

VERSÃO PARA CARTAS DO JOGO “EM BUSCA DO PRÊMIO NOBEL
(EBPN)

Jogo para o ensino de eletricidade

Francisco Napoleão Freire Netto

Jogo anexo à Dissertação de Mestrado “Abordagem ausubeliana para o ensino de eletricidade, usando a versão para cartas do jogo *Em busca do Prêmio Nobel*”, apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal Rural do Semiárido, no Mestrado Profissional em Ensino de Física (MNPEF), polo 9, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador

Prof. Dr. Geovani Ferreira Barbosa

Co-Orientador

Prof. Dr. Carlos Alberto dos Santos

Mossoró
2025

SUMÁRIO

1 APRESENTAÇÃO	1
2 EBPB NA VERSÃO CARTAS	2
3 TEXTO AUSUBELIANO	5
4 APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL	7
REFERÊNCIAS	9
APÊNDICE A – TESTE DE CONCEPÇÕES ALTERNATIVAS (TCA)	11
APÊNDICE B – TESTE DE ASSOCIAÇÃO NUMÉRICA DE CONCEITOS (TANC)	14
APÊNDICE C – QUESTIONÁRIO DE REAÇÃO AO JOGO	15
APÊNDICE D – TEXTO AUSUBELIANO SOBRE ELETRICIDADE	17

1 APRESENTAÇÃO

O produto que se apresenta aqui consiste em uma versão para cartas do jogo *Em Busca do Prêmio Nobel* (EBPN), cuja versão digital foi usada em outros trabalhos realizados no MNPEF-UFERSA (DE AQUINO, E. M. et al., 2023; DINIZ, 2018; DINIZ; DOS SANTOS, 2019; DOS SANTOS; DE AQUINO, 2018, 2018). O jogo é acompanhado por um texto ausubeliano sobre eletricidade para o ensino médio. Trata-se de um texto didático para apresentar Organizadores Prévios (OP) e contextualizar o conteúdo usado nos livros-textos em um cenário da teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel.

Embora no presente estudo, diversas circunstâncias administrativas no âmbito escolar tenham impedido a aplicação do teste de concepções alternativas (TCA) e do teste de associação numérica de conceitos (TANC), eles serão colocados aqui para que outros professores interessados em usar o jogo possam realizar a validação como foi planejada aqui. Só conseguimos aplicar o questionário de reação ao jogo.

A validação do material pode ser realizada por meio de dois testes de acesso à estrutura cognitiva e de um questionário de reação ao jogo e ao texto ausubeliano. Um dos testes de acesso à estrutura cognitiva, denominado Teste de Concepções Alternativas (TCA), é amplamente reportado na literatura (BAŞER, M.; GEBAN, Ö., 2007; BILAL, E.; EROL, M., 2009; CHAMBERS; ANDRE, 1997; CORUHLU; CALIK; CEPNI, 2012; DILBER; DUZGUN, 2008; ENGELHARDT; BEICHNER, 2004; EYLON, B. S.; GANIEL, U., 1990; HASHISH, A. H.; SEYD-DARWISH, I.; TIT, N., 2020; KÜÇÜKÖZER; KOCAKÜLAH, [s.d.]; MCDERMOTT; SHAFFER, 1992; MÉTIOUI, A.; TRUDEL, L.; MACWILLIE, M. B., 2015; MI, S. et al., 2023; MOYNIHAN, R. et al., 2016; NE, [s.d.]; NKOPANE et al., [s.d.]; ONDER-CELIKKANLI, N.; TAN, M., 2022; SHAFFER; MCDERMOTT, 1992; STEFANIDOU, C. G. et al., 2019). O outro é o Teste de Associação Numérica de Conceitos (TANC), igualmente bem conhecido na literatura (GEESLIN; SHAVELSON, 1975, 1975; GLINER, 1981; DOS SANTOS; MOREIRA, 1979a; MOREIRA; DOS SANTOS, 1981; SUBKOVIK; ROECKS, 1976; THRO, 1978). O questionário de satisfação foi elaborado a partir do que consta no método Kirkpatrick (KIRKPATRICK, D., 2006).

Os testes e o questionário são apresentados como apêndices ao final deste documento, enquanto os procedimentos analíticos são apresentados na literatura mencionada.

Como se verá mais adiante, o jogo EBPB é multiplataforma e multitemático. Ele pode ser adaptado para uso digital e nos formatos de cartas e tabuleiro. Sua estrutura pode ser utilizada para o ensino de qualquer assunto, e ele pode ser usado com base em diferentes referenciais pedagógicos. Portanto, além das fundamentações básicas do jogo, o que será apresentado aqui é apenas a forma como ele foi utilizado na dissertação “Abordagem ausubeliana para o ensino de eletricidade, usando a versão para cartas do jogo *Em busca do Prêmio Nobel*”, apresentada no MNPEF-UFERSA, polo 9, 2025.

2 EBPB NA VERSÃO CARTAS

Na versão cartas, o jogo é disputado entre dois jogadores ou dois grupos, cada um formado por quatro ou cinco participantes. Para facilitar a explicação, as regras serão descritas considerando a competição entre grupos de quatro integrantes. Os estágios do jogo são os mesmos da versão digital: Graduação, Mestrado, Doutorado e Pesquisador em busca do Nobel.

As questões variam de acordo com cada categoria. No nível Graduação, abordam exclusivamente carga elétrica e campo elétrico. No nível Mestrado, o tema central é o potencial elétrico. Já no nível Doutorado, os desafios envolvem corrente elétrica, circuitos elétricos e a Lei de Ohm. As questões dessas três categorias são retiradas do ENEM e apresentam níveis de dificuldade baixo ou intermediário. Na categoria Pesquisador, as questões abrangem todos os tópicos anteriores e são selecionadas entre as mais difíceis do ENEM.

As cartas do jogo contêm as mesmas questões utilizadas na versão digital, conforme ilustrado na Figura 1. Cada jogador recebe um material com o conteúdo relacionado ao tema. O estudo pode ser feito individualmente, em atividades organizadas pelo professor ou durante o próprio jogo, seguindo as regras estabelecidas. A disposição das cartas na mesa é representada na Figura 2.

Duas formas de aplicação do jogo foram testadas. Uma na presente dissertação, e outra na dissertação de Eliabe Maxsuel de Aquino (a ser submetida). A ideia inicial era aplicar as duas formas nas duas. No entanto, na minha turma os alunos sugeriram

mudanças e resolvi adotá-las, até para no futuro, em replicações do jogo, termos elementos de comparação.

G3

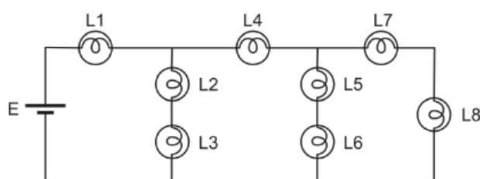
Uma menina começa a pentear seus longos cabelos usando um pente de plástico, quando percebe que o pente atrai pequenos pedaços de papel que se encontram sobre a mesa. Esse fenômeno acontece por que (Adaptado de Gualter et al, 2007):

- a) O pente é um bom condutor elétrico.
- b) O papel é um bom condutor elétrico.
- c) Os pedaços de papel já estavam eletrizados.
- d) O pente ficou eletrizado por atrito no cabelo.
- e) Entre o pente e os pedaços de papel ocorre atração gravitacional.

(a)

D6

No circuito dessa figura, quais são as três lâmpadas que acendem com o mesmo brilho por apresentarem igual valor de corrente fluindo nelas? (Adaptado do Enem 2009).



- a) L1, L2 e L3.
- b) L2, L3 e L4.
- c) L2, L5 e L7.
- d) L4, L5 e L6.
- e) L4, L7 e L8.

(c)

M6

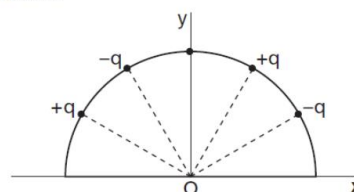
Quatro cargas puntiformes iguais, positivas, estão nos vértices de um quadrado. É correto dizer que no centro do quadrado (PUC-MG):

- a) O potencial é diferente de zero e o campo elétrico é nulo.
- b) O potencial é nulo e o campo elétrico é diferente de zero.
- c) O potencial e o campo elétrico são ambos diferentes de zero.
- d) O potencial e o campo elétrico são ambos nulos.

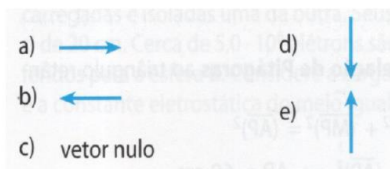
(b)

P11

Quatro cargas, todas de mesmo valor, q , sendo duas positivas e duas negativas, estão fixadas em um semicírculo no plano XY, conforme figura abaixo.



Indique a opção que pode representar o campo elétrico resultante, produzido por essas cargas, no ponto O (UFC-CE):



(d)

Figura 1 – Ilustração de cartas nas categorias (a) graduação (resposta: d); (b) mestrado (resposta: a); (c) doutorado (resposta: b); (d) pesquisador (resposta: a).

De acordo com as regras originais, utilizadas na dissertação de E.M. de Aquino:

1. O jogo começa com o sorteio dos componentes de cada equipe para ocupar cada um dos estágios. Ou seja, um componente será sorteado para a graduação, outro para o mestrado, e assim por diante.
2. A equipe sorteada para iniciar o jogo (suponhamos, equipe 1) retira a carta de cima do conjunto graduação da equipe 2 e entrega a carta para o adversário ler a questão. Se este acertar, a carta volta para baixo do conjunto, e o jogador da equipe 1 retira outra carta do conjunto graduação e repete o procedimento. Quando o jogador adversário erra a questão, a carta volta para o final do conjunto, e o jogador da equipe 2 retira a carta do conjunto da equipe 1 e prossegue como descrito acima.
3. A equipe passa de estágio quando seus componentes acertam 5 questões. Portanto, a equipe ganha o Nobel quando acerta pelo menos 20 questões.
4. Cada vez que um jogador acerta uma questão, em qualquer estágio, ele retira uma carta do conjunto SORTE/AZAR. Se a carta tiver a palavra SORTE, ele segue o jogo; se a carta tiver a palavra AZAR, o jogador perde a questão que acertou, é como se tivesse errado a questão.
5. Cada jogador pode pedir ajuda da equipe. Se o colega que vai ajudá-lo (jogador-auxiliar) errar a questão, é como se o jogador tivesse errado, e tudo segue como descrito no item 1. Se o jogador-auxiliar acertar a questão, o jogador em ação não poderá mais solicitar ajuda.
6. Os componentes da equipe que está questionando podem consultar o livro de conteúdo, o que é impedido para os componentes da equipe que está respondendo.

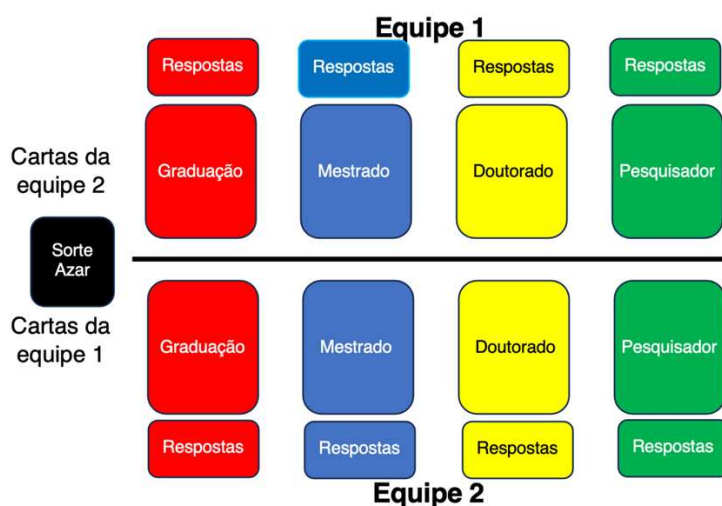


Figura 2 – Disposição das cartas na mesa. Abaixo das cartas de perguntas são colocadas as cartas com as respostas.

Na presente dissertação, por sugestão dos alunos, as regras foram essas:

1. O jogo começa com o sorteio do grupo que irá começar a responder. O grupo que começa a responder escolhe qual de seus componentes deverá iniciar.
2. Este componente deverá retirar a carta de cima da categoria em jogo; fazer a leitura em voz alta e em seguida responder. Caso acerte, ele deverá escolher uma carta do conjunto SORTE/AZAR. Caso a carta seja de sorte ele passa a vez para o grupo oponente; caso a carta tenha a palavra azar, o jogador continua retirando carta até que chegue na combinação resposta correta e carta de sorte.
3. Para passar de etapa cada equipe deverá responder no mínimo cinco questões da etapa. O mínimo corresponde a tirar cinco cartas de sorte.
4. Cada equipe é composta de quatro componentes e um coringa, que substituirá algum componente ausente no dia do jogo.
5. Em cada uma das fases um jogador poderá solicitar ajuda aos colegas do grupo, uma única vez por etapa.
6. Os componentes que não estiverem respondendo poderão fazer uso do material de leitura. Desde que não seja solicitada a ajuda.
7. Para obter o prêmio Nobel cada equipe deverá responder corretamente no mínimo cinco questões de cada fase.

3 TEXTO AUSUBELIANO*

O texto ausubeliano usado na presente intervenção didática, foi elaborado por Eliabe Maxsuel de Aquino, Geovani Ferreira Barbosa e Carlos Alberto dos Santos (ver Apêndice E), distribuído para leitura durante as aulas. O texto foi escrito seguindo os fundamentos da teoria de aprendizagem significativa de Ausubel. A partir do sumário (Figura 3) é possível fazer um paralelo entre a estrutura do texto e os fundamentos da teoria de Ausubel.

* Interessados em usar o texto ausubeliano podem entrar em contato: cas.ufrgs@gmail.com

Sumário

Apresentação	1
Organizador Prévio 1 – Carga e Campo Elétrico	3
Capítulo 1 – Carga Elétrica	7
Organizador Prévio 2 – Potencial Elétrico	21
Capítulo 2 – Campo, Potencial, Força e Energia	23
Organizador Prévio 3 – Corrente Elétrica, Circuitos Elétricos e Lei de Ohm	37
Organizador Prévio 4 - Eletrodinâmica	43
Capítulo 3 – Eletrodinâmica	51
Capítulo 4 – Circuitos Elétricos	63

Figura 3 – Sumário do texto ausubeliano “Eletrostática e Eletrodinâmica.

Um artigo publicado por Ausubel em 1957, em coautoria com Lillian Cuxier Robbins e Elias Blake Jr. (AUSUBEL, D. P.; ROBBINS, L. C.; BLAKE JR., 1968), pode ser um dos primeiros registros em que ele formulou um dos princípios fundamentais de sua teoria da aprendizagem significativa. Devido à sua importância histórica e à sua relevância para nossa abordagem baseada no pensamento ausubeliano, consideramos válido apresentar aqui uma tradução livre de um trecho desse artigo.

Materiais significativos são invariavelmente relacionados a uma estrutura cognitiva existente que é hierarquicamente organizada em termos de grupos conceituais altamente estáveis e inclusivos sob os quais são subsumidos dados ilustrativos menos estáveis e mais específicos. À medida que entram no campo cognitivo, são apropriadamente "catalogados" sob focos conceituais relevantes, uma vez que esta é a maneira mais ordenada e eficiente de organizar grandes quantidades de material para pronta disponibilidade. (...) Como é mais econômico e menos oneroso, no entanto, subsumir o máximo de material sob categorias tão inclusivas quanto possível, a importação de muitos itens ilustrativos específicos é assimilada pelo significado generalizado dos focos subsumidores mais estabelecidos e altamente conceituados.

Essa concepção geral de subsunções — conceitos altamente estáveis e abrangentes — e subsumidos constitui o principal fundamento de uma abordagem didática baseada em Ausubel. No entanto, devido à sua complexidade, é também um dos aspectos mais frequentemente negligenciados nas aplicações relatadas na literatura. Identificar os subsunções em uma determinada área do conhecimento não é uma tarefa trivial. No contexto do eletromagnetismo, especificamente na disciplina de física básica em cursos universitários, Moreira propôs o seguinte cenário (MOREIRA, M. A., 1977):

De acordo com a teoria de Ausubel, as ideias, fenômenos e conceitos mais inclusivos e gerais devem ser apresentados no início da instrução para servir como "ancoragem"

conceitual para o aprendizado subsequente. Seguindo esse princípio, as Equações de Maxwell e conceitos inclusivos como força eletromagnética e campo eletromagnético foram introduzidos, nos grupos experimentais, no início do curso, a fim de servir como base para a apresentação subsequente de fenômenos elétricos e magnéticos.

Se a proposta de Moreira parece adequada para cursos universitários, sua aplicação direta no ensino médio não é viável. Nesse contexto, compreendemos que os conceitos mais inclusivos são aqueles que fundamentam toda a área do conhecimento, estando presentes em qualquer abordagem dentro dela. Por essa razão, carga elétrica e campo elétrico são considerados como os principais subsunçores da disciplina. Assim, o primeiro organizador prévio (OP) trata desses dois conceitos de maneira generalizante, conforme preconiza Ausubel. Para uma compreensão mais aprofundada da apropriação da teoria da aprendizagem significativa, sugerimos a leitura do texto no Apêndice E.

Ao longo do material, destaca-se que o conceito de potencial é aplicável não apenas no eletromagnetismo, mas também em contextos gravitacionais e nucleares. Além disso, de maneira qualitativa e geral, enfatiza-se a distinção entre energia potencial, entendida como energia de configuração, e energia cinética, associada à atividade ou movimento. O texto também menciona um equívoco conceitual recorrente entre alunos do ensino médio e até mesmo entre calouros de engenharia: a crença de que a existência de potencial em um fio condutor depende da presença de corrente elétrica. Na realidade, ocorre o oposto: é a diferença de potencial que gera a corrente elétrica.

A estrutura didática fundamentada na teoria de Ausubel inicia-se com a definição dos subsunçores, explorados por meio dos organizadores prévios. Em seguida, o conteúdo se desenvolve a partir dos princípios de diferenciação progressiva e reconciliação integrativa. A diferenciação progressiva ocorre quando conceitos gerais e abrangentes são refinados e detalhados no contexto formal da disciplina. Já a reconciliação integrativa acontece quando esses conceitos são interligados por meio de fórmulas, definições e exemplos ilustrativos. Todo o material elaborado é permeado por esses fundamentos teóricos, garantindo uma abordagem estruturada e coerente com os princípios da aprendizagem significativa.

4 APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

Conforme mencionado anteriormente, o jogo EBPB é uma plataforma versátil e multitemática. Sua estrutura permite sua utilização em diferentes formatos: digital

(acessível por qualquer dispositivo eletrônico), cartas e tabuleiro. Além disso, sua flexibilidade possibilita a adaptação para qualquer tema, bem como a aplicação dentro de diferentes referenciais pedagógicos. A seguir, a título de ilustração, descreve-se a forma como o jogo foi empregado no contexto da dissertação supracitada.

Sequência didática:

Datas	Aulas	CONTEÚDO
22/2/2024	Aula 1	Apresentação da disciplina, metodologia da apostila.
29/2/2024	Aula 2	Início da leitura do Organizador Prévio 1
14/3/2024	Aula 3	Continuação da leitura e discussão do Organizador Prévio 1 - Carga Elétrica e Campo Elétrico;
21/3/2024	Aula 4	Aula sobre carga elétrica e campo elétrico e exercícios
4/4/2024	Aula 5	Leitura e discussão do Organizador Prévio 2 – Potencial Elétrico
11/4/2024	Aula 6	Potencial elétrico e exercícios
25/4/2024	Aula 7	Comparação entre campo elétrico e potencial elétrico
2/5/2024	Aula 8	Diferença de potencial
9/5/2024	Aula 9	Energia elétrica, exercícios e sorteio para o início do jogo
16/5/2024	Aula 10	Início do jogo fase graduação
23/5/2024	Aula 11	Potencial elétrico em condutores esféricos
30/5/2024	Aula 12	Exercícios.
6/6/2024	Aula 13	Revisão de conteúdos
18/6/2024	Aula 14	Jogo- Fase Mestrado
8/8/2024	Aula 15	Leitura e discussão do Organizador Prévio 3 – Corrente Elétrica, Circuitos Elétricos e Lei de Ohm
15/8/2024	Aula 16	Corrente Elétrica
29/8/2024	Aula 17	Lei de Ohm
05/09/2024	Aula 18	Exercício
19/09/2025	Aula 19	Jogo- Fase Doutorado
26/9/2024	Aula 20	Leitura e discussão do Organizador Prévio 4 – Eletrodinâmica
10/10/2024	Aula 21	Geradores e Receptores
24/10/2024	Aula 22	Jogo – Fase Pesquisador
31/10/2024	Aula 23	Jogo- Continuação
7/11/2024	Aula 24	Aplicação do questionário de reação ao jogo

REFERÊNCIAS

- AUSUBEL, D. P.; ROBBINS, L. C.; BLAKE JR, E. Retroactive inhibition and facilitation in the learning of school materials. *Journal of Educational Psychology*, v. 48, n. 6, p. 334–343, 1968.
- BAŞER, M.; GEBAN, Ö. Effect of instruction based on conceptual change activities on students' understanding of static electricity concepts. *Research in Science & Technological Education*, v. 25, n. 2, p. 243–267, 2007.
- BILAL, E.; EROL, M. Investigating students' conceptions of some electricity concepts. *Latin-American Journal of Physics Education*, v. 3, n. 2, p. 193–201, 2009.
- CHAMBERS, S. K.; ANDRE, T. Gender, Prior Knowledge, Interest, and Experience in Electricity and Conceptual Change Text Manipulations in Learning about Direct Current. *Journal of Research in Science Teaching*, 1997.
- CORUHLU, T. S.; CALIK, M.; CEPNI, S. Effect of conceptual change pedagogies on students' alternative conceptions of electricity resistance and electricity current. *Energy Education Science and Technology Part B: Social and Educational Studies*, 2012.
- DE AQUINO, E. M. et al. EM BUSCA DO PRÊMIO NOBEL: UM JOGO DIGITAL MULTIPLATAFORMA E MULTITEMÁTICO. *REPPE-Revista de Produtos Educacionais e Pesquisas em Ensino*, v. 7, n. 2, p. 413–432, 2023.
- DILBER, R.; DUZGUN, B. Effectiveness of Analogy on Students' Success and Elimination of Misconceptions. *Am. J. Phys. Educ.* [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.journal.lapen.org.mx>>.
- DINIZ, F. S. V. Uso do jogo digital “Em busca do prêmio Nobel” para abordar tópicos de atomística. [s.l.] Universidade Federal Rural do Semiárido, 2018.
- DINIZ, F. V. S.; DOS SANTOS, C. A. Ensinando atomística com o jogo digital “Em busca do Prêmio Nobel”. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 41, n. 3, p. e20180268, 2019.
- DOS SANTOS, C. A.; DE AQUINO, E. M. Em busca do Prêmio Nobel – Versão beta. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 40, n. 3, p. e3501-5, 2018.
- ENGELHARDT, P. V.; BEICHNER, R. J. Students' understanding of direct current resistive electrical circuits. *American Journal of Physics*, 2004.
- EYLLON, B. S.; GANIEL, U. Macro-micro relationships: the missing link between electrostatics and electrodynamics in students' reasoning. *International Journal of Science Education*, v. 12, n. 1, p. 79–94, 1990.
- GEESLIN, W. E.; SHAVELSON, R. J. An Exploratory analysis of the representation of a mathematical structure in students' cognitive structures. *American Educational Research Journal*, v. 12, n. 1, p. 21–39, 1975.
- GLINER, G. S. A Note on a Statistical Paradigm for the Evaluation of Cognitive Structure in Physics Instruction. *Applied Psychological Measurement*, v. 5, n. 4, p. 493–502, 1981.
- HASHISH, A. H.; SEYD-DARWISH, I.; TIT, N. Addressing some physical

- misconceptions in electrostatics of Freshman Engineering students. *International Journal for Innovation Education and Research*, v. 8, n. 2, p. 1–7, 2020.
- KIRKPATRICK, D. *Evaluating training programs: The four levels*. San Francisco: Berrett-Koehler Publishers, 2006.
- KÜÇÜKÖZER, H.; KOCAKÜLAH, S. Secondary School Students' Misconceptions about Simple Electric Circuits. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.tused.org>>.
- MCDERMOTT, L. C.; SHAFFER, P. S. Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part I: Investigation of student understanding. *American Journal of Physics*, v. 60, n. 11, p. 994–1003, 1992.
- MÉTIOUI, A.; TRUDEL, L.; MACWILLIE, M. B. PRESERVICE PRIMARY TEACHERS' REPRESENTATIONS AFTER TEACHING OF THE ELEMENTARY ELECTROSTATIC PHENOMENA. *Science & Technologies*, v. 5, n. 3, p. 115–120, 2015.
- MI, S. et al. Development and validation of a conceptual survey instrument to evaluate senior high school students' understanding of electrostatics. *Physical Review Physics Education Research*, v. 19, n. 1, p. 010114, 2023.
- MOREIRA, M. A. An Ausubelian approach to physics instruction: an experiment in an introductory college course in eletromagnetism. Thesis—Ithaca: Cornell University, 1977.
- MOREIRA, M. A. Concept Maps as Tools for Teaching. *Journal of College Science Teaching*, v. 8, n. 5, p. 283–286, 1979.
- MOREIRA, M. A.; DOS SANTOS, C. A. The Influence Of Content Organization On Student'S Cognitive Structure in Thermodynamics. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 18, p. 525–531, 1981.
- MOYNIHAN, R. et al. Helping lower secondary students develop conceptual understanding of electrostatic forces. *Sch. Sci. Rev*, v. 98, n. 363, p. 101–108, 2016.
- NE. Students' Conceptual Knowledge about Electricity and Magnetism and Its Implications: An Example of Turkish University. [s.l: s.n.].
- NKOPANE, L. et al. Alternative Conceptions about Simple Electric Circuits amongst High School FET Band Learners. [s.l: s.n.].
- NOVAK, J. D. Concept mapping: A useful tool for science education. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 27, n. 10, p. 937–949, 1990.
- ONDER-CELIKKANLI, N.; TAN, M. Determining Turkish high school students' misconceptions about electric charge imbalance by using a four-tier misconception test. *Physics Education*, v. 57, n. 5, p. 055010, 2022.
- SHAFFER, P. S.; MCDERMOTT, L. C. Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part II: Design of instructional strategies. *American Journal of Physics*, 1992.
- STEFANIDOU, C. G. et al. Conceptual Difficulties Pre-Service Primary Teachers Have with Static Electricity. *Journal of Baltic Science Education*, v. 18, n. 2, p. 300–313, 2019.
- THRO, M. P. Relationships Between Associative and Content Structure of Physics Concepts. *Journal of Educational Psychology*, v. 70, n. 6, p. 971–978, 1978.

Apêndice A

Teste de Concepções Alternativas (TCA)

Eletrostática e circuitos elétricos

1) Quando a humidade do ar é baixa, diz-se que o ambiente se encontra seco. Nessas circunstâncias as pessoas podem sentir pequenos choques elétricos ao tocarem objetos metálicos, com maçanetas de porta. Esse fenômeno é consequência do fato de que o corpo humano pode se comportar com um condutor, ou seja:

- a) oferece resistência nula ao movimento da quantidade líquida de carga através do corpo.
- b) permite que uma quantidade líquida de carga se desloque com facilidade através do corpo.
- c) permite que uma quantidade líquida de carga se desloque com dificuldade através do corpo.
- d) reduz o deslocamento da quantidade líquida de carga em função do aumento da diferença de potencial.
- e) alterna a capacidade de deslocamento da quantidade líquida de carga no corpo, facilitando ou dificultando o fenômeno.

2) Durante uma tempestade, um bom local para se proteger dos raios é o interior de um carro, desde que não seja conversível. A razão para essa proteção é:

- a) Isolamento elétrico dos pneus.
- b) Efeito de para-raios da antena.
- c) Blindagem pela carcaça metálica.
- d) Escoamento da água pela lataria.
- e) Aterramento pelo fio terra da bateria.

3) Por qual motivo ocorre a eletrização ilustrada na tirinha?

- a) Troca de átomos entre a calça e os pelos do gato.
- b) Diminuição do número prótons nos pelos do gato.
- c) Criação de novas partículas eletrizadas nos pelos do gato.
- d) Movimentação de elétrons entre a calça e os pelos do gato.
- e) Repulsão entre partículas elétricas da calça e dos pelos do gato.

4) Um pente plástico é atritado com papel toalha seco. A seguir ele é aproximado de pedaços de papel que são atraídos e acabam grudados ao pente. Essa movimentação dos pedaços de papel até o pente é explicada pelo fato de os papeizinhos



- a) Serem influenciados pela força de atrito que ficou retida no pente.
- b) Serem influenciados pela força de resistência do ar em movimento.
- c) Experimentarem um campo elétrico capaz de exercer forças elétricas.
- d) Experimentarem um campo magnético capaz de exercer forças magnéticas.
- e) Possuírem carga elétrica que permite serem atraídos ou repelidos pelo pente.

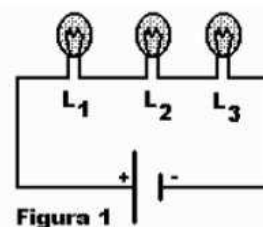
5) Enquanto fazia a limpeza em seu local de trabalho, uma pessoa se surpreendeu com o seguinte fenômeno: depois de limpar um objeto de vidro, esfregando-o vigorosamente com um pedaço de pano de lã, percebeu que o vidro atraiu para si pequenos pedaços de papel que estavam espalhados sobre a mesa. O motivo da surpresa consiste no fato de que:

- a) Quando o vidro é atritado com a lã, prótons do vidro são retirados, tornando-o negativamente eletrizado, possibilitando que atraísse os pedaços de papel.
- b) O atrito entre o vidro e a lã aqueceu o vidro e o calor produzido foi o responsável pela atração dos pedaços de papel.
- c) Ao esfregar a lã no vidro, um campo magnético é criado ao redor do vidro semelhante ao existente ao redor de um ímã.
- d) Quando esfregados um contra o outro, a lã e o vidro, tornam-se eletricamente neutros, impedindo que o vidro repelisse os pedaços de papel.
- e) O atrito entre o vidro e a lã fez um dos dois perder elétrons e o outro ganhar, eletrizando os dois, o que permitiu que o vidro atraísse os pedaços de papel.

Em todas as questões a seguir admite-se que as lâmpadas sejam iguais. Os brilhos das lâmpadas crescem quando a intensidade da corrente elétrica aumenta. A bateria representada tem resistência elétrica desprezível.

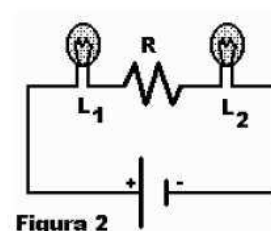
6) No circuito da figura 1 pode-se afirmar que:

- (a) L1 brilha mais do que L2 e esta mais do que L3.
- (b) L3 brilha mais do L2 e esta mais do que L1.
- (c) As três lâmpadas têm o mesmo brilho.



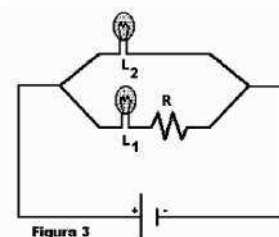
7) No circuito da figura 2, R é um resistor. Neste circuito:

- (a) L1 e L2 têm o mesmo brilho.
- (b) L1 brilha mais do L2.
- (c) L2 brilha mais do L1.



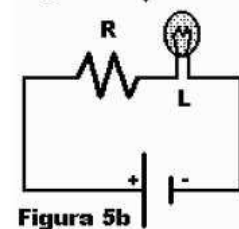
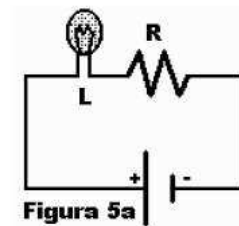
8) No circuito da figura 3, R é um resistor. Neste circuito:

- (a) L1 tem o mesmo brilho que L2.
- (b) L2 brilha mais do que L1
- (c) L1 brilha mais do que L2.



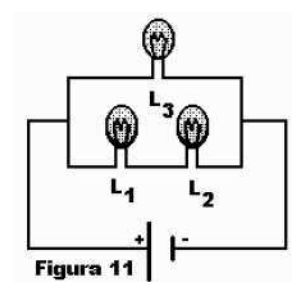
9) Nos circuitos 5a e 5b a lâmpada L, o resistor R e a bateria são exatamente os mesmos. Nestas situações:

- (a) L brilha mas no circuito 5a.
- (b) L brilha igual em ambos circuitos.
- (c) L brilha mais no circuito 5b.



10) No circuito da figura 11:

- (a) L1 e L2 têm o mesmo brilho que menor do que o de L3.
- (b) L1 brilha mais do que L2 e do que L3.
- (c) L1, L2 e L3 brilham igualmente.



Apêndice B

Teste de Associação Numérica de Conceitos (TANC)

Eletricidade

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Lei de Ohm - Força elétrica									
Potencial elétrico - Lei de Coulomb									
Resistência elétrica – Lei de Ohm									
Corrente elétrica - Lei de Ohm									
Força elétrica – Corrente elétrica									
Lei de Ohm - Lei de Coulomb									
Resistência elétrica – Lei de Coulomb									
Corrente elétrica – Potencial elétrico									
Lei de Coulomb - Força elétrica									
Diferença de potencial - Resistência elétrica									
Diferença de potencial - Lei de Coulomb									
Campo elétrico - Resistência elétrica									
Lei de Coulomb – Corrente elétrica									
Corrente elétrica - Diferença de potencial									
Diferença de potencial - Lei de Ohm									
Força elétrica - Diferença de potencial									
Potencial elétrico - Diferença de potencial									
Potencial elétrico - Lei de Ohm									
Carga elétrica – Campo elétrico									
Potencial elétrico – Carga elétrica									
Carga elétrica - Diferença de potencial									
Lei de Coulomb – Carga elétrica									
Resistência elétrica – Potencial elétrico									
Carga elétrica – Corrente elétrica									
Lei de Ohm – Carga elétrica									
Carga elétrica - Força elétrica									
Campo elétrico – Potencial elétrico									
Diferença de potencial – Campo elétrico									
Campo elétrico - Lei de Coulomb									
Corrente elétrica – Campo elétrico									
Força elétrica – Campo elétrico									
Resistência elétrica – Força elétrica									
Campo elétrico - Lei de Ohm									
Corrente elétrica - Resistência elétrica									
Carga elétrica - Resistência elétrica									
Potencial elétrico - Força elétrica									

Apêndice C

Questionário de reação ao jogo EBPN, versão cartas

	Discordo totalmente	Discordo parcial- mente	Não concordo nem dis- cordo	Concordo parcial- mente	Concordo totalmente
Eu estou confiante com o aprendizado que obtive no jogo					
Depois do jogo, eu consigo compreender conceitos básicos de eletricidade					
Houve momentos em que eu queria desistir do jogo					
Eu alcancei rapidamente os objetivos do jogo					
Eu jogaria novamente o EBPN					
Fiquei torcendo pelo jogo acabar logo					
O jogo foi mais difícil de entender do que eu gostaria					
O desenho das cartas do jogo é atraente					

Polo 09

MNPEF

Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

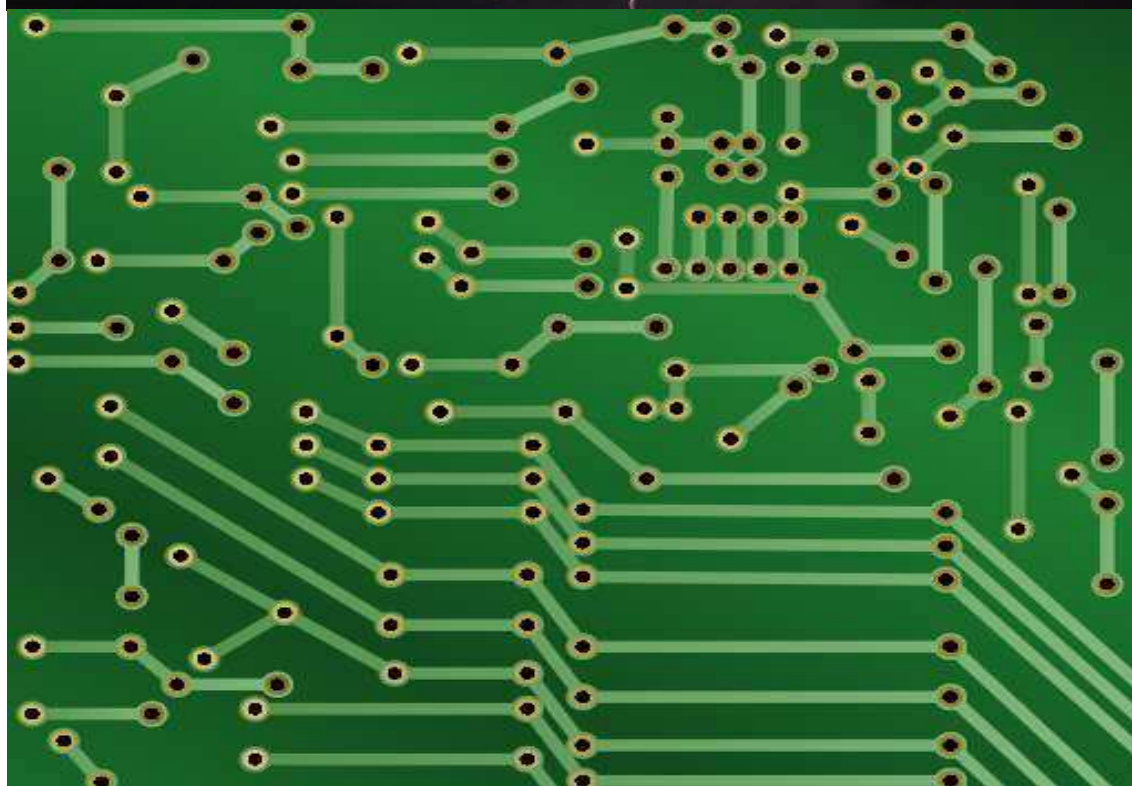
UFERSA

Universidade
Federal Rural
do Semi-Árido



Eletrostática e Eletrodinâmica

Texto ausubeliano para o ensino médio



Eliabe Maxsuel de Aquino, Geovani Ferreira Barbosa,
Carlos Alberto dos Santos

Sumário

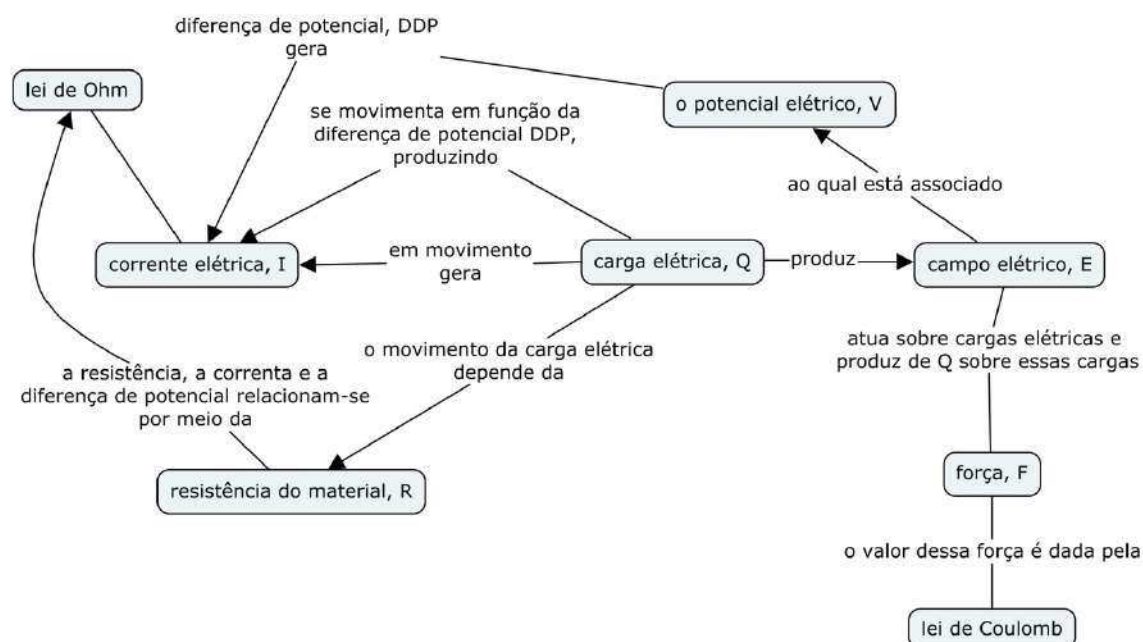
Apresentação	1
Organizador Prévio 1 – Carga e Campo Elétrico	3
Capítulo 1 – Carga Elétrica	7
Organizador Prévio 2 – Potencial Elétrico	21
Capítulo 2 – Campo, Potencial, Força e Energia	23
Organizador Prévio 3 – Corrente Elétrica, Circuitos Elétricos e Lei de Ohm	37
Organizador Prévio 4 - Eletrodinâmica	43
Capítulo 3 – Eletrodinâmica	51
Capítulo 4 – Circuitos Elétricos	63

Organizador Prévio Geral

Eletrostática e Eletrodinâmica

Abordaremos os conceitos de eletrostática e eletrodinâmica de acordo com a teoria de aprendizagem de David Ausubel, segundo a qual, textos introdutórios, denominados Organizadores Prévios, deverão ser apresentados antes de cada capítulo, com uma visão geral e qualitativa do que será tratado. E antes de todos os capítulos, ou seja, no início do curso, um Organizador Prévio Geral deverá ser apresentado com uma visão geral da disciplina.

Esse mapa conceitual contém todos os conceitos a serem abordados na disciplina. Nele, a carga elétrica tem uma posição central, porque é o conceito mais fundamental do eletromagnetismo em geral, e da eletricidade em particular.



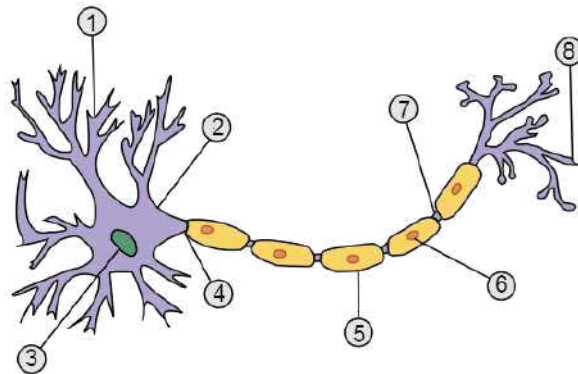
A carga elétrica produz um campo elétrico, e a este está associado um potencial elétrico. Desses três conceitos decorrem todos os fenômenos observados em experimentos de eletricidade:

- ⇒ É por meio do campo elétrico que uma carga exerce força elétrica sobre outra. O valor dessa força é dado pela lei de Coulomb.
- ⇒ É por meio da diferença de potencial que surgem correntes elétricas nos condutores. Estes apresentam certa resistência à passagem da corrente elétrica por meio da sua resistência elétrica. A relação entre diferença de potencial, resistência e corrente elétrica é dada pela lei de Ohm.

Organizador Prévio 1

Carga Elétrica e Campo Elétrico

São poucos os recursos tecnológicos contemporâneos que não fazem uso da eletricidade, que também desempenha papel importantíssimo na medicina, quer seja quanto aos fenômenos biológicos ou quanto aos equipamentos contemporâneos. Para citar apenas alguns exemplos: raios-X, tomografia computadorizada, ressonância magnética nuclear, *pet scan*, ultrassonografia, eletroencefalograma, eletrocardiograma, entre outros. Além disso, praticamente todas as funções e atividades dos corpos dos seres vivos de algum modo envolvem eletricidade. A ação cerebral é basicamente de natureza elétrica. Por exemplo, o neurônio¹, principal componente do nosso tecido nervoso, é uma célula especializada na recepção, interpretação e transmissão de sinais elétricos.



Estrutura básica de um neurônio. (1) Dendrito; (2) Corpo celular; (3) Núcleo; (4) Axônio; (5) Bainha de mielina; (6) Célula de Schwann; (7) Nó de Ranvier; (8) Terminal do axônio. Fonte: Adaptado de "Anatomy and Physiology" by the US National Cancer Institute's Surveillance, Epidemiology and End Results (SEER) Program.

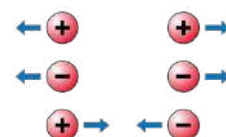
Outro caso biológico interessante, curioso e que continua desafiando os cientistas é o dos peixes elétricos, como esse peixe elétrico azul Cichlid, exposto no aquário de Houston (EUA). A pergunta que ainda não tem resposta consensual é: como eles desenvolvem a habilidade de produzir descargas elétricas? Em um artigo científico publicado recentemente por pesquisadores da Universidade do Texas e da Universidade Estadual de Michigan (EUA), os autores concluíram que o fenômeno tem a ver com mutação genética e com variação de potencial elétrico nos neurônios.



¹ A menos que seja dito o contrário, todas as ilustrações usadas aqui são de domínio público e disponíveis em https://commons.wikimedia.org/wiki/Main_Page.

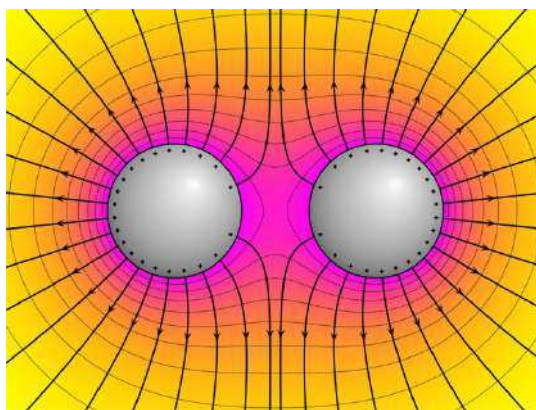
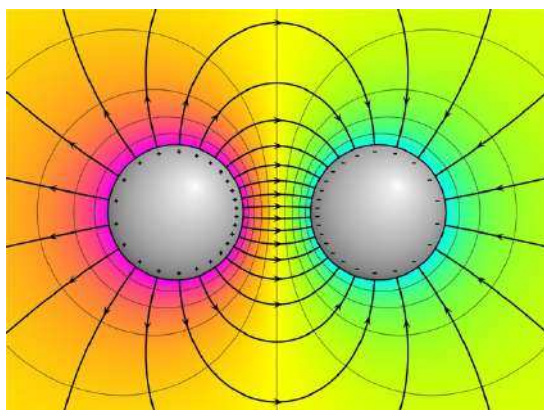
Resumindo tudo isso, podemos dizer que não importa onde ocorra o fenômeno elétrico, ele sempre tem sua origem na existência de cargas elétricas. Isso é assim nos dispositivos eletrônicos, nos equipamentos médicos ou nos fenômenos biológicos em seres vivos. Essencialmente, a carga elétrica existente na natureza vem dos elétrons e dos prótons, componentes básicos dos átomos. Eu disse essencialmente porque na prática é assim, mas na verdade a carga elétrica na natureza também é conduzida por outras partículas elementares. No entanto, essa discussão está além do que vamos estudar nessa disciplina. É certo dizer que tudo que tem a ver com eletricidade termina chegando aos elétrons e prótons. Os elétrons possuem carga negativa e os prótons possuem carga positiva. Essas cargas têm sinais diferentes, mas o valor é o mesmo. Ao longo do curso você vai saber qual é o valor da carga do elétron e do próton.

Cargas de mesmo sinal se repelem, enquanto cargas de sinais contrários se atraem. Como elas se repelem ou se atraem? Por meio da força elétrica.



Você vai aprender que essa força tem um nome: força coulombiana, porque foi Charles Augustin de Coulomb quem descobriu, em 1783, a lei que resulta na fórmula dessa força. Ou seja, a força elétrica entre duas cargas é dada pela lei de Coulomb.

No dia a dia estamos acostumados com força de contato: podemos empurrar ou puxar alguma coisa. No caso da Lei de Coulomb, diz-se que se trata de uma ação à distância, porque as cargas não se tocam. Mas, essa ideia de ação à distância desagradou muita gente, até que na década de 1830 Michael Faraday introduziu a ideia de campo elétrico, que estabelece o contato entre as cargas. Ou seja, uma carga cria um campo elétrico, e esse age na outra carga, produzindo a força de atração ou repulsão.



A atração entre as cargas se manifesta na continuidade das linhas do campo entre elas, enquanto na repulsão as linhas de campo se repelem no espaço entre as cargas.

Então, vou refazer a frase que coloquei acima: Tudo que tem a ver com eletricidade termina chegando na carga e no campo elétrico.

Capítulo 1

Carga Elétrica

Você viu nos Organizadores Prévios, que os dois conceitos mais importantes da eletricidade são a carga elétrica e o campo elétrico. A carga elétrica gera um campo e a partir daí seguem-se todos os fenômenos da eletricidade. Vamos tratar neste capítulo especificamente da carga elétrica. De onde ela surge e como os corpos podem ser eletricamente carregados.

De acordo com os conhecimentos da física contemporânea, a carga elétrica na natureza é transportada por diferentes tipos de partículas elementares, sendo, nesse contexto, o elétron a principal delas. Embora muito importantes para a física das partículas elementares, os léptons e os quarks não precisam ser considerados em uma abordagem elementar da eletricidade. Ou seja, vamos nos concentrar aqui tão somente no elétron e no próton, que não é uma partícula elementar, mas é constituída de quarks que lhe conferem uma carga elétrica igual em valor e oposta em sinal à carga do elétron.

Se elétrons e prótons são os principais portadores de carga elétrica na natureza, onde eles se encontram?



Sabemos hoje que essas partículas, juntamente com os nêutrons são os componentes básicos do átomo. Embora a humanidade tenha mais de 130 mil anos de existência, desde o surgimento do homo sapiens, ou mais de 5 mil anos desde os egípcios, ou mais de 4 mil anos desde os gregos, essa ideia de que o átomo é constituído de prótons, nêutrons e elétrons só foi consolidada entre 1897 e 1932.

Em 1897, Joseph John Thomson descobriu que a carga negativa que se observava em diversos experimentos da física era transportada por uma partícula que George Francis Fitzgerald sugeriu ser denominada elétron, porque em 1891, George Johnstone Stoney tinha usado esse termo para designar a unidade de carga em experimentos nos quais ele passava corrente elétrica através de produtos químicos.



Entre 1908 e 1911, Ernest Rutherford, realizou experimentos que o levaram a propor o modelo atômico que foi desenvolvido por Niels Bohr. Neste modelo, o átomo seria constituído de um núcleo muito pequeno e pesado, em torno do qual orbitariam os elétrons.

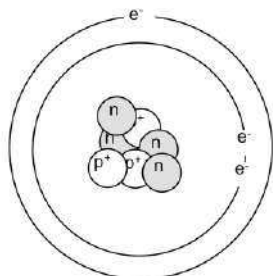


Em 1919, Rutherford descobriu que o núcleo continha uma partícula que ele denominou próton, com carga elétrica positiva e muito mais pesada que o elétron, mas que poderia conter outra partícula, neutra, com massa similar à do próton.



Em 1932, seu colaborador James Chadwick descobriu essa partícula, que foi denominada nêutron.

Mas, para chegar a esta fase gloriosa de 35 anos (1897–1932), filósofos e cientistas, desde os gregos, como Tales de Mileto (625–547 a.C.) e Aristóteles (384–322 a.C.), até John Dalton (1766–1844), desenvolveram vários modelos atômicos. Esses modelos fazem parte da história, e não é objetivo nesta disciplina estudá-los. Eles são apresentados nas disciplinas de química. Aqui usaremos apenas o modelo de Bohr, sugerido por Rutherford.



Resumindo tudo isso, podemos dizer que a matéria é constituída de átomos, e que esses são constituídos de um núcleo muito pequeno, contendo prótons e nêutrons, em torno do qual, em grandes distâncias, orbitam os elétrons. Do ponto de vista atômico, podemos dizer que a matéria é um grande vazio. Mas, o que interessa para a nossa disciplina, é que a carga positiva se concentra no núcleo, e a carga negativa fica zigzagueando em torno dele. Em condições normais, o átomo é eletricamente neutro, porque o número de prótons é igual ao de elétrons.

Podemos imaginar que nesse modelo a força de atração entre prótons e elétrons é a força coulombiana que você vai estudar no próximo capítulo, e vai ver que os elétrons mais afastados do núcleo são fracamente atraídos por ele, de modo que podem facilmente sair do átomo. Esses elétrons livres são os responsáveis pela corrente elétrica nos condutores.

Quando um elétron sai do átomo, ele o deixa com um próton a mais do que o número de elétrons, de modo que agora o átomo é



positivo. Os átomos que perdem elétrons são denominados íons. Eles estão ionizados.

Se esses elétrons menos ligados ao núcleo podem se liberar do átomo, eles também podem passar de um corpo a outro? Podem. Essa passagem dá origem ao que denominamos de processos de eletrização e condutividade. Os relâmpagos que vemos nas nuvens resultam de processos de transferência de cargas elétricas entre elas. O funcionamento dos diversos motores e equipamentos eletrônicos decorre da condutividade elétrica, ou seja, do movimento de elétrons no interior dos condutores e dos semicondutores.



Condutores e isolantes

Como os elétrons se movimentam nos materiais?



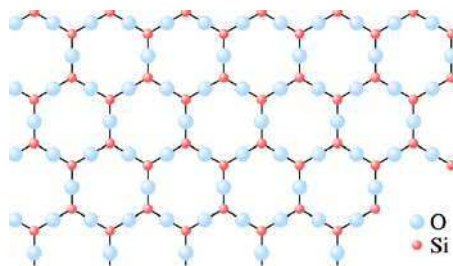
Essa é a questão básica que alimenta toda a ciência e a tecnologia da eletricidade. Para discuti-la temos que reconhecer os diferentes tipos de materiais. Mas, são tantos os tipos de materiais na natureza, que para simplificar nossa abordagem didática temos que fazer algumas restrições. Começaremos restringindo o estado da matéria.

Entre sólido, líquido e gasoso, vamos ficar com os materiais sólidos. Entre orgânicos e inorgânicos, vamos ficar com os materiais inorgânicos. Com isso serão excluídos os materiais biológicos. Entre os materiais sólidos conhecidos, condutores, isolantes, semicondutores e supercondutores, vamos ficar com os condutores e isolantes, ou dielétricos. Você vai perceber que essas duas denominações serão usadas aqui. Isolante é a mesma coisa que dielétrico, mas usaremos as duas palavras indistintamente para você se acostumar com elas.

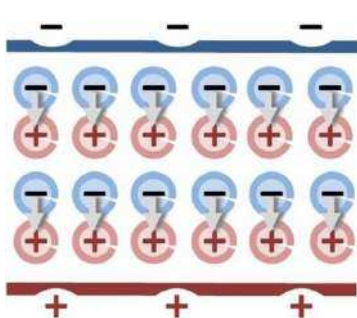
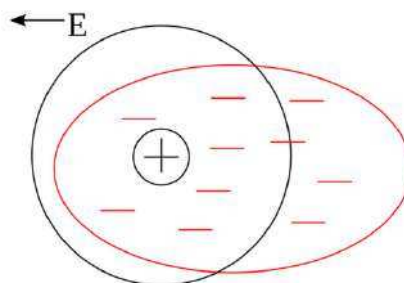
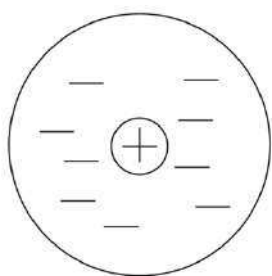
A forma mais elementar de definirmos um material condutor, é dizer que ele tem facilidade de conduzir corrente elétrica. De modo análogo, dielétrico é um material que não conduz corrente elétrica.

Essas duas definições são simples demais, e não nos ajudam a entender os fenômenos mais elementares da eletrostática e da eletrodinâmica. Então, vamos melhorar as definições.

Nessa estrutura do quartzo (SiO_2), que é um material isolante, os núcleos atômicos permanecem praticamente imóveis nas posições indicadas para os átomos de silício (Si) e oxigênio (O).



Em condições normais, os elétrons distribuem-se homogeneamente em torno de cada núcleo. Mas, se um campo elétrico for aplicado, a distribuição de elétrons fica distorcida. Como o quartzo é um dielétrico, essa distribuição distorcida fica localizada em alguns pontos na superfície e no interior do material. Como essas cargas estão localizadas, ou quase estáticas, diz-se que estamos em uma situação eletrostática. Se o quartzo fosse um material condutor, os elétrons se espalhariam por toda a superfície.



Portanto, no caso dos dielétricos, diz-se que as moléculas ficam polarizadas quando se aplica um campo elétrico. As cargas positivas ficam em um lado, e as negativas no lado oposto, em relação ao centro da molécula. É essa imagem de moléculas polarizadas que pode ser usada para explicar alguns fenômenos da eletrostática, discutidos ao final deste capítulo, e também no capítulo 3.



Nos materiais dielétricos, os elétrons praticamente não se afastam dos núcleos atômicos.

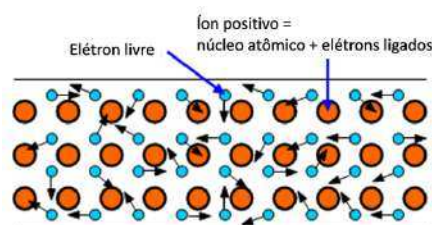
A situação é completamente diferente no caso dos materiais condutores. O que sabemos hoje sobre a condutividade elétrica em materiais metálicos, como ferro, níquel, entre outros, resulta de estudos realizados a partir do século 19. Como qualquer material, os condutores são constituídos de átomos, e estes são constituídos de prótons, nêutrons e elétrons. Prótons e elétrons têm cargas

elétricas iguais em valor e de sinais contrários. O próton é positivo, e o elétron é negativo. Em condições normais, o número de prótons é igual ao de elétrons em cada átomo. Portanto, em condições normais a matéria é eletricamente neutra.



Tudo o que foi dito no parágrafo anterior, vale para todos os materiais. Agora vamos começar a distinguir os condutores.

Ao contrário dos dielétricos, nos condutores os elétrons têm liberdade para se locomoverem para longe dos núcleos aos quais estavam ligados. Bem, nem todos os elétrons têm essa liberdade, mas os que têm já são suficientes para produzirem os fenômenos da eletrodinâmica, sendo o surgimento da corrente elétrica o principal deles.



Esses elétrons que têm liberdade de se locomoverem para longe do núcleo são denominados elétrons livres. Há outra expressão referente a eles: mar de elétrons de Fermi. Enrico Fermi, físico italiano foi quem desenvolveu esse modelo. Praticamente todos os fenômenos da eletrodinâmica estão relacionados com esse mar de elétrons.



Não esqueça. A eletrodinâmica tem tudo a ver com o movimento dos elétrons livres.

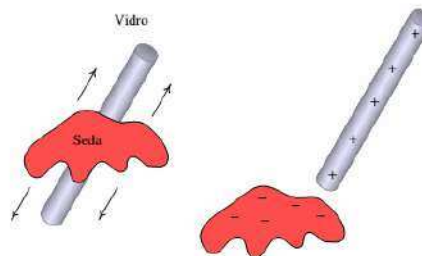
Eletrização por atrito ou contato em dielétricos

Tudo indica que a eletrização por atrito foi o primeiro processo descoberto pelo homem, e é por isso considerado como o início da história da eletricidade. Trata-se de um fenômeno muito mais complexo do que a ideia que os livros didáticos costumam apresentar. Portanto, convém que se tenha em mente que a

abordagem que aqui será apresentada é uma simplificação do conhecimento científico disponível.

Os relatos históricos indicam que foi em Mileto, antiga Grécia, onde hoje situa-se a Turquia, que o fenômeno da eletricidade estática, ou eletrostática, foi observado em um experimento de eletrização por atrito. Isso ocorreu 600 anos antes da era cristã, e o experimento foi realizado por Tales, que ficou conhecido como Tales de Mileto. O experimento foi feito com âmbar, uma resina de árvore fossilizada. Depois que esfregou um pedaço de âmbar com peles de animais, Tales percebeu que o âmbar atraía pequenos objetos, como penas. Como a palavra âmber significa elétron em grego, aquele fenômeno deu origem ao que passou a se chamar eletricidade. Mais de dois mil anos depois a palavra foi usada para denominar a partícula elementar que transporta a menor carga elétrica na natureza, o elétron.

Nas aulas de física, o experimento é geralmente realizado com um bastão de vidro ou plástico, atritado com um pano de seda. Nesse caso, elétrons são transferidos do bastão, que fica positivo, para o pano, que fica negativo.



Você pode fazer outro experimento, de modo mais simples. Coloque pequenos pedaços de papel sobre uma mesa. Depois use um rolo de filmes de PVC, desses usados para embalar comida. Puxe uma ponta do filme e aproxime dos pedaços de papel. Alguns desses papéis serão atraídos e grudarão no filme.

De um modo geral, os livros didáticos do ensino médio apenas relatam o que acontece, como foi feito acima, sem qualquer explicação de como o fenômeno ocorre. Essa posição dos autores de livros didáticos é compreensível porque o fenômeno é realmente muito complexo. Mesmo depois de mais de 2600 anos de sua descoberta, ainda não há consenso na comunidade científica sobre sua explicação, embora seja um fenômeno bastante presente na tecnologia contemporânea. Antes de apresentarmos qualquer explicação para o processo de carga por atrito, devemos abordar o modelo atômico da matéria.

Você já sabe, a matéria é constituída de átomos, cujo modelo adotado aqui é o de Bohr. Quando os átomos são colocados juntos para formar determinado material, seus núcleos ficam praticamente imóveis, enquanto alguns elétrons têm uma certa liberdade para se deslocarem no material, e até mesmo podem sair do material. Esses elétrons são conhecidos como elétrons quase livres. Eles são os responsáveis pela corrente elétrica.



Mas, exatamente como os elétrons passam de um corpo a outro?

No caso de materiais condutores a explicação não é tão difícil. Veremos isso mais adiante. A explicação difícil é para o caso de materiais dielétricos.

De um modo geral, os livros didáticos apresentam essa questão referindo-se ao atrito entre dois materiais isolantes diferentes. Na verdade, isso também acontece com materiais idênticos, e eventualmente nem é necessário o atrito. Basta o contato. Um exemplo fácil de se comprovar foi citado acima. É o caso de um rolo de filme de PVC. Quando separamos uma folha do rolo, ela fica carregada. Basta aproximarmos do nosso braço para observarmos o efeito da carga elétrica sobre os cabelos.



Mais acima você viu uma ilustração do processo de eletrização por atrito com um pedaço de seda, que ficou negativa, e um bastão de vidro que ficou positivo. Elétrons foram transferidos do vidro para a seda.



Por que alguns materiais ficam positivos e outros negativos?

Isso tem a ver com uma propriedade que se aprende na química: a eletronegatividade, que é a tendência que um átomo possui para atrair elétrons. Quanto maior a eletronegatividade, maior a possibilidade de um material ficar negativo quando atritado contra outro com menor negatividade. Materiais vêm sendo investigados a esse respeito desde o início do século 20, cujos resultados permitiram a elaboração do que se chama de série triboelétrica. Triboeletricidade é o termo



usado para se referir a todos os fenômenos da eletricidade por atrito.

É por isso que o vidro fica positivo no atrito com a seda, como se vê na ilustração acima.

Se o vidro fosse atritado com o couro ou com a pele humana seca, ele ficaria negativo.



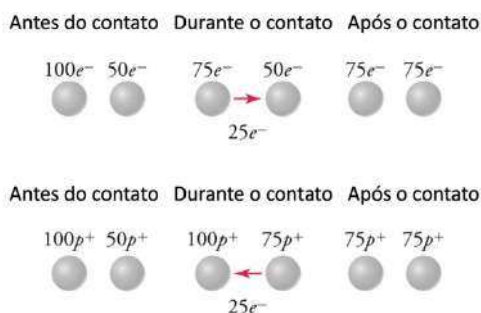
Por que a pele deve estar seca?

Porque a humidade facilita o escoamento de elétrons para o meio ambiente, de modo que dificilmente os corpos ficam carregados. É por isso que os experimentos de eletrostática devem ser realizados em ambientes secos.

Eletrização por contato em condutores

Você já sabe que diferentemente dos isolantes, nos condutores existem muitos elétrons que podem se mover livremente. Além disso, em condições normais os materiais são eletricamente neutros. Ou seja, a quantidade total de prótons e elétrons é a mesma. O que acontece quando duas peças condutoras são colocadas em contato? Elas passam a formar uma única peça condutora. Se uma das peças estiver carregada, ou as duas, o que vai ocorrer é a redistribuição de cargas entre as peças, de modo que a quantidade total de carga permaneça a mesma. Isso é o que se chama de conservação da carga.

Essa ilustração, adaptada da Texas Gateway¹, é ótima para explicar o fenômeno. A transferência de carga depende das dimensões dos materiais, mas, para simplificar, vamos considerar que as esferas têm as mesmas dimensões.



¹<https://www.texasgateway.org/resource/181-electrical-charges-conservation-charge-and-transfer-charge>.

No primeiro caso, uma esfera tem 100 elétrons, enquanto a outra tem 50 elétrons. Portanto, no final do processo as duas esferas deverão conter no total 150 elétrons. Durante o contato, a primeira esfera fornece 25 elétrons para segunda. Quando todos os elétrons se distribuírem nas duas esferas, teremos o equilíbrio eletrostático, com os elétrons ocupando as duas superfícies. Quando as esferas forem separadas, cada uma ficará com 75 elétrons.

No segundo caso, as esferas estão com cargas positivas. A segunda esfera transfere 25 elétrons para a primeira. No final do processo, quando elas forem separadas, ambas ficarão com 75 prótons.

Se as esferas tiverem cargas de sinais contrários, o procedimento é similar. Soma-se algebricamente as duas e divide-se o total em duas partes.



Atenção! Esses cálculos só valem para o caso de duas esferas com as mesmas dimensões

Para calcular as cargas elétricas dos exemplos acima, basta multiplicar o número de elétrons ou de prótons, pelo valor da carga elementar, que é a carga do elétron ou do próton: $1,6 \times 10^{-19}$ C. Essa unidade de carga elétrica é Coulomb.

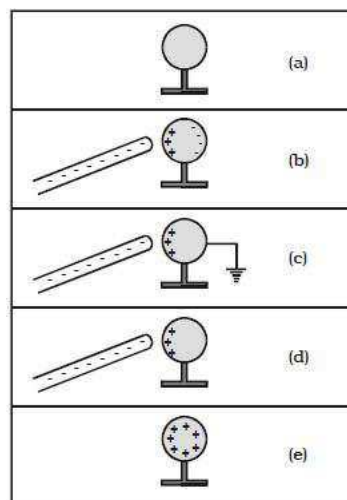
Uma pergunta natural a essa altura: por que os elétrons migram para a superfície e distribuem-se homogeneamente em toda a esfera? Tem uma única finalidade: deixar o condutor em equilíbrio eletrostático. Ou seja, sem grandes movimentos de cargas. Isso só será possível se o campo elétrico no interior do condutor for nulo. Veremos no capítulo 2 como isso funciona.



O campo elétrico no interior de uma esfera condutora carregada será nulo se a carga for distribuída homogeneamente na superfície.

Eletrização por indução em condutores

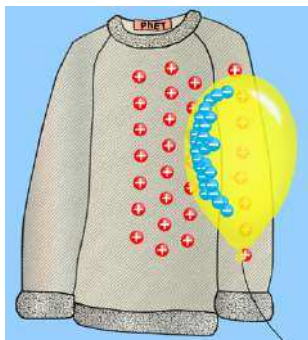
Você já sabe que nos condutores existem muitos elétrons livres, e que eles se movimentam facilmente. Qualquer campo elétrico, por pequeno que seja, leva-os a se deslocarem ao longo do condutor. Está aí a fonte da eletrização por indução em condutores. Nessa imagem, um bastão negativamente carregado aproxima-se de uma esfera eletricamente neutra. O bastão pode ser condutor ou isolante, mas a esfera tem que ser condutora. Elétrons livres da esfera deslocam-se para o lado mais afastado do bastão. Se a esfera for ligada à terra, os elétrons livres escoarão e deixarão um excesso de carga positiva na esfera. Se o bastão for afastado para muito longe, elétrons livres ainda existentes na esfera se redistribuirão na superfície da esfera, de modo que o excesso de carga positiva fique homogeneamente distribuída na superfície.



Alguns experimentos didáticos de eletrostática

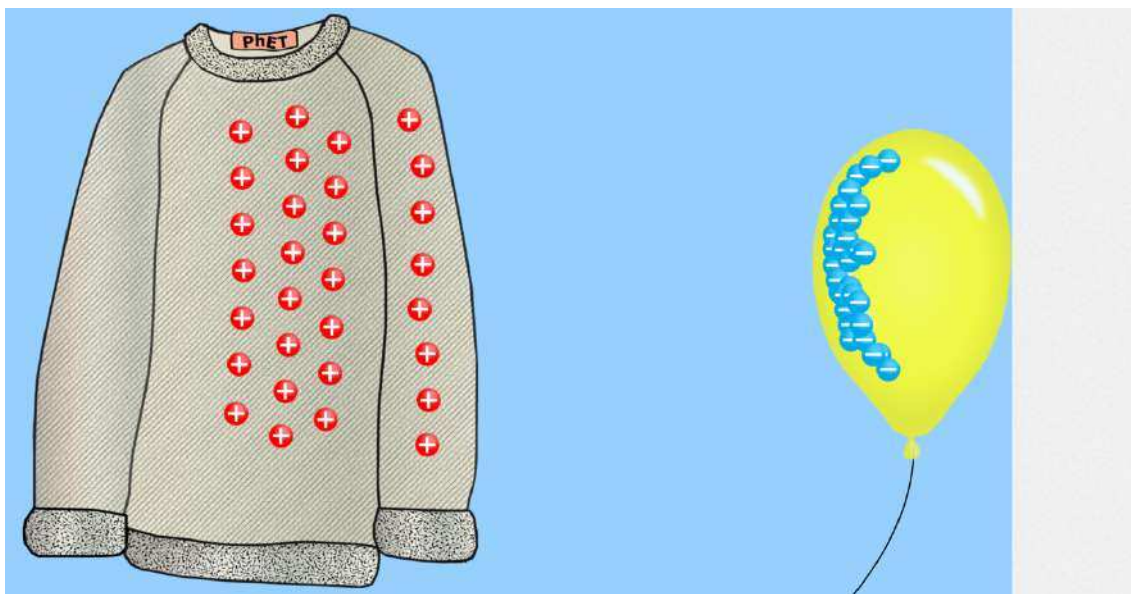
Experimentos de eletrostática devem ser realizados em ambiente seco, porque a humidade permite o escoamento de elétrons do material carregado para o ar, e vice-versa. Mas, é possível apreciar esses experimentos com a utilização de simulações computacionais. Um dos melhores repositórios de simulações de física é o PhET (<https://phet.colorado.edu>), da Universidade do Colorado.

Vamos ver o que acontece quando um balão de plástico é atritado contra um casaco de lã. Tanto um quanto um quanto o outro estão eletricamente neutros.

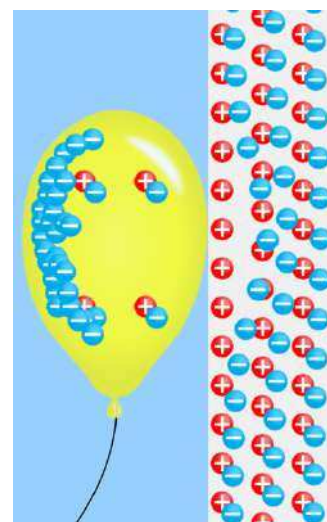


Depois do atrito, elétrons migram do casaco para o balão. Esse é o sentido da migração porque a eletronegatividade da borracha é maior do que a da lã. É por isso também que na série triboelétrica, a lã fica mais perto do lado positivo, enquanto a borracha fica mais perto do lado negativo.

Se depois de carregado, o balão for afastado do casaco e colocado nas proximidades de um muro, ele fica grudado. Por quê?



A explicação tem a ver com o processo de polarização mencionado acima. O muro é isolante, de modo que é pequeno o deslocamento de seus elétrons. O resultado é que as moléculas ficam polarizadas. A polarização é tanto maior, quanto mais próxima estiver a molécula do material carregado. Isso está bem ilustrado na figura. As cargas negativas do balão são atraídas pelas cargas positivas do muro que estão mais próximas da superfície e repelidas pelas cargas negativas que estão um pouco mais afastadas da superfície do muro. No capítulo 3 você vai descobrir que a força de atração é maior do que a de repulsão. É por isso que o balão fica grudado no muro.



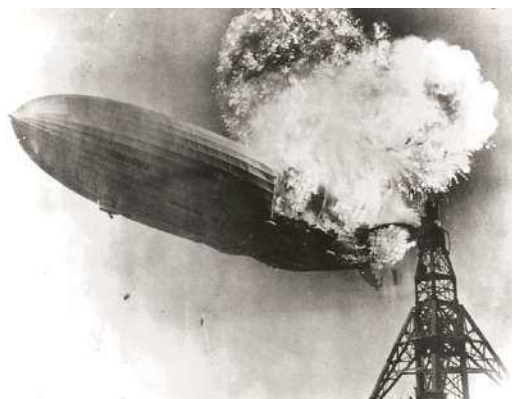
Eletrostática no dia a dia

Para você ter ideia da importância da eletrostática, vamos apresentar algumas situações do dia a dia, bem como algumas aplicações tecnológicas contemporâneas. No início do capítulo você viu que os relâmpagos que vemos em dias de tempestade resultam de processos de descargas elétricas entre nuvens.

No início do século 20, o Conde alemão Ferdinand Von Zeppelin começou a construir os dirigíveis que ele inventou por volta de 1874. Esses dirigíveis eram popularmente conhecidos como Zepelins, e voavam graças ao seu tanque cheio de gás hidrogênio. Foram fabricados vários modelos, sendo esse da foto, o LZ



129 Hindenburg, o mais famoso, que teve um fim trágico. Depois do acidente com esse modelo, em 1937, o hidrogênio foi substituído pelo gás hélio.



Hindenburg.

A principal hipótese do incêndio durante a manobra de pouso, em Nova Jersey, nos EUA, é de que o dirigível ficou eletricamente carregado depois de atravessar uma tempestade. Durante o pouso, houve uma descarga elétrica e por coincidência houve também uma falha em uma das válvulas de hidrogênio. Rapidamente a faísca provocou o incêndio que destruiu o

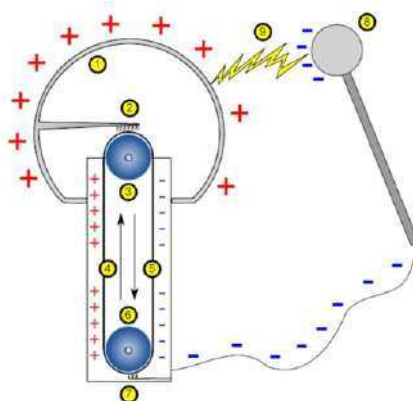
Assim como esse acidente com o dirigível Hindenburg, descargas eletrostáticas podem provocar acidentes em ambientes onde materiais combustíveis estão presentes, por exemplo vazamento de gás pode resultar em explosão se houver alguma faísca elétrica no ambiente.

A mais importante aplicação comercial baseada na triboeletricidade talvez seja a máquina Xerox, inventada por Chester Carlson em 1938, que originou todas as copiadoras a laser. Na figura, o primeiro equipamento, construído em 1942. Seu funcionamento é muito complexo para ser apresentado aqui.



Outra importante aplicação é o gerador Van de Graaff, bastante usado em demonstrações didáticas, mas que foi inventado em 1929 como fonte de alta tensão para aceleradores de partículas.

Na fotografia, o Van de Graaff do primeiro acelerador de partículas da Hungria, construído em 1951. Na fotografia abaixo, um Van de Graaff para uso didático, e ao lado o esquema de funcionamento.



1. Esfera metálica oca (com cargas positivas);
2. Eletrodo conectado à esfera. Uma escova garante o contato entre o eletrodo e a correia de borracha (4 e 5);
3. Rolo superior (acrílico);
4. Lado da correia com cargas positivas;
5. Lado oposto da correia, com cargas negativas;
6. Rolo inferior (metal);
7. Eletrodo inferior, ligado à terra;
8. Esfera com cargas negativas, usada para descarregar a esfera principal;
9. Centelha produzida pela diferença de potencial entre a esfera principal e esfera pequena.

A correia de borracha (4,5) desliza, por meio de um motor, entre dois rolos (3,6), um de acrílico (3) e outro de metal (6). O atrito entre a correia e os rolos provoca a transferência de elétrons de um para o outro. Como a borracha é mais eletronegativa do que o acrílico, ela fica negativa depois do atrito, enquanto o rolo de acrílico fica positivo. Quando a correia passa sobre o eletrodo inferior (7), essas cargas negativas escoam para a terra. A correia fica positiva. Quando ela passa pelo eletrodo superior (2), ela captura elétrons da esfera oca (1), que fica positiva. A partir daí o processo se repete.

Com o tempo, a carga acumulada na esfera superior é tão grande que produz enorme potencial elétrico, acima de 30 mil volt (no próximo capítulo você

vai saber o que é um potencial elétrico). Esse enorme potencial gera faíscas entre a esfera superior e objetos nas suas proximidades, carregados, como a esfera menor, que está negativamente carregada ou mesmo entre a esfera e uma parte do corpo humano.



Organizador Prévio 2

Potencial Elétrico

Depois da carga elétrica e do campo elétrico, o conceito mais importante da eletricidade é o de potencial elétrico. É tão importante quanto conceitualmente difícil de entender. Os livros didáticos geralmente o apresentam a partir de relações matemáticas com a carga elétrica e com a energia elétrica. Talvez a falta de uma abordagem qualitativa justifique os inúmeros equívocos apresentados por alunos de todos os níveis, do ensino médio aos cursos de engenharia. Nesse texto introdutório, que denominamos de organizador prévio, vamos tratar o conceito de potencial elétrico a partir de uma abordagem qualitativa antes de introduzir sua conexão formal com a carga e a energia elétrica.

Na linguagem coloquial, o termo potencial é frequentemente usado para se referir à capacidade que uma pessoa tem para realizar algo, para atingir determinada meta. Sobre um bom aluno no colégio diz-se que tem potencial para ter sucesso na vida profissional. Podemos dizer que essa capacidade de realizar algo na linguagem cotidiana, tem a ver com a ideia da energia potencial como a capacidade de realizar trabalho.

Antes desse curso você estudou as leis de Newton e aprendeu que a força gravitacional entre duas massas é diretamente proporcional ao produto das massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas. Na unidade anterior da nossa disciplina você aprendeu que a força coulombiana entre duas cargas tem a mesma forma da força gravitacional. Ou seja, a força eletrostática entre duas cargas elétricas é diretamente proporcional ao produto das cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas. Você já sabe que esta força será de atração se as cargas tiverem sinais diferentes, e de repulsão quando os sinais forem iguais.

Você aprendeu que a forma da força gravitacional leva ao teorema da conservação da energia mecânica (energia cinética + energia potencial). E tudo isso tem a ver com o potencial gravitacional. Então, tudo que aprendemos com o potencial gravitacional pode ser inteiramente transposto para o caso do potencial elétrico. Mais do que isso, toda a energia no universo é essencialmente consequência das interações fundamentais:

1. Interação gravitacional;
2. Interação eletromagnética;
3. Interação nuclear.

No estado latente, quando recebe a denominação de energia potencial, a energia depende unicamente da configuração da matéria envolvida. Ou seja, da

distribuição de massas no caso gravitacional, de cargas elétricas no caso eletromagnético e de partículas elementares, prótons e nêutrons no caso nuclear. Em suma, como bem definiu Rankine em 1867:

1. Energia potencial é uma energia de configuração;
2. Energia cinética é uma energia de atividade, ou de movimento.

Muita gente pensa que o potencial elétrico depende das propriedades dos componentes de um circuito elétrico. Não depende. O potencial só depende da existência de cargas elétricas. Havendo carga elétrica em algum ponto do espaço, haverá potencial em sua volta. Mais adiante você vai ter a oportunidade de analisar melhor essa questão.

Por exemplo, você vai aprender que não é necessário ter uma corrente elétrica para ter um potencial em qualquer ponto de um fio condutor. Ou seja, não é a corrente elétrica que produz o potencial, ou a diferença de potencial. É o contrário. É a diferença de potencial que produz a corrente. Então, se o potencial em dois pontos de um circuito for o mesmo, não haverá corrente entre esses dois pontos. Só quando há diferença de potencial, o que também denominamos como voltagem, é que haverá corrente. Podemos dizer isso de outro modo: a diferença de potencial, ou a voltagem, produz o movimento das cargas elétricas, e esse movimento dá origem à corrente elétrica.

Muitos livros didáticos levam seus leitores a pensarem que na eletricidade a corrente elétrica é um conceito primário. Não é! O conceito primário é a carga elétrica. Depois vem o campo elétrico que ela produz. A partir do campo elétrico tem-se o potencial elétrico, e só então surge a corrente elétrica. A corrente elétrica surge apenas quando há diferença de potencial, ou voltagem, entre dois pontos de um circuito elétrico. Ou seja, é a diferença de potencial que faz surgir a corrente em um circuito elétrico.

Capítulo 2

Campo, Potencial, Força e Energia

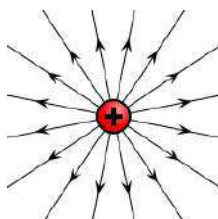
O conceito de campo elétrico

No capítulo anterior você trabalhou com o conceito mais fundamental da eletricidade, a carga elétrica. Você aprendeu que a carga elétrica elementar é transportada pelo elétron (carga negativa) e pelo próton (carga positiva), e que essas duas partículas formam o átomo. O próton fica no núcleo atômico, e o elétron fica se movimentando em volta do núcleo. Em seu estado natural, o átomo é eletricamente neutro. Ou seja, tem no interior do núcleo o mesmo número de prótons que o de elétrons em volta dele. Cada átomo tem um número de prótons bem determinado. Esse número de prótons é denominado de número atômico. Assim, o número atômico do hidrogênio é 1, porque só há um próton no núcleo do hidrogênio. O número atômico do cobre é 29, porque ele tem 29 prótons e 29 elétrons. É de cobre que são feitos muito dos condutores usados em circuitos elétricos.

Para facilitar o tratamento matemático desses conceitos de campo e potencial, é conveniente fazer cálculos com cargas pontuais, em vez de trabalhar com materiais reais, macroscópicos, como um pedaço de fio. E também para exercitar, convém trabalhar com cargas pontuais de diferentes valores, não exatamente um múltiplo da carga do elétron, que é $1,6 \times 10^{-19}$ C, embora na natureza todas as cargas elétricas sejam iguais a um múltiplo da carga do elétron. Mais importante do que isso, podemos fazer cálculos algébricos, com letras em lugar de números.



Em quase todos os livros didáticos, a interação entre cargas elétricas é representada pela força entre elas, matematicamente expressa pela lei de Coulomb. Trata-se do que se chama de ação à distância. Mas, nos anos 1830 Michael Faraday criou a ideia de campo elétrico e campo magnético, ou campo eletromagnético, e a ideia de ação à distância foi substituída pela ideia de ação por intermédio do campo.



O processo é assim. Primeiro a carga cria em volta de si seu campo elétrico. Se ela estiver em movimento também cria seu campo magnético, mas isso é outra história. Vamos ficar apenas com o campo elétrico. O campo elétrico é visualmente representado pelas suas linhas de força. Se a carga for positiva (negativa), as linhas de força apontam para fora (dentro) da carga. Se houver outra carga nas proximidades da primeira, o campo desta atua sobre a segunda, exercendo uma força dada pela lei de Coulomb. É claro que por simetria, a segunda

carga também cria seu campo, que exercerá uma força igual e de sentido contrário sobre a primeira carga.



Faraday criou a ideia de campo elétrico e campo magnético. Einstein usou a ideia na sua teoria da gravitação para substituir o conceito de interação à distância pelo de interação via campo.

A Figura 2.1 ilustra bem a situação para o caso de duas esferas metálicas. A maior, carregada positivamente, tem suas linhas de campo apontando para fora, enquanto a menor, com carga negativa tem as linhas de campo apontando para o centro da carga. Essas linhas são denominadas linhas de campo ou linhas de força. A razão dessa segunda denominação, é que se uma pequena carga, também conhecida como carga de prova, for colocada em algum ponto da linha, a força sobre ela a fará se deslocar ao longo da linha. Essa carga de prova deve ser tão pequena, que seu campo, igualmente pequeno não interfira no campo da carga maior. Neste sentido, a esfera pequena na Figura 2.1 não é uma carga de prova.

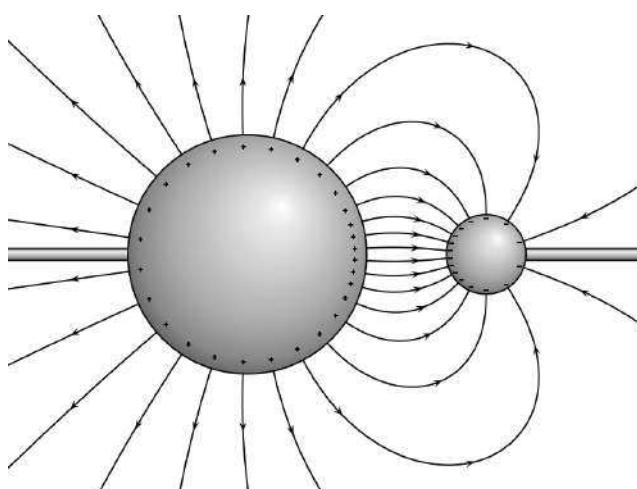
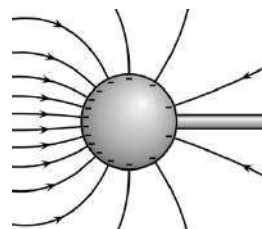


Figura 2.1 – Linhas de campo elétrico de duas esferas metálicas carregadas. As linhas da carga positiva apontam para fora de carga, enquanto as da negativa apontam para a carga (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:VFPT_metal_balls_large_small.svg).



Observe que as cargas se distribuem uniformemente nas duas esferas metálicas da figura 2.1.

Vejamos agora como quantificar a ideia de campo elétrico. Graficamente, o valor do campo elétrico é dado pela densidade de linhas de força. Nessa ilustração, o campo à esquerda da esfera negativa é muito maior do que à direita, porque tem mais linhas de força na mesma unidade de área da esfera. Mas, exatamente quanto vale o campo em determinado ponto? Ou seja, quanto vale o campo a uma distância r de uma carga Q ?



É possível mostrar experimentalmente que o valor do campo é dado por:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} = k \frac{Q}{r^2}. \quad (2.1)$$

Nesta fórmula usamos a definição da constante dielétrica, $k = 1/4\pi\epsilon_0$, que será usada em todas as fórmulas daqui em diante. Seu valor é, aproximadamente, $k=9 \times 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$.

Assim como a força (qualquer que seja sua natureza) e o campo gravitacional, o campo elétrico tem uma direção e um sentido bem determinados. Ou seja, além do valor calculado pela equação (2.1), que representa o módulo do campo, este tem uma direção e um sentido. As grandezas físicas que além de um valor escalar, ou módulo precisam de uma direção e um sentido para serem totalmente caracterizadas são denominadas de grandezas vetoriais. Portanto, assim como a força, o campo elétrico é uma grandeza vetorial, ou simplesmente um vetor. A direção e o sentido do vetor campo elétrico são os mesmos da força elétrica. Ou seja, para uma carga puntiforme positiva (negativa), ele aponta para fora (dentro) da carga, como ilustrado na Figura 2.1.

O conceito de potencial é muito complexo, razão pela qual os livros didáticos do ensino médio tentam abordar a eletricidade explorando a corrente

elétrica como se ela fosse um efeito primário. Não é. A corrente é consequência da existência do potencial, ou, mais precisamente, da diferença de potencial. A propriedade elétrica primária é a carga elétrica, que produz o campo elétrico e o potencial elétrico.

O conceito de potencial elétrico

Você aprendeu, no Organizador Prévio 2, que depois da carga elétrica e do campo elétrico, o conceito mais importante da eletricidade é o de potencial elétrico. Aprendeu também que se trata de um conceito tão importante quanto conceitualmente difícil de entender.

Na linguagem coloquial, o termo potencial é frequentemente usado para se referir à capacidade que uma pessoa tem para realizar algo, para atingir determinada meta. Sobre um bom aluno no colégio diz-se que tem potencial para ter sucesso na vida profissional. Essa capacidade de realizar algo na linguagem cotidiana, de fato tem a ver com a ideia da energia potencial como a capacidade de realizar trabalho. E praticamente todos os livros didáticos abordam o potencial elétrico a partir da sua relação com a energia potencial, o que está correto. Foi assim que a ideia do potencial elétrico surgiu, mas do ponto de vista conceitual mais fundamental, o potencial tem a ver com o campo elétrico. A partir da relação do potencial com o campo, chega-se à energia potencial.

É assim: carga gera campo. Existindo um campo, existirá um potencial. Se existir uma diferença de potencial, haverá movimento de cargas. É a origem da corrente elétrica.



O conceito de potencial elétrico é muito importante em várias áreas da medicina. É por isso que devemos dominar seu conhecimento. Por causa da dificuldade matemática para estudar este conceito detalhadamente, podemos definir, sem provar, o potencial a uma distância, r , de uma carga Q :

$$V = k \frac{Q}{r} \quad (2.2)$$

Substituindo a equação (2.2) em (2.1), obtém-se a relação entre campo e potencial:

$$V = Er \quad (2.3)$$

Antes de abordarmos as relações matemáticas do conceito de potencial envolvendo força e energia, convém aprofundarmos qualitativamente este importante conceito da eletricidade. Essa discussão qualitativa vai lhe ajudar a compreender melhor muitos dos exercícios que terá que fazer nessa disciplina, no exame do ENEM e também em vestibulares.

No capítulo 3 você vai estudar circuitos elétricos simples. Vai aprender que a corrente elétrica em um circuito resulta da ação de uma *força eletromotriz* produzida por uma fonte de voltagem, por exemplo, uma pilha dessas que usamos nos rádios portáteis. Em praticamente todos os livros didáticos, os termos ou expressões: *força eletromotriz*, ou *fem*, *voltagem*, *queda de potencial* ou *diferença de potencial*, são usados indistintamente, como se fossem a mesma coisa. Mas, isso não é bem assim.

Para entender isso direitinho, precisamos ter em mente que todos os fenômenos elétricos decorrem das cargas elétricas. Se elas estão imóveis, temos fenômenos eletrostáticos. Se elas se movem, teremos a eletrodinâmica. Vamos fazer uns cálculos simples com uma carga positiva, $+q$, em repouso.

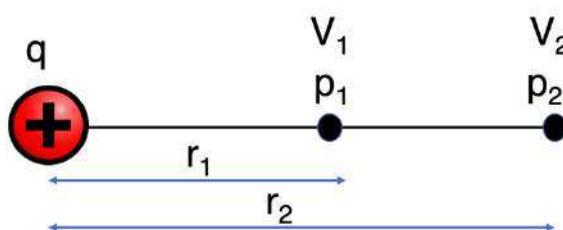


Figura 2.2 – Potencial elétrico de uma carga puntiforme.

Usando a equação 2.2, obtém-se:

$$V_1 = k \frac{q}{r_1}$$

$$V_2 = k \frac{q}{r_2}$$

Como r_2 é maior do que r_1 , o potencial V_2 é menor do que V_1 . Portanto, se uma carga positiva for colocada em P_1 , ela se deslocará em direção a P_2 . O inverso ocorre com uma carga negativa. Se ela for colocada em P_2 , se deslocará em direção a P_1 .



Resultado muito importante para circuitos elétricos. Os elétrons sempre se deslocam do potencial menor para o maior.

Vejamos agora o caso de um dipolo elétrico, formado por uma carga positiva e outra negativa, separadas por uma distância d . Essa estrutura é muito importante no estudo do eletromagnetismo. Veremos mais adiante alguns exercícios sobre isso.

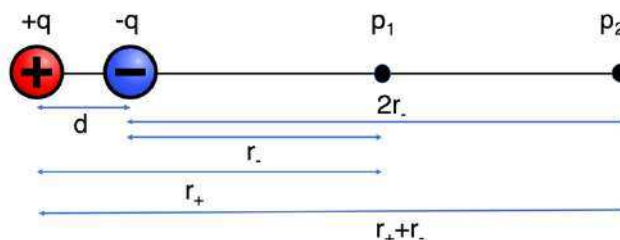


Figura 2.3 – Diferença de potencial devida a um dipolo em dois pontos.

O potencial de um conjunto de cargas é igual à soma dos potenciais das cargas individuais. Portanto, o potencial no ponto p_1 será

$$V(p_1) = V_+(p_1) + V_-(p_1) = kq \left(\frac{1}{r_+} - \frac{1}{r_-} \right) = kq \frac{r_- - r_+}{r_- r_+} < 0 \quad (2.5)$$

$$V(p_2) = V_+(p_2) + V_-(p_2) = kq \left(\frac{1}{r_+ + r_-} - \frac{1}{2r_-} \right) = kq \frac{r_- - r_+}{2r_- r_+ + 2r_-^2} < 0 \quad (2.6)$$

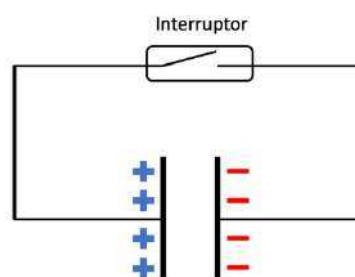
Para facilitar a interpretação, vamos supor que $r_-=5$ m e $r_+=6$ m. Substituindo esses valores em (2.5) e (2.6), obtém-se:

$$V(p_1) = -\frac{kq}{30}$$

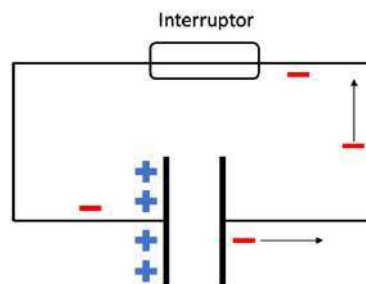
$$V(p_2) = -\frac{kq}{110}$$

Portanto, $V(p_2) > V(p_1)$, confirmando que o elétron vai do potencial menor para o maior.

Outro resultado importante é que a separação de cargas provoca diferença de potencial ao longo de uma linha que une as cargas. Para ilustrar essa afirmação, suponha duas placas metálicas paralelas. Por meio de algum processo, que não interessa definir agora, elétrons são extraídos de uma placa, que ficará positiva, e colocados na outra, que ficará negativa. Agora vamos conectar as duas placas usando um interruptor. Enquanto o interruptor estiver aberto, a situação é essa da figura. As cargas continuarão imóveis nas placas e haverá uma diferença de potencial entre quaisquer dois pontos do circuito.



Quando o interruptor for fechado, cargas negativas saem da placa em direção à placa positiva. Haverá uma corrente elétrica até que todo o excesso de cargas negativas se junte ao de cargas positivas. Nesse momento não haverá mais excesso de carga livre. Não haverá mais diferença de potencial, e a corrente cessa. Esse conjunto de placas paralelas é denominado capacitor. Trata-se de um dispositivo muitíssimo importante para qualquer equipamento eletrônico. Você vai ler sobre ele no Organizador Prévio 4.



Atenção, a existência da corrente não significa que a carga negativa saia da placa e vá até a placa oposta. Na verdade, a carga negativa tende a fazer isso, mas assim que ela se movimenta outra carga negativa à sua frente segue a rota, que por sua vez é substituída por outra carga mais adiante, até que uma carga negativa próxima da placa positiva seja absorvida pela placa e neutralize uma carga positiva.

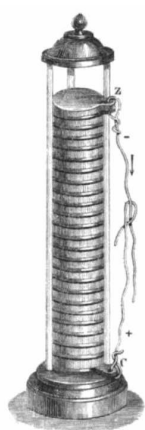


Força eletromotriz e pilha voltaica

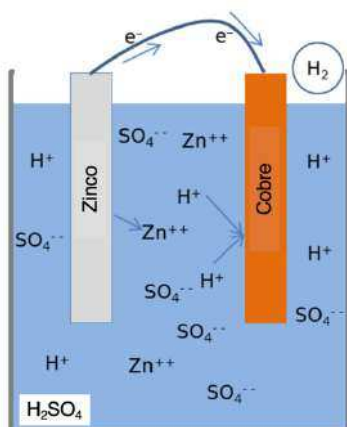
Tudo o que foi visto acima é fruto da eletrostática: cargas de sinais contrários se atraem, e cargas de sinais iguais se repelem. No capacitor, isolado, as cargas não se atraem porque há um meio dielétrico entre elas. Basta colocar um fio entre as placas do capacitor, para as cargas negativas se moverem na direção da placa positiva. Agora, uma situação bastante diferente ocorre no caso das pilhas, cujo funcionamento foi descoberto por Alessandro Volta no final do século 18. Em todas essas pilhas, reações químicas no seu interior provocam a separação de cargas. Num dos polos se concentram cargas negativas, e no outro polo se concentram cargas positivas. Uma situação muito parecida com essas do capacitor carregado. Todavia, no



caso das pilhas há uma substância no seu interior que continua produzindo a separação de cargas. Quando essa substância for totalmente consumida, a pilha deixará de funcionar. Neste caso, as cargas não obedecem ao princípio da eletrostática. Elas continuam separadas, mesmo que sua união seja possível. Volta denominou *força eletromotriz* a ação que faz as cargas ficarem separadas. Portanto, o potencial que resulta dessa situação não é um potencial eletrostático como o que vimos até agora, é uma espécie de potencial químico, algo que converte energia química em energia elétrica.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.4 – (a) Desenho original de Alessandro Volta. (b) Modelo atômico de uma pilha de Volta, com dois eletrodos (zinco e cobre) e ácido sulfúrico, H_2SO_4 como solução eletrolítica. (c) Modelos de pilhas modernas.

A pilha voltaica exibida na figura 2.4 funciona assim. O ácido sulfúrico, H_2SO_4 , retira íons de zinco do anodo (eletrodo negativo), que ficam na solução, deixando dois elétrons no eletrodo. Esses elétrons se deslocam pelo fio condutor externo, até que um elétron nas proximidades do eletrodo de cobre é absorvido por este. Esse elétron no cobre vai atrair íons de hidrogênio presentes na solução eletrolítica. Esse processo se repete até que todo o eletrólito seja consumido.

Então, em um circuito elétrico temos potenciais vindos da eletrostática e potenciais vindo de reações eletroquímicas. Mas, daqui em diante vamos nos fixar apenas nos potenciais eletrostáticos. Quando trabalhamos com a eletrodinâmica, para a qual precisamos de uma bateria, podemos simplesmente considerá-la como uma *caixa preta*, que fornece uma voltagem fixa. No caso das pilhas comerciais, usualmente essa voltagem é de 1,5 volt. Na prática, para estudar fenômenos eletrodinâmicos não há necessidade de saber como a bateria fornece energia para produzir o movimento de elétrons nos circuitos.

Campo, potencial, força e energia

A essa altura precisamos incluir os conceitos de força e energia, pois você deve ter lido, um pouco mais acima, que *a partir da relação do potencial com o campo, chega-se à energia potencial*. Mas, para isso é necessário introduzirmos o conceito de força elétrica. Cinquenta anos antes de Faraday criar o conceito de campo elétrico, Charles Augustin de Coulomb descobriu a lei que ficou conhecida como lei de Coulomb, que fornece a força entre duas cargas elétricas, q e Q , a uma distância r entre elas.



$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2} = k \frac{qQ}{r^2} \quad (2.4)$$

Substituindo (2.1) em (2.4), obtém-se

$$F = qE \quad (2.5)$$

A equação (2.5) expressa o conceito de força por intermédio do campo. Ou seja, a carga Q cria um campo elétrico E , que exerce a força qE sobre a carga q .

Se há uma força sobre uma partícula carregada, essa força vai realizar um trabalho sobre a partícula, ou seja, vai lhe fornecer energia. Embora estejamos falando de carga elétrica, força elétrica e energia elétrica, tudo isso pode ser tratado do mesmo modo como aprendemos com o campo gravitacional e as leis de Newton. É muito instrutivo estabelecermos a relação entre força elétrica, campo elétrico e energia elétrica partindo do que aprendemos na mecânica newtoniana.



Pela lei da gravitação universal de Newton, dois corpos, m e M , separados por uma distância r , atraem-se com uma força dada por:

$$F = G \frac{mM}{r^2}, \quad (2.6)$$

onde G é a constante gravitacional. Veja que esta fórmula fica igual à (2.4) se substituirmos G por k , m por q e M por Q . Podemos dizer que elas são formalmente iguais. Mais importante do que essa semelhança, é o fato de que as principais propriedades físicas resultantes de (2.6) podem ser estendidas para a lei de Coulomb. Essas forças são conhecidas como forças conservativas porque levam ao teorema da conservação da energia (energia cinética + energia potencial) e ao teorema do trabalho-energia.

Para um sistema conservativo, regido pelas equações (2.4) e (2.6), a energia total é sempre conservada. Ou seja, a soma da variação da energia cinética, ΔE_c , com a variação da energia potencial, ΔE_p , é zero:

$$\Delta E_c + \Delta E_p = 0 \rightarrow \Delta E_c = -\Delta E_p.$$

Por outro lado, o trabalho, T , realizado sobre uma partícula num sistema conservativo é sempre igual à variação da energia cinética da partícula:

$$T = \Delta E_c = -\Delta E_p. \quad (2.7)$$

Precisamos agora resolver um problema que você deve ter resolvido quando estudou mecânica. O problema é calcular o trabalho para levar um objeto de massa m , de um ponto i até um ponto f , como ilustrado na figura 2.5. Isso pode ser feito levando o objeto pelo caminho iof , ou pelo caminho d , ou pelo caminho c , ou por qualquer caminho que comece em i e termine em f . Para resolver o problema precisamos saber como calcular o trabalho de uma força, ao longo de uma trajetória paralela à direção da força. Você aprendeu na mecânica que o trabalho é o produto da força pela distância percorrida.

O trabalho para levar a partícula de i até o ponto o é:

$$T_x = Fx. \quad (2.8)$$

O trabalho para levar a partícula de o até o ponto f é nulo, porque o caminho é perpendicular à direção da força. Portanto, o trabalho para levar a partícula pelo caminho iof é dado por (2.8).

Pelo caminho d , o trabalho será:

$$T_d = (F \cos \theta) d = \left(F \frac{x}{d} \right) d = Fx. \quad (2.9)$$

Como (2.8) é igual a (2.9), conclui-se que o trabalho pelo caminho iof é igual ao trabalho pelo caminho d .

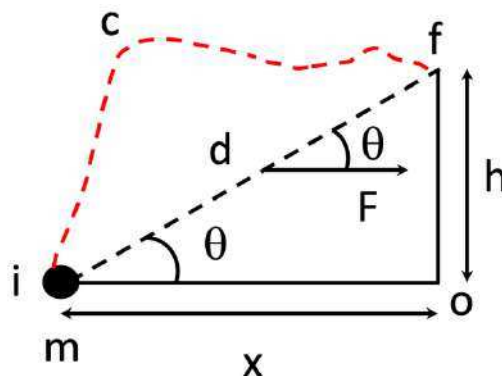


Figura 2.5 – O trabalho realizado pela força F para levar um objeto do ponto i até o ponto f independe do caminho utilizado.

Para calcular o trabalho por um caminho qualquer, c , precisamos de cálculo integral, que só é ensinado em cursos universitários. Mas, podemos enunciar o resultado geral: em sistemas conservativos, o trabalho para levar uma partícula de um ponto a outro independe do caminho entre esses dois pontos.



Agora temos tudo para relacionar campo elétrico, potencial elétrico e energia potencial. Para evitar confusão, vamos denominar energia potencial pela letra U , em vez de E_p . Vamos reescrever a equação (2.7):

$$U_p(f) - U_p(i) = -T_{if}, \quad (2.10)$$

onde, $U_p(i)$ é a energia potencial no ponto i , $U_p(f)$ é a energia potencial no ponto f , e T_{if} é o trabalho necessário para levar uma carga elétrica do ponto i até o ponto f . É importante chamar a atenção para o seguinte fato: o trabalho é sempre a diferença das energias nos dois pontos do trajeto, o inicial e o final. Isso significa que é possível definir arbitrariamente o valor da energia potencial em algum ponto como referência. No caso gravitacional costuma-se definir a energia potencial na superfície da Terra como sendo nula. No caso eletrostático é costume usar um ponto no infinito como tendo energia potencial eletrostática nula. Ou seja,

$$U_p(f) - U_p(\infty) = -T_{if} \rightarrow U_p(f) = -T_{\infty}.$$

Portanto, dada uma configuração de cargas e uma carga de prova, q_0 , a energia potencial dessa configuração é o negativo do trabalho realizado pelo campo da configuração para trazer a carga de prova do infinito até o ponto em que ela se encontra.

A situação que discutimos até agora é assim: uma carga elétrica cria um campo elétrico. A intensidade desse campo decresce com o aumento da distância à carga, conforme a equação (2.1). Se uma carga, q , for colocada no campo de ação do campo, ela será submetida a uma força dada pela fórmula (2.5). Essa força realizará trabalho sobre a carga levando-a de um ponto a outro, conforme a fórmula (2.10).

Mas, em vez de trabalhar com energia potencial, é melhor trabalhar com potencial, assim definido:

$$V = \frac{U}{q_0} = -\frac{T}{q_0} \rightarrow V_f - V_i = -\frac{T_{if}}{q_0}. \quad (2.11)$$

O trabalho realizado por uma força F , do ponto i ao ponto f , ao longo de um percurso x é dado por (2.8):

$$T_{if} = Fx = q_0 Ex \quad (2.12)$$

Substituindo (2.12) em (2.11), obtém-se a expressão para a diferença de potencial (ddp) entre dois pontos, i e f , em função do campo elétrico:

$$V_f - V_i = -Ex \quad (2.13)$$

Diferença de potencial

Embora o conceito de potencial seja muito importante, é a diferença de potencial que interessa na prática, porque é a ddp que gera energia que resulta em movimento de cargas. As correntes elétricas surgem por causa da ddp. Na linguagem usual, a ddp também é denominada simplesmente de voltagem. Ou seja, nos circuitos elétricos a voltagem é uma diferença de potencial. Podemos considerar a ddp, ou a voltagem, como o conceito primário, ou conceito fundamental no estudo dos circuitos elétricos.

Embora tudo se origine nas cargas e nos campos elétricos, na prática é a ddp o conceito fundamental no estudo dos circuitos elétricos.



Unidades de carga elétrica, campo elétrico e voltagem

Praticamente todas as grandezas físicas são dimensionais, ou seja, necessitam de uma unidade de medida. Por exemplo, usamos o centímetro para medir pequenos comprimentos e metro para medir comprimentos maiores. Já nas rodovias, usamos o quilômetro. Com relação ao peso, usamos grama para massas pequenas, e quilograma para massas maiores. Já para objetos muito mais pesados, usamos a tonelada. Os britânicos e estadunidenses costumam usar libra para o peso e milha para o comprimento, mas esse critério não é mais usado pela comunidade científica.

Antigamente tinha dois sistemas de unidades, o CGS e o MKS. O primeiro tinha como unidades básicas o centímetro para o comprimento, o grama para massa e o segundo para tempo. No segundo sistema as unidades básicas eram metro, quilograma e segundo.

A partir de 1960, a comunidade científica internacional decidiu adotar um único sistema, a partir do MKS, que ficou conhecido como *Sistema Internacional de Unidades*, ou SI. Nesse sistema, a unidade de carga elétrica é Coulomb, C. A unidade de campo elétrico é Newton/Coulomb, N/C. É fácil entender por que esta é a unidade de campo elétrico. Basta examinar a equação (2.5):

$$F = qE \rightarrow E = \frac{F}{q}.$$

Com a unidade de força é Newton, e a de carga é Coulomb, resulta que a unidade de campo elétrico é N/C.

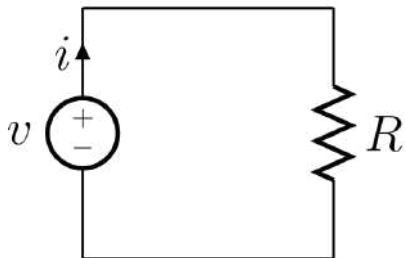
Potencial, diferença de potencial, força eletromotriz e voltagem, todas têm a mesma unidade: Volt.

Organizador Prévio 3

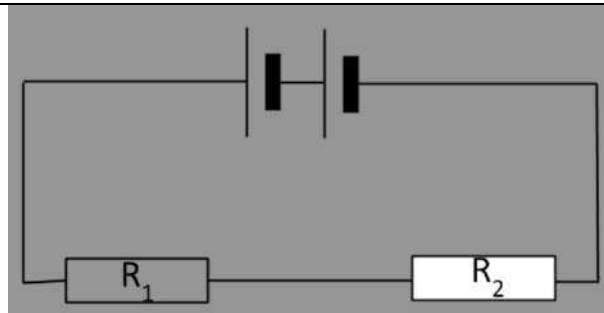
Corrente Elétrica, Circuitos Resistivos e Lei de Ohm

Nas duas unidades anteriores, você aprendeu que carga elétrica, campo elétrico e potencial elétrico são os conceitos mais importantes da eletrostática. Veremos aqui que eles são também os mais importantes da eletrodinâmica, porque deles decorrem os fenômenos eletrodinâmicos. A corrente elétrica, que talvez seja o conceito eletrodinâmico mais presente em nossa memória é consequência do movimento de cargas elétricas. E esse movimento é provocado pela ação de campos elétricos e pela existência de diferenças de potenciais ao longo do circuito elétrico. Esse será o tema dessa terceira unidade.

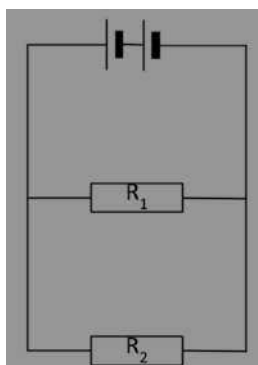
Mas, antes de abordarmos os detalhes matemáticos envolvendo os conceitos da eletrodinâmica, será conveniente abordarmos o tema sob um ponto de vista mais geral e qualitativo. Entendemos que essa abordagem facilitará a aprendizagem conceitual no que se refere ao tratamento matemático de circuitos simples, contendo uma pilha ou uma fonte de tensão, ligada a um ou mais resistores, ligados em série ou em paralelo, como ilustram as figuras abaixo.



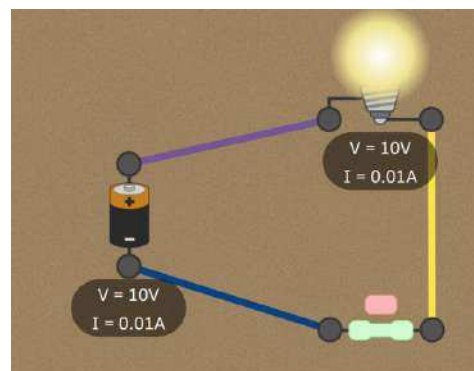
O circuito mais simples: uma fonte de tensão, ou bateria, e uma resistência.



Circuito em série com duas resistências.



Circuito em paralelo com duas resistências.



Circuito simples com uma lâmpada.

Como se vê, tanto a bateria, ou fonte de voltagem, como os resistores são graficamente representados de diferentes formas. Também é importante entender que uma lâmpada incandescente é essencialmente um resistor. Ou seja, a luz emitida por uma lâmpada incandescente é na verdade emitida pelo resistor, ou filamento que há no interior da lâmpada. A luz é emitida porque a corrente que circula no filamento o aquece ao ponto de fazê-lo emitir luz. Veremos isso mais adiante.



Mas, o que é mesmo a corrente elétrica? Já temos a primeira resposta: é o movimento de cargas elétricas. Mas, que cargas elétricas? Nos resistores que vamos abordar aqui, as cargas elétricas são transportadas pelos elétrons. Em soluções líquidas, pode haver corrente de elétrons, bem como de íons positivos, mas isso não será abordado aqui.

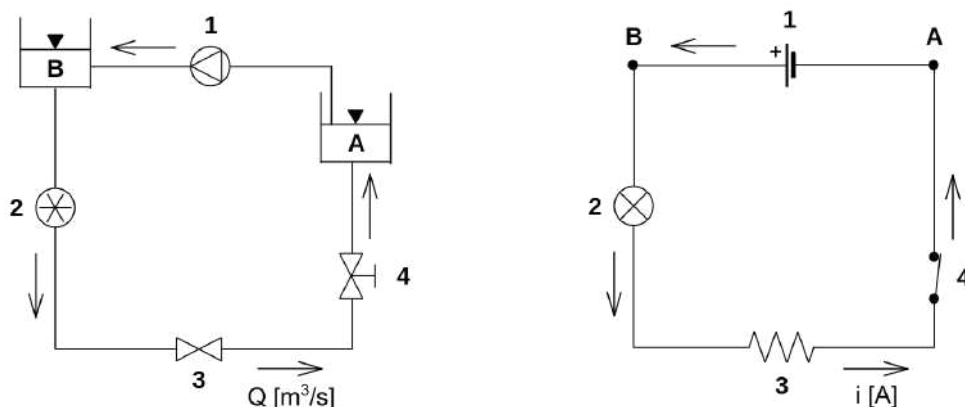
Mas, como se dá o processo que resulta na corrente elétrica? Bem, essa não é uma questão fácil de responder. Se você já leu algum livro didático sobre isso, talvez tenha em mente as seguintes hipóteses:

1. O estabelecimento de um campo elétrico em um fio metálico provoca um fluxo de elétrons neste condutor, fluxo este denominado corrente elétrica.
2. Quando um fio é ligado entre aos terminais de uma bateria, um campo elétrico é estabelecido no interior do fio, orientado do potencial maior para o menor. Como a carga elétrica dos elétrons é negativa, surgem neles forças elétricas de sentido oposto ao do campo. Dessa forma, os elétrons livres passam a se deslocar de um terminal a outro, criando-se, então, a corrente elétrica no fio.
3. A corrente elétrica é como o fluxo da água em um circuito hidráulico, onde a bateria funciona como a bomba.

As duas primeiras hipóteses têm algum fundo de verdade, mas não descrevem tudo o que está por trás do fenômeno da passagem de uma corrente elétrica através de um fio condutor. A terceira hipótese, muito frequente em livros didáticos, está absolutamente equivocada. Os processos de fluxo eletrônico e de fluxo d'água são completamente diferentes. Essa analogia entre os dois circuitos leva os alunos a uma concepção errada da corrente elétrica. Na ilustração a seguir, o circuito hidráulico da esquerda é comparado com o circuito elétrico à direita, com os seguintes símbolos representando dispositivos análogos:

- (1) bomba hidráulica e fonte de voltagem;
- (2) turbina e lâmpada;

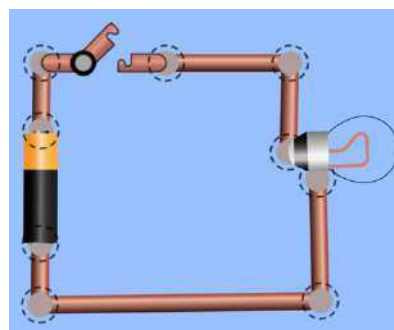
- (3) válvula de estrangulamento e resistor;
- (4) válvula de corte de fluxo e chave.



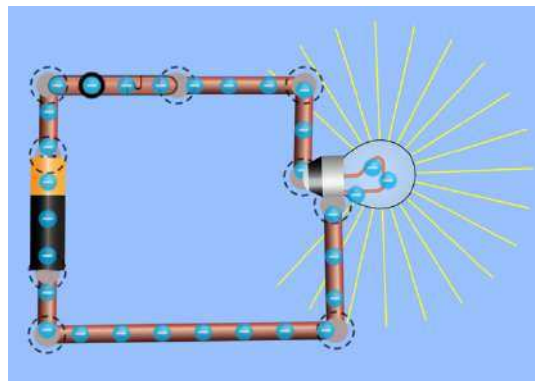
Quais são as dificuldades impostas por essa analogia? A analogia enfatiza o que se chama de corrente convencional, que tem o sentido contrário ao da corrente real. Isso dificulta a compreensão do que seja o fluxo de elétrons. Na imagem, a corrente que sai do polo positivo entra no polo negativo. Isso sugere que no caso da corrente real, o elétron que sai do polo negativo chega ao polo positivo. Isso não é verdade. Ou seja, enquanto no circuito hidráulico uma molécula de água que sai de B realmente chega em A, no circuito elétrico, um elétron que sai do polo negativo jamais chegará ao polo positivo.

A ideia equivocada que surge dessa analogia, é que a corrente elétrica é um fluxo contínuo de elétrons, como se eles saíssem de um polo da bateria e chegassem ao outro polo. No processo de corrente elétrica os elétrons movem-se em um curto espaço no interior do condutor. Mais adiante você vai estudar os detalhes do processo da corrente elétrica, mas é interessante adiantarmos alguns aspectos qualitativos. Por exemplo, há uma questão básica que precisa ser bem entendida: exatamente o que faz a corrente elétrica fluir? Uma resposta a essa questão tem a ver com o papel desempenhado pelas cargas superficiais nos condutores, que servem de guia para a corrente elétrica. Essa abordagem não é apresentada em nenhum dos livros didáticos que conhecemos. Ela é apresentada em alguns artigos científicos, que usaremos ao longo desta unidade.

Como funciona um circuito elétrico? Bem, vejamos o circuito mais simples. Uma bateria ligada a uma chave e a uma resistência, como uma lâmpada incandescente. A corrente surge quando a chave é ligada.



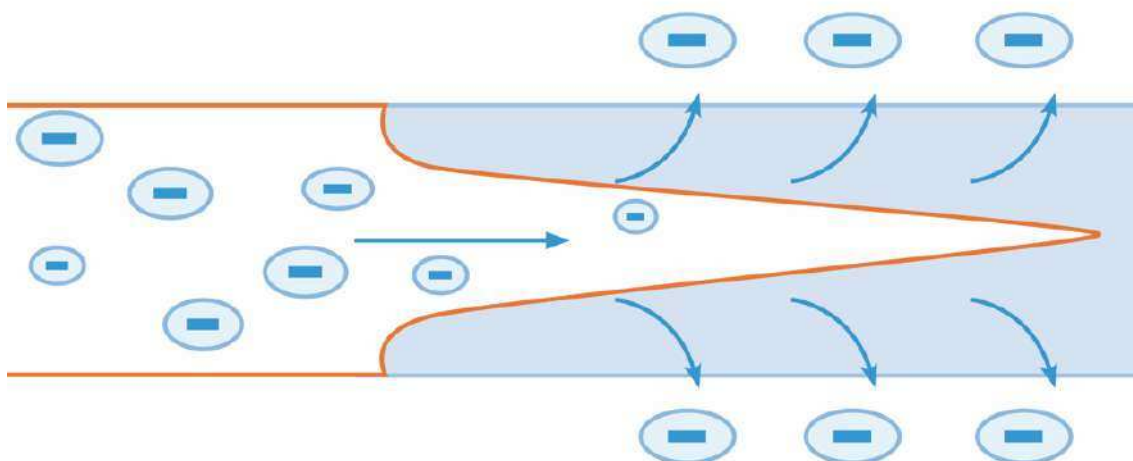
O que ocorre quando a chave é ligada? Para responder essa questão, precisamos saber como funciona uma bateria. Na verdade, não precisamos saber os detalhes do funcionamento, até porque existem diferentes tipos de baterias, com diferentes mecanismos. Basta sabermos que qualquer que seja o mecanismo, a função sempre será a acumulação de cargas positivas em um terminal, a acumulação de cargas negativas no terminal oposto.



Nesse tipo de bateria, o terminal positivo é o amarelo.

Essas cargas geram campos elétricos, mas se a bateria estiver desligada, esses campos não apresentam efeitos visíveis. Ao fechar a chave, a bateria será ligada ao circuito, e nesse momento, os campos elétricos começam a atuar nas cargas do fio condutor próximas aos terminais. Como nos condutores apenas os elétrons estão livres para se mover sob a ação dos campos elétricos.

Nas unidades anteriores você aprendeu que o campo elétrico de uma carga varia com o quadrado da distância. Ou seja, quanto mais distante, menor o valor do campo elétrico. Portanto, esse efeito do campo elétrico das cargas varia inversamente ao quadrado da distância. Depois de um curto intervalo de tempo após a bateria ser ligada ao circuito, os elétrons livres migram para as superfícies dos condutores metálicos, formando uma estrutura de cargas superficiais. Mais adiante veremos detalhadamente como os campos eletrostáticos gerados por essas cargas superficiais são responsáveis pela circulação de corrente elétrica no interior dos condutores.



O que acontece é que o campo de um elétron mexe com os elétrons vizinhos, e esses vizinhos mexem com os elétrons mais adiante, até que esse mexe-

mexe passa por todo o circuito e chega ao polo positivo. Quando esse movimento eletrônico ocorre no filamento da lâmpada, ele o aquece tanto ao ponto de emitir luz.

Portanto, os elétrons que no início estavam perto do polo negativo, ficam por lá. Eles apenas iniciam o mexe-mexe. O sinal que provoca esse mexe-mexe é transmitido à velocidade da luz. Atenção: o sinal é que é transmitido à velocidade da luz. Os elétrons se mexem com baixíssima velocidade.

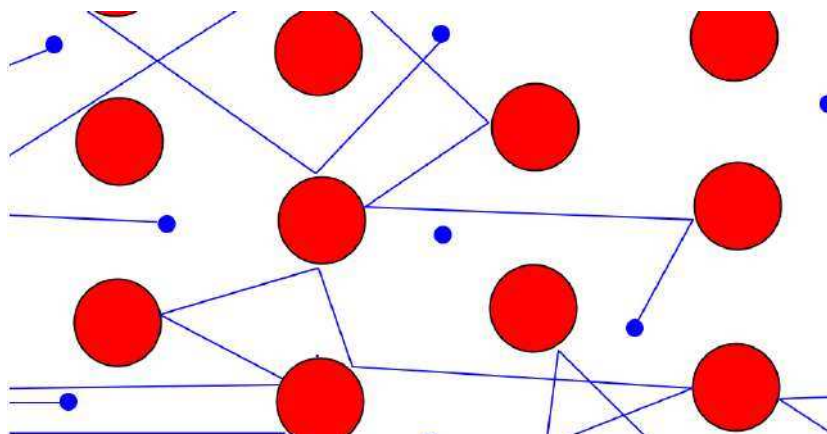
Em suma, não é o elétron que sai do polo negativo e eventualmente chega ao polo positivo o responsável pela corrente elétrica. A corrente elétrica é consequência de campos elétricos criados pelas cargas superficiais e pela transmissão quase instantânea das variações de campos elétricos no interior do condutor.

A corrente elétrica faz os elétrons se movimentarem ao longo do circuito, mesmo que cada um percorra um espaço pequeno, milhares de elétrons estão em constante movimento no interior dos condutores.

Então, o que ocorre no interior dos condutores quando os elétrons se movimentam? Você sabe qualquer material é composto de átomos, e que estes são constituídos de um núcleo com carga positiva, em volta do qual orbitam elétrons. Então, tem-se uma carga positiva blindada por uma esfera de carga negativa.

-	+	-	+
+	e	+	-
-	+	e	+
+	-	+	-

Quando um elétron em movimento se aproxima de um átomo, ele é repellido pela carga negativa ligada ao núcleo. O resultado da repulsão é o espalhamento do elétron, em direções aleatórias, de modo que muitos são jogados para trás. Mas, o campo elétrico volta a impulsioná-lo para a frente e ele vai novamente sofrer outros espalhamentos.



Esses choques entre os elétrons e a camada de cargas negativas (que também são elétrons) aquece o condutor. Quando o condutor atinge alta temperatura, ele emite luz. É fácil observar um metal emitindo luz, basta colocá-lo num braseiro. Ele primeiro fica vermelho, ou seja, emite luz vermelha, e termina ficando branco, emitindo todas as faixas da luz visível.



Esse processo de espalhamento depende de cada metal, e o resultado é medido por uma propriedade conhecida como resistência elétrica. Então, tem-se a corrente elétrica que depende da bateria, ou seja, da voltagem fornecida pela bateria, e também depende da resistência do material do qual é feito o condutor. A voltagem, a corrente elétrica e a resistência estão relacionadas pela lei de Ohm, que você vai estudar nesta unidade.

Organizador Prévio 4

Eletrodinâmica

No Organizador Prévio 3 você tomou conhecimento dos conceitos básicos fundamentais para o estudo da eletrodinâmica, que tem a ver com o movimento de elétrons em um circuito composto por diversos componentes, tais como fonte de tensão, ou de voltagem, resistores, capacitores, indutores, diodos, transistores e circuitos integrados. Nesta disciplina vamos tratar apenas dos circuitos simples, compostos tão somente de uma fonte de voltagem e alguns poucos resistores, mas para que você tenha uma ideia mais geral do assunto vamos apresentar neste Organizador Prévio uma abordagem qualitativa mais ampliada. Você vai notar que alguns conceitos apresentados no Organizador Prévio 3 serão retomados aqui com uma linguagem um pouco diferente. Isso é proposital, para facilitar a internalização dos conceitos mais importantes na sua memória, ou estrutura cognitiva.

Componentes básicos de um circuito elétrico

Diodos, transistores e circuitos integrados são os componentes da tecnologia moderna, mas não serão aqui tratados porque exigem um nível de conhecimento acima do que se exige no ensino médio.

Em princípio, todos os outros componentes podem ser tratados no ensino médio, mas na prática o que se observa é que dificilmente há tempo hábil para tratar capacitores e indutores. Repetindo o que foi escrito acima, os circuitos tratados aqui consistirão apenas em uma bateria e uma associação de resistores. Esses circuitos são geralmente denominados de circuitos elétricos simples, ou simplesmente circuitos simples. Mesmo assim, apresentaremos no final da disciplina uma breve discussão de capacitores e indutores.

Fonte de tensão

A fonte de tensão, ou bateria, ou pilha, ou gerador, é o elemento ativo de um circuito simples. Ou seja, o circuito funciona pela ação dessa fonte. A principal fonte de tensão em nosso cotidiano está presente em cada tomada de nossa casa. É uma fonte fornecida pela companhia de energia elétrica. Outra fonte muito conhecida são as pilhas usadas em aparelhos eletrodomésticos. E há também as baterias que usamos em relógios, celulares e computadores. Para os experimentos que iremos discutir aqui, vamos trabalhar com as pilhas de rádio, que serão ora denominadas pilhas, ora baterias. Ou seja, para o nosso contexto, pilhas de rádio e baterias de relógio e celulares são uma única coisa: bateria.

A fonte de tensão fornecida pela companhia de energia elétrica é de corrente alternada, ao passo que as baterias são fontes de corrente contínua. Essa denominação popular, fonte de corrente contínua, ou alternada, gera uma confusão muito grande nas pessoas que têm pouco conhecimento sobre o assunto. Muita gente imagina que as baterias são uma fonte de corrente constante. Ou seja, que elas fornecem a mesma corrente, qualquer que seja o circuito a elas conectado. Na verdade, o que uma bateria fornece de modo constante é a voltagem, ou diferença de potencial. Por exemplo, nas lojas temos pilhas de 1,5 volts ou baterias de 9 volts. A corrente que sairá dessas baterias vai depender do circuito que for a elas conectado.

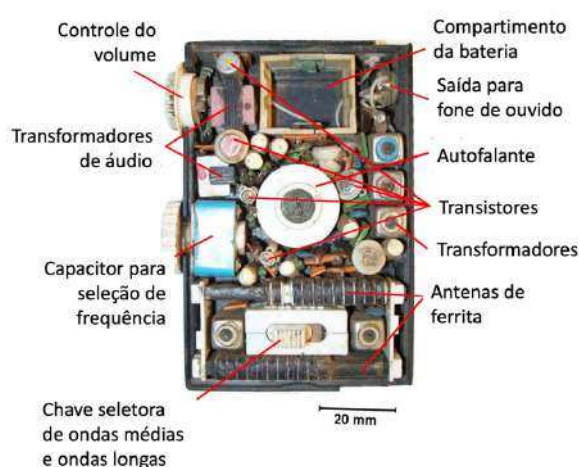
Condutores, isolantes, semicondutores e supercondutores

Nós estamos falando de eletrodinâmica, de movimento de elétrons, ou de corrente elétrica. Isso só é possível porque existem alguns materiais, denominados condutores, nos quais os elétrons podem se deslocar facilmente. O contrário, os materiais nos quais os elétrons têm muita dificuldade para se deslocarem são os isolantes. O termo técnico moderno é dielétrico, mas os textos didáticos continuam usando a denominação isolante porque tem um significado mais intuitivo.

Além de condutores e isolantes, existem na natureza os semicondutores e os supercondutores. Os semicondutores, por exemplo, germânio, silício, selênio e arsênio, são usados na fabricação dos dispositivos semicondutores, por exemplo, os chips de nossos celulares e computadores. Os supercondutores são usados na fabricação de bobinas para a produção de campos magnéticos intensos, como por exemplo nos equipamentos para ressonância magnética.

Nessa fotografia temos um circuito complexo, com todos os elementos mencionados acima. Trata-se de um antigo rádio transistorizado.

Observe o espaço para se colocar a bateria, um grande capacitor para fazer a sintonia da estação de rádio, um indutor com núcleo de ferrita e vários transistores. Para entender circuitos com essa complexidade, é preciso entender os circuitos simples, com apenas uma bateria e alguns resistores, capacitores e indutores.



Corrente e Resistência

Nos circuitos simples que vamos tratar aqui, os materiais usados são metais condutores. Os metais condutores de eletricidade são também condutores de calor. Se você colocar uma colher metálica na água quente, logo perceberá que o calor é conduzido através do cabo da colher. É por isso que os cozinheiros preferem colheres com cabo de madeira, ou, mais modernamente, colheres de teflon.

A razão pela qual esses metais são bons condutores de eletricidade e de calor é a mesma: eles têm muitos elétrons livres. E tanto o calor, quanto a corrente elétrica são conduzidos basicamente pelos elétrons livres. Todos os materiais são constituídos de átomos, e estes são constituídos de um núcleo (com prótons e nêutrons) e de elétrons que ficam orbitando em volta do núcleo. Como os elétrons são negativos, e o núcleo é positivo, eles se atraem. É por isso que os elétrons ficam orbitando em torno do núcleo. Todavia, nos metais condutores, alguns desses elétrons são fracamente ligados ao núcleo, de modo que eles podem facilmente saltar de um átomo para outro. Esses são os elétrons livres, os responsáveis pela condução do calor e da eletricidade.

Vejamos o caso da colher metálica na água fervente. As moléculas da água estão agitadas, com altos valores de energia cinética, por causa da alta temperatura. Quando entram em contato com a colher, as moléculas da água transferem parte da energia cinética para a colher. Os elétrons livres na parte da colher em contato com a água ficam mais agitados que os do cabo, mas rapidamente transferem energia para os elétrons próximos, até que os elétrons do cabo também ganham energia cinética, e, portanto, ficam com temperatura mais alta.

No caso da corrente elétrica o fenômeno é muito parecido. Em vez da água fervente, temos uma bateria, que cria um campo elétrico quando ligamos um material condutor entre seus terminais. Esse campo elétrico se espalha pelos condutores e fornece energia cinética a todos os elétrons livres. É essa transmissão de energia que medimos como corrente elétrica. De modo similar ao caso da colher metálica, que fica aquecida por causa da energia cinética dos elétrons, quando uma corrente elétrica passa por um resistor, a energia cinética dos elétrons aumenta, e o resistor é aquecido. Voltaremos a discutir esse fenômeno nos próximos capítulos.

O que importa aqui é definir o que são resistores. Como foi dito acima, os materiais usados nos circuitos que aqui estudaremos, são feitos de metais condutores. Alguns metais conduzem mais do que outros. Cada material tem uma propriedade, chamada condutividade elétrica, que define sua capacidade de conduzir corrente elétrica. Conhecendo essa propriedade e as dimensões de um fio (área da seção reta e comprimento), é possível calcular a resistência elétrica do fio. Quanto maior a resistência, menor a corrente que passa pelo fio, para

uma dada voltagem aplicada. Voltaremos a essa questão quando formos discutir a lei de Ohm.

A unidade de resistência elétrica é o Ohm, cujo símbolo é Ω . Nas aplicações comerciais, os valores típicos são na faixa de mil Ohms, ou $k\Omega$. O valor da resistência vem marcado no resistor por meio de um código de cores. Por exemplo, na figura abaixo, a resistência à esquerda (fig. a) é de $1,5 k\Omega$, enquanto a outra (fig. b) é de $10 k\Omega$.

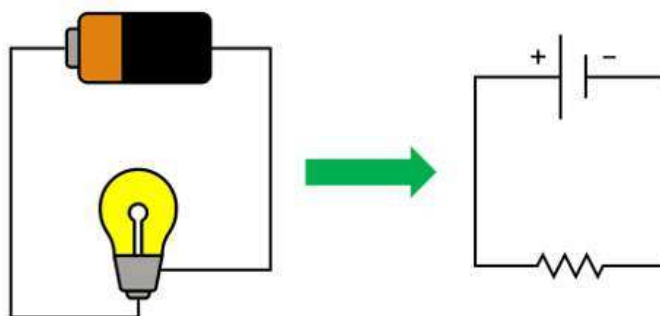


(a)



(b)

Mais adiante vamos discutir detalhadamente a corrente elétrica em circuitos simples, mas para apresentar o capacitor e o indutor é necessário termos alguma ideia da corrente produzida por uma bateria. O circuito mais simples que podemos montar consiste em uma bateria conectada a uma lâmpada incandescente. Ao lado o mesmo circuito representado pelos símbolos de bateria e de resistência. Uma lâmpada incandescente é simplesmente um conjunto de resistências, que pode ser representada por uma única resistência.



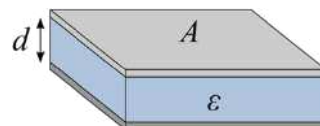
A bateria fornece uma voltagem, que faz circular uma corrente ao longo do circuito. Podemos dizer a mesma coisa com outras palavras. A bateria cria um campo elétrico que faz circular uma corrente elétrica. Ainda há outra forma de dizer isso. A bateria cria um campo elétrico que provoca o movimento de elétrons que resulta na corrente elétrica. Quando esse tipo de circuito foi estudado pela primeira vez, no início do século 19, o elétron ainda não havia sido descoberto, de modo que ninguém sabia ao certo quem transportava a corrente

elétrica. Foi então que convencionaram definir a corrente elétrica como um fluxo que sai do polo positivo para o negativo. Ou seja, trata-se de uma corrente como se os portadores fossem cargas positivas. Mas, desde a descoberta do elétron, em 1897, é sabido que os portadores de corrente são elétrons. Portanto, o movimento da corrente real, ou corrente eletrônica é do polo negativo para o positivo.

O processo da corrente elétrica se dá mais ou menos assim: quando a bateria é ligada à resistência, ela tende a empurrar os elétrons que estão próximos. Esses elétrons tendem a empurrar os outros que estão à sua frente, e esse empurra-empurra resulta na corrente elétrica, que termina chegando no polo positivo. O que acontece quando os elétrons chegam no polo positivo? Deixaremos para discutir essa questão mais adiante.

Capacitores

Vejam agora o que acontece se em vez de uma resistência, tivermos um capacitor ligado à bateria. Duas placas metálicas separadas por uma pequena distância constitui um capacitor, definido por sua capacitância.

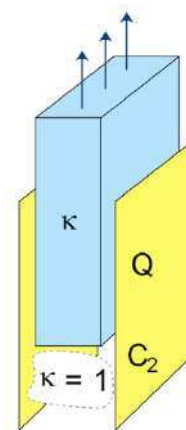


Nos desenhos dos circuitos elétricos, o capacitor é representado por este símbolo.



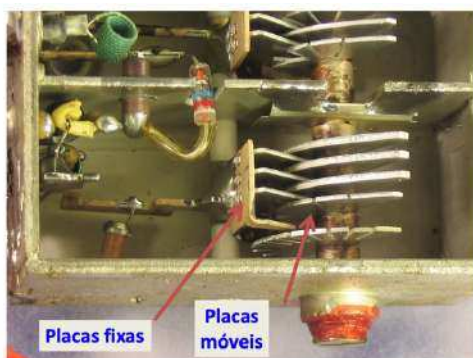
Existem duas propriedades geométricas e uma propriedade química que definem a funcionalidade de um capacitor. As propriedades geométricas são a área das placas e a distância entre elas. A propriedade química é o tipo de material que está entre as placas. Esse material tem que ser um isolante, ou como se diz atualmente, um dielétrico, e é caracterizado pela sua constante dielétrica, k . No vácuo, $k=1$.

Para um capacitor funcionar bem, a distância entre as placas tem que ser muito menor do que as dimensões lineares das placas. É por isso que no início desta seção foi dito que um capacitor é constituído por *duas placas metálicas separadas por uma pequena distância*.



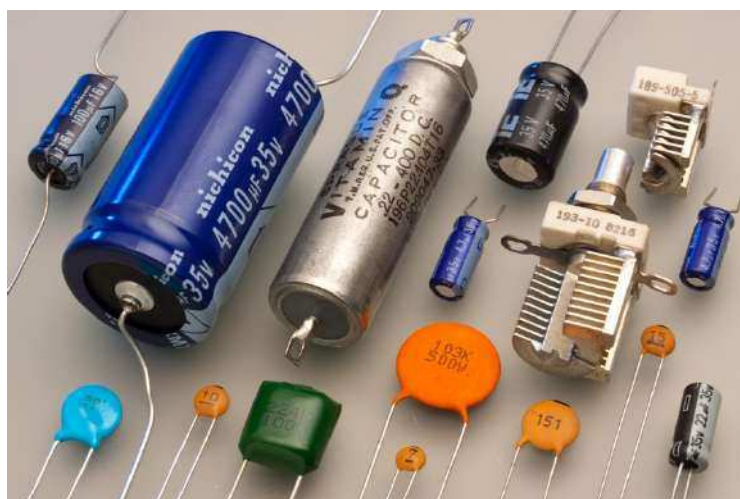
Portanto, a mudança do material entre as placas altera o funcionamento do capacitor. A mesma coisa acontece com a variação da área das placas.

Em muitas aplicações, como no caso dos antigos rádios, a sintonia pode ser feita com a construção de capacitores nos quais a capacitância pode ser variada pela variação das áreas de suas placas.



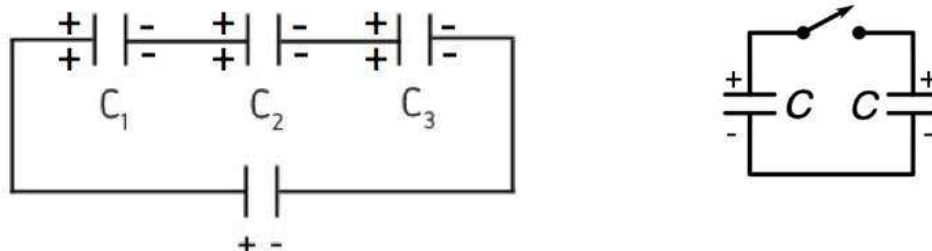
Nos capacitores variáveis, uma das placas é fixa, enquanto as outras são móveis. Alterando a posição dessas placas móveis, obtém-se capacitores com propriedades diferentes.

Temos aqui diferentes modelos de capacitores modernos.



É importante chamar a atenção para o fato de que na tecnologia contemporânea, onde predominam os circuitos integrados, os capacitores são invisíveis a olho nu.

Em muitos circuitos elétricos temos necessidade de ligar capacitores em série e em paralelo, como no caso dos resistores. Na figura à esquerda temos três capacitores ligados em série a uma bateria, enquanto à direita temos dois capacitores ligados em paralelo. A figura sugere que algumas placas ficam com cargas negativas, enquanto outras ficam com cargas positivas. Essa é uma das finalidades dos capacitores: acumular cargas em suas placas. Vejamos como isso ocorre.



Podemos analisar esta situação, no caso da associação em série, a partir do polo negativo ou do polo positivo da bateria. O resultado é o mesmo. Vamos analisar a partir do polo negativo. Quando a bateria é ligada, o polo negativo tende a expulsar os elétrons que estão próximos, do mesmo modo como discutimos acima, para o surgimento da corrente elétrica. Esta mensagem de expulsão é transferida de elétron a elétron, até que chega à primeira placa do capacitor C3. Os elétrons que chegam àquela placa não podem ir adiante, porque logo depois existe o dielétrico, ou seja um material isolante que não permite o movimento de elétrons em seu interior. É por isso que há o acúmulo de elétrons nessa primeira placa. No entanto, esses elétrons criam um campo elétrico que produz a expulsão dos elétrons na placa seguinte. Esses elétrons acumulam-se na placa do capacitor C2, e o processo se repete até chegar no capacitor C1. Os elétrons expulsos da segunda placa de C1 expulsam os elétrons seguintes até que a mesma quantidade de elétrons expulsos do polo negativo da bateria chega ao polo positivo.

Preste atenção: eu disse que a mesma quantidade de elétrons expulsos pelo polo negativo chega ao polo positivo. Ou seja, os elétrons que chegam ao polo positivo não são os mesmos que saem do polo negativo. Apenas a quantidade é a mesma. Isto significa que a quantidade de carga em um circuito elétrico se conserva.

Capítulo 3

Eletrodinâmica

Para uma abordagem no ensino médio, podemos dividir a eletricidade em três áreas: eletrostática, eletrodinâmica e eletromagnetismo. Nesta disciplina não estudaremos o eletromagnetismo, mas é importante termos conhecimento da sua relação com a eletrostática e a eletrodinâmica. Todos os fenômenos da eletricidade têm relação com os conceitos estudados na eletrostática, sendo a carga elétrica o conceito fundamental. Já falamos sobre isso, mas não custa repetir: carga elétrica cria campo elétrico, que exerce força sobre outras cargas colocadas em suas proximidades. Essa força realiza trabalho, aumentando a energia cinética da carga. O movimento das cargas também pode ser visto a partir do efeito do potencial elétrico, associado ao campo elétrico.

Se essas cargas em movimento estiverem no interior de materiais condutores, podemos observar a existência de uma corrente elétrica, que é o principal fenômeno da eletrodinâmica. No Organizador Prévio 4 você teve uma visão geral de tudo isso. Vamos agora estudar os detalhes e os processos de medida. Mas, antes disso, convém termos em mente a linha do tempo das principais descobertas da eletricidade, até chegarmos ao que sabemos hoje. Uma parte dessa história você estudou nos capítulos anteriores; outra parte vai estudar neste capítulo, mas, a parte mais moderna, que inclui o eletromagnetismo será estudada em outra oportunidade.

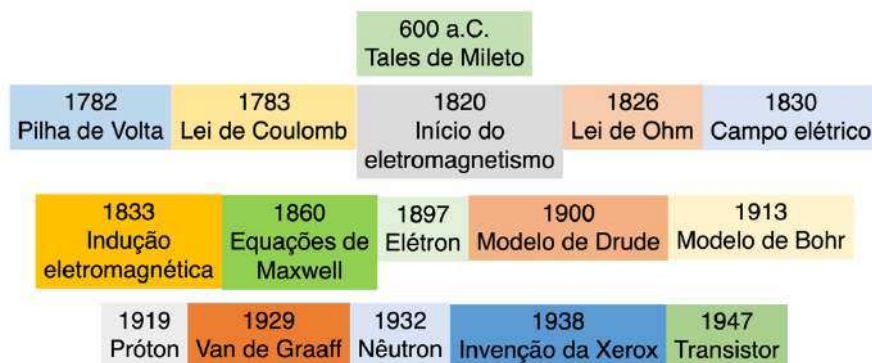


Figura 3.1 – Principais eventos da eletricidade.

Observe a escala do tempo. Entre as primeiras observações sistemáticas da eletrostática, feitas por Tales de Mileto, e a formulação da primeira lei, feita por Coulomb, decorreram mais de dois mil anos. A primeira observação referente ao eletromagnetismo se deu ao mesmo tempo em que ocorreu a descoberta da principal lei da eletrodinâmica, a lei de Ohm, mas foram necessários 40 anos

para que as leis do eletromagnetismo fossem concluídas. Isso se deu com a formulação das equações de Maxwell. Mas, a história do eletromagnetismo moderno começa mesmo é com a descoberta do elétron, em 1897. Até então, ninguém sabia ao certo quem eram os responsáveis pelos fenômenos da eletrodinâmica, sobretudo qual era exatamente a origem da corrente elétrica. Isso só começou a ficar mais claro com a descoberta do elétron. Três anos depois dessa descoberta, Paul Drude elaborou sua teoria dos metais, que se constituiu no grande salto para os estudos modernos da condutividade elétrica. É o modelo microscópico de Drude que usaremos para explicar os fenômenos da eletrodinâmica.



O eletromagnetismo contemporâneo se inicia com a junção do modelo de Drude, com o modelo atômico de Rutherford e Bohr e com as descobertas do elétron e do próton. É a existência de prótons no núcleo atômico e de elétrons à sua volta que dá consistência ao modelo de Drude.

O modelo de Drude só vale para a parte central da tabela periódica, que você deve ter estudado nas disciplinas de química. É nessa parte, marcada em azul, que se encontram os metais, sendo cobre (Cu) um dos mais importantes para os estudos de condutividade elétrica.

Group Period	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	* 71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	* 103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
			* 57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb		
			* 89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No		

Figura 3.2 – Tabela periódica. Os metais estão marcados em azul.

Depois do surgimento do modelo de Drude, o estudo da física teve muitos avanços, começando pela teoria da relatividade, as pesquisas sobre fenômenos radioativos, a descoberta do próton, do nêutron e da fissão nuclear, a elaboração da teoria quântica, entre outros, até que, em 1947, o transistor foi inventado,

dando início à tecnologia eletrônica que alimenta todos os dispositivos digitais atuais.

Modelo Microscópico de Drude

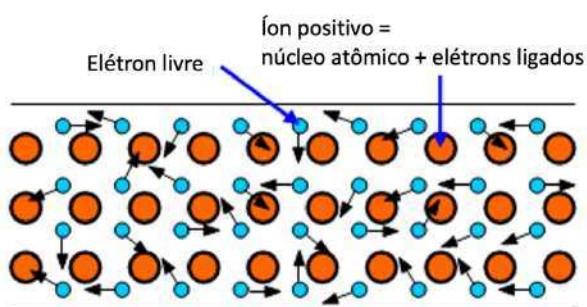
O modelo de Drude parte do princípio de que em um metal existe uma grande quantidade de elétrons livres. Na visão de Drude esses elétrons livres formam o que ele chamou de gás de elétrons. A partir dessa imagem ele usou os estudos da termodinâmica, especificamente da teoria cinética dos gases para obter os resultados da condutividade elétrica. A matemática envolvida nesses estudos está muito acima do ensino médio. Mas, podemos fazer uma descrição qualitativa dos resultados obtidos por Drude.



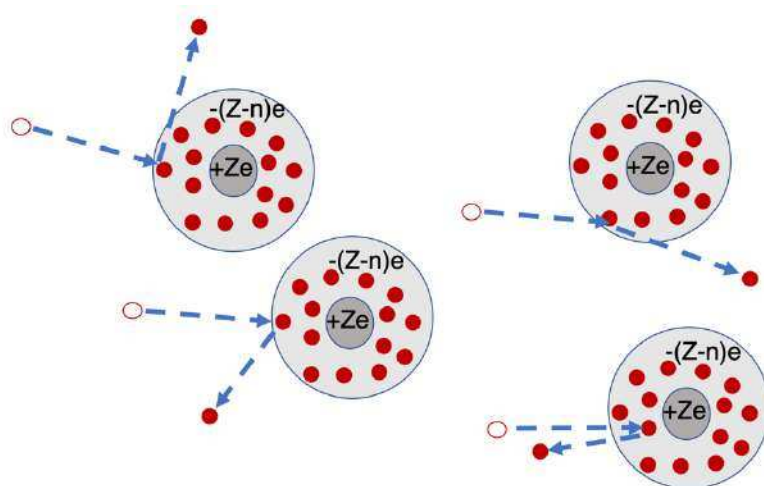
A matemática do modelo de Drude é muito difícil, mas a descrição qualitativa do que acontece no interior de um metal condutor é simples.

Microscopicamente, o que acontece é o seguinte. Cargas elétricas podem movimentar-se sob a ação de campos elétricos e magnéticos, e em diversos ambientes, mas vamos nos concentrar em materiais metálicos condutores, como cobre, níquel, ferro, entre outros. Geralmente os condutores usados em circuitos elétricos são confeccionados com cobre. Então, vamos tratar de elétrons movendo-se em resistores, sob a ação de um campo elétrico provido por uma bateria.

Geralmente o modelo microscópico de Drude é ilustrado em livros didáticos com essa imagem. Na ausência de campo elétrico, os elétrons movimentam-se aleatoriamente, exatamente como uma molécula de gás. Quando se aproximam do íon positivo, formado pela carga nuclear (positiva) e os elétrons fortemente ligados ao núcleo, os elétrons livres são espalhados em todas as direções. É por isso que o movimento é aleatório. Mas, tem um problema com essa imagem. Como é que os elétrons livres são espalhados por um íon positivo? De acordo com a lei de Coulomb eles deveriam ser atraídos, e não repelidos pelo íon positivo. Para resolver esse enigma é preciso olhar o modelo de Drude mais detalhadamente.



A imagem abaixo é uma visão mais realista do modelo de Drude. Você aprendeu na química que, no estado normal, o átomo tem no núcleo um certo número de prótons, e em volta desse núcleo orbita o mesmo número de elétrons. Esse número de prótons, igual ao de elétrons, é internacionalmente representado pela letra Z , e é denominado *número atômico*. Ou seja, a carga nuclear é positiva e igual a Ze , sendo e o módulo da carga do elétron, $e=1,6 \times 10^{19}$ C. Desse Z elétrons em volta do núcleo, n podem ser considerados livres, e $Z-n$ são os mais ligados ao núcleo. Os prótons e os elétrons ligados formam um íon positivo, com carga igual a ne . Então, por que o íon positivo espalha o elétron livre? Não deveria atraí-lo?



Para responder essa intrigante questão, precisamos de mais um conhecimento aprendido na química. Comparado com o tamanho total do átomo, o núcleo é minúsculo. Por exemplo, se ele fosse do tamanho de uma bola de futebol e colocado no centro do Maracanã, os elétrons ficariam nas arquibancadas. É isso que permite o espalhamento dos elétrons no modelo de Drude. Quando um elétron livre chega perto do íon, sua primeira e mais forte interação é com alguns elétrons ligados, que estão mais afastados do núcleo. A interação com a carga positiva do núcleo é mais fraca. Portanto, a força de repulsão é maior do que a força de atração.



É a grande distância entre os elétrons e o núcleo atômico que explica o espalhamento dos elétrons nos materiais condutores.

Veja na tabela periódica da figura 3.2 que o cobre tem número atômico 29. Desses 29 elétrons do cobre, apenas um é considerado livre. Isso parece pouco, mas não é. Com apenas esse elétron livre, o cobre é um dos melhores condutores de eletricidade. Em um pedaço de cobre existem alguns octilhões de elétrons livres. Um octilhão é o número 1 seguido de 27 zeros. É com essa enorme quantidade de elétrons livres que temos que lidar em um circuito elétrico simples.

Se um campo elétrico for aplicado a um condutor, o movimento aleatório dos elétrons livres será alterado pela força do campo elétrico, e esses elétrons passarão a ter um movimento ordenado. Os espalhamentos mencionados acima continuarão, mas a força do campo elétrico fará com que o movimento eletrônico seja ordenado, como ilustra a figura 3.3. No caso de um bom condutor, os elétrons livres se deslocam com mais facilidade do que no caso de um mau condutor. Veja que o elétron se move no sentido contrário ao do campo elétrico. Isso é assim por causa da equação (2.5).

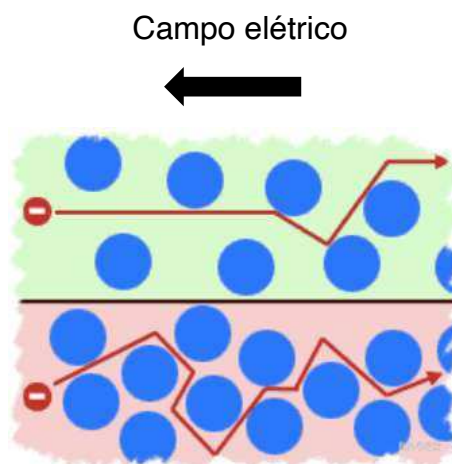


Figura 3.3. Ilustração do movimento de elétrons no interior de um bom condutor (desenho superior) e no interior de um mau condutor (desenho inferior).



MICROSCOPICAMENTE temos o movimento de elétrons, que não podemos observar, apenas imaginar como seja. **MACROSCOPICAMENTE** temos a corrente elétrica, que podemos medir com um amperímetro.

Apesar de microscopicamente o movimento aparentar caótico, macroscopicamente há um movimento eletrônico efetivo na figura 3.3, da esquerda para a direita. A imagem desse movimento é similar àquele de uma pessoa que dá dois passos para a frente e um para trás. No final das contas essa pessoa vai andar para a frente. É esse movimento efetivo dos elétrons que dá origem à corrente elétrica.

Corrente Elétrica

A primeira indicação da existência de corrente elétrica surgiu no século 18, com a invenção da pilha de Volta, mas a primeira investigação sistemática desse fenômeno só foi feita por volta de 1820, quando Ampère estudava a relação entre o sentido da corrente elétrica e o efeito que ela exercia numa bússola. Em sua homenagem, a unidade de corrente elétrica no sistema internacional (SI) é o ampere (A).

A intensidade de corrente elétrica é definida como a quantidade de carga que atravessa a seção reta de um condutor, por unidade de tempo, isto é,

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t}, \quad (3.1)$$

sendo a quantidade de carga medida em coulombs (C), e o intervalo de tempo em segundos (s). Então $1 \text{ C/s} = 1 \text{ A}$.

Embora definida por uma equação muito simples, o conceito de corrente elétrica é muito complexo, causando confusão na mente de alunos de todos os níveis, do ensino médio ao universitário, e mesmo profissionais da eletricidade manifestam confusão conceitual em relação à corrente elétrica. Praticamente todos os livros didáticos contribuem para essa confusão.

A figura 3.4 é uma ilustração da corrente elétrica em um condutor de comprimento L . O modelo de Drude é sugerido pela existência de espalhamento eletrônico pelos pontos pretos, que simbolizam os íons positivos da rede cristalina. Há duas indicações de corrente nessa figura. A corrente conhecida como corrente convencional, indicada pela letra I , e a corrente de elétrons, conhecida como corrente real. A corrente convencional sai do polo positivo da bateria, enquanto a corrente real sai do polo negativo. Até 1897, ano da descoberta do elétron, ninguém sabia quem era o responsável pela corrente elétrica. Então, durante quase um século convencionou-se definir o sentido da corrente do polo positivo para o negativo, e esta convenção prevalece até hoje.

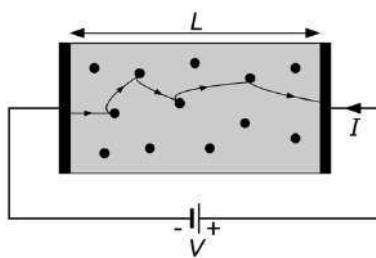
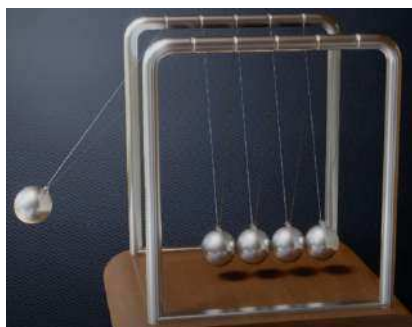
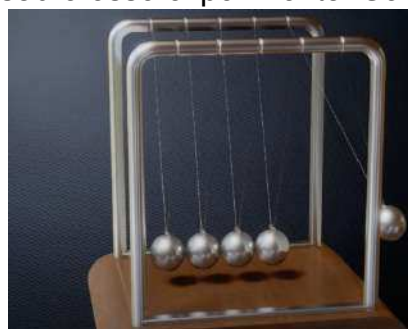


Figura 3.4 – Desenho típico encontrado em livros didáticos para ilustrar a corrente elétrica através de um resistor de comprimento L , alimentado por uma bateria com tensão V .

Essa imagem é fonte de muita confusão. Ela sugere que o elétron sai do polo negativo e vai até o polo positivo. Não é isso o que acontece. A explicação detalhada do que acontece requer conhecimentos de física e matemática que estão acima do que podemos tratar aqui. No entanto, podemos discutir qualitativa o que acontece quando se estabelece uma corrente elétrica em um condutor. Faremos isso usando como analogia um experimento que você talvez tenha visto na mecânica. Existem vários vídeos no Youtube sobre esse experimento. Selecionei esse que está aqui <https://www.youtube.com/watch?v=DMRulHySH3c>.

Uma esfera é afastada e depois liberada para atingir a primeira das quatro esferas que estão imóveis. A esfera em movimento transfere sua energia, ou sua quantidade de movimento, para a primeira esfera. Essa quantidade de movi-



mento é transferida para as três esferas seguintes, até que a quarta esfera recebe a energia e se move para a esquerda. Ou seja, o movimento da esfera à direita é transferido para a esfera à esquerda. Observe que todas as outras esferas ficam imóveis, justamente porque toda a quantidade de movimento, ou toda a energia foi transferida para a última esfera à esquerda.

O que acontece no condutor é algo parecido. Quando uma bateria é conectada a um condutor, instantaneamente cria-se um campo elétrico, que atua em todos os elétrons e prótons do material. No entanto, apenas os elétrons livres podem se mover em distâncias apreciáveis sob a ação desse campo. Na figura 3.5, a força do campo é indicada pelas setas azuis em alguns elétrons, selecionados para ilustrar a explicação. Como a aplicação do campo é quase instantânea, o elétron mais próximo do polo positivo será por este atraído antes que

qualquer elétron mais próximo do polo negativo. Portanto, não é o elétron que está próximo do polo negativo que será absorvido pelo polo positivo.

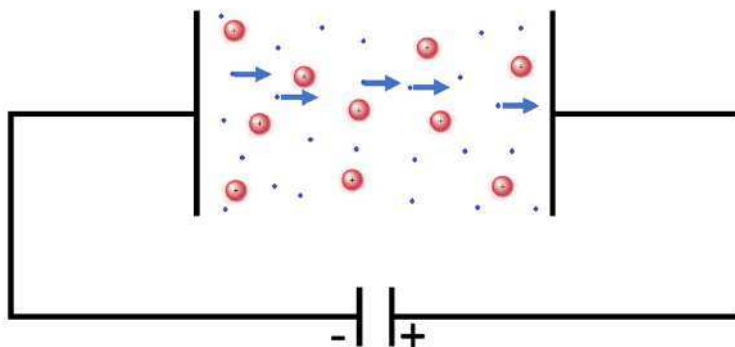


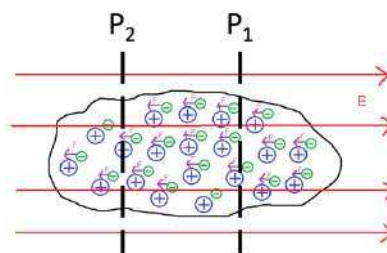
Figura 3.5 – Modelo microscópico da corrente elétrica.



Pergunta natural: no contexto desse modelo, qual o significado da equação (3.1)?

Como o campo elétrico atua instantaneamente, tem-se praticamente a mesma densidade de carga elétrica ao longo do condutor. Ou seja, se colocarmos um contador de elétrons em qualquer ponto do condutor, P_1 , P_2 ou qualquer outro ponto, a contagem ao longo de um determinado

tempo será a mesma. É essa contagem que denominamos de corrente elétrica, ou seja, a quantidade de elétrons por unidade de tempo, que passa em uma seção reta do condutor. Existem equipamentos, denominados amperímetros, que fazem essa contagem. Na verdade, a palavra correta não é contagem, é medida. Os amperímetros medem a quantidade de carga por unidade de tempo. Para concluir, a corrente não é o fluxo de elétrons ao longo do condutor, é a quantidade de elétrons que passam por unidade de tempo em determinada seção reta do condutor. E ela será a mesma em qualquer ponto do condutor.



Resistência, Resistividade, Condutividade e Lei de Ohm

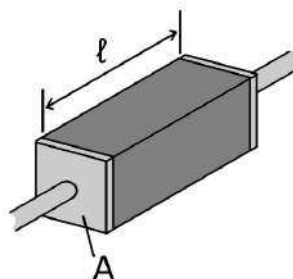
Na figura 3.3 são ilustrados os movimentos de um elétron em um bom condutor e em um mau condutor. A figura sugere que no bom condutor o elétron se movimenta mais livremente, enquanto no mau condutor há mais obstáculos para o movimento eletrônico. Esse tipo de imagem, ou modelo, tem alguma coisa a ver com a realidade?

O que faz um material ser bom ou mau condutor de eletricidade?

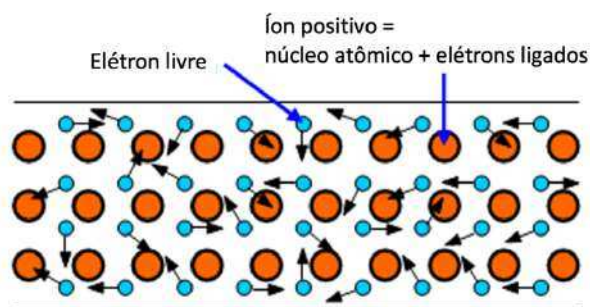


Só depois que todos os fundamentos clássicos da eletricidade foram descobertos é que essa pergunta pôde ser respondida. Por exemplo, quando Georg Simon Ohm descobriu a lei que leva seu nome, no início dos anos 1820, ele não tinha a menor ideia do que acontecia no interior dos condutores. Ele só conseguiu relacionar as

propriedades macroscópicas nos seus experimentos, e conseguiu estabelecer a relação entre diferença de potencial, corrente elétrica e resistência. A resistência é uma propriedade que depende do material condutor e de sua geometria, ou seja, seu comprimento, ℓ , e sua seção reta, ou área transversal, A . Daqui a pouco você vai ver a fórmula descoberta por Ohm, mas antes disso é interessante saber que propriedades microscópicas explicam a resistência de um material.

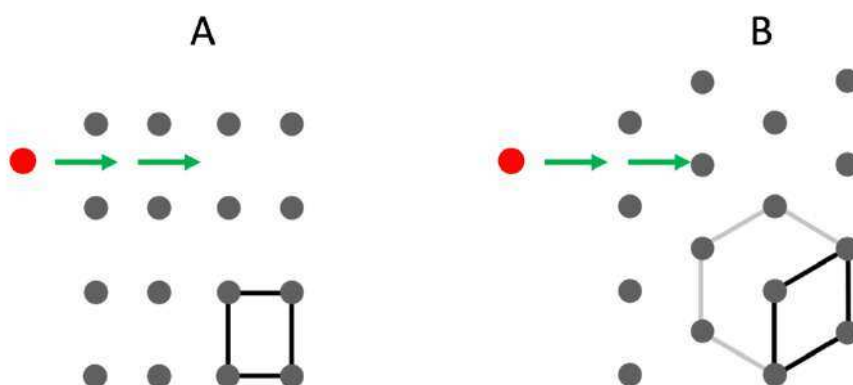


Vamos voltar ao modelo de Drude, cuja ilustração foi apresentada acima, e será repetida aqui. Os íons positivos formam a estrutura cristalina do material. Nessa imagem, a estrutura é formada de fileiras de três íons, que se repetem ao longo do fio. Denominamos *célula unitária* essa parte da estrutura que se repete. Cada material tem uma determinada célula unitária. Os materiais que têm células unitárias similares formam determinados grupos de materiais. Não precisamos discutir esses detalhes aqui. Basta ficarmos com o modelo qualitativo de Drude.



Veja essas duas células unitárias na figura abaixo. Na célula A, os íons formam quadrados, com um íon em cada vértice, enquanto na célula B eles

formam hexágonos, com um íon no centro e seis íons nos vértices. As imagens sugerem que se um elétron penetra nessas estruturas cristalinas na mesma direção das setas, ele passa sem espalhamento na estrutura A, mas será espalhado na estrutura B. A situação real é muito mais complexa, mas esse modelo simples indica que materiais com estruturas cristalinas diferentes espalham elétrons diferentemente. Essas diferenças nos espalhamentos eletrônicos resultam em diferentes valores das resistências elétricas. Quando Ohm descobriu que diferentes metais apresentavam diferentes resistências, ele não sabia que isso tinha a ver com a estrutura atômica dos materiais.



Nos seus primeiros experimentos, Ohm mediu a corrente elétrica que passava em determinado fio condutor, quando ele aplicava uma diferença de potencial (ddp) entre seus extremos. Ele experimentou fios de vários metais: cobre, ferro, zinco, ouro, prata, platina, entre outros. Para todos eles o resultado foi muito similar. Em notação moderna, ele obteve a seguinte relação:

$$i = \frac{V}{R}, \quad (3.2)$$

onde, i é a corrente elétrica, V é a ddp, e R é uma constante que depende do material. A partir desse resultado, Ohm enunciou sua lei:

A corrente em um condutor é diretamente proporcional à ddp aplicada nas suas extremidades.

Em vários livros didáticos, a lei de Ohm é apresentada diferente do enunciado acima, mas todas elas resultam da equação (3.2). Nessa equação, a constante de proporcionalidade é o inverso da resistência, que Ohm demonstrou como calcular:

A resistência de um condutor pode ser calculada dividindo o comprimento do condutor pelo produto da sua condutividade pela sua área transversal.

Em notação moderna, esse enunciado pode ser expresso por essa equação:

$$R = \frac{L}{\sigma A}, \quad (3.3)$$

onde, L é o comprimento do fio, A é sua seção transversal, e σ é a condutividade do material. É essa propriedade que tem a ver com a estrutura cristalina do material. O inverso da condutividade é a resistividade, outra propriedade do material, ou seja, $\frac{1}{\sigma} = \rho$. Nos livros didáticos, a equação (3.3) é geralmente apresentada em termos da resistividade:

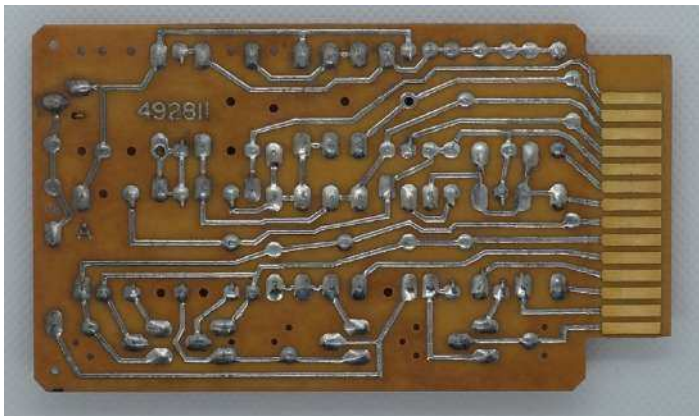
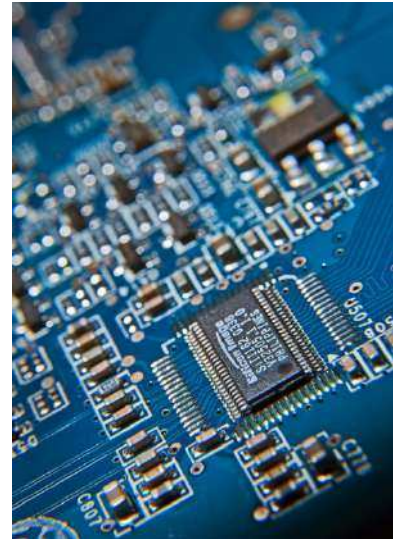
$$R = \rho \frac{L}{A}. \quad (3.4)$$

No sistema SI, a unidade de resistência é o ohm (Ω), da resistividade é ohm.m, e da condutividade é S/m, onde S é o símbolo de Siemens.

Capítulo 4

Circuitos Elétricos

Não há praticamente nada em nosso dia a dia que não dependa de pelo menos um circuito elétrico, quase sempre bastante complexo, como essa placa mãe de um computador, similar a este que estou usando para escrever esse texto. Diariamente engenheiros eletrônicos dedicam-se aos cálculos de correntes e diferenças de potenciais nesses circuitos, com o objetivo de montar seus projetos e fabricar equipamentos. As conexões entre os vários componentes do circuito são feitas no verso da placa, como na fotografia abaixo.



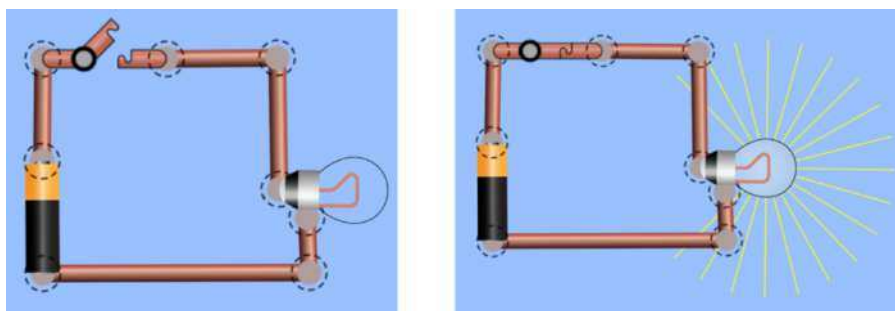
Até mesmo para tarefas simples, sistemas eletrônicos são fabricados, como essa placa usada para a extração de água de uma bombona caseira.

Para abordar todos esses circuitos elétricos, são necessários basicamente o conhecimento da lei de Ohm, que você aprendeu no capítulo anterior e das leis de Kirchhoff, que serão abordadas aqui apenas de forma bastante introdutória e qualitativa.

Todo circuito necessita de pelo menos uma bateria ou fonte de tensão para fazê-lo funcionar, e de um ou mais interruptores, que, como o nome sugere, servem para interromper o funcionamento do circuito, ou parte dele. Se não fosse assim, as lâmpadas de nossas casas ficariam sempre apagadas ou sempre acesas. Um dos circuitos mais



simples que podemos imaginar consiste de uma bateria, um interruptor e uma lâmpada incandescente¹.



Quando o interruptor é fechado, a lâmpada brilha, ou seja, emite luz. Por quê? Na maioria dos livros didáticos diz-se que isso acontece porque os elétrons na resistência da lâmpada² atingem altas temperaturas, que os faz emitir luz visível. Isso é parte da verdade, mas não é tudo. Porque o fato de atingir altas temperaturas os faz emitir luz visível? Logo depois da descoberta do elétron, em 1897, Joseph Larmor descobriu que uma partícula carregada em movimento emite luz, cuja frequência é proporcional à sua velocidade. Por outro lado, a temperatura de um corpo também é proporcional à velocidade dos componentes atômicos do corpo. É isso que justifica as afirmações contidas nos livros didáticos, de que os materiais condutores emitem luz por causa das altas temperaturas que apresentam durante a passagem da corrente elétrica.



É inevitável a repetição de ideias, conceitos e leis já abordados, na descrição que faremos aqui do fenômeno da condutividade elétrica em circuitos simples. Aliás, do ponto de vista didático essa repetição é conveniente, pois facilita a internalização dos conceitos abordados.

No momento que o interruptor (chave) é ligado, o campo elétrico produzido pela bateria começa a atuar nas cargas distribuídas ao longo dos condutores do circuito. Assim que um elétron sai do polo negativo da bateria, outro entra pelo polo positivo. Veja que não é o elétron que sai do polo negativo que vai ser absorvido pelo polo positivo. Mas, a quantidade de elétrons que saem do polo negativo da bateria é igual à quantidade que entra no polo positivo. Isso significa que há conservação da carga elétrica no circuito. Nenhuma carga *desaparece* no processo da condutividade elétrica. O mesmo acontece com a corrente elétrica, que também é conservada. **Não há qualquer tipo de consumo da corrente elétrica no circuito.**

¹ A menos que seja dito o contrário, todas as imagens deste capítulo foram extraídas da <https://commons.wikimedia.org/> e do portal <https://phet.colorado.edu>.

² Isso vale para o caso de lâmpadas incandescentes e fluorescentes. No caso das modernas lâmpadas LED o mecanismo é outro, bem mais complicado.



O campo elétrico atua em TODAS as cargas, mas apenas os elétrons livres se deslocam em uma distância razoavelmente longa.

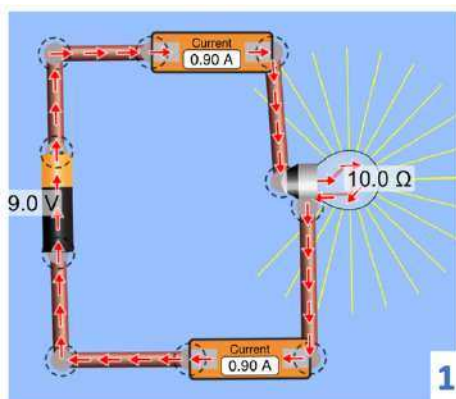
Então, a corrente que sai da bateria é igual à que entra. A corrente sai da bateria por causa do campo elétrico produzido por ela. A bateria não é fonte de corrente, ela é fonte de tensão, ou de potencial, ou de força eletromotriz. Tudo isso é produzido pelo campo elétrico.



Atenção, a bateria não é fonte de corrente, ela é fonte de tensão, ou de potencial, ou de força eletromotriz.

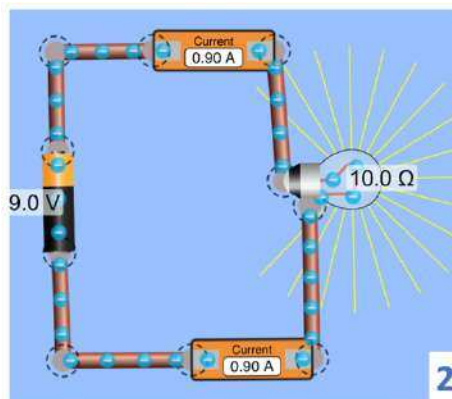
Cada bateria tem uma força eletromotriz (*fem*) que depende do processo de fabricação. Por exemplo, essas pilhas que costumamos usar em diversos aparelhos domésticos, têm forças eletromotrizes que variam de 1,5 V a 9 V. Com o tempo, o material que produz a força eletromotriz vai sendo consumido até que a pilha deixa de funcionar porque deixa de produzir a voltagem exigida pelos equipamentos.





Então, a fem é fixa, mas a corrente que sai de um polo da bateria e entre pelo outro depende do circuito. Veja bem o circuito (1). Uma bateria de 9 V alimenta uma lâmpada de $10\ \Omega$. As setas vermelhas indicam a corrente convencional, aquela que sai do polo positivo e entra no polo negativo.

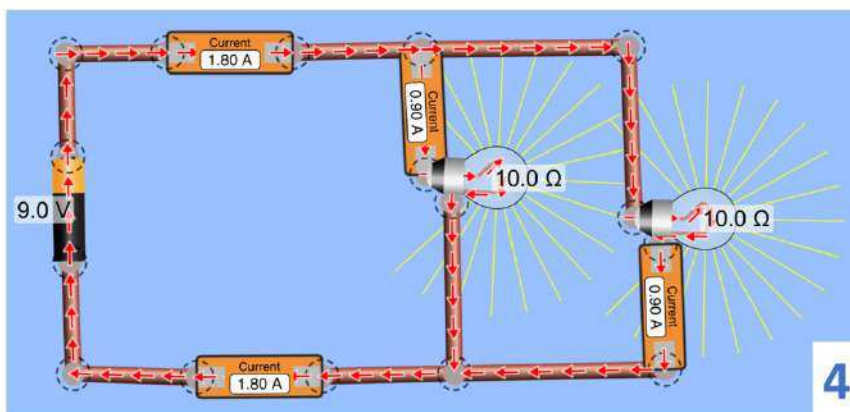
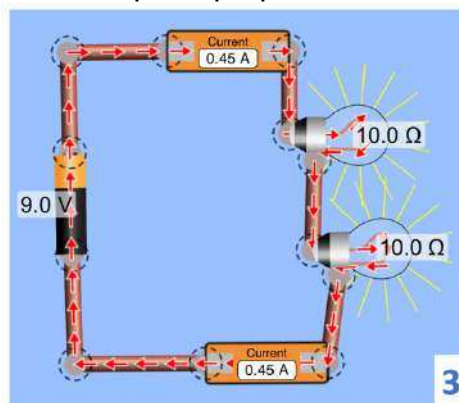
Um amperímetro mede a corrente na saída da bateria, e outro mede a corrente na entrada. Como foi dito acima, as duas correntes são iguais. Portanto, a corrente é conservada ao longo do circuito. Embora seja quase universal o uso da corrente convencional, a corrente real é aquela formada pelo fluxo de elétrons livres, saindo do polo negativo no sentido do polo positivo, como ilustra o circuito (2).



A corrente de 0,9 A medida pelo amperímetro não é uma propriedade da bateria. Ela depende dos componentes do circuito. O que é propriedade da bateria é a fem.

Para verificar que a corrente depende do circuito, vamos acrescentar uma lâmpada, permanecendo com a mesma pilha de 9 V. Veja que a corrente agora é a metade da anterior.

Vamos acrescentar a segunda lâmpada de outro modo.



Veja que, em comparação com o circuito (1), a corrente de saída (e de entrada) dobrou o valor, enquanto a corrente que passa em cada lâmpada é a metade da corrente que sai da bateria.

Vamos redesenhar os circuitos (1), (3) e (4) com os símbolos usados nos livros didáticos e discuti-los o mais detalhadamente possível. Agora eles foram renomeados: 5, 6 e 7. Vamos responder as seguintes questões:

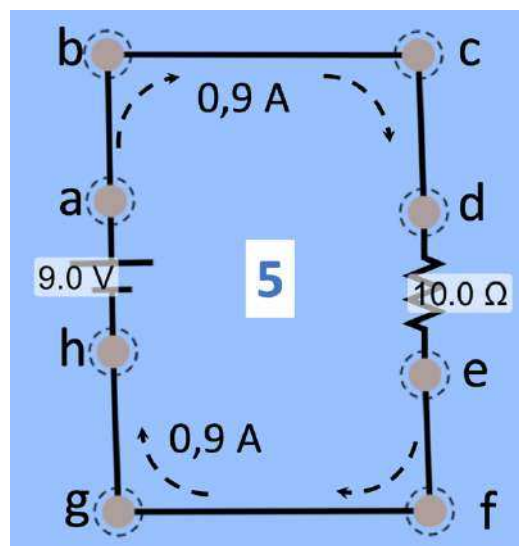
1. Por que a corrente no circuito 6 é a metade da corrente no circuito 5?
2. Por que a corrente de saída e entrada no circuito 7 é o dobro da corrente no circuito 5?
3. Por que no circuito 7 as correntes nos trechos c-i e d-j são iguais à metade da corrente de saída?

Tudo isso tem a ver com a lei de Ohm (eq. 3.2), que vamos reescrever na forma como usualmente é apresentada nos livros didáticos:

$$V = Ri. \quad (4.1)$$

Na equação (4.1), V representa a diferença de potencial entre as extremidades da resistência. Por comodidade escreve-se V em vez de ΔV . Portanto, quando uma corrente i atravessa um condutor com resistência R , aparece uma diferença de potencial (ddp), V , entre suas extremidades. Vejamos como usamos essa equação nos circuitos elétricos simples.

Tudo que for dito sobre esse circuito poderá ser aplicado nos circuitos 6 e 7. Esse circuito é igual ao circuito 1. Apenas substituímos os símbolos. Tem-se uma bateria ou fonte de tensão de 9 V e um resistência de 10 Ω . Para montar o circuito, temos que usar fios condutores para conectar os componentes. Esses fios são fabricados de tal modo que suas resistências elétricas são praticamente nulas, comparadas com as resistências dos componentes eletro-eletrônicos. Para esse circuito 5 usamos os fios abcd e efgh. Como indicado no circuito 1, o amperímetro mediu uma corrente de 0,9 A.



Portanto, só haverá diferença de potencial entre os pontos a e h ($\Delta V = V_a - V_h = 9V$) e entre d e e, ou seja, através do resistor. Essa ddp ($V_d - V_e$) será, conforme a equação (4.1), o produto de R (10 Ω) por i (0,9 A), ou seja 9 V, que é exatamente a fem da bateria. Esse resultado foi obtido com a lei de Ohm, mas

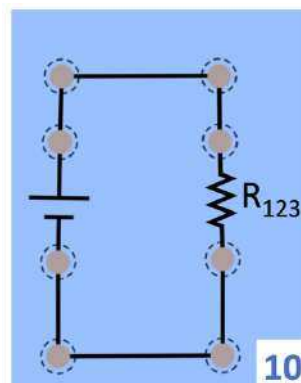
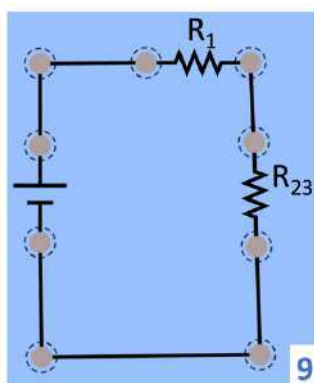
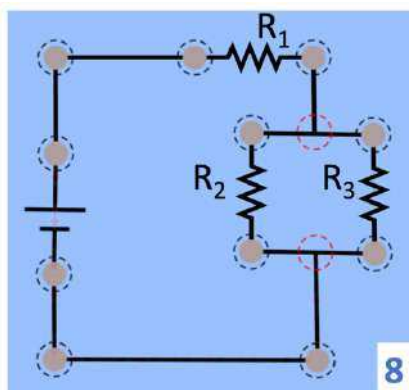
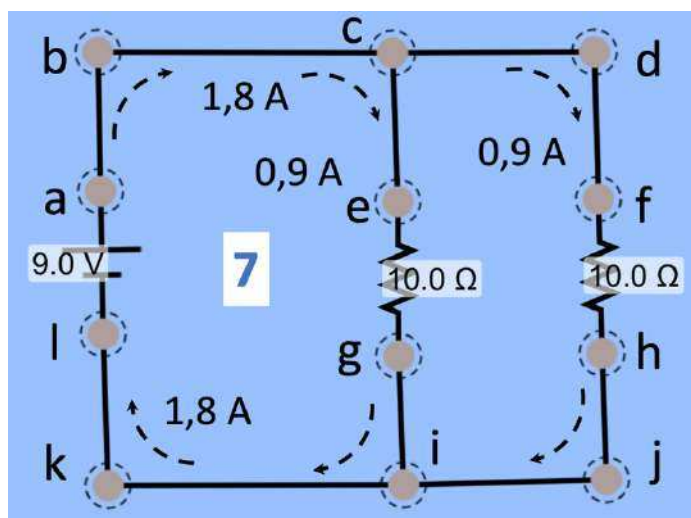
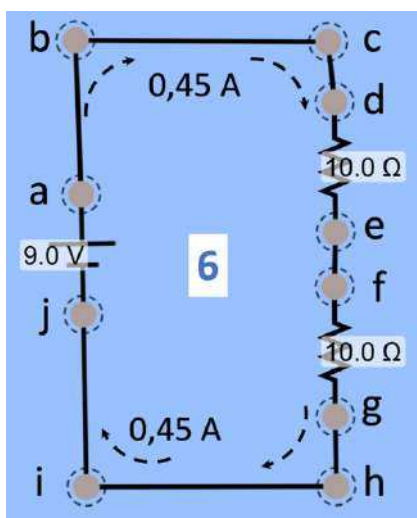
podemos obtê-lo sem fazer uso dessa lei. Como o fio abcd não tem resistência, o potencial em a é igual ao potencial em d. Da mesma forma, o potencial em h é igual ao potencial em e. Ou seja:

$$V_a = V_d$$

$$V_h = V_e$$

$$V_d - V_e = V_a - V_h = 9V$$

Esse procedimento pode ser aplicado em muitos circuitos, com diferentes associações de resistências. Existem duas formas de associar resistências. Uma delas é o que chamamos de associação em série, como no circuito 6. A outra forma é a associação em paralelo, como no circuito 7. Geralmente os circuitos são contêm os dois tipos de associação, como no circuito 8. Qualquer que seja o tipo de associação, podemos substituir o conjunto das resistências por uma única, que denominamos de resistência equivalente. No presente caso, o circuito 8 é substituído pelo circuito 9, e finalmente o circuito 9 é substituído pelo 10. A resistência R_{123} é a resistência equivalente das três resistências do circuito 8. Vejamos como calcular R_{123} .



A resistência equivalente de duas ou mais resistências em série é a soma das resistências. O inverso da resistência equivalente de duas ou mais resistências em paralelo é a soma dos inversos das resistências. R_{23} é a resistência equivalente de R_2 e R_3 , que estão em paralelo:

$$\frac{1}{R_{23}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{R_2 + R_3}{R_2 R_3}$$

$$R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \quad (4.2)$$

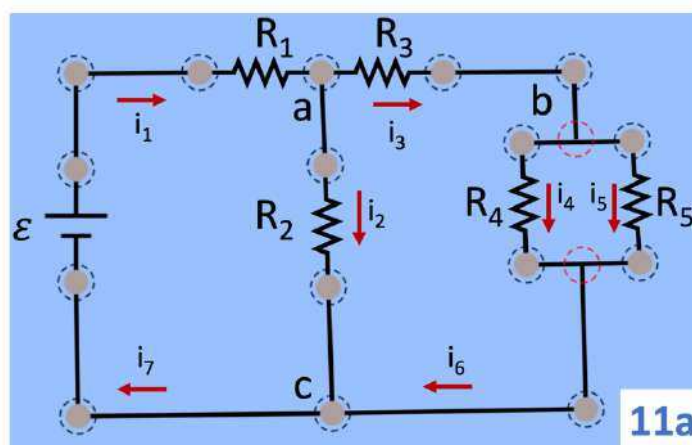
Mostre que a resistência equivalente de três resistências em paralelo é dada pela fórmula:

$$R_{123} = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3} \quad (4.3)$$

No circuito 9, R_1 e R_{23} estão em série, logo:

$$R_{123} = R_1 + R_{23} = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_2 + R_3} \quad (4.4)$$

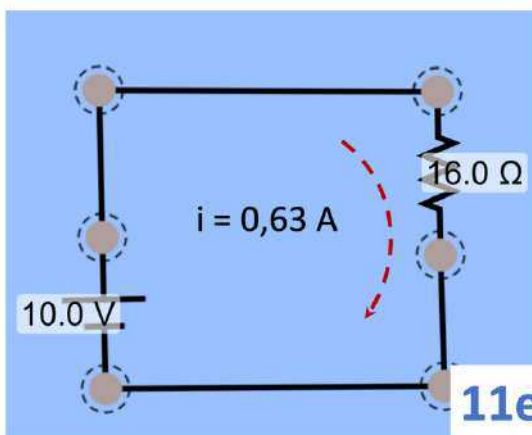
Você pode usar essa sistemática para calcular a resistência equivalente de qualquer circuito simples como esses que estamos tratando aqui, sempre começando do final do circuito para o início. Por exemplo, no circuito 11a você pode calcular a resistência equivalente começando pelas resistências R_4 e R_5 , que estão em paralelo. Calcule R_{45} . Esta está em série com R_3 . Calcule R_{345} . Esta está em paralelo com R_2 . Calcule R_{2345} . Finalmente, R_{2345} está em série com R_1 , de modo que a resistência equivalente do circuito será $R_{eq} = R_1 + R_{2345}$.



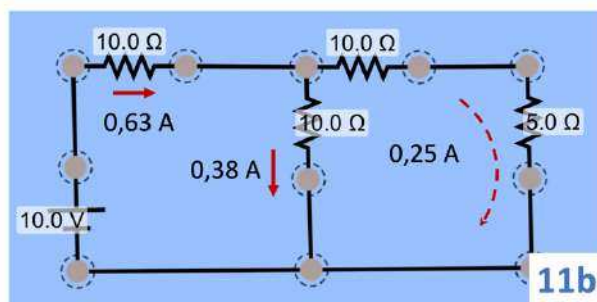
Esse circuito é razoavelmente complexo. Se o estudarmos detalhadamente você estará preparado para resolver a maioria dos circuitos do ENEM. Vamos supor que a fem, ε , da bateria seja 10 V, e que todas as resistências sejam iguais a $10\ \Omega$. Vamos ver o que podemos dizer a respeito dos valores das correntes, sem fazer qualquer cálculo.

1. $i_1 = i_7$, pelo princípio da conservação da carga, ou da corrente. Ou seja, a corrente que sai da bateria tem que ser a mesma que entra, não importa o circuito.
2. Também pelo princípio da carga, $i_3 = i_6$.
3. $i_4 = i_5$, porque as resistências são iguais e estão sob a mesma diferença de potencial. Mostre que essa conclusão é consequência da lei de Ohm, expressa na eq. (4.1).
4. Os pontos a, b e c, onde a corrente se divide, são denominados nós.
5. No nó a, a corrente i_1 se divide em i_2 e i_3 , de modo que $i_1 = i_2 + i_3$.
6. No nó b, i_3 se divide em i_4 e i_5 , de modo que $i_3 = i_4 + i_5$.

Transformando o procedimento descrito logo depois da eq. (4.4) em circuitos, e substituindo os valores da fem e das resistências, teremos os circuitos 11b-11e, a partir dos quais podemos calcular as correntes. A primeira pergunta é: neste circuito, que corrente é fornecida pela bateria? Esse cálculo é feito com o circuito 11e, quando todas as resistências foram substituídas pela resistência equivalente do circuito. Usando a eq. (4.1) no circuito 11e, obtém-se a corrente fornecida pela bateria, que é 0,63 A. Preste atenção, se o circuito fosse diferente, a corrente também seria diferente. A única coisa que permanece igual é a fem da bateria, 10 V.

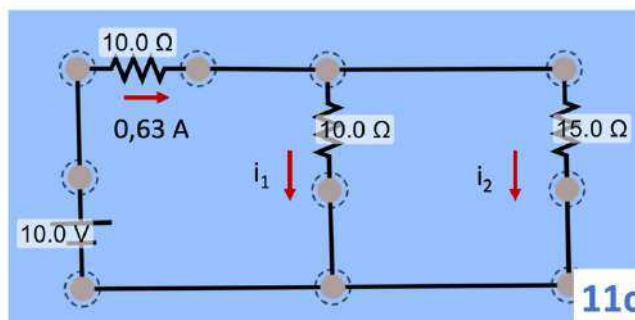


Agora vamos para o circuito 11b.



Veja que neste circuito as resistências R_4 e R_5 , que estavam em paralelo no circuito original (11a), foram substituídas pela resistência de $5\ \Omega$. Faça o cálculo e comprove que este é o valor correto. A corrente que sai da bateria, $0,63$

A, é dividida em duas: $0,63 = 0,38 + 0,25$. Como calculamos essas duas correntes? Transformando o circuito 11b no 11c, somando as resistências de $10\ \Omega$ e $5\ \Omega$, que estão em série em 11b.



Agora precisamos fazer um cálculo um pouco mais elaborado. Veja que em 11c as resistências de $10\ \Omega$ e $15\ \Omega$, estão em paralelo. Portanto, estão submetidas à mesma diferença de potencial. Usando a eq. (4.1), obtém-se:

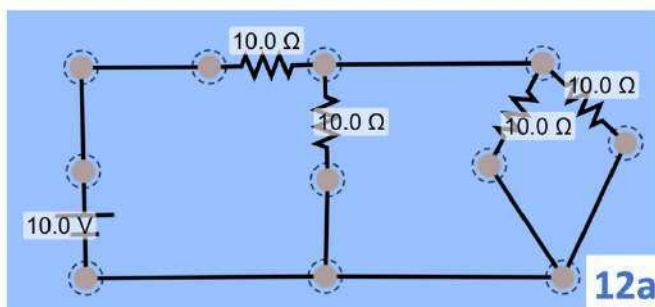
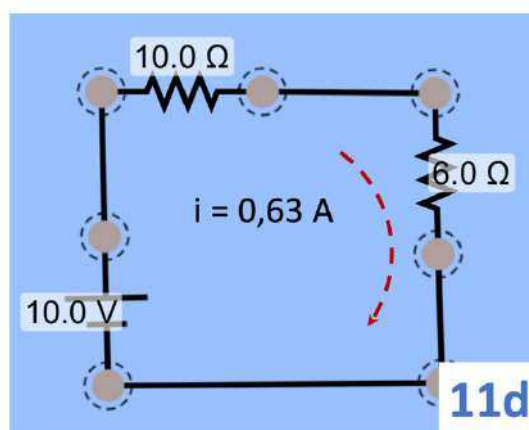
$$V = 10i_1 = 15i_2 \rightarrow i_1 = 1,5i_2$$

Por outro lado,

$$0,63 = i_1 + i_2 = 2,5i_2 \rightarrow i_2 = 0,25\ A \rightarrow i_1 = 0,38\ A$$

Finalmente, o circuito 11c é transformado no 11d, quando substituímos as resistências de $10\ \Omega$ e $15\ \Omega$, estão em paralelo, pela resistência equivalente de $6\ \Omega$.

Vamos retirar a resistência R_3 no circuito 11a, para você ficar convencido de que a bateria não é uma fonte de cor-



rente constante. Ela é uma fonte de força eletromotriz constante. A corrente que ela fornece depende do circuito que ela alimenta. Agora o circuito 11a será substituído pelo circuito 12a.

Veja que o circuito 12a é idêntico ao circuito 11a, excetuando a resistência R_3 que foi eliminada. Ele apenas está desenhado um pouco diferente. Repita os procedimentos apresentados para os circuitos 11 e mostre que agora, no circuito final, a resistência equivalente é $13,33 \, \Omega$, e que a corrente fornecida pela bateria é $0,75 \, \text{A}$.

