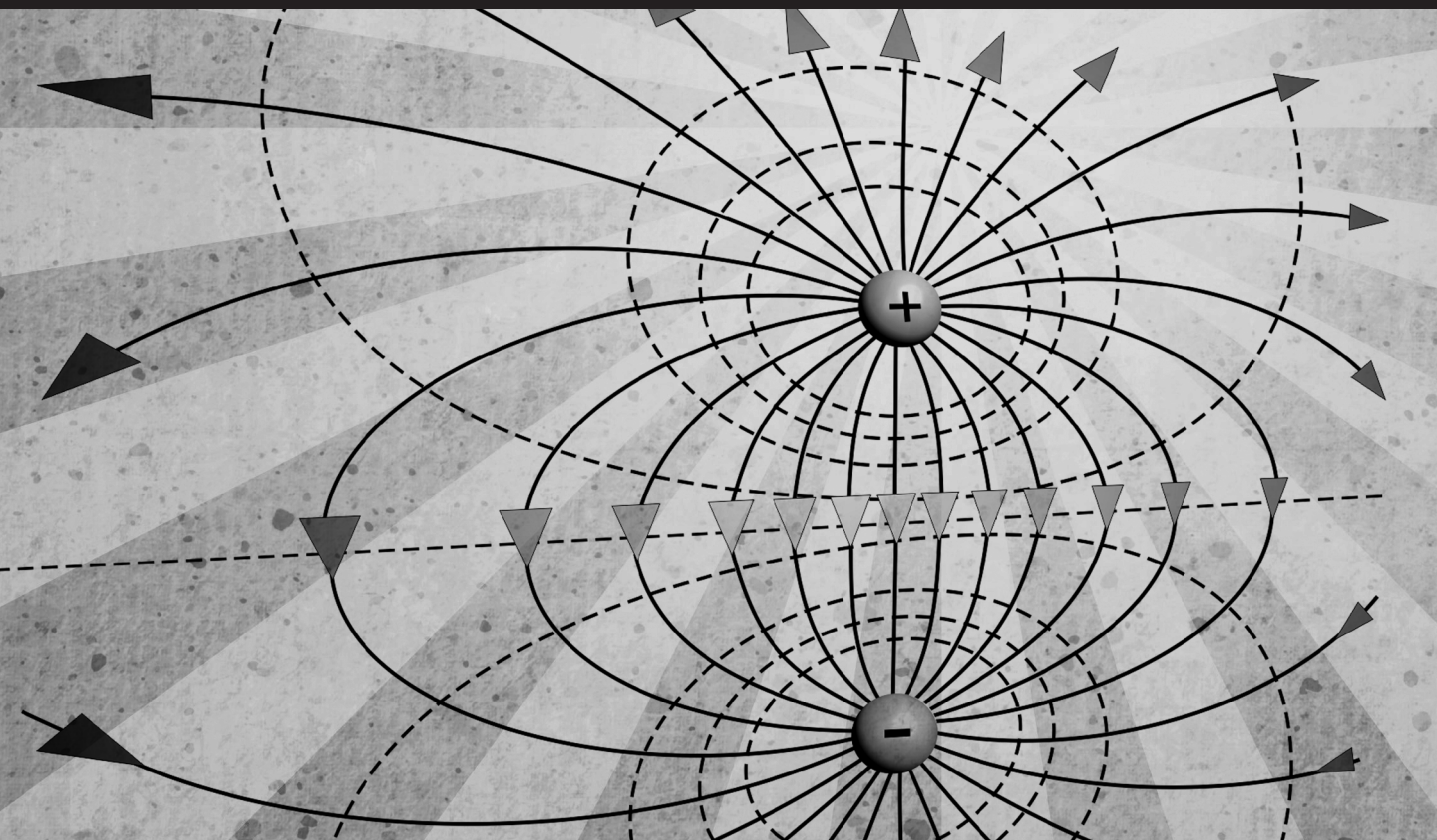


Introdução às Ciências Físicas 2

Volume 1

Maria Antonieta Almeida





Fundação

CECIERJ

Consórcio **cederj**

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

Introdução às Ciências Físicas 2

Volume 1

Maria Antonieta Almeida



**SECRETARIA DE
CIÊNCIA E TECNOLOGIA**

**UNIVERSIDADE
ABERTA DO BRASIL**

Ministério da
Educação

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
PAÍS RICO É PAÍS SEM POBREZA

Apoio:



Fundação Cecierj / Consórcio Cederj

Rua da Ajuda, 5 – Centro – Rio de Janeiro, RJ – CEP 20040-000
Tel.: (21) 2333-1112 Fax: (21) 2333-1116

Presidente

Carlos Eduardo Bielschowsky

Vice-presidente

Masako Oya Masuda

Coordenação do Curso de Física

Luiz Felipe Canto

Material Didático

Elaboração de Conteúdo

Maria Antonieta Almeida

Coordenação de Desenvolvimento Instrucional

Cristine Costa Barreto

Supervisão de Desenvolvimento Instrucional

Flávia Busnardo

Desenvolvimento Instrucional e Revisão

Rommulo Barreiro

José Meyohas

Juliana Bezerra

Paulo César Alves

Avaliação Do Material Didático

Thaís de Siervi

Departamento de Produção

Editor

Fábio Rapello Alencar

Revisão Tipográfica

Beatriz Fontes

Licia Matos

Maria Elisa Silveira

Mariana Caser

Yana Gonzaga

Coordenação de Produção

Bianca Giacomelli

Programação Visual

Alexandre d'Oliveira

Maria Fernanda de Novaes

Núbia Roma

Ilustração

Equipe Cederj

Capa

Clara Gomes

Produção Gráfica

Patrícia Esteves

Copyright © 2014, 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.

Introdução às Ciências Físicas 2. V.1. / Maria Antonieta Almeida. – Rio de Janeiro : Cederj, 2014.
p. 452

ISBN: 978-85-7648-946-7

I. Física. 1. Almeida, Maria Antonieta. I. Título.

CDD: 530

Governo do Estado do Rio de Janeiro

Governador

Luiz Fernando de Souza Pezão

Secretário de Estado de Ciência e Tecnologia

Gustavo Reis Ferreira

Universidades Consorciadas

CEFET/RJ - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca

Diretor-geral: Carlos Henrique Figueiredo Alves

IFF - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense

Reitor: Luiz Augusto Caldas Pereira

UENF - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

Reitor: Silvério de Paiva Freitas

UERJ - Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Reitor: Ricardo Vieiralves de Castro

UFF - Universidade Federal Fluminense

Reitor: Roberto de Souza Salles

UFRRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

Reitor: Carlos Levi

UFRRJ - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Reitora: Ana Maria Dantas Soares

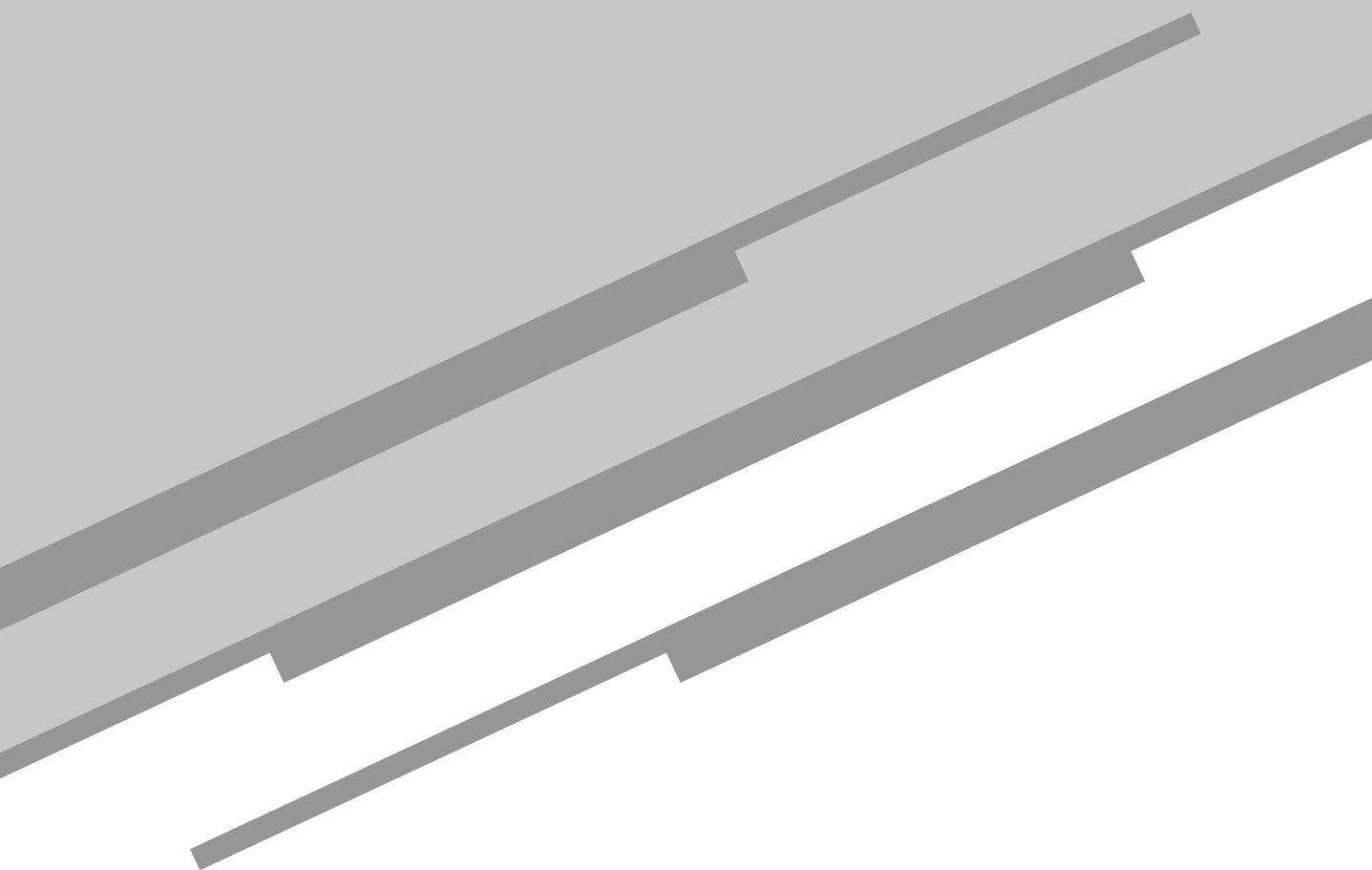
UNIRIO - Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro

Reitor: Luiz Pedro San Gil Jutuca

Sumário

Recomeçando	7
<i>Maria Antonieta Almeida</i>	
Aula 1 – Iniciando o estudo da eletricidade	11
<i>Maria Antonieta Almeida</i>	
Aula 2 – Isolantes e condutores e a Lei de Coulomb	39
<i>Maria Antonieta Almeida</i>	
Aula 3 – Campo elétrico	79
<i>Maria Antonieta Almeida</i>	
Aula 4 – Linhas de campo elétrico	111
<i>Maria Antonieta Almeida</i>	
Aula 5 – Condutores em equilíbrio eletrostático	137
<i>Maria Antonieta Almeida</i>	
Aula 6 – Princípio da conservação da energia	159
<i>Maria Antonieta Almeida</i>	
Aula 7 – A energia potencial elétrica e o potencial elétrico	193
<i>Maria Antonieta Almeida</i>	
Aula 8 – Prática 1 – Mapeamento de equipotenciais	233
<i>Maria Antonieta Almeida</i>	
Aula 9 – Correntes elétricas	249
<i>Maria Antonieta Almeida</i>	
Aula 10 – Prática 2 – Lei das malhas e lei dos nós	287
<i>Maria Antonieta Almeida</i>	
Aula 11 – As fontes de correntes elétricas	309
<i>Maria Antonieta Almeida</i>	
Aula 12 – Distribuição de energia elétrica em circuitos elétricos	337
<i>Maria Antonieta Almeida</i>	
Aula 13 – Prática 3 – Distribuição de energia em circuitos elétricos	377
<i>Maria Antonieta Almeida</i>	
Complemento 1 – História da eletricidade	409
<i>Maria Antonieta Almeida</i>	
Complemento 2 – Medindo grandezas elétricas com o multímetro Minipa ET-2041	423
<i>Maria Antonieta Almeida</i>	
Complemento 3 – Trabalho, energia potencial elétrica e potencial elétrico de forças variáveis	433
<i>Maria Antonieta Almeida</i>	
E para terminar	445
<i>Maria Antonieta Almeida</i>	
Referências	447

Recomeçando



Resultados experimentais versus modelos: os fenômenos elétricos

Você está recebendo agora o material referente ao primeiro módulo da disciplina Introdução às Ciências Físicas 2. Ele dá continuidade aos estudos introdutórios de Física, iniciados na disciplina Introdução às Ciências Físicas 1. Neste momento, entraremos no mundo da eletricidade, onde serão apresentadas a interação entre cargas elétricas, a distribuição de correntes elétricas e de energia elétrica. Algumas das leis associadas aos fenômenos elétricos serão verificadas experimentalmente.

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

Inicialmente, analisaremos os fenômenos associados ao aparecimento de cargas elétricas. Caracterizaremos a matéria de acordo com a mobilidade dessas cargas 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 a distribuição de energia nos circuitos.

As aulas deste módulo devem ser complementadas por leituras dos livros *Física - volume único*, de Antonio Máximo e Beatriz Alvarenga, e *Física 3*, do Grupo de Reelaboração do Ensino da Física (Gref).

Este módulo foi previsto para ter duração média de quatro semanas e é constituído de treze aulas, sendo iniciado por esta seção, denominada “Recomeçando”, e terminando com a seção “E para terminar...”.

As aulas são assim distribuídas:

1. Iniciando o estudo da eletricidade;
2. Isolantes e condutores e a Lei de Coulomb;
3. Campo elétrico;
4. Linhas de campo elétrico;
5. Condutores em equilíbrio eletrostático;
6. Princípio da conservação da energia;
7. A energia potencial elétrica e o potencial elétrico;
8. Mapeamento de equipotenciais;

9. Correntes elétricas;
10. Prática 2 – Lei das malhas e lei dos nós;
11. As fontes de correntes elétricas;
12. Distribuição de energia em circuitos elétricos;
13. Prática 3 – Distribuição de energia em circuitos elétricos.

Ao final do módulo, você encontrará também complementos sobre a história da eletricidade, trabalho, energia potencial elétrica e potencial elétrico de forças variáveis sobre um multímetro, e as referências.

Este módulo é acompanhado também por vídeos que são parte integrante do material didático. Você deve assistir-lhes com atenção. Eles estão disponíveis no Portal TECA. Para acessá-los, entre no portal, escolha a opção Vídeos, digite ICF2 e aperte o botão Pesquisa TECA.

Vídeos disponíveis no portal sobre:

- cargas elétricas;
- isolantes e condutores;
- forças elétricas em corpos neutros;
- blindagem eletrostática;
- quadro de luz de corrente contínua;
- lei de Ohm;
- lei das malhas e lei dos nós;
- quadro de luz de corrente alternada;
- visualização de linhas de campo elétrico de terminais que simulam:
 - uma carga pontual positiva;
 - um anel com cargas negativas;
 - um dipolo elétrico
 - duas cargas pontuais positivas e um anel com cargas negativas;
 - dois anéis com cargas opostas;
 - um terminal com simetria axial com cargas positivas;
 - um anel com cargas negativas e dois terminais com cargas opostas.

O material para os experimentos a serem realizados nos polos já está disponível, e os tutores o conhecem bem.

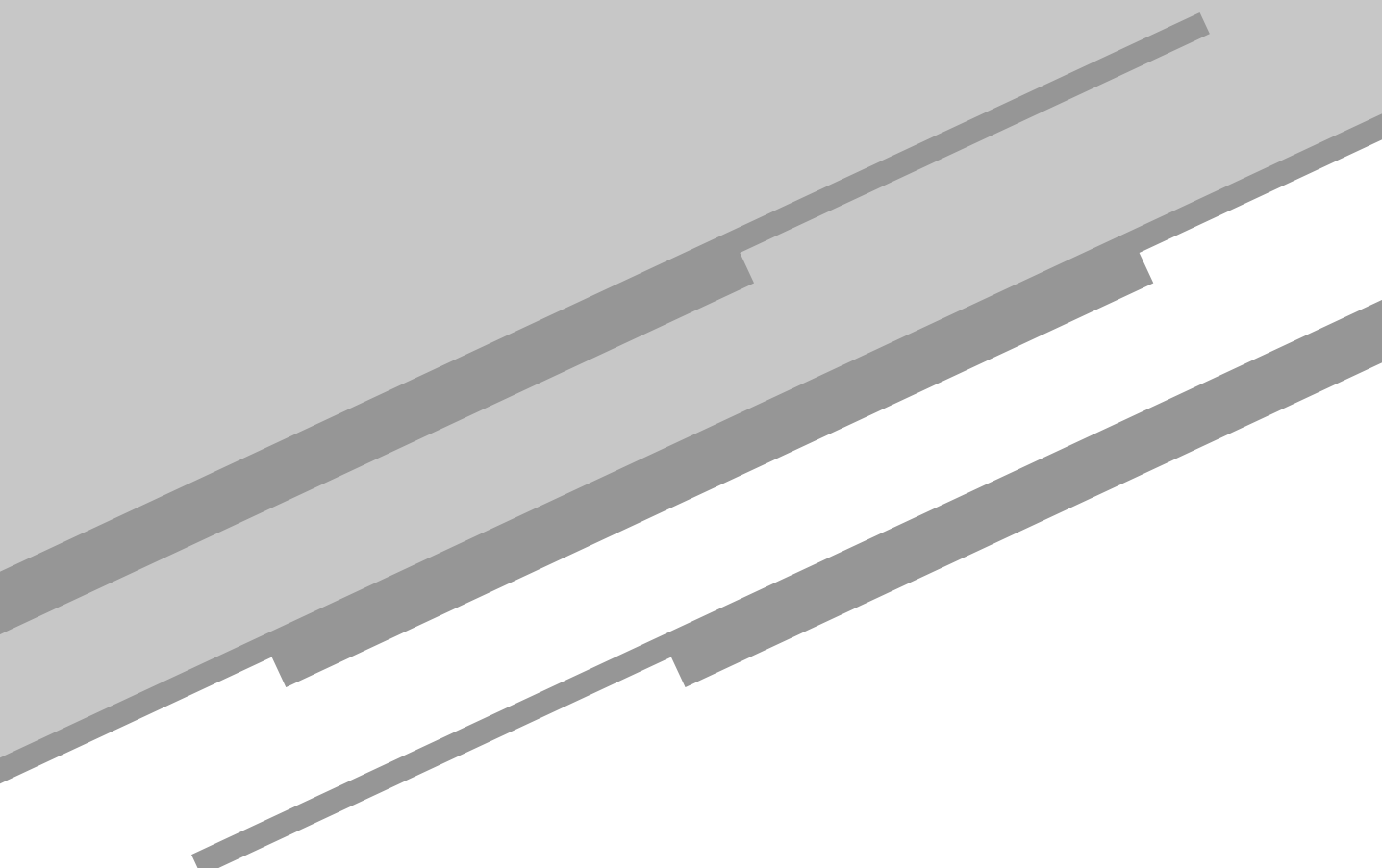
Os principais conceitos abordados são:

- carga elétrica;
- isolantes e condutores;
- força elétrica;
- campo elétrico;
- voltagem;
- corrente elétrica;
- distribuição de energia elétrica.

Para acompanhar as discussões feitas, você precisa conhecer as ideias básicas de trigonometria, saber manipular funções trigonométricas simples e dominar a mecânica da partícula, apresentada no Módulo 2 da disciplina Introdução às Ciências Físicas 1.

Aula 1

Iniciando o estudo da eletricidade



Maria Antonieta Almeida

Meta

Discutir a importância da utilização da energia elétrica no mundo moderno. Apresentar o conceito de carga elétrica.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. explicar de forma simplificada como é a produção e a transmissão da energia elétrica proveniente de uma hidroelétrica;
2. classificar os aparelhos elétricos em três tipos básicos;
3. identificar os tipos de cargas elétricas;
4. identificar o fenômeno de eletrização dos corpos.

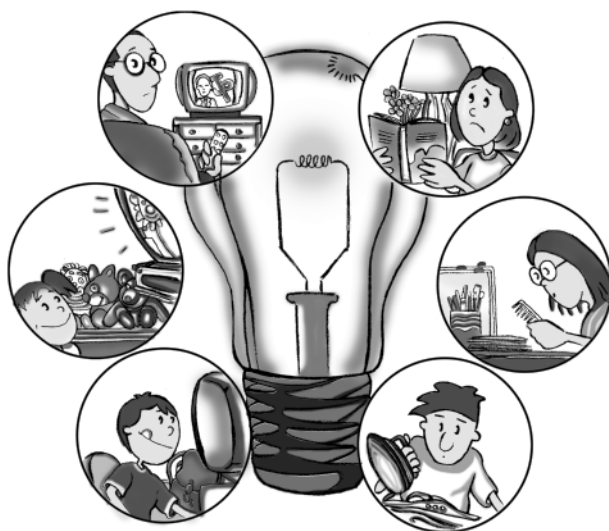
Introdução

Você deve estar se perguntando por que precisa aprender eletricidade. Entre as possíveis respostas, podemos citar:

- a utilização da energia elétrica no mundo moderno;
- a necessidade do conhecimento na eletricidade para entender os processos químicos;
- a necessidade do conhecimento da eletricidade para compreender os processos biológicos;
- a necessidade do conhecimento da eletricidade para entender fenômenos naturais como os raios.

Nesta aula, daremos os primeiros passos no estudo da eletricidade. Será realizada uma discussão superficial sobre a produção, transmissão e utilização da energia elétrica e será discutido o conceito de carga elétrica. As discussões gerais sobre os temas tratados nesta aula serão realizadas entre os membros da família Silva.

Produção, transmissão e utilização da energia elétrica





Os vídeos a seguir complementam a discussão sobre produção, transmissão e utilização da energia elétrica. Eles podem ser acessados pela Sala da Disciplina ICF 2 na Plataforma Cederj, através do questionário 1 da Aula 1 ou nos DVDs disponíveis nos polos para cópias:

- *Kika – De onde vem a energia elétrica – TV Escola.*
- *Dínamo.*

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 8 anos, vê no quarto um desenho animado na TV. 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, dirige-se à caixa de disjuntores e grita: “Os disjuntores estão ligados. Deem 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 reúne-se à família.

Ana choraminga, lamentando a interrupção do seu desenho, e pede para alguém consertar a sua TV.

André explica, com jeito de quem sabe tudo: “Ana, a sua TV não funciona quando está faltando luz”.

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

Paula explica à filha que a luz apagou porque faltou energia elétrica e que a TV só funciona quando recebe essa energia.

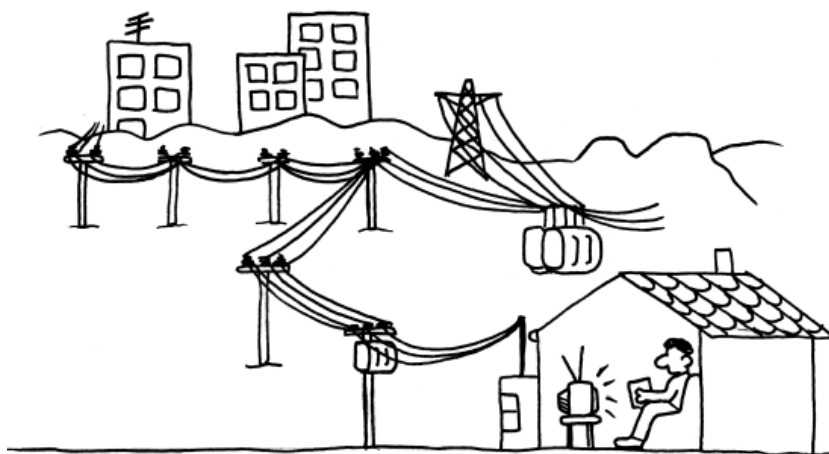


Figura 1.1: Transmissão de energia pela rede elétrica.

– Mãe, o que é energia elétrica? Quem pode arranjar um pouco dessa energia para colocar na TV, 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 a TV na tomada, a energia elétrica entra pelo fio que vem da rua para nossa casa, sai pela tomada e aciona a TV”.

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 funcionar, 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 brinquedos com pilhas 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 computador, as máquinas de lavar louça e de lavar roupa, bem como o ferro de passar estavam consumindo energia elétrica!

Empolgada, ela continua: “A energia produzida em uma rede elétrica pode estar guardada em uma represa, sob a forma de energia potencial gravitacional, 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, ou nas usinas nucleares, quando a água vaporizada pela energia nuclear movimenta as **turbinas**. O movimento das turbinas produz energia elétrica porque nelas são fixadas bobinas que giram no interior de um ímã. Quando uma bobina gira no interior de um ímã, as cargas elétricas dos fios condutores da **bobina** ganham energia elétrica. Um dispositivo formado por uma bobina que gira na presença de um ímã é denominado de dínamo. São os dínamos que transformam energia mecânica em energia elétrica”.

Uma **turbina** pode ser descrita, de forma simplificada, como uma roda dotada por pás que gira em torno de um eixo.

Bobina é um fio condutor, enrolado em torno de um carretel.

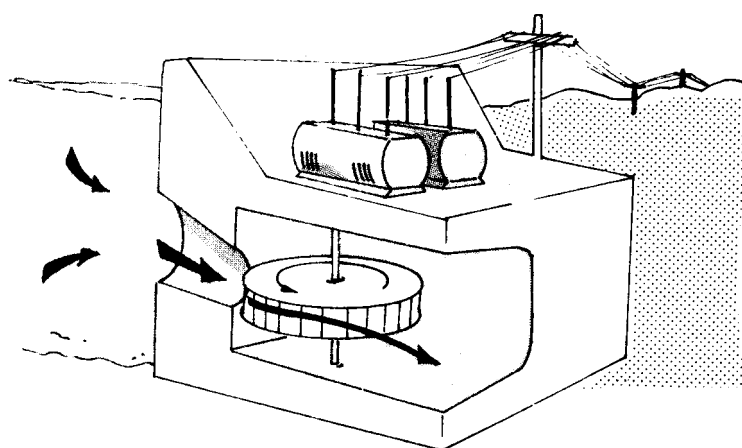


Figura 1.2: Usina hidroelétrica.

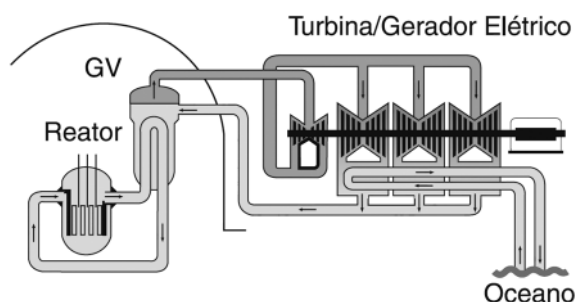


Figura 1.3: Usina nuclear.

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

Ronaldo intervém em favor da irmã, dizendo que André está exagerando, como sempre: “Admito que você não saiba o que é uma bobina ou uma turbina porque elas não são encontradas com facilidade no seu cotidiano. Uma turbina pode ser descrita, de forma simplificada, como uma roda dotada por pás que gira em torno de um eixo. Bobina é um fio condutor, enrolado em torno de um carretel. Mas você deveria conhecer os tipos de energia, porque 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 a TV. Todos retomam suas atividades.

A transformação da energia elétrica em outros tipos de energia nos aparelhos elétricos

Você já sabe que existem várias fontes de energia. Entre elas, podemos citar as pilhas, as usinas hidrelétricas, as usinas nucleares etc. No Brasil, uma parte significativa da energia elétrica é produzida nas hidroelétricas.

A energia elétrica pode ser transformada em outros tipos de energia pelos aparelhos elétricos. Os aparelhos elétricos podem ser classificados em três grupos, utilizando como critério o tipo de energia produzido por eles: o *grupo dos resistivos*, em que a energia elétrica é transformada em energia térmica; o *grupo dos motores elétricos*, no qual a energia elétrica é transformada em energia de movimento, e o *grupo dos aparelhos de comunicação e informação*, em que a energia elétrica é transformada em imagens, sons e informações.

===== **Atividade 1** =====

Atende ao Objetivo 1

Com base na sessão que você acabou de ler (“Produção, transmissão e utilização da energia elétrica”) e nos vídeos a que você assistiu (*Kika – De onde vem a energia elétrica* – TV Escola e *Dínamo*), responda às questões a seguir:

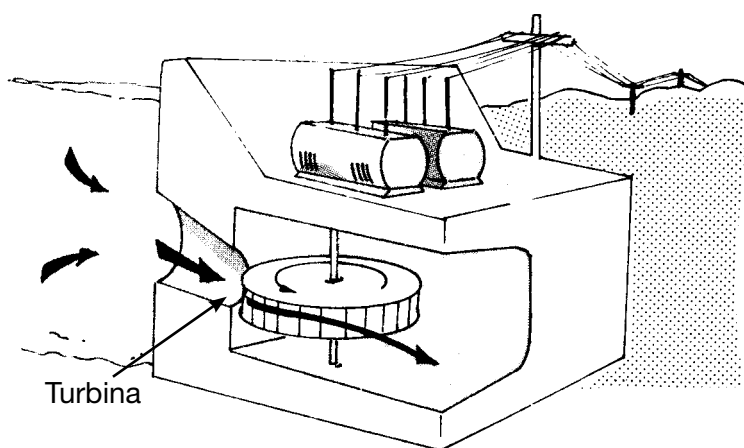
a) Você sabe quais são as partes principais de um dínamo? O que um dínamo faz?

b) Descreva como a energia mecânica é transformada em energia elétrica nas usinas hidroelétricas.

Resposta Comentada

a) Dínamo é um dispositivo formado por uma bobina fixa em um dispositivo que gira e um ímã. A bobina pode ser descrita, de uma forma simples, como um fio condutor enrolado em um carretel. Quando a bobina gira na presença de um ímã, aparece uma corrente elétrica na bobina. Logo, o dínamo transforma a energia responsável pela rotação da bobina em energia elétrica.

b) Em uma hidroelétrica, quando as comportas são abertas, a água movimenta as turbinas. As bobinas ligadas às turbinas giram na presença de um ímã, de tal forma que uma corrente elétrica aparece nas bobinas. A energia do movimento da água é transformada em energia elétrica das cargas elétricas da corrente elétrica. A corrente elétrica é transmitida pelos fios da rede elétrica para as residências, fábricas etc.



Atividade 2

Atende ao Objetivo 2

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

- | | |
|-------------------------------|--------------------------------|
| a) chuveiro () | f) tomada () |
| b) ventilador () | g) barbeador () |
| c) filmadora () | h) microfone () |
| d) lâmpadas fluorescentes () | i) faca elétrica () |
| e) calculadora () | j) lâmpadas incandescentes () |

Resposta Comentada

- | | |
|-------------------------------|--------------------------------|
| a) chuveiro (R) | f) tomada () |
| b) ventilador (M) | g) barbeador (M) |
| c) filmadora (C) | h) microfone (C) |
| d) lâmpadas fluorescentes () | i) faca elétrica (M) |
| e) calculadora (C) | j) lâmpadas incandescentes (R) |

A tomada e a lâmpada fluorescente não se enquadram nesta classificação.

A tomada liga os aparelhos eletroeletrônicos na rede elétrica. Ela não transforma energia elétrica em calor, em movimento, em imagens, em sons, nem armazena informações. Por isso, ela não é um elemento resistivo, nem um elemento de comunicação e informação, nem um motor. Logo, ela não se enquadra na classificação dada.

A lâmpada fluorescente transforma energia elétrica em energia luminosa, assim como a lâmpada incandescente, contudo esta transformação não é realizada por um resistor, nem por um motor. Seu funcionamento é baseado na emissão de radiação eletromagnética em forma de luz pelos átomos da camada de fósforo que cobre suas paredes internas. Ela não produz imagens, nem sons, nem acumula informações. Por isso, ela não se enquadra na classificação descrita no problema.



Cargas elétricas

Todos nós já percebemos que alguns objetos, quando atritados, ficam com uma característica diferente. Por exemplo, eles são capazes de atrair os pelos dos nossos braços. A ciência mostrou que estes objetos estão eletrizados, isto é, sua carga elétrica total não é nula. O texto “Um dia seco no inverno” discute a eletrização dos corpos. Mas, antes de ler este texto, veja se você é capaz de responder às perguntas:

1. O que são cargas elétricas?
2. Quais são os tipos de cargas elétricas?
3. É possível modificar a carga total de um sistema isolado?

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 enfeitiçado! Ele está despenteando 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 ao cinema. Ela esquece o pente e os seus cabelos arrepiados e sai correndo.

Corpo eletrizado

Um corpo eletrizado possui um excesso de cargas elétricas.



Figura 1.4: O pente que foi utilizado para pentear os cabelos atrai pequenos pedaços de papel.

André, que vinha passando, interessa-se 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?

– 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 um excesso de cargas elétricas.

– Cargas elétricas? Não estou vendo nenhuma carga elétrica.

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

– 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, 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.

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.

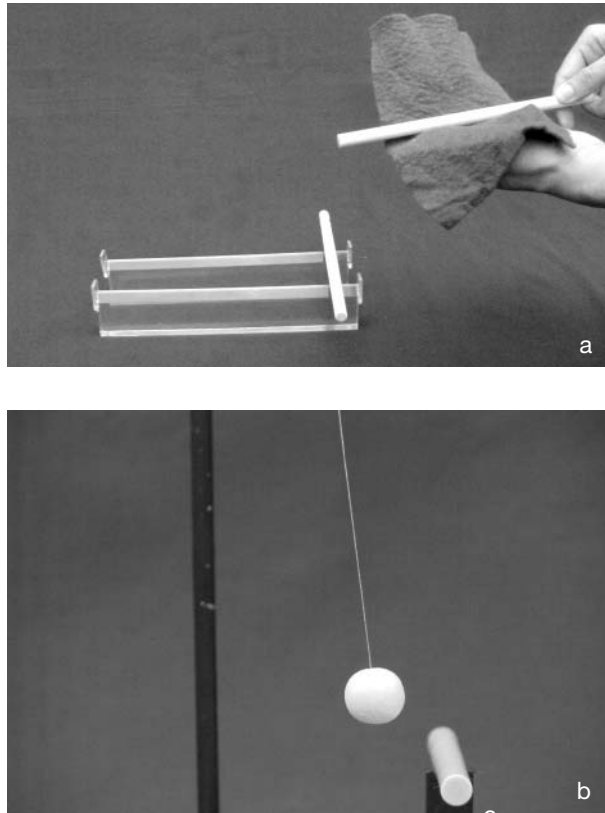


Figura 1.5: (a) Bastões de PVC atritados com flanela. (b) Bolinha de isopor sendo atraída por um bastão de PVC eletrizado.

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.

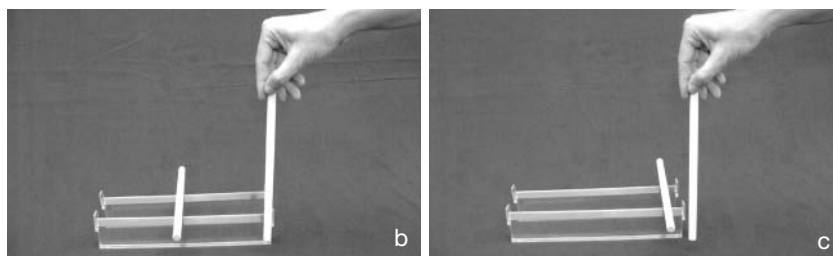
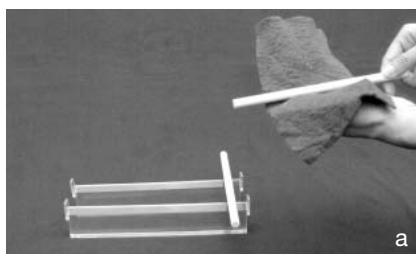


Figura 1.6: (a) Bastões de PVC atritados com flanela. (b/c) Bastões de PVC repelindo-se.

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 repelem-se. As forças de repulsão entre os bastões são chamadas **forças elétricas**.

Forças elétricas

São as forças entre cargas elétricas. Leia a respeito da evolução das ideias sobre forças elétricas no complemento “A história da eletricidade”.

– Professor Edmundo, isso só acontece com o PVC?

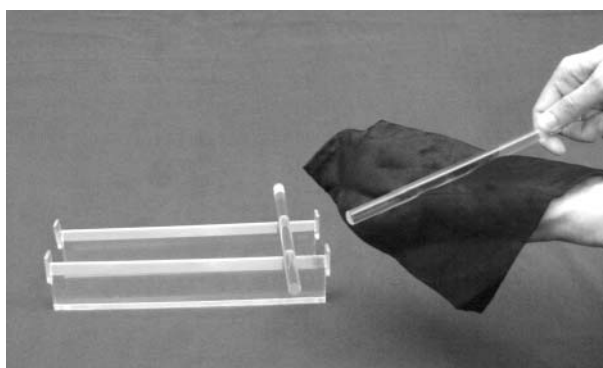


Figura 1.7: Bastões de acrílico atritados com seda.

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

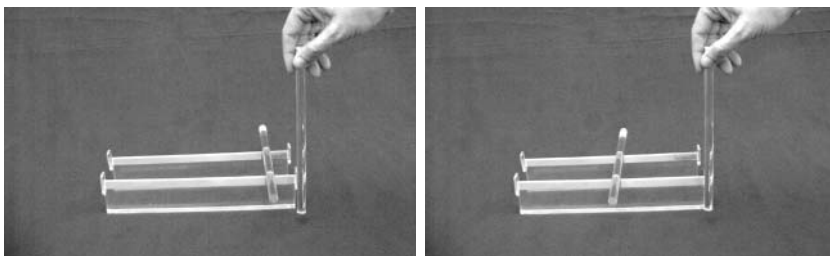


Figura 1.8: Bastões de acrílico repelindo-se.

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?

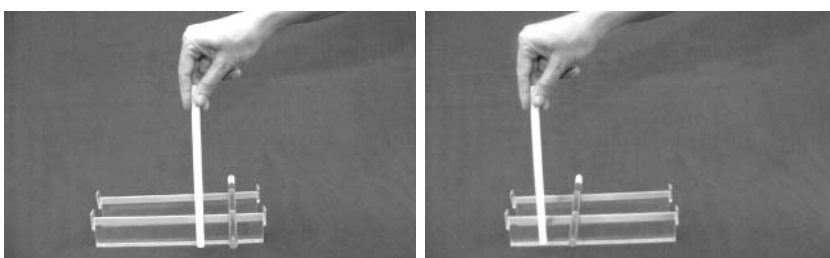


Figura 1.9: Acrílico e PVC se atraindo.

– 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 chamam 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 um 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 são aquelas que aparecem no bastão de acrílico atritados com seda.

Cargas elétricas negativas são aquelas que aparecem no bastão de PVC atritados com flanela.

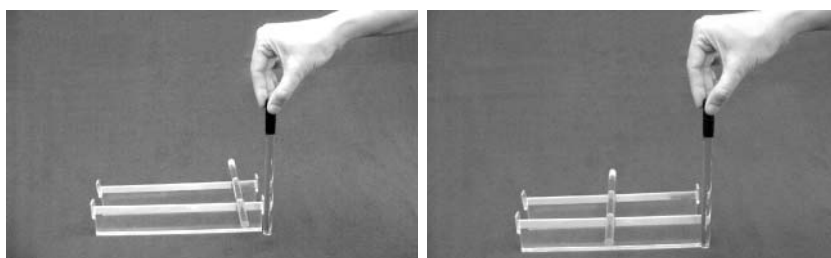


Figura 1.10: Bastões de acrílico e vidro se repelindo.

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

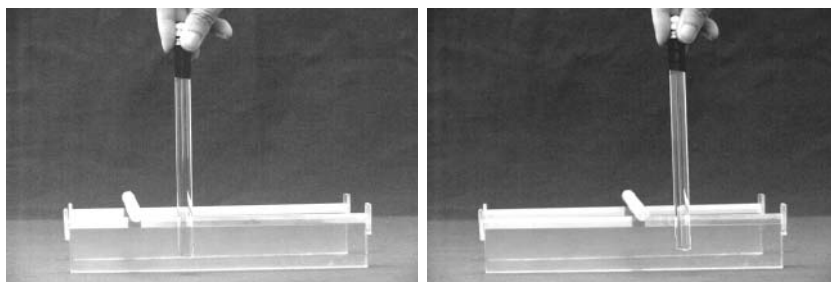


Figura 1.11: Bastões de PVC e vidro se atraindo.

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.



Carga elétrica é uma propriedade da matéria responsável pelas forças entre dois corpos eletrizados.

– 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.



Princípio da conservação da carga elétrica: não é possível modificar a carga elétrica total de um sistema isolado.

– 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.



Corpo neutro é um corpo que contém o mesmo número de cargas elétricas positivas e negativas.

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.

– 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?

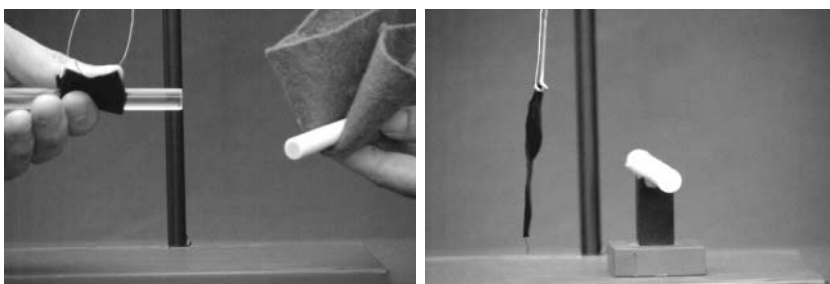


Figura 1.12: Seda com carga elétrica negativa sendo repelida pelo bastão de PVC negativo.

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.

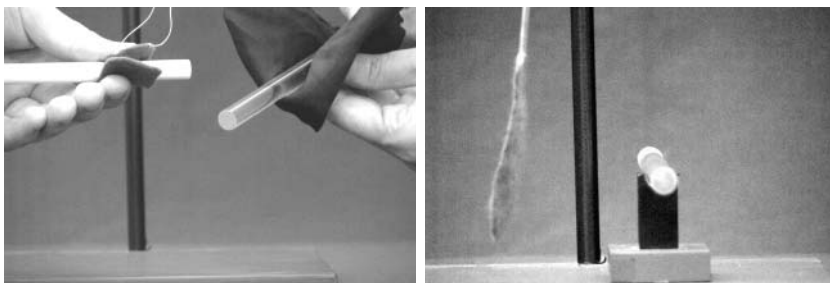


Figura 1.13: Lã com carga elétrica positiva sendo repelida pelo bastão de acrílico positivo.

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.

Neste 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 por meio do atrito, parte dos elétrons do cabelo se transfere 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 1.14**). 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 1.14: (a) Bolinha de isopor neutra sendo atraída pelo bastão de PVC negativo. (b) 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:

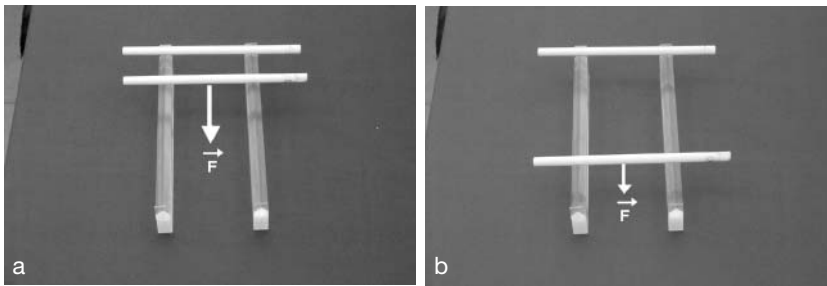


Figura 1.15: A força entre os bastões eletrizados diminui quando a distância entre eles aumenta.

- A força entre duas cargas elétricas diminui quando a distância aumenta, e aumenta quando a distância diminui. Isso pode ser observado facilmente analisando-se o comportamento de dois bastões de PVC eletrizados, quando eles são colocados sobre o trilho de acrílico e separados por distâncias diferentes. Observe que, quanto mais próximos estiverem os bastões, maior será 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 deslocando-os ligeiramente das suas posições. Consequentemente, apesar de ter carga elétrica total nula, as cargas elétricas positivas e negativas da bolinha de isopor ficam ligeiramente separadas, de tal forma que aparece uma densidade de cargas elétricas positivas na região mais próxima do bastão e uma densidade de cargas elétricas negativas na região mais afastada do bastão (**Figura 1.16**). Logo, na presença do bastão de PVC, a bolinha de isopor, do ponto de vista elétrico, fica diferente.



Veja os experimentos sobre as cargas elétricas e suas propriedades nos vídeos *Cargas elétricas* e *Forças elétricas sobre corpos neutros*, disponíveis para cópia nos polos e no Portal TECA. Entre no Portal TECA. Escolha vídeos, escreva a palavra de ICF1_cederj e aperte o botão da pesquisa.

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

– Por isso, 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, uma vez que as cargas elétricas positivas da bolinha estão mais próximas do bastão do que as negativas.

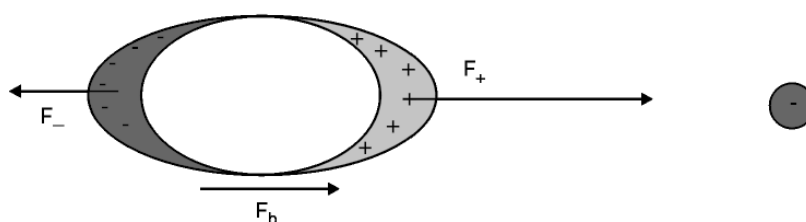


Figura 1.16: O bastão eletrizado separa as cargas elétricas positivas e negativas da bolinha de isopor neutra.

Satisfeito com as explicações, André sai para o recreio.

– Tchau, professor!

Atividade 3

Atende ao Objetivo 3

Com base na situação que você acabou de ler (a aula do professor Edmundo), responda às questões a seguir:

a) O que são cargas elétricas?

b) Quais são os tipos de cargas elétricas?

c) Marque a alternativa correta:

I. () Cargas elétricas de mesmo tipo se atraem e de tipo diferentes se repelem.

II. () Cargas elétricas de tipos diferentes se atraem e do mesmo tipo se repelem.

d) É possível modificar a carga elétrica total de um sistema isolado?

e) Um bastão de acrílico foi atritado com um pedaço de seda e ficou eletrizado negativamente. Um estudante descreveu o processo, dizendo que o corpo recebeu prótons, retirados da seda. Você concorda com essa descrição?

f) Um bastão de PVC foi atritado com lã, adquirindo cargas elétricas negativas. A lã ficou eletrizada? Em caso afirmativo, qual é o sinal da carga da lã?

g) Um bastão é atraído por outro bastão eletrizado com cargas elétricas positivas. Qual é o tipo da carga elétrica do bastão que foi atraído?

Resposta Comentada

a) Carga elétrica é a propriedade da matéria associada a corpos elétricos eletrizados.

b) Existem dois tipos de cargas elétricas: as cargas elétricas positivas e as negativas. O tipo de carga elétrica que um corpo adquire quando é atritado com outro depende do par que está sendo atritado. Por exemplo, bastões de PVC atritados com lã adquirem cargas elétricas negativas.

c) A alternativa correta é a II, porque cargas elétricas de tipos diferentes se atraem e do mesmo tipo se repelem.

d) O princípio da conservação da carga elétrica diz que, em um sistema isolado, a carga elétrica total do sistema se conserva.

e) Quando um corpo é atritado, os elétrons de um corpo são transferidos para outro corpo. Logo, a descrição do aluno está incorreta. O

bastão de acrílico ficou positivo porque ele perdeu elétrons.

f) A lã ficou eletrizada porque, pelo princípio da conservação da carga elétrica, se o bastão de PVC recebeu elétrons, eles foram retirados da lã. Logo, a lã ficou com carga elétrica positiva. Veja a constatação desta informação no vídeo *Cargas elétricas*, disponível no polo para cópia e no Portal Teca.

g) Um bastão eletrizado com cargas positivas pode atrair um bastão neutro e um bastão com cargas elétricas negativas. Logo, neste caso, não podemos concluir qual é o tipo de carga elétrica do bastão que foi atraído. Para descobrir o tipo de carga elétrica que existe no bastão que foi atraído, é necessário colocá-lo na presença de outro bastão com cargas elétricas negativas. Se ele continuar a ser atraído, ele é neutro. Se ele for repelido, a sua carga elétrica é negativa.

Conclusão

Nesta aula, discutimos a produção e a transmissão de energia elétrica. Como o aprofundamento da compreensão do processo de produção e transmissão da energia elétrica requer o conhecimento dos fenômenos elétricos, iniciamos o estudo da eletricidade com a introdução do conceito de carga elétrica e de corpo eletrizado. As cargas elétricas foram classificadas como positivas e negativas. Foi explicado o que acontece quando um corpo neutro é eletrizado, e a razão pela qual um corpo neutro é atraído por um corpo carregado. Foi enunciado o princípio da conservação da carga elétrica.

Atividade Final

Atende ao Objetivo 3

a) Em um dia seco, atrite um canudo de refrigerante no seu cabelo. O seu cabelo tem de estar seco e limpo. A seguir, atrite um bastão de PVC com uma flanela limpa e aproxime do canudo. Descreva e explique o

comportamento do canudo quando o bastão de PVC eletrizado é aproximado do canudo.

b) Picote papel com um furador de papel. Recolha o papel do furador e coloque sobre uma superfície plana. A seguir, atrite um canudo no seu cabelo e aproxime o canudo dos pedacinhos de papel. Descreva o que acontece.

Respostas Comentadas

a) O bastão de PCV atritado com flanela fica com cargas elétricas negativas. O canudo atritado no seu cabelo é repelido pelo bastão de PVC eletrizado. Ao atritar o canudo no seu cabelo, ele fica eletrizado. Ele é repelido pelo bastão de PVC eletrizado. Logo ele fica com cargas elétricas negativas.

b) Quando o canudo eletrizado negativamente é aproximado dos pedacinhos de papel, ele modifica a distribuição de elétrons no papel, de tal forma que as cargas elétricas positivas ficam mais próximas do canudo eletrizado do que as cargas elétricas negativas. A força resultante nas cargas positivas é maior que a força resultante nas cargas negativas, por isso ele é atraído pelo canudo eletrizado. Veja o vídeo *Forças elétricas em corpos neutros*, disponível nos polos para cópia e no Portal Teca.

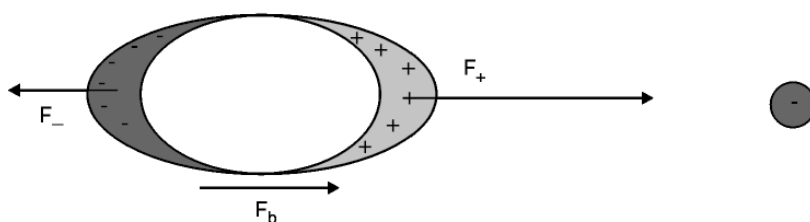


Figura 1.17: O canudo eletrizado negativamente modifica a distribuição de cargas elétricas no pedacinho de papel de tal forma que, do ponto de vista macroscópico, ele se comporta como um corpo eletrizado com as cargas elétricas positivas mais próximas do que as negativas.

Resumo

Você viu nesta aula que:

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*, em que a energia elétrica é transformada em energia térmica; o *grupo dos motores elétricos*, no qual a energia elétrica é transformada em energia de movimento, e o *grupo dos aparelhos de comunicação e informação*, em que a energia elétrica é transformada em imagens, sons e informações.
3. Existem dois tipos de cargas elétricas: positivas e negativas.
4. Lei de Du Fay: cargas elétricas do mesmo tipo se repelem e cargas elétricas de tipos diferentes se atraem.
5. Princípio da conservação da carga: a carga elétrica total (soma de todas as cargas) de um sistema isolado é constante.
6. A força elétrica entre duas cargas elétricas diminui quando a distância aumenta e aumenta quando a distância diminui.

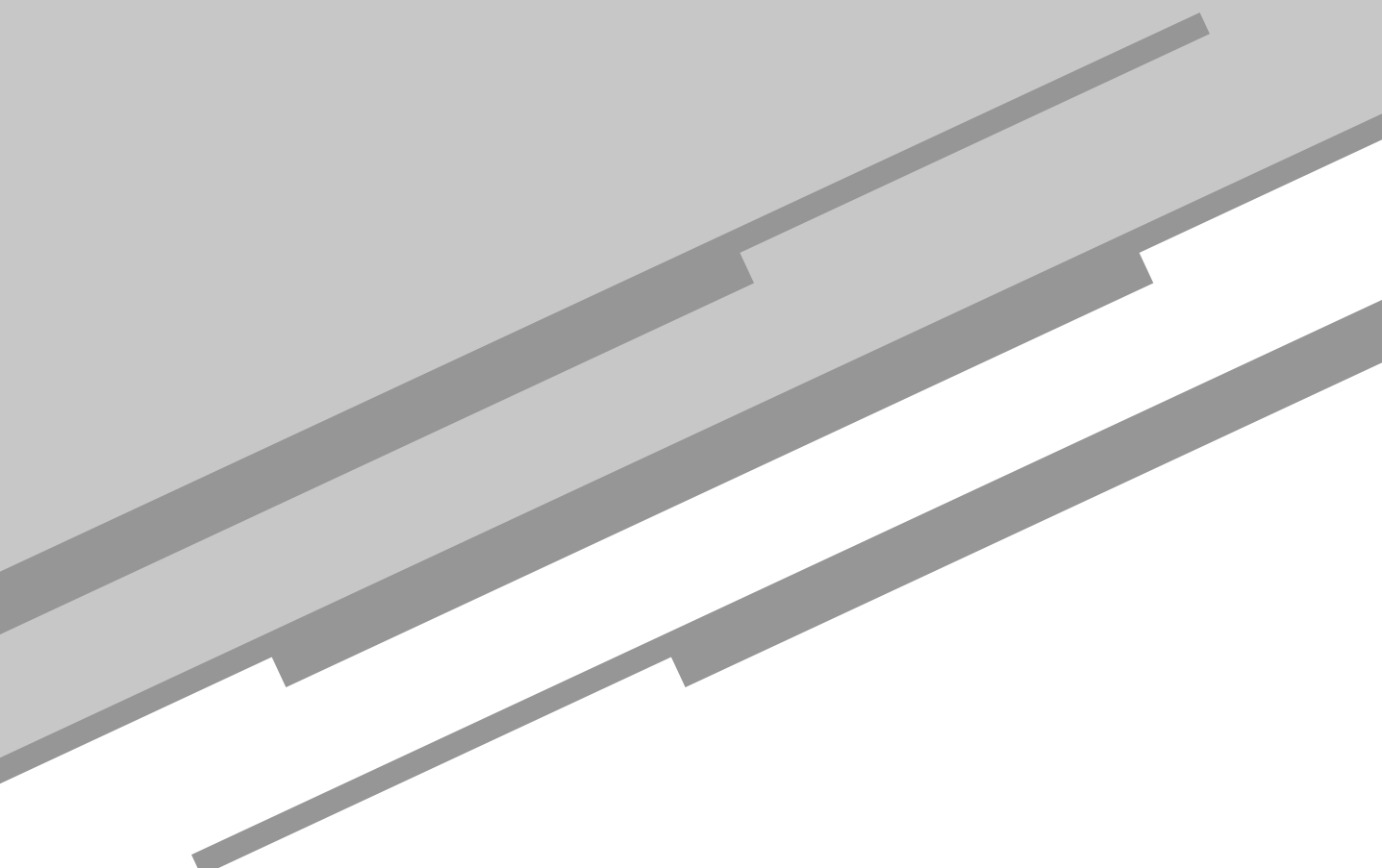
Leituras recomendadas

Leia os textos das páginas 25 a 31 do livro *Física 3 (Eletromagnetismo)* – Grupo de Reelaboração do Ensino da Física (GREF).

Leia sobre eletrização – carga elétrica, carga elétrica positiva e carga elétrica negativa, carga elétrica e estrutura da matéria – na seção “Eletricidade e magnetismo” do livro *Física – Volume único*, de Antonio Máximo e Beatriz Alvarenga.

Aula 2

Isolantes e condutores e a Lei de Coulomb



Maria Antonieta Almeida

Metas

Apresentar os conceitos de cargas elétricas, isolantes e condutores. Mostrar a interação entre cargas elétricas como uma ação a distância.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. diferenciar isolantes de condutores;
2. reconhecer os processos de eletrização dos corpos;
3. descrever a interação entre as cargas elétricas como uma ação a distância.

Pré-requisitos

Para ter bom aproveitamento nesta aula, é importante que você saiba somar frações, elevar expressões a potências, conhecer o conceito de funções, ter noções de geometria plana (ângulos, geometria dos triângulos), trigonometria básica (seno, cosseno, tangente, cotangente), vetores e as Leis de Newton.

Esses conteúdos podem ser encontrados nos livros das disciplinas de Matemática Básica, Geometria Básica e Ciências Físicas I.

Isolantes e condutores

É do conhecimento geral que, para recebermos energia elétrica, devemos ligar fios de cobre na rede elétrica e, para evitarmos os choques elétricos nas manipulações com tomadas, devemos utilizar chaves de fenda com cabos de plástico. A subseção “A descoberta dos condutores”, a seguir, pretende explicar esses fatos. Antes da leitura, veja se você é capaz de responder às seguintes perguntas:



Fonte: <http://www.sxc.hu/photo/850380>

1. O que são isolantes?
2. O que são condutores?
3. Quais são os processos que eletrizam isolantes?
4. Quais são os processos que eletrizam 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, então, 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 de André, procurando seu telefone celular.

– 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.

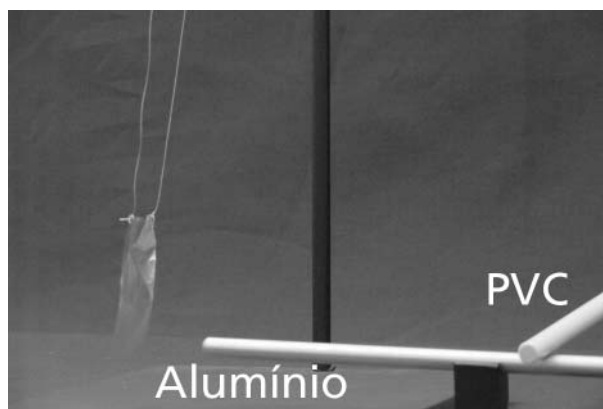


Figura 2.1: O bastão de alumínio conduz a carga elétrica do bastão de PVC para a folha de alumínio.



Veja os experimentos sobre isolantes e condutores no vídeo “Isolantes e condutores”, disponível no seu polo para cópia e no Portal TECA (Entre no Portal TECA, escolha vídeos, digite ICF2_cederj e escolha o botão “Pesquisa”).

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 livre do bastão de alumínio (aquela 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, distribuindo-se 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!

Condutores

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

Isolantes

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

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?

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?

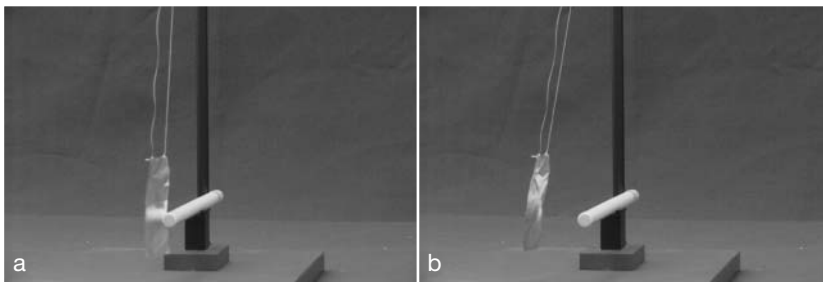


Figura 2.2: a) Bastão de PVC eletrizado atrai o papel de alumínio; b) O papel de alumínio se eletriza por contato e é repelido pelo bastão.

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 2.3: Eletrização por indução.

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

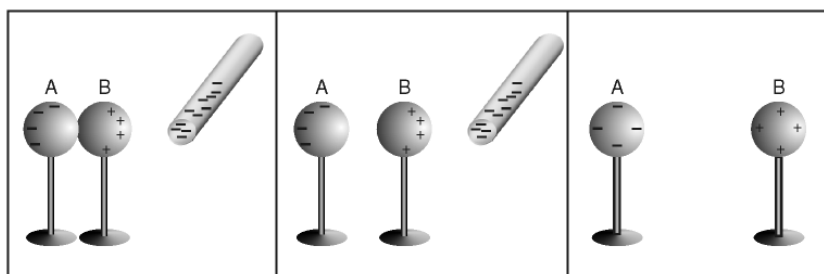


Figura 2.4: Eletrização por indução.

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 telefone celular 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 isolantes e tenta carregá-las por indução com um bastão de PVC eletrizado; o resultado é negativo.

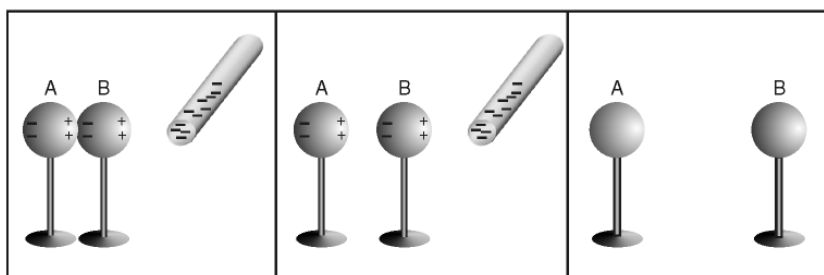


Figura 2.5: Esferas isolantes neutras não eletrizam por indução.

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

Atividade 1

Atende aos Objetivos 1 e 2

Com base na conversa entre André e Fátima, que você acabou de ler, responda às seguintes perguntas:

a) O que são isolantes?

b) O que são condutores?

c) Quais são os processos que eletrizam isolantes?

d) Quais são os processos que eletrizam condutores?

Resposta Comentada

a) Isolantes são corpos que não permitem o movimento de cargas elétricas no seu interior. Por isso, eles não se eletrizam por contato.

b) Os condutores são corpos que permitem o movimento de cargas elétricas no seu interior. Eles se eletrizam facilmente por contato. Veja o vídeo “Isolantes e condutores”, disponível no polo para cópia e no Portal TECA.

c) Os isolantes só são eletrizados por atrito, porque eles não permitem o movimento de elétrons no seu interior.

d) Os condutores são facilmente eletrizados por contato e por indução. Eles também podem ser eletrizados por atrito.

Atividade 2

Atende ao Objetivo 2

Um bastão de acrílico atritado com seda é aproximado de uma esfera de

isopor neutra, que foi pintada com tinta preparada com álcool e grafite, como mostra a **Figura 2.6**. A grafite é uma substância condutora.

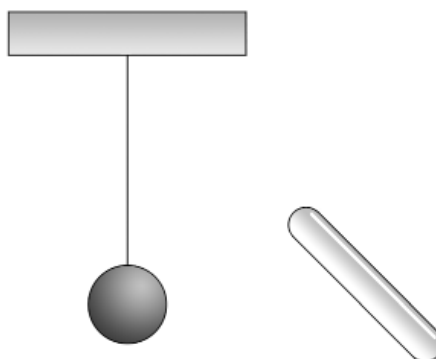


Figura 2.6: Bastão de acrílico eletrizado na presença de uma esfera de isopor pintada com uma tinta de grafite.

a) Qual é a carga elétrica do bastão de acrílico?

b) Desenhe a distribuição de cargas elétricas na esfera quando ela está na posição representada na **Figura 2.6**.

c) Qual é o movimento da esfera? Qual é o sinal da carga total final da esfera?

Resposta Comentada

a) O bastão de acrílico atritado com seda fica com um excesso de cargas elétricas positivas, como mostra a **Figura 2.7**.

b)

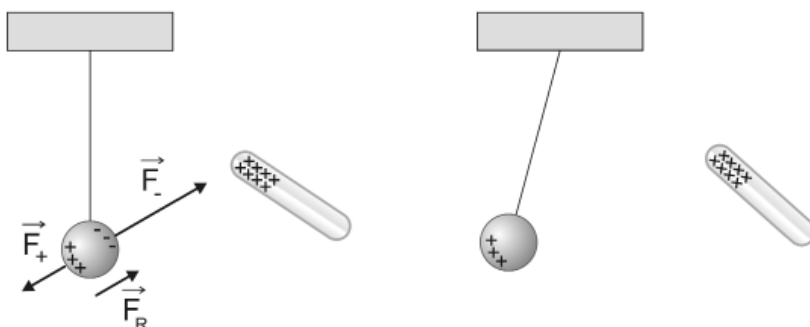


Figura 2.7: Distribuições de cargas elétricas na esfera e no bastão nas posições inicial e final da esfera.

As cargas elétricas positivas do bastão eletrizado atraem os elétrons da camada condutora de grafite de tal forma que eles ficam mais próximos do bastão eletrizado. A camada de grafite mais afastada do bastão eletrizado fica com cargas elétricas positivas.

c) Como a força elétrica entre cargas elétricas diminui quando a distância entre essas cargas aumenta (ver vídeo “Forças elétricas”), a força elétrica exercida sobre as cargas negativas da esfera é maior do que a força elétrica exercida sobre as cargas elétricas positivas. Por isso, a esfera condutora é atraída pelo bastão. Ao ser atraída pelo bastão eletrizado, a esfera vai colidir com ele. Como a tinta de grafite é condutora, os elétrons passam para o bastão, deixando a esfera com cargas elétricas positivas. Como as cargas elétricas positivas se repelem, a esfera é repelida, adquirindo a posição final representada na **Figura 2.7**.

Atividade 3

Atende ao Objetivo 2

Um bastão de acrílico atritado com seda é aproximado a uma esfera de isopor, como mostra a **Figura 2.8**.

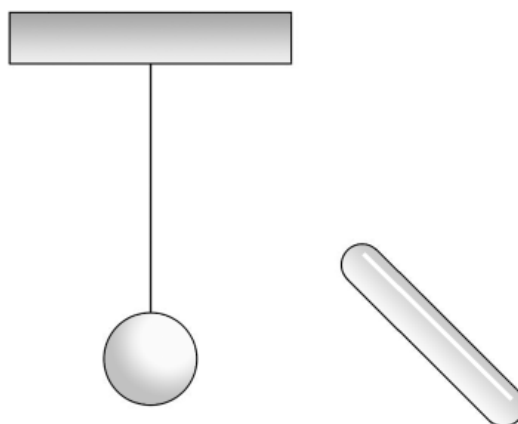


Figura 2.8: Esfera de isopor na presença de um bastão de acrílico eletrizado.

a) Qual é a carga elétrica do bastão de acrílico?

b) Qual é o movimento da esfera?

c) Qual é a carga total final da esfera? Qual é a posição final da esfera?

Resposta Comentada

a) O bastão de acrílico atritado com seda fica com um excesso de cargas elétricas positivas, como mostra a **Figura 2.9**.

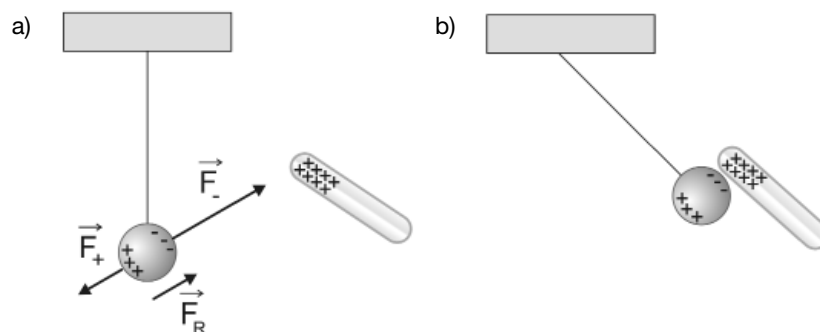


Figura 2.9: Distribuições de cargas elétricas na esfera de isopor e no bastão nas posições inicial e final da esfera.

b) Como a esfera é de isopor, as cargas elétricas positivas do bastão eletrizado não produzem um deslocamento grande dos elétrons. Todavia, elas modificam ligeiramente a distribuição de elétrons na esfera de isopor de tal forma que, do ponto de vista macroscópico, tudo funciona como se existisse uma camada de cargas elétricas negativas na superfície da esfera de isopor mais próxima do bastão e uma camada de cargas elétricas positivas na região da esfera mais afastada do bastão (**Figura 2.9**).

c) Como a força elétrica entre cargas elétricas diminui quando a distância entre as cargas elétricas aumenta (ver vídeo “Forças elétricas”), a força elétrica exercida sobre as cargas negativas da esfera é maior do que a força elétrica exercida sobre as cargas elétricas positivas (**Figura 2.9**). Por isso, a esfera de isopor é atraída pelo bastão. A **Figura 2.9** mostra que a esfera vai colidir com o bastão eletrizado. Como a esfera de isopor é isolante, não há passagem de elétrons para o bastão. A esfera de isopor permanece encostada no bastão, como mostra a **Figura 2.9b**.



Atividade 4

Atende ao Objetivo 2

Duas esferas condutoras neutras são colocadas em contato, como mostra a figura seguinte. Um bastão eletrizado com cargas elétricas positivas é aproximado das esferas (**Figura 2.10**). Descreva as cargas elétricas finais das esferas nas seguintes situações:

a) As esferas são afastadas na presença do bastão e, a seguir, o bastão é retirado.

b) O bastão eletrizado é afastado e, a seguir, as esferas são afastadas.

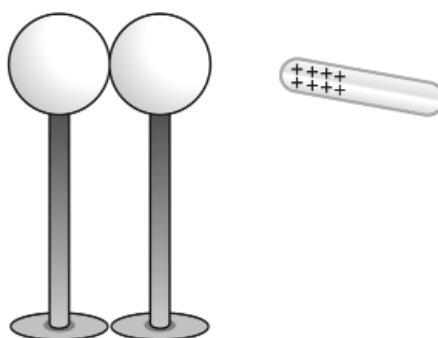


Figura 2.10: Esferas condutoras neutras na presença de um bastão carregado com cargas elétricas positivas.

Resposta Comentada

a) As duas esferas unidas funcionam como um único condutor. As cargas elétricas positivas do bastão eletrizado atraem os elétrons das esferas de tal forma que, na região mais próxima do bastão, aparecem cargas elétricas negativas e, nas regiões mais afastadas do bastão, aparecem cargas elétricas positivas (**Figura 2.11**). Quando o bastão é afastado, a esfera da esquerda fica com cargas elétricas positivas, e a esfera da direita fica com cargas elétricas negativas (**Figura 2.12**). Quando o bastão é retirado, a esfera da esquerda fica com carga elétrica positiva, e a esfera da direita fica com cargas elétricas negativas.

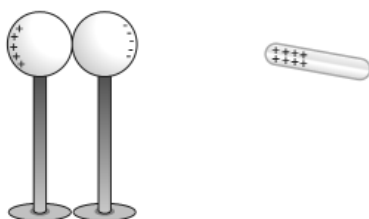


Figura 2.11

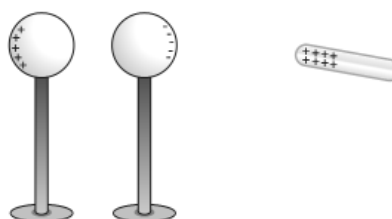


Figura 2.12

b) As duas esferas unidas funcionam como um único condutor. As cargas elétricas positivas do bastão eletrizado atraem os elétrons das esferas de tal forma que, na região mais próxima do bastão, aparecem cargas

elétricas positivas e, nas regiões mais afastadas do bastão, aparecem cargas elétricas negativas (**Figura 2.11**). Quando o bastão é afastado, as esferas se tornam neutras novamente (**Figura 2.13**). As esferas neutras continuam neutras quando são afastadas (**Figura 2.14**).

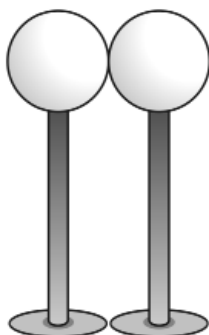


Figura 2.13

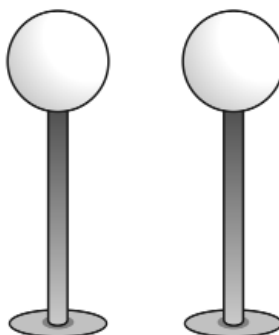


Figura 2.14

Atividade 5

Atende ao Objetivo 2

I. Um eletroscópio de folha foi carregado com uma carga elétrica q (**Figura 2.11**). Um aluno de Introdução às Ciências Físicas 2 utiliza um bastão eletrizado positivamente para descobrir qual é a carga elétrica do eletroscópio. Ele aproxima o bastão do eletroscópio sem tocá-lo (**Figura 2.12**). Na presença do bastão, as folhas do eletroscópio se juntam.

a) Explique com desenhos o que aconteceu com o eletroscópio.

b) A carga elétrica total do eletroscópio é positiva ou negativa? Justifique a sua resposta.

II. O aluno toca a esfera do eletroscópio com o bastão e, em seguida, o afasta do eletroscópio. Ele observa que o ângulo final α_2 entre as folhas de alumínio é maior do que o ângulo α_1 ($\alpha_2 > \alpha_1$) que existia antes de o bastão ser aproximado (**Figura 2.13**).

c) Explique com desenhos o que aconteceu com o eletroscópio.

d) A carga elétrica total do eletroscópio é positiva ou negativa? Justifique a sua resposta.

Resposta Comentada

I.

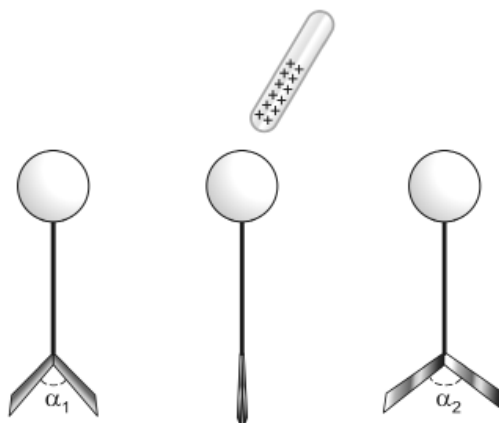
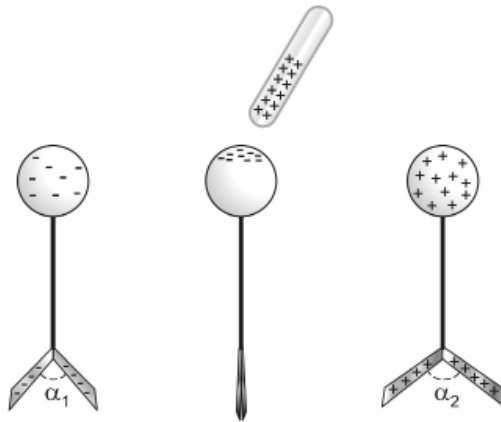


Figura 2.15

Figura 2.16

Figura 2.17

II. Como as folhas do eletroscópio fecharam na **Figura 2.16**, as cargas elétricas que estavam nas folhas foram retiradas delas pela presença do bastão com cargas elétricas positivas. Como cargas elétricas positivas atraem cargas elétricas negativas, podemos concluir que as cargas elétricas das folhas eram negativas. As cargas elétricas negativas que estavam nas folhas e na esfera ficaram mais próximas do bastão, como na **Figura 2.19**;

**Figura 2.18****Figura 2.19****Figura 2.20**

Quando o bastão toca o eletroscópio, os elétrons do eletroscópio se transferem para o bastão, para neutralizar as cargas elétricas positivas deste. A quantidade de elétrons transferida depende da quantidade de cargas elétricas positivas do bastão.

Podem ocorrer três situações:

- na primeira situação, apenas uma parte dos elétrons flui do eletroscópio para o bastão. Neste caso, quando o bastão é afastado, o eletroscópio fica carregado com uma quantidade de carga elétrica negativa menor. Dessa forma, as folhas ficariam carregadas com uma quantidade de cargas elétricas negativas menor do que a da **Figura 2.18**, provocando uma abertura menor entre as folhas, isto é, $\alpha_2 < \alpha_1$;
- na segunda situação, todos os elétrons em excesso fluem do eletroscópio para o bastão. Neste caso, quando o bastão é afastado, o eletroscópio fica descarregado. Dessa forma, as folhas ficam neutras e a abertura entre elas seria nula;
- na terceira situação, fluiria para o bastão uma quantidade de elétrons maior do que a que existia no eletroscópio na situação da **Figura 2.18**. Neste caso, quando o bastão é afastado, o eletroscópio fica carregado

com uma quantidade de cargas elétricas positivas. Se a quantidade de cargas positivas do eletroscópio for menor do que a quantidade de cargas elétricas negativas presentes na **Figura 2.18**, as folhas ficam afastadas com $\alpha_2 < \alpha_1$. Se, no entanto, a quantidade de cargas elétricas positivas do eletroscópio for maior do que a quantidade de cargas elétricas negativas presentes na **Figura 2.18**, as folhas ficariam carregadas com uma quantidade de cargas elétricas positivas maior do que a da **Figura 2.18**, provocando uma abertura maior entre as folhas, isto é, $\alpha_2 > \alpha_1$.

Como, na **Figura 2.19**, a abertura entre as folhas é tal que $\alpha_2 > \alpha_1$, podemos concluir que o eletroscópio ficou carregado com uma quantidade de cargas elétricas positivas maior do que a quantidade de cargas elétricas negativas que existia na **Figura 2.18**.



Forças elétricas

O mundo moderno é movido a eletricidade. A compreensão dos fenômenos elétricos requer o conhecimento das leis que descrevem *quantitativamente* a interação entre as cargas elétricas. A subseção “Saudades do professor Edmundo” discute a *Lei de Coulomb*, que permite calcular as forças entre cargas elétricas. Mas, antes de ler, veja se você é capaz de responder às perguntas:

1. Descreva o *modelo de ação a distância que descreve a interação entre cargas elétricas em repouso* (interação eletrostática). Você sabe quem propôs esse modelo?
2. Enuncie o *princípio da superposição para 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. Ele se lembra dos conceitos de cargas elétricas, forças elétricas e campos elétricos, que aprendeu no 9º ano. 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, no 9º ano, 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, e 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 antiga 8ª série é revista em 10 minutos, sem nenhuma demonstração experimental. Cargas elétricas, forças elétricas, isolantes e condutores são relembrados como velhos conhecidos. A descrição da balança de torção, utilizada pelo físico A. 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”.

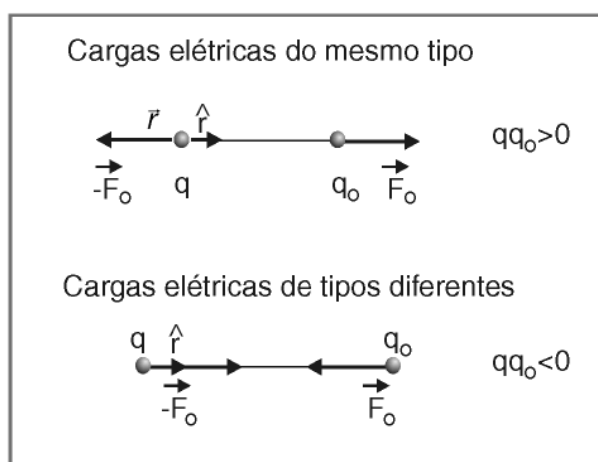


Figura 2.21: Forças elétricas entre cargas elétricas pontuais.

Forças elétricas são as forças entre cargas elétricas. Leia a respeito da evolução das ideias sobre forças elétricas no complemento “A história da eletricidade”.

O módulo da força elétrica é:

$$F_o = k \frac{|q q_o|}{r^2}$$

A expressão vetorial da força elétrica é:

$$\vec{F}_o = k \frac{|q q_o|}{r^2} \hat{r}$$

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 e o ampere), ela vale $9,0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$, r é distância entre as cargas, e \vec{r} é o vetor unitário com a direção e o sentido do vetor deslocamento \vec{r} , que vai de q até q_o .

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. A força elétrica de várias cargas pontuais, agindo sobre uma carga elétrica, é igual à soma destas várias forças elétricas exercidas pelas cargas elétricas sobre ela”, ressaltando 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 ou 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 a Fátima.

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.

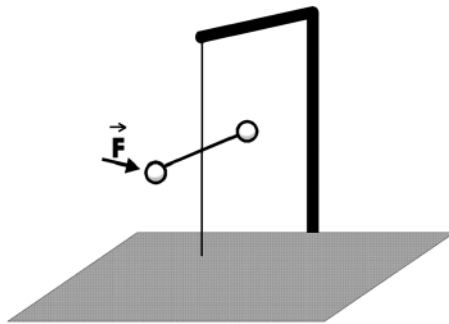


Figura 2.22: Aplicando uma força no haltere.

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:

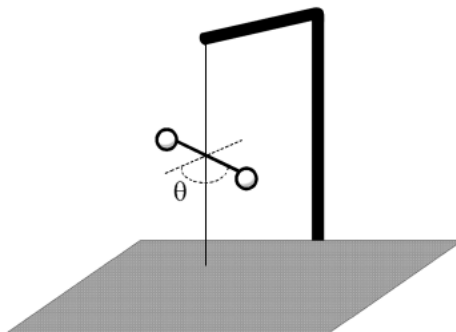
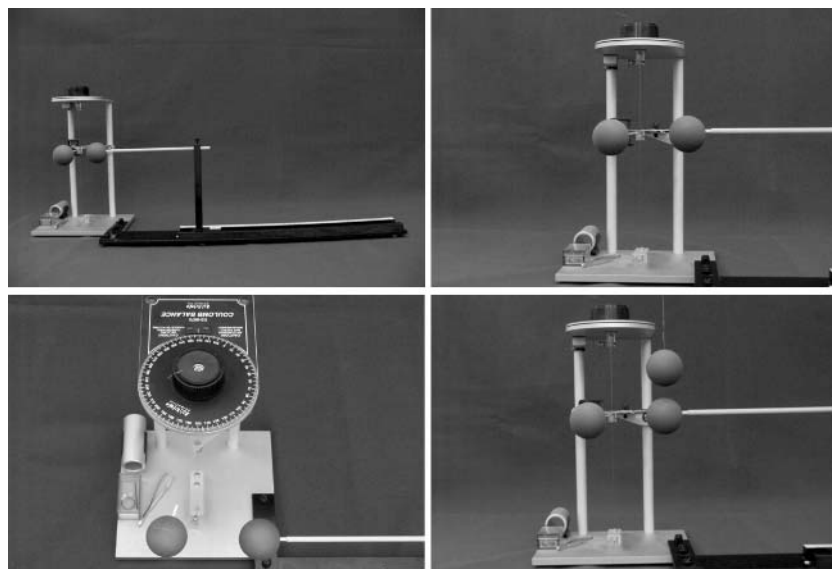


Figura 2.23: Ângulo de torção.

– O ângulo de torção aumenta quando a força aplicada aumenta. O conhecimento das propriedades elásticas do fio e da medida desse ân-

gulo 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 2.24: Balança de torção de 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 a um fio vertical; a segunda está ligada a uma haste que pode se deslocar sobre um trilho; 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 se 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 2.25: 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:

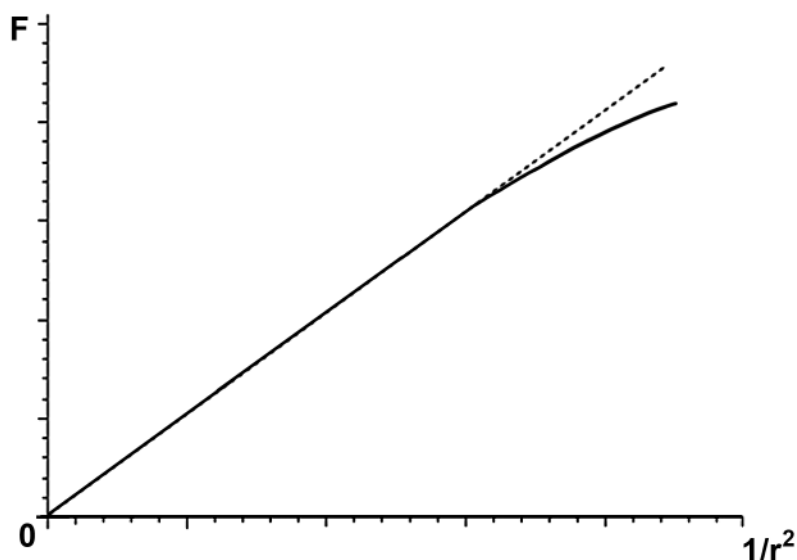


Figura 2.26: Gráfico que relaciona a força com o inverso do quadrado da distância entre as esferas.

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 é verdade para o mundo macroscópico. Nele, a carga pontual é um modelo matemático que é utilizado nas condições que acabei de descrever: distâncias grandes, dimensões pequenas. No mundo microscópico, até hoje, nenhum experimento mostrou que os elétrons têm dimensões; por isso, ele pode ser considerado uma carga elétrica pontual.

– Como posso obter a dependência da força elétrica com a carga elétrica?

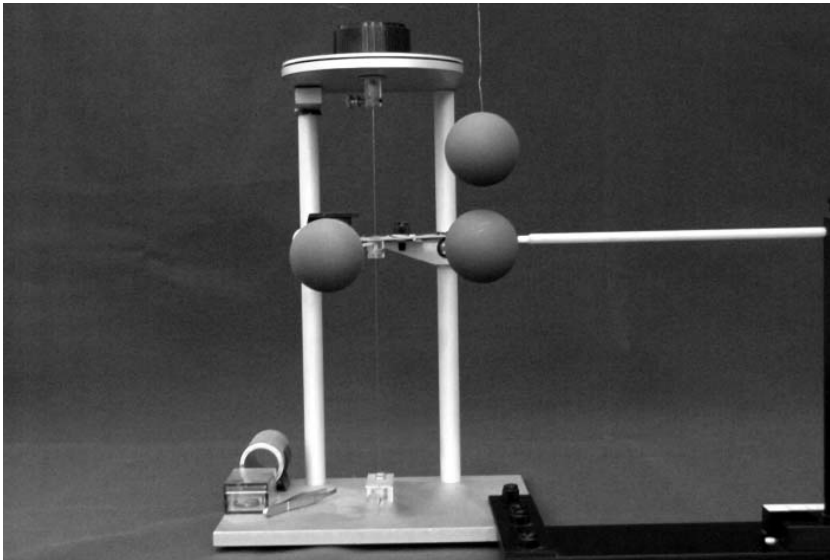


Figura 2.27: Variando a carga elétrica da segunda bolinha.

– 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 .

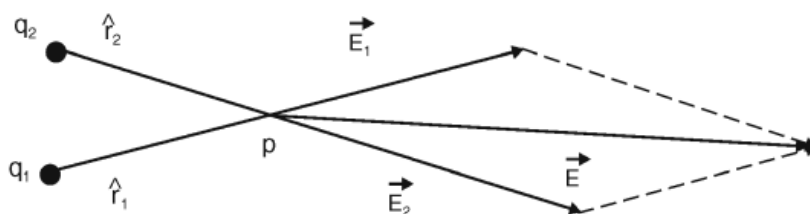


Figura 2.28: Diagrama de forças.

E começa a explicar o diagrama:

– A força \vec{F}_{01} , 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:

$$\vec{F}_0 = \vec{F}_{01} + \vec{F}_{02} = \frac{k q_0 q_1}{r_{01}^2} \hat{r}_{01} + \frac{k q_0 q_2}{r_{02}^2} \hat{r}_{02}$$

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 utilizarem 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 as 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:

$$\vec{F}_o = k \frac{q q_o}{r^2} \hat{r}$$

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

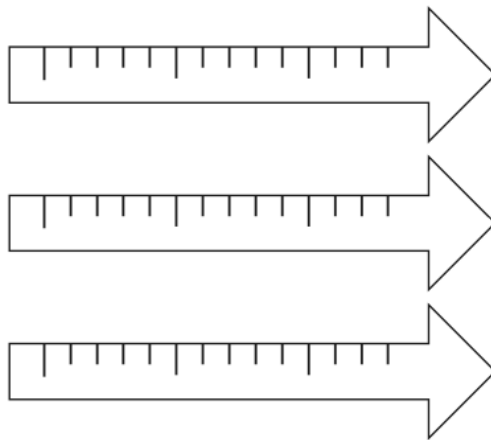


Figura 2.29: Metros de pedreiro e a representação de vetores.



A utilização dos metros de pedreiro na representação de vetores foi discutida nas Aulas 1 e 2 do Módulo 2 de ICF 1.

– Imagine que este primeiro metro representa um vetor \vec{A} . Multiplicar o vetor \vec{A} por dois 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 em sentido contrário.

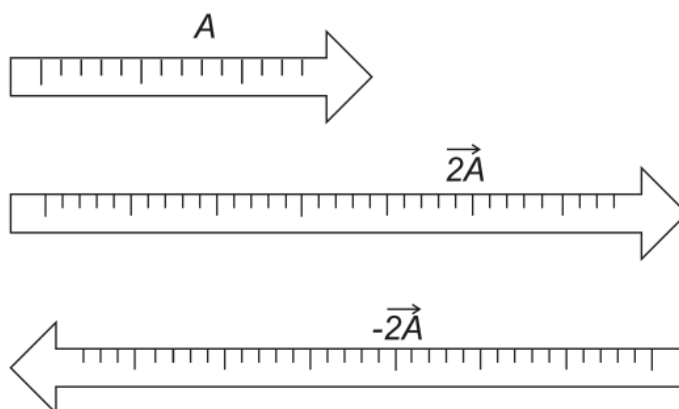


Figura 2.30: Metros de pedreiro e a representação de vetores.

– Isto 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 \vec{r} . Ele tem a direção e o sentido do vetor deslocamento \vec{r} , que vai de q até q_o (ver **Figura 2.21**).

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 $k \frac{q_1 q_o}{r^2}$ é positivo, e \vec{F}_o tem a mesma direção e o mesmo sentido de \vec{r} . A força é atrativa quando as cargas são de tipos diferentes (uma positiva e outra negativa). Nesse caso, o número real $k \frac{q_1 q_o}{r^2}$ é negativo, e o sentido de \vec{F}_o é contrário ao sentido de \vec{r} . O módulo da força elétrica é o mesmo nos dois casos: $F_o = k \frac{|q_1 q_o|}{r^2}$.

Pede à irmã um problema resolvido sobre a Lei de Coulomb e o prin-

cípio da superposição.

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

Atividade 6

Atende ao Objetivo 3

Com base nessa segunda situação apresentada, responda às seguintes perguntas:

a) Descreva o modelo de ação a distância que descreve a interação entre cargas elétricas em repouso (interação eletrostática). Você sabe quem propôs esse modelo?

b) Enuncie o princípio da superposição para forças elétricas.

Resposta Comentada

a) 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.

$$\vec{F}_o = k \frac{q q_o}{r^2} \hat{r}$$

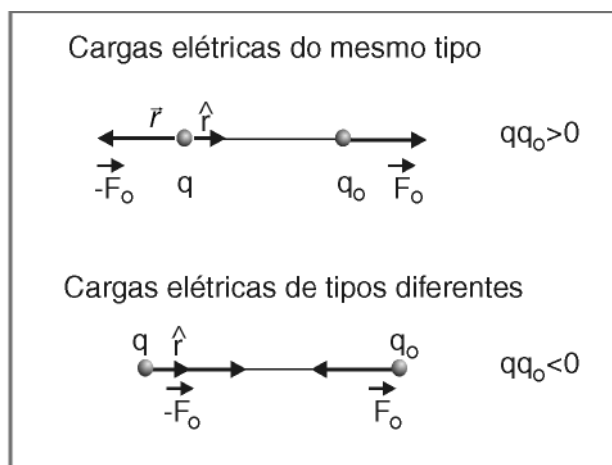


Figura 2.31: O modelo da interação a distância entre duas cargas elétricas foi proposto por Augustin Coulomb.

b) A força elétrica entre duas cargas elétricas pontuais não é alterada pela presença de outras cargas elétricas pontuais. Logo, a força elétrica que várias cargas elétricas pontuais exercem sobre uma carga elétrica q_o é dada por:

$$\vec{F}_o = k \frac{q_o q_1}{r_{o1}^2} \hat{r}_{o1} + k \frac{q_o q_2}{r_{o2}^2} \hat{r}_{o2} + \dots + k \frac{q_o q_N}{r_{oN}^2} \hat{r}_{oN} = \sum_{i=1}^N k \frac{q_o q_N}{r_{oi}^2} \hat{r}_{oi}$$

Atividade 7

Atende ao Objetivo 3

Um sistema é formado por duas cargas elétricas positivas iguais q_1 e q_2 ($q_1 = q_2 = q$), separadas por uma distância d . O eixo OX é perpendicular à reta que une as cargas elétricas q_1 e q_2 . O ponto O coincide com o ponto médio da reta que une as duas cargas elétricas. Calcule a força elétrica exercida por esse sistema em uma carga elétrica Q colocada sobre um ponto P do eixo OX , que dista D da origem do sistema de eixos coordenados (ver **Figura 2.32**).

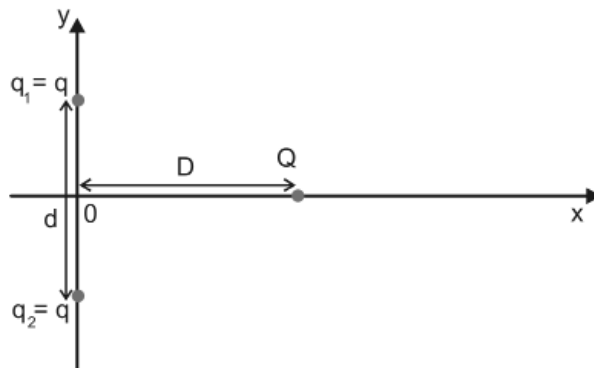


Figura 2.32: Forças entre cargas elétricas.

Resposta Comentada

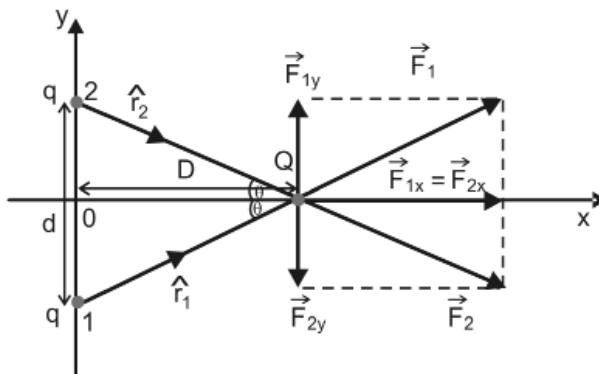


Figura 2.33: Força elétrica resultante sobre a carga Q.

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:

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

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, isto 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:

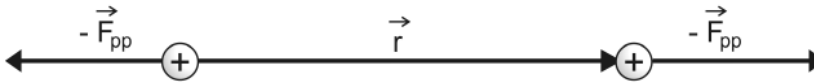
– Eu sabia que você ia me tirar essas dúvidas!

Dá um beijo agradecido na irmã e volta rápido para o seu quarto. Sabe que precisa se distrair urgentemente. Liga para sua namorada.

Atividade 8

Atende ao Objetivo 3

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} m. A carga e a massa do próton são respectivamente iguais a $1,6 \times 10^{-19}$ C e $1,67 \times 10^{-27}$ kg. Que outra força garante a estabilidade do átomo de hélio?

Resposta Comentada**Figura 2.34**

O módulo da força elétrica entre os prótons do núcleo é dado por:

$$F_{pp} = \frac{kq_p^2}{r^2},$$

onde $q_p = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, $k = 9 \cdot 10^9 \text{ N/C}^2$ e $r = 10^{-15} \text{ m}$.

Logo, o módulo da força elétrica entre os prótons é:

$$F_{pp} = \frac{(9 \cdot 10^9 \text{ N/C}^2)(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C})^2}{(10^{-15} \text{ m})^2} \cong 230 \text{ N}$$

$$a = \frac{F_{pp}}{m} \cong 1,4 \cdot 10^{29} \text{ m/s}^2$$

A força que mantém os prótons unidos é a força nuclear, que é uma força de curto alcance.



Atividade 9

Atende ao Objetivo 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 .

a) No caso em que a reta que une as cargas elétricas do dipolo elétrico coincide com o eixo OX (ver **Figura 2.35**), calcule a força elétrica exercida pelo dipolo elétrico em uma carga elétrica Q colocada sobre eixo OX . A distância entre a carga elétrica Q e o centro O do dipolo é igual a D centro (**Figura 2.35**).

b) No caso em que a reta que une as cargas elétricas do dipolo elétrico é perpendicular ao eixo OX , calcule a força elétrica exercida pelo dipolo elétrico em uma carga elétrica Q colocada sobre eixo OX . A distância entre a carga elétrica Q e o centro O do dipolo é igual a D centro (Figura 2.36).



Figura 2.35



Figura 2.36

Resposta Comentada

a)

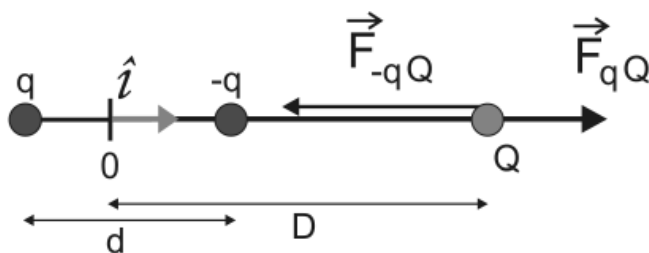


Figura 2.37

Vou resolver o problema imaginando que a carga elétrica Q é positiva. Nesse caso, ela é repelida pela carga elétrica q e atraída pela carga elétrica $-q$. Os módulos das forças que as cargas elétricas q e $-q$ exercem sobre Q são:

$$F_{-qQ} = \frac{kqQ}{\left(D - \frac{d}{2}\right)^2} \text{ e } F_{qQ} = \frac{kqQ}{\left(D + \frac{d}{2}\right)^2}$$

Logo, as forças elétricas exercidas sobre Q são:

$$\vec{F}_{-qQ} = -\frac{kqQ}{\left(D - \frac{d}{2}\right)^2} \hat{i} \text{ e } \vec{F}_{qQ} = \frac{kqQ}{\left(D + \frac{d}{2}\right)^2} \hat{i}$$

A força que o dipolo elétrico exerce sobre a carga elétrica Q é, pelo *princípio da superposição*, igual a:

$$\vec{F}_Q = \vec{F}_{-qQ} + \vec{F}_{qQ} = -\frac{kqQ}{\left(D - \frac{d}{2}\right)^2} \hat{i} + \frac{kqQ}{\left(D + \frac{d}{2}\right)^2} \hat{i}$$

Como o resultado está com notação vetorial, ele vale quando a carga elétrica Q é positiva ou negativa.

b)

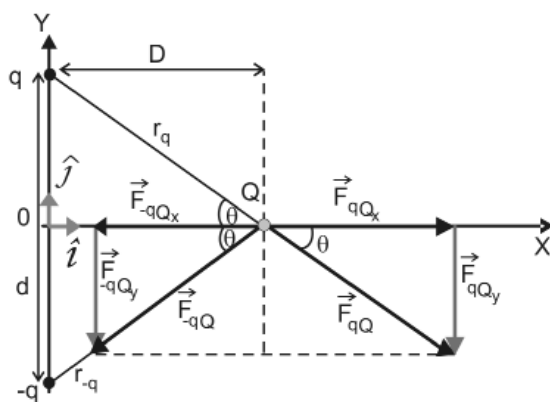


Figura 2.38

Pelo *princípio da superposição*, a força elétrica que atua na carga elétrica Q é dada por:

$$\vec{F}_Q = \vec{F}_{qQ} + \vec{F}_{-qQ}$$

A **Figura 2.38** mostra que a força resultante que atua na carga elétrica Q só tem componente y porque temos que:

$$\vec{F}_{qQx} = -\vec{F}_{-qQx} \Rightarrow \vec{F}_{Qx} = \vec{F}_{qQx} + \vec{F}_{-qQx} = \vec{F}_{qQx} - \vec{F}_{-qQx} = \vec{0}$$

A **Figura 2.38** também mostra que os vetores projetados associados às forças \vec{F}_{qQ} e \vec{F}_{-qQ} que atuam na carga elétrica Q na direção y são iguais.

Consequentemente, a força que atua na carga elétrica Q é dada por:

$$\vec{F}_Q = \vec{F}_{qQy} + \vec{F}_{-qQy} = 2\vec{F}_{qQy}$$

Para calcular a força resultante, vai ser necessário calcular a componente y da força F_{qQy} . O módulo da força que as cargas elétricas q exercem sobre a carga elétrica Q é dado por:

$$F_{qQ} = \frac{kqQ}{r_q^2}$$

O Teorema de Pitágoras aplicado ao triângulo OqQ fornece o módulo da distância entre as cargas q e Q :

$$r_q^2 = \left(\frac{d}{2}\right)^2 + D^2 \Rightarrow r_q = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + D^2}$$

Logo, o módulo da força \vec{F}_{qQ} se reduz:

$$F_{qQ} = \frac{kqQ}{D^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

O módulo da componente F_{qQy} pode ser obtido da **Figura 2.38**:

$$\text{sen}(\theta) = \frac{|F_{qQy}|}{F_{qQ}} \Rightarrow |F_{qQy}| = F_{qQ} \text{sen}(\theta)$$

Como o vetor projetado F_{qQy} tem o sentido contrário ao do vetor unitário \hat{j} , a componente é negativa, isto é,

$$F_{qQy} = -F_{qQ} \text{sen}(\theta)$$

Pelo triângulo retângulo OqQ , temos que:

$$\text{sen}(\theta) = \frac{d}{2r_q} = \frac{d}{2\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + D^2}}$$

Por isso, a componente F_{qQy} é dada por:

$$F_{qQy} = -F_{qQ} \text{sen}(\theta) = -\frac{kqQ}{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + D^2} \frac{d}{2\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + D^2}} = -\frac{kqQd}{2\left(\left(\frac{d}{2}\right)^2 + D^2\right)^{3/2}}$$

Logo, a força que o dipolo elétrico exerce sobre a carga elétrica Q é dada por:

$$\vec{F}_Q = 2F_{qQy} \hat{j} = -\frac{kqQd}{\left(D^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2\right)^{3/2}} \hat{j}$$

A resolução foi realizada imaginando-se que a carga elétrica Q era positiva. Mas, como a resposta está no formato vetorial, é fácil verificar que ela também vale quando a carga elétrica Q é negativa. Quando a carga elétrica é negativa, a força elétrica tem o sentido contrário ao sentido representado na **Figura 2.38**.

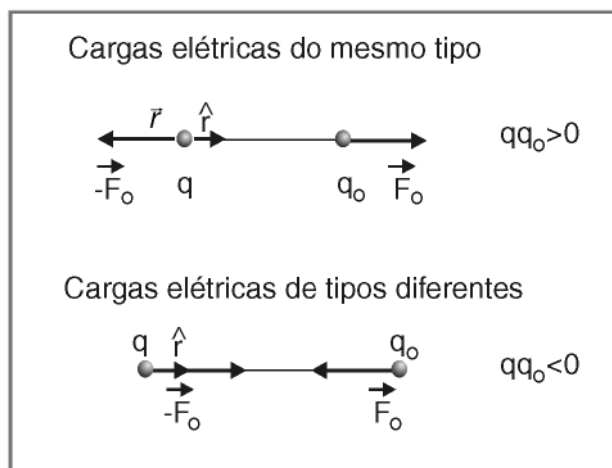


Resumo

Nesta aula, você viu que:

1. Isolantes são materiais que se eletrizam facilmente por atrito com outro isolante. Neles, as cargas elétricas têm dificuldade de se deslocar.
2. Condutores são materiais onde as cargas elétricas se deslocam com facilidade. Eles podem ser eletrizados por atrito, contato e indução.
3. A Lei de Coulomb nos diz que: *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:*

$$\vec{F}_o = k \frac{q q_0}{r^2} \hat{r}$$



4. A força elétrica entre duas cargas elétricas pontuais não é alterada pela presença de outras cargas elétricas pontuais. Logo, a força elétrica que várias cargas elétricas pontuais exercem sobre uma carga elétrica q_0 é dada por:

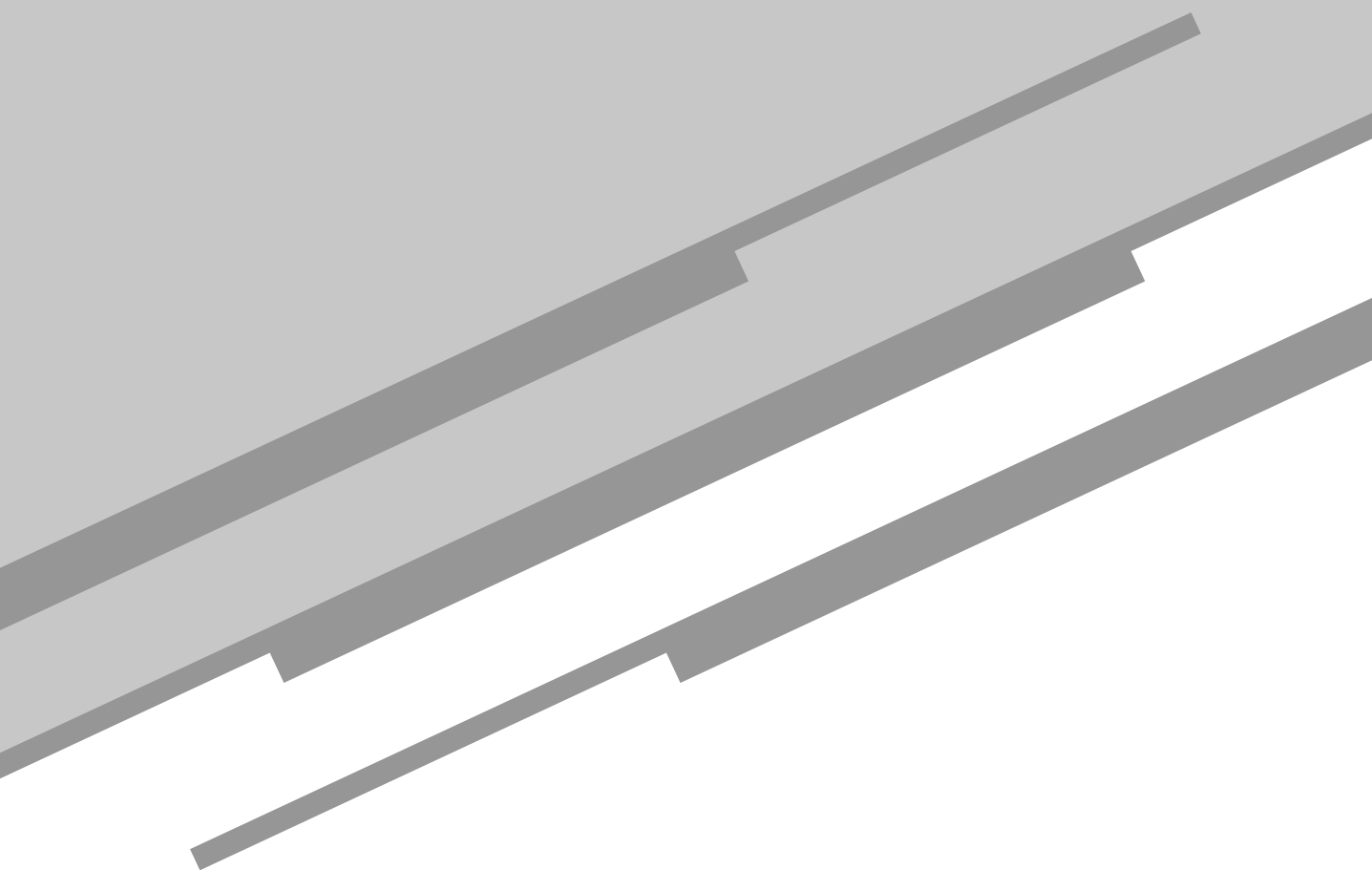
$$\vec{F}_o = k \frac{q_0 q_1}{r_{01}^2} \hat{r}_{01} + k \frac{q_0 q_2}{r_{02}^2} \hat{r}_{02} + \dots + k \frac{q_0 q_N}{r_{0N}^2} \hat{r}_{0N} = \sum_{i=1}^N k \frac{q_0 q_N}{r_{0i}^2} \hat{r}_{0i}$$

Leitura recomendada

Leia sobre condutores, isolantes e Lei de Coulomb na seção “Eletricidade e magnetismo”, do livro de Antonio Máximo e Beatriz Alvarenga, *Física – Volume Único*.

Aula 3

Campo elétrico



Maria Antonieta Almeida

Metas

Discutir a diferença entre a representação da interação eletrostática do ponto de vista de uma ação à distância e do ponto de vista de uma ação de contato.

Discutir o conceito de campo elétrico.

Definir o campo elétrico de uma carga elétrica pontual.

Discutir o princípio da superposição para os campos elétricos.

Apresentar como se calculam campos elétricos de distribuições de cargas elétricas pontuais.

Apresentar as propriedades do campo elétrico de um capacitor de placas paralelas.

Apresentar a relação entre o campo elétrico e a força elétrica.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. reconhecer a diferença entre a representação da interação eletrostática do ponto de vista de uma ação à distância e do ponto de vista de uma ação de contato;
2. descrever as principais características de definição do campo elétrico de uma carga elétrica pontual;
3. enunciar o princípio da superposição para o campo elétrico;
4. calcular o campo elétrico de uma distribuição de cargas elétricas pontuais;
5. descrever a relação entre campo elétrico e força elétrica;
6. identificar a trajetória de cargas elétricas que se encontram em uma região onde existe um campo elétrico.

Pré-requisitos

Para se ter bom aproveitamento desta aula, é importante que você saiba somar frações e elevar expressões a potências. Também é necessário conhecer o conceito de funções, ter noções de geometria plana (ângulos, geometria dos triângulos), trigonometria básica (seno, cosseno, tangen-

te, cotangente), vetores, as Leis de Newton e a Lei de Coulomb.

Esses conteúdos podem ser encontrados nos livros das disciplinas de: Matemática Básica, Geometria Básica e Introdução às Ciências Físicas I.

Introdução

Desde a nossa infância, empurramos ou puxamos objetos quando queremos deslocá-los. Por isso, é muito difícil aceitar que um corpo possa exercer uma força sobre outro corpo sem tocá-lo. Empurrar ou puxar um corpo sem tocá-lo parece coisa de mágicos ou de fantasmas. Certamente, essa é uma das razões pelas quais os cientistas tiveram grande dificuldade de aceitar a visão de que a interação entre cargas elétricas era uma ação a distância.

Michael Faraday (Newington, Surrey, 22 de setembro de 1791 — Hampton Court, 25 de agosto de 1867) propôs uma teoria na qual as forças elétricas eram exercidas pelas linhas de força que estavam em contato com as cargas elétricas.

Hoje, a descrição da interação entre cargas elétricas é realizada utilizando-se o conceito de campo elétrico.

A seguir, discutiremos sobre o conceito de campo elétrico através da leitura da seção “Uma varinha mágica”, mas antes disso, veja se você é capaz de responder às seguintes perguntas:

1. A introdução do conceito de campo elétrico privilegia uma visão de ação a distância ou de contato? Por quê?
2. Qual a definição do campo elétrico de uma carga elétrica pontual? Descreva as principais características do campo elétrico de uma carga elétrica pontual positiva e de uma carga elétrica pontual negativa.
3. Enuncie o princípio da superposição para os campos elétricos. Esse princípio tem natureza teórica ou experimental?
4. Qual a lei que fornece a força exercida por um campo elétrico em uma carga elétrica pontual?

Uma varinha mágica



Ana está no seu quarto, assistindo ao filme *A bela adormecida*, de Walt Disney. Uma de suas cenas preferidas ocorre quando as fadas madrinhas da princesa, com suas varinhas mágicas, atraem e dão vida aos objetos inanimados, e os ovos passam a caminhar sozinhos para a panela do bolo. Nesse momento, 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 serem tocados.

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.

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 ideia 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 a 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 uma coisa que não ocorre no nosso cotidiano.

Silêncio geral. Apesar de ficar surpreso com o nível de reflexão de 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 ideia 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 pode estar sempre em contato com outras cargas e outros ímãs.

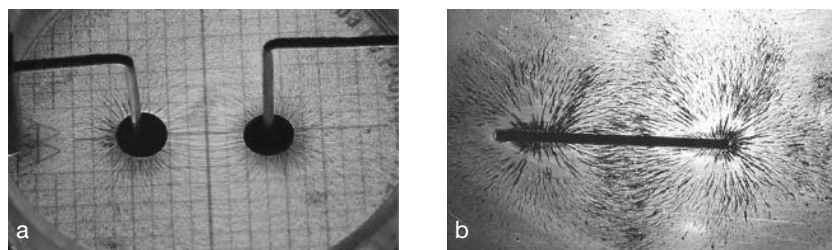


Figura 3.1: a) Terminais circulares com cargas elétricas q e $-q$ imersos em óleo de rícino coberto com fubá. b) Limalha de ferro espalhada sobre uma placa de acrílico colocada sobre um ímã.

O professor dá as soluções:

– Para visualizarmos o “fantasma elétrico”, imergimos as cargas elétricas em óleo e jogamos fubá sobre ele (**Figura 3.1a**); para visualizar o “fantasma magnético”, é só jogar limalha de ferro nas vizinhanças dos ímãs (veja a **Figura 3.1b**). 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.

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

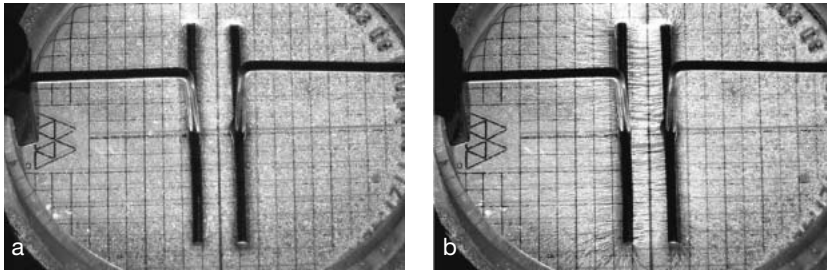


Figura 3.2: a) Terminais lineares descarregados imersos em óleo coberto com fubá. b) Terminais lineares com cargas q e $-q$ imersos em óleo coberto com fubá.

O professor mostra para a turma duas imagens:

– Na **Figura 3.2a**, 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 3.2b**, 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 3.2b** existem linhas paralelas entre os terminais, linhas curvas nas extremidades dos terminais e nenhuma linha atrás dos terminais.

E o professor continuou:

– Para Faraday, as linhas que vocês estão vendo funcionavam como 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 em linhas de força, 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.

– 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. O professor substituto, apesar de discutir o assunto sem dificuldades, fala 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.

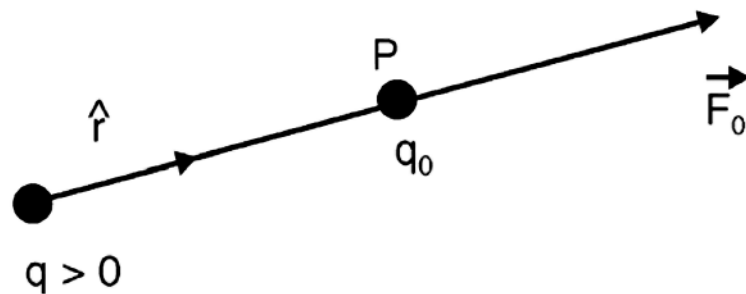


Figura 3.3: Força elétrica exercida pela carga elétrica q na carga de prova q_0 .

Depois, escreve no quadro a expressão da força elétrica:

$$\vec{F} = \frac{kqq_0}{r^2} \hat{r}$$

– Temos que definir o vetor do campo elétrico criado por q no ponto P 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 . Vou definir o campo elétrico criado por uma carga elétrica pontual em um ponto P do espaço, como o quociente entre a força elétrica que o campo elétrico exerce sobre a carga elétrica de prova colocado no ponto p e a carga elétrica de prova. Essa definição fornece a seguinte expressão para o campo elétrico:

$$\vec{E}_p = \frac{\vec{F}_o}{q_o} = \frac{k q q_o}{q_o r^2} \hat{r} = \frac{k q}{r^2} \hat{r}$$

Com essa definição, a força elétrica que o campo elétrico criado pela carga elétrica pontual q colocada no ponto P é dada por:

$$\vec{F}_o = q_o \vec{E}$$

A turma não resiste e reclama:

- Que complicação!
- Toda ideia 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_o . 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 e reflete em voz alta:

- O vetor unitário \hat{r} tem a mesma direção e o mesmo sentido do vetor deslocamento \vec{r} que vai da carga elétrica q até o ponto P . Por isso, o campo elétrico da carga positiva tem o mesmo sentido do vetor deslocamento \vec{r} (**Figura 3.4**) e o campo elétrico da carga elétrica negativa tem o sentido contrário ao do vetor deslocamento \vec{r} .

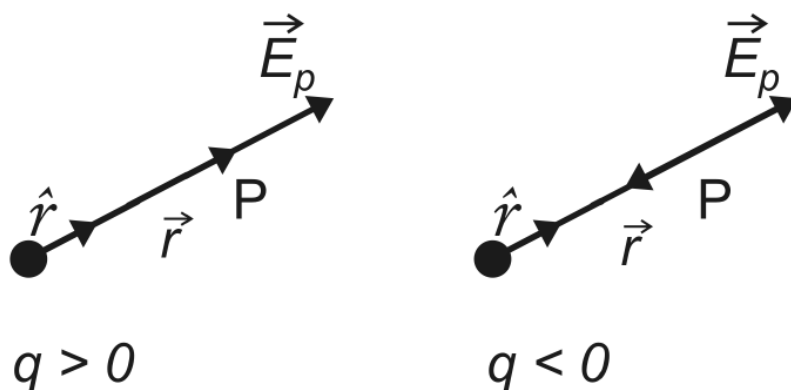


Figura 3.4: Campo elétrico de uma carga elétrica pontual.

Ronaldo ainda não tem certeza se está entendendo tudo.

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

– Vou definir o vetor do campo elétrico de um conjunto de cargas pontuais de forma análoga a como defini o campo de uma carga elétrica pontual. O campo elétrico criado por várias cargas elétricas pontuais é o quociente entre a força elétrica que atua na carga elétrica de prova e a carga elétrica de prova.

Ele vai para o quadro, desenha as forças elétricas criadas por duas cargas elétricas em uma carga elétrica de prova q_0 colocada em um ponto P e escreve a fórmula da força resultante sobre a carga elétrica de prova.

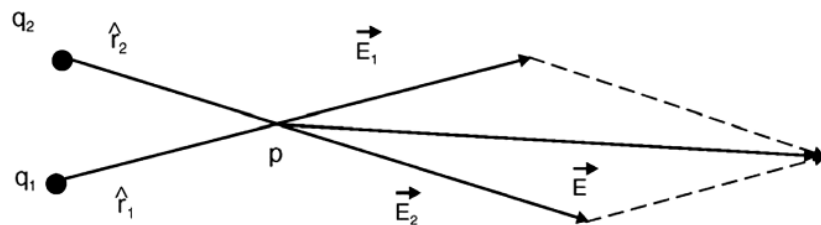


Figura 3.5a: Diagrama de forças.

$$\vec{F}_o = \vec{F}_{o1} + \vec{F}_{o2} = \frac{kq_0q_1}{r_1^2} \hat{r}_1 + \frac{kq_0q_2}{r_2^2} \hat{r}_2$$

A seguir, o professor divide a força resultante pela carga elétrica de prova e obtém o campo elétrico resultante no ponto P .

$$\vec{E}_P = \frac{\vec{F}_{o1} + \vec{F}_{o2}}{q_0} = \left(\frac{\frac{kq_0q_1}{r_1^2} \hat{r}_1 + \frac{kq_0q_2}{r_2^2} \hat{r}_2}{q_0} \right) = \frac{kq_1}{r_1^2} \hat{r}_1 + \frac{kq_2}{r_2^2} \hat{r}_2$$

Ronaldo pede ao professor para ele desenhar os campos elétricos das cargas e o campo elétrico resultante no ponto P . O professor faz o desenho explicando aos alunos que os sentidos dos campos criados pelas cargas elétricas q_1 e q_2 no ponto P eram iguais aos sentidos dos vetores unitários, porque ele estava supondo que as cargas elétricas eram positivas.

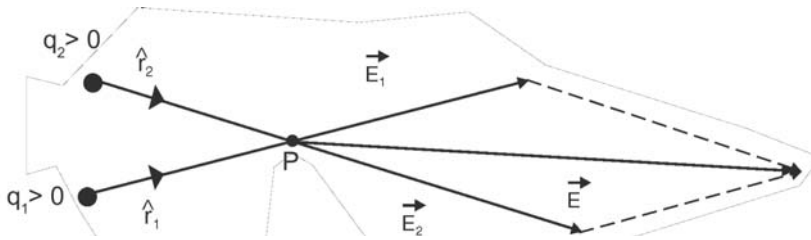


Figura 3.5b: Princípio da superposição para o campo elétrico.

– Professor, essa definição de campo elétrico pode ser generalizada para um número qualquer de cargas elétricas?

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

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{01} + \dots + \vec{F}_{0N}}{q_0} = \left(\frac{\frac{k q_0 q_1}{r_1^2} \hat{r}_1 + \dots + \frac{k q_0 q_N}{r_N^2} \hat{r}_N}{q_0} \right) = \frac{k q_1}{r_1^2} \hat{r}_1 + \dots + \frac{k q_N}{r_N^2} \hat{r}_N \Rightarrow$$

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^N \frac{k q_i}{r_i^2} \hat{r}_i = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i$$

O professor alerta:

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

– Quer dizer que o princípio da superposição que valia para as forças elétricas vale para o campo elétrico também?

– Perfeito!

– Por favor, professor, passe exercícios sobre cálculo de campos elétricos!

O professor entrega aos alunos um conjunto de atividades.

Atividade 1

Atende aos Objetivos 1, 2, 3 e 5

Com base na situação retratada na seção “Uma varinha mágica”, responda às questões a seguir:

- a) A introdução do conceito de campo elétrico privilegia uma visão de ação a distância ou de contato? Por quê?
- b) Descreva as principais características do campo elétrico de uma carga elétrica pontual positiva e o de uma carga elétrica pontual negativa.
- c) Enuncie o princípio da superposição para os campos elétricos. Esse princípio tem natureza teórica ou experimental?
- d) Qual a lei que fornece a força exercida por um campo elétrico em uma carga elétrica pontual?

Respostas Comentadas

- a) O campo elétrico atua na carga elétrica que está no ponto onde ele está aplicado. Logo, a interação elétrica descrita com o campo elétrico é uma interação de contato.
- b) O campo elétrico de uma carga elétrica pontual tem:
 - a direção do vetor deslocamento, que vai da carga até o ponto onde ele está aplicado;
 - o sentido do vetor deslocamento, que vai da carga até o ponto onde ele está aplicado, quando a carga elétrica é positiva;
 - o sentido contrário ao do vetor deslocamento, que vai da carga até o ponto onde ele está aplicado, quando a carga elétrica é negativa;
 - o módulo diretamente proporcional ao módulo da carga elétrica e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre a carga elétrica e o ponto onde ele está aplicado.
- c) O princípio da superposição afirma que o campo elétrico de uma carga elétrica não é alterado pela presença de outras cargas e que o campo elétrico criado por várias cargas é a soma dos campos elétricos das cargas pontuais.

d) A força elétrica que o campo elétrico exerce sobre uma carga pontual é dada por $\vec{F} = q\vec{E}$.

Atividade 2

Atende aos Objetivos 2, 3 e 4

Com base na seção “Uma varinha mágica”, faça o seguinte exercício:

Um dipolo elétrico é um sistema formado por duas cargas elétricas de mesmo módulo e sinais contrários (**Figura 3.6**, a seguir). As cargas elétricas estão separadas por uma distância $2d$. Calcule o campo elétrico no ponto médio da reta que une as duas cargas.

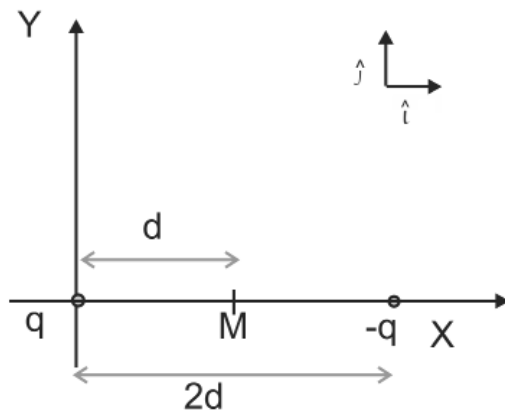
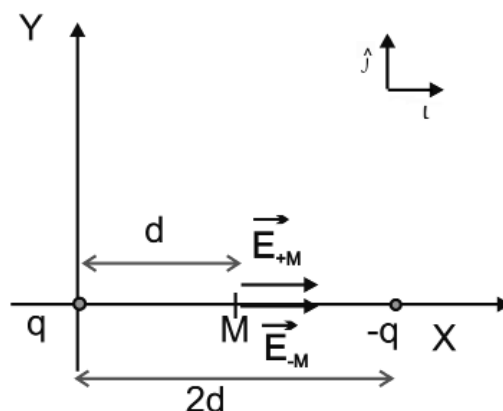


Figura 3.6

Resposta Comentada**Figura 3.7**

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 $\vec{E}_- = \frac{kq}{d^2} \hat{i}$. Logo, pelo princípio da superposição, o campo elétrico que é criado em M pelas duas cargas elétricas é $\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_- = \frac{2kq}{d^2} \hat{i}$.

Atividade 3

Atende aos Objetivos 2, 3, 4 e 5

De acordo com a seção que você acabou de ler “Uma varinha mágica”, faça o seguinte exercício:

O dipolo elétrico da **Figura 3.8** é formado pelas cargas elétricas q e $-q$ separadas pela distância $d\sqrt{3}$.

- Desenhe o campo elétrico criado pela carga $-q$ no ponto P localizado em $x = 0$ e $y = d$.
- Desenhe o campo elétrico criado pela carga $+q$ no ponto P .
- Desenhe o campo elétrico resultante criado pelo dipolo elétrico no ponto P .
- Calcule o campo elétrico resultante criado pelo dipolo elétrico no ponto P . Represente o seu resultado em termos dos unitários \hat{i} e \hat{j} .

Uma carga elétrica $Q = -2q$ é colocada no ponto P .

- Calcule a força elétrica exercida pelo campo elétrico criado pelo dipolo elétrico na carga Q .

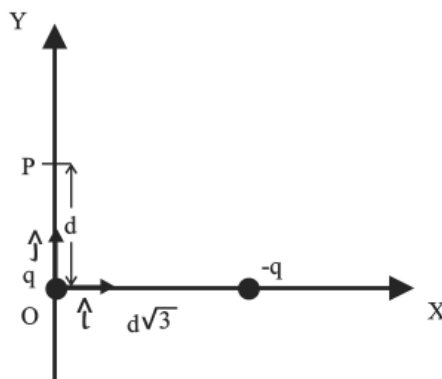


Figura 3.8

Respostas Comentadas

Respostas do item (a) ao (d).

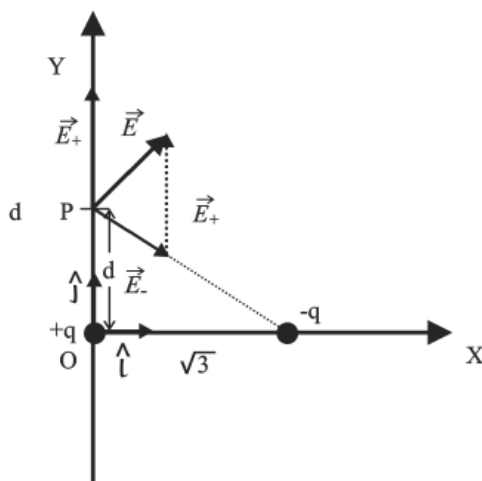


Figura 3.9

Na **Figura 3.9**, o campo elétrico resultante \vec{E} foi obtido pela regra do paralelogramo.

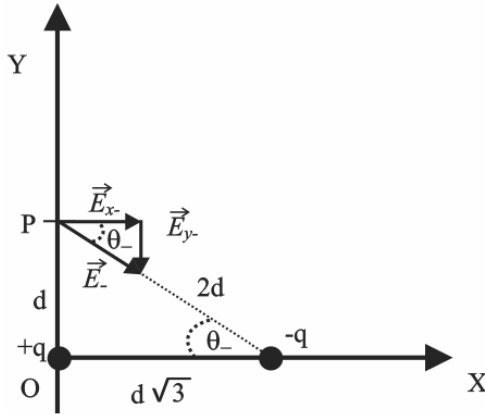
O campo elétrico resultante é:

$$\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_- \Rightarrow E_x = E_{+x} + E_{-x} \text{ e } E_y = E_{+y} + E_{-y}$$

A distância entre a carga elétrica negativa e o ponto P é $D = \sqrt{d^2 + 3d^2} = 2d$. Os módulos dos campos \vec{E}_+ e \vec{E}_- são:

$$E_+ = \frac{kq}{d^2} \text{ e } E_- = \frac{kq}{4d^2}$$

As componentes do campo elétrico \vec{E}_+ são $E_{+x} = 0$ e $E_{+y} = \frac{kq}{d^2}$.

**Figura 3.10**

A **Figura 3.10** mostra que o seno e o cosseno do ângulo θ_- que o campo elétrico da carga elétrica negativa \vec{E}_- forma com o eixo OX são:

$\cos(\theta_-) = \frac{d\sqrt{3}}{2d} = \frac{\sqrt{3}}{2}$ e $\sin(\theta_-) = \frac{d}{2d} = \frac{1}{2}$. Portanto, as componentes do campo elétrico \vec{E}_- são:

$$\cos(\theta_-) = \frac{E_{x-}}{E_-} \Rightarrow E_{x-} = E_- \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{kq\sqrt{3}}{8d^2} \text{ e}$$

$$\sin(\theta_-) = \frac{|E_{y-}|}{E_-} \Rightarrow E_{y-} = -E_- \frac{1}{2} = -\frac{kq}{8d^2}$$

As componentes do campo elétrico resultante são:

$$E_x = E_{x+} + E_{x-} = 0 + \frac{kq\sqrt{3}}{8d^2} = \frac{kq\sqrt{3}}{8d^2} \text{ e}$$

$$E_Y = E_{y+} + E_{y-} = \frac{kq}{d^2} - \frac{kq}{8d^2} = \frac{7kq}{8d^2}$$

Portanto, temos que:

$$\vec{E} = \frac{kq\sqrt{3}}{8d^2} \hat{i} + \frac{7kq}{8d^2} \hat{j}$$

e) A força que o campo elétrico exerce em $-2q$ é

$$\vec{F} = -2q\vec{E} = -\frac{kq^2\sqrt{3}}{4d^2}\hat{i} - \frac{7kq^2}{4d^2}\hat{j}$$

Atividade 4

Atende aos Objetivos 2, 3 e 4

Ainda com base na seção “Uma varinha mágica”, faça o seguinte exercício:

Um dipolo elétrico formado por duas cargas elétricas com módulos iguais a q , separadas por uma distância d , está sobre o eixo OY , como mostra a **Figura 3.11** a seguir. O ponto médio da reta que une as duas cargas elétricas do dipolo elétrico coincide com a origem O do sistema de eixos coordenados. Calcule o campo elétrico criado pelo dipolo elétrico no ponto P que está sobre o eixo OX . O ponto P dista x da origem do sistema de eixos coordenados.

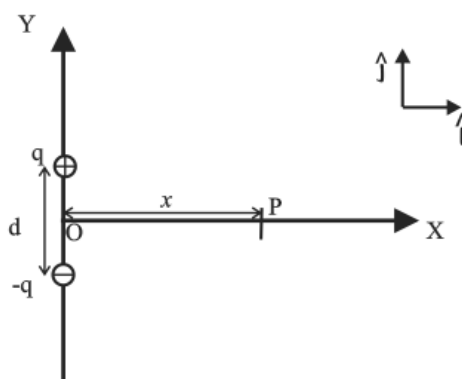
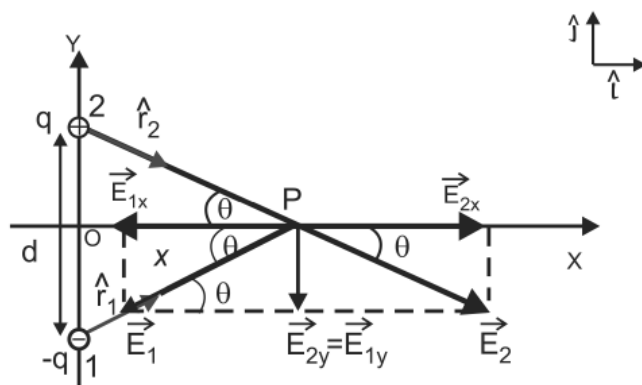


Figura 3.11

Resposta Comentada**Figura 3.12**

Pelo princípio da superposição do campo elétrico, temos que:

$$\vec{E}_P = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

O campo elétrico 1 foi criado pela carga elétrica $-q$ e o campo elétrico 2 foi criado pela carga elétrica 2.

A **Figura 3.12** mostra que o campo elétrico resultante que atua no ponto P tem componente x nula.

$$\vec{E}_{Px} = \vec{E}_{1x} + \vec{E}_{2x} = \vec{0}$$

A **Figura 3.12** também mostra que os vetores projetados associados aos campos elétricos 1 e 2 que atuam no ponto P na direção y são iguais. Consequentemente, o campo elétrico resultante em P é dado por:

$$\vec{E}_{Py} = \vec{E}_{1y} + \vec{E}_{2y} = 2\vec{E}_{2y}$$

Para calcular o campo resultante, vai ser necessário calcular a componente y campo elétrico 2. O módulo do campo elétrico 2 é dado por:

$$E_2 = \frac{kq}{r_q^2}$$

O Teorema de Pitágoras aplicado ao triângulo OqP fornece o módulo da distância entre as cargas q e P .

$$r_q^2 = \left(\frac{d}{2}\right)^2 + D^2 \Rightarrow r_q = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + D^2}$$

Logo o módulo do campo 2 se reduz a:

$$E_2 = \frac{kq}{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + D^2}$$

O módulo da componente E_{2y} pode ser obtido da **Figura 3.12**.

$$\text{sen}(\theta) = \frac{|E_{2y}|}{E_2} \Rightarrow |E_{2y}| = E_2 \text{sen}(\theta)$$

Como o vetor projetado, associado ao campo elétrico 2, na direção y , tem o sentido contrário ao do vetor unitário \hat{j} , a sua componente no eixo OY é negativa, isto é, $E_{2y} = -E_2 \text{sen}(\theta)$.

Pelo triângulo retângulo OqP , temos que:

$$\text{sen}(\theta) = \frac{d}{2r_q} = \frac{d}{2\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + D^2}}$$

Por isso, a componente E_{2y} é dada por:

$$E_{2y} = -E_2 \text{sen}(\theta) = -\frac{kq}{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + D^2} \frac{d}{2\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + D^2}} = -\frac{kqd}{2\left(\left(\frac{d}{2}\right)^2 + D^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

Logo, o campo elétrico resultante criado pelo dipolo elétrico no ponto P é dado por:

$$\vec{E}_2 = 2E_{2y}\hat{j} = -\frac{kqd}{\left(\left(\frac{d}{2}\right)^2 + D^2\right)^{\frac{3}{2}}}\hat{j}$$

Atividade 5

Atende aos Objetivos 2, 3, 4 e 5

Com base na seção “Uma varinha mágica”, faça o seguinte exercício:

Três cargas pontuais idênticas q_1 , q_2 e q_3 e ($q_1 = q < 0$) são colocadas nos vértices de um quadrado de lado L , como mostra a **Figura 3.13**.

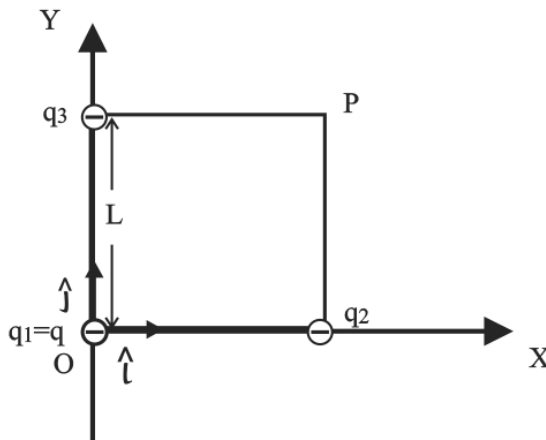


Figura 3.13

- a) Desenhe, no ponto P (vértice vazio do quadrado) da **Figura 3.13**, os campos elétricos.
 - b) Calcule esses campos.
 - c) Calcule o campo elétrico resultante no ponto P . Desenhe o campo elétrico resultante no ponto P na **Figura 3.13**.
 - d) Calcule a força elétrica que o campo elétrico exerce sobre uma carga elétrica $-3q$ que foi colocada no ponto P .
 - e) Desenhe na **Figura 3.13** a força elétrica que atua na carga elétrica $-3q$.
- Atenção! Expresse todos os vetores em termos dos unitários \hat{i} e \hat{j} .

Resposta Comentada

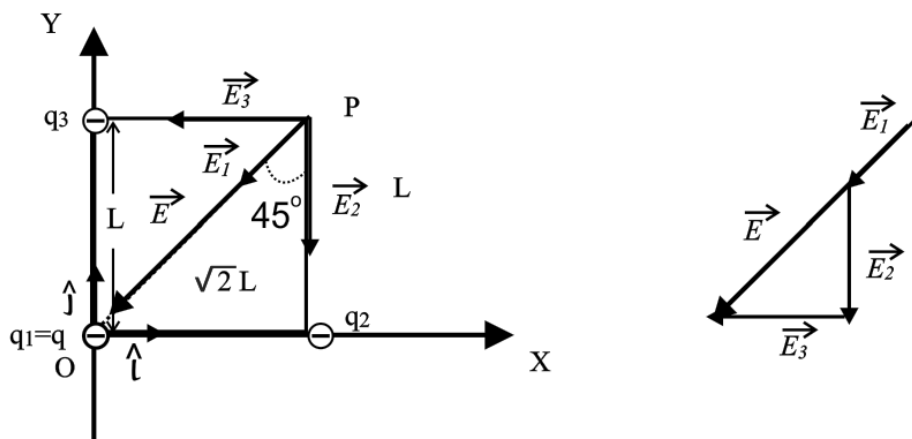


Figura 3.14

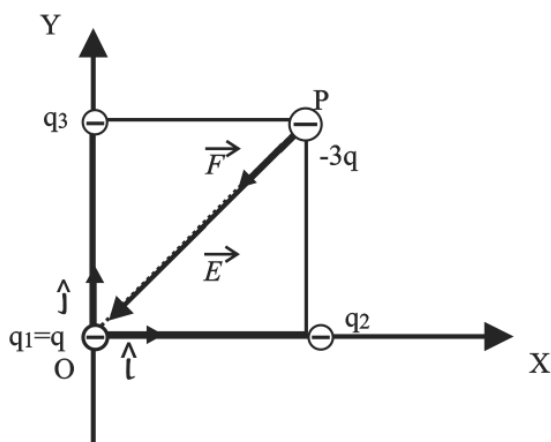


Figura 3.15

a) Os campos elétricos 1 e 2 foram desenhados na **Figura 3.14**.

b) Os módulos dos campos elétricos são dados por:

$$E_1 = \frac{|q|}{4\pi\epsilon_0(\sqrt{2}L)^2} = \frac{|q|}{8\pi\epsilon_0 L^2} \text{ e } E_2 = E_3 = \frac{|q|}{4\pi\epsilon_0 L^2}$$

As componentes dos campos elétricos são:

$$E_{1x} = -\frac{|q|}{8\pi\epsilon_0 L^2} \cos(45^\circ) = -\frac{|q|}{8\pi\epsilon_0 L^2} \frac{\sqrt{2}}{2} = -\frac{|q|\sqrt{2}}{16\pi\epsilon_0 L^2} = \frac{q\sqrt{2}}{16\pi\epsilon_0 L^2} \text{ e}$$

$$E_{1y} = -\frac{|q|}{8\pi\epsilon_0 L^2} \sin(45^\circ) = -\frac{|q|}{8\pi\epsilon_0 L^2} \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{q\sqrt{2}}{16\pi\epsilon_0 L^2}$$

$$E_{2x} = 0, E_{2y} = -\frac{|q|}{4\pi\epsilon_0 L^2} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 L^2} \text{ e}$$

$$E_{3x} = -\frac{|q|}{4\pi\epsilon_0 L^2} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 L^2}, E_{3y} = 0$$

Logo, os vetores campo elétrico são:

$$\vec{E}_1 = \frac{q\sqrt{2}}{16\pi\epsilon_0 L^2} \hat{i} + \frac{q\sqrt{2}}{16\pi\epsilon_0 L^2} \hat{j},$$

$$\vec{E}_2 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 L^2} \hat{j} \text{ e } \vec{E}_3 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 L^2} \hat{i}$$

c) O campo elétrico resultante é

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 \Rightarrow$$

$$\vec{E} = \left(\frac{q\sqrt{2}}{16\pi\epsilon_0 L^2} + \frac{q}{4\pi\epsilon_0 L^2} \right) \hat{i} + \left(\frac{q\sqrt{2}}{16\pi\epsilon_0 L^2} + \frac{q}{4\pi\epsilon_0 L^2} \right) \hat{j} \Rightarrow$$

$$\vec{E} = \frac{q}{16\pi\epsilon_0 L^2} (\sqrt{2} + 4) (\hat{i} + \hat{j})$$

O campo elétrico resultante foi obtido pela regra da soma de vetores e foi desenhado na **Figura 3.14**.

d) A força resultante que atua na carga elétrica $-3q$ é dada por:

$$\vec{F} = -3q\vec{E} = -\frac{3q^2}{16\pi\epsilon_0 L^2} (\sqrt{2} + 4) (\hat{i} + \hat{j})$$

A força elétrica foi desenhada na **Figura 3.15**.

Atividade 6

Atende aos Objetivos 2, 3, 4 e 5

De acordo com a seção “Uma varinha mágica”, faça o seguinte exercício:

Um sistema é formado pelas cargas elétricas $q_1 = -q$, $q_2 = -q$ e $q_3 = q$ ($q > 0$). As cargas elétricas estão nos vértices de um triângulo isósceles. Considere a constante $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ conhecida.

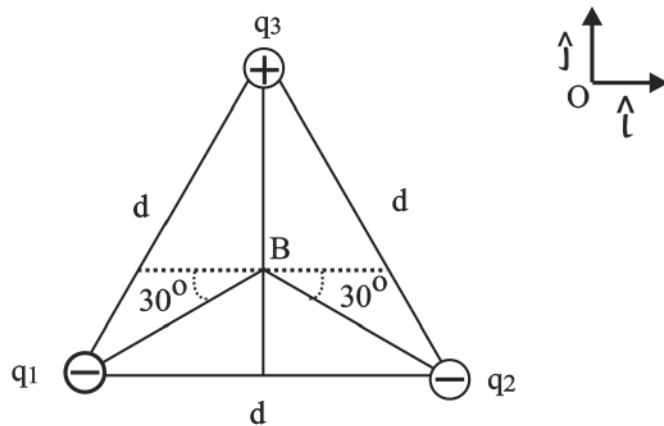
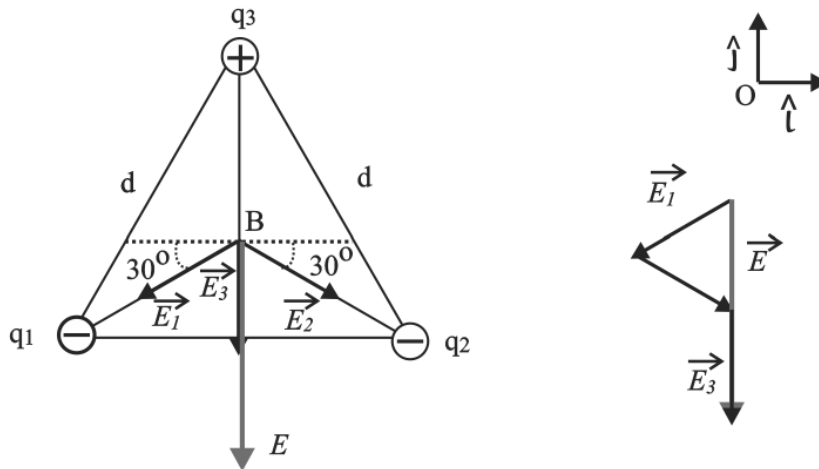


Figura 3.16

- a) Desenhe na **Figura 3.16** os campos elétricos \vec{E}_1 , \vec{E}_2 e \vec{E}_3 criados pelas cargas elétricas q_1 , q_2 e q_3 no ponto B da **Figura 3.16**. O ponto B está a uma distância d de todos os vértices do triângulo.
- b) Calcule os campos elétricos \vec{E}_1 , \vec{E}_2 e \vec{E}_3 . Represente esses campos elétricos em termos dos vetores unitários \hat{i} e \hat{j} , representados na **Figura 3.16**.
- c) Desenhe o campo elétrico resultante no ponto B da **Figura 3.16**. Calcule o campo resultante no ponto B . Represente esse campo elétrico em termos dos vetores unitários \hat{i} e \hat{j} , representados na **Figura 3.16**.
- d) Desenhe na **Figura 3.16** a força resultante que atua em uma carga elétrica $-2q$, colocada no ponto B da **Figura 3.16**. Calcule essa força elétrica em termos dos vetores unitários \hat{i} e \hat{j} , representados na **Figura 3.16**.

Respostas Comentadas

a)

**Figura 3.17**

b)

$$E_1 = E_2 = E_3 = \frac{kq}{d^2} \Rightarrow$$

$$\left. \begin{aligned} E_{1x} &= -E_1 \cos(30^\circ) = -\frac{kq}{d^2} \frac{\sqrt{3}}{2} = -\frac{\sqrt{3} kq}{2d^2} \\ E_{1y} &= -E_1 \sin(30^\circ) = -\frac{kq}{d^2} \frac{1}{2} = -\frac{kq}{2d^2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \vec{E}_1 = -\frac{\sqrt{3} kq}{2d^2} \hat{i} - \frac{kq}{2d^2} \hat{j},$$

$$\left. \begin{aligned} E_{2x} &= E_2 \cos(30^\circ) = \frac{kq}{d^2} \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{\sqrt{3} kq}{2d^2} \\ E_{2y} &= E_2 \sin(30^\circ) = -\frac{kq}{d^2} \frac{1}{2} = -\frac{kq}{2d^2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \vec{E}_2 = \frac{\sqrt{3} kq}{2d^2} \hat{i} - \frac{kq}{2d^2} \hat{j}$$

$$E_{3x} = 0, E_{3y} = -\frac{kq}{d^2} \left\} \Rightarrow \vec{E}_{3y} = -\frac{kq}{d^2} \hat{j}$$

c)

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 \Rightarrow$$

$$\vec{E} = -\frac{\sqrt{3} kq}{2d^2} \hat{i} - \frac{kq}{2d^2} \hat{j} + \frac{\sqrt{3} kq}{2d^2} \hat{i} - \frac{kq}{2d^2} \hat{j} - \frac{kq}{d^2} \hat{j} = -\frac{2kq}{d^2} \hat{j}$$

d)

$$\vec{F} = -2q\vec{E} = \frac{4kq^2}{d^2} \hat{j}$$

Atividade 7

Atende aos Objetivos 2, 3, 4 e 5

Com base na seção “Uma varinha mágica”, faça o seguinte exercício:

Um sistema é formado pelas cargas elétricas $q_1 = q$, $q_2 = -2q$ e $q_3 = -q$ ($q > 0$). As cargas elétricas estão nos vértices de um triângulo equilátero de lado L . Considere conhecidos k , q e L . A constante k é

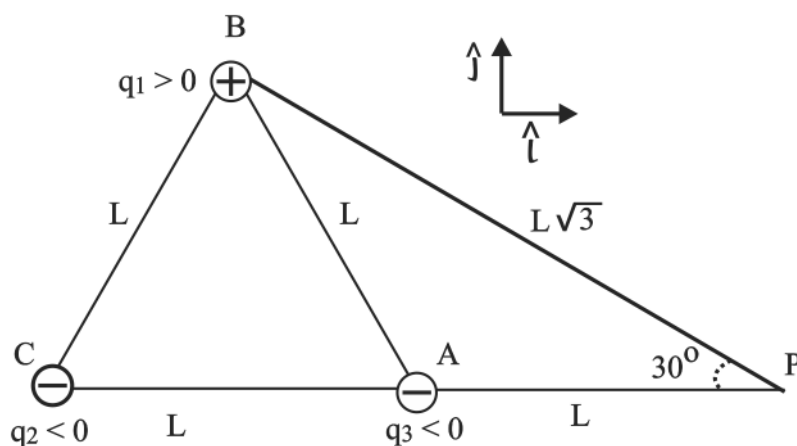
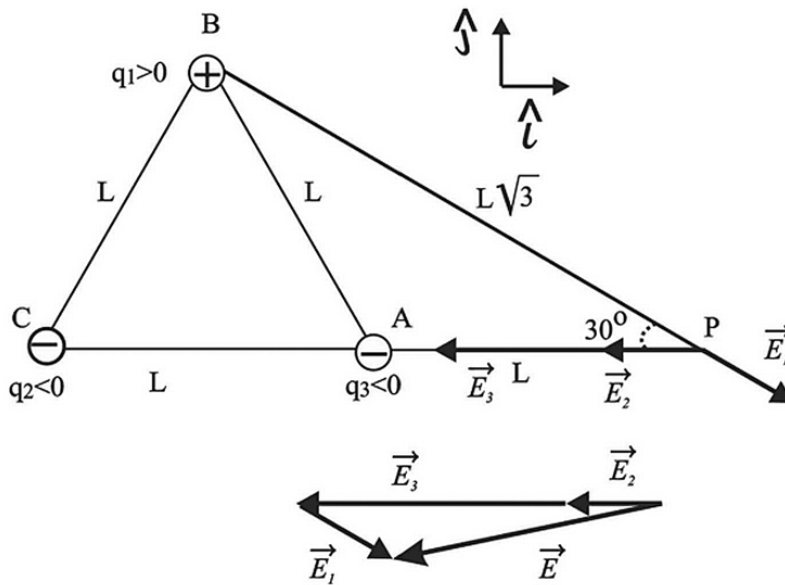


Figura 3.18

- a) Desenhe, no ponto P da **Figura 3.18**, os campos elétricos \vec{E}_1 , \vec{E}_2 e \vec{E}_3 , criados pelas cargas elétricas q_1 , q_2 e q_3 . A distância do ponto P ao vértice A do triângulo é igual a L , e ao vértice B , vale $\sqrt{3}L$.
- b) Calcule os campos elétricos \vec{E}_1 , \vec{E}_2 e \vec{E}_3 . Represente esses campos elétricos em termos dos vetores unitários representados na **Figura 3.18**. Desenhe, na **Figura 3.18**, o campo resultante no ponto P .
- c) Calcule o campo elétrico resultante no ponto P .
- d) Calcule a força que o campo elétrico do ponto P exerce sobre uma carga elétrica positiva $3q$ colocada no ponto P . Desenhe, na **Figura 3.18**, a força resultante no ponto P .

Respostas Comentadas**Figura 3.19**

- a) Os campos foram representados no ponto P da **Figura 3.19**.
 b) Os módulos dos campos elétricos são dados por:

$$E_1 = \frac{k|q|}{(\sqrt{3}L)^2} = \frac{kq}{3L^2}, E_2 = \frac{k|-2q|}{(2L)^2} = \frac{kq}{2L^2} \text{ e } E_3 = \frac{k|-q|}{L^2} = \frac{kq}{L^2}$$

Os campos elétricos são iguais a:

$$\left. \begin{aligned} E_{1x} &= E_1 \cos(30^\circ) = \frac{kq}{3L^2} \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{\sqrt{3}kq}{6L^2} \\ E_{1y} &= -E_1 \sin(30^\circ) = -\frac{kq}{3L^2} \frac{1}{2} = -\frac{kq}{6L^2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \vec{E}_1 = \frac{\sqrt{3}kq}{6L^2} \hat{i} - \frac{kq}{6L^2} \hat{j}$$

$$\vec{E}_2 = -\frac{kq}{2L^2} \hat{i} \text{ e } \vec{E}_3 = -\frac{kq}{L^2} \hat{i}$$

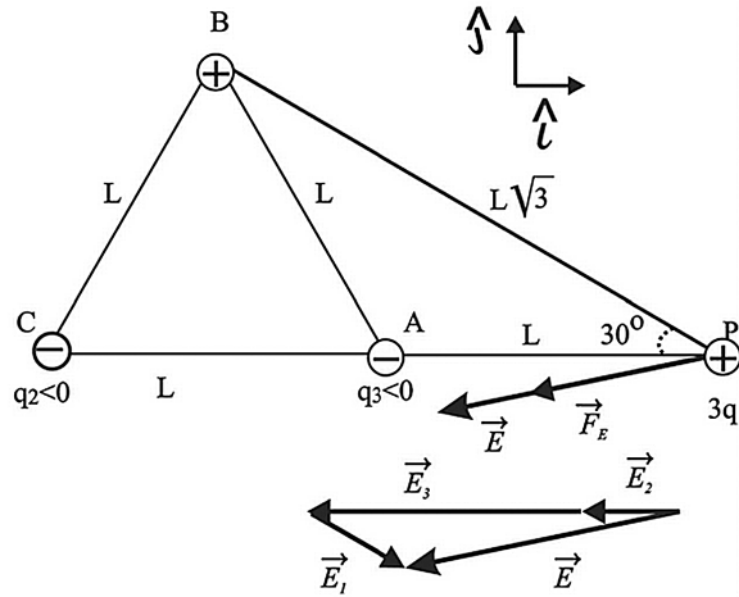


Figura 3.20

c) O desenho do campo resultante representado na **Figura 3.20**, foi obtido aplicando-se a regra geométrica de soma de vetores (ver a seção “Os vetores e suas bases” na Aula 2 do Módulo 2 de ICF1). O campo elétrico resultante no ponto P da **Figura 3.20** pode ser calculado com o princípio da superposição.

$$\begin{aligned}\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 &= \frac{\sqrt{3} k q}{6 L^2} \hat{i} - \frac{k q}{6 L^2} \hat{j} - \frac{k q}{2 L^2} \hat{i} - \frac{k q}{L^2} \hat{i} \Rightarrow \\ \vec{E} &= \left(\frac{\sqrt{3} k q}{6 L^2} - \frac{3 k q}{2 L^2} \right) \hat{i} - \frac{k q}{6 L^2} \hat{j} = \frac{k q}{L^2} \left(\frac{\sqrt{3}}{6} - \frac{3}{2} \right) \hat{i} - \frac{k q}{6 L^2} \hat{j}\end{aligned}$$

d) A força que o campo elétrico do ponto P exerce sobre uma carga elétrica positiva 3q colocada no ponto P é dada por:

$$\vec{F} = 3q \vec{E} = \frac{3 k q^2}{L^2} \left(\frac{\sqrt{3}}{6} - \frac{3}{2} \right) \hat{i} - \frac{k q^2}{2 L^2} \hat{j}$$

A força resultante no ponto P foi desenhada na **Figura 3.20**. Ela tem o mesmo sentido do campo elétrico porque a carga elétrica é positiva.

Atividade 8

Atende aos Objetivos 5 e 6

Ainda com base na seção “Uma varinha mágica”, faça o seguinte exercício:

Um capacitor de placas paralelas é um sistema formado por dois condutores quadrados carregados com cargas de módulos iguais e sinais contrários. Entre as placas do capacitor, o campo elétrico é orientado verticalmente para baixo com módulo constante e igual a 360 N/C . Fora das placas, o campo elétrico é nulo. O campo elétrico foi representado na **Figura 3.21** pelas linhas de força. Um elétron é projetado entre as placas do capacitor com velocidade inicial de módulo $v_0 = 1,60 \times 10^5 \text{ m/s}$. A velocidade inicial do elétron forma um ângulo de 10° com a horizontal, como mostra a **Figura 3.21**. As placas do capacitor são quadrados com lados iguais a $L = 4 \text{ cm}$, e a distância d entre as placas vale 2 mm . O módulo da carga do elétron é igual a $1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$ e a massa do elétron vale $m = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$. Atenção! Despreze o peso do elétron. A origem do sistema de eixos coordenados dista $d/2$ das duas placas. Forneça todas as suas respostas com três algarismos significativos.

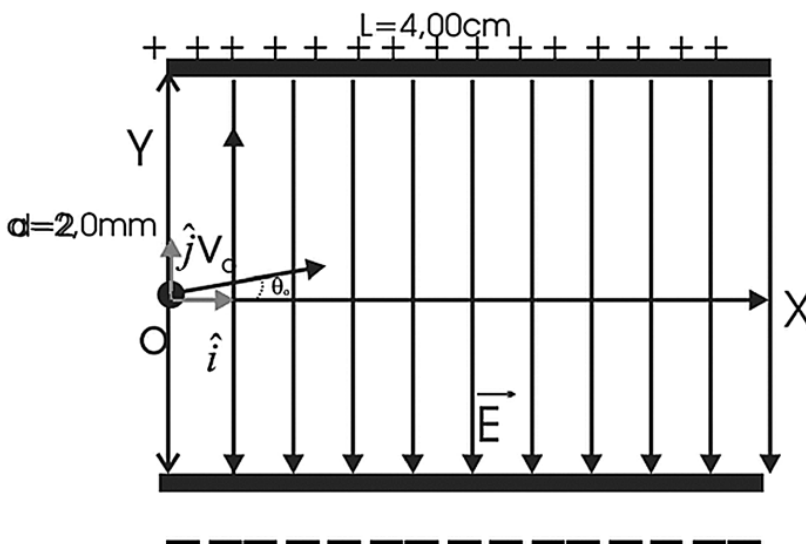


Figura 3.21

- a) Calcule as componentes x e y do vetor posição e do vetor velocidade do elétron ($x(t), y(t), v_x(t), v_y(t)$). Utilize os eixos coordenados representados na **Figura 3.21**.
- b) O elétron colide com uma das placas do capacitor? Justifique a sua resposta, utilizando as expressões escritas no item (a).

Respostas Comentadas

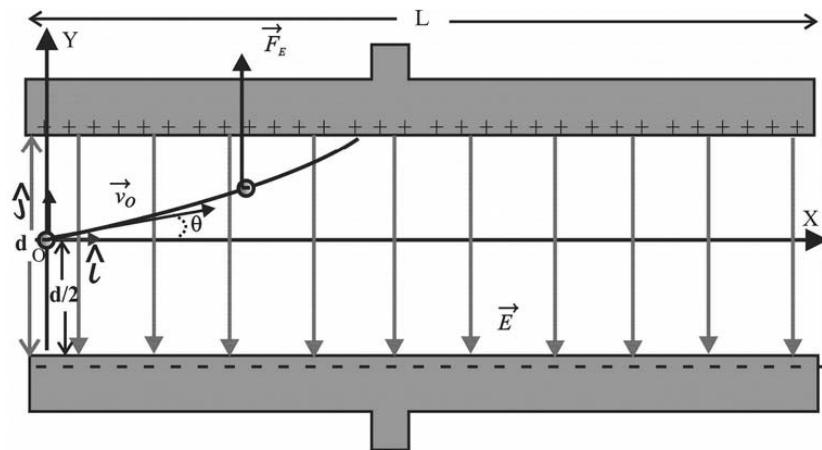


Figura 3.22

- a) Como o problema mandou desprezar o peso dos elétrons, a única força que atua sobre ele é a força elétrica (ver **Figura 3.22**), que é dada por: $\vec{F}_E = -e \vec{E}$, sendo e módulo da carga do elétron. Logo, pela Segunda Lei de Newton, temos que:

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

As componentes do campo elétrico são: $E_x = 0$ e $E_y = -E$

Logo, as componentes da aceleração dos elétrons se reduzem a

$$a_x = 0 \text{ e } a_y = -\frac{eE_y}{m} = \frac{eE}{m}.$$

Logo, as componentes da velocidade dos elétrons e as componentes do seu vetor posição são dadas por:

$$v_x = v_{ox}, v_y = v_{oy} + a_y t = v_{oy} + \frac{eE}{m} t,$$

$$x = x_o + v_{ox} t \text{ e } y = y_o + v_{oy} t + \frac{eE}{2m} t^2$$

Pelas condições iniciais do problema, temos que: $x_o = 0$ e $y_o = 0$. Logo, temos que:

$$v_x = v_{ox}, v_y = v_{oy} + a_y t = v_{oy} + \frac{eE}{m}t,$$

$$x = v_{ox}t \text{ e } y = v_{oy}t + \frac{eE}{2m}t^2$$

Os dados do problema são: $e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$, $m = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$,
 $v_o = 1,60 \times 10^5 \text{ m/s}$, $\theta_o = 10^\circ$, $L = 4,0 \text{ cm}$, $d = 2 \text{ mm}$ e $E = 360 \text{ N/C}$.

Logo, temos que:

$$v_{ox} = v_o \cos(\theta_o) = (1,60 \cdot 10^5 \text{ m/s}) \cdot \cos(10^\circ) = 1,575 \dots 10^5 \text{ m/s} \cong 1,58 \text{ m/s},$$

$$v_{oy} = v_o \sin(\theta_o) = (1,60 \cdot 10^5 \text{ m/s}) \cdot \sin(10^\circ) = 0,277 \dots 10^5 \text{ m/s} \cong 0,28 \text{ m/s},$$

$$a = \frac{eE}{m} = \frac{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C})(360 \text{ N/C})}{9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}} = 6,322 \dots 10^{13} \text{ m/s}^2 \cong 6,32 \text{ m/s}^2,$$

$$v_x = 1,58 \text{ m/s},$$

$$v_y = 0,28 \cdot 10^5 + 6,32 \cdot 10^{13} t,$$

$$x = 1,58 t \text{ e } y = 0,28 \cdot 10^5 t + \frac{6,32 \cdot 10^{13}}{2} t^2 = 0,28 \cdot 10^5 t + 3,16 \cdot 10^{13} t^2$$

b) Para descobrir se o elétron colide com as placas do capacitor, é suficiente calcular o seu deslocamento vertical, associado ao deslocamento horizontal $x(t_1) = L$. Se o deslocamento vertical $y(t_1)$ for maior do que $d/2$, o elétron colidirá com a placa superior do capacitor. Vou calcular $y(t_1)$ com as expressões teóricas.

$$x(t_1) = v_{ox} t_1 \Rightarrow t_1 = \frac{x(t_1)}{v_{ox}} = \frac{L}{v_{ox}} \Rightarrow$$

$$y(t_1) = v_{oy} t_1 + \frac{eE}{2m} t_1^2 = v_{oy} \left(\frac{L}{v_{ox}} \right) + \frac{eE}{2m} \left(\frac{L}{v_{ox}} \right)^2 = \frac{v_{oy}}{v_{ox}} L + \frac{eEL^2}{2m v_{ox}^2} \Rightarrow$$

$$y(t_1) = \tan(\theta_o) L + \frac{eEL^2}{2m v_o^2 \cos^2(\theta_o)} \cong 2,04 \text{ m}$$

O valor do deslocamento vertical $y(t_1)$ mostra que o elétron colide com a placa superior do capacitor, como mostra a **Figura 3.22**.

A turma está cansada e com muitas dificuldades de absorver o conceito de campo elétrico e o cálculo do campo elétrico de um sistema de cargas elétricas pontuais. Ronaldo pergunta ao professor se eles calcularão campos elétricos de sistemas de cargas elétricas mais complexos. O professor explica que o cálculo de campos elétricos de distribuições complexas de cargas elétricas requer o conhecimento de Cálculo Diferencial e Integral, que não está na ementa da disciplina de Física do Ensino Médio. Logo, eles não poderão calcular o campo elétrico de distribuições complexas de cargas elétricas. Todavia, será possível contornar o problema pela introdução do conceito de linhas de campo elétrico e pela utilização de um método experimental que permite reproduzir de forma qualitativa as linhas de campo elétrico. Esse será um dos assuntos da próxima aula.

O sinal toca e a turma se dispersa.

Resumo

1. As cargas elétricas criam no espaço um campo elétrico, que 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 criado por um conjunto de cargas elétricas pontuais em um ponto P do espaço é a soma de todos os campos elétricos criados pelas cargas elétricas pontuais. O campo elétrico de uma carga elétrica pontual não é alterado pela presença de outras cargas elétricas.

$$\vec{E} = \sum_1^N \vec{E}_i = \sum_1^N \frac{kq_i}{r_i^2} \hat{r}_i$$

Nesta aula, você aprendeu o conceito de campo elétrico, com o qual foi possível representar a interação elétrica como uma ação de contato. Isto é, quem exerce uma força elétrica sobre uma carga elétrica pontual é o campo elétrico que atua no ponto em que a carga elétrica está.

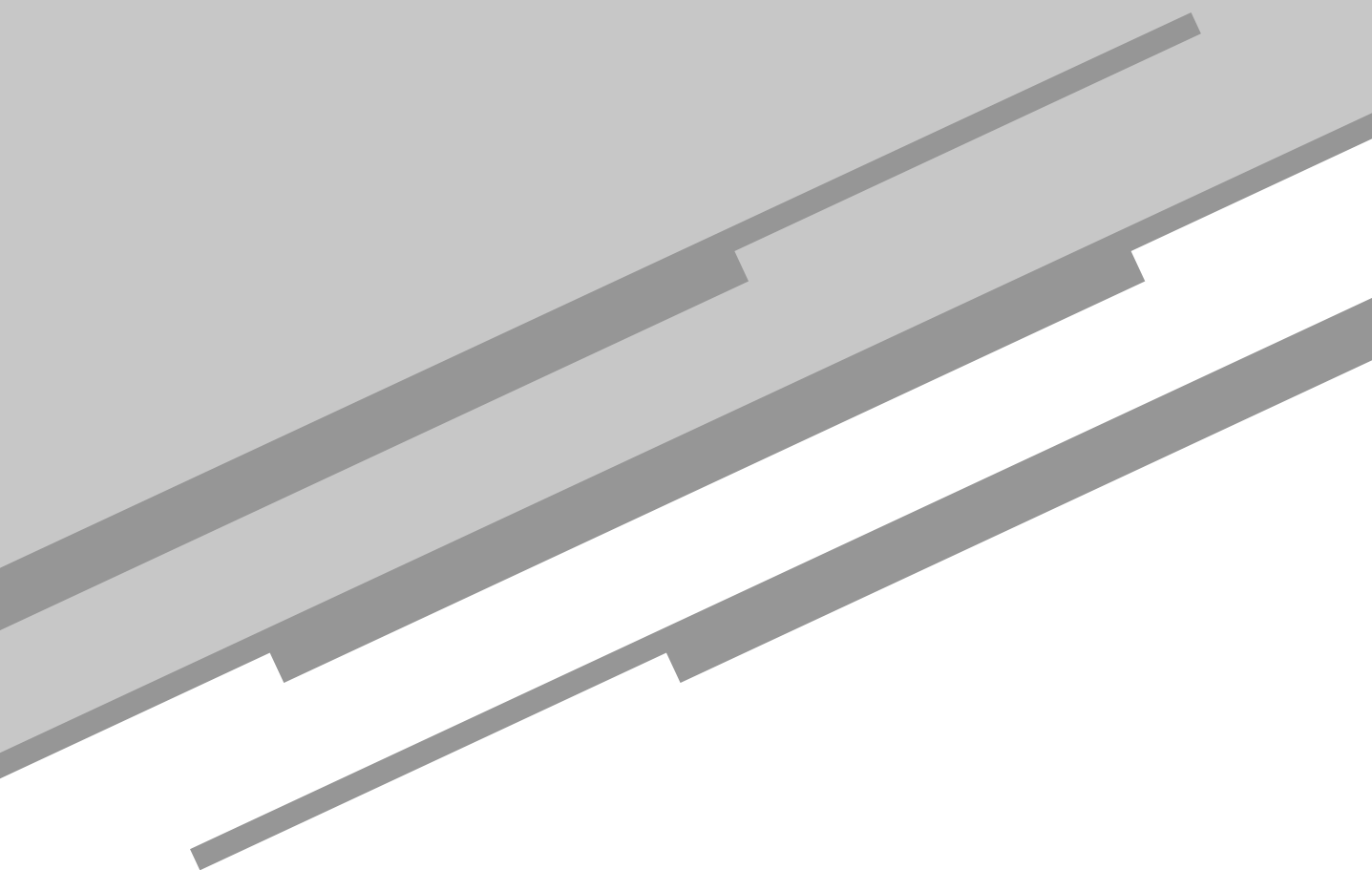
Leituras recomendadas

Leia sobre o assunto campos elétricos na seção Eletricidade e Magnetismo do livro de Antonio Máximo e Beatriz Alvarenga, *Física* - volume único.

Leia sobre os assuntos carga elétrica e suas propriedades e formulação da Lei de Coulomb no livro *Física 3 - Eletromagnetismo*, do GREF.

Aula 4

Linhas de campo elétrico



Maria Antonieta Almeida

Metas

Discutir as linhas de campo elétrico.

Discutir o conceito de dipolo elétrico e o seu movimento em um campo elétrico.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. definir dipolo elétrico e reconhecer o seu movimento em uma região onde existe campo elétrico;
2. representar um campo elétrico pelas suas linhas de campo elétrico;
3. interpretar as propriedades do campo elétrico criado por uma distribuição de cargas elétricas através das linhas formadas por substâncias polares colocadas próximas às cargas;
4. identificar as propriedades do campo elétrico de um capacitor e placas paralelas.

Pré-requisitos

Para se ter bom aproveitamento desta aula, é importante que você saiba somar frações e elevar expressões a potências. Também é necessário conhecer os conceitos de funções e de campo elétrico, ter noções de geometria plana (ângulos, geometria dos triângulos), trigonometria básica (seno, cosseno, tangente, cotangente), vetores, das Leis de Newton e de Coulomb.

Esses conteúdos podem ser encontrados nos livros das disciplinas de: Matemática Básica, Geometria Básica e Introdução às Ciências Físicas 1.

Introdução

O conhecimento dos campos de distribuições de cargas elétricas mais complexas requer cálculo diferencial e integral que não está na ementa da disciplina de ICF2. Todavia é possível aprender algumas características dos campos elétricos utilizando a técnica desenvolvida por Faraday para visualizar as linhas de força. Essa técnica consiste em colocar substâncias polares sobre óleo nas proximidades de terminais carregados. Com ela, é possível verificar algumas propriedades importantes dos campos elétricos de distribuições complexas de cargas elétricas. As discussões sobre as linhas de campo elétrico, dipolos elétricos e o seu movimento na presença de campos elétricos estão na seção denominada “As linhas de campo elétrico”.

Antes de ler essa seção, tente responder às seguintes perguntas:

1. Que relação existe entre as linhas de campo elétrico e o campo elétrico?
2. O que é um dipolo elétrico? Qual a definição de momento de dipolo elétrico?
3. Descreva o movimento de um dipolo elétrico em um campo elétrico constante em um meio onde exista atrito entre o dipolo elétrico e o meio.
4. Descreva o movimento de um dipolo elétrico em um campo elétrico que varia no espaço em um meio onde exista atrito entre o dipolo elétrico e o meio.
5. Descreva um método experimental que permita visualizar linhas muito parecidas com as linhas de campo elétrico.
6. Você sabe como produzir um campo elétrico aproximadamente constante?

As linhas de campo elétrico

Ronaldo ainda continua confuso com a ideia de campo elétrico. Ele se lembra das linhas de força de Faraday e pergunta ao professor:

– Existe alguma relação entre as linhas de força de Faraday e o campo elétrico?

– Os campos elétricos podem ser representados visualmente por linhas denominadas *linhas do campo elétrico*. Elas são muito parecidas com as linhas de força de Faraday e são construídas da seguinte forma:

- em cada ponto do espaço, o vetor campo elétrico é tangente à linha;
- as linhas vão da carga elétrica positiva para a carga elétrica negativa, e o campo elétrico tem o sentido das linhas;
- o número de linhas de campo elétrico que entram ou saem de uma carga elétrica é proporcional ao módulo das cargas elétricas;
- o número das linhas de campo elétrico por unidade de área perpendicular às linhas nas proximidades de um ponto é proporcional ao módulo do campo elétrico no ponto. Logo, onde as linhas estão mais próximas, o módulo do campo elétrico é maior.



Michael Faraday, grande físico do século XIX, achou conveniente representar os campos elétricos através de linhas de força, cuja construção é bastante simples.

As linhas de força são um conjunto de linhas imaginárias, dispostas de tal forma que a força que atua sobre uma carga de prova positiva em qualquer ponto do espaço é tangente à linha naquele ponto.

O professor mostra para os alunos algumas figuras (**Figuras 4.1a, 4.1b, 4.1c e 4.1d**) com linhas de campos elétricos de distribuições diferentes de cargas elétricas e comenta:

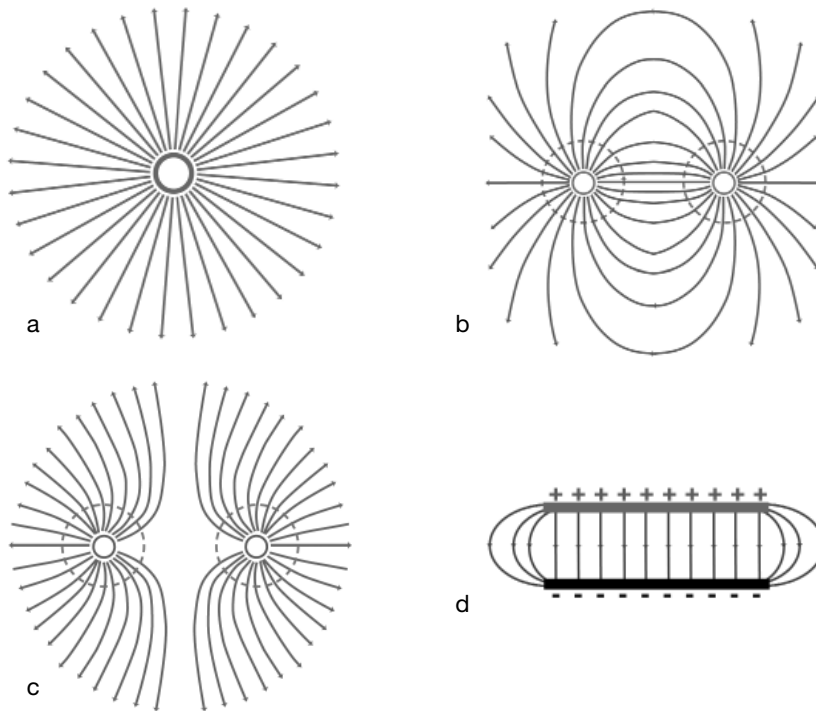


Figura 4.1: a) Carga pontual positiva; b) Dipolo elétrico; c) Cargas pontuais positivas iguais; d) Capacitor de placas paralelas.

– Estas figuras representam as linhas do campo elétrico de uma carga pontual, de um dipolo elétrico, de duas cargas pontuais positivas iguais e de duas placas carregadas com cargas elétricas iguais com sinais contrários. Vamos ver se vocês conseguem tirar as informações sobre os campos elétricos representados por estas linhas. Mariana, quais são as propriedades do campo elétrico da carga elétrica pontual positiva?

Mariana responde com cautela:

– Como as linhas de campo elétrico são radiais e o campo elétrico é tangente às linhas de campo elétrico em cada ponto, o campo elétrico da carga pontual é radial. Pelo sentido das linhas de campo elétrico, ele aponta no sentido contrário ao ponto em que a carga elétrica foi colocada. Como o número de linhas de campo é o mais próximo nas proximidades da carga elétrica, o campo elétrico é mais intenso próximo à carga elétrica.

– Perfeito! Agora é a sua vez, Lúcia. Descreva algumas propriedades do campo elétrico criado por duas placas planas paralelas com cargas elétricas de mesmo módulo e sinais contrários.

– O campo elétrico entre as placas e longe das suas extremidades é constante porque as distâncias entre as linhas são uniformes, se encurvam nas proximidades das extremidades das placas e são nulas ou muito pequenas atrás das placas.

– Correto! O sistema formado por duas placas paralelas com cargas iguais com sinais contrários é denominado capacitor de placas paralelas. Quando a dimensão das placas for muito maior do que a distância entre elas, o campo elétrico produzido entre as placas é aproximadamente constante. Agora é a sua vez, Ronaldo. Descreva algumas propriedades do campo elétrico do dipolo elétrico.

– Os campos elétricos próximos das cargas elétricas são muito parecidos com os campos elétricos das cargas pontuais. Eles são mais intensos próximo à reta que une a carga elétrica positiva e negativa do que nas regiões mais afastadas da reta, porque as linhas de campo na região da vizinhança da reta estão mais próximas do que nas regiões mais afastadas dela. O sentido das linhas mostra que o campo elétrico entre as cargas elétricas do dipolo elétrico apontam da esquerda para a direita. Professor, essas linhas são as linhas formadas pelo fubá naquela foto que você nos mostrou?

O professor mostra a foto novamente para a turma e continua:

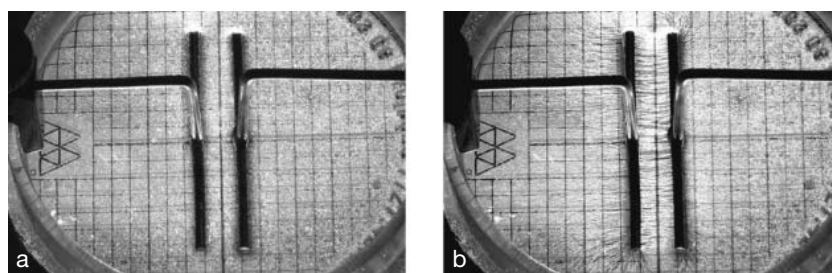


Figura 4.2: a) Terminais lineares descarregados imersos em óleo coberto com fubá; b) Terminais lineares com cargas q e $-q$ imersos em óleo coberto com fubá.

– As linhas observadas no fubá são muito parecidas com as linhas de campo elétrico.

Ronaldo pede para o professor explicar por que as linhas que aparecem no fubá são parecidas com as linhas de campo elétrico.

– As moléculas do fubá são neutras. Todavia, a distribuição de prótons e elétrons da molécula não é uniforme no espaço. Os centros de cargas elétricas positivas e negativas não coincidem.

- O que é um centro de carga positiva e um centro de carga negativa?
- A definição de centro de carga elétrica positiva associada às cargas elétricas pontuais positivas é muito parecida com a definição de centro de massa. O centro de carga elétrica positiva associado a duas cargas elétricas pontuais positivas q_1 e q_2 é

$$\vec{r}_{CQP} = \frac{q_1 \vec{r}_1 + q_2 \vec{r}_2}{q_1 + q_2}$$

sendo \vec{r}_1 e \vec{r}_2 os vetores posição das cargas elétricas. Da mesma forma que o centro de massa, o centro de carga elétrica positiva está mais próximo das cargas elétricas maiores. A definição de centro de cargas elétricas negativas associado a duas cargas elétricas negativas q_3 e q_4 é análoga à definição de centro de cargas positivas, isto é,

$$\vec{r}_{CQN} = \frac{q_3 \vec{r}_3 + q_4 \vec{r}_4}{q_3 + q_4}$$

sendo \vec{r}_3 e \vec{r}_4 os vetores posição das cargas elétricas. Da mesma forma que o centro de massa, o centro de carga elétrica negativa está mais próximo das cargas elétricas com módulos maiores. Essas definições podem ser generalizadas para uma distribuição qualquer de cargas elétricas. As moléculas cujos centros de cargas positiva e negativa não coincidem são denominadas polares.

A molécula polar, no que se refere às forças elétricas que atuam sobre ela, pode ser considerada como um sistema formado por uma carga elétrica positiva $q > 0$ e por uma carga elétrica negativa $-q$ rigidamente ligadas, isto é, elas podem ser tratadas como um dipolo elétrico. Esse é o caso da molécula do fubá, que é uma molécula polar.

- Não entendi. Você pode explicar melhor?
- Como a molécula de fubá é complicada, vou utilizar a molécula de ácido clorídrico, que é mais simples para explicar a razão pela qual algumas moléculas neutras podem ser consideradas como um dipolo elétrico. A molécula de ácido clorídrico (HCl) é neutra. Ela é formada por um átomo de hidrogênio e um átomo de cloro. O núcleo do átomo de cloro tem uma capacidade maior de atrair elétrons. Por isso, os elétrons da molécula de ácido clorídrico estão mais próximos do átomo de cloro do que do átomo de hidrogênio ($H^+ Cl^-$). Consequentemente, o centro de cargas positivo e o centro de cargas negativo da molécula de cloro não

coincidem. Por isso, podemos calcular em primeira aproximação a força elétrica que atua na molécula do ácido clorídrico, imaginando que ela é um dipolo elétrico.

O professor desenha no quadro a representação elétrica da molécula do ácido clorídrico.

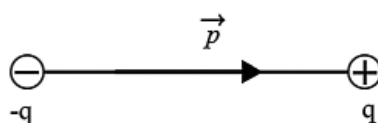


Figura 4.3a: Dipolo elétrico.

– É isso que acontece com a molécula de fubá?

– É. Cada dipolo elétrico é caracterizado por um vetor denominado momento de dipolo elétrico. O momento de dipolo \vec{p} é um vetor que tem a direção da reta que une as duas cargas elétricas do dipolo elétrico, módulo igual a produto da carga elétrica positiva pela distância d entre elas ($|\vec{p}| = qd$) e um sentido que vai da carga elétrica negativa para a carga elétrica positiva. O grão de fubá, que é formado por moléculas de fubá, se comporta como um dipolo elétrico quando é colocado na presença de um campo elétrico constante.

– O que significa isso?

O professor desenha um dipolo elétrico em um campo elétrico constante e continua a discussão com o Ronaldo.

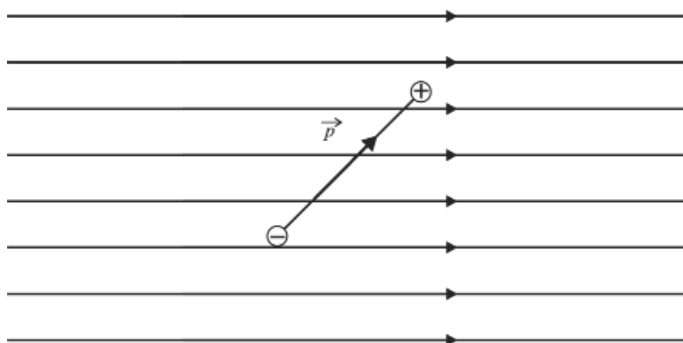


Figura 4.3b1: O dipolo elétrico em um campo elétrico constante.

– O que você acha que acontece com um dipolo elétrico quando ele é colocado em um campo elétrico constante?

– Não sei.

O professor chama Ronaldo ao quadro e solicita que ele desenhe sobre as cargas elétricas as forças elétricas que atuam sobre elas.

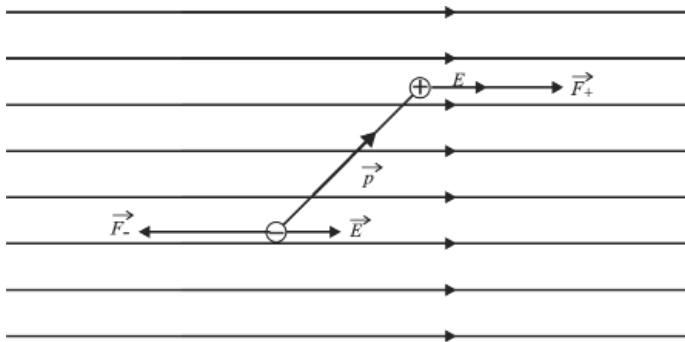


Figura 4.3b2: O dipolo elétrico em um campo elétrico constante.

– A força que o campo elétrico exerce sobre a carga elétrica positiva é $\vec{F}_+ = q\vec{E}$ e sobre a carga elétrica negativa é $\vec{F}_- = -q\vec{E}$. Elas têm módulos e direções iguais e sentidos opostos. Logo, a força elétrica resultante sobre o dipolo elétrico é nula, e ele fica parado.

– Não é bem assim. O dipolo elétrico não se desloca porque essas forças puxam suas cargas em sentidos opostos. Mas elas giram o dipolo em torno do ponto do médio da reta que une as cargas porque as forças que atuam sobre ele têm componentes na direção perpendicular ao dipolo elétrico, e essas forças criam velocidades tangenciais que dão a ele um movimento de rotação.

O professor desenha vários dipolos elétricos para explicar o seu movimento de rotação.

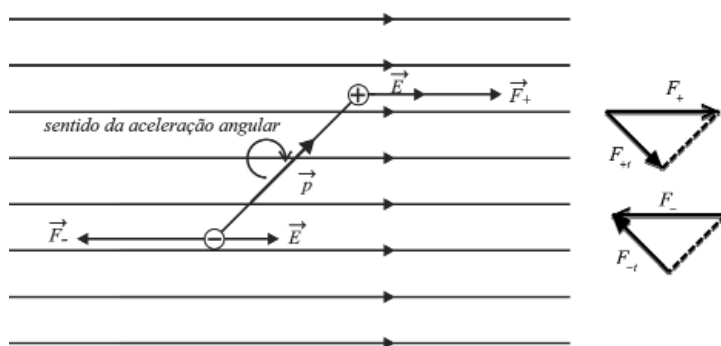


Figura 4.3c: O dipolo elétrico apresenta um movimento circular acelerado no sentido horário em torno do ponto médio da reta que une as duas cargas elétricas.

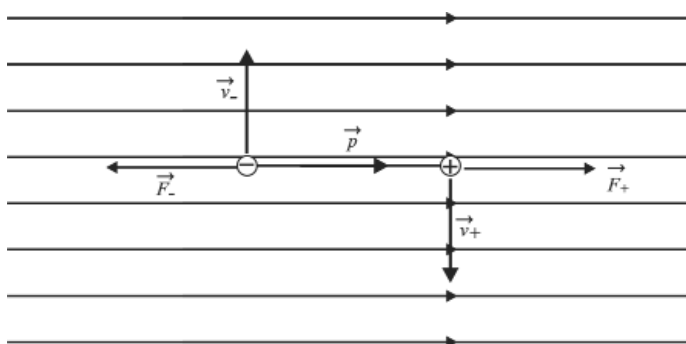


Figura 4.3d: O dipolo está com velocidade angular com o módulo máximo.

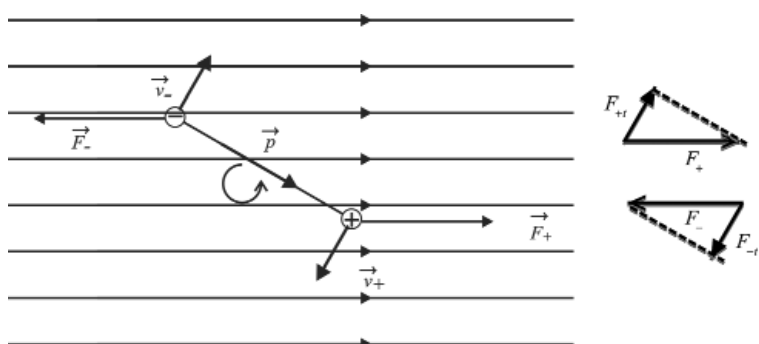


Figura 4.3e: O dipolo está desacelerando porque as componentes tangenciais das forças elétricas têm sentidos contrários aos das velocidades das cargas elétricas.

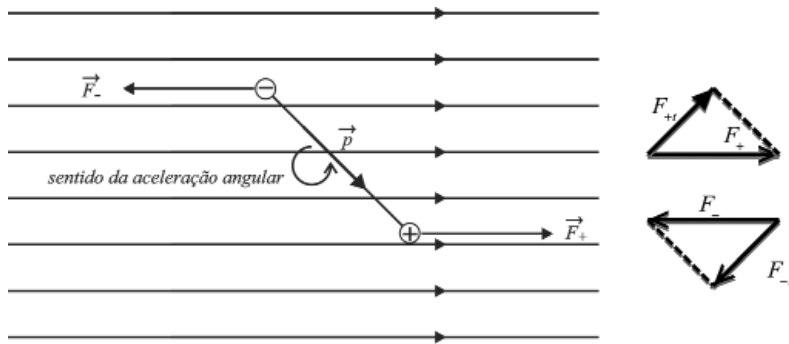


Figura 4.3f: O dipolo elétrico está invertendo o sentido do seu movimento de rotação porque as velocidades das cargas são nulas e as componentes tangenciais das forças elétricas vão girá-lo no sentido anti-horário.

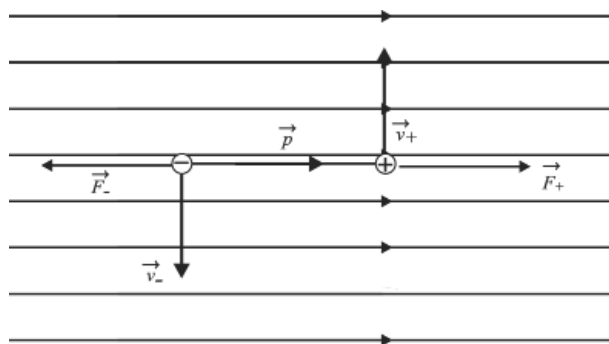


Figura 4.3g: O dipolo alinhado com o campo elétrico.

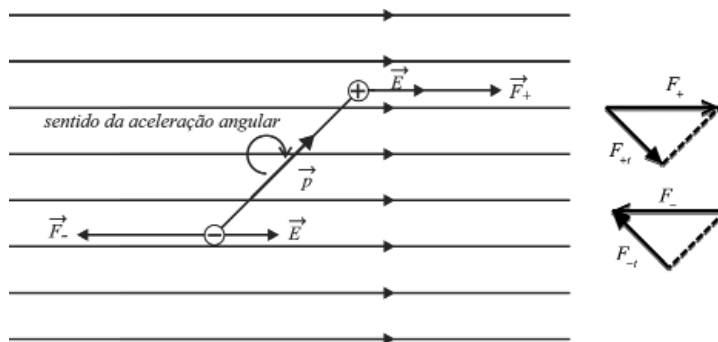


Figura 4.3h: O dipolo está acelerando no sentido horário novamente.

– As forças tentam alinhar o vetor dipolo elétrico com o campo elétrico (Figura 4.3c). O dipolo elétrico não fica alinhado com o campo elétrico porque tem velocidade (Figura 4.3d). Ele continua girando, porém, agora a rotação é desacelerada (Figura 4.3e). O dipolo desacelera até parar (Figura 4.3f). A seguir acelera no sentido oposto e volta a

se alinhar com o campo elétrico (**Figura 4.3g**). Desacelera novamente até parar (**Figura 4.3h**) e repete o movimento descrito indefinidamente.

Ronaldo reflete por alguns minutos e pergunta.

– É isso que acontece com o grão de fubá?

– Se o grão de fubá estivesse em um meio sem atrito, seria isso que ocorreria. No caso do grão de fubá colocado sobre o óleo de rícino, o atrito do grão com o óleo dissipa rapidamente a energia de rotação do grão de tal forma, que ele para rapidamente, na maioria das vezes, alinhado com o campo elétrico.

– Se o grão de fubá fica parado na presença de um campo elétrico, por que nessa figura existe uma concentração maior de fubá em algumas regiões?

O professor desenha um dipolo elétrico em uma região onde o campo elétrico não é constante e pergunta a Ronaldo:

– O grão de fubá só fica parado se o campo elétrico for constante. Para entender o que eu estou falando, diga o que acontece com esse dipolo elétrico que está em um campo elétrico que não é constante, isto é, que varia no espaço.

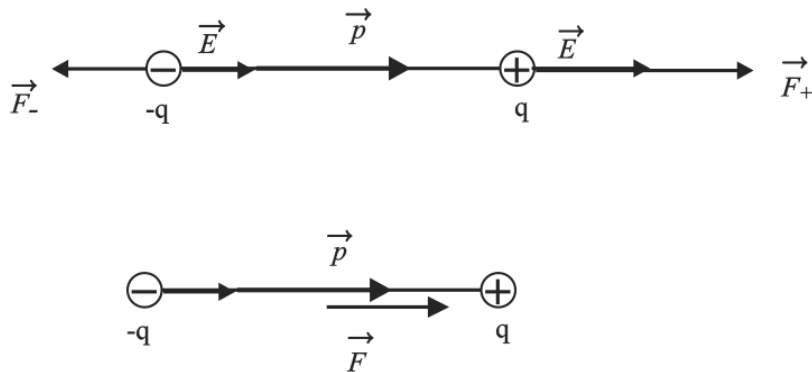


Figura 4.3i: A força resultante acelera o centro do dipolo para a direita.

– Como o módulo da força elétrica sobre a carga elétrica positiva é maior do que o módulo da força sobre a carga elétrica negativa, o centro do dipolo elétrico é acelerado pela força elétrica resultante \vec{F} para a região onde o campo elétrico é maior. Ronaldo, depois da nossa discussão, você já consegue explicar a formação das linhas que você observou nesta foto?

– Como o grão de fubá se comporta como um dipolo elétrico, ao ser colocado na superfície do óleo de rícino, na presença de um campo elétrico, ele sofre a ação desse campo. Nas regiões onde o campo elétrico é constante, os momentos de dipolo dos grãos de fubá se alinham com o campo elétrico. Nas regiões onde o campo elétrico varia no espaço, os grãos de fubá se alinham com o campo elétrico e são arrastados para as regiões onde o módulo do campo elétrico é maior. Nas regiões onde o campo elétrico é nulo, o grão de fubá não se movimenta.

– Correto.

– Professor, por que, no caso em que o campo elétrico varia no espaço, os grãos de fubá se deslocam e depois param?

– Porque a posição do grão de fubá é determinada pela força resultante que atua sobre ele, que é diferente da força elétrica exercida no grão de fubá pelo campo elétrico criado pela distribuição de cargas elétricas dos terminais. Além da força elétrica criada pelas cargas elétricas dos terminais, existem outras forças atuando sobre os grãos de fubá. Entre elas, podemos citar as forças de contato entre os grãos, as forças elétricas que os grãos exercem entre si, a força peso e a força empuxo. Por exemplo, na **Figura 4.4** os grãos alinhados com o campo elétrico se encostam exercendo forças entre si. Ela mostra, de forma qualitativa, o que ocorre com o grão de fubá 1. Os grãos 2 e 3, alinhados com o campo elétrico, impedem o movimento do grão 1. A força \vec{F}_{E1} é a força que o campo elétrico total exerce sobre o grão 1, e as forças \vec{F}_{12} e \vec{F}_{13} são as forças de contato que os grãos 2 e 3 exercem sobre o grão 1. Na **Figura 4.4** não foram representadas as forças peso e força empuxo que atuam sobre o grão 1.

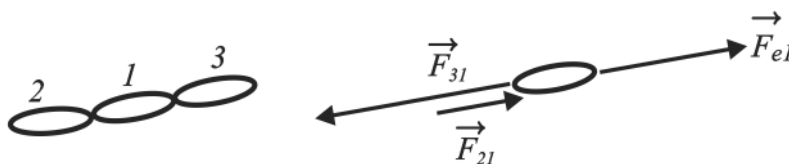


Figura 4.4: Forças sobre o grão de fubá 1.

– Como eu faço para descobrir o sentido do campo elétrico criado pelos terminais carregados através da observação das linhas formadas pelo fubá?

– Não é possível descobrir o sentido das linhas de campo elétrico observando o alinhamento dos grãos de fubá, uma vez que a inversão

das cargas dos terminais produzem um alinhamento dos grãos de fubá análogos.

– Posso descobrir as cargas elétricas dos terminais metálicos pela observação das linhas?

– Não, pois a inversão das cargas dos terminais produz um alinhamento dos grãos de fubá análogos.

– Professor, por que os grãos de fubá não se alinham fora dos terminais lineares?

– Porque os campos elétricos nessas regiões ou são muito fracos ou são nulos.

A turma assiste à discussão entre o professor e Ronaldo, incrédulo...

Percebendo a descrença da turma, o professor comenta que qualquer substância polar se comporta como os grãos de fubá quando colocada sobre o óleo de rícino na presença de terminais carregados. Ele cita o caso das sementes de grama, que são polares. Mostra vídeos nos quais as sementes de grama formam linhas na presença de terminais carregados diferentes.



Vídeos sobre visualização de linhas de campo elétrico mostram a formação qualitativa de linhas de campo elétrico de algumas distribuições de cargas elétricas. As distribuições de cargas utilizadas nos vídeos reproduzem qualitativamente as linhas de campo elétrico de uma carga pontual positiva e de um anel com cargas negativas, de um dipolo elétrico, de duas cargas pontuais positivas e de um anel com cargas negativas, de dois anéis com cargas opostas, de um terminal com simetria axial com cargas positivas e de um anel com cargas negativas e dois terminais lineares com cargas opostas. Eles estão disponíveis no *Portal TECA*. Escolha o vídeo e, em seguida, digite “ICF2_cederj”.

A turma observa, nos vídeos apresentados pelo professor, o alinhamento das sementes de grama com o campo elétrico e o seu deslocamento para as regiões onde o campo elétrico é mais intenso.

O sinal toca, mas a turma permanece sentada durante alguns instantes, tentando absorver todas as informações recebidas.

Que tal aproveitar esse intervalo para fazer uma sequência de atividades que poderão auxiliar no uso de suas habilidades e conhecimentos acerca de dipolo elétrico e o seu movimento em um campo elétrico? Preparado? Então, mãos à obra.

Atividade 1

Atende aos Objetivos 1 e 2

Com base na história que você acabou de ler, responda às seguintes questões:

a) Que relação existe entre as linhas de campo elétrico e o campo elétrico?

b) O que é um dipolo elétrico? Qual a definição de momento de dipolo elétrico?

c) Descreva o movimento de um dipolo elétrico em um campo elétrico constante em um meio onde existe atrito entre o dipolo elétrico e o meio.

d) Descreva o movimento de um dipolo elétrico em um campo elétrico que varia no espaço em um meio onde existe atrito entre o dipolo elétrico e o meio.

e) Descreva um método experimental que permita visualizar linhas muito parecidas com as linhas de campo elétrico.

f) Você sabe como produzir um campo elétrico aproximadamente constante?

Respostas Comentadas

a) As linhas de campo elétrico são linhas imaginárias que permitem visualizar o campo elétrico criado por um conjunto de cargas elétricas.

Elas são desenhadas da seguinte forma:

- o campo elétrico é tangente à linha de campo em cada ponto linha;
- o sentido da linha de campo elétrico é das cargas positivas para as cargas elétricas negativas;
- o número de linhas de campo elétrico por unidade e a área perpendicular à linha são proporcionais ao módulo do campo elétrico. Logo, o campo é mais intenso onde as linhas de campo elétrico estão mais próximas.

b) Um dipolo elétrico é um sistema formado por uma carga elétrica q ($q > 0$) e uma carga elétrica $-q$ rigidamente ligadas. O dipolo elétrico é caracterizado pelo vetor momento de dipolo elétrico. O vetor momento de dipolo elétrico representado na **Figura 4.3a** tem a direção da reta que une as duas cargas elétricas. O sentido vai da carga elétrica negativa para

a carga elétrica positiva e o módulo é igual a $p=qd$, sendo d a distância entre as cargas elétricas.

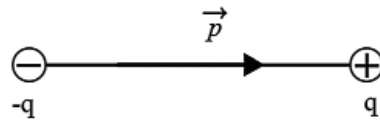


Figura 4.5: Dipolo elétrico.

- c) Quando colocamos um dipolo elétrico em um campo constante, o seu vetor momento de dipolo elétrico tende a se alinhar com o campo elétrico. Se não existe atrito entre o dipolo elétrico e o meio onde ele se encontra, ele oscila indefinidamente em torno da direção do campo elétrico. Se existe atrito entre o dipolo elétrico e o meio onde ele se encontra, a oscilação desaparece e a tendência é o momento de dipolo elétrico se alinhar com o campo elétrico.
- d) O momento de dipolo elétrico se alinha com o campo elétrico e é atraído para uma região onde o módulo do campo elétrico é maior.
- e) O método experimental que permite visualizar linhas parecidas com as linhas de campo elétrico consiste em colocar uma substância polar sobre óleo de rícino onde foram imersos terminais carregados.
- f) Podemos produzir um campo elétrico aproximadamente constante utilizando duas placas condutoras paralelas carregadas com cargas elétricas q e $-q$ e separadas por uma distância d , nas condições em que a distância entre as placas é muito menor do que suas dimensões. Nesse caso, o campo elétrico entre as placas é aproximadamente constante e, fora das placas, é aproximadamente nulo.

Atividade 2

Atende aos Objetivos 2 e 3

De acordo com a seção “As linhas do campo elétrico”, faça o seguinte exercício:

As imagens a seguir representam fubá sobre óleo na presença de dois terminais que podem estar carregados ou descarregados. Um dos terminais aparece nos centros das figuras e o outro é circular e envolve os terminais dos centros das figuras. Os terminais circulares não estão visíveis.

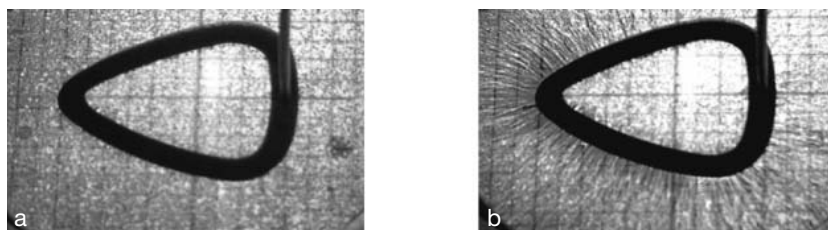


Figura 4.6: a) Terminais condutores descarregados. Fubá sobre o óleo. b) Terminais condutores carregados. Linhas de campo produzidas pelas cargas elétricas dos terminais no fubá que está sobre o óleo.

Responda:

a) Em qual das imagens os terminais estão carregados? Por quê?

b) Você consegue descobrir as cargas elétricas dos terminais?

c) Descreva o campo elétrico no interior do terminal do centro da figura e na região próxima ao terminal do centro. Onde o campo elétrico é mais intenso?

Respostas Comentadas

- a) Os terminais estão carregados na **Figura 4.6b** porque, em algumas regiões, o fubá está organizado em linhas. Isso ocorre porque o fubá contém um momento de dipolo intrínseco que se alinha com o campo elétrico.
- b) A observação das linhas formadas no fubá não permite descobrir as cargas elétricas dos terminais porque elas não se alteram se forem trocados os seus sinais.
- c) No interior do centro da figura, ou o campo elétrico é nulo ou ele é muito fraco, uma vez que o fubá não está alinhado nessa região. Próximo ao terminal do centro, como as linhas do fubá são perpendiculares a ele, o campo elétrico também o é. Como na extremidade esquerda do terminal do centro da figura existe um número maior de linhas de fubá por unidade de área perpendicular a elas, o campo elétrico é mais intenso nessa região.

===== **Atividade 3** =====

Atende ao Objetivo 2

Com base na seção que você acabou de ler, “As linhas do campo elétrico”, faça o seguinte exercício.

A **Figura 4.7** mostra as linhas de campo elétrico de duas cargas elétricas pontuais q_1 e q_2 .

- a) O que você pode afirmar sobre os sinais e a relação entre os módulos das cargas elétricas?

b) Desenhe os campos elétricos nos pontos A e B da **Figura 4.7**.

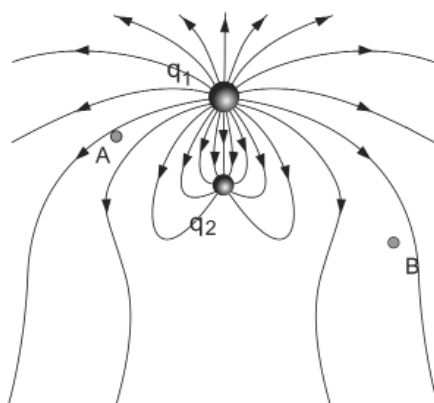


Figura 4.7

Respostas Comentadas

a) A carga elétrica q_1 é positiva porque as linhas de campos elétrico saem dela e a carga elétrica q_2 é negativa porque as linhas de campo entram nela. A carga elétrica q_1 tem o módulo maior porque o número de linhas de campo elétrico que saem dela é maior do que o número de linhas de campo elétrico que penetram na carga elétrica q_2 .

b)

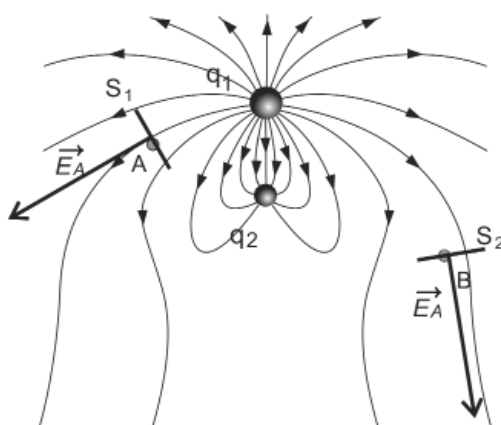


Figura 4.8

Antes de desenhar os campos elétricos na **Figura 4.8**, é necessário comparar os módulos dos campos elétricos nos pontos A e B para isso, utili-

zamos as áreas S_1 e S_2 que foram representadas na **Figura 4.8**. Elas são perpendiculares às linhas de campo elétrico próximas aos pontos A e B. O módulo do campo elétrico no ponto A é maior do que o módulo do campo elétrico no ponto B porque o número de linha de campo elétrico por unidade de área perpendicular (áreas S_1 e S_2) a elas é maior no ponto A do que no ponto B.

As linhas de campo elétrico são construídas de tal forma que:

- em cada ponto do espaço, o vetor campo elétrico é tangente à linha;
- as linhas vão da carga elétrica positiva para a carga elétrica negativa. Existe um número de linhas maior saindo das cargas elétricas com módulos maiores;
- o número das linhas de campo elétrico por unidade de área perpendicular à área é proporcional ao módulo.



Atividade 4

Atende ao Objetivo 4

Com base na seção lida, faça o seguinte exercício:

Um campo elétrico constante \vec{E} é produzido na região entre duas placas idênticas condutoras, carregadas com cargas de sinais contrários, que são mantidas paralelas e separadas por uma distância d , como mostra a **Figura 4.9** a seguir. As dimensões das placas são muito maiores do que a distância d entre elas.

a) Desenhe, na **Figura 4.9**, as linhas do campo elétrico existentes entre as placas.

b) Se um elétron for colocado em repouso a uma distância intermediária $y = d/2$ entre as duas placas, qual será a direção de seu movimento? Qual será o módulo da velocidade máxima do elétron? Despreze o peso do elétron.

c) Considere agora que o elétron seja lançado da mesma distância intermediária $y = d/2$ com velocidade inicial \vec{v}_0 paralela às placas. Ele colide com uma das placas. Qual será o módulo da velocidade máxima do elétron? Despreze o peso do elétron.

d) Existe outro exemplo de situação física análoga a esta descrita na atividade, do ponto de vista do movimento, que você já tenha visto antes?

Respostas Comentadas

a) Como as dimensões das duas placas são muito maiores do que a distância entre elas, podemos considerar o campo elétrico entre elas constante. A direção do campo elétrico é perpendicular às placas. Por isso, as linhas do campo serão retas paralelas, igualmente espaçadas e apontando ortogonalmente da placa positiva para a negativa, como é mostrado na **Figura 4.10**.

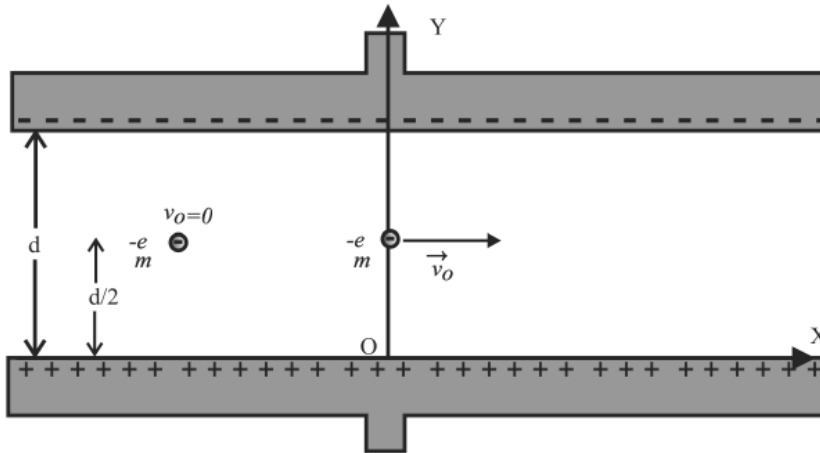


Figura 4.9

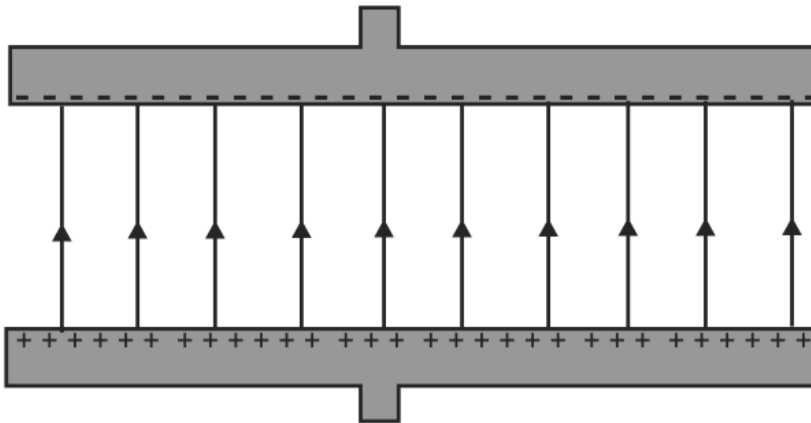


Figura 4.10

b) A trajetória de um elétron é determinada pela força elétrica que atua sobre ele e pelas condições iniciais do problema. As forças que atuam no elétron são o seu peso e a força elétrica. A força que o campo elétrico cria sobre o elétron é $\vec{F}_E = -e\vec{E}$, em que e é o módulo da carga do elétron ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$). Como o problema mandou desprezar o peso do elétron, a força resultante que atua nele é a força elétrica. A **Figura 4.11** mostra a força resultante que atua no elétron nessa aproximação.

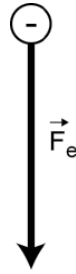


Figura 4.11

A aceleração do elétron é dada pela Segunda Lei de Newton, isto é,

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

$$a_x = 0 \text{ e } a_y = -\frac{eE_y}{m} = -\frac{eE}{m}$$

As coordenadas do vetor posição e da velocidade do elétron são:

$$v_x = v_{ox}, v_y = v_{oy} + a_y t = v_{oy} - \frac{eE}{m}t,$$

$$x = x_o + v_{ox}t \text{ e } y = y_o + v_{oy}t - \frac{eE}{2m}t^2$$

No caso em que o elétron é largado em $y_o = d/2$ com velocidade inicial $\vec{v}_o = \vec{0}$, as coordenadas do vetor posição e da velocidade do elétron se reduzem a:

$$v_x = 0, v_y = -\frac{eE}{m}t,$$

$$x = x_o \text{ e } y = \frac{d}{2} - \frac{eE}{2m}t^2$$

Logo, nesse caso, o elétron se aproxima da placa positiva. O módulo da sua velocidade vai aumentar até o momento imediatamente anterior à sua colisão com essa placa.

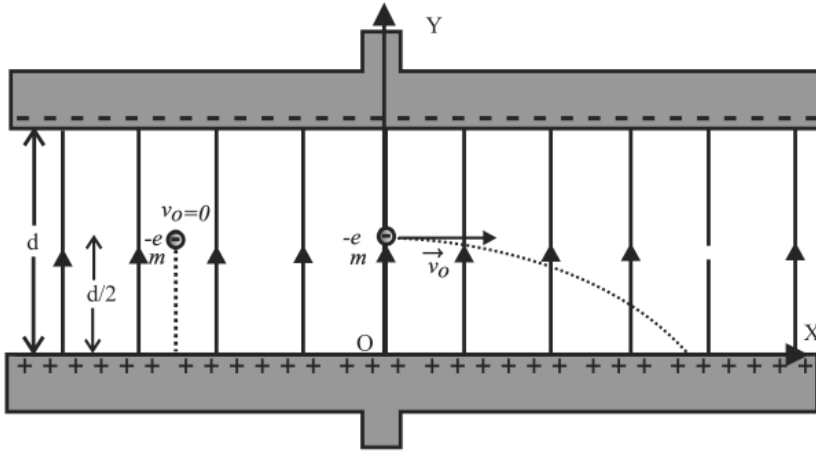


Figura 4.12

Logo, a velocidade do elétron vai ser máxima no instante t_1 em que $y(t_1) = 0$, isto é,

$$y(t_1) = \frac{d}{2} - \frac{eE}{2m} t_1^2 = 0 \Rightarrow t_1 = \sqrt{\frac{dm}{eE}},$$

$$v_x = 0, v_y = -\frac{eE}{m} t_1 \Rightarrow v_y = -\frac{eE}{m} \sqrt{\frac{dm}{eE}} = -\sqrt{\frac{deE}{m}} \Rightarrow$$

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{deE}{m}}$$

c) A **Figura 4.12** mostra que, nesta nova situação, temos que:

$$x_o = 0, y_o = d/2 \text{ e } \vec{v}_o = v_o \hat{i}$$

Logo, as coordenadas do vetor posição e da velocidade do elétron se reduzem a

$$v_x = v_o, v_y = -\frac{eE}{m} t,$$

$$x = v_o t \text{ e } y = \frac{d}{2} - \frac{eE}{2m} t^2$$

Logo, neste caso, o elétron se aproxima da placa positiva. O módulo da sua velocidade vai aumentar até o instante imediatamente anterior à sua colisão com a placa positiva. Assim, a velocidade do elétron vai ser máxima no instante t_1 em que $y(t_1)=0$, isto é,

$$y(t_1) = \frac{d}{2} - \frac{eE}{2m} t_1^2 = 0 \Rightarrow t_1 = \sqrt{\frac{dm}{eE}},$$

$$v_x = v_o, v_y = -\frac{eE}{m} t_1 \Rightarrow v_y = -\frac{eE}{m} \sqrt{\frac{dm}{eE}} = -\sqrt{\frac{deE}{m}} \Rightarrow$$

$$v_{\max} = \sqrt{v_o^2 + \frac{deE}{m}}$$

d) As equações anteriores mostram que, do ponto de vista do eixo Y, o elétron continuará se aproximando da placa positiva com um movimento uniformemente acelerado e que, do ponto de vista do eixo X, o seu movimento será retilíneo e uniforme, com a componente da velocidade constante $v_x = v_o$.

A trajetória do elétron pode ser obtida eliminando-se o tempo da equação da coordenada y, isto é,

$$x = v_o t \Rightarrow t = \frac{x}{v_o} \Rightarrow$$

$$y = \frac{d}{2} - \frac{eE}{2m} t^2 = \frac{d}{2} - \frac{eE}{2m} \left(\frac{x}{v_o} \right)^2 = \frac{d}{2} - \frac{eEx^2}{2mv_o^2}$$

Nesta nova situação, o movimento do elétron é uma parábola (ver **Figura 4.12**). Ele é idêntico ao movimento de um objeto lançado próximo à superfície da Terra.

Conclusão

É muito difícil para o ser humano compreender o que não é percebido pelos seus sentidos, como é o caso dos campos elétricos. Por isso, é muito importante que, ao se tornar um professor, você utilize estratégias pedagógicas que permitam aos seus futuros alunos ver o invisível através da sua ação sobre objetos visíveis. A ação do invisível também deve ser explicada, para que ela não seja interpretada como mágica. Isso pode ser realizado, no caso dos campos elétricos, com discussão do método experimental para visualizar as linhas de campo elétrico que foi realizada nesta aula com figuras e vídeos.

Resumo

1. Os campos elétricos podem ser representados visualmente por linhas denominadas linhas de campo elétrico. Elas são construídas de tal forma que:

- em cada ponto do espaço o vetor campo elétrico é tangente à linha;
- as linhas vão da carga elétrica positiva para a carga elétrica negativa, e o campo elétrico tem o sentido das linhas. Existe um número de linhas maior saindo ou entrando nas cargas elétricas com módulos maiores;
- o número das linhas de campo elétrico por unidade de área perpendicular à linha é proporcional ao módulo do campo elétrico.

2. Um dipolo elétrico é formado por uma carga elétrica positiva q e uma carga elétrica negativa $-q$ rigidamente ligadas. Ele é caracterizado pelo vetor momento de dipolo \vec{p} . O momento de dipolo elétrico tem a direção da reta que une as duas cargas elétricas e o sentido que vai da carga elétrica negativa para a carga elétrica positiva. O módulo é igual a qd , sendo d a distância entre as cargas elétricas. Quando um dipolo elétrico é colocado em uma região onde existe campo elétrico em um meio com atrito, ele tende a se alinhar com o campo elétrico e se desloca para as regiões onde o módulo do campo elétrico é maior.

3. Algumas propriedades dos campos elétricos de distribuições complexas de cargas elétricas podem ser visualizadas no método experimental de visualização qualitativa das linhas e campo elétrico através do alinhamento de moléculas polares colocadas na presença de terminais carregados imersos em óleo de rícino.

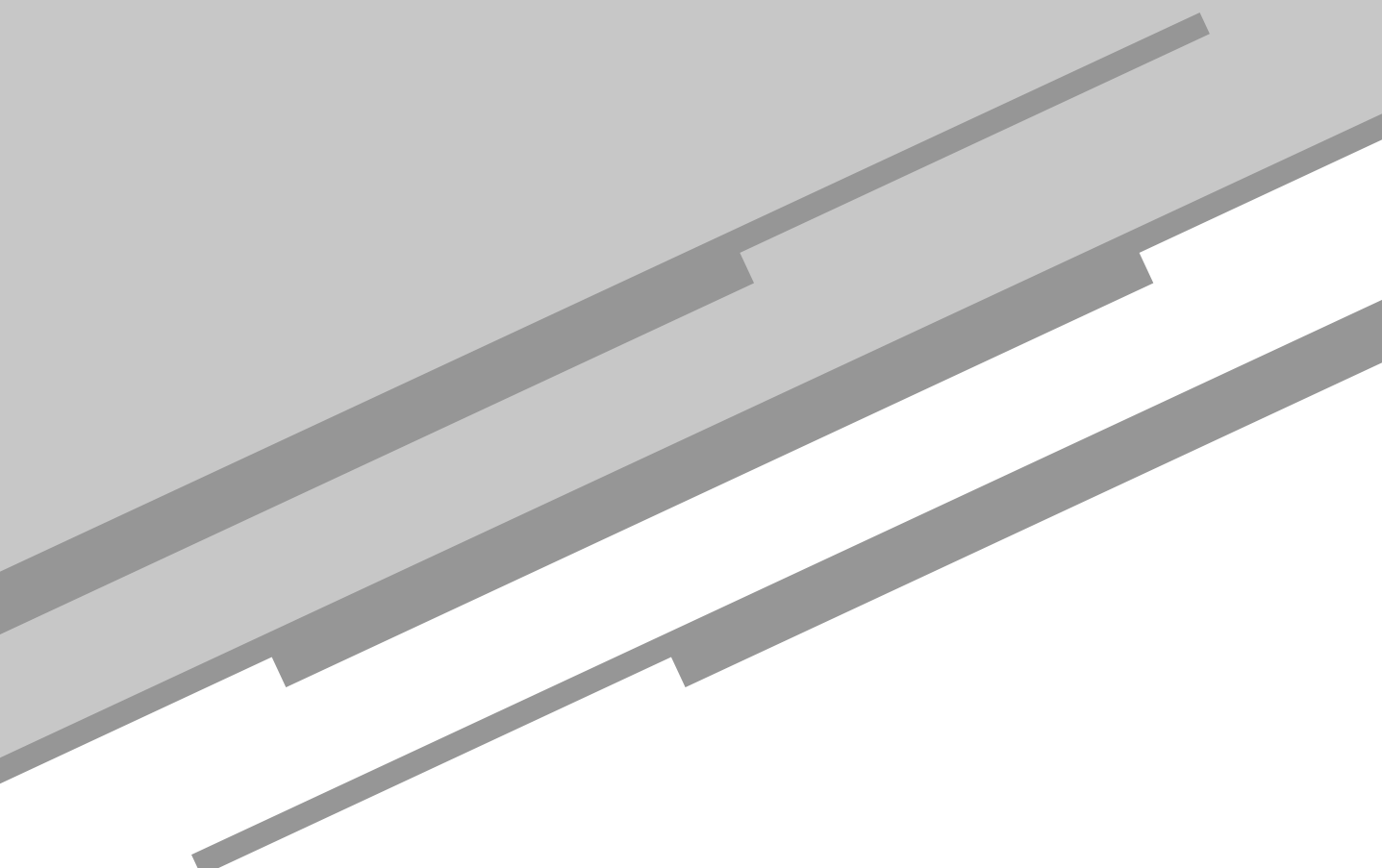
Leituras recomendadas

Leia sobre o assunto campos elétricos na seção “Eletricidade e magnetismo” do livro de Antonio Máximo e Beatriz Alvarenga, *Física* - Volume único.

Leia sobre os assuntos carga elétrica e suas propriedades e formulação da Lei de Coulomb no livro *Física 3* (eletromagnetismo), do Grupo de Reelaboração do Ensino de Física (Gref).

Aula 5

Condutores em equilíbrio eletrostático



Maria Antonieta Almeida

Meta

Discutir o campo elétrico e a distribuição de cargas elétricas em condutores em equilíbrio eletrostático, bem como a blindagem e o aterramento.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. prever de forma qualitativa a distribuição de cargas elétricas e os campos elétricos em condutores em equilíbrio eletrostático;
2. reconhecer a importância da blindagem e do aterramento em algumas situações do cotidiano.

Pré-requisitos

Para se ter bom aproveitamento desta aula, é importante que o aluno saiba vetores, as Leis de Newton, o conceito de condutor de eletricidade, a definição de campo elétrico, a definição de linhas de campo elétrico e a relação entre o campo elétrico e a força elétrica que este exerce sobre cargas elétricas.

Esses conteúdos podem ser encontrados nos livros de Introdução às Ciências Físicas 1 e nas aulas 2, 3 e 4 deste módulo.

Introdução

As propriedades dos campos elétricos nos condutores são de grande importância no nosso cotidiano. São as caixas condutoras que blindam o interior dos aparelhos eletroeletrônicos contra a ação de campos elétricos externos. São as caixas condutoras aterradas que impedem que os campos elétricos criados pelas cargas elétricas que aparecem nos aparelhos elétricos atuem sobre o seu exterior, e que evitam os choques elétricos em pessoas que tocam esses aparelhos. As propriedades dos condutores em equilíbrio eletrostático são discutidas nas seções “Campos elétricos e distribuição de cargas elétricas em condutores em equilíbrio eletrostático”; a blindagem e o aterramento, nas seções seguintes.

Antes de ler as seções, tente responder às seguintes perguntas:

1. Quais as principais propriedades do campo elétrico na superfície de um condutor em equilíbrio eletrostático?
2. Quais as principais características do campo elétrico no interior de um condutor em equilíbrio eletrostático?
3. É possível proteger uma região do espaço contra a ação de campos elétricos (blindar a eletrostática)? Qual a importância prática dessa blindagem?
4. É possível evitar que os campos elétricos criados por cargas elétricas colocadas dentro de uma cavidade de um condutor atuem fora dele? O que significa, na prática, aterrar um condutor?

Campos elétricos e distribuição de cargas elétricas em condutores em equilíbrio eletrostático

O professor substituto inicia a aula perguntando à turma se eles já ouviram falar da Gaiola de Faraday. Diante do silêncio dos alunos, ele diz que vai discutir a distribuição de cargas elétricas e os campos elétricos em condutores em equilíbrio eletrostático para que eles entendam a importância da Gaiola de Faraday. Ele inicia sua exposição:

– Vamos discutir, inicialmente, em que condições os condutores não apresentam movimento de cargas elétricas no seu interior e nas suas superfícies, isto é, vamos discutir os condutores que estão em equilíbrio eletrostático.

Se existe um *campo elétrico* na massa condutora, o *campo elétrico* cria sobre os elétrons livres do condutor forças elétricas capazes de deslocá-los. Logo, se existe campo elétrico na massa condutora, existe movimento de elétrons no condutor.

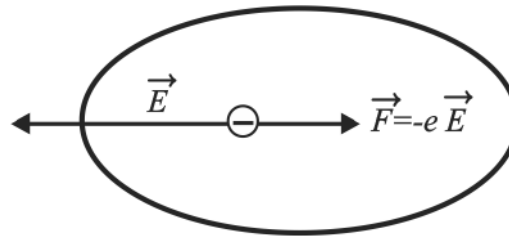


Figura 5.1: Força sobre um elétron livre da massa condutora.

Se existe um campo elétrico na superfície de um condutor, ele exerce sobre as cargas elétricas dessa superfície uma força elétrica. Essa força pode produzir um movimento das cargas elétricas sobre a superfície do condutor, ou ainda, um movimento das cargas elétricas para o interior do condutor, ou um movimento das cargas elétricas para fora do condutor.

O movimento da carga elétrica para fora do condutor só pode ser produzido quando o campo elétrico varia com o tempo (efeito fotoelétrico). Esse efeito fotoelétrico não vai ser estudado em ICF2.

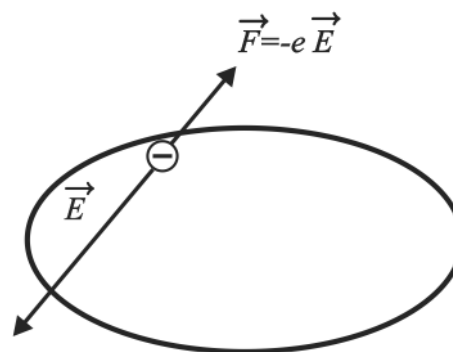


Figura 5.2: Força elétrica sobre um elétron livre da superfície de um condutor.

O movimento das cargas elétricas sobre a superfície do condutor ocorre quando a força que atua sobre a carga elétrica tem uma componente paralela à superfície. Este é o caso da **Figura 5.2**.

O movimento das cargas elétricas da superfície do condutor para o seu interior ocorre quando a força elétrica tem uma componente perpendicular à superfície que aponta para o interior do condutor. Esse não é o caso da **Figura 5.2**.

Logo, para que não exista movimento de cargas elétricas, em um condutor, os seguintes fatos devem ocorrer:

1. o campo elétrico na massa condutora tem que ser nulo;
2. o campo elétrico na superfície do condutor tem que ser perpendicular a essa superfície e tem que criar forças elétricas sobre as cargas elétricas do condutor que apontem para fora deste.

Os alunos estão com dificuldade de entender o que está sendo explicado. Mariana se manifesta:

– Professor, você poderia mostrar um exemplo de um condutor em equilíbrio eletrostático, para eu entender como é o campo elétrico nele?

O professor mostra uma figura com dois condutores em equilíbrio eletrostático. Nela, existe uma esfera carregada com cargas elétricas positivas e outra esfera neutra, cujas cargas elétricas foram separadas pelo campo elétrico da esfera carregada. As duas esferas estão em equilíbrio eletrostático. O campo elétrico do sistema foi representado pelas linhas de campo elétrico.

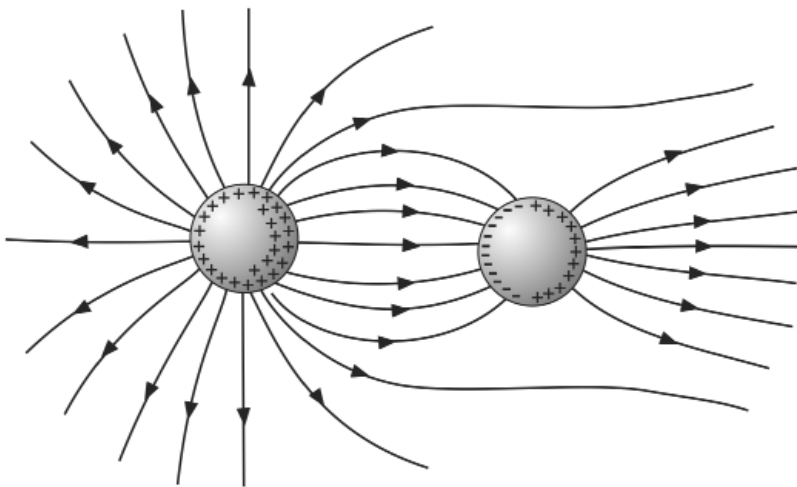


Figura 5.3: Esferas condutoras em equilíbrio eletrostático.

– Como o campo elétrico no interior do condutor é nulo, não existem linhas de campo elétrico nos interiores das esferas. Na esfera da esquerda, que tem cargas elétricas positivas na sua superfície, o campo elétrico é perpendicular à superfície da esfera e aponta para fora dela. Por isso, a força elétrica que atua em uma carga elétrica positiva da superfície aponta para fora do condutor. Na esfera da direita, que tem cargas elétricas positivas e negativas na sua superfície, o campo elétrico na superfície com cargas elétricas positivas aponta para fora dela e o campo elétrico na superfície com cargas elétricas negativas aponta para dentro. Na esfera carregada, as forças elétricas que atuam nos dois lados das superfícies apontam para fora delas. Por isso, as forças elétricas que atuam nas cargas elétricas das superfícies das esferas apontam para fora destas e não produzem movimento das cargas elétricas nem sobre suas superfícies, nem para os interiores das esferas condutoras.

Ronaldo entende melhor o que o professor tinha explicado. Todavia, ainda não entende por que só existem cargas elétricas nas superfícies do condutor.

– Professor, na sua figura, só existem cargas elétricas nas superfícies dos condutores. Por que isso acontece?

– A distribuição de cargas em um condutor em equilíbrio eletrostático se dá de tal forma a satisfazer as condições de inexistência do movimento de cargas elétricas no condutor. O cálculo da distribuição de cargas elétricas nos condutores em equilíbrio eletrostático é complicado e não pode ser realizado no Ensino Médio. Vou apenas informar a vocês quais são as propriedades gerais dessas distribuições. Por exemplo, nunca vão existir aglomerações de cargas elétricas na massa condutora. Por isso, as cargas elétricas dessas esferas estão nas superfícies.

O professor mostra à turma algumas figuras com condutores em equilíbrio eletrostático e chama a atenção para algumas características das distribuições apresentadas.

– Nesta figura, existe um condutor maciço carregado com cargas elétricas positivas. Observem que, neste caso, só existem cargas elétricas na superfície do condutor. As cargas elétricas se distribuíram de tal forma a garantir um campo elétrico nulo na massa do condutor e perpendicular à sua superfície com o sentido para fora deste.

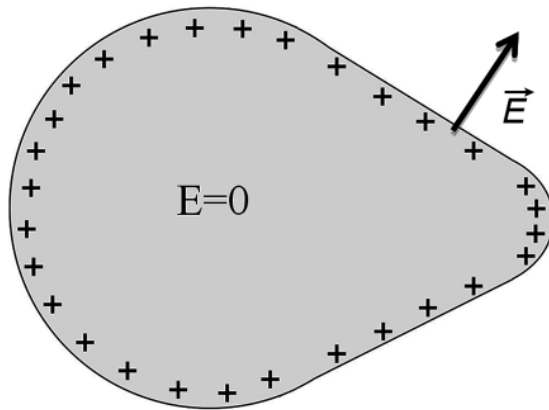


Figura 5.4: Distribuição de cargas elétricas em um condutor em equilíbrio eletrostático.

Vejam que a densidade de cargas elétricas é maior na parte da superfície com maior curvatura (a ponta).

Ronaldo pergunta se isso sempre acontece.



Veja o vídeo “Surface distribution of charge”, produzido pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts, disponível no Youtube na página <http://www.youtube.com/watch?v=skTCdhBE61Q>.

Nesse vídeo, o experimentador utiliza um eletroscópio para mostrar que a densidade superficial de cargas elétricas é maior nas pontas de um condutor carregado em equilíbrio eletrostático que tenha a forma parecida com o condutor da **Figura 5.4**

– Isso é sempre verdade. A densidade de carga elétrica é sempre maior nas pontas dos condutores. Outra informação importante é que o módulo do campo elétrico é maior nas proximidades das pontas dos condutores em equilíbrio eletrostático. Nós observamos essa propriedade quando discutimos o alinhamento do fubá na presença do terminal fechado com uma ponta.

O professor mostra a foto novamente à turma e comenta:

– Observem que as linhas formadas pelo fubá estão mais próximas na ponta do terminal. Logo, a intensidade do campo elétrico é maior na parte mais pontuda do terminal, isto é, onde a densidade superficial de cargas elétricas do condutor é maior.

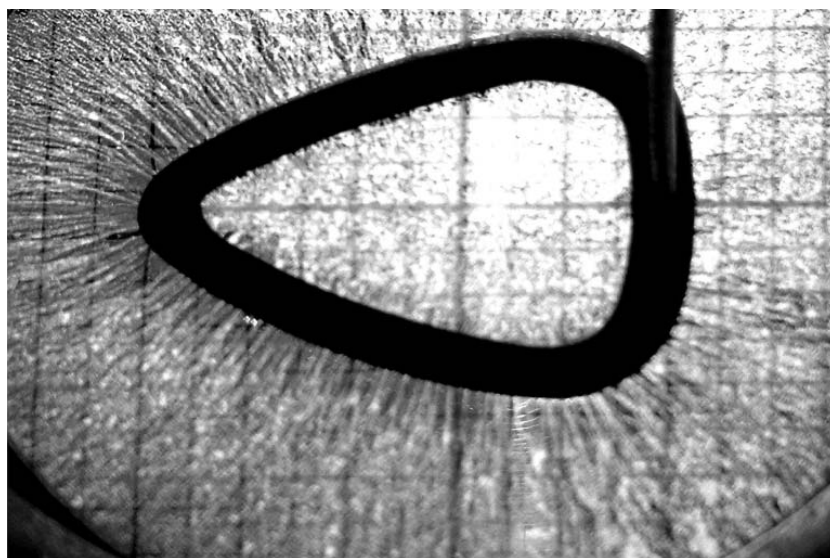


Figura 5.5: Terminais condutores carregados. Linhas de campo produzidas pelas cargas elétricas dos terminais no fubá que está sobre o óleo.

O conhecimento de que campos elétricos são mais intensos nas pontas de condutores é utilizado na construção de para-raios. Os para-raios têm como finalidade atrair os raios produzidos na atmosfera. Eles atraem os raios porque o campo elétrico intenso criado próximo às suas pontas transforma o ar, que normalmente é isolante, em condutor. Para tornar o ar condutor é preciso produzir um campo elétrico com módulo maior do que $E = 3 \cdot 10^6 \text{ V/m}$. O campo elétrico intenso produzido pelo para-raios acelera os elétrons livres da atmosfera, gerando colisões com as moléculas do ar, que são ionizadas, produzindo, por sua vez, outros elétrons, que colidem com novas moléculas do ar. A ionização das moléculas do ar transforma-o em um condutor com íons positivos e elétrons. O ar condutor produzido nas proximidades do para-raios cria um caminho fácil para os raios, que são descarregados através do para-raios na Terra.

A turma fica muito interessada quando percebe que aquelas coisas complicadas que o professor anda discutindo têm alguma aplicação

prática. O professor percebe o interesse da turma e continua a discussão sobre as distribuições de cargas elétricas nos condutores. Ele mostra outra figura, na qual existe um outro condutor com uma cavidade. A forma do novo condutor é igual à forma do condutor maciço. Ele também está carregado com carga elétrica positiva.

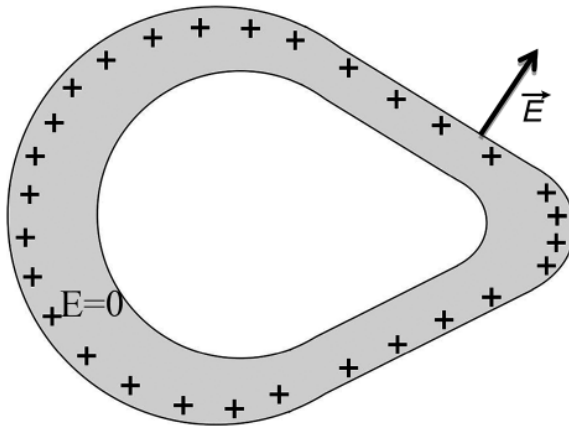


Figura 5.6: Condutor oco carregado em equilíbrio eletrostático. Não existem cargas elétricas na cavidade do condutor.

Ronaldo percebe rapidamente que a distribuição de cargas elétricas do condutor com cavidade parece igual à distribuição do condutor maciço e pergunta:

– Professor, a distribuição de cargas elétricas do condutor com a cavidade é igual à distribuição de cargas elétricas do condutor maciço?

– Isso só é verdade se a carga elétrica total do condutor maciço for a mesma do condutor com a cavidade. Se a densidade da carga elétrica for igual à do condutor maciço, ela cria um campo elétrico nulo na massa condutora e um campo elétrico perpendicular à superfície condutora externa, apontando para fora do condutor. Essas são as condições que o campo elétrico deve satisfazer para que o condutor com a cavidade esteja em equilíbrio eletrostático.

Ronaldo tenta generalizar as informações sobre o campo elétrico, associadas com o condutor com a cavidade.

– Quer dizer que os campos elétricos na massa condutora e no buraco do condutor em equilíbrio eletrostático são sempre nulos?

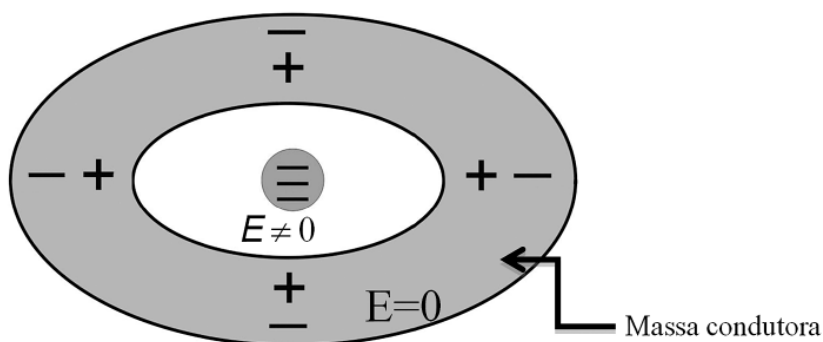


Figura 5.7: Campo elétrico na massa condutora e na cavidade de um condutor neutro em equilíbrio eletrostático, com cargas elétricas na sua cavidade.

O professor mostra uma figura com um condutor neutro que contém na sua cavidade um bastão com cargas elétricas negativas.

– Isso só é verdade para a massa condutora. Os campos elétricos em cavidades de condutores em equilíbrio eletrostático nem sempre são nulos. Por exemplo, existem campos elétricos na cavidade e na região externa, no caso do condutor da **Figura 5.7**. O campo elétrico só é sempre nulo na massa condutora de um condutor em equilíbrio eletrostático.

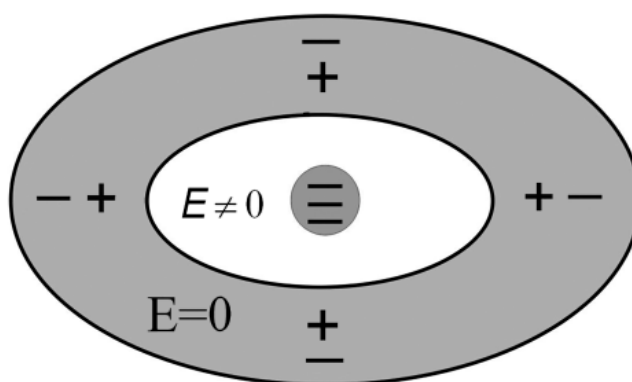


Figura 5.8: Campo elétrico no exterior de um condutor neutro com cargas elétricas na sua cavidade.

A discussão é interrompida pelo sinal do recreio. Todos os alunos saem da sala.

Atividade 1

Atende ao Objetivo 1

Com base na seção que você acabou de ler (“Campos elétricos e distribuição de cargas elétricas em condutores em equilíbrio eletrostático”), responda às seguintes perguntas:

a) Quais as principais propriedades do campo elétrico na superfície de um condutor em equilíbrio eletrostático?

b) Quais as principais características do campo elétrico na massa de um condutor em equilíbrio eletrostático?

Respostas Comentadas

a) O campo elétrico nas superfícies do condutor em equilíbrio eletrostático é perpendicular às superfícies e cria forças elétricas sobre as cargas elétricas das superfícies que apontam para fora do condutor.

b) Em um condutor em equilíbrio eletrostático, o campo elétrico na massa condutora é nulo.

Blindagem eletrostática

O professor reinicia a aula mostrando outra figura à turma. Nela, existe um condutor neutro na presença de um bastão carregado com cargas elétricas negativas.

– Quem quer explicar a distribuição de cargas elétricas deste condutor?

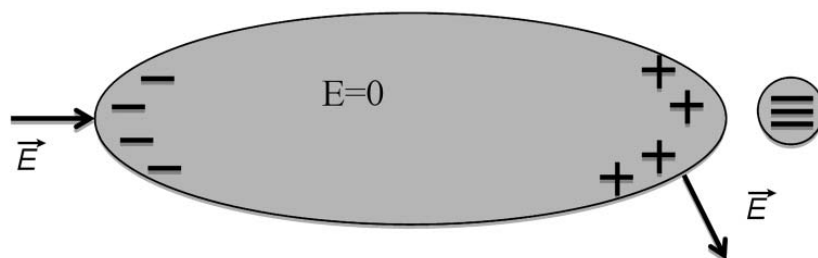


Figura 5.9: Distribuição de cargas elétricas em um condutor maciço e neutro em equilíbrio eletrostático, na presença de cargas elétricas externas negativas.

A turma fica em silêncio. Ronaldo toma coragem e tenta explicar a distribuição de cargas elétricas do condutor:

– O campo elétrico criado pelo bastão eletrizado negativamente afasta alguns elétrons livres do condutor. Eles se localizam nas regiões da superfície do condutor mais afastadas do bastão. Logo, aparecem cargas elétricas positivas na região da superfície do condutor próxima ao bastão. A distribuição de cargas elétricas do equilíbrio eletrostático é aquela que anula o campo elétrico na massa condutora e produz campos elétricos nas perpendiculares às superfícies dos condutores, que, por sua vez, geram forças elétricas para fora do condutor.

– Muito bem! Descreva agora a distribuição de cargas elétricas do mesmo condutor neutro com uma cavidade.

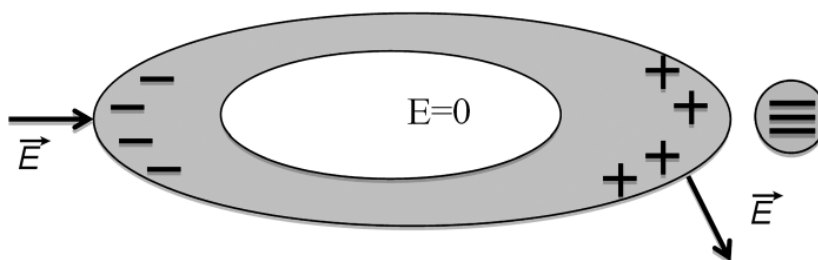


Figura 5.10: Distribuição de cargas elétricas em um condutor com cavidade e neutro em equilíbrio eletrostático, na presença de cargas elétricas externas.

– A distribuição de cargas elétricas é igual àquela que existia no condutor maciço, porque ela cria campos elétricos que garantem o equilíbrio eletrostático do condutor. Nesse caso, o campo elétrico criado pelo bastão eletrizado negativamente na região limitada pela superfície do condutor é anulado pelos campos elétricos das cargas elétricas positivas e negativas induzidas nessa superfície. Esse fenômeno é denominado

blindagem eletrostática. Um condutor com uma cavidade é comumente denominado Gaiola de Faraday.

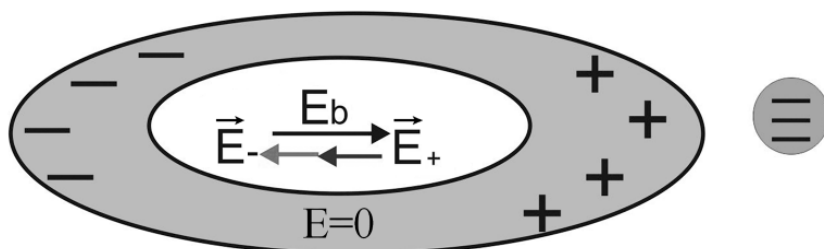


Figura 5.11: Campos elétricos produzidos pelo bastão e pelas cargas elétricas induzidas no condutor neutro.

Para fixar os conceitos ensinados, o professor passa o vídeo sobre blindagem eletrostática, alertando que ele foi produzido para o Ensino Fundamental. Por isso, ele trata a interação eletrostática com conceito de ação a distância. Todavia, isso não impede a visualização experimental da blindagem eletrostática.

No vídeo, a blindagem é realizada com uma gaiola condutora. Ronaldo questiona esse procedimento, uma vez que a discussão tinha sido realizada com um condutor com uma cavidade e com uma superfície fechada.

– A blindagem só é total se a superfície condutora for completamente fechada. Todavia, você acabou de perceber no vídeo que a blindagem também é muito forte quando utilizamos gaiolas. As gaiolas condutoras são denominadas gaiolas de Faraday.

Finalmente, o professor tinha explicado o que era uma Gaiola de Faraday. Ele continua falando.



Vídeo “Blindagem eletrostática”: Nesse vídeo são apresentados experimentos que mostram os fenômenos de blindagem e de aterramento de condutores. Ele está disponível no Portal TECA. Para acessá-lo, escolha o vídeo e digite ICF2_cederj.

– A blindagem é muito útil para nós. Por exemplo, em dias de tempestade, a permanência no interior de carros e ônibus, que são estruturas metálicas ocas, nos protegem dos raios. Outra situação em que a blindagem é útil é na proteção dos eletroeletrônicos da ação de campos elétricos criados nas regiões onde eles são colocados. Por isso, é comum encontrar eletroeletrônicos protegidos por caixas metálicas.

A menção de eletroeletrônicos lembra a Ronaldo uma observação ouvida recentemente de um eletricitista sobre a necessidade de aterrar os aparelhos elétricos, para evitar que as pessoas levem choque. Aproveita a discussão para entender o que havia sido dito.

– Professor, por que é necessário aterrar os aparelhos elétricos? O que significa isso?

O professor é chamado para uma reunião com o diretor e encerra a aula, prometendo uma explicação a seguir. A turma dispersa rapidamente para aproveitar o tempo livre inesperado.

Atividade 2

Atende ao Objetivo 2

Com base na seção que você acabou de ler (“Blindagem eletrostática”), responda à seguinte pergunta:

É possível proteger uma região do espaço contra a ação de campos elétricos (blindagem eletrostática)? Qual a importância prática da blindagem eletrostática?

[illegible]

Resposta Comentada

Um condutor com uma cavidade pode blindá-la contra a ação dos campos elétricos criados por cargas elétricas externas. A blindagem tem grande importância prática. Por exemplo, em dias de tempestade, a permanência no interior de carros e ônibus, que são estruturas metálicas ocas, nos protegem dos raios. Outra situação em que a blindagem é útil é na proteção dos eletroeletrônicos da ação de campos elétricos criados nas regiões onde eles são colocados. Por isso, é comum encontrar eletroeletrônicos protegidos por caixas metálicas.

Aterramento

O professor reúne os alunos e continua a aula, que foi interrompida pela reunião com o diretor.

– Agora, atendendo ao pedido do Ronaldo, vou explicar por que é importante aterrar os aparelhos elétricos.

Ele mostra à turma a figura de um condutor com uma cavidade, onde existe um bastão com cargas elétricas negativas.

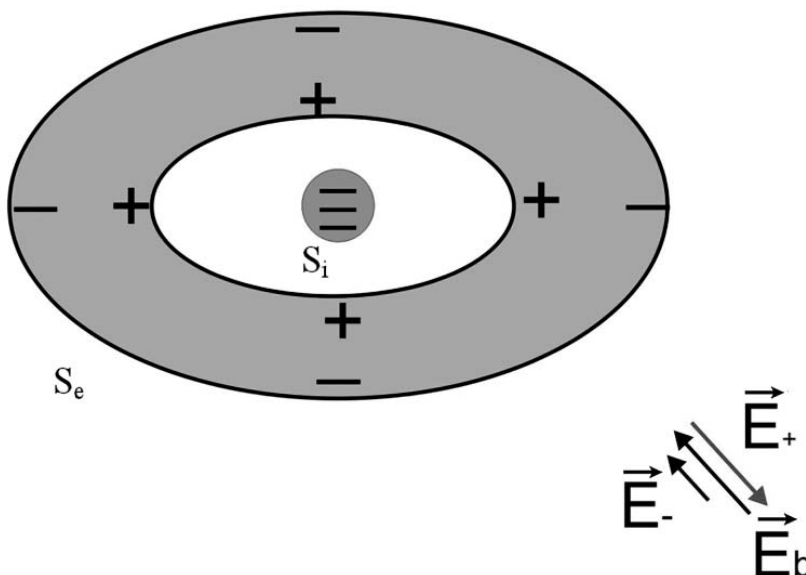


Figura 5.12: Campos elétricos produzidos pelo bastão e pelas cargas elétricas induzidas no condutor neutro.

As cargas elétricas negativas colocadas no interior da cavidade desse condutor neutro em equilíbrio eletrostático induzem, na superfície interna do condutor, cargas elétricas positivas. Como o condutor é neutro, igual quantidade de cargas elétricas negativas aparece na sua superfície externa. As cargas elétricas induzidas na *superfície interna* S_i do condutor *anulam* o campo elétrico criado pelas *cargas elétricas do bastão eletrizado negativamente na região fora da superfície S_i da cavidade*. Todavia, a carga elétrica induzida na superfície externa do condutor cria um campo elétrico em pontos externos a ele. Logo, um condutor com uma cavidade *não blind* o seu exterior contra a ação dos campos elétricos criados pelas cargas elétricas localizadas na sua cavidade.

Ronaldo comenta:

- Professor, isso que você está falando não faz sentido. Quando estou perto de aparelhos elétricos, não sinto a ação de nenhum campo elétrico.
- Calma, Ronaldo, ainda não terminei a minha explicação!
- Certo, professor.
- A *blindagem eletrostática* externa só vai ocorrer se as cargas elétricas induzidas na superfície externa do condutor forem retiradas.

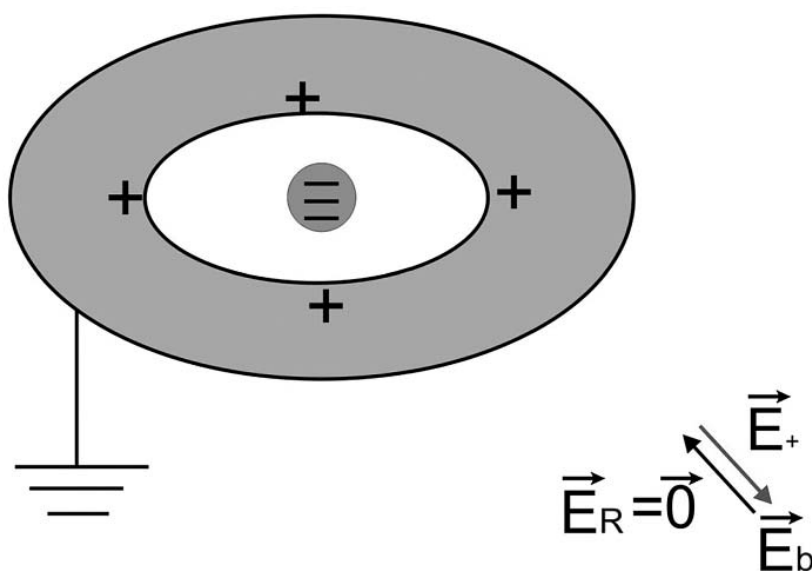


Figura 5.13: Campos elétricos produzidos pelo bastão e pelas cargas elétricas induzidas no condutor neutro que foi aterrado.

Para retirar as *cargas da superfície externa do condutor*, é suficiente ligá-lo a um condutor maior. Nesse caso, as cargas elétricas externas fluem livremente para o condutor maior. A quantidade de cargas que flui para o condutor maior depende da relação entre as dimensões do condutor e as dimensões do condutor maior. Como a Terra é um condutor grande, é comum utilizá-la para retirar cargas elétricas das superfícies externas de condutores em equilíbrio eletrostático. Por isso denominamos esse procedimento de aterramento. Nas suas residências, os aparelhos elétricos, como as geladeiras e as máquinas de lavar roupa, são aterradas para evitar que os campos elétricos criados pelas cargas elétricas produzidas nos seus interiores atuem no seu exterior. O aterramento também evita que as pessoas levem choques ao tocar nos aparelhos, uma vez que ele retira as cargas elétricas das superfícies condutoras que envolvem os aparelhos elétricos.

– Eu entendi o que você disse sobre aterramento. Mas é difícil acreditar nas suas informações.

– Eu concordo com você. Por isso, vou mostrar um vídeo sobre aterramento de condutores.

O professor passa para a turma o final do vídeo “Blindagem eletrostática”, que contém a discussão sobre o aterramento. A aula termina, mas Roberto permanece na sala por alguns minutos, tentando assimilar totalmente a explicação sobre o aterramento de condutores.

===== **Atividade 3** =====

Atende ao Objetivo 2

1. Com base nas seções que você acabou de ler (“Blindagem eletrostática” e “Aterramento”), responda à seguinte pergunta:

a) Por que um carro fechado nos protege dos raios de uma tempestade?

2. Se você está dirigindo um carro em dia de tempestade e ele é atingido por um raio, o que você deve fazer?

(a) Parar o carro, abrir a porta rapidamente, colocar o pé no chão segurando na porta e sair correndo?

(b) Encostar o carro em uma parede e depois sair do carro?

Respostas comentadas

1. Porque um condutor blindo o seu interior contra a ação dos campos elétricos criados pelas cargas elétricas produzidas pelos raios.

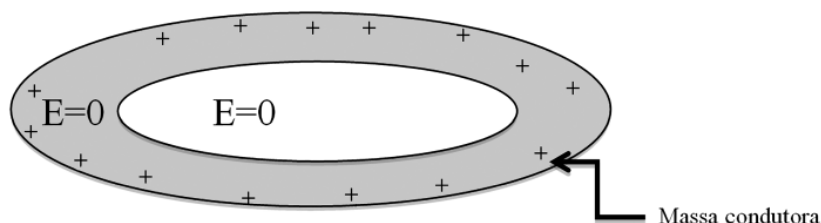


Figura 5.14: Campo elétrico de um condutor isolado em equilíbrio eletrostático.

2 (a) Não se deve parar o carro, abrir a porta e colocar o pé no chão para sair, uma vez que o corpo humano e a Terra são condutores. Dessa forma, a carga elétrica que está no carro descarrega para a Terra através do corpo humano.

Devemos encostar o carro em um poste e depois sair dele, uma vez que, dessa forma, a carga elétrica que está no carro passa para a Terra através do poste. Assim, os ocupantes do carro não serão atravessados por correntes elétricas.

Atividade Final

Atende aos Objetivos 1 e 2

Com base na seções que você acabou de ler (“Condutores em equilíbrio eletrostático”, “Blindagem” e “Aterramento”), faça o seguinte exercício:

A Figura 5.15a mostra uma pequena esfera condutora neutra *A* isolada. A Figura 5.15b mostra a esfera *A*, que estava neutra, na presença de uma esfera isolante *B* carregada positivamente. A Figura 5.15c mostra a esfera *A* após ser aterrada na presença da esfera *B*. A Figura 5.15d mostra

a esfera A após ser desaterrada na presença da esfera B e a Figura 5.15e mostra a esfera A após a esfera B ser afastada.

a) Desenhe esquematicamente nas Figuras 5.15a, 5.15b, 5.15c, 5.15d e 5.15e, a distribuição das cargas elétricas na superfície e no interior da esfera A . Justifique as suas respostas.

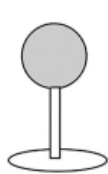


Figura 5.15a

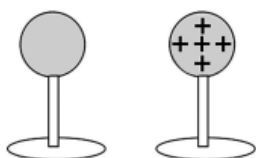


Figura 5.15b

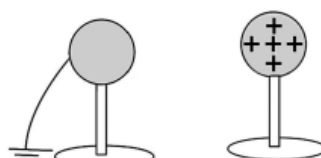


Figura 5.15c

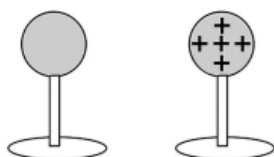


Figura 5.15d

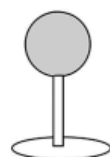
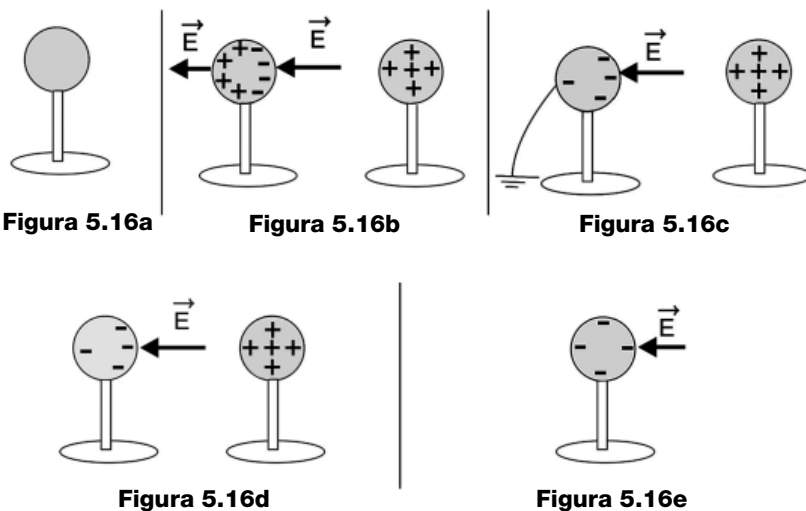


Figura 5.15e

b) Qual seria a distribuição de cargas elétricas e do campo elétrico da esfera A se a esfera B fosse afastada na situação da Figura 5.15c?

Respostas Comentadas



1. Na Figura 5.16a não existem cargas elétricas no interior e na superfície da esfera. Por isso, não existe campo elétrico também.

Na Figura 5.16b, os elétrons da esfera condutora foram atraídos pela carga elétrica positiva da esfera isolante. Como, em um condutor em equilíbrio eletrostático, as cargas elétricas se depositam na superfície do condutor, elas estão distribuídas na superfície da esfera condutora, como mostra a Figura 5.16b. O campo elétrico no interior da esfera A é nulo e perpendicular à superfície da esfera, com o sentido para dentro, sobre as cargas negativas, e para fora sobre as cargas positivas.

Na Figura 5.16c a esfera A foi aterrada. Logo, os elétrons da Terra se deslocam para a esfera, anulando sua carga elétrica positiva. O campo elétrico no interior da esfera A é nulo e perpendicular à superfície com o sentido para dentro da esfera.

Na Figura 5.16d, a distribuição de cargas elétricas e os campos elétricos são iguais aos da Figura 5.16c, porque apenas o fio que aterrava a esfera foi retirado. Supusemos aqui que a quantidade de cargas elétricas na superfície do fio era muito pequena.

Na Figura 5.16e, a distribuição de cargas elétricas é uniforme, o campo elétrico no interior da esfera é nulo e a superfície da esfera é radial.

2. Se a esfera A que estava na situação da Figura 5.16c for desaterrada, somente após a esfera B ser afastada, os elétrons da Terra neutralizam as cargas elétricas da esfera A. Logo, como no caso da Figura 5.16a, não

existem cargas elétricas no interior e na superfície da esfera. Por isso, não existe campo elétrico também.

Conclusão

Nesta aula, informamos que, por falta de ferramentas matemáticas, não é possível no Ensino Médio obter, a partir das leis da Física, as informações sobre a distribuição de cargas elétricas e do campo elétrico em condutores em equilíbrio eletrostático. Todavia, como essas informações são fundamentais para falar sobre fenômenos importantes, como a blindagem e o aterramento, resolvemos descrevê-las na medida do possível, utilizando como apoio vídeos e fotos.

Resumo

No que se refere aos condutores em equilíbrio eletrostático, podemos afirmar que:

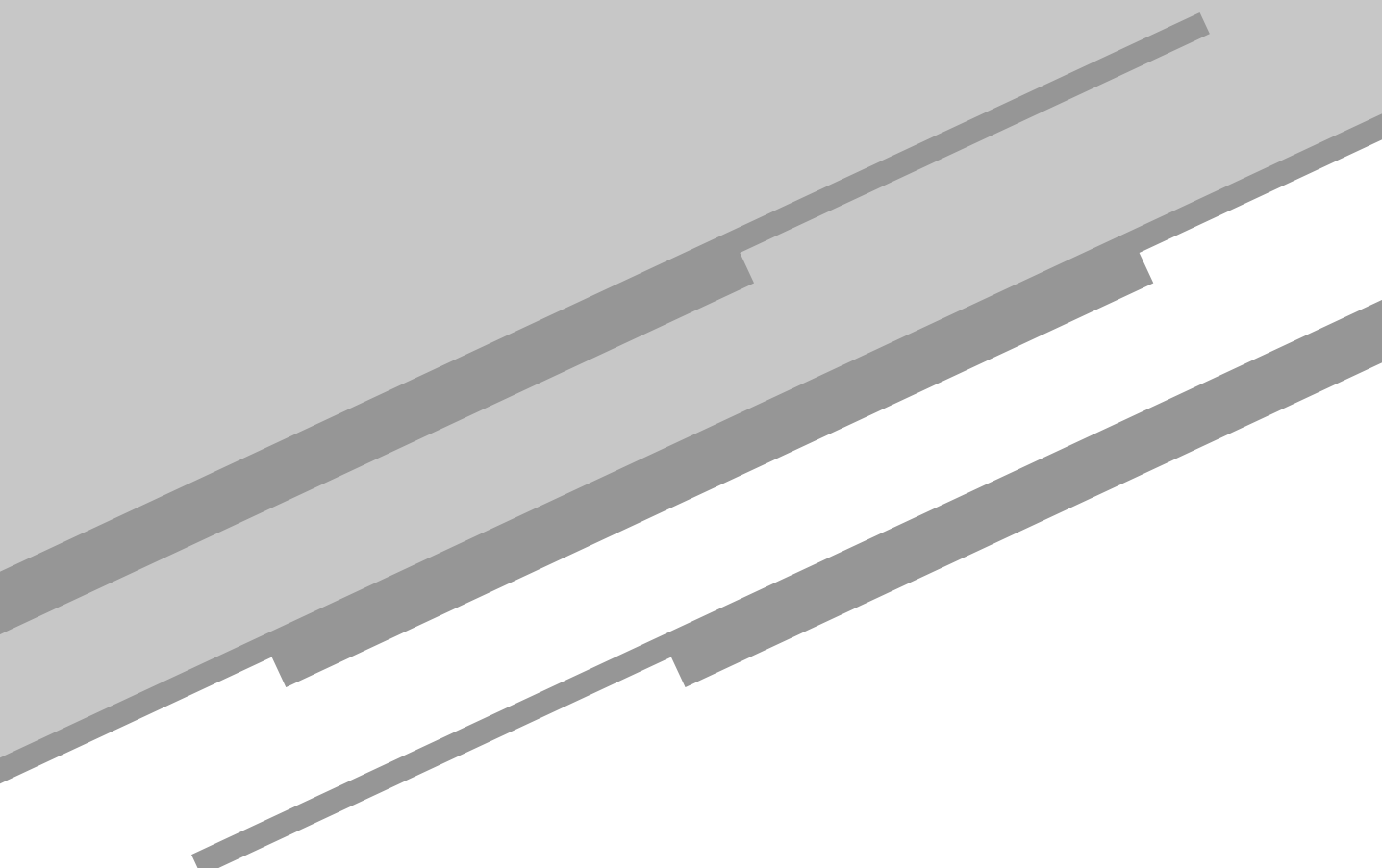
1. Em um condutor em equilíbrio eletrostático, o campo elétrico na massa condutora é nulo. O campo elétrico nas superfícies do condutor em equilíbrio eletrostático são perpendiculares a elas e criam forças elétricas sobre as cargas elétricas das superfícies, que apontam para fora do condutor.
2. Em um condutor em equilíbrio eletrostático, só existem cargas elétricas em suas superfícies. A densidade superficial de cargas é maior nas pontas dos condutores.
3. Um condutor com uma cavidade pode blindar a região da cavidade contra a ação dos campos elétricos criados por cargas elétricas externas.
4. As cargas elétricas colocadas na cavidade de um condutor oco induzem cargas elétricas nas superfícies internas e externas do condutor.
5. Aterrizar um condutor é ligá-lo a um condutor muito maior.
6. O aterramento do condutor retira as cargas elétricas induzidas na sua superfície externa .
7. Um condutor com uma cavidade não blindar a região externa a ele contra a ação dos campos elétricos criados por cargas elétricas colocadas no interior da cavidade. A blindagem externa só ocorre quando o condutor é aterrado.

Leituras recomendadas

Leia sobre distribuição de cargas em um condutor, blindagem eletrostática, poder das pontas, relâmpago, trovão e para-raios na seção “Eletricidade e Magnetismo” do livro de Antonio Máximo e Beatriz Alvarenga, *Física* - volume único.

Aula 6

Princípio da conservação da energia



Maria Antonieta Almeida

Metas

1. Discutir o princípio da conservação da energia;
2. definir trabalho de uma força constante em uma trajetória retilínea;
3. definir trabalho de uma força constante em uma trajetória curva;
4. definir potência associada a uma força;
5. definir energia cinética;
6. definir forças conservativas;
7. definir energia potencial gravitacional.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. descrever o princípio da conservação da energia;
2. calcular trabalho de forças constantes;
3. calcular variações de energia cinética;
4. utilizar o princípio da conservação da energia na resolução de problemas;
5. calcular potência associada a forças.

Pré-requisitos

Para se ter bom aproveitamento desta aula, é importante saber somar frações, elevar expressões a potências, conhecer o conceito de funções, e ter noções de geometria plana (ângulos, geometria dos triângulos), trigonometria básica (seno, cosseno, tangente, cotangente), vetores e Leis de Newton.

Esses conteúdos podem ser encontrados nos livros das disciplinas de Matemática Básica, Geometria Básica e no volume 2, módulo 2 de Introdução às Ciências Físicas 1.

Introdução

O mundo moderno é movido a energia. Se a energia acabasse, seria um caos porque as máquinas parariam e teríamos problemas para produzir alimentos, para nos transportar, para produzir roupas etc. Por isso, é importante conhecer os tipos de energia que existem e saber responder a perguntas simples, tais como:

1. Podemos criar energia?
2. Podemos destruir energia?
3. Podemos gastar de forma irresponsável a energia disponível no planeta Terra?

Nesta aula, discutiremos o princípio da conservação da energia, os conceitos de trabalho de forças constantes, a definição de energia cinética, a definição de forças conservativas e a possibilidade de definir a energia potencial gravitacional. Também será discutido o conceito de potência de uma força. Todas essas discussões serão apresentadas nas seções denominadas “Princípio da conservação da energia” e “Potência de uma força”. Antes da leitura desses textos, veja se você é capaz de responder às seguintes perguntas:

1. Escreva o princípio de Conservação da Energia.
2. O que são forças conservativas?
3. É possível definir uma energia potencial gravitacional? Por quê?
4. Qual a expressão da energia potencial gravitacional nas proximidades da Terra?
5. O que é a origem da energia potencial?
6. Defina o trabalho associado a uma força constante em uma trajetória retilínea.
7. Defina a potência associada a uma força.

Princípio da conservação da energia

São dez horas da noite. Ronaldo está revendo o conceito de energia, porque o seu professor de eletricidade avisou que, para dar prosseguimento ao estudo da eletricidade, precisa que os alunos entendam o princípio da conservação da energia. Ele fará um teste sobre esse assunto na próxima semana. Apesar de já ter estudado o conceito de energia,

ele ainda tem dificuldades no assunto. Por isso, resolve pedir ajuda à sua irmã Fátima.

– Fátima, estou tentando entender o princípio da conservação da energia, mas está difícil. Você pode me ajudar?

– Fátima entrega para Ronaldo um texto do físico Richard P. Feynman sobre os princípios de conservação e uma lista de exercícios de mecânica da partícula. E determina:

– Já é muito tarde. A conversa sobre energia 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 discutir com você o conceito de energia, é preciso que você leia o texto do Feynman e resolva alguns problemas de dinâmica da partícula.

Fátima volta aos seus estudos e esquece o irmão.

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

– Irmãzinha, o Feynman é fantástico! Confesso que não estava com a menor vontade de fazer o que você me pediu. Mas, como tenho prova na semana que vem, resolvi atendê-la. Podemos discutir o texto dele?

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 esteja 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 noutra. 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 de “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.

Ela, então, 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; além de um cubo caído fora do quarto, pois a criança havia 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, dividir pelo peso de um cubo, e somar ao número de cubos que ela já encontrou, ou

$$\text{Número de cubos} = \text{Número de cubos visíveis} + \frac{\text{Peso da caixa} - \text{Peso da caixa vazia}}{\text{Peso do cubo}},$$

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

$$\begin{aligned} \text{Número de cubos} = & \text{Número de cubos visíveis} + \frac{\text{Peso da caixa} - \text{Peso da caixa vazia}}{\text{Peso do cubo}} + \\ & + \frac{\text{Variação da altura da água suja}}{0,5} \end{aligned}$$

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. É como se a pobre mãe pudesse adicionar aos 21 cubos inteiros um valor calculado de 49/8 cubos e um outro valor calculado de 7/8 cubos, dando um total de 28 cubos. 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 devido 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 $E_c = \frac{mv^2}{2}$. 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 estabelece 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.

Ronaldo entrega o primeiro exercício. Fátima observa a sua resolução.

===== **Atividade 1** =====

Atende ao Objetivo 3

Com base na seção que você leu (“Princípio da conservação da energia”) e dos seus conhecimentos de dinâmica da partícula, resolva o seguinte exercício:

Uma pedra de 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.

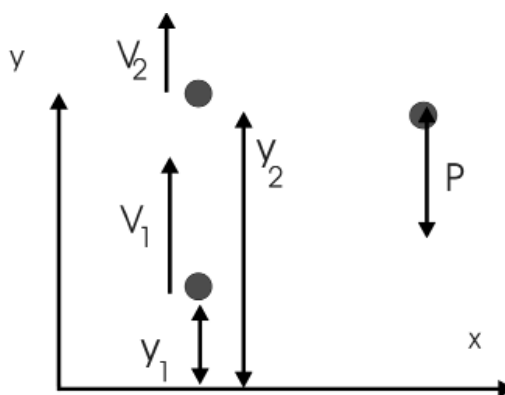


Figura 6.1: Invariantes na queda livre.

Respostas Comentadas

Pela aplicação da segunda Lei de Newton temos que:

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

Movimento 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 $\frac{mv^2}{2} + mgy + C$ 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 na subida da pedra, enquanto a função $mgy + C$ está aumentando. Já na descida da pedra, a energia cinética está aumentando enquanto a função $mgy + C$ está diminuindo. 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.

– 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 .

$$E_{p_2} - E_{p_1} = mgy_2 + C - (mgy_1 + C) = mg(y_2 - y_1)$$

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 po-

tencial 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 para 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 para 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).

Fátima concorda e solicita a resolução do segundo exercício. Antes de entregá-la, Ronaldo observa a resolução do segundo problema e faz com a variação da energia cinética a mesma manipulação matemática que Fátima fez no problema 1.

Atividade 2

Atende ao Objetivo 3

De acordo com a seção que você leu (“Princípio da conservação da energia”) e dos seus conhecimentos de dinâmica da partícula, resolva o seguinte exercício.

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.

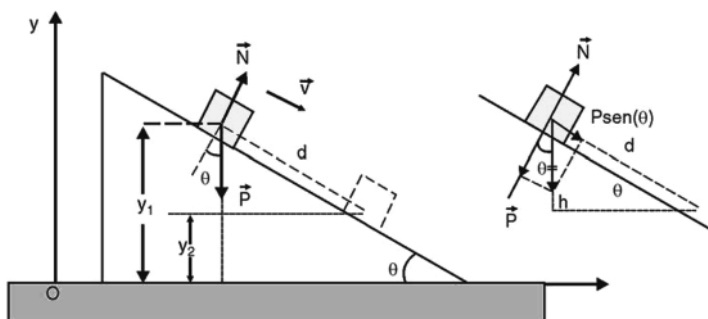


Figura 6.2: Invariantes em um plano inclinado liso

Respostas Comentadas

a) Aplicação da segunda Lei de Newton fornece $\vec{N} + \vec{P} = m\vec{a}$. A componente da força 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 $P \sin(\theta)$. Portanto, a aceleração da massa pode ser calculada da seguinte forma:

$$P \sin \theta = ma \Rightarrow mg \sin(\theta) = ma \Rightarrow a = g \sin(\theta), \text{ onde } \sin(\theta) = \frac{h}{d}$$

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

$$v_2^2 - v_1^2 = -2g \sin(\theta)d = -2gh = -2g(y_2 - y_1) \Rightarrow$$

$$\frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = -mg(y_2 - y_1)$$

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

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

b) A massa e a energia mecânica são os invariantes do movimento.

Fátima recebe a resolução que Ronaldo fez e diz que ela está correta.

Ronaldo 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?

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.

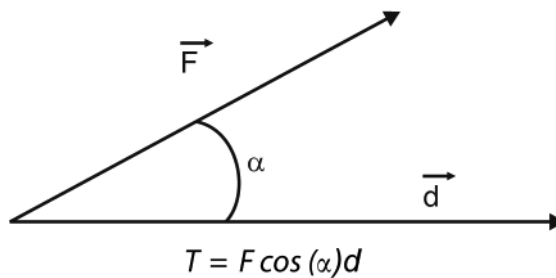


Figura 6.3: Trabalho de uma força constante.

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

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

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. A energia potencial é sempre definida de tal forma que a energia potencial associada à 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 à custa 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° . O cosseno de um ângulo maior do que 90° 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?

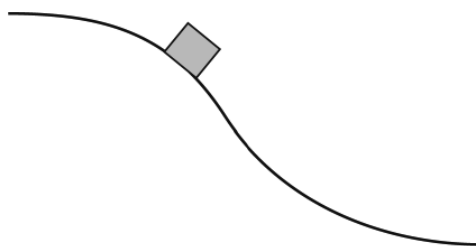


Figura 6.4: Invariantes em uma superfície lisa.

– É possível demonstrar que a expressão da energia potencial 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 mais escura da **Figura 6.5**), a massa se desloca em planos inclinados.

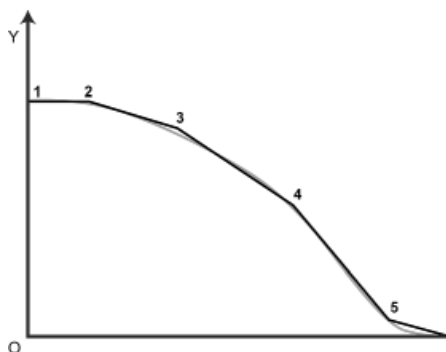


Figura 6.5: Trabalho de uma força constante em uma superfície lisa.

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:

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

Simplificando:

$$\begin{aligned} \frac{mv_6^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} &= -mg(y_6 - y_5) - mg(y_5 - y_4) - mg(y_4 - y_3) - \\ &- mg(y_3 - y_2) - mg(y_2 - y_1) \Rightarrow \\ \frac{mv_6^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} &= -mg(y_6 - y_1) \Rightarrow \frac{mv_6^2}{2} + mgy_6 = \frac{mv_1^2}{2} + mgy_1 \end{aligned}$$

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?

– O terceiro exercício que você fez vai ajudar a responder esta pergunta.

Ronaldo entrega o terceiro exercício para a irmã.

Atividade 3

Atende ao Objetivo 3

Com base na seção que você leu (“Princípio da conservação da energia”) e dos seus conhecimentos de dinâmica da partícula resolva o seguinte exercício.

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 da distância d percorrida pela massa, da força de atrito e da aceleração da gravidade g ;

b) as constantes do movimento.

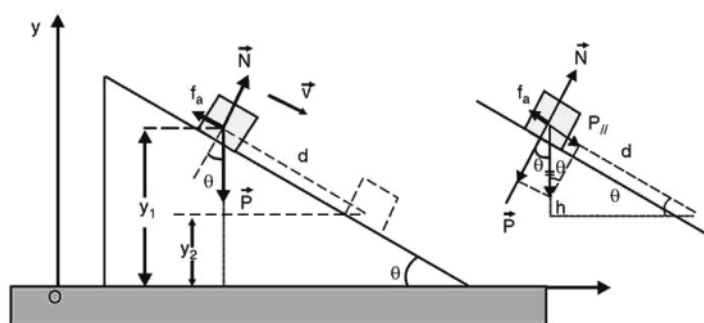


Figura 6.6: Plano inclinado com atrito.

Respostas Comentadas

a) 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 $-fa$. Portanto, a aceleração da massa pode ser calculada da seguinte forma:

$$P \text{sen} \theta - f_a = ma \Rightarrow mg \text{sen}(\theta) - fa = ma \Rightarrow a = g \text{sen}(\theta) - \frac{f_a}{m},$$

em que $\text{sen}(\theta) = \frac{h}{d}$. Esse movimento é uniformemente acelerado. Pela equação de Torricelli temos:

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

$$\frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = -mg(y_2 - y_1) - 2f_a d$$

b) 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.

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

– 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.

– Fátima, como se expressa o princípio da conservação da energia neste caso?

– Podemos simplesmente escrever que: $\Delta E_M + Q = 0$,

sendo $E_M = \frac{mv^2}{2} + mgy$ e o calor $Q = -f_a \cdot d$.

Ronaldo comenta:

– 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.

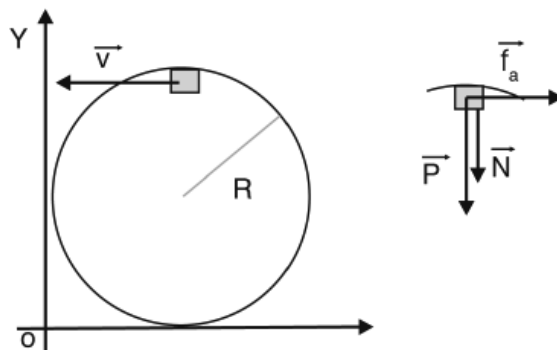


Figura 6.7: Círculo vertical com atrito.

– É complicado mesmo. Vou dar um exemplo: imagine uma massa se deslocando em uma superfície circular vertical com atrito (veja **Figura 6.7**). A velocidade da massa vai diminuindo à medida que a massa percorre a superfície. Finalmente ela para. 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 con-

trapartida, a energia calorífica que ela recebe a cada vez que está no ponto mais alto da sua trajetória depende da volta: certamente ela recebeu uma quantidade de energia calorífica maior (energia calorífica total) 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. O seu trabalho depende da trajetória. Por isso, ela não é **conservativa**.

– Fátima, me ensinaram que a unidade de energia cinética era o joule (J). Posso afirmar que todos esses novos tipos de energia têm a mesma unidade?

– É claro que sim. Você não pode adicionar grandezas físicas com unidades diferentes.

Fátima escuta o anúncio do noticiário das onze horas na televisão. Não tinha percebido a hora passar. Beija o irmão e vai para o seu quarto.

Ronaldo volta ao seu quarto e revê o último tópico do capítulo sobre energia, denominado “Potência de uma força”.

Potência de uma força

As forças fornecem ou retiram energia de um sistema quando elas realizam trabalho sobre eles. A informação sobre a velocidade com que uma força modifica a energia de um sistema é de grande importância no cotidiano. Por exemplo, quando um operário de um caminhão de mudança empurra uma geladeira sobre um plano inclinado para colocá-la dentro do caminhão, ele pode fazer o serviço devagar ou depressa. Se ele fizer o serviço devagar, ele cansa menos os seus músculos e leva mais tempo. Se ele fizer depressa, ele se cansa mais e leva menos tempo. Para o operário é conveniente encontrar uma solução que otimize o cansaço e o tempo, isto é, ele tem que encontrar a potência ideal. A potência associada a uma força é definida como o trabalho associado à força por unidade de tempo, isto é,

$$P = \frac{T}{t}$$

A unidade de potência é *Joule/s*, que é denominada Watt (W).

Força conservativa

Força cujo trabalho não depende da trajetória. Ela não dissipa energia nem fornece energia a um sistema. Ela só transforma a energia potencial associada a ela em outro tipo de energia.

Atividade 4

Atende aos Objetivos 1, 2, 3, 4 e 5

Conforme as seções que você leu (“Princípio da conservação da energia” e “Potência de uma força”), responda às seguintes questões.

a) Escreva o princípio de conservação da energia.

b) O que são forças conservativas?

c) É possível definir uma energia potencial gravitacional? Por quê?

d) Qual a expressão da energia potencial gravitacional nas proximidades da Terra?

e) O que é a origem da energia potencial?

f) Defina o trabalho de uma força constante em uma trajetória retilínea.

g) Defina a potência associada a uma força.

Respostas Comentadas

a) A energia de um sistema isolado é constante.

b) Forças conservativas são as forças cujos trabalhos não dependem das trajetórias. Elas não dissipam energia nem fornecem energia a um sistema. Elas só transformam parte da energia do sistema nas energias potenciais associadas a elas ou transformam as energias potenciais associadas a elas em outros tipos de energia.

c) Sim, porque o trabalho da força peso não depende da trajetória. A força peso não dissipa energia. Ela só transforma parte da energia do sistema em energia potencial gravitacional ou transforma a energia potencial gravitacional em outros tipos de energia.

d) A energia potencial gravitacional próxima à superfície da Terra é $E_p = mgy + C$. Essa expressão só é válida se o eixo OY coincide com o eixo vertical e se ele aponta para cima. Se o eixo vertical apontar para baixo, a energia potencial gravitacional é dada por $E_p = -mgy + C$. Essa mudança de sinal é necessária porque a energia potencial tem que aumentar à medida que o ponto se afasta da Terra. Isso só é verdade, quando o eixo aponta para baixo, se existir um sinal negativo na expressão da energia potencial gravitacional.

e) A origem da energia potencial é o ponto onde a energia potencial é nula.

f) O trabalho de uma força constante em uma trajetória retilínea é, por definição, o produto da componente da força na direção do seu deslocamento pelo módulo do seu deslocamento, isto é, $T(\vec{F}) = F \cos(\theta) d$.

g) A potência associada a uma força é o trabalho fornecido pela força

por unidade de tempo, isto é, $P = \frac{T}{t}$ sendo T o trabalho e t o tempo em que a força é aplicada.



Atividade 5

Atende aos Objetivos 1, 2, 3 e 4

Com base na seção que você leu (“Princípio da conservação da energia”) e dos seus conhecimentos de dinâmica da partícula, resolva o seguinte exercício:

Um bloco é lançado sobre um plano inclinado e atinge o ponto A com velocidade $\vec{v}_0 = 4\text{ m/s} \hat{i}$ (**Figura 6.8**). Existe atrito entre o bloco e o plano. O ângulo θ que o plano forma com a horizontal vale 30° . Despreze a resistência do ar. A variação da altura do bloco quando ele vai do ponto A até ponto B representado na **Figura 6.8** é de 0,5m. O bloco sobe o plano inclinado sem girar. Resolva o problema do referencial da Terra considerado inercial. Considere $g = 10\text{ m/s}^2$. Utilize o sistema de eixos do desenho.

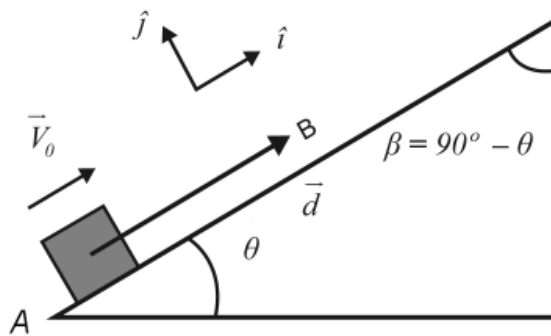


Figura 6.8: Bloco subindo um plano inclinado com atrito.

- a) Desenhe o bloco separado do exterior e coloque todas as forças que atuam sobre ele, quando ele está subindo o plano inclinado.

O bloco inverte o seu movimento no ponto B. Calcule no ponto B as seguintes grandezas:

- b) a variação da energia cinética do bloco;
- c) a variação da energia potencial do bloco;

d) o trabalho da força peso;

e) o trabalho da força normal;

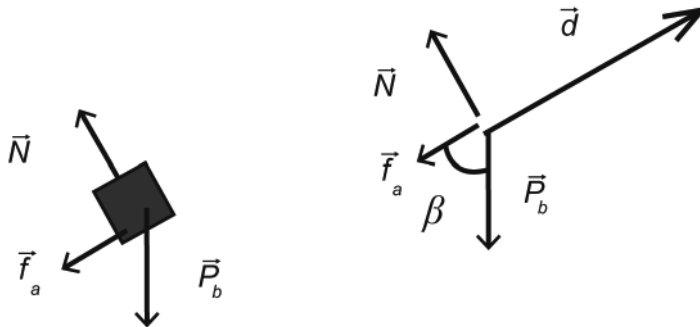
f) o calor produzido pela força de atrito;

g) o trabalho da força e atrito;

h) o coeficiente de atrito entre o bloco e o plano inclinado.

Respostas Comentadas

a)

**Figura 6.9:** Diagrama de forças do bloco.

Estão em contato com o bloco o plano inclinado e o ar. Logo, somente o ar e o plano inclinado podem exercer forças de contato sobre o bloco. Como o problema manda desprezar as forças que o ar exerce sobre o bloco, somente o plano inclinado pode exercer forças de contato sobre o bloco. As forças de contato que o plano inclinado exerce sobre o bloco são a normal \vec{N} e a força de atrito \vec{P}_b . A força de atrito aponta para a base do plano porque o bloco está deslizando para cima do plano. A única força gravitacional não desprezível que atua no bloco é o seu peso \vec{f}_a . As forças de contato e a força peso foram representadas na **Figura 6.9**.

b) A variação da energia cinética do bloco é dada por:

$$\Delta E_C = \frac{mv_B^2}{2} - \frac{mv_A^2}{2} = 0 - \frac{mv_o^2}{2} = -\frac{(1\text{kg})(3\text{m/s})^2}{2} = -8\text{J}$$

c) Para calcular a variação de energia potencial do bloco vamos utilizar um eixo vertical OY' apontando para cima com origem coincidindo com o ponto A (**Figura 6.10**).

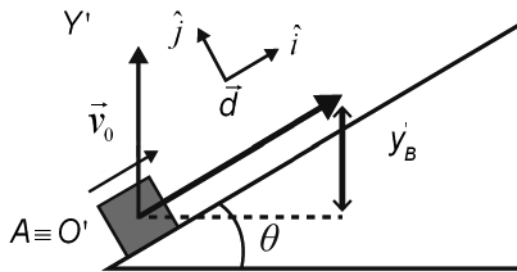


Figura 6.10: Eixo $O'Y'$ utilizado para o cálculo da energia potencial gravitacional do bloco.

Neste caso, a energia potencial do bloco é dada por:

$E_p = mgy'$. Logo a variação de energia potencial é dada por:

$$\Delta E_p = mgy'_B - mgy'_A = (1\text{kg})(10\text{m/s}^2)(0,7\text{m}) = 7\text{J}$$

d) O trabalho da força peso pode ser calculado diretamente da definição de trabalho ou através da relação entre o trabalho da força peso e a variação de energia potencial gravitacional.

Da relação entre o trabalho da força peso e a energia potencial gravitacional temos que:

$$T(\vec{P}_b) = -\Delta E_p = mgy'_B - mgy'_A = -7,0\text{J}$$

Da definição do trabalho da força peso temos que:

$$T(\vec{P}_b) = P_b d \cos(180^\circ - \beta) = mgd \cos(180^\circ - (90^\circ - \theta)) = mg \cos(90^\circ + 30^\circ)$$

$$T(\vec{P}_b) = mg (\cos(90^\circ) \cos(30^\circ) - \sin(90^\circ) \sin(30^\circ)) = -mg d \sin(30^\circ)$$

Pela **Figura 6.10** temos que:

$$y'_B = d \sin(30^\circ)$$

Logo o trabalho da força peso é dado por:

$$T(\vec{P}_b) = -mg d \sin(30^\circ) = -mg y'_B = -(1\text{kg})(10\text{m/s}^2)(0,7\text{m}) = -7,0\text{J}$$

e) O trabalho da força normal é dado por:

$$T(\vec{N}) = N.d.\cos(90^\circ) = 0\text{J}$$

f) O calor dissipado pela força de atrito pode ser calculado utilizando-se o princípio da conservação da energia.

$$\Delta E_M + Q = 0 \Rightarrow \Delta(E_C + E_p) + Q = 0 \Rightarrow \Delta E_C + \Delta E_p + Q = 0$$

$$Q = -\Delta E_C - \Delta E_p = -8J + 7J = -1J$$

g) O trabalho da força de atrito é igual ao calor dissipado, isto é,

$$T(\vec{f}_a) = Q = -1J$$

h) Podemos calcular a força de atrito utilizando o valor encontrado para o trabalho realizado por ela.

$$\begin{cases} T(\vec{f}_a) = f_a d \cos(180^\circ) = -f_a d = -1J \\ y'_B = d \cdot \sin(30^\circ) = \frac{d}{2} \end{cases} \Rightarrow$$

$$f_a = -\frac{T(\vec{f}_a)}{d} = -\frac{T(\vec{f}_a)}{2 \cdot y'_B} = -\frac{-1J}{(1,4m)} = \frac{10}{14} N \cong 0,7N$$

Atividade 6

Atende aos Objetivos 1, 2, 3, 4 e 5

Com base na seção que você leu (“Princípio da conservação da energia” e “Potência de uma força”) e dos seus conhecimentos de dinâmica da partícula, resolva o seguinte exercício.

Um homem empurra uma caixa ladeira acima. A caixa está sobre um carrinho com rodas. A massa do sistema formado pela caixa e pelo carrinho vale 20kg. O ângulo θ que a ladeira faz com a vertical é igual a 60° . A força que o homem exerce sobre a caixa é uma força paralela à ladeira. A caixa se desloca sobre a ladeira com uma velocidade constante de 1,8km/h. Despreze o atrito entre as rodas do carrinho e a ladeira.

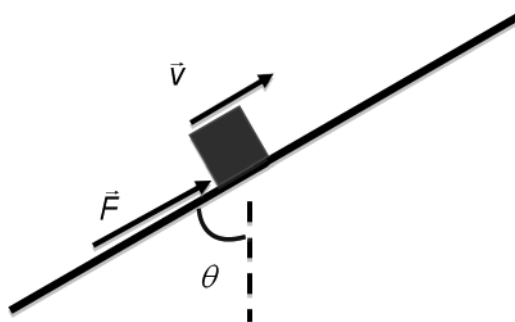


Figura 6.11: Caixa sendo empurrada sobre o plano inclinado.

- a) Qual o valor do módulo da força que o homem exerce sobre o carrinho?
- b) Qual a potência que está sendo fornecida à caixa?
- c) Qual a energia que será fornecida à caixa em 5 minutos?
- d) Em que tipo de energia a energia fornecida à caixa está se transformando?

Respostas Comentadas

a) Para encontrar o valor da força \vec{F} vamos aplicar a segunda Lei de Newton ao sistema formado pelo carrinho e pela caixa. As forças que atuam no sistema formado pelo carrinho e pela caixa são o normal \vec{N} , a força \vec{F} e o peso da caixa \vec{P}_c (**Figura 6.12**).

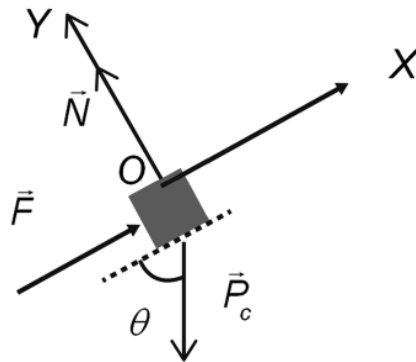


Figura 6.12: Diagrama de forças sobre a caixa

Logo pela segunda lei de Newton temos que:

$$\vec{N} + \vec{P}_c + \vec{F} = m\vec{a} = \vec{0} \Rightarrow N_x + P_x + F_x = 0 \Rightarrow F_x = -P_x = mg \cos(\theta)$$

$$F_x = F = (20\text{kg})(10\text{m/s}^2) \cos(60^\circ) = 100\text{N}$$

b) Potência fornecida ao bloco é o trabalho da força \vec{F} por unidade de tempo, isto é,

$$P = \frac{T(\vec{F})}{t} = \frac{F d \cos(0^\circ)}{t} = F \frac{d}{t} = F v$$

A velocidade da caixa em m/s é dada por:

$$v = \frac{1,8 \cdot 10^3 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = 0,5 \text{ m/s}$$

Logo a potência fornecida à caixa é dada por:

$$P = F v = (100N).(0,5m/s) = 50W$$

c) A energia fornecida à caixa em cinco minutos é igual ao trabalho realizado pela força \vec{F} , isto é,

$$T(\vec{F}) = P t = (50W)(5.60s) = 3000J$$

e) A energia fornecida à caixa é transformada em energia potencial gravitacional, uma vez que a energia cinética do sistema fica constante e não existe dissipação de energia porque a força de atrito é desprezível.

Conclusão

O princípio da conservação da energia afirma que a energia não pode ser criada, isto é, ela pode ser apenas transformada. Esse princípio não cria nenhuma dificuldade teórica para uma sociedade cujo consumo de energia é muito alto. Todavia, existe um outro princípio da Física que afirma que existe degradação de energia em processos nos quais há produção de calor, isto é, parte da energia transformada pode se tornar inacessível para ser utilizada em nossas máquinas. Por isso, é muito importante economizar a energia disponível na Terra.

Resumo

1. Princípio da conservação da energia: “A energia de um sistema isolado se conserva.”
2. A energia potencial gravitacional nas vizinhanças da superfície da Terra é $E_p = mgy + C$.
3. A constante C não tem significado físico e pode assumir qualquer valor finito. Utilizaremos $C=0$.
4. A origem da energia potencial gravitacional é o ponto onde a energia potencial gravitacional é nula.

5. O trabalho de uma força constante em uma trajetória retilínea é, por definição, o produto da componente da força na direção do seu deslocamento pelo módulo do seu deslocamento, isto é, $T(\vec{F}) = F \cos(\theta) d$.

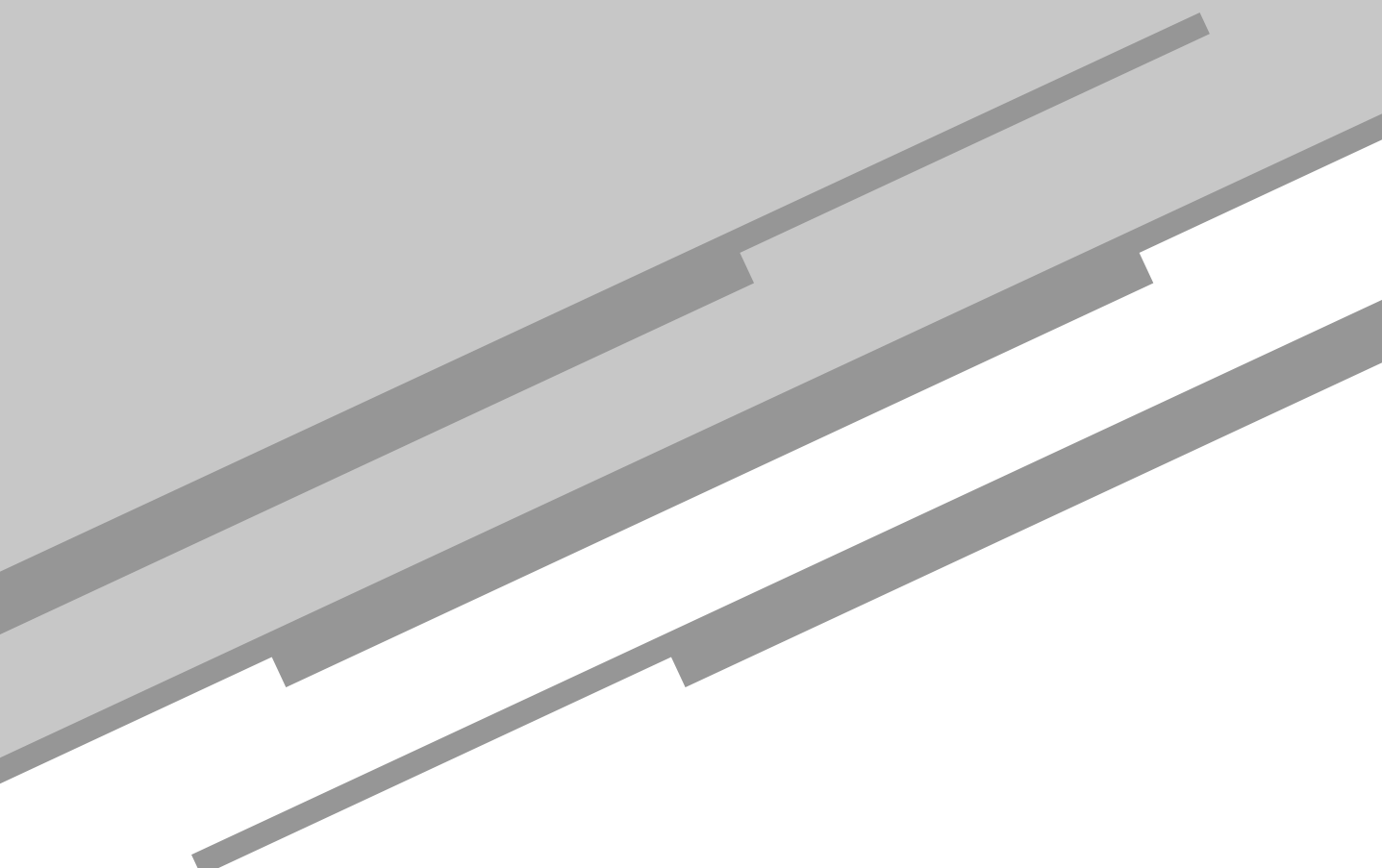
6. A potência associada a uma força é $P = \frac{T}{t}$, sendo T o trabalho da força e t o tempo no qual a força atua.

Leituras recomendadas

Leia sobre os assuntos trabalho de uma força, potência, energia cinética e energia potencial-conservação da energia na unidade “Trabalho e energia” do livro *Física* - volume único de A. Máximo e B. Alvarenga.

Aula 7

A energia potencial elétrica
e o potencial elétrico



Metas

Definir a energia potencial elétrica, o potencial elétrico, as superfícies equipotenciais e obter a relação entre potencial elétrico e campo elétrico.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. calcular a energia potencial elétrica de uma carga elétrica em um campo elétrico constante;
2. calcular o potencial elétrico de um campo elétrico constante;
3. obter de forma qualitativa as propriedades do campo elétrico através das superfícies equipotenciais;
4. calcular o campo elétrico a partir do potencial elétrico;
5. relacionar o trabalho da força elétrica com a variação de energia potencial elétrica.

Pré-requisitos

Para se ter bom aproveitamento desta aula, é importante que se saiba somar frações, elevar expressões a potências, conhecer o conceito de funções, o princípio da conservação da energia e as expressões da energia cinética e da energia potencial gravitacional, ter noções de geometria plana (ângulos, geometria dos triângulos), trigonometria básica (seno, cosseno, tangente, cotangente), vetores e das Leis de Newton.

Esses conteúdos podem ser encontrados nos livros das disciplinas de Matemática Básica, Geometria Básica, Introdução às Ciências Físicas 1 e nas aulas deste módulo.

Introdução

O mundo moderno utiliza grande quantidade de energia elétrica, que alimenta os computadores, as geladeiras, as lâmpadas etc. Por isso, é importante entendê-la com profundidade. A energia elétrica é uma energia potencial. A existência de uma energia potencial elétrica permite definir o potencial elétrico. A diferença de potencial elétrico é conhecida popularmente como voltagem. Você já ouviu falar sobre a voltagem de uma pilha, a voltagem que deve ser fornecida à sua geladeira, ao seu computador etc.

Nesta aula, discutiremos os conceitos de energia elétrica e de potencial elétrico, e aprenderemos a relacionar o campo elétrico com o potencial elétrico. A discussão sobre esses tópicos estão nas seções denominadas “O defeito na lâmpada” e “Uma aula de voltagem para vestibulandos”. Antes da leitura dessas sessões, veja se você é capaz de responder às seguintes perguntas:

1. É possível definir uma energia potencial elétrica? Por quê?
2. Qual a energia potencial elétrica associada a uma carga elétrica pontual, localizada em uma região do espaço onde existe um campo elétrico paralelo ao eixo OY , com o sentido contrário a esse eixo e com módulo constante E ?
3. A energia potencial elétrica associada à carga elétrica pontual q , localizada em uma região onde existe um campo elétrico, tem alguma arbitrariedade na sua definição? Qual?
4. Qual o valor da energia potencial elétrica no ponto que é escolhido como sua origem?
5. A energia potencial elétrica muda quando a sua origem é deslocada para outro ponto? E a diferença de energia potencial elétrica entre dois pontos?
6. O que é potencial elétrico?
7. Qual a expressão do potencial elétrico em uma região do espaço onde existe um campo elétrico paralelo ao eixo OY , com o sentido contrário ao desse eixo e com módulo constante E ?
8. O que é origem do potencial?
9. O potencial elétrico muda quando sua origem é deslocada para outro ponto? E a diferença de potencial entre dois pontos?

10. Marque a alternativa correta:

- a. () As cargas elétricas positivas e negativas se deslocam espontaneamente para as regiões em que o potencial elétrico é menor.
- b. () 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.

11. O que é uma superfície equipotencial?

12. Qual a direção do campo elétrico na superfície equipotencial?

13. É possível calcular o campo elétrico quando se conhece o potencial elétrico em todo o espaço? De que forma?

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 na área.

– E você, chefe, 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?

– Ronaldo, no momento estou muito ocupada. Espere a aula de Física sobre voltagem .

Ronaldo volta aos seus estudos sem reclamar; afinal de contas, se a irmã, que sempre atendia aos seus pedidos para explicar suas dúvidas de Física, recusou-se a fazê-lo naquele momento, era porque ela devia estar muito ocupada mesmo.

Uma aula de voltagem para vestibulandos

Ronaldo está refletindo sobre o texto “Os grandes princípios de conservação”, de Feynman. A ideia 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 elétrica, e começa a aula relembrando 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.

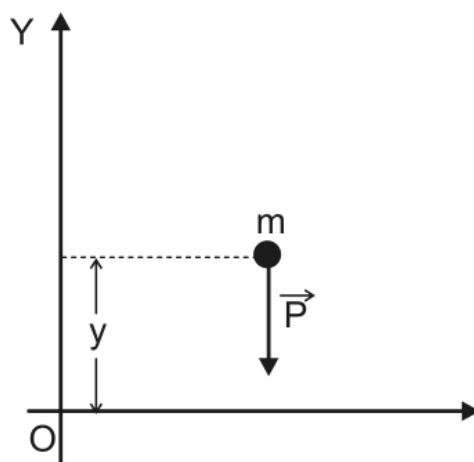


Figura 7.1: Massa em queda livre.

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, chama-se 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 um campo elétrico 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 por 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 à Terra é muito menor do que o raio da Terra (6.400km). Isso ocorre na maioria dos problemas que vocês estudam em Mecânica. Nessas 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 a 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.

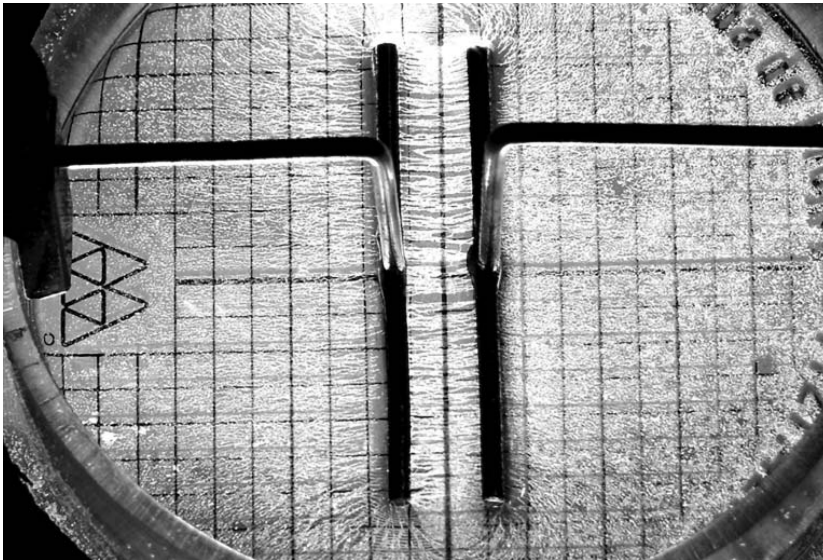


Figura 7.2: Alinhamento do fubá na presença de dois terminais lineares carregados com cargas de módulos iguais e sinais opostos.

– 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 delas forem bem maiores do que a distância entre elas.

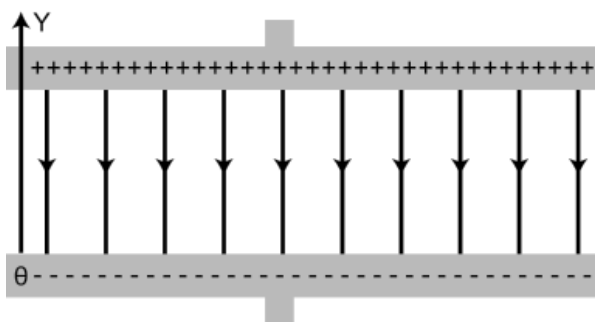


Figura 7.3: Capacitor plano.

O professor continua a aula.

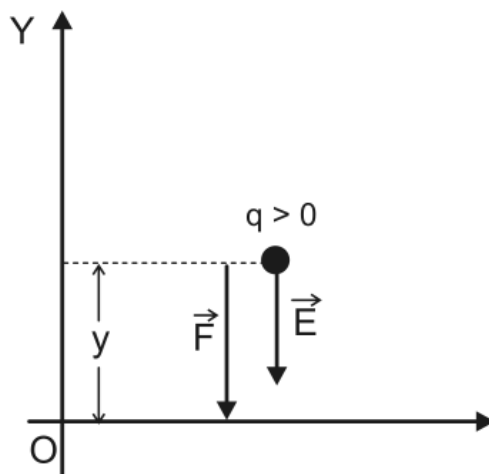


Figura 7.4: Deslocamento de uma carga elétrica positiva em uma região onde existe um campo elétrico constante.

– 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?

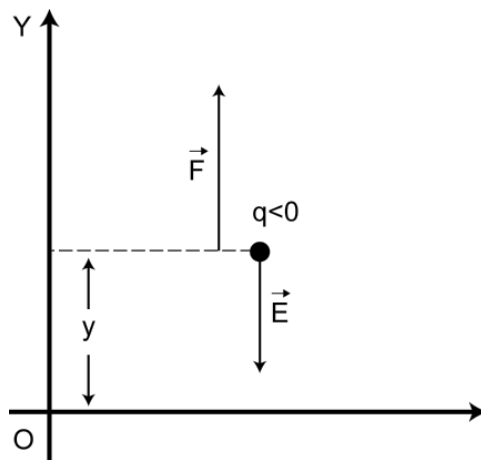


Figura 7.5: Deslocamento de uma carga elétrica negativa em uma região onde existe um campo elétrico constante.

– 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

decrecente de y . Esse fato é contemplado pela expressão anterior, pois q é um número negativo.

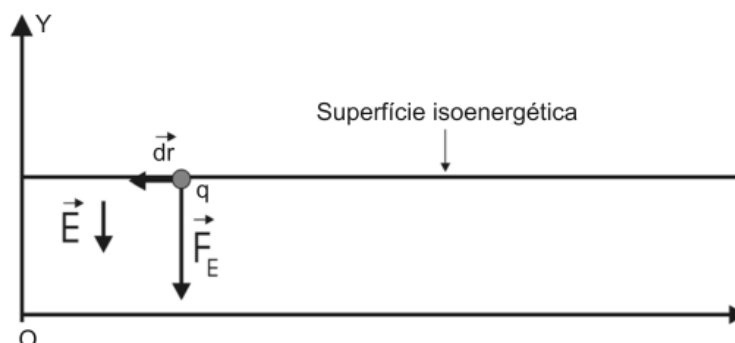


Figura 7.6: Superfície isoenergética.

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 essas superfícies.

Ronaldo lembra-se da irmã com carinho. A discussão que fizera com ele sobre o princípio da conservação da energia 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 .

$$V = \frac{U_E}{q} = Ey$$

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.

A observação do nosso exemplo permite tirar algumas conclusões:

1. As cargas elétricas positivas se deslocam espontaneamente para as regiões de menor potencial elétrico (menor energia potencial), e as negativas, para as regiões de maior potencial elétrico (menor energia potencial).

2. O potencial elétrico é maior nas regiões próximas às cargas positivas.

3. O campo elétrico aponta para as regiões onde o potencial elétrico é menor.

4. O campo elétrico é perpendicular às superfícies equipotenciais.

5. A relação entre o módulo do campo elétrico e a variação da energia potencial na sua direção é $E = \frac{|\Delta V|}{|\Delta y|}$, em que $|\Delta y|$ 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.

Ronaldo reclama:

– Não compreendo a razão pela qual os resultados obtidos para campos elétricos constantes também são válidos para campos elétricos que variam no espaço.

O professor retira da sua pasta um texto sobre energia potencial elétrica e trabalho de forças variáveis e o entrega para Ronaldo.

– A leitura desse texto vai ajudá-lo a aceitar melhor a generalização dos resultados obtidos.



Leia sobre o trabalho de forças variáveis e sobre o potencial elétrico associado a campos elétricos variáveis no Complemento 3, disponível no final deste módulo.

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 $V_+ - V_- = 1,5\text{V}$. Isso quer dizer que uma carga elétrica positiva $q > 0$ ganhará uma energia $1,5q$ quando se deslocar do terminal positivo para o negativo, e uma carga elétrica negativa $q < 0$ ganhará uma energia $-1,5q$ quando se deslocar do terminal negativo para o positivo.

Finalmente, surgiu a explicação do que era voltagem!

Toca o sinal de fim das aulas. Todos saem correndo. Ronaldo levanta 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, aquelas lâmpadas foram construídas para uma voltagem de 220V e foram ligadas em uma voltagem de 110V. Quando retornar do recreio, solicitará ao professor exemplos sobre o conceito de potencial elétrico.

A turma retorna do recreio para o segundo tempo de Física. Ronaldo pede ao professor que mostre alguns exemplos sobre potencial elétrico. O professor entrega aos alunos uma lista de exercícios.

Atividade 1

Atende aos Objetivos 1, 2, 3, 4 e 5

Com base nas seções que você leu, “O defeito na lâmpada” e “Uma aula de voltagem para vestibulandos”, resolva as seguintes perguntas:

1. É possível definir uma energia potencial elétrica? Por quê?

2. Qual a energia potencial elétrica associada a uma carga elétrica pontual q , localizada em uma região do espaço onde existe um campo elétrico paralelo ao eixo OY , com o sentido contrário ao esse eixo e com módulo constante E ?

3. A energia potencial elétrica associada à carga elétrica pontual q localizada em uma região onde existe um campo elétrico tem alguma arbitrariedade na sua definição? Qual?

4. Qual o valor da energia potencial elétrica no ponto que é escolhido como a sua origem?

5. A energia potencial elétrica muda quando a sua origem é deslocada para outro ponto? E a diferença de energia potencial elétrica entre dois pontos?

6. O que é potencial elétrico?

7. Qual a expressão do potencial elétrico em uma região do espaço onde existe um campo elétrico paralelo ao eixo OY , com o sentido contrário ao desse eixo e com módulo constante E ?

8. O que é origem do potencial?

9. O potencial elétrico muda quando sua origem é deslocada para outro ponto? E a diferença de potencial entre dois pontos?

10. Marque a alternativa correta:

a. () As cargas elétricas positivas e negativas se deslocam espontaneamente para as regiões em que o potencial elétrico é menor.

b. () 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.

11. O que é uma superfície equipotencial?

12. Qual a direção do campo elétrico na superfície equipotencial?

13. É possível calcular o campo elétrico quando se conhece o potencial elétrico em todo o espaço? De que forma?

Respostas Comentadas

1. As forças cujo trabalho não depende da trajetória são denominadas conservativas. O trabalho dessas forças só depende do ponto inicial e do ponto final da trajetória. É possível demonstrar que as forças elétricas criadas por cargas elétricas em repouso são conservativas. Logo, é possível definir uma energia potencial elétrica.

2. A energia potencial elétrica de uma carga elétrica pontual localizada em uma região onde existe um campo elétrico paralelo ao eixo OY , com o sentido contrário ao desse eixo e com módulo constante E , é dada por: $U = qEy + C$.

3. Sim. A energia potencial elétrica de uma carga elétrica pontual colocada em uma região onde existe um campo elétrico é dada por: $U_p = -W_{O \rightarrow p}(\vec{F})$. O ponto O é escolhido arbitrariamente. Como o trabalho da força elétrica depende da localização do ponto O , a energia potencial elétrica tem uma arbitrariedade na sua definição. Ver detalhes no Complemento 3.

4. A energia potencial elétrica no ponto denominado origem da energia potencial elétrica é nula, uma vez que $U_o = -W_{o \rightarrow o}(\vec{F}) = 0$.

5. A energia potencial elétrica se modifica quando a localização de sua origem é modificada, mas a diferença de potencial entre dois pontos não se altera. Ver detalhes no Complemento 3.

6. O potencial elétrico é a energia potencial elétrica por unidade de carga elétrica, isto é, $V_p = \frac{U_p}{q}$.

7. O potencial elétrico é dado por: $V_p = Ey + C$. O valor da constante C depende da localização da origem do potencial elétrico.

8. Origem do potencial elétrico é o ponto onde o potencial elétrico é nulo.

9. O potencial elétrico se modifica quando o ponto denominado origem do potencial elétrico muda de posição. Todavia, a variação do potencial elétrico entre dois pontos não se altera quando a localização de sua origem muda. Ver detalhes no Complemento 3.

10. () As cargas elétricas positivas e negativas se deslocam espontaneamente para as regiões em que o potencial elétrico é menor.

(X) 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.

11. É uma superfície onde o potencial elétrico é constante.
12. O campo elétrico em um ponto da superfície equipotencial é perpendicular a ela.
13. A componente do vetor campo elétrico, na direção do vetor unitário \hat{s} , nas proximidades de um ponto P é dada por: $E_s = -\frac{\Delta V}{\Delta S}$, sendo ΔS um pequeno deslocamento na direção do vetor unitário nas proximidades do ponto P . Ver detalhes no Complemento 3, disponível no final deste módulo.

Atividade 2

Atende aos Objetivos 1 e 2

Com base nas seções que você leu “O defeito na lâmpada” e “Uma aula de voltagem para vestibulandos”, resolva o seguinte exercício.

1. Um campo elétrico de módulo constante \vec{E} é produzido na região interna a duas placas idênticas, carregadas com cargas com módulos iguais e sinais contrários. Elas são mantidas paralelas e separadas por uma pequena distância d , como mostra a **Figura 7.7**. As dimensões das placas são muito maiores do que d .

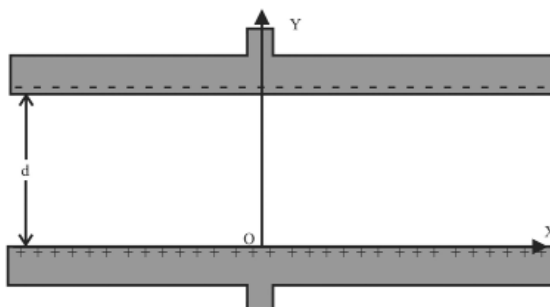


Figura 7.7: Capacitor de placas paralelas.

- a) Desenhe, na **Figura 7.7**, as linhas do campo elétrico.
- b) Assumindo que o valor do potencial elétrico é nulo na placa carregada positivamente, escreva a expressão para o potencial elétrico em um ponto que se encontra entre as duas placas a uma distância y da placa positiva.

- c) Desenhe, na **Figura 7.7**, as superfícies equipotenciais que passam pelos pontos com coordenadas $y = d/3$ e $y = 2d/3$.
- d) Calcule a energia potencial elétrica de um elétron em $y = d/3$ e em $y = 2d/3$. O módulo da carga do elétron é e ($e > 0$).

Respostas Comentadas

a) Como as dimensões das placas são muito maiores do que a distância entre elas, o campo elétrico entre as placas é constante. Ele é perpendicular a elas e aponta para as cargas elétricas negativas. Logo, as linhas de campo elétrico são perpendiculares às placas e apontam para a placa negativa.

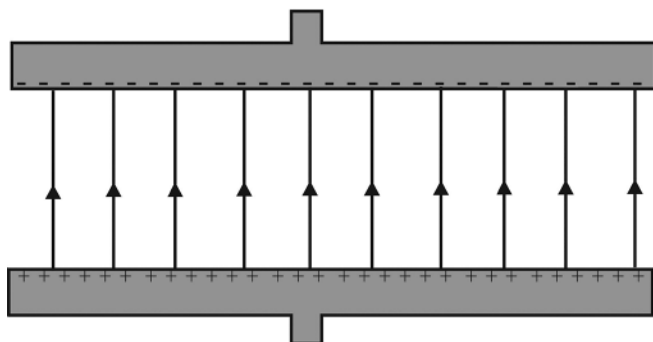


Figura 7.8: Linhas do campo elétrico do capacitor de placas paralelas.

b) O módulo do campo é dado por $E = \frac{|\Delta V|}{|\Delta y|}$. Como o potencial elétrico é maior próximo à placa positiva, ele diminui quando y aumenta. Por isso, podemos escrever que $|\Delta V| = -(V(y) - V(0))$, na região onde $0 \leq y \leq d$. Logo, temos que $E = \frac{-(V(y) - V(0))}{y - 0} \Rightarrow V(y) = -E y + V(0)$. Como a origem do potencial elétrico é o ponto onde determinamos arbitrariamente que o potencial é nulo e, nesse caso, o problema afirma que ela está na origem do eixo OY , temos que $V(0) = 0 \Rightarrow V(y) = -E y + V(0) = -E y$.

c) Em vista dos resultados que obtivemos no item anterior, concluímos que os potenciais em $y = d/3$ e $y = 2d/3$ são dados por: $V = V_1 = -Ed/3$ e $V = V_2 = -2Ed/3$. Isso indica que as superfícies equipotenciais serão planos paralelos às placas. As linhas que representam a interseção desses planos com um plano perpendicular às placas foram indicadas na **Figura 7.9**.

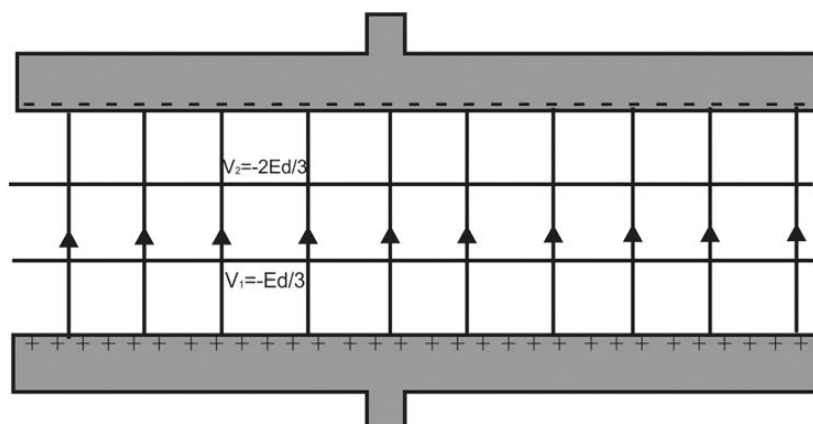


Figura 7.9: As linhas paralelas às placas representam a interseção dos planos equipotenciais com um plano perpendicular a elas.

d) A energia potencial elétrica é dada por: $U = qV$. Logo, as energias potenciais elétricas são:

$$U(d/3) = -(-e)Ed = eEd/3; U(2d/3) = -(-2e)Ed/3 = 2eEd/3.$$

Atividade 3

Atende aos Objetivos 1, 2 e 4

Com base nas seções que você leu, “O defeito na lâmpada” e “Uma aula de voltagem para vestibulandos”, resolva o seguinte exercício:

1. A **Figura 7.10a** mostra uma esfera condutora de raio R que se encontra inicialmente descarregada e eletricamente isolada.

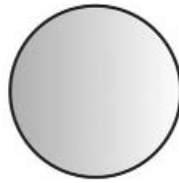


Figura 7.10a: Esfera condutora de raio R .

- a) Esboce, na **Figura 7.10.a**, a nova distribuição de cargas na esfera quando uma barra com uma carga $+q$ é colocada próxima dela.
- b) Quanto vale o módulo E do campo elétrico no interior da esfera antes e depois da aproximação da barra?
- c) Lembrando que o módulo do campo elétrico E está relacionado com a diferença de potencial ΔV entre dois pontos muito próximos e separados por uma pequena distância Δr pela relação $E = |\Delta V / \Delta r|$, o que você pode dizer sobre o comportamento do potencial elétrico no interior da esfera antes e depois da aproximação da barra?

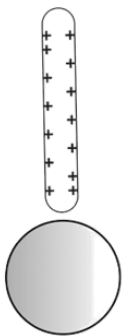


Figura 7.10b

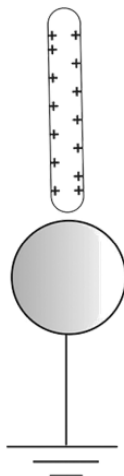


Figura 7.10c

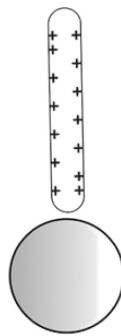


Figura 7.10d

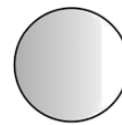


Figura 7.10e

Suponha agora que, ainda mantendo a barra próxima à esfera, é feito um aterramento desta com o uso de um fio condutor (**Figura 7.10c**), o qual é removido logo a seguir (**Figura 7.10d**). Considerando essa nova situação (**Figura 7.10d**):

- d) esboce, na **Figura 7.10d**, a distribuição de cargas na esfera;
- e) obtenha o módulo E do campo elétrico no interior da esfera;
- f) obtenha o potencial elétrico V no interior da esfera.

Por fim, após a remoção do aterramento, a barra carregada é afastada da esfera condutora (**Figura 7.10e**), que se encontra de novo eletricamente isolada. Considerando esta última situação (**Figura 7.10e**):

- g) esboce, na **Figura 7.10e**, o que acontece com a distribuição de cargas na esfera;
- h) determine quanto vale o módulo E do campo elétrico no interior da esfera;
- i) obtenha o comportamento do potencial elétrico V no interior da esfera.

Respostas Comentadas

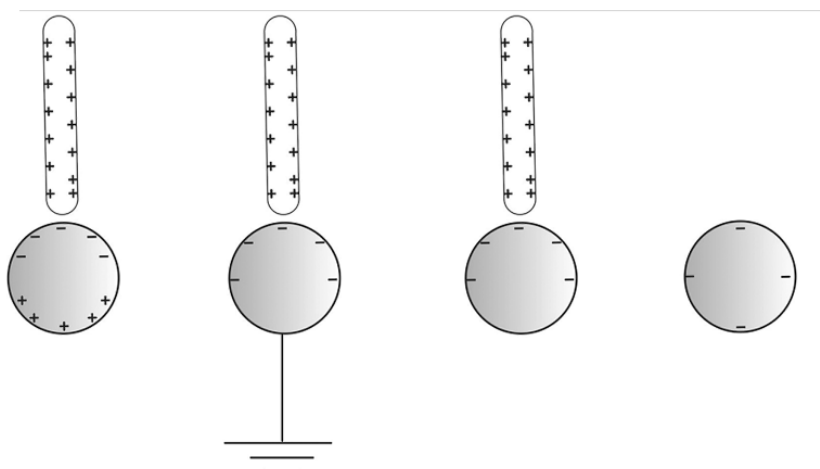


Figura 7.10f

Figura 7.10g

Figura 7.10h

Figura 7.10i

a) Como a esfera é condutora, os elétrons livres se deslocam com facilidade. Logo, o campo elétrico criado pelas cargas da barra deslocam os elétrons para a parte da superfície da esfera mais próxima à barra. A região da superfície da esfera mais afastada da barra fica com cargas elétricas positivas, como mostra a **Figura 7.10f**.

b) Como a esfera está em equilíbrio eletrostático, o campo elétrico na massa condutora é nulo antes e depois da aproximação da barra carregada.

c) Sendo, em ambos os casos, $E = 0$, então $|\Delta V| = |E\Delta r| = 0$, o que implica que o potencial elétrico na esfera é constante.

d) Ao aterrar a esfera condutora, elétrons provenientes da Terra fluem para ela, que fica com uma distribuição de cargas elétricas negativas, como mostra a **Figura 7.10g**. A distribuição das cargas elétricas na esfera não muda se ela é desaterrada na presença do bastão carregado como mostra a **Figura 7.10h**.

e) Como a esfera está em equilíbrio eletrostático, o campo elétrico permanece com o valor nulo no seu interior ($E = 0$).

f) Sendo $E = 0$, a diferença de potencial entre dois pontos da esfera também é nula, uma vez que $|\Delta V| = |E\Delta r| = 0$. Logo, o potencial elétrico na esfera é constante.

g) Na ausência do campo elétrico da barra, as cargas negativas na esfera condutora se repelem. Elas se distribuem uniformemente sobre a superfície da esfera, como mostra a **Figura 7.10i**.

h) Como a esfera está em equilíbrio eletrostático, o campo elétrico permanece com o valor nulo no seu interior ($E = 0$).

i) Como o campo elétrico é nulo ($E = 0$), a diferença de potencial entre dois pontos do interior da esfera também é nula, uma vez que $|\Delta V| = |E\Delta r| = 0$. Logo, o potencial elétrico no volume da esfera será constante.



Atividade 4

Atende aos Objetivos 3 e 4

Com base nas seções que você leu, “O defeito na lâmpada” e “Uma aula de voltagem para vestibulandos”, resolva o seguinte exercício:

1. A **Figura 7.11** mostra uma esfera condutora carregada com algumas superfícies equipotenciais (1, 2, 3 e 4) mapeadas experimentalmente. Os valores dos potenciais das equipotenciais, com as suas incertezas, foram colocados na **Tabela 1**.

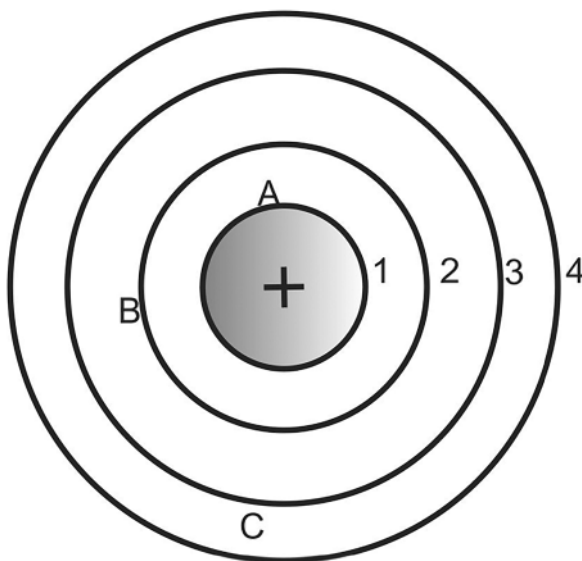


Figura 7.11: Esfera condutora carregada com suas equipotenciais.

Tabela 1

Equipotenciais	$V[V]$	$\delta V[V]$
1	10,00	0,01
2	5,71	0,01
3	3,77	0,01
4	3,01	0,01

a) Meça com uma régua, na **Figura 7.11**, as distâncias r do centro da esfera (marcado por uma cruz na **Figura 7.11**) às superfícies equipotenciais. Coloque os valores de r e de $1/r$, com suas incertezas, na **Tabela 2**.

Tabela 2

Equipotenciais	$r[\text{cm}]$	$\delta r[\text{cm}]$	$1/r[\text{cm}^{-1}]$	$\delta(1/r)[\text{cm}^{-1}]$
4				
3				
3				
1				

A incerteza de r é a incerteza da régua que você vai utilizar e a incerteza de $1/r$ é $\delta(1/r) = \frac{\delta r}{r^2}$.

b) Construa, com os dados das **Tabelas 1 e 2**, um gráfico de V versus $1/r$ para pontos fora da esfera.

c) Em vista dos resultados encontrados no gráfico que você desenhou, escreva a expressão que deve traduzir o comportamento do potencial elétrico $V(r)$ para pontos externos da esfera.

d) Para obter a expressão aproximada do módulo do campo elétrico, utilize a relação entre o potencial elétrico e o campo elétrico $E = \left| \frac{\Delta V}{\Delta r} \right|$, que vale no caso em que o campo elétrico \vec{E} é paralelo ao deslocamento $\Delta \vec{r}$ e $r \gg |\Delta r|$. Calcule os módulos dos campos sobre as equipotenciais e transfira para a **Tabela 3**. Desenhe, nos pontos A, B e C das equipotenciais, os campos elétricos.

Tabela 3

Equipotenciais	$\Delta r[\text{cm}]$	$ \Delta V[\text{V}] $	$E[\text{V/cm}]$
1		0,01	
2		0,01	
3		0,01	

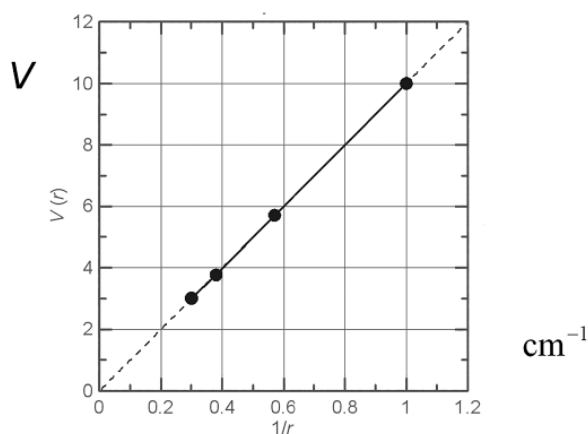
Respostas Comentadas

a) As incertezas da **Tabela 2** foram fornecidas com apenas um algarismo significativo.

Tabela 2

Equipotenciais	$r[\text{cm}]$	$\delta r[\text{cm}]$	$1/r[\text{cm}^{-1}]$	$\delta(1/r)[\text{cm}^{-1}]$
1	1,00	0,01	1,00	0,01
2	1,75	0,01	0,57	0,003
3	2,65	0,01	0,38	0,001
4	3,35	0,01	0,30	0,0089

b)

**Figura 7.12:** Gráfico de V versus $(1/r)$.

c) A superfície equipotencial 1 coincide com a superfície da esfera. Como sabemos que o potencial elétrico de uma esfera condutora em equilíbrio eletrostático é constante, podemos concluir que o potencial elétrico da esfera condutora é constante e vale 10V. Pelo gráfico da **Figura 7.12**, podemos concluir que o potencial da esfera para pontos externos a ela ($r >$ raio da esfera) varia com o inverso da distância do ponto ao centro da esfera, isto é, $V(r) = C/r$ onde C é uma constante.

Tabela 3

Equipotenciais	$\Delta r[\text{cm}]$	$ \Delta V[\text{V}] $	$E[\text{V/cm}]$
1	1,00	10,00	10
2	1,75	5,71	3,3
3	2,65	3,77	1,4
4	3,35	3,01	0,9

d) A expressão aproximada do campo elétrico pode ser obtida pela expressão do potencial elétrico retirada do gráfico, da seguinte forma:

$$E = \left| \frac{\Delta V}{\Delta r} \right| = \left| \frac{1}{\Delta r} \left(\frac{cte}{r + \Delta r} - \frac{cte}{r} \right) \right| = \left| \frac{cte}{\Delta r} \left(\frac{1}{r + \Delta r} - \frac{1}{r} \right) \right| = \left| \frac{cte}{\Delta r} \left(\frac{r - r - \Delta r}{(r + \Delta r)r} \right) \right| = \left| \frac{cte}{\Delta r r^2} \left(\frac{\Delta r}{1 + \frac{\Delta r}{r}} \right) \right| \Rightarrow$$

$$E = \left| \frac{cte}{r^2} \left(\frac{1}{1 + \frac{\Delta r}{r}} \right) \right|$$

Como a expressão anterior só é válida quando os pontos são muito próximos,

$$\text{temos que: } 1 + \frac{\Delta r}{r} \cong 1 \Rightarrow E = \left| \frac{cte}{r^2} \right| = \frac{V}{r} = \frac{C}{r^2}.$$

A **Tabela 3** apresenta o resultado do cálculo aproximado do módulo do campo elétrico $E(r)$ nas equipotenciais. Como os campos elétricos sobre as equipotenciais são perpendiculares a elas e apontam para as regiões em que o potencial diminui, os campos elétricos sobre as equipotenciais são radiais e apontam no sentido contrário ao do centro da esfera. A **Figura 7.13** mostra os campos elétricos nos pontos A, B e C.

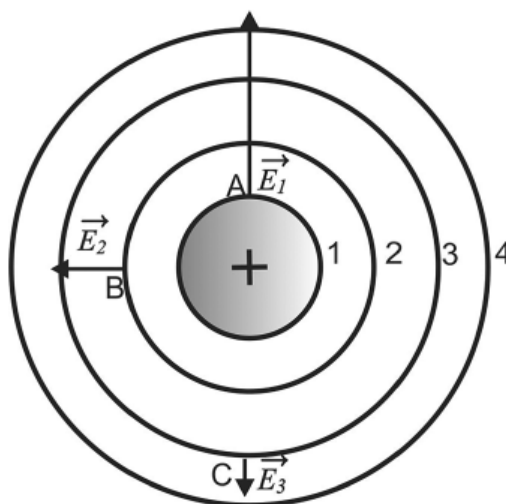


Figura 7.13: Campos elétricos sobre as equipotenciais.

Atividade 5

Atende aos Objetivos 3 e 5

Com base nas seções que você leu, “O defeito na lâmpada” e “Uma aula de voltagem para vestibulandos”, resolva o seguinte exercício:

1. Na **Figura 7.14**, foram desenhadas superfícies equipotenciais associadas a uma distribuição de cargas elétricas.

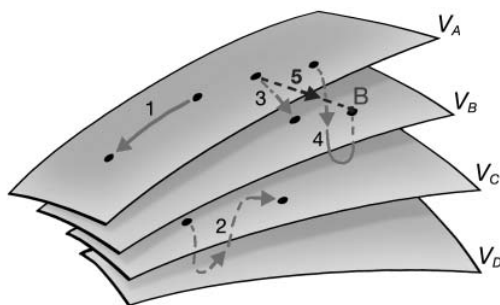


Figura 7.14: Superfícies equipotenciais.

Os valores dos potenciais nas superfícies da **Figura 7.14** são

$$V_A = 0V, V_B = 2V, V_C = 4V, V_D = 6V.$$

- a) Desenhe, na **Figura 7.14**, o campo elétrico do ponto B.
- b) Na **Figura 7.14**, foram desenhadas linhas numeradas de 1 até 5. Qual o trabalho realizado pela força elétrica que atua em uma carga elétrica pontual $q = 10^{-6} \text{ C}$, quando ela é deslocada sobre as linhas 1, 2, 3, 4 e 5?

- c) Em qual das superfícies está a origem do potencial elétrico? O que acontece com o valor do potencial elétrico de todas as superfícies se deslocarmos a origem do potencial para o ponto B da superfície B?

Respostas Comentadas

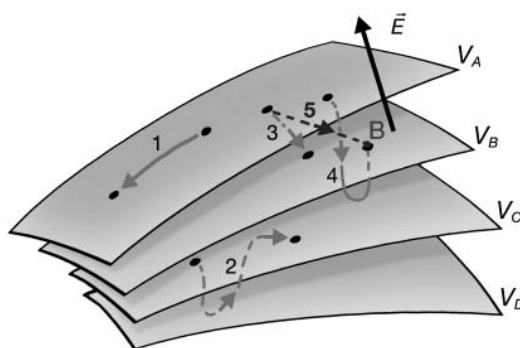


Figura 7.15: Vetor campo elétrico no ponto B.

- a) O campo elétrico no ponto B foi desenhado na **Figura 7.15**. Como a diferença de potencial elétrico entre dois pontos da superfície B tem que ser nula, o campo elétrico tem que ser perpendicular à superfície B. O

sentido do campo elétrico vai da superfície B para a superfície A, porque o campo elétrico sempre aponta para as regiões com menor potencial elétrico.

b) O trabalho realizado pela força elétrica é dado por:

$$W_{G \rightarrow H}(\vec{F}_E) = -q(V_G - V_H)$$

Logo, temos que:

$$W_1(\vec{F}_E) = -q(V_A - V_A) = 0$$

$$W_2(\vec{F}_E) = -q(V_C - V_C) = 0$$

$$W_3(\vec{F}_E) = -q(V_B - V_A) = -(10^{-6}C) \times (2V) = -2 \times 10^{-6}W$$

$$W_4(\vec{F}_E) = -q(V_B - V_A) = -(10^{-6}C) \times (2V) = -2 \times 10^{-6}W$$

$$W_5(\vec{F}_E) = -q(V_B - V_A) = -(10^{-6}C) \times (2V) = -2 \times 10^{-6}W$$

Os trabalhos realizados nas trajetórias 4 e 5 são iguais, porque elas se iniciam e finalizam nos mesmos pontos. Aliás, essa é uma das condições para se definir o potencial elétrico, isto é, a força elétrica tem que ser conservativa.

c) A origem do potencial elétrico é o ponto onde o potencial elétrico é nulo. Logo, ela está sobre a superfície A. Quando modificamos essa origem, todos os pontos modificam o seu potencial elétrico por um valor constante. Todavia, a diferença de potencial entre dois pontos não se modifica. Se denominarmos o novo potencial por V' , temos que:

$$V'_B = 0V \Rightarrow$$

$$V'_A - V'_B = V_A - V_B \Rightarrow V'_A = V_A - V_B = 0V - 2V = -2V$$

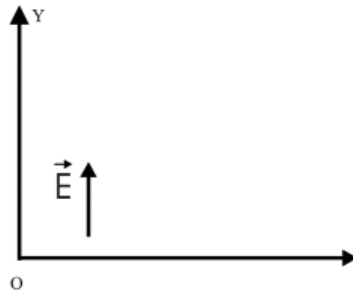
$$V'_C - V'_B = V_C - V_B \Rightarrow V'_C = V_C - V_B = 4V - 2V = 2V$$

$$V'_D - V'_B = V_D - V_B \Rightarrow V'_D = V_D - V_B = 6V - 2V = 4V$$

Atividade 6

Atende ao Objetivo 2

Com base nas seções que leu, “O defeito na lâmpada” e “Uma aula de voltagem para vestibulandos”, resolva o seguinte exercício:

**Figura 7.16**

1. Escreva a expressão do potencial elétrico associada ao campo elétrico constante $E = 1000\text{V/m}$, representado no gráfico da **Figura 7.16**, nos seguintes casos:

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

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

Respostas Comentadas

O campo elétrico aponta para as regiões onde o potencial elétrico é menor. Logo, o potencial elétrico é dado por: $V = -Ey + C = -1000y + C$.

a) Se a origem do potencial elétrico está em $y = 0\text{m}$, temos que:

$$V(0\text{m}) = 0\text{V} \Rightarrow -(1000\text{V/m}) \cdot (0\text{m}) + C = 0 \Rightarrow C = 0$$

$$\Rightarrow V(y) = -(1000\text{V/m})y.$$

b) Se a origem do potencial elétrico está em $y = 1\text{m}$, temos que:

$$V(1\text{m}) = 0\text{V} \Rightarrow -(1000\text{V/m}) \cdot (1\text{m}) + C = 0 \Rightarrow C = 1000\text{V}$$

$$\Rightarrow V(y) = -(1000\text{V/m})y + 1000\text{V}.$$

Atividade 7

Atende ao Objetivo 2

Com base nas seções que você leu, “O defeito na lâmpada” e “Uma aula de voltagem para vestibulandos”, e nos seus conhecimentos da dinâmica da partícula, resolva o seguinte exercício:

1. A **Figura 7.17** mostra um capacitor de placas paralelas que contém orifícios nas suas placas. A distância entre as placas é igual a d . Um elétron, inicialmente em repouso ($v_0 = 0$) na origem O , sofre a ação do campo elétrico criado pelas placas. O módulo do campo elétrico entre as placas é igual a E_0 . O potencial elétrico entre as placas é igual a $V = E_0 x$. A carga do elétron é igual a $-e$ ($e > 0$). A massa do elétron é igual a m . Despreze o peso do elétron.

Dados: m , e , d e E_0 .

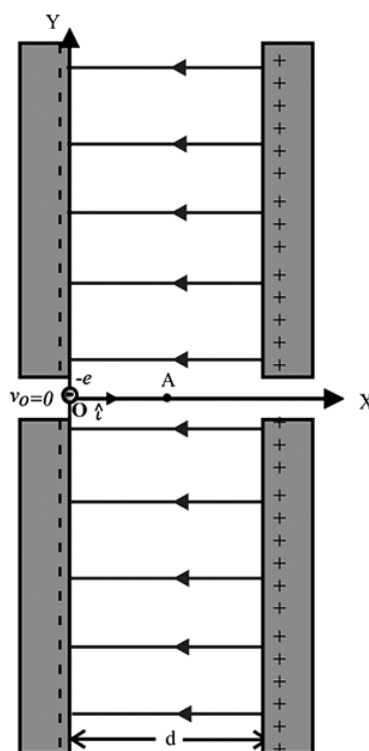


Figura 7.17: Capacitor de placas paralelas.

a) Desenhe, na **Figura 7.17**, o campo elétrico e a força elétrica que atuam no elétron quando ele está no ponto A.

b) Escreva o campo elétrico e a força elétrica utilizando o vetor unitário \hat{i} , associado ao eixo OX .

c) Obtenha $v_x(t)$ e $x(t)$ para o elétron durante o tempo em que ele está entre as placas ($0 \leq x \leq d$). Considere que, no instante $t = 0$, o elétron está em $x = 0$.

d) Calcule o tempo que o elétron leva para alcançar a placa positiva ($x = d$).

e) Calcule a velocidade do elétron quando ele atinge a placa positiva ($x = d$).

f) Calcule as energias potenciais do elétron em $x = 0$ e $x = d$.

g) Sabendo que a energia mecânica do elétron é a soma da sua energia cinética ($\frac{mv^2}{2}$) com a sua energia potencial elétrica, calcule as energias mecânicas do elétron em $x = 0$ e $x = d$.

Respostas Comentadas

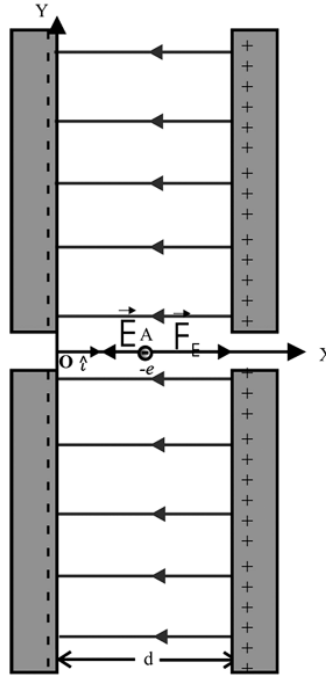


Figura 7.18: Força elétrica que o campo elétrico exerce sobre o elétron.

- a) O campo elétrico e a força elétrica foram desenhados na **Figura 7.18**.
- b) O campo elétrico é dado por: $\vec{E} = -E_0 \hat{i}$, $\vec{F} = -e \vec{E} = e E_0 \hat{i}$.
- c) Como o problema manda desprezar o peso do elétron, a única força não desprezível que atua nele é a força elétrica. Logo, pela segunda lei de Newton, temos que:

$$m\vec{a} = \vec{F} \Rightarrow \begin{cases} ma_x = F_x = e E_0 \\ ma_y = F_y = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a_x = \frac{e E_0}{m} \\ a_y = 0 \end{cases}$$

$$a_x = \frac{e E_0}{m} \Rightarrow v_x = v_{ox} + \frac{e E_0}{m} t \Rightarrow x = x_0 + v_{ox} t + \frac{e E_0}{2m} t^2$$

A **Figura 7.17** mostra que as condições iniciais do problema são dadas por: $x_0 = 0$ e $v_{ox} = 0$. Logo, temos que: $v_x = \frac{e E_0}{m} t$ e $x = \frac{e E_0}{2m} t^2$.

- d) Vamos denominar o tempo que o elétron leva para atingir a placa de t_1 .

$$v_x(t_1) = \frac{e E_0}{m} t_1 = \frac{e E_0}{m} \sqrt{\frac{2md}{e E_0}} = \sqrt{\frac{2e E_0 d}{m}}$$

e) A velocidade do elétron no instante t_1 :

$$v_x(t_1) = \frac{eE_o}{m}t_1 = \frac{eE_o}{m}\sqrt{\frac{2md}{eE_o}} = \sqrt{\frac{2eE_o d}{m}}$$

f) A energia potencial do elétron é dada por: $U = -eV = -eE_o x$

Logo, as energias potenciais do elétron em $x = 0$ e $x = d$ são iguais a $U(0) = 0, U(d) = -eE_o d$.

g) $E_M(0) = \frac{mv_o^2}{2} + U(0) = 0$

$$E_M(d) = \frac{mv_2^2}{2} + U(d) = \frac{m\left(\sqrt{\frac{2eE_o d}{m}}\right)^2}{2} - eE_o d = eE_o d - eE_o d = 0$$

Esse resultado já era esperado, uma vez que a força elétrica é conservativa. Logo, a energia mecânica do elétron não se modifica quando ele se desloca.

Atividade 8

Atende ao Objetivo 2

Com base nas seções que você leu, “O defeito na lâmpada” e “Uma aula de voltagem para vestibulandos”, e nos seus conhecimentos da dinâmica da partícula, resolva o seguinte exercício:

1. Um capacitor de placas paralelas é um sistema formado por dois condutores quadrados, carregados com cargas de módulos iguais e sinais contrários. As placas do capacitor são quadrados com lados iguais a L e a distância entre elas é igual a $d(d < L)$. O campo elétrico entre as placas do capacitor foi representado na **Figura 7.19** pelas suas linhas de campo elétrico. Ele é orientado verticalmente para cima e tem módulo constante e igual a E . Fora das placas, o campo elétrico é nulo. Uma carga elétrica positiva com carga elétrica q e massa m é projetada entre as placas do capacitor com velocidade inicial de módulo V_o . A velocidade inicial da carga elétrica forma um ângulo de θ_o com a horizontal, como mostra a **Figura 7.19**. Despreze o peso da carga elétrica q . A origem do sistema de eixos coordenados está sobre a placa positiva, como mostra a Figura 7.19.

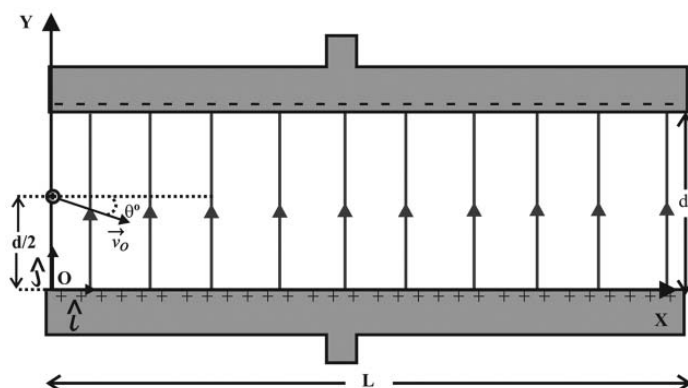


Figura 7.19: Campo elétrico entre as placas do capacitor.

a) Calcule as componentes x e y do vetor posição e do vetor velocidade da carga elétrica q ($x(t), y(t), v_x(t), v_y(t)$). Utilize os eixos coordenados representados na **Figura 7.19**.

b) Se a carga elétrica não colidir com a placa positiva, qual será a menor distância entre elas?

c) Se a carga elétrica não colidissem com a placa negativa, qual seria a distância vertical que ela percorreria quando alcançasse o ponto com coordenada $x = L$?

d) Escreva o potencial elétrico de um ponto entre as placas que dista y da placa positiva. Coloque a origem do potencial elétrico na origem do sistema de eixos coordenados.

e) Escreva o potencial elétrico e a energia potencial elétrica em $y = d/2$ e em $y = d$.

f) Se a carga elétrica não colidissem com a placa positiva, qual seria a sua velocidade no ponto $y = d$?

g) Se a carga elétrica for um próton, ela colidirá com alguma das placas do capacitor? Justifique a sua resposta. Suponha que, neste caso, temos que: $v_o = 1,00 \times 10^2 \text{ m/s}$, $\theta_o = 5^\circ$, $q = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$, $m = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, $d = 10 \text{ mm}$, $L = 4 \text{ cm}$, $E = 0,1 \text{ V/m}$.

Respostas Comentadas

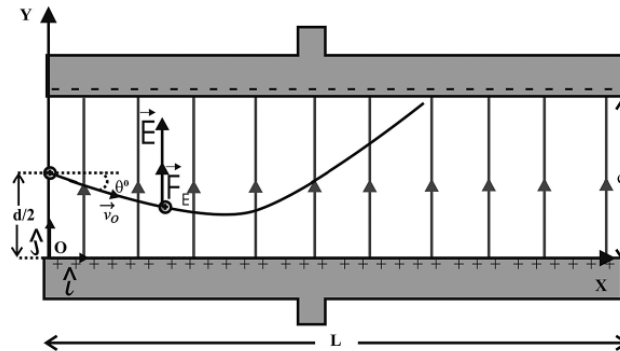


Figura 7.20: Trajetória da carga elétrica no interior do capacitor de placas paralelas.

a) Como a força peso é desprezível, a única força que atua na carga elétrica q é a força elétrica (ver **Figura 7.20**) que é dada por: $\vec{F} = e \vec{E}$.

A segunda lei de Newton fornece a aceleração da carga elétrica q .

$$m\vec{a} = \vec{F} \Rightarrow \begin{cases} ma_x = F_x = eE_o \\ ma_y = F_y = eE \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a_x = 0 \Rightarrow v_x = v_{ox} \\ a_y = \frac{eE}{m} \end{cases} \Rightarrow$$

$$\begin{cases} v_x = v_{ox} \Rightarrow x = x_o + v_{ox}t \\ v_y = v_{oy} + \frac{eE}{m}t \Rightarrow y = y_o + v_{oy}t + \frac{eE_o}{2m}t^2, \end{cases}$$

onde as condições iniciais são dadas por:

$$x_o = 0, y_o = d/2,$$

$$v_{ox} = v_o \cdot \cos(\theta_o), v_{oy} = -v_o \cdot \sin(\theta_o)$$

Logo, as componentes do vetor velocidade e do vetor posição da carga elétrica são:

$$v_x = v_o \cos(\theta_o), v_y = -v_o \sin(\theta_o) + \frac{qE}{m}t$$

$$x = v_o \cos(\theta_o)t, y = \frac{d}{2} - v_o \sin(\theta_o)t + \frac{qEt^2}{2m}$$

b) A menor distância entre a placa positiva e a carga elétrica q ocorre quando a componente y da velocidade da carga se anula, isto é,

$$v_y = v_{oy} + at_1 = 0 \Rightarrow t_1 = -\frac{v_{oy}}{a} \Rightarrow y(t_1) = \frac{d}{2} - v_{oy} \frac{v_{oy}}{a} + \frac{a}{2} \left(\frac{v_{oy}}{a} \right)^2 = y_o - \frac{v_{oy}^2}{a} + \frac{v_{oy}^2}{2a}$$

$$y(t_1) = \frac{d}{2} - \frac{v_{oy}^2}{2a} = \frac{d}{2} - \frac{v_o^2 \sin^2(\theta_o) m}{2qE}$$

c) Se a carga elétrica q não colidir com a placa negativa, a distância vertical percorrida por ela é dada por:

$$x = v_{ox} t_2 = L \Rightarrow t_2 = \frac{L}{v_{ox}}$$

$$y(t_2) = y_o + v_{oy} \frac{L}{v_{ox}} + \frac{a \left(\frac{L}{v_{ox}} \right)^2}{2} = \frac{d}{2} - \frac{v_o \sin(\theta_o) L}{v_o \cos(\theta_o)} + \frac{a L^2}{2 v_o^2 \cos(\theta_o)^2}$$

$$y(t_2) = \frac{d}{2} - \tan(\theta_o) L + \frac{q E L^2}{2 m v_o^2 \cos(\theta_o)^2}$$

d) Como o potencial elétrico tem que ser maior na placa positiva, temos que: $V = -Ey + C$.

Como a origem do potencial elétrico está na origem do sistema de eixos coordenados, temos que: $V(0) = -E \cdot 0 + C = 0 \Rightarrow C = 0$.

Logo, o potencial elétrico se reduz a $V = -Ey$.

e) Os potenciais elétricos em $y = d/2$ e $y = d$ são dados por:

$$V\left(\frac{d}{2}\right) = -\frac{Ed}{2}, V(d) = -Ed \Rightarrow V(d) < V\left(\frac{d}{2}\right)$$

Como a energia potencial elétrica é dada por $U = qV$, as energias potenciais elétricas no pontos $y = d/2$ e $y = d$ são dadas por:

$$U(d/2) = qV(d/2) = -\frac{qEd}{2}, U(d) = qV(d) = -qEd \Rightarrow U(d) < U\left(\frac{d}{2}\right).$$

f) Como a força elétrica é conservativa, se a carga elétrica não colidir com a placa positiva, a velocidade da carga elétrica pode ser obtida com o princípio da conservação da energia, isto é,

$$\left(\frac{mv^2(t_2)}{2} - \frac{mv_o^2}{2} \right) + \left(U(d) - U\left(\frac{d}{2}\right) \right) = 0 \Rightarrow$$

$$v^2(t_2) - v_o^2 = -\frac{2 \left(U(d) - U\left(\frac{d}{2}\right) \right)}{m} = -\frac{2 \left(-qEd - \left(-\frac{qEd}{2} \right) \right)}{m} = \frac{qEd}{m} \Rightarrow$$

$$v(t_2) = \sqrt{v_o^2 + \frac{qEd}{m}}$$

g) Se a carga elétrica for um próton, a menor distância entre ela e a placa positiva será dada por:

$$y(t_1) = \frac{d}{2} - \frac{v_{oy}^2}{2a} = \frac{d}{2} - \frac{v_o^2 \sin(\theta_o)^2 m}{2qE} \Rightarrow$$

$$y(t_1) = 2.10^{-3} m - \frac{(1.0.10^2 m/s) \cdot \sin(5^\circ)^2 \cdot (1.67.10^{-27} kg)}{2 \cdot (1.6.10^{-19} C) \cdot (0.01 V/m)} \cong 0.002 m = 2 mm$$

Logo, o próton não colidiria com a placa positiva. Para verificar se o próton colidiria com a placa negativa, vamos calcular a distância vertical que ele percorreria quando estivesse em $x = L$.

Logo, o próton colidiria com a placa negativa. A trajetória do próton foi representada na **Figura 7.20**.

Conclusão

Nesta aula, definimos a energia elétrica que alimenta os aparelhos elétricos indispensáveis à vida moderna. Aprendemos também o significado da palavra voltagem, que está associada aos aparelhos elétricos e às fontes de energia elétrica. Nas próximas aulas, mostraremos que a potência elétrica está relacionada com a voltagem dos aparelhos elétricos.

Resumo

1. A diferença de potencial elétrico é a variação da energia elétrica por unidade de carga elétrica, isto é $\Delta V = \frac{\Delta U_{PE}}{q}$.
2. O potencial elétrico só depende do campo elétrico. É uma propriedade do campo elétrico.
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.

A relação entre o módulo do campo elétrico e a variação da energia potencial na sua direção é $E = \frac{|\Delta V|}{|\Delta y|}$, sendo $|\Delta y|$ o deslocamento na direção do campo elétrico.

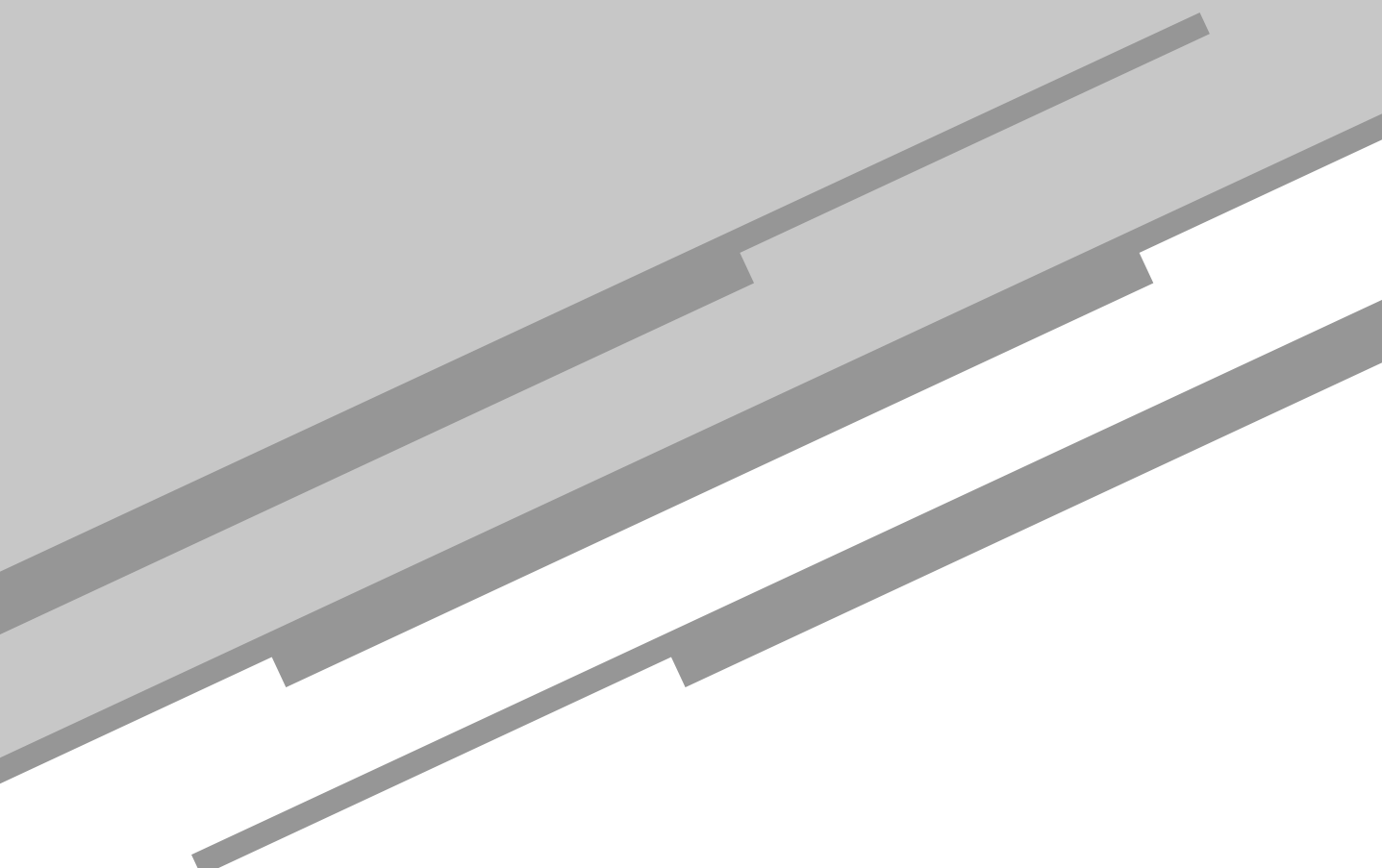
Leituras recomendadas

Leia sobre o assunto “Voltagem em um campo uniforme” na seção de Eletricidade e Magnetismo do livro *Física - Volume único*, de A. Máximo e B. Alvarenga.

Leia sobre o assunto “A tensão elétrica” na Parte 1 do livro *Física 3 - eletromagnetismo*, do Grupo de Reelaboração do Ensino da Física (Gref).

Aula 8

Prática 1 - Mapeamento de equipotenciais



Maria Antonieta Almeida

Metas

Ensinar um método experimental que permita conhecer o potencial elétrico produzido por terminais lineares e circulares carregados por uma fonte de voltagem contínua; interpretar os dados experimentais obtidos, de tal forma a mapear as equipotenciais, tratar os dados obtidos, de tal forma a calcular o módulo do campo elétrico produzido pelos terminais carregados.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. utilizar o multímetro para medir potenciais elétricos;
2. construir tabelas com as medidas diretas e suas incertezas;
3. construir tabelas com as medidas indiretas com as suas incertezas;
4. construir gráficos com os dados experimentais;
5. estimar, com os gráficos construídos, os módulos dos campos elétricos;
6. entender o método dos mínimos quadrados, de tal forma a utilizar o aplicativo que se baseia nesse método para construir gráficos com os dados experimentais e obter valores mais precisos do módulo do campo elétrico.

Pré-requisitos

Para ter bom aproveitamento desta aula, é importante que você saiba somar frações, elevar expressões a potências, conhecer o conceito de funções, ter noções de geometria plana (ângulos, geometria dos triângulos) e de trigonometria básica (seno, cosseno, tangente, cotangente), e saiba representar um polinômio de grau 1 (retas) em um plano. Além disso, é preciso conhecer os conceitos de campo elétrico e potencial elétrico.

Esses conteúdos podem ser encontrados nos livros das disciplinas de Matemática Básica, Geometria Básica e nas aulas deste módulo.

Introdução

Os conceitos mais difíceis de ensinar são aqueles que não são percebidos pelos nossos sentidos. Entre eles, podemos citar os conceitos de campo elétrico e potencial elétrico. O aprendizado deles é facilitado quando o aluno tem a oportunidade de realizar experimentos que tornam esses conceitos mais reais. Por isso, você fará, nesta aula, os seguintes experimentos que estão disponíveis nos polos:

Experimento 1: Mapeamento de equipotenciais em uma cuba eletrolítica com eletrodos retos;

Experimento 2: Mapeamento de equipotenciais em uma cuba eletrolítica com eletrodos circulares.

Nesses experimentos, ao 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 um campo elétrico conservativo que dá origem a uma distribuição de potencial elétrico. Essa distribuição será investigada com um voltímetro de elevada impedância, permitindo o mapeamento das equipotenciais e o cálculo do campo elétrico.



Veja os vídeos denominados *Mapeamento de equipotenciais com eletrodos lineares* e *Mapeamento de equipotencias com eletrodos circulares*. Neles foram realizados os experimentos que você vai fazer nos laboratórios desta aula. Os eletrodos carregados foram imersos em água em uma cuba de acrílico, e o potencial elétrico foi medido com um multímetro. As medidas do potencial elétrico mostram propriedades importantes dele e do campo elétrico. Sugiro que você assista aos vídeos antes de participar do laboratório, para que entenda com profundidade o que vai fazer.

É importante que, após fazer o experimento no laboratório, você assista novamente aos vídeos, a fim de fazer o relatório com mais facilidade.

Eles estão disponíveis nos polos, para cópia, e no Portal TECA, onde você deve escolher vídeos, digitar “ICF2” e escolher o botão “Pesquisa TECA”.

Atividade 1

Atende ao Objetivo 1

Aprenda como medir voltagens com o multímetro, lendo o Complemento 2. A seguir, marque as respostas corretas:

- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você deve ligar o multímetro da escala de 200V $\overline{\sim}$.
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você deve ligar o multímetro da escala de 2V $\overline{\sim}$.
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você deve ligar o multímetro da escala de 20V $\overline{\sim}$.
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você deve ligar o multímetro da escala de 200V \sim .
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você deve ligar o multímetro da escala de 2V \sim .
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você deve ligar o multímetro da escala de 20V \sim .
- () O multímetro deve ser ligado em série com o elemento cuja voltagem queremos medir.
- () O multímetro deve ser ligado em paralelo com o elemento cuja voltagem queremos medir.

As fotos dos multímetros apresentadas nos experimentos são do multímetro digital ET-2011 da Minipa. Cuidado! Você não deve se basear nelas se os multímetros do seu polo forem diferentes.

Respostas Comentadas

() Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você deve ligar o multímetro da escala de 200V $\overline{\sim}$.

() Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você deve ligar o multímetro da escala de 2V $\overline{\sim}$.

(X) Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você deve ligar o multímetro da escala de 20V $\overline{\sim}$.

() Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você deve ligar o multímetro da escala de 200V \sim .

() Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você deve ligar o multímetro da escala de 2V \sim .

() Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você deve ligar o multímetro da escala de 200V \sim .

() O multímetro deve ser ligado em série com o elemento cuja voltagem queremos medir.

(X) O multímetro deve ser ligado em paralelo com o elemento cuja voltagem queremos medir.

Como o símbolo de voltagem contínua é $\overline{\sim}$ e o de voltagem alternada é \sim , todas as respostas que contêm o símbolo de corrente alternada estão erradas.

Se ligarmos o multímetro em um voltagem menor do que a voltagem máxima da fonte, ele queima o fusível, logo, a resposta que indica a escala de 2V $\overline{\sim}$ também está errada.

O multímetro pode ser ligado sem queimar nas escalas de 200V e 12V contínuas. Se você ler o manual do multímetro, vai verificar que a escala de 20V contínua fornece uma medida com maior precisão do que a escala com 200V contínua. Logo, a resposta correta é a que está indicada com um X, isto é, você deve ligar o multímetro na escala de 20V contínua.

O multímetro deve ser ligado em paralelo com o elemento cuja voltagem queremos medir, uma vez que, se ele for ligado em série, vai alterar muito a voltagem do elemento e vai medir a voltagem nos seus terminais.

Experimento 1

Atende aos Objetivos 1, 2, 3, 4, 5 e 6

Mapeamento de equipotenciais em uma cuba eletrolítica com eletrodos retos

Coloque sobre a bancada os seguintes materiais:

- 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 fixados à cuba;
- 1 fonte de C.C. 12V;
- 1 voltímetro digital;
- fios com garras.

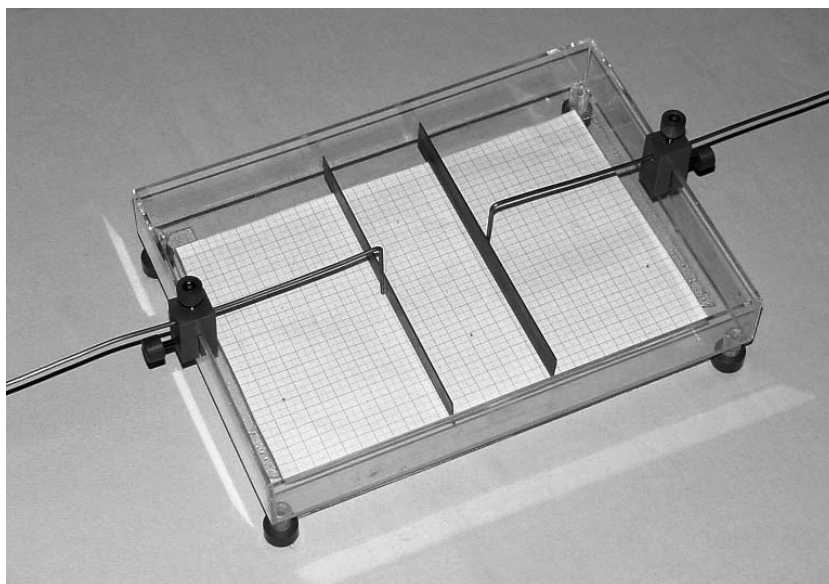


Figura 8.1: Cuba com eletrodos retos.

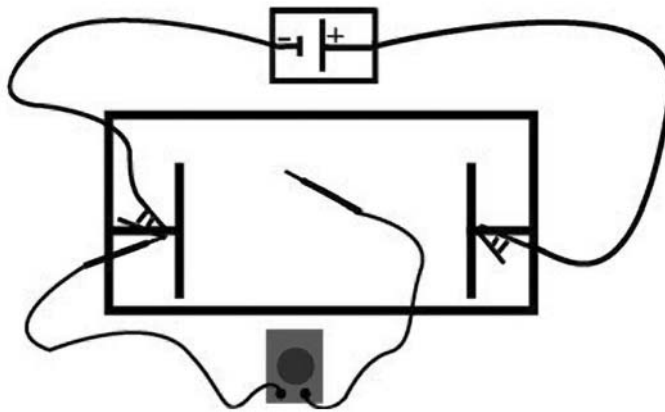


Figura 8.2: Ligação dos eletrodos na fonte e ligação das ponteiros do multímetro com os terminais.

1. Desenhe, em uma folha de papel milimetrado, os dois eletrodos retos, como mostra a **Figura 8.3**. Marque os pontos onde o potencial elétrico vai ser medido (1, 2, 3 etc.). Pregue o papel milimetrado no fundo da cuba.

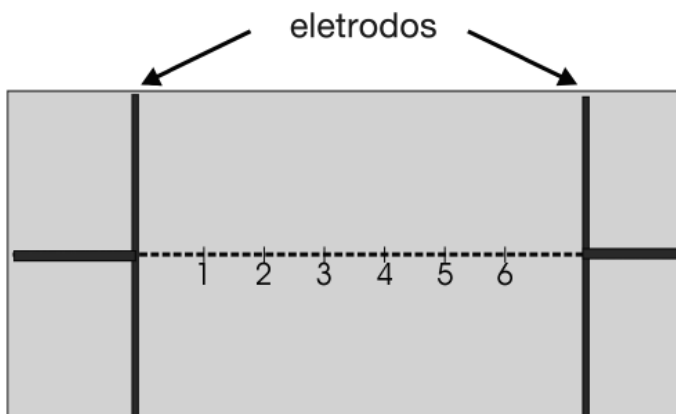


Figura 8.3: Papel milimetrado para eletrodos retos

2. Instale os eletrodos retos sobre o seu desenho no papel milimetrado (**Figura 8.3**) e efetue as conexões mostradas na **Figura 8.3**.

3. A cuba deve ser inicialmente nivelada com o auxílio de um nível de bolha circular, ajustando-se seus suportes reguláveis. Um desnível na cuba 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 deles.
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 8.4**. Ligue a ponta de prova preta do multímetro no conector aterrado (COM) e a ponta de prova vermelha no conector para medir voltagens.



Figura 8.4: Escala de 20V para corrente contínua.

Cuidado!!! O modelo do multímetro do seu polo pode ser diferente.

8. Pondo a ponta de prova de referência do voltímetro em contato com o eletrodo da esquerda (**Figura 8.2**) 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 2cm, ao longo de um segmento de reta que seja perpendicular aos eletrodos e que passe próximo aos seus centros. Coloque os dados na **Tabela 1**.

Tabela 1

Pontos	x [cm]	δx [cm]	$V_x - V_o$ [V]	$\delta(V_x - V_o)$ [V]
1				
2				
3				
4				
5				
6				

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

A incerteza na diferença de potencial é igual a

$$\delta(V_x - V_o) = \sqrt{(\delta V_x)^2 + (\delta V_o)^2}$$

9. Construa um gráfico de V versus a distância ao eletrodo da esquerda (**Figura 8.2**). Qual o resultado esperado? O que você obteve? Que informação fornece a inclinação do gráfico?

10. O *método dos mínimos quadrados* é um método numérico que ajusta uma reta aos pontos experimentais. De maneira simplificada, podemos dizer que esse ajuste é realizado minimizando a soma dos quadrados das distâncias dos valores dos pontos experimentais à melhor reta.

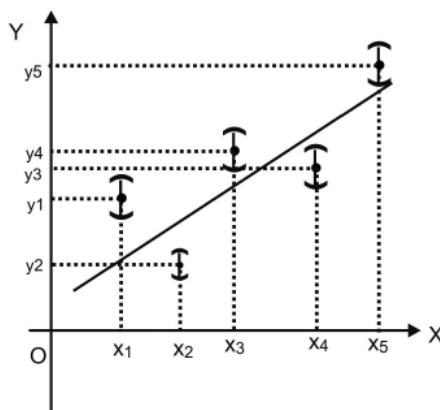


Figura 8.5: Ajuste de uma reta aos pontos experimentais.

Na **Figura 8.5**, foram representados os pontos experimentais $(x_1, y_1 \dots x_5, y_5)$ e a melhor reta $y(x) = ax + b$.

O método minimiza a seguinte expressão: $\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(y(x_i) - y_i)^2}{(\delta y_i)^2}$, sendo

$y(x_i)$ o valor da grandeza obtida utilizando-se a função que define a reta, y_i a medida experimental associada à medida x_i , δy_i a incerteza da medida experimental associada à medida y_i e N o número de medidas experimentais da grandeza y .

Ele fornece os coeficientes angular (a) e linear (b) da melhor reta. Também são fornecidas as incertezas do coeficiente angular δa e do coeficiente linear δb . Esse método só fornece bons resultados quando uma das incertezas relativas é muito menor do que a outra. Ele está disponível em algumas páginas na internet.

Utilize o método dos mínimos quadrados que está disponível em <http://www.if.ufrj.br/~carlos/applets/reta/reta.html> para obter o coeficiente angular da melhor reta com a sua incerteza. Não se esqueça de colocar no eixo das ordenadas a grandeza com a menor incerteza. Em alguns desses programas, os dados devem ser escritos com pontos e não com vírgulas (por exemplo: número 1,2 deve ser escrito como 1.2).

11. Calcule o campo elétrico entre os terminais lineares nos pontos próximos à região central da cuba de acrílico, utilizando a reta que o programa da internet forneceu.

Compare o valor do campo elétrico que você obteve pelo método dos mínimos quadrados com o valor que você obteve com o gráfico construído no item 9. Qual dos resultados você acha que é mais preciso?

Respostas Comentadas

A resposta deste experimento é individual. A seguir, algumas orientações para fazer as tarefas solicitadas no experimento.

Antes de construir o gráfico, releia com atenção o Complemento 3 do Módulo 2 de ICF1. Nele, há orientações sobre a escolha adequada das escalas dos eixos, da forma correta de lançar os pontos do gráfico e da necessidade de colocar as barras de incerteza nos pontos.

Com a finalidade de interpretar o coeficiente angular da reta que você vai obter no item 9, releia a parte da Aula 7 sobre a relação entre o campo elétrico e o potencial elétrico.

Se você está com dificuldade de entender o método dos mínimos quadrados, leia sobre o assunto no livro *Fundamentos da teoria dos erros*, de J.H. Vuolo.

Peça ajuda ao seu tutor para utilizar e entender o funcionamento do programa dos mínimos quadrados.

Assista novamente ao vídeo *Mapeamento de equipotenciais com eletrodos lineares*. Ele tem informações que vão ajudá-lo a compreender melhor este experimento.



Experimento 2

Atende aos Objetivos 1, 2, 3, 4, 5 e 6

Mapeamento de equipotenciais em uma cuba eletrolítica com eletrodos circulares

Coloque sobre a banca os seguintes materiais:

- 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;
- 2 fios com garras.

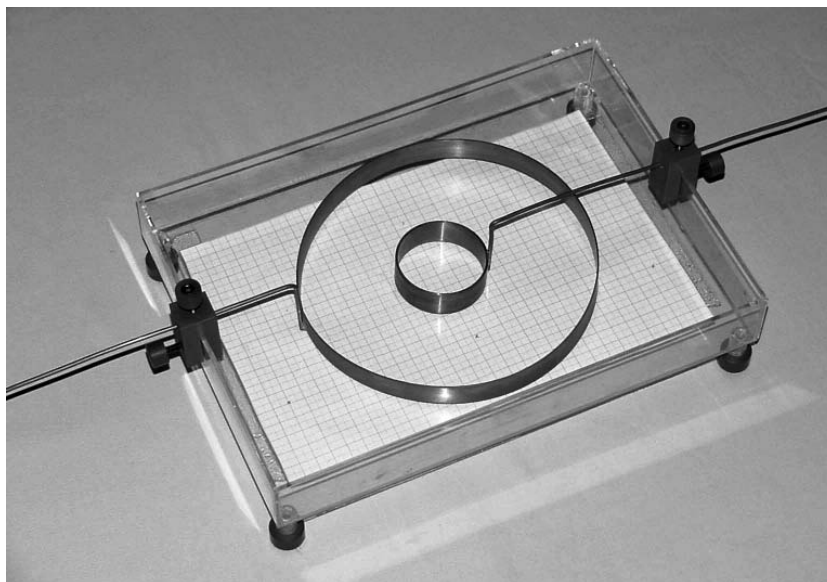


Figura 8.6: Cuba com eletrodos circulares.

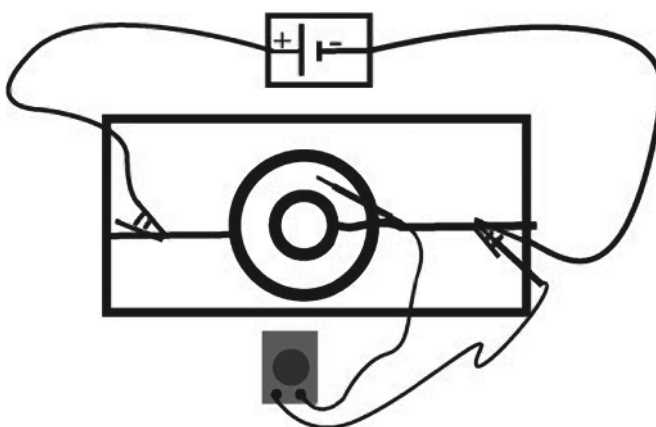


Figura 8.7: Ligação dos eletrodos nas fontes e ligação das ponteiros do multímetro com os terminais.

1. Estime os raios dos círculos dos eletrodos. Desenhe em uma folha de papel milimetrado os dois eletrodos circulares, como mostra a **Figura 8.9**. Marque os pontos onde o potencial elétrico vai ser medido (representados na **Figura 8.9** por traços verticais |). Pregue o papel milimetrado no fundo da cuba.

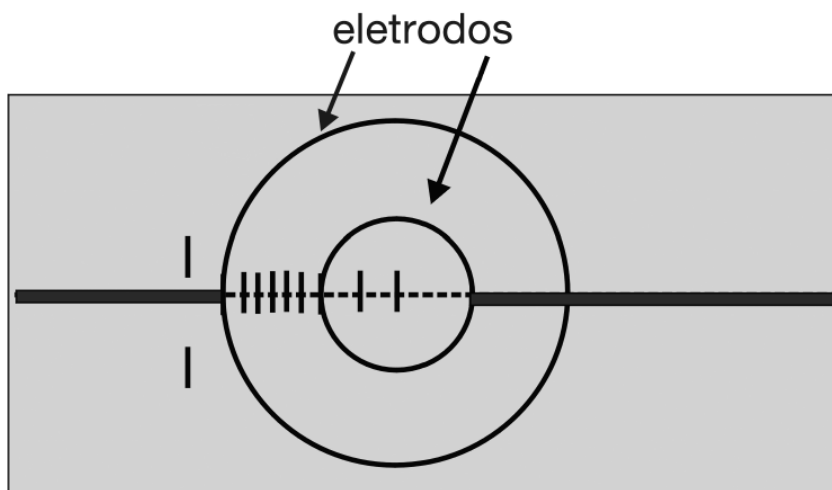


Figura 8.9: Desenho no papel milimetrado dos eletrodos circulares.

2. Instale os eletrodos circulares sobre as figuras desenhadas no papel milimetrado. Efetue as conexões mostradas na **Figura 8.8**.
3. Ligue o multímetro na escala de 20V para corrente contínua, como na **Figura 8.4** do Experimento 1. Ligue a ponta de prova preta do multímetro no conector aterrado (COM) e a ponta de prova vermelha no conector para medir voltagens.
4. Pondo a ponta de prova de referência do voltímetro (multímetro) em contato com o eletrodo interno (aquele que tem o menor raio - **Figura 8.6**) 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. Complete a **Tabela 2** a seguir.

Tabela 2

Pontos	x [cm]	δx [cm]	$1/x$ [cm ⁻¹]	$\delta(1/x)$ [cm ⁻¹]	$V_x - V_o$ [V]	$\delta(V_x - V_o)$ [V]
1						
2						
3						
4						
5						
6						

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

A incerteza no inverso da distância é $\delta(1/x) = (1/x^2) \delta x$. A incerteza na diferença de potencial é igual a $\delta(V_x - V_o) = \sqrt{(\delta V_x)^2 + (\delta V_o)^2}$.

5. Construa um gráfico de V versus a distância $1/x$ ao centro do eletrodo menor. Qual a relação entre o potencial elétrico e a distância x ?

6. Pondo a ponta de prova de referência do voltímetro (multímetro) em contato com o eletrodo externo (aquele que tem o maior raio - **Figura 8.7**) 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. Complete a **Tabela 3**.

7. Os potenciais dos pontos da **Tabela 2** são iguais aos pontos da **Tabela 3**? As diferenças de potencial entre os pontos 3 e 5 das **Tabelas 2** e **3** e 5 da **Tabela 3** são iguais? Comente o resultado.

Tabela 3

Pontos	x [cm]	δx [cm]	$V_x - V_0$ [V]	$\delta(V_x - V_0)$ [V]
1				
2				
3				
4				
5				
6				

Resposta Comentada

A resposta deste experimento é individual. A seguir, algumas orientações para fazer o gráfico solicitado no item 5 do Experimento 2.

Antes de construir o gráfico, releia com atenção o Complemento 3 do Módulo 2 de ICF1. Nele, há orientações sobre a escolha adequada das escalas dos eixos, a forma correta de lançar os pontos do gráfico e a necessidade de colocar as barras de incerteza nos pontos.

Com a finalidade de responder ao item 7 deste experimento, leia sobre a origem do potencial elétrico na Aula 7.

Assista novamente ao vídeo *Mapeamento de equipotenciais com eletrodos circulares*. Ele tem informações que vão ajudá-lo a compreender melhor este experimento.

Conclusão

Nesta aula, você mediu o potencial elétrico em uma cuba eletrolítica com eletrodos carregados lineares e circulares, utilizando um multímetro. Com essas medidas, conseguiu descobrir as equipotenciais e estimar o módulo do campo elétrico. Espero que os experimentos tenham tornado o conceito de potencial elétrico mais simples para você.

Resumo

O multímetro pode medir potenciais elétricos quando é ligado em paralelo com o elemento do circuito.

A escala do multímetro que deve ser escolhida tem que ser maior do que o potencial máximo da fonte e tem que fornecer a maior precisão possível.

Os experimentos com as cubas de acrílico mostraram, na prática, alguns resultados que foram discutidos na aula teórica sobre o potencial elétrico:

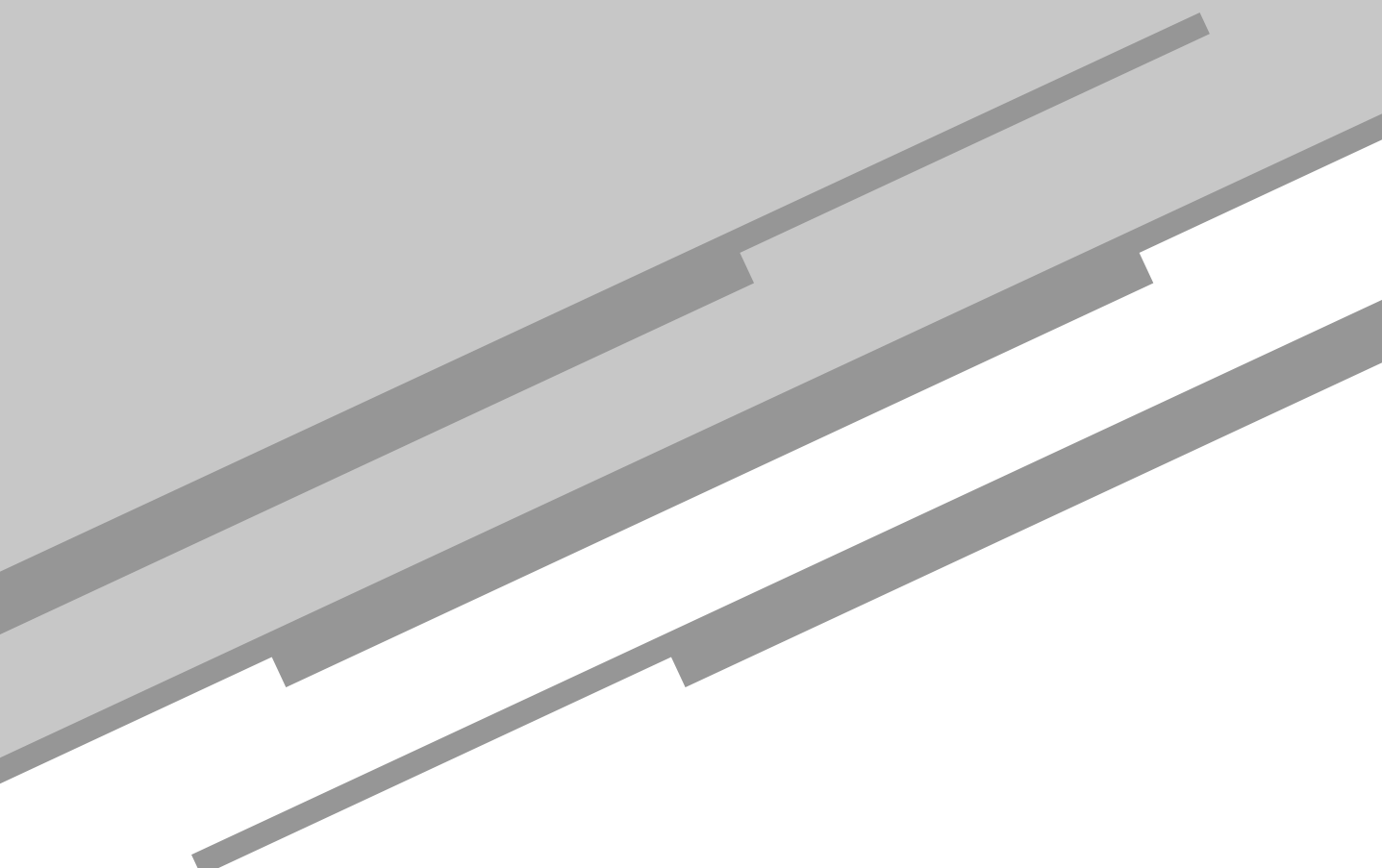
1. o potencial elétrico é maior nas proximidades dos eletrodos positivos;
2. o potencial elétrico é constante sobre condutores;
3. a origem do potencial elétrico é arbitrária e está associada, na prática, à ponteira de referência do multímetro;
4. quando mudamos a origem do potencial elétrico de posição, isto é, mudamos a ponteira de referência de posição, os potenciais elétricos de todos os pontos mudam de valor, mas a diferença de potencial entre os pontos não se modifica;
5. o conhecimento do potencial elétrico permite calcular o campo elétrico.

Leitura recomendada

Leia sobre o método dos mínimos quadrados no livro *Fundamentos da Teoria de Erros*, de José Henrique Vuolo.

Aula 9

Correntes elétricas



Maria Antonieta Almeida

Metas

Definir corrente elétrica, velocidade de deslocamento e os conceitos das grandezas associadas às propriedades elétricas dos condutores de corrente elétrica (resistência, resistividade, condutividade etc.). Enunciar a lei de Ohm e apresentar o modelo clássico de condução.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. definir e calcular uma corrente elétrica;
2. identificar os transportadores de corrente elétrica;
3. definir e calcular a resistência de resistores cilíndricos;
4. calcular a velocidade de deslocamento dos elétrons de condução;
5. calcular os vetores densidade de corrente elétrica;
6. enunciar a lei de Ohm.

Pré-requisitos

Para ter bom aproveitamento desta aula, é importante que você tenha estudado as aulas 3, 4, 5, 6 e 7 deste módulo.

Introdução

A energia elétrica é produzida nas usinas hidroelétricas, nas termoe-létricas, nas usinas nucleares etc. É a corrente elétrica que transporta a energia elétrica produzida nas diferentes usinas para os locais onde ela é consumida. Por isso, é importante saber o que é uma corrente elétrica e conhecer as leis associadas a ela. Nesta aula, vamos definir a corrente elétrica, as grandezas associadas às propriedades elétricas dos condutores de corrente elétrica (resistência, resistividade, condutividade etc.) e discutir a lei de Ohm e o modelo clássico de condução. Esses assuntos são apresentados nas seções denominadas “Um curto-circuito” e “Modelo clássico de condução”. Antes da leitura dessas seções, veja se você é capaz de responder às seguintes perguntas:

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 nas soluções eletrolíticas?
4. O que é a corrente elétrica convencional?
5. O que é uma corrente elétrica contínua?
6. O que é o efeito Joule?
7. O que é resistência elétrica?
8. Qual é a lei de Ohm?

Um curto-circuito

Fátima está em seu quarto, descansando. Ronaldo, a seu lado, diverte-se 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 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, e 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, tal como essa **Figura 9.1**.

E mostra a figura ao irmão.

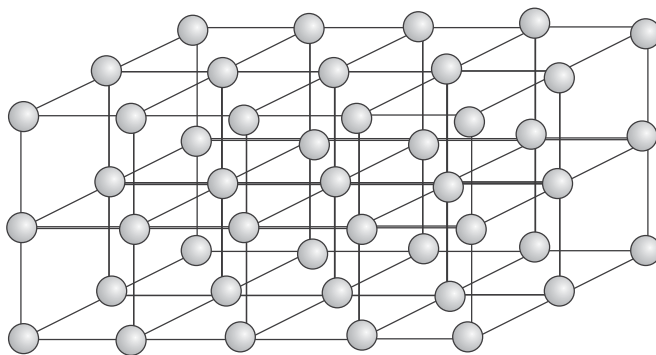


Figura 9.1: Rede de íons de um metal.

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



Elétrons livres são os elétrons que podem se deslocar livremente nos condutores porque estão fracamente ligados aos núcleos dos seus átomos.

– 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 (atg) de cobre é $63,5 \text{ g/atg}$. Portanto, o número de elétrons livres por unidade de volume é

$$n = \frac{(6,02 \cdot 10^{23} \text{ átomos / atg})(8,92 \text{ g / cm}^3)}{(63,5 \text{ g / atg})} = 8,46 \cdot 10^{23} \text{ átomos / g}$$

– 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 ideia 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 9.2**).

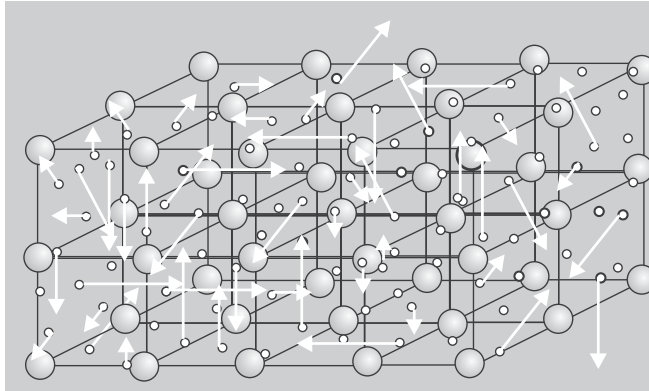


Figura 9.2: Os elétrons têm um movimento caótico no interior do metal.

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 o filamento de tungstênio é percorrido por uma **corrente elétrica**.



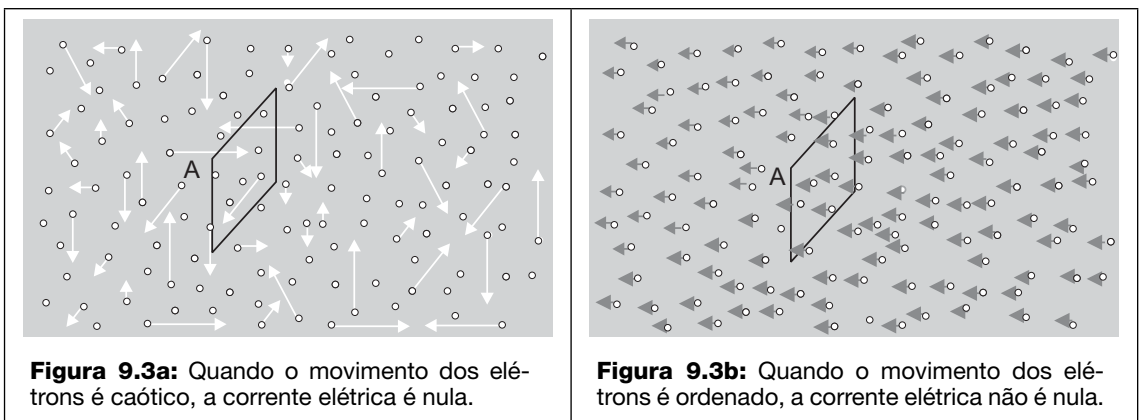
Corrente elétrica é o movimento ordenado de cargas elétricas que estão livres em um condutor.

– 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 9.3b**), 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*):



Quando o movimento dos elétrons é caótico (**Figura 9.3a**), 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.

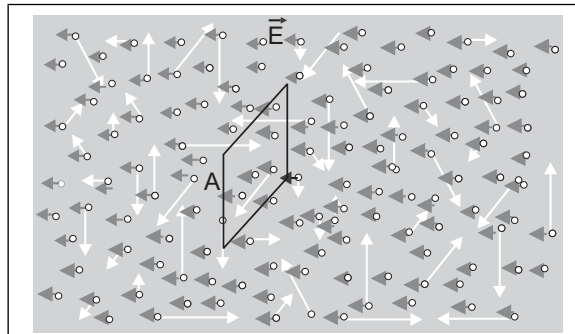


Figura 9.4: Na presença de um campo elétrico externo, os elétrons adquirem uma velocidade média no sentido contrário ao do campo elétrico.

– 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 9.4**). Esse movimento adicional se faz com uma velocidade média que tem a mesma direção do campo elétrico criado pela fonte e sentido contrário ao dele. Essa velocidade é denominada **velocidade de deslocamento** (também denominada velocidade de migração ou velocidade de arrasto). A velocidade de deslocamento está representada na **Figura 9.4** pelas setas cinza. A representação das velocidades no desenho não está na escala correta.



Velocidade de deslocamento é a velocidade média das cargas elétricas livres de um condutor. Ela é nula quando os condutores estão desligados das fontes de corrente elétrica.

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

– 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. 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

Aquecimento de um condutor pela passagem de corrente elétrica.

– Que complicação!

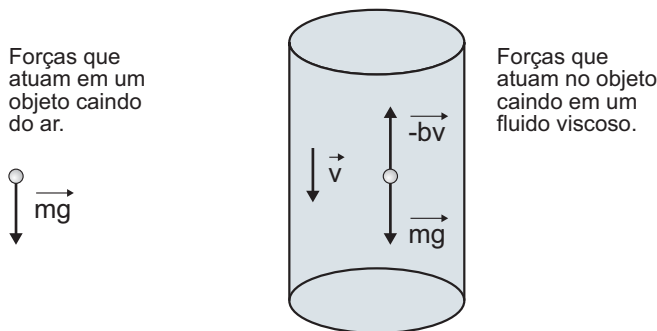


Figura 9.5: Movimento de um objeto em um fluido viscoso.

– 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 ($\vec{F}_{viscosa} = -b\vec{v}$) exercida pelo fluido sobre o objeto é contrária ao mo-

vimento 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 $\vec{v}_{\text{limite}} \cong \frac{m\vec{g}}{b}$. 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 incompressível 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 a energia elétrica em energia cinética dos elétrons da mesma forma que a força gravitacional transforma a 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 elé-

tricas que atravessam dois condutores diferentes ligados a uma mesma fonte de tensão são diferentes. Quando dois condutores são ligados a uma mesma diferença de potencial, dizemos que o condutor que é atravessado pela corrente elétrica maior tem uma resistência elétrica menor, e aquele com a menor corrente elétrica tem uma resistência elétrica maior.

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

– 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:

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

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



Resistência é a propriedade da matéria que mede a dificuldade que um corpo apresenta à passagem de corrente elétrica. Quando a resistência do corpo é grande, é difícil passar uma corrente elétrica pelo corpo; quando ela é pequena, é fácil.

Ronaldo já está cansado, mas não consegue se 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 a 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, ou seja, pela corrente elétrica.

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).

Modelo clássico de 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 sobre

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 ΔV contra i com os valores obtidos; **interpola** os pontos com a melhor reta.



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

Para, volta-se para a turma e pergunta:

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

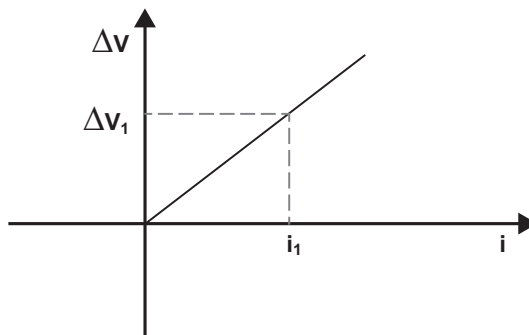


Figura 9.6: Curva característica de um resistor ôhmico.

Diante do silêncio da turma, ele continua:

– Como esta reta passa pela origem do sistema de eixos coordenados, 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:

$$\Delta V = Ri$$

A unidade de corrente elétrica é *Volt / metro* e é denominada **ohm** (Ω).



A lei de Ohm é a lei que afirma que existem resistores cujos valores das resistências elétricas não mudam quando as correntes elétricas que os atravessam modificam.

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.



O modelo cinético dos gases ideais é um modelo muito simples que imagina que as moléculas do gás são esferas rígidas pequeníssimas que só interagem quando colidem elasticamente entre si e elasticamente com as paredes do recipiente. As moléculas são tratadas como partículas. As distâncias médias entre as moléculas são grandes quando comparadas às dimensões destas. A distribuição das velocidades das moléculas é aleatória, de tal forma que a velocidade média das moléculas é nula. Existe um número muito grande de moléculas em um volume, que é pequeno do ponto de vista macroscópico. O número de moléculas com certo valor do vetor velocidade \vec{v} é constante no tempo. Os deslocamentos das moléculas obedecem às leis de Newton. Veja mais detalhes do modelo cinético dos gases ideais na Aula 2 do módulo 2 de ICF2.

– Como assim?

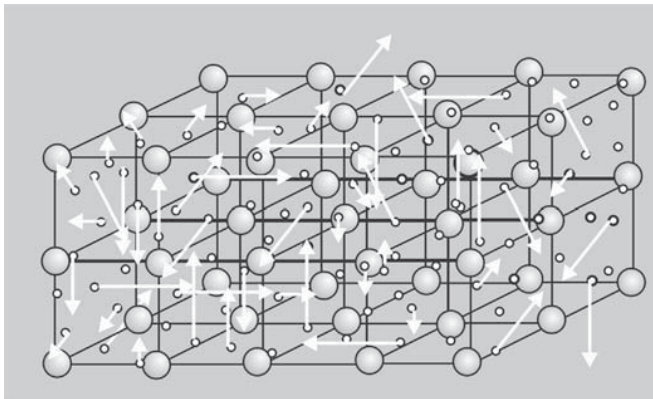


Figura 9.7: Os elétrons têm um movimento desordenado no interior dos metais.

– 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 ideia 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 $\langle \vec{v}_o \rangle$ é nula, isto é:

$$\langle \vec{v}_o \rangle = \frac{\vec{v}_{o1} + \dots + \vec{v}_{oN}}{N} = \vec{0}$$

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 para:

– 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 de elétrons é uniformemente acelerado e sua velocidade é:

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

Nessa fórmula, \vec{v}_o é a velocidade do elétron imediatamente após a última colisão e 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:

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{\vec{v}_1 + \dots + \vec{v}_N}{N} = \frac{\vec{v}_{o1} + \dots + \vec{v}_{oN}}{N} - \frac{e\vec{E}}{m} \left(\frac{t_1 + \dots + t_N}{N} \right)$$

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:

$$\frac{\vec{v}_{o1} + \dots + \vec{v}_{oN}}{N} = \vec{0} \quad \text{e}$$

$$\langle t \rangle = \left(\frac{t_1 + \dots + t_N}{N} \right) = \left(\frac{t_{o1} + \dots + t_{oN}}{N} \right) = \langle t_o \rangle$$

Nessa equação, o índice o 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

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{\vec{v}_{o1} + \dots + \vec{v}_{oN}}{N} - \frac{e\vec{E}}{m} \langle t \rangle = \langle \vec{v}_o \rangle - \frac{e\vec{E}}{m} \langle t \rangle = -\frac{e\vec{E}}{m} \langle t_o \rangle$$

A velocidade média dos elétrons $\langle \vec{v} \rangle$ é chamada de velocidade de deslocamento \vec{v}_d , ou seja,

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

Como o tempo médio entre duas colisões $\langle t_o \rangle$ só depende da natureza do material e da temperatura, a velocidade de deslocamento dos elétrons (velocidade média) em um metal mantido com temperatura constante e submetido a um campo elétrico constante é constante.

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

– O tempo médio entre duas colisões entre elétrons e dos elétrons com a rede de íons ($\cong 10^{-14} \text{ s}$) 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 \bar{v}_d . O movimento médio 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, $\bar{v}_{\text{limite}} \cong \frac{m\vec{g}}{b}$. 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. Fiz uma 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 com o mesmo módulo, a mesma direção e sentido contrário à velocidade de deslocamento dos elétrons. Denomina-se essa corrente elétrica de **corrente elétrica convencional**. As partículas que transportam a corrente elétrica

são denominadas *transportadores de corrente elétrica*. Os transportadores de corrente elétrica dos condutores metálicos são os elétrons.



Corrente elétrica convencional é a corrente elétrica que imagina que os transportadores de corrente elétrica têm cargas elétricas positivas, que o movimento de cargas elétricas positivas ocorre com uma velocidade de deslocamento com o mesmo módulo, a mesma direção e sentido contrário ao da velocidade de deslocamento da corrente real com transportadores de cargas elétricas negativas ($\vec{v}_{d+} = -\vec{v}_{d-}$) e que os módulos das cargas elétricas dos transportadores de corrente da corrente elétrica convencional são iguais aos módulos das cargas elétricas dos transportadores de corrente elétrica da corrente real com cargas elétricas negativas.

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 de segundo.

A turma começa a se agitar. São muitas ideias novas ao mesmo tempo. O outro professor de Física explicava pouco; este explica muito. A comparação entre os dois professores lembra o ditado “nem tanto ao mar nem tanto à Terra”. Já nem sabem mais a razão de toda essa explicação.

O professor percebe que a turma está se dispersando.

– Alguém lembra por que estamos discutindo tudo isso?

Com grande esforço, Ronaldo organiza suas ideias:

– É para provar a lei de Ohm.

– 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 9.8** cria um movimento ordenado dos elétrons da direita para a esquerda.

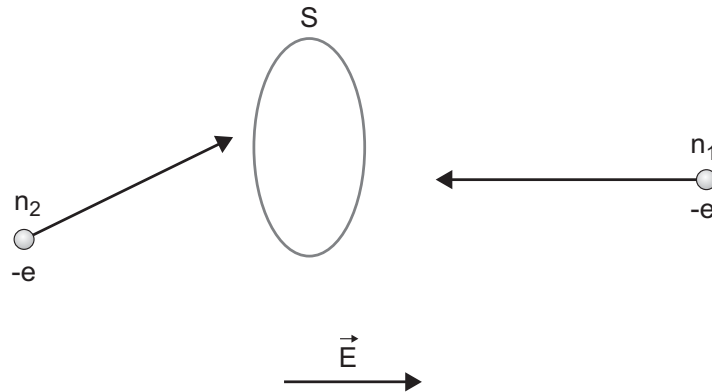


Figura 9.8: Corrente elétrica.

Tomemos n_1 como o número de elétrons que atravessam S da direita para a esquerda e n_2 como o número dos que atravessam S no sentido oposto. A intensidade da corrente elétrica é:

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

na qual ΔQ é a carga elétrica total que atravessa a área S em um intervalo de tempo Δt e $e = 1,9 \times 10^{-19} \text{ C}$ é o módulo da carga elétrica do elétron. Quando o intervalo de tempo Δt 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 ΔQ que atravessa a área S no intervalo de tempo Δt utilizando a velocidade de deslocamento dos elétrons.

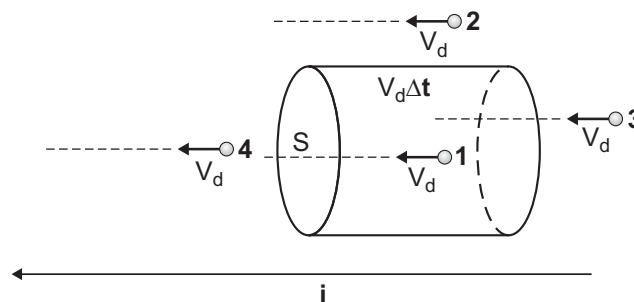


Figura 9.9: Relação entre a corrente elétrica e a velocidade de deslocamento.

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 9.9**, 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 N 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 Δt é o número de elétrons contidos no cilindro multiplicado pela carga elétrica dos elétrons: $\Delta Q = -Ne$. Por isso, a corrente elétrica é:

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

A corrente por unidade de área é denominada de densidade de corrente elétrica j . O módulo da densidade de corrente elétrica é dado por:

$$j = \frac{i}{S} = e n v_d$$

É costume definir o vetor densidade de corrente elétrica associado a um transportador de corrente elétrica com carga elétrica q e velocidade de deslocamento \vec{v}_d da seguinte forma: $\vec{j} = q n \vec{v}_d$. Logo, o vetor densidade de corrente elétrica associado aos elétrons de condução é dado por:

$$\vec{j} = -e n \vec{v}_d$$

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 $i_C = e n S v_d$. 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.

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.

– Se for impossível identificar as diferenças de um movimento de cargas elétricas positivas em um sentido para um 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. Esse é o caso das soluções eletrolíticas das pilhas. 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 9.10** o sentido da corrente elétrica convencional pelo vetor unitário \hat{n} perpendicular à área S .

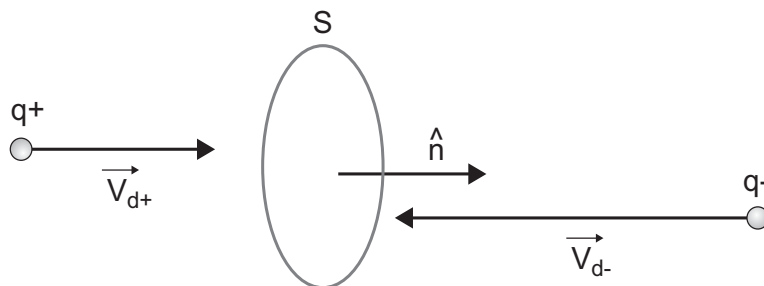


Figura 9.10: Corrente elétrica com transportadores de cargas positivas e negativas.

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 9.10**, a corrente elétrica é igual a $i = i_{C+} + i_{C-}$, em que i_{C+} e i_{C-} são os módulos das correntes convencionais associadas aos transportadores de corrente positivos e negativos. É claro que a corrente convencional e a corrente verdadeira são iguais quando os transportadores de cargas elétricas são positivos.



A corrente elétrica produzida por diferentes transportadores de corrente elétrica é a soma dos módulos das correntes elétricas convencionais associadas a cada um dos transportadores.

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

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

em que v_{d+} é o módulo do vetor velocidade de deslocamento das cargas positivas e n_+ é a densidade volumétrica dos transportadores de corrente elétrica com carga elétrica positiva.

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

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

em que v_{d-} é o módulo da velocidade de deslocamento das cargas q e n_- é a densidade volumétrica dos transportadores de corrente elétrica com 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 $q_+ = |q_-|$ 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 convencional transportada pelos elétrons fica positiva, isto é,

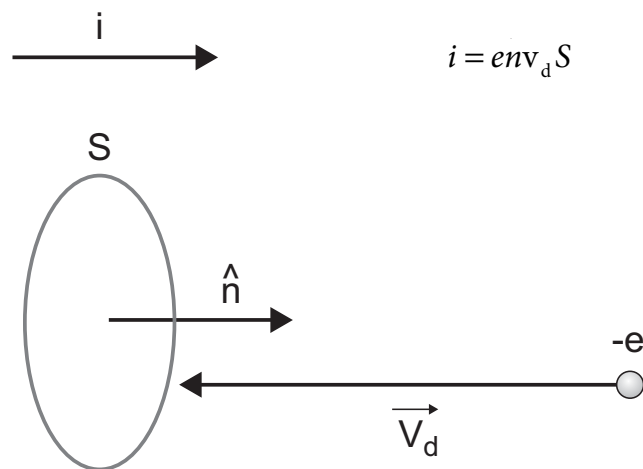


Figura 9.11: Corrente elétrica convencional associada aos elétrons.

Como vimos anteriormente, a relação entre o módulo da velocidade de deslocamento dos elétrons em um condutor e o campo elétrico é

$$v_d = \frac{eE\langle t_o \rangle}{m}.$$

Substituindo a velocidade de deslocamento na expressão da corrente elétrica convencional, concluímos que a corrente elétrica por unidade de área é proporcional ao campo elétrico:

$$j = \frac{i}{S} = \frac{env_d S}{S} = en \frac{eE\langle t_o \rangle}{m} = \frac{e^2 n \langle t_o \rangle}{m} E = \sigma E,$$

sendo $\sigma = \frac{e^2 n \langle t_o \rangle}{m}$ denominada **condutividade elétrica**. Ela depende do condutor e da temperatura.



Condutividade elétrica é a propriedade da matéria que mede a facilidade que um material apresenta à passagem de corrente elétrica. Ela só depende da composição química do material e da temperatura. Ela não depende da forma do material.

A relação entre a densidade de corrente elétrica e o campo elétrico é denominada lei de Ohm local.

$$j = \sigma E$$

A definição do vetor densidade de corrente elétrica $\vec{j} = nq\vec{v}_d$ e a relação entre a velocidade de deslocamento \vec{v}_d e o campo elétrico \vec{E} obtida anteriormente $\left(\vec{v}_d = \frac{q\vec{E}\langle t_o \rangle}{m} \right)$ permitem reescrever a lei de Ohm local na forma vetorial, isto é,

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

Na **Figura 9.12**, 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.

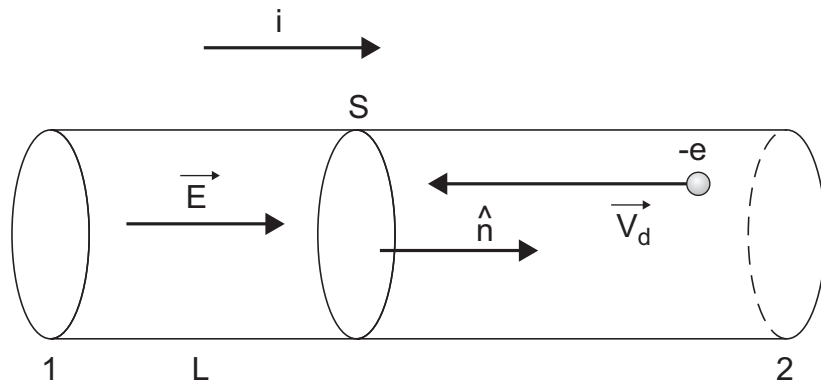


Figura 9.12: Lei de Ohm em um condutor cilíndrico.

A diferença de potencial em um condutor com seção reta S e comprimento L que é percorrido por uma corrente elétrica convencional que vai de 1 para 2 é

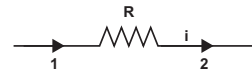
$$V_1 - V_2 = EL$$

A relação entre o módulo do campo elétrico e a corrente elétrica i é fornecida pela lei de Ohm local, isto é,

$$E = \frac{j}{\sigma} = \frac{i}{\sigma S}$$

Substituindo-se o módulo do campo elétrico na expressão da diferença de potencial $V_1 - V_2$ obtemos:

$$V_1 - V_2 = \frac{i}{\sigma S} L = \left(\frac{L}{\sigma S} \right) i = \left(\frac{L\rho}{S} \right) i = Ri \Rightarrow \quad V_1 - V_2 = Ri$$



Nesta 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 ρ . A resistividade também depende do material e da temperatura. A expressão obtida para a resistência mostra que a unidade de resistividade é Ωm e a unidade de condutividade é $(\Omega m)^{-1}$.



Resistividade elétrica é a propriedade da matéria que mede a dificuldade que um material apresenta à passagem de corrente elétrica. Ela só depende da composição química do material e da temperatura. Ela não depende da forma do material. A lei de Ohm local pode ser reescrita utilizando a resistividade, isto

$$\vec{E} = \frac{\vec{j}}{\sigma} = \rho \vec{j}.$$

Ronaldo percebe que o professor tinha finalizado aquela demonstração complicada porque ele acabara de escrever a lei de Ohm no quadro. Ele lembra que já ouviu falar que as propriedades da matéria só podiam ser explicadas pela Física Quântica e pergunta:

– 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 referentes às propriedades elétricas da matéria. 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 maneira geral, os primeiros modelos construídos não são satisfatórios, como no caso do modelo clássico de condução.

Ronaldo lembra que já ouviu sua irmã Fátima falar sobre correntes contínuas e sobre correntes alternadas. Ele pergunta ao professor o que significam essas expressões.

– Em todas as demonstrações que fiz hoje, eu imaginei que a corrente convencional associada aos transportadores de correntes elétricas ocorria em um único sentido. Correntes elétricas que não modificam o

seu módulo e o seu sentido com o passar do tempo são denominadas correntes contínuas. Todavia, existem correntes elétricas cujos módulo e sentido se invertem com o passar do tempo. Elas são denominadas correntes alternadas. Os resultados obtidos nesta aula se aplicam às correntes alternadas quando o intervalo de variação do módulo e do sentido das correntes elétricas não é muito pequeno. A corrente elétrica que chega às nossas residências é alternada. As fornecidas por pilhas e baterias são contínuas. Existem dispositivos elétricos que transformam correntes elétricas contínuas em correntes elétricas alternadas.

O professor percebe que exagerou nas explicações teóricas e distribui para os alunos uma lista de exercícios.

===== **Atividade 1** =====

Atende aos Objetivos 1, 2, 3 e 6

Com base nas seções “Um curto-circuito” e “Modelo clássico de condução”, responda às seguintes perguntas:

a) O que é corrente elétrica?

b) Quais são os transportadores de corrente elétrica nos condutores metálicos?

c) Quais são os transportadores de corrente elétrica nas soluções eletrolíticas?

d) O que é a corrente elétrica convencional?

e) O que é uma corrente elétrica contínua?

f) O que é o efeito Joule?

g) O que é resistência elétrica?

h) Qual é a lei de Ohm?

Respostas Comentadas

a) Corrente elétrica é o movimento ordenado de cargas elétricas. A corrente elétrica é definida como a carga elétrica que atravessa uma área

S por unidade de tempo, isto é, $i = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$.

b) Nos condutores metálicos, a corrente elétrica é transportada pelos elétrons livres.

c) Nas soluções eletrolíticas, as correntes elétricas são transportadas pelos íons positivos e negativos.

d) A corrente elétrica pode ser transportada por cargas elétricas positivas, por cargas elétricas negativas ou por cargas elétricas positivas e negativas (eletrólitos). A corrente elétrica convencional é uma corrente elétrica em que todos os transportadores de corrente elétrica têm cargas elétricas positivas. Os transportadores de corrente elétrica com cargas elétricas negativas q_- e velocidade de deslocamento \vec{v}_{d-} são substituídos por transportadores de corrente elétrica com cargas elétricas positivas iguais a $-q_-$ com velocidades de deslocamentos iguais a $\vec{v}_{d+} = -\vec{v}_{d-}$.

- e) A corrente elétrica contínua é uma corrente elétrica com módulo e sentido constantes no tempo.
- f) O efeito Joule é a transformação de energia elétrica em energia calorífica que ocorre quando um condutor é percorrido por uma corrente elétrica.
- g) Resistência é a propriedade de um corpo que está associada à dificuldade de passagem da corrente elétrica por ele. Quanto maior é a resistência de um corpo, maior é a dificuldade de uma corrente elétrica atravessá-lo. A resistência de um resistor é a razão entre a diferença de potencial nos terminais do resistor e a corrente elétrica, isto é, $R = \frac{\Delta V}{i}$.
- h) A lei de Ohm afirma que a diferença de potencial nos terminais de um resistor é dada por $\Delta V = Ri$, sendo R uma constante.

Atividade 2

Atende ao Objetivo 3

Com base na situação que você leu em “Um curto-circuito” e “Modelo clássico de condução”, faça o seguinte exercício:

Calcule as resistências de um fio de alumínio e um fio de cobre que têm diâmetros e comprimentos iguais. Os diâmetros dos fios são iguais a 2,5mm e os comprimentos dos fios são iguais a 1,0m. As resistividades do alumínio e do cobre são respectivamente iguais a:

$$\rho_{Al} = 2,75 \cdot 10^{-8} \Omega m \text{ e } \rho_{Cu} = 1,69 \cdot 10^{-8} \Omega m.$$

Forneça a sua resposta com dois algarismos significativos.

b) Qual é o módulo do vetor densidade de corrente elétrica \vec{j} ? Desenhe vetor densidade de corrente elétrica na **Figura 9.13**.

c) Desenhe na **Figura 9.13** o sentido da corrente elétrica dos elétrons.

d) Calcule o vetor velocidade de deslocamento dos elétrons de condução (elétrons livres). O módulo dessa velocidade tem a mesma ordem de grandeza do módulo da velocidade média do movimento caótico dos elétrons no interior da prata ($\langle v_{\text{caótica}} \rangle \cong 10^5 \text{ m/s}$)? Desenhe na **Figura 9.13** a velocidade de deslocamento dos elétrons.

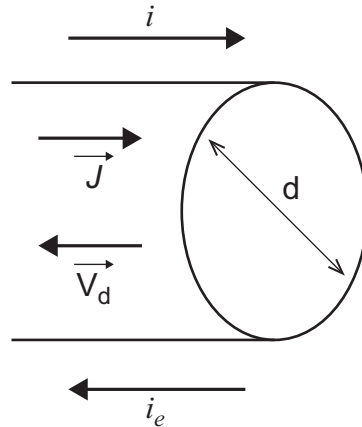
Respostas Comentadas

Figura 9.14: Fio de prata com as correntes elétricas, com o vetor densidade de corrente elétrica e com a velocidade de deslocamento dos elétrons.

a) $i = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{(420C)}{(80 \times 60s)} \cong 0,09A$

b) O módulo do vetor densidade de corrente elétrica é

$$j = \frac{i}{A} = \frac{i}{\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)} = \frac{(420C)}{(80 \times 60s) \frac{\pi \times (2,6 \times 10^{-3})^2}{4}} \cong 16 \times 10^3 A/m^2$$

c) Os elétrons têm uma velocidade de deslocamento com o sentido contrário ao da corrente elétrica convencional. Logo, a corrente elétrica verdadeira tem o sentido contrário ao sentido da corrente elétrica convencional.

d)

$$j = nev_d \Rightarrow v_d = \frac{j}{ne} = \frac{(1600A)}{(5,8 \times 10^{28} \text{ elétrons livres } / m^3)(1,6 \times 10^{-19} C)} \cong 0,18 \times 10^{-5} m/s$$

A velocidade de deslocamento calculada é muito menor do que a velocidade média caótica dos elétrons.

Atividade 4

Atende aos Objetivos 1, 4 e 5

Com base na situação que você leu nas seções “Um curto-circuito” e “Modelo clássico de condução”, faça o seguinte exercício:

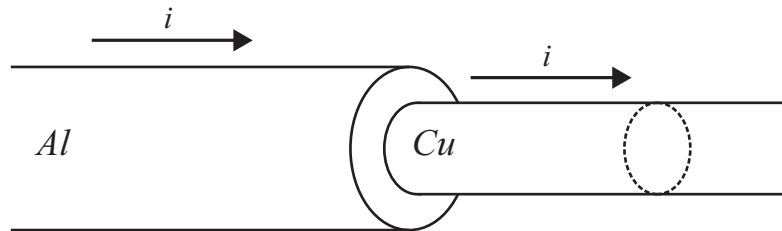


Figura 9.15: Fios de cobre e de alumínio ligados em série.

A extremidade de um fio de alumínio cujo diâmetro é de 2,5mm é soldada à extremidade de um fio de cobre com diâmetro de 1,8mm. Uma corrente elétrica de 1,3 A passa pelo fio composto. As resistividades do alumínio e do cobre são respectivamente iguais a $\rho_{Al} = 2,75 \cdot 10^{-8} \Omega m$ e $\rho_{Cu} = 1,69 \cdot 10^{-8} \Omega m$. O número de transportadores de corrente elétrica do alumínio é igual a $6,0 \cdot 10^{28} (\text{elétrons livres})/m^3$ e do cobre é igual a $8,5 \cdot 10^{28} (\text{elétrons livres})/m^3$.

a) Qual é o módulo do vetor densidade de corrente elétrica \vec{j} em cada fio? Desenhe os vetores densidade de corrente elétrica na **Figura 9.15**.

b) Desenhe na **Figura 9.15** o sentido da corrente elétrica dos elétrons.

c) Calcule os vetores velocidade de deslocamento dos elétrons de condução (elétrons livres) nos fios de cobre e alumínio. Desenhe esses vetores na **Figura 9.15**.

- d) Calcule o vetor campo elétrico no fio de cobre e no fio de alumínio. Desenhe esses vetores na **Figura 9.15**.

Respostas Comentadas

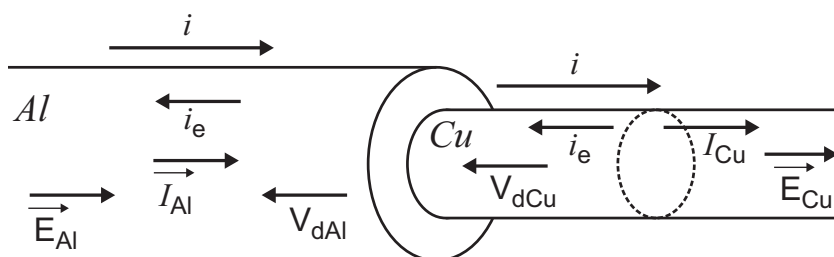


Figura 9.16: Fios de alumínio e cobre com os vetores elétricos e as correntes dos elétrons.

- a) Os vetores densidade de corrente elétrica \vec{j} em cada fio foram representados na **Figura 9.16**. Os módulos dos vetores densidade de corrente elétrica \vec{j} em cada fio são dados por:

$$j_{Al} = \frac{i}{S_{Al}} = \frac{i}{\pi r_{Al}^2} = \frac{(1,3A)}{3,14 \cdot \left(\frac{2,5 \cdot 10^{-3}}{2} m\right)^2} \cong 2,6 \cdot 10^5 A/m^2,$$

$$j_{Cu} = \frac{i}{S_{Cu}} = \frac{i}{\pi r_{Cu}^2} = \frac{(1,3A)}{3,14 \cdot \left(\frac{1,8 \cdot 10^{-3}}{2} m\right)^2} \cong 5,1 \cdot 10^5 A/m^2$$

- b) A corrente convencional tem o sentido contrário ao da corrente dos elétrons. A corrente dos elétrons foi desenhada na **Figura 9.16**.

c) As velocidades de deslocamento dos elétrons foram representadas na **Figura 9.16**. A relação entre o módulo da velocidade de deslocamento dos elétrons e o módulo do vetor densidade de corrente elétrica é dada por: $j = env$, em que e é o módulo da carga do elétrons, n é o número de transportadores de corrente elétrica por unidade de volume e v , a velocidade de deslocamento dos elétrons. Logo, temos que:

$$j_{Al} = en_{Al}v_{Al} \Rightarrow v_{Al} = \frac{j_{Al}}{en_{Al}} \cong \frac{2,6 A / m^2}{(1,6 \cdot 10^{-19} C) \cdot (6 \cdot 10^{28} \text{ elétrons} / m^3)} = 2,7 \cdot 10^{-5} m / s$$

$$j_{Cu} = en_{Cu}v_{Cu} \Rightarrow v_{Cu} = \frac{j_{Cu}}{en_{Cu}} \cong \frac{2,6 A / m^2}{(1,6 \cdot 10^{-19} C) \cdot (8,5 \cdot 10^{28} \text{ elétrons} / m^3)} = 3,8 \cdot 10^{-5} m / s$$

d) Os vetores campo elétrico no fio de cobre e no fio de alumínio foram representados na **Figura 9.16**. A relação entre o módulo do campo elétrico e o vetor densidade de corrente elétrica fornece os módulos do campo elétrico que são iguais a $E = \rho j$, sendo ρ a resistividade do material. Logo, temos que:

$$E_{Al} = \rho_{Al} \cdot j_{Al} = (2,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m) \cdot (2,6 \cdot 10^5 A / m^2) = 0,007 V / m$$

$$E_{Cu} = \rho_{Cu} \cdot j_{Cu} = (1,69 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m) \cdot (2,6 \cdot 10^5 A / m^2) = 0,009 V / m$$

Conclusão

Nesta aula, você aprendeu definições de corrente elétrica e das grandezas que caracterizam as propriedades de condução elétrica de um meio. Foi apresentada também a lei de Ohm, que relaciona a diferença de potencial aplicada nos terminais de um resistor e a corrente elétrica que o atravessa. Na próxima aula, discutiremos as fontes de corrente elétrica.

Resumo

1. Corrente elétrica é o movimento ordenado de cargas elétricas. É definida como a carga elétrica que atravessa uma área S por unidade de tempo, isto é, $i = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$.

2. O vetor densidade de corrente é dado por $\vec{j} = nq\vec{v}_d$, em que n é o número de transportadores de corrente elétrica por unidade e volume, q é a carga elétrica do transportador e \vec{v}_d é a velocidade de deslocamento do transportador de corrente elétrica. O módulo do vetor densidade de corrente elétrica é a corrente elétrica por unidade de área, isto é, $j = \frac{i}{S}$.

3. A corrente elétrica convencional associada a transportadores de cargas elétricas negativas com carga elétrica q e velocidade de deslocamento \vec{v}_{d-} é formada por transportadores de cargas elétricas positivas com cargas elétricas $-q$ que se deslocam com velocidade de deslocamento $-\vec{v}_{d-}$.

4. A resistência de um resistor cilíndrico com comprimento ℓ e seção reta S é dada por $R = \frac{\rho \ell}{S}$, em que ρ é a resistividade do material, ℓ é o comprimento do resistor e S é a seção reta do resistor.

5. A lei de Ohm afirma que a diferença de potencial nos terminais de um resistor é dada por $\Delta V = Ri$, sendo R uma constante.

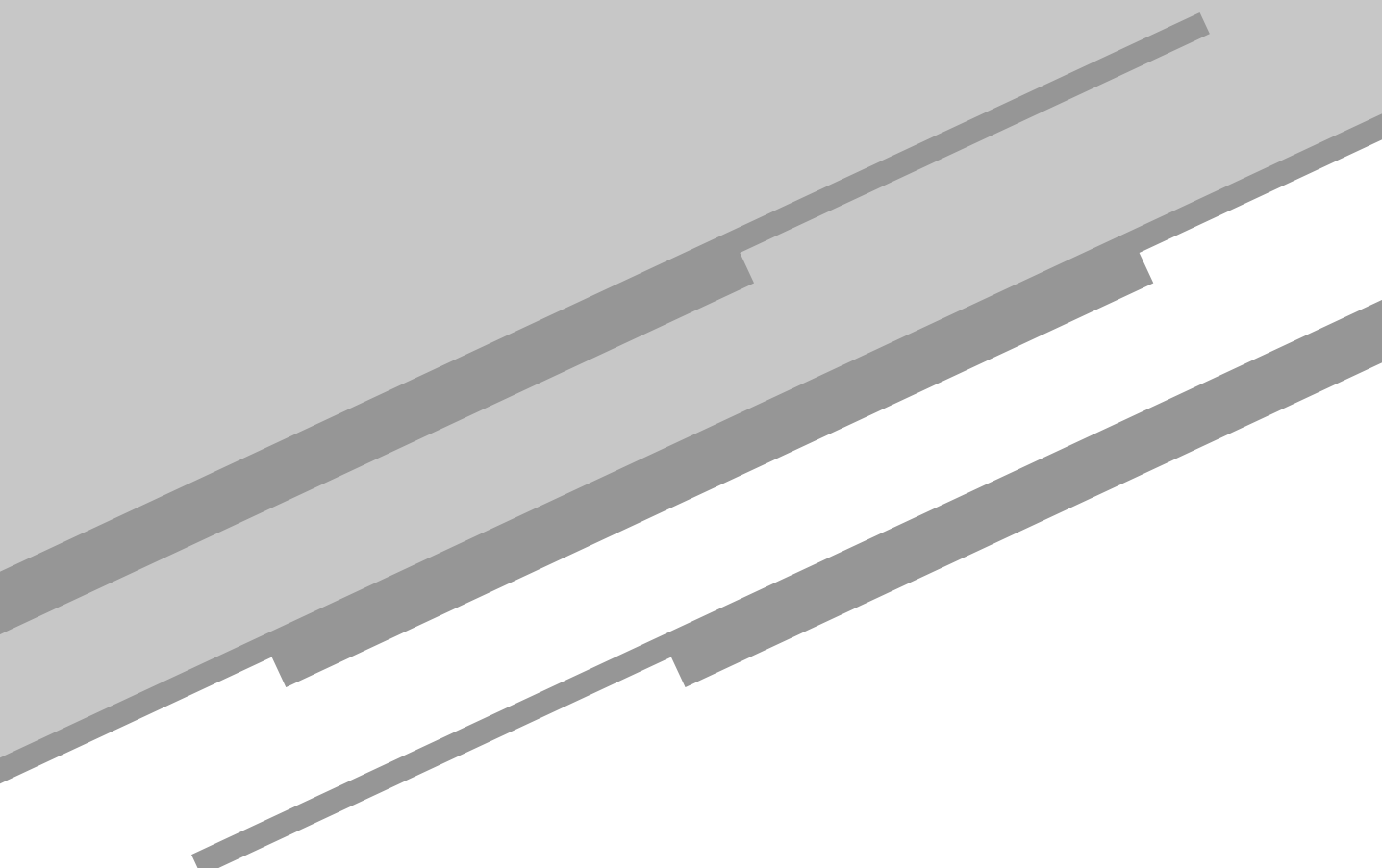
Leituras recomendadas

Leia sobre os assuntos corrente elétrica, sentido convencional da corrente, intensidade de corrente e medida da intensidade de corrente na seção “Eletricidade e Magnetismo” do livro *Física* - volume único, de A. Máximo e B. Alvarenga.

Leia sobre os assuntos modelo clássico da corrente elétrica, metal sem corrente, corrente elétrica e a sua causa, tensão elétrica, aquecimento nos condutores e diferentes linguagens descrevendo o mesmo fenômeno, na Parte 1 do livro *Física 3 (eletromagnetismo)*, do Gref.

Aula 10

Prática 2 – Lei das malhas e lei dos nós



Maria Antonieta Almeida

Metas

Ensinar um método experimental que permite construir as curvas características dos resistores, obter experimentalmente a lei das malhas e a lei dos nós e verificar as características da voltagem nos terminais de um fonte de corrente contínua.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. utilizar o multímetro para medir correntes elétricas;
2. utilizar o multímetro para medir voltagens;
3. construir as tabelas com as medidas diretas com as suas incertezas;
4. construir as tabelas com as medidas indiretas com as suas incertezas;
5. construir as curvas características dos resistores com os dados experimentais;
6. estimar com os gráficos construídos a resistência dos resistores;
7. utilizar o método dos mínimos quadrados para calcular a resistência de resistores ôhmicos;
8. descrever as propriedades das voltagens nos terminais de uma fonte de corrente contínua;
9. enunciar a lei das malhas e a lei dos nós.

Pré-requisitos

Para se ter bom aproveitamento desta aula, é importante que o aluno saiba somar frações, elevar expressões a potências, conhecer o conceito de funções e representação gráfica de uma reta. Além disso, o aluno deve conhecer o conceito de potencial elétrico, corrente elétrica e resistência elétrica.

Esses conteúdos podem ser encontrados nos livros das disciplinas de Matemática Básica e nas aulas deste módulo.

Introdução

As correntes elétricas distribuem a energia elétrica aos elementos de um circuito elétrico que estão ligados a uma fonte de energia elétrica. Para calcular a energia que a corrente elétrica fornece a cada elemento do circuito elétrico, é necessário descobrir as propriedades elétricas dos elementos do circuito elétrico, as correntes elétricas e as voltagens associadas a cada elemento. Por isso, nesta prática você vai fazer experimentos para aprender sobre a voltagem nos terminais da fonte, construção experimental das curvas características de lâmpadas com filamentos de tungstênio e de resistores carbônicos e a lei das malhas e a lei dos nós. Ambas são leis que permitem calcular teoricamente as correntes elétricas em um circuito elétrico. Serão realizados os seguintes 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



Assista aos vídeos denominados *Quadro de luz de corrente contínua*, *A lei de Ohm* e *A lei das malhas e a lei dos nós* antes e depois de realizar os experimentos desta aula. Os experimentos que você vai fazer neste laboratório são realizados nesses vídeos. Eles vão ajudá-lo a fazer os experimentos, entendendo melhor os seus objetivos, e a fazer as atividades propostas. Eles estão disponíveis na Sala da disciplina ICF2 e no Portal TECA. Para acessá-los no Portal TECA, escolha vídeo, digite “ICF2_cederj” e escolha o botão PESQUISA TECA.

Atividade 1

Atende ao Objetivo 2

Aprenda como medir voltagens com o multímetro, lendo o Complemento 3. A seguir, marque as respostas corretas:

- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você pode ligar o multímetro da escala de 200V $\overline{\cdot\cdot\cdot}$.
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você pode ligar o multímetro da escala de 2V $\overline{\cdot\cdot}$.
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você pode ligar o multímetro da escala de 20V $\overline{\cdot\cdot}$.
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você pode ligar o multímetro da escala de 200V \sim .
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você pode ligar o multímetro da escala de 2V \sim .
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você pode ligar o multímetro da escala de 20V \sim .
- () O multímetro deve ser ligado em série com o elemento cuja voltagem queremos medir.
- () O multímetro deve ser ligado em paralelo com o elemento cuja voltagem queremos medir.

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

Resposta Comentada

- (X) Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você pode ligar o multímetro da escala de 200V $\overline{\cdot\cdot\cdot}$.
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você pode ligar o multímetro da escala de 2V $\overline{\cdot\cdot}$.
- (X) Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você pode ligar o multímetro da escala de 20V $\overline{\cdot\cdot}$.
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você pode ligar o multímetro da escala de 200V \sim .

() Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você pode ligar o multímetro da escala de 2V~.

() Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você pode ligar o multímetro da escala de 20V~.

() O multímetro deve ser ligado em série com o elemento cuja voltagem queremos medir.

(X) O multímetro deve ser ligado em paralelo com o elemento cuja voltagem queremos medir.

Como o símbolo de voltagem contínua é --- e o de voltagem alternada é \sim , todas as respostas que contêm o símbolo de corrente alternada estão erradas.

Se ligarmos o multímetro em uma voltagem menor do que a voltagem máxima da fonte, ele queima o fusível. Logo, a resposta que indica a escala de 2V --- também está errada.

O multímetro pode ser ligado sem queimar nas escalas de 200V e 20V contínuas. Se você ler o manual do multímetro, você vai verificar que a escala de 20V contínua fornece uma medida com maior precisão do que a escala com 200V contínua. Logo, se a fonte for estável, você deve usar a escala de 20V contínua. Se a instabilidade da fonte for alta, utilize a escala de 200V contínua.

O multímetro deve ser ligado em paralelo com o elemento cuja voltagem queremos medir, uma vez que, se ele for ligado em série, vai alterar muito a voltagem nos terminais do elemento e vai medir a voltagem nos seus terminais, que é diferente da voltagem nos terminais do elemento do circuito.

Atividade 2

Atende ao Objetivo 1

Aprenda como medir correntes com o multímetro, lendo o Complemento 3. A seguir, marque as respostas corretas:

- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V e você não tem como estimar a corrente elétrica no resistor, você deve ligar o multímetro na escala de 20 A $\overline{\cdot}$.
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V e você não tem como estimar a corrente elétrica no resistor, você deve ligar o multímetro da escala de 20 mA $\overline{\cdot}$.
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V e você já sabe que a sua corrente elétrica é menor do que 20mA e maior do que 2mA, você deve ligar o multímetro da escala de 20mA $\overline{\cdot}$.
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V e você já sabe que a sua corrente elétrica é menor do que 20mA e maior do que 2mA, você deve ligar o multímetro da escala de 2mA $\overline{\cdot}$.
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V e você já sabe que a sua corrente elétrica é menor do que 20mA e maior do que 2mA, você deve ligar o multímetro da escala de 200mA $\overline{\cdot}$.
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V e você não tem como estimar a corrente elétrica no resistor, você deve ligar o multímetro na escala de 20 A \sim .
- () O multímetro deve ser ligado em série com o elemento cuja voltagem queremos medir.
- () O multímetro deve ser ligado em paralelo com o elemento cuja voltagem queremos medir.

As fotos dos multímetros nos experimentos são do multímetro digital ET-2041 da Minipa. Cuidado! Você não deve se basear nelas se os multímetros do seu polo forem diferentes.

Respostas Comentadas

- (X) Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V e você não tem como estimar a corrente elétrica no resistor, você deve ligar o multímetro na escala de 20A $\overline{\cdot}$.
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V e você não tem como estimar a corrente elétrica no resistor, você deve ligar o multímetro na escala de 20mA $\overline{\cdot}$.
- (X) Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V e você já sabe que a sua corrente elétrica é menor do que 20mA e maior do que 2mA, você deve ligar o multímetro da escala de 20mA $\overline{\cdot}$.

() Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V e você já sabe que a sua corrente elétrica é menor do que 20mA e maior do que 2mA, você deve ligar o multímetro da escala de 2mA $\overline{\text{---}}$.

() Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V e você já sabe que a sua corrente elétrica é menor do que 20mA e maior do que 2mA, você deve ligar o multímetro da escala de 200mA $\overline{\text{---}}$.

() Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V e você não tem como estimar a corrente elétrica no resistor, você deve ligar o multímetro da escala de 20 A \sim .

(X) O multímetro deve ser ligado em série com o elemento cuja voltagem queremos medir.

() O multímetro deve ser ligado em paralelo com o elemento cuja voltagem queremos medir.

Como o símbolo de corrente contínua é $\overline{\text{---}}$ e o de corrente alternada é \sim , a resposta que contém o símbolo de corrente alternada está errada.

Se ligarmos o multímetro em uma escala com corrente máxima menor do que algum dos valores da corrente elétrica, o multímetro queima. Logo, se não podemos estimar a corrente elétrica que atravessa o elemento do circuito elétrico, devemos utilizar a escala com o maior valor da corrente. No caso da corrente contínua e do multímetro descrito no Complemento 3, devemos ligar o multímetro na escala de 20A $\overline{\text{---}}$. Se você já sabe que a corrente elétrica no resistor é menor do que 20mA e maior do que 2mA, você deve ligar o multímetro da escala de 20mA $\overline{\text{---}}$, uma vez que, se ligamos na escala de 2mA $\overline{\text{---}}$, ele queima e, se ligarmos na escala de 200mA, as medidas realizadas terão precisão menor do que aquelas realizadas na escala de 20mA contínua.

O multímetro mede a corrente elétrica que o atravessa. Logo, ele deve ser ligado em série com o elemento cuja corrente desejamos medir, uma vez que, se ele for ligado em paralelo, a corrente elétrica que o atravessa é diferente da corrente que atravessa o elemento do circuito. Além disso, ele **vai queimar** porque a resistência do multímetro, quando está funcionando como amperímetro, é muito baixa e produz no multímetro uma corrente alta.

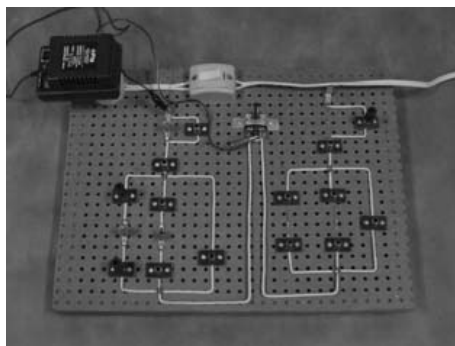


Figura 10.1: Quadro de luz I

===== **Experimento 3** =====

Atende aos Objetivos 1, 2, 3 e 6

A lei de Ohm

Objetivo:

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

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.

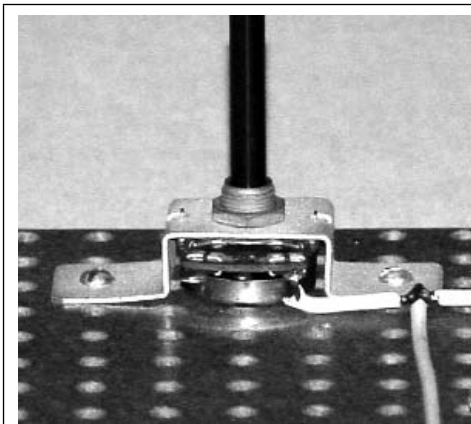


Figura 10.2a: Potenciômetro

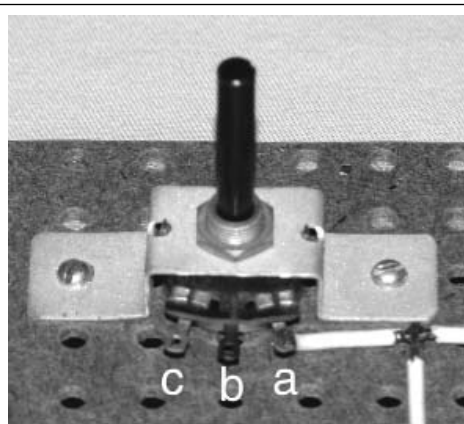


Figura 10.2b: Terminais do potenciômetro

O potenciômetro é uma resistência variável.

O potenciômetro utilizado no quadro de luz I (ver **Figura 10.1**) tem uma resistência que varia de $0 \text{ até } 400 \pm 4\Omega$ (ver **Figuras 10.2a e 10.2b**) 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 400Ω . 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.

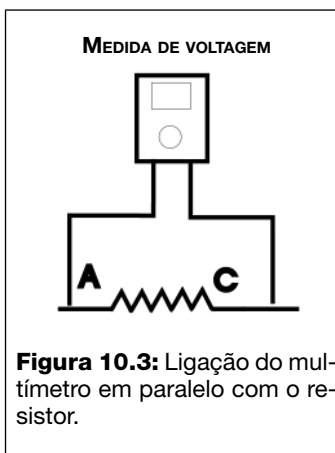


Figura 10.3: Ligação do multímetro em paralelo com o resistor.



Figura 10.4: Posição das pontas do multímetro na lâmpada na medida da voltagem nos seus terminais.

Para medir voltagens, é necessário colocar o multímetro em **PARALELO** com o elemento do circuito. Por exemplo, na **Figura 10.3**, o multímetro foi colocado em paralelo com o resistor. Na **Figura 10.4**, as pontas do multímetro estão medindo a voltagem nos terminais da lâmpada.

Ligação em paralelo

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

MEDIDA DE CORRENTE ELÉTRICA

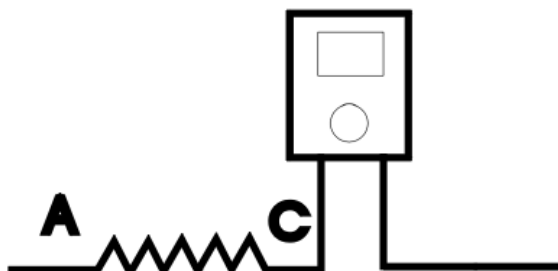


Figura 10.5: Ligação do multímetro em série com o resistor.

Ligação em série

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 10.5** 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 **Figura 10.6**). O contato elétrico entre as partes interna e externa do conector macho foi realizado com um pedaço de fio de cobre (conector em curto). O conector macho funciona como um fio condutor. 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 10.7**).

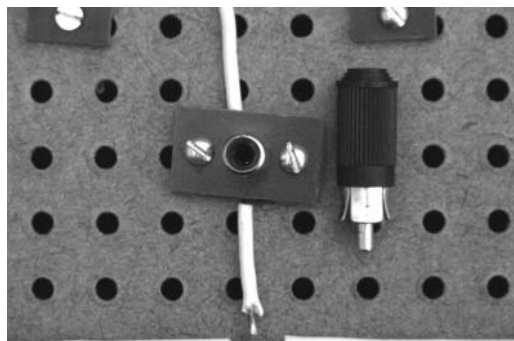


Figura 10.6: Conectores macho e fêmea. O conector macho está em curto.

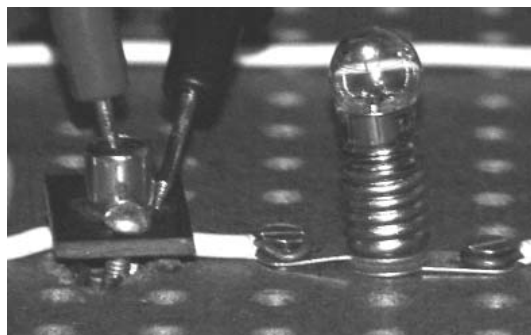
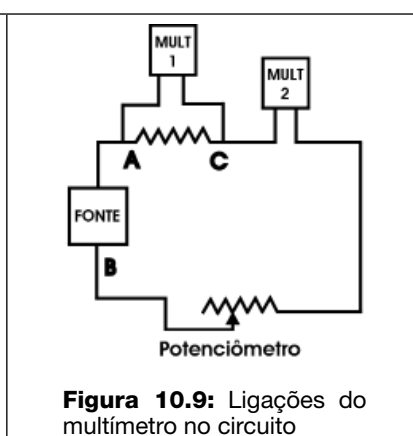
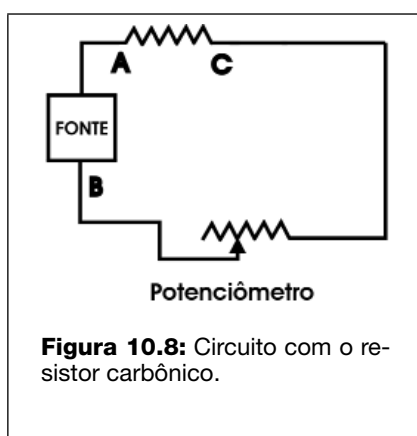


Figura 10.7: Pontas do multímetro no interior e no exterior do conector fêmea.

Materiais necessários:

- multímetros (2);
- quadro de luz I;
- lâmpada de lanterna 3,9V/0,3A;
- substituidor de pilha.

Atividade experimental:**Circuito com o resistor carbônico**

1. Monte o circuito da **Figura 10.8**. Para ligar os elementos do circuito, utilize os conectores RCA. Coloque o botão da fonte em 12V.



Primeiro multímetro

Figura 10.10: Escala para medir a voltagem.



Segundo multímetro

Figura 10.11: Escala para medir a corrente elétrica.

Cuidado! O modelo do seu multímetro pode ser diferente.

- Coloque o multímetro 1 na escala de 200V (DC) (**Figura 10.10**). Ligue o conector preto no terminal COM de referência e o conector vermelho ao terminal V/ Ω (veja **Figura 10.10**).
- Coloque o segundo multímetro na escala de 200mA (DC) (**Figura 10.11**). Ligue o conector preto ao terminal COM de referência e o conector vermelho ao terminal A (veja **Figura 10.11**). Introduza as pontas do multímetro na tomada fêmea do conector RCA próxima ao ponto C, como mostra a foto da **Figura 10.7** e meça a corrente elétrica.
- 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 10.9**. Feche o circuito com as pontas do multímetro 2 colocadas como na **Figura 10.7**.
- 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 0,04mA em 0,04mA até atingir o valor máximo da corrente elétrica. Anote todos os valores na **Tabela 1**.

Tabela 1

I (A) [A]	$V_A - V_C$ [V]	$\delta(V_A - V_B)$ [V]	δI

8. Construa, em papel milimetrado, o gráfico de ΔV contra a corrente elétrica I . A curva obtida dessa forma é denominada 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.

[illegible]

Circuito com a lâmpada

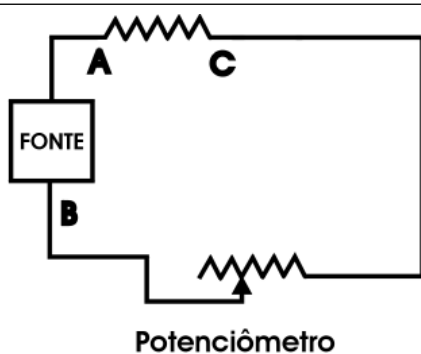


Figura 10.12: Circuito com a lâmpada.

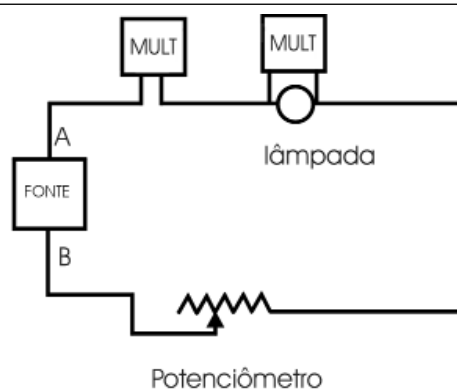


Figura 10.13: Posições dos multímetros no circuito.

1. Monte o circuito da **Figura 10.12**. Para ligar os elementos do circuito, utilize os conectores RCA. Coloque o botão da fonte em 12V.
2. Troque a escala do multímetro 1 para a escala de 20V (DC) (**Figura 10.10**). Ligue o conector preto no terminal COM de referência e o conector vermelho ao terminal V/ Ω (veja **Figura 10.10**).



Multímetro 2

Figura 10.14: Escala para medir correntes na lâmpada.

Cuidado! O modelo do seu multímetro pode ser diferente.

3. Coloque o segundo multímetro na escala de 20A (DC). Cuidado! Se você utilizar a escala errada, pode **queimar** o multímetro! Ligue o conector preto ao terminal COM de referência e o conector vermelho ao terminal 20A (veja **Figura 10.14**).
4. Introduza o multímetro na tomada fêmea do conector RCA próxima ao ponto C, como mostra a **Figura 10.7**, e meça a corrente elétrica.
5. 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**.

6. Repita o procedimento variando a corrente elétrica de 0,04A em 0,04A até atingir o valor máximo da corrente elétrica. Anote todos os valores na **Tabela 2**.

Tabela 2

I (A) [A]	$V_A - V_C$ [V]	$\delta(V_A - V_B)$ [V]	δI

7. Construa em papel milimetrado o gráfico de ΔV contra a corrente elétrica I. A curva obtida dessa forma é denominada curva característica do resistor.

Conclusões do experimento 3:

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.

Resposta Comentada

Esse experimento não tem resposta comentada, porque ele depende dos dados obtidos por você. Todavia, você pode obter informações relevantes para a elaboração das suas respostas no vídeo *A lei de Ohm*.

Atividade 3

Atende ao Objetivo 7

Utilize um programa dos mínimos e os dados da **Tabela 1** para você obter a resistência do resistor carbônico. O programa dos mínimos quadrados está na seguinte página da rede internacional dos computadores:

<http://www.if.ufrj.br/~carlos/applets/reta/reta.html>

Resposta Comentada

Esta atividade não tem resposta comentada, porque ela depende dos dados obtidos pelos alunos.

Experimento 4

Atende ao Objetivo 8

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.

Materiais necessários:

- multímetro (2);
- quadro de luz I;
- substituidor de pilhas.

Atividade experimental:

- Abra o circuito da **Figura 10.12** e meça a diferença de potencial $V_A - V_B$ nos terminais da fonte. Feche o circuito e meça a corrente elétrica em A. Coloque os resultados na **Tabela 3**. Repita o procedimento anterior variando a corrente elétrica de 0,04 A em 0,04A. Registre novamente na **Tabela 3**.

Tabela 3

I (A) [A]	$V_A - V_C$ [V]	$\delta(V_A - V_B)$ [V]	δI

Conclusões do experimento 4:

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 distribuidor de pilhas é uma fonte ideal.
- () O distribuidor de pilhas não é uma fonte ideal.

Justifique as suas respostas.

Resposta Comentada

Este experimento não tem resposta comentada, porque ele depende dos dados obtidos por você. Todavia, você pode obter informações relevantes para a elaboração das suas respostas no vídeo *A lei das malhas e a lei dos nós*.

Experimento 5

Atende ao Objetivo 9

Leis das malhas

Objetivo:

Investigar as variações de potencial elétrico em um circuito elétrico.

Informações preliminares:

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

Materiais necessários:

- multímetro;
- quadro de luz I;
- substituidor de pilhas.

Atividade experimental

1. Faça o circuito da figura abaixo.

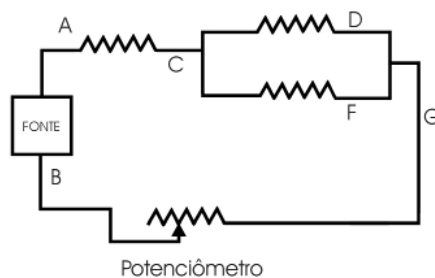


Figura 10.15: Circuito para obter a lei das malhas.

2. Meça as diferenças de potencial nos terminais dos elementos que compõem a malha ACDGBA e coloque na **Tabela 4.1**. 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 ponteira ligada ao terminal de referência (COM) em C e a outra ponta em A.

Tabela 4.1

Malha ACDGBA	ΔV [V]	$\delta \Delta V$ [V]
Resistor AC		
Resistor CD		
Potenciômetro		
Fonte		
Soma algébrica		

3. Meça as diferenças de potencial nos terminais dos elementos que compõem a malha CDFC e coloque na **Tabela 4.2**.

Tabela 4.2

Malha CDFC	ΔV [V]	$\delta \Delta V$ [V]
Resistor CD		
Resistor CF		
Soma algébrica		

Conclusão do experimento 5:

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

Resposta Comentada

Esse experimento não tem resposta comentada, porque ele depende dos dados obtidos por você. Todavia, você pode obter informações relevantes para a elaboração das suas respostas no vídeo *A lei das malhas e a lei dos nós*.

Experimento 6

Atente ao Objetivo 9

A lei dos nós

Objetivo:

Investigar a distribuição de correntes elétricas em um circuito.

Informações preliminares:

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.

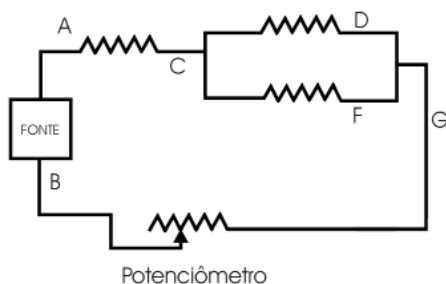


Figura 10.16: Circuito para o experimento da lei dos nós.

Materiais necessários:

- multímetro (1);
- quadro de luz I;
- substituidor de pilhas.

Atividade experimental

1. Monte o circuito da **Figura 10.16**
 2. Coloque o multímetro para medir corrente elétrica contínua (DC) na escala de 20mA.
- Meça as correntes elétricas nos pontos A, B, C, D, F e G e coloque seus valores na **Tabela 5**.

Tabela 5

PONTO	I [mA]	δI [mA]
A		
B		
C		
D		
E		
F		
G		

Conclusões do experimento 6:

1. A corrente elétrica que sai da fonte é _____ à corrente elétrica que entra na fonte.
2. As correntes elétricas nos pontos A e C são _____. Por isso, podemos concluir que a corrente elétrica _____ é consumida quando percorre uma resistência.
3. 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 _____.

Resposta Comentada

Este experimento não tem resposta comentada, porque ele depende dos dados obtidos por você. Todavia, você pode obter informações relevantes para a elaboração das suas respostas no vídeo *A lei das malhas e a lei dos nós*.

Conclusão

Nesta aula, você aprendeu a construir experimentalmente as curvas características de resistores e comprovou experimentalmente a lei das malhas e a lei dos nós. Os conhecimentos adquiridos serão utilizados nos cálculos das correntes elétricas e das voltagens em circuitos elétricos.

Resumo

A medida de uma corrente elétrica que atravessa um elemento de um circuito elétrico deve ser realizada com o multímetro na escala das correntes (amperímetro) ligado em série com o elemento do circuito elétrico.

A diferença de potencial fornecida por uma fonte varia com o valor da corrente elétrica. Ela pode ser medida com um multímetro (voltímetro) colocado em paralelo com ela.

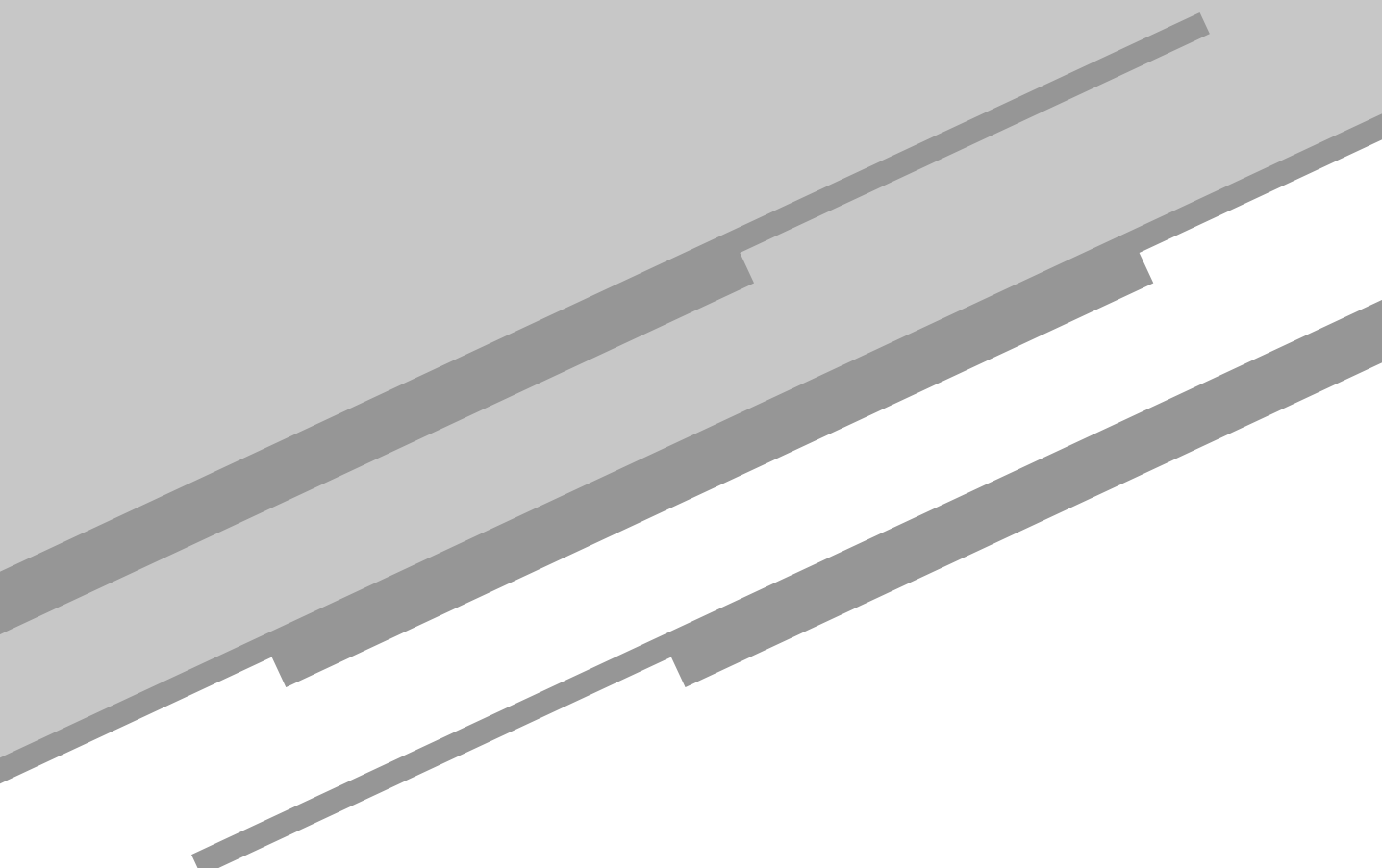
A construção da curva característica de um resistor pode ser realizada medindo-se a voltagem e a corrente elétrica nos terminais do resistor, para diferentes valores da voltagem.

Leitura recomendada

Leia sobre o método dos mínimos quadrados no livro *Fundamentos da Teoria de Erros*, de José Henrique Vuolo.

Aula 11

As fontes de correntes elétricas



Maria Antonieta Almeida

Metas

Discutir as fontes de corrente contínua, diferenciando o campo elétrico motor do campo elétrico conservativo criado pelas cargas elétricas, e definir a força eletromotriz.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. diferenciar o campo elétrico motor do campo elétrico criado por cargas elétricas em repouso;
2. calcular voltagens nos terminais de fontes;
3. calcular voltagens e correntes elétricas em circuitos elétricos simples;
4. calcular a resistência equivalente de resistores ligados em série.

Introdução

As fontes de energia elétrica alimentam as geladeiras, as lâmpadas, os computadores etc. Como já vimos, a energia elétrica é obtida nas hidroelétricas, termoeletricas, baterias etc. Nas hidroelétricas, o dínamo transforma energia mecânica em energia elétrica que é transportada pelas correntes elétricas para as cidades. As correntes elétricas produzidas pelos dinamos são denominadas correntes alternadas, porque elas variam o seu sentido e o seu módulo periodicamente. As baterias também fornecem energia elétrica. Nelas, a energia química é transformada em energia elétrica através de reações químicas. As correntes elétricas produzidas por baterias e pilhas são denominadas correntes contínuas. Elas não variam no tempo.

Nesta aula, discutiremos o funcionamento das baterias, diferenciando o campo elétrico motor do campo elétrico criado pelas cargas elétricas. Definiremos também a força eletromotriz.

Esses assuntos serão discutidos nas seções "Arrombando um armário mágico" e "Força eletromotriz". Antes da leitura dessas seções, veja se você é capaz de responder às seguintes perguntas:

1. O que é corrente contínua?
2. O que é corrente alternada?
3. Cite uma fonte de corrente contínua.
4. Cite uma fonte de corrente alternada.
5. O que é um campo elétrico motor?
6. O que é a força eletromotriz?
7. Qual a variação de potencial elétrico em um resistor quando ele é atravessado no sentido da corrente elétrica convencional?
8. Qual a variação de potencial elétrico em um resistor quando ele é atravessado no sentido contrário ao da corrente elétrica convencional?
9. Qual a diferença de potencial elétrico entre o polo positivo e o polo negativo de uma fonte ideal quando ela é atravessada por uma corrente elétrica convencional que vai do polo positivo para o negativo? Essa variação muda quando o sentido da corrente convencional se inverte?

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. Mesmo irritada, continua tentando. Está tão concentrada, que se assusta com as risadas de Fátima e Ronaldo, que tinham acabado de entrar no quarto. Apesar do medo de a irmã chamar sua atenção por ter mexido no armário, 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 é conservativo.

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

– Não entendi nada, explique 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 correntes elétricas* são capazes de manter uma corrente elétrica. Elas criam um campo elétrico que não é conservativo. Elas fornecem aos elétrons que percorrem o circuito completo a energia que foi perdida na forma de calor.

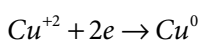
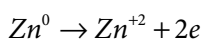
Fátima retira pilhas da sua gaveta e coloca-as no circuito. As lâmpadas acendem.

– 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 dela. 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 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 11.1**). Nela, temos um terminal de zinco e um terminal de cobre. O terminal de zinco fica imerso na solução de sulfato de zinco (ZnSO_4), e o de cobre, na solução de sulfato de cobre (CuSO_4). O contato elétrico entre as soluções é mantido por uma ponte salina que contém uma solução de sulfato de potássio (K_2SO_4).



Quando o terminal de zinco é colocado na solução de sulfato de potássio, o Zn se oxida, passando para a solução e 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 nas cargas elétricas é o campo resultante, o movimento das cargas elétricas é interrompido.

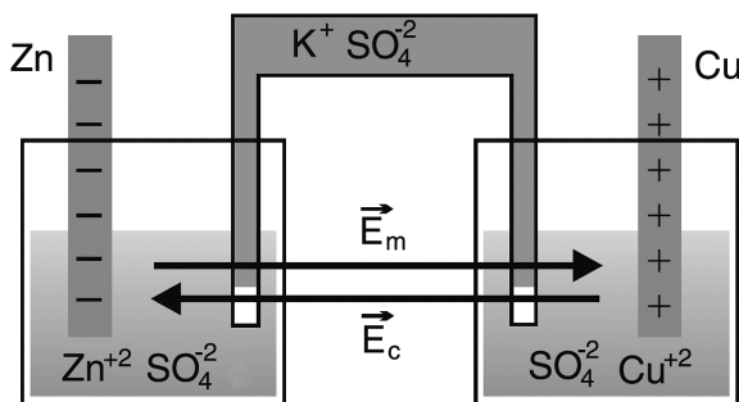


Figura 11.1: Pilha de Daniel aberta.

- 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 oxidação-redução se reiniciam e a corrente elétrica se estabelece.

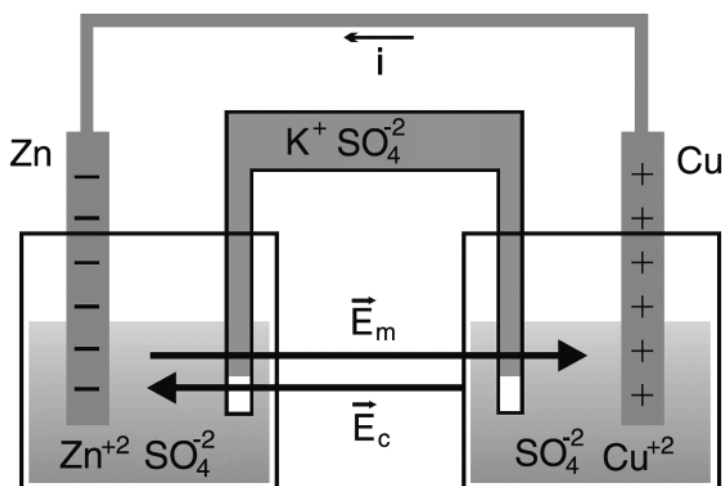


Figura 11.2: Pilha de Daniel fechada.

- 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 nela. 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.

– 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.

Ponte salina

A ponte salina é uma solução aquosa de um sal.

– 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. Ela é criada por dínamos. O campo elétrico motor nos dínamos das hidroelétricas 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 e comenta sobre isso com o irmão.

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

Força eletromotriz

Ronaldo está pensando na discussão que tivera com Fátima sobre fontes de corrente elétrica contínua quando o professor inicia a aula anunciando que vai falar sobre esse assunto. Ele repete para a turma o que Fátima dissera sobre as baterias, utilizando como exemplo a pilha de Daniel. Ronaldo pergunta ao professor sobre a relação entre a diferença de potencial nos terminais de uma pilha de comprimento L e a corrente elétrica.

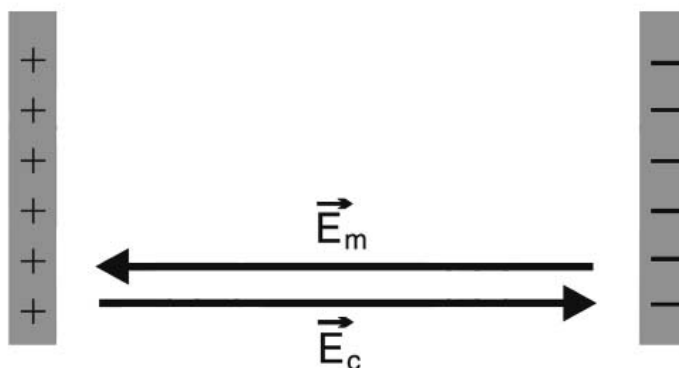


Figura 11.3: Campo elétrico motor.

– 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 do terminal negativo. O campo elétrico motor tem natureza química e aponta na direção das cargas positivas. Para que uma corrente elétrica convencional formada por transportadores de corrente elétrica positivos caminhe do polo negativo para o polo positivo da pilha, é necessário que o módulo do campo elétrico motor seja maior do que o módulo do campo eletrostático. Por isso, neste caso, o módulo do campo elétrico resultante é:

$$E = E_m - E_c$$

Logo, no caso em que a corrente elétrica convencional vai do polo negativo para o polo positivo da fonte, a diferença de potencial nos terminais da fonte é:

$$V_1 - V_2 = E_c L = (E_m - E)L = E_m L - EL$$

A substituição, na expressão anterior, do campo elétrico resultante dado pela lei de Ohm local ($E = \frac{j}{\sigma} = \frac{i}{S\sigma}$) fornece:

$$\begin{aligned} V_1 - V_2 &= E_c L = E_m L - \frac{i}{S\sigma} L = \varepsilon - ri \Rightarrow \\ V_1 - V_2 &= \varepsilon - ri, \end{aligned}$$

em que $\varepsilon = E_m L$ 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.

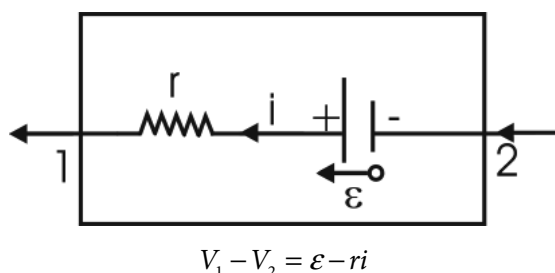


Figura 11.4: Diferença de potencial entre os terminais positivo e negativo de uma fonte real quando a corrente elétrica convencional tem o mesmo sentido do campo elétrico motor.

Para que uma corrente elétrica convencional formada por transportadores de corrente elétrica positivos caminhe do polo positivo para o polo negativo da pilha, é necessário que o módulo do campo elétrico motor seja menor do que o módulo do campo eletrostático. Por isso, neste caso, o módulo do campo elétrico resultante é:

$$E = E_c - E_m.$$

A diferença de potencial nos terminais da pilha é:

$$V_1 - V_2 = E_c L = (E + E_m)L = \varepsilon + \frac{i}{S\sigma}L = \varepsilon + ri \Rightarrow$$

$$V_1 - V_2 = \varepsilon + ri$$

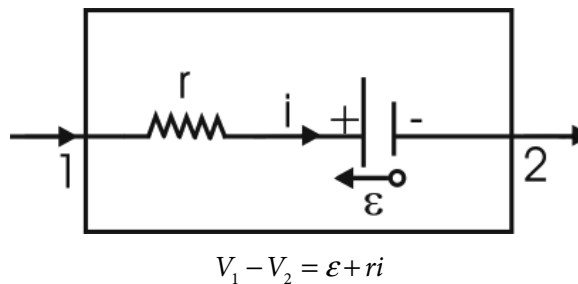


Figura 11.5: Diferença de potencial entre os terminais positivo e negativo de uma fonte real quando a corrente elétrica convencional tem o sentido contrário do campo elétrico motor.

– 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, isto é, quando ela está aberta, uma vez que

$$i = 0 \Rightarrow V_1 - V_2 = \varepsilon.$$

Quando a resistência interna da pilha é desprezível em relação à resistência total do circuito elétrico, a modificação da diferença de potencial nos terminais da pilha pela passagem de uma corrente elétrica é desprezível, isto é, a diferença de potencial nos terminais da pilha é aproximadamente igual à força eletromotriz. Neste caso, dizemos que a pilha é ideal. A **Figura 11.6** é a representação de uma pilha ideal.

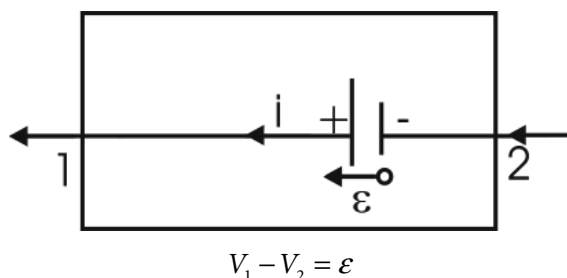


Figura 11.6: Diferença de potencial entre os terminais positivo e negativo de uma pilha ideal.

Ronaldo pergunta ao professor se as expressões que ele obteve para a diferença de potencial nos terminais da pilha podem ser utilizadas em qualquer fonte de corrente contínua.

– Sim, as expressões que eu obtive para a diferença de potencial nos terminais de uma pilha podem ser utilizadas para qualquer fonte de corrente elétrica contínua.

O professor entrega uma lista de atividades aos alunos.

Atividade 1

Atende aos Objetivos 1, 2 e 3

Com base nas seções que você leu, "Arrombando um armário mágico" e "Força eletromotriz" e em seus conhecimentos da Aula 9, responda às seguintes perguntas:

a) O que é corrente contínua?

b) O que é corrente alternada?

c) Cite uma fonte de corrente contínua.

d) Cite uma fonte de corrente alternada.

e) O que é um campo elétrico motor?

f) O que é a força eletromotriz?

g) Qual a variação de potencial elétrico em um resistor com resistência R quando ele é atravessado no sentido da corrente elétrica convencional?

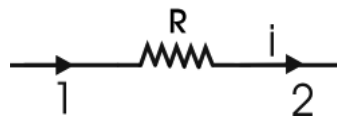
h) Qual a variação de potencial elétrico em um resistor com resistência R quando ele é atravessado no sentido contrário ao da corrente elétrica convencional?

i) Qual é a diferença de potencial elétrico entre o polo positivo e o polo negativo de uma fonte ideal quando ela é atravessada por uma corrente elétrica convencional que vai do polo negativo para o polo positivo? Essa variação muda quando o sentido da corrente convencional se inverte?

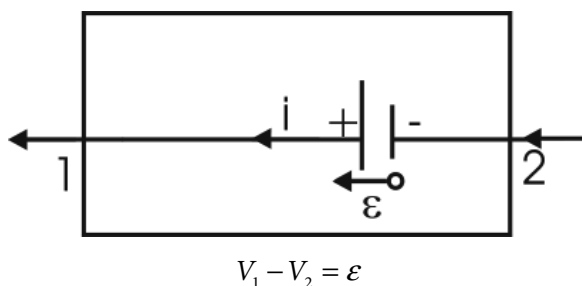
Respostas Comentadas

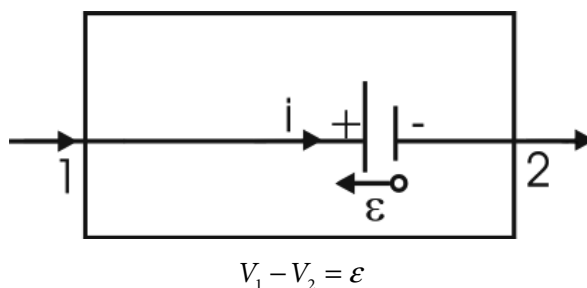
a) A corrente elétrica contínua é uma corrente elétrica com módulo e sentido constantes no tempo.

- b) A corrente elétrica alternada é uma corrente elétrica cujo módulo e o sentido mudam no tempo.
- c) As baterias são fontes de corrente contínua.
- d) A rede elétrica é uma fonte de corrente alternada.
- e) O campo elétrico motor é um campo elétrico não conservativo que força as cargas elétricas a se deslocarem no sentido contrário ao seu sentido espontâneo, isto é, força as cargas elétricas positivas a se aproximarem das cargas elétricas positivas e as cargas elétricas negativas a se aproximarem das cargas elétricas negativas.
- f) A força eletromotriz não é força. Ela é a diferença de potencial nos terminais de uma fonte quando ela está aberta, isto é, quando a fonte não é atravessada por uma corrente elétrica.
- g) Como a corrente elétrica convencional em um resistor vai do maior potencial para o menor potencial, a diferença de potencial nos terminais de um resistor quando ele é atravessado no sentido da corrente elétrica (de 1 para 2) é dada por $V_2 - V_1 = -Ri$.



- h) Como a corrente elétrica convencional em um resistor vai do maior potencial para o menor potencial, a diferença de potencial nos terminais de um resistor quando ele é atravessado no sentido contrário ao da corrente elétrica convencional (de 2 para 1) é dada por $V_1 - V_2 = Ri$.
- i) A diferença de potencial entre o polo positivo e o polo negativo de uma fonte ideal não é alterada pela corrente elétrica, isto é, ela é sempre igual à força eletromotriz, isto é, $V_+ - V_- = \mathcal{E}$.





Atividade 2

Atende aos Objetivos 1, 2 e 3

De acordo com as seções que você leu, "Arrombando um armário mágico" e "Força eletromotriz" e seus conhecimentos da Aula 9, responda às seguintes perguntas:

Na **Figura 11.7** é apresentado, de forma esquemática, o circuito elétrico que representaria a ligação da bateria de um carro com o seu motor de arranque e a chave de ignição. Já nos gráficos, **Figuras 11.8a e 11.8b**, estão apresentados os comportamentos com o tempo da corrente elétrica i no circuito quando duas pessoas ligam o carro em ocasiões diferentes.

O gráfico da **Figura 11.8a** mostra o que acontece com a corrente elétrica i no circuito, em função do tempo, quando o dono do carro, habituado a usá-lo, vira a chave de ignição. Já o gráfico da **Figura 11.8b** mostra o comportamento da corrente i quando a filha adolescente do dono tenta ligar o carro na ausência do seu pai.

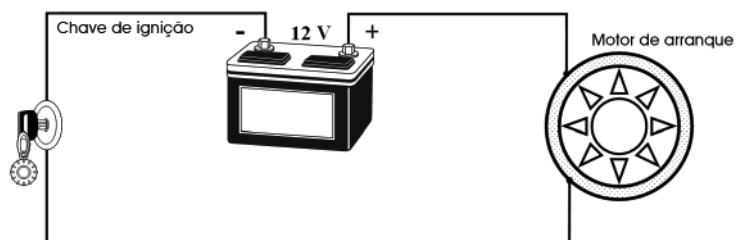


Figura 11.7: Circuito elétrico.

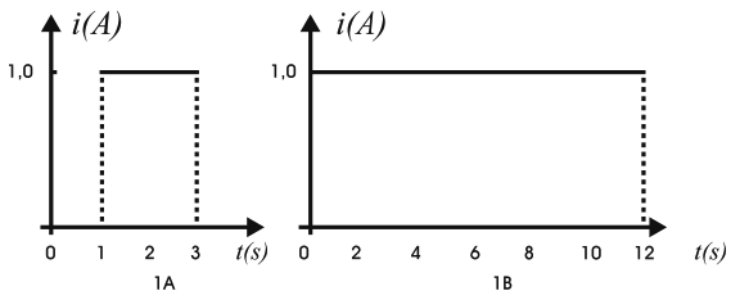


Figura 11.8a: Corrente quando o pai liga o carro. **Figura 11.8b:** Corrente quando a filha liga o carro.

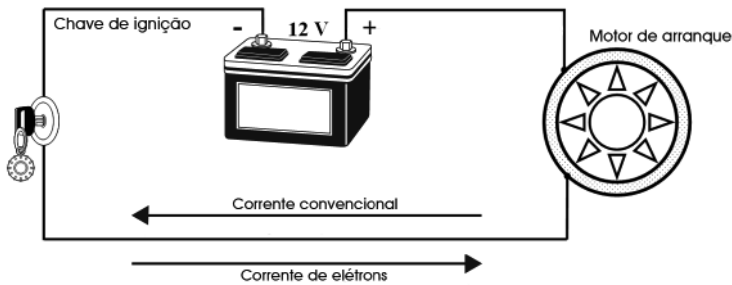
- Indique na **Figura 11.7** o sentido da corrente de elétrons no circuito.
- Indique na **Figura 11.7** o sentido para a corrente elétrica convencional no circuito.
- Lembrando que a corrente elétrica i é definida como o total de cargas Δq que percorre e atravessa a seção reta do circuito durante o intervalo de tempo Δt dividido por este intervalo de tempo ($i = \Delta q / \Delta t$), determine a carga elétrica total que percorre o circuito quando o dono do carro o liga (**Figura 11.8a**).
- Repita o mesmo cálculo do item anterior para obter a carga elétrica total que atravessa a seção reta do circuito quando a filha do dono do carro tenta ligá-lo na ausência do pai (**Figura 11.8b**).
- Calcule o número de transportadores de corrente elétrica no caso em que o pai liga o carro ($\Delta q = \Delta n e$). O módulo da carga do elétron é igual a $1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

f) Repita o mesmo cálculo do item anterior para o caso em que a filha liga o carro.

g) Lembrando que a resistência elétrica R em um trecho de um circuito é definida pela razão entre a diferença de potencial ΔV existente nos terminais daquele trecho e a corrente elétrica i que o percorre, faça uma estimativa da resistência elétrica R que deve ter o circuito envolvendo o motor de arranque do carro e a chave de ignição quando a corrente elétrica vale 1A. Observe que a bateria do carro mantém em seus terminais uma diferença de potencial de 12 Volts.

h) O que é o efeito Joule?

i) Em qual das duas situações (**Figura 11.8a** ou **Figura 11.8b**) as consequências do efeito Joule podem representar maior perigo para o bom funcionamento da parte elétrica do carro? Justifique a sua resposta.

Respostas Comentadas**Figura 11.9**

a) Nos condutores externos às fontes, as cargas elétricas negativas se deslocam espontaneamente do potencial menor para o potencial maior. Nas fontes de corrente elétrica, as cargas elétricas negativas são forçadas pelo campo elétrico motor a se deslocarem do potencial maior para o potencial menor. Como nos fios condutores são os elétrons que transportam a corrente elétrica, no circuito da **Figura 11.9**, fora da fonte, os elétrons se deslocam no sentido anti-horário, isto é, do potencial menor (terminal negativo) para o potencial maior (terminal positivo) e, no interior da fonte, do potencial maior para o potencial menor.

b) As cargas elétricas positivas se deslocam espontaneamente do potencial maior para o potencial menor. Nas fontes de corrente elétrica, essas cargas são forçadas pelo campo elétrico motor a se deslocarem do potencial menor para o potencial maior. Como na corrente convencional se supõe que transportadores de corrente elétrica têm cargas positivas, no circuito da **Figura 11.9**, fora da fonte, as cargas elétricas positivas da corrente convencional se deslocam no sentido horário, isto é, do potencial maior (terminal positivo) para o potencial menor (terminal negativo) e, no interior da fonte, do potencial menor para o potencial maior.

c) Como $i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$, temos que $\Delta q = i\Delta t$. Por isso, a carga que percorre o circuito é dada pelo produto entre a corrente elétrica estabelecida no circuito e o intervalo de tempo em que essa corrente esteve presente nele. Pela **Figura 11.8a**, a carga total que percorre o circuito quando o pai liga o carro é:

$$\Delta q_{pai} = 1A \times (3s - 1s) = 2C \Rightarrow \Delta q_{1A} = 2C$$

d) Como $i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$, temos que $\Delta q = i\Delta t$. Por isso, a carga que percorre o circuito é dada pelo produto entre a corrente elétrica estabelecida no circuito e o intervalo de tempo em que essa corrente esteve presente nele. Pela **Figura 11.8b**, a carga total que percorre o circuito quando a filha liga o carro é:

$$\Delta q_{\text{filha}} = 1A \times (12s - 0s) = 12C \Rightarrow \Delta q_{2B} = 12C$$

e) Sabendo o valor da carga total que percorre o circuito (Δq) durante um intervalo de tempo (Δt) e o valor da carga do elétron ($e = 1,6 \times 10^{-19} C$), podemos calcular o número de elétrons que atravessa o circuito durante o intervalo de tempo Δt da seguinte forma:

$$\begin{aligned}\Delta q &= \Delta n \times e \Rightarrow \Delta n = \frac{\Delta q}{e} \\ \Delta n_{\text{pai}} &= \frac{2C}{1,6 \times 10^{-19} C} = 1,25 \times 10^{19} \text{ elétrons} \\ \Delta n_{\text{filha}} &= \frac{12C}{1,6 \times 10^{-19} C} = 7,5 \times 10^{19} \text{ elétrons}\end{aligned}$$

f) O circuito representado na **Figura 11.9** deve apresentar uma resistência R não nula, devida à própria resistência dos fios que o compõem. O valor de R será dado pela razão entre a diferença de potencial no circuito e a corrente elétrica que o percorre. Como a maior corrente que atravessa o circuito é de $1A$, o valor de R é, no mínimo, igual a:

$$\Delta V = R \times i \Rightarrow R = \frac{12}{1} = 12 \Omega$$

g) Como não sabemos se a resistência do circuito elétrico é ôhmica, não podemos afirmar que o valor encontrado para R vale para qualquer corrente elétrica.

h) O efeito Joule é a conversão de energia elétrica em calor que ocorre quando um resistor com resistência R é atravessado por uma corrente i .

i) Quando uma corrente elétrica atravessa um circuito elétrico, os transportadores de corrente perdem energia devido à sua colisão com o material. Logo, quanto maior for o tempo em que uma corrente elétrica atravessa um circuito, maior será a quantidade de calor produzido nele. Logo, a situação em que a corrente atravessa o circuito por

mais tempo (situação da **Figura 11.8b**) representa um maior desgaste da parte elétrica do carro porque os fios aquecem mais.

Atividade 3

Atende ao Objetivo 4

Com base nas seções lidas, "Arrombando um armário mágico" e Força eletromotriz" e em seus conhecimentos da Aula 9, faça o seguinte exercício:

Uma associação de resistores, quando é submetida a uma diferença de potencial ΔV , é atravessada por uma corrente elétrica total i . Dizemos que um resistor equivalente à associação de resistores é aquele que, ao ser submetido à diferença ΔV , também é atravessado pela corrente elétrica i .

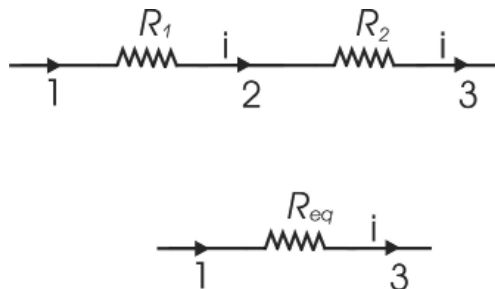


Figura 11.10: Associação de resistores em série atravessados pela corrente elétrica convencional.

a) Dizemos que dois resistores estão ligados em série (**Figura 11.10**) quando eles são atravessados pela mesma corrente elétrica. Calcule a resistência da associação de resistores em série. Suponha que as resistências dos resistores são R_1 e R_2 .

b) Generalize o resultado para N resistores ligados em série.

Respostas Comentadas

a) Com N resistores ligados em série, temos que:

$$V_1 - V_2 = R_1 i, V_2 - V_3 = R_2 i, \dots, V_N - V_{N+1} = R_N i$$

A diferença de potencial no resistor equivalente é dada por:

$$V_1 - V_3 = R_{eq} i$$

Logo, temos que:

$$V_1 - V_3 = (V_1 - V_2) + (V_2 - V_3) = R_{eq} i \Rightarrow$$

$$R_1 i + R_2 i = R_{eq} i \Rightarrow$$

$$R_{eq} = R_1 + R_2$$

b) Esse resultado pode ser generalizado facilmente para N resistores.

A diferença de potencial no resistor equivalente é dada por:

$$V_1 - V_{N+1} = R_{eq} i \Rightarrow V_1 - V_2 + V_2 - V_3 + V_3 - \dots + V_N - V_{N+1} \Rightarrow$$

$$V_1 - V_{N+1} = R_1 i + \dots + R_N i = R_{eq} i \Rightarrow$$

$$R_{eq} = R_1 + \dots + R_N.$$

Logo, temos que:

$$R_{eq} = R_1 + \dots + R_N$$



Atividade 4

Atende aos Objetivos 1, 2 e 3

Com base nas seções que você leu, "Arrombando um armário mágico" e "Força eletromotriz" e seus conhecimentos da Aula 9, faça o seguinte exercício:

Um resistor com resistência R é ligado a duas pilhas reais, como mostra a **Figura 11.11**. As pilhas têm forças eletromotrizes \mathcal{E}_1 e \mathcal{E}_2 e resistências internas r_1 e r_2 . Considere $\mathcal{E}_1 = 2V$, $\mathcal{E}_2 = 4V$, $r_1 = r_2 = 1,0\Omega$ e $R = 98\Omega$.

a) Indique, na **Figura 11.11**, a corrente elétrica i que atravessa o resistor com resistência R . Calcule a corrente elétrica. O sentido que você escolheu está correto? Justifique a sua resposta.

b) Calcule as diferenças de potenciais $V_a - V_c$ e $V_b - V_a$ nos terminais das pilhas.

c) Qual das pilhas está sendo carregada (recebendo energia da corrente elétrica)? Justifique a sua resposta.

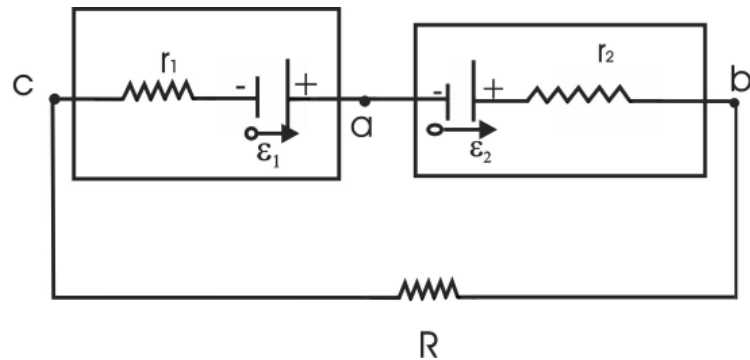


Figura 11.11: Circuito elétrico.

Respostas Comentadas

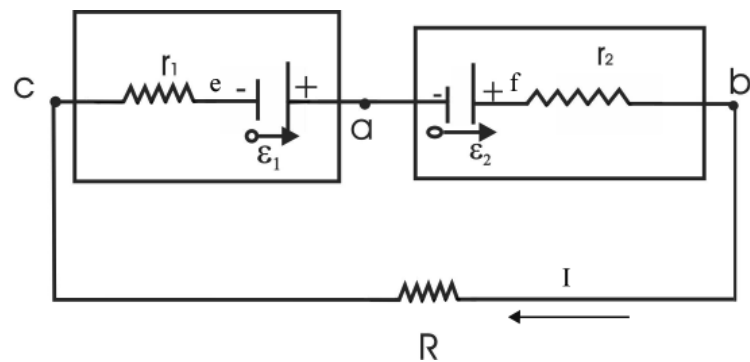


Figura 11.12

a) Na **Figura 11.12** foi desenhada a corrente elétrica convencional e foram marcados os pontos e e f . O sentido da corrente elétrica pode ser escolhido de forma arbitrária. Se ele estiver correto, o sinal da corrente elétrica será positivo. Se estiver invertido, o sinal da corrente elétrica será negativo.

Para calcular a corrente elétrica, vamos percorrer o circuito elétrico no sentido da corrente elétrica e somar todas as diferenças de potencial associadas a cada elemento do circuito. Essa soma é nula porque a diferença entre o potencial do ponto c e o potencial do ponto c ($V_c - V_c = 0$) é nula. Essa diferença de potencial pode ser reescrita como a soma das diferenças de potencial ao longo do circuito elétrico da seguinte forma:

$$V_c - V_c = V_c - V_e + V_e - V_a + V_a - V_f + V_f - V_b + V_b - V_c = 0$$

A equação anterior é a expressão matemática da lei das malhas.

Quando vamos de b para c atravessando o resistor R no sentido da corrente elétrica convencional, o potencial elétrico diminui em $-RI$ porque no resistor as cargas elétricas positivas da corrente elétrica convencional se deslocam espontaneamente do maior potencial elétrico para o menor potencial elétrico:

$$V_b - V_c = -RI$$

Quando vamos de c para e atravessando o resistor r_1 no sentido da corrente elétrica convencional, o potencial elétrico diminui em $-r_1 I$ porque no resistor as cargas elétricas positivas da corrente elétrica convencional se deslocam espontaneamente do maior potencial elétrico para o menor potencial elétrico:

$$V_e - V_c = -r_1 I$$

Quando vamos de e para a atravessando a fonte com fem ε_1 do polo negativo para o polo positivo, o potencial elétrico aumenta em ε_1 , uma vez que o potencial do polo negativo é sempre menor do que o potencial do polo positivo:

$$V_a - V_e = \varepsilon_1$$

Quando vamos de a para f atravessando a fonte com fem ε_2 do polo negativo para o polo positivo, o potencial elétrico aumenta em ε_2 , uma vez que o potencial do polo negativo é sempre menor do que o potencial do polo positivo:

$$V_f - V_a = \varepsilon_2$$

Quando vamos de f para b atravessando o resistor r_2 no sentido da corrente elétrica convencional, o potencial elétrico diminui em $-r_2 I$ porque no resistor as cargas elétricas positivas da corrente elétrica convencional se deslocam espontaneamente do maior potencial elétrico para o menor potencial elétrico:

$$V_b - V_f = -r_2 I$$

Logo, a soma das diferenças de potencial no circuito da **Figura 11.12** é dada por:

$$-RI - r_1 I + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 - r_2 I = 0$$

$$I = \frac{\varepsilon_2 + \varepsilon_1}{R + r_1 + r_2} = \frac{4 + 2}{1 + 1 + 98} A = \frac{6}{100} A = 0,06 A$$

Como a corrente elétrica foi positiva, o sentido escolhido está correto.

b) As diferenças de potenciais $V_a - V_c$ e $V_b - V_a$ nos terminais das fontes foram calculadas a seguir:

$$V_c - r_1 I + \varepsilon_1 = V_a \Rightarrow V_a - V_c = \varepsilon_1 - r_1 I = (2 - 0,06)V = 1,94V$$

$$V_a + \varepsilon_2 - r_2 I = V_b \Rightarrow V_b - V_a = \varepsilon_2 - r_2 I = (4 - 0,06)V = 3,94V$$

c) Na fonte 1 (fem ε_1), as cargas elétricas positivas da corrente elétrica convencional vão do menor para o maior potencial. Logo, as cargas elétricas ganham energia. Na fonte 2 (fem ε_2), as cargas elétricas positivas da corrente elétrica convencional vão do menor potencial para o maior potencial. Logo, as cargas elétricas positivas ganham energia. São as fontes que fornecem energia para as cargas elétricas positivas da corrente elétrica. Por isso, nenhuma das fontes está acumulando energia; elas estão perdendo energia.

Atividade 5

Atende aos Objetivos 1, 2 e 3

De acordo com as seções que você leu, "Arrombando um armário mágico" e "Força eletromotriz" e seus conhecimentos da Aula 9, faça o seguinte exercício:

As **Figuras 11.13a e 11.13b** mostram circuitos formados por duas baterias reais e um resistor R . Considere os seguintes valores para os elementos do circuito:

$$\varepsilon_1 = 7V, \varepsilon_2 = 20V, R = 10\Omega, r_1 = 2\Omega, r_2 = 1\Omega$$

a) Desenhe, na **Figura 11.13a**, a corrente elétrica. Calcule a corrente elétrica do circuito. O sentido da corrente que você escolheu estava correto? Justifique a sua resposta. Se o seu sentido estiver errado, desenhe a corrente elétrica com o sentido correto na **Figura 11.13b**.

b) Calcule as diferenças de potencial $V_a - V_c$ e $V_c - V_e$. Qual das baterias está sendo carregada? Justifique a sua resposta.

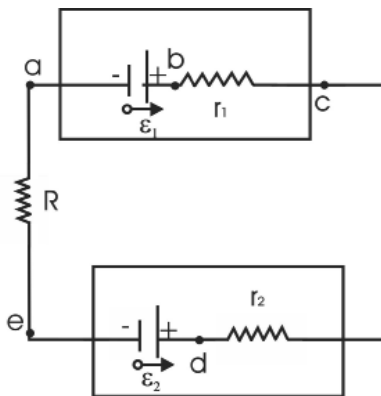


Figura 11.13a

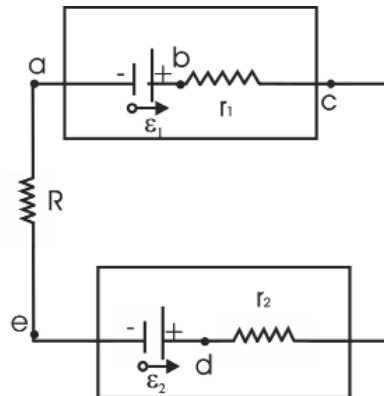


Figura 11.13b

Respostas Comentadas

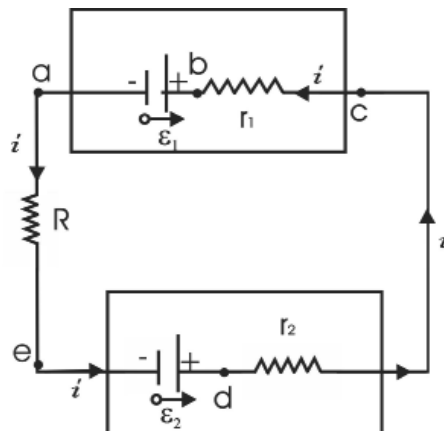


Figura 11.14: Circuito com a corrente elétrica escolhida.

a) O sentido da corrente elétrica escolhido foi representado na **Figura 11.14**.

A aplicação da lei das malhas ao circuito fornece a corrente elétrica:

$$-Ri + \mathcal{E}_2 - r_2i - r_1i - \mathcal{E}_1 = 0$$

$$i = \frac{\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1}{R + r_1 + r_2} = \frac{(20 - 7)V}{(10 + 2 + 1)\Omega} = 1A$$

Como a corrente elétrica foi positiva, o sentido escolhido está correto.

b) As diferenças de potenciais $V_c - V_a$ e $V_a - V_b$ nos terminais das fontes foram calculadas a seguir:

$$V_a + \mathcal{E}_1 + r_1i = V_c \Rightarrow V_a - V_c = -\mathcal{E}_1 - r_1i = -(7 + 2.1)V = -9V$$

$$V_c + r_2i - \mathcal{E}_2 = V_e \Rightarrow V_a - V_e = \mathcal{E}_2 - r_2i = (20 - 1.1)V = 19V$$

A bateria que está sendo carregada é a bateria 1, porque nela as cargas elétricas da corrente elétrica convencional estão se deslocando de um ponto de maior potencial (ponto c) para um ponto de menor potencial elétrico (ponto e). Logo, a energia potencial elétrica dessas cargas está diminuindo. As cargas elétricas estão fornecendo energia elétrica para o resistor e para a bateria.

Conclusão

Nesta aula, você estudou as características do campo elétrico motor, que é o campo elétrico que produz as correntes elétricas. Você também aprendeu o que era força eletromotriz e a escrever diferença de potencial nos terminais de uma fonte. Agora você está apto a resolver circuitos elétricos simples.

Resumo

1. A corrente elétrica contínua é uma corrente elétrica com módulo e sentido constantes no tempo.
2. A corrente elétrica alternada é uma corrente elétrica cujo módulo e sentido mudam no tempo.
3. As baterias são fontes de corrente contínua.
4. A rede elétrica é uma fonte de corrente alternada.
5. O campo elétrico motor é um campo elétrico não conservativo que

força as cargas elétricas a se deslocarem no sentido contrário ao seu sentido espontâneo, isto é, força as cargas elétricas positivas a se aproximarem das cargas elétricas positivas e as cargas elétricas negativas a se aproximarem das cargas elétricas negativas.

6. A força eletromotriz não é força. Ela é a diferença de potencial nos terminais de uma fonte quando ela está aberta, isto é, quando ela não é atravessada por uma corrente elétrica.

7. Como a corrente elétrica convencional em um resistor vai do maior potencial para o menor potencial, a diferença de potencial nos terminais de um resistor, quando ele é atravessado no sentido contrário ao da corrente elétrica convencional (de 2 para 1), é dada por $V_1 - V_2 = Ri$.

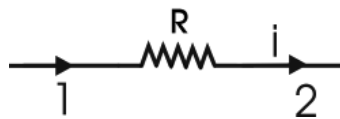
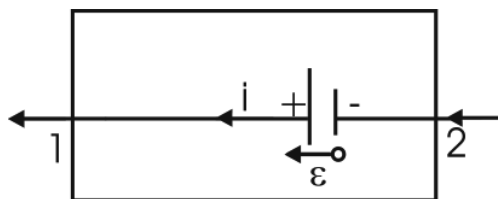
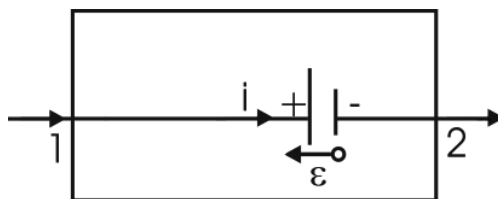


Figura 11.15: Diferença de potencial em um resistor.

8. A diferença de potencial entre o polo positivo e o polo negativo de uma fonte ideal não é alterada pela corrente elétrica, isto é, ela é sempre igual à força eletromotriz, ou seja,



$$V_1 - V_2 = \varepsilon$$



$$V_1 - V_2 = \varepsilon$$

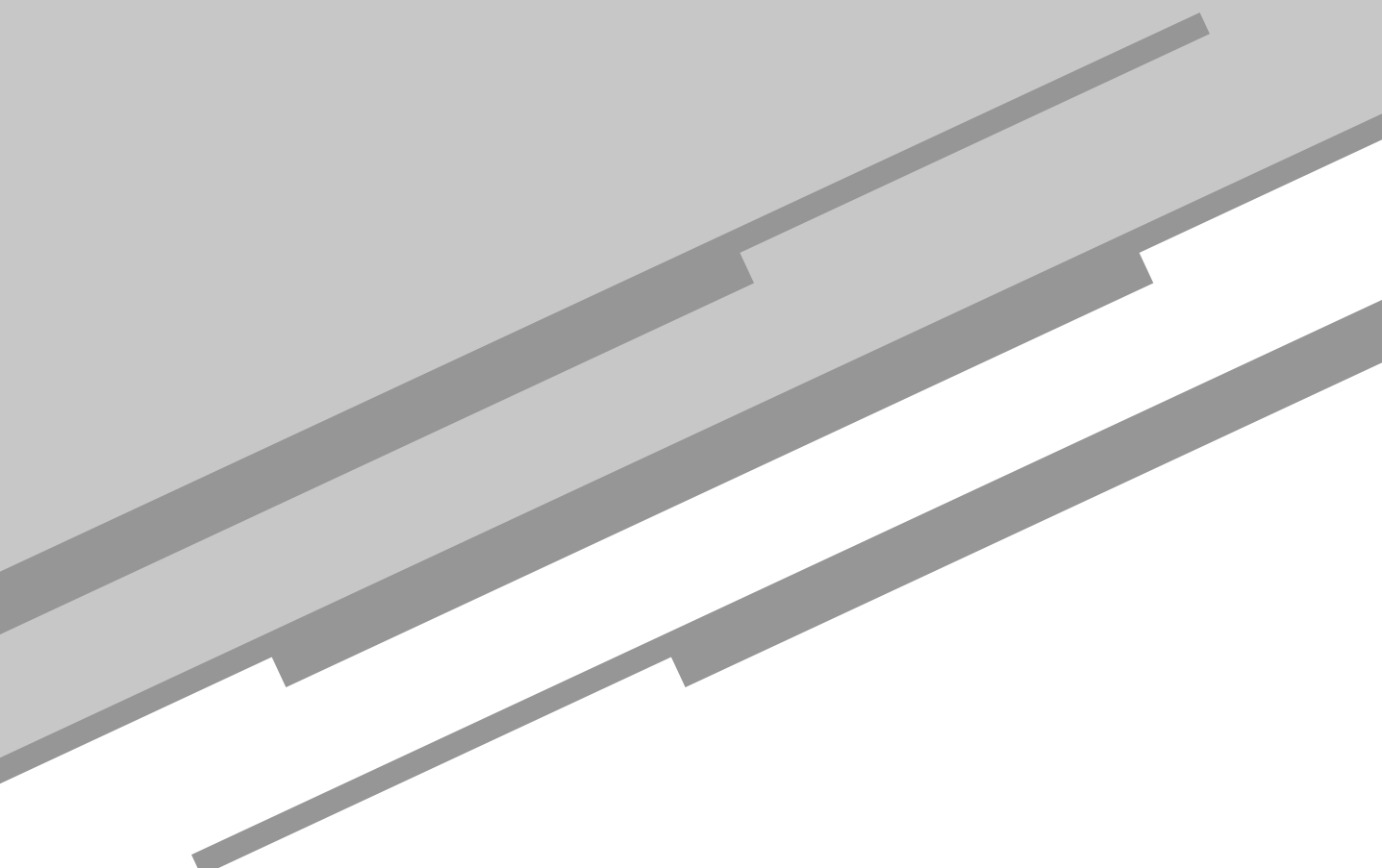
Figura 11.16: Diferença de potencial nos terminais de uma fonte ideal.

Leituras recomendadas

Leia sobre os assuntos "A força eletromotriz" e "Associação de resistores em série" na seção "Eletricidade e magnetismo", do livro *Física* - volume único, de A. Máximo e B. Alvarenga.

Aula 12

Distribuição de energia elétrica
em circuitos elétricos



Maria Antonieta Almeida

Meta

Obter as expressões da potência e da energia elétrica fornecidas pelos resistores e pelas fontes de corrente elétrica contínua às correntes elétricas, bem como discutir a lei das malhas e a lei dos nós.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. aplicar a lei das malhas;
2. aplicar a lei dos nós;
3. calcular a resistência equivalente de resistores ligados em paralelo;
4. calcular correntes elétricas em circuitos com mais do que uma malha;
5. calcular as potências e as energias elétricas que os resistores e as fontes fornecem à corrente elétrica.

Introdução

A energia elétrica que utilizamos é transportada e distribuída pelas correntes elétricas. Nesta aula, obteremos a expressão da potência e da energia elétrica que um elemento de um circuito fornece à corrente elétrica. Também serão discutidas as leis que permitem calcular as correntes elétricas em circuitos com várias malhas. Todas essas discussões serão apresentadas nas seções denominadas “Feriado em Teresópolis” e “Aplicando a lei das malhas e a lei dos nós”. Antes da leitura dessas seções, veja se você é capaz de responder às seguintes questões:

1. Escreva a expressão da diferença de potencial entre o polo positivo e o polo negativo de uma fonte ideal. Escreva a potência fornecida por uma fonte ideal de corrente contínua à corrente elétrica convencional quando ela atravessa a fonte do polo negativo para o polo positivo. O valor dessa potência se modifica se a corrente convencional atravessar a fonte do polo positivo para o polo negativo?
2. Um resistor R é atravessado por uma corrente elétrica i e é submetido a uma diferença de potencial ΔV . Nesse caso, qual a expressão do módulo da energia dissipada no resistor em um intervalo de tempo Δt ?
3. Em uma associação de resistores em paralelo, a maior potência é dissipada nos resistores maiores ou menores?
4. Descreva qualitativamente a distribuição de energia em um circuito de corrente contínua alimentado por uma fonte ideal, quando a corrente elétrica atravessa a fonte do polo negativo para ao polo positivo.
5. Descreva qualitativamente a distribuição de energia em um circuito de corrente contínua alimentado por uma fonte real, quando a corrente elétrica atravessa a fonte do polo negativo para ao polo positivo.
6. Você pode explicar por que, ao ligarmos muitos aparelhos a uma mesma tomada através de um benjamim, mantendo a diferença de potencial fornecida pela tomada constante, a fiação pode queimar?
7. Você pode explicar por que, quando ligamos o chuveiro elétrico, o brilho das lâmpadas diminui?
8. 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?

Feriado em Teresópolis

Para aproveitar um feriado prolongado, a família Silva aluga um chalé em um condomínio em Teresópolis. Chegam ao chalé no final da tarde, após enfrentarem 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 “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 está bem.

– Fátima, deixe-me ver o que houve.

Retira o chuveiro queimado, vai à despensa buscar um chuveiro de reserva, igual.

– Espere um instantinho, que vou trocá-lo.

Pede a ela um pouco de paciência enquanto 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 minhas ideias sobre seu funcionamento estão corretas. Por exemplo, a resistência que aquece a água quando o botão do chuveiro está na posição “inverno” deve ser maior do que aquela que é acionada quando a chave está virada para “verão”.

Fátima sorri, o irmão cometeu 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 a chave 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. 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 deslocamento 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 mostra novamente o interior do chuveiro para o irmão.

– O calor produzido aumenta com a resistência e com a corrente elétrica, que diminui quando a resistência aumenta. Para uma mesma tensão, o resistor com a resistência menor 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 se 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 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 se lembra 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 para 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 Δt . Por uma questão de simplificação, vamos imaginar que os únicos transportadores de corrente elétrica sejam os elétrons. A generalização para o caso com vários transportadores de corrente elétrica é imediata.

Em um intervalo de tempo Δt , todos os elétrons se deslocam em média $V_d \Delta t$. Logo, pela **Figura 12.1a** vemos que apenas os elétrons que estão no cilindro de área S e altura $V_d \Delta t$ atravessam a área S .

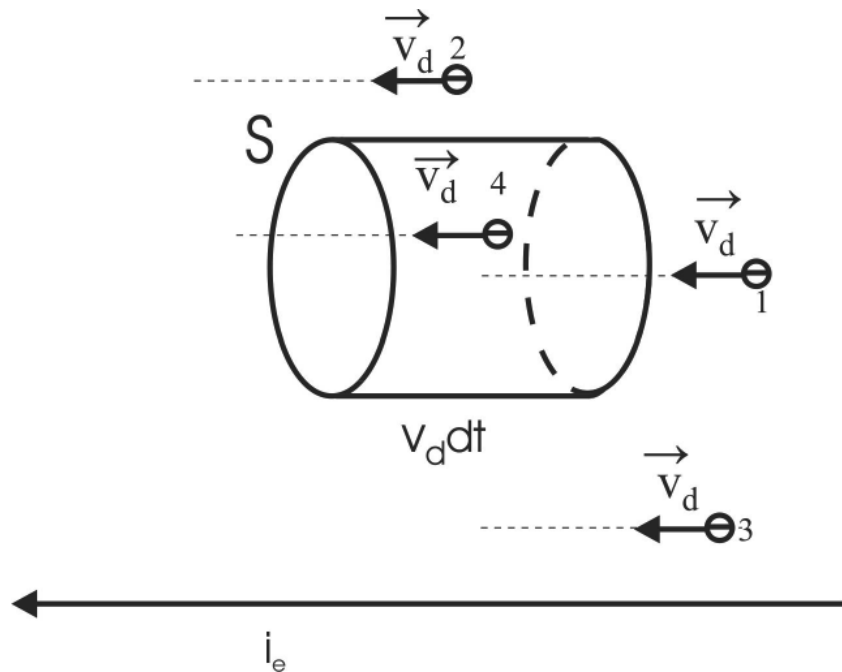


Figura 12.1a: Nesta figura, os deslocamentos médios dos elétrons em um intervalo de tempo Δt foram representados por linhas pontilhadas.

A variação da energia potencial elétrica de cada um desses elétrons é $\Delta U_e = -e \Delta V_e$. Vamos supor inicialmente que a corrente elétrica dos elétrons está percorrendo o condutor fora da fonte. Logo, os elétrons estão se deslocando para a região onde o potencial elétrico é maior. Como estamos supondo que o campo eletrostático é constante, a variação do potencial de cada elétron é $\Delta V_e = E_e v_d \Delta t$.

Todos os elétrons têm o mesmo deslocamento e a mesma variação de potencial elétrico. Portanto, a variação da energia potencial elétrica de todos os elétrons que atravessaram a área S é a mesma. O número de

elétrons livres N que atravessaram S é $n S v_d \Delta t$, em que n é o número de elétrons livres por unidade de volume. A carga elétrica dos elétrons que atravessam a área S é $\Delta Q_e = -Ne$.

Assim, a variação da energia potencial elétrica associada a todos os elétrons que atravessam a área S é $\Delta U_{\Delta Q_e} = \Delta Q_e \Delta V_e = -en v_d S \Delta V_e \Delta t$. Logo, a potência elétrica associada à corrente dos elétrons é dada por:

$$P_e = \frac{\Delta U_{\Delta Q_e}}{\Delta t} = -en v_d S \Delta V_e.$$

Ronaldo se lembra da corrente elétrica convencional e pergunta:

– Professor, essa expressão também vale para a corrente elétrica convencional?

– Na corrente elétrica convencional, temos cargas elétricas positivas com módulos iguais aos módulos das cargas elétricas dos elétrons. Elas se deslocam com velocidades médias iguais a $-\vec{v}_d$. A densidade volumétrica n_p das cargas elétricas positivas da corrente elétrica convencional é igual à densidade volumétrica n dos elétrons de condução (elétrons livres). Em um intervalo de tempo Δt , todas as cargas positivas da corrente elétrica convencional se deslocam em média $\vec{v}_d \Delta t$. Logo, pela **Figura 12.1b**, vemos que apenas as cargas elétricas positivas que estão no interior do cilindro de área S e altura $\vec{v}_d \Delta t$ atravessam a área S . A variação da energia potencial elétrica de cada carga positiva é $\Delta U_p = e \Delta V_p$. Como estamos supondo que o campo eletrostático é constante e que estamos fora da fonte, a variação do potencial de cada carga positiva é $\Delta V_p = -E_c v_d \Delta t$.

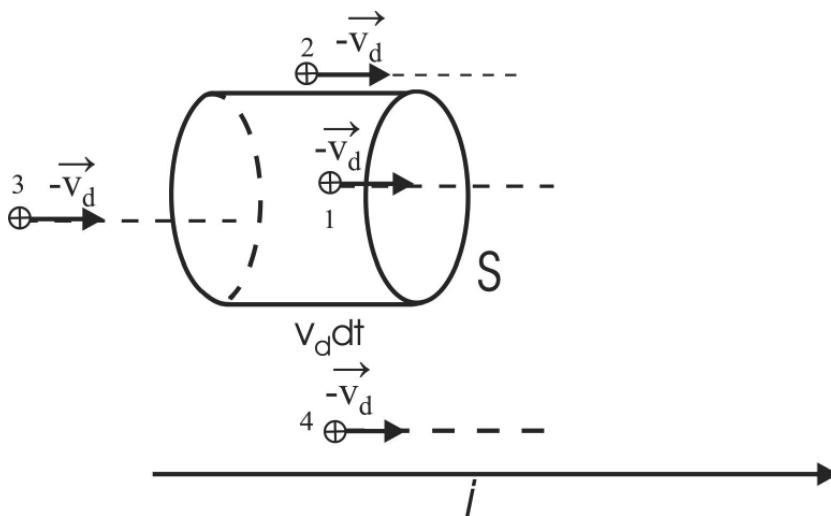


Figura 12.1b: Nesta figura, os deslocamentos médios das cargas elétricas positivas da corrente elétrica convencional, em um intervalo de tempo Δt , foram representados por linhas pontilhadas.

Todas as cargas elétricas positivas têm o mesmo deslocamento e a mesma variação de potencial elétrico. Portanto, a variação da energia potencial elétrica de todas as cargas elétricas positivas que atravessaram a área S é a mesma. O número de cargas elétricas positivas N da corrente elétrica convencional que atravessaram S é $nSv_d\Delta t$, sendo n o número de elétrons livres por unidade de volume. A carga elétrica total positiva que atravessa a área S no intervalo de tempo Δt , é $\Delta Q_p = enSv_d\Delta t$. Assim, a variação da energia potencial elétrica associada a todas as cargas elétricas positivas da corrente elétrica convencional que atravessam a área S é $\Delta U_{\Delta Q_p} = \Delta Q_p \Delta V_p = enSv_d\Delta t \Delta V_p$. Logo, a potência elétrica associada à corrente das cargas elétricas positivas da corrente elétrica convencional é dada por: $P_p = \frac{\Delta U_{\Delta Q_p}}{\Delta t} = en v_d S \Delta V_p$.

Ronaldo observa as duas expressões obtidas para a potência da corrente convencional e da corrente de elétrons:

$$P_e = -nv_d S \Delta V_e, P_p = nv_d S \Delta V_p$$

Elas parecem diferentes. Ele lembra que o professor disse que era impossível distinguir a corrente elétrica convencional da corrente elétrica de elétrons, analisando apenas as potências associadas a elas, e pergunta:

– Professor, as potências associadas à corrente elétrica convencional e à corrente de elétrons são diferentes?

– Ronaldo, elas são iguais, porque temos que $\Delta V_e = -\Delta V_p$. A potência pode ser reescrita, utilizando-se a corrente elétrica convencional, uma vez que temos que $nev_d S = jS = i$. Logo, temos que:

$$P_p = \frac{\Delta U_{\Delta Q_p}}{\Delta t} = i \Delta V_p$$

Ronaldo lembra-se da lei de Ohm e pergunta como fica a fórmula da potência para resistores ôhmicos.

– A fórmula da potência para resistores ôhmicos pode ser reescrita de duas formas diferentes. A primeira delas é útil quando queremos comparar a potência dissipada em resistores ligados em série. Nesse caso, já que a corrente elétrica é a mesma em todos os resistores, reescrevemos a diferença de potencial nos terminais dos resistores em termos das suas resistências e da corrente elétrica convencional. A relação entre a diferença de potencial nos terminais de um resistor e a corrente elétrica é $\Delta V_p = -Ri$. O sinal *menos* é necessário, porque, em um resis-

tor, as cargas elétricas da corrente elétrica convencional fluem espontaneamente do maior para o menor potencial. A potência no resistor se reduz a $P = i \cdot (-Ri) = -Ri^2$. O sinal negativo indica que a corrente elétrica está fornecendo energia para o resistor.

A nova expressão da potência reforça a ideia de Ronaldo de que a potência fornecida ao resistor com resistência maior é maior. Ele pergunta ao professor se a potência elétrica é sempre maior no resistor com resistência maior.

– Ronaldo, isso só é verdade quando as correntes elétricas que atravessam os resistores são iguais. Se as correntes forem diferentes, a comparação entre as potências dissipadas nos resistores fica mais complicada, uma vez que a potência depende da resistência e da corrente elétrica. A potência aumenta com o aumento da resistência e com o aumento da corrente elétrica. Todavia, esta diminui com o aumento da resistência. Resta saber que efeito vai ser mais dominante na potência, se o aumento da resistência ou a diminuição da corrente elétrica.

Mariana, que estava atenta à discussão, solicita ao professor um exemplo com resistores percorridos por correntes elétricas diferentes.

– Vamos analisar o que acontece com resistores diferentes ligados em paralelo. Resistores ligados em paralelo são submetidos a uma mesma diferença de potencial elétrico. Nesse caso, as resistências e as correntes elétricas serão diferentes. A corrente será maior no resistor com a menor resistência. Esta discussão fica mais fácil, se reescrevermos a fórmula da potência de uma segunda forma. Isso pode ser realizado substituindo-se a corrente elétrica por sua expressão obtida com a Lei de Ohm, isto é,

$$i = -\frac{\Delta V_p}{R}. \text{ Logo, temos que: } P = i\Delta V_p = -\left(\frac{\Delta V_p}{R}\right)\Delta V_p = -\frac{\Delta V_p^2}{R}.$$

Ronaldo observa a fórmula obtida pelo seu professor. Ela mostra que, no caso em que a diferença de potencial é constante, a potência dissipada no resistor com resistência maior é menor. Logo, nesse caso, o efeito sobre a potência devido à diminuição da corrente elétrica no resistor com resistência maior é maior do que o efeito devido ao aumento da resistência elétrica. Estava provado o que ele observara no chuveiro: a menor resistência tem que ser utilizada no inverno. A resposta à pergunta de Fátima sobre a influência da resistência e da corrente elétrica na potência dissipada em resistores ligados em paralelo tinha sido dada: em uma ligação em paralelo, quem domina a potência é a corrente elétrica. O resistor atravessado pela maior corrente elétrica dissipa a maior potência.

O professor continua a aula:

– A unidade de potência elétrica no sistema MKSA é Watt. A primeira fórmula da potência que nós obtivemos vale para qualquer elemento de um circuito elétrico.

$$P_p = \frac{\Delta U_{\Delta Q_p}}{\Delta t} = i \Delta V_p$$

Ronaldo se lembra das pilhas e pergunta:

– Professor, como fica a distribuição de energia no interior de uma pilha?

– No caso em que a corrente elétrica convencional vai do polo negativo para o polo positivo, isto é, tem o sentido do campo elétrico motor, a energia que este fornece aos transportadores da corrente elétrica, que atravessam uma pilha de comprimento L , é igual ao trabalho realizado pela força elétrica motora sobre esses transportadores, isto é, $Energia = F_{EM}L = \Delta QE_m L = \Delta Q \mathcal{E}$.

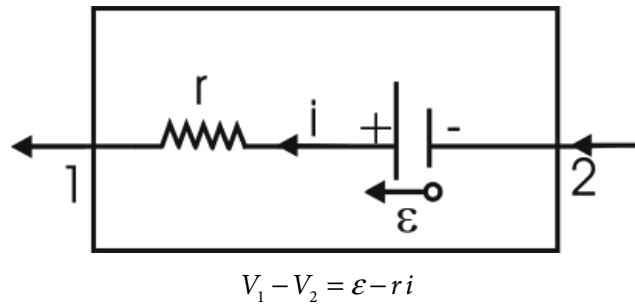


Figura 12.2: Diferença de potencial em uma pilha real quando ela está fornecendo energia à corrente elétrica.

Nesse caso, a diferença de potencial entre o polo positivo e negativo da pilha é $V_1 - V_2 = \Delta V_{pilha} = \mathcal{E} - ri$. Consequentemente, a força eletromotriz é dada por $\mathcal{E} = \Delta V_{pilha} + ri$ e a energia se transforma em $Energia = \Delta Q \mathcal{E} = \Delta Q(\Delta V_{pilha} + ri) = i \Delta t(\Delta V_{pilha} + ri)$. Por isso, a potência fornecida pela pilha é dada por:

$$\frac{Energia}{\Delta t} = i(\Delta V_{pilha} + ri) = i \Delta V_{pilha} + ri^2$$

Coloca a fórmula no quadro e continua a explicar:

– Essa expressão mostra que parte da potência (ri^2) fornecida aos transportadores de corrente elétrica pelo campo elétrico motor é dissipada na resistência interna r da pilha na forma de calor. A outra parte ($i\Delta V_{\text{pilha}}$) é transformada em energia potencial elétrica, que é transportada para o exterior da pilha. 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.

Outro aluno pergunta:

– Professor, o que acontece com a distribuição de energia quando a corrente elétrica convencional atravessa uma pilha no sentido contrário, isto é, do polo positivo para o polo negativo?

– Nesse caso, a diferença de potencial entre os polos positivo e negativo da pilha é $V_1 - V_2 = \Delta V_{\text{pilha}} = \mathcal{E} + ri$.

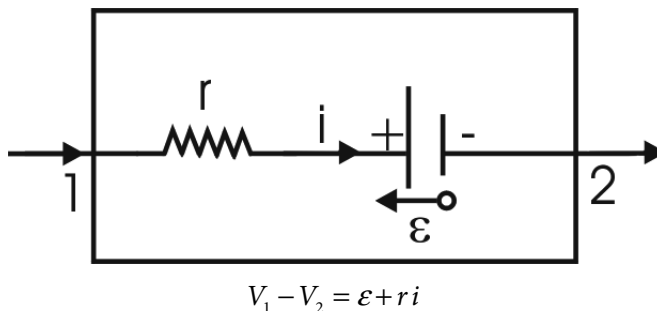


Figura 12.3: Diferença de potencial em uma pilha real quando ela está recebendo energia da corrente elétrica.

Logo, a potência que a corrente elétrica recebe da pilha é:

$$P = i(V_2 - V_1) = -i(\mathcal{E} + ri) = -i\mathcal{E} - ri^2.$$

O sinal negativo na expressão da potência significa que os elétrons que transportam a corrente elétrica estão perdendo energia. O termo da potência $-ri^2$ está relacionado à energia dissipada na forma de calor na resistência interna da pilha. A outra parte, $-i\mathcal{E}$, está associada à energia elétrica que é transformada em energia química pelo campo elétrico motor. É importante ressaltar que, neste caso, o campo elétrico motor se opõe ao movimento das cargas, roubando energia delas.

Um aluno resmunga:

– Por que eu tenho que aprender essas coisas complicadas? Eu quero ser escritor.

O professor responde:

– Os aparelhos eletrodomésticos que estão na sua residência consomem energia elétrica. A energia elétrica custa caro. A produção de energia elétrica prejudica o meio ambiente. Por isso, seria interessante que todo cidadão entendesse um pouco de eletricidade, para minimizar os seus gastos com a energia elétrica, ajudando, dessa forma, a proteger o meio ambiente.

– 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 calcular as correntes elétricas e as potências elétricas em um circuito elétrico?

– As leis que são utilizadas para projetar um circuito elétrico são:

- a lei das malhas;
- 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. Uma malha é um caminho fechado. Logo, para percorrê-la, saímos de um ponto e voltamos ao mesmo ponto. Consequentemente, a soma algébrica das diferenças de potencial em uma malha é nula.

$$\sum_i \Delta V_i = 0$$

A lei dos nós está relacionada aos seguintes fatos:

- a conservação da carga elétrica;
- a inexistência de acúmulo de cargas elétricas no interior de um condutor percorrido pela corrente elétrica constante.

Como não existe acúmulo de cargas elétricas no interior dos condutores percorridos por correntes elétricas contínuas, toda carga elétrica que chega a um nó tem que ser redistribuída pelos condutores conectados a ele. A lei dos nós diz que a soma dos módulos das correntes elétricas que chegam a um nó é igual à soma dos módulos das correntes

elétricas que saem de um nó. Se existem N_e correntes chegando em um nó e N_s correntes saindo do mesmo nó, a lei dos nós pode ser escrita da seguinte forma:

$$\sum_{k=1}^{N_e} |i_k| = \sum_{k=1}^{N_s} |i_k| \Leftrightarrow \sum_{k=1}^{N_e+N_s} i_k = 0$$

Se atribuirmos sinais negativos às correntes que entram em um nó e sinais positivos às correntes que saem do nó, podemos enunciar a lei dos nós de outra forma: a soma algébrica das correntes elétricas em um nó é nula.

Ronaldo não consegue entender o que o professor está explicando e solicita exemplos sobre cálculos correntes em circuitos elétricos.

O sinal toca. O professor promete fazer os exemplos na aula seguinte.

Aplicando a lei das malhas e a lei dos nós aos circuitos elétricos

O professor de Física inicia a aula seguinte discutindo exemplos com circuitos elétricos.

– Hoje vamos aprender como calcular as correntes elétricas em um circuito elétrico. Com essa finalidade, vamos aplicar a lei das malhas e a lei dos nós aos circuitos elétricos. A lei das malhas diz que a soma algébrica das diferenças de potencial em uma malha é nula.

Ronaldo aproveita para tirar as suas dúvidas sobre essa lei.

– Professor, o que é uma malha?

O professor desenha um circuito elétrico e explica:

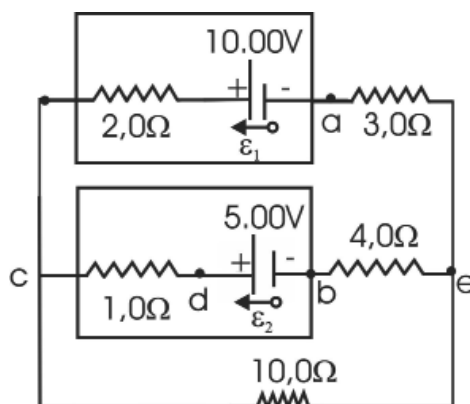


Figura 12.4: Circuito elétrico.

– Malha é uma linha fechada em um circuito elétrico. Por exemplo, este circuito elétrico tem três malhas.

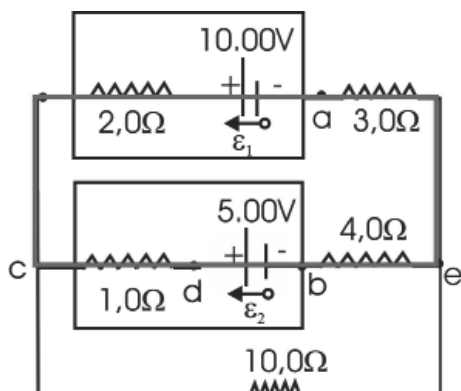


Figura 12.4a: Malha 1.

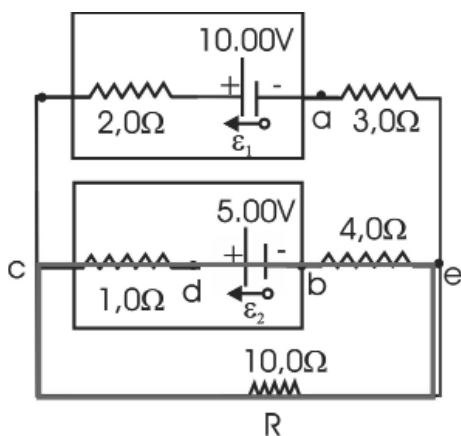


Figura 12.4b: Malha 2.

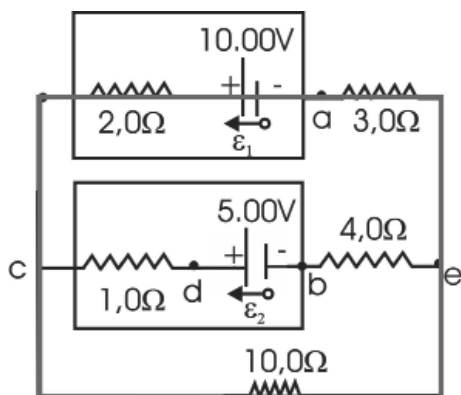


Figura 12.4c: Malha 3.

Para aplicar a lei das malhas em um circuito elétrico, é necessário desenhar as correntes elétricas no circuito, uma vez que, ao percorrer uma malha, a diferença de potencial nos terminais de um resistor vai depender do sentido da corrente elétrica que o atravessa.

– Professor, por favor, mostre um exemplo.

– Calma, é isso que estou tentando fazer! Para aplicar a lei das malhas, preciso recordar como é a variação de potencial nos terminais de uma fonte ideal e nos terminais de um resistor.

O professor desenha resistores e fontes ideais no quadro e prossegue:

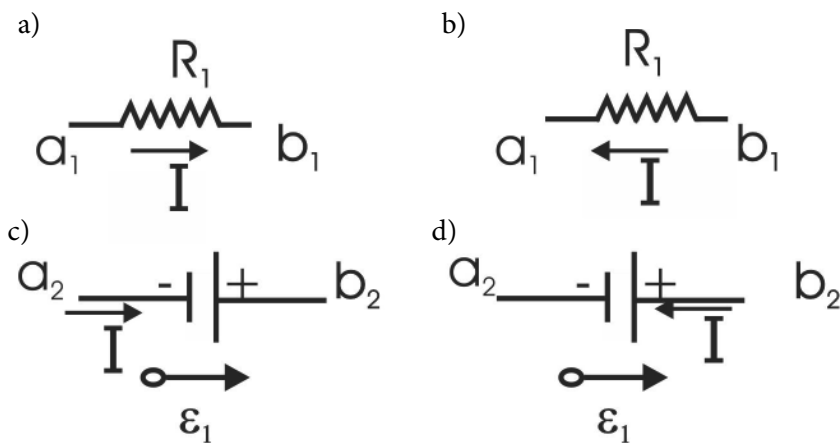


Figura 12.5: Variações de potencial elétrico nos terminais de resistores e de fontes ideais.

– Na **Figura 12.5**, desenhei as correntes elétricas convencionais. Na **Figura 12.5a**, a corrente elétrica convencional atravessa o resistor R_1 da *esquerda para a direita*. Logo, o potencial elétrico *diminui*, uma vez que as cargas elétricas positivas da corrente elétrica convencional vão do maior para o menor potencial elétrico. Por isso, temos que: $V_{a1} - V_{b1} = R_1 I$. Na **Figura 12.5b**, a corrente elétrica convencional atravessa o resistor R_1 da *direita para a esquerda*. Logo, o potencial elétrico *aumenta*, uma vez que as cargas elétricas positivas da corrente elétrica convencional vão do maior para o menor potencial elétrico. Por isso, temos que: $V_{a1} - V_{b1} = -R_1 I$

– Professor, quer dizer que a variação do potencial elétrico, quando atravessamos um resistor, depende da relação entre o sentido da corrente elétrica e o sentido que eu escolho para percorrer o resistor?

– Correto; quando eu percorro o resistor no sentido da corrente elétrica convencional, o potencial elétrico diminui e, quando percorro o resistor no sentido contrário ao da corrente elétrica convencional, o potencial elétrico aumenta. No caso da fonte ideal, a variação do potencial elétrico, quando eu a percorro, não depende do sentido da corrente elétrica. Veja os exemplos das **Figuras 12.5c e 12.5d**. Nelas, quando eu percorro a fonte da esquerda para a direita, o potencial sempre aumenta no valor da f.e.m., porque o potencial elétrico do polo negativo da fonte é sempre menor do que o potencial elétrico do polo positivo.

Ronaldo solicita ao professor que ele aplique a lei das malhas na malha 1.

– Para aplicar a lei das malhas, preciso desenhar as correntes elétricas no circuito. Posso arbitrar os sentidos das correntes elétricas.

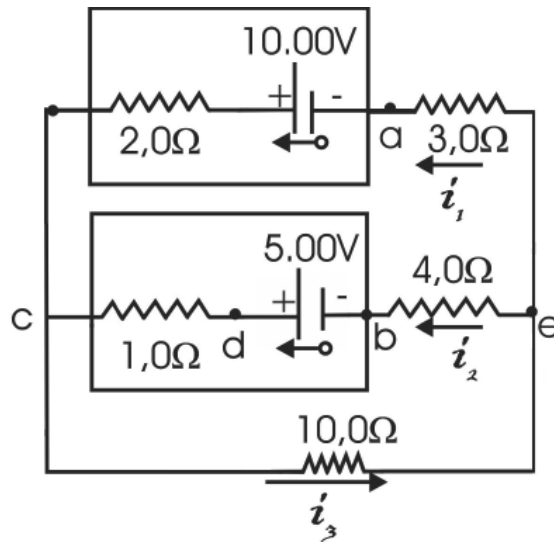


Figura 12.6a: Proposta inicial para a distribuição de correntes elétricas no circuito elétrico.

– Professor, o que acontece se os sentidos das correntes elétricas estiverem errados?

– Se os sentidos escolhidos das correntes elétricas estiverem errados, os valores calculados dessas correntes serão negativos. Vou aplicar a lei das malhas na malha 1. Vou percorrer a malha 1 no sentido horário, partindo do ponto *e*.

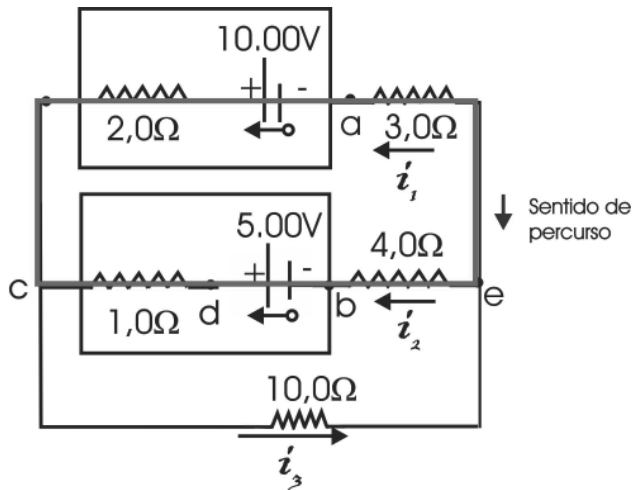


Figura 12.6b: Sentido de percurso na malha 1.

Quando eu atravesso o resistor de 4Ω no sentido da corrente elétrica, o potencial diminui em $-4i_2$. Quando eu atravesso a fonte com f.e.m de 5V do polo negativo para o polo positivo, o potencial aumenta em 5V. Quando eu atravesso o resistor de $1,00\Omega$ no sentido da corrente elétrica, o potencial diminui em $-i_2$. Quando eu atravesso o resistor de $2,00\Omega$ no sentido contrário ao corrente elétrica, o potencial aumenta em $2i_1$. Quando eu atravesso a fonte com f.e.m de 10V do polo positivo para o polo negativo dela, o potencial elétrico cai em -10V. Quando eu atravesso o resistor de $3,00\Omega$ no sentido contrário ao da corrente elétrica, o potencial elétrico aumenta em $3i_1$. Logo, pela lei da malhas, temos que: $-4i_2 + 5 - i_2 + 2i_1 - 10 + 3i_1 = 0$. Vamos ver se vocês entenderam a lei das malhas. Mariana, aplique a lei na malha 2.

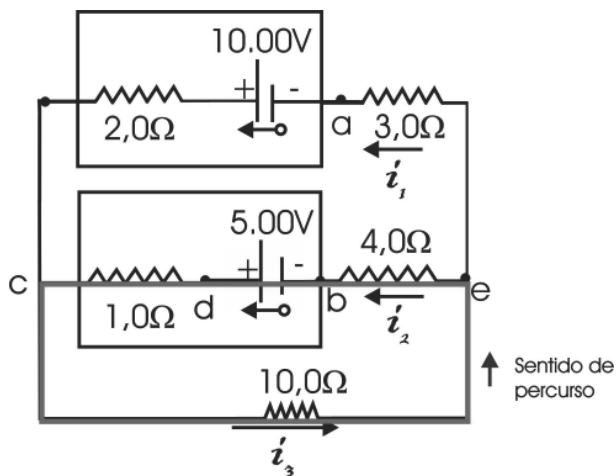


Figura 12.6c: Sentido de percurso na malha 2.

– Vou percorrer a malha 2 no sentido anti-horário, partindo do ponto *e*. Quando eu atravesso o resistor de 4Ω no sentido da corrente elétrica, o potencial diminui em $-4i_2$. Quando eu atravesso a fonte com f.e.m. de 5V do polo negativo para o polo positivo dela, o potencial aumenta em 5V. Quando eu atravesso o resistor de $1,00\Omega$ no sentido da corrente elétrica, o potencial diminui em $-i_2$. Quando eu atravesso o resistor de 10Ω no sentido da corrente elétrica, o potencial diminui em $-10i_3$. Logo, pela lei das malhas, temos que: $-4i_2 + 5 - i_2 + 2i_1 - 10 + 3i_1 = 0$

– Correto, Mariana! Agora é a sua vez, Ronaldo. Aplique a lei das malhas à malha 3.

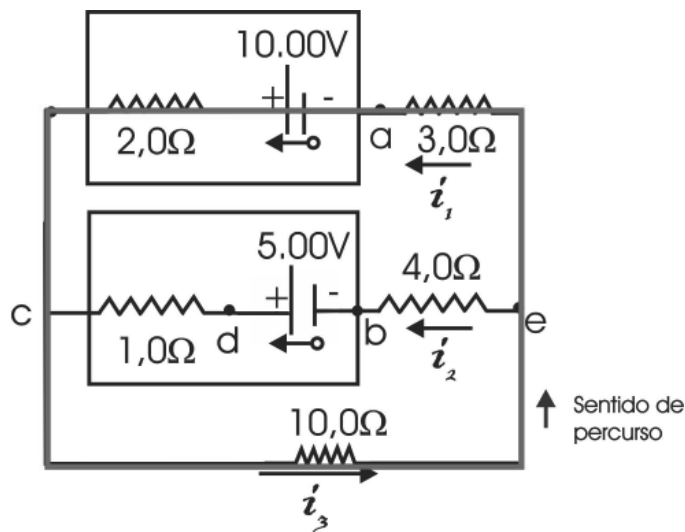


Figura 12.6d: Sentido de percurso na malha 3.

– Vou percorrer a malha 3 no sentido anti-horário, partindo do ponto *e*. Quando eu atravesso o resistor de $3,00\Omega$ no sentido da corrente elétrica, o potencial diminui em $-3i_1$. Quando eu atravesso a fonte com f.e.m. de 10V do polo negativo para o polo positivo dela, o potencial aumenta em 10V. Quando eu atravesso o resistor de $2,00\Omega$ no sentido da corrente elétrica, o potencial diminui em $-2i_1$. Quando eu atravesso o resistor em 10Ω no sentido da corrente elétrica, o potencial diminui em $-10i_3$. Logo, pela leis das malhas, temos que: $-3i_1 + 10 - 2i_1 - 10i_3 = 0$.

O sinal do recreio toca, e o professor interrompe a resolução do problema.

A lei dos nós

Após o recreio, o professor retoma a discussão sobre o cálculo de correntes elétricas em um circuito elétrico.

– Estamos estudando o método para calcular correntes elétricas em um circuito elétrico alimentado por uma fonte de corrente contínua. Em nosso exemplo, temos que calcular três correntes elétricas. Para isso, precisamos de três equações independentes.

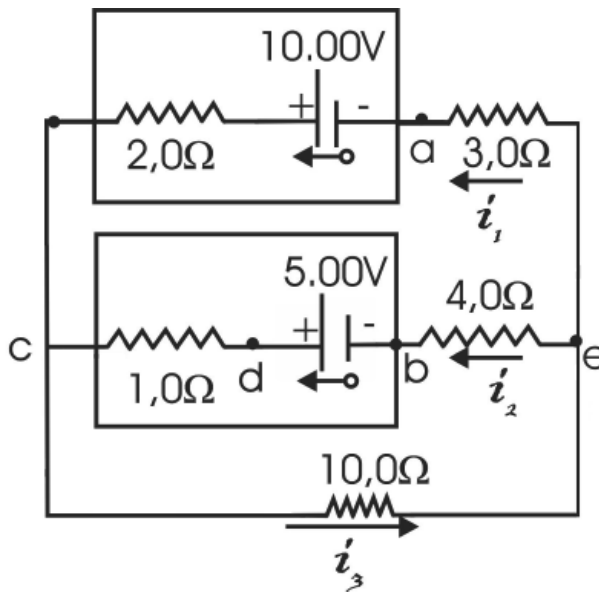


Figura 12.6e: Circuito elétrico com três malhas.

Quando aplicamos a lei das malhas ao nosso circuito, obtivemos três equações:

$$1) -4i_2 + 5 - i_2 + 2i_1 - 10 + 3i_1 = 0$$

$$2) -4i_2 + 5 - i_2 - 10i_3 = 0$$

$$3) -3i_1 + 10 - 2i_1 - 10i_3 = 0$$

Todavia, existem apenas duas equações independentes, porque a equação (1) é a diferença entre as equações (2) e (3).

$$(2) - (3) = -4i_2 + 5 - i_2 - 10i_3 - (-3i_1 + 10 - 2i_1 - 10i_3) = 0 \Rightarrow$$

$$-4i_2 + 5 - i_2 + 3i_1 - 10 + 2i_1$$

– Professor, como vou saber quantas equações independentes a lei das malhas fornece?

– A aplicação da lei das malhas em N_l malhas fornece $n_l - 1$ equações independentes. Como no nosso caso são três malhas, apenas duas das equações são independentes. A outra equação que está faltando é fornecida pela lei dos nós.

– Nossa, professor! Temos que aprender mais uma lei?

– Calma, Mariana! A lei dos nós é muito fácil. Nós são os pontos de encontro das correntes elétricas em um circuito elétrico. Mariana, quais são os nós do nosso circuito?

– Professor, o nosso circuito tem dois nós. Eles estão nos pontos c e e .

– Correto!

O professor redesenha as correntes elétricas próximas aos nós c e e e enuncia a lei dos nós.

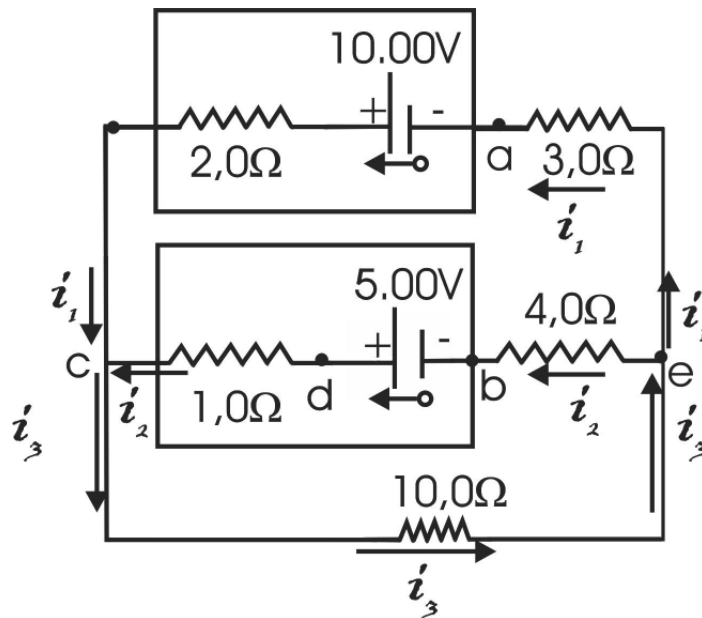


Figura 12.6f: Circuito elétrico com dois nós.

– A lei dos nós diz que a soma dos módulos das correntes elétricas que chegam a um nó é igual à soma dos módulos das correntes elétricas que saem do nó. Lúcia, utilize a lei dos nós para relacionar as correntes elétricas no nó c e no nó e .

– Como a soma dos módulos das correntes elétricas que chegam ao nó c é igual à soma dos módulos das correntes elétricas que saem dele, temos: $i_1 + i_2 = i_3$. A lei dos nós aplicada ao nó e fornece: $i_3 = i_1 + i_2$. Nossa, professor! As equações que eu obtive utilizando a lei dos nós são iguais.

– Isso sempre acontece. A aplicação da lei dos nós em n_2 nos fornece $N_2 - 1$ equações independentes. Como no nosso caso são dois nós, apenas uma das equações é independente.

A turma está inquieta. Eles estão recebendo muitas informações no mesmo dia. Ronaldo solicita que o professor termine o exercício:

– Afinal de contas, professor, quais são as correntes elétricas que atravessam esse circuito?

O professor escolhe três equações independentes para obter os valores das correntes elétricas:

– A lei dos nós aplicada ao nó c fornece a primeira equação (1):

$$i_1 + i_2 = i_3.$$

A lei das malhas aplicada à malha 2 fornece a segunda equação:

$$-4i_2 + 5 - i_2 - 10i_3 = 0 \Rightarrow 5i_2 + 10i_3 = 5 \Rightarrow i_2 = 1 - 2i_3.$$

A lei das malhas aplicada à malha 3 fornece a terceira equação:

$$-3i_1 + 10 - 2i_1 - 10i_3 = 0 \Rightarrow 5i_1 + 10i_3 = 10 \Rightarrow i_1 = 2 - 2i_3.$$

A substituição das correntes elétricas 1 e 2 na equação (1) fornece a corrente elétrica 3:

$$i_3 = 2 - 2i_3 + 1 - 2i_3 \Rightarrow 5i_3 = 3 \Rightarrow i_3 = 0,6A.$$

A substituição do valor da corrente elétrica 3 nas correntes elétricas 1 e 2 fornece os valores dessas correntes:

$$\begin{aligned} i_1 &= 2 - 2i_3 = 0,8A \\ i_2 &= 1 - 2i_3 = -0,8A \end{aligned}$$

O sinal negativo na corrente 2 significa que ela foi colocada com o sentido errado.

O professor faz um novo desenho do circuito e coloca as correntes elétricas com os sentidos corretos.

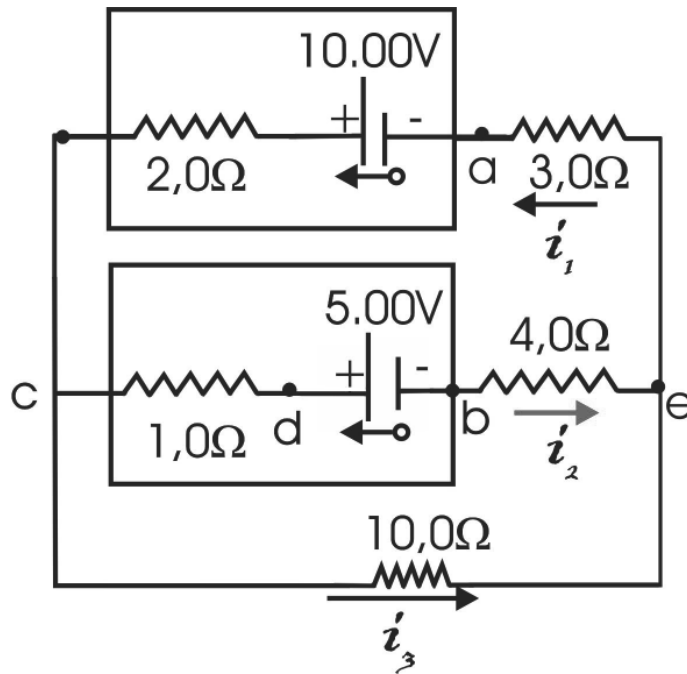


Figura 12.6g: Distribuição real de correntes elétricas no circuito elétrico.

Ronaldo reclama:

- Nossa, professor! Essas leis são abstratas e difíceis de entender!
- Você tem razão. Por isso, eu trouxe este quadro de corrente contínua para mostrar experimentalmente a lei das malhas e a lei dos nós.

O professor explica rapidamente os componentes do quadro de corrente contínua e, com um multímetro, demonstra experimentalmente a lei dos nós e a lei das malhas.

Em seguida, entrega uma lista de atividades para os alunos fazerem em casa. O sinal toca. A sala rapidamente se esvazia. Ronaldo fica aliviado, pois eliminou mais uma das suas dúvidas. Afinal de contas, o vestibular está perto e o tempo de preparação para o exame é pequeno.

Atividade 1

Atende aos Objetivos 1, 2, 3, 4 e 5

Com base nas seções que você acabou de ler, “Feriado em Teresópolis” e “Aplicando a lei das malhas e a lei dos nós aos circuitos elétricos”, responda às questões a seguir:

a) Escreva a expressão da diferença de potencial entre o polo positivo e o polo negativo de uma fonte ideal. Escreva a potência fornecida por uma fonte ideal de corrente contínua à corrente elétrica convencional quando ela atravessa a fonte do polo positivo para o polo negativo. O valor dessa potência se modifica se a corrente convencional atravessar a fonte do polo positivo para o polo negativo?

b) Um resistor R é atravessado por uma corrente elétrica i e é submetido a uma diferença de potencial ΔV . Nesse caso, qual a expressão do módulo da energia dissipada no resistor em um intervalo de tempo Δt ?

c) Em uma associação de resistores em paralelo, a maior potência é dissipada nos resistores maiores ou menores?

d) Descreva qualitativamente a distribuição de energia em um circuito de corrente contínua alimentado por uma fonte ideal.

e) Descreva qualitativamente a distribuição de energia em um circuito de corrente contínua alimentado por uma fonte real, quando a corrente elétrica atravessa a fonte do polo negativo para o polo positivo.

f) Você pode explicar por que, ao ligarmos muitos aparelhos a uma mesma tomada através de um benjamim, mantendo a diferença de potencial fornecida pela tomada constante, a fiação pode queimar?

g) Você pode explicar por que, quando ligamos o chuveiro elétrico, o brilho das lâmpadas diminui?

i) 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?

Respostas Comentadas

a) A diferença de potencial entre o polo positivo e o polo negativo de uma fonte ideal é igual à sua força eletromotriz, isto é, $V_+ - V_- = \mathcal{E}$. A potência que a corrente elétrica convencional recebe de uma fonte, quando a atravessa do polo negativo para o polo positivo, é dada por: $P_{\mathcal{E}} = (V_+ - V_-)|i| = \mathcal{E}|i|$. A potência que a corrente elétrica convencional recebe de uma fonte quando a atravessa do polo positivo para o negativo

é dada por: $P_{\varepsilon} = (V_- - V_+) |i| = -\varepsilon |i|$. Nesse caso, a fonte está retirando energia do circuito elétrico, ao invés de fornecer energia elétrica ao circuito elétrico, isto é, ela está funcionando como acumulador de energia elétrica.

b) O módulo da energia dissipada em um resistor R percorrido por uma corrente elétrica em um intervalo de tempo Δt é dado por $|\Delta U_R| = R i^2 \Delta t$.

c) Em uma associação de resistores em paralelo, todos eles estão submetidos a uma mesma diferença de potencial ΔV . Nesse caso, a comparação entre as potências dissipadas nos resistores fica facilitada quando escrevemos a potência em função da diferença de potencial e da resistência do resistor, isto é, $|P_R| = \frac{\Delta V^2}{R}$. Essa expressão mostra que as potências maiores estão associadas aos menores resistores com resistências menores.

d) Quando uma corrente elétrica convencional atravessa uma fonte ideal do polo negativo para o polo positivo, ela recebe energia elétrica da fonte. Essa energia é proveniente da energia acumulada na pilha na forma de energia química. Ela foi transformada em energia elétrica pelo campo elétrico motor.

e) Quando uma corrente elétrica convencional atravessa uma fonte real do polo negativo para o positivo, recebe energia elétrica da fonte. Essa energia estava acumulada na pilha na forma de energia química. Ela foi transformada em energia elétrica pelo campo elétrico motor. Parte da energia elétrica que a fonte fornece à corrente elétrica é transformada em calor na sua resistência interna, de tal forma que apenas uma parte da energia elétrica que a corrente elétrica recebe da fonte está disponível para ser utilizada no circuito externo à fonte. Essa energia é denominada energia útil.

f) Quando ligamos muitos aparelhos em uma mesma tomada através de um benjamim, estamos ligando todos os aparelhos em paralelo. Se, durante a adição de um novo aparelho à tomada, a diferença de potencial ficar praticamente constante, a corrente elétrica que sai dela aumenta, produzindo em seus fios de alimentação uma corrente elétrica maior. Esse aumento de corrente elétrica nos fios de alimentação da tomada pode fundi-los.

g) A energia dissipada no interior de uma fonte de corrente elétrica aumenta com o aumento da corrente elétrica. Logo, a potência fornecida pela fonte ao circuito a que ela está ligada diminui. Quando ligamos o chuveiro elétrico à rede elétrica, ele puxa uma corrente alta. Logo, a

potência que a fonte disponibiliza para as lâmpadas diminui. Essa diminuição pode produzir correntes elétricas menores nas lâmpadas, diminuindo os seus brilhos.

h) Como o chuveiro está ligado em paralelo com a rede elétrica, o módulo da potência dissipada no chuveiro é dado por: $|P_R| = \frac{\Delta V^2}{R}$. Logo, se a voltagem fornecida ao chuveiro permanecer praticamente constante, a diminuição da resistência do chuveiro elétrico aumenta o módulo da potência dissipada nele. Por isso, no inverno, a resistência do chuveiro tem que ser reduzida.

Atividade 2

Atende ao Objetivo 2

Com base nas seções que você acabou de ler, “Feriado em Teresópolis” e “Aplicando a lei das malhas e a lei dos nós aos circuitos elétricos”, resolva o exercício a seguir:

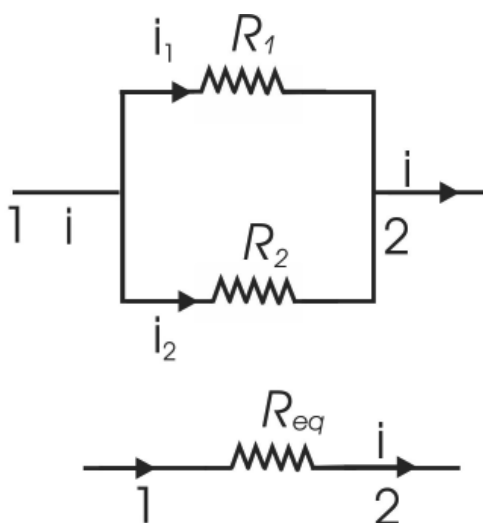


Figura 12.7: Associação de resistores em paralelo atravessados pela corrente elétrica convencional.

Dizemos que dois resistores estão ligados em paralelo (**Figura 12.7**) quando eles estão submetidos à mesma diferença de potencial.

a) Calcule a resistência da associação de resistores em paralelo. Suponha que as resistências dos resistores são R_1 e R_2 .

b) Generalize o resultado para N resistores ligados em paralelo.

Respostas Comentadas

a) Como a corrente representada na **Figura 12.7** é a corrente elétrica convencional, ela é constituída por cargas elétricas positivas. Logo, elas se deslocam espontaneamente do maior para o menor potencial. Por isso, temos que: $V_1 - V_2 = R_1 i_1$ e $V_1 - V_2 = R_2 i_2$.

A diferença de potencial no resistor equivalente é dada por: $V_1 - V_2 = R_{eq} i$.

Se aplicarmos a lei dos nós, temos que $i = i_1 + i_2$.

Logo, temos que:

$$i = i_1 + i_2 \Rightarrow \frac{V_1 - V_2}{R_{eq}} = \frac{V_1 - V_2}{R_1} + \frac{V_1 - V_2}{R_2} \Rightarrow$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

b) A generalização do resultado obtido em (a) para o caso de N resistores ligados em paralelo é imediata, uma vez que

$$\begin{cases} V_1 - V_2 = R_1 i_1, \dots, V_1 - V_2 = R_N i_N \\ i = i_1 + \dots + i_N \end{cases} \Rightarrow$$

$$\frac{V_1 - V_2}{R_{eq}} = \frac{V_1 - V_2}{R_1} + \dots + \frac{V_1 - V_2}{R_N} \Rightarrow$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \dots + \frac{1}{R_N}$$

Logo, quando existem N resistores ligados em paralelo, o inverso da resistência equivalente é a soma dos inversos das resistências da associação em paralelo.

Atividade 3

Atende ao Objetivo 2

Com base nas seções que você acabou de ler, “Feriado em Teresópolis” e “Aplicando a lei das malhas e a lei dos nós aos circuitos elétricos”, resolva o exercício a seguir:

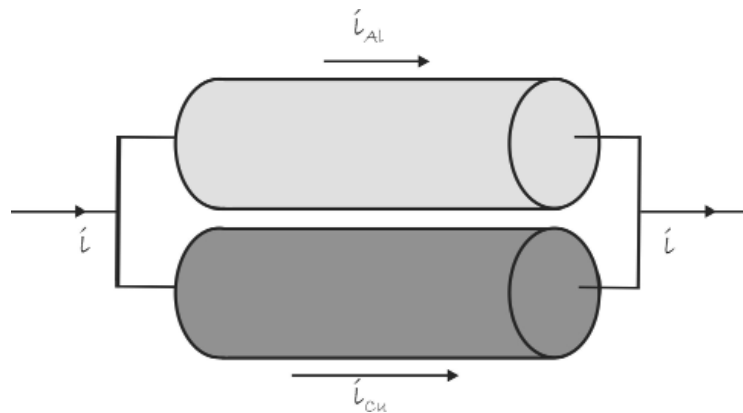


Figura 12.8: Fios ligados em paralelo.

Uma corrente elétrica convencional de 2 A se divide entre um fio de cobre e um fio de alumínio, como mostra a **Figura 12.8**. O fio de alumínio e o de cobre têm diâmetros iguais $d = 2,0\text{mm}$ e comprimentos iguais $L = 1,0\text{m}$. As resistividades do alumínio e do cobre são respectivamente iguais a $\rho_{Al} = 2,75 \cdot 10^{-8} \Omega m$ e $\rho_{Cu} = 1,69 \cdot 10^{-8} \Omega m$. O número de transportadores de corrente elétrica do alumínio é igual a $6,0 \cdot 10^{28}$ (elétrons livres)/ m^3 e do cobre é igual a $8,10^{28}$ (elétrons livres)/ m^3 . A carga elétrica do elétron é $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$.

a) Calcule as resistências dos fios e a resistência equivalente da ligação em paralelo dos fios.

b) Calcule a diferença de potencial nos terminais dos fios.

c) Calcule as correntes elétricas nos fios.

d) Calcule os campos elétricos no centro de cada fio. Desenhe esses vetores na **Figura 12.8**.

e) Qual é o módulo do vetor densidade de corrente elétrica \vec{j} no centro de cada fio? Desenhe os vetores densidade de corrente elétrica nos centros dos fios da **Figura 12.8**.

f) Desenhe, na **Figura 12.8**, os sentidos das correntes elétricas dos elétrons no alumínio e no cobre.

g) Calcule os vetores velocidade de deslocamento dos elétrons de condução (elétrons livres) nos fios de cobre e alumínio. Desenhe esses vetores na **Figura 12.8**.

Respostas Comentadas

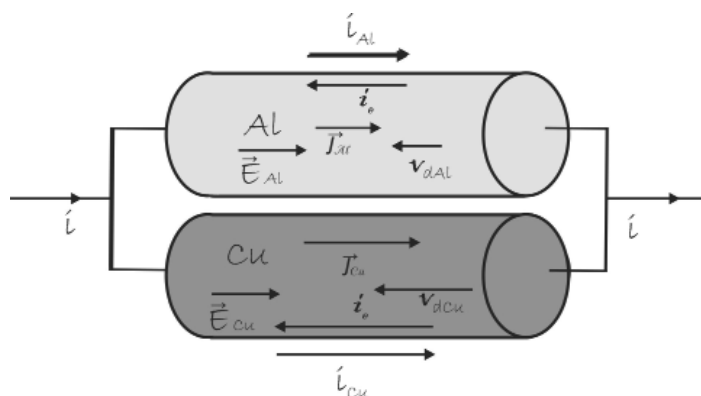


Figura 12.9: Vetores elétricos e correntes elétricas nos fios.

a) A resistência de um fio cilíndrico é dada por: $R = \frac{\rho L}{A}$. As áreas dos fios de alumínio e cobre são iguais a $A_{Al} = A_{Cu} = \frac{\pi d^2}{4}$. Por isso, as resistências dos fios são iguais a:

$$R_{Al} = \frac{\rho_{Al} L_{Al}}{A_{Al}} = \frac{4\rho_{Al} L_{Al}}{\pi d_{Al}^2} = \frac{4\rho_{Al} L}{\pi d^2} = \frac{4(2,75 \cdot 10^{-8} \Omega m)(1,0m)}{3,14 \cdot (2 \cdot 10^{-3})^2} \cong 8,8 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R_{Cu} = \frac{\rho_{Cu} L_{Cu}}{A_{Cu}} = \frac{4\rho_{Cu} L}{\pi d^2} = \frac{4(1,69 \cdot 10^{-8} \Omega m)(1,0m)}{3,14 \cdot (2 \cdot 10^{-3})^2} \cong 5,4 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{Al}} + \frac{1}{R_{Cu}} \Rightarrow R = \frac{R_{Al} R_{Cu}}{R_{Al} + R_{Cu}} \cong 3,3 \cdot 10^{-3} \Omega$$

b) A diferença de potencial nos terminais dos fios é dada por:

$$\Delta V = Ri = (3,3 \cdot 10^{-3} \Omega)(2,0A) = 6,6 \cdot 10^{-3} V.$$

c) As correntes elétricas nos fios são:

$$i_{Al} = \frac{\Delta V}{R_{Al}} = \frac{6,6 \cdot 10^{-3} V}{8,8 \cdot 10^{-3} \Omega} \cong 0,76 A$$

$$i_{Cu} = \frac{\Delta V}{R_{Cu}} = \frac{6,6 \cdot 10^{-3} V}{5,4 \cdot 10^{-3} \Omega} \cong 1,24 A$$

d) Os campos elétricos nos fios de cobre e de alumínio foram desenhados na **Figura 12.9**. Os módulos dos vetores campo elétrico no fio de cobre e no fio de alumínio foram obtidos a seguir:

$$\Delta V = E \cdot L \Rightarrow E = \frac{\Delta V}{L} \Rightarrow E_{Al} = E_{Cu} = \frac{\Delta V}{L} \cong \frac{6,6 \cdot 10^{-3} V}{1,0m} = 6,6 \cdot 10^{-3} V/m.$$

e) Os vetores densidade de corrente elétrica nos centros dos fios foram desenhados na **Figura 12.9**. Os módulos do vetor densidade de corrente elétrica j no centro de cada fio são dados por:

$$E = \rho \cdot j \Rightarrow \begin{cases} j_{Al} = \frac{E_{Al}}{\rho_{Al}} = \frac{(6,6 \cdot 10^{-3} V/m)}{2,75 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m} \cong 2,4 \cdot 10^5 A/m^2 \\ j_{Cu} = \frac{E_{Cu}}{\rho_{Cu}} = \frac{(6,6 \cdot 10^{-3} V/m)}{1,69 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m} \cong 3,9 \cdot 10^5 A/m^2 \end{cases}$$

f) Os sentidos das correntes elétricas dos elétrons no alumínio e no cobre estão representados na **Figura 12.9**. Eles têm os sentidos contrários aos sentidos das correntes elétricas convencionais.

g) Os vetores velocidade de deslocamento foram representados na **Figura 12.9**. A relação entre a velocidade de deslocamento dos elétrons e o módulo do vetor densidade de corrente elétrica é dada por: $j = env$, sendo e o módulo da carga dos elétrons, n o número de transportadores de corrente elétrica por unidade de volume e v a velocidade de deslocamento dos elétrons. Logo, temos que:

$$j_{Al} = en_{Al}v_{Al} \Rightarrow v_{Al} = \frac{j_{Al}}{en_{Al}} \cong \frac{2,4 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2}{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}) \cdot (6 \cdot 10^{28} \text{ elétrons/m}^3)} = 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

$$j_{Cu} = en_{Cu}v_{Cu} \Rightarrow v_{Cu} = \frac{j_{Cu}}{en_{Cu}} \cong \frac{3,9 \text{ A/m}^2}{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}) \cdot (8,5 \cdot 10^{28} \text{ elétrons/m}^3)} = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

Atividade 4

Atende aos Objetivos 1, 2, 3, 4 e 5

Com base nas seções que você acabou de ler, “Feriado em Teresópolis” e “Aplicando a lei das malhas e a lei dos nós aos circuitos elétricos”, resolva o exercício a seguir:

A **Figura 12.10** mostra um circuito com três malhas. Os elementos do circuito têm os seguintes valores:

$$\mathcal{E}_1 = 2,0\text{V}, \mathcal{E}_2 = 4,0\text{V}, \mathcal{E}_3 = 8,0\text{V}, R_1 = 1,0\Omega, R_2 = 2,0\Omega.$$

a) Encontre as correntes elétricas do circuito da **Figura 12.10**. Os sentidos das correntes colocados na **Figura 12.10** estão corretos? Coloque, na **Figura 12.11**, as correntes elétricas com os sentidos corretos.

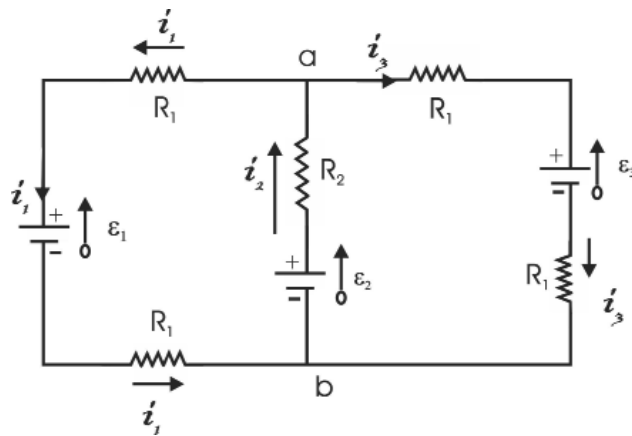


Figura 12.10: Circuito elétrico com as correntes elétricas provisórias.

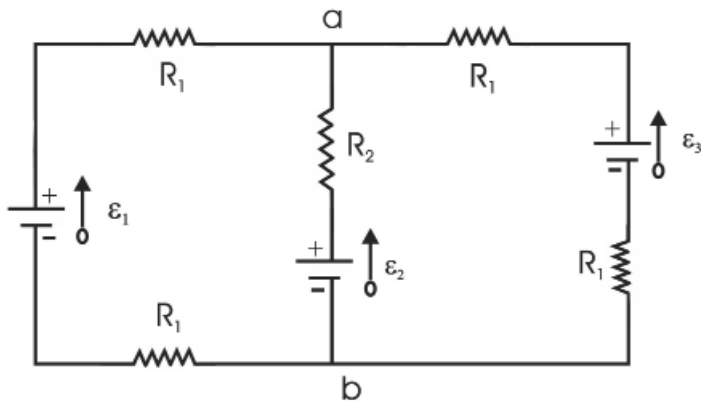


Figura 12.11

b) Calcule a diferença de potencial entre os pontos a e b .

c) Quais as fontes do sistema que estão fornecendo energia para o circuito dele e quais estão recebendo energia do circuito? Justifique a sua resposta.

d) Em quais resistores está ocorrendo a maior dissipação de energia? Justifique a sua resposta.

Respostas Comentadas

a) A lei das malhas afirma que a soma das diferenças de potencial em uma malha é nula. A seguir, foram desenhadas as três malhas associadas ao circuito elétrico representado na **Figura 12.10**.

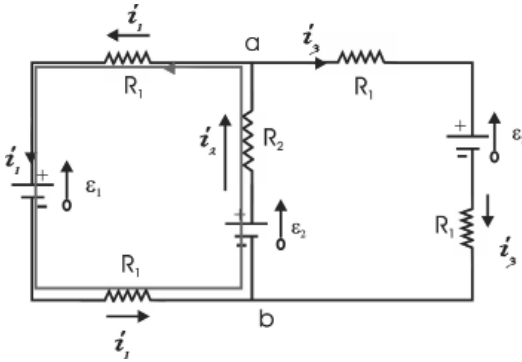


Figura 12.10a

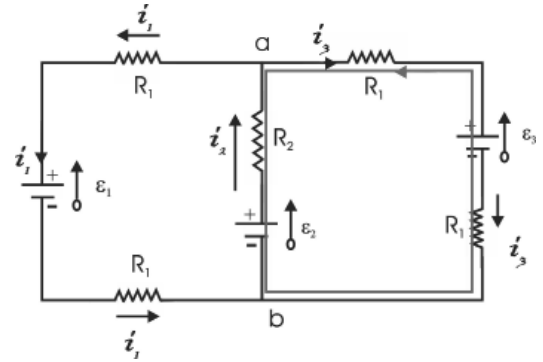


Figura 12.10b

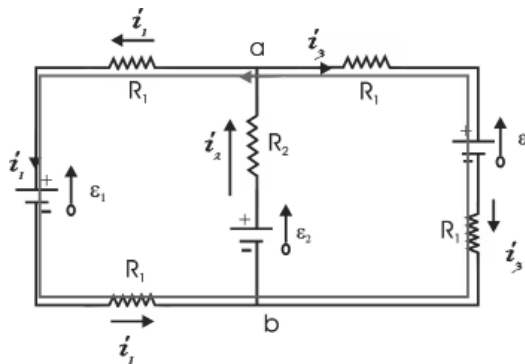


Figura 12.10c

A três malhas foram percorridas no sentido anti-horário. As regras para se escrever a variação do potencial elétrico são:

- (1) Se o resistor é percorrido no sentido da corrente elétrica convencional, o potencial elétrico diminui, logo, a variação de energia potencial é negativa. Por exemplo, na malha 1, quando o deslocamento é de a para b , o potencial elétrico cai em $-R_1 i_1$.
- (2) Se o resistor é percorrido no sentido contrário ao da corrente elétrica, o potencial elétrico aumenta, logo, a variação da energia potencial é positiva. Por exemplo, na malha 2, quando o deslocamento é de a para b , o resistor R_2 é percorrido no sentido contrário ao da corrente elétrica, e a variação do potencial elétrico é positiva e igual a $R_2 i_2$.

(3) Quando atravessamos uma fonte, o sinal da variação do potencial elétrico não depende do sentido da corrente elétrica. Se vamos do polo negativo para o positivo, o potencial elétrico aumenta em ε . Por exemplo, na malha 1, quando atravessamos a fonte dois e o deslocamento é do polo negativo para o positivo, o potencial aumenta em $+\varepsilon_2$. Nesse caso, o deslocamento tem o sentido da corrente elétrica. Se vamos do polo positivo para o polo negativo, o potencial cai ε . Por exemplo, na malha 1, o potencial cai em $-\varepsilon_1$ quando atravessamos a fonte 1. Nesse caso, o deslocamento também tem o sentido da corrente elétrica.

A lei das malhas nesses circuitos fornecem as seguintes equações:

malha 1 (**Figura 12.10a**): $-R_1 i_1 - \varepsilon_1 - R_1 i_1 + \varepsilon_2 - R_2 i_2 = 0$

malha 2 (**Figura 12.10b**): $R_2 i_2 - \varepsilon_2 + R_1 i_3 + \varepsilon_3 + R_1 i_3 = 0$

malha 3 (**Figura 12.10c**): $-R_1 i_1 - \varepsilon_1 - R_1 i_1 + R_1 i_3 + \varepsilon_3 + R_1 i_3 = 0$

Observe que só existem duas equações independentes, uma vez que a equação da malha 3 é a soma das equações das malhas 1 e 2. Vamos utilizar as equações da malha 1 e da malha 2 para resolver o problema.

malha 1: (1) $-R_1 i_1 - \varepsilon_1 - R_1 i_1 + \varepsilon_2 - R_2 i_2 = 0$

malha 2: (2) $R_2 i_2 - \varepsilon_2 + R_1 i_3 + \varepsilon_3 + R_1 i_3 = 0$

A outra equação necessária para resolver o problema é a equação proveniente da lei dos nós, isto é, (3) $i_1 + i_3 = i_2$.

O sistema de equações que tem que ser resolvido é

(1) $-i_1 - 2 - i_1 + 4 - 2i_2 = 0 \Rightarrow i_2 = 1 - i_1$

(2) $2i_2 - 4 + i_3 + 8 + i_3 = 0 \Rightarrow i_3 = -2 - i_2$

(3) $i_1 + i_3 = i_2 \Rightarrow i_3 = i_2 - i_1 = 1 - 2i_1$

A substituição da equação (1) na equação (2) fornece: (4) $i_3 = -3 + i_1$

A introdução das equações (1) e (4) na equação (3) fornece:

$$-3 + i_1 = 1 - 2i_1 \Rightarrow i_1 = \frac{4}{3} A$$

$$i_2 = 1 - i_1 = -\frac{1}{3} A$$

$$i_3 = -3 + i_1 = -\frac{5}{3} A$$

Logo, as correntes elétricas dois e três estão invertidas. As correntes com os sentidos corretos estão representadas na **Figura 12.12**.

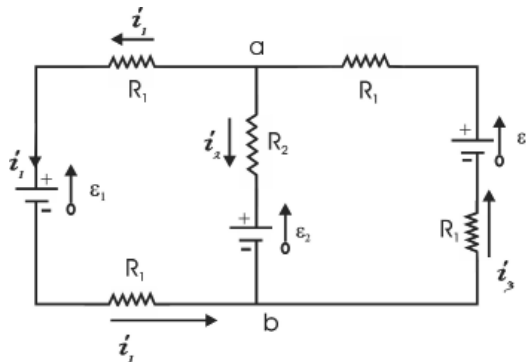


Figura 12.12: Distribuição real de correntes elétricas.

b) O cálculo da diferença de potencial pode ser realizado com as correntes com os sentidos iniciais ou com as correntes com os sentidos corrigidos. Se utilizarmos as correntes iniciais, elas têm que entrar nas fórmulas com os sinais negativos; se utilizarmos as correntes corretas, elas entram nas fórmulas com os sinais positivos. Vamos utilizar as correntes com os sentidos corretos.

$$V_b + \varepsilon_2 - R_2 i_2 = V_a \Rightarrow V_a - V_b = \varepsilon_2 - R_2 i_2 = 8 - 2 \cdot \frac{1}{3} = \frac{22}{3} V \cong 7,3 V$$

c) A resposta desse item pode basear-se na análise qualitativa do ganho de energia das cargas elétricas da corrente elétrica convencional ou o cálculo direto da potência fornecida pelas fontes. Na análise qualitativa, é obrigatório o uso das correntes reais. Na resposta que utiliza o cálculo das potências, podem ser utilizadas as correntes propostas e/ou as correntes elétricas reais. Como vou fazer a análise qualitativa, vou utilizar as correntes reais.

A energia potencial de uma carga elétrica é dada por: $U = qV$.

Quando a carga elétrica é positiva, a energia potencial da carga é maior nas regiões onde o potencial elétrico é maior. Como a corrente elétrica convencional é formada por cargas elétricas positivas, podemos dizer que:

(1) nas fontes 1 e 2, as energias potenciais das cargas elétricas da corrente elétrica convencional diminuem quando elas atravessam as fontes. Logo, as cargas elétricas estão fornecendo energia para as fontes 1 e 2. Assim, as fontes estão sendo carregadas.

(2) na fonte 3, as energias potenciais das cargas elétricas da corrente elétrica aumentam quando elas atravessam a fonte. Logo, a fonte 3 está fornecendo energia para a corrente elétrica. Assim, somente a fonte 3 está funcionando como fonte.

d) Os módulos das potências dissipadas nos resistores são:

$$|P_1| = R_1 i_1^2 = \left(\frac{4}{3}\right)^2 W = \frac{16}{9} W \cong 1,8W$$

$$|P_2| = R_2 i_2^2 = \left(\frac{1}{3}\right)^2 W = \frac{2}{9} W \cong 0,2W$$

$$|P_3| = R_1 i_3^2 = \left(\frac{5}{3}\right)^2 W = \frac{25}{9} W \cong 2,8W.$$

Como a energia dissipada em um resistor é $|P\Delta t|$, sendo Δt o intervalo de tempo considerado, os resistores que dissipam maior energia são aqueles que dissipam maior potência. Logo, os resistores que dissipam maior energia são os resistores percorridos pela corrente elétrica i_3 .

Conclusão

Nesta aula, foram apresentadas as leis que permitem calcular as correntes elétricas e a distribuição de energia em um circuito elétrico de corrente contínua. Com esse conhecimento, você está apto a entender o gasto de energia na sua residência. Dessa forma, você será capaz de economizar energia elétrica, ajudando a preservar o planeta Terra.

Resumo

1. A potência elétrica que um elemento do circuito elétrico fornece à corrente elétrica é $P = i(V_f - V_i)$, sendo V_i o potencial elétrico do ponto de onde a corrente elétrica é proveniente e V_f o potencial elétrico do ponto para onde a corrente elétrica fluiu.
2. Lei das malhas: a soma algébrica das diferenças de potencial de uma malha é nula.

$$\sum_i \Delta V_i = 0$$

3. Lei dos nós: a soma dos módulos das correntes elétricas que chegam a um nó é igual à soma dos módulos das correntes elétricas que saem de um nó. Se existem N_e correntes chegando em um nó e N_s correntes saindo do mesmo nó, ela pode ser escrita da seguinte forma:

$$\sum_{k=1}^{N_e} |i_k| = \sum_{k=1}^{N_s} |i_k|.$$

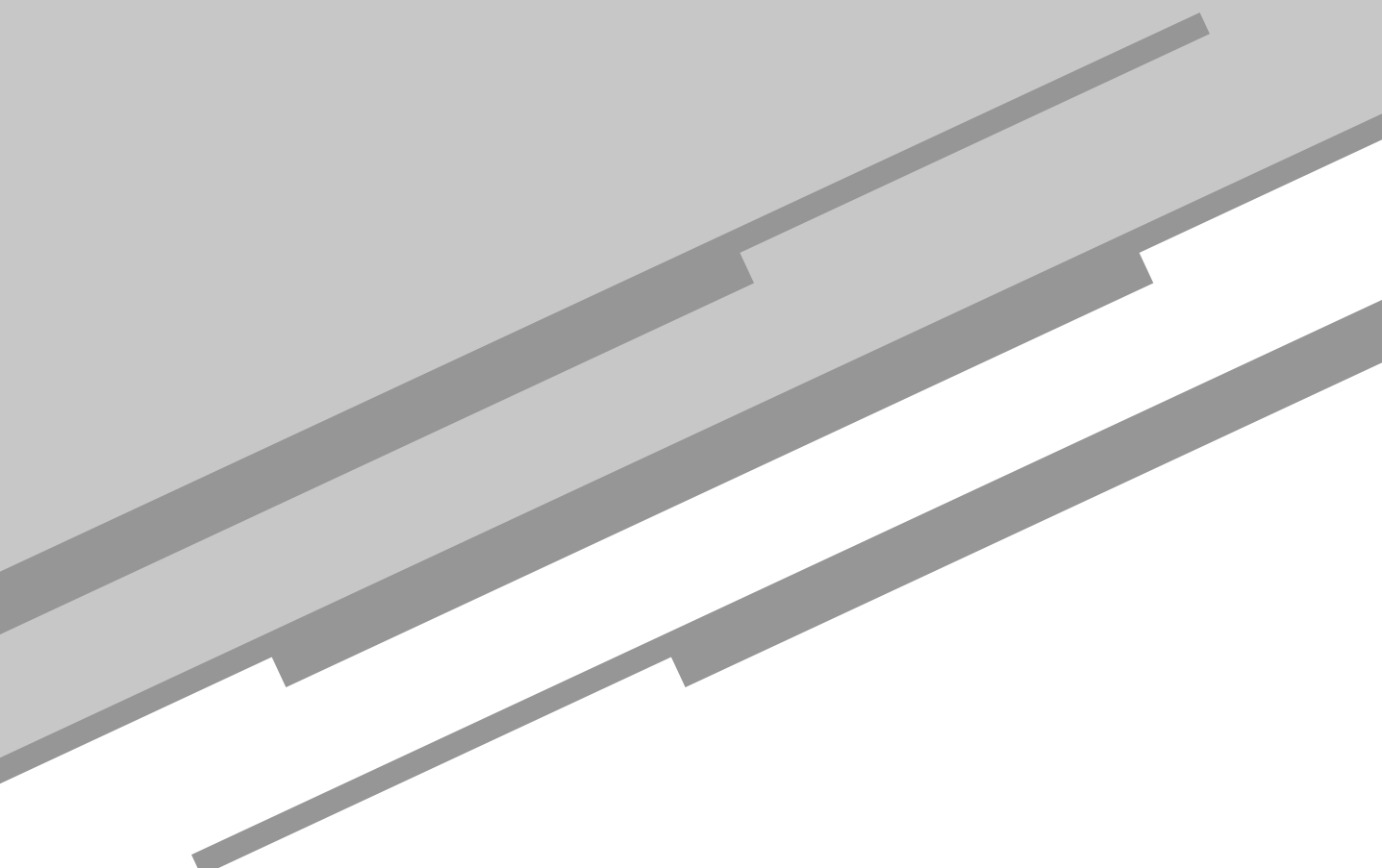
Leituras recomendadas

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 “Eletricidade e magnetismos” do livro *Física* - volume único de A. Máximo e B. Alvarenga.

Leia sobre os assuntos “A intensidade de corrente elétrica”, “A potência elétrica”, “As diferentes potências obtidas no mesmo tipo de aparelho: a resistência elétrica” na Parte 1 do livro *Física 3 - Eletromagnetismo*, do Grupo de Reelaboração do Ensino de Física (Gref).

Aula 13

Prática 3 – Distribuição de energia em circuitos elétricos



Meta

Ensinar um método experimental que permite obter a potência consumida em um elemento de um circuito elétrico.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta prática, você seja capaz de:

1. utilizar o multímetro para medir resistências;
2. compreender a distribuição de energia em resistores ligados em série;
3. compreender a distribuição de energia em resistores ligados em paralelo;
4. construir tabelas com as medidas indiretas com as suas incertezas;
5. calcular potências em elementos de um circuito elétrico, utilizando as medidas de voltagens e correntes no elemento;
6. comparar potências entre lâmpadas através de suas luminosidades.

Introdução

As correntes elétricas distribuem a energia elétrica aos elementos de um circuito que está ligado a uma fonte de energia elétrica. Nesta prática, faremos medidas de resistências, voltagens e correntes elétricas que permitirão calcular as potências de resistores ligados em série e em paralelo. Serão realizados os seguintes experimentos:

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).

Esses experimentos serão realizados utilizando-se o quadro de luz I (corrente contínua - **Figura 13.1**) e o quadro de luz II (corrente alternada - **Figura 13.2**).

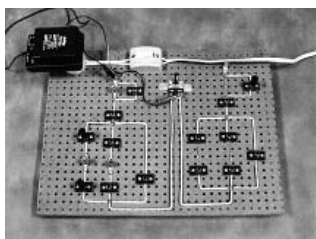


Figura 13.1: Quadro de luz I.

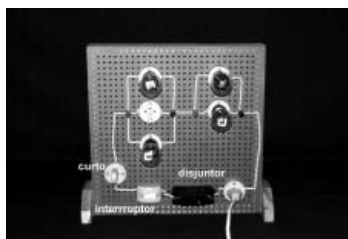


Figura 13.2: Quadro de luz II.

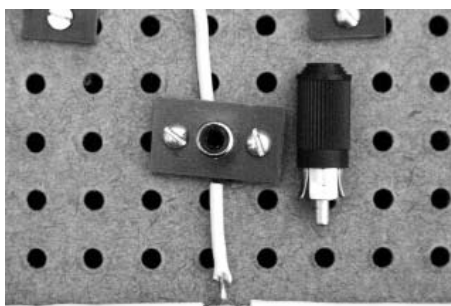


Figura 13.3: Foto do curto RCA.

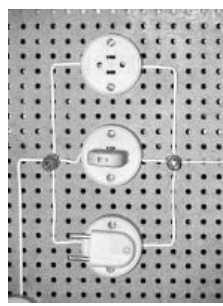


Figura 13.4: Foto do curto tomada.

A ligação elétrica entre dois pontos abertos no quadro de luz I será feita com terminais RCA em curto (**Figura 13.3**) e, no quadro de luz II, com tomadas em curto (**Figura 13.4**).

Material necessário à Prática 3:

- substituidor de pilhas (um);
- quadro de luz I (corrente contínua) (um);
- quadro de luz II (corrente alternada) (um);
- multímetro (dois);
- curtos com terminais RCA (quatro);
- curtos com tomadas (quatro);
- lâmpadas de 15W/220V(duas), de 15W/110V(uma), de 60W/110V (uma), de 7W/110V (uma) e de 3,9V, 0,3A (duas).



Veja o vídeo denominado *Quadro de luz de corrente alternada*, que está disponível na Sala da Disciplina ICF2 e no Portal TECA. Ele mostra a distribuição de energia utilizando-se lâmpadas ligadas em série e em paralelo com a rede elétrica. No Portal TECA, escolha o vídeo, digite “ICF2” e escolha pesquisa TECA.

Atividade 1

Atende ao Objetivo 5

Aprenda como medir voltagens com o multímetro, lendo o Complemento 2. A seguir, marque as respostas corretas:

- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você pode ligar o multímetro da escala de 200V $\overline{\overline{\overline{\cdot}}}$.
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você pode ligar o multímetro da escala de 2V $\overline{\overline{\overline{\cdot}}}$.
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você pode ligar o multímetro da escala de 20V $\overline{\overline{\overline{\cdot}}}$.
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você pode ligar o multímetro da escala de 200V \sim .
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você pode ligar o multímetro da escala de 2V \sim .
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você pode ligar o multímetro da escala de 20V \sim .
- () O multímetro deve ser ligado em série com o elemento cuja voltagem queremos medir.
- () O multímetro deve ser ligado em paralelo com o elemento cuja voltagem queremos medir.

As fotos dos multímetros apresentados nos experimentos são do multímetro digital ET-2041 da Minipa. Cuidado! Você não deve se basear nelas se os multímetros do seu polo forem diferentes.

Respostas Comentadas

- (X) Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você pode ligar o multímetro da escala de 200V $\overline{\overline{\overline{\cdot}}}$.
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você pode ligar o multímetro da escala de 2V $\overline{\overline{\overline{\cdot}}}$.
- (X) Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você pode ligar o multímetro da escala de 20V $\overline{\overline{\overline{\cdot}}}$.
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você pode ligar o multímetro da escala de 200V \sim .

() Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você pode ligar o multímetro da escala de 2V ~ .

() Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V, você pode ligar o multímetro da escala de 20V ~ .

() O multímetro deve ser ligado em série com o elemento cuja voltagem queremos medir.

(X) O multímetro deve ser ligado em paralelo com o elemento cuja voltagem queremos medir.

Como o símbolo de voltagem contínua é --- e o de voltagem alternada é \sim , todas as respostas que contêm o símbolo de corrente alternada estão erradas.

Se ligarmos o multímetro em uma voltagem menor do que a voltagem máxima da fonte, o fusível será queimado. Logo, a resposta que indica a escala de 2V --- também está errada.

O multímetro pode ser ligado sem queimar nas escalas de 200V e 20V contínuas. Se você ler o manual do multímetro, vai verificar que a escala de 20V contínua fornece uma medida com maior precisão do que a escala de 200V contínua. Logo, se a fonte for estável, você deve usar a escala de 20V contínua. Se a instabilidade da fonte for alta, utilize a escala de 200V contínua.

O multímetro deve ser ligado em paralelo com o elemento cuja voltagem queremos medir, pois, se ele for ligado em série, vai alterar muito a voltagem nos terminais do elemento do circuito e a medição ficará diferente.



Atividade 2

Atende ao Objetivo 5

Aprenda como medir correntes com o multímetro, lendo o Complemento 2. A seguir, marque as respostas corretas:

- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V e você não tem como estimar a corrente elétrica no resistor, deve-se ligar o multímetro na escala de 20A $\overline{\cdot\cdot\cdot}$.
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V e você não tem como estimar a corrente elétrica no resistor, deve-se ligar o multímetro da escala de 200mA $\overline{\cdot\cdot\cdot}$.
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V e você já sabe que a sua corrente elétrica é menor do que 20mA e maior do que 2mA, deve-se ligar o multímetro da escala de 20mA $\overline{\cdot\cdot\cdot}$.
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V e você já sabe que a sua corrente elétrica é menor do que 20mA e maior do que 2mA, deve-se ligar o multímetro da escala de 2mA $\overline{\cdot\cdot\cdot}$.
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V e você já sabe que a sua corrente elétrica é menor do que 20mA e maior do que 2mA, deve-se ligar o multímetro da escala de 200mA $\overline{\cdot\cdot\cdot}$.
- () Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V e você não tem como estimar a corrente elétrica no resistor, deve-se ligar o multímetro na escala de 20A \sim .
- () O multímetro deve ser ligado em série com o elemento cuja voltagem queremos medir.
- () O multímetro deve ser ligado em paralelo com o elemento cuja voltagem queremos medir.

As fotos dos multímetros apresentados nos experimentos são do multímetro digital ET-2041 da Minipa. Cuidado! Você não deve se basear nelas se os multímetros do seu polo forem diferentes.

Respostas Comentadas

- (X) Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V e você não tem como estimar a corrente elétrica no resistor, deve-se ligar o multímetro na escala de 20 A $\overline{\cdot\cdot\cdot}$.

() Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V e você não tem como estimar a corrente elétrica no resistor, deve-se ligar o multímetro na escala de 20 A ~ .

() Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V e você não tem como estimar a corrente elétrica no resistor, deve-se ligar o multímetro da escala de 200mA $\overline{\sim}$.

(X) Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V e você já sabe que a sua corrente elétrica é menor do que 20mA e maior do que 2mA, deve-se ligar o multímetro da escala de 20mA $\overline{\sim}$.

() Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V e você já sabe que a sua corrente elétrica é menor do que 20mA e maior do que 2mA, deve-se ligar o multímetro da escala de 2mA $\overline{\sim}$.

() Quando a fonte fornece uma voltagem contínua máxima de 12V e você já sabe que a sua corrente elétrica é menor do que 20mA e maior do que 2mA, deve-se ligar o multímetro da escala de 200mA $\overline{\sim}$.

(X) O multímetro deve ser ligado em série com o elemento cuja voltagem queremos medir.

() O multímetro deve ser ligado em paralelo com o elemento cuja voltagem queremos medir.

Como o símbolo de corrente contínua é $\overline{\sim}$ e o de corrente alternada é ~ , a resposta que contém o símbolo de corrente alternada está errada.

Se ligarmos o multímetro em uma escala com corrente máxima menor do que algum dos valores da corrente elétrica, ele queimará. Logo, se não podemos estimar a corrente elétrica que atravessa o elemento do circuito elétrico, devemos utilizar a escala com o maior valor da corrente. No caso da corrente contínua e do multímetro descrito no Complemento 3, devemos ligá-lo na escala de 20A. Se você já sabe que a corrente elétrica no resistor é menor do que 20mA e maior do que 2mA, deve ligar o multímetro na escala de 20mA $\overline{\sim}$, uma vez que, se o ligarmos na escala de 2mA $\overline{\sim}$, ele queimará e, se o ligarmos na escala de 200mA $\overline{\sim}$, as medidas realizadas terão precisão menor do que aquelas realizadas na escala de 20mA contínua.

O multímetro mede a corrente elétrica que o atravessa. Logo, ele deve ser ligado em série com o elemento cuja corrente desejamos medir, uma vez que, se ele for ligado em paralelo, a corrente elétrica que o atravessa-

rá será diferente da corrente que atravessa o elemento do circuito. Além disso, *ele queimará*, porque sua resistência, quando ele está funcionando como amperímetro, é muito baixa e produz nele uma corrente alta.

Atividade 3

Atende ao Objetivo 1

Aprenda como medir resistências com o multímetro, lendo o Complemento 2. A seguir, marque as respostas corretas:

- () Para medir a resistência com o multímetro, é necessário desligar o circuito.
- () É possível medir a resistência de um multímetro com o circuito ligado.
- () O multímetro tem que ser ligado em série com o resistor para medir a sua resistência.
- () O multímetro tem que ser ligado em paralelo com o resistor para medir a sua resistência.
- () Se você não tem ideia da ordem de grandeza da resistência do multímetro, deve começar com a maior escala e ir reduzindo-a até que ele comece a marcar.
- () Se você não tem ideia da ordem de grandeza da resistência do multímetro, deve começar com a menor escala e ir aumentando-a até que ele comece a marcar.

Respostas Comentadas

- (X) Para medir a resistência com o multímetro, é necessário desligar o circuito elétrico.
- () É possível medir a resistência de um multímetro com o circuito elétrico ligado.
- () O multímetro tem que ser ligado em série com o resistor para medir a sua resistência.
- (X) O multímetro tem que ser ligado em paralelo com o resistor para medir a sua resistência.

(X) Se você não tem ideia da ordem de grandeza da resistência do multímetro, pode começar com a maior escala e ir reduzindo-a até que ele comece a marcar.

(X) Se você não tem ideia da ordem de grandeza da resistência do multímetro, deve começar com a menor escala e ir aumentando-a até que ele comece a marcar.

O multímetro tem um circuito elétrico interno que mede resistências. Se ele for ligado a um circuito alimentado por outra corrente elétrica, ele alterará a corrente no circuito que mede resistências e fornecerá um resultado errado. Por isso, o circuito elétrico tem que ser desligado para que o multímetro possa medir a resistência de um resistor.

Quando ligarmos o multímetro em um resistência maior do que o valor da escala, não haverá risco de danificá-lo. Por isso, você pode ligá-lo em qualquer escala. Se a resistência que você quer medir for maior do que o valor máximo da escala, aparecerá o valor 1. Nesse caso, você escolhe uma escala menor, até que o multímetro mostre o valor da resistência do resistor.

O multímetro deve ser ligado em paralelo com o resistor para que se consiga medir a sua resistência.

=====

===== **Experimento 7** =====

Atende ao Objetivo 1

Medindo resistências

Objetivo:

Desenvolver 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: $P = \Delta V i = \frac{\Delta V^2}{R} = R i^2$,

em que ΔV é a 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 há 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 é nula, dizemos que eles estão em curto.

Materiais necessários:

- multímetro (um);
- quadro de luz (um);
- substituidor de pilhas (um);
- lâmpadas de 60W/110V, 7W/110V;
- curtos do tipo RCA.

Atividade experimental:

1. Observe as lâmpadas de 60W/110V e 7W/110V e marque as respostas verdadeiras:

() O filamento da lâmpada de 60W/110V é feito 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 feito de um fio mais grosso e menor do 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.

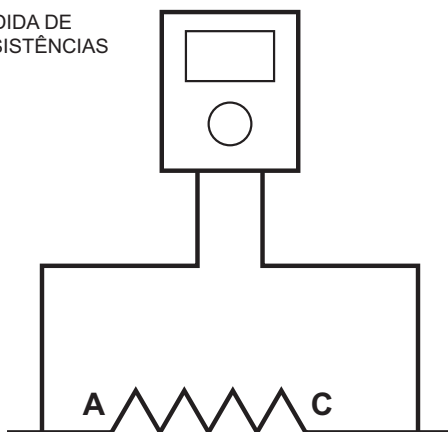


Figura 13.5a: Ligação do multímetro em paralelo com o resistor.

Figura 13.5b: Escala para medir resistências.

CUIDADO! Verifique se o resistor cuja resistência será medida está sem corrente elétrica.



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

2. 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 13.5a**.
3. Meça com o multímetro as resistências das lâmpadas de 60W/110V e 7W/110V e coloque o resultado da medida na **Tabela 1**.

3. 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 lâmpada	Resistência da lâmpada desligada	Resistência calculada a partir das informações do fabricante da lâmpada
60W/110V		
7W/110V		

4. Calcule as resistências das lâmpadas com as informações sobre potência e voltagem fornecidas pelo fabricante ($R = \frac{\Delta V}{P}$) e coloque os resultados na **Tabela 1**. Discuta com o tutor a discordância entre os valores medidos e os valores fornecidos pelo fabricante.

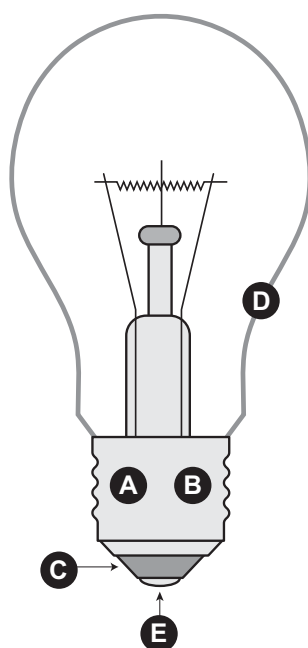


Figura 13.6: Lâmpada de tungstênio.

5. 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 13.6** e complete a **Tabela 2**.

Tabela 2

Par de pontos	Resistência	Incerteza na resistência
AB		
AC		
AD		
AE		
BC		
BD		
BE		
CD		
CE		
DE		

a) Interprete os resultados da **Tabela 2** e liste os pontos que estão em contato elétrico.

b) 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*.

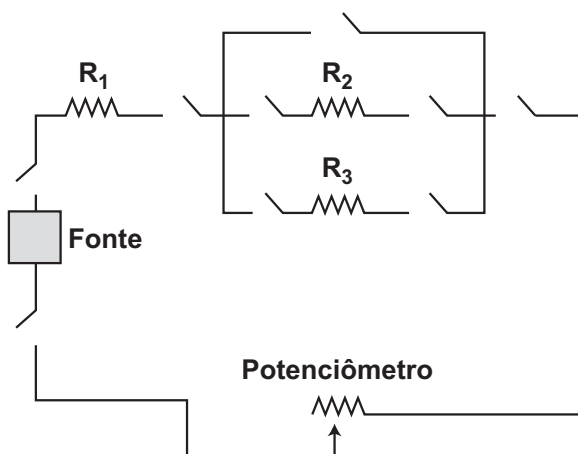


Figura 13.7: Circuito aberto utilizado para medir todas as suas resistências.

6. a) Retire todos os curtos do quadro de luz abaixo. Meça todas as resistências e coloque-as na **Tabela 3**.



Tabela 3

	Resistência ($k\Omega$)	Incerteza na resistência
R_1		
R_2		
R_3		
AC		
DC		

b) 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 $2k\Omega$.

c) Desligue as resistências R_1 e R_2 . Com os curtos, ligue as resistências R_2 e R_3 em paralelo e meça a resistência dessa associação (resistência do trecho DC).

Conclusão:

d) 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

Respostas Comentadas

Este experimento não tem respostas comentadas, porque elas dependem das medidas obtidas por você. No entanto, não deixe de discutir com seu o tutor as discrepâncias entre as suas medidas e a previsão teórica.

Experimento 8

Atende aos Objetivos 4, 5 e 6

A luminosidade de uma lâmpada e a corrente elétrica:

Objetivo:

Investigar a variação da luminosidade de uma lâmpada com a potência elétrica dissipada.

Materiais necessários:

- multímetro (dois);
- quadro de luz I;
- substituidor de pilhas;
- curtos RCA (quatro);
- lâmpada de 3,9V, 0,3A.

Atividade experimental:

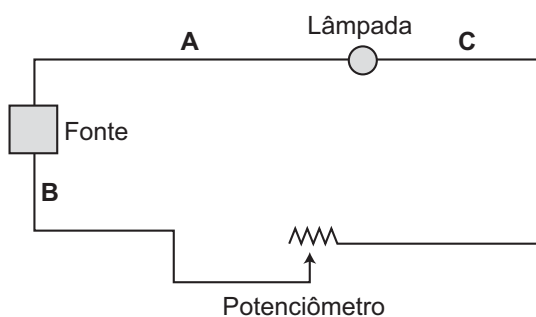


Figura 13.8: Circuito com a lâmpada.

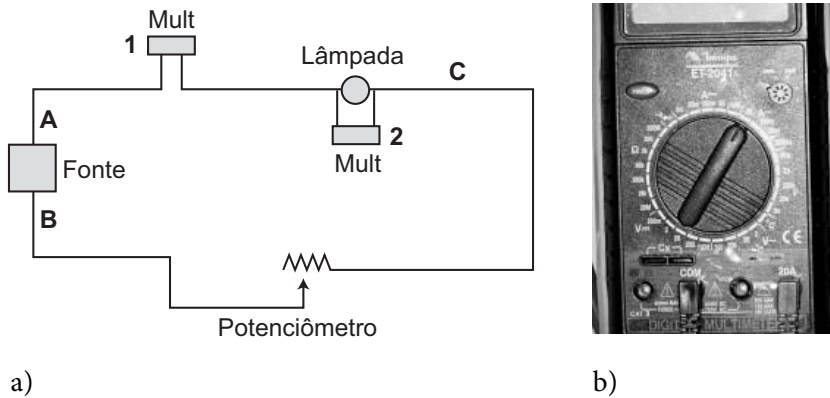


Figura 13.9: a) A posição do multímetro no circuito. O multímetro ligado em série com a lâmpada mede a corrente elétrica que a atravessa. b) A foto mostra a escala do multímetro que mede as correntes elétricas que atravessam a lâmpada.



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

1. Monte o circuito da **Figura 13.8**. Mantenha o substituidor de pilhas em 12V.
2. Coloque o multímetro 1 na escala de 20A (DC). A **Figura 13.9a** mostra como se deve introduzir o multímetro para medir a corrente elétrica que atravessa a lâmpada.
3. Coloque o multímetro 2 na escala DE 20V/DC e ligue-o em paralelo com a lâmpada, como mostra a **Figura 13.9a**. Varie a corrente elétrica com o botão do potenciômetro, de forma a obter luminosidades diferentes para as lâmpadas. Meça as diferenças de potencial nos terminais da lâmpada e as correntes elétricas que a atravessam e coloque os resultados na **Tabela 4**.

Tabela 4

	Luminosidade fraca	Luminosidade média	Luminosidade forte
Corrente			
Voltagem			
Potência V_i			

a) 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.

Respostas Comentadas

Este experimento não tem respostas comentadas, porque elas dependem das medidas obtidas por você. No entanto, não deixe de discutir com seu tutor a possibilidade de retirar informações qualitativas sobre a potência dissipada na lâmpada, utilizando apenas sua luminosidade.

Experimento 9

Atende aos Objetivos 3, 4, 5 e 6

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).

Materiais necessários:

- quadro de luz I (um);
- substituidor de pilhas;
- lâmpadas de lanterna de 3,9V, 0.3A (duas);
- Curtos RCA (quatro).

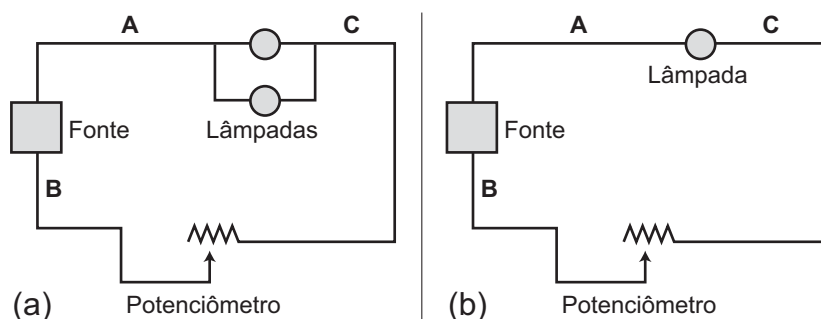
Atividade experimental:

Figura 13.10: a) Lâmpadas ligadas em paralelo. b) Circuito com uma das lâmpadas desatarraxada.

1. 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.

2. 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.

3. Introduza no circuito da **Figura 13.9a** uma nova lâmpada ligada em paralelo com a primeira (veja **Figura 13.10a**). Ajuste o potenciômetro para obter a maior luminosidade possível nas lâmpadas. Observe-as. Meça a voltagem nos terminais das lâmpadas e coloque-as na **Tabela 5**.

4. Meça a corrente elétrica que atravessa a fonte colocando o multímetro no ponto A. Anote o resultado na **Tabela 5**.

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	$\Delta V \mp \delta \Delta V$	$i \pm \delta i$
Duas lâmpadas em paralelo		
Uma lâmpada		

a) Complete as sentenças:

1. As correntes elétricas que atravessam as duas lâmpadas do circuito da **Figura 13.10a** 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 13.10a**), a corrente que atravessa a fonte é _____ do que aquela que existe quando uma das lâmpadas é desatarraxada (**Figura 13.10b**). Por isso, a dissipação de energia calorífica no interior da fonte, no caso do circuito da **Figura 13.10a** é _____ do que no caso da **Figura 13.10b**. A voltagem e a energia fornecidas a uma das lâmpadas do circuito da **Figura 13.10a** são _____ do que aquelas fornecidas à única lâmpada do circuito da **Figura 13.10b**. Por isso, as lâmpadas do circuito da **Figura 13.10a** brilham _____ do que aquela do circuito da **Figura 13.10b**.

3. Quando o circuito tem duas lâmpadas ligadas em paralelo (**Figura 13.10a**), a corrente que atravessa a fonte é _____ do que o dobro daquela que existe quando uma das lâmpadas é desatarraxada (**Figura 13.10b**). Portanto, as correntes elétricas que atravessam as lâmpadas do circuito da **Figura 13.10a** são _____ do que aquela que atravessa a lâmpada do circuito da **Figura 13.10b**. Como as correntes elétricas e as voltagens nas lâmpadas do circuito da **Figura 13.10a** são _____ do que aquelas da lâmpada do circuito da **Figura 13.10b**, as potências dissipadas e as luminosidades das lâmpadas do circuito da **Figura 13.10a** são _____ do que aquela da lâmpada do circuito da **Figura 13.10b**.

Justifique todas as suas respostas.

Respostas Comentadas

Este experimento não tem respostas comentadas, porque elas dependem das medidas obtidas por você. Discuta com o seu tutor o que ocorreria com a luminosidade das lâmpadas se a fonte fosse ideal.

**Experimento 10**

Atende aos Objetivos 2, 4, 5 e 6

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.

Materiais necessários:

- multímetro (dois);
- quadro de luz I (um);
- substituidor de pilhas;
- lâmpadas de lanterna de 3,9V, 0,3A.

Atividade experimental:

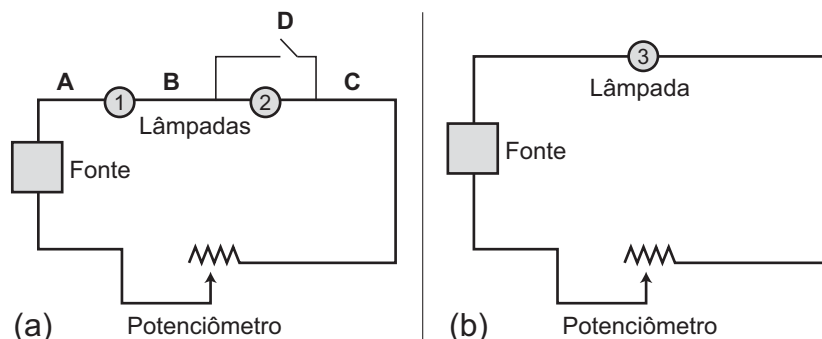


Figura 13.11: a) Circuito com duas lâmpadas ligadas em série. b) Circuito com uma das lâmpadas retiradas pelo curto introduzido no ponto D do circuito da figura (a).

1. 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.

2. 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.

3. Monte o circuito representado na **Figura 13.11a**. Coloque o botão do substituidor 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**.

4. Meça as correntes elétricas que atravessam as lâmpadas.

5. Feche o curto em D para obter o circuito da **Figura 13.11b** e meça a corrente elétrica e a diferença de potencial nos terminais da lâmpada que permaneceu acesa (lâmpada 3). Anote o resultado na **Tabela 6**.

6. Meça a corrente elétrica que atravessa a fonte.

Tabela 6

Número de lâmpadas	$\Delta V \mp \delta \Delta V$	$i \pm \delta i$
Lâmpada 1		
Lâmpada 2		
Lâmpada 3		

a) Complete as sentenças:

1. No circuito da **Figura 13.11a**, 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 13.11a**, 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.

Respostas Comentadas

Este experimento não tem respostas comentadas, porque elas dependem das medidas obtidas por você. Ele é muito útil para discutir a diferença entre dissipação de energia e dissipação de corrente elétrica.

Experimento 11

Atende aos Objetivos de 2, 4, 5 e 6

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.

$$V = V_m \cos(2\pi f t)$$

$$I = I_m \cos(2\pi f t)$$

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,

$$V_{\text{eficaz}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

$$I_{\text{eficaz}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

A potência média dissipada em um resistor percorrido por uma corrente alternada é dada por:

$$\bar{P} = \frac{V_{\text{eficaz}}^2}{R} = R I_{\text{eficaz}}^2$$

Uma fonte de corrente elétrica alternada é considerada ideal quando a voltagem eficaz fornecida pela fonte não depende da corrente elétrica efetiva que a atravessa.

Materiais necessários:

- multímetro (dois);
- quadro de luz II (um) (corrente alternada);
- lâmpadas de 60W/110V (uma), 15W/220V (duas), 7W/110V (uma);
- curtos do tipo tomada (quatro).

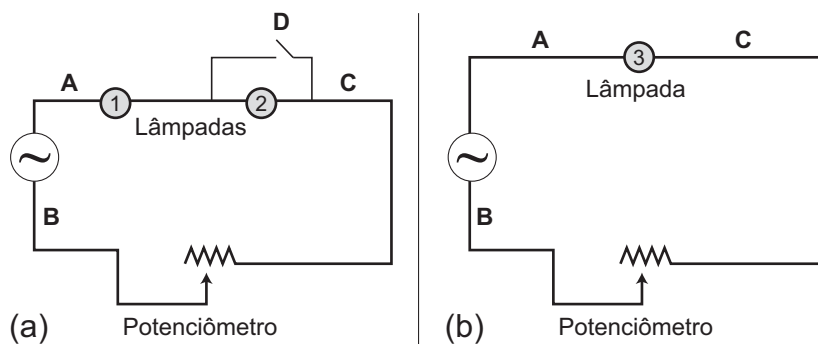
Atividade experimental:

Figura 13.12: a) Circuito com lâmpadas ligadas em série. b) Circuito (a) com uma das lâmpadas colocadas em curto no ponto D.

1. Monte o quadro de luz II de acordo com a **Figura 13.12a**. Utilize inicialmente todas as lâmpadas iguais (15W/220V). Ligue o circuito à rede elétrica.

Multímetro 1



Figura 13.13: Escala para medir voltagens alternadas.

Multímetro 2



Figura 13.14: Escala para medir correntes alternadas.



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

2. Um dos multímetros (multímetro 1 **Figura 13.13**) vai ser utilizado para medir a voltagem da fonte. Escolha uma escala de voltagem alternada $>150\text{V AC}$.

Cuidado! Você pode queimar o multímetro se ele for colocado na escala errada.

3. O segundo multímetro (**Figura 13.14**) 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(\sim).

4. Meça a diferença de potencial nos terminais da fonte e a corrente elétrica que a atravessa, e anote na **Tabela 7**.

5. Meça a diferença de potencial nos terminais das lâmpadas e anote na **Tabela 7**.

Cuidado! Você pode se queimar! Utilize um isolante térmico (por exemplo, papel-toalha) para desatarraxar uma das lâmpadas. Observe a outra lâmpada.

6. Com um curto no ponto D, retire a lâmpada 2 do circuito. Meça a diferença de potencial nos terminais da fonte e a corrente elétrica que a atravessa, e anote o resultado na **Tabela 7**.

7. Retire o curto do ponto D, substitua a lâmpada 2 por uma lâmpada de 60W/110V e a lâmpada 1 pela lâmpada de 7W/110V. Meça a diferença de potencial nos terminais das duas lâmpadas.

Tabela 7

	$\Delta V \mp \delta \Delta V$	$i \pm \delta i$	$R = V/i$
Fonte (Figura 13.12a)			
Fonte (Figura 13.12b)			
Lâmpada 1		CUIDADO! NÃO MEÇA AS CORRENTES NAS LÂMPADAS!	
Lâmpada 2			
Lâmpada 3			
Lâmpada 60W/110V			
Lâmpada 7W/110V			

a) 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 V porque as correntes nas duas lâmpadas são _____ e a resistência da lâmpada de 60W/110V é _____ do que aquela da lâmpada de 7W/110V.

Respostas Comentadas

Este experimento não tem respostas comentadas, porque elas dependem das medidas obtidas por você. Todavia, o vídeo *Quadro de luz de corrente alternada* vai ajudá-lo a responder às questões.

Experimento 12

Atende aos Objetivos 3, 4, 5 e 6

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.

Materiais necessários:

- multímetro;
- quadro de luz II (corrente elétrica alternada);
- curtos do tipo tomada (quatro);
- lâmpadas de 15W/220V (duas), de 60W/110V, de 7W/110V e de 15W/110V(uma).

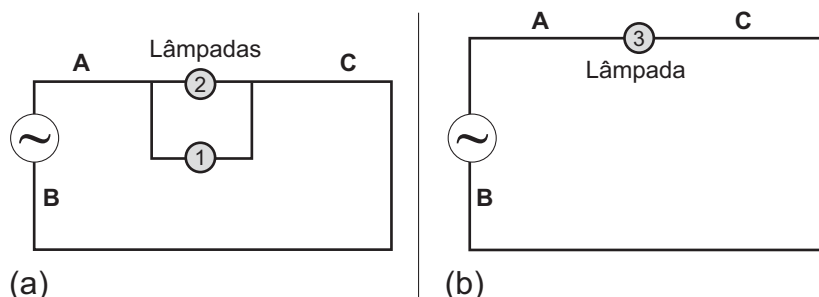
Atividade experimental:

Figura 13.15: a) Lâmpadas ligadas em paralelo. b) Circuito com uma das lâmpadas desatarraxada.

1. Monte um quadro de luz II de acordo com a **Figura 13.15a**. Utilize inicialmente lâmpadas iguais (15W/110V). Ligue o circuito à rede elétrica.

2. Coloque o multímetro na escala de >150V AC (corrente alternada).

Cuidado! Você pode queimar o multímetro se ele for colocado na escala errada.

3. Meça a diferença de potencial nos terminais de todas as lâmpadas e coloque na **Tabela 8**.

Cuidado para não se queimar! Utilize um isolante térmico (por exemplo, papel-toalha) para desatarraxar uma das lâmpadas.

4. Meça a diferença de potencial entre os terminais da lâmpada que continuou acesa e anote o resultado na **Tabela 8**.

Tabela 8

Lâmpadas 15 W/110 V	$\Delta V \mp \delta \Delta V$
Lâmpada 1 () circuito da Figura 13.15a	
Lâmpada 2 () circuito da Figura 13.15a	
Lâmpada 3 () circuito da Figura 13.15b	

a) 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 13.15a** é maior que aquela que atravessa a lâmpada 3 no circuito da **Figura 13.15b**.
- () A corrente elétrica que atravessa a lâmpada 1 do circuito da **Figura 13.15a** é menor do que aquela que atravessa a lâmpada 3 no circuito da **Figura 13.15b**.
- () Na faixa de corrente elétrica utilizada, a rede elétrica _____ uma fonte ideal.

Justifique as suas respostas.

5. Troque a lâmpada 1 por uma lâmpada de 7W/110V e a lâmpada 2 por uma de 60W/110V. Meça a diferença de potencial nos terminais das lâmpadas 1 e 2 e coloque o resultado na **Tabela 9**.

Tabela 9

Lâmpadas	$\Delta V \mp \delta \Delta V$
Primeira () 7W/110V	
Segunda () 60W/110V	

b) 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 9**.

6) Troque a lâmpada de 60W/110V por uma de 15W/110V e a lâmpada de 7W/110V por uma de 15W/220V. Meça a diferença de potencial nos terminais das lâmpadas 1 e 2 e coloque na **Tabela 10**.

Tabela 10

Lâmpadas	$\Delta V \mp \delta \Delta V$
Primeira () 15W/110V	
Segunda () 15W/220V	

c). 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. Esse 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 funciona _____.

Respostas Comentadas

Este experimento não tem respostas comentadas, porque elas dependem das medidas obtidas por você. Todavia, o vídeo *Quadro de luz de corrente alternada* vai ajudá-lo a responder às questões.

Conclusão

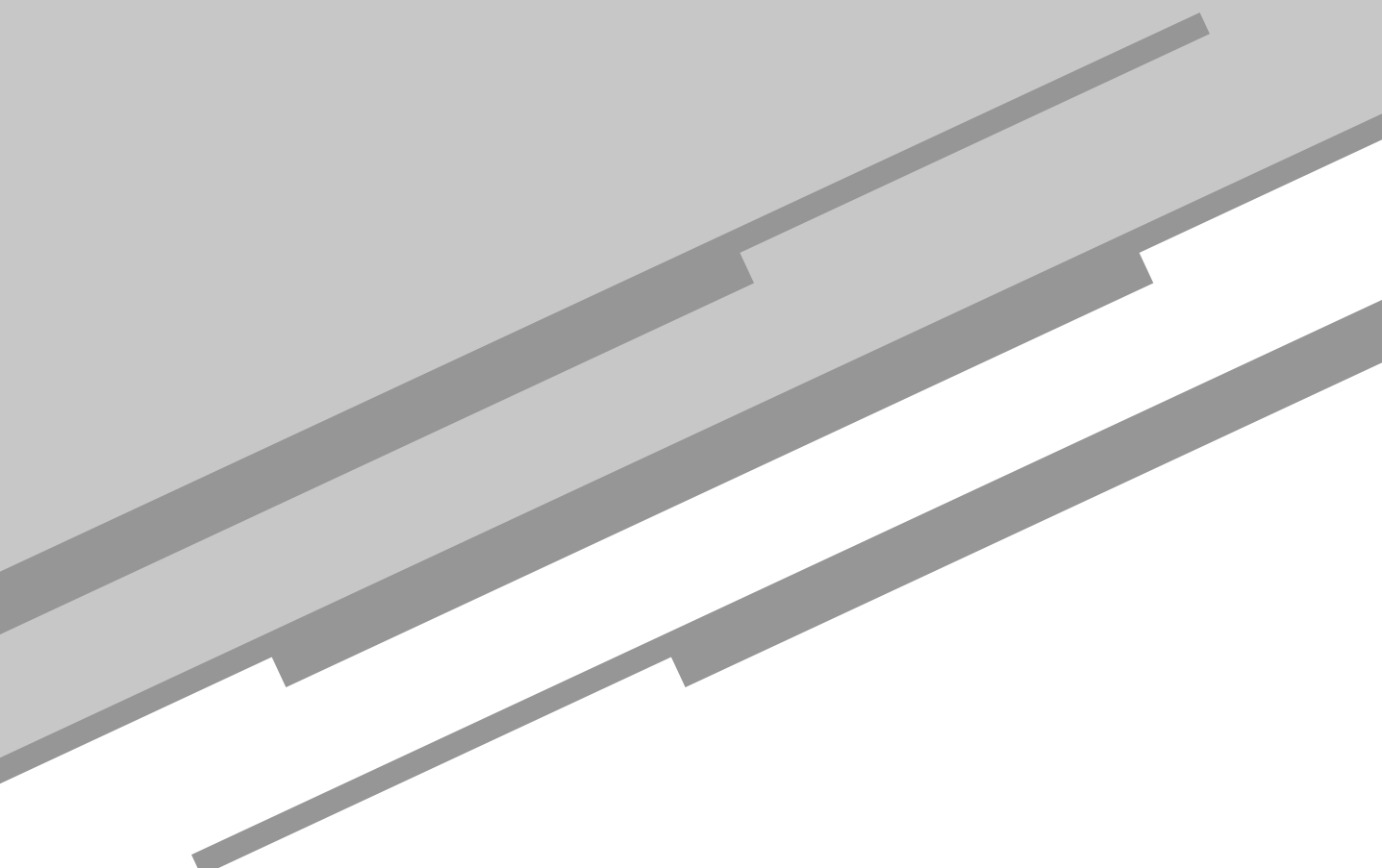
Nesta aula, você aprendeu a medir experimentalmente as resistências de associações de resistores em série e em paralelo, e a potência dissipada em um resistor. Você também comprovou experimentalmente a relação qualitativa entre a luminosidade de uma lâmpada e a potência dissipada nela. Os conceitos de fonte ideal e de fonte real devem ter ficado mais claros para você.

Resumo

1. O multímetro ligado em série com um resistor mede a sua resistência quando ele não é percorrido por uma corrente elétrica.
2. A potência dissipada em um resistor pode ser obtida experimentalmente, medindo-se a voltagem nos terminais do resistor e a corrente elétrica que o atravessa.
3. Quando a fonte é ideal, a voltagem fornecida por ela não se modifica quando o número de resistores do circuito é alterado.
4. Quando a fonte é real, a voltagem fornecida por ela se modifica quando o número de resistores do circuito é alterado.

Complemento 1

História da eletricidade



Maria Antonieta Almeida

Objetivos

Mostrar de forma sucinta a história dos modelos que foram propostos para descrever a interação entre cargas elétricas.

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.

Em 1600, **William Gibert** publicou um livro 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 Gilbert quem demonstrou que esse ponto de vista estava errado. Atritou um grande número de substâncias que passaram a atrair corpos leves. Dentre elas, 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 os puxava 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 ideias de seu tempo a respeito do caráter dos seres humanos. Naquela época, imaginava-se que os homens tinham quatro tipos de humores: catarro, sangue, raiva e melancolia. De acordo com a proporção desses humores, a pessoa era classificada como fleumática, sanguínea, 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 eletrizáveis.

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 ideia 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, von Guericke utilizou uma esfera de enxofre puro, que foi fixada em um eixo que podia girar. Ele verificou que, se esfregasse a esfera com a mão, à medida que a girava, ela 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.

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.

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. Naquela 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, bem como produzir combustão e, além disso, os melhores condutores de eletricidade eram os melhores condutores de calor. Os opositores dessa ideia 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 eles 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” (DESAGULIERS, 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 (1698-1739), que foi superintendente dos jardins do rei da França, notou que uma folha de ouro se comportava de maneira diferente quando colocada perto de vidro eletrizado. Explicou esse fato supondo que os vórtices do fluido elétrico em torno do bastão atraíam a folha, que 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:

1. Um corpo eletrizado por contato com outro corpo eletrizado também é repelido por outros corpos eletrizados?
2. Dois corpos eletrizados diferem apenas no que diz respeito à intensidade da eletrização?

A investigação dessas ideias 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.

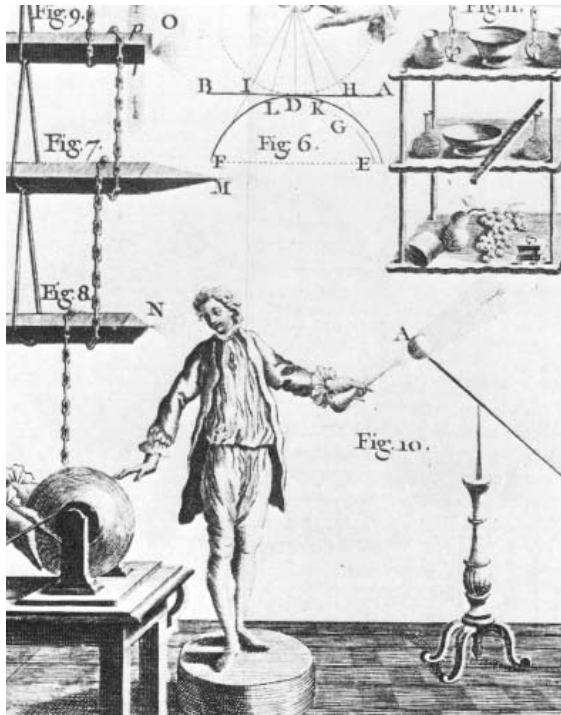


Figura 1.1: Máquina eletrostática construída com uma esfera de vidro.

Em 1759, Robert Symmer, baseado nas ideias 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 Musschenbrock (1692-1761), professor em Leyden, tentou descobrir um dispositivo que permitisse guardar eletricidade, e criou a *garrafa de Leyden*, que permitiu esse armazenamento.

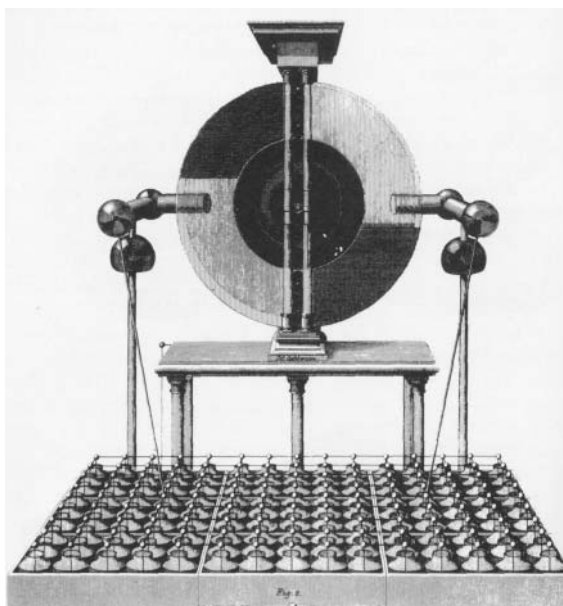


Figura 1.2: Bateria de garrafas de Leyden.

Tentou conservar a carga elétrica de uma porção de água envolvendo-a com um isolante como o 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.

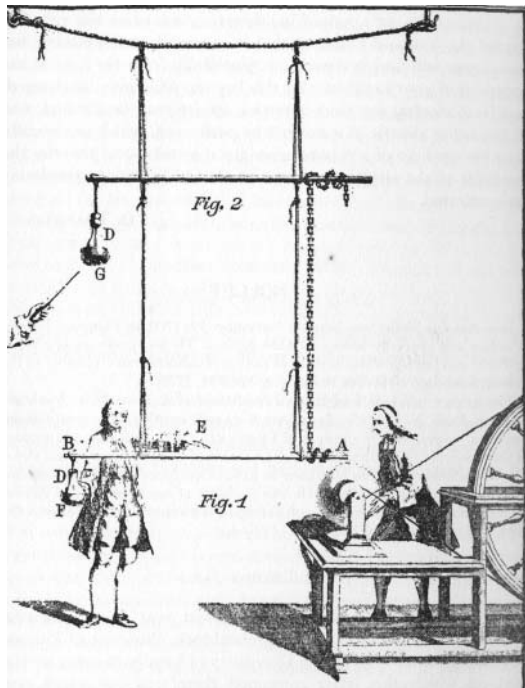


Figura 1.3: Experiência de Van Musschenbrock com uma garrafa de Leyden.

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 Musschenbrock 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 (1715-1787) e Benjamin Franklin (1706-1790). De acordo com essa teoria, a matéria tem um único fluido em uma proporção que não lhe atribui propriedades elétricas. O 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 baseou-se 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 vai de A para B. Quando A aponta para C, o fluido elétrico sai de C e passa para A, que está 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.

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.



Figura 1.4: 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.

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:

3. o fluido elétrico tem natureza vítrea. Portanto, um corpo com eletricidade vítrea tem excesso de fluido elétrico;
4. 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 ideias para descrever o fluido elétrico: é composto por partículas muito sutis, uma vez que elas são 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.

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. Ambas as teorias supunham que alguma coisa intrínseca ao sistema elétrico atuava no ponto onde a ação elétrica se realizava. Nas teorias antigas, era o fluido elétrico que efetuava a ação elétrica, enquanto nas teorias modernas isso se dá pelo “estresse do espaço”. No intervalo entre a queda da primeira escola e a aceitação da segunda, prevaleceu a teoria de ação a distância.



Figura 1.5: Faraday não acreditava na teoria de ação à 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 carregá-la, 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 seja 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 daquele sobre estes. Ele foi forçado a supor que a superfície do vidro próximo ao corpo excitado era diretamente afetada e capaz de exercer uma influência através do vidro sobre a superfície oposta; a última superfície recebia então uma espécie de excitação secundária ou derivada, que era responsável pelo efeito elétrico depois dela.

Essa ideia 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. Essa teoria foi reforçada por outros experimentos. Ele escreveu: “Uma corrente em uma fonte, densa e contínua, quando carregada, separa e forma um *pinel* com todas as gotas tentando se afastar umas das outras”. Com a finalidade de explicar a atração entre corpos com cargas opostas, em que em um 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 é 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 ideia de que, para um corpo exercer força sobre o outro, tinha de haver contato. Essa ideia reaparece sob 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.

A relação da força elétrica com o inverso do quadrado da distância é proposta por Joseph Priestley (1733-1804), após este ter tomado conhecimento, por meio de 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 às suas bordas) e nenhuma força em objetos colocados no seu interior. Deduz que a força gravitacional teórica exercida por uma camada uniforme de massa em corpos colocados no seu interior é 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 hipótese.

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 ele.

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 varia 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.



Figura 1.6: A. Coulomb.

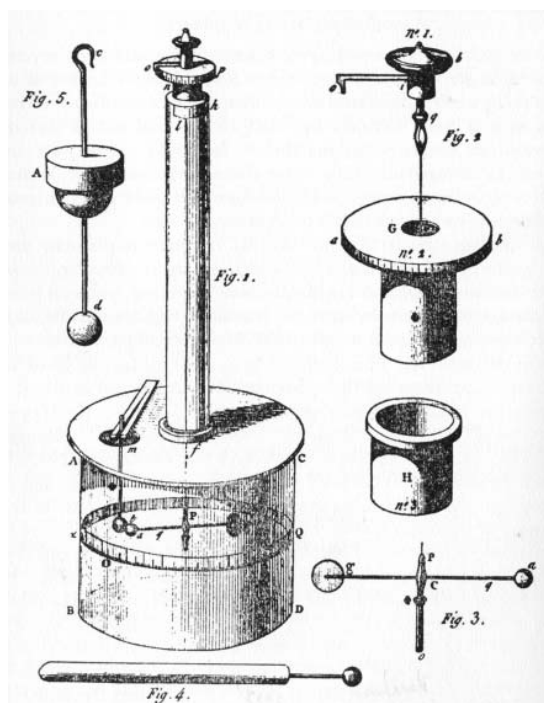


Figura 1.7: Balança de Coulomb.

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.

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 ideia que fora discutida frequentemente durante todo o século XVIII – a de que os nervos dos músculos animais continham um fluido sutil semelhante, mas não igual ao fluido elétrico.

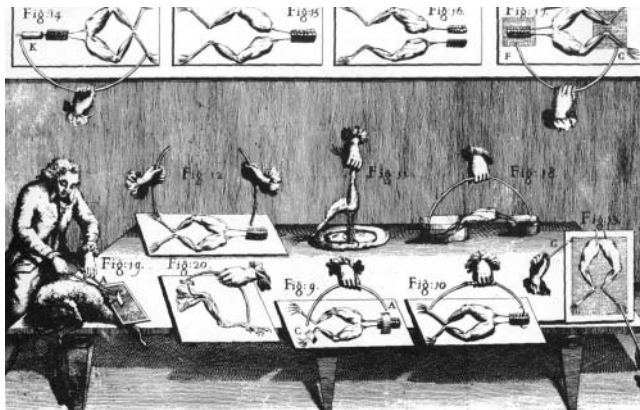


Figura 1.8: Luigi Galvani descobre a eletricidade nas rãs.

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.



Figura 1.9: Alessandro Volta

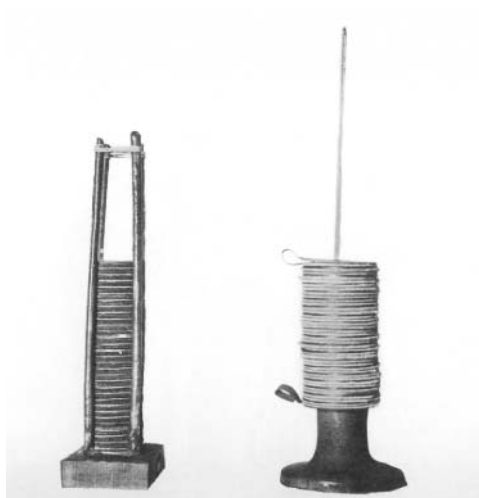


Figura 1.10: Pilha criada por Volta.

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. Essa lei ganhou seu nome.

Complemento 2

Medindo grandezas elétricas com o
multímetro Minipa ET-2041

Maria Antonieta Almeida

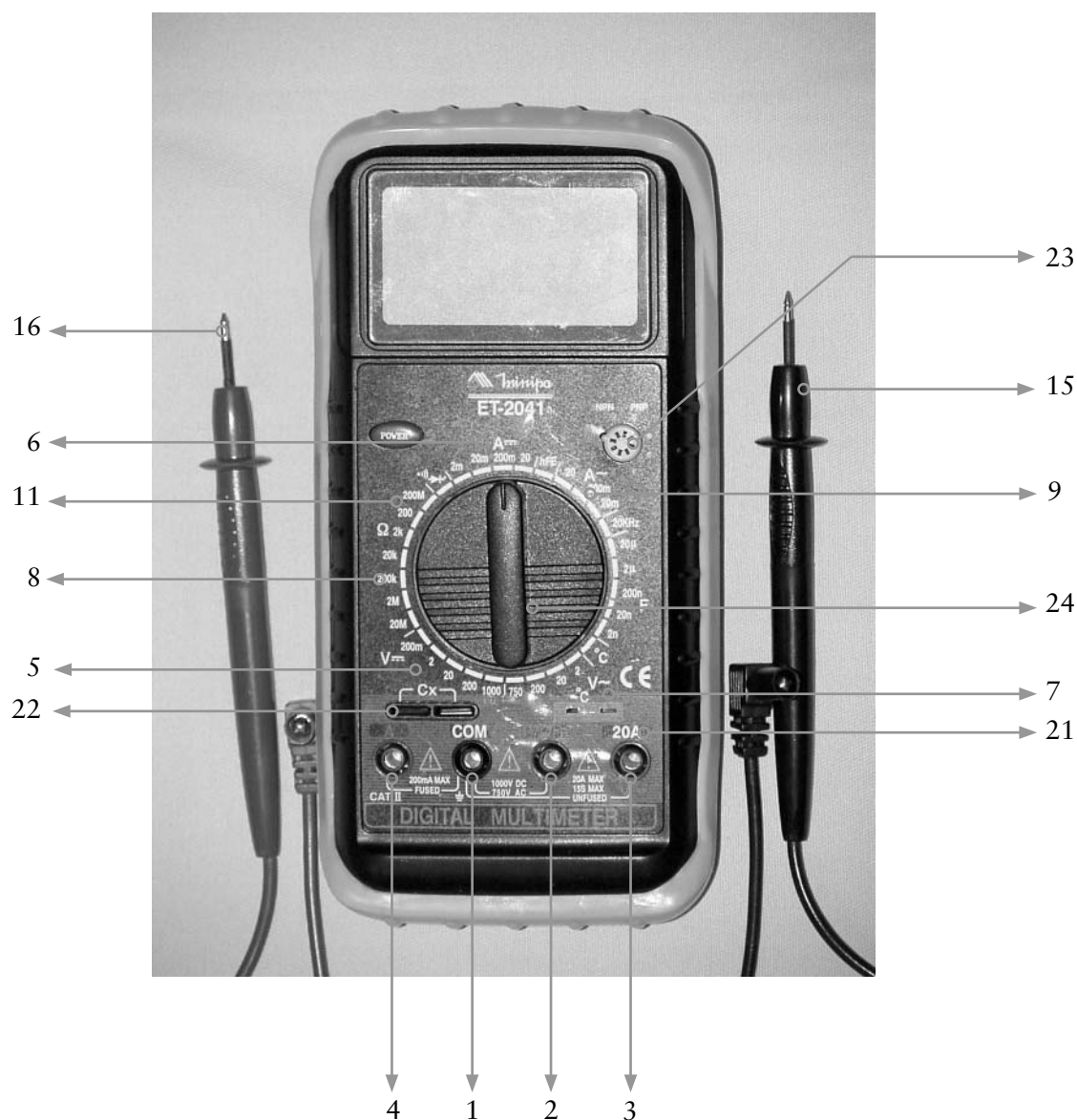


Figura 2.1

O multímetro contém vários elementos no seu painel, que foram listados a seguir. Para não sobrecarregar a foto, foram indicados, nela, apenas alguns desses elementos.

1. Conector aterrado;
2. conector 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 $V \overline{\cdot}$;
6. escala para medir correntes contínuas $A \overline{\cdot}$;
7. escala para medir voltagens alternadas $V \sim$;
8. escala para medir resistências Ω ;
9. escala para medir correntes alternadas $A \sim$;
10. escala para medida de capacitâncias;
11. posição para medida de continuidade e teste de diodo;
12. posição para medida de temperaturas;
13. posição para teste de h_{Fe} em transistores;
14. posição para medida 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 medida de temperaturas;
22. soquete para medida de capacitâncias;
23. soquete para testes de h_{Fe} em transistores NPN e PNP;
24. seletor de escalas.

O multímetro é um instrumento utilizado para medidas elétricas (correntes, voltagens, resistências etc.). A impedância desse multímetro é de 10 M Ω 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 ($I=I_0$ e $V=V_0$).

A voltagem e a corrente elétrica em um circuito percorrido por uma corrente elétrica alternada varia com a frequência da fonte ($I=I_0 \cos(\omega t + \delta)$, $V=V_0 \cos(\omega t + \delta)$).

O multímetro mede as voltagens e as correntes elétricas efetivas

$$\left(V = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \text{ e } I = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \right)$$

Medida de voltagens

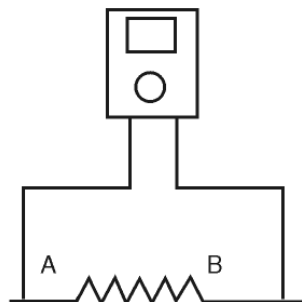


Figura 2.2

A escala que mede voltagens em circuitos percorridos por correntes elétricas contínuas tem o símbolo $V \cdots$ 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. Já nos circuitos com correntes elétricas alternadas, o multímetro mede a corrente elétrica efetiva.

As escalas permitem medir faixas de voltagens diferentes. Por exemplo, a escala 20V serve para medir voltagens menores ou iguais a 20V.

Cuidado! Se a voltagem a ser medida for maior que o máximo da escala escolhida, o multímetro queimará. A voltagem contínua máxima a ser medida é de 1000V e a alternada, de 750V.

A escolha da escala deve ser feita de forma que se leve em consideração a precisão da medida que se deseja (ler manual do multímetro para obter

informações mais detalhadas). Por exemplo, suponha que a 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.

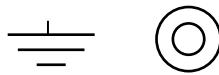


Figura 2.3

O *plug* de uma das pontas do multímetro vai ser ligado ao seu conector com o símbolo representado acima. O 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.

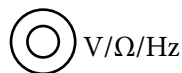


Figura 2.4

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).

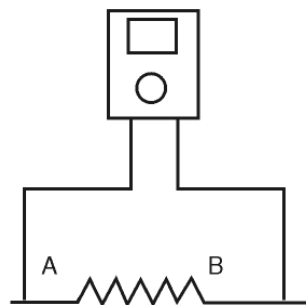


Figura 2.5

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 na extremidade B.

O multímetro é ligado em paralelo com o elemento do circuito em que se deseja medir a diferença de potencial.

Medida de correntes elétricas

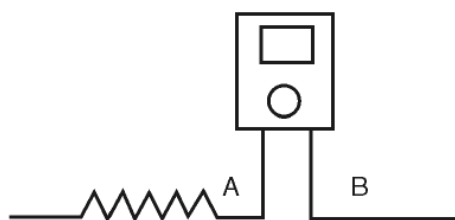


Figura 2.6

O multímetro mede correntes elétricas em circuitos percorridos por correntes contínuas e alternadas. A escala que mede a corrente contínua tem o símbolo A --- e a que mede correntes alternadas contém o símbolo A \sim .

Nos circuitos com correntes elétricas contínuas, o multímetro mede o valor instantâneo da corrente elétrica. Já nos circuitos com correntes elétricas alternadas, 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 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 queimará.

Assim como na medida de voltagens, a escolha da escala deve ser feita levando 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 esteja 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).

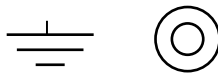




Figura 2.7

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 de que a corrente elétrica é menor do que 200A.

Cuidado! Uma corrente maior do que 2A, nesse conector, queima o fusível.

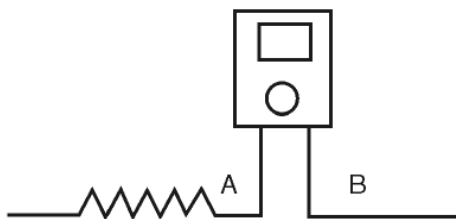


Figura 2.8

Quando se deseja medir a corrente elétrica que atravessa um ponto de um circuito elétrico, abre-se o mesmo, criando dois pontos A e B sem contato elétrico. Liga-se uma das pontas do multímetro no ponto A e a outra 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

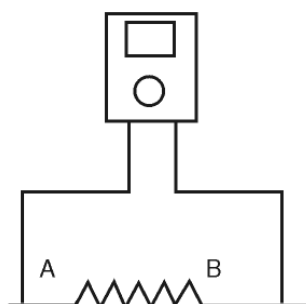


Figura 2.9

Cuidado! O multímetro só mede resistências de circuitos sem corrente elétrica. PORTANTO, ANTES DE MEDIR UMA RESISTÊNCIA, VERIFIQUE SE O CIRCUITO ESTÁ DESLIGADO.

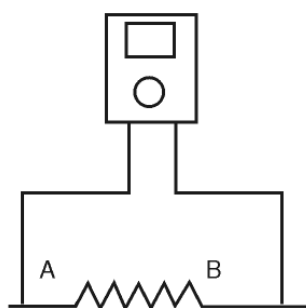



Figura 2.10

O multímetro tem que ser ligado em paralelo com a resistência que se deseja medir. A escala do multímetro que mede resistências tem o símbolo Ω . Quando se liga 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 etc. Para isso, com o seletor na posição , colocamos as pontas de prova preta no conector aterrado COM e a vermelha no conector V Ω Hz. Depois, isola-se do circuito a parte cuja continuidade se deseja verificar 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 utilizado para o teste de continuidade. Ao testarmos o diodo nos dois sentidos, a buzina soará em apenas um dos testes, indicando a posição em que o diodo deverá conduzir.

Medida de temperatura

Para medirmos a temperatura com o multímetro, basta encaixarmos o *plug* do termopar no soquete $^{\circ}\text{C}$ e colocarmos o seletor de escalas na posição $^{\circ}\text{C}$.

Medida de capacitância

Para medirmos o valor da capacitância de um capacitor, basta encaixarmos seus terminais no soquete CX e selecionarmos a escala de capacitância adequada.

Cuidado! Antes de inserir os terminais do capacitor no soquete, o mesmo deverá ser totalmente descarregado.

Medida de frequência

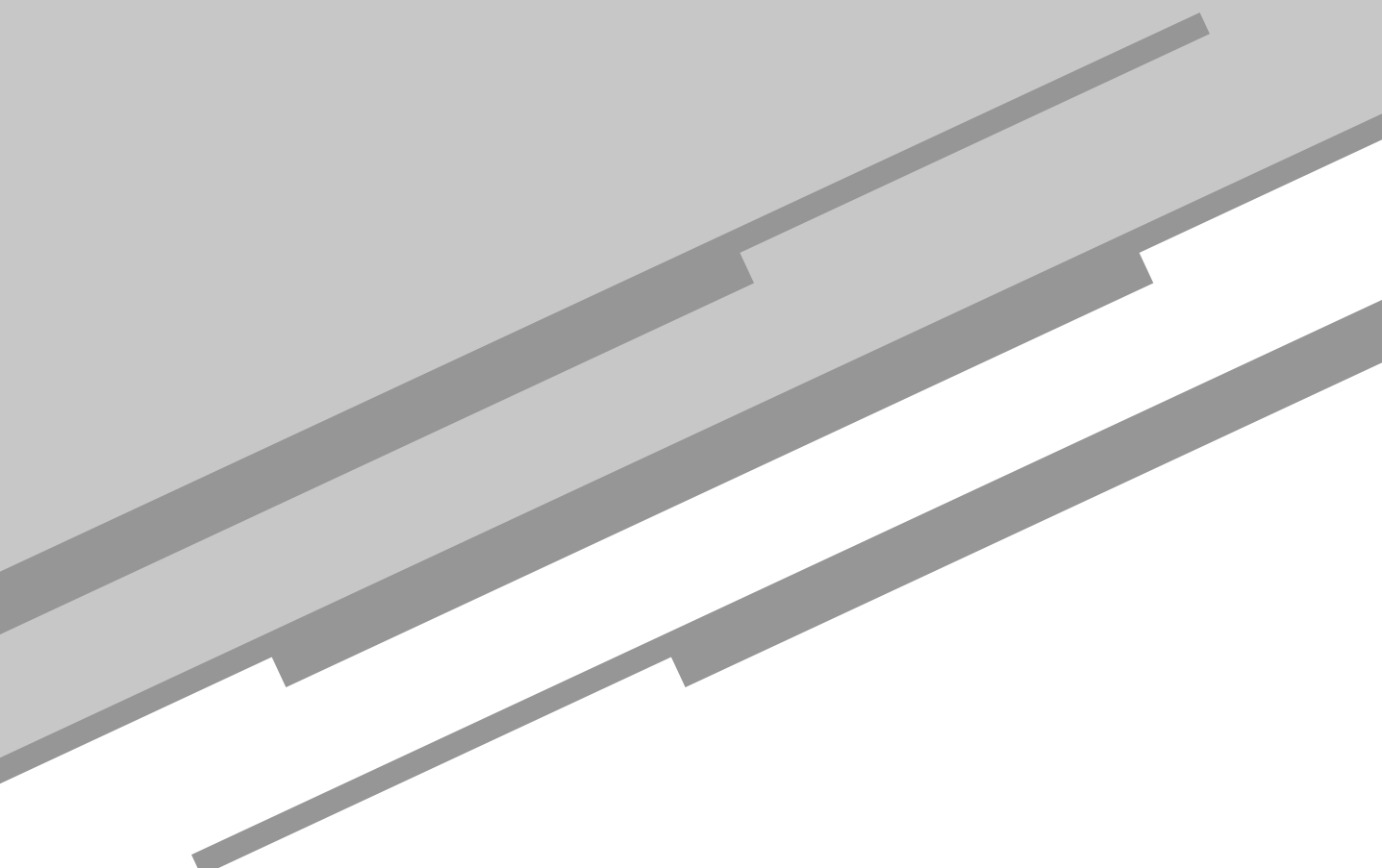
Para medirmos a frequência de uma determinada fonte, basta selecionarmos a posição 2KHz e colocarmos as pontas de prova em contato com os terminais da fonte. A ligação das pontas deverá ser feita em paralelo com a fonte e os *plugs* preto e vermelho deverão ser encaixados respectivamente nos conectores COM e V Ω 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.

Complemento 3

Trabalho, energia potencial elétrica e
potencial elétrico de forças variáveis



Maria Antonieta Almeida

Objetivos

Generalizar de forma qualitativa os conceitos de trabalho, energia potencial elétrica e potencial elétrico para forças variáveis.

Generalização do conceito de trabalho

Vimos que o *trabalho de uma força constante em uma trajetória retilínea* é dado por:

$$W_{A \rightarrow B}(\vec{F}) = F \cdot d \cdot \cos(\theta),$$

sendo d o módulo do vetor deslocamento (**Figura 3.1**), que vai de A até B, e θ o menor ângulo formado entre o vetor deslocamento e a força \vec{F} que realiza o trabalho.

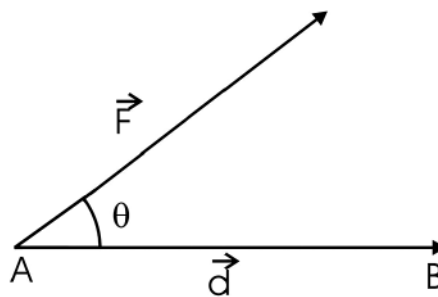


Figura 3.1: Deslocamento retilíneo de uma força constante.

A generalização do conceito de trabalho para uma força qualquer em uma trajetória que não é retilínea se faz dividindo a trajetória em pequenos deslocamentos retilíneos (**Figura 3.2**), de tal forma que a força é aproximadamente constante nesses deslocamentos. Aplica-se, portanto, a definição de trabalho de uma força constante sobre eles. O limite da soma desses trabalhos quando o número de deslocamentos vai a infinito é, por definição, o trabalho da força \vec{F} , isto é,

$$W_C(\vec{F}) = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\sum_{i=1}^N F_i \cdot \Delta s_i \cdot \cos(\theta_i) \right),$$

em que \vec{F}_i é a força sobre o deslocamento retilíneo em que $\Delta \vec{s}_i$ e θ_i o ângulo entre a força \vec{F}_i e o deslocamento $\Delta \vec{s}_i$.

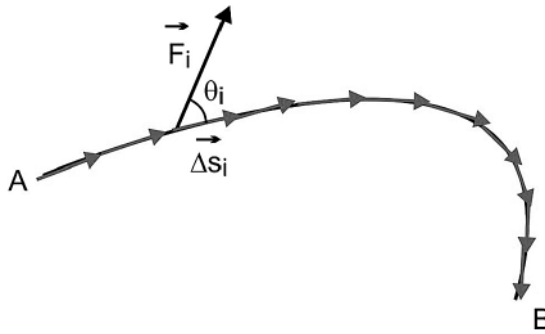


Figura 3.2: Deslocamento curvilíneo de uma força variável.

Forças conservativas e conceito de energia potencial

O trabalho de uma força depende dos pontos A e B e pode depender ou não da trajetória da partícula que une esses pontos.

As forças cujos trabalhos dependem das trajetórias das partículas são denominadas *forças não conservativas*.

As forças cujos trabalhos não dependem da trajetória das partículas são denominadas *forças conservativas*.

Só é possível definir a energia potencial quando a força é conservativa, isto é, $W_{C_1}(\vec{F}) = W_{C_2}(\vec{F})$.

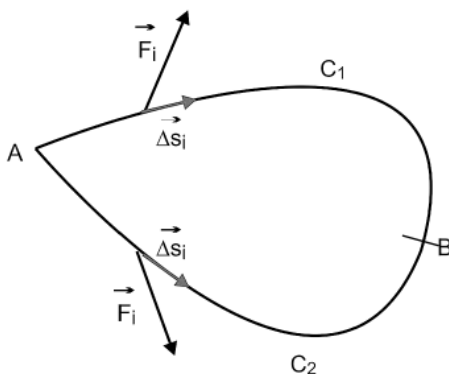


Figura 3.3: Os trabalhos de uma força conservativa sobre as trajetórias C_1 e C_2 que unem os pontos A e B são iguais.

É possível demonstrar que as forças elétricas criadas por cargas elétricas em repouso são conservativas. Logo, é possível definir uma energia potencial elétrica.

A *variação de energia potencial elétrica* é definida da seguinte forma:

$$\Delta U_{A \rightarrow B} = -W_{A \rightarrow B}(\vec{F})$$

A *energia potencial elétrica de uma carga elétrica pontual* que se encontra em um ponto P é definida da seguinte forma:

$$U_P = -W_{O \rightarrow P}(\vec{F}),$$

na qual O é um ponto onde a energia potencial elétrica é nula: $U_O = 0$. Esse ponto é denominado *origem da energia potencial elétrica*.

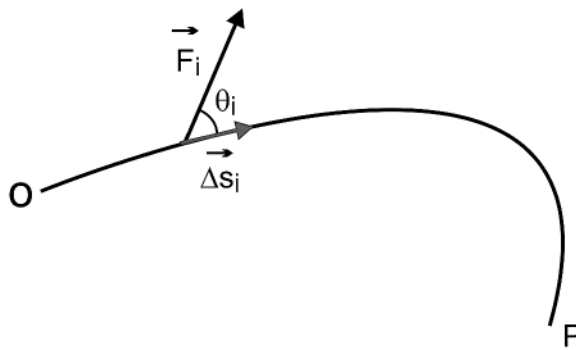


Figura 3.4: A energia potencial elétrica está relacionada com o trabalho da força elétrica desde a origem O da energia potencial elétrica ($U_O=0$) até o ponto P.

A origem da energia potencial elétrica pode ser escolhida em vários pontos diferentes. Essa possibilidade introduz na energia potencial elétrica uma arbitrariedade, uma vez que o trabalho realizado pela força elétrica muda quando o ponto de partida muda.

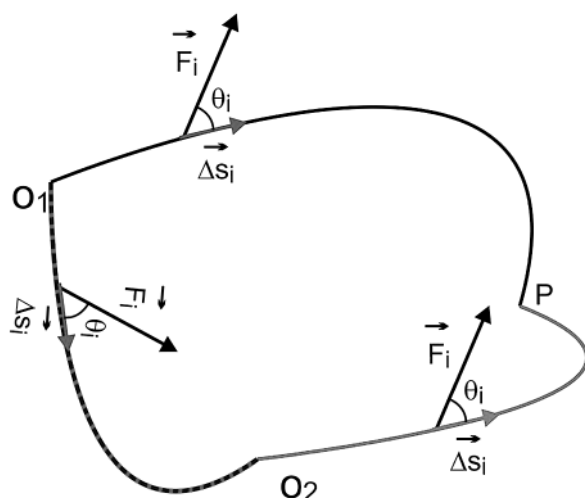


Figura 3.5: Relação entre os trabalhos associados às origens de energia potencial O_1 e O_2 .

A energia potencial elétrica definida com a origem O_1 é dada por:

$$U_{1P} = -W_{O_1 \rightarrow P}(\vec{F})$$

A energia potencial elétrica definida com a origem O_2 é dada por:

$$U_{2P} = -W_{O_2 \rightarrow P}(\vec{F})$$

Como o trabalho realizado pela força elétrica não depende da trajetória da carga elétrica, a **Figura 3.5** mostra que a energia potencial pode ser reescrita da seguinte forma:

$$U_{1P} = -W_{O_1 \rightarrow O_2}(\vec{F}) - W_{O_2 \rightarrow P}(\vec{F})$$

Logo, a relação entre as energias potenciais U_1 e U_2 é

$$U_1 = -W_{O_1 \rightarrow O_2}(\vec{F}) + U_2$$

Como o trabalho realizado de O_1 até O_2 pela força elétrica é uma constante, temos que:

$$U_1 = U_2 + C,$$

sendo a constante C dada por $C = -W_{O_1 \rightarrow O_2}(\vec{F})$.

Logo, a energia potencial se modifica quando sua origem muda de posição.

A relação entre as diferenças de energia de potencial calculadas com as energias potenciais U_{1A} , U_{1B} , U_{2A} e U_{2B} é:

$$U_{1B} - U_{1A} = U_{2B} + C - (U_{1A} + C) = U_{2B} - U_{1A}$$

Logo, a diferença da energia potencial elétrica não modifica quando a origem da energia potencial elétrica muda de posição.

Esses fatos são verificados facilmente no caso em que temos uma carga elétrica q em um campo elétrico constante que tem a direção do eixo OY e sentido contrário a ele (ver **Figura 3.6**).

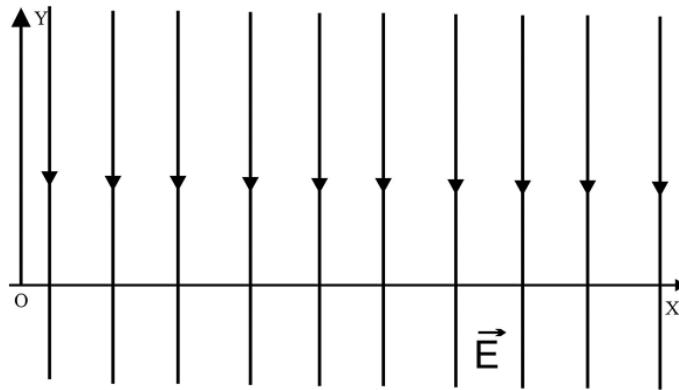


Figura 3.6: Região com campo elétrico constante.

As expressões a seguir são as *energias potenciais elétricas* de uma carga elétrica, as quais têm origens diferentes. Elas também diferem entre si.

Na primeira expressão, a energia potencial é nula em $y = 0m$ e, na segunda expressão, em $y=1m$.

Todavia, as diferenças de energia potencial elétrica entre os pontos com coordenadas y_A e y_B fornecidas pelas duas expressões são iguais, uma vez que

$$\begin{aligned} U_B - U_A &= qE y_B - qE y_A \\ U_B^* - U_{2A}^* &= qE y_B - qE - (qE y_B - qE) = qE y_B - qE y_A. \end{aligned}$$

Generalizando o conceito de potencial elétrico

O *potencial elétrico* é, por definição, a *energia elétrica por unidade de carga elétrica*, isto é,

$$V_p = \frac{U_p}{q}$$

A substituição do trabalho da força elétrica na expressão que define o potencial elétrico permite relacioná-lo com o campo elétrico, uma vez que

$$V_p = \frac{U_p}{q} = \frac{-W_{O \rightarrow P}(\vec{F})}{q} = -\lim_{N \rightarrow \infty} \left(\sum_{i=1}^N \frac{F_i}{q} \cdot \Delta s_i \cdot \cos(\theta_i) \right)$$

$$V_p = -\lim_{N \rightarrow \infty} \left(\sum_{i=1}^N E_i \cdot \Delta s_i \cdot \cos(\theta_i) \right),$$

sendo \vec{E}_i o campo elétrico sobre o deslocamento retilíneo $\Delta \vec{s}_i$ e θ_i , o ângulo entre o campo elétrico \vec{E}_i e o deslocamento $\Delta \vec{s}_i$.

Observe que o potencial elétrico só depende do campo elétrico, não depende da carga elétrica colocada na região onde existe o campo elétrico. O potencial elétrico é uma propriedade do campo elétrico. A unidade de potencial elétrico é o Volt (V).

Por exemplo, no caso do campo elétrico constante representado na **Figura 3.6**, a energia potencial elétrica de uma carga pontual q pode ser escrita como:

$$U = q E y + C$$

Por isso, o potencial elétrico é dado por

$$V = \frac{U}{q} = \frac{q E y + C}{q} = E y + \frac{C}{q} \Rightarrow$$

$$V = E y + C_1$$

A constante C_1 é arbitrária.

Denominamos *origem do potencial elétrico* o ponto no qual o potencial elétrico é nulo.

Como o potencial elétrico é dado por

$$V_p = \frac{U_p}{q},$$

podemos tirar as seguintes conclusões:

1. a origem do potencial elétrico coincide com a origem da energia potencial elétrica;
2. como o valor da energia potencial elétrica em um ponto depende da posição da origem da energia potencial elétrica, o valor do potencial elétrico também depende da posição da origem do potencial elétrico;
3. como o valor da diferença da energia potencial elétrica entre dois pontos não depende da posição da origem da energia potencial elétrica, o valor da diferença de potencial elétrico também não depende da posição da origem do potencial elétrico.

Generalizando a relação entre o potencial elétrico e o campo elétrico

Quando dois pontos estão próximos, podemos imaginar que o seu valor sobre um deslocamento $\Delta\vec{s} = \Delta s \hat{s}$ é aproximadamente constante. Por isso, a variação do potencial elétrico entre pontos próximos (ver **Figura 3.7**) pode ser calculada da seguinte forma:

$$\Delta V = -E \Delta s \cos(\theta)$$

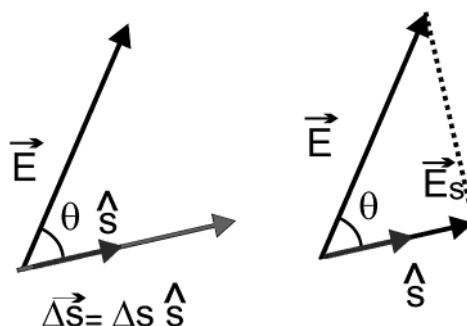


Figura 3.7: Projeção do campo elétrico na direção do deslocamento $\Delta\vec{s} = \Delta s \hat{s}$.

Denominamos \hat{s} o vetor unitário na direção do vetor deslocamento $\Delta\vec{s} = \Delta s \hat{s}$.

A relação anterior mostra que, se o deslocamento Δs for positivo e o ângulo θ for igual a 0° , a variação do potencial elétrico será negativa. Logo, o campo elétrico sempre apontará para as regiões com potencial elétrico menor.

A componente do vetor campo elétrico na direção do vetor unitário \hat{s} é:

$$E_s = E \cos(\theta)$$

A relação $\Delta V = -E \cos(\theta) \Delta s = -E_s \Delta s$ fornece:

$$E_s = -\frac{\Delta V}{\Delta s}$$

A relação anterior mostra que, se a variação de potencial elétrico e o deslocamento Δs forem positivos, a componente do campo elétrico em relação ao vetor unitário \hat{s} será negativa. Logo, o campo elétrico sempre apontará para as regiões com potenciais elétricos menores.

Se o vetor unitário \hat{s} coincidir com os vetores unitários dos eixos OX , OY e OZ , poderemos calcular todas as componentes do campo elétrico quando conhecermos o potencial elétrico, isto é,

$$E_x = -\frac{\Delta V}{\Delta x}, E_y = -\frac{\Delta V}{\Delta y}, E_z = -\frac{\Delta V}{\Delta z}$$

Logo, o conhecimento do campo potencial elétrico permite calcular o campo elétrico.

Superfícies equipotenciais

Superfícies equipotenciais são aquelas onde o potencial elétrico é constante.

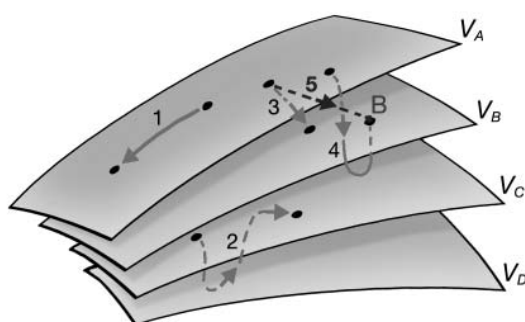


Figura 3.8: Superfícies equipotenciais

A diferença de potencial entre dois pontos de uma equipotencial é nula. Se calcularmos a diferença de potencial entre dois pontos da equipotencial com potencial V_A , utilizando um caminho do tipo 1 desenhado na **Figura 3.8**, veremos que a única forma de ela ser nula é o campo elétrico ser perpendicular a ela em todos os pontos do caminho representado pela linha 1. Logo, o campo elétrico será sempre perpendicular às superfícies equipotenciais.

Como o campo elétrico de uma carga elétrica pontual é radial, as superfícies equipotenciais dessa carga são superfícies esféricas com os centros sobre ela.

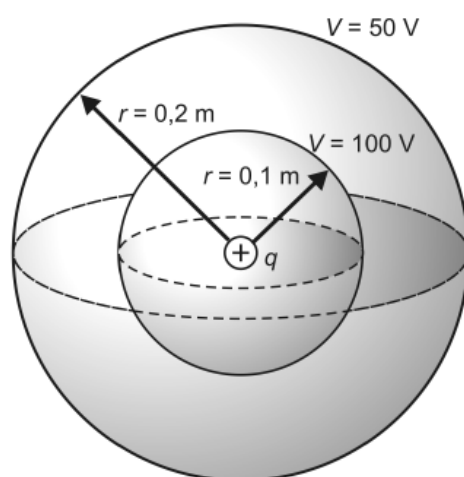


Figura 3.9: Superfícies equipotenciais de uma carga elétrica pontual

Como é difícil visualizar desenhos em três dimensões de equipotenciais, é comum desenhar as linhas equipotenciais obtidas pela interseção das superfícies equipotenciais com planos escolhidos convenientemente. A **Figura 3.10a** mostra as curvas equipotenciais obtidas com a interseção das equipotenciais de uma carga elétrica pontual com um plano que contém a carga elétrica. A **Figura 3.10b** mostra as linhas equipotenciais obtidas com a interseção das equipotenciais de um plano infinito uniformemente carregado com um plano perpendicular ao plano carregado, e a **Figura 3.10c** mostra as linhas equipotenciais obtidas com a interseção de um plano que contém o dipolo elétrico com as suas equipotenciais. As linhas e superfícies equipotenciais são desenhadas de tal forma que a diferença de potencial entre duas equipotenciais vizinhas (ou linhas equipotenciais) são iguais. Essa construção permite visualizar as regiões em que o campo elétrico é mais intenso, uma vez que nelas as equipotenciais estão mais próximas.

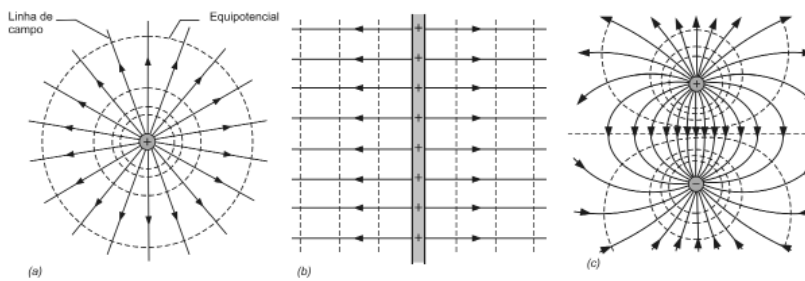
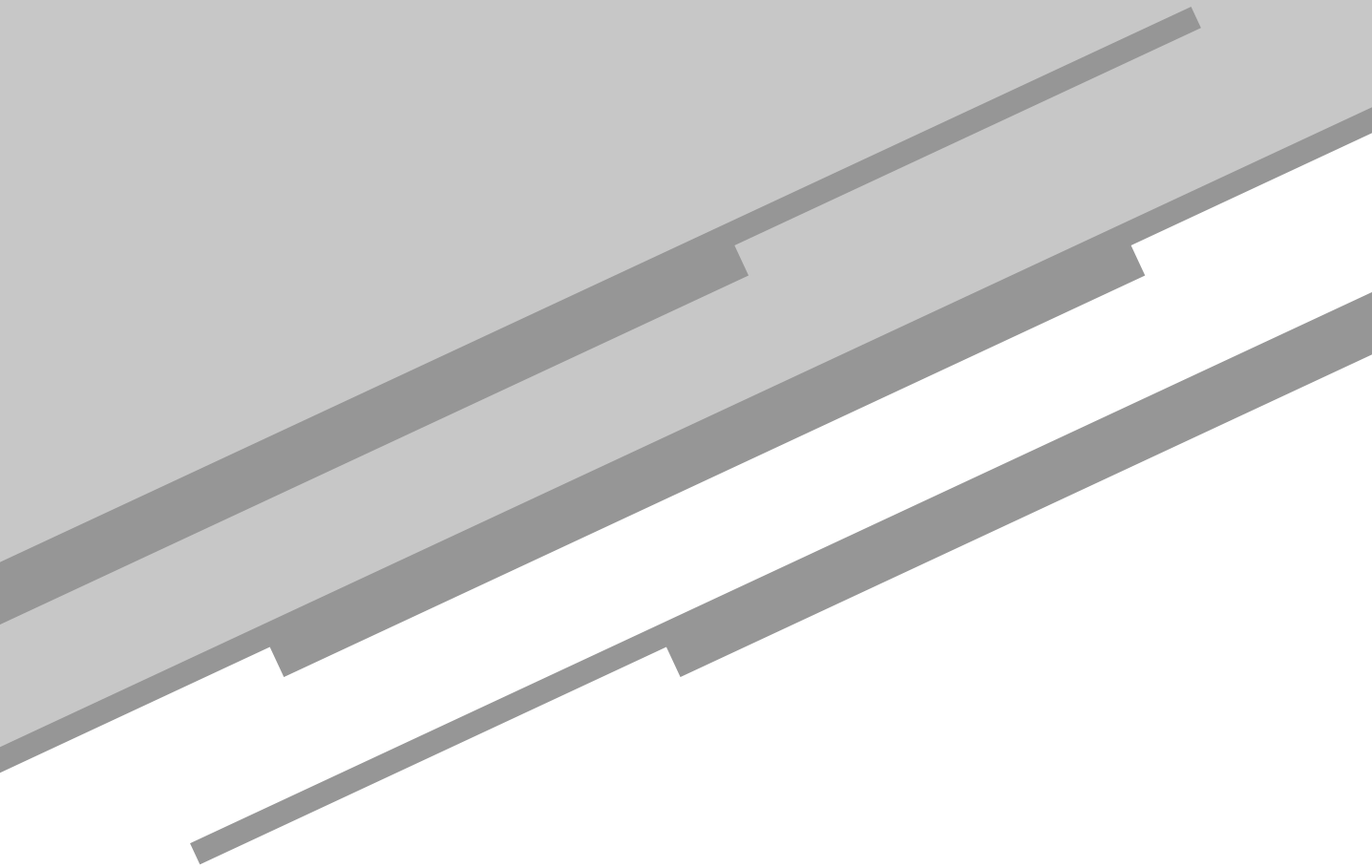


Figura 3.10: Linhas equipotenciais.

**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.

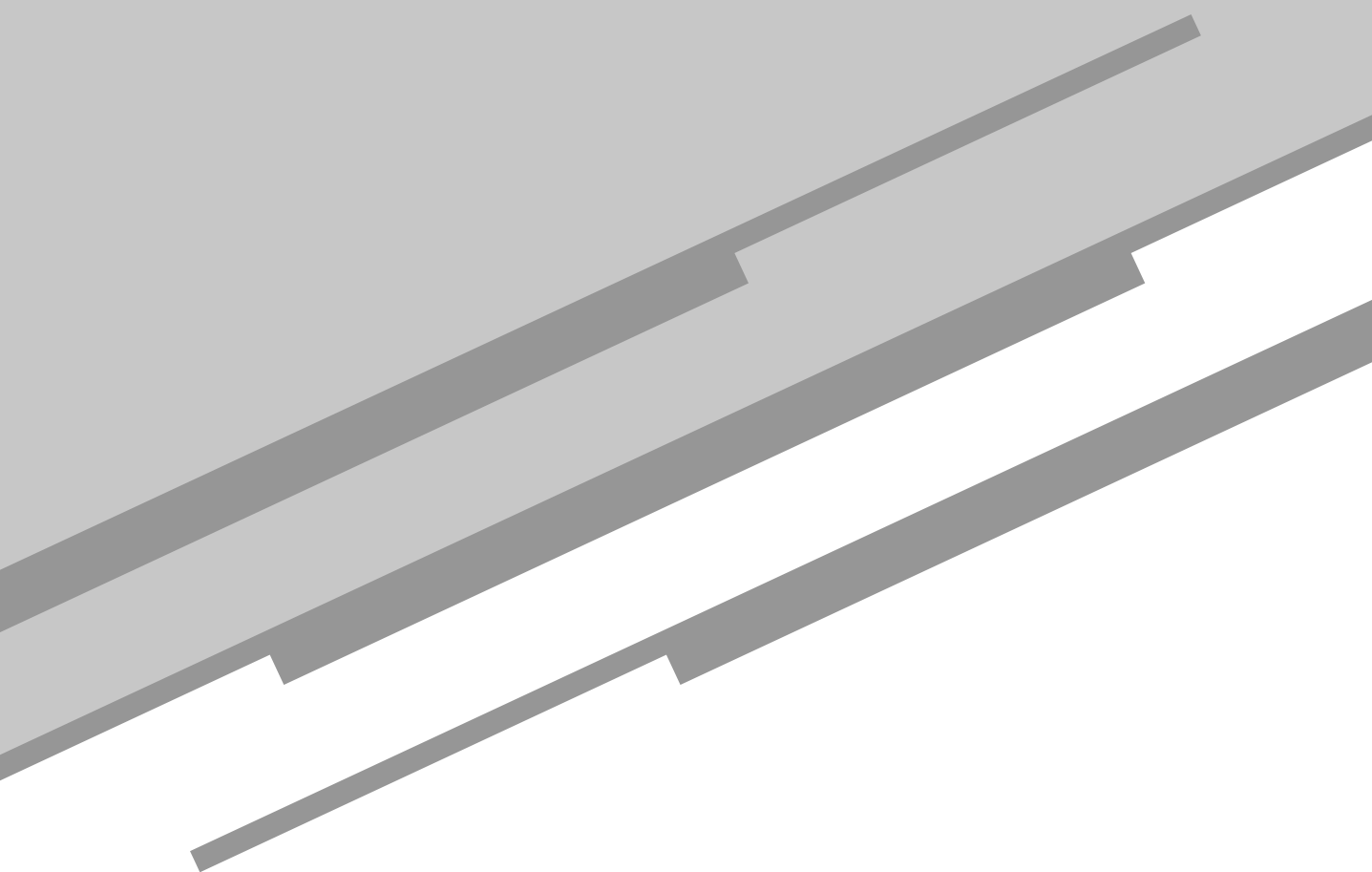
Foram realizadas práticas em que foram medidas correntes elétricas, voltagens e resistências elétricas.

A interação elétrica foi entendida à 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 elétrico e magnético são parte do campo eletromagnético, o qual pode ser produzido por correntes elétricas que variam rapidamente no tempo. Ele é o responsável pela transmissão de informações entre as emisoras de televisão e rádio e as residências, e pelo transporte de energia entre o Sol e a Terra etc.

Iniciamos o estudo da Física 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.

Referências



Aula 1

GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DA FÍSICA (Gref). *Física*. São Paulo: Edusp, 2001. 3 v.

LUZ, Antonio Maximo Ribeiro; ALVARES, Beatriz Alvarenga. *Física*: volume único. São Paulo: Scipione, 1999. 670 p.

Aula 2

ALMEIDA, Maria Antonieta Teixeira. *Introdução às ciências físicas I*: volume 2 - módulo 2. 3. ed. Rio de Janeiro: Fundação Cecierj, 2008.

LUZ, Antonio Maximo Ribeiro; ALVARES, Beatriz Alvarenga. *Física*: volume único. São Paulo: Scipione, 1999. 670 p.

PESCO, Dirce Uesu; ARNAUT, Roberto Geraldo Tavares. *Matemática básica*: volume único - módulo 1. 5. ed. Rio de Janeiro: Fundação Cecierj, 2008.

_____; _____. *Geometria básica*: volume 1 - módulo 1. 2. ed. Rio de Janeiro: Fundação Cecierj, 2010.

Aula 3

ALMEIDA, Maria Antonieta Teixeira. *Introdução às ciências físicas I*: volume 2 - módulo 2. 3. ed. Rio de Janeiro: Fundação Cecierj, 2008.

GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DA FÍSICA (Gref). *Física 3*: eletromagnetismo. São Paulo: Edusp, 1995.

LUZ, Antonio Maximo Ribeiro; ALVARES, Beatriz Alvarenga. *Física*: volume único. São Paulo: Scipione, 1999. 670 p.

PESCO, Dirce Uesu; ARNAUT, Roberto Geraldo Tavares. *Matemática básica*: volume único - módulo 1. 5. ed. Rio de Janeiro: Fundação Cecierj, 2008.

_____; _____. *Geometria básica*: volume 1 - módulo 1. 2. ed. Rio de Janeiro: Fundação Cecierj, 2010.

Aula 4

ALMEIDA, Maria Antonieta Teixeira. *Introdução às ciências físicas I*: volume 2 - módulo 2. 3. ed. Rio de Janeiro: Fundação Cecierj, 2008.

GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DA FÍSICA (Gref). *Física 3*: eletromagnetismo. São Paulo: Edusp, 1995.

LUZ, Antonio Maximo Ribeiro; ALVARES, Beatriz Alvarenga. *Física*: volume único. São Paulo: Scipione, 1999. 670 p.

PESCO, Dirce Uesu; ARNAUT, Roberto Geraldo Tavares. *Matemática básica*: volume único - módulo 1. 5. ed. Rio de Janeiro: Fundação Cecierj, 2008.

_____; _____. *Geometria básica*: volume 1 - módulo 1. 2. ed. Rio de Janeiro: Fundação Cecierj, 2010.

Aula 5

ALMEIDA, Maria Antonieta Teixeira. *Introdução às ciências físicas I*: volume 2 - módulo 2. 3. ed. Rio de Janeiro: Fundação Cecierj, 2008.

LUZ, Antonio Maximo Ribeiro; ALVARES, Beatriz Alvarenga. *Física*: volume único. São Paulo: Scipione, 1999. 670 p.

Aula 6

ALMEIDA, Maria Antonieta Teixeira. *Introdução às ciências físicas I*: volume 2 - módulo 2. 3. ed. Rio de Janeiro: Fundação Cecierj, 2008.

FEYNMAN, Richard P. *Lectures on Physics*, VI. Addison-Wesley Publishing Company, 1964.

PESCO, Dirce Uesu; ARNAUT, Roberto Geraldo Tavares. *Matemática básica*: volume único - módulo 1. 5. ed. Rio de Janeiro: Fundação Cecierj, 2008.

_____; _____. *Geometria básica*: volume 1 - módulo 1. 2. ed. Rio de Janeiro: Fundação Cecierj, 2010.

Aula 7

ALMEIDA, Maria Antonieta Teixeira. *Introdução às ciências físicas I*: volume 2 - módulo 2. 3. ed. Rio de Janeiro: Fundação Cecierj, 2008.

GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DA FÍSICA (Gref). *Física*. São Paulo: Edusp, 2001. 3 v.

PESCO, Dirce Uesu; ARNAUT, Roberto Geraldo Tavares. *Matemática básica*: volume único - módulo 1. 5. ed. Rio de Janeiro: Fundação Cecierj, 2008.

_____; _____. *Geometria básica*: volume 1 - módulo 1. 2. ed. Rio de Janeiro: Fundação Cecierj, 2010.

Aula 8

VUOLO, José Henrique. *Fundamentos da teoria de erros*. São Paulo: Edgard Blücher, 1996.

Aula 9

GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DA FÍSICA (Gref). *Física*. São Paulo: Edusp, 2001. 3 v.

LUZ, Antonio Maximo Ribeiro; ALVARES, Beatriz Alvarenga. *Física*: volume único. São Paulo: Scipione, 1999. 670 p.

Aula 10

VUOLO, José Henrique. *Fundamentos da teoria de erros*. São Paulo: Edgard Blücher, 1996.

Aula 11

LUZ, Antonio Maximo Ribeiro; ALVARES, Beatriz Alvarenga. *Física*: volume único. São Paulo: Scipione, 1999. 670 p.

Aula 12

GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DA FÍSICA
(Gref). *Física 3: eletromagnetismo*. 2. ed. São Paulo: Edusp, 1995.

LUZ, Antonio Maximo Ribeiro; ALVARES, Beatriz Alvarenga.
Física: volume único. São Paulo: Scipione, 1999. 670 p.

Aula 13

GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DA FÍSICA
(Gref). *Física 3: eletromagnetismo*. 2. ed. São Paulo: Edusp, 1995.

LUZ, Antonio Maximo Ribeiro; ALVARES, Beatriz Alvarenga.
Física: volume único. São Paulo: Scipione, 1999. 670 p.

ISBN 978-85-7648-946-7



9 788576 489467



UENF
Universidade Estadual
do Norte Fluminense



SECRETARIA DE
CIÊNCIA E TECNOLOGIA



Ministério da
Educação

