

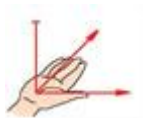


CIÊNCIAS DA NATUREZA E SUAS TECNOLOGIAS

Física

Ensino Médio
MÓDULO III

× ×
× ×



Força Magnética

[Sobre um fio](#)

[Sobre uma Espira](#)



Indução Magnética

[Fluxo de Indução](#)

[Variação do Fluxo](#)

[Indução](#)

[Lei de Lenz](#)

[Corrente de Foucault](#)

[Lei de Faraday-Neumann](#)

[Transformadores](#)

Física moderna



Física quântica

[Introdução](#)

[Modelo ondulatório](#)

[Radiação térmica/Corpo negro](#)

[Modelo quântico para radiações eletromagnéticas](#)

[Efeito fotoelétrico](#)

[Contradições da Física clássica ao efeito fotoelétrico](#)

[Interpretação de Einstein para o efeito fotoelétrico](#)

[Dualidade onda-partícula](#)

[Átomo de Bohr](#)



Relatividade

[Introdução](#)

[Teoria da Relatividade](#)

[Dilatação do Tempo](#)

[Contração do Comprimento](#)

[Massa Relativística](#)

[Equivalência entre Massa e Energia](#)

[Energia e Quantidade de Movimento](#)

Eletrromagnetismo



Eletrrostática

Eletrrostática

Cargas Elétricas

Toda a matéria que conhecemos é formada por moléculas. Esta, por sua vez, é formada de átomos, que são compostos por três tipos de partículas elementares: prótons, nêutrons e elétrons.

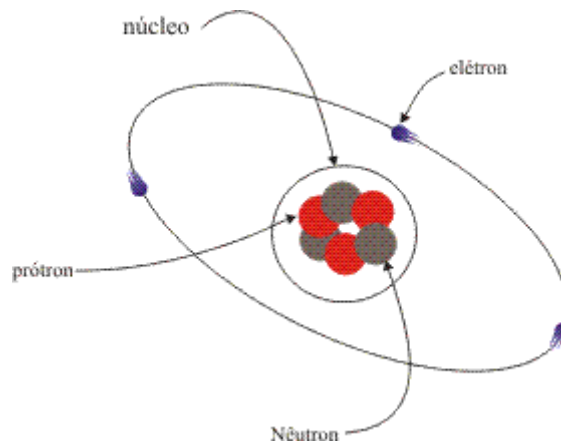
Os átomos são formados por um núcleo, onde ficam os prótons e nêutrons e uma eletrosfera, onde os elétrons permanecem, em órbita.

Os prótons e nêutrons têm massa praticamente igual, mas os elétrons têm massa milhares de vezes menor. Sendo **m** a massa dos prótons, podemos representar a massa dos elétrons como:

$$m_{\text{elêtron}} \cong \frac{1}{2000} \cdot m$$

Ou seja, a massa dos elétrons é aproximadamente 2 mil vezes menor que a massa dos prótons.

Podemos representar um átomo, embora fora de escala, por:



Se pudéssemos separar os prótons, nêutrons e elétrons de um átomo, e lançá-los em direção a um ímã, os prótons seriam desviados para uma direção, os elétrons a uma direção oposta a do desvio dos prótons e os nêutrons não seriam afetados.

Esta propriedade de cada uma das partículas é chamada **carga elétrica**. Os prótons são partículas com cargas positivas, os elétrons tem carga negativa e os nêutrons tem carga neutra.

Um próton e um elétron têm valores absolutos iguais, embora tenham sinais opostos. O valor da carga de um próton ou um elétron é chamado carga elétrica elementar e simbolizado por **e**.

A unidade de medida adotada internacionalmente para a medida de cargas elétricas é o **coulomb (C)**.

A carga elétrica elementar é a menor quantidade de carga encontrada na natureza, comparando-se este valor com coulomb, têm-se a relação:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

A unidade coulomb é definida partindo-se do conhecimento de densidades de corrente elétrica, medida em ampère (A), já que suas unidades são interdependentes.

Um coulomb é definido como a quantidade de carga elétrica que atravessa em um segundo, a secção transversal de um condutor percorrido por uma corrente igual a 1 ampère.

Eletrização

A única modificação que um átomo pode sofrer sem que haja reações de alta liberação e/ou absorção de energia é a perda ou ganho de elétrons.

Por isso, um corpo é chamado **neutro** se ele tiver número igual de prótons e de elétrons, fazendo com que a carga elétrica sobre o corpo seja nula.

Pela mesma analogia podemos definir corpos eletrizados positivamente e negativamente.

Um corpo eletrizado negativamente tem maior número de elétrons do que de prótons, fazendo com que a carga elétrica sobre o corpo seja negativa.

Um corpo eletrizado positivamente tem maior número de prótons do que de elétrons, fazendo com que a carga elétrica sobre o corpo seja positiva.

Fique atento:

É comum haver confusão sobre *corpos positivamente carregados*, principalmente, já que é plausível de se pensar que para que o corpo tenha carga elétrica positiva ele deva receber carga elétrica positiva, ou seja, ganhar prótons.

Quando na verdade um corpo está positivamente carregado se ele perder elétrons, ficando com menos carga elétrica negativa.

Para que durante os cálculos você não se confunda, lembre que a física vista a nível de ensino médio estuda apenas reações elementares e cotidianas, como o movimento de elétrons. As reações onde as partículas intranucleares (nêutrons e prótons) podem ser modificadas são estudadas na parte da ciência conhecida como Física Nuclear.

Eletrizar um corpo significa basicamente tornar diferente o número de prótons e de elétrons (adicionando ou reduzindo o número de elétrons).

Podemos definir a carga elétrica de um corpo (Q) pela relação:

$$Q = n \cdot e$$

Onde:

Q = Carga elétrica, medida em coulomb no SI

n = quantidade de cargas elementares, que é uma grandeza adimensional e têm sempre valor inteiro ($n=1, 2, 3, 4 \dots$)

e = carga elétrica elementar ($e = 1,6 \cdot 10^{-19} C$)

A eletrostática é basicamente descrita por dois princípios, o da atração e repulsão de cargas conforme seu sinal (sinais iguais se repelem e sinais contrários se atraem) e a conservação de cargas elétricas, a qual assegura que em um sistema isolado, a soma de todas as cargas existentes será sempre constante, ou seja, não há perdas.

Processos de Eletrização

Processos de eletrização

Considera-se um corpo eletrizado quando este tiver número diferente de prótons e elétrons, ou seja, quando não estiver neutro.

O processo de retirar ou acrescentar elétrons a um corpo neutro para que este passe a estar eletrizado denomina-se **eletrização**. Alguns dos processos de eletrização mais comuns são os seguintes.

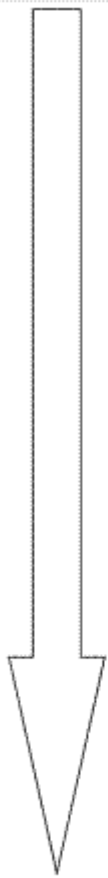
Eletrização por atrito

Este processo foi o primeiro de que se tem conhecimento. Foi descoberto por volta do século VI a.C. pelo matemático grego Tales de Mileto, que concluiu que o atrito entre certos materiais era capaz de atrair pequenos pedaços de palha e penas.

Posteriormente o estudo de Tales foi expandido, sendo possível comprovar que dois corpos neutros feitos de materiais distintos, quando são atritados entre si, um deles fica eletrizado negativamente (ganha elétrons) e outro positivamente (perde elétrons).

Quando há eletrização por atrito, os dois corpos ficam com cargas de módulo igual, porém com sinais opostos. Esta eletrização depende também da natureza do material, por exemplo, atritar um material m_1 com uma material m_2 pode deixar m_1 carregado negativamente e m_2 positivamente, enquanto o atrito entre o material m_1 e outro material m_3 é capaz de deixar m_1 carregado negativamente e m_3 positivamente.

Convenientemente foi elaborada uma lista em dada ordem que um elemento ao ser atritado com o sucessor da lista fica eletrizado positivamente. Esta lista é chamada **série triboelétrica**:

Materiais	
Pele humana seca	
Couro	
Pele de coelho	
Vidro	
Cabelo humano	
Fibra sintética (nylon)	
Lã	
Chumbo	
Pele de gato	
Seda	
Alumínio	
Papel	
Algodão	
Aço	
Madeira	
Âmbar	
Borracha dura	
Níquel	
Cobre	
Latão	
Prata	
Ouro	
Platina	
Poliéster	-
Isopor	
Filme PVC	
Poliuretano	
Polietileno ('fita adesiva')	
Polipropileno	
Vinil	
Silicone	
Teflon	

Eletrização por contato

Outro processo capaz de eletrizar um corpo é feito por contato entre eles.

Se dois corpos condutores, sendo pelo menos um deles eletrizado, são postos em contato, a carga elétrica tende a se estabilizar, sendo redistribuída entre os dois, fazendo com que ambos tenham a mesma carga, inclusive com mesmo sinal.

O cálculo da carga resultante é dado pela média aritmética entre a carga dos condutores em contato. Por exemplo:

- Um corpo condutor A com carga $Q_1 = +6C$ é posto em contato com outro corpo neutro $Q_N = 0C$. Qual é a carga em cada um deles após serem separados.

$$Q' = \frac{Q_1 + Q_N}{2} = \frac{+6 + 0}{2} = +3C$$

- Um corpo condutor A com carga $Q_A = -1C$ é posto em contato com outro corpo condutor B com carga $Q_B = -3C$, após serem separados os dois o corpo A é posto em contato com um terceiro corpo condutor C de carga $Q_C = +4C$ qual é a carga em cada um após serem separados?

$$Q' = \frac{Q_A + Q_B}{2} = \frac{-1 - 3}{2} = -2C$$

Ou seja, neste momento:

$$Q' = Q'_A = Q'_B = -2C$$

Após o segundo contato, tem-se:

$$Q'' = \frac{Q'_A + Q_C}{2} = \frac{-2 + 4}{2} = +1C$$

E neste momento:

$$Q'' = Q''_A = Q'_C = +1C$$

Ou seja, a carga após os contatos no corpo A será +1C, no corpo B será -2C e no corpo C será +1C.

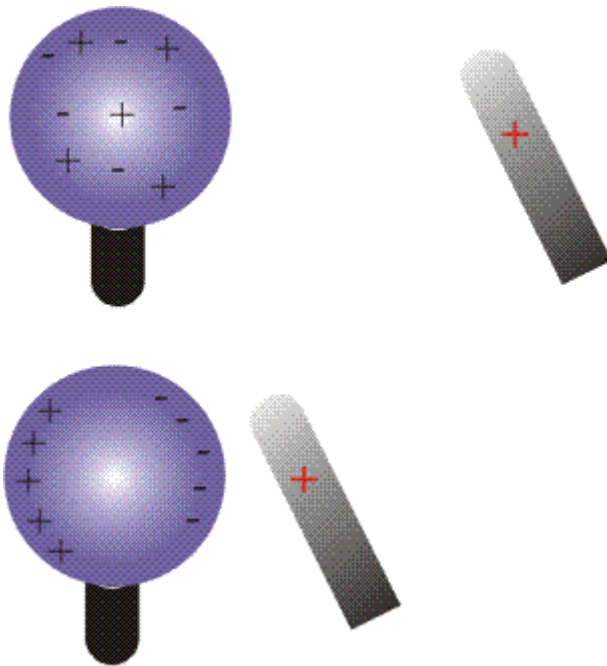
Um corpo eletrizado em contato com a terra será neutralizado, pois se ele tiver falta de elétrons, estes serão doados pela terra e se tiver excesso de elétrons, estes serão descarregados na terra.

Processos de Eletrização

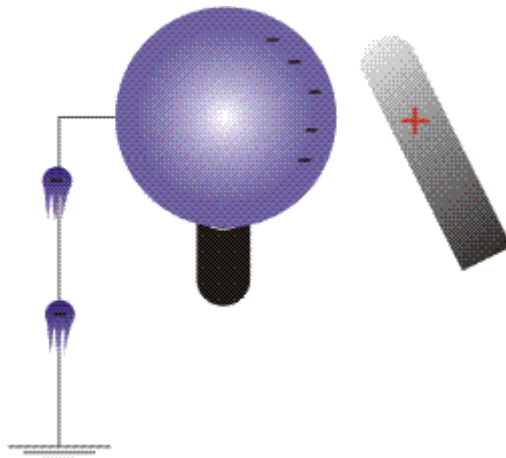
Eletrização por indução eletrostática:

Este processo de eletrização é totalmente baseado no princípio da atração e repulsão, já que a eletrização ocorre apenas com a aproximação de um corpo eletrizado (indutor) a um corpo neutro (induzido). O processo é dividido em três etapas:

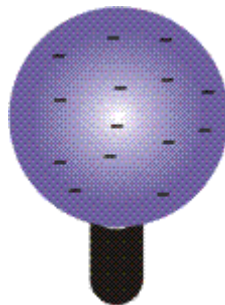
- Primeiramente um bastão eletrizado é aproximado de um condutor inicialmente neutro, pelo princípio de atração e repulsão, os elétrons livres do induzido são atraídos/repelidos dependendo do sinal da carga do indutor.



- O próximo passo é ligar o induzido à terra, ainda na presença do indutor.



- Desliga-se o induzido da terra, fazendo com que sua única carga seja a do sinal oposto ao indutor.



Após pode-se retirar o indutor das proximidades e o induzido estará eletrizado com sinal oposto à carga do indutor e as cargas se distribuem por todo o corpo.

Lei de Coulomb

Esta lei, formulada por Charles Augustin Coulomb, refere-se às forças de interação (atração e repulsão) entre duas cargas elétricas puntiformes, ou seja, com dimensão e massa desprezível.

Lembrando que, pelo princípio de atração e repulsão, cargas com sinais opostos são atraídas e com sinais iguais são repelidas, mas estas forças de interação têm intensidade igual, independente do sentido para onde o vetor que as descreve aponta.

O que a Lei de Coulomb enuncia é que a *intensidade da força elétrica de interação entre cargas puntiformes é diretamente proporcional ao produto dos módulos de cada carga e inversamente proporcional ao quadrado da distância que as separa*. Ou seja:

$$F \propto \frac{Q_1 \cdot Q_2}{d^2}$$

Onde a equação pode ser expressa por uma igualdade se considerarmos uma constante k , que depende do meio onde as cargas são encontradas. O valor mais usual de k é considerado quando esta interação acontece no vácuo, e seu valor é igual a:

$$k = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$$

Então podemos escrever a equação da lei de Coulomb como:

$$F = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{d^2}$$

Para se determinar se estas forças são de atração ou de repulsão utiliza-se o produto de suas cargas, ou seja:

$$Q_1 \cdot Q_2 > 0 \Rightarrow \text{forças de repulsão}$$

$$Q_1 \cdot Q_2 < 0 \Rightarrow \text{forças de atração}$$

Campo Elétrico

Assim como a Terra tem um campo gravitacional, uma carga **Q** também tem um campo que pode influenciar as cargas de prova **q** nele colocadas. E usando esta analogia, podemos encontrar:

$$P = m \cdot g$$

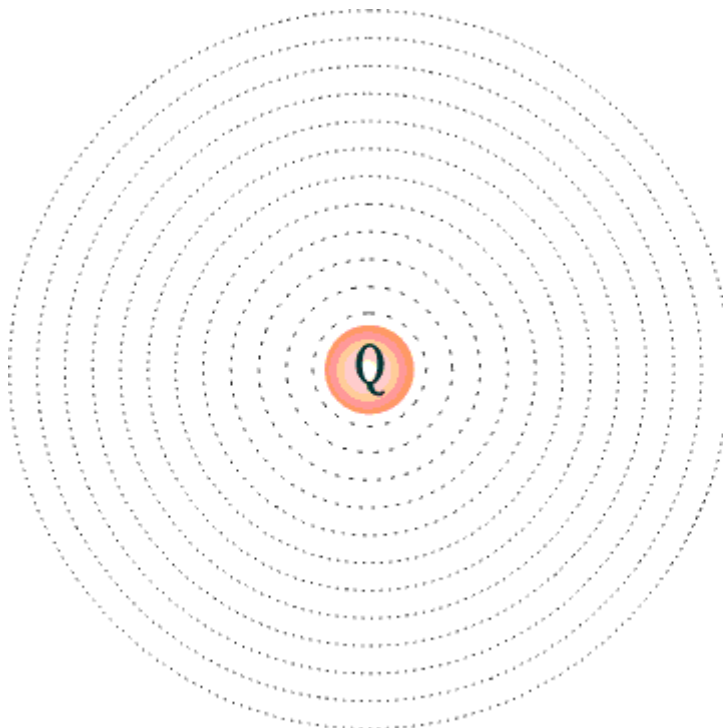
$$g = \frac{P}{m}$$

Desta forma, assim como para a intensidade do campo gravitacional, a intensidade do campo elétrico (**E**) é definido como o quociente entre as forças de interação das cargas geradora do campo (**Q**) e de prova (**q**) e a própria carga de prova (**q**), ou seja:

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

$$E = \frac{k \frac{Q \cdot \cancel{q}}{d^2}}{\cancel{q}} = k \cdot \frac{Q}{d^2}$$

Chama-se *Campo Elétrico* o campo estabelecido em todos os pontos do espaço sob a influência de uma carga geradora de intensidade **Q**, de forma que qualquer carga de prova de intensidade **q** fica sujeita a uma força de interação (atração ou repulsão) exercida por **Q**.



representação de um campo elétrico por linhas imaginárias

Já uma *carga de prova*, para os fins que nos interessam, é definida como um corpo puntual de carga elétrica conhecida, utilizado para detectar a existência de um campo elétrico, também possibilitando o cálculo de sua intensidade.

Vetor Campo Elétrico

Voltando à analogia com o campo gravitacional da Terra, o campo elétrico é definido como um vetor com mesma direção do vetor da força de interação entre a carga geradora **Q** e a carga de prova **q** e com mesmo sentido se $q > 0$ e sentido oposto se $q < 0$. Ou seja:

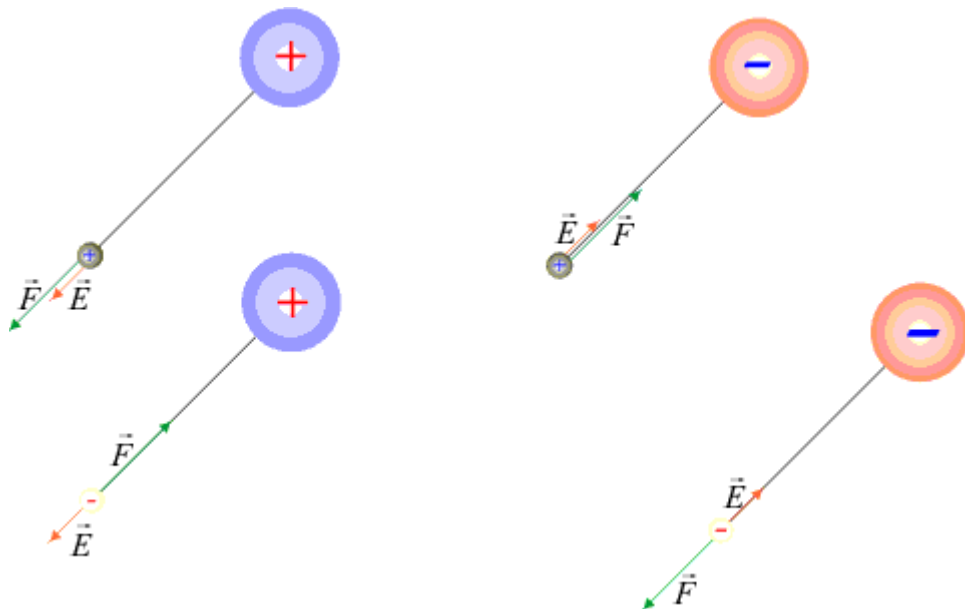
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{|q|}$$

A unidade adotada pelo SI para o campo elétrico é o N/C (Newton por coulomb).

Interpretando esta unidade podemos concluir que o campo elétrico descreve o valor da força elétrica que atua por unidade de carga, para as cargas colocadas no seu espaço de atuação.

Campo Elétrico (continuação)

O campo elétrico pode ter pelo menos quatro orientações diferentes de seu vetor devido aos sinais de interação entre as cargas, quando o campo é gerado por apenas uma carga, estes são:



Quando a carga de prova tem sinal negativo ($q < 0$), os vetores força e campo elétrico têm mesma direção, mas sentidos opostos, e quando a carga de prova tem sinal positivo ($q > 0$), ambos os vetores têm mesma direção e sentido

Já quando a carga geradora do campo tem sinal positivo ($Q > 0$), o vetor campo elétrico tem sentido de afastamento das cargas e quando tem sinal negativo ($Q < 0$), tem sentido de aproximação, sendo que isto não varia com a mudança do sinal das cargas de provas.

Quando uma única partícula é responsável por gerar um campo elétrico, este é gerado em um espaço que a circunda, embora não esteja presente no ponto onde a partícula é encontrada.

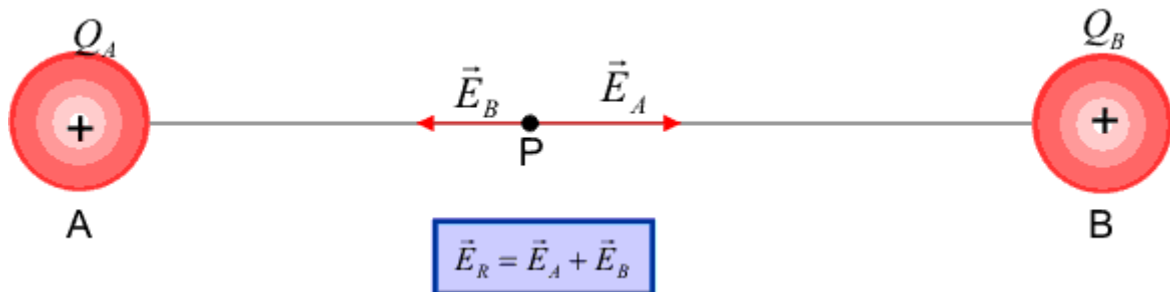
Campo elétrico gerado por mais do que uma partícula eletrizada.

Quando duas ou mais cargas estão próximas o suficiente para que os campos gerados por cada uma se interfiram, é possível determinar um campo elétrico resultante em um ponto desta região.

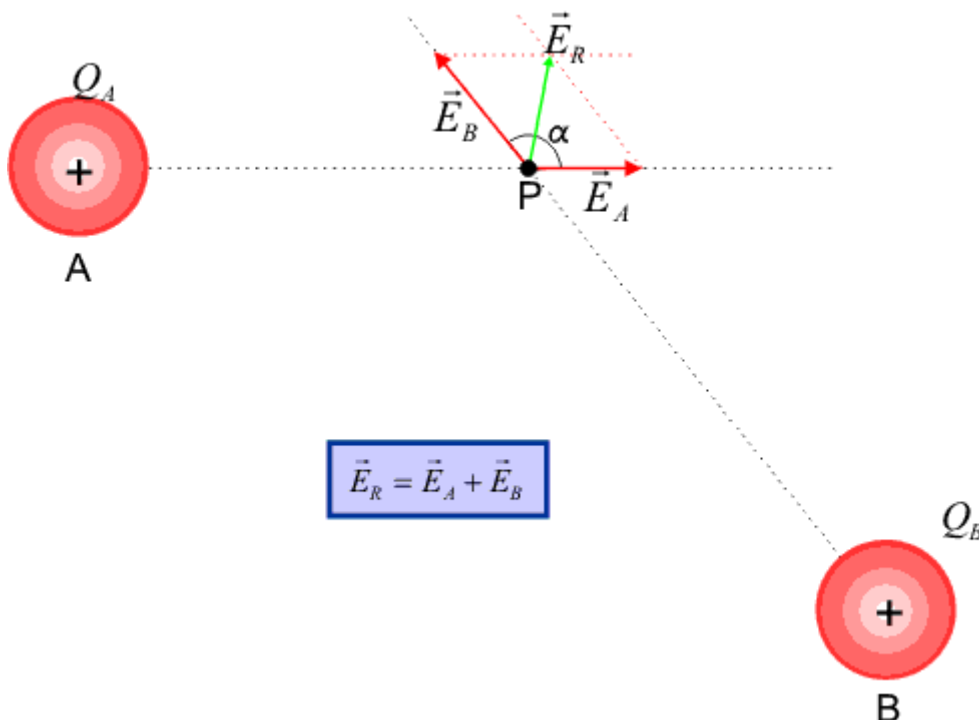
Para isto, analisa-se isoladamente a influência de cada um dos campos gerados sobre um determinado ponto.

Por exemplo, imaginemos duas cargas postas arbitrariamente em um ponto **A** e outro **B**, com cargas Q_A e Q_B , respectivamente. Imaginemos também um ponto **P** sob a influência dos campos gerados pelas duas cargas simultaneamente.

O vetor do campo elétrico resultante será dado pela soma dos vetores \vec{E}_A e \vec{E}_B no ponto P, como ilustram os exemplos a seguir.



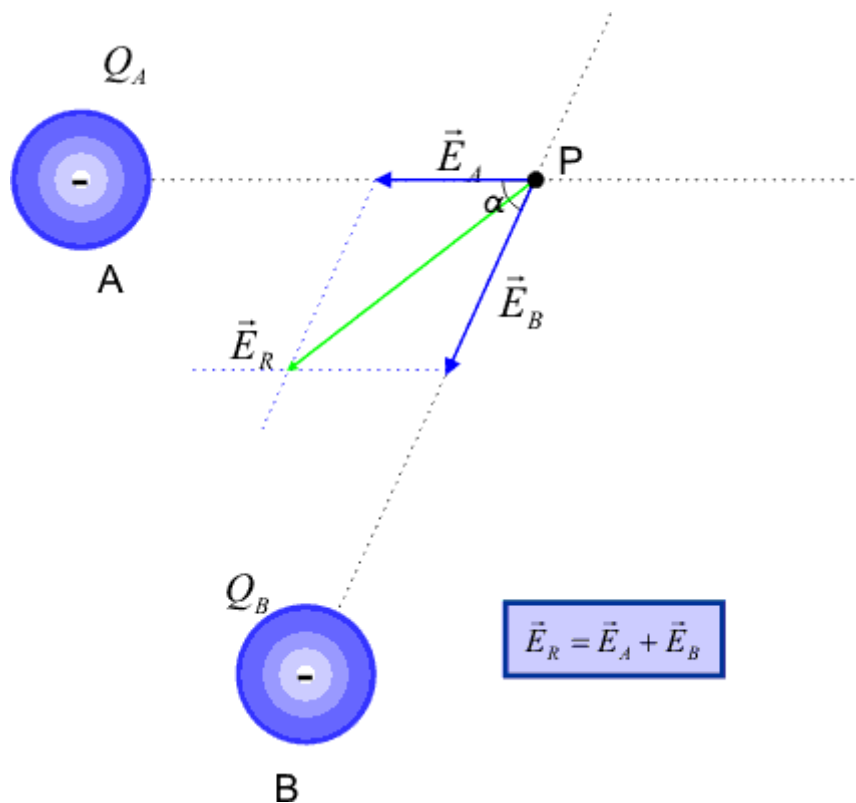
Como as duas cargas geradoras do campo têm sinal positivo, cada uma delas gera um campo divergente (de afastamento), logo o vetor resultante terá módulo igual à subtração entre os valores dos vetores e direção e sentido do maior valor absoluto.



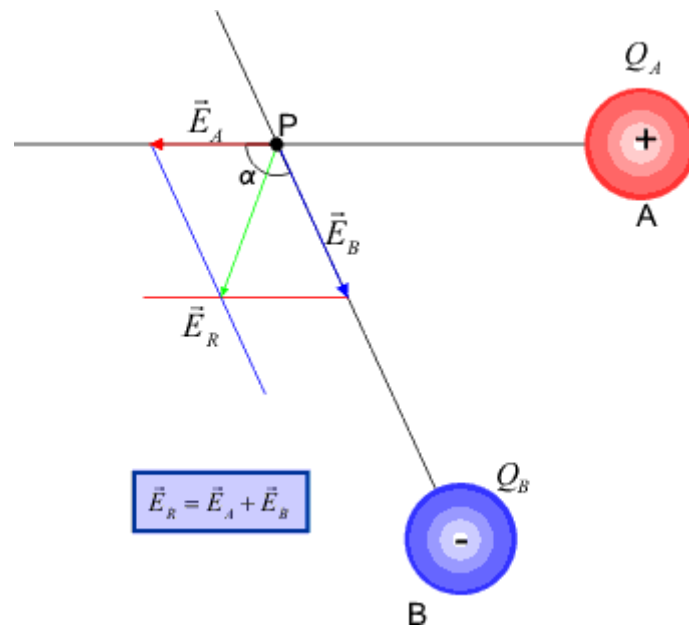
Assim como no exemplo anterior, ambos os campos elétricos gerados são divergentes, mas como existe um ângulo formado entre eles, esta soma vetorial é calculada através de regra do paralelogramo, ou seja, traçando-se o vetor soma dos dois vetores, tendo assim o módulo direção e sentido do vetor campo elétrico resultante.

Campo Elétrico (continuação)

Como ambas as cargas que geram o campo tem sinais negativos, cada componente do vetor campo resultante é convergente, ou seja, tem sentido de aproximação.



O módulo, a direção e o sentido deste vetor são calculados pela regra do paralelogramo, assim como ilustra a figura.



Neste exemplo, as cargas que geram o campo resultante têm sinais diferentes, então um dos vetores converge em relação à sua carga geradora (\vec{E}_B) e outro diverge (\vec{E}_A).

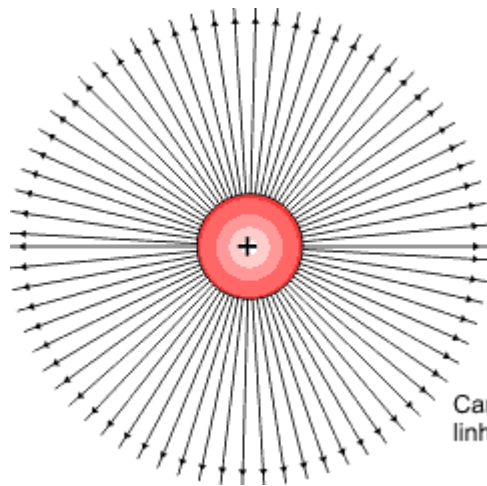
Então podemos generalizar esta soma vetorial para qualquer número finito de partículas, de modo que:

$$\vec{F}_R = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n$$

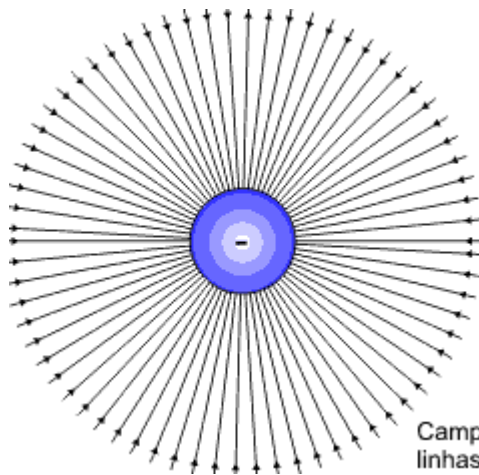
Linhas de força

Estas linhas são a representação geométrica convencional para indicar a presença de campos elétricos, sendo representadas por linhas que tangenciam os vetores campo elétrico resultante em cada ponto, logo, jamais se cruzam. Por convenção, as linhas de força têm a mesma orientação do vetor campo elétrico, de modo que para campos gerados por cargas positivas as linhas de força são divergentes (sentido de afastamento) e campos gerados por cargas elétricas negativas são representados por linhas de força convergentes (sentido de aproximação).

Quando se trabalha com cargas geradoras sem dimensões, as linhas de força são representadas radialmente, de modo que:



Campos gerados por cargas positivas têm linhas de força divergentes.



Campos gerados por cargas negativas têm linhas de força convergentes.

Campo Elétrico (continuação)

Densidade Superficial de cargas

Um corpo em equilíbrio eletrostático, ou seja, quando todos possíveis responsáveis por sua eletrização acomodam-se em sua superfície, pode ser caracterizado por sua densidade superficial média de cargas σ_m , que por definição é o resultado do quociente da carga elétrica Q , pela área de sua superfície A .

$$\sigma_m = \frac{Q}{A}$$

Sendo sua unidade adotada no SI o C/m².

Observe que para cargas negativas a densidade superficial média de cargas também é negativa, já que a área sempre é positiva.

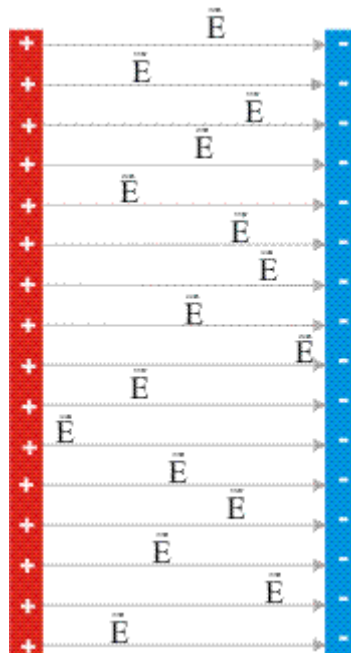
Utiliza-se o termo médio já que dificilmente as cargas elétricas se distribuem uniformemente por toda a superfície de um corpo, de modo que é possível constatar que o módulo desta densidade é inversamente proporcional ao seu

raio de curvatura, ou seja, em objetos pontiagudos eletrizados há maior concentração de carga em sua extremidade (ponta).

Campo Elétrico Uniforme (CEU)

Dizemos que um campo elétrico é uniforme em uma região quando suas linhas de força são paralelas e igualmente espaçadas umas das outras, o que implica que seu vetor campo elétrico nesta região \vec{E} têm, em todos os pontos, mesma intensidade, direção e sentido.

Uma forma comum de se obter um campo elétrico uniforme é utilizando duas placas condutoras planas e iguais. Se as placas forem postas paralelamente, tendo cargas de mesma intensidade, mas de sinal oposto, o campo elétrico gerado entre elas será uniforme.



Potencial Elétrico

Imagine um campo elétrico gerado por uma carga Q , ao ser colocada uma carga de prova q em seu espaço de atuação podemos perceber que, conforme a combinação de sinais entre as duas cargas, esta carga q , será atraída ou repelida, adquirindo movimento, e conseqüentemente Energia Cinética.

Lembrando da energia cinética estudada em mecânica, sabemos que para que um corpo adquira energia cinética é necessário que haja uma energia potencial armazenada de alguma forma. Quando esta energia está ligada à atuação de um campo elétrico, é chamada **Energia Potencial Elétrica** ou **Eletrostática**, simbolizada por E_p .

$$E_p = K \cdot \frac{Qq}{d}$$

A unidade usada para a E_p é o joule (J).

Pode-se dizer que a carga geradora produz um campo elétrico que pode ser descrito por uma grandeza chamada **Potencial Elétrico** (ou **eletrostático**).

De forma análoga ao Campo Elétrico, o potencial pode ser descrito como o quociente entre a energia potencial elétrica e a carga de prova q . Ou seja:

$$v = \frac{E_p}{q}$$

Logo:

$$\begin{aligned} v &= \frac{E_p}{q} \\ v &= \frac{K \cdot \frac{Qq}{d}}{q} = K \cdot \frac{Qq}{d} \cdot \frac{1}{q} \\ v &= K \cdot \frac{Q}{d} \end{aligned}$$

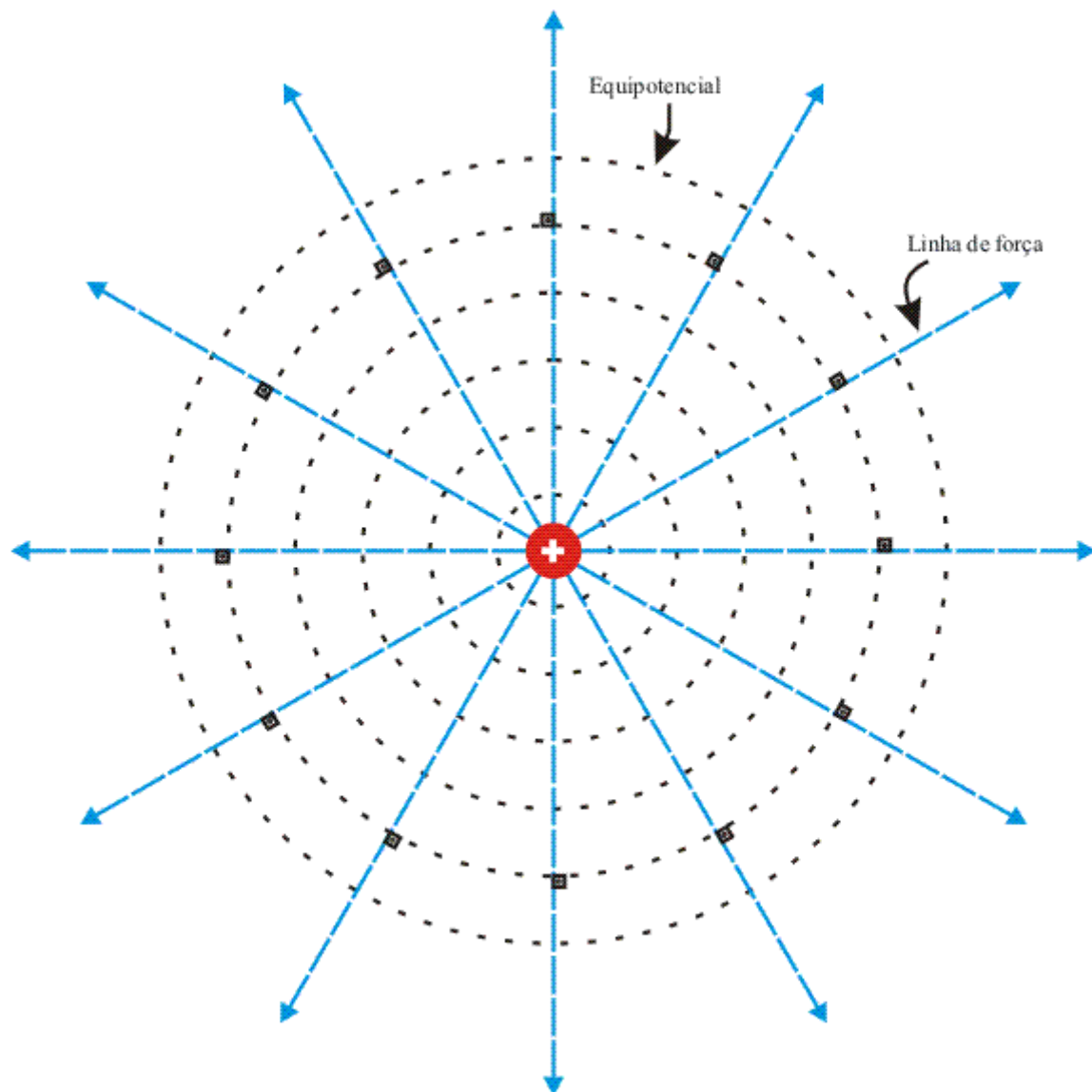
A unidade adotada, no SI para o potencial elétrico é o **volt (V)**, em homenagem ao físico italiano Alessandro Volta, e a unidade designa Joule por coulomb (**J/C**).

Quando existe mais de uma partícula eletrizada gerando campos elétricos, em um ponto P que está sujeito a todas estes campos, o potencial elétrico é igual à soma de todos os potenciais criados por cada carga, ou seja:

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$

Uma maneira muito utilizada para se representar potenciais é através de equipotenciais, que são linhas ou superfícies perpendiculares às linhas de força, ou seja, linhas que representam um mesmo potencial.

Para o caso particular onde o campo é gerado por apenas uma carga, estas linhas equipotenciais serão circunferências, já que o valor do potencial diminui uniformemente em função do aumento da distância (levando-se em conta uma representação em duas dimensões, pois caso a representação fosse tridimensional, os equipotenciais seriam representados por esferas ocas, o que constitui o chamado efeito casca de cebola, onde quanto mais interna for a casca, maior seu potencial).



Potencial Elétrico

Trabalho de uma força elétrica

O trabalho τ que uma carga elétrica realiza é análogo ao trabalho realizado pelas outras energias potenciais usadas no estudo de mecânica, ou seja:

Se imaginarmos dois pontos em um campo elétrico, cada um deles terá energia potencial dada por:

$$E_{p_1} = q \cdot v_1 \text{ e } E_{p_2} = q \cdot v_2$$

Sendo o trabalho realizado entre os dois pontos:

$$\tau_{1,2} = F \cdot \Delta d$$

Mas sabemos que, quando a força considerada é a eletrostática, então:

$$\tau_{1,2} = K \frac{Qq}{(d_1 - d_2)^2} \cdot (d_1 - d_2)$$

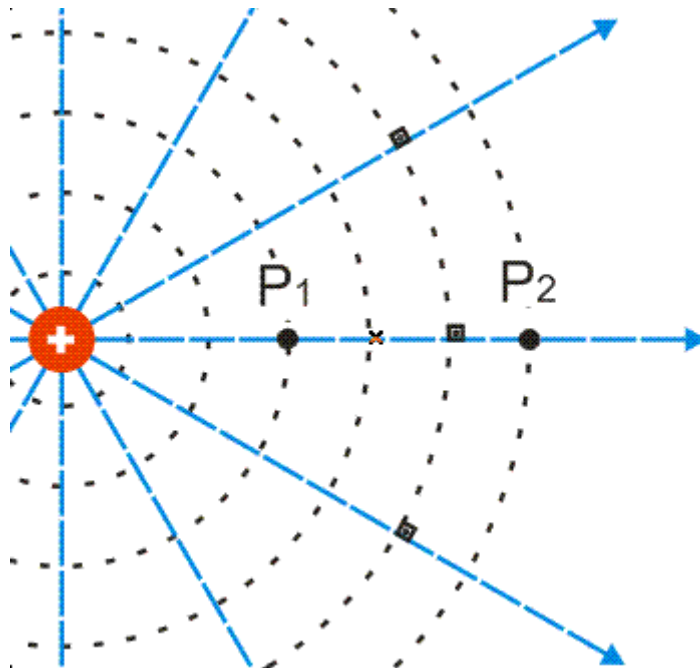
$$\tau_{1,2} = K \frac{Qq}{(d_1 - d_2)} = E_{P_1} - E_{P_2}$$

Portanto :

$$\tau_{1,2} = q \cdot (v_1 - v_2)$$

Diferença de potencial entre dois pontos

Considere dois pontos de um campo elétrico, A e B, cada um com um posto a uma distância diferente da carga geradora, ou seja, com potenciais diferentes. Se quisermos saber a diferença de potenciais entre os dois devemos considerar a distância entre cada um deles.



Então teremos que sua tensão ou d.d.p (diferença de potencial) será expressa por **U** e calculada por:

$$U = v_1 - v_2$$

$$U = K \frac{Q}{d_1} - K \frac{Q}{d_2}$$



Eletrodinâmica

Eletrodinâmica

Corrente Elétrica

Ao se estudarem situações onde as partículas eletricamente carregadas deixam de estar em equilíbrio eletrostático passamos à situação onde há deslocamento destas cargas para uma determinada direção e em um sentido, este deslocamento é o que chamamos **corrente elétrica**.

Estas correntes elétricas são responsáveis pela eletricidade considerada utilizável por nós.

Normalmente utiliza-se a corrente causada pela movimentação de elétrons em um condutor, mas também é possível haver corrente de íons positivos e negativos (em soluções eletrolíticas ou gases ionizados).

A corrente elétrica é causada por uma diferença de potencial elétrico (d.d.p./ tensão). E ela é explicada pelo conceito de campo elétrico, ou seja, ao considerar uma carga A positiva e outra B, negativa, então há um campo orientado da carga A para B. Ao ligar-se um fio condutor entre as duas os elétrons livres tendem a se deslocar no sentido da carga positiva, devido ao fato de terem cargas negativas, lembrando que sinais opostos são atraídos.

Desta forma cria-se uma corrente elétrica no fio, com sentido oposto ao campo elétrico, e este é chamado **sentido real da corrente elétrica**. Embora seja convencionalizado que a corrente tenha o mesmo sentido do campo elétrico, o que não altera em nada seus efeitos (com exceção para o fenômeno chamado Efeito Hall), e este é chamado o **sentido convencional da corrente**.

Para calcular a intensidade da corrente elétrica (i) na seção transversal de um condutor se considera o módulo da carga que passa por ele em um intervalo de tempo, ou seja:

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

Considerando $|Q| = n e$

A unidade adotada para a intensidade da corrente no SI é o ampère (**A**), em homenagem ao físico francês Andre Marie Ampère, e designa coulomb por segundo (**C/s**).

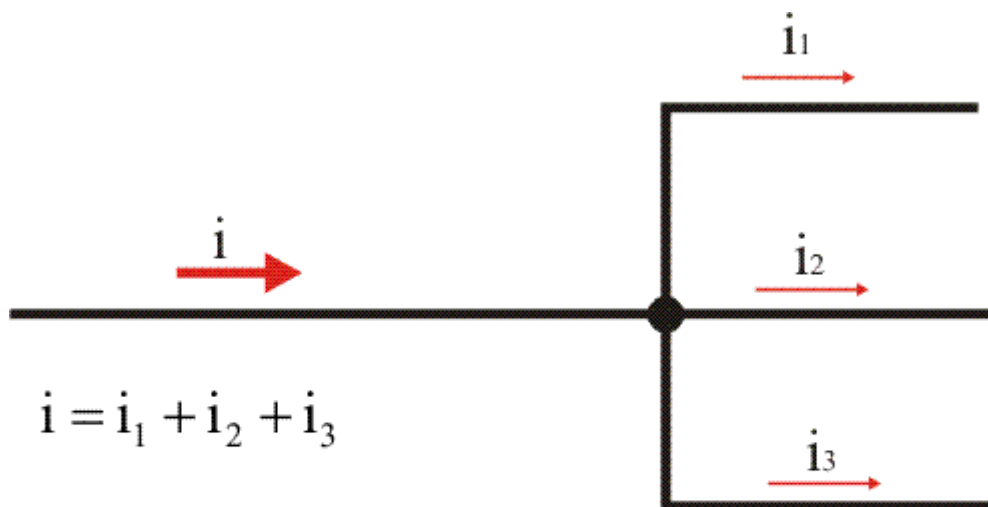
Sendo alguns de seus múltiplos:

Nome	Símbolo	Valor em A
Ampère	A	1
Deciampère	dA	10^{-1}
Centiampère	cA	10^{-2}
Miliampère	mA	10^{-3}
Microampère	μA	10^{-6}
Nanoampère	nA	10^{-9}
Picoampère	pA	10^{-12}

Continuidade da corrente elétrica

Para condutores sem dissipação, a intensidade da corrente elétrica é sempre igual, independente de sua secção transversal, esta propriedade é chamada **continuidade da corrente elétrica**.

Isto implica que se houver "opções de caminho" em um condutor, como por exemplo, uma bifurcação do fio, a corrente anterior a ela será igual à soma das correntes em cada parte desta bifurcação, ou seja:



Genericamente :

$$i = i_1 + i_2 + \dots + i_n$$

Resistência Elétrica

Ao aplicar-se uma tensão U , em um condutor qualquer se estabelece nele uma corrente elétrica de intensidade i . Para a maior parte dos condutores estas

duas grandezas são diretamente proporcionais, ou seja, conforme uma aumenta o mesmo ocorre à outra.

Desta forma:

$$U \propto i$$
$$\frac{U}{i} = \text{constante}$$

A esta constante chama-se **resistência elétrica** do condutor (R), que depende de fatores como a natureza do material. Quando esta proporcionalidade é mantida de forma linear, chamamos o condutor de **ôhmico**, tendo seu valor dado por:

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

Sendo R constante, conforme enuncia a 1ª Lei de Ohm: *Para condutores ôhmicos a intensidade da corrente elétrica é diretamente proporcional à tensão (ddp) aplicada em seus terminais.*

A resistência elétrica também pode ser caracterizada como a "dificuldade" encontrada para que haja passagem de corrente elétrica por um condutor submetido a uma determinada tensão. No SI a unidade adotada para esta grandeza é o **ohm (Ω)**, em homenagem ao físico alemão Georg Simon Ohm.

Pode-se também definir uma grandeza chamada Condutância elétrica (**G**), como a facilidade que uma corrente tem em passar por um condutor submetido à determinada tensão, ou seja, este é igual ao inverso da resistência:

$$G = \frac{1}{R}$$
$$G = \frac{1}{\frac{U}{i}} = \frac{i}{U}$$

E sua unidade, adotada pelo SI é o siemens (S), onde:

$$1\text{S} \equiv \frac{1}{\Omega} = \Omega^{-1}$$

Geradores de corrente elétrica

A corrente sempre existe enquanto há diferença de potencial entre dois corpos ligados, por um condutor, por exemplo, mas esta tem pequena duração quando estes corpos são eletrizados pelos métodos vistos em eletrostática, pois entram rapidamente em equilíbrio.

A forma encontrada para que haja uma diferença de potencial mais duradoura é a criação de geradores elétricos, que são construídos de modo que haja tensão por um intervalo maior de tempo.

Existem diversos tipos de geradores elétricos, que são caracterizados por seu princípio de funcionamento, alguns deles são:

Geradores luminosos

São sistemas de geração de energia construídos de modo a transformar energia luminosa em energia elétrica, como por exemplo, as placas solares feitas de um composto de silício que converte a energia luminosa do sol em energia elétrica.

Geradores mecânicos

São os geradores mais comuns e com maior capacidade de criação de energia. Transformam energia mecânica em energia elétrica, principalmente através de magnetismo. É o caso dos geradores encontrados em usinas hidroelétricas, termoelétricas e termonucleares.

Geradores químicos

São construídos de forma capaz de converter energia potencial química em energia elétrica (contínua apenas). Este tipo de gerador é muito encontrado como baterias e pilhas.

Geradores térmicos

São aqueles capazes de converter energia térmica em energia elétrica, diretamente.

Quando associados dois, ou mais geradores como pilhas, por exemplo, a tensão e a corrente se comportam da mesma forma como nas associações de resistores, ou seja:

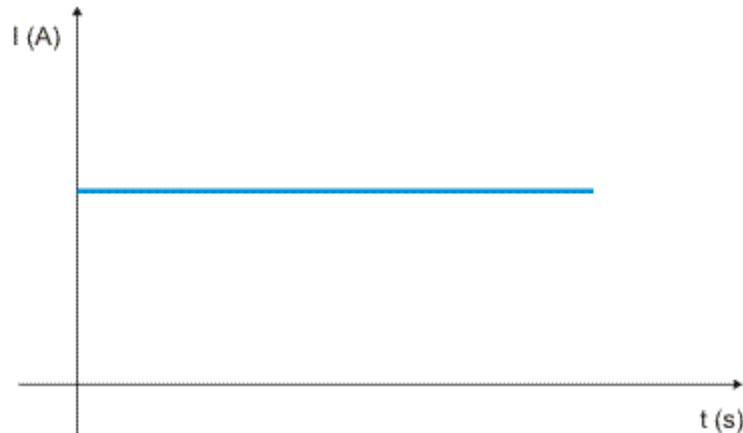
- Associação em série: corrente nominal e tensão é somada.
- Associação em paralelo: corrente é somada e tensão nominal.

• Corrente contínua e alternada

- Se considerarmos um gráfico $i \times t$ (intensidade de corrente elétrica por tempo), podemos classificar a corrente conforme a curva encontrada, ou seja:
- **Corrente contínua**
- Uma corrente é considerada contínua quando não altera seu sentido, ou seja, é sempre positiva ou sempre negativa.

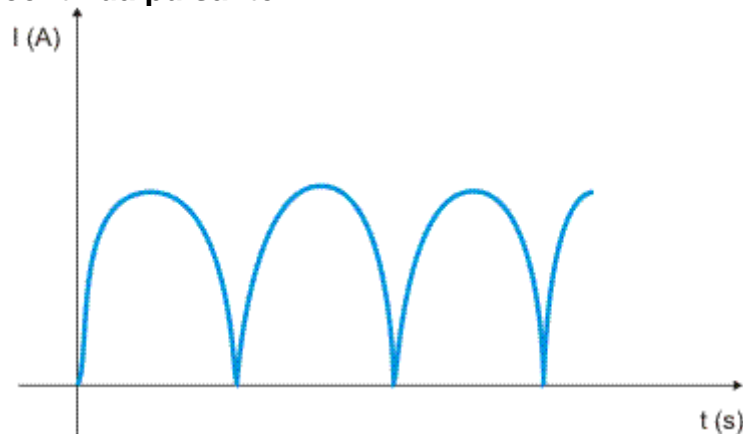
- A maior parte dos circuitos eletrônicos trabalha com corrente contínua, embora nem todas tenham o mesmo "rendimento", quanto à sua curva no gráfico $i \times t$, a corrente contínua pode ser classificada por:

- **Corrente contínua constante**



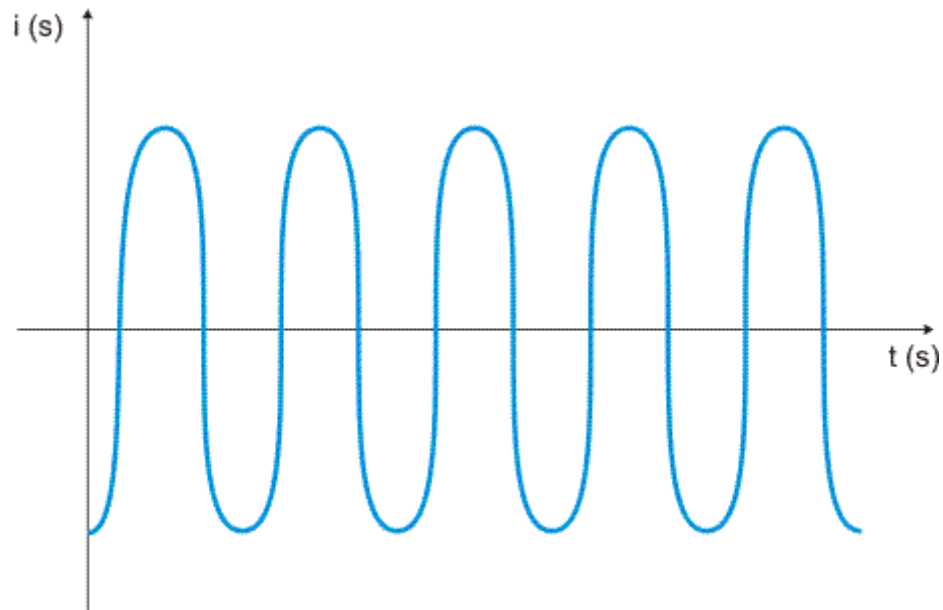
- Diz-se que uma corrente contínua é constante, se seu gráfico for dado por um segmento de reta constante, ou seja, não variável. Este tipo de corrente é comumente encontrado em pilhas e baterias.

- **Corrente contínua pulsante**



- Embora não altere seu sentido as correntes contínuas pulsantes passam periodicamente por variações, não sendo necessariamente constantes entre duas medidas em diferentes intervalos de tempo.
- A ilustração do gráfico acima é um exemplo de corrente contínua constante.
- Esta forma de corrente é geralmente encontrada em circuitos retificadores de corrente alternada.

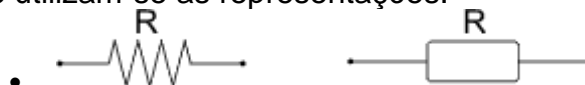
- **Corrente alternada**



- Dependendo da forma como é gerada a corrente, esta é invertida periodicamente, ou seja, ora é positiva e ora é negativa, fazendo com que os elétrons executem um movimento de vai-e-vem.
- Este tipo de corrente é o que encontramos quando medimos a corrente encontrada na rede elétrica residencial, ou seja, a corrente medida nas tomadas de nossa casa.

• Resistores

- São peças utilizadas em circuitos elétricos que tem como principal função converter energia elétrica em energia térmica, ou seja, são usados como aquecedores ou como dissipadores de eletricidade.
- Alguns exemplos de resistores utilizados no nosso cotidiano são: o filamento de uma lâmpada incandescente, o aquecedor de um chuveiro elétrico, os filamentos que são aquecidos em uma estufa, entre outros.
- Em circuitos elétricos teóricos costuma-se considerar toda a resistência encontrada proveniente de resistores, ou seja, são consideradas as ligações entre eles como condutores ideais (que não apresentam resistência), e utilizam-se as representações:

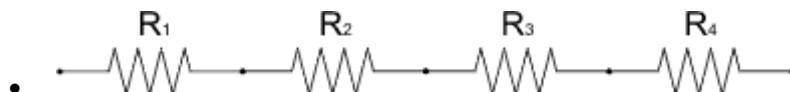


• Associação de Resistores

- Em um circuito é possível organizar conjuntos de resistores interligados, chamada associação de resistores. O comportamento desta associação varia conforme a ligação entre os resistores, sendo seus possíveis tipos: **em série**, **em paralelo** e **mista**.

• Associação em Série

- Associar resistores em série significa ligá-los em um único trajeto, ou seja:



- Como existe apenas um caminho para a passagem da corrente elétrica esta é mantida por toda a extensão do circuito. Já a diferença de potencial entre cada resistor irá variar conforme a resistência deste, para que seja obedecida a 1ª Lei de Ohm, assim:

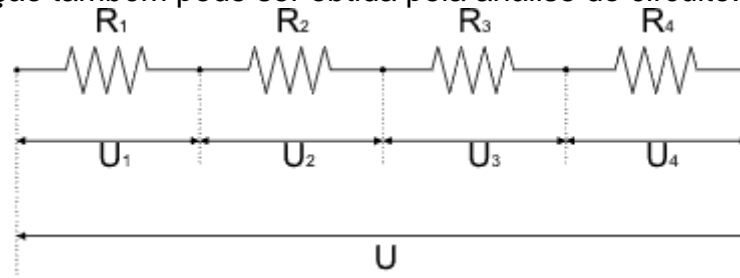
$$U_1 = R_1 \cdot i$$

$$U_2 = R_2 \cdot i$$

$$U_3 = R_3 \cdot i$$

$$U_4 = R_4 \cdot i$$

- Esta relação também pode ser obtida pela análise do circuito:



- Sendo assim a diferença de potencial entre os pontos inicial e final do circuito é igual à:

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

$$U = R_1 \cdot i + R_2 \cdot i + R_3 \cdot i + \dots + R_n \cdot i$$

- Analisando esta expressão, já que a tensão total e a intensidade da corrente são mantidas, é possível concluir que a resistência total é:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

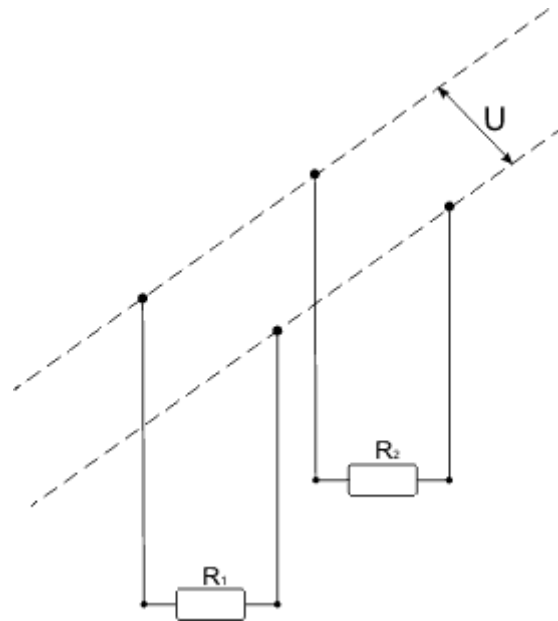
- Ou seja, um modo de se resumir e lembrar-se das propriedades de um circuito em série é:

Tensão (ddp) (U)	se divide
Intensidade da corrente (i)	se conserva
Resistência total (R)	soma algébrica das resistência em cada resistor.

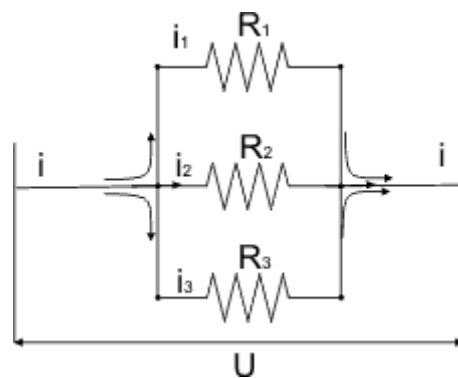
Associação de Resistores

Associação em Paralelo

Ligar um resistor em paralelo significa basicamente dividir a mesma fonte de corrente, de modo que a ddp em cada ponto seja conservada. Ou seja:



Usualmente as ligações em paralelo são representadas por:



Como mostra a figura, a intensidade total de corrente do circuito é igual à soma das intensidades medidas sobre cada resistor, ou seja:

$$i = i_1 + i_2 + i_3 + \dots + i_n$$

Pela 1ª lei de ohm:

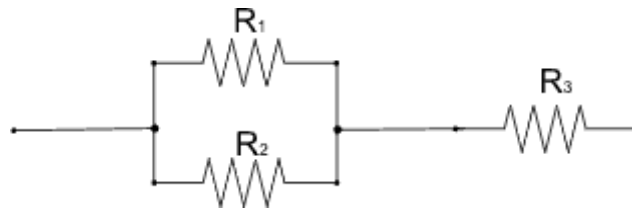
$$i = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} + \dots + \frac{U}{R_n}$$

E por esta expressão, já que a intensidade da corrente e a tensão são mantidas, podemos concluir que a resistência total em um circuito em paralelo é dada por:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Associação Mista

Uma associação mista consiste em uma combinação, em um mesmo circuito, de associações em série e em paralelo, como por exemplo:



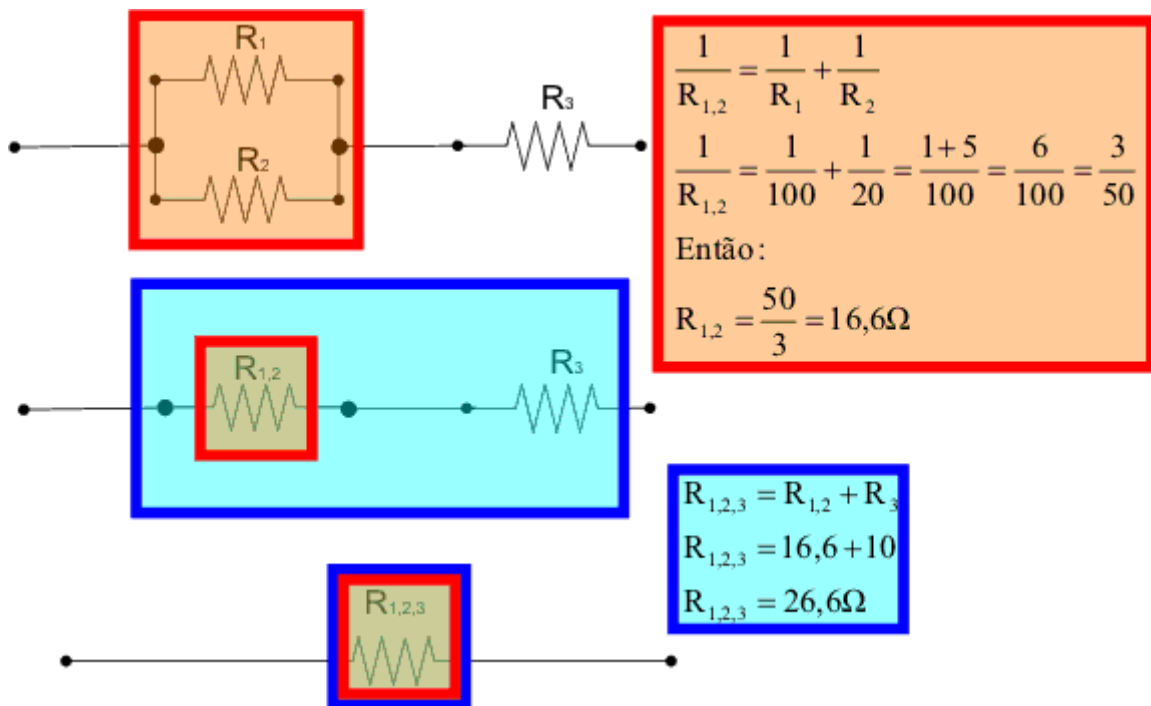
Em cada parte do circuito, a tensão (U) e intensidade da corrente serão calculadas com base no que se conhece sobre circuitos série e paralelos, e para facilitar estes cálculos pode-se reduzir ou redesenhar os circuitos, utilizando resistores resultantes para cada parte, ou seja:

Sendo:

$$R_1 = 100\Omega$$

$$R_2 = 20\Omega$$

$$R_3 = 10\Omega$$



Efeito Joule

A corrente elétrica é resultado de movimentação de ânions, cátions ou elétrons livres, como já vimos. Ao existir corrente elétrica as partículas que estão em movimento acabam colidindo com as outras partes do condutor que se encontra em repouso, causando uma excitação que por sua vez irá gerar um efeito de aquecimento. A este efeito dá-se o nome efeito Joule.

O aquecimento no fio pode ser medido pela lei de joule, que é matematicamente expressa por:

$$Q = i^2 \cdot R \cdot t$$

Onde :

i = intensidade da corrente

R = resistência do condutor

t = tempo pelo qual a corrente percorre o condutor

Esta relação é válida desde que a intensidade da corrente seja constante durante o intervalo de tempo de ocorrência.

Potência Elétrica

A potência elétrica dissipada por um condutor é definida como a quantidade de energia térmica que passa por ele durante uma quantidade de tempo.

$$Pot = \frac{E}{\Delta t}$$

A unidade utilizada para energia é o watt (**W**), que designa joule por segundo (J/s)

Ao considerar que toda a energia perdida em um circuito é resultado do efeito Joule, admitimos que a energia transformada em calor é igual a energia perdida por uma carga q que passa pelo condutor. Ou seja:

$$E = E_{pi} - E_{pf}$$

Mas, sabemos que:

$$E_p = q \cdot v$$

Então:

$$E = q \cdot v_1 - q \cdot v_2$$

$$E = |q| \cdot |(v_1 - v_2)|$$

$$E = |q| \cdot U$$

Logo:

$$Pot = \frac{|q| \cdot U}{\Delta t}$$

Mas sabemos que $i = \frac{|q|}{\Delta t}$, então podemos escrever que:

$$Pot = U \cdot i$$

Por exemplo:

Qual a corrente que passa em uma lâmpada de 60W em uma cidade onde a tensão na rede elétrica é de 220V?

$$Pot = U \cdot i$$
$$i = \frac{Pot}{U} = \frac{60}{220} = 0,27A = 270mA$$

Pela 1ª Lei de Ohm temos que $R = \frac{U}{i}$, então podemos definir duas formas que relacionem a potência elétrica com a resistência.

$$Pot = U \cdot i \quad (1)$$

$$U = R \cdot i \quad (2)$$

$$i = \frac{U}{R} \quad (3)$$

Substituindo-se (2) em (1):

$$Pot = R \cdot i^2$$

Substituindo-se (3) em (1):

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

Então se utilizando do exemplo anterior, qual a resistência do filamento interno da lâmpada?

$$Pot = \frac{U^2}{R}$$
$$R = \frac{U^2}{Pot} = \frac{(220)^2}{60} \cong 806\Omega$$

Consumo de energia

Cada aparelho que utiliza a eletricidade para funcionar, como por exemplo, o computador de onde você lê esse texto, consome uma quantidade de energia elétrica.

Para calcular este consumo basta sabermos a potência do aparelho e o tempo de utilização dele, por exemplo, se quisermos saber quanta energia gasta um chuveiro de 5500W ligado durante 15 minutos, seu consumo de energia será:

$$E = \text{Pot} \cdot \Delta t$$

$$\text{Pot} = 5500\text{W}$$

$$\Delta t = 15\text{min} = 900\text{s}$$

$$E = 5500 \cdot 900 = 4950000\text{J}$$

Mas este cálculo nos mostra que o joule (J) não é uma unidade eficiente neste caso, já que o cálculo acima se refere a apenas um banho de 15 minutos, imagine o consumo deste chuveiro em uma casa com 4 moradores que tomam banho de 15 minutos todos os dias no mês.

Para que a energia gasta seja compreendida de uma forma mais prática podemos definir outra unidade de medida, que embora não seja adotada no SI, é mais conveniente.

Essa unidade é o **quilowatt-hora (kWh)**.

Para calcularmos o consumo do chuveiro do exemplo anterior nesta unidade consideremos sua potência em kW e o tempo de uso em horas, então teremos:

$$E = \text{Pot} \cdot \Delta t$$

$$\text{Pot} = 5500\text{W} = 5,5\text{kW}$$

$$\Delta t = 15\text{min} = 0,25\text{h}$$

$$E = 5,5 \cdot 0,25 = 1,375\text{kWh}$$

O mais interessante em adotar esta unidade é que, se soubermos o preço cobrado por kWh, podemos calcular quanto será gasta em dinheiro por este consumo.

Por exemplo:

Considere que em sua cidade a companhia de energia elétrica tenha um tarifa de 0,300710 R\$/kWh, então o consumo do chuveiro elétrico de 5500W ligado durante 15 minutos será:

$$\text{Custo} = \text{tarifa} \cdot E_{\text{consumida}}$$

$$\text{Custo} = 0,300710 \frac{\text{R\$}}{\text{kWh}} \cdot 1,375\text{kWh}$$

$$\text{Custo} = 0,41\text{R\$}$$

Se considerarmos o caso da família de 4 pessoas que utiliza o chuveiro diariamente durante 15 minutos, o custo mensal da energia gasta por ele será:

$$E = 5,5 \cdot 0,25 \cdot 4 \cdot 30$$

$$E = 165\text{kWh}$$

$$\text{Custo} = \text{tarifa} \cdot E_{\text{consumida}}$$

$$\text{Custo} = 0,300710 \frac{\text{R\$}}{\text{kWh}} \cdot 165\text{kWh}$$

$$\text{Custo} = 49,61\text{R\$}$$

Segunda lei de Ohm

Esta lei descreve as grandezas que influenciam na resistência elétrica de um condutor, conforme cita seu enunciado:

A resistência de um condutor homogêneo de seção transversal constante é proporcional ao seu comprimento e da natureza do material de sua construção, e é inversamente proporcional à área de sua seção transversal. Em alguns materiais também depende de sua temperatura.

Sendo expressa por:

$$R = \frac{\rho \cdot \ell}{A}$$

Onde:

ρ = resistividade, depende do material do condutor e de sua temperatura.

ℓ = largura do condutor

A = área da seção transversal.

Como a unidade de resistência elétrica é o ohm (**Ω**), então a unidade adotada pelo SI para a resistividade é $\Omega \cdot \text{m}$.

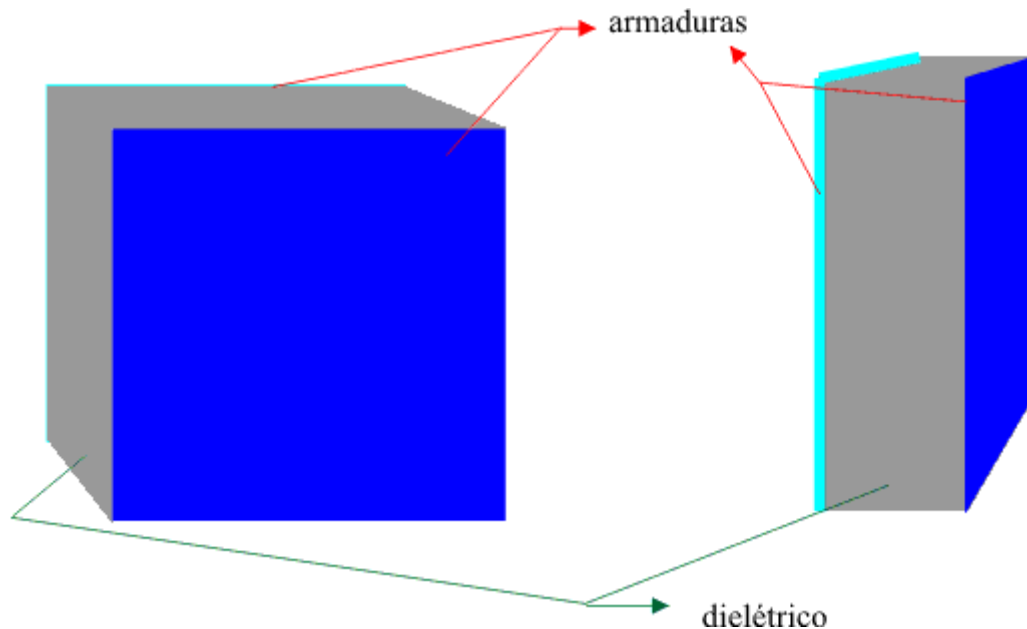
Capacitores

Em circuitos eletrônicos alguns componentes necessitam que haja alimentação em corrente contínua, enquanto a fonte está ligada em corrente alternada. A resolução deste problema é um dos exemplos da utilidade de um capacitor.

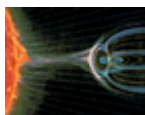
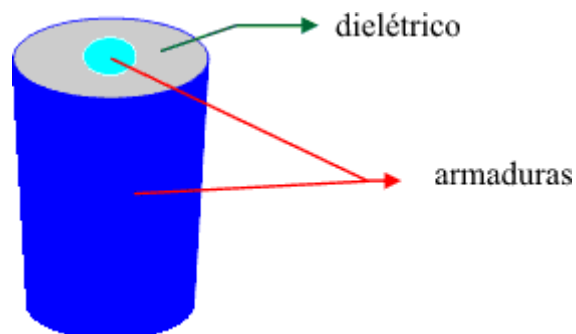
Este equipamento é capaz de armazenar energia potencial elétrica durante um intervalo de tempo, ele é construído utilizando um campo elétrico uniforme. Um capacitor é composto por duas peças condutoras, chamadas armaduras e um material isolante com propriedades específicas chamado dielétrico.

Para que haja um campo elétrico uniforme é necessário que haja uma interação específica, limitando os possíveis formatos geométricos de um capacitor, assim alguns exemplos de capacitores são:

Capacitores planos



Capacitores cilíndricos



Campo Magnético

Ímãs e magnetos

Um ímã é definido com um objeto capaz de provocar um campo magnético à sua volta e pode ser natural ou artificial.

Um ímã natural é feito de minerais com substâncias magnéticas, como por exemplo, a magnetita, e um ímã artificial é feito de um material sem propriedades magnéticas, mas que pode adquirir permanente ou instantaneamente características de um ímã natural.

Os ímãs artificiais também são subdivididos em: permanentes, temporais ou eletroímãs.

- Um ímã permanente é feito de material capaz de manter as propriedades magnéticas mesmo após cessar o processo de imantação, estes materiais são chamados ferromagnéticos.
- Um ímã temporal tem propriedades magnéticas apenas enquanto se encontra sob ação de outro campo magnético, os materiais que possibilitam este tipo de processo são chamados paramagnéticos.
- Um eletroímã é um dispositivo composto de um condutor por onde circula corrente elétrica e um núcleo, normalmente de ferro. Suas características dependem da passagem de corrente pelo condutor; ao cessar a passagem de corrente cessa também a existência do campo magnético.

Propriedades dos ímãs

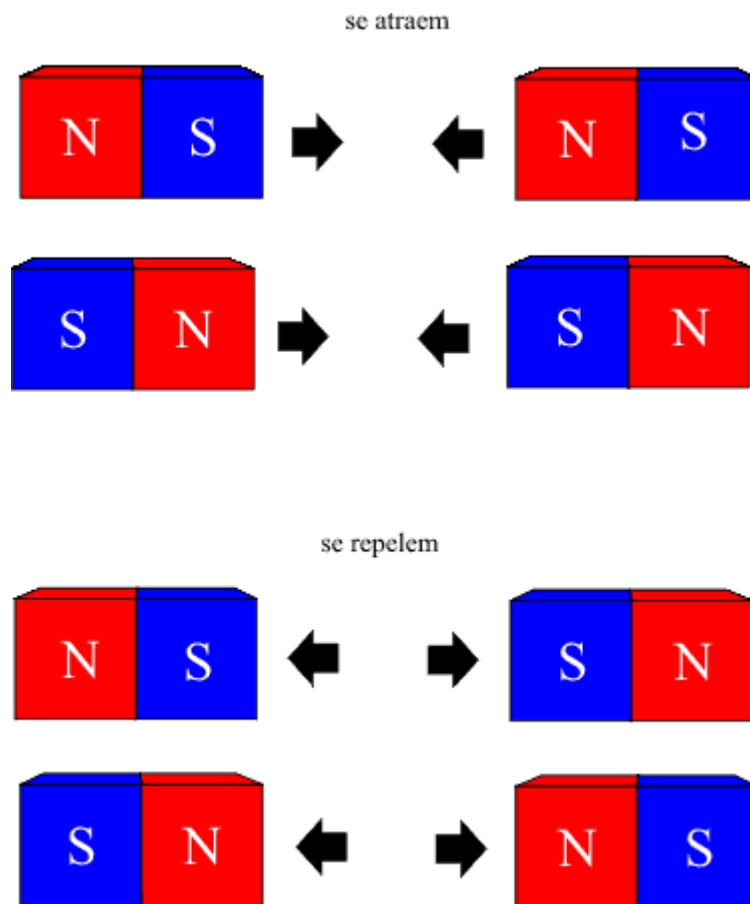
Polos magnéticos

São as regiões onde se intensificam as ações magnéticas. Um ímã é composto por dois polos magnéticos, norte e sul, normalmente localizados em suas extremidades, exceto quando estas não existirem, como em um ímã em forma de disco, por exemplo. Por esta razão são chamados **dipolos magnéticos**.

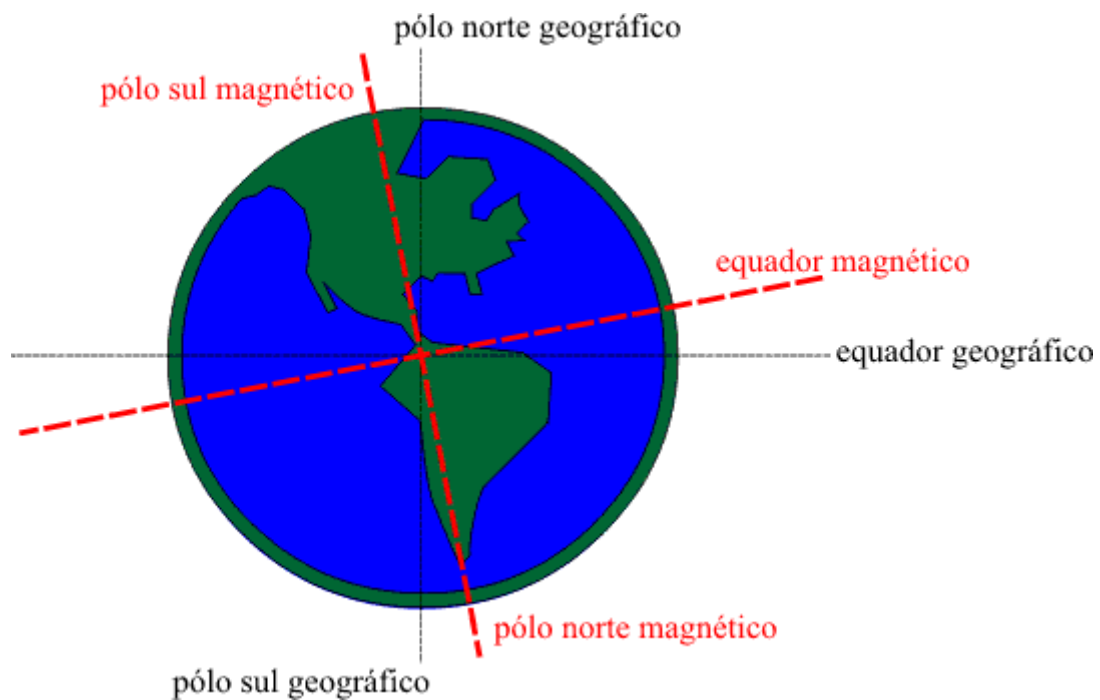
Para que sejam determinados estes polos, se deve suspender o ímã pelo centro de massa e ele se alinhará aproximadamente ao polo norte e sul geográfico recebendo nomenclatura equivalente. Desta forma, o polo norte magnético deve apontar para o polo norte geográfico e o polo sul magnético para o polo sul geográfico.

Atração e repulsão

Ao manusear dois ímãs percebemos claramente que existem duas formas de colocá-los para que estes sejam repelidos e duas formas para que sejam atraídos. Isto se deve ao fato de que polos com mesmo nome se repelem, mas polos com nomes diferentes se atraem, ou seja:



Esta propriedade nos leva a concluir que os polos norte e sul geográficos não coincidem com os polos norte e sul magnéticos. Na verdade eles se encontram em pontos praticamente opostos, como mostra a figura abaixo:



A inclinação dos eixos magnéticos em relação aos eixos geográficos é de aproximadamente 191° , fazendo com os seus polos sejam praticamente invertidos em relação aos polos geográficos.

Interação entre polos

Dois polos se atraem ou se repelem, dependendo de suas características, à razão inversa do quadrado da distância entre eles. Ou seja, se uma força de interação F é estabelecida a uma distância d , ao dobrarmos esta distância a força observada será igual a uma quarta parte da anterior $F/4$. E assim sucessivamente.

Inseparabilidade dos polos de um ímã

Esta propriedade diz que é impossível separar os polos magnéticos de um ímã, já que toda vez que este for dividido serão obtidos novos polos, então se diz que qualquer novo pedaço continuará sendo um dipolo magnético.

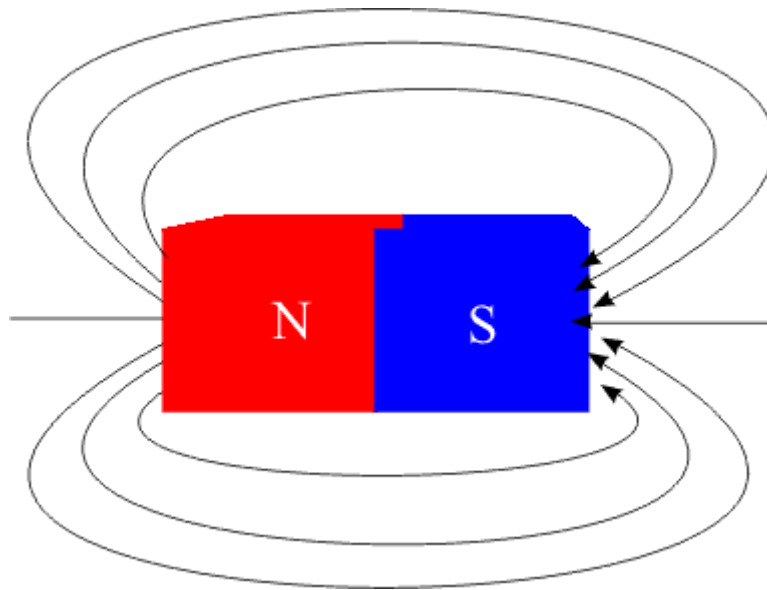
Campo Magnético

É a região próxima a um ímã que influencia outros ímãs ou materiais ferromagnéticos e paramagnéticos, como cobalto e ferro.

Compare campo magnético com campo gravitacional ou campo elétrico e verá que todos estes têm as características equivalentes.

Também é possível definir um vetor que descreva este campo, chamado vetor indução magnética e simbolizado por \vec{B} . Se pudermos colocar uma pequena bússola em um ponto sob ação do campo o vetor \vec{B} terá direção da reta em que a agulha se alinha e sentido para onde aponta o polo norte magnético da agulha.

Se pudermos traçar todos os pontos onde há um vetor indução magnética associado veremos linhas que são chamadas linhas de indução do campo magnético. estas são orientados do polo norte em direção ao sul, e em cada ponto o vetor \vec{B} tangencia estas linhas.

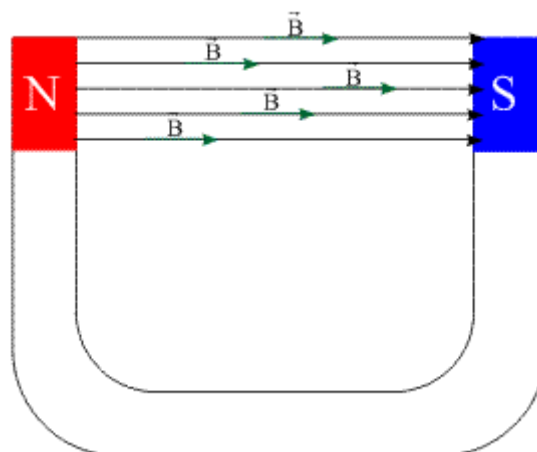


As linhas de indução existem também no interior do ímã, portanto são linhas fechadas e sua orientação interna é do polo sul ao polo norte. Assim como as linhas de força, as linhas de indução não podem se cruzar e são mais densas onde o campo é mais intenso.

Campo Magnético

Campo Magnético Uniforme

De maneira análoga ao campo elétrico uniforme, é definido como o campo ou parte dele onde o vetor indução magnética \vec{B} é igual em todos os pontos, ou seja, tem mesmo módulo, direção e sentido. Assim sua representação por meio de linha de indução é feita por linhas paralelas e igualmente espaçadas.



A parte interna dos ímãs em forma de U aproxima um campo magnético uniforme.

Efeitos de um campo magnético sobre cargas

Como os elétrons e prótons possuem características magnéticas, ao serem expostos à campos magnéticos, interagem com este, sendo submetidos a uma força magnética \vec{F}_M .

Supondo:

- campos magnéticos estacionários, ou seja, que o vetor campo magnético \vec{B} em cada ponto não varia com o tempo;
- partículas com uma velocidade inicial \vec{v} no momento da interação;
- e que o vetor campo magnético no referencial adotado é \vec{B} ;

Podemos estabelecer pelo menos três resultados:

Carga elétrica em repouso

"Um campo magnético estacionário não interage com cargas em repouso."

Tendo um Ímã posto sobre um referencial arbitrário R , se uma partícula com carga q for abandonada em sua vizinhança com velocidade nula não será observado o surgimento de força magnética sobre esta partícula, sendo ela positiva, negativa ou neutra.

Carga elétrica com velocidade na mesma direção do campo

"Um campo magnético estacionário não interage com cargas que tem velocidade não nula na mesma direção do campo magnético."

Sempre que uma carga se movimenta na mesma direção do campo magnético, sendo no seu sentido ou contrário, não há aparecimento de força eletromagnética que atue sobre ela. Um exemplo deste movimento é uma carga que se movimenta entre os polos de um Ímã. A validade desta afirmação é assegurada independentemente do sinal da carga estudada.

Efeitos de um campo magnético sobre cargas

Carga elétrica com velocidade em direção diferente do campo elétrico

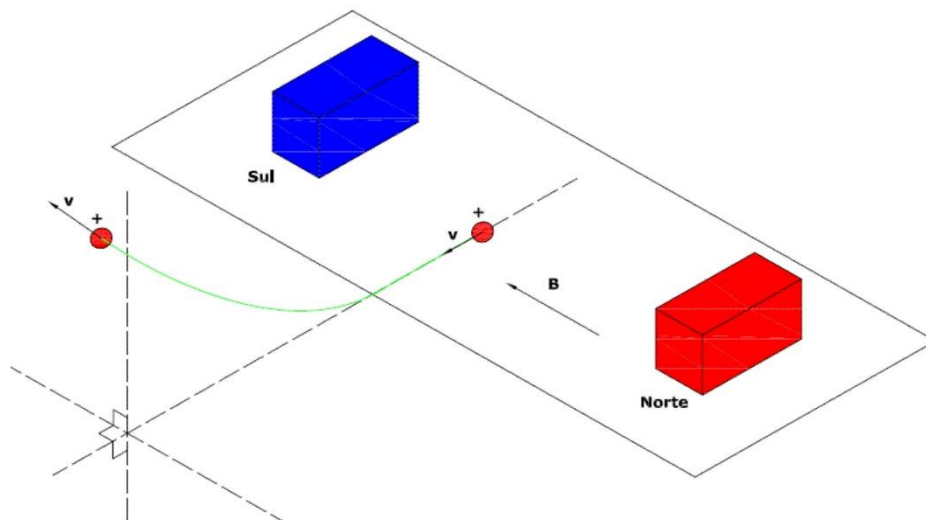
Quando uma carga é abandonada nas proximidades de um campo magnético estacionário com velocidade em direção diferente do campo, este interage com ela. Então esta força será dada pelo produto entre os dois vetores, \vec{B} e \vec{v} e resultará em um terceiro vetor perpendicular a ambos, este é chamado um produto vetorial e é uma operação vetorial que não é vista no ensino médio.

Mas podemos dividir este estudo para um caso peculiar onde a carga se move em direção perpendicular ao campo, e outro onde a direção do movimento é qualquer, exceto igual a do campo.

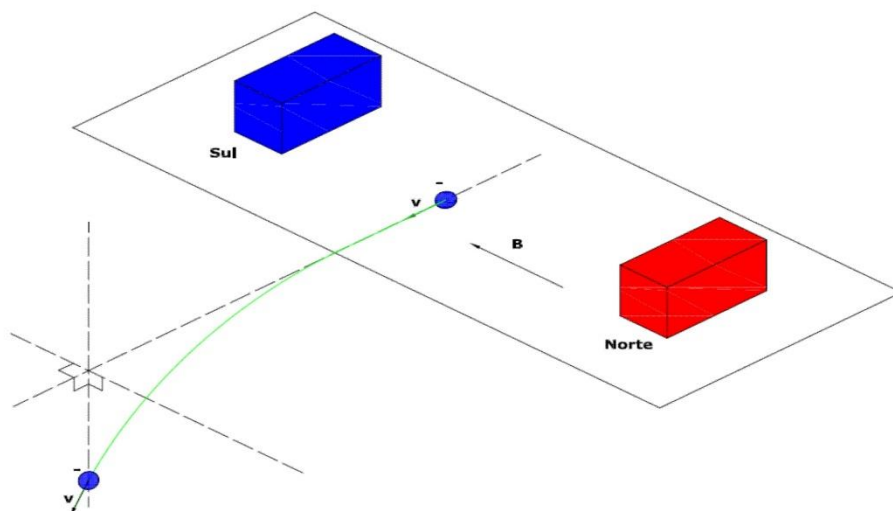
- Carga com movimento perpendicular ao campo

Experimentalmente pode-se observar que se aproximarmos um ímã de cargas elétricas com movimento perpendicular ao campo magnético, este movimento será desviado de forma perpendicular ao campo e à velocidade, ou seja, para cima ou para baixo. Este será o sentido do vetor força magnética.

Para cargas positivas este desvio acontece para cima:



E para cargas negativas para baixo.



A intensidade de \vec{B} será dada pelo produto vetorial $\vec{F}_M \times \vec{v}$, que para o caso particular onde \vec{B} e \vec{v} são perpendiculares é calculado por:

$$B = \frac{F_M}{|q| v}$$

A unidade adotada para a intensidade do Campo magnético é o tesla (**T**), que denomina $\frac{N}{C \cdot m/s}$, em homenagem ao físico iugoslavo Nikola Tesla.

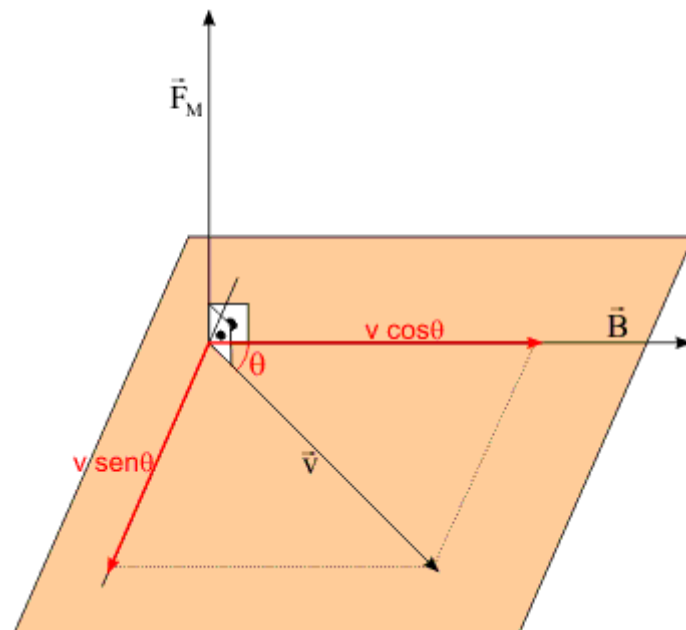
Consequentemente a força será calculada por:

$$F = B |q| v$$

Medida em newtons (N)

- Carga movimentando-se com direção arbitrária em relação ao campo

Como citado anteriormente, o caso onde a carga tem movimento perpendicular ao campo é apenas uma peculiaridade de interação entre carga e campo magnético. Para os demais casos a direção do vetor \vec{F}_M será perpendicular ao vetor campo magnético \vec{B} e ao vetor velocidade \vec{v} .



Para o cálculo da intensidade do campo magnético se considera apenas o componente da velocidade perpendicular ao campo, ou seja, $v \sin \theta$, sendo θ o ângulo formado entre \vec{B} e \vec{v} então substituindo v por sua componente perpendicular teremos:

$$B = \frac{F}{|q| v \cdot \sin \theta} \Leftrightarrow F = B |q| v \cdot \sin \theta$$

Aplicando esta lei para os demais casos que vimos anteriormente, veremos que:

- se $v = 0$, então $F = 0$
- se $\theta = 0^\circ$ ou 180° , então $\sin \theta = 0$, portanto $F = 0$
- se $\theta = 90^\circ$, então $\sin \theta = 1$, portanto $F = B |q| v$.

Regra da mão direita

Um método usado para se determinar o sentido do vetor \vec{F}_M é a chamada regra da mão direita espalmada. Com a mão aberta, se aponta o polegar no sentido do vetor velocidade \vec{v} e os demais dedos na direção do vetor campo magnético.

Para cargas positivas, vetor \vec{F}_M terá a direção de uma linha que atravessa a mão, e seu sentido será o de um vetor que sai da palma da mão.

Para cargas negativas, vetor \vec{F}_M terá a direção de uma linha que atravessa a mão, e seu sentido será o de um vetor que sai do dorso da mão, isto é, o vetor que entra na palma da mão.

Efeito Hall

Em 1879, durante experiências feitas para se medir diretamente o sinal dos portadores de carga em um condutor Edwin H. Hall percebeu um fenômeno peculiar.

Na época já se sabia que quando o fio percorrido por corrente elétrica era exposto a um campo magnético as cargas presentes neste condutor eram submetidos a uma força que fazia com que seu movimento fosse alterado.

No entanto, o que Edwin Hall descreveu foi o surgimento de regiões com carga negativa e outras com carga positiva no condutor, criando um campo magnético perpendicular ao campo gerado pela corrente principal.

Em sua homenagem este efeito ficou conhecido como Efeito Hall.



Força Magnética

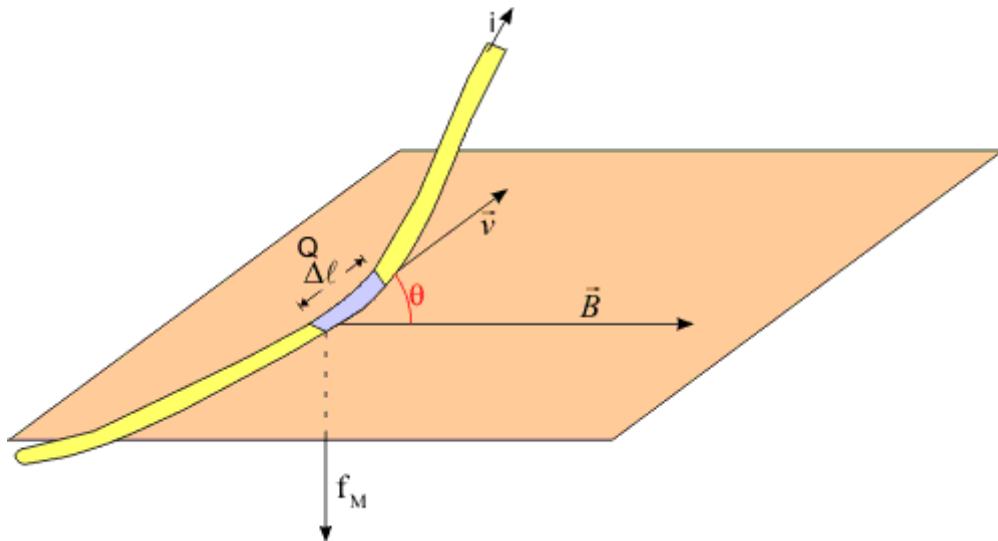
Força magnética sobre um fio condutor

Sempre que uma carga é posta sobre influência de um campo magnético, esta sofre uma interação que pode alterar seu movimento. Se o campo magnético em questão for uniforme, vimos que haverá uma força agindo sobre a carga

com intensidade $F_M = |q| v B \sin\theta$, onde θ é o ângulo formado no plano entre os vetores velocidade e campo magnético. A direção e sentido do vetor \vec{F}_M serão dadas pela regra da mão direita espalmada.

Se imaginarmos um fio condutor percorrido por corrente, haverá elétrons livres se movimentando por sua seção transversal com uma velocidade \vec{v} . No entanto, o sentido adotado para o vetor velocidade, neste caso, é o sentido real da corrente (\vec{v} tem o mesmo sentido da corrente). Para facilitar a compreensão pode-se imaginar que os elétrons livres são cargas positivas.

Como todos os elétrons livres têm carga (que pela suposição adotada se comporta como se esta fosse positiva), quando o fio condutor é exposto a um campo magnético uniforme, cada elétron sofrerá ação de uma força magnética.



Mas se considerarmos um pequeno pedaço do fio ao invés de apenas um elétron, podemos dizer que a interação continuará sendo regida por $F_M = |q| v B \sin\theta$, onde Q é a carga total no segmento do fio, mas como temos um comprimento percorrido por cada elétron em um determinado intervalo de tempo, então podemos escrever a velocidade como:

$$v = \frac{\Delta \ell}{\Delta t}$$

Ao substituírmos este valor em \vec{F}_M teremos a força magnética no segmento, expressa pela notação \vec{f}_M :

$$f_M = |Q| \frac{\Delta \ell}{\Delta t} B \sin\theta$$

$$\frac{|Q|}{\Delta t}$$

Mas sabemos que $\frac{|Q|}{\Delta t}$ indica a intensidade de corrente no fio, então:

$$\vec{f}_M = B i \Delta \ell \sin \theta$$

Sendo esta expressão chamada de Lei Elementar de Laplace.

A direção e o sentido do vetor \vec{f}_M são perpendicular ao plano determinado pelos vetores \vec{v} e \vec{B} , e pode ser determinada pela regra da mão direita espalmada, apontando-se o polegar no sentido da corrente e os demais dedos no sentido do vetor \vec{B} .

Saiba mais...

Se quisermos determinar a força magnética que atua em fio extenso (com dimensões não desprezíveis) devemos fazer com que os comprimentos $\Delta \ell$ sejam cada vez menores e somar os vetores em cada $\Delta \ell_n$, de modo que toda o fio seja descrito, uma forma avançada para se realizar este cálculo é utilizando-se *integral de linha*.

Para o caso particular onde o condutor é retilíneo, todos os vetores serão iguais, então podemos reescrever a Lei elementar de Laplace como $\vec{f}_M = B i \ell \sin \theta$.

Força magnética sobre uma espira retangular

Da mesma forma como um campo magnético uniforme interage com um condutor retilíneo pode interagir com um condutor em forma de espira retangular percorrido por corrente.

Quando a corrente passa pelo condutor nos segmentos onde o movimento das cargas são perpendiculares ao vetor indução magnética há a formação de um "braço de alavanca" entre os dois segmentos da espira, devido ao surgimento de \vec{f}_M . Nos segmentos onde o sentido da corrente é paralelo ao vetor indução magnética não há surgimento de \vec{f}_M pois a corrente, e por consequência \vec{v} , tem mesma direção do campo magnético.

Se esta espira tiver condições de girar livremente, a força magnética que é perpendicular ao sentido da corrente e ao campo magnético causará rotação. À medida que a espira gira a intensidade da força que atua no sentido vertical, que é responsável pelo giro, diminui, de modo que quando a espira tiver girado 90° não haverá \vec{f}_M causando giro, fazendo com que as forças de cada lado do braço de alavanca entrem em equilíbrio.

No entanto, o movimento da espira continua, devido à inércia, fazendo com que esta avance contra as forças \vec{f}_M . Com isso o movimento segue até que as forças \vec{f}_M o anulem e volta a girar no sentido contrário, passando a exercer um movimento oscilatório.

Uma forma de se aproveitar este avanço da posição de equilíbrio é inverter o sentido da corrente, fazendo com que o giro continue no mesmo sentido. Este é o princípio de funcionamento dos motores de corrente contínua, e a inversão de corrente é obtida através de um anel metálico condutor dividido em duas partes.

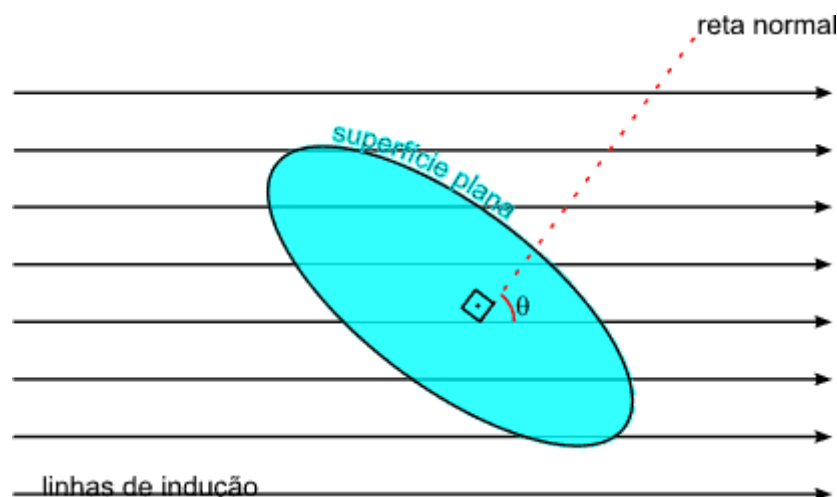


Indução Magnética

Fluxo de Indução

Para que se entenda o que é, e como se origina a indução magnética é necessário que definamos uma grandeza física chamada fluxo de indução magnética. Esta grandeza é vetorial e simbolizada por Φ .

Mesmo que haja fluxo de indução magnética sobre qualquer corpo, independente de sua forma ou material, vamos defini-lo apenas para o caso particular de uma superfície plana de área superficial A , podendo ser a área delimitada por uma espira, imersa em um campo magnético uniforme, desta forma:



Então podemos escrever o fluxo de indução magnética como o produto do vetor indução magnética (campo magnético) \vec{B} pela área da superfície A e pelo cosseno do ângulo θ , formado entre \vec{B} e uma linha perpendicular à superfície, chamada reta normal. Assim:

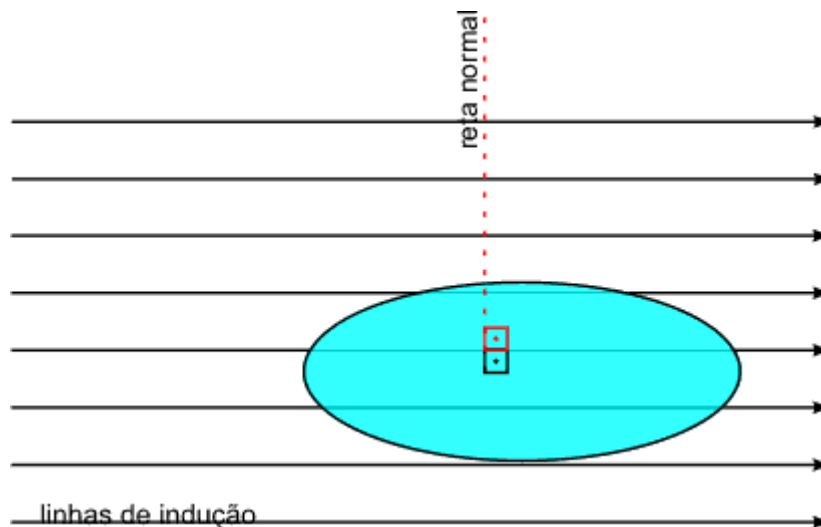
$$\Phi = B \cdot A \cdot \cos\theta$$

A unidade adotada para se medir o fluxo de indução magnética pelo SI é o weber (Wb), em homenagem ao físico alemão Wilhelm Webber, e caracteriza

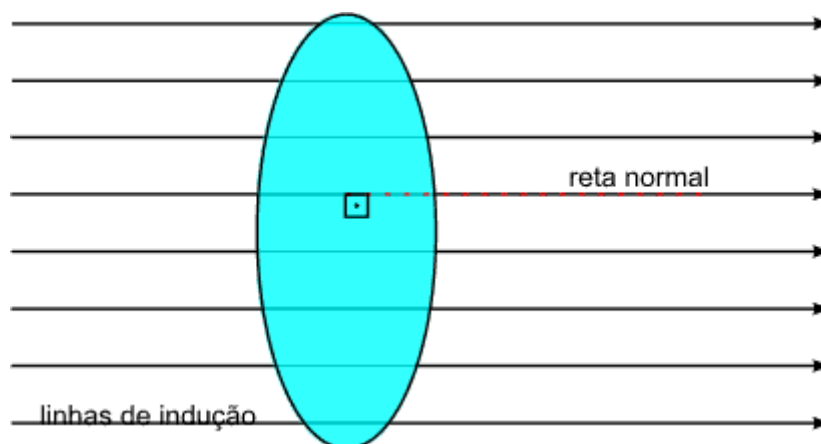
tesla por metro quadrado $\left(\frac{T}{m^2}\right)$.

É possível também se associar o fluxo de indução magnética à quantidade de linhas de indução que atravessam a superfície, de modo que:

- Se a reta normal à superfície for perpendicular ao vetor indução magnética, nenhuma linha de indução o atravessará, portanto o fluxo será nulo. O que é comprovado pela equação do fluxo magnético já que $\cos 90^\circ = 0$

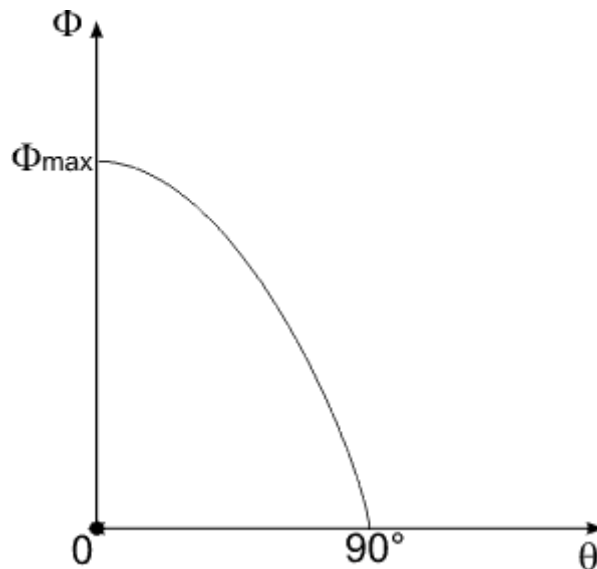


- Se a reta normal à superfície for paralela ao vetor indução magnética, o número máximo de linhas de indução o atravessará, logo o valor do fluxo será máximo já que $\cos 0^\circ = 1$ e que $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ onde $1 \geq \cos \theta \geq 0$.



Se o vetor indução magnética e a área são valores constante e apenas o ângulo θ é livre para variar, então podemos montar um gráfico de $\Phi \times \theta$, onde

veremos a variação do fluxo em função da variação de θ , em uma senoide defasada de $\frac{\pi}{2}$ rad (gráfico do cosseno).



Variação do Fluxo Magnético

Saber apenas calcular o fluxo magnético não resolve nossos problemas de indução, pois para que esta exista, é necessário que haja **variação** no fluxo magnético.

Sabendo que o fluxo magnético é calculado por:

$$\Phi = B \cdot A \cdot \cos\theta$$

Como a equação nos mostra, o fluxo depende de três grandezas, **B**, **A**, e **θ** . Portanto, para que **Φ** varie é necessário que pelo menos uma das três grandezas varie, como veremos a seguir.

Variação do fluxo devido à variação do vetor indução magnética

Imagine um tubo capaz de conduzir em seu interior as linhas de indução geradas por um ímã, por exemplo. Se em um ponto do tubo houver uma redução na área de sua secção transversal, todas as linhas que passavam por uma área **A** terão de passar por uma área **A'**, menor que a anterior. A única forma de todas as linhas de indução passarem, ou seja, de se manter o fluxo, por esta área menor é se o vetor indução aumentar, o que nos leva a concluir que as linhas de indução devem estar mais próximas entre si nas partes onde a área é menor. Como as secções transversais no tubo citadas são paralelas entre si, esta afirmação pode ser expressa por:

$$\Phi = B_1 \cdot A_1 = B_2 \cdot A_2$$

Então, se pensarmos em um ímã qualquer, este terá campo magnético mais intenso nas proximidades de seus pólos, já que as linhas de indução são mais concentradas nestes pontos. Portanto, uma forma de fazer com que Φ varie é aproximar ou afastar a superfície da fonte magnética, variando \vec{B}

Variação do fluxo devido à variação da área

Outra maneira utilizada para se variar Φ é utilizando um campo magnético uniforme e uma superfície de área A .

Como o campo magnético uniforme é bem delimitado, é possível variar o fluxo de indução magnética movimentando-se a superfície perpendicularmente ao campo, entre a parte sob e fora de sua influência. Desta forma, a área efetiva por onde há fluxo magnético varia.

Variação do fluxo devido à variação do ângulo θ

Além das duas formas citadas acima, ainda é possível variar Φ fazendo com que varie o ângulo entre a reta normal à superfície e o vetor \vec{B} . Uma maneira prática e possivelmente a mais utilizada para se gerar indução magnética é fazendo com que a superfície por onde o fluxo passa gire, fazendo com que θ varie.



Indução Magnética

Indução Eletromagnética

Quando uma área delimitada por um condutor sofre variação de fluxo de indução magnética é criado entre seus terminais uma **força eletromotriz (fem)** ou **tensão**. Se os terminais estiverem ligados a um aparelho elétrico ou a um medidor de corrente esta força eletromotriz irá gerar uma corrente, chamada **corrente induzida**.

Este fenômeno é chamado de indução eletromagnética, pois é causado por um campo magnético e gera correntes elétricas.

A corrente induzida só existe enquanto há variação do fluxo, chamado **fluxo indutor**.

Lei de Lenz

Segundo a lei proposta pelo físico russo Heinrich Lenz, a partir de resultados experimentais, a corrente induzida tem sentido oposto ao sentido da variação do campo magnético que a gera.

- Se houver diminuição do fluxo magnético, a corrente induzida irá criar um campo magnético com o mesmo sentido do fluxo;
- Se houver aumento do fluxo magnético, a corrente induzida irá criar um campo magnético com sentido oposto ao sentido do fluxo.

Se usarmos como exemplo, uma espira posta no plano de uma página e a submetemos a um fluxo magnético que tem direção perpendicular à página e com sentido de entrada na folha.

- Se $\Delta\Phi$ for positivo, ou seja, se a fluxo magnético aumentar, a corrente induzida terá sentido anti-horário;
- Se $\Delta\Phi$ for negativo, ou seja, se a fluxo magnético diminuir, a corrente induzida terá sentido horário.

Correntes de Foucault

Quando um fluxo magnético varia através de uma superfície sólida, e não apenas delimitada por um condutor como foi visto em indução eletromagnética, há criação de uma corrente induzida sobre ele como se toda superfície fosse composta por uma combinação de espiras muito finas justapostas.

O nome dado a estas correntes é em homenagem ao físico e astrônomo francês Jean Bernard Léon Foucault, que foi quem primeiro mostrou a existência delas.

Devido à suas dimensões consideráveis, a superfície sofre dissipação de energia por efeito Joule, causando grande aumento de temperatura, o que torna possível utilizar estas correntes como aquecedores, por exemplo, em um forno de indução, que têm a passagem de correntes de Foucault como princípio de funcionamento.

Em circuitos eletrônicos, onde a dissipação por efeito Joule é altamente indesejável, pois pode danificar seus componentes. É frequente a utilização de materiais laminados ou formados por pequenas placas isoladas entre si, a fim de diminuir a dissipação de energia.

Lei de Faraday-Neumann

Também chamada de lei da indução magnética, esta lei, elaborada a partir de contribuições de Michael Faraday, Franz Ernst Neumann e Heinrich Lenz entre 1831 e 1845, quantifica a indução eletromagnética.

A lei de Faraday-Neumann relaciona a força eletromotriz gerada entre os terminais de um condutor sujeito à variação de fluxo magnético com o módulo da variação do fluxo em função de um intervalo de tempo em que esta variação acontece, sendo expressa matematicamente por:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

O sinal negativo da expressão é uma consequência da Lei de Lenz, que diz que a corrente induzida tem um sentido que gera um fluxo induzido oposto ao fluxo indutor.

Transformadores

Os transformadores de tensão, chamados normalmente de transformadores, são dispositivos capazes de aumentar ou reduzir valores de tensão.

Um transformador é constituído por um núcleo, feito de um material altamente imantável, e duas bobinas com número diferente de espiras isoladas entre si, chamadas primário (bobina que recebe a tensão da rede) e secundário (bobina em que sai a tensão transformada).

O seu funcionamento é baseado na criação de uma corrente induzida no secundário, a partir da variação de fluxo gerada pelo primário.

A tensão de entrada e de saída são proporcionais ao número de espiras em cada bobina. Sendo:

$$\frac{U_P}{U_S} = \frac{N_P}{N_S}$$

Onde:

- U_P é a tensão no primário;
- U_S é a tensão no secundário;
- N_P é o número de espiras do primário;
- N_S é o número de espiras do secundário.

Por esta proporcionalidade concluímos que um transformador reduz a tensão se o número de espiras do secundário for menor que o número de espiras do primário e vice-verso.

Se considerarmos que toda a energia é conservada, a potência no primário deverá ser exatamente igual à potência no secundário, assim:

$$P_P = P_S$$

Portanto :

$$U_P \cdot i_P = U_S \cdot i_S$$

Física moderna



Física quântica

Física quântica

Introdução

Até agora, todos os tópicos que estudamos parte de uma área denominada **Física Clássica**. Embora seja muito útil, a Física Clássica não é capaz de explicar corretamente alguns fenômenos físicos importantes, como por exemplo o comportamento da matéria em escalas atômicas e subatômicas.

Em 1900, os estudos da **Física Quântica** foram iniciados, e demoraram cerca de 30 anos para serem "concluídos". Na verdade, ainda não podemos afirmar que essa teoria esteja totalmente pronta, uma vez que se trata de uma área na qual os físicos desenvolvem muitos trabalhos científicos atualmente.

A Física Quântica consegue explicar satisfatoriamente boa parte dos problemas que não tinham respostas até o início do século XX. Além disso, essa teoria é aplicável também a sistemas macroscópicos, tornando ainda mais evidente a sua genialidade.

Nosso objetivo a partir de agora é explorar alguns conceitos dessa nova teoria, a fim de introduzirmos noções básicas de Física Quântica e entendermos por que a Física Clássica não serve para explicar os fenômenos em escalas microscópicas.

Modelo ondulatório para radiações eletromagnéticas

Por volta de 1860, Maxwell desenvolveu quatro equações que, basicamente, sintetizam o comportamento dos fenômenos elétricos e magnéticos.



Maxwell

As equações de Maxwell sugerem que o campo elétrico e o campo magnético propagam-se concomitantemente. Assim, esse conjunto de equações permite fazermos algumas inferências, dentre elas:

- um campo elétrico variável no tempo induz o surgimento de um campo magnético;
- um campo magnético variável no tempo induz o surgimento de um campo elétrico.

Portanto, se forem gerados um campo elétrico e um campo magnético, ambos variáveis no tempo, um será capaz de sustentar a existência do outro, de modo que será perfeitamente possível a coexistência e a propagação de ambos. Ao se propagarem, esses dois campos constituem as **radiações eletromagnéticas**, como as ondas de rádio, a luz visível, as micro-ondas, os raios X, etc.

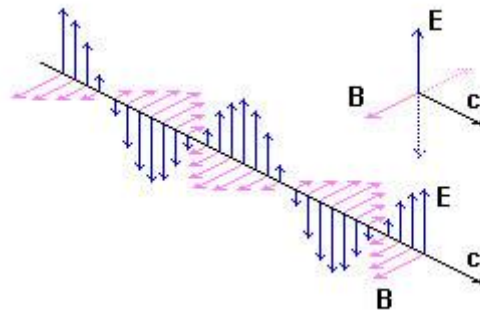
Por apresentarem comportamento ondulatório, as radiações eletromagnéticas também são chamadas de **ondas eletromagnéticas (OEM)**. Heinrich Hertz foi quem provou, experimentalmente, em 1887, a existência das OEM ao gerar e detectar ondas de rádio em seu laboratório.



Heinrich Hertz

De acordo com a teoria proposta por Maxwell para o Eletromagnetismo, as OEM são produzidas por cargas elétricas em movimento acelerado. Um exemplo de aplicação desse princípio são as antenas emissoras de rádio, que geram suas ondas a partir de elétrons oscilantes. Ao realizar um movimento de frequência f , um elétron (ou uma partícula eletricamente carregada) emite uma OEM cuja frequência também é f .

Na figura abaixo, podemos observar uma representação simplificada de como ocorre a propagação de um pulso eletromagnético — uma OEM plana.



Além de serem variáveis no tempo, os campos elétrico e magnético são perpendiculares entre si e à direção de propagação.

Uma OEM não precisa de um meio material para se propagar (como é o caso das ondas mecânicas, por exemplo). Portanto, existe a possibilidade de ela propagar-se no vácuo. A velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo foi calculada por Maxwell antes mesmo de ele saber que a luz era uma OEM. A expressão matemática que nos fornece o valor dessa velocidade, c , é dada por:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

Onde:

$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ (permissividade elétrica do vácuo);

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A}$ (permeabilidade magnética do vácuo);

$c = 2,99792 \times 10^8 \text{ m/s}$ (velocidade da luz).

Os resultados acima valem tanto para o vácuo como para o ar, e coincidem com a velocidade de propagação da luz no ar, obtida experimentalmente. Baseado nisso, Maxwell concluiu que a luz visível também era uma OEM.

É importante salientar que as OEM não interagem com os campos elétricos e magnéticos por onde passam. Desse modo, a luz não sofre desvios ao passar próximo a um corpo eletrizado ou a um polo magnético.

A radiação térmica e a radiação de um corpo negro

Dois conceitos importantes para a Física Quântica são os de radiação térmica e de corpo negro. Estudaremos, a partir de agora, cada um deles.

Radiação térmica

Qualquer superfície de um corpo que esteja a uma temperatura superior ao zero absoluto emite radiações eletromagnéticas. Como essa energia está relacionada à temperatura, é chamada de **radiação térmica**.

A radiação térmica emitida pela superfície de um corpo que se encontra à temperatura ambiente é infravermelha, uma radiação não visível. Se elevarmos a temperatura de uma placa metálica a 600° C, por exemplo, a radiação emitida ainda será infravermelha, mas agora seremos capazes de “percebê-la”, caso aproximemos nossas mãos da placa. Aumentando ainda mais a temperatura até cerca de 700° C, passaremos a ter não só radiações infravermelhas intensas, mas também poderemos observar a emissão de uma luz avermelhada.

Caso a temperatura da placa metálica continue sendo aumentada e supondo que a temperatura de fusão não seja atendida, observaremos radiações infravermelhas cada vez com maior intensidade, além de a placa passar, gradualmente, do vermelho para o alaranjado, depois para o amarelo, e assim por diante, tendendo a atingir a cor branca.

À medida que a luz azul passa a ser emitida, sua mistura com as demais luzes nos dá a sensação do branco, tal como acontece com o filamento aceso de uma lâmpada incandescente. Caso um corpo que já atingiu a coloração branca siga tendo a temperatura aumentada, ele tenderá a adquirir uma coloração azulada. É por essa razão que as estrelas azuis são as mais quentes.

Lei de Stefan-Boltzmann

Em 1879, Stefan obteve, empiricamente, a equação que Boltzmann demonstrou matematicamente em 1884. A expressão é:

$$Pot = e\sigma AT^4$$

(Lei de Stefan-Boltzmann)

Onde:

Pot = potência total irradiada pela superfície externa de um corpo que se encontra a uma temperatura absoluta T;

e = emissividade ou poder de emissão do corpo, dependendo da natureza da superfície emissora e podendo assumir valores entre 0 e 1 (grandeza adimensional);

σ = constante de Boltzmann, cujo valor é $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$;

A = área da superfície emissora.

É importante salientar que, de acordo com a Lei de Stefan-Boltzmann, a potência irradiada depende da temperatura absoluta da superfície do corpo na quarta potência, sendo, portanto, o fator determinante na equação.

A lei de Stefan-Boltzmann também pode ser expressa da seguinte forma:

$$I = e\sigma T^4$$

Onde **I** é a intensidade total da radiação térmica emitida pelo corpo, ou seja, a quantidade total de energia emitida por unidade de tempo e por unidade de área da superfície externa do corpo.

De acordo com a teoria eletromagnética clássica, a radiação térmica é emitida por cargas elétricas do corpo, oscilando em várias frequências perto da superfície devido à agitação térmica. Assim, a radiação é emitida em uma faixa contínua de frequências, ou seja, em um espectro contínuo:



Segundo a Física Clássica, ao incidir radiação térmica em um corpo, as cargas elétricas próximas à superfície do corpo se agitam, de modo que parte da energia incidente no corpo é absorvida por ele. Em 1859, Gustav Kirchhoff percebeu que o poder de absorção de um corpo é igual ao seu poder de emissão. Matematicamente:

$$a = e$$

Portanto, um corpo bom absorvedor de radiação térmica (mau refletor) também é um bom emissor. Analogamente, um mau absorvedor (bom refletor) é também um mau emissor.

Radiação de um corpo negro

Corpo negro é um corpo ideal que absorve toda a radiação térmica incidente. É, portanto, um absorvedor perfeito, uma vez que seu poder de absorção é igual a 1.

Ainda que seja uma idealização, há diversas formas de obtermos corpos com comportamentos semelhantes ao de um corpo negro. Por exemplo, podemos revestir um corpo qualquer com uma camada irregular de pigmentos pretos.

Como, emissividade e absorvidade são iguais, de acordo com a lei de Kirchhoff, um corpo negro também terá emissividade igual a 1. Desse modo, além de um absorvedor ideal, um corpo negro é também um emissor ideal.

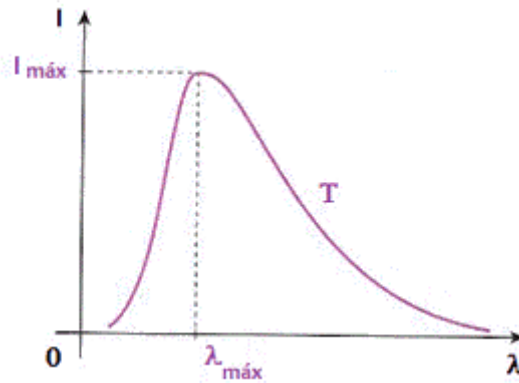
A lei de Stefan-Boltzmann para um corpo negro passa a ser:

$$I = \sigma T^4$$

Qualquer corpo negro, na mesma temperatura, emite radiação térmica com a mesma intensidade total. Cada radiação de determinado comprimento de onda, na mesma temperatura, também é emitida com a mesma intensidade por todos os corpos negros, não importando o material de que sejam feitos.

O estudo dos corpos negros é de grande importância para a Física, já que a radiação térmica que emitem tem comportamento universal. A análise do espectro de emissão desses corpos foi ponto-chave para o desenvolvimento das teorias de **quantização de energia**.

O gráfico abaixo apresenta a intensidade da radiação emitida por um corpo negro em função do comprimento de onda em determinada temperatura.

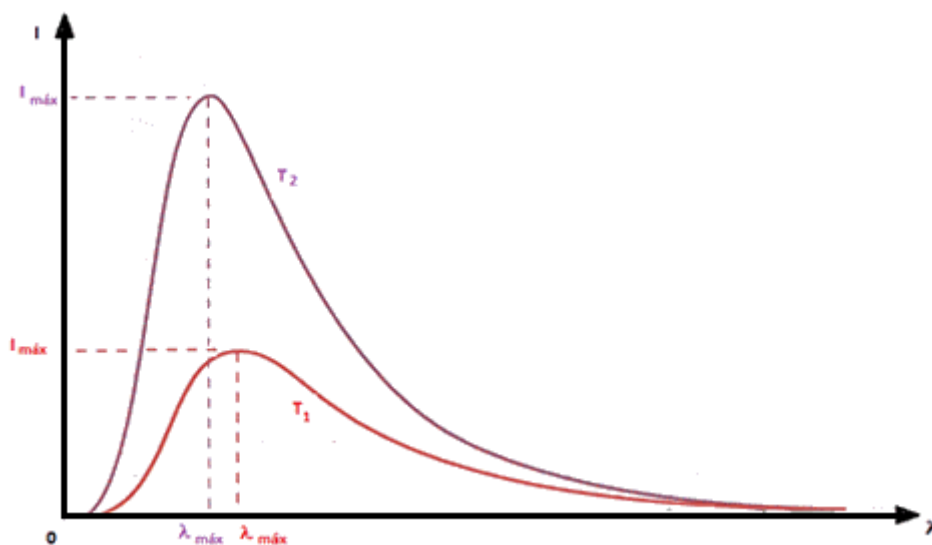


Analisando o gráfico acima, é importante notar que:

- a radiação térmica emitida é composta por inúmeras radiações, distribuídas em uma faixa contínua de comprimentos de onda;
- há uma radiação, de certo comprimento de onda, que é emitida com máxima intensidade.

Lei de Deslocamento de Wien

No gráfico apresentado a seguir, podemos observar o comportamento de radiações emitidas por um corpo negro em duas temperaturas distintas.



Ao passar da temperatura T_1 para a T_2 , é importante notar que:

- a intensidade de cada radiação emitida, de determinado comprimento de onda, aumenta, bem como a intensidade total da radiação emitida e da potência total irradiada;
- o ponto máximo da curva se desloca à medida que o comprimento de onda para o qual a intensidade é máxima diminui.

Em 1893, Wilhelm Wien demonstrou que o ponto de máximo da curva $I \times \lambda$ desloca-se de acordo com a expressão abaixo, denominada de **lei de deslocamento de Wien**:

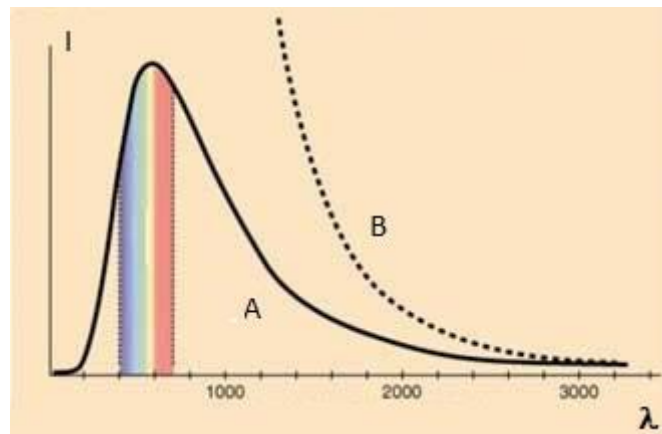
$$\lambda_{máx} = \frac{b}{T}$$

Onde **b** é a **constante de dispersão de Wien**, cujo valor é $b = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m.K}$

Modelo quântico para as radiações eletromagnéticas

A teoria eletromagnética de Maxwell é muito útil para explicar os fenômenos relacionados à propagação das radiações eletromagnéticas. Entretanto, não serve para explicar alguns fenômenos que ocorrem na interação dessas radiações com a matéria, tampouco alguns fatos relacionados à emissão.

Um exemplo disso é o espectro de emissão do corpo, que foi objeto de estudo de muitos cientistas durante meio século, uma vez que as ideias da época apresentavam incoerências entre as previsões teóricas e os resultados experimentais.



Legenda:

- A: curva obtida a partir de resultados experimentais;
- B: curva prevista pela teoria clássica.

O fato do comportamento do gráfico da intensidade da radiação do corpo negro em função do comprimento de onda previsto por Maxwell ser muito diferente do obtido por meio de dados experimentais ficou conhecido, no século XIX, como **catástrofe do violeta**.

Em 1900, Max Planck apresentou uma nova teoria, que entrava em conflito com a teoria clássica aceita até então, com o objetivo de solucionar o problema. Planck supôs que, na superfície de um corpo negro, havia osciladores harmônicos simples (OHS, representados pelas cargas elétricas oscilantes) capazes de assumir determinados valores de energia. Matematicamente:

$$E = nhf$$

Onde:

n = número quântico;
h = constante de Planck (h = 6,63x10⁻³⁴ J.s);
f = frequência do oscilador.

Cada valor de n representará um **estado quântico** diferente desse oscilador e será sempre um múltiplo de hf, o que significa que a energia do oscilador é **quantizada**, isto é, só pode assumir certos valores.

De acordo com a Física Clássica, um OHS pode ter qualquer valor de energia e não depende da frequência, e sim da amplitude das oscilações. Isso torna a atitude de Planck de propor uma nova teoria contrária a esses princípios bastante corajosa. Além disso, ele propôs que os OHS existentes na superfície do corpo emitem ou absorvem energia apenas ao passarem de um estado quântico para outro.

Assim, se o oscilador passa de um nível maior de energia para um nível menor, por exemplo, de n=2 para n=1, ele emite uma quantidade discreta de energia, que corresponde, matematicamente, à diferença entre as energias dos dois níveis. Caso passe de um nível de menor de energia para um de maior, como de n=1 para n=2, ele absorve uma quantidade discreta de energia, analogamente ao caso anterior. Isso significa que a emissão e absorção de energia também ocorrem em quantidades quantizadas.

Cada porção discreta de energia foi denominada **quantum**, termo que vem do latim, cujo plural é **quanta**. Em virtude disso, a teoria de Planck ganhou popularidade com o nome de **teoria dos quanta**.

Utilizando-se as formulações feitas por Max Planck para a quantização de energia, foi possível obter-se um novo gráfico de intensidade da radiação emitida pelo corpo em função do comprimento de onda em pleno acordo com os resultados experimentais.

Entretanto, uma nova questão perturbava os físicos da época: se a energia é emitida apenas em quantidades bem determinadas, o que implica determinados comprimentos de onda e frequências bem estabelecidos, como o espectro da radiação térmica pode ser contínuo? A resposta é a seguinte: como há um número muito grande de osciladores com energias distintas, a probabilidade de serem emitidas radiações de quaisquer frequências também é muito grande.

Vale salientar que Planck nunca afirmou que as radiações eletromagnéticas se propagavam em quantidades discretas de energia. Nesse ponto de vista, ele acreditava que a teoria proposta por Maxwell era coerente. Portanto, para Planck, quantizados eram os osciladores, e não a radiação eletromagnética.

É importante que saibamos que a ideia do quantum, mais tarde denominado **fóton**, foi muito útil para esclarecer diversos outros fenômenos que a Física Clássica não era capaz de explicar corretamente.

Efeito fotoelétrico

O efeito fotoelétrico é um bom exemplo da incompatibilidade dos resultados experimentais com a teoria eletromagnética proposta por Maxwell.

Resumidamente, é o fenômeno no qual ocorre a emissão de elétrons de uma superfície metálica ao ser exposta à radiação eletromagnética.

Heinrich Hertz foi um dos primeiros cientistas a observar esse fenômeno. Ele utilizou um dispositivo que gerava faíscas, constituído por dois circuitos: um para gerar ondas e outro para detectá-las, separados por certa distância. Tratava-se, basicamente, de um equipamento com duas placas metálicas conectadas em potenciais diferentes, onde ocorriam descargas elétricas.

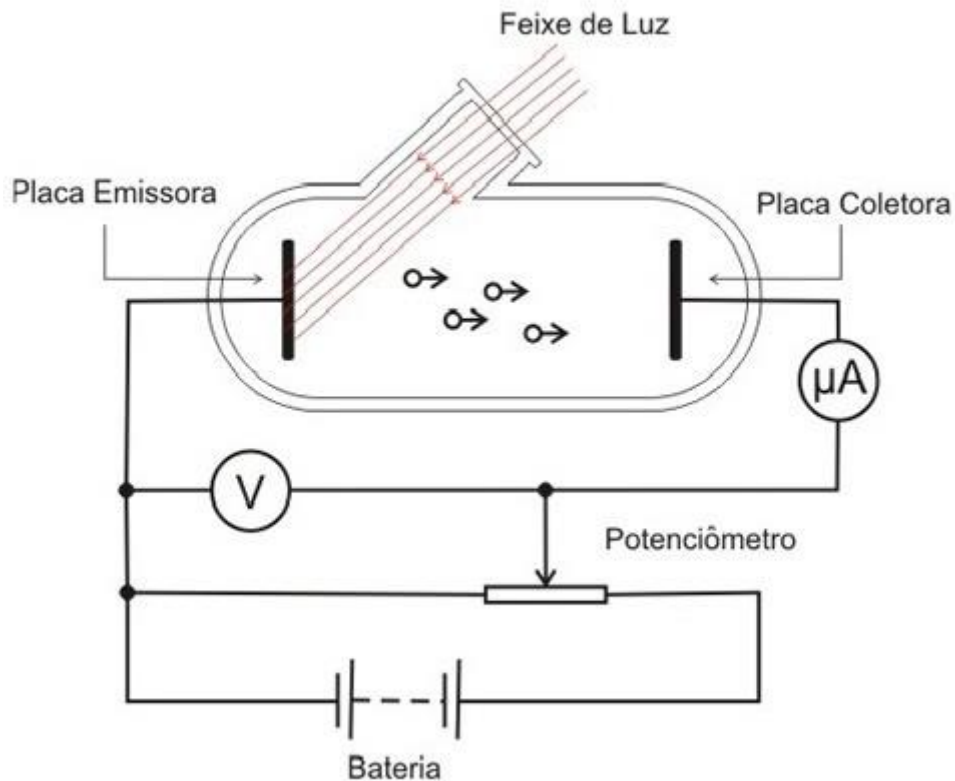
Acidentalmente, Hertz verificou que as faíscas da placa geradora produziam faíscas na placa receptora. Após novas tentativas, concluiu que a luz era capaz de gerar faíscas e que o fenômeno era observado apenas com a luz ultravioleta.

O experimento de Hertz serviu para confirmar a existência das ondas eletromagnéticas e a teoria de Maxwell sobre a propagação da luz, uma vez que o cientista conseguiu produzir ondas eletromagnéticas, hoje conhecidas como micro-ondas. A novidade foi o efeito da luz ultravioleta na descarga elétrica, visto que esse fato ainda não tinha explicação.

Em 1889, Wilhelm Hallwachs mostrou que, ao serem iluminadas com radiação ultravioleta, as superfícies metálicas como o zinco, o potássio e o sódio, ejetavam partículas de carga negativa. Nessa época, ainda não se tinha conhecimento sobre a existência do elétron, que só foi descoberto em 1897.

Philipp von Lenard, assim como Thomson, também mediu a relação carga/massa das partículas ejetadas e deduziu que o aumento de faíscas que Hertz havia observado era resultado da emissão de elétrons, aos quais deu o nome de **fotoelétrons**.

Na figura abaixo, tem-se a ilustração de um aparelho que possibilita observarmos o efeito fotoelétrico:



No aparato experimental acima, certa luz com frequência f ilumina uma superfície metálica no interior de um tubo mantido a vácuo, e elétrons são emitidos dessa superfície. As duas placas são mantidas a uma diferença de potencial V . Caso os elétrons emitidos possuam energia suficiente para atingir o coletor, serão capturados, e isso será observado na forma de uma corrente elétrica i , que é registrada no amperímetro A . A frequência f , a intensidade I da luz, a diferença de potencial V e o material do emissor podem variar.

Os resultados experimentais obtidos nesse experimento estão listados abaixo:

- A corrente elétrica medida no amperímetro surge quase instantaneamente ao processo de iluminação da superfície emissora, mesmo que a luz incidente tenha baixa intensidade. O atraso entre o tempo de iluminação e o surgimento da corrente elétrica é da ordem de 10^{-9} s e independe da intensidade da luz incidente.
- Se fixarmos a frequência e a ddp, a corrente elétrica será diretamente proporcional à intensidade da luz incidente.
- Se fixarmos a frequência e a intensidade da luz incidente, a corrente irá decrescer à medida que a ddp aumentar. A corrente elétrica cessa para determinado valor de V , denominado **potencial elétrico de frenagem** ou **potencial elétrico de corte**, V_0 , que independe da intensidade da luz incidente.
- Para certo material emissor, o potencial de frenagem varia linearmente com a frequência, de acordo com a equação:

$$eV_0 = hf - ew_0$$

Onde w_0 é uma constante denominada **função trabalho**, sendo, portanto, função do material. Lembrando que h é a constante de Planck, cujo valor é $h = 6,63 \times 10^{-34}$ Js, e e é a carga do elétron ($e = 1,6 \times 10^{-19}$ C).

Para cada material, existe uma **frequência de corte** ou **limiar de frequência**, abaixo da qual os elétrons não são emitidos, não importando a intensidade da luz incidente.

Contradições da Física clássica ao efeito fotoelétrico

Dos itens listados no tópico anterior, o único que está de acordo com a teoria eletromagnética clássica é o que diz que, caso fixemos a frequência e a ddp, a corrente elétrica será diretamente proporcional à intensidade da luz incidente.

O item que fala sobre a existência de uma frequência de corte para a qual os elétrons começam a ser emitidos nem era previsto pela teoria clássica, de modo que foi concebido baseado apenas em resultados experimentais.

Quanto aos resultados previstos pela teoria ondulatória clássica, a energia luminosa deveria estar uniformemente distribuída sobre a frente de onda, ou seja, a energia incidente estaria distribuída de forma homogênea sobre a superfície metálica do emissor. Sendo assim, se a luz incidente fosse fraca, deveria haver um intervalo de tempo considerável entre o instante que a luz começa a incidir sobre a superfície e a ejeção do elétron.

Durante esse intervalo, o elétron ficaria absorvendo energia da frente de onda até que conseguisse acumular quantidade suficiente para ser ejetado da placa.

A teoria clássica afirma ainda que a corrente elétrica é proporcional à intensidade da luz emissora. Isso significa que, se fixarmos a intensidade da luz incidente, a corrente também será fixada, sem decair. Além disso, a energia cinética dos elétrons é proporcional à intensidade da radiação, de forma que cada intensidade corresponde a certo valor de energia cinética e a um respectivo potencial de corte, o que não era observado nos experimentos.

Por fim, o efeito fotoelétrico deveria ocorrer para qualquer frequência de luz, desde que ela fosse suficientemente intensa para fornecer a energia necessária à ejeção de elétrons.

Interpretação de Einstein para o efeito fotoelétrico

Em 1905, Einstein propôs uma nova teoria para a luz, utilizando o efeito fotoelétrico para comprovar se suas ideias estavam, de fato, corretas.

Inicialmente, Planck havia restringido o conceito de quantização de energia apenas aos elétrons existentes nas paredes de um corpo negro. Para ele, ao irradiar energia, ela se espalhava pelo espaço, assim como as ondas se espalham na água. Einstein, por sua vez, propôs que a energia estaria quantizada em pacotes concentrados que, mais tarde, passariam a ser chamados de **fótons**.

Einstein concentrou sua atenção na forma corpuscular como a luz é emitida e absorvida, e não na forma ondulatória como ela se propaga. Argumentou que a exigência de Planck de que a energia das ondas eletromagnéticas emitidas por uma fonte fosse um múltiplo de hf implicava que, ao ir de um estado de energia nhf para um estado cuja energia era $(n-1)hf$, a fonte emitiria um pulso discreto de radiação eletromagnética com energia hf .

Supôs, inicialmente, que esse pacote de energia estaria localizado em um pequeno volume do espaço e que permaneceria localizado nesse local à medida que se afastasse da fonte com velocidade c , a velocidade da luz.

A energia E do pacote, ou melhor, do fóton, está relacionada com a frequência f segundo a equação:

$$E = hf$$

No efeito fotoelétrico, um fóton é completamente absorvido por um elétron no fotocátodo. Assim, ao ser emitido da superfície do metal, a energia cinética do elétron será dada por:

$$K = hf - w$$

Onde:

hf = energia do fóton incidente absorvido;

w = trabalho necessário para remover o elétron do metal.

Alguns elétrons são mais fortemente ligados do que os outros, de modo que, no caso da ligação mais fraca e de nenhuma perda interna, o fotoelétron vai emergir com energia cinética máxima, $K_{\text{máx}}$. Assim:

$$K_{\text{máx}} = hf - w_0$$

Onde w_0 , uma energia característica do metal, denominada função trabalho, é a energia mínima necessária para que um elétron atravesse a superfície do metal e escape das forças atrativas que o prendem a esse metal.

Já que $K_{\text{máx}} = eV_0$, podemos reescrever a equação do efeito fotoelétrico como:

$$eV_0 = hf - w_0$$

Quanto à objeção de que $K_{\text{máx}}$ depende da intensidade da iluminação, a teoria do fóton concorda integralmente com os resultados obtidos experimentalmente: dobrar a intensidade da luz simplesmente dobra o número de fótons e, consequentemente, dobra a intensidade da corrente elétrica, mas isso não muda a energia hf de cada fóton.

Quanto à existência de um limiar de frequências, essa ideia é facilmente eliminada quando a energia cinética máxima for nula:

$$hf_0 = w_0$$

Isso quer dizer que um fóton de frequência f_0 tem exatamente a energia necessária para ejetar fotoelétrons e, portanto, nenhum excesso de energia cinética.

Já a ausência de retardamento é explicada pelo fato de que a energia necessária é fornecida em pacotes concentrados. Desse modo, ao contrário do que se pensava, ela não é espalhada uniformemente sobre uma área extensa, já que, se houver luz incidindo sobre o cátodo, haverá ao menos um fóton para atingi-lo, o qual será instantaneamente absorvido por um algum átomo e provocará a emissão imediata de um fóton.

Por fim, o modelo de Einstein afirma que um fóton de frequência f tem exatamente a energia hf , e não múltiplos de hf . No entanto, é evidente que, se estivermos tratando de n fótons com frequência f , a energia nessa frequência será nhf .

Dualidade onda-partícula

Agora que já estudamos o modelo ondulatório proposto por Maxwell, o qual afirma que a luz é uma onda eletromagnética e cujo modelo quântico seria composto por um conjunto de partículas chamadas fótons, nos interessa saber se, afinal, a luz é uma onda ou partícula.

A verdade é que não há uma resposta única para essa pergunta. O correto é dizer que depende do fenômeno, uma vez que a luz ora se comporta como onda, ora como partícula. Portanto, não podemos afirmar nada sobre o que a luz de fato é, mas sim, em como ela se comporta em determinados fenômenos.

Alguns fenômenos físicos como, por exemplo, a interferência e a difração da luz, são explicados pelo modelo ondulatório. Já o efeito fotoelétrico, para ser explicado corretamente, deve fazer uso do modelo quântico de fótons. Desse modo, ambos os modelos são importantes e complementares.

Chamamos de **dualidade onda-partícula** esse duplo comportamento da luz.

Vale ressaltar que tanto a luz quanto as demais radiações eletromagnéticas não exibem os dois comportamentos simultaneamente. Esse é o **Princípio da Complementaridade** proposto por Niels Bohr.



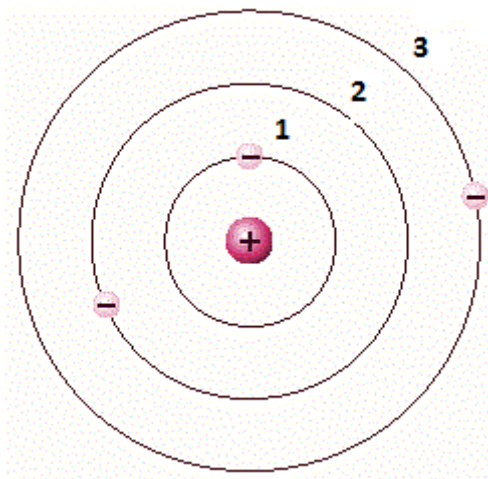
Niels Bohr

Átomo de Bohr

Em um átomo, os elétrons encontram-se em diferentes níveis de energia. Os elétrons dos níveis de mais baixa energia estão mais próximos do núcleo; já os que estão em níveis de mais alta energia, situam-se mais distantes do núcleo.

A figura abaixo apresenta um átomo cujos elétrons estão em diferentes níveis de energia. Para que o elétron do nível 1 passe para o nível 2, precisamos fornecer certa energia a ele, já que o núcleo exerce uma força de atração sobre esse elétron.

Desse modo, no nível 2, o elétron encontra-se em um nível de energia maior do que quando ocupava o nível 1.



Modelo Atômico de Bohr

O átomo sempre foi estudado por meio de modelos propostos pelos cientistas. Cada modelo trouxe hipóteses baseadas em formulações teóricas e nos

resultados experimentais obtidos pelos seus respectivos autores, permanecendo válido até que apresentasse falhas na explicação dos fenômenos. Caso isso ocorresse, os pesquisadores deveriam propor novos modelos ou adaptações às teorias já desenvolvidas.

Em 1911, Ernest Rutherford propôs um modelo que descrevia o átomo como um sistema planetário, no qual havia um núcleo central com carga positiva e elétrons em órbita ao redor. Embora importante, o modelo de Rutherford não explicava corretamente alguns fenômenos. De acordo com a teoria proposta por Maxwell, qualquer carga dotada de aceleração deveria emitir radiação eletromagnética, perdendo energia. Visto que um elétron do átomo de Rutherford descrevia uma órbita circular e, portanto, possuía aceleração centrípeta, ele deveria emitir permanentemente radiação, reduzindo seu nível de energia. Desse modo, deveria descrever uma trajetória espiralada até cair no núcleo, o que não ocorria, uma vez que as eletrosferas dos átomos são estáveis.

Além disso, há outro problema no modelo de Rutherford. Segundo Maxwell, a radiação emitida pelo elétron tem a mesma frequência do movimento. Assim, como a frequência do movimento do elétron deveria variar continuamente na ida até o núcleo, o elétron também deveria emitir continuamente radiação com frequência variável. Porém, a radiação emitida por um átomo deve ter apenas frequências de determinados valores, diferentemente da radiação térmica emitida por um corpo, a qual apresenta um espectro contínuo.

Em virtude dessas incoerências, Niels Bohr desenvolveu uma nova teoria, baseada em ideias quânticas. Bohr inferiu que, para a eletrosfera de um átomo ser mantida estável, os elétrons desse átomo deveriam assumir certos níveis de energia, chamados **estados estacionários** ou **quânticos**, cada um deles correspondendo a uma determinada energia. Ele postulou que, em um estado estacionário, o átomo não emitia radiação, de modo que sua eletrosfera se mantinha estável.

Gustav Hertz e James Franck, no ano seguinte, confirmaram a existência dos estados estacionários. O estado estacionário, cujos elétrons estão nos mais baixos níveis de energia, é chamado de **estado fundamental**; os demais estados permitidos são chamados de **estados excitados**. Isso quer dizer que são permitidos apenas o estado fundamental e os demais estados excitados — quaisquer outros estados são proibidos.

Considerando o caso particular do hidrogênio, que é constituído por apenas um elétron, os níveis de energia podem ser obtidos pela expressão abaixo:

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} eV$$

Onde o **número quântico principal** é simbolizado pela letra n ($= 1, 2, 3, \dots$) e E_n é a energia correspondente a cada número quântico.

É importante ressaltar que $n = 1$ corresponde ao estado fundamental de energia. Além disso, os valores de energia são negativos, o que significa que o elétron

precisa receber energia para chegar ao nível, deixando de interagir com o núcleo nesse momento, ou perdendo o vínculo com o átomo.

Bohr também postulou que todo átomo, ao passar de um estado estacionário para outro, emite ou absorve um quantum de energia exatamente igual à diferença entre as energias correspondentes a esses estados. Esse resultado não pode ser explicado pela teoria eletromagnética clássica, uma vez que, de acordo com ela, a frequência da radiação emitida está relacionada com a frequência do movimento do elétron. Hoje sabemos que isso não está correto, visto que a frequência da radiação emitida relaciona-se apenas com a diferença de energia entre os estados inicial e final.

Segundo Bohr, os elétrons descrevem trajetórias circulares ao redor de um núcleo positivo devido à força de atração dada pela *Lei de Coulomb* que, nesse caso, é a força centrípeta do movimento. Os raios dessas trajetórias só podem assumir certos valores bem determinados. Para o hidrogênio, por exemplo, os valores permitidos para os raios são dados pela expressão abaixo:

$$r_n = n^2 r_1$$

Onde:

n = número quântico ($n = 1, 2, 3, \dots$);

r_n = raio da órbita correspondente ao número quântico n ;

r_1 = raio correspondente ao estado fundamental de energia, dado por:

$$r_1 = \frac{h^2}{4\pi^2 K Z e^2 m}$$

Onde:

h = constante de Planck ($h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}$);

K = constante eletrostática do vácuo ($K = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$);

Z = número atômico do elemento químico;

e = carga do elétron ($e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$);

m = massa do elétron ($m = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$).



Relatividade

Relatividade

Introdução

Ao estudarmos a Mecânica Clássica, vimos que a velocidade é uma grandeza **relativa**, uma vez que depende do referencial em que é medida.

Isso nos leva a inferir que outras grandezas que dependem da velocidade também devem ser relativas, como a energia cinética e a quantidade de movimento, por exemplo.

A energia potencial gravitacional também é uma grandeza relativa, já que seu valor depende do nível de referência adotado para mensurar as alturas.

Já **comprimento**, **tempo** e **massa** são grandezas que sempre foram tratadas como **absolutas**. Isso significa que o valor dessas grandezas não depende do referencial em que são medidas.

Mais adiante, veremos que tais grandezas também podem se apresentar relativas quando a velocidade dos movimentos em que estão envolvidas for muito alta, ou seja, não desprezíveis comparadas à velocidade da luz ($c = 300000 \text{ km/s}$).

Teoria da relatividade

O surgimento da Física Quântica, no início do século XX, foi de extrema importância para explicar alguns fenômenos que, até então, apresentavam incoerências entre a teoria clássica e os resultados experimentais. Como algumas questões persistiam sem respostas, elas foram solucionadas por uma nova teoria: a **Teoria da Relatividade**, de [Albert Einstein](#).

Essa teoria constitui-se de duas partes: a **Teoria da Relatividade Restrita** (ou Teoria da Relatividade Especial), publicada em 1905, na qual os fenômenos são tratados em relação a referenciais necessariamente inerciais, e a **Teoria da Relatividade Geral**, publicada em 1915, na qual os fenômenos são tratados em relação a referenciais não inerciais. Deteremos nossa atenção apenas ao estudo da Teoria da Relatividade Restrita.

Vale ressaltar que a Teoria da Relatividade não invalida a Mecânica Newtoniana, da mesma forma que a Física Quântica não invalida a Teoria Eletromagnética Clássica. A teoria proposta por Einstein apenas explica corretamente o comportamento dos fenômenos quando a ordem de grandeza da velocidade do movimento é comparável à velocidade da luz no vácuo, algo que a Mecânica Clássica não é capaz de explicar.

Postulados de Einstein

A Teoria da Relatividade Restrita foi construída a partir de dois postulados:

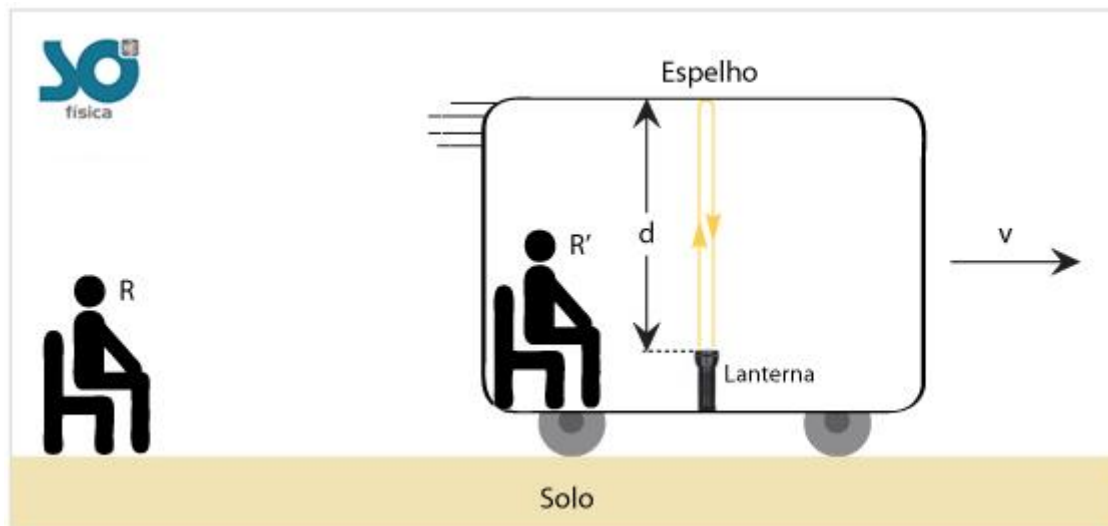
1. As leis da Física são as mesmas em qualquer referencial. Não existe um referencial privilegiado.
2. A velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor ($c = 300000 \text{ km/s}$) em relação a qualquer referencial inercial.

Obs.: o segundo postulado diferencia-se da formulação sobre a composição da velocidade da Mecânica Newtoniana, visto que, de acordo com a Teoria da Relatividade, nenhuma composição de velocidades poderá ter valor superior ao da velocidade da luz no vácuo.

Dilatação do tempo

Para estudarmos a relatividade do tempo, iremos considerar um vagão em MRU com velocidade v em relação ao solo.

No teto do vagão, está colocado um espelho plano e, no chão, uma lanterna está colada a uma distância d do espelho, conforme a figura abaixo:



A lanterna emite do piso um pulso de luz que vai até o espelho e volta para ela. É importante definir, aqui, dois eventos:

- 1º) lanterna emitindo o pulso de luz;
- 2º) pulso de luz chegando e retornando à lanterna.

Vamos estabelecer dois referenciais para analisarmos o intervalo de tempo decorrido entre os dois eventos. São eles:

- **R'**: referencial em repouso em relação ao local onde ocorreram os eventos. Para esse referencial, o intervalo de tempo será simbolizado por $\Delta t'$.
- **R**: referencial em movimento em relação ao local onde ocorreram os eventos. Para esse referencial, o intervalo de tempo entre os eventos será simbolizado por Δt .

Do ponto de vista do referencial R', a luz faz o trajeto indicado na figura acima, propagando-se com velocidade c e percorrendo a distância **$2d$** durante o intervalo de tempo **$\Delta t'$** .

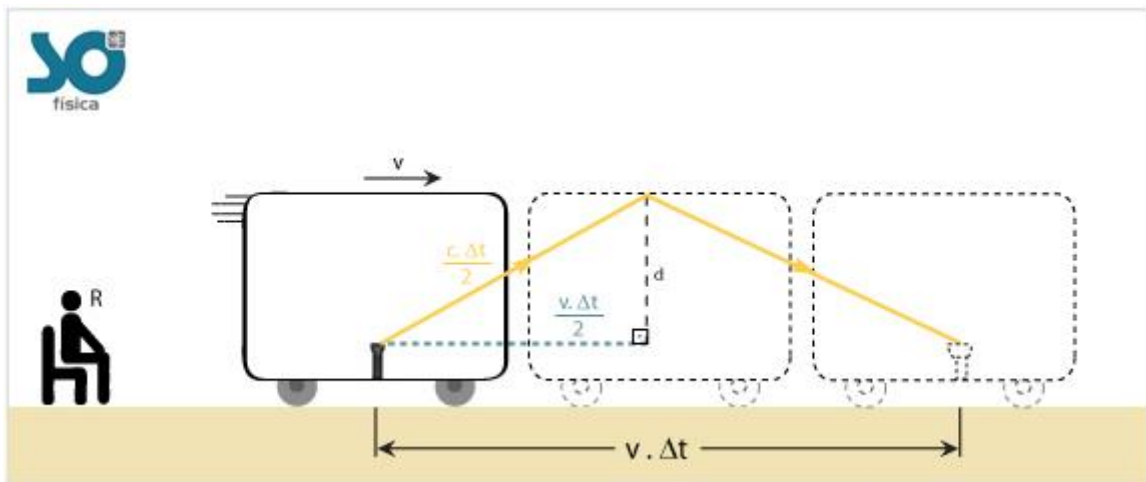
Assim, para R', podemos escrever:

$$c = \frac{2d}{\Delta t'} \Rightarrow \Delta t' = \frac{2d}{c}$$

Já que:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Observe na figura a seguir a trajetória da luz em relação ao referencial R.



Agora, analisando do ponto de vista do referencial R, a luz também faz o trajeto em questão com velocidade c , tendo percorrido uma distância **$c \cdot \Delta t$** durante o intervalo de tempo Δt . Vale lembrar que R viu o vagão, com velocidade v , se percorrer a distância **$v \cdot \Delta t$** .

Partindo do triângulo retângulo da figura acima, podemos escrever:

$$\left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2 = d^2 + \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2$$

$$\frac{c^2\Delta t^2}{4} = d^2 + \frac{v^2\Delta t^2}{4}$$

$$c^2\Delta t^2 = 4d^2 + v^2\Delta t^2$$

$$(c^2 - v^2)\Delta t^2 = 4d^2$$

$$\Delta t^2 = \frac{4d^2}{c^2 - v^2} = \frac{4d^2}{c^2\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}$$

$$\Delta t = \frac{2d}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Como:

$$\Delta t' = \frac{2d}{c}$$

Podemos substituir esse resultado, obtendo:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Já que a expressão apresentada no denominador da equação acima é menor do que 1, podemos concluir que Δt é maior do que $\Delta t'$. Assim:

Para um referencial R que se desloca em relação ao local em que os eventos ocorrem, o intervalo de tempo Δt entre os eventos é maior que o intervalo $\Delta t'$ medido pelo referencial R', que está em repouso em relação ao local dos eventos. Esse fenômeno é denominado **dilatação do tempo**.

Contração do comprimento

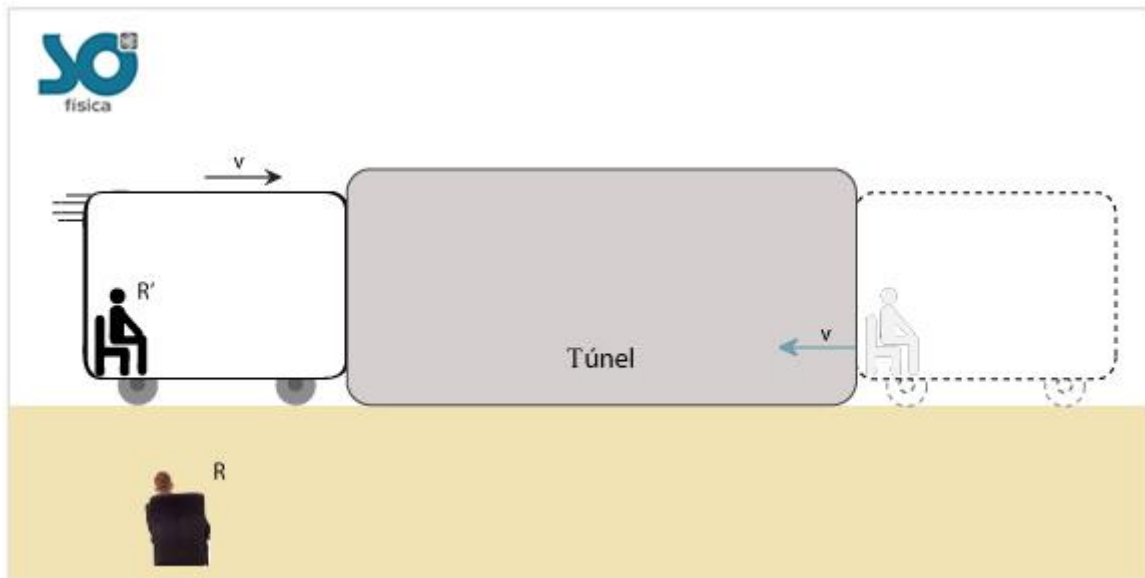
Para estudarmos a relatividade do comprimento, analisaremos a seguinte situação: imaginaremos o mesmo vagão do item anterior com as mesmas condições já estabelecidas. Como está representado na figura a seguir, o vagão irá atravessar um túnel. Iremos adotar dois referenciais para mensurar o comprimento do vagão. São eles:

- R: referencial em repouso em relação ao corpo, cujo comprimento será medido – o túnel. Para esse referencial, o comprimento do túnel é l .
- R': referencial móvel em relação ao túnel. Nesse referencial, o comprimento do túnel é l' .

No referencial R, o comprimento do túnel é l . Assim, enquanto o vagão passa completamente pelo túnel, o referencial R o vê percorrer uma distância l durante um intervalo de tempo Δt . Portanto, em relação ao referencial R, temos:

$$v = \frac{l}{\Delta t} \Rightarrow l = v \cdot \Delta t$$

Já para o referencial R', o túnel tem comprimento l' e desloca-se para a esquerda com velocidade v , conforme a figura abaixo.



Desse modo, R' vê o túnel passar inteiramente por ele percorrendo uma distância l' durante um intervalo $\Delta t'$. Assim:

$$v = \frac{l'}{\Delta t'} \Rightarrow l' = v \cdot \Delta t'$$

Como:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Podemos reescrever:

$$\Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Substituindo o resultado acima na expressão do comprimento do vagão:

$$l' = v \Delta t \Rightarrow l' = v \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Sendo:

$$l = v \Delta t$$

Obtemos:

$$l' = l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Como:

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

O resultado é menor que 1, então l' é menor que l . Portanto:

Para um referencial R , que se encontra em repouso em relação a um corpo, esse corpo possui comprimento l . Já para um referencial R' que se desloca em relação ao mesmo corpo, o comprimento é l' , sendo l' menor que l . Chamamos esse fenômeno de **contração do comprimento**. Vale lembrar que a contração ocorre apenas na direção do movimento.

Massa relativística

Suponhamos que um corpo, cuja **massa de repouso** será simbolizada por m_0 , encontre-se em repouso em relação ao solo. Caso essa massa seja colocada em movimento e adquira uma velocidade v , é possível demonstrar que, nessa situação, a massa m do corpo será dada por:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Sendo m a **massa relativística**.

Analogamente aos itens já estudados, o denominador da expressão acima também é menor que 1, de modo que a massa do corpo em movimento é maior que a massa do corpo em repouso.

Obviamente, o aumento da massa não implica um aumento da quantidade de partículas que compõem a pedra, mas sim, um aumento de sua inércia. Isso significa que, caso o corpo esteja em movimento retilíneo acelerado e sob ação de uma força resultante constante, a aceleração não será constante: diminuirá à medida que a velocidade aumentar.

Equivalência entre massa e energia

Consideremos, novamente, um corpo em repouso. É possível demonstrar que sua massa de repouso m_0 equivale a uma energia intrínseca E_0 , expressa por:

$$E_0 = m_0 c^2$$

Reações que liberam energia o fazem devido à perda de massa, que é transformada em energia.

A energia solar, por exemplo, provém de uma reação chamada **fusão nuclear**, em que núcleos de hidrogênio se associam para formar um núcleo de hélio.

Entretanto, a massa do hélio é ligeiramente menor que o somatório das massas dos núcleos de hidrogênio, devido às perdas pela energia liberada.

Outro exemplo de aplicação da fusão nuclear ocorre na explosão de uma bomba atômica. Isso nos leva a inferir que massa é uma forma de energia.

Caso o corpo esteja em movimento em relação a um referencial no qual ele possua uma massa de repouso m_0 , a energia total poderá ser obtida pela expressão:

$$E = mc^2$$

Sendo m a massa relativística do corpo, dada por:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Assim, a energia total **E** será o somatório da energia de repouso do corpo, **E₀**, com a energia cinética **E_c**:

$$E = E_0 + E_c$$

Energia e quantidade de movimento de um corpo

Suponhamos que um corpo esteja movendo-se com velocidade **v** em relação a um dado referencial. Como a energia total **E** desse corpo é dada por:

$$E = mc^2 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} c^2$$

E a quantidade de movimento (momentum linear) pode ser obtida por:

$$Q = mv = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} v$$

É conveniente enfatizar que:

Um corpo com massa de repouso diferente de zero não pode atingir a velocidade da luz no vácuo, já que, se fizermos **v** tender a **c**, as expressões matemáticas da energia e do momentum linear tenderão a infinito, o que é absurdo.

A expressão que relaciona a energia total com a quantidade movimento é dada por:

$$E^2 = Q^2 c^2 + (m_0 c^2)^2$$

Suponhamos que a massa de repouso de uma partícula seja nula, a expressão acima passa a ser:

$$E^2 = Q^2 c^2 + 0 \Rightarrow E = Qc$$

$$m = \frac{E}{c^2} v \Rightarrow v = \frac{Qc^2}{E}$$

$$v = \frac{Qc^2}{Qc} \Rightarrow v = c$$

Assim, uma partícula com $m_0 = 0$ move-se com velocidade igual a **c**. É o caso dos fótons, que não possuem massa de repouso. No entanto, o momentum linear dos fótons não é nulo e, portanto, pode ser obtido pela equação abaixo:

$$E = Qc$$

Referencias

Como referenciar: "Cargas Elétricas" em *Só Física*. Virtuuous Tecnologia da Informação, 2008-2020. Consultado em 07/07/2020 às 16:33. Disponível na Internet em <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Eletromagnetismo/Eletrostatica/cargas.php>

Como referenciar: "Corrente Elétrica" em *Só Física*. Virtuuous Tecnologia da Informação, 2008-2020. Consultado em 07/07/2020 às 16:34. Disponível na Internet em <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Eletromagnetismo/Eletrodinamica/corrente.php>

Como referenciar: "Ímãs e magnetos" em *Só Física*. Virtuuous Tecnologia da Informação, 2008-2020. Consultado em 07/07/2020 às 16:34. Disponível na Internet em <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Eletromagnetismo/CampoMagnetico/imasemagnetos.php>

Como referenciar: "Força magnética sobre um fio condutor" em *Só Física*. Virtuuous Tecnologia da Informação, 2008-2020. Consultado em 07/07/2020 às 16:35. Disponível na Internet em <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Eletromagnetismo/ForcaMagnetica/fio.php>

Como referenciar: "Fluxo de Indução" em *Só Física*. Virtuuous Tecnologia da Informação, 2008-2020. Consultado em 07/07/2020 às 16:35. Disponível na Internet em <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Eletromagnetismo/InducaoMagnetica/fluxo.php>

Como referenciar: "Física quântica" em *Só Física*. Virtuuous Tecnologia da Informação, 2008-2020. Consultado em 07/07/2020 às 16:35. Disponível na Internet em <http://www.sofisica.com.br/conteudos/fisicamoderna/FisicaQuantica/introducao.php>

Como referenciar: "Física quântica" em *Só Física*. Virtuuous Tecnologia da Informação, 2008-2020. Consultado em 07/07/2020 às 16:36. Disponível na Internet em <http://www.sofisica.com.br/conteudos/fisicamoderna/Relatividade/introducao.php>