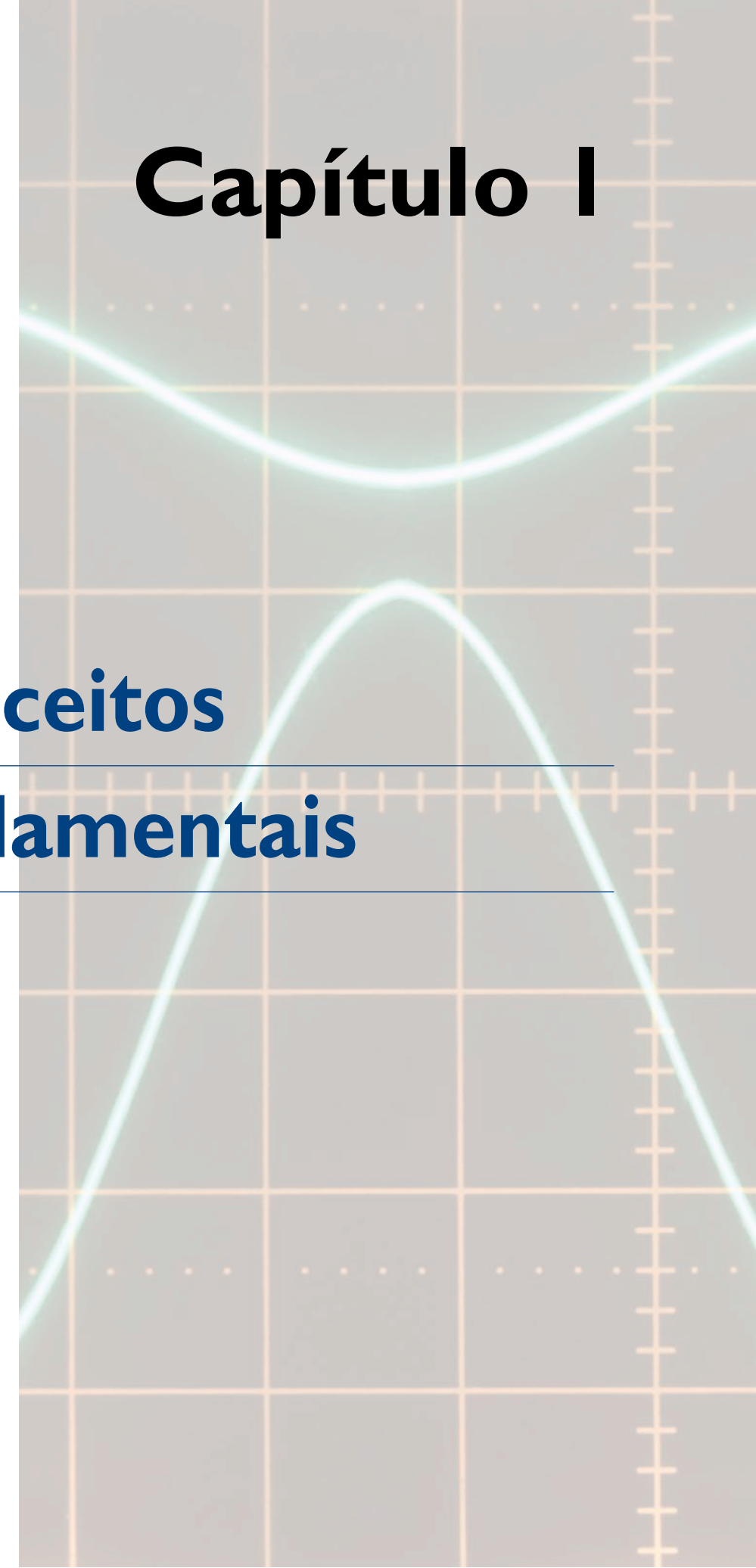


Capítulo I

Conceitos fundamentais



Ernest Rutherford (1871-1937), físico e químico neozelandês, desenvolveu pesquisas sobre radiatividade que lhe renderam o Prêmio Nobel de Química de 1908.

James Chadwick (1891-1974), físico britânico, colaborou com Rutherford. A descoberta do nêutron lhe valeu o Prêmio Nobel de Física de 1935.

Da eletrização do âmbar, observada por Tales de Mileto, à criação do primeiro capacitor, realizaram-se muitos estudos sobre a eletricidade nos materiais. Descobriu-se que havia dois tipos de eletricidade, que se convencionou chamar de positiva e negativa, mas ainda não se dispunha de uma forma de armazená-la por tempo suficiente que viabilizasse alguma aplicação. A garrafa de Leiden resolveu esse problema e permitiu que os estudos sobre os fenômenos elétricos avançassem, introduzindo novos conceitos, como carga, campo, tensão, corrente, potência e energia, fundamentais para o entendimento dos circuitos elétricos. São esses conceitos que vamos estudar neste capítulo.

1.1 Modelos atômicos

O modelo atômico mais simples para entender os fenômenos elétricos é o de **Rutherford**, de 1911. A esse modelo acrescentam-se os nêutrons, descobertos por **Chadwick**, em 1932.

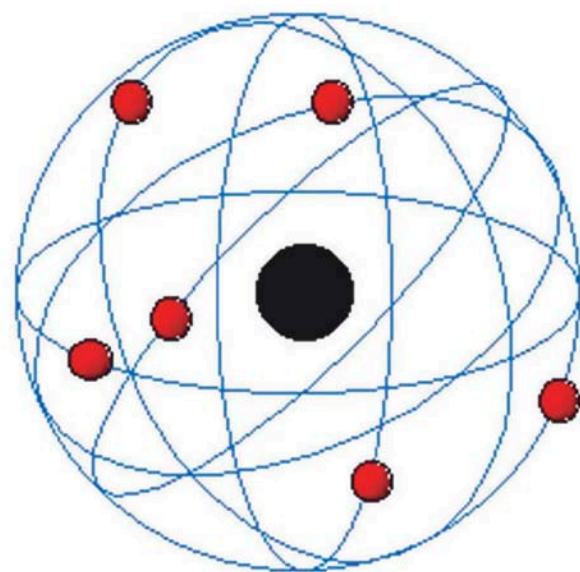


Figura 1.1
Modelo atômico de Rutherford.

Rutherford descobriu experimentalmente que o volume do átomo é em sua maior parte vazio. No centro, encontra-se um pequenino núcleo positivo, cons-

tituído por prótons (partículas com carga elétrica positiva) e nêutrons (partículas neutras). Ao redor do núcleo, em uma região denominada eletrosfera, orbitam partículas ainda menores de carga negativa, chamadas **elétrons**.

A massa do próton é cerca de 1850 vezes maior que a do elétron.

Esse modelo atômico também é conhecido como modelo planetário, pela analogia com o sistema solar. O núcleo faz o papel do Sol, enquanto os elétrons se movem como os planetas. Em lugar da atração gravitacional, temos a força elétrica atrativa entre cargas de sinais opostos.

1.2 Carga elétrica

Prótons e elétrons possuem uma propriedade denominada carga elétrica, representada por **Q**. As cargas dessas partículas têm a mesma intensidade, porém sinais contrários. A unidade de medida do Sistema Internacional utilizada para quantificar a carga elétrica é o coulomb (símbolo: C), em homenagem a **Charles Coulomb**. A carga elétrica elementar, ou seja, a carga de um elétron ou de um próton vale $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

Charles Augustin de Coulomb (1736-1806), engenheiro e físico francês, realizou experiências com cargas elétricas em uma balança de torção a fim de determinar a força da natureza elétrica entre elas. Desse estudo resultou a lei que leva seu nome.

Um átomo é considerado eletricamente neutro quando tem igual número de prótons e de elétrons. Se, por algum motivo, houver um desequilíbrio nessa igualdade numérica, o átomo passa a se chamar íon. Os íons são positivos (cátions), no caso de perda de elétrons, ou negativos (ânions), no caso de ganho de elétrons.

A carga elétrica de qualquer corpo é determinada pela diferença entre o número de elétrons e o de prótons que ele possui. Se em determinado corpo essa diferença for igual a **N**, a carga total é dada pelo produto $N \cdot e$, uma vez que **e** é o valor de uma carga elementar positiva ou negativa. Assim, na expressão 1.1, **Q** representa a carga elétrica total do corpo.

$$Q = Ne \quad (1.1)$$

Se o número de elétrons for maior que o de prótons, o corpo terá carga negativa; se for menor, carga positiva.

Exemplo

Quantos elétrons um corpo neutro deve perder para que passe a ter carga elétrica igual a 1 C?

Solução:

Sabemos o valor da carga do elétron: $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

e da carga total do corpo: $Q = 1 \text{ C}$

Pela equação 1.1, temos:

$$1 \text{ C} = N \cdot 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}, \text{ resultando } N = 6,25 \cdot 10^{18} \text{ elétrons.}$$

Em expressões matemáticas, as barras representam o módulo do número entre elas. Qualquer que seja o sinal desse número, o módulo é sempre positivo. Assim, $|8| = 8$ e $|-8| = 8$.



1.3 Campo elétrico

Antes de passar ao estudo do campo elétrico e das forças que atuam sobre as cargas, vamos fazer uma analogia com o campo gravitacional. Toda massa (por exemplo, a de um planeta) cria um campo gravitacional a seu redor, fazendo com que outras massas sejam atraídas por ela (todos os corpos são atraídos para o centro da Terra). Da mesma forma, cargas elétricas produzem campos elétricos em torno de si, de tal maneira que outra carga elétrica que esteja nesse campo sofrerá repulsão (se ambas tiverem o mesmo sinal) ou atração (se os sinais forem diferentes). Tais forças entre as cargas, no caso, têm natureza elétrica, e entre as massas, natureza gravitacional.

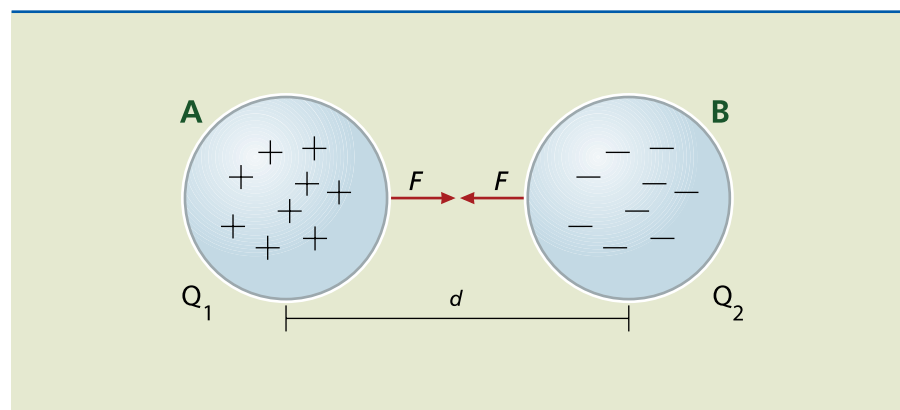
Assim como as massas imersas em campo gravitacional estão sujeitas a uma força gravitacional, as cargas elétricas no interior de um campo elétrico também sofrem a ação de forças de natureza elétrica.

No caso de duas massas, cada uma cria o próprio campo gravitacional. Portanto, quando próximas, ambas estão sob a ação de forças atrativas, cujas intensidades são iguais e de sentidos opostos.

Analogamente, se tivermos dois corpos A e B carregados com cargas elétricas de sinais diferentes (figura 1.2), teremos B imerso no campo elétrico gerado por A, sujeito a uma força atrativa F, de direção horizontal e sentido para a esquerda. A carga de A, que está imersa no campo elétrico produzido por B, está sujeita a uma força de mesma intensidade F e direção horizontal, mas com sentido para a direita.

Experimentalmente, verifica-se que cargas de polaridades diferentes se atraem, enquanto cargas de mesmo sinal se repelem.

Figura 1.2
Força elétrica entre dois corpos carregados.



A intensidade da força elétrica de atração (entre cargas de sinais contrários) ou de repulsão (entre cargas de mesmo sinal) é dada pela expressão algébrica da lei de Coulomb.

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{d^2} \quad (1.2)$$

em que:

- F é a intensidade da força de interação elétrica entre Q₁ e Q₂, medida em newtons (N);
- Q₁ e Q₂ as cargas elétricas de cada corpo, medidas em coulombs (C);
- d a distância entre os centros de massa de Q₁ e Q₂, medida em metros (m);
- k a constante de proporcionalidade do meio

(para o vácuo, $k = k_0 = 9,00 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$).

No modelo planetário de Rutherford, os elétrons de um átomo se distribuem em órbitas circulares, conhecidas também por camadas (K, L, M, N...), como mostra a figura 1.3. Os elétrons da última camada, por estarem mais distantes, estão sujeitos a menor força de atração e podem ser facilmente retirados do átomo.

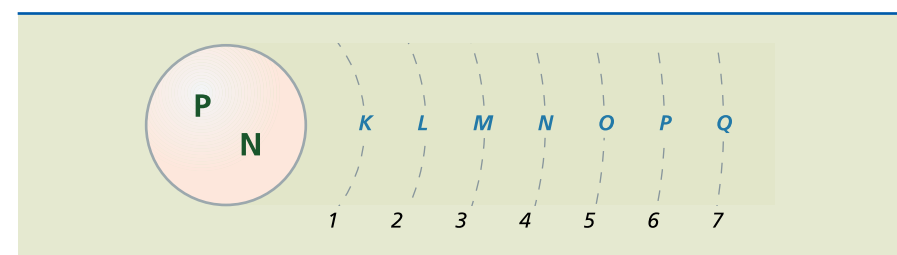


Figura 1.3
Órbitas descritas pelos elétrons de um átomo no modelo de Rutherford.

1.4 Processos de eletrização

Há três maneiras de eletrizar um corpo: por atrito, por contato ou por indução. No experimento descrito a seguir ocorrem os três tipos de eletrização (figuras 1.4a a 1.4d). Para reproduzi-lo, bastam um pente, cabelo e papel picado.

Figura 1.4a
De início, o cabelo, o pente e o papel estão eletricamente neutros.



Ao passar o pente no cabelo (atrito), ocorre a transferência de cargas entre os dois elementos. O pente agora tem excesso de cargas negativas e o cabelo, de cargas positivas (figura 1.4b), dando origem, assim, a campos elétricos.



Figura 1.4b

Processo de eletrização por atrito.



VALUA VITALY / SHUTTERSTOCK

Ao aproximar o pente eletrizado dos pedaços de papel, o campo elétrico do pente age sobre as cargas do papel, provocando a separação entre elas. As cargas positivas se concentram na parte superior dos pedaços de papel, por atração, enquanto as negativas são repelidas para a parte inferior.

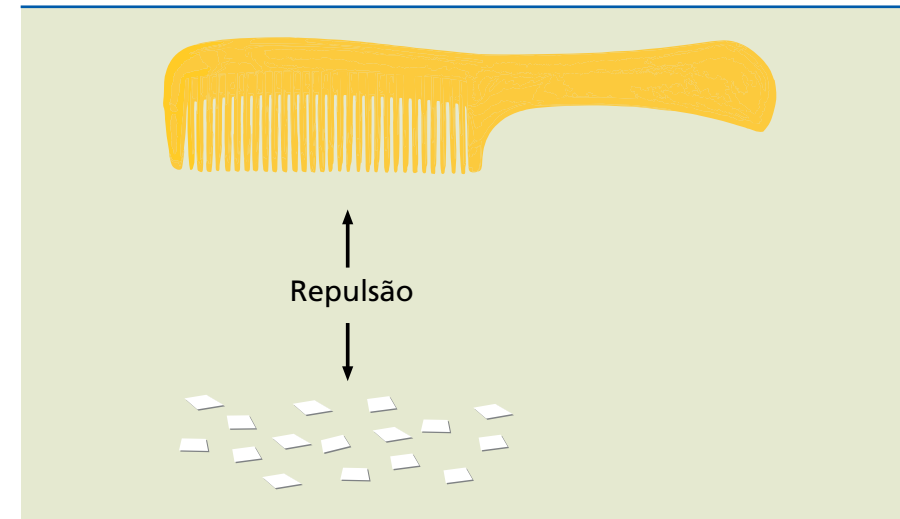
Figura 1.4c

Indução de cargas elétricas no papel (atração).



ALAMY/OTHER IMAGES

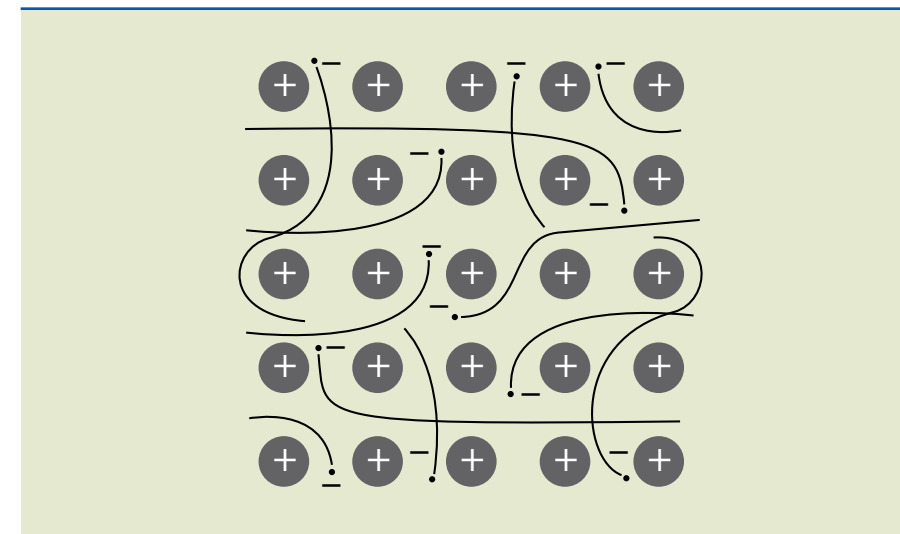
A polarização dá origem a uma atração entre o pente e o papel, até ocorrer o contato entre eles. Após o contato, alguns elétrons do pente se transferem para o papel, de modo que a distribuição espacial das cargas atinge o equilíbrio. Esses elétrons neutralizam algumas das cargas positivas dos pedaços de papel, o qual se torna negativo. Nessa situação, papel e pente estão negativamente carregados, o que provoca a repulsão entre eles (figura 1.4d).

**Figura 1.4d**

Após o contato, ocorre repulsão entre o pente e o papel.

1.5 Elementos condutores, semicondutores e isolantes

Os metais podem ter um, dois ou três elétrons em sua última camada. O cobre, um dos condutores mais utilizados, possui um elétron na última camada, e o alumínio, três. Esses elétrons estão fracamente ligados ao átomo, o que lhes permite movimentar-se livremente na rede cristalina do metal, vagando de um átomo para outro. Por isso, são chamados elétrons livres. Eles podem ser arrancados do átomo pela ação de um campo elétrico externo. É essa característica que torna os metais bons condutores.

**Figura 1.5**

Rede cristalina de um metal: os elétrons da última camada vagam livremente entre os átomos.

Os semicondutores, como o silício e o germânio, têm quatro elétrons na última camada e podem se comportar como condutores ou isolantes, dependendo de como os átomos se ligam a seus vizinhos (estrutura cristalina).



Elementos com a última camada completa, como os gases nobres, são elementos isolantes.

Essas considerações são válidas apenas para os elementos. Nas substâncias, formadas por diversos elementos, a condução elétrica depende de como ocorrem as ligações interatômicas nas moléculas, que não serão discutidas neste livro.

É importante observar também que um isolante pode se tornar condutor, caso esteja sujeito a um campo elétrico muito intenso.

1.6 Grandezas elétricas, unidades, notação e prefixos

Em praticamente todos os casos vamos trabalhar com as grandezas elétricas expressas em unidades do Sistema Internacional de Unidades (SI). A maioria leva o nome de grandes cientistas, por exemplo: V, para volt (em homenagem a Alessandro Volta); A, para ampère (André Marie Ampère); e W, para watt (James Watt). Note que volt, ampère e watt são grafados com letras minúsculas, e seus símbolos, em maiúscula. As regras para a grafia correta das unidades e seus símbolos são encontradas no *site* do Inmetro (<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/unidLegaisMed.asp>). O nome da grandeza deve ser grafado no plural quando for o caso (1 volt, 2 volts), enquanto o símbolo permanece sempre no singular e sem ponto no final (1 V, 2 V, e não 2 Vs).

Serão usadas, ainda, potências de 10 para a descrição das grandezas, porque assim é possível trabalhar de maneira mais confortável com valores muito grandes ou muito pequenos. Deve-se também ter cuidado em respeitar o uso de maiúscula ou minúscula nos prefixos, cujas regras para a grafia correta são encontradas na mesma página do Inmetro citada no parágrafo anterior.

Prefixos das unidades SI

Múltiplos:

$$k = \text{quilo} = 1\,000 = 10^3$$

$$M = \text{mega} = 1\,000\,000 = 10^6$$

$$G = \text{giga} = 1\,000\,000\,000 = 10^9$$

$$T = \text{tera} = 1\,000\,000\,000\,000 = 10^{12}$$

Submúltiplos:

$$m = \text{mili} = 0,001 = 10^{-3}$$

$$\mu = \text{micro} = 0,000\,001 = 10^{-6}$$

$$n = \text{nano} = 0,000\,000\,001 = 10^{-9}$$

$$p = \text{pico} = 0,000\,000\,000\,001 = 10^{-12}$$

Ao escrever uma equação em textos matemáticos e técnicos, é usual o emprego de letras gregas. A tabela 1.1 mostra o alfabeto grego e o nome de cada letra.

Tabela 1.1
Alfabeto grego

| Pronúncia | Minúscula | Maiúscula |
|---------------|------------|-----------|
| alfa | α | A |
| beta | β | B |
| gama | γ | Γ |
| delta | δ | Δ |
| épsilon | ϵ | E |
| dzeta ou zeta | ζ | Z |
| eta | η | H |
| teta | θ | Θ |
| iota | ι | I |
| capa | κ | K |
| lambda | λ | Λ |
| mi | μ | M |
| ni | ν | N |
| csi | ξ | Ξ |
| ômicron | \omicron | O |
| pi | π | Π |
| rô | ρ | P |
| sigma | σ | Σ |
| tau | τ | T |
| ípsilon | υ | Y |
| fi | ϕ | Φ |
| qui ou chi | χ | X |
| psi | ψ | Ψ |
| ômega | ω | Ω |



1.7 Tensão elétrica (U) ou diferença de potencial (ddp)

Uma carga imersa em um campo elétrico fica sujeita a uma força e pode vir a se movimentar. Em outras palavras, essa carga adquire uma energia potencial elétrica ϵ_p , que pode ser transformada em energia de movimento (cinética), ou seja, pode realizar trabalho. Quanto maior a carga, maior a força e maior a energia potencial ϵ_p .

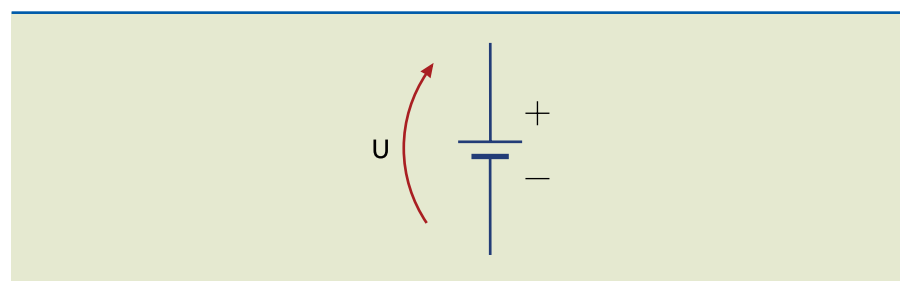
O fator ϵ_p/Q indica a quantidade de energia por unidade de carga. Essa razão é conhecida como potencial elétrico. Observe que é possível calcular o potencial em cada ponto do campo elétrico. Sua unidade é o joule/coulomb (J/C), batizado de volt (V).

Particularmente importante é a definição de tensão ou diferença de potencial (ddp) entre dois pontos. Dados dois pontos A e B, com potenciais V_A e V_B respectivamente, define-se tensão entre os pontos A e B ou diferença de potencial entre os pontos A e B como:

$$U_{AB} = V_A - V_B \quad (1.3)$$

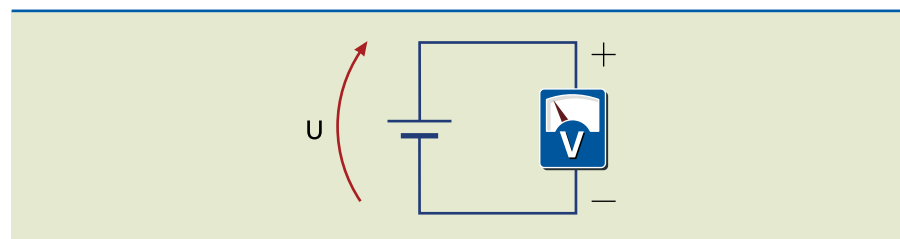
Em circuitos elétricos, a diferença de potencial é imposta por geradores ou baterias. A figura 1.6 ilustra o símbolo de um gerador de tensão contínua, com a ponta da flecha; o traço maior do símbolo indica o ponto de maior potencial (terminal positivo, +).

Figura 1.6
Representação da diferença de potencial em um gerador de tensão.



Os instrumentos de medida em eletricidade, na maioria das vezes, recebem o nome de acordo com a grandeza mensurada. Assim, o instrumento que mede a tensão elétrica é o voltímetro, que deve ser ligado em paralelo com o elemento a ser medido (figura 1.7). No caso de um sinal contínuo, é preciso prestar atenção à polaridade das pontas de prova.

Figura 1.7
Representação de um voltímetro medindo a diferença de potencial entre os terminais do gerador.



A analogia com um sistema hidráulico é bastante útil para entender o significado da tensão elétrica. A figura 1.8 ilustra dois reservatórios de água interligados a um registro: o reservatório A está cheio de água, enquanto o B permanece vazio.

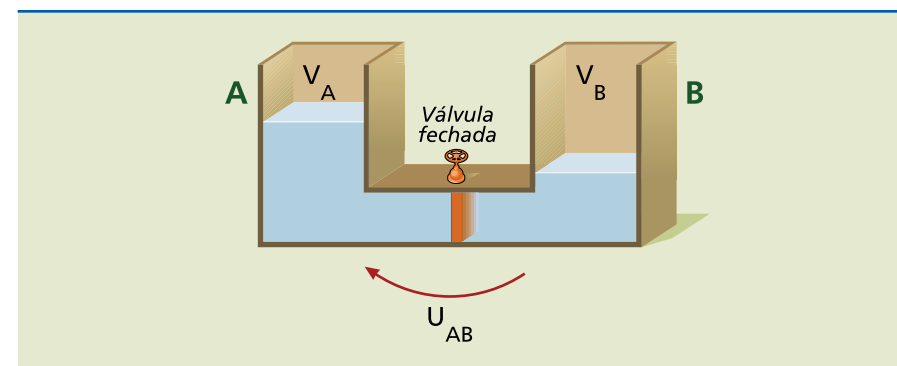
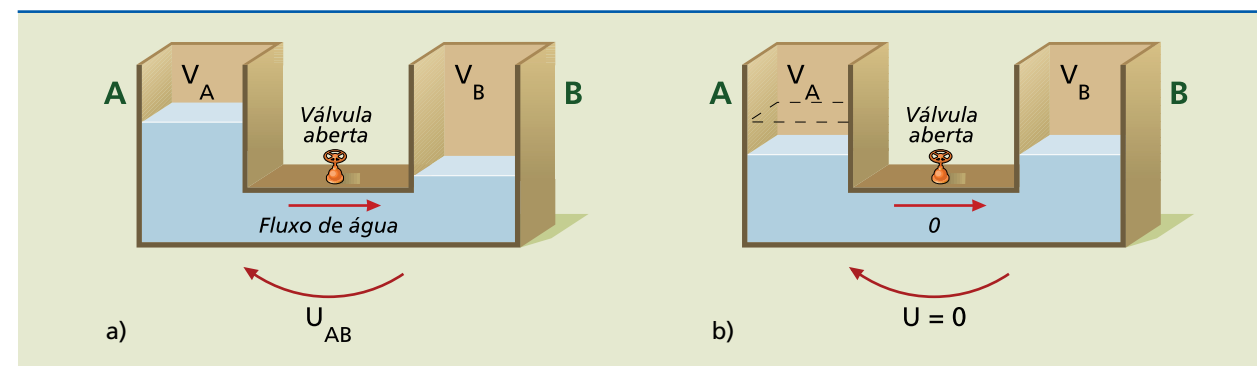


Figura 1.8
Reservatórios cheio (A) e vazio (B).

O lado esquerdo da válvula está sujeito à pressão da coluna de água no reservatório A (análogo ao potencial no terminal positivo da bateria). O lado direito da válvula tem apenas a pressão atmosférica (equivalente ao potencial no terminal negativo da bateria), que é muito menor que a pressão no lado esquerdo da válvula.

Quando se abre a válvula, a água sai do reservatório A em direção ao B, até que o nível nos dois reservatórios fique exatamente o mesmo, ou seja, deixa de existir a diferença de pressão (diferença de potencial) entre eles (figura 1.9).

Figura 1.9
(a) Fluxo de água e
(b) nivelamento dos reservatórios de água.



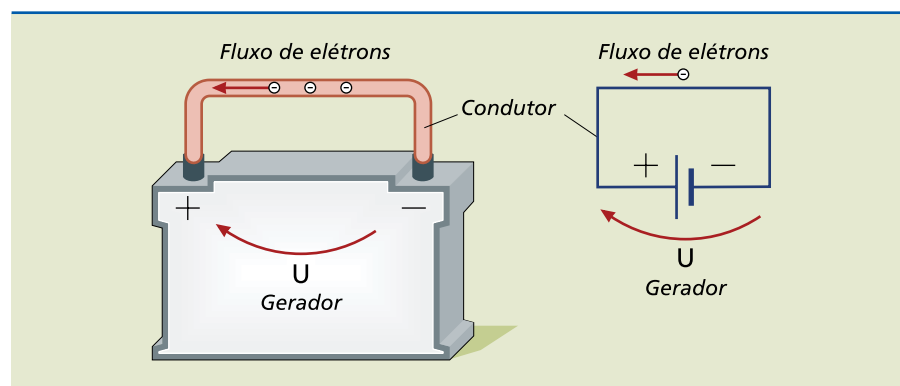
1.8 Corrente elétrica

Ao conectarmos um fio aos terminais do gerador da figura 1.10, os elétrons circularão do terminal negativo ao positivo, sob o efeito da diferença de potencial entre ambos. O fluxo de elétrons, chamado de corrente elétrica, é análogo ao fluxo de água (vazão) entre os reservatórios sob a ação da diferença de pressão entre eles. O fluxo de elétrons continua até que a diferença de potencial entre os terminais da bateria seja nula.

Assim como a vazão de água é medida em litros por segundo, a vazão de elétrons, ou seja, a corrente, é medida em termos da quantidade de carga, em coulombs, que atravessa o condutor por segundo, também denominada ampère (A).



Figura 1.10
Corrente elétrica imposta pela tensão U .



Para calcular a intensidade da corrente, basta dividir a quantidade de carga ΔQ que passa por uma seção reta do condutor pelo intervalo de tempo Δt (equação 1.4).

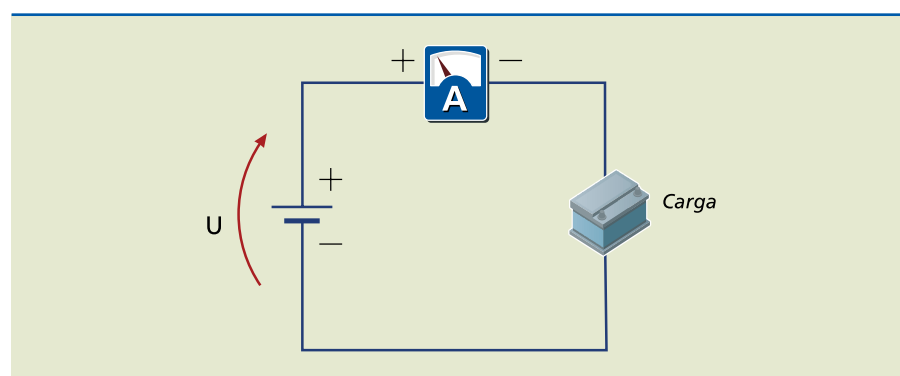
$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (1.4)$$

Assim, 1 ampère corresponde ao fluxo de 1 coulomb a cada segundo, ou seja:

$$1A = \frac{1C}{1s}$$

O instrumento de medida de corrente elétrica é o amperímetro. Para “contar” quantos elétrons passam por segundo, ele deve ser intercalado em série com o circuito (figura 1.11).

Figura 1.11
Amperímetro intercalado no circuito.

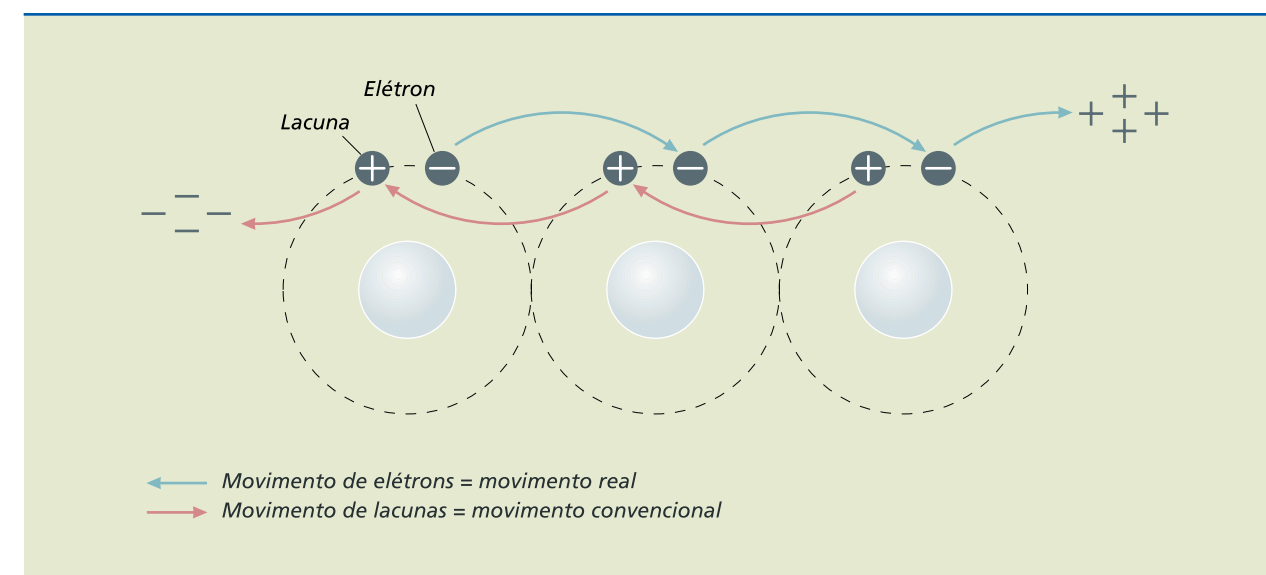


1.8.1 Sentido da corrente

O sentido real da corrente elétrica corresponde ao movimento dos elétrons saindo do terminal negativo do gerador em direção ao terminal positivo (figura 1.12). Na prática, porém, adota-se o sentido convencional de corrente, que é o oposto do sentido real, ou seja, sai do terminal positivo em direção ao negativo. Isso ocorre porque, no passado, acreditava-se que as cargas positivas eram as que se moviam, ideia eliminada com o avanço das pesquisas na área.

Alternativamente, podemos imaginar que o sentido convencional corresponde ao movimento das lacunas. A saída de um elétron da última camada do átomo dá origem a uma lacuna (carga elétrica “fictícia” positiva), que se movimentaria no sentido contrário ao dos elétrons, conforme ilustrado na figura 1.12.

Figura 1.12
Movimento de elétrons (movimento real); movimento de lacunas (movimento convencional).



1.8.2 Efeitos da corrente elétrica

A corrente elétrica não é visível, mas podemos perceber claramente seus efeitos.

- **Efeito térmico** – Também conhecido como efeito Joule, ocorre devido à colisão dos elétrons em movimento (livres) com átomos do condutor. Os átomos recebem parte da energia cinética proveniente do movimento dos elétrons e acabam aumentando sua vibração (agitação térmica) dentro do condutor, o que equivale a aumento em sua temperatura. De modo simplificado, pode-se dizer que o efeito Joule é a transformação de energia elétrica em calor. Alguns exemplos de aplicação do efeito são o chuveiro, o ferro elétrico e as lâmpadas incandescentes, cujo filamento chega a 3000 °C, emitindo luz.
- **Efeito químico** – Ocorre quando a corrente elétrica passa por certas soluções, contribuindo para a reação química. Alguns exemplos de utilização na indústria são a eletrólise, aplicada na separação de gases, purificação do alumínio etc., e a galvanização, em que se realiza o recobrimento de materiais com prata, ouro e cromo.
- **Efeito magnético** – Ocorre quando a passagem da corrente elétrica por um condutor dá origem a um campo magnético a seu redor. Esse efeito é a base para o funcionamento de transformadores, motores, geradores etc.
- **Efeito luminoso** – A corrente elétrica circulando em um recipiente no qual há gases metálicos (mercúrio, sódio) provoca emissão de luz, como acontece com a lâmpada fluorescente.
- **Efeito fisiológico** – Ao passar através dos seres vivos, a corrente pode causar diferentes efeitos, dependendo da intensidade, da duração e do caminho que



Tabela 1.2
Efeitos da corrente elétrica no corpo humano.

ela percorre nos tecidos. Pode ocorrer desde formigamento até contração e paralisia muscular, perda de consciência, asfixia, queimaduras etc., conforme descrito na tabela 1.2.

| Corrente elétrica* (60 Hz) | Duração | Efeitos mais graves** |
|----------------------------|----------------------------|--|
| 0 a 0,5 mA | Qualquer | Nenhum |
| 0,5 a 2 mA | Qualquer | Limiar de percepção |
| 2 a 10 mA | Qualquer | Dor Contração muscular Descontrole muscular |
| 10 a 25 mA | Minutos | Contração muscular Dificuldade respiratória Aumento da pressão arterial |
| 25 a 50 mA | Segundos | Paralisia respiratória Fibrilação ventricular Inconsciência |
| 50 a 200 mA | Mais de um ciclo cardíaco | Fibrilação ventricular Inconsciência Paralisia respiratória Marcas visíveis |
| Acima de 200 mA | Menos de um ciclo cardíaco | Fibrilação ventricular Inconsciência Marcas visíveis |
| Acima de 200 mA | Mais de um ciclo cardíaco | Parada cardíaca reversível Inconsciência Queimaduras |

* As faixas de valores para a corrente elétrica são muito aproximadas e devem praticamente ser consideradas como ordens de grandeza.

** Grande probabilidade de ocorrência.

Fonte: GREF. Física 3: eletromagnetismo. 3. ed. São Paulo: Edusp, 1998, p. 348.

1.9 Tensão (corrente) contínua/alternada

Os sinais das tensões e correntes podem ser classificados em contínuos e alternados. O sinal contínuo não muda sua polaridade ao longo do tempo. A figura 1.13 é um esboço dos gráficos, sem unidades, dos sinais contínuos de tensão ou corrente, característicos dos geradores químicos, como pilhas e baterias. O sinal alternado muda sua polaridade periodicamente ao longo do tempo. Um exemplo é a tensão fornecida na rede elétrica das grandes cidades.

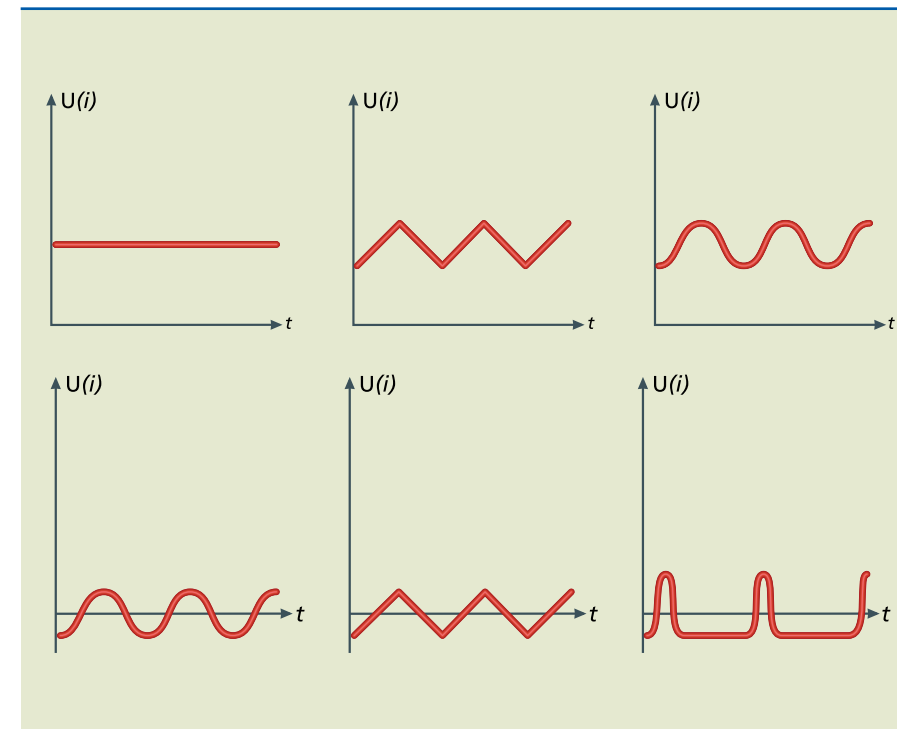


Figura 1.13
Gráficos de tensão e corrente elétrica alternadas.

1.10 Potência elétrica (P)

A potência elétrica P indica quanto trabalho ϵ (ou energia) é realizado em um intervalo de tempo Δt , conforme descrito na equação 1.5.

$$P = \frac{\epsilon}{\Delta t} \quad (1.5)$$

Também pode ser calculada pelo produto da tensão U e da corrente I no circuito. Na figura 1.14, tanto a potência fornecida pelo gerador (com tensão U em seus terminais e fornecendo uma corrente I) como a consumida pela carga (com tensão U em seus terminais e consumindo uma corrente I) são definidas pela equação 1.6.

$$P = UI \quad (1.6)$$

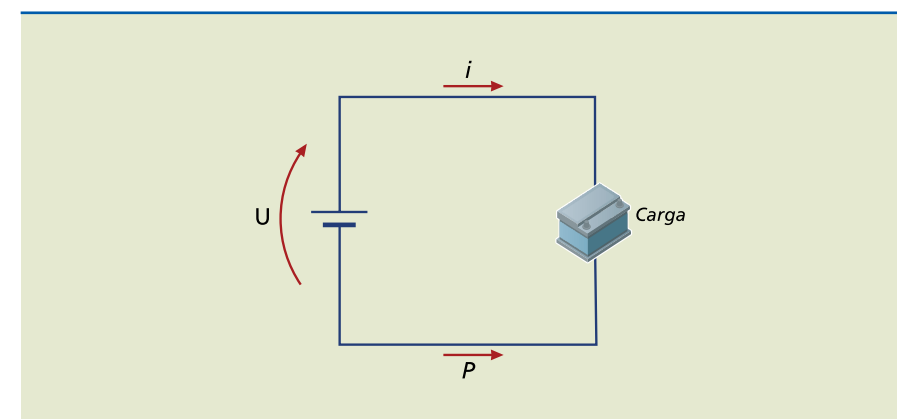


Figura 1.14
Esquema de gerador e carga.

