Física

Eletricidade

Brincando de memorizar conceitos

Rafael Silva

Prefácio

A importância da Física como ciência didática

A Física é uma das ciências fundamentais para a compreensão do mundo natural, desempenhando um papel essencial no ensino das ciências exatas. Como disciplina didática, ela permite a construção de modelos teóricos que explicam as tendências cotidianas e promovem o desenvolvimento do pensamento lógico.

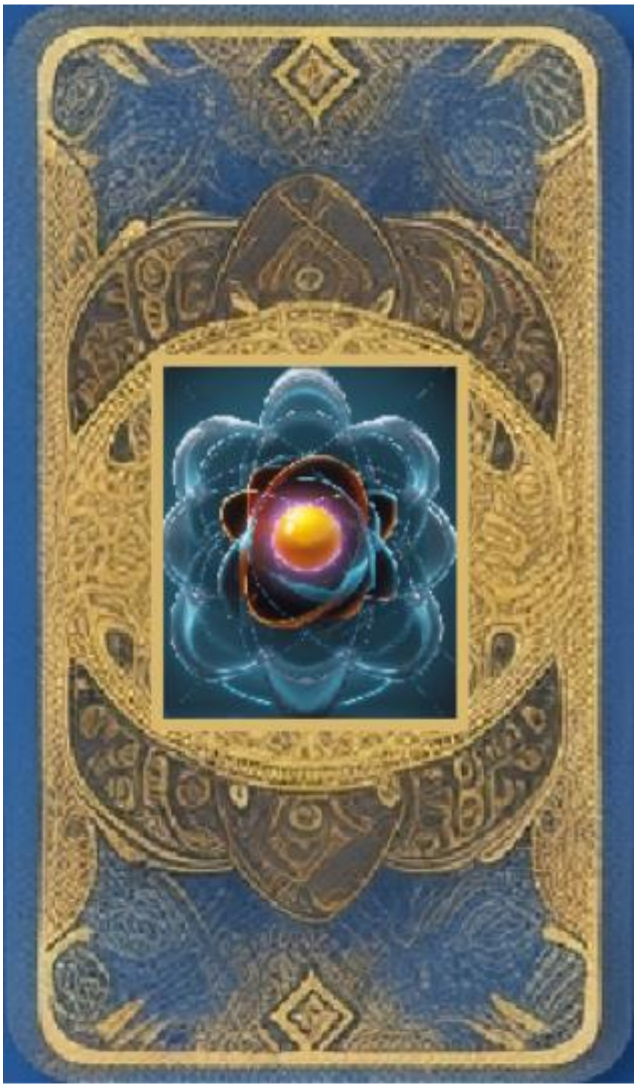
Os estudos demonstram que a aplicação de conceitos físicos em sala de aula favorece a assimilação de conhecimentos interdisciplinares, especialmente quando associados a experimentos práticos. A utilização de metodologias ativas, como a experimentação e a simulação computacional, tem sido amplamente científica e aplicada no ensino moderno, evidenciando resultados positivos no aprendizado.

Além disso, a Física contribui para a formação de cidadãos críticos e aptos a compreender o avanço tecnológico. A partir do ensino dessa ciência, os estudantes desenvolvem habilidades analíticas que podem ser aplicadas em diversas áreas do conhecimento.

Diante dessa perspectiva, este livro propõe um método inovador para o ensino de Física Elétrica, aliando rigor acadêmico a estratégias didáticas que estimulam a memorização e a compreensão conceitual. Para isso, foi incluído neste livro, um jogo de cartas interativo como ferramenta complementar ao estudo. O jogo apresenta perguntas e respostas organizadas de forma estruturada, permitindo ao estudante explorar os conteúdos de diferentes maneiras: seja por meio de um jogo da memória, associando conceitos e fórmulas, seja em um formato de carteado, no qual os jogadores formam pares de questões e soluções de maneira dinâmica.

O diferencial dessa abordagem é a integração com tecnologias virtuais e inteligência artificial. As cartas contêm códigos QR que, ao serem escaneados por sensores, enviam informações a um sistema computacional capaz de processar respostas, oferecer propostas e gerar interfaces gráficas interativas. Dessa forma, o estudante não apenas reforça seu aprendizado de maneira lúdica, mas também tem acesso a recursos digitais que aprofundam a exploração dos temas envolvidos.

Ao unir metodologias pedagógicas inovadoras com os princípios fundamentais da Física, este livro busca tornar o aprendizado mais acessível, engajador e eficaz. A ludicidade, quando aliada à precisão científica, permite que temas complexos sejam assimilados de maneira mais natural, reduzindo a resistência ao estudo e incentivando a curiosidade científica. Assim, este livro não apenas valoriza o ensino da Física, mas também apresenta um modelo de aprendizado adaptável às novas demandas tecnológicas e educacionais.



SUMÁRIO

Introdução

A Eletricidade é um dos pilares fundamentais da Física e está profundamente presente no nosso cotidiano, desde os dispositivos eletrônicos que utilizamos até os fenômenos naturais como os raios. Seu estudo abrange uma ampla variedade de conceitos e aplicações, sendo essencial tanto para a compreensão dos princípios teóricos quanto para o desenvolvimento tecnológico.

Iniciamos o estudo da Eletricidade pelo conceito de **carga elétrica elementar**, a menor quantidade de carga possível, que está associada a partículas fundamentais como elétrons e prótons. A partir disso, abordamos a **carga elétrica** de um sistema, suas interações e propriedades fundamentais, como a conservação da carga.

A interação entre cargas elétricas é descrita pela **Lei de Coulomb**, que determina a intensidade da força elétrica entre duas cargas puntiformes. Para melhor compreensão desse fenômeno, estudamos o **campo elétrico**, que descreve a influência que uma carga exerce sobre o espaço ao seu redor, abordando sua representação vetorial e a maneira como diferentes distribuições de carga influenciam o campo gerado.

Através do conceito de campo elétrico, introduzimos também o **potencial elétrico**, um conceito essencial para o estudo da energia elétrica e da diferença de potencial (ddp), permitindo uma descrição mais intuitiva das interações elétricas. Exploramos ainda a relação entre o **trabalho da força elétrica** e a diferença de potencial, sendo este um conceito essencial para o funcionamento dos circuitos elétricos.

Em armazenamento de cargas elétricas, estudamos os **capacitores**, dispositivos que desempenham um papel fundamental na eletrônica. Analisando suas propriedades, como a **capacidade elétrica**, e sua associação em diferentes configurações e a energia armazenada nesses dispositivos.

Em seguida, introduzimos o conceito de **corrente elétrica**, que representa o movimento ordenado das cargas elétricas em um condutor. Exploramos os diferentes tipos de corrente e os efeitos associados, como o efeito Joule, que descreve a dissipação de energia em forma de calor. A **resistência elétrica** é discutida através das **Leis de Ohm**, que fornecem uma descrição quantitativa da relação entre corrente, tensão e resistência.

A **potência elétrica** também é um aspecto essencial do estudo da eletricidade, permitindo entender o consumo energético em circuitos. Nesse contexto, exploramos diferentes **associações de resistores** e sua influência sobre a corrente e a tensão no circuito.

Para a medição das grandezas elétricas, estudamos os **medidores elétricos**, incluindo o voltímetro, amperímetro e ohmímetro, bem como a **Ponte de Wheatstone**, utilizada para medição precisa de resistências.

Outro conceito essencial é a **força eletromotriz (f.e.m)**, relacionada à capacidade de um gerador de fornecer energia elétrica a um circuito. Introduzimos a **equação do gerador**, sua associação em circuitos e o conceito de rendimento. A **Lei de Ohm-Pouillet** é discutida no contexto dos circuitos com geradores.

Além disso, exploramos os **receptores elétricos**, dispositivos que convertem energia elétrica em outras formas de energia. A **Lei de Ohm generalizada** e as **Leis de Kirchhof** (nós e malhas) nos permitem analisar circuitos mais complexos.

Finalizamos o estudo com o **campo magnético**, um fenômeno intimamente relacionado à eletricidade. Exploramos o **campo magnético criado por condutores** e dispositivos como **espiras circulares e solenoides**, além da **força magnética sobre cargas em movimento** e condutores, seguindo as regras da mão direita e da mão esquerda.

Dessa forma, este livro fornecerá uma base sólida para o estudo da Eletricidade, abrangendo desde os conceitos mais fundamentais até suas aplicações tecnológicas e experimentais. Esperamos que esta jornada pelo mundo da Eletricidade seja enriquecedora e estimulante!

Carga Elétrica Elementar

Desde a antiguidade, os fenômenos elétricos despertam a curiosidade dos estudiosos. Relatos históricos indicam que os gregos antigos, por volta de 600 a.C., já observavam a eletrização ao esfregar âmbar em tecidos, percebendo que pequenos objetos eram atraídos. Entretanto, foi apenas com o desenvolvimento da ciência experimental que se descobriu a natureza fundamental da carga elétrica.

No século XVIII, Benjamin Franklin propôs a existência de dois tipos de cargas elétricas, que chamou de positiva e negativa. Esse modelo ajudou a entender fenômenos como a eletrização por atrito e a repulsão ou atração entre corpos carregados. Contudo, foi no final do século XIX e início do século XX que a estrutura fundamental da carga elétrica começou a ser desvendada.

Em 1897, o físico britânico J.J. Thomson identificou o elétron como uma partícula subatômica com carga negativa. Seu experimento com tubos de raios catódicos revelou que havia partículas muito menores que os átomos, carregadas eletricamente. Mais tarde, Robert Millikan, com seu famoso experimento da gota de óleo (1909), conseguiu medir com precisão a carga do elétron, estabelecendo seu valor fundamental como aproximadamente $1{,}6 \times 10^{-19} C$.

Da mesma forma, com o avanço da física nuclear, descobriu-se que os prótons, encontrados no núcleo dos átomos, possuem carga elétrica de mesma magnitude que o elétron, porém positiva. O estudo dessas partículas revelou que toda a eletrização de um corpo ocorre pela transferência de elétrons, enquanto os prótons permanecem fixos no núcleo atômico.

A descoberta da carga elétrica elementar revolucionou o entendimento da eletricidade e permitiu o desenvolvimento da eletrônica, possibilitando avanços tecnológicos como os semicondutores, transistores e circuitos integrados. Dessa forma, compreender a carga elétrica elementar é essencial para o estudo da eletricidade e suas aplicações.

Exercício Resolvido

Explique como a descoberta do elétron e a medição da carga elétrica elementar influenciaram o avanço da ciência e da tecnologia.

Resposta:

A descoberta do elétron por J.J. Thomson em 1897 revelou que os átomos não eram indivisíveis, como se acreditava anteriormente, mas compostos por partículas menores. Isso abriu caminho para o desenvolvimento da física moderna, incluindo a teoria quântica e a eletrônica. A medição da carga elétrica elementar feita por Millikan em 1909 permitiu quantificar os fenômenos elétricos com precisão, possibilitando a criação de dispositivos eletrônicos. Sem essa descoberta, tecnologias como computadores, comunicações sem fio e circuitos integrados não seriam possíveis.

Carga Elétrica

A carga elétrica é uma propriedade fundamental da matéria, responsável pelas interações eletromagnéticas. Ela está presente em partículas subatômicas, como elétrons e prótons, e sua unidade no Sistema Internacional (SI) é o coulomb (C).

A quantidade de carga elétrica (Q) de um corpo é determinada pela relação entre o número de cargas elementares (n) e a carga elétrica elementar (e), dada pela equação:

$$Q = n \times e$$

Onde:

- Q , é a carga elétrica total (**em coulombs, C**);
- n , é o número de cargas elementares em excesso (**pode ser positivo ou negativo**);
- e , é a carga elétrica elementar, com valor aproximado de $1{,}6 \times 10^{-19} C$.

Um corpo está eletricamente neutro quando possui o mesmo número de prótons e elétrons. No entanto, se houver um excesso ou déficit de elétrons, ele se torna eletrizado, apresentando carga elétrica positiva (**déficit de elétrons**) ou negativa (**excesso de elétrons**).

A carga elétrica também é quantizada, ou seja, sempre aparece em múltiplos inteiros da carga elementar e. Isso significa que não existem cargas elétricas fracionárias isoladas na natureza. Esse princípio, validado por experimentos como o de Millikan, confirma que toda carga elétrica é um múltiplo inteiro de e .

Exercício Resolvido

Um corpo possui um excesso de 5×10^{13} elétrons. Determine a carga elétrica total desse corpo.

Resolução:
Sabemos que a carga elétrica total é dada por:

$$Q = n \times e$$

Substituindo os valores conhecidos:

$$Q = (5 \times 10^{13}) \times (1{,}6 \times 10^{-19})$$

$$Q = 8 \times 10^{-6} C$$

Resposta:

A carga elétrica total do corpo é $Q = 8 \times 10^{-6} C$ *(ou 8 microcoulombs).*

Força Elétrica e a Lei de Coulomb

A força elétrica é uma interação fundamental que ocorre entre cargas elétricas. Ela pode ser atrativa, quando cargas de sinais opostos se atraem, ou repulsiva, quando cargas de mesmo sinal se repelem. Essa força é descrita quantitativamente pela **Lei de Coulomb**, formulada pelo cientista francês **Charles-Augustin de Coulomb** em 1785.

Lei de Coulomb

A **Lei de Coulomb** afirma que a intensidade da força elétrica entre duas cargas puntiformes é diretamente proporcional ao produto dos valores das cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que as separa. A equação que descreve essa relação é:

$$F = k \times \left|\frac{q_1 \times q_2}{d^2}\right|$$

Onde:

- F é a força elétrica entre as cargas (**em newtons, N**);
- k é a constante eletrostática do meio onde as cargas estão inseridas (**em N·m²/C²**);
- q_1 e q_2 são os valores das cargas elétricas envolvidas (**em coulombs, C**);
- d é a distância entre as cargas (**em metros, m**).

O valor da constante k

No vácuo (**ou no ar, onde o valor é praticamente o mesmo**), a constante eletrostática k , tem um valor de aproximadamente:

$$k = 8{,}99 \times 10^9 N \cdot m^2/C^2$$

Esse valor é derivado da permissividade elétrica do vácuo ε_0, que aparece em outras equações do eletromagnetismo. A relação entre **k** e ε_0 é dada por:

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$$

Sendo $\varepsilon = 8{,}85 \times 10^{-12} N \cdot m^2/C^2$, obtém-se o valor de $\boldsymbol{k}$, mencionado acima.

A força elétrica segue o **princípio da ação e reação**, ou seja, se uma carga exerce força sobre outra, a segunda também exerce força de mesma intensidade, mas em sentido oposto.

Exercício Resolvido

Duas cargas elétricas puntiformes de $q_1 = 2 \times 10^{-6} C$ e $q_2 = 5 \times 10^{-6} C$ estão separadas por uma distância de 0,3 m no vácuo. Determine a intensidade da força elétrica entre elas.

Resolução:

Aplicamos a **Lei de Coulomb**:

$$F = k \times \left| \frac{q_1 \times q_2}{d^2} \right|$$

Substituindo os valores:

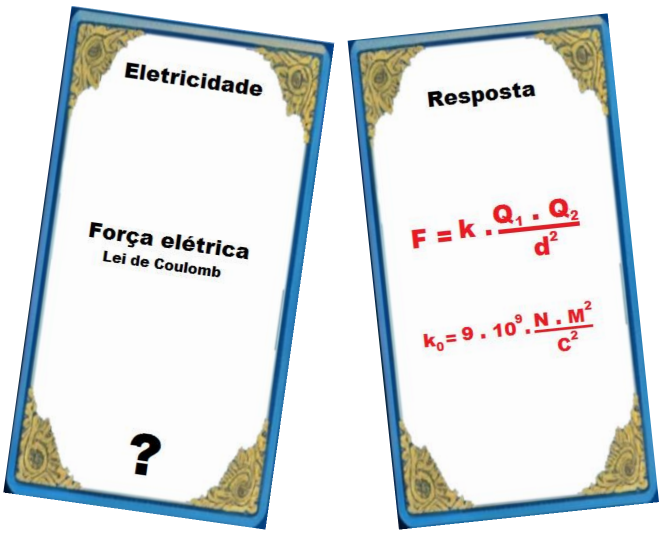
$$F = (8{,}99 \times 10^9) \times \frac{(2 \times 10^{-6}) \times (5 \times 10^{-6})}{(0{,}3)^2}$$

$$\therefore$$

$$F \approx 0{,}999 \approx 1{,}0\ N$$

Resposta:

A força elétrica entre as cargas tem intensidade de aproximadamente **1,0 N**.



Campo Elétrico

O conceito de **campo elétrico** foi introduzido para descrever a influência que uma carga elétrica exerce no espaço ao seu redor. Em vez de pensar na força elétrica apenas como uma interação direta entre cargas, considera-se que cada carga cria um campo ao seu redor, que pode interagir com outras cargas colocadas nesse campo.

Definição e Fórmula

O **campo elétrico** ($\boldsymbol{E}$) em um ponto do espaço é definido como a força elétrica ($\boldsymbol{F}$) experimentada por uma carga de teste $\boldsymbol{q}$ colocada nesse ponto, dividida pelo valor dessa carga.

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

Onde:

- $\boldsymbol{E}$, é o campo elétrico (**em N/C, newton por coulomb**);
- $\boldsymbol{F}$, é a força elétrica exercida sobre a carga de prova (**em N, newton**);
- $\boldsymbol{q}$, é a carga de prova usada para medir o campo (**em C, coulomb**).

Essa equação mostra que o campo elétrico é uma **grandeza vetorial**, ou seja, possui:

1. **Intensidade**: Representa o valor numérico da força por unidade de carga.
2. **Direção**: Coincide com a direção da força elétrica que atuaria sobre uma carga de prova positiva.
3. **Sentido**: Se a carga fonte for positiva, o campo elétrico aponta para fora (**afastando-se da carga**). Se for negativa, o campo aponta para dentro (**aproximando-se da carga**).

Campo Elétrico de uma Carga Puntiforme

Se o campo elétrico for gerado por uma única carga puntiforme $\boldsymbol{Q}$, a intensidade do campo em um ponto situado a uma distância $\boldsymbol{d}$, dessa carga é dada por:

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

Onde:

- $k = 8{,}99 \times 10^9 N \cdot m^2/C^2$, é a constante eletrostática no vácuo;
- $\boldsymbol{Q}$, é a carga que gera o campo (**em C, coulomb**);
- **d**, é a distância entre a carga $\boldsymbol{Q}$ e o ponto onde se deseja calcular o campo (**em m, metro**).

Esse campo elétrico independe da carga de prova $\boldsymbol{q}$ usada para medi-lo, ou seja, o campo gerado por uma carga é uma característica do espaço ao redor dela.

Exercício Resolvido

Uma carga elétrica de $6{,}0 \times 10^{-6} C$ está fixada no vácuo. Determine a intensidade do campo elétrico em um ponto situado a **0,2 m** dessa carga.

Resolução:

Aplicamos a fórmula do campo elétrico gerado por uma carga puntiforme:

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

Substituindo os valores:

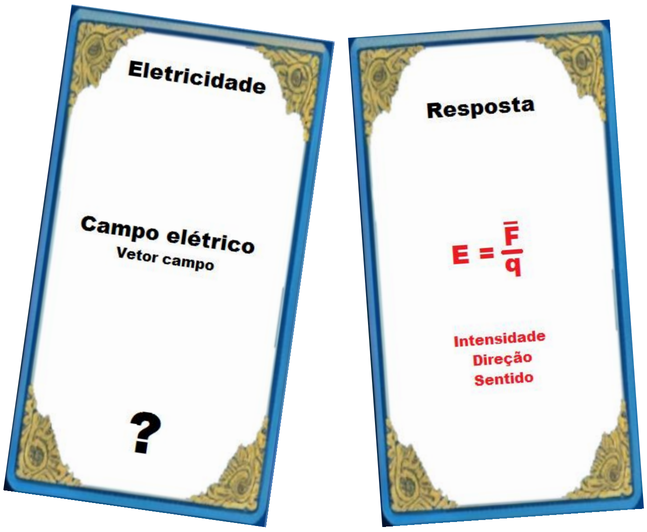
$$E = (8{,}99 \times 10^9) \times \left(\frac{6{,}0 \times 10^{-6}}{(0{,}2)^2}\right)$$

$$\therefore$$

$$E \approx 1{,}35 \times 10^6 \ N/C$$

Resposta:

O campo elétrico nesse ponto tem intensidade de aproximadamente $1{,}35 \times 10^6 \ N/C$ e seu sentido depende do sinal da carga fonte. Se for positiva, o campo se afasta; se for negativa, o campo aponta para a carga.



Campo Elétrico de uma Carga Puntiforme

O conceito de **campo elétrico** permite descrever como uma carga elétrica influencia o espaço ao seu redor. Se essa carga for considerada **puntiforme** (ou seja, uma carga concentrada em um único ponto), podemos calcular o campo elétrico que ela gera em qualquer ponto do espaço.

Fórmula do Campo Elétrico de uma Carga Puntiforme

Sabemos que o campo elétrico é definido como a força elétrica $\boldsymbol{F}$ sobre uma carga de prova $\boldsymbol{q}$ dividida pelo valor dessa carga:

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

A força elétrica que uma carga $\boldsymbol{Q}$ exerce sobre a carga de prova $\boldsymbol{q}$, é dada pela **Lei de Coulomb**:

$$F = k \times \frac{|Q| \times |q|}{d^2}$$

Substituindo essa expressão na equação do campo elétrico:

$$E = \frac{k \times \frac{|Q| \times |q|}{d^2}}{q}$$

Cancelando q, obtemos a fórmula do **campo elétrico de uma carga puntiforme**:

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

Onde:

- E, é o campo elétrico (**em N/C, newton por coulomb**);
- $k = 8{,}99 \times 10^9 N \cdot m^2/C^2$, é a constante eletrostática no vácuo;
- Q, é a carga que gera o campo (**em C, coulomb**);
- d, é a distância entre a carga Q e o ponto onde se deseja calcular o campo (**em m, metro**).

Essa equação mostra que a intensidade do campo elétrico depende **diretamente** da carga Q e **inversamente** do quadrado da distância d.

Intensidade, Direção e Sentido do Campo Elétrico

Como o campo elétrico é uma **grandeza vetorial**, ele possui:

1. **Intensidade**: O valor do campo, que depende de Q e d.
2. **Direção**: Sempre radial, ou seja, ao longo da linha que liga a carga Q ao ponto onde o campo está sendo analisado.
3. **Sentido**:
    a. Se Q, for **positiva**, o campo aponta para **fora** (**afastando-se da carga**).
    b. Se Q, for **negativa**, o campo aponta para **dentro** (**aproximando-se da carga**).

Exercício Resolvido

Uma carga puntiforme de $5{,}0 \times 10^{-6}$, está fixa no vácuo. Determine a intensidade do campo elétrico em um ponto situado a **0,5 m** dessa carga.

Resolução:

Usamos a equação do campo elétrico de uma carga puntiforme:

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

Substituindo os valores:

$$E = (8{,}99 \times 10^9) \times \frac{5{,}0 \times 10^{-6}}{(0{,}5)^2}$$

$$\therefore$$

$$E \approx 1{,}8 \times 10^5\ N/C$$

Resposta:

O campo elétrico nesse ponto tem intensidade de $E = 1{,}8 \times 10^5\ N/C$.

- Observando que a carga Q *é* positiva, portanto, o campo aponta **para fora**.

Campo Elétrico de Várias Cargas Puntiformes

Quando há **mais de uma carga** em uma região do espaço, o **campo elétrico resultante** em um ponto é determinado pela **soma vetorial** dos campos elétricos produzidos individualmente por cada carga.

Princípio da Superposição

O campo elétrico é uma **grandeza vetorial**, o que significa que, para calcular o campo elétrico resultante em um ponto devido a várias cargas, devemos considerar:

1. **A intensidade** de cada campo elétrico individual.
2. **A direção e o sentido** de cada campo elétrico.

Se tivermos **n cargas** $Q_1, \ Q_2, \ \ldots, \ Q_n$, o campo elétrico resultante em um ponto $\boldsymbol{P}$ será a soma vetorial dos campos gerados por cada carga:

$$\overline{E}_{result} = \overline{E_1} + \overline{E_2} + \cdots + \overline{E_n}$$

Cada campo $\overline{E}_{i}$, é calculado usando a fórmula do **campo elétrico de uma carga puntiforme**:

$$\overline{E}_{i} = k \times \frac{|Q|}{d^2} \times \hat{u}_i$$

Onde:

- $k = 8{,}99 \times 10^9 N \cdot m^2/C^2$ (**constante eletrostática do vácuo**);
- $\boldsymbol{Q}$, é a carga que gera o campo (em **C**);
- $\boldsymbol{d}$, é a distância entre a carga $\boldsymbol{Q}$ e o ponto $\boldsymbol{P}$;
- **û**, é um vetor unitário indicando a **direção e o sentido** do campo elétrico.

Como o campo elétrico é **vetorial**, devemos somar os vetores considerando componentes $\boldsymbol{x}$ e $\boldsymbol{y}$ (**se for o caso de cargas distribuídas em duas dimensões**).

Exercício Resolvido

Duas cargas $Q_1 = +4{,}0 \times 10^{-6}\ C\ e\ Q_2 = -2{,}0 \times 10^{-6}\ C$ estão posicionadas sobre o eixo $\boldsymbol{x}$, com uma distância de **0,6 m** entre elas. Determine o campo elétrico resultante no ponto médio entre as cargas.

Resolução:

1. **Posicionamento:**
   a. A carga Q_1, está na posição ***x=0***.
   b. A carga Q_2, está na posição ***x=0,6m***.
   c. O ponto médio está em ***x=0,3***, ou seja, a **mesma distância** de ambas as cargas (***d=0,3***).
2. **Cálculo dos campos individuais:**

$$E_1 = k \times \frac{|Q_1|}{d^2}$$

$$E_1 = 8{,}99 \times 10^9 \times \frac{4{,}0 \times 10^{-6}}{(0{,}3)^2}$$

$$\therefore$$

$$E_1 \approx 3{,}996 \times 10^5\ N/C$$

Como Q_1***, é*** positiva, seu campo elétrico aponta **para fora**, ou seja, para a direita.

Agora, calculamos E_2 *:*

$$E_2 = k \times \frac{|Q_2|}{d^2}$$

$$E_2 = 8{,}99 \times 10^9 \times \frac{2{,}0 \times 10^{-6}}{(0{,}3)^2}$$

$$\therefore$$

$$E_2 \approx 1{,}998 \times 10^5\ N/C$$

Como Q_2, é negativa, seu campo elétrico aponta **para a carga**, ou seja, **também para a direita**.

3. **Campo elétrico resultante:**

Como ambos os campos possuem **o mesmo sentido**, somamos os valores:

$$\overline{E}_{result} = \overline{E_1} + \overline{E_2} + \cdots + \overline{E_n}$$

$$\overline{E}_{result} = \overline{E_1} + \overline{E_2}$$

$$\overline{E}_{result} = 3{,}996 \times 10^5 + 1{,}998 \times 10^5$$

$$\overline{E}_{result} \approx 5{,}994 \times 10^5 \ N/C$$

Resposta:

O campo elétrico resultante no ponto médio entre as cargas tem intensidade de aproximadamente $5{,}994 \times 10^5 \ N/C$ e aponta para a **direita**.

Campo Elétrico em um Condutor Esférico

Os condutores esféricos carregados desempenham um papel fundamental no estudo do campo elétrico. De acordo com as propriedades dos condutores em equilíbrio eletrostático, a carga se distribui **uniformemente** na superfície do condutor, resultando em diferentes características do campo elétrico dentro e fora da esfera.

Campo Elétrico no Interior do Condutor Esférico

Uma das propriedades mais importantes dos condutores, é que, **o campo elétrico no interior de um condutor esférico em equilíbrio eletrostático é nulo**.

Isso acontece porque as cargas livres dentro do condutor se redistribuem de forma a cancelar qualquer campo elétrico interno. Matematicamente, temos:

$$E_{interno} = 0\ (para\, r\ < R)$$

Onde:

- $E_{interno}$, é o campo elétrico dentro do condutor;
- $\boldsymbol{r}$ é a distância ao centro da esfera;
- $\boldsymbol{R}$ é o raio do condutor esférico.

Campo Elétrico na Superfície do Condutor

Na superfície do condutor, o campo elétrico **atinge seu valor máximo** e é **perpendicular** à superfície. Ele pode ser determinado pela relação:

$$E_{sup} = \frac{k \times Q}{R^2}$$

Onde:

- $k = 8{,}99 \times 10^9 N \cdot m^2/C^2$ (**constante eletrostática do vácuo**);
- $\boldsymbol{Q}$ é a carga total do condutor;
- $\boldsymbol{R}$ é o raio do condutor esférico.

Este campo é **uniforme** em toda a superfície esférica, apontando sempre **para fora** se Q, for positiva, e **para dentro** se Q, for negativa.

Campo Elétrico Externo ao Condutor Esférico

Fora do condutor, o campo elétrico se comporta **como se toda a carga estivesse concentrada no centro da esfera**, obedecendo a equação do campo de uma carga puntiforme:

$$E_{ext} = \frac{k \times Q}{r^2}$$

Onde:

- *r>R (fora da esfera).*

Esse campo segue a **lei do inverso do quadrado da distância**, diminuindo de intensidade à medida que se afasta do condutor.

Resumo das Propriedades do Campo Elétrico em um Condutor Esférico

Região	**Equação do Campo Elétrico**	**Características**
Interior (*r<R*)	*E=0*	O campo é nulo devido ao equilíbrio das cargas.
Superfície (*r=R*)	$E = \frac{k \times Q}{R^2}$	Campo máximo, perpendicular à superfície.
Exterior (*r>R*)	$E = \frac{k \times Q}{r^2}$	Campo igual ao de uma carga puntiforme.

Exercício Resolvido

Uma esfera condutora tem raio de **0,5 m** e uma carga total de $8{,}0 \times 10^{-6}\, C$. Determine:

a) O campo elétrico dentro da esfera.
b) O campo elétrico na superfície da esfera.
c) O campo elétrico a **1,0 m** do centro da esfera.

Resolução:

a) **Campo no interior**

$$E_{interno} = 0 \text{ (por ser um condutor)}$$

b) **Campo na superfície**

$$E_{sup} = \frac{k \times Q}{R^2}$$

$$E_{sup} = \frac{(8{,}99 \times 10^9) \times (8{,}0 \times 10^{-6})}{(0{,}5)^2}$$

$$\therefore$$

$$E_{sup} = 2{,}88 \times 10^5\ N/C$$

c) **Campo a 1,0 m do centro da esfera**

$$E_{ext} = \frac{k \times Q}{r^2}$$

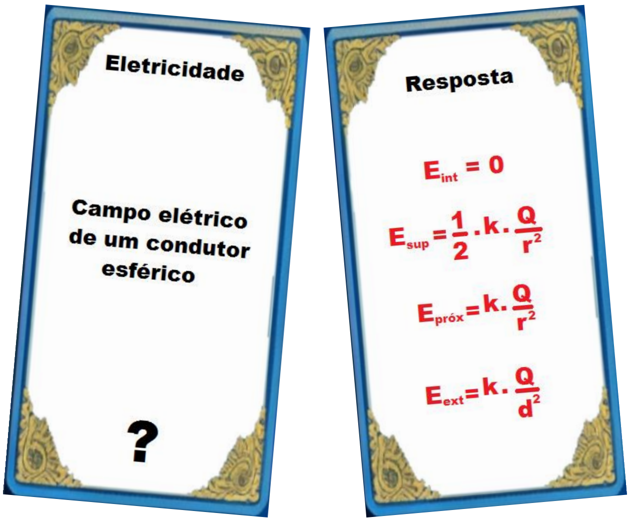
$$E_{ext} = \frac{(8{,}99 \times 10^9) \times (8{,}0 \times 10^{-6})}{(1{,}0)^2}$$

$$\therefore$$

$$E_{ext} = 7{,}19 \times 10^4\ N/C$$

Respostas:

a) $E = 0\ N/C$ (**interior**);
b) $E = 2{,}88 \times 10^5\ N/C$ (**superfície**);
c) $E = 7{,}19 \times 10^4\ N/C$ (**externo a 1,0 m do centro**).



Trabalho da Força Elétrica

O trabalho da força elétrica é um conceito fundamental na eletricidade, pois está diretamente relacionado à energia que uma carga ganha ou perde ao se mover dentro de um campo elétrico. Quando uma carga elétrica q, se desloca de um ponto A para um ponto B, a força elétrica pode realizar trabalho, sobre essa carga, alterando sua energia potencial elétrica.

Fórmula do Trabalho da Força Elétrica

O trabalho realizado pela força elétrica ao mover uma carga q, entre dois pontos A e B, no campo elétrico gerado por uma carga fonte Q, é dado por:

$$\mathrm{T}_{A,B} = q \times k \times Q \times \left(\frac{1}{d_A} - \frac{1}{d_B}\right)$$

Onde:

- T = Trabalho realizado pela força elétrica (**Joules - J**);

- q = Carga que se desloca (**Coulombs - C**);
- $k = 8{,}99 \times 10^9 N \cdot m^2/C^2$ (**constante eletrostática**);
- $\boldsymbol{Q}$ = Carga que gera o campo elétrico (**Coulombs - C**);
- d_A = Distância do ponto A até a carga $\boldsymbol{Q}$ (**metros - m**);
- d_B = Distância do ponto B até a carga $\boldsymbol{Q}$ (**metros - m**).

Essa equação mostra que o trabalho depende das posições inicial e final da carga no campo elétrico. Se $d_A > d_B$, o trabalho será positivo, indicando que a força elétrica acelerou a carga. Se $d_A < d_B$, o trabalho será negativo, indicando que a carga perdeu energia.

Significado Físico do Trabalho da Força Elétrica

- Se $T>0$: a força elétrica **fornece energia** à carga, aumentando sua energia cinética. Isso ocorre quando uma carga positiva se aproxima de outra carga positiva (ou uma negativa se aproxima de outra negativa).
- Se $T<0$: a força elétrica **retira energia** da carga, reduzindo sua energia cinética. Isso acontece quando cargas de sinais opostos se aproximam.
- Se $T=0$: não há variação de energia quando a carga se move em um círculo de raio constante ao redor de $\boldsymbol{Q}$, ou seja, em trajetórias equipotenciais.

Exercício Resolvido

Uma carga $q = 2{,}0 \times 10^{-6} C$, *se desloca de um ponto* $\boldsymbol{A}$, que está a **6 cm** do centro de uma carga fixa $Q = 5{,}0 \times 10^{-6} C$, até um ponto $\boldsymbol{B}$, que está a **10 cm** do centro dessa carga.

Determine o trabalho realizado pela força elétrica nesse deslocamento.

Resolução:

Convertendo para metros:

$$d_A = 0{,}06\, m \;\; e \;\; d_B = 0{,}10\, m$$

Aplicando a fórmula:

$$\mathrm{T}_{A,B} = q \times k \times Q \times \left(\frac{1}{d_A} - \frac{1}{d_B}\right)$$

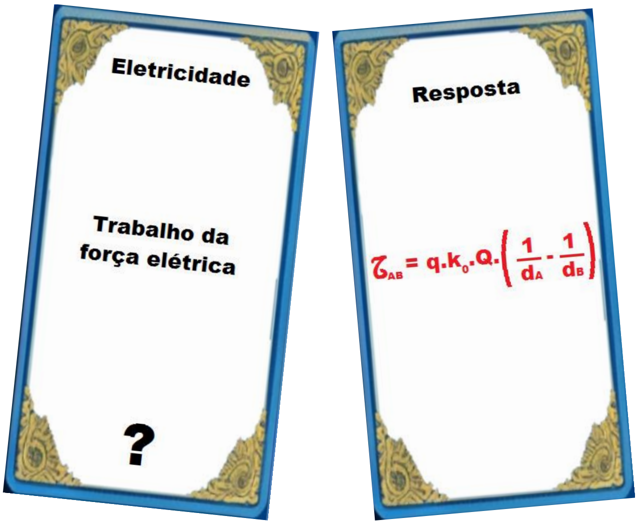
$$T_{A,B} = (2{,}0 \times 10^{-6}) \times (8{,}99 \times 10^{9}) \times (5{,}0 \times 10^{-6}) \times \left(\frac{1}{0{,}06} - \frac{1}{0{,}10}\right)$$

$$\therefore$$

$$T_{A,B} = 6{,}0 \times 10^{-1}\, J$$

Resposta:

O trabalho realizado pela força elétrica é **0,6 J**.



Energia Potencial Elétrica

A energia potencial elétrica é uma grandeza escalar que mede a capacidade de uma carga realizar trabalho devido à influência de um campo elétrico. Esse conceito está diretamente relacionado ao trabalho da força elétrica e à diferença de potencial entre dois pontos no espaço.

Quando uma carga de prova ***q***, está sob a ação de uma carga geradora ***Q***, ela possui energia potencial devido à interação entre essas cargas. O trabalho realizado pela força elétrica ao mover a carga de um ponto $\boldsymbol{A}$ para um ponto $\boldsymbol{B}$ está relacionado à variação dessa energia potencial.

1. Trabalho da Força Elétrica de um Ponto A ao Infinito

Para calcular o trabalho necessário para mover uma carga $\boldsymbol{q}$, de um ponto $\boldsymbol{A}$ para uma posição muito distante (infinito), usamos a seguinte equação:

$$T_{A\to\infty} = q \times k \times Q \times \left(\frac{1}{d_A} - 0\right)$$

Como no infinito a influência da carga $\boldsymbol{Q}$ é desprezível, temos:

$$T_{A\to\infty} = q \times k \times Q \times \frac{1}{d_A}$$

Onde:

- $T_{A\to\infty}$ = Trabalho para levar a carga $\boldsymbol{q}$ do ponto $\boldsymbol{A}$ até o infinito (**Joules - J**);
- $k = 8{,}99 \times 10^9 N \cdot m^2/C^2$ (**constante eletrostática**);
- $\boldsymbol{Q}$ = Carga fixa que gera o campo (**Coulombs - C**);
- $\boldsymbol{q}$ = Carga de prova que se desloca (**Coulombs - C**);
- d_A = Distância entre $\boldsymbol{A}$ e $\boldsymbol{Q}$ (**metros - m**).

2. Energia Potencial Elétrica no Ponto A

A energia potencial elétrica de uma carga $\boldsymbol{q}$, colocada em um ponto $\boldsymbol{A}$, no campo elétrico gerado por uma carga $\boldsymbol{Q}$, é definida como:

$$U_A = q \times k \times Q \times \frac{1}{d_A}$$

Essa equação mostra que a energia potencial elétrica de $\boldsymbol{q}$, em $\boldsymbol{A}$, depende da carga fonte $\boldsymbol{Q}$, da posição d_A e da carga $\boldsymbol{q}$, que se move no campo.

Se $\boldsymbol{Q}$ e $\boldsymbol{q}$ tiverem o **mesmo sinal**, a energia potencial será **positiva**, indicando uma força repulsiva. Se tiverem **sinais opostos**, a energia potencial será **negativa**, indicando uma força atrativa.

3. Trabalho de A até B como Diferença de Potencial

Se a carga $\boldsymbol{q}$, se desloca de um ponto $\boldsymbol{A}$ até um ponto $\boldsymbol{B}$, a diferença de energia potencial entre esses pontos será:

$$T_{A \to B} = U_A - U_B$$

Substituindo a equação da energia potencial elétrica:

$$T_{A \to B} = q \times k \times Q \times \left(\frac{1}{d_A} - \frac{1}{d_B}\right)$$

Essa expressão é semelhante à equação do trabalho da força elétrica, pois o trabalho realizado pela força elétrica ao deslocar uma carga $\boldsymbol{q}$, entre dois pontos $\boldsymbol{A}$ e $\boldsymbol{B}$ é equivalente à diferença entre as energias potenciais nesses pontos.

Se o trabalho for **positivo**, significa que a força elétrica realiza trabalho sobre a carga $\boldsymbol{q}$, aumentando sua energia cinética. Se for **negativo**, significa que a carga perde energia.

Exercício Resolvido

Uma carga de prova $q = 2{,}0 \times 10^{-6}\ C$ está em um ponto $\boldsymbol{A}$, a **5 cm** de uma carga fixa $Q = 4{,}0 \times 10^{-6}\ C$, e é deslocada para um ponto $\boldsymbol{B}$, que está a **10 cm** da carga fixa.

Calcule:

a) A energia potencial elétrica da carga no ponto $\boldsymbol{A}$.
b) O trabalho realizado pela força elétrica ao deslocar a carga de $\boldsymbol{A}$ para $\boldsymbol{B}$.

Resolução:

Passo 1: Energia Potencial Elétrica em A

$$U_A = q \times k \times Q \times \frac{1}{d_A}$$

$$U_A = (2{,}0 \times 10^{-6}) \times (8{,}99 \times 10^{9}) \times (4{,}0 \times 10^{-6}) \times \left(\frac{1}{0{,}05}\right)$$

$$\therefore$$

$$U_A \approx 14{,}38 \times 10^{-1}\,J \approx 1{,}44\,J$$

Passo 2: Trabalho da Força Elétrica de A para B

$$T_{A \to B} = q \times k \times Q \times \left(\frac{1}{d_A} - \frac{1}{d_B}\right)$$

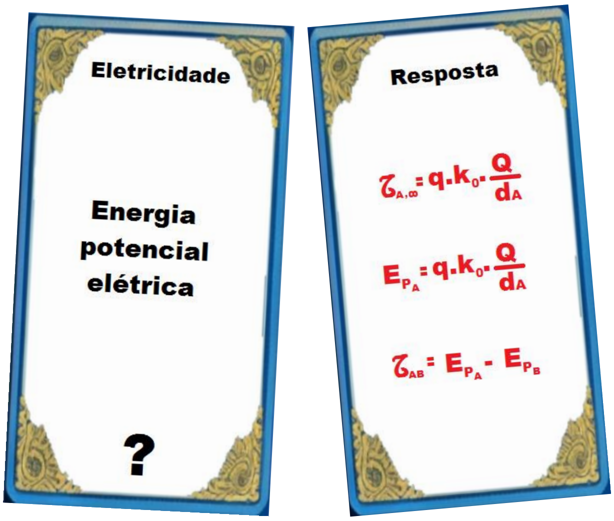
$$T_{A \to B} = (2{,}0 \times 10^{-6}) \times (8{,}99 \times 10^{9}) \times (4{,}0 \times 10^{-6}) \times \left(\frac{1}{0{,}05} - \frac{1}{0{,}10}\right)$$

Calculando os valores:

$$\therefore\ T_{A \to B} \approx 0{,}72\,J$$

Resposta:

a) A energia potencial elétrica em $\boldsymbol{A}$ é aproximadamente **1,44 J**.
b) O trabalho realizado ao mover a carga de $\boldsymbol{A}$ para $\boldsymbol{B}$ é aproximadamente **0,72 J**.



Potencial Elétrico

O **potencial elétrico** é uma grandeza escalar que representa a capacidade de um campo elétrico realizar **Trabalho**, sobre uma carga elétrica. Ele mede a energia potencial elétrica por unidade de carga em um ponto específico do espaço.

Diferente da energia potencial elétrica, que depende da carga de prova q, o potencial elétrico é uma característica do campo e independe da carga testada. Ele é dado pela relação entre o trabalho realizado para mover uma carga q e o valor dessa carga.

A unidade de medida do potencial elétrico no Sistema Internacional (SI) é o **volt (V)**, que equivale a **joule por coulomb (J/C)**.

Potencial Elétrico Relacionado ao Trabalho da Força Elétrica

O potencial elétrico em um ponto A pode ser definido a partir do **trabalho da força elétrica** ao deslocar uma carga de prova q, desse ponto até o infinito:

$$V_A = \frac{T_{A\rightarrow\infty}}{q}$$

Onde:

- V_A = Potencial elétrico no ponto $\boldsymbol{A}$ (**V**);
- $T_{A\rightarrow\infty}$ = Trabalho realizado para mover a carga $\boldsymbol{q}$ de $\boldsymbol{A}$ até o infinito (**J**);
- $\boldsymbol{q}$ = Carga de prova (**C**).

Esse conceito mostra que o potencial elétrico mede o trabalho necessário para mover **uma unidade de carga positiva** de um ponto $\boldsymbol{A}$ até o infinito.

Potencial Elétrico no Ponto A

Sabemos que o trabalho para mover uma carga $\boldsymbol{q}$, de um ponto $\boldsymbol{A}$ para o infinito é:

$$T_{A\rightarrow\infty} = q \times k \times Q \times \frac{1}{d_A}$$

Substituindo na equação do potencial elétrico:

$$V_A = \frac{q \times k \times Q \times \frac{1}{d_A}}{q}$$

Cancelando $\boldsymbol{q}$:

$$V_A = k \times Q \times \frac{1}{d_A}$$

Essa equação mostra que o potencial elétrico no ponto $\boldsymbol{A}$ depende apenas da carga fonte $\boldsymbol{Q}$, da constante eletrostática $\boldsymbol{k}$ e da distância d_A entre a carga fonte e o ponto onde estamos calculando o potencial.

Onde:

- V_A = Potencial elétrico no ponto $\boldsymbol{A}$ (**V**);

- $k = 8{,}99 \times 10^9 N \cdot m^2/C^2$(**constante eletrostática**);
- $\boldsymbol{Q}$ = Carga que gera o campo (**C**);
- d_A = Distância entre $\boldsymbol{A}$ e $\boldsymbol{Q}$ (**m**).

Exercício Resolvido

Uma carga fixa $Q = 5{,}0 \times 10^{-6}\ C$ está localizada em um ponto fixo do espaço. Determine:

a) O potencial elétrico em um ponto $\boldsymbol{A}$ que está a **6 cm** da carga.
b) O trabalho necessário para levar uma carga de $q = 2{,}0 \times 10^{-6}\ C$ do ponto $\boldsymbol{A}$ até o infinito.

Resolução:

Passo 1: Potencial Elétrico em A

$$V_A = k \times Q \times \frac{1}{d_A}$$

$$V_A = (8{,}99 \times 10^9) \times (5{,}0 \times 10^{-6}) \times \frac{1}{0{,}06}$$

$$\therefore$$

$$V_A = 7{,}49 \times 10^5\ V\ = 749000\ V$$

Passo 2: Trabalho da Força Elétrica para Levar q, ao Infinito

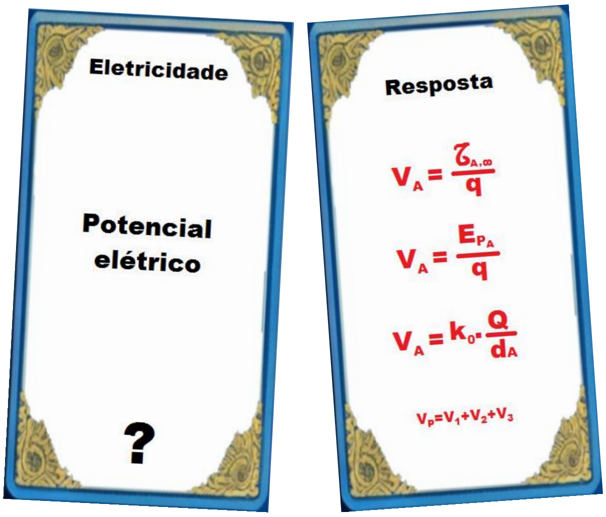
$$T_{A\to\infty} = q \times V_A$$

$$T_{A\to\infty} = (2{,}0 \times 10^{-6}) \times (7{,}49 \times 10^5)$$

$$T_{A\to\infty} = 1{,}498\ J\ \approx\ 1{,}50\ J$$

Resposta:

a) O potencial elétrico no ponto **A** é **749000 V (ou 7,49 × $\mathbf{10^5}$ V)**.
b) O trabalho necessário para levar a carga $\boldsymbol{q}$ até o infinito é aproximadamente **1,50 J**.



Diferença de Potencial (ddp)

A **diferença de potencial elétrico** (ou **tensão elétrica**) entre dois pontos de um campo elétrico é definida como o trabalho realizado pela força elétrica para deslocar uma carga de prova entre esses dois pontos, dividido pelo valor da carga.

Matematicamente, a diferença de potencial entre dois pontos $\boldsymbol{A}$ e $\boldsymbol{B}$ é dada por:

$$V_A - V_B = \frac{T_{A \to B}}{q}$$

Onde:

- $V_A - V_B$ = Diferença de potencial entre os pontos $\boldsymbol{A}$ e $\boldsymbol{B}$ (**V**);
- $T_{A \to B}$ = Trabalho realizado pela força elétrica ao deslocar a carga $\boldsymbol{q}$ de $\boldsymbol{A}$ para $\boldsymbol{B}$ (**J**);
- $\boldsymbol{q}$ = Carga de prova (**C**).

A unidade de medida da diferença de potencial no SI é o **volt (V)**, onde **1 V = 1 J/C**. Isso significa que uma ddp de **1 volt** entre dois pontos indica que **1 joule de energia** é gasto para deslocar **1 coulomb de carga** entre esses pontos.

Fórmula da ddp em um campo elétrico gerado por uma carga puntiforme

Em um campo elétrico gerado por uma carga $\boldsymbol{Q}$, a diferença de potencial entre dois pontos $\boldsymbol{A}$ e $\boldsymbol{B}$, situados a distâncias d_A e d_B da carga, pode ser escrita como:

$$V_A - V_B = k \times Q \times \left(\frac{1}{d_A} - \frac{1}{d_B}\right)$$

Onde:

- $k = 8{,}99 \times 10^9 N \cdot m^2/C^2$ (**constante eletrostática**);
- $\boldsymbol{Q}$ = Carga que gera o campo (**C**);
- d_A , d_B = Distâncias dos pontos $\boldsymbol{A}$ e $\boldsymbol{B}$ até a carga $\boldsymbol{Q}$ (**m**).

Isso significa que a diferença de potencial entre dois pontos depende apenas da carga fonte $\boldsymbol{Q}$ e das distâncias dos pontos ao centro do campo elétrico.

Exercício Resolvido

Uma carga elétrica $Q = 4{,}0 \times 10^{-6}\, C$ gera um campo elétrico. Determine a diferença de potencial entre os pontos $\boldsymbol{A}$ e $\boldsymbol{B}$, sabendo que:

- O ponto $\boldsymbol{A}$ está a **10 cm** da carga $\boldsymbol{Q}$;
- O ponto $\boldsymbol{B}$ está a **30 cm** da carga $\boldsymbol{Q}$.

Resolução:

A diferença de potencial entre os pontos $\boldsymbol{A}$ e $\boldsymbol{B}$ é calculada por:

$$V_A - V_B = k \times Q \times \left(\frac{1}{d_A} - \frac{1}{d_B}\right)$$

Substituindo os valores:

$$V_A - V_B = (8{,}99 \times 10^9) \times (4{,}0 \times 10^{-6}) \times \left(\frac{1}{0{,}10} - \frac{1}{0{,}30}\right)$$

$$\therefore$$

$$V_A - V_B \approx 2{,}40 \times 10^5\ V \approx\ 240000\ V$$

Resposta:

A diferença de potencial entre os pontos A e B é aproximadamente **240000 V (ou 2,4 × 10^5 V)**.

Relação entre Trabalho e Diferença de Potencial

A relação entre **trabalho** e **diferença de potencial (ddp)** é fundamental para entender a movimentação de cargas elétricas em um campo elétrico. O trabalho realizado pela força elétrica ao mover uma carga de um ponto A para um ponto B dentro de um campo elétrico é diretamente proporcional à diferença de potencial entre esses pontos.

Fórmula do Trabalho da Força Elétrica

O **trabalho** T_{AB} realizado pela força elétrica ao deslocar uma carga elétrica $\boldsymbol{q}$, entre dois pontos de potencial V_A e V_B é dado por:

$$T_{AB} = q \times (V_A - V_B)$$

Onde:

- T_{AB} = Trabalho da força elétrica ao deslocar a carga de $\boldsymbol{A}$ para $\boldsymbol{B}$ (**J**);
- $\boldsymbol{q}$ = Carga elétrica em movimento (**C**);
- V_A = Potencial elétrico no ponto $\boldsymbol{A}$ (**V**);
- V_B = Potencial elétrico no ponto $\boldsymbol{B}$ (**V**).

Se o trabalho for **positivo**, significa que a força elétrica está realizando trabalho espontaneamente, impulsionando a carga. Se for **negativo**, significa que um agente externo precisa fornecer energia para deslocar a carga.

Fórmula do Potencial em Função do Trabalho

A diferença de potencial entre dois pontos $\boldsymbol{A}$ e $\boldsymbol{B}$ também pode ser expressa em termos do trabalho por unidade de carga:

$$U = \frac{T_{AB}}{q}$$

Onde:

- $\boldsymbol{U}$ = Diferença de potencial entre $\boldsymbol{A}$ e $\boldsymbol{B}$ (**V**);
- T_{AB} = Trabalho realizado pela força elétrica (**J**);
- $\boldsymbol{q}$ = Carga elétrica deslocada (**C**).

Essa equação reforça que **1 volt equivale a 1 joule por coulomb (1 V = 1 J/C)**, o que significa que **1 V é a ddp necessária para que 1 J de energia seja transferido para cada 1 C de carga**.

Exercício Resolvido

Uma carga elétrica de $q = 2{,}0 \times 10^{-6}\ C$ se desloca de um ponto $\boldsymbol{A}$ para um ponto $\boldsymbol{B}$ em um campo elétrico. A diferença de potencial entre os pontos é **100 V**.

Determine:

a) O trabalho realizado pela força elétrica para deslocar essa carga.
b) Se a carga fosse negativa, o trabalho teria o mesmo valor?

Resolução:

Usamos a fórmula:

$$T_{AB} = q \times (V_A - V_B)$$

Substituindo os valores:

$$T_{AB} = (2{,}0 \times 10^{-6}) \times (100)$$

$$T_{AB} = 2{,}0 \times 10^{-4}\ J = 0{,}0002\ J = 0{,}2\ mJ$$

Se a carga fosse **negativa**, o trabalho teria o mesmo módulo, mas **com sinal negativo**, pois a carga estaria se movendo contra o campo elétrico.

Resposta:

a) O trabalho realizado pela força elétrica é $0{,}2\ mJ$ **(ou 0,0002 J)**.
b) Se a carga fosse negativa, o trabalho seria $-0{,}2\ mJ$, pois a força elétrica estaria agindo no sentido oposto ao deslocamento.

Diferença de Potencial em um Campo Elétrico Uniforme

A **diferença de potencial elétrico (ddp)** entre dois pontos em um **campo elétrico uniforme** pode ser calculada diretamente a partir da relação entre o campo elétrico e a distância entre os pontos. Esse conceito é especialmente útil para entender a ddp entre placas de um capacitor ou entre dois pontos fixos dentro de um campo gerado por cargas distribuídas uniformemente.

Fórmula da Diferença de Potencial em um Campo Elétrico Uniforme

Em um campo elétrico uniforme, a ddp entre dois pontos A e B, separados por uma distância d, é dada por:

$$U_{AB} = E \times d$$

Onde:

- U_{AB} = Diferença de potencial entre os pontos A e B (**V**);
- E = Intensidade do campo elétrico **(N/C ou V/m)**;
- d = Distância entre os pontos A e B ao longo da direção do campo (**m**).

Essa equação mostra que **a ddp é proporcional à intensidade do campo elétrico e à distância percorrida na direção do campo**.

Interpretação Física

- Se o deslocamento ocorre **no mesmo sentido** do campo elétrico, U_{AB} será **positivo**, indicando uma perda de energia potencial para cargas positivas.
- Se o deslocamento ocorre **contra o sentido** do campo elétrico, U_{AB} será **negativo**, indicando um ganho de energia potencial para cargas positivas.

Essa relação é particularmente útil para **capacitores planos**, onde o campo elétrico entre as placas carregadas positivamente e negativamente é uniforme, tornando o cálculo da ddp entre as placas direto e intuitivo.

Exercício Resolvido

Duas placas paralelas carregadas criam um campo elétrico uniforme de intensidade $E = 5000\ V/m$. Sabendo que a distância entre as placas é de **2 cm**, determine a diferença de potencial entre elas.

Resolução:

Usamos a fórmula:

$$U_{AB} = E \times d$$

Convertendo a distância para metros:

$$d = 2\ cm\ \Rightarrow\ 0{,}02\ m$$

Substituindo os valores:

$$U_{AB} = (5000) \times (0{,}02)$$

$$U_{AB} = 100\ V$$

Resposta:

A diferença de potencial entre as placas é **100 V**.

Potencial Elétrico de um Condutor Esférico

Um **condutor esférico carregado** apresenta características importantes relacionadas ao seu **potencial elétrico**. Como a carga elétrica em um condutor em equilíbrio se distribui uniformemente em sua superfície, o potencial varia de acordo com a posição em relação à esfera: **fora da esfera, na superfície e dentro da esfera**.

Potencial Externo ao Condutor Esférico

Para um ponto **fora da esfera** ($r > R$), o potencial elétrico é o mesmo de uma carga puntiforme localizada no centro da esfera. Ele é dado por:

$$V_{ext} = k.\frac{Q}{r}$$

Onde:

- V_{ext} = Potencial elétrico externo ao condutor (V);
- $k = 9{,}0 \times 10^9 N \cdot m^2/C^2$;
- $\boldsymbol{Q}$ = Carga total do condutor (C);
- $\boldsymbol{r}$ = Distância do ponto até o centro da esfera (m).

O potencial externo **diminui com a distância**, pois quanto maior for $\boldsymbol{r}$, menor será o potencial.

Potencial na Superfície do Condutor

Na **superfície da esfera** ($\boldsymbol{r=R}$), o potencial assume um valor fixo:

$$V_{sup} = k.\frac{Q}{R}$$

Ou seja, o potencial na superfície é **maior do que em qualquer ponto externo** à esfera, e **igual ao potencial de um ponto muito próximo à sua superfície externa**.

Potencial Interno ao Condutor

Uma das propriedades mais interessantes de um **condutor esférico** é que **todo o seu interior tem o mesmo potencial da superfície**:

$$V_{int} = V_{sup} = k.\frac{Q}{R}$$

Isso acontece porque o campo elétrico dentro de um condutor **é nulo**, ou seja, não há variação do potencial em seu interior.

Assim, qualquer ponto dentro da esfera condutora tem **o mesmo potencial da superfície**, independentemente da posição dentro do condutor.

Resumo das Fórmulas

Região do Condutor	Potencial
Externa ($r>R$)	$V_{ext} = k.\frac{Q}{r}$
Superfície ($r=R$)	$V_{sup} = k.\frac{Q}{R}$
Interna ($r<R$)	$V_{int} = V_{sup} = k.\frac{Q}{R}$

Exercício Resolvido

Uma esfera condutora de raio **0,2 m** possui carga total de $5{,}0 \times 10^{-6}\ C,\ k = 9{,}0 \times 10^{9} N \cdot m^2/C^2$.

Determine:

a) O potencial na superfície da esfera.
b) O potencial em um ponto externo localizado a **0,5 m** do centro da esfera.
c) O potencial em um ponto interno a **0,1 m** do centro da esfera.

Resolução:

a) Potencial na Superfície

$$V_{sup} = k.\frac{Q}{R}$$

$$V_{sup} = (9{,}0 \times 10^{9}).\frac{5{,}0 \times 10^{-6}}{0{,}2}$$

$$V_{sup} = 2{,}25 \times 10^{5}\ V$$

Resposta:

225.000 V.

b) Potencial em um Ponto Externo (r=0,5m)

$$V_{ext} = k.\frac{Q}{r}$$

$$V_{ext} = (9{,}0 \times 10^9).\frac{5{,}0 \times 10^{-6}}{0{,}5}$$

$$V_{ext} = .9{,}0 \times 10^4\ V$$

Resposta:

90.000 V

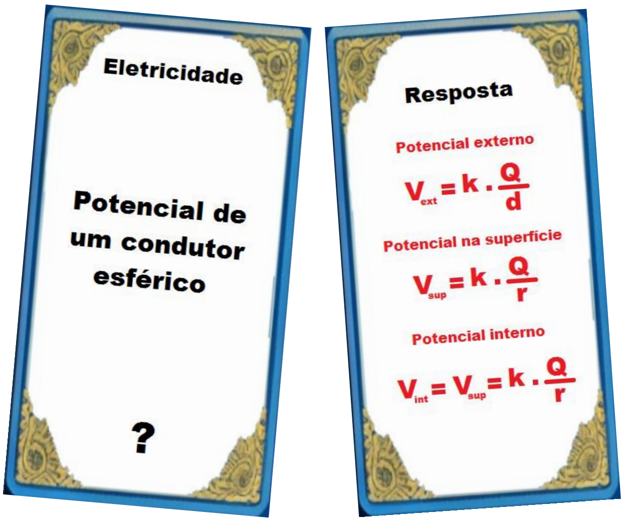
c) Potencial em um Ponto Interno (r=0,1)

Como o potencial interno é igual ao da superfície **(0,1m < 0,2m)**:

$$V_{int} = V_{sup} = 2{,}25 \times 10^5\ V$$

Resposta:

225.000 V.



Capacidade de um Condutor

A **capacidade de um condutor** mede a **capacidade** de um corpo armazenar carga elétrica para um determinado potencial elétrico. Essa propriedade é chamada de **capacitância** e é fundamental para o funcionamento de diversos dispositivos elétricos e eletrônicos, como os capacitores.

Definição de Capacitância

A capacitância (C) de um condutor é definida como a razão entre a carga elétrica (Q) armazenada no condutor e o potencial elétrico (V) que essa carga produz:

$$C = \frac{Q}{V}$$

Onde:

- C = Capacitância (**Farad, F**);
- Q = Carga armazenada no condutor (**Coulomb,** C);
- V = Potencial elétrico do condutor (**Volt,** V).

Isso significa que, quanto maior for a capacitância de um condutor, **mais carga ele pode armazenar para um mesmo potencial**.

Capacitância de um Condutor Esférico

No caso de um **condutor esférico isolado**, a capacitância pode ser expressa como:

$$C = \frac{R}{k}$$

Onde:

- R = Raio da esfera (**m**);
- k = Constante eletrostática do vácuo ($9{,}0 \times 10^9 N \cdot m^2/C^2$).

Essa equação mostra que **a capacitância de uma esfera condutora depende apenas do seu raio**, sendo **diretamente proporcional a ele**.

Unidade de Medida da Capacitância

A unidade de capacitância no Sistema Internacional (SI) é o **Farad** (F), definido como:

$$1F = 1\frac{C}{V}$$

Ou seja, um condutor tem **capacitância de 1 Farad** quando armazena **1 Coulomb de carga** para cada **1 Volt** de potencial elétrico.

Entretanto, o **Farad é uma unidade muito grande**, então na prática usamos seus **submúltiplos**:

- **Milifarad (mF)**: $1\,mF = 10^{-3}F$.
- **Microfarad (μF)**: $1\,\mu F = 10^{-6}F$.
- **Nanofarad (nF)**: $1\,nF = 10^{-9}F$.
- **Picofarad (pF)**: $1\,pF = 10^{-12}F$.

Exercício Resolvido

Uma esfera condutora de raio **0,1 m** está isolada no vácuo. Determine sua capacitância.

Resolução:

Usamos a fórmula da capacitância para uma esfera:

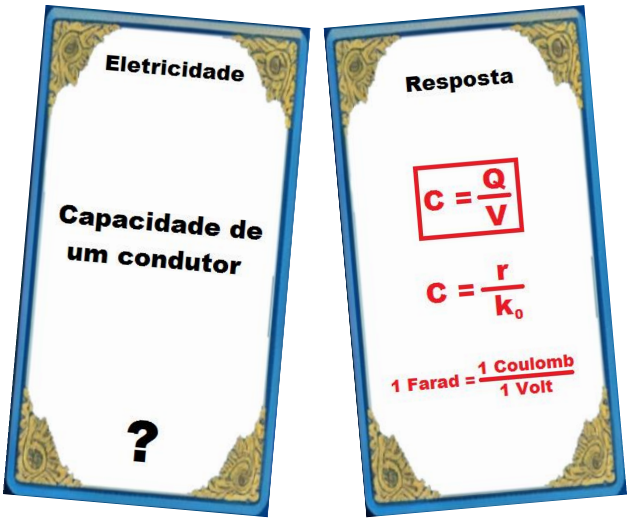
$$C = \frac{R}{k}$$

Substituindo os valores:

$$C = \frac{0,1}{9,0 \times 10^9}$$

$$C = 1,1 \times 10^{-11} F$$

Ou seja, a capacitância da esfera é aproximadamente **11,1 pF (picofarad)**.



Contato entre Condutores Eletrizados

Quando dois **condutores eletrizados** entram em contato, ocorre uma **redistribuição de cargas elétricas** entre eles até que ambos fiquem com o **mesmo potencial elétrico**. Esse fenômeno é fundamental na eletricidade, pois explica como cargas se distribuem em sistemas condutores e como funcionam certos dispositivos elétricos.

Potencial Após o Contato

Se dois condutores isolados, com capacitâncias $C_1 \, e \, C_2$, e potenciais iniciais $V_1 \, e \, V_2$, forem colocados em contato, a carga total do sistema se conserva. Após o contato, ambos os condutores terão o **mesmo potencial elétrico** (V_f), que pode ser calculado por:

$$V_f = \frac{C_1 V_1 + C_2 V_2}{C_1 + C_2}$$

Onde:

- $C_1 \, e \, C_2$ = Capacitâncias dos condutores (**Farad, F**);
- $V_1 \, e \, V_2$ = Potenciais iniciais dos condutores (**Volt, V**);
- V_f = Potencial final comum após o contato (**Volt, V**).

Essa equação mostra que o potencial final é uma **média ponderada** dos potenciais iniciais, levando em conta a capacitância de cada condutor.

Potencial pelo Método da Soma das Cargas

Outra forma de calcular o **potencial final** é somando as cargas iniciais dos condutores e dividindo pela soma das capacitâncias:

$$V_f = \frac{Q_1 + Q_2}{C_1 + C_2}$$

Onde:

- $Q_1 = C_1 V_1$ (carga inicial do primeiro condutor);

- $Q_2 = C_2 V_2$ (carga inicial do segundo condutor);
- V_f = Potencial comum após o contato.

Ambas as equações fornecem o **mesmo resultado** para o potencial final.

Redistribuição das Cargas

Após o contato, as novas cargas dos condutores serão:

$$Q_1' = C_1 V_f$$

$$Q_2' = C_2 V_f$$

Ou seja, a carga se redistribui de acordo com a **capacitância de cada condutor**, sempre mantendo, o mesmo potencial elétrico.

Exercício Resolvido

Dois condutores isolados são colocados em contato. O primeiro tem **capacitância de 3 μF** e potencial inicial de **200 V**. O segundo tem **capacitância de 2 μF** e potencial inicial de **100 V**. Determine o potencial comum após o contato.

Resolução:

Usamos a fórmula:

$$V_f = \frac{C_1 V_1 + C_2 V_2}{C_1 + C_2}$$

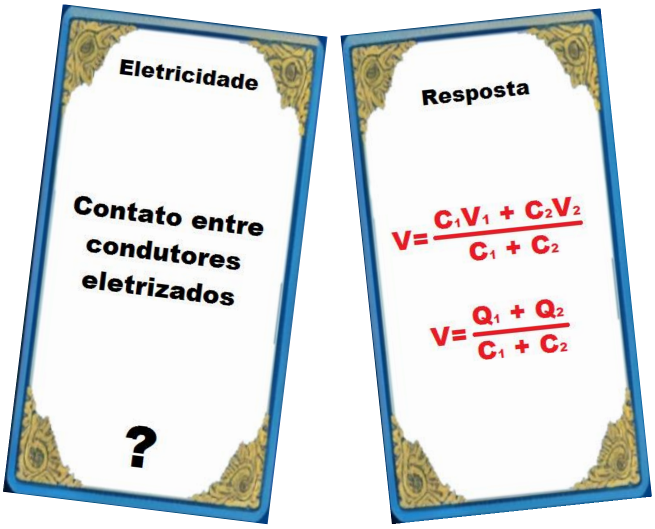
Substituindo os valores:

$$V_f = \frac{(3 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^2) + (2 \times 10^{-6} \times 10^2)}{3 \times 10^{-6} + 2 \times 10^{-6}}$$

$$\therefore$$

$$V_f = 160\ V$$

Assim, após o contato, ambos os condutores terão um **potencial final de 160 V**.



Energia Potencial Elétrica de um Condutor

A **energia potencial elétrica** de um condutor eletrizado está associada ao **trabalho necessário** para acumular cargas em sua superfície. À medida que a carga do condutor aumenta, o trabalho realizado para trazer cargas adicionais se acumula na forma de **energia armazenada**. Essa energia é importante, especialmente na análise de **capacitores**, pois permite entender como a carga e a voltagem influenciam a energia armazenada em sistemas elétricos.

Fórmula da Energia Potencial de um Condutor

A energia potencial elétrica (E_p) de um condutor eletrizado pode ser expressa por diferentes fórmulas equivalentes:

$$E_p = \frac{Q \times V}{2}$$

Ou, substituindo $Q = C \times V$, temos:

$$E_p = \frac{C \times V^2}{2}$$

Onde:

- E_p = Energia potencial elétrica (**Joule, J**);
- $\boldsymbol{Q}$ = Carga elétrica armazenada no condutor (**Coulomb, C**);
- $\boldsymbol{V}$ = Potencial elétrico do condutor (**Volt, V**);
- $\boldsymbol{C}$ = Capacitância do condutor (**Farad, F**).

Essas expressões mostram que a energia armazenada no condutor depende da carga e da voltagem aplicadas.

Interpretação Física

A energia armazenada em um condutor pode ser interpretada como o trabalho necessário para mover uma carga de um ponto de **potencial nulo** até o condutor. Como a carga se distribui uniformemente, a média do trabalho realizado em cada pequena porção de carga é **metade da carga final** multiplicada pela voltagem final.

Isso justifica o fator **1/2** nas equações.

Exemplo Resolvido

Um condutor tem uma capacitância de **5 μF** e está submetido a um potencial elétrico de **200 V**. Determine a energia potencial armazenada nesse condutor.

Resolução:

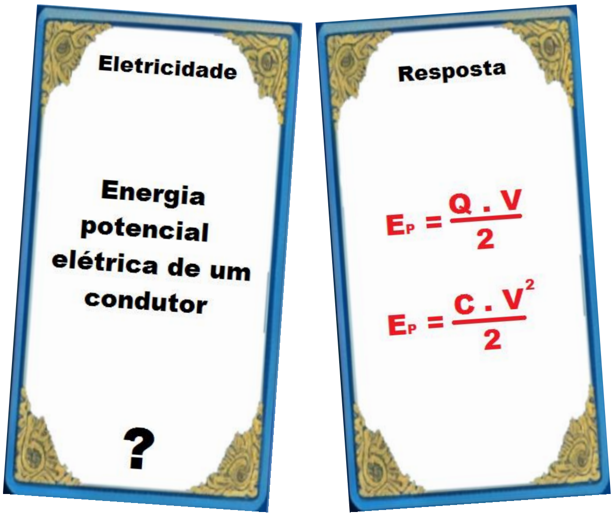
Utilizando a fórmula:

$$E_p = \frac{C \times V^2}{2}$$

Substituímos os valores:

$$E_p = \frac{(5\times10^{-6})\times(200)^2}{2}$$
$$\therefore$$
$$E_p = 0{,}1\,J$$

Assim, a **energia armazenada** no condutor é **0,1 Joules**.



Capacitores

Os **capacitores** são dispositivos elétricos projetados para armazenar carga elétrica e energia em um campo elétrico. Eles são amplamente utilizados em circuitos eletrônicos para funções como filtragem, temporização e armazenamento de energia.

A **capacitância** de um capacitor mede sua capacidade de armazenar carga para uma dada diferença de potencial. Ela é definida pela relação:

$$C = \frac{Q}{U}$$

Onde:

- C = Capacitância do capacitor (**Farad,** F);
- Q = Carga elétrica armazenada (**Coulomb,** C);
- U = Diferença de potencial entre as placas (**Volt,** V).

Compreensão da Fórmula

A capacitância (C) é diretamente proporcional à carga (Q) e inversamente proporcional à diferença de potencial (U). Isso significa que, para um mesmo capacitor, **quanto maior for a carga armazenada, maior será a diferença de potencial aplicada entre suas placas**.

Se tivermos dois capacitores idênticos, um com carga Q_A e outro com carga Q_B, $e\ soubermos\ que\ Q_A > Q_B$, então, para a mesma capacitância, a diferença de potencial entre as placas de Q_A será maior que a de Q_B, ou seja, $V_A > V_B$.

No entanto, se os capacitores forem diferentes e possuírem capacitâncias distintas, a relação entre cargas e potenciais dependerá da capacitância específica de cada um.

Exemplo Resolvido

Um capacitor tem uma carga de $Q = 6 \times 10^{-6}\, C$ e está submetido a uma diferença de potencial de $U = 12\, V$. Determine a capacitância desse capacitor.

Resolução:

Utilizamos a fórmula da capacitância:

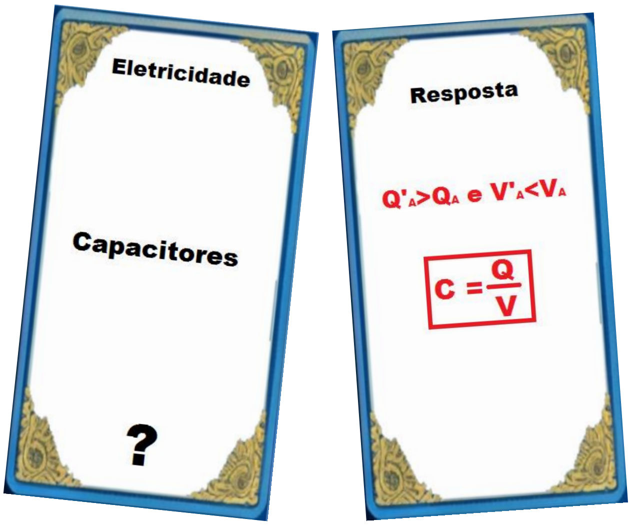
$$C = \frac{Q}{U}$$

Substituímos os valores:

$$C = \frac{6\times10^{-6}}{12}$$

$$C = 5 \times 10^{-7}\, F$$

Ou seja, a capacitância do capacitor é **0,5 μF**.



Capacitores de Placas Paralelas

Os **capacitores de placas paralelas** são um dos tipos mais comuns de capacitores, compostos por duas placas condutoras paralelas separadas por um material isolante chamado **dielétrico**. Esse arranjo permite armazenar carga elétrica e criar um campo elétrico uniforme entre as placas.

A **capacitância** de um capacitor de placas paralelas depende da carga armazenada, da diferença de potencial aplicada e das características físicas do capacitor.

Fórmulas da Capacitância

Capacitância geral

A capacitância é definida como a razão entre a carga armazenada e a diferença de potencial entre as placas:

$$C = \frac{Q}{U}$$

Onde:

- C = Capacitância (F)
- Q = Carga armazenada (C)
- U = Diferença de potencial (V)

Capacitância em função da geometria do capacitor

A capacitância de um capacitor de placas paralelas depende das características físicas do capacitor:

$$C = \frac{k \times \varepsilon_0 \times A}{d}$$

Onde:

- k = Constante dielétrica do material entre as placas
- ε_0 = Permissividade elétrica do vácuo ($8{,}85 \times 10^{-12}\ F/m$)
- A = Área das placas (m^2)
- d = Distância entre as placas (m)

Essa equação mostra que **a capacitância aumenta com o aumento da área das placas** e **diminui quando a distância entre elas aumenta**. Além disso, **materiais dielétricos com maior constante dielétrica aumentam a capacitância**.

Fórmulas da Energia Potencial

A energia potencial elétrica armazenada em um capacitor pode ser expressa de duas maneiras:

Em função da carga e da tensão

$$E_p = \frac{Q \times U}{2}$$

Em função da capacitância e da tensão

$$E_p = \frac{C \times U^2}{2}$$

Essas equações mostram que **a energia armazenada cresce conforme a capacitância ou a tensão aplicada aumenta**.

Exemplo Resolvido

- Um capacitor de placas paralelas tem área $A = 0{,}02\, m^2$, distância entre as placas $d = 2 \times 10^{-3}\, m$ e está preenchido com um dielétrico cuja constante dielétrica é $k = 5$. Sendo a permissividade elétrica do vácuo $(8{,}85 \times 10^{-12} F/m)$.

Determine:

a) A capacitância do capacitor.
b) A energia armazenada quando submetido a uma diferença de potencial de $\boldsymbol{100V}$.

Resolução:

(a) Cálculo da capacitância

Usamos a fórmula:

$$C = \frac{k \times \varepsilon_0 \times A}{d}$$

Substituindo os valores:

$$C = \frac{(5) \times (8{,}85 \times 10^{-12}) \times (0{,}02)}{2 \times 10^{-3}}$$

$$\therefore$$

$$C \approx 4{,}43 \times 10^{-12} F \approx 4{,}43\, pF$$

(b) Cálculo da energia armazenada

Usamos a fórmula:

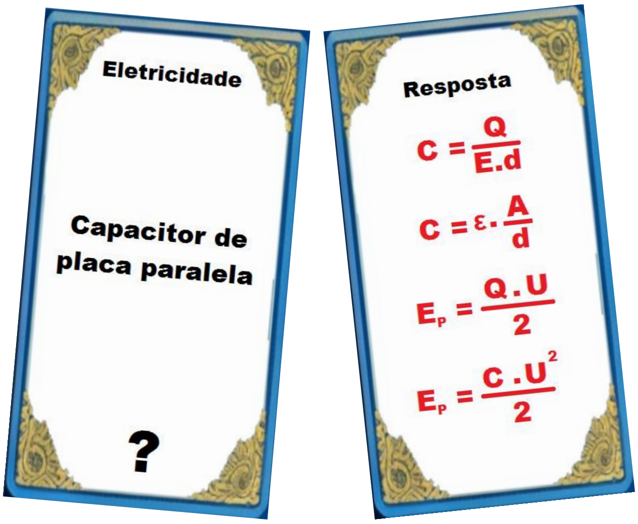
$$E_p = \frac{C \times U^2}{2}$$

Substituindo os valores:

$$E_p = \frac{(4{,}43 \times 10^{-12}) \times (100)^2}{2}$$

$$\therefore$$

$$E_p = 2{,}22 \times 10^{-8}\, J$$



Associação de Capacitores em Série

Quando **capacitores** são ligados em **série**, a carga armazenada em cada capacitor é a **mesma** em toda a associação, mas a diferença de potencial (ddp) total é a soma das ddps individuais de cada capacitor. Esse tipo de associação é útil para diminuir a capacitância equivalente e para suportar tensões mais altas.

Características da Associação em Série

- A **carga armazenada** é **a mesma** em todos os capacitores:

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = \cdots = Q_n = Q$$

- A **diferença de potencial total** é a soma das diferenças de potenciais individuais:

$$U_{total} = U_1 + U_2 + U_3 + \cdots + U_n$$

- A **capacitância equivalente** da associação em série é dada por:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \cdots + \frac{1}{C_n}$$

Esse resultado mostra que a capacitância equivalente de capacitores em série será **menor** do que a menor capacitância individual da associação.

Fórmulas Principais

- **Carga em cada capacitor**:

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = \cdots = Q_n = Q$$

- **Tensão total**:

$$U_{total} = U_1 + U_2 + U_3 + \cdots + U_n$$

- **Capacitância equivalente** para dois capacitores**:

$$C_{eq} = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2}$$

Para três ou mais capacitores:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \cdots + \frac{1}{C_n}$$

Exemplo Resolvido

Três capacitores de **10 μF**, **20 μF** e **30 μF** são ligados em **série**. Determine:

a) A capacitância equivalente da associação.
b) A carga armazenada quando a associação é submetida a uma ddp total de **60 V**.
c) A diferença de potencial em cada capacitor.

Resolução:

(a) Cálculo da capacitância equivalente

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

Substituindo os valores:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{10 \times 10^{-6}} + \frac{1}{20 \times 10^{-6}} + \frac{1}{30 \times 10^{-6}}$$

$$\therefore$$

$$\frac{1}{C_{eq}} \approx 1{,}83 \times 10^5 \quad \rightarrow \quad C = \frac{1}{1{,}83 \times 10^5}$$

$$\therefore$$

$$C_{eq} \approx 5{,}46\ \mu F$$

(b) Cálculo da carga armazenada

Sabemos que:

$$Q = C_{eq} \times U_{total}$$

Substituindo os valores:

$$Q \approx 5{,}46 \times 10^{-6} \times 60$$

$$Q \approx 328 \times 10^{-6}\ ou\ 328\ \mu C$$

(c) Cálculo da ddp em cada capacitor

A ddp em cada capacitor é dada por:

$$U_n = \frac{Q}{C_n}$$

Para $C_1 = 10\mu F$:

$$U_1 = \frac{328 \times 10^{-6}}{10 \times 10^{-6}} = 32{,}8\ V$$

Para $C_2 = 20\mu F$:

$$U_2 = \frac{328 \times 10^{-6}}{20 \times 10^{-6}} = 16{,}4\ V$$

Para $C_3 = 30\mu F$:

$$U_3 = \frac{328 \times 10^{-6}}{30 \times 10^{-6}} = 10{,}9\ V$$

Observando que:

$$U_{total} = U_1 + U_2 + U_3$$

$$U_{total} = 32{,}28 + 16{,}4 + 10{,}9 \approx 60V$$

Associação de Capacitores em Paralelo

Quando **capacitores** são associados **em paralelo**, todos eles compartilham a **mesma diferença de potencial (ddp)**, mas a **carga armazenada** é diferente para cada um, dependendo de sua capacitância. Esse tipo de associação é útil para aumentar a capacidade total de armazenamento de carga.

Características da Associação em Paralelo

- A **diferença de potencial** (U) é a **mesma** em todos os capacitores:

$$U_{total} = U_1 = U_2 = U_3 \ldots = U_n$$

- A **carga total** armazenada na associação é a **soma das cargas individuais**:

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \cdots + Q_n$$

Como $Q=C{\cdot}U$, podemos reescrever:

$$Q_{total} = Q_1 \times U + Q_2 \times U + Q_3 \times U + \cdots + Q_n \times U$$

- A **capacitância equivalente** da associação em paralelo é a **soma das capacitâncias individuais**:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 + \cdots + C_n$$

Isso mostra que a **capacitância equivalente será sempre maior do que a maior capacitância individual**.

Fórmulas Principais

- **Carga total armazenada**:

$$Q_{total} = C_{eq} \times U$$

- **Diferença de potencial em cada capacitor**:

$$U_1 = U_2 = U_3 \dots = U_n$$

- **Capacitância equivalente** para dois capacitores**:

$$C_{eq} = C_1 + C_2$$

Para três ou mais capacitores:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 + \cdots + C_n$$

Exemplo Resolvido

Três capacitores de **4 μF**, **6 μF** e **10 μF** são ligados **em paralelo** e submetidos a uma ddp de **50 V**. Determine:

a) A capacitância equivalente da associação.
b) A carga total armazenada.
c) A carga em cada capacitor.

Resolução:

(a) Cálculo da capacitância equivalente

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3$$

Substituindo os valores:

$$C_{eq} = 4 + 6 + 10 = 20\ \mu F$$

(b) Cálculo da carga total armazenada

$$Q_{total} = C_{eq} \times U$$

Substituindo os valores:

$$Q_{total} = (20 \times 10^{-6}) \times 50$$

$$Q_{total} = 1{,}0 \times 10^{-3}\ C\ =\ 1000\ mC(milicoulomb)$$

(c) Cálculo da carga em cada capacitor

A carga em cada capacitor é dada por:

$$Q_n = C_n \times U$$

Para $C_1 = 4\ \mu F$:

$$Q_1 = 4 \times 50 = 200\ \mu C$$

Para $C_2 = 6\ \mu F$:

$$Q_2 = 6 \times 50 = 300\ \mu C$$

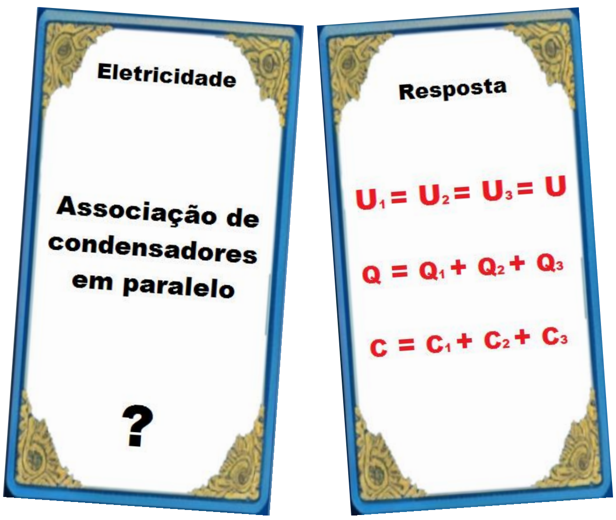
Para $C_3 = 10\ \mu F$:

$$Q_3 = 10 \times 50 = 500\ \mu C$$

Verificamos que:

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q_{total} = 200 + 300 + 500 = 1000 \mu C\ (ou\ 1\ mC)$$



Associação Mista de Capacitores

A **associação mista de capacitores** ocorre quando alguns capacitores estão **em série** e outros **em paralelo** dentro do mesmo circuito. Para resolver esses sistemas, é necessário identificar cada parte da associação e aplicar as **fórmulas de capacitores em série e em paralelo** até encontrar a **capacitância equivalente total**.

Passos para Resolver uma Associação Mista

1. **Identificar as partes do circuito:** Verificar quais capacitores estão em **série** e quais estão em **paralelo**.

2. **Calcular a capacitância equivalente dos capacitores em série:**

$$\frac{1}{C_{eq-série}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \cdots + \frac{1}{C_n}$$

3. **Calcular a capacitância equivalente dos capacitores em paralelo:**

$$C_{eq-paralelo} = C_1 + C_2 + C_3 + \cdots + C_n$$

4. **Reduzir o circuito passo a passo:**

   Aplicar os cálculos sucessivamente até encontrar a capacitância equivalente total do sistema.

5. **Determinar a carga e a ddp nos capacitores individuais:**

   Utilizando as fórmulas:
   - Carga em capacitores em série:

   Todos possuem a mesma carga ($Q_{total} = Q_1 = Q_2 = Q_3$).
   - ddp em capacitores em paralelo:

   Todos possuem a mesma diferença de potencial ($U_{total} = U_1 = U_2 = U_3$).

Exemplo Resolvido

Considere o circuito abaixo, onde os capacitores C_1 *e* C_2 estão em série, e sua associação está em paralelo com C_3.

Os valores são:

- $C_1 = 4\ \mu F$
- $C_2 = 6\ \mu F$

- $C_3 = 8\ \mu F$
- A tensão total aplicada é **50 V**.

Determine:

a) A capacitância equivalente total.
b) A carga total armazenada no circuito.
c) A carga e ddp em cada capacitor.

Resolução:

(a) Cálculo da Capacitância Equivalente Total

Primeiro, encontramos a capacitância equivalente da parte **em série** (C_1 *e* C_2):

$$\frac{1}{C_{eq-série}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

Substituindo os valores:

$$\frac{1}{C_{eq-série}} = \frac{1}{4} + \frac{1}{6}$$
$$\therefore$$
$$C_{eq-série} = 2{,}4\ \mu F$$

Agora, somamos essa capacitância equivalente com C_3, pois eles estão **em paralelo**:

$$C_{eq-total} = C_{eq-série} + C_3$$

$$C_{eq-total} = 2{,}4 + 8 = 10{,}4\ \mu F$$

(b) Cálculo da Carga Total

Sabemos que a carga total armazenada no sistema é dada por:

$$Q_{total} = C_{eq-total} \times U$$

$$Q_{total} = 10{,}4 \times 10^{-6} \times 50$$

$$Q_{total} = 520\ \mu C$$

(c) Carga e ddp nos Capacitores

- **Carga nos capacitores em paralelo**
  O capacitor C_3 recebe **diretamente a carga proporcional** à sua capacitância:

$$Q_3 = C_3 \times U$$
$$Q_3 = 8 \times 50 = 400\,\mu C$$

- **Carga nos capacitores em série**
  A carga nos capacitores em série é **igual** para ambos:

$$Q_{série} = Q_{total} - Q_3$$
$$Q_{série} = 520 - 400 = 120\,\mu C$$

Assim, temos:

$$Q_1 = Q_2 = 120\,\mu C$$

- **Diferença de Potencial em Cada Capacitor**

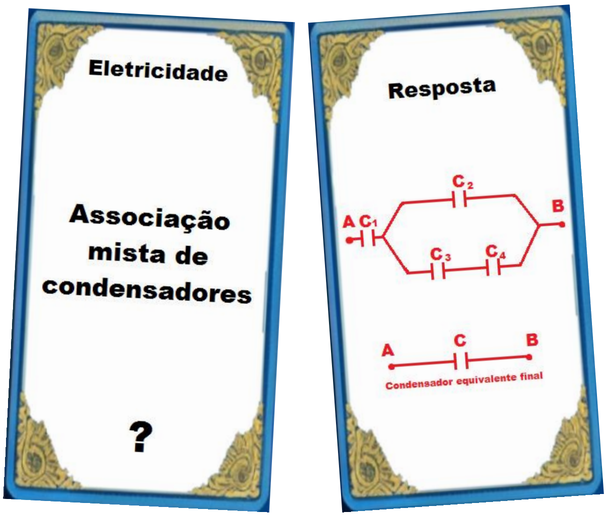
Sabemos que:

$$U_1 = \frac{Q_1}{C_1} = \frac{120}{4} = 30\,V$$
$$U_2 = \frac{Q_2}{C_2} = \frac{120}{6} = 20\,V$$

Verificação:
Como os capacitores em série somam suas ddp:

$$U_1 + U_2 = 30 + 20 = 50\,V$$

O que confirma o valor da fonte.



Corrente Elétrica

A **corrente elétrica** é um dos conceitos fundamentais da eletricidade. Ela representa o **fluxo ordenado de cargas elétricas** através de um condutor. Esse fluxo ocorre devido à aplicação de uma diferença de potencial (*U*) que impulsiona as cargas a se moverem.

Definição de Corrente Elétrica

A **corrente elétrica (*I*)** é definida como a **quantidade de carga elétrica (*Q*) que passa por um condutor em um determinado intervalo de tempo (*Δt*)**. Sua fórmula matemática é:

$$i = \frac{Q}{\Delta t}$$

Onde:

- i→ Corrente elétrica (medida em **Ampère (A)**)
- Q→ Carga elétrica (medida em **Coulombs (C)**)
- Δt→ Intervalo de tempo (medido em **segundos (s)**)

Essa relação indica que **quanto maior a quantidade de carga transportada em um menor tempo, maior será a corrente elétrica**.

Unidade de Medida e Submúltiplos

A unidade de medida da corrente elétrica é o **Ampère (A)**, que corresponde ao fluxo de **1 Coulomb por segundo**:

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

Os submúltiplos mais comuns são:

- **Miliampère (mA):** $1\ mA\ = 10^{-3}\ A$
- **Microampère (μA):** $1\ \mu A\ = 10^{-6}\ A$
- **Nanoampère (nA):** $1\ nA\ = 10^{-9}\ A$

Por exemplo, circuitos eletrônicos costumam operar com correntes na ordem de **miliampères ou microampères**, enquanto eletrodomésticos usam **Ampères** inteiros.

Tipos de Corrente Elétrica

- **Corrente Contínua (CC ou DC)**: As cargas elétricas se movem sempre no mesmo sentido, como em baterias e pilhas.
- **Corrente Alternada (CA ou AC)**: As cargas oscilam, invertendo seu sentido periodicamente, como ocorre nas redes elétricas domésticas.

Exemplo Resolvido

Em um circuito elétrico, uma carga elétrica de **30 C** passa por um fio condutor em **2 minutos**. Determine a corrente elétrica que percorre esse fio.

Resolução:

Identificamos os dados fornecidos:

$$Q = 30C$$

$$\Delta t = 2 \text{ min} \quad = 120\, s$$

Aplicamos a fórmula da corrente elétrica:

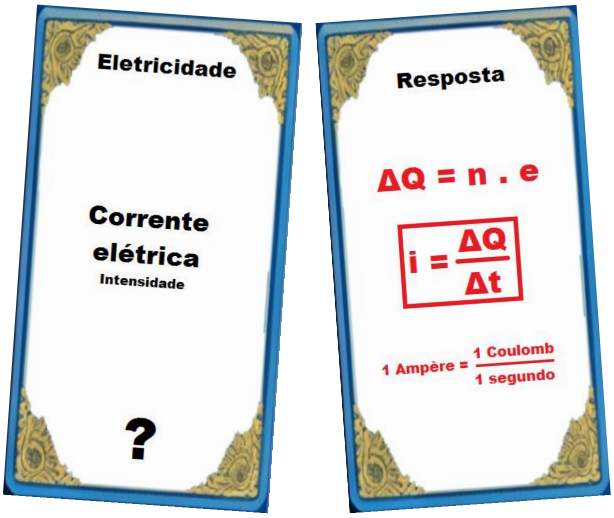
$$i = \frac{Q}{\Delta t}$$

$$i = \frac{30}{120}$$

$$i = 0{,}25\, A$$

Resposta:

A corrente elétrica que percorre o fio é **0,25 A (ou 250 mA)**.



Efeitos da Corrente Elétrica

A corrente elétrica, ao atravessar diferentes materiais, pode provocar diversos efeitos. Os principais são:

- **Efeito térmico (Efeito Joule)**
- **Efeito luminoso**

- **Efeito magnético**
- **Efeito químico**

Cada um desses efeitos tem aplicações fundamentais no nosso dia a dia, desde o funcionamento de lâmpadas e motores até processos industriais e eletroquímicos.

Efeito Térmico (Efeito Joule)

O **efeito térmico** da corrente elétrica, também chamado de **Efeito Joule**, ocorre porque, ao passar por um condutor, os elétrons colidem com os átomos do material, transformando parte da energia elétrica em calor.

Esse efeito é utilizado em dispositivos como:

- **Chuveiros elétricos**
- **Ferro de passar roupa**
- **Aquecedores elétricos**
- **Fios de resistência**

Esse fenômeno pode ser desejado, como nos aparelhos de aquecimento, ou indesejado, como no superaquecimento de fios em instalações elétricas, podendo causar incêndios.

Efeito Luminoso

O **efeito luminoso** ocorre quando a corrente elétrica, ao passar por um material, excita os elétrons, fazendo com que eles emitam luz. Esse efeito é usado em:

- **Lâmpadas incandescentes** (onde o efeito térmico aquece um filamento, que emite luz)
- **Lâmpadas fluorescentes** (a corrente excita o gás dentro da lâmpada, que emite luz ao interagir com o revestimento fosforescente)
- **LEDs (Diodos Emissores de Luz)** (dispositivos semicondutores que convertem eletricidade diretamente em luz)

Cada tecnologia usa diferentes mecanismos para transformar a energia elétrica em luz, variando em eficiência e durabilidade.

Efeito Magnético

A passagem de corrente elétrica por um fio condutor cria um **campo magnético** ao redor do fio. Esse efeito foi descoberto pelo físico dinamarquês **Hans Christian Oersted** em 1820 e é a base de dispositivos como:

- **Eletroímãs** (usados em sucateiras para levantar metais pesados)
- **Motores elétricos** (transformam eletricidade em movimento)
- **Geradores elétricos** (transformam movimento em eletricidade)
- **Campainhas elétricas**

Esse efeito é amplamente explorado em circuitos eletrônicos, telecomunicações e máquinas industriais.

Efeito Químico

O efeito químico da corrente elétrica ocorre quando a eletricidade provoca reações químicas em certas substâncias. Esse fenômeno é utilizado na **eletrólise**, que consiste na decomposição de substâncias por meio da eletricidade. Exemplos:

- **Baterias e acumuladores** (transformam energia química em elétrica e vice-versa)
- **Galvanoplastia** (processo de revestimento metálico, como folheação a ouro e niquelagem)
- **Produção de gás hidrogênio pela eletrólise da água**

Esse efeito é essencial para a indústria química e no armazenamento de energia.

Exemplo Resolvido

O que aconteceria se um fio condutor de ferro fosse percorrido por uma corrente elétrica muito intensa durante um longo período?

Resposta:

Se a corrente for muito intensa, o **efeito Joule** provocará um aumento excessivo da temperatura no fio, podendo aquecê-lo até a fusão. Isso pode causar danos ao material e até incêndios, caso o superaquecimento atinja componentes inflamáveis próximos.

Tipos de Corrente Elétrica: Contínua e Alternada

A corrente elétrica pode ser classificada em dois tipos principais: **corrente contínua (CC)** e **corrente alternada (CA)**. Ambas desempenham papéis fundamentais na eletricidade moderna, sendo aplicadas em diferentes contextos na indústria, no cotidiano e na transmissão de energia elétrica.

Corrente Contínua (CC)

A corrente contínua é aquela em que os elétrons se movem **sempre na mesma direção**, do polo negativo para o polo positivo de uma fonte de energia. Esse tipo de corrente foi estudado por cientistas como **Alessandro Volta**, que desenvolveu a primeira pilha elétrica em 1800.

Evolução e Aplicações

No final do século XIX, **Thomas Edison** desenvolveu sistemas de distribuição de eletricidade baseados em corrente contínua. No entanto, como a CC sofre grandes perdas em longas distâncias, ela acabou sendo substituída pela corrente alternada para a distribuição de energia elétrica.

Atualmente, a CC é usada em:

- **Baterias e pilhas** (celulares, laptops, carros elétricos)
- **Painéis solares** (geram eletricidade em CC)
- **Eletrônica em geral** (dispositivos como computadores, televisores e rádios funcionam internamente com CC)

Corrente Alternada (CA)

A corrente alternada é aquela em que os elétrons **mudam de direção periodicamente**, oscilando entre polos positivo e negativo. O uso da CA foi impulsionado pelo trabalho de **Nikola Tesla**, que, no final do século XIX, demonstrou que essa forma de corrente era mais eficiente para distribuição de eletricidade em grandes distâncias.

Evolução e Aplicações

A corrente alternada se tornou o padrão global para a transmissão de energia elétrica, pois pode ser transportada por longas distâncias com menos perdas e sua voltagem pode ser alterada com transformadores.

Atualmente, a CA é usada em:

- **Redes elétricas residenciais e industriais** (as tomadas fornecem corrente alternada)
- **Motores elétricos** (eletrodomésticos, elevadores, indústrias)
- **Linhas de transmissão de energia** (subestações elétricas operam com CA)

Principais Diferenças entre CC e CA

Característica	Corrente Contínua (CC)	Corrente Alternada (CA)
Sentido da corrente	Sempre no mesmo sentido	Alterna periodicamente
Pioneiro	Thomas Edison	Nikola Tesla
Fonte	Pilhas, baterias, painéis solares	Geradores, usinas elétricas
Aplicações	Eletrônicos, baterias, carros elétricos	Rede elétrica, eletrodomésticos, motores

Exemplo Resolvido

Um celular precisa ser carregado utilizando a eletricidade da rede elétrica. Sabemos que a tomada fornece corrente alternada, enquanto a bateria do celular usa corrente contínua. Como o carregador resolve esse problema?

Resposta:

O carregador do celular contém um **retificador**, que converte a corrente alternada da tomada em corrente contínua. Além disso, ele reduz a voltagem da rede elétrica (geralmente 110V ou 220V) para um valor seguro para o celular (geralmente entre 5V e 20V). Isso permite que a bateria armazene energia de forma eficiente.

Resistência Elétrica

A **resistência elétrica** é a oposição que um material oferece à passagem da corrente elétrica. Em um circuito, alguns materiais permitem que os elétrons fluam com facilidade (como os metais), enquanto outros dificultam esse fluxo, convertendo parte da energia elétrica em calor. Esse fenômeno é fundamental para entender o comportamento dos circuitos elétricos e está diretamente relacionado à **Lei de Ohm**.

O que é Resistência Elétrica?

A resistência elétrica depende de três fatores principais:

- **Material do condutor**: Alguns materiais, como o cobre e a prata, oferecem baixa resistência à corrente elétrica, enquanto outros, como a borracha e o plástico, são isolantes e oferecem resistência muito alta.
- **Comprimento do fio**: Quanto mais longo for um fio, maior será sua resistência.
- **Área da secção transversal**: Quanto mais grosso for um fio, menor será sua resistência, pois há mais espaço para os elétrons se moverem.

A resistência é medida em **ohms (Ω)** e pode ser calculada pela **Lei de Ohm**.

Lei de Ohm

O físico alemão **Georg Simon Ohm** descobriu que a tensão (**U**), a corrente elétrica (**i**) e a resistência (**R**) de um circuito seguem uma relação matemática simples, dada pela equação:

$$U = R \times i$$

Onde:

- **U** é a tensão elétrica, medida em volts (V);
- **R** é a resistência elétrica, medida em ohms (Ω);
- **i** é a corrente elétrica, medida em ampères (A).

A partir dessa equação, podemos calcular qualquer um dos três valores, desde que tenhamos os outros dois.

Exemplo Resolvido

Um circuito possui uma resistência de **10 Ω** e uma corrente elétrica de **2 A**. Qual é a voltagem aplicada nesse circuito?

Resolução:

Utilizando a Lei de Ohm:

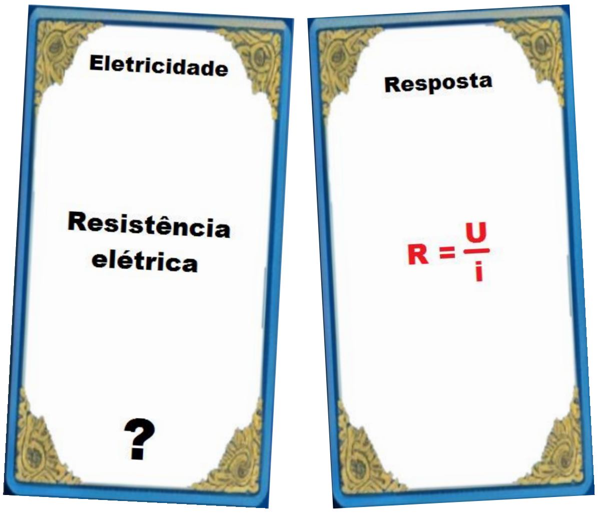
$$U = R \times i$$

$$U = 10\Omega \times 2A$$

$$U = 20\ V$$

Resposta:

A voltagem aplicada no circuito é de **20V**.



A Primeira Lei de Ohm

A **Primeira Lei de Ohm** estabelece uma relação fundamental entre a tensão elétrica (U), a corrente elétrica (I) e a resistência elétrica (R). Essa relação foi descoberta pelo físico alemão **Georg Simon Ohm**, em 1827, durante seus estudos sobre o comportamento da eletricidade em diferentes materiais.

Contexto Histórico

No início do século XIX, a eletricidade era um fenômeno pouco compreendido. Cientistas como **Alessandro Volta** já haviam descoberto formas de gerar eletricidade, mas ainda não se sabia exatamente como a corrente elétrica se comportava em diferentes materiais. Foi então que **Georg Simon Ohm**, um professor e físico alemão, decidiu investigar essa questão.

Ohm realizou experimentos utilizando fios condutores de diferentes materiais e comprimentos, medindo como a corrente elétrica variava com a tensão aplicada. A partir dessas medições, ele formulou uma equação matemática simples, que ficou conhecida como **Primeira Lei de Ohm**:

$$U = R \times i$$

Essa descoberta revolucionou a eletrônica e a engenharia elétrica, pois permitiu entender e prever o comportamento dos circuitos elétricos.

Primeira Lei de Ohm

A **Primeira Lei de Ohm** afirma que a **corrente elétrica (I) que atravessa um condutor é diretamente proporcional à tensão elétrica (U) aplicada e inversamente proporcional à resistência elétrica (R) do condutor**. Matematicamente, essa relação é expressa como:

$$i = \frac{U}{R}$$

Onde:

- **U** é a tensão elétrica, medida em volts (V);
- **i** é a corrente elétrica, medida em ampères (A);
- **R** é a resistência elétrica, medida em ohms (Ω).

Essa equação nos permite calcular qualquer um dos três valores, desde que tenhamos os outros dois.

Exemplo Resolvido

Uma lâmpada elétrica opera com uma tensão de **110V** e possui uma resistência de **55Ω**. Qual é a corrente elétrica que passa pela lâmpada?

Resolução:

Utilizando a Primeira Lei de Ohm:

$$i = \frac{U}{R}$$

$$i = \frac{110V}{55\Omega}$$

$$i = 2\ A$$

Resposta:

A corrente elétrica que passa pela lâmpada é de **2A**.

A Segunda Lei de Ohm

A **Segunda Lei de Ohm** complementa a Primeira Lei de Ohm ao explicar como a resistência elétrica de um material depende das suas características físicas, como o tipo de material, o comprimento e a área da secção transversal do condutor. Essa lei é essencial para entender a resistência de fios e componentes elétricos em circuitos.

A Segunda Lei de Ohm

A **Segunda Lei de Ohm** afirma que a **resistência elétrica (R) de um condutor homogêneo é diretamente proporcional ao seu comprimento (L) e inversamente proporcional à sua área de secção transversal (A), dependendo também da resistividade (ρ) do material**. Matematicamente, essa relação é expressa como:

$$R = \rho \times \frac{L}{A}$$

Onde:

- **R** é a resistência elétrica, medida em ohms (**Ω**);
- **ρ (Roh)** é a resistividade do material, medida em ohm metro (**Ω·m**);
- **L** é o comprimento do condutor, medido em metros (**m**);
- **A** é a área da secção transversal do condutor, medida em metros quadrados (**m^2**).

Essa equação mostra que:

- Quanto **maior o comprimento (L)** do fio, **maior** será a resistência.
- Quanto **maior a área de secção transversal (A)** do fio, **menor** será a resistência.
- A **resistividade (ρ)** é uma propriedade do material e determina sua capacidade de conduzir corrente elétrica. Materiais como o **cobre e a prata** têm resistividades baixas, enquanto o **vidro e a borracha** têm resistividades muito altas (são isolantes).

Exemplo Resolvido

Um fio de cobre tem **20 metros** de comprimento e uma secção transversal de **2 mm^2**. Sabendo que a resistividade do cobre é **$1{,}7 \times 10^{-8}$ Ω·m**, qual é a resistência desse fio?

Resolução:

Primeiro, convertemos a área para metros quadrados:

Passo 1:

$$1\ mm^2 = 10^{-3}\ m$$

Elevamos **ambos os lados ao quadrado**, pois estamos lidando com **área** ($m^2 \rightarrow mm^2$):

$$(1\ mm)^2 = (10^{-3}\ m)^2 = 10^{-6}\ m^2$$

Portanto:

$$1\ mm^2 = 10^{-6}\ m^2$$

Passo 2:

Agora basta multiplicar:

$$2\ mm^2 \rightarrow 2 \times (1\ mm^2) = 2 \times 10^{-6}\ m^2$$

Resultado em:

$$A = 2\ mm^2 = 2 \times 10^{-6} m^2$$

Agora, aplicamos a Segunda Lei de Ohm:

$$R = \rho \times \frac{L}{A}$$

$$R = (1{,}7 \times 10^{-8}) \times \frac{20}{2 \times 10^{-6}}$$

$$\therefore$$

$$R = 0{,}17\ \Omega$$

Resposta:

A resistência do fio é **0,17Ω**.

Potência Elétrica

A potência elétrica é a **quantidade de energia elétrica transformada ou transferida por unidade de tempo**. Esse conceito é fundamental para entender o funcionamento de circuitos elétricos, eletrodomésticos e sistemas de geração de energia.

O Que é Potência Elétrica?

A **potência elétrica (P)** mede a rapidez com que a energia elétrica é convertida em outras formas, como calor, luz ou movimento. Em um circuito elétrico, a potência depende da **diferença de potencial (U)** aplicada e da **corrente elétrica (i)** que percorre o circuito.

A unidade de potência elétrica no Sistema Internacional (SI) é o **watt (W)**, onde:

$$1W = 1V \times 1A$$

Fórmulas da Potência Elétrica

A potência elétrica pode ser calculada por diferentes fórmulas, dependendo das grandezas conhecidas.

Fórmula geral da potência elétrica:

$$P = U \times i$$

Onde:

- **P** é a potência elétrica (**W**);
- **U** é a diferença de potencial (**V**);
- **i** é a corrente elétrica (**A**).

Potência elétrica em relação a resistência (Lei de Ohm):

Substituindo $U = R \times i$ na equação anterior, temos:

$$P = R \times i^2$$

Potência elétrica em função da tensão e resistência:

Substituindo $i = \frac{U}{R}$ na equação inicial, temos:

$$P = \frac{U^2}{R}$$

Essas três equações são úteis dependendo das grandezas conhecidas no problema.

Exemplo Resolvido

Um resistor de **10Ω** é ligado a uma tensão de **20V**. Determine a potência dissipada nesse resistor.

Resolução:

Podemos utilizar a fórmula:

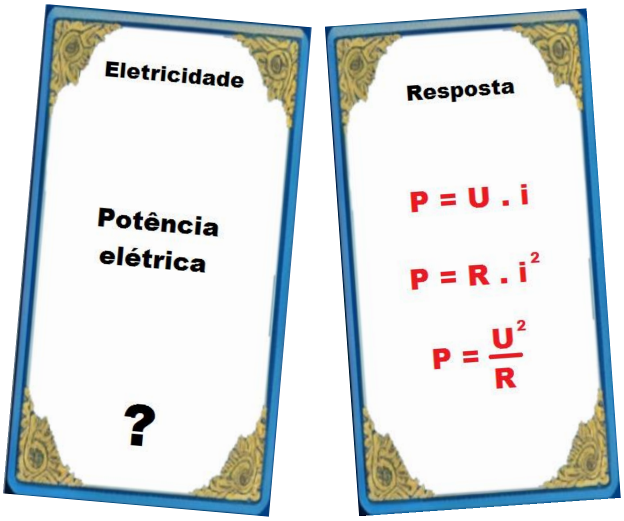
$$P = \frac{U^2}{R}$$

$$P = \frac{20^2}{10}$$

$$P = 40\ W$$

Resposta:

O resistor dissipa **40W** de potência elétrica.



Potência Dissipada

A potência dissipada representa a energia transformada em calor em um circuito elétrico. Esse conceito está diretamente ligado à resistência elétrica, pois todo condutor real oferece resistência à passagem da corrente elétrica, convertendo parte da energia elétrica em calor. Esse fenômeno é conhecido como **Efeito Joule**.

O Que é Potência Dissipada?

A potência dissipada pode ser entendida como a quantidade de energia que um dispositivo elétrico transforma em calor por unidade de tempo. Qualquer equipamento elétrico que possua resistência dissipa potência, como chuveiros elétricos, lâmpadas incandescentes e resistores em circuitos eletrônicos.

A equação da potência dissipada é a mesma da potência elétrica e pode ser escrita de diferentes formas:

$$P = U \times i$$

$$P = R \times i^2$$

$$P = \frac{U^2}{R}$$

Onde:

- **P** é a potência dissipada (W);
- **U** é a tensão elétrica (V);
- **i** é a corrente elétrica (A);
- **R** é a resistência elétrica (Ω).

Trabalho e Potência

O **trabalho elétrico (T)** realizado por um dispositivo ao longo do tempo pode ser calculado pela relação:

$$T = P \times \Delta t$$

Onde:

- **T** é o trabalho realizado (**J**);
- **P** é a potência dissipada (**W**);
- **Δt** é o intervalo de tempo (**s**).

Isso significa que a energia dissipada por um circuito depende do tempo que ele permanece ligado.

Unidade de Medida – Quilowatt-hora (kWh)

Na prática, a energia consumida por aparelhos elétricos é medida em **quilowatt-hora (kWh)**, unidade comum nas contas de energia elétrica.

A conversão entre **joules (J)** e **quilowatt-hora (kWh)** é:

$$1\ kWh = 3{,}6 \times 10^6 J$$

Isso significa que **1 kWh** equivale a **3,6 milhões de joules**, que é a energia consumida por um dispositivo de **1000W (1kW)** operando por **1 hora**.

Exemplo Resolvido

Uma lâmpada de **100W** fica acesa por **5 horas**. Determine a energia dissipada em **joules** e em **quilowatt-hora (kWh)**.

Resolução:

Usamos a fórmula do trabalho:

$$T = P \times \Delta t$$

Convertendo o tempo para segundos:

$$5h = 5 \times 3600\ s = 18000\ s$$

Agora, calculamos a energia dissipada em joules:

$$T = 100 \times 18000$$

$$T = 1{,}8 \times 10^6\ J$$

Agora, em **quilowatt-hora**:

A divisão por 1000 serve **para converter watts (W) em quilowatts (kW)**. A fórmula completa é:

$$\textbf{(Trabalho)} \quad W_{kwh} = \left(\frac{Pot_{watt}}{1000}\right) \times temp_{hora}$$

$$T = \frac{100W \times 5h}{1000}$$

$$T = 0{,}5\ kWh$$

Resposta:

A energia dissipada pela lâmpada foi **1,8 × 10^6 J** ou **0,5 kWh**.

Associação de Resistores em Série

Quando resistores são conectados **em série**, a corrente elétrica percorre o mesmo caminho, passando por todos os resistores consecutivamente, sem divisão. Essa configuração tem implicações diretas na resistência equivalente e na distribuição da tensão no circuito.

Características da Associação em Série

- **A corrente elétrica é a mesma** em todos os resistores, pois não há bifurcações no circuito.
- **A tensão elétrica é dividida** entre os resistores, de acordo com seus valores de resistência.
- **A resistência equivalente é a soma das resistências individuais**.

Fórmulas da Associação em Série

1. **Resistência Equivalente:**

A resistência equivalente R_{eq} de um conjunto de resistores em série é a soma de todas as resistências:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n$$

Ou seja, quanto mais resistores forem adicionados em série, maior será a resistência total do circuito.

2. **Tensão Total:**

A tensão total U_{total} do circuito é a soma das tensões nos resistores individuais:

$$U_{total} = U_1 + U_2 + U_3 + \cdots + U_n$$

3. **Corrente Elétrica:**

A corrente elétrica **i** no circuito é a mesma para todos os resistores e pode ser determinada pela **Lei de Ohm**:

$$i = \frac{U_{total}}{R_{eq}}$$

Exemplo Resolvido

Três resistores de **10Ω, 20Ω e 30Ω** estão ligados em série a uma bateria de **24V**. Determine:

a) A resistência equivalente do circuito.
b) A corrente elétrica total no circuito.
c) A tensão em cada resistor.

Resolução:

a) Resistência Equivalente

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_{eq} = 10 + 20 + 30 = 60\ \Omega$$

b) Corrente Total

Pela Lei de Ohm:

$$i = \frac{U_{total}}{R_{eq}}$$

$$i = \frac{24\ V}{60\ \Omega} = 0{,}4\ A$$

c) Tensão em cada Resistor

Usamos $U = R \times i$ para cada resistor:

$$U_1 = 10\Omega \times 0{,}4A = 4V$$

$$U_2 = 20\Omega \times 0{,}4A = 8V$$

$$U_3 = 30\Omega \times 0{,}4A = 12V$$

Verificando:

$$U_{total} = 4V + 8V + 12V = 24V$$

Resposta Final:

- $R_{eq} = 60\ \Omega$
- $i = 0{,}4\ A$
- $U_1 = 4V$, $U_2 = 8V$, $U_3 = 12V$

Associação de Resistores em Paralelo

Quando resistores são ligados **em paralelo**, todos os terminais de um lado dos resistores estão conectados a um mesmo ponto e todos os terminais do outro lado estão conectados a outro ponto. Isso significa que a tensão elétrica é a mesma em todos os resistores, enquanto a corrente elétrica se divide entre eles.

Características da Associação em Paralelo

- **A tensão elétrica é a mesma** em todos os resistores.
- **A corrente elétrica se divide** entre os resistores, proporcionalmente ao valor da resistência.
- **A resistência equivalente é menor que a menor resistência individual do circuito.**

Fórmulas da Associação em Paralelo

1. **Resistência Equivalente**

A resistência equivalente (R_{eq}) em um circuito com dois ou mais resistores em paralelo é dada pela soma dos inversos das resistências individuais:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots + \frac{1}{R_n}$$

Para o caso específico de dois resistores ($R_1 \ e \ R_2$):

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$$

2. **Tensão Total**

A tensão total é a mesma em todos os resistores:

$$U_{total} = U_1 = U_2 = U_3 = \cdots = U_n$$

3. **Corrente Elétrica**

A corrente total do circuito é a soma das correntes individuais nos resistores:

$$i_{total} = i_1 = i_2 = i_3 = \cdots = i_n$$

Cada corrente pode ser calculada pela Lei de Ohm:

$$i = \frac{U}{R}$$

Exemplo Resolvido

Três resistores de **6Ω, 12Ω e 18Ω** estão ligados em paralelo a uma bateria de **24V**. Determine:

a) A resistência equivalente do circuito.
b) A corrente elétrica total no circuito.
c) A corrente que passa por cada resistor.

Resolução:

a) Resistência Equivalente

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{6} + \frac{1}{12} + \frac{1}{18}$$

$$\therefore$$

$$R_{eq} \approx 3{,}27\ \Omega$$

b) Corrente Total

Pela Lei de Ohm:

$$i_{total} = \frac{U}{R_{eq}}$$

$$i_{total} = \frac{24V}{3{,}27\Omega} \approx 7{,}34\ A$$

c) Corrente em Cada Resistor

$$i_1 = \frac{24V}{6\Omega} = 4\ A$$

$$i_2 = \frac{24V}{12\Omega} = 2\ A$$

$$i_3 = \frac{24V}{18\Omega} = 1{,}33\ A$$

Resposta Final:

- $R_{eq} \approx 3{,}27\ \Omega$
- $i_{total} \approx 7{,}33\ A$
- $i_1 = 4A\ ,\ i_2 = 2A\ ,\ i_3 = 1{,}33A$

Associação Mista de Resistores

Em circuitos elétricos, os resistores podem ser associados de diferentes maneiras para controlar a corrente elétrica e a tensão no circuito. Quando um circuito contém resistores organizados **tanto em série quanto em paralelo**, chamamos essa configuração de **associação mista de resistores**.

Como Resolver Circuitos com Associação Mista

Para calcular a resistência equivalente de uma associação mista, seguimos estas etapas:

1. **Identificar partes do circuito que estão em série e em paralelo.**
2. **Calcular a resistência equivalente das partes em paralelo usando a fórmula apropriada:**

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots + \frac{1}{R_n}$$

3. **Calcular a resistência equivalente das partes em série somando os valores:**

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n$$

4. **Substituir as resistências equivalentes no circuito original e repetir o processo até encontrar a resistência total.**

Exemplo Resolvido

Dado o circuito abaixo, determine a resistência equivalente total:

- Dois resistores de **6Ω** e **4Ω** estão ligados **em série**.
- Um resistor de **8Ω** está ligado **em paralelo** com a associação dos resistores de **6Ω** e **4Ω**.
- Todo o conjunto está ligado a uma bateria de **24V**.

Resolução:

1. **Cálculo da Resistência da Associação em Série**

Os resistores de **6Ω** e **4Ω** estão em série, logo:

$$R_{eq\,série} = R_1 + R_2 = 6\Omega + 4\Omega = 10\Omega$$

2. **Cálculo da Resistência da Associação em Paralelo**

O resistor **8Ω** está em paralelo com essa associação de **10Ω**, então aplicamos a fórmula da resistência equivalente em paralelo:

$$\frac{1}{R_{eq\,total}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$\frac{1}{R_{eq\,total}} = \frac{1}{10} + \frac{1}{8}$$

$$\therefore$$

$$R_{eq\,total} \approx 4{,}44\Omega$$

Medidores Elétricos

Os medidores elétricos são instrumentos essenciais para analisar circuitos elétricos e verificar grandezas como corrente, tensão e resistência. Eles são amplamente utilizados em laboratórios, indústrias e manutenções elétricas. Neste texto, exploraremos os principais medidores elétricos e suas aplicações.

Tipos de Medidores Elétricos

Amperímetro

O **amperímetro** é utilizado para medir a corrente elétrica (**A**) em um circuito. Ele deve ser ligado **em série** com o componente onde se deseja medir a corrente.

Características:

- Possui resistência interna muito baixa para não interferir no circuito.
- Pode ser analógico (**ponteiro**) ou digital (**display numérico**).

Voltímetro

O **voltímetro** mede a **diferença de potencial (ddp)** entre dois pontos de um circuito. Ele deve ser ligado **em paralelo** ao componente que se deseja medir.

Características:

- Possui resistência interna muito alta para evitar desvio de corrente.
- Indica o valor da tensão em volts (**V**).

Ohmímetro

O **ohmímetro** mede a **resistência elétrica** de um componente ou circuito. Ele é usado para verificar se um resistor está em boas condições ou se há uma falha em conexões.

Características:

- Mede resistência em ohms (**Ω**).
- Alguns modelos requerem que o circuito esteja desligado para medição correta.

Multímetro

O **multímetro** combina várias funções, permitindo medir tensão, corrente e resistência em um único aparelho. Pode ser **analógico** ou **digital** e é amplamente utilizado em testes elétricos.

Características:

- Mede tensão (**V**), corrente (**A**) e resistência (**Ω**).
- Alguns modelos medem capacitância, frequência e temperatura.

Osciloscópio

O **osciloscópio** é um instrumento avançado que permite visualizar sinais elétricos em função do tempo. Ele é muito útil para analisar circuitos de corrente alternada e sinais variáveis.

Características:

- Representa sinais elétricos em gráficos de tempo.
- Permite analisar frequências e amplitudes de ondas elétricas.

Exemplo Resolvido

Um estudante deseja medir a corrente elétrica que passa por uma lâmpada de 40W em um circuito de 220V. Ele possui um amperímetro e um voltímetro. Como ele deve conectar esses aparelhos corretamente para obter as medições?

Resolução:

1. Para medir a **corrente elétrica**, o **amperímetro** deve ser colocado **em série** com a lâmpada.
2. Para medir a **tensão**, o **voltímetro** deve ser conectado **em paralelo** com a lâmpada.

Sabendo que $P = U \times i$, podemos calcular a corrente:

$$i = \frac{P}{U} = \frac{40W}{220V} \approx 0{,}18\ A$$

Ou seja, o amperímetro indicará **0,18 A**, e o voltímetro indicará **220V**.

Ponte de Wheatstone

A **Ponte de Wheatstone** é um circuito elétrico desenvolvido para medir resistências desconhecidas de forma precisa. Esse circuito é amplamente utilizado em laboratórios de eletrônica, instrumentação e física experimental. Além disso, a resistividade dos fios influencia diretamente no comportamento da resistência elétrica em condutores.

Ponte de Wheatstone

A **Ponte de Wheatstone** consiste em um circuito com quatro resistores interligados em forma de um losango. Dois dos resistores são conhecidos (R_1 e R_2), um é variável (R_3), e o último (R_x) é o resistor desconhecido que queremos determinar. Um galvanômetro (**G**) é conectado entre os pontos intermediários do circuito para detectar se há passagem de corrente.

Princípio de Funcionamento

Quando a ponte está **em equilíbrio**, ou seja, quando não há corrente passando pelo galvanômetro, a relação entre as resistências segue a seguinte fórmula:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_x}$$

Rearranjando para encontrar a resistência desconhecida R_x:

$$R_x = R_3 \times \frac{R_2}{R_1}$$

Se a ponte não estiver equilibrada, ajustamos R_3 até que o galvanômetro indique corrente nula. Nesse momento, a equação pode ser aplicada para calcular R_x com precisão.

Resistividade dos Fios

A **resistividade elétrica** de um fio condutor influencia sua resistência. A resistência $\boldsymbol{R}$ de um fio depende de três fatores principais:

- ρ: Resistividade do material (**em $\Omega \cdot m$**), característica do material condutor.
- L: Comprimento do fio (**em metros**).
- A: Área da secção transversal do fio (**em metros quadrados**).

A relação entre esses parâmetros é dada pela fórmula:

$$R = \rho \times \frac{L}{A}$$

Essa equação mostra que quanto maior o comprimento do fio, maior será sua resistência. Além disso, fios com maior diâmetro (maior área de seção transversal) possuem menor resistência.

Exemplo Resolvido

Um circuito de Ponte de Wheatstone está em equilíbrio e apresenta os seguintes valores de resistência:

- **R_1 = 100Ω**
- **R_2 = 200Ω**
- **R_3 = 150Ω**
- R_x (**resistência desconhecida**)

Determine o valor de R_x.

Resolução

Como a ponte está em equilíbrio, utilizamos a fórmula da Ponte de Wheatstone:

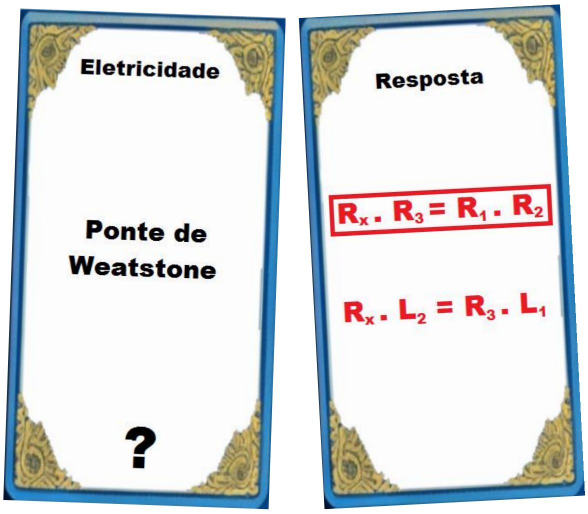
$$R_x = R_3 \times \frac{R_2}{R_1}$$

Substituindo os valores:

$$R_x = 150\Omega \times \frac{200\Omega}{100\Omega}$$

$$R_x = 300\Omega$$

Portanto, a resistência desconhecida R_x é **300Ω**.



Gerador e Força Eletromotriz (*f.e.m*)

Os geradores elétricos são dispositivos capazes de converter diferentes formas de energia em energia elétrica. Eles desempenham um papel essencial no fornecimento de eletricidade para residências, indústrias e diversas aplicações tecnológicas. Um conceito fundamental relacionado aos geradores é a **força eletromotriz ($f.e.m$)**, que mede a capacidade de um gerador de fornecer energia elétrica a uma carga.

Força Eletromotriz ($f.e.m$)

A **força eletromotriz ($f.e.m$)**, simbolizada por $\boldsymbol{E}$, representa a quantidade de energia fornecida por um gerador para movimentar uma carga elétrica dentro do circuito.

Fórmula Geral da $f.e.m$

A $f.e.m$ pode ser expressa em termos de trabalho **T** realizado para deslocar uma carga elétrica $\boldsymbol{Q}$:

$$E = \frac{T}{Q}$$

Onde:

- E é a força eletromotriz (**em volts, V**);
- T é o trabalho realizado (**em joules, J**);
- Q é a carga elétrica transportada (**em coulombs, C**).

Essa equação mostra que a $f.e.m$ corresponde à energia fornecida por unidade de carga transportada pelo circuito.

Relação com Potência e Corrente

A potência fornecida pelo gerador também pode ser usada para determinar a $f.e.m$, através da relação:

$$E = \frac{P}{i}$$

Onde:

- P, é a potência elétrica fornecida pelo gerador (**em watts, W**);
- i, é a corrente elétrica no circuito (**em amperes, A**).

Essa equação mostra que a $f.e.m$ também pode ser interpretada como a quantidade de energia fornecida por unidade de corrente elétrica.

Exemplo Resolvido

Um gerador fornece um trabalho de **1500 J** para deslocar uma carga elétrica de **500 C** dentro de um circuito. Determine a força eletromotriz desse gerador.

Resolução

Utilizando a fórmula da $f.e.m$:

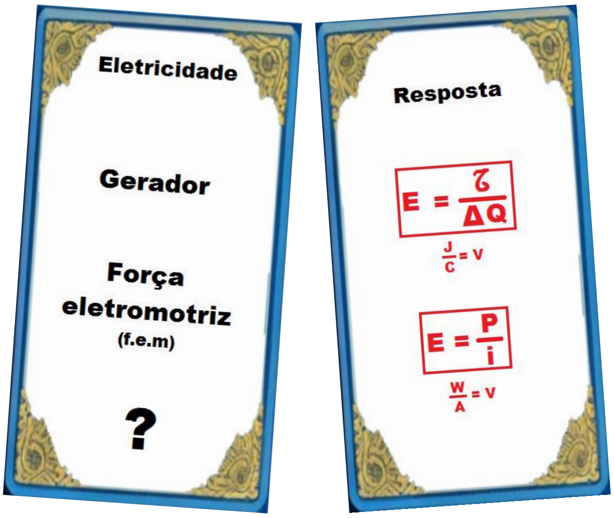
$$E = \frac{T}{Q}$$

Substituindo os valores:

$$E = \frac{1500\,J}{500\,C}$$

$$E = 3\,V$$

Portanto, a força eletromotriz do gerador é **3V**.



Equação do Gerador

Os geradores elétricos não são ideais, pois possuem uma resistência interna que influencia o funcionamento do circuito. Dessa forma, a **equação do gerador** leva em consideração a resistência interna do gerador, além de sua força eletromotriz ($f.e.m$).

Equação do Gerador

A equação que descreve o comportamento de um gerador real é:

$$U = E - r \times i$$

Onde:

- U é a tensão elétrica fornecida aos terminais do gerador (**em volts, V**);
- E é a força eletromotriz do gerador (**em volts, V**);

- r é a resistência interna do gerador (**em ohms, Ω**);
- i é a corrente elétrica no circuito (**em amperes, A**).

Essa equação mostra que a tensão útil fornecida pelo gerador U é sempre menor do que sua força eletromotriz E, pois, parte da energia é dissipada devido à resistência interna r.

Exemplo Resolvido

Um gerador possui força eletromotriz de **12 V** e resistência interna de **1,5 Ω**. Se ele fornece uma corrente de **3 A**, qual será a tensão elétrica em seus terminais?

Resolução

Utilizando a equação do gerador:

$$U = E - r \times i$$

Substituindo os valores:

$$U = 12V - (1{,}5\Omega \times 3A)$$

$$U = 7{,}5\ V$$

Portanto, a tensão nos terminais do gerador será **7,5 V**.

Rendimento de um Gerador

Os geradores elétricos reais não convertem toda a energia disponível em energia útil para o circuito, pois parte dela é dissipada na forma de calor devido à resistência interna. O **rendimento de um gerador** mede a eficiência dessa conversão de energia.

Fórmula do Rendimento do Gerador

O rendimento $\boldsymbol{\eta}$ de um gerador é a relação entre a potência útil P_u fornecida ao circuito e a potência total P_t gerada pelo dispositivo:

$$\eta = \frac{P_u}{P_t} \times 100\%$$

Como a potência total gerada pelo gerador é dada por:

$$P_t = E \times i$$

E a potência útil entregue ao circuito é:

$$P_u = U \times i$$

Podemos reescrever a equação do rendimento como:

$$\eta = \frac{U \times i}{E \times i} \times 100\%$$

Cancelando a corrente **i**, obtemos:

$$\eta = \frac{U}{E} \times 100\%$$

Exemplo Resolvido

Um gerador tem força eletromotriz de **30 V** e fornece uma tensão útil de **27 V** a um circuito externo. Qual é o seu rendimento?

Resolução

Utilizando a fórmula do rendimento:

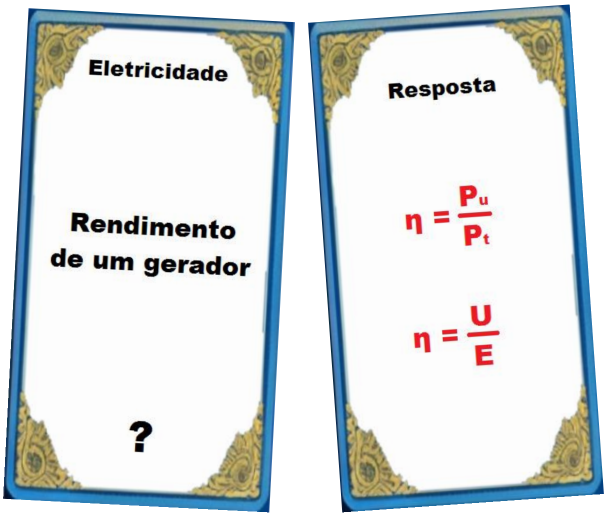
$$\eta = \frac{U}{E} \times 100\%$$

Substituindo os valores:

$$\eta = \frac{27V}{30V} \times 100\%$$

$$\eta = 90\%$$

Portanto, o rendimento do gerador é **90%**.



Corrente de Curto-Circuito

A **corrente de curto-circuito** (i_{cc}) é a corrente máxima que um gerador pode fornecer quando seus terminais são ligados diretamente um ao outro sem resistência externa. Esse fenômeno pode ser perigoso, pois provoca um fluxo intenso de corrente, levando ao superaquecimento e danos ao sistema elétrico.

Fórmula da Corrente de Curto-Circuito

A equação do gerador é dada por:

$$U = E - r \times i$$

No caso de um curto-circuito, a tensão nos terminais do gerador é **zero** (***U=0***), pois não há resistência externa no circuito. Substituindo isso na equação do gerador:

$$0 = E - r \times i_{cc}$$

Resolvendo para i_{cc} :

$$i_{cc} = \frac{E}{r}$$

Onde:

- i_{cc}= corrente de curto-circuito (**A**);
- $\boldsymbol{E}$= força eletromotriz do gerador (**V**);
- $\boldsymbol{r}$= resistência interna do gerador ($\boldsymbol{\Omega}$).

Exemplo Resolvido

Um gerador tem força eletromotriz de **12 V** e resistência interna de **0,5 Ω**. Determine a corrente de curto-circuito.

Resolução

Utilizamos a fórmula:

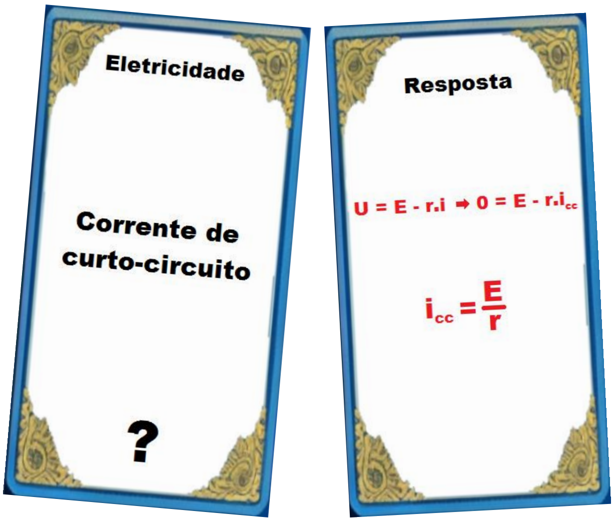
$$i_{cc} = \frac{E}{r}$$

Substituindo os valores:

$$i_{cc} = \frac{12V}{0{,}5\Omega}$$

$$i_{cc} = 24\ A$$

Portanto, a corrente de curto-circuito é **24 A**.



Lei de Ohm-Pouillet

A **Lei de Ohm-Pouillet** é uma generalização da Lei de Ohm que leva em conta a resistência interna de um gerador ao analisar um circuito elétrico. Essa lei é especialmente útil para calcular a corrente elétrica em circuitos que incluem fontes de tensão realistas, ou seja, que possuem uma resistência interna.

Fórmula da Lei de Ohm-Pouillet

A corrente elétrica (**i**) em um circuito com um gerador de força eletromotriz (E) e resistência interna (r), associado a uma resistência externa (R), pode ser determinada pela seguinte fórmula:

$$i = \frac{E}{R+r}$$

Onde:

- **i** = corrente elétrica no circuito (**A**);
- E = força eletromotriz do gerador (**V**);
- R = resistência externa do circuito (Ω);

- $r =$ resistência interna do gerador (Ω).

Essa equação mostra que a corrente elétrica depende não apenas da resistência do circuito externo, mas também da resistência interna do gerador. Quando R é muito grande, a corrente será menor, e quando R é muito pequeno (como em um curto-circuito), a corrente tende ao valor máximo, dado por $i_{cc} = \frac{E}{r}$.

Exemplo Resolvido

Um gerador possui uma força eletromotriz de **24 V** e uma resistência interna de **2 Ω**. Ele está ligado a uma resistência externa de **10 Ω**. Determine a corrente elétrica no circuito.

Resolução

Usamos a fórmula da Lei de Ohm-Pouillet:

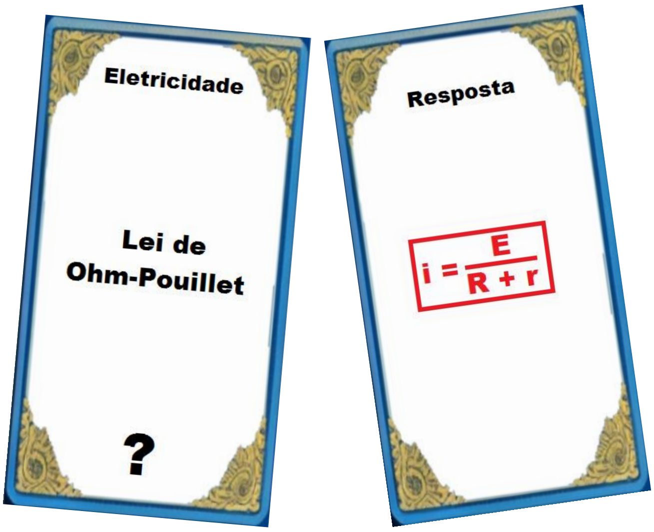
$$i = \frac{E}{R+r}$$

Substituindo os valores fornecidos:

$$i = \frac{24V}{10\Omega+2\Omega}$$

$$i = 2\ A$$

Portanto, a corrente elétrica no circuito é **2 A**.



Associação de Geradores

A associação de geradores é feita para aumentar a tensão ou a corrente disponível em um circuito elétrico. Existem dois tipos principais de associação: **em série** e **em paralelo**. Cada uma dessas configurações possui características próprias e é utilizada conforme a necessidade do sistema elétrico.

Associação de Geradores em Série

Quando os geradores são associados **em série**, suas forças eletromotrizes (E) e resistências internas (r) se somam. Isso é útil quando se deseja aumentar a tensão total do sistema.

Fórmulas para associação em série:

- **Força eletromotriz equivalente:**

$$E_{eq} = E_1 + E_2 + \cdots + E_n$$

- **Resistência interna equivalente:**

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \cdots + R_n$$

A corrente elétrica no circuito será determinada pela Lei de Ohm-Pouillet:

$$i = \frac{E_{eq}}{R + r_{eq}}$$

Onde:

- E_{eq} = força eletromotriz total (**V**);
- r_{eq} = resistência interna total (**Ω**);
- $\boldsymbol{R}$ = resistência externa (**Ω**).

Exemplo Resolvido (Série)

Dois geradores de **12 V** cada um e resistências internas de **1 Ω** são ligados em série e alimentam um resistor de **5 Ω**. Determine a corrente no circuito.

Resolução

1. **Força eletromotriz total:**

$$E_{eq} = E_1 + E_2 + \cdots + E_n$$

$$E_{eq} = 12V + 12V = 24V$$

2. **Resistência interna total:**

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \cdots + R_n$$

$$R_{eq} = 1\Omega + 1\Omega = 2\Omega$$

3. **Aplicando a Lei de Ohm-Pouillet:**

$$i = \frac{E_{eq}}{R + r_{eq}}$$

$$i = \frac{24V}{5\Omega + 2\Omega}$$

$$i = 3{,}43\,A$$

Portanto, a corrente no circuito é **3,43 A**.

Associação de Geradores em Paralelo

Quando os geradores são associados **em paralelo**, a tensão total do sistema permanece a mesma, mas a resistência interna equivalente é reduzida, permitindo uma maior disponibilidade de corrente elétrica.

Fórmulas para associação em paralelo:

- **Força eletromotriz equivalente:**
  Como os geradores em paralelo devem ter a mesma E, então:

$$E_{eq} = E$$

- **Resistência interna equivalente:**

$$\frac{1}{r_{eq}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \cdots + \frac{1}{r_n}$$

A corrente elétrica no circuito será determinada por:

$$i = \frac{E}{R + r_{eq}}$$

Exemplo Resolvido (Paralelo)

Dois geradores idênticos, cada um com **12 V** de f.e.m e resistência interna de **2 Ω**, são ligados em paralelo para alimentar um resistor de **6 Ω**. Determine a corrente no circuito.

Resolução

1. **A força eletromotriz equivalente será:**

$$E_{eq} = E$$

$$E_{eq} = 12\,V$$

2. **Resistência interna equivalente:**

$$\frac{1}{r_{eq}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \cdots + \frac{1}{r_n}$$

$$\frac{1}{r_{eq}} = \frac{1}{2\Omega} + \frac{1}{2\Omega}$$

$$r_{eq} = 1\,\Omega$$

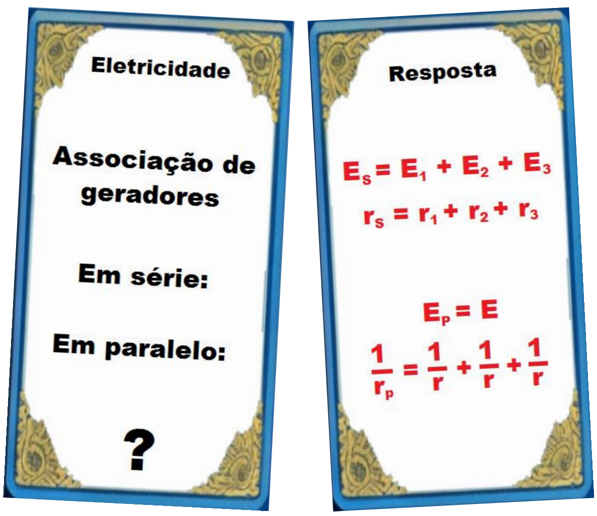
3. **Aplicando a Lei de Ohm-Pouillet:**

$$i = \frac{E_{eq}}{R + r_{eq}}$$

$$i = \frac{12V}{6\Omega + 1\Omega}$$

$$i = 1{,}71\,A$$

Portanto, a corrente no circuito é **1,71 A**.



Receptores Elétricos

Os **receptores elétricos** são dispositivos que transformam **energia elétrica** em outras formas de energia, como **mecânica, térmica ou luminosa**. Exemplos de receptores são motores elétricos, lâmpadas e aquecedores.

Diferente dos **geradores**, que fornecem energia elétrica ao circuito, os **receptores** a consomem e realizam trabalho.

Equação do Receptor

Um receptor elétrico possui uma **força contraeletromotriz** (E'), que é gerada internamente por ele ao consumir eletricidade. A tensão total aplicada a um receptor é maior do que a força contraeletromotriz, pois há uma **queda de tensão** devido à resistência interna (r') do receptor.

A **equação do receptor** é:

$$U = E' + r' \times i$$

Onde:

- U = tensão elétrica aplicada ao receptor (**V**);
- E'= força contraeletromotriz (**V**);
- r'= resistência interna do receptor (**Ω**);
- **i** = corrente elétrica no receptor (**A**).

Rendimento do Receptor

O rendimento (η) de um receptor mede **a eficiência** com que ele transforma a energia elétrica em trabalho útil.

A fórmula do rendimento é:

$$\eta = \frac{E' \times i}{U \times i} \times 100\%$$

Ou seja, o rendimento é a razão entre a potência útil ($E' \times i$) e a potência total fornecida ao receptor ($U \times i$).

Como parte da energia elétrica se perde devido à resistência interna do receptor, o rendimento sempre será menor que **100%**.

Exemplo Resolvido

Um motor elétrico funciona como receptor com força contraeletromotriz de **10 V** e resistência interna de **2 Ω**. Se ele recebe uma tensão de **12 V**, determine:

a) A corrente elétrica no motor.
b) O rendimento do receptor.

Resolução

1. **Aplicando a equação do receptor:**

$$U = E' + r' \times i$$

$$12V = 10V + 2\Omega \times i$$

$$i = 1\ A$$

2. **Cálculo do rendimento:**

$$\eta = \frac{E' \times i}{U \times i} \times 100\%$$

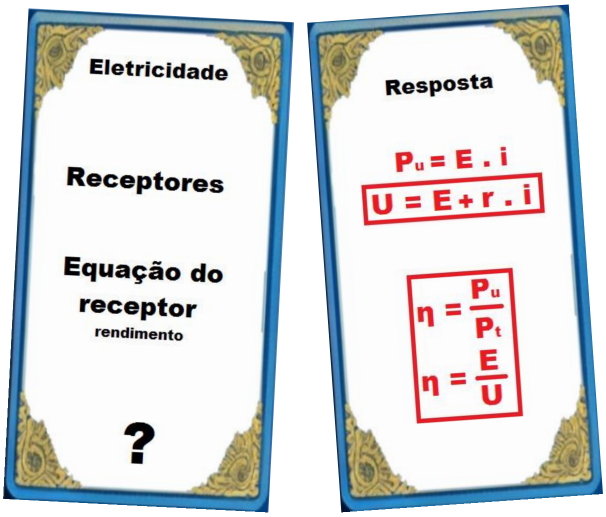
$$\eta = \frac{10V \times 1A}{12V \times 1A} \times 100\%$$

$$\therefore$$

$$\eta = 83{,}3\%$$

Resposta:

- A corrente no motor é **1 A**.
- O rendimento do motor é **83,3%**.



Lei de Ohm Generalizada

A **Lei de Ohm** descreve a relação entre a **tensão elétrica (U)**, a **corrente elétrica (I)** e a **resistência elétrica (R)** de um circuito.

A versão mais conhecida dessa lei é:

$$U = R \times i$$

No entanto, essa fórmula se aplica **apenas a resistores ôhmicos** (que obedecem à Lei de Ohm). Para circuitos mais complexos que incluem **geradores, receptores e resistências internas**, utilizamos a **Lei de Ohm Generalizada**.

Lei de Ohm Generalizada

A **Lei de Ohm Generalizada** considera a presença de **fontes de energia (geradores e receptores), bem como as resistências internas**.

A equação geral é:

$$U = E - E' - (R + r + r').i$$

Onde:

- U= tensão elétrica total no circuito (**V**);
- E = força eletromotriz do gerador (**V**);
- E' = força contraeletromotriz do receptor (**V**);
- R= resistência externa do circuito (**Ω**);
- r = resistência interna do gerador (**Ω**);
- r'= resistência interna do receptor (**Ω**);
- **i** = corrente elétrica no circuito (**A**).

A Lei de Ohm Generalizada **se aplica a qualquer circuito elétrico**, pois considera os elementos que afetam o fluxo de corrente.

Exemplo Resolvido

Em um circuito elétrico, há um **gerador** com força eletromotriz de **24 V** e resistência interna de **2 Ω**. O circuito também possui um **receptor** com força contraeletromotriz de **10 V** e resistência interna de **3 Ω**, além de uma resistência externa de **5 Ω**. Determine:

a) A corrente elétrica no circuito.
b) A tensão elétrica nos terminais do gerador.

Resolução

1. **Aplicando a Lei de Ohm Generalizada:**

$$U = E - E' - (R + r + r').i$$

Substituindo os valores:

$$0 = 24V - 10V - (5\Omega + 2\Omega + 3\Omega).i$$

$$\therefore$$

$$i = 1{,}4\ A$$

2. **Cálculo da tensão nos terminais do gerador:**

$$U_g = E - r \times i$$

$$U_g = 24V - (2\Omega \times 1{,}4\ A)$$

$$U_g = 21{,}2V$$

Resposta:

- A corrente elétrica no circuito é **1,4 A**.
- A tensão nos terminais do gerador é **21,2 V**.

.

Leis de Kirchhoff

As **Leis de Kirchhoff** são princípios fundamentais da análise de circuitos elétricos. Elas permitem determinar **correntes e tensões** em circuitos mais complexos, onde a **Lei de Ohm** isoladamente não é suficiente.

São duas as **Leis de Kirchhoff**:

1. **Lei dos Nós (ou Lei das Correntes de Kirchhoff - LCK)**

2. **Lei das Malhas (ou Lei das Tensões de Kirchhoff - LTK)**

Lei dos Nós (LCK)

A **Lei dos Nós** afirma que a soma das **correntes que entram** em um nó é igual à soma das **correntes que saem**.

$$\sum I_{entrada} = \sum I_{saída}$$

Onde:

- $I_{entrada}$ são as correntes que chegam ao nó.
- $I_{saída}$ são as correntes que saem do nó.

Exemplo

Considere um nó com três correntes:

- $I_1 = 4A$ (entrando)
- $I_2 = 3A$ (saindo)
- I_3 (saindo e desconhecida)

Pela Lei dos Nós:

$$I_1 = I_2 + I_3$$

$$4A = 3A + I_3$$

$$I_3 = 1A$$

Ou seja, a corrente I_3 saindo do nó é **1 A**.

Lei das Malhas (LTK)

A **Lei das Malhas** afirma que a soma algébrica das **tensões ao longo de um caminho fechado** é sempre **zero**.

$$\sum U = 0$$

Isso significa que, ao percorrer uma malha de um circuito, os ganhos e perdas de tensão devem se cancelar.

Exemplo

Considere uma malha com um gerador e dois resistores:

- ***E=12V*** **(gerador)**
- $R_1 = 2\Omega$
- $R_2 = 4\Omega$
- I (corrente no circuito)

Aplicando a Lei das Malhas:

Percorremos a malha no sentido da corrente, começando na fonte, como a tensão em cada resistor equivale a $U = r \times i$, podemos substituir a soma da seguinte forma:

$$E - R_1 \times I - R_2 \times I = 0$$

O sinal atribuído a cada tensão obedece a regra onde a soma das tensões **com sinais algébricos** será positivo para fontes e negativo para **quedas**, observando que, cada resistor contribui com uma **queda de tensão** igual a $R \times i$ (Lei de Ohm), sendo assim:

$$12V - (2\Omega \times I) - (4\Omega \times I) = 0$$

$$\therefore$$

$$I = 2\ A$$

A corrente no circuito é **2 A**.

Exercício Resolvido

No circuito abaixo, temos:

- Um nó com três correntes:
  - $I_1 = 5\ A$ (entrando)
  - $I_2 = 2\ A$ (saindo)
  - I_3 (desconhecida)
- Uma malha contendo:
  - Um gerador de $\mathbf{10V}$
  - Dois resistores: $R_1 = 3\Omega\ e\ R_2 = 2\Omega$

- A corrente no circuito é I (desconhecida).

Determine:
a) O valor de I_3 no nó.
b) O valor de I na malha.

Resolução:

Passo 1: Aplicando a Lei dos Nós

$$I_1 = I_2 + I_3$$

$$5A = 2A + I_3$$

$$I_3 = 3A$$

Passo 2: Aplicando a Lei das Malhas

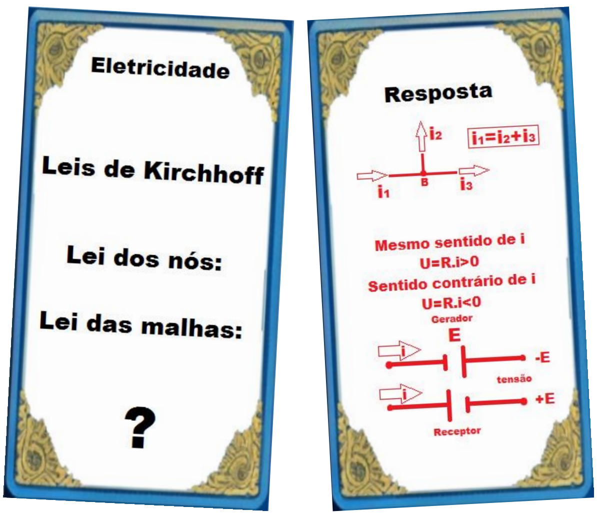
$$E - R_1 \times I - R_2 \times I = 0$$

$$10V - (3\Omega \times I) - (2\Omega \times I) = 0$$

$$I = 2\,A$$

Resposta:

- $I_3 = 3\,A$.
- A corrente na malha é $2A$.



Campo Magnético Criado por um Condutor Retilíneo

Quando uma corrente elétrica percorre um **condutor retilíneo**, ela cria um **campo magnético** ao seu redor. Esse campo magnético tem a forma de **círculos concêntricos** em torno do fio e segue a **Regra da Mão Direita**:

- **Dedão** aponta no sentido da corrente elétrica (**i**).
- **Dedos** se curvam indicando o sentido do campo magnético (B).

Se observarmos esse fenômeno **de cima**, de um plano onde o condutor atravessa perpendicularmente (**a 90º com o plano**), o campo magnético formará círculos concêntricos ao redor do fio.

Fórmula do Campo Magnético

A intensidade do **campo magnético (B)** em um ponto a uma distância r do condutor retilíneo é dada por:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \times \frac{i}{r}$$

Onde:

- B = intensidade do campo magnético (**Tesla, T**)
- μ_0 = **permeabilidade magnética do vácuo** ($4\pi \times 10^{-7} T \cdot m/A$)
- **i** = corrente elétrica no condutor (**Ampère, A**)
- r = distância do ponto ao condutor (**metros, m**)
- $\pi \approx 3{,}14$ (**constante matemática**)

A equação mostra que **quanto maior a corrente**, mais forte é o campo magnético, e **quanto maior a distância**, mais fraco ele se torna.

Exemplo Resolvido

Um fio condutor muito longo é percorrido por uma corrente de **10 A**. Determine o valor do campo magnético a **5 cm** do condutor. Considere a **permeabilidade magnética do vácuo** como $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} T \cdot m/A$.

Resolução:

Pela fórmula do campo magnético:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \times \frac{i}{r}$$

Substituindo os valores:

$$B = \frac{(4\pi \times 10^{-7})}{2\pi} \times \frac{10}{0{,}05}$$

$$\therefore$$

$$B = 4 \times 10^{-5}\, T$$

Resposta:

O campo magnético a **5 cm do fio** é $4 \times 10^{-5}\, T$ (**ou** $40\mu T$).

A Experiência de Oersted (Regra da Mão Direita)

No início do século XIX, **Hans Christian Oersted** realizou uma experiência que demonstrou, pela primeira vez, a relação entre **eletricidade e magnetismo**. Esse experimento foi um marco na história da Física, pois revelou que uma corrente elétrica gera um **campo magnético ao seu redor**.

A Experiência de Oersted

Oersted posicionou uma **bússola** perto de um fio condutor e observou que, quando uma **corrente elétrica** passava pelo fio, a agulha da bússola **mudava de direção**. Isso indicava a presença de um **campo magnético** gerado pela corrente elétrica.

Esse experimento foi fundamental para o desenvolvimento do **eletromagnetismo**, mostrando que **cargas elétricas em movimento produzem um campo magnético** ao seu redor.

Regra da Mão Direita

Para determinar o sentido do **campo magnético (B)** criado por um fio percorrido por corrente elétrica, usamos a **Regra da Mão Direita**:

- Posicione **o polegar no sentido da corrente elétrica (i)**.
- Os **demais dedos se curvam** no sentido do campo magnético (B).

Isso significa que o **campo magnético forma círculos concêntricos ao redor do fio**.

Exemplo:

Se a corrente elétrica estiver **subindo** em um fio vertical, o campo magnético ao seu redor seguirá o sentido de um **parafuso girando no sentido anti-horário**.

Exemplo Resolvido

Um fio condutor muito longo transporta uma corrente elétrica de **5 A** no sentido **de baixo para cima**. Qual será o sentido do campo magnético ao redor do fio?

Resolução:

Usando a **Regra da Mão Direita**:

1. Coloque o **polegar apontando para cima** (sentido da corrente elétrica).
2. Os **demais dedos se curvam** no sentido do campo magnético.

O campo magnético será **anti-horário** quando visto de cima.

Resposta:

O campo magnético ao redor do fio forma **círculos concêntricos no sentido anti-horário** quando visto de cima.

Campo Magnético Criado por uma Espira Circular

Quando uma corrente elétrica percorre um **fio condutor em forma de espira circular**, um **campo magnético** é gerado ao seu redor. Esse campo tem uma distribuição característica, com **linhas de campo magnético fechadas** e um comportamento semelhante ao de um **ímã em forma de disco**.

Fórmula do Campo Magnético no Centro de uma Espira

O **campo magnético (B)** no centro de uma **espira circular** pode ser determinado pela seguinte equação:

$$B = \frac{\mu_0 \times i}{2R}$$

Onde:

- B = intensidade do campo magnético no centro da espira (**Tesla, T**)
- μ_0 = permeabilidade magnética do vácuo ($4\pi \times 10^{-7} T \cdot m/A$)
- **i** = corrente elétrica na espira (**Ampère, A**)
- R = raio da espira (**metros, m**)

Influência do Número de Espiras

Se tivermos **N espiras** empilhadas, formando uma bobina circular, o campo magnético no centro será **N vezes maior**:

$$B = \frac{N \times \mu_0 \times i}{2R}$$

Isso ocorre porque o campo gerado por cada espira **se soma** ao dos demais, reforçando o campo total.

Exemplo Resolvido

Uma espira circular de raio **0,05 m** conduz uma corrente de **8 A**. Qual a intensidade do campo magnético no centro da espira? ($\pi \approx 3{,}14$)

Resolução:

Usamos a fórmula:

$$B = \frac{\mu_0 \times i}{2R}$$

Substituindo os valores:

$$B = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 8}{2 \times 0{,}05}$$

$$\therefore$$

$$B \approx 100{,}48 \times 10^{-6}\, T \;\; ou\ aproximadamente\ 100{,}5\ \mu T$$

Resposta:

$$B \approx 100{,}5\ \mu T\ (microteslas).$$

Campo Magnético Criado por um Solenoide

Um **solenoide** é uma bobina formada por várias espiras cilíndricas de fio condutor enrolado em torno de um eixo. Quando uma **corrente elétrica** percorre essas espiras, um **campo magnético** é gerado dentro do solenoide, semelhante ao campo de um **ímã em barra**.

Fórmula do Campo Magnético no Interior de um Solenoide

O campo magnético no interior de um solenoide longo e ideal (**isto é, um solenoide onde o comprimento é muito maior que o raio das espiras**) é dado por:

$$B = \mu_0 \times n \times i$$

Onde:

- $\boldsymbol{B}$ = intensidade do campo magnético (**Tesla, T**)
- μ_0 = permeabilidade magnética do vácuo ($4\pi \times 10^{-7} T \cdot m/A$)
- $\boldsymbol{n}$ = número de espiras por metro ($n = \frac{N}{L}$, **onde N é o número total de espiras e L é o comprimento do solenoide em metros**)
- **i** = corrente elétrica na bobina (**Ampère, A**)

Características do Campo Magnético em um Solenoide

1. **Campo Magnético Interno:**
    a. No interior do solenoide, as **linhas de campo magnético são paralelas**, o que indica um campo uniforme.
    b. A intensidade do campo é **proporcional ao número de espiras por metro** e à corrente elétrica que circula na bobina.
2. **Campo Magnético Externo:**
    a. Fora do solenoide, o campo magnético é **praticamente desprezível** se comparado ao seu interior, exceto nas extremidades.
    b. Em um solenoide longo, o campo externo se anula quase completamente.
3. **Efeito da Permeabilidade do Meio:**
    a. Se dentro do solenoide houver um **núcleo de material ferromagnético** (**como ferro**), o campo magnético pode aumentar significativamente.
    b. Nesse caso, a equação é modificada para incluir a **permeabilidade relativa** (μ_r) do material:

$$B = \mu_0 \times n \times i$$

Onde $\mu = \mu_0 \times \mu_r$.

Exemplo Resolvido

Um solenoide tem **500 espiras** distribuídas ao longo de **50 cm** de comprimento. Se ele for percorrido por uma corrente de **3 A**, determine a intensidade do campo magnético em seu interior. $(\pi = 3{,}14)$

Resolução:

1. **Calcular n (número de espiras por metro):**

$$n = \frac{N}{L} = \frac{500}{0{,}50} = 1000\ espiras/m$$

2. **Aplicar a fórmula do campo magnético:**

$$B = \mu_0 \times n \times i$$

Substituindo os valores:

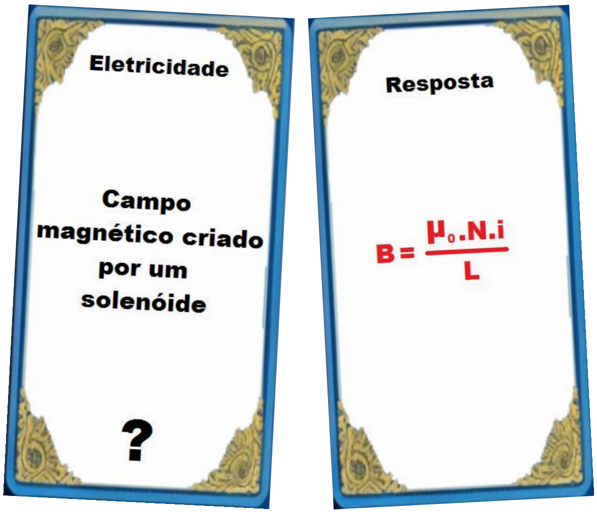
$$B = (4\pi \times 10^{-7}) \times (1000) \times (3)$$

$$B \approx 12\pi \times 10^{-4}\,T \approx 37{,}68 \times 10^{-4}\,T$$

$$B \approx 3{,}77 \times 10^{-3}\,T\ \ ou\ \ 3{,}77\,mT$$

Resposta:

$B \approx 3{,}77\,mT$ (miliTeslas).



Força Magnética sobre Cargas Elétricas

Quando uma carga elétrica se movimenta dentro de um campo magnético, ela sofre a ação de uma **força magnética**. Essa força é perpendicular tanto ao vetor velocidade da carga quanto ao campo magnético, sendo determinada pela **Regra da Mão Esquerda** e pela equação fundamental da força magnética.

Fórmula Geral da Força Magnética

A força magnética (F_m) que age sobre uma carga elétrica $\boldsymbol{q}$ que se move com velocidade $\boldsymbol{v}$ dentro de um campo magnético $\boldsymbol{B}$ é dada por:

$$F_m = q \times v \times B \times sen(\theta)$$

Onde:

- F_m = força magnética (**Newton, N**)
- $\boldsymbol{q}$ = carga elétrica (**Coulomb, C**)
- $\boldsymbol{v}$ = velocidade da carga (**m/s**)
- $\boldsymbol{B}$ = intensidade do campo magnético (**Tesla, T**)
- $\boldsymbol{\theta}$ = ângulo entre o vetor velocidade da carga e o campo magnético

Análise da Força para Diferentes Ângulos

Caso 1: θ=0º ou 180º

- Se a carga elétrica **se move paralelamente ao campo magnético**, ou seja, $\theta = 0° \; ou \; \theta = 180°$ **,** temos $sen(0°) = 0 \; e \; sen(180°) = 0$.
- **Resultado:** $F_m = 0$, ou seja, **não há força magnética** atuando sobre a carga.

Caso 2: *θ=90º*

- Se a carga elétrica **se move perpendicularmente ao campo magnético**, temos $sen(90°) = 1$, então a força fica:

$$F_m = q \times v \times B \times sen(\theta)$$

- **Resultado:** Esse é o **caso de máxima força magnética**, e a carga tende a se mover em um **movimento circular uniforme** dentro do campo magnético.

Regra da Mão Esquerda

A **Regra da Mão Esquerda** é usada para determinar a direção da força magnética sobre cargas **negativas** (**como elétrons**). O posicionamento da mão é o seguinte:

1. **Dedão:** aponta na direção da força magnética resultante.
2. **Indicador:** aponta na direção do campo magnético $\boldsymbol{B}$.
3. **Dedo médio:** aponta na direção da velocidade da carga $\boldsymbol{v}$.

Exemplo Resolvido

Um elétron ($q = 1{,}6 \times 10^{-19}\, C$) se move com uma velocidade de $2 \times 10^{6}\, m/$ ***sperpendicularmente a um campo magnético*** $de\; 0{,}5\; T$. Determine a força magnética sobre essa carga.

Resolução:

A equação da força magnética é:

$$F_m = q \times v \times B \times sen(\theta)$$

Como o movimento é **perpendicular** ao campo magnético, temos $\theta = 90°\ e\ sen(90°) = 1$.

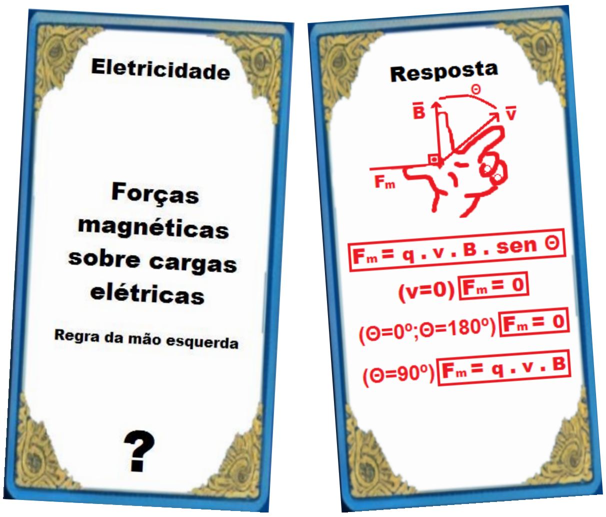
Substituindo os valores:

$$F_m = (1{,}6 \times 10^{-19}) \times (2 \times 10^6) \times (0{,}5) \times 1$$

$$F_m = 1{,}6 \times 10^{-13}\ N$$

Resposta:

A força magnética sobre o elétron é $1{,}6 \times 10^{-13}\ N$.



Força Magnética sobre um Condutor Retilíneo

Quando uma corrente elétrica percorre um condutor dentro de um campo magnético, este condutor sofre a ação de uma **força magnética**. Esse fenômeno ocorre porque os elétrons em movimento dentro do fio experimentam uma força individual devido ao campo magnético, e a soma dessas forças resulta em uma força total sobre o condutor.

Fórmula da Força Magnética sobre um Condutor

A força magnética (F_m) sobre um fio retilíneo percorrido por corrente elétrica dentro de um campo magnético uniforme é dada por:

$$F_m = B \times i \times L \times sen(\theta)$$

Onde:

- F_m = força magnética (**Newton, N**)
- $\boldsymbol{B}$ = intensidade do campo magnético (**Tesla, T**)
- **i** = corrente elétrica no condutor (**Ampère, A**)
- $\boldsymbol{L}$ = comprimento do fio dentro do campo magnético (**metros, m**)
- $\boldsymbol{\theta}$ = ângulo entre o fio e o campo magnético

Análise da Força para Diferentes Ângulos

Caso 1: θ=0° ou 180º (fio paralelo ao campo magnético)

- Se o condutor está **paralelo ao campo magnético**, $\theta = 0° \; ou \; \theta = 180°$, então $sen(0°) = 0 \; e \; sen(180°) = 0$
- **Resultado:** $F_m = 0$, ou seja, **não há força magnética** sobre o fio.

Caso 2: θ=90º (fio perpendicular ao campo magnético)

- Se o condutor está **perpendicular ao campo magnético**, temos $sen(90°) = 1$.
- **Resultado:** A força magnética atinge seu **valor máximo**:

$$F_m = B \times i \times L$$

Regra da Mão Esquerda

A **Regra da Mão Esquerda** é usada para determinar a direção da força magnética sobre um condutor percorrido por corrente elétrica. Para aplicá-la, posicione a mão esquerda assim:

1. **Indicador:** aponta na direção do campo magnético $\boldsymbol{B}$.
2. **Dedo médio:** aponta na direção da corrente elétrica **i**.
3. **Dedão:** aponta na direção da força magnética F_m.

Exemplo Resolvido

Um fio condutor de **0,5 m** de comprimento está imerso em um campo magnético uniforme de intensidade **0,3 T**. O fio é percorrido por uma corrente elétrica de $\boldsymbol{4}$ **A** e forma um ângulo de **90°** ***com o campo magnético***.

Calcule a força magnética atuando sobre o fio.

Resolução:

A equação da força magnética é:

$$F_m = B \times i \times L \times sen(\theta)$$

Substituindo os valores:

$$F_m = (0{,}3) \times (4) \times (0{,}5) \times sen(90°)$$

$$F_m = 0{,}6\ N$$

Resposta:

A força magnética atuando sobre o fio é **0,6 N**.

Eletricidade

Força magnética sobre um condutor retilíneo

?

Resposta

$$\boxed{F_m = B \,.\, i \,.\, L \,.\mathrm{sen}\, \Theta}$$

$\Theta = 0^{\circ}$ $\Theta = 180^{\circ}$

$$\boxed{F_m = 0}$$

$\Theta = 90^{\circ}$

$$\boxed{F_m = B \,.\, i \,.\, L}$$