da reta; portanto, a resistência é constante e não depende da voltagem. Isso é sempre verdade?

Ninguém se manifesta. Mais uma vez, ele tenta motivar a turma.

– Existe um grande número de materiais cuja resistência não depende da tensão aplicada. São os **resistores ôhmicos**. A Lei de Ohm afirma que nos resistores ôhmicos a voltagem é proporcional à corrente elétrica. A constante de proporcionalidade é a resistência do material. Ou seja:

RESISTORES ÔHMICOS

LEI DE OHM

$$\Delta V = Ri$$

E vai em frente:

– O cobre é um resistor ôhmico, mas há resistores que não são ôhmicos.

Ronaldo já tinha percebido que os físicos sempre tentavam explicar os resultados experimentais com modelos matemáticos. E levantou a questão para o professor:

– Professor, existe algum modelo que explica a Lei de Ohm?

– A Lei de Ohm pode ser obtida através do modelo clássico de condução, em que os elétrons são tratados como as moléculas de um gás ideal. Num gás ideal, o movimento das moléculas é caótico, isto é, não existe uma direção preferencial para seu movimento.

– Como assim?

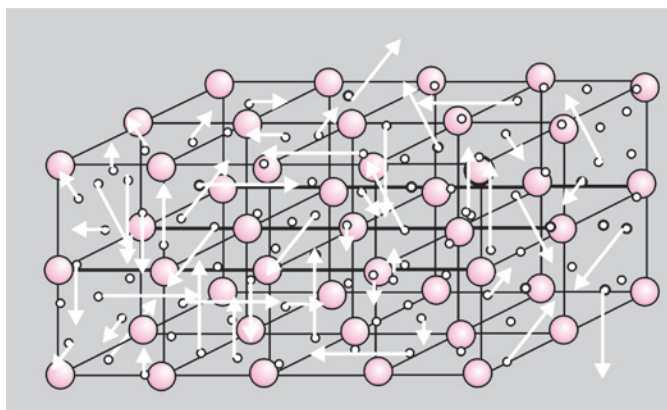


Figura 85 - Os elétrons têm um movimento desordenado no interior dos metais.

– Quero dizer que, em todo instante de tempo, a probabilidade de se encontrar um elétron com velocidade  $\vec{v}$  é igual à probabilidade de se encontrar um elétron com velocidade  $-\vec{v}$ . O conceito de velocidade média expressa essa idéia de uma maneira mais precisa. Tomemos  $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_N$  como as velocidades dos  $N$  elétrons livres em um determinado instante de tempo. A velocidade média dos elétrons livres é, por definição, a soma de todas as velocidades dos elétrons livres dividida pelo número de elétrons livres.

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{\vec{v}_1 + \dots + \vec{v}_N}{N}$$

Na ausência de campo elétrico, a velocidade média dos elétrons livres  $\langle \vec{v}_c \rangle$  é nula, isto é:

$$\langle \vec{v}_c \rangle = \frac{\vec{v}_{c1} + \dots + \vec{v}_{cN}}{N} = \vec{0}$$

Ronaldo percebe que o novo professor está tornando mais quantitativos os argumentos que Fátima utilizou para explicar o curto-circuito. E fica ansioso para receber o resto da explicação. O professor não pára:

Ver maiores detalhes  
sobre o modelo cinético  
dos gases ideais no  
módulo 5.

VELOCIDADE MÉDIA DOS  
ELÉTRONS.



– O modelo clássico de condução trata os elétrons como bolas rígidas e elásticas. Por isso, eles só interagem quando colidem entre si ou quando colidem com a rede de íons. Nessa situação, a única força que atua no período entre duas colisões é a força elétrica externa  $\vec{F} = -e\vec{E}$ . Para simplificar a discussão, podemos imaginar que o campo elétrico é constante. A aceleração de um elétron entre duas colisões é obtida pela segunda Lei de Newton:

$$m\vec{a} = -e\vec{E} \Rightarrow \vec{a} = -\frac{e\vec{E}}{m}$$

Assim, o movimento do elétron é uniformemente acelerado e sua velocidade é:

$$\vec{v} = \vec{v}_c + \vec{a}t = \vec{v}_c - \frac{e\vec{E}}{m}t$$

Nessa fórmula,  $\vec{v}_c$  é a velocidade do elétron imediatamente após a última colisão;  $t$  é o tempo entre duas colisões. Podemos calcular o valor médio da velocidade dos elétrons livres do metal na presença do campo elétrico utilizando a expressão anterior para todos os elétrons:

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{\vec{v}_1 + \dots + \vec{v}_N}{N} = \frac{\vec{v}_{c1} + \dots + \vec{v}_{cN}}{N} - \frac{e\vec{E}}{m} \left( \frac{t_1 + \dots + t_N}{N} \right)$$

No modelo clássico de condução, também é considerado que imediatamente após a colisão todos os elétrons perdem a “memória” do seu movimento ordenado e que o tempo médio entre duas colisões,  $t$ , não é alterado pela presença do campo elétrico, isto é:

$$\langle \vec{v}_c \rangle = \frac{\vec{v}_{c1} + \vec{v}_{c2} + \dots + \vec{v}_{cN}}{N} = \vec{0} \quad \text{e}$$

$$\langle t \rangle = \left( \frac{t_1 + \dots + t_N}{N} \right) = \left( \frac{t_{c1} + \dots + t_{cN}}{N} \right) = \langle t_c \rangle$$

Nessa equação, o índice  $c$  refere-se às grandezas na ausência de campo elétrico.

– Professor, quer dizer que com campo ou sem campo tudo fica igual?

– É claro que não. Estou apenas fazendo aproximações que só são verdadeiras quando o acréscimo na velocidade dos elétrons devido à ação do campo elétrico é desprezível em relação à velocidade caótica dos elétrons. Vejam que a velocidade média dos elétrons só é nula na ausência de campo elétrico, pois

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{\vec{v}_1 + \dots + \vec{v}_N}{N} = -\frac{e\vec{E}}{m} \langle t_c \rangle$$

A velocidade média dos elétrons  $\langle \vec{v} \rangle$  é chamada de **velocidade de deslocamento**  $\vec{v}_d$ .

$$\vec{v}_d = -\frac{e\vec{E}}{m} \langle t_c \rangle$$

VELOCIDADE DE  
DESLOCAMENTO DOS  
ELÉTRONS

Portanto, um metal na ausência de campo elétrico é diferente de um metal na presença de campo elétrico. O tempo médio entre duas colisões  $\langle t_c \rangle$  só depende da natureza do material e da temperatura. É constante a velocidade de deslocamento (velocidade média) em um metal mantido em temperatura constante e submetido a um campo elétrico constante.

– Professor, não consigo entender direito essa idéia de velocidade de deslocamento.

– O tempo médio entre duas colisões entre elétrons e dos elétrons com a rede de íons ( $\cong 10^{-14}s$ ) é muito menor do que os tempos utilizados nas observações de laboratórios (segundo, décimo de segundo, milésimo de segundo etc.). Quando estamos medindo o deslocamento de cargas elétricas em um tempo com ordem de grandeza muito maior do que o tempo médio de colisão, o deslocamento associado à parte caótica do movimento é nulo; assim, resta apenas o deslocamento associado à contribuição da força elétrica. Em média, tudo funciona como se todos os elétrons livres se deslocassem com velocidade constante e igual à velocidade de deslocamento  $\vec{v}_d$ . A velocidade média de um elétron livre em um metal percorrido por uma corrente elétrica constante é proporcional à força elétrica que atua sobre ele. Esse tipo de proporcionalidade também aparece quando um objeto se movimenta no interior de um tubo vertical preenchido por um fluido viscoso. Nesse caso, quando o objeto atinge a velocidade limite, ela é proporcional à força peso, isto é,  $\vec{v}_{\text{limite}} \cong \frac{m \cdot \vec{g}}{b}$ . Por isso, dizemos que o movimento de um elétron no interior de um condutor é análogo ao movimento de um objeto pequeno que se desloca em um tubo vertical que contém líquido viscoso.

Mariana tem dificuldades com analogias e não compreendeu bem a explicação.

– Professor, não é verdade que o elétron se desloca em um líquido? Então como é que você está falando de viscosidade?

– Não estou dizendo isso. Por isso falei em analogia. Em ciência, dizemos que dois sistemas são análogos quando eles satisfazem às mesmas equações. É o caso que acabamos de discutir. No caso do líquido viscoso, é a interação entre as camadas do líquido e a superfície do objeto que produz uma força que pode ser representada macroscopicamente como uma força de atrito proporcional à velocidade do objeto. No caso dos elétrons, são as colisões com a rede de íons e entre os elétrons que produzem uma força de atrito macroscópica proporcional à velocidade de deslocamento dos elétrons.

O professor continua...

– O conhecimento de que são os elétrons que transportam a corrente elétrica é recente ( $\cong 100$  anos). Durante muito tempo, o modelo que descrevia uma corrente elétrica tratava as cargas elétricas que se movimentavam no interior de um condutor como um fluido viscoso com carga elétrica positiva. É por isso que, até hoje, apesar de se saber que são as cargas elétricas negativas que se movimentam nos condutores metálicos, os livros representam essas correntes elétricas como movimento de cargas elétricas positivas com velocidade de deslocamento de mesmo módulo e sentido contrário à velocidade de deslocamento dos elétrons. Denomina-se essa corrente elétrica como **corrente elétrica convencional**.

Ver página 95 da Aula 5  
do Módulo 4.

CORRENTE ELÉTRICA  
CONVENCIONAL

Ronaldo sabe que o campo elétrico motor da rede elétrica varia com uma frequência de 60Hz. Mas não está satisfeito e pergunta:

- O campo elétrico motor da rede elétrica é variável. O modelo clássico de condução pode ser aplicado para a corrente elétrica produzida pela rede elétrica?
- O modelo clássico pode ser aplicado para um campo elétrico variável cujo período de variação seja muito maior do que o tempo médio de colisão entre os elétrons. É o caso da nossa rede elétrica. Nela, o período de variação do campo elétrico é de 1/60 do segundo.

A turma começa a se agitar. São muitas idéias novas ao mesmo tempo. Já nem sabem mais a razão de toda essa explicação.

O professor percebe que a turma está dispersando. “Alguém lembra por que estamos discutindo tudo isso?”

Com grande esforço, Ronaldo organiza suas idéias.

- É para provar a Lei de Ohm.

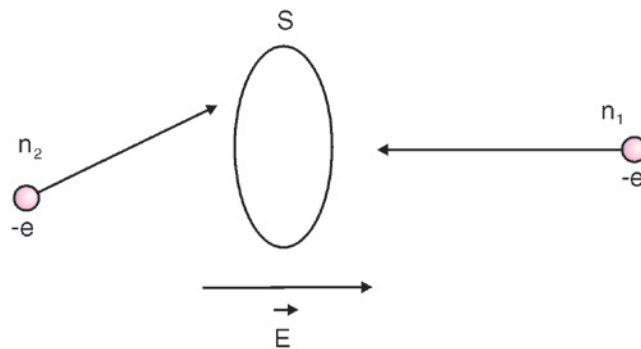


Figura 86 - Corrente elétrica.

– Isso mesmo. Podemos demonstrar a Lei de Ohm para um condutor cilíndrico com seção reta  $S$  e comprimento  $L$ . O campo elétrico representado na Figura 86 cria um movimento ordenado dos elétrons da direita para a esquerda. Tomemos  $n_1$  como o número de elétrons que atravessam  $S$  da direita para a esquerda e  $n_2$  o número dos que atravessam  $S$  no sentido oposto; a intensidade da corrente elétrica é:

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{-n_1 e + n_2 e}{\Delta t}$$

CORRENTE ELÉTRICA

$\Delta Q$  é a carga elétrica total que atravessa a área  $S$  em um intervalo de tempo  $\Delta t$  e  $e = 1,9 \times 10^{-19} \text{C}$  é o módulo da carga elétrica do elétron. Quando o intervalo de tempo é grande em relação ao tempo médio entre duas colisões, tudo funciona como se todos os elétrons se deslocassem com velocidade constante e igual à velocidade de deslocamento. Por isso, podemos reescrever a carga elétrica que atravessa a área  $S$  no intervalo de tempo utilizando a velocidade de deslocamento dos elétrons.

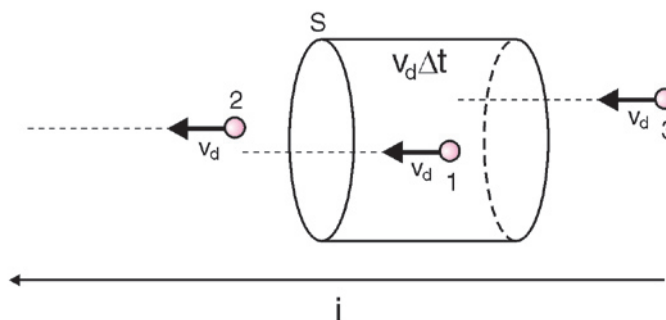


Figura 87 - Relação entre a corrente elétrica e a velocidade de deslocamento.

Cada uma das cargas elétricas se desloca em média uma distância  $v_d \Delta t$  (na figura, as distâncias são representadas por retas pontilhadas) no intervalo de tempo considerado. Pela figura, é fácil verificar que apenas as cargas elétricas que estão no interior do cilindro de área  $S$  e altura  $v_d \Delta t$  atravessam a área  $S$ . Por isso, se denominarmos  $n$  o número de elétrons livres por unidade de volume e lembrarmos que o volume de um cilindro é a área de sua base multiplicada por sua altura, podemos registrar o número de elétrons que atravessam a área  $S$  da seguinte forma:  $N = n S v_d \Delta t$ . A carga elétrica que atravessa a área  $S$  no intervalo de tempo  $\Delta t$  é o número de elétrons  $N$  contidos no cilindro multiplicado pela carga elétrica dos elétrons:  $\Delta Q = -eN$ . Por isso, a corrente elétrica é:

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\frac{n S v_d \Delta t e}{\Delta t} = -en v_d S$$

Ronaldo se lembra de que os livros utilizam a corrente convencional, em que as cargas elétricas positivas se deslocam no sentido contrário ao dos elétrons com velocidade de módulo  $v_d$ .

– Professor, o valor da corrente elétrica convencional obtido com o seu raciocínio é  $i_c = en S v_d$ . Esse valor é positivo, enquanto o valor obtido para os elétrons é negativo. Por que é possível utilizar a corrente convencional e obter resultados corretos?

– Sua pergunta é muito boa. Afirmar que a corrente elétrica verdadeira e a corrente elétrica convencional são equivalentes significa que os efeitos produzidos pelas duas correntes elétricas são idênticos. Por exemplo, a previsão teórica para o calor produzido em um resistor percorrido pela corrente elétrica convencional e pela corrente elétrica dos elétrons é a mesma para as duas correntes.

– Se for impossível identificar as diferenças de um movimento de cargas elétricas positivas em um sentido e o movimento de cargas elétricas negativas em sentido contrário, como é que foi descoberto que nos condutores metálicos são os elétrons que transportam a corrente elétrica?

Outra pergunta muito boa. Você é muito esperto. A afirmativa de que todos os efeitos são iguais não é verdadeira. Existe um efeito denominado *Efeito Hall*, que é capaz de diferenciar uma corrente de cargas elétricas positivas de uma corrente de cargas elétricas negativas em sentido contrário.

Ronaldo fica aflito. E se pergunta em voz alta:

– Estou confuso. Se os efeitos das duas correntes são diferentes como é que posso tratá-las como sendo iguais?

O professor escuta e responde:

– Nós vamos estudar apenas a distribuição de correntes elétricas e de energia nos circuitos. Nesse caso, os resultados fornecidos pelas duas correntes elétricas são iguais.

– Nas pilhas existem movimentos de cargas elétricas positivas e negativas. Qual o valor da corrente elétrica nesse caso?

– O conceito de corrente elétrica tem que ser generalizado para a situação em que os transportadores da corrente elétrica têm cargas elétricas diferentes. Para simplificar a discussão, vou imaginar que existem apenas dois tipos de transportadores de corrente elétrica.

Transportadores de corrente com cargas elétricas positivas e negativas se deslocam em sentidos opostos. É habitual escolher o sentido da corrente elétrica igual ao sentido do movimento das cargas elétricas positivas. Representamos na Figura 86 o sentido da corrente elétrica pelo vetor unitário  $\hat{n}$  perpendicular à área  $S$ .

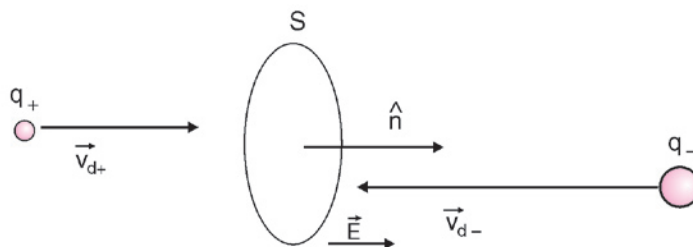


Figura 88 - Corrente elétrica com transportadores de cargas positivas e negativas.

Por definição, a **corrente elétrica** produzida por vários transportadores de corrente é a soma dos módulos das correntes elétricas convencionais associadas a cada um dos transportadores. No exemplo da Figura 88, a corrente elétrica é igual a

$$i = i_{+} + i_{-} ,$$

onde  $i_{+}$  e  $i_{-}$  são os módulos das correntes convencionais associadas aos transportadores de corrente positivos e negativos.

O módulo da corrente elétrica convencional associada ao transportador de corrente positivo é dada por:

$$i_{+} = q_{+} n_{+} v_{d+} S$$

O Efeito Hall é o aparecimento de uma diferença de potencial lateral em uma fita condutora colocada em uma região onde existe um campo magnético.

**Nova definição de corrente elétrica.**

onde  $v_{d+}$  é o módulo do vetor velocidade de deslocamento das cargas positivas e  $n_+$  é a densidade volumétrica da carga elétrica positiva.

O módulo da corrente elétrica convencional associada ao transportador de corrente negativo é dada por:

$$i_- = |q_-| n_- v_{d-} S,$$

onde  $v_{d-}$  é o módulo da velocidade de deslocamento das cargas  $q_-$  e  $n_-$  é a densidade volumétrica da carga elétrica negativa.

A corrente elétrica total é

$$i = q_+ n_+ v_{d+} S + |q_-| n_- v_{d-} S.$$

O professor fica revendo as fórmulas.

– Observe que pela nova definição de corrente elétrica estamos considerando equivalentes uma corrente elétrica produzida por cargas elétricas negativas  $q_-$  se deslocando com velocidade  $\vec{v}_{d-}$  e uma corrente elétrica produzida por cargas elétricas positivas  $|q_-|$  se deslocando em sentido contrário com velocidade  $-\vec{v}_{d-}$ .

Mariana perde a paciência com aquela discussão extensa sobre correntes elétricas.

– Professor, quando é que você vai demonstrar a Lei de Ohm?

O professor sorri. Sabia que nem todos os alunos conseguiam perceber a importância de uma discussão detalhada dos conceitos para poder aprofundar um estudo. Retorna então à demonstração da Lei de Ohm.

– Vou demonstrar a Lei de Ohm apenas para o caso em que a corrente elétrica tem um tipo de transportador de corrente. A generalização para o caso com vários tipos de transportadores de corrente elétrica é imediata. Utilizarei a partir de agora a nova definição de corrente elétrica. Nela, todas as correntes elétricas com transportadores negativos são substituídas pelas correntes elétricas convencionais. Para que a discussão não fique muito abstrata, usarei o exemplo da corrente elétrica produzida nos condutores metálicos. Com a nova convenção, a corrente elétrica transportada pelos elétrons fica positiva, isto é,  $i = env_d S$ .

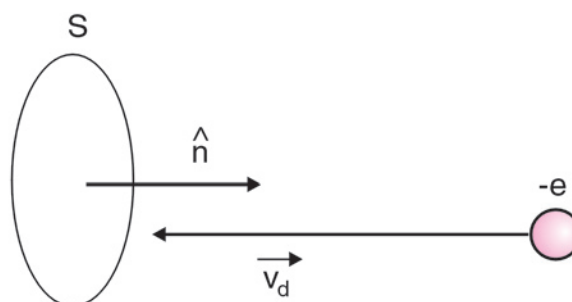


Figura 89 - Corrente elétrica convencional associada aos elétrons.

A relação entre o módulo da velocidade de deslocamento dos elétrons em um condutor e o campo elétrico é  $v_d = \frac{eE\langle t_c \rangle}{m}$ .

Ver página 121.

Substituindo a velocidade de deslocamento na expressão da corrente elétrica, concluímos que a corrente elétrica por unidade de área é proporcional ao campo elétrico:

$$j = \frac{i}{S} = \frac{env_d S}{S} = en \frac{eE\langle t_c \rangle}{m} = \frac{e^2 n \langle t_c \rangle}{m} E = \sigma E$$

onde  $\sigma = \frac{e^2 n \langle t_c \rangle}{m}$  é denominada **condutividade elétrica**. Ela depende do condutor e da temperatura.

CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

A corrente elétrica por unidade de área é denominada densidade de corrente elétrica  $j$ .

DENSIDADE ELÉTRICA

A relação entre a densidade de corrente elétrica e o campo elétrico é denominada **Lei de Ohm local**.

LEI DE OHM LOCAL

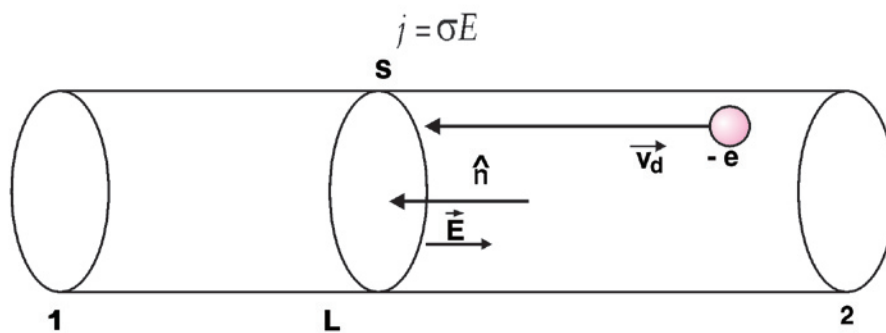


Figura 90 - Lei de Ohm em um condutor cilíndrico.

Na Figura 90 o campo elétrico tem o sentido de 1 para 2. Portanto, o potencial elétrico do ponto 1 é maior do que o potencial elétrico do ponto 2. A corrente elétrica convencional (movimento de cargas elétricas positivas) vai de 1 para 2.

A diferença de potencial entre os pontos 1 e 2 de um condutor com seção reta  $S$  e comprimento  $L$  que é percorrido por uma corrente elétrica convencional que vai de 1 para 2 é  $V_1 - V_2 = EL$ .

RESISTIVIDADE

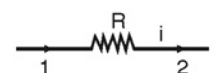
A relação entre o módulo do campo elétrico e a corrente elétrica  $i$  é fornecida pela Lei de Ohm local, isto é,

$$E = \frac{j}{\sigma} = \frac{i}{S\sigma}.$$

$$V_1 - V_2 = Ri$$

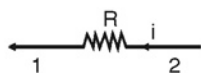
Substituindo-se o módulo do campo elétrico na expressão diferença de potencial  $V_1 - V_2$  obtemos:

$$V_1 - V_2 = \frac{i}{\sigma S} L = \left( \frac{L}{S\sigma} \right) i = \left( \frac{L\rho}{S} \right) i = Ri.$$



## RESISTIVIDADE ELÉTRICA

$$V_1 - V_2 = -Ri$$



Nessa equação,  $R = \rho \frac{L}{S}$  e  $\rho = \frac{1}{\sigma}$ .  $R$  é denominada **resistência elétrica** e o inverso da condutividade é a **resistividade elétrica**  $\rho$ . A resistividade também depende do material e da temperatura.

Quando o campo elétrico tem o sentido de 2 para 1 o potencial elétrico do ponto 2 é maior do que o do ponto 1. Portanto, a corrente elétrica convencional (movimento de cargas positivas) vai de 2 para 1. Conseqüentemente, o potencial do ponto 2 é maior do que o potencial do ponto 1 e a diferença de potencial  $V_1 - V_2$  é igual a  $-Ri$ .

Ronaldo observa a expressão da resistência elétrica. Ela aumenta com o comprimento do condutor e com a resistividade e diminui com a área da seção reta. Compreende a diminuição da resistência com a área do condutor, uma vez que é mais fácil atravessar uma área grande do que uma pequena. Ele sabe que o aumento do comprimento do condutor aumenta a probabilidade de colisão entre os elétrons e a rede; por isso, a resistência deve aumentar com o comprimento do condutor. Como deveria ser a dependência da resistividade com a temperatura? Pergunta alto:

– Professor, como a resistividade varia com a temperatura?

– Em geral, a resistividade de um material aumenta com a temperatura. Qualitativamente, podemos dizer que o movimento dos íons é maior quando a temperatura é maior. Portanto, a probabilidade de um elétron colidir com a rede aumenta.

Ronaldo se lembra da pilha.

– Professor, qual é a relação entre a diferença de potencial nos terminais de uma pilha de comprimento  $L$  e a corrente elétrica?

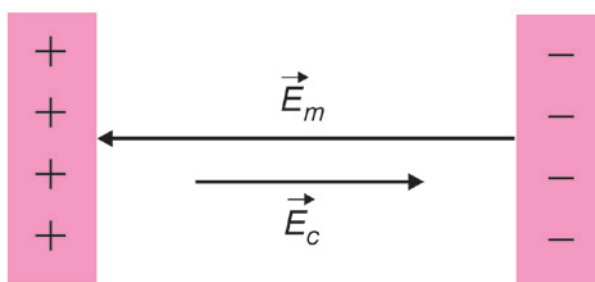


Figura 91 - Campo elétrico motor.

O campo elétrico no interior da pilha não é conservativo. Ele é a soma vetorial do campo elétrico motor e do campo eletrostático.

O campo eletrostático é criado pelas cargas elétricas e aponta no sentido das cargas negativas.

O campo elétrico motor tem natureza química e aponta na direção das cargas positivas. Quando a pilha é atravessada por uma corrente elétrica convencional com o sentido do campo elétrico motor, o campo elétrico motor fica maior do que o campo eletrostático. Portanto, o módulo do campo elétrico resultante é

$$E = E_m - E_c.$$



A diferença de potencial nos terminais da pilha é

$$V_1 - V_2 = E_c L = (E_m - E)L = E_m L - EL.$$

A substituição na expressão anterior do módulo do campo elétrico resultante ( $E = \frac{j}{\sigma} = \frac{i}{S\sigma}$ ) fornece:

$$V_1 - V_2 = E_m L - \frac{i}{S\sigma} L = \varepsilon - ri,$$

onde  $\varepsilon = E_m L$  é denominada **força eletromotriz** da pilha e  $r = \frac{L}{S\sigma}$  é a resistência interna da pilha. A força eletromotriz é representada no desenho de uma pilha por uma seta que tem a direção e o sentido do campo elétrico motor.

Quando a pilha é atravessada por uma corrente elétrica convencional com o sentido contrário ao do campo elétrico motor, o campo elétrico conservativo fica maior do que o campo elétrico motor. Portanto, o módulo do campo elétrico resultante é

$$E = E_c - E_m.$$

A diferença de potencial nos terminais da pilha é

$$V_1 - V_2 = E_c L = (E + E_m)L = \varepsilon + \frac{i}{S\sigma} L = \varepsilon + ri$$

– Professor, a força eletromotriz é uma força?

– A força eletromotriz não é força. Ela é a diferença de potencial nos terminais da pilha quando ela não é atravessada por uma corrente elétrica ( $i=0 \Rightarrow V_1 - V_2 = \varepsilon$ ), isto é, quando ela está aberta.

– Professor, já ouvi dizer que as propriedades da matéria só podem ser explicadas pela Física Quântica. Como é que você conseguiu explicar a Lei de Ohm com uma teoria clássica?

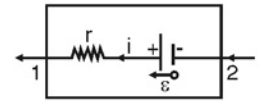
– Você tem razão, o modelo clássico de condução não explica vários fatos. Entre eles posso citar a existência de condutores e isolantes, a diminuição da resistividade de alguns materiais com a temperatura e outros.

A turma se agita. Depois de toda aquela confusão, o novo professor chega e diz que aquele modelo não estava correto? Ronaldo protesta.

– Professor, para que o senhor explicou o modelo clássico de condução se ele não está correto?

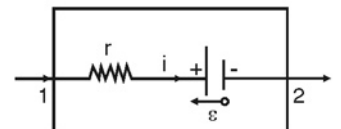
– Porque ele permite obter a Lei de Ohm. É importante que vocês percebam que as teorias científicas são construídas e aperfeiçoadas ao longo do tempo. De uma maneira geral, os primeiros modelos construídos não são satisfatórios, como no caso do modelo clássico de condução.

$$V_1 - V_2 = \varepsilon - ri$$



FORÇA ELETROMOTRIZ

$$V_1 - V_2 = \varepsilon + ri$$



O sinal toca. A turma desaparece rapidamente. No ônibus, Ronaldo tenta concluir se a troca de professores foi proveitosa. O novo professor explica mais do que a Fátima e do que o antigo professor, mas passa muito conteúdo numa mesma aula. Ele preferia ter um mistura equilibrada dos dois – contando com o apoio da Fátima, claro. Afinal de contas, o ditado popular é que está certo: “Nem tanto ao mar, nem tanto à terra.”

.....

1. A corrente elétrica que atravessa uma área  $S$  é

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t}.$$

2. A corrente elétrica convencional associada a um transportador de carga  $q$  é

$$i_q = |q| n v_d \cos(\theta) S.$$

Modelo clássico de condução:

3. Velocidade de deslocamento dos elétrons livres é

$$\vec{v}_d = -\frac{e\vec{E}}{m} \langle t_c \rangle.$$

4. A resistência elétrica é  $R = \rho \frac{L}{S}$ .

5. A resistividade do condutor é  $\rho = \frac{m}{e^2 n \langle t_c \rangle}$ .

6. Lei de Ohm local:  $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ .

7. Lei de Ohm:  $V = Ri$ .

.....

## Leituras e exercícios 9

Leia sobre os assuntos *Resistência elétrica, Lei de Ohm, Resistividade de um material, O que é um reostato, O que é supercondutividade?, Associação de resistores em série, Associação de resistores em paralelo, Como estão ligados os aparelhos elétricos em nossas residências, O choque elétrico* na seção 9.4, do capítulo 9 do livro *Física-volume único*, de A. Máximo e B. Alvarenga.

Deste mesmo capítulo faça os exercícios de fixação de 33 a 46, questões de revisão de 14 até 17 e problemas e questões de vestibulares de 15 a 17.

## Distribuição de energia em um circuito elétrico

### “Feriado em Teresópolis”



Para aproveitar um feriado prolongado, a família Silva alugou um chalé em um condomínio em Teresópolis. Chegam ao chalé no final da tarde, após enfrentar um grande congestionamento. Fátima resolve tomar um banho para relaxar e se refrescar. Aborrecida, verifica que o banheiro não tem aquecedor a gás, há apenas um chuveiro elétrico para aquecer a água do banho. Coloca a chave na posição de verão e abre a torneira. O chuveiro emite uma faísca e as luzes apagam. Só se ouve a voz dela, irritada:

– Droga! O chuveiro estava em curto!

Roberto corre ao banheiro, para verificar se a filha estava bem.

– Fátima, deixe-me ver o que houve. Retira o chuveiro queimado, vai à dispensa e volta com um novo chuveiro.

– Espere um instantinho que vou trocá-lo. Pede a ela um pouco de paciência enquanto ele providencia a troca.

Fátima se veste e espera o pai retirar o chuveiro estragado. Ela leva o chuveiro estragado para fora de casa, onde ainda há alguma claridade, e resolve abri-lo. Ronaldo, que estava à toa, junta-se a ela.

– Sempre tive curiosidade de ver um chuveiro elétrico por dentro, para verificar se as minhas idéias sobre seu funcionamento do seu interior estão corretas. Por exemplo, a resistência que aquece a água quando o botão do chuveiro está na posição de inverno deve ser maior do que aquela que é acionada quando a chave está virada para botão do verão.

Fátima sorri, o irmão cometera um erro comum.

– De que forma você chegou a essa conclusão?

– Muito simples. Quando existe corrente elétrica, os elétrons colidem com os íons dos resistores, produzindo calor. Portanto, quanto maior for a resistência, maior será o calor dissipado, por efeito Joule.

Fátima pede ao irmão para observar o interior do chuveiro com as chaves nas posições de inverno e verão.

– Não acredito no que estou vendo! A resistência na posição do verão é maior do que a resistência na posição de inverno. Estou totalmente confuso.

– Não precisa ficar nervoso! Você está esquecendo que a produção de calor depende da resistência do material e da corrente elétrica?

– Por que o calor produzido depende da corrente elétrica?

– Porque nos resistores as colisões transformam em calor toda a energia elétrica fornecida aos elétrons pelo campo elétrico aos elétrons em calor. A energia recebida pelos elétrons é proporcional à variação de energia potencial. A variação da energia potencial de um elétron é proporcional ao seu deslocamento médio. Para um mesmo material, as maiores velocidades de deslocamentos estão associadas às maiores correntes elétricas. Portanto, para dois resistores iguais e no mesmo intervalo de tempo, a quantidade de energia elétrica transformada em calor será maior no resistor percorrido pela corrente elétrica maior.

Fátima começa a se empolgar. E continua:

– Quando uma bola de gude percorre um trilho vertical com atrito, a sua energia cinética é transformada em calor, até que ela pára. Se compararmos dois trilhos circulares trilhos iguais com bolas iguais, a bolinha que inicia o movimento com uma velocidade maior dará um maior número de voltas no mesmo intervalo de tempo. Portanto, o calor produzido será maior nesse trilho. Essa analogia mecânica está boa para explicar o que ocorre no circuito? Você entendeu?

– Foi ótima. Entendi bem. Mas uma diferença importante entre o seu trilho e o circuito elétrico é que, no trilho, a bolinha pára porque não existe uma força que reponha a energia dissipada na forma de calor. No circuito elétrico, a energia dissipada é repostada pelo campo elétrico motor.

Fátima mostra novamente o interior do chuveiro para o irmão.

– O calor produzido aumenta com a resistência e com a corrente elétrica. A corrente elétrica diminui quando a resistência aumenta. Para uma mesma tensão, o resistor com a menor resistência terá uma corrente elétrica maior. Resta saber quem influencia mais a produção de energia calorífica, se a resistência ou a corrente.

Gritos avisam que o chuveiro está funcionando. Fátima vai tomar o seu banho, deixando a explicação incompleta. Ronaldo sai para encontrar alguns amigos e esquece do problema do chuveiro.

Na semana seguinte, o professor de Física inicia a aula mostrando um circuito com uma fonte com tensão variável que contém uma lâmpada de lanterna comum. Aumenta lentamente a tensão da fonte até acendê-la completamente.

– Vamos discutir hoje a distribuição de energia elétrica e de correntes elétricas em um circuito. Observem que, ao se aumentar a voltagem da fonte, a lâmpada brilha com maior intensidade. Alguém pode me responder por quê?

Silêncio na turma. O professor provoca:

– Ronaldo, você não se arrisca a opinar?

Ronaldo lembra-se das suas previsões erradas a respeito do chuveiro elétrico e resolve ser cauteloso.

– A lâmpada emitiu luz porque o filamento de tungstênio foi aquecido. O aquecimento ocorreu devido à colisão dos elétrons com a rede de íons do material. A minha compreensão do assunto pára por aí.

– Nós já temos o conhecimento necessário para calcular a energia que os transportadores de corrente elétrica recebem do campo elétrico em um intervalo de tempo  $\Delta t$ . Por uma questão de simplicidade, vamos imaginar que os únicos transportadores de corrente elétrica são os elétrons. A generalização para o caso com vários transportadores de corrente elétrica é imediata.

A Figura 87 repetida a seguir mostra que em um intervalo de tempo  $\Delta t$  cada um dos elétrons que atravessa a área  $S$  se desloca  $\vec{v}_d \Delta t$ .

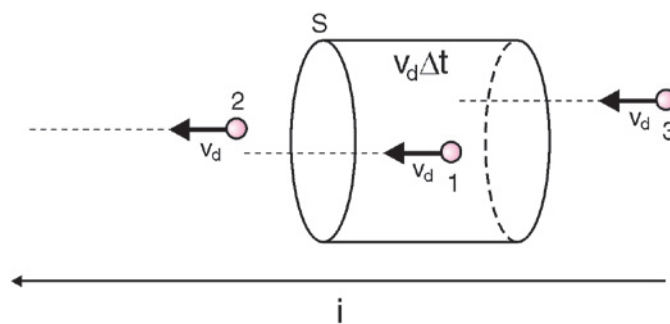


Figura 92 - Relação entre a corrente elétrica e a velocidade de deslocamento.

O módulo da variação da energia potencial elétrica de cada um desses elétrons é  $|\Delta U| = e\Delta V$ . Como estamos supondo que o campo elétrico é constante, o módulo da variação do potencial do elétron é  $|\Delta V| = E v_d \Delta t$ . Todos os elétrons têm o mesmo deslocamento e a mesma variação de potencial elétrico. Portanto, o módulo da variação da energia potencial elétrica de todos os elétrons que atravessaram a área  $S$  é a mesmo. O número de elétrons  $N$  que atravessaram  $S$  é  $n S v_d \Delta t$ . O módulo da carga elétrica total desses elétrons é  $|\Delta Q| = Ne = en S v_d \Delta t$ . Assim, o módulo da variação da energia potencial elétrica associada a todos os elétrons que atravessam a área  $S$  é  $|\Delta U_{\Delta Q}| = |\Delta Q \Delta U| = en S v_d \Delta t \Delta V = i \Delta t \Delta V$ .

O **módulo da potência  $P$**  é o módulo da variação da energia potencial da carga elétrica  $\Delta Q$  por unidade de tempo, e é dado por  $P = \left| \frac{\Delta U_{\Delta Q}}{\Delta t} \right| = |\Delta V i|$ . A unidade de potência elétrica no sistema MKSA é Watt.

A fórmula da potência obtida anteriormente vale para qualquer elemento de um circuito elétrico. Um resistor sempre dissipa a potência  $P$ . Uma pilha fornece ao circuito a potência  $P$  quando é percorrida por uma corrente elétrica convencional com o mesmo sentido do campo elétrico motor e acumula a potência quando a corrente convencional tem sentido contrário ao do campo elétrico motor.

Ronaldo observa a fórmula obtida pelo seu professor.

Potência dissipada em um elemento do circuito.

**MÓDULO DA POTÊNCIA DE UM ELEMENTO DO CIRCUITO**

– No caso em que a diferença de potencial é constante, a potência aumenta com o aumento da corrente elétrica. Nesse caso, a menor resistência fornecerá a maior corrente elétrica. Por isso, em um chuveiro elétrico que funciona com tensão constante, a menor resistência tem que ser utilizada no inverno. Professor, uma dúvida: em que situação a potência aumenta com o aumento da resistência?

– Quando o resistor é ôhmico, a potência pode ser reescrita da seguinte forma:  $P = (Ri)i = Ri^2$ . Portanto, quando a corrente elétrica é constante, a maior quantidade de energia será dissipada na maior resistência. Essa nova expressão da potência demonstra que a influência da corrente elétrica é maior do que a influência da resistência, porque a potência aumenta linearmente com a resistência e quadraticamente com a corrente elétrica.

Ronaldo percebe que o professor acabara de demonstrar o argumento qualitativo que Fátima utilizou em Teresópolis no episódio do chuveiro elétrico.

– Professor, como fica a distribuição de energia no interior de uma pilha?

– O módulo da energia (*Energia*) que o campo elétrico motor fornece aos transportadores da corrente elétrica que atravessam uma pilha de comprimento  $L$  é igual ao módulo do trabalho realizado pela força elétrica motora sobre esses transportadores, isto é,

$$Energia = F_{EM}L = |\Delta Q|E_m L = |\Delta Q|\varepsilon$$

No caso em que a corrente elétrica convencional tem o sentido do campo elétrico motor, o módulo da diferença de potencial nos terminais da pilha é  $|\Delta V_{pilha}^+| = \varepsilon - ri$ .

Conseqüentemente, a força eletromotriz é dada por:  $\varepsilon = |\Delta V_{pilha}^+| + ri$ .

A substituição da expressão anterior na fórmula da energia cedida aos transportadores de corrente elétrica que atravessam a pilha fornece

$$Energia = ||\Delta Q|(|\Delta V_{pilha}^+| + ri)| = |\Delta Q|||\Delta V_{pilha}^+| + |\Delta Q|||\Delta V_r^+|.$$

Coloca a fórmula no quadro e continua a explicar:

– Essa expressão mostra que parte da energia ( $|\Delta V_r^+ \Delta Q|$ ) fornecida aos transportadores de corrente da pilha pelo campo elétrico motor é dissipada na resistência interna  $r$  da pilha na forma de calor. A outra parte ( $|\Delta V_{pilha}^+ \Delta Q|$ ) é transformada em energia potencial elétrica. Por isso, somente parte da energia produzida na pilha pode ser utilizada no circuito elétrico. Para que a energia dissipada no interior da pilha seja pequena, sua resistência interna tem que ser desprezível.

– Professor, a energia consumida em um circuito elétrico depende das resistências e das correntes elétricas. Portanto, para planejar uma rede elétrica de uma residência é necessário conhecer as correntes elétricas que serão produzidas na rede. Quais são as leis que permitem projetar uma rede elétrica?

– As leis que são utilizadas para projetar um circuito elétrico são:

- a Lei das Malhas e
- a Lei dos Nós.

Animado com a atenção da turma, o professor prossegue:

– A **Lei das Malhas** é decorrente da existência de um campo elétrico conservativo no circuito. Esse campo permite a definição de um potencial elétrico. Assim, a variação da energia potencial elétrica de um elétron que percorre uma malha do circuito é nula. Conseqüentemente, a soma das diferenças de potencial de uma malha é nula.

LEI DAS MALHAS

– A **Lei dos Nós** está relacionada aos seguintes fatos:

LEI DOS NÓS

- à conservação da carga elétrica e
- à inexistência de acúmulo de cargas elétricas no interior de um condutor.

As cargas elétricas se acumulam apenas nas superfícies dos condutores. Dessa maneira, toda carga elétrica que chega a um nó tem que ser redistribuída pelos condutores conectados a ele.

O sinal toca. A sala rapidamente se esvazia. Ronaldo fica aliviado, pois tinha eliminado mais uma das suas dúvidas. Afinal de contas, o vestibular estava perto e o tempo de preparação para o exame era pequeno.

.....

1. A potência elétrica é  $P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \Delta V i$ .

2. Lei das Malhas: a soma algébrica das diferenças de potencial elétrico em uma malha do circuito é nula.

3. Lei dos Nós: a soma das correntes elétricas que chegam a um nó é igual à soma algébrica das correntes elétricas que saem de um nó.

.....

## Leituras e exercícios 10

Leia sobre os assuntos *Potência de um aparelho elétrico*, *O efeito Joule*, *Eficiência de um aparelho elétrico*, *Algumas aplicações do efeito Joule*, *Medida da energia elétrica usada em uma residência* na seção 9.5, do capítulo 9 do livro *Física- volume único*, de A. Máximo e B. Alvarenga.

Deste mesmo capítulo faça os exercícios de fixação de 47 até 54, a questão de revisão 21 e problemas e questões de vestibular de 18 até 30.

Leia sobre os assuntos *A intensidade de corrente elétrica*, *A potência elétrica*, *As diferentes potências obtidas no mesmo tipo de aparelho: a resistência elétrica* nas seções 1.7.1, 1.7.3 e 1.7.4 do livro *Física 3 - Eletromagnetismo*, do Gref.

Da parte 1 do livro *Física 3 - Eletromagnetismo*, do Gref, refaça os exercícios resolvidos de 1 até 12 e as atividades 1, 2 e 3.

Nesta aula foi definido o conceito de corrente elétrica. A Lei de Ohm foi obtida a partir do Modelo Clássico de Condução.

As leis que permitem entender a distribuição de energia e de correntes elétricas em um circuito elétrico foram apresentadas.



## Prática 3 - Distribuição de energia nos circuitos: aspectos experimentais



Esta prática tem como objetivo desenvolver sua capacidade de entender qualitativamente a energia em circuitos elétricos. Deve ser realizada no pólo regional. Está dividida nos seguintes tópicos:

Experimento 7 - Medindo resistências.

Experimento 8- A luminosidade de uma lâmpada e a corrente elétrica.

Experimento 9 - Distribuição de energia em resistores ligados em série no quadro de luz I (corrente contínua).

Experimento 10- Distribuição de energia em resistores ligados em paralelo no quadro de luz I (corrente contínua).

Experimento 11- Distribuição de energia em resistores ligados em série no quadro de luz II (corrente alternada).

Experimento 12- Distribuição de energia em resistores ligados em paralelo no quadro de luz II (corrente alternada).

*Antes de realizar esta Prática, leia o manual de utilização do multímetro e responda ao questionário sobre ele.*

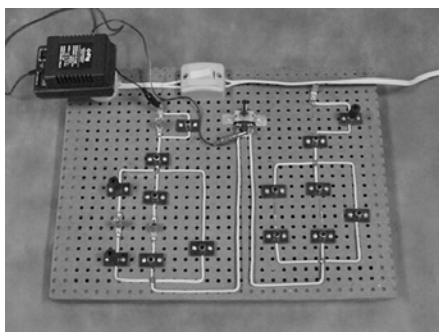


Figura 93a - Quadro de luz I

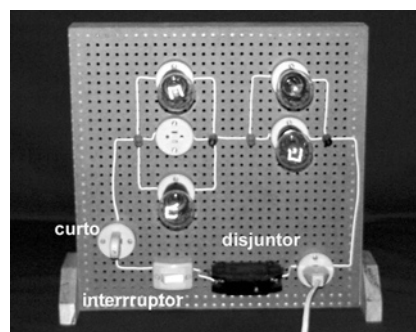


Figura 93b - Quadro de luz 2

*Material necessário à Prática 3*

- Eliminador de pilhas
- Quadro de luz I (corrente contínua) (1)
- Quadro de luz II (corrente alternada) (1)
- Multímetro (2)
- Curtos com terminais RCA (4)
- Curtos com tomadas (4)
- Lâmpadas de 15W/220V (duas) de 15W/110V (uma), de 60W/110V (uma) e de 7W/110V.

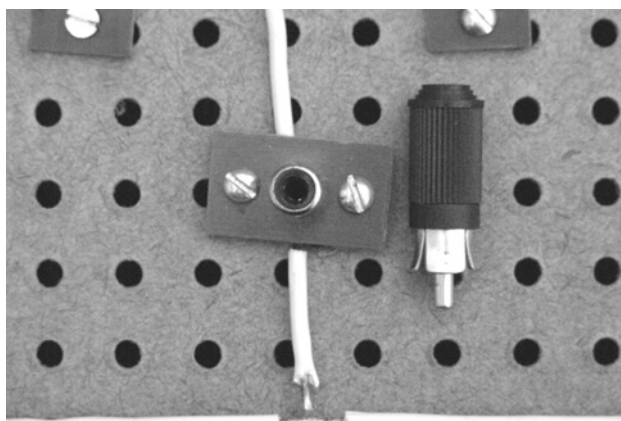


Figura 94a - Foto do curto RCA

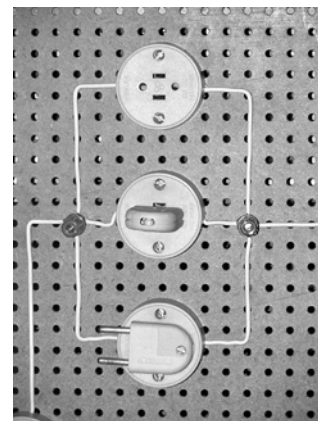


Figura 94b - Foto do curto tomada

A ligação elétrica entre dois pontos abertos do circuito vai ser feita com terminais RCA (no caso de corrente elétrica contínua, Figura 94-a) e com tomadas (no caso de correntes elétricas alternadas, Figura 94-b).

Faça suas medidas com cuidado, mesmo que para isso você aparentemente gaste muito tempo. Seja caprichoso, pois sua atenção e seu cuidado na realização dos experimentos facilitarão seu trabalho mais tarde.

Bom trabalho!

## Experimento 7 - Medindo resistências.

### Objetivo

Desenvolver no estudante a capacidade de avaliar qualitativa e quantitativamente a resistência de resistores.



### Informações preliminares

A resistência de um condutor aumenta com o seu comprimento e diminui com a sua área.

A potência dissipada em um resistor é dada por:

$$P = \Delta V \cdot i = \frac{\Delta V^2}{R} = Ri^2 ,$$

onde  $\Delta V$  é voltagem,  $R$  é a resistência e  $i$  é a corrente elétrica.

Uma associação de resistores é dita em série quando não existem nós (pontos onde existe soma ou divisão de correntes elétricas) entre os resistores.

Uma associação de resistores é dita em paralelo quando todos os resistores estão ligados a um mesmo par de nós.

A medida de resistências pode ser utilizada para verificar quais são os pontos de um sistema que estão ligados eletricamente. Quando a resistência entre dois pontos é muito grande, eles estão isolados eletricamente. Quando a resistência entre dois pontos é nula, dizemos que eles estão em curto.

### Material do experimento

- Multímetro (1)
- Quadro de luz I
- Eliminador de pilhas
- Lâmpadas de 60W/110V, 7W/110V
- Curtos do tipo RCA

### Atividade experimental

• Observe as lâmpadas de 60W/110V e 7W/110V e marque as respostas verdadeiras:

( ) O filamento da lâmpada de 60W/110V é feita de um fio mais fino e maior do que o da lâmpada de 7W/110V. Por isso, a resistência da lâmpada de 60W/110V é maior do que a da lâmpada de 7W/110V.

( ) O filamento da lâmpada de 60W/110V é feita de um fio mais grosso e menor que o da lâmpada de 7W/110V. Por isso, a resistência da lâmpada de 60W/110V é menor que a da lâmpada de 7W/110V.

#### MEDIDA DE RESISTÊNCIAS

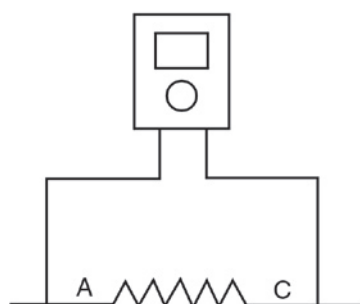


Figura 95a



Figura 95b

**Cuidado!!!**  
O modelo do seu  
multímetro pode  
ser diferente!!!

**CUIDADO!!!** Verifique se o resistor cuja  
resistência vai ser medida está sem corrente elétrica.

Coloque o multímetro na escala de  $2k\Omega$ . A medida da resistência deve ser feita com as pontas do multímetro colocadas nas extremidades do resistor, como mostra a Figura 95.

• Meça com o multímetro as resistências das lâmpadas de 60W/110V e 7W/110V e coloque o resultado da medida na Tabela 1.

Tabela 1

Tipo de lâmpadas	Resistência da lâmpada desligada [ $\Omega$ ]	Resistência calculada a partir das informações do fabricante da lâmpada [ $\Omega$ ]
60W/110V		
7W/110V		

Calcule as resistências das lâmpadas com as informações sobre potência e voltagem fornecidas pelo fabricante  $R = \frac{\Delta V^2}{P}$  e coloque os resultados na Tabela 1.

1. Discuta com o tutor a discordância entre os valores medidos e os valores fornecidos pelo fabricante.

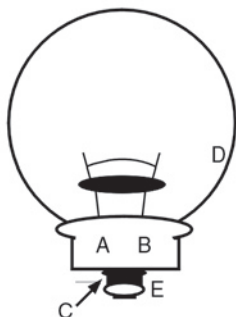


Figura 96

Utilize o multímetro para descobrir que pontos de uma lâmpada incandescente estão ligados eletricamente. Com essa finalidade, meça as resistências entre os pontos indicados na Figura 96 e complete a Tabela 2.

Tabela 2

Par de pontos	Resistência [Ω]	Incerteza na resistência [Ω]
AB		
AC		
AD		
BC		
BD		
BE		
CD		
CE		
DE		

Interprete os resultados da Tabela 2 e liste os pontos que estão em contato elétrico.

---



---



---



---

Marque a resposta correta:

( ) Em uma lâmpada, a corrente elétrica penetra pelo ponto C e sai pelo ponto B.

( ) Em uma lâmpada, a corrente elétrica penetra pelo ponto E e sai pela base que contém A e B.

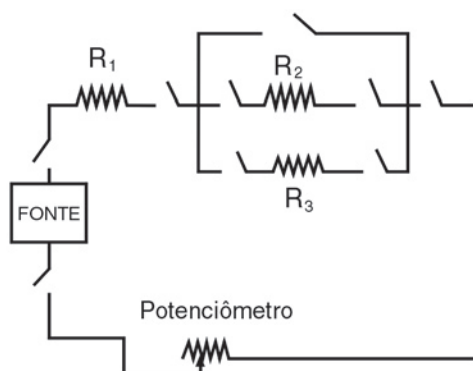


Figura 97

Retire todos os curtos do Quadro de luz 1. Meça todas as resistências e coloque na Tabela 3.

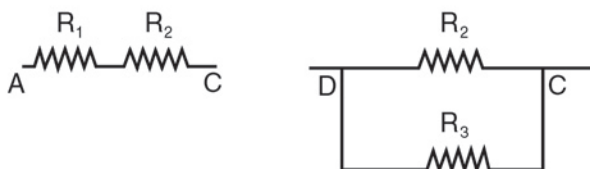


Figura 97b

- Com os curtos, ligue as resistências  $R_1$  e  $R_2$  em série e meça a resistência dessa associação (resistência do trecho AC). UTILIZE A ESCALA DE  $2k\Omega$ .
- Com os curtos, ligue as resistências  $R_2$  e  $R_3$  em paralelo e meça a resistência dessa associação (resistência do trecho DC).

Tabela 3

	Resistência ( $k\Omega$ ) [ $\Omega$ ]	Incerteza na resistência [ $\Omega$ ]
$R_1$		
$R_2$		
$R_3$		
AC		
DC		

**Conclusão:** \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Complete as sentenças a seguir :

A resistência equivalente a uma associação de resistores em série é \_\_\_\_\_.

A resistência equivalente a uma associação de resistores em paralelo é \_\_\_\_\_.

*Discuta com o tutor as discrepâncias entre as suas medidas e a previsão teórica.*

## Experimento 8 - A luminosidade de uma lâmpada e a corrente elétrica.

### Objetivo

Investigar a variação da luminosidade de uma lâmpada com a potência elétrica dissipada.



### Material do experimento

- Multímetro (2)
- Quadro de luz I
- Substituidor de pilhas
- Curtos RCA (4)
- Lâmpada de 3,9V, 0,3A

### Atividade experimental

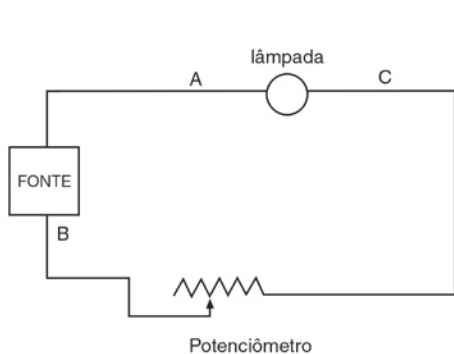


Figura 98

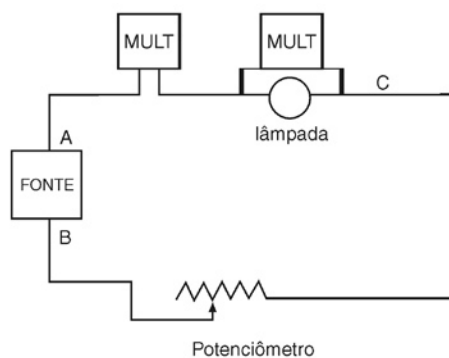


Figura 99

- Monte o circuito da Figura 98. Mantenha o substituidor de pilhas em 12V.

### MEDIDA DE CORRENTE ELÉTRICA

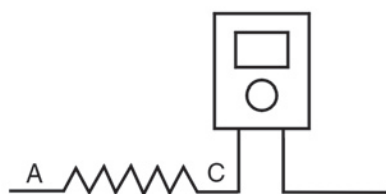


Figura 100



Figura 100-b

**Cuidado!!!**  
O modelo do  
multímetro do  
pólo pode ser  
diferente!!!

**Cuidado!!!** Coloque o multímetro na escala de 20A (DC). A Figura 100, repetida novamente, mostra como se deve introduzir o multímetro para medir a corrente elétrica no ponto C.

- Varie a corrente elétrica com o botão do potenciômetro de forma a obter luminosidades diferentes para as lâmpadas. Meça as diferenças de potencial (ESCALA DE 20V/DC) e as correntes elétricas e coloque os resultados na Tabela 4.

Tabela 4

	Luminosidade fraca	Luminosidade média	Luminosidade forte
Corrente - $i$			
Voltagem - $V_A - V_C$			
Potência - $\Delta V i$			

Marque a afirmativa correta:

- ( ) A luminosidade é maior quando a potência  $V_i$  é menor.
- ( ) A luminosidade é maior quando a potência  $V_i$  é maior.



## Experimento 9 - Distribuição de energia em resistores ligados em paralelo no quadro de luz I.

### Objetivo

Discutir qualitativamente a distribuição de energia em circuitos elétricos com ligações em paralelo quando se utiliza *uma fonte real* (a voltagem fornecida depende da corrente elétrica que atravessa a fonte).



### Material necessário ao experimento

- Quadro de luz I (1)
- Eliminador de pilhas
- Lâmpadas de lanterna de 3,9V, 0.3A (duas)
- Curtos RCA (4)

### Atividade experimental

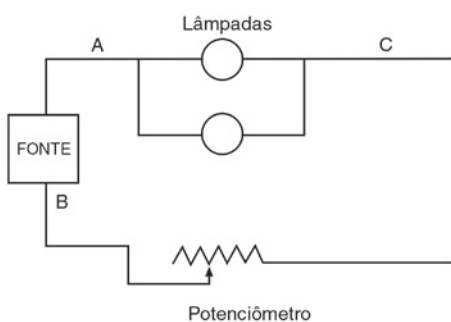


Figura 101a

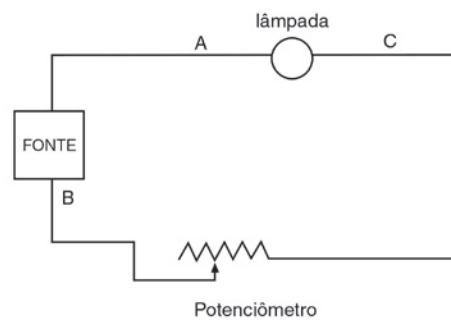


Figura 101b

- Um dos multímetros vai ser utilizado para medir a voltagem da fonte.

Escolha uma escala de voltagem de 200V DC (corrente contínua).

**Cuidado!!!** Você pode queimar o multímetro se ele for colocado na escala errada.

- O segundo multímetro vai ser utilizado para medir a corrente elétrica que atravessa a fonte. Um dos plugs de uma das ponteiros deve ser colocado no conector 20A. Deve-se escolher a escala de corrente contínua de 20A.

• Introduza no circuito da Figura 98 uma nova lâmpada ligada em paralelo com a primeira (veja Figura 101-a). Ajuste o potenciômetro para obter a *maior luminosidade possível nas lâmpadas*. Observe as lâmpadas. Meça a voltagem nos terminais das lâmpadas e coloque na Tabela 5.

- Meça a corrente elétrica que atravessa a fonte colocando o multímetro no ponto A. Anote o resultado na Tabela 5.
- Desatarraxe uma das lâmpadas e meça novamente a diferença de potencial nos terminais da lâmpada que permaneceu acesa e a corrente elétrica que atravessa a fonte. Anote o resultado na tabela a seguir.

Tabela 5

Número de lâmpadas	Voltagem $\pm \delta V$ [V]	Corrente elétrica $\pm \delta i$ [A]	$V_i \pm \delta(V_i)$ [W]
Duas lâmpadas em paralelo			
Uma lâmpada			

Complete as sentenças:

1. As correntes elétricas que atravessam as duas lâmpadas do circuito da Figura 101a são \_\_\_\_\_ porque elas estão submetidas à mesma \_\_\_\_\_ e as suas luminosidades são \_\_\_\_\_. As potências dissipadas nas duas lâmpadas são \_\_\_\_\_.

2. Quando o circuito tem duas lâmpadas ligadas em paralelo (circuito da Figura 101a), a corrente que atravessa a fonte é \_\_\_\_\_ do que aquela que existe quando uma das lâmpadas é desatarraxada (Figura 101b). Por isso, a dissipação de energia calorífica no interior da fonte, no caso do circuito da Figura 101a é \_\_\_\_\_ do que no caso da Figura 101b. A voltagem e a energia fornecidas a uma das lâmpadas do circuito da Figura 101a são \_\_\_\_\_ do que aquelas fornecidas à única lâmpada do circuito da Figura 101b. Por isso, as lâmpadas do circuito da Figura 101a brilham \_\_\_\_\_ do que aquela do circuito da Figura 101b.

3. Quando o circuito tem duas lâmpadas ligadas em paralelo (Figura 101a), a corrente que atravessa a fonte é \_\_\_\_\_ do que o dobro daquela que existe quando uma das lâmpadas é desatarraxada (Figura 101b). Portanto, as correntes elétricas que atravessam as lâmpadas do circuito da Figura 101a são \_\_\_\_\_ do que aquela que atravessa a lâmpada do circuito da Figura 101b. Como as correntes elétricas e as voltagens nas lâmpadas do circuito 101a são \_\_\_\_\_ do que aquelas da lâmpada do circuito 101b, as potências dissipadas e as luminosidades das lâmpadas do circuito 101a são \_\_\_\_\_ do que aquela da lâmpada do circuito 101b.

Justifique todas as suas respostas.

---

---

---

---

---

## Experimento 10 - Potência dissipada em resistores ligados em série no quadro de luz I.

### Objetivo

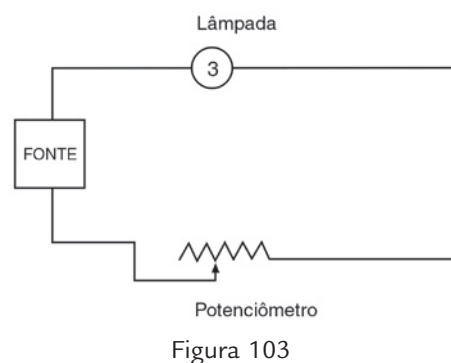
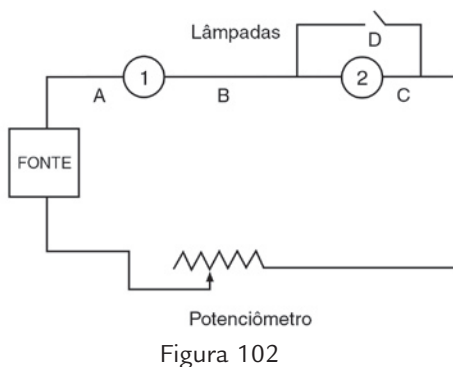
Investigar qualitativamente a distribuição de energia de resistores ligados em série em um circuito de corrente contínua produzida por uma fonte de corrente real.



### Material do experimento

- Multímetro (2)
- Quadro de luz I (1)
- Eliminador de pilhas
- Lâmpadas de lanterna de 3,9V/0,3A

### Atividade experimental



- Um dos multímetros vai ser utilizado para medir a voltagem da fonte.

Escolha uma escala de voltagem 200V DC.

**Cuidado!!!** Você pode queimar o multímetro se ele for colocado na escala errada.

- O segundo multímetro vai ser utilizado para medir a corrente elétrica que atravessa a fonte. Um dos plugs de uma das ponteiros deve ser colocado no conector 20 A. Deve-se escolher a escala de corrente contínua de 20 A.

- Monte o circuito representado na Figura 102. Coloque o botão do eliminador de pilhas em 12V. Utilize o potenciômetro para obter a maior luminosidade possível nas lâmpadas. Meça a diferença de potencial dos terminais das lâmpadas 1 e 2 e anote na Tabela 6.
- Meça as correntes elétricas que atravessam as lâmpadas.
- Feche o curto em D (curto RCA) para obter o circuito da Figura 103 e meça a corrente elétrica e a diferença de potencial nos terminais da lâmpada que permaneceu acesa (lâmpada 3). Anote o resultado na tabela.

Tabela 6

Número de lâmpadas	Voltagem $\pm \delta V$ [V]	Corrente elétrica $\pm \delta i$ [A]
Lâmpada 1		
Lâmpada 2		
Lâmpada 3		

Complete as sentenças:

1. No circuito da Figura 102, a corrente elétrica \_\_\_\_\_ sendo dissipada no trecho que vai de A até C, isto é, a corrente elétrica em C é \_\_\_\_\_ do que a corrente elétrica em A.
2. No circuito da Figura 102, a energia elétrica \_\_\_\_\_ sendo dissipada no trecho que vai de A até C, isto é, a energia potencial elétrica das cargas elétricas em C é \_\_\_\_\_ do que aquela em A.

Justifique todas as suas respostas.

---

---

---

---

---

---

---

## Experimento 11 - Distribuição de energia em resistores ligados em série no quadro de luz II (corrente alternada).

### Objetivo

Investigar qualitativamente a distribuição de energia de resistores ligados em série em um circuito com corrente alternada.

### Informações preliminares

A voltagem e a corrente elétrica em circuito que utiliza como fonte de corrente elétrica a rede elétrica não são constantes. Elas variam harmonicamente com o tempo com uma frequência  $f$  de 60 Hz.

$$\begin{aligned} V &= V_m \cos(2\pi f t) \\ I &= I_m \cos(2\pi f t) \end{aligned}$$

O multímetro não mede a corrente elétrica instantânea nem a voltagem instantânea. Ele mede a corrente elétrica eficaz (raiz quadrada do valor médio do quadrado da corrente elétrica instantânea em um período) e a voltagem eficaz (raiz quadrada do valor médio do quadrado da voltagem instantânea em um período), isto é,

$$\begin{aligned} V_{\text{eficaz}} &= \frac{V_m}{\sqrt{2}} \\ I_{\text{eficaz}} &= \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \end{aligned}$$

A potência média dissipada em um resistor percorrido por uma corrente alternada é dada por:

$$\overline{P} = \frac{V_{\text{eficaz}}^2}{R} = R I_{\text{eficaz}}^2.$$

Uma fonte de corrente elétrica alternada é considerada ideal quando a voltagem efetiva fornecida pela fonte não depende da corrente elétrica efetiva que atravessa a fonte.



A definição do valor médio de uma função será apresentada na disciplina de Cálculo.

### Material do experimento

- Multímetro (2)
- Quadro de luz II (1) (corrente alternada)
- Lâmpadas de 60W/110V (uma), 15W/2200V (duas), 7W/110V (uma)
- Curtos do tipo tomada (4)

### Atividade experimental

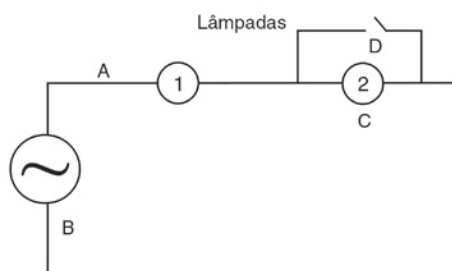


Figura 104

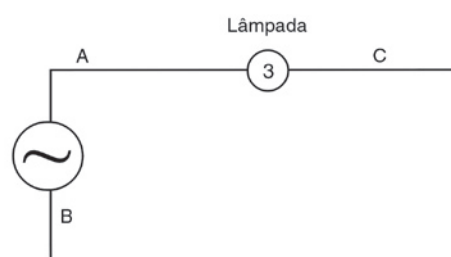


Figura 105

Monte o quadro de luz II de acordo com a Figura 104. Utilize inicialmente todas as lâmpadas iguais (15W/220). Ligue o circuito à rede elétrica

Multímetro 1



Figura 106

Multímetro 2



Figura 107

**Cuidado!!!**  
O modelo do  
multímetro do  
pólo pode ser  
diferente!!!

- Um dos multímetros (multímetro 1 - Figura 106) vai ser utilizado para medir a voltagem da fonte. Escolha uma escala de voltagem alternada  $>150V$  AC.

**Cuidado!!!** Você pode queimar o multímetro se ele for colocado na escala errada.

- O segundo multímetro (multímetro - Figura 107) vai ser utilizado para medir a corrente elétrica que atravessa a fonte. O plug de uma das ponteiros deve ser colocado no conector 20 A.

**Cuidado!!!** Deve-se escolher a escala de corrente alternada de 20 A( ~).

- Meça a diferença de potencial nos terminais da fonte e a corrente elétrica que atravessa a fonte e anote na Tabela 7.
- Meça a diferença de potencial nos terminais das lâmpadas e anote na Tabela 7.

**Cuidado!!!** Você pode ser queimar!!! Utilize um isolante térmico (por exemplo, papel-toalha) para desatarraxar uma das lâmpadas. Observe a outra lâmpada.

- Com um curto no ponto D (curto tomada) retire a lâmpada 2 do circuito. Meça a diferença de potencial nos terminais da fonte e a corrente elétrica que atravessa a fonte e anote o resultado na Tabela 7.
- Retire o curto do ponto D e substitua a lâmpada 2 por uma lâmpada de 60W/110V e substitua a lâmpada 1 pela lâmpada de 7W/110V. Meça a diferença de potencial nos terminais das duas lâmpadas e coloque na Tabela 7.

Tabela 7

	Voltagem $\pm \delta V$ [V]	Corrente $\pm \delta i$ [A]	Resistência $V/i \pm \delta R$ [ $\Omega$ ]
Fonte (Figura 104)			
Fonte (Figura 105)			
Lâmpada 1		<b>Cuidado!!! Cuidado!!! Cuidado!!! Cuidado!!! Cuidado!!!</b>	
Lâmpada 2			
Lâmpada 3			
Lâmpada 60W/110V			
Lâmpada 7W/110V			

As medidas de corrente só devem ser feitas para a fonte. Se você fizer para as lâmpadas, você PROVOCARÁ UM CURTO!!!

Complete as sentenças:

1. Na faixa de corrente elétrica utilizada, a fonte de corrente alternada \_\_\_\_\_ uma fonte ideal.
2. As potências dissipadas nas lâmpadas 1 e 2 são \_\_\_\_\_ do que a dissipada na lâmpada 3 porque a corrente elétrica e a voltagem na lâmpada 3 são \_\_\_\_\_ do que nas lâmpadas 1 e 2.
3. A potência dissipada na lâmpada de 60W/110 V é \_\_\_\_\_ do que a potência dissipada na lâmpada de 7W/110, porque as correntes nas duas lâmpadas são \_\_\_\_\_ e a resistência da lâmpada de 60W/110 V é \_\_\_\_\_ do que aquela da lâmpada de 7W/110V.



## Experimento 12 - Distribuição de energia em resistores ligados em paralelo no quadro de luz II (corrente alternada).

### Objetivo

Investigar qualitativamente as correntes elétricas que atravessam resistores ligados em paralelo em circuitos de corrente alternada.

### Material do experimento

- Multímetro
- Quadro de luz II (corrente elétrica alternada)
- Curtos do tipo tomada (4)
- Lâmpadas de 15W/220V (duas), de 60W/110V, de 7W/110V e de 15W/110V(uma)

### Atividade experimental

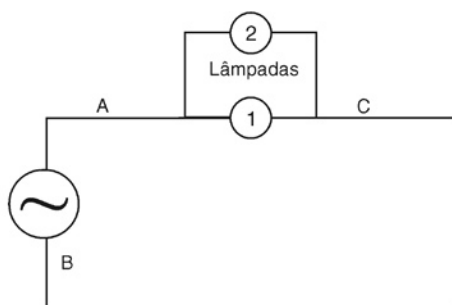


Figura 108

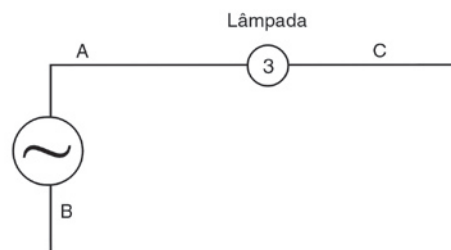


Figura 109

- Monte um Quadro de luz II de acordo com a Figura 108 . Utilize inicialmente lâmpadas iguais (15W/110). Ligue o circuito à rede elétrica.

*Coloque o multímetro na escala de >150V AC (corrente alternada).*

**Cuidado!!!** Você pode queimar o multímetro se for colocado na escala errada.



- Meça a diferença de potencial nos terminais de todas as lâmpadas e coloque na Tabela 8.

***Cuidado para você não se queimar!!!***  
Utilize um isolante térmico (por exemplo, papel-toalha) para desatarraxar uma das lâmpadas.

- Meça a diferença de potencial entre os terminais da lâmpada que continuou acesa e anote o resultado na Tabela 8.

Tabela 8

	Vtagem $\pm \delta V$
Lâmpada 15W/110V	
Lâmpada 1 circuito da Figura 108	
Lâmpada 2 circuito da Figura 108	
Lâmpada 3 circuito da Figura 109	

1. Marque as respostas corretas:

- ( ) As correntes elétricas que atravessam as lâmpadas 2 e 3 são diferentes.
- ( ) As correntes elétricas que atravessam as lâmpadas 2 e 3 são iguais.
- ( ) As potências dissipadas nas lâmpadas 2 e 3 são iguais, porque elas estão submetidas a diferenças de potenciais iguais e são atravessadas por correntes diferentes.
- ( ) As potências dissipadas nas lâmpadas 2 e 3 são iguais porque elas estão submetidas a diferenças de potenciais iguais e são atravessadas por correntes elétricas iguais.
- ( ) A corrente elétrica que atravessa a lâmpada 1 do circuito da Figura 108 é maior que aquela que atravessa a lâmpada 3 no circuito da Figura 109.
- ( ) A corrente elétrica que atravessa a lâmpada 1 do circuito da Figura 108 é menor do que aquela que atravessa a lâmpada 3 no circuito da Figura 109.

2. ( ) Na faixa de corrente elétrica utilizada, a rede elétrica \_\_\_\_\_ uma fonte ideal.

Justifique as suas respostas.

---

---

---

---

---

- Troque a lâmpada 1 por uma lâmpada de 7W/110V e a lâmpada 2 por uma lâmpada de 60W/110V. Meça a diferença de potencial nos terminais das lâmpadas 1 e 2 coloque na Tabela 9.

Tabela 9

Lâmpadas	Voltagem $\pm \delta V$ [V]
Primeira - 7W/110V	
Segunda - 60W/110V	

3. Marque as respostas corretas:

- ( ) As correntes elétricas que atravessam as lâmpadas 1 e 2 são diferentes.
- ( ) As correntes elétricas que atravessam as lâmpadas 1 e 2 são iguais.
- ( ) A lâmpada de 60W/110V brilha mais que a lâmpada de 7W/110V.
- ( ) A lâmpada de 60W/110V brilha menos que a lâmpada de 7W/110V.

Justifique as suas respostas utilizando os resultados da Tabela 10.

---

---

---

---

---

- Troque a lâmpada de 60W/110V por uma lâmpada de 15W/110V e a lâmpada de 7W/110V por uma lâmpada de 15W/220V. Meça a diferença de potencial nos terminais das lâmpadas 1 e 2 e coloque na Tabela 10.

Tabela 10

Lâmpadas	Voltagem $\pm \delta V$ [V]
Primeira - 15W/110V	
Segunda - 15W/220V	

4. Podemos concluir que, quando ligamos uma lâmpada de 220V em uma voltagem de 110V, ela brilha \_\_\_\_\_ porque a potência produzida é \_\_\_\_\_ do que a especificada na lâmpada. Este fato sugere que quando ligamos um aparelho que foi planejado para funcionar em uma voltagem de 220V em uma voltagem de 110V ele funciona \_\_\_\_\_ e quando ligamos um aparelho planejado para funcionar em 110V em uma voltagem de 220V ele \_\_\_\_\_.

## E para terminar...

Construímos neste módulo os conceitos mais simples associados aos fenômenos elétricos. Eles nos permitiram entender as interações entre cargas elétricas, o conceito de voltagem, a distribuição de correntes e energia nos circuitos elétricos.

Foram realizadas práticas onde foram medidas correntes elétricas, voltagens e resistências elétricas.

A interação elétrica foi entendida a luz do conceito de campo elétrico. Comentamos que a interação entre ímãs também pode ser descrita com o conceito de campo magnético. Hoje, já sabemos que os campos elétricos e magnéticos são parte do campo eletromagnético. O campo eletromagnético pode ser produzido por correntes elétricas que variam rapidamente no tempo. Ele é o responsável pela transmissão de informações entre as emissoras de televisão e de rádio e as residências, pelo transporte de energia entre o Sol e a Terra, etc.

Iniciamos a nossa disciplina com um modelo geométrico da luz para compreender o método científico. Olhamos para os céus para entender melhor o nosso sistema solar. Aprendemos alguns conceitos básicos da Mecânica para explicar o movimento dos corpos. Conhecemos um pouco da interação elétrica e avançamos no nosso conhecimento da composição da matéria e do mundo tecnológico que nos cerca. No próximo módulo aprenderemos um pouco sobre os conceitos de calor e temperatura e as Leis da Termodinâmica.



## História da eletricidade

### Objetivos

Mostrar de forma sucinta a história dos modelos que foram propostos para descrever a interação entre cargas elétricas.

Em 1600, William Gibert publicou um livro sobre eletricidade e magnetismo que é considerado o início da história moderna da eletricidade e do eletromagnetismo.

Os povos antigos já conheciam a capacidade do âmbar para atrair corpos leves após ser atritado. Durante dois mil anos, acreditava-se que essa propriedade fosse exclusividade do âmbar e de outras poucas substâncias. Foi William Gilbert (1540-1603) quem demonstrou que esse ponto de vista estava errado. Atritou um grande número de substâncias que passaram a atrair corpos leves. Entre essas substâncias podemos citar o vidro, o enxofre e as pedras preciosas. Ele denominou eletricidade a força exercida pelos corpos atritados. *Na época de Gilbert, acreditava-se que um corpo só poderia exercer força sobre o outro se estivesse em contato com ele.* A explicação que se dava para a atração gravitacional entre os corpos baseava-se na crença de que a atmosfera era o eflúvio que puxava os corpos para a Terra. Por isso, Gilbert construiu uma teoria em que uma atmosfera elétrica era o eflúvio responsável pela força elétrica exercida nos corpos leves.

Como ele era médico, a construção e a descrição da atmosfera elétrica responsável pela força elétrica foram influenciadas pelas idéias da sua época a respeito do caráter dos seres humanos. Naquela época, imaginava-se que os seres humanos tinham quatro tipos de humores: catarro, sangue, raiva e melancolia. De acordo com a proporção desses humores, uma pessoa era classificada como fleumática, sangüínea, colérica ou melancólica. Gilbert observou que as substâncias eletrizáveis eram, na sua maioria, duras e transparentes; de acordo com o pensamento da época, eram formadas pela consolidação de líquidos aquosos.

Para ele, o “fluido que escoava” desses líquidos deveria ser uma espécie de humor responsável pelas propriedades elétricas dos corpos eletrizáveis. O atrito aqueceria e liberaria esse humor, emitido na forma de um eflúvio, que formaria uma atmosfera em torno do corpo atritado. Essa atmosfera deveria ser tênue, uma vez que não era percebida pelos nossos sentidos, e atraía os corpos leves na direção dos corpos eletrizáveis.

William Gilbert (1540-1603) nasceu em Colchester, na Grã-Bretanha. Estudou em Cambridge, onde se formou médico. Praticou medicina em Londres e chegou a ser o médico da rainha Elizabeth I.

Otto von Guericke  
inventa as  
primeiras máquinas  
eletrostáticas.

O grande impulso na compreensão dos fenômenos elétricos se deve ao desenvolvimento da “máquina eletrostática”. A invenção original deveu-se a Otto von Guericke, engenheiro e diplomata alemão, e por algum tempo, prefeito de Magdeburg, que no fim da década de 1640, interessou-se por física. Uma idéia que o intrigava era a sugestão de que os corpos celestes se atraíam por magnetismo. Ele pensou em refazer as experiências de magnetismo realizadas por Gilbert utilizando uma esfera com minerais fundidos para imitar o que julgava ser a composição da Terra. As primeiras esferas construídas continham uma grande quantidade de enxofre. Mais tarde, ele utilizou uma esfera de enxofre puro que foi fixada em um eixo que podia girar. Von Guericke verificou que se esfregasse a esfera com a mão, à medida que ele girava a esfera adquiria poderes de atração e expelia centelhas. Ele não percebeu que os efeitos observados eram devidos à eletricidade estática.

Mas o estudo da eletricidade realmente só se desenvolve a partir da década de 1720. Foi quando Stephen Gray, filósofo pouco conhecido, estimulado pelos trabalhos de Von Guericke e Hawksbee, realizou uma série de experiências usando a máquina eletrostática. Naquela ocasião, se considerava que o eflúvio era inseparável do corpo eletrizado.

Stephen Gray descobriu que era possível transferir para outros corpos a eletricidade produzida no vidro, por atrito, através de um grupo de materiais. Jean Théophile Desaguliers continuou os experimentos de Gray e denominou esse grupo de materiais de não-elétricos ou condutores.

Stephen Gray  
descobriu que era  
possível transferir  
para outros corpos a  
eletricidade produzida  
no vidro, por atrito,  
através de um  
grupo de materiais.

Em 1729, Stephen Gray descobriu que era possível transferir para outros corpos a eletricidade produzida no vidro, por atrito, através de um grupo de materiais. Entre esses materiais estavam os metais. Depois da morte de Gray, em 1736, Jean Théophile Desaguliers (1683-1744) continuou seus experimentos. Ele denominou **não-elétricos** ou **condutores** os materiais que permitiam o transporte de eletricidade.

Jean Théophile  
Desaguliers continuou  
os experimentos de  
Gray e denominou  
esse grupo materiais  
de não-elétricos ou  
condutores.

Após as descobertas de Gray, as teorias que afirmavam que o eflúvio elétrico era inseparável do material atritado perderam a credibilidade. Passou-se a acreditar que a eletricidade era um fluido que podia passar de um corpo para outro. Esse fluido foi considerado uma das substâncias básicas do universo. Nessa ocasião foi levantada uma outra questão: era a eletricidade uma outra manifestação do fenômeno do calor ou era um novo fluido? Os defensores da identidade entre calor e eletricidade argumentavam que ambos podiam ser produzidos por atrito, podiam produzir combustão e, além disso, os melhores condutores de eletricidade eram os melhores condutores de calor. Os opositores dessa idéia ressaltavam que a eletrização produzia pouco calor. Além disso, citavam a experiência realizada por Gray em 1729, em que foi utilizado um cubo de carvalho maciço e outro oco. As dimensões dos cubos eram iguais e foram eletrizados da mesma forma; os fenômenos elétricos produzidos pelos cubos foram idênticos. Gray concluiu que somente as superfícies tomavam parte dos fenômenos elétricos. Portanto, enquanto o calor penetrava no interior dos corpos, o fluido elétrico permanecia na superfície ou perto dela. No meio do século XVIII, o fluido elétrico era considerado uma atmosfera que envolvia um corpo carregado. É muito interessante conhecer algumas citações sobre eletricidade:

- “A eletricidade que um não-elétrico com grande comprimento (corda de cânhamo com 800 a 900 pés) recebe caminha de um extremo ao outro em uma esfera de eflúvio”. (Citado por Desaguliers em 1740);

- “Em torno de um corpo eletrizado existe um vórtice de matéria fina em estado de agitação, que é empurrada na direção dos corpos leves que estão no interior da esfera de atividade. A existência desse vórtice não é uma simples conjectura, uma vez que ele causa em uma face a mesma sensação produzida por uma teia de aranha”.

Charles-François Du Fay denominou **vítrea** a eletricidade encontrada no vidro e **resinosa** a encontrada no âmbar.

Charles-François Du Fay (1698-1739) foi superintendente dos jardins do rei da França, notou que uma folha de ouro se comportava de maneira diferente quando colocada próxima de vidro eletrizado. Explicou esse fato supondo que os vórtices do fluido elétrico em torno do bastão atraíam a folha. A folha de ouro absorvia parte do eflúvio elétrico e criava o seu próprio vórtice. Os dois vórtices se expandiam em sentidos opostos e se repeliam. O vórtice do tubo, sendo mais forte, expulsava o vórtice da folha de ouro. Du Fay tentou responder às seguintes perguntas:

- Um corpo eletrizado por contato com outro corpo eletrizado também é repelido por outros corpos eletrizados?

- Dois corpos eletrizados diferem apenas no que diz respeito à intensidade da eletrização?

A investigação dessas idéias levou-o a descobrir que existiam dois tipos de eletricidade com naturezas completamente diferentes: aquelas que apareciam nos sólidos transparentes, tais como vidro, cristais etc., e aquelas que apareciam em resinas como âmbar, cera etc. Eletricidades do mesmo tipo se repeliam e de tipos diferentes se atraíam. Denominou **vítrea** a eletricidade encontrada no vidro e **resinosa** a encontrada no âmbar.

Charles-François Du Fay denominou vítrea a eletricidade encontrada no vidro e resinosa a encontrada no âmbar.

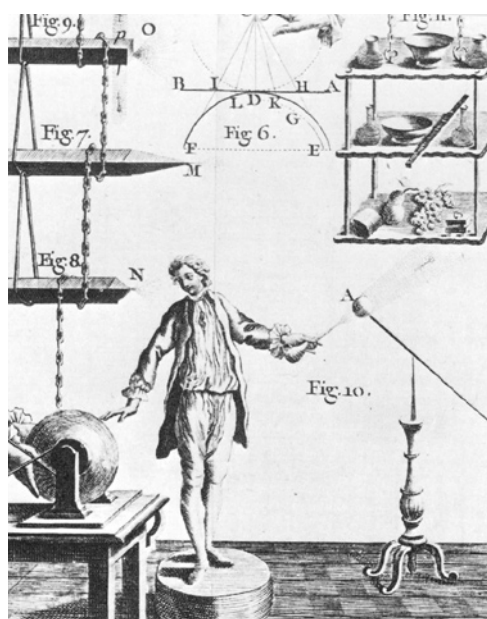


Figura 110 - Máquina eletrostática construída com uma esfera de vidro.

Em 1759, Robert Symmer, baseado nas idéias publicadas por Du Fay, propõe a existência de dois fluidos elétricos, o fluido positivo e o fluido negativo.

Nas décadas de 1740 e 1750, construíram-se diversas variações da máquina elétrica de Von Guericke, utilizando-se um globo e um cilindro de vidro para gerar cargas elétricas. Posteriormente, elas se tornaram mais poderosas, em especial quando John Cuthbertson, na década de 1780, desenhou um aparelho usando dois pratos de vidro que giravam em direções opostas, e todas elas produziam fontes mais poderosas de eletricidade estática e permitiam que se efetuassem experiências em maior escala. Uma consequência disso foi a descoberta, em 1745, por Ewald von Kleist, de um aparelho capaz de armazenar eletricidade de maneira tal que, quando descarregava, soltava uma centelha suficientemente grande para acender uma quantidade de álcool. Ewald acumulou a eletricidade estática em vidro de remédio forrado com metal.

Já era sabido que a eletricidade dos corpos se perdia rapidamente no ar. Em 1745, van Musschenbroek (1692-1761), professor em Leyden, tentou descobrir um dispositivo que permitisse guardar eletricidade. E criou a **garrafa de Leyden**, que permitiu armazenar eletricidade.

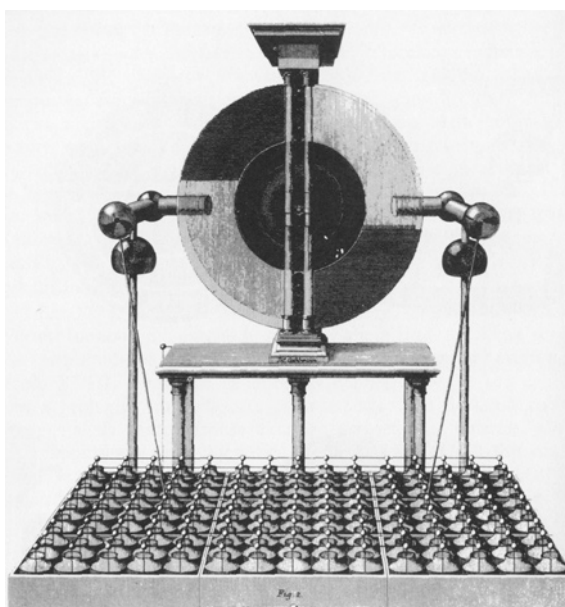


Figura 111 - Bateria de garrafas de Leyden

Tentou conservar a carga elétrica de uma porção de água envolvendo-a com um isolante como vidro, por exemplo. Em um dos seus experimentos, utilizou uma garrafa de vidro contendo água. A garrafa foi pendurada por um arame no cano de uma arma. O arame que atravessava a rolha da garrafa penetrava algumas polegadas na água.



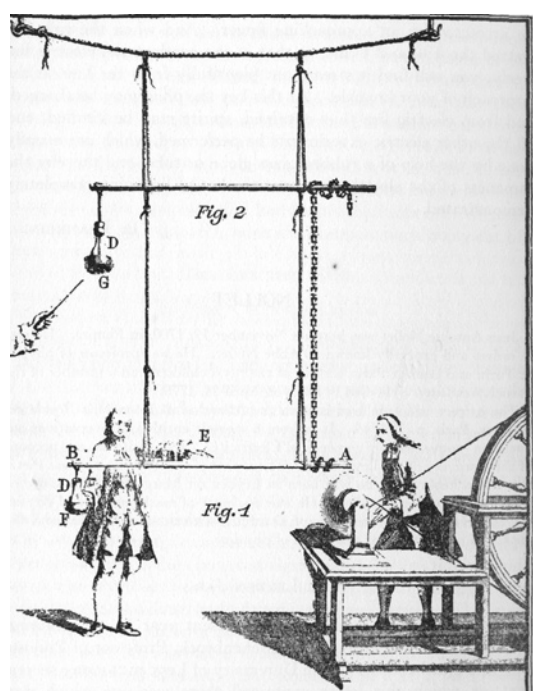


Figura 112 - Experiência de Van Musschenbroek com uma garrafa de Leyden

O cano da arma foi pendurado no teto por fios de seda e colocado em contato com um globo de vidro em movimento. O globo estava sendo eletrizado por mãos secas e Van Musschenbroek solicitou a um amigo, Cunacus, que segurasse uma garrafa com uma das mãos e com a outra tocou o cano da arma. Cunacus levou um choque violento que atravessou o seu braço e o seu peito. Essa experiência demonstrou a existência de um processo para armazenar eletricidade. A garrafa de Leyden é o predecessor dos capacitores.

Logo a seguir à criação da garrafa de Leyden, a teoria de um único fluido elétrico reapareceu. Ela foi proposta simultaneamente por dois cientistas: William Watson (1715-1870) e Benjamin Franklin. De acordo com essa teoria, a matéria tem um único fluido em uma proporção que não lhe atribui propriedades elétricas. Um excesso ou a falta desse fluido é que dá origem à eletricidade. Esse fluido não pode ser criado ou destruído. Ele só pode ser transferido de um corpo para o outro. A afirmativa anterior é conhecida como o *princípio da conservação da carga elétrica*.

A argumentação utilizada por Franklin para propor a teoria de um único fluido se baseou na seguinte experiência: duas pessoas (A e B) ficavam isoladas da Terra por cera, e uma terceira ficava aterrada. Um tubo de vidro era eletrizado pela primeira pessoa através do atrito com suas mãos, a segunda esfregava os nódulos dos seus dedos no vidro e a terceira deveria receber centelhas das duas primeiras. As centelhas só eram produzidas quando as duas primeiras pessoas não se tocavam.

A explicação fornecida por Franklin para a experiência era: a pessoa A cede fluido elétrico para o vidro; a pessoa B rouba o fluido recebido pelo vidro. O fluido elétrico flui de A para B. Quando A aponta para C, o fluido elétrico sai de C e passa para A, que estava com falta de fluido. Quando a pessoa B aponta para C, o fluido elétrico sai de B e vai para C. Quando as pessoas A e B se tocam antes de apontar para C, o fluido que estava em B retorna para A e os dois ficam sem eletrização.



Franklin explicou a eletrização dos corpos imaginando que a matéria possui um fluido de natureza vítrea. Um excesso desse fluido ou a sua falta tornava o corpo eletrizado.

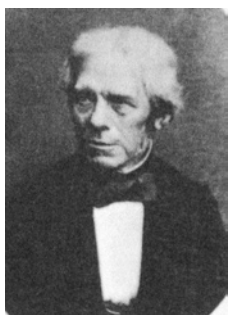
A denominação moderna de cargas elétricas positivas e negativas se deve a Benjamin Franklin. Os corpos com excesso do fluido teriam eletricidade positiva; aqueles que têm falta teriam eletricidade negativa. Ao iniciar as suas experiências, Franklin não conhecia a teoria de Du Fay. Mas é evidente que a eletricidade positiva de Franklin coincide com a vítrea de Du Fay; e a negativa, com a resinosa.

Todavia é curioso conhecer quais foram as considerações da observação de descargas elétricas produzidas por corpos com eletricidade resinosa e com eletricidade vítrea. Quando a eletricidade era resinosa, a descarga se abria sobre a superfície do condutor que a recebia, como se ela estivesse saindo dele. Quando se produzia, com uma garrafa de Leyden, uma descarga com eletricidade vítrea no interior e resinosa no exterior e se utilizava um condutor que tinha uma das pontas próxima à esfera em contato com o interior da garrafa e a outra ponta próxima à camada externa com carga negativa, observava-se que, no escuro, a esfera parecia uma estrela que emanava luz, e a ponta que estava próxima à camada externa da garrafa emitia um feixe de raios.

Franklin sugeriu que o fluido do interior da garrafa passava pelo condutor e era conduzido para o exterior da garrafa. Ele também observou que a chama de uma vela colocada entre o corpo eletrizado e o condutor que recebia uma descarga se inclinava para o condutor, quando a descarga era de um corpo com eletricidade vítrea, e para o corpo carregado, quando a eletricidade era resinosa. Entretanto, Franklin comentou que os fatos descritos anteriormente não permitiam decidir entre as seguintes hipóteses:

- 1) O fluido elétrico tem natureza vítrea. Portanto, um corpo com eletricidade vítrea tem excesso de fluido elétrico;
- 2) O fluido elétrico tem natureza resinosa. Portanto, o corpo com eletricidade vítrea tem falta de eletricidade resinosa.

À semelhança dos seus contemporâneos, Franklin utilizou as seguintes idéias para descrever o fluido elétrico: é composto por partículas muito sutis, uma vez que elas eram capazes de penetrar condutores densos sem encontrar nenhuma resistência. Todavia, abandona a teoria de difusão de eflúvios para descrever a repulsão elétrica e começa a introduzir a teoria de ação a distância para descrever a interação entre cargas elétricas.



Faraday não acreditava na teoria de ação à distância

A doutrina aceita na época (primeira escola) não admitia a ação a distância e tinha semelhanças com aquela (segunda escola) que vai ser introduzida por Faraday um século depois: as duas explicavam a interação elétrica sem introduzir a ação a distância. As duas teorias supunham que alguma coisa intrínseca ao sistema elétrico é que atuava no ponto onde a ação elétrica se realiza. Nas teorias antigas, era o fluido elétrico que efetuava a ação elétrica, enquanto nas teorias modernas é o “estresse do espaço”. No intervalo entre a queda da primeira escola e a aceitação da segunda escola, prevaleceu a teoria de ação a distância.

Os germes da segunda escola podem ser encontrados nos escritos de Benjamin Franklin. Aparecem na correspondência com Collinson, datada de 1º de setembro de 1747, em uma discussão sobre a garrafa de Leyden. Ao carregar a garrafa de Leyden, o fluido elétrico é transferido de um lado para o outro do vidro, através da camada que está em contato com a outra camada. Supõe-se que o vidro é impermeável à passagem de fluido elétrico. Por isso, a falta de eletricidade de um lado pode coexistir com o excesso do outro lado, durante o tempo em que os dois lados não são conectados; mas a eletricidade é equalizada através do corpo do experimentador que recebe o choque.

Apesar de, pela teoria da garrafa de Leyden, ter sido obrigado a supor que o vidro era impermeável ao fluido elétrico, Franklin sabia que uma placa de vidro colocada entre um corpo carregado e objetos não era capaz de evitar a ação elétrica do corpo carregado sobre os objetos. Ele foi forçado a supor que a superfície do vidro próximo ao corpo excitado é diretamente afetada e é capaz de exercer uma influência através do vidro sobre a superfície oposta; a última superfície recebe então uma espécie de excitação secundária ou derivada, que é responsável pelo efeito elétrico depois dela.

Essa idéia se harmoniza admiravelmente com o fenômeno da garrafa de Leyden; agora é possível afirmar que o excesso de eletricidade na face interna do vidro exerce uma repulsão através da substância do vidro que causa uma deficiência na outra face, expulsando a eletricidade dela.

Franklin chegou então a um modelo de ação a distância entre as partículas dos fluidos. Esta teoria foi reforçada por outros experimentos. Franklin escreveu: “Uma corrente em uma fonte, densa e contínua, quando carregada, separa e forma um *píncel* com todas as gotas tentando se afastar umas das outras. Com a finalidade de explicar a atração entre corpos com cargas opostas, em que num existe excesso de eletricidade comparada com a matéria comum e no outro excesso de matéria comum comparado com a eletricidade, ele assumiu que “apesar de as partículas da matéria elétrica se repelirem, existe uma forte atração pela outra matéria”, de tal forma que “a matéria comum é uma espécie de esponja do fluido elétrico”. Ela absorve eletricidade até saturar, e a partir de então o excesso de eletricidade permanece na superfície do corpo.

O poder de atração e de repulsão foi atribuído somente ao fluido elétrico, que Franklin considerou ter natureza vítrea; quando a repulsão entre corpos eletrizados com eletricidade resinosa chegou ao seu conhecimento, ficou perplexo. Como veremos, essa dificuldade foi resolvida por Aepinus.

Apesar de acreditar que a eletricidade agia a distância, Franklin não abandonou a doutrina do eflúvio. Para ele, “a forma da atmosfera elétrica era a do corpo que ele envolve”. Essa forma pode tornar-se visível em um ar parado. Ele observou que a atmosfera de eflúvio não parece afetar nem é afetada pelo ar seco, uma vez que é possível respirar livremente, próximo de um corpo carregado e uma corrente de ar seco não elimina a eletricidade dos corpos.

Franz Ulrich Theodor Aepinus (1724-1802) propôs a teoria de ação a distância para a eletricidade. Ele abandonou completamente a teoria do eflúvio, que tinha como filosofia a idéia de que para um corpo exercer força sobre o outro tinha de haver contato. Essa idéia reaparece com outra forma, anos depois, com Faraday. Ele explica a repulsão dos corpos resinosos com uma nova suposição: as partículas de matéria com falta do fluido elétrico se repelem.

Ulrich Theodor Aepinus (1724-1802) propôs a teoria de ação a distância para a eletricidade.

Priestley utiliza uma analogia com a gravitação e argumentos teóricos para propor a lei do inverso do quadrado para a interação eletrostática.

A relação da força elétrica com o inverso do quadrado da distância é proposta por Joseph Priestley (1733-1804), após ter tomado conhecimento através do seu amigo Franklin do fato de que um recipiente metálico oco e carregado eletricamente não conseguia atuar sobre corpos colocados no seu interior. Em 21 de dezembro de 1766, Priestley faz experiências que mostram que não existe carga elétrica na superfície interna de um recipiente metálico oco e carregado (exceto próximo das suas bordas) e nenhuma força em objetos colocados no seu interior. Na época deduz que a força gravitacional teórica exercida por uma camada uniforme de massa em corpos colocados no seu interior era nula. Em 1767, baseado no comportamento análogo da camada de massa e do recipiente carregado, Priestley conjectura que a força elétrica entre duas cargas elétricas deveria variar com o inverso do quadrado da distância, mas não faz experimentos para provar sua conjectura.

Em 1769, Dr. John Robison (1739-1805) faz experimentos para medir a força elétrica entre cargas iguais e entre cargas diferentes. Obtém que a repulsão entre cargas iguais era inversamente proporcional à distância elevada a 2,06 e que a atração entre cargas diferentes era inversamente proporcional à distância elevada ao quadrado. Robinson conjectura que a dependência da força com a distância, nos dois casos, deveria ser com o inverso do quadrado da distância.

Henry Cavendish (1731-1810), filho do Lord Charles Cavendish, apresentou publicações em que comentava que a força elétrica entre duas cargas elétricas deveria ser inversamente proporcional a  $x^n$ . A potência  $n$  deveria ser menor que 3 e maior que 2. Aliás, provavelmente 2. Somente após a sua morte, em meados do século XIX, Lord Kelvin encontrou escritos que evidenciavam que Cavendish descobrira a lei do inverso do quadrado da distância. Todavia, esses resultados não foram publicados por Cavendish.

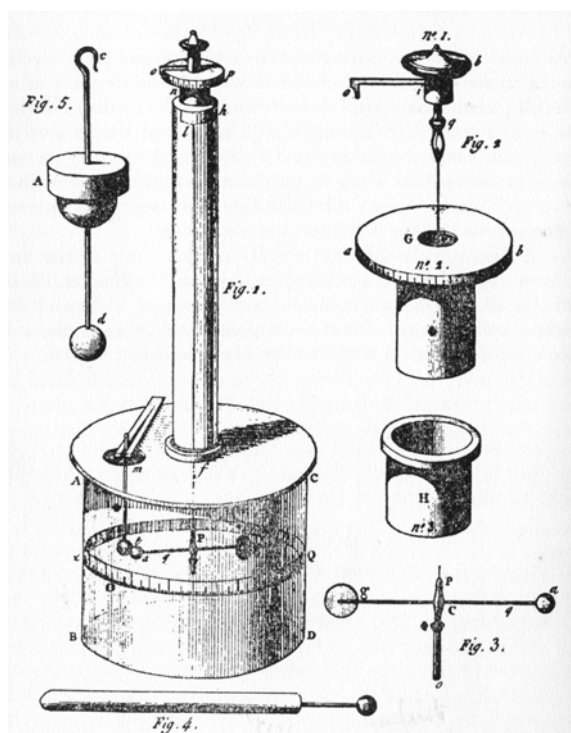


Figura 113 - Balança de Coulomb

Augustin Coulomb (1736-1806) inventa e constrói uma balança de torção em 1785. Ele prova a conjectura feita por Priestley, de que a relação da força elétrica entre duas cargas elétricas variava com o inverso do quadrado da distância. Ele não aceita a teoria de um único fluido elétrico, pois concorda com a teoria dos dois fluidos proposta, em 1759, por Robert Symmer.

A discordância entre os defensores da teoria dos dois fluidos e os da teoria de um único fluido estava no fato de que, no primeiro caso, acreditava-se que os dois fluidos se movimentavam no interior do condutor e, no segundo caso, só existia um fluido se movendo.

Siméon Denis Poisson (1781-1840), em analogia com o potencial gravitacional, introduz o conceito de potencial elétrico. Michael Faraday traz de volta o conceito de que só pode haver força se houver contato. Introduz as linhas de força para explicar as forças elétricas e magnéticas.



A. Coulomb



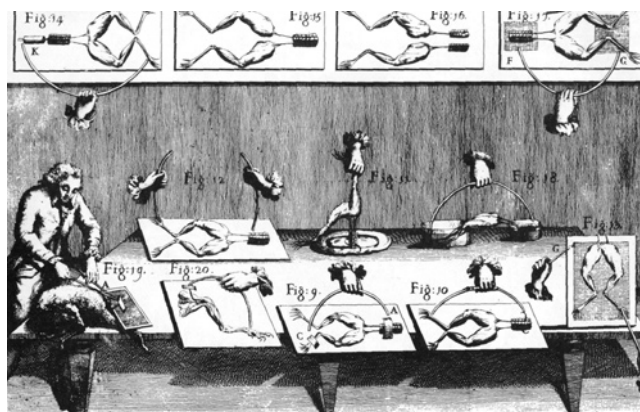


Figura 114 - Luigi Galvani descobre a eletricidade nas rãs

Os últimos progressos em matéria de eletricidade no século XVIII aconteceram na Itália, nas cidades de Bolonha e Pavia. Em 1780, Luigi Galvani, professor de obstetrícia, realizou uma série de investigações sobre as contrações dos membros posteriores de rãs, quando se lhes aplicava eletricidade estática. Galvani interpretou seus resultados como devidos à “**eletricidade animal**”. Concluiu que tinha provado uma idéia que fora discutida freqüentemente durante todo o século XVIII - a de que os nervos dos músculos animais continham um fluido sutil semelhante, mas não igual ao fluido elétrico.



Alessandro Volta

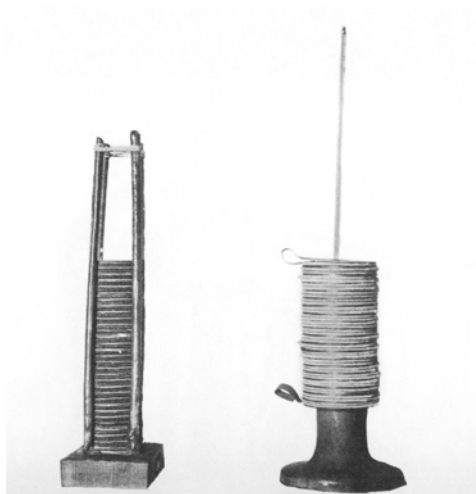


Figura 115 - Pilha criada por Volta

A publicação dos resultados de Galvani criou uma polêmica entre aqueles que acreditavam que a eletricidade animal era diferente da eletricidade encontrada nos objetos e os que as consideravam iguais. Alessandro Volta (1745-1827) não acreditava na existência de uma eletricidade animal; para provar sua hipótese, constrói a primeira pilha. As pilhas deram um grande impulso ao estudo da eletricidade, porque permitiram a produção de correntes elétricas constantes.

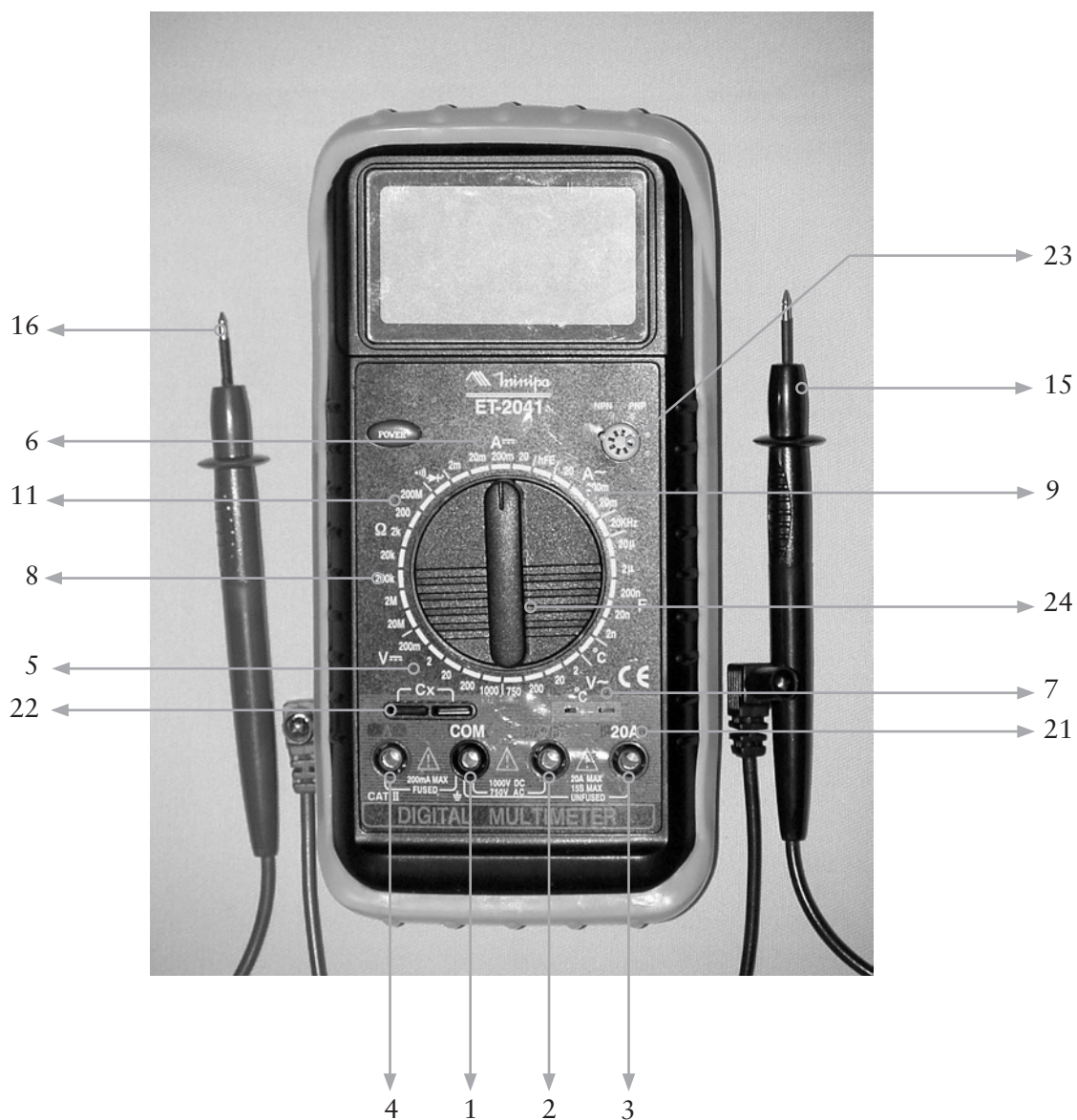
Humphry Davy (1779-1829) mostrou que a corrente elétrica que atravessa um condutor metálico é diretamente proporcional à área e à condutividade do condutor e inversamente proporcional ao seu comprimento. Ele também estudou a condutividade de vários metais e mostrou que ela diminui com a temperatura.

Em 1826, George Simon Ohm (1787-1854) enuncia a lei que estabeleceu que a voltagem nos terminais de condutores era proporcional à corrente elétrica, lei que ganhou seu nome.





## Medindo grandezas elétricas com o multímetro Minipa ET-2041



1. Conector aterrado
2. Conector com para medir voltagens, resistências, frequências, continuidade e diodos
3. Conector para medir altas correntes elétricas
4. Conector para medir correntes elétricas menores ou iguais a 200 mA
5. Escala para medir voltagens em circuitos com correntes contínuas  $V \text{ -----}$
6. Escala para medir correntes contínuas  $A \text{ -----}$
7. Escala para medir voltagens alternadas  $V \sim$
8. Escala para medir resistências  $\Omega$
9. Escala para medir correntes alternadas  $A \sim$
10. Escala para medidas de capacitâncias
11. Posição para medidas de continuidade e teste de diodo
12. Posição para medidas de temperaturas
13. Posição para teste de hFe em transistores
14. Posição para medidas de frequências
15. Ponta de prova preta do multímetro
16. Ponta de prova vermelha do multímetro
17. Termopar tipo K
18. Plug vermelho
19. Plug preto
20. Plug do termopar
21. Soquete para medidas de temperaturas
22. Soquete para medidas de capacitâncias
23. Soquete para testes de hFe em transistores NPN e PNP
24. Seletor de escalas

O multímetro é um instrumento que é utilizado para medidas elétricas (correntes, voltagens, resistências, etc). A impedância desse multímetro é de 10 M $\Omega$  no caso de medidas de voltagens.

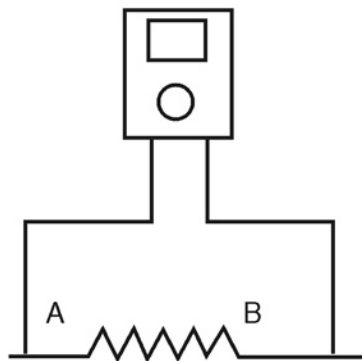
O multímetro mede voltagens em circuitos percorridos por correntes elétricas contínuas e alternadas.

As correntes elétricas e as voltagens em um circuito elétrico percorrido por uma corrente contínua são constantes ( $I = I_c$  e  $V = V_c$ ).

As voltagens e corrente elétrica em um circuito percorrido por uma corrente elétrica alternada varia com frequência da fonte ( $I = I_c \cos(\omega t + \delta)$ ,  $V = V_c \cos(\omega t + \delta)$ ).

O multímetro mede as voltagens e as correntes elétricas efetivas  $\left( V = \frac{V_c}{\sqrt{2}} \text{ e } I = \frac{I_c}{\sqrt{2}} \right)$ .

## Medida de voltagens



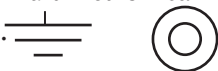
A escala que mede voltagens em circuitos percorridos por correntes elétricas contínuas tem o símbolo  $V \text{ —}$  e a escala que mede voltagens em circuitos percorridos por correntes elétricas alternadas contém o símbolo  $V \sim$ . Nos circuitos com correntes elétricas contínuas o multímetro mede a corrente elétrica. Nos circuitos com corrente elétrica alternada o multímetro mede a corrente elétrica efetiva.

As escalas permitem medir faixas de voltagens diferentes. Por exemplo, a escala  $20V \text{ —}$  serve para medir voltagens menores ou iguais a 20V.

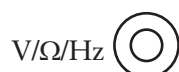
**Cuidado!!!** Se a voltagem a ser medida for maior do que o máximo da escala escolhida o multímetro queima. A voltagem contínua máxima a ser medida é de 1000V e a alternada de 750V.

A escolha da escala deve ser feita de tal forma a levar em consideração a precisão da medida que se deseja (ler manual do multímetro para obter informações mais detalhadas). Por exemplo, suponha que voltagem a ser determinada está entre 2V e 20V. Quando se escolhe a faixa de 20V a precisão da medida é maior do que quando se escolhe a faixa de 200V.

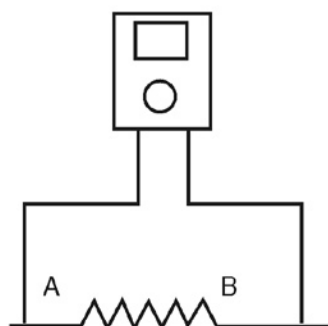
As pontas do multímetro ficam com o mesmo potencial dos pontos que estão em contato com ela.



O plug de uma das pontas do multímetro vai ser ligado ao conector do multímetro com o símbolo representado acima. A multímetro atribuirá a essa ponta um potencial elétrico nulo (Terra). Para facilitar a visualização da ponta com potencial nulo é habitual ligar o plug preto ao conector aterrado.



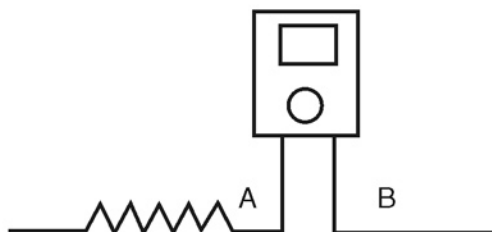
O segundo plug deverá ser ligado ao conector com o símbolo representado acima. O multímetro atribuirá a esse ponto a diferença de potencial entre ele e a ponta ligada a um potencial elétrico nulo (Terra).



Quando se deseja medir a diferença de potencial  $V_B - V_A$  entre dois pontos A e B do circuito é suficiente encostar a ponta aterrada no ponto A e a outra ponta no ponto B.


O multímetro é ligado em paralelo com o elemento do circuito onde se deseja medir a diferença de potencial.

### Medida de correntes elétricas



O multímetro mede correntes elétricas em circuitos percorridos por correntes elétricas contínua e alternada. A escala que mede corrente contínua tem o símbolo A  $\text{-----}$  e a escala que mede correntes alternada contém o símbolo A  $\sim$ .

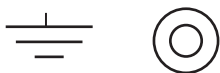
Nos circuitos com correntes elétricas contínua o multímetro mede o valor instantâneo da corrente elétrica. Nos circuitos com corrente elétrica alternada o multímetro mede a corrente elétrica efetiva no ponto.


As escalas cobrem faixas de correntes diferentes. Por exemplo, a escala 200mA , serve para medir correntes menores ou iguais a 200mA.

**Cuidado!!!** A corrente elétrica a ser medida tem que ser menor do que a corrente elétrica máxima da escala escolhida. Por exemplo, se você ligar o multímetro na escala de 200mA em um sistema percorrido por uma corrente elétrica de 2A o multímetro queima.


A escolha da escala deve ser feita de tal forma a levar em consideração a precisão da medida que se deseja (ler manual do multímetro para obter informações mais detalhadas). Por exemplo, suponha que a corrente elétrica a ser determinada está entre 2mA e 200mA. Quando se escolhe a faixa de 200mA a precisão da medida é maior do que quando se escolhe a faixa de 20A.

Deve-se ligar um dos plugs do multímetro (por exemplo o preto) no conector aterrado (ver figura abaixo)

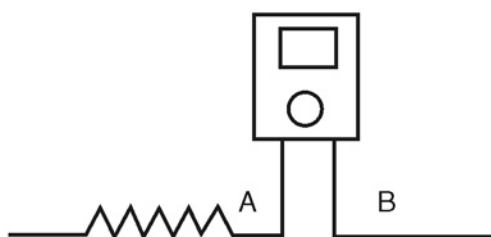


O outro plug (vermelho) deve ser ligado inicialmente no conector com o símbolo 20A .

**Cuidado!!!** Uma corrente de 10A durante 15s queima o multímetro.

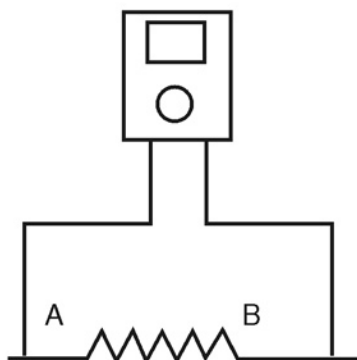
O plug (vermelho) só deve ser ligado ao conector mA  quando se tiver certeza que a corrente elétrica é menor do que 200A.

**Cuidado!!!** Uma corrente maior do 2A nesse conector queima o fusível.

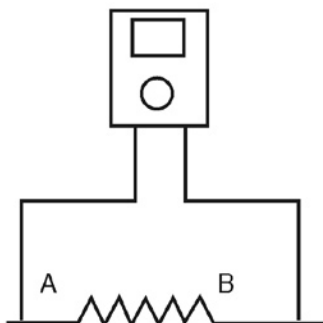


Quando se deseja medir a corrente elétrica que atravessa um ponto de um circuito elétrico, abre-se o circuito criando dois pontos A e B sem contato elétrico. Liga-se uma das pontas do multímetro no ponto A e a outra ponta no ponto B (liga-se o multímetro em série com o elemento do circuito que é atravessado pela corrente elétrica que se deseja medir).

### Medida de resistências



***Cuidado!!!*** O multímetro só mede resistências de circuitos sem corrente elétrica. PORTANTO, ANTES DE MEDIR UMA RESISTÊNCIA VERIFIQUE SE O CIRCUITO ESTÁ DESLIGADO.



O multímetro tem que ser ligado em paralelo com a resistência que se deseja medir. A escala do multímetro que mede resistências tem um símbolo  $\Omega$ . Ao se ligar uma resistência maior do que o máximo da escala escolhida o multímetro não indica nenhuma leitura. Inicialmente você escolhe a maior escala e a seguir a escala que fornece a precisão desejada.

## Medida de continuidade

O multímetro pode ser utilizado para medir continuidade em trechos de circuitos, ou seja, verificar possíveis interrupções em condutores, conexões, pontos de solda e etc... Para isso, com o seletor na posição  $\rightarrow|$  colocamos as pontas de prova preta no conector aterrado COM e a vermelha no conector V  $\Omega$  Hz. Depois, isola-se do circuito a parte que se deseja verificar a continuidade e coloca-se cada uma das pontas em contato com um dos terminais do trecho a ser verificado. Em caso de haver continuidade a buzina soará.

## Teste em diodos

O procedimento para testes de funcionamento de diodos é o mesmo que para o teste de continuidade. Ao testarmos o diodo nos dois sentidos, a buzina soará em apenas um dos testes; posição em que o diodo deverá conduzir.

## Medida de temperatura

Para medirmos temperatura com o multímetro, basta encaixarmos o plug do termopar no soquete °C e colocar o seletor de escalas na posição °C.

## Medida de capacitância

Para medirmos o valor da capacitância de um capacitor, basta encaixarmos os terminais do capacitor no soquete CX e selecionarmos a escala de capacitância adequada.

***Cuidado!!!*** Antes de se inserir os terminais do capacitor no soquete, o mesmo deverá ser totalmente descarregado.

## Medida de frequência

Para medirmos a frequência de uma determinada fonte, basta selecionarmos a posição 2KHz e colocarmos as pontas de prova em contato com os terminais da fonte. A ligação das pontas deverá ser feita em paralelo com a fonte e os plugs preto e vermelho deverão ser encaixados respectivamente nos conectores COM e V $\Omega$  Hz.

## Teste de hFe em transistores

Para realizarmos testes de hFe em transistores, basta encaixarmos os terminais emissor (E), base (B) e coletor (C) do transistor a ser testado no soquete hFe de acordo com a identificação dos seus pinos. Para transistores do tipo NPN utilizar a escala vermelha e para os do tipo PNP utilizar a escala amarela.





## Referências Bibliográficas

FEYNMAN, Richard P. *O que é uma lei física*. Lisboa : Gradiva, 1989. 222 p.

GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DA FÍSICA. *Física*. São Paulo: EdUSP, 2001. 3v.

KITTEL, Charles; KNIGHT, Walter; RUDERMAN, Malvin. *Curso de Física de Berkely*. v. 2: Eletricidade. São Paulo: Edgard Blücher, 1970.

LUZ, Antonio Maximo Ribeiro; ALVARES, Beatriz Alvarenga. *Física*: volume único. São Paulo: Scipione, 1999. 670p.

MCDERMOTT, Lillian C; SCHAFFER, Peter S.; The Physics Education Group/ Department of Physics/University of Washington. *Tutorial in Introductory Physics*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.

REITZ, John R.; MILFORD, Frederick J.; CHRISTY, Robert W. *Fundamentos da teoria eletromagnética*. Rio de Janeiro: Campus, 1982.

RESNICK, R.; HALLIDAY, D. *Física*: v.3. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1981.

WITAKER, Edmund, Sir. *A history of theories of a ether and electricity*. New York: Harper Torchbook, 1960.



## Agradecimentos

Aos professores do Instituto de Física da UFRJ,

Ildeu de Castro Moreira,

pelas sugestões e comentários no complemento histórico.

Stenio Dore de Magalhães e Marta Feijó Barroso,

pelas sugestões e comentários no módulo 4.

Ao professor

Stenio Dore de Magalhães,

pela confecção do roteiro do experimento de Mapeamento de Equipotenciais.

Aos estudantes do Instituto de Física da UFRJ,

Gustavo da Silva Soares

Vitor Nascimento de Carvalho Pinto

por terem lido e testado o material apresentado.

Aos tutores do Instituto de Física da UFRJ,

Tatiana da Silva

Gisele Cristina Coelho Pinto

José Roberto da Rocha Bernardo

pelo teste do material e pelas sugestões.

Aos funcionários do Instituto de Física da UFRJ,

Agostinho Mendes da Cunha

pela participação na elaboração dos vídeos,

Francisco de Souza Oliveira

pela participação na elaboração dos experimentos.

À funcionária do CEDERJ

Elizabeth Brito,

pela participação na elaboração dos experimentos.





ISBN 85-89200-22-1



9 788589 120022 6



**UENF**  
Universidade Estadual  
do Norte Fluminense



Universidade Federal Fluminense

**uff**



**UNIRIO**



**FAPERJ**  
Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo  
à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro



**GOVERNO DO  
Rio de Janeiro**

**SECRETARIA DE  
CIÊNCIA E TECNOLOGIA**

**Ministério  
da Educação**

**BRASIL**  
UM PAÍS DE TODOS  
GOVERNO FEDERAL