

Força Magnética

Força Magnética sobre uma carga pontual

Diagram illustrating the magnetic force on a moving point charge:

Equation: $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$

Labels:

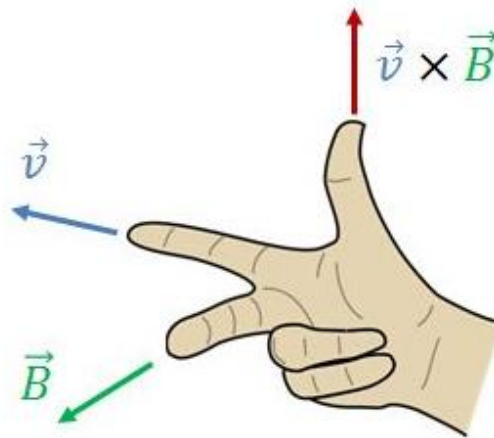
- Carga elétrica [C] (Electric charge [C])
- Vetor velocidade da carga [m/s] (Velocity vector of the charge [m/s])
- Vetor campo magnético [T] (Magnetic field vector [T])
- Força magnética [N] (Magnetic force [N])

Diagram showing the angle θ between the velocity vector \vec{v} and the magnetic field vector \vec{B} .

Equation: $F_B = qvB \sin \theta$

Label: Ângulo formado pelos vetores \vec{B} e \vec{v} (Angle formed by the vectors \vec{B} and \vec{v})

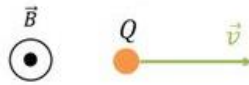
Regra da mão direita



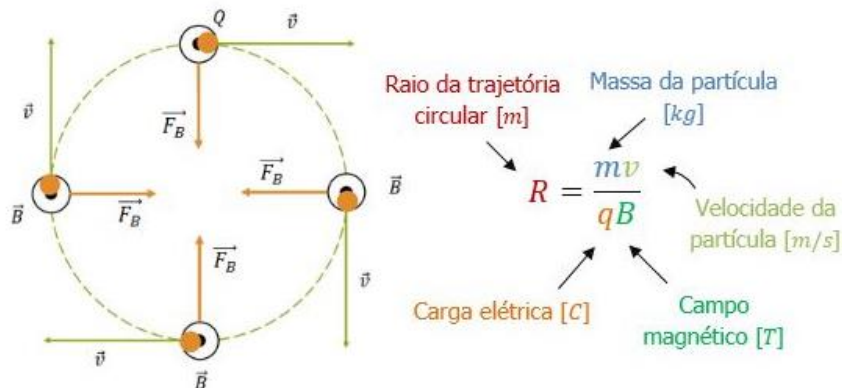
- Cargas em movimento podem sofrer ação de forças magnéticas. Cargas em repouso não.
- Como estamos trabalhando com produto vetorial, a direção e sentido de \vec{F}_B podem ser determinados através da **regra da mão direita**.
- Na hora de usar a **regra da mão direita**, não se esqueça de considerar o sinal da carga. Se a carga for **positiva**, a regra da mão direita vai te dar a direção e sentido da força magnética. Se a carga for **negativa**, o sentido da força magnética deve ser trocado.

Trajétória circular

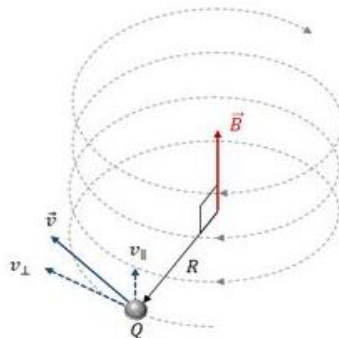
- Se uma partícula pontual com carga $Q > 0$ se move em uma região com campo magnético \vec{B} , ela apresentará uma trajetória circular.



- Nesse caso, a **força magnética** funciona como **força centrípeta**.

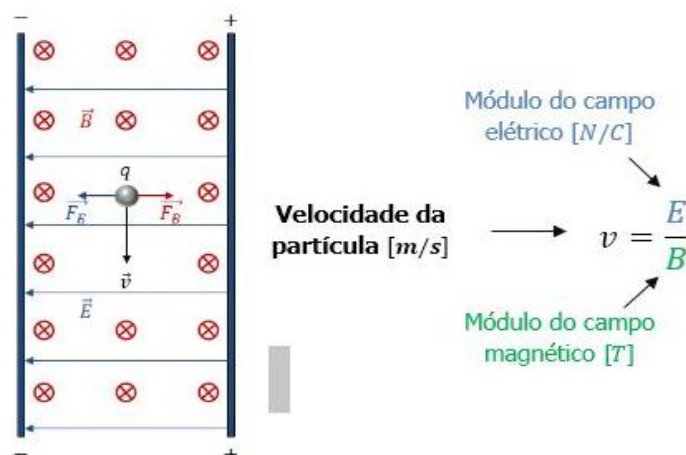


Trajétória helicoidal

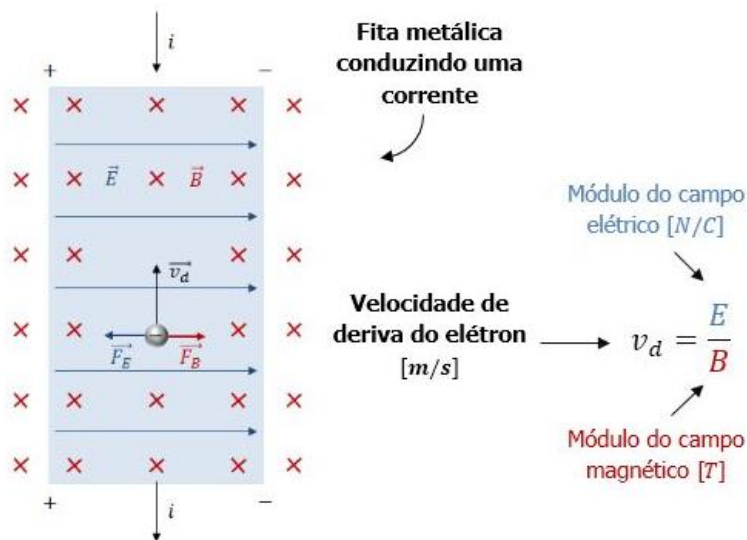


- Se a velocidade tiver uma componente **paralela** ao campo magnético, essa componente vai seguir como se nada tivesse acontecido.
- Nesse caso, a partícula passa a descrever uma trajetória helicoidal.

Força resultante nula



Efeito Hall - Força resultante nula sobre o elétron



- No caso de um condutor conduzindo uma corrente elétrica (i), a velocidade do elétron é a **velocidade de deriva**, dada por:

Corrente elétrica $[A]$

$$v_d = \frac{i}{neA}$$

Área transversal da fita metálica $[m]$

Número de portadores de carga por unidade de volume

$e \cong 1,6 \times 10^{-19} C$

$$n = \frac{Bi}{Vle}$$

Diferença de potencial de Hall $V = Ed$

Espessura da fita $l = A/d$

Força Magnética sobre um Fio Condutor

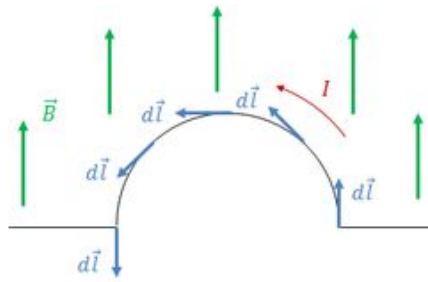
Força em corpos carregados

Corrente elétrica $[A]$

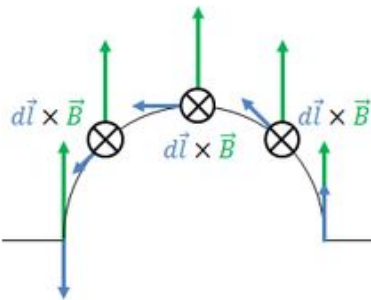
Vetor campo magnético $[T]$

Vetor força magnética $[N]$

$$\vec{F}_B = \int_{\text{corpo}} I \, d\vec{l} \times \vec{B}$$



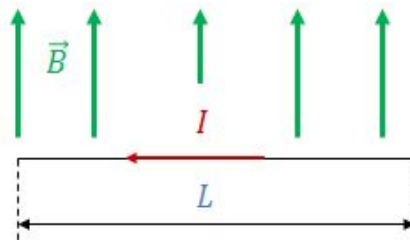
- O vetor $d\vec{l}$ tem módulo infinitesimal dl e a direção e sentido da corrente elétrica em qualquer ponto do fio condutor.



- A direção e sentido da força magnética no fio são determinados pelo produto vetorial $d\vec{l} \times \vec{B}$.

Fio retilíneo

$$\vec{F}_B = I \vec{L} \times \vec{B}$$



- \vec{L} é o vetor que tem o módulo igual ao tamanho do fio e a direção e sentido da corrente que passa por ele.

Fio deslizante

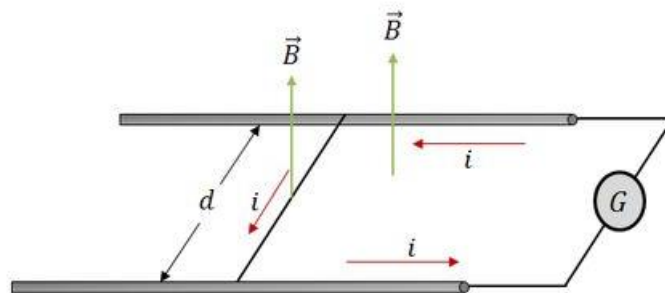


Diagram illustrating the forces and acceleration on a sliding wire:

Vetor aceleração do fio [m/s^2] $\rightarrow \vec{a} = \frac{I}{m} \vec{L} \times \vec{B}$

Corrente elétrica [A] I

Massa do fio [kg] m

Vetor comprimento do fio [m] \vec{L}

Vetor campo magnético [T] \vec{B}

- Se quisermos calcular a velocidade, basta integrar a expressão acima, prestando atenção em quais termos são constantes para tirarmos da integral.

Vetor velocidade do fio [m/s] $\rightarrow \vec{v} = \int \left(\frac{I}{m} \vec{L} \times \vec{B} \right) dt$

Momento Magnético Dipolar

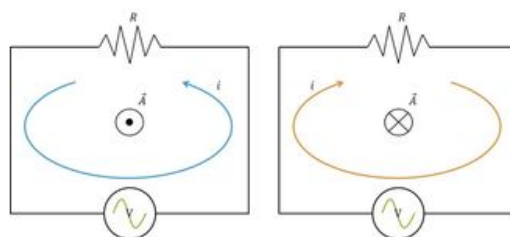
Momento dipolo magnético

Diagram illustrating the magnetic dipole moment:

Momento dipolo magnético Am^2 $\rightarrow \vec{\mu} = I \vec{A}$

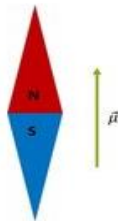
Corrente elétrica [A] I

Vetor área da espira [m^2] \vec{A}



- O vetor área tem o módulo igual a área da espira;
- Para achar o sentido do vetor área, você tem que saber o sentido da corrente. Então, basta você enrolar os seus dedos no sentido da corrente que o seu polegar vai dar o sentido do vetor área;

Momento dipolar magnético de um ímã



- Em um ímã, o momento de dipolo tem sentido do polo Sul para o polo Norte.

Momento dipolar magnético de uma bobina

$$\vec{\mu} = n I \vec{A}$$

Número de espiras

Torque magnético [$N \cdot m$] $\rightarrow \vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$

Vetor momento dipolar magnético [Am^2]

Vetor campo magnético [Am^2]

Módulo do torque magnético [$N \cdot m$] $\rightarrow \tau = \mu B \sin \theta$

Ângulo formado pelos vetores \vec{A} e \vec{B}

Módulo do momento dipolar magnético [Am^2]

Módulo do campo magnético [Am^2]

- A espira se comporta exatamente como um ímã, possuindo um dipolo magnético;
- O torque magnético não depende do formato da espira, depende apenas da sua área;

Energia Potencial [J] $\rightarrow U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$

Vetor momento dipolar magnético [Am^2]

Vetor campo magnético [Am^2]

Energia Potencial [J] $\rightarrow U = -\mu B \cos \theta$

Ângulo formado pelos vetores \vec{A} e \vec{B}

Módulo do momento dipolar magnético [Am^2]

Módulo do campo magnético [Am^2]

Trabalho Magnético sobre uma Espira

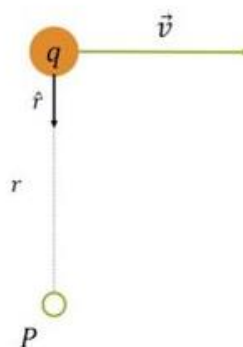
- Se um agente externo faz o um dipolo magnético girar de uma orientação inicial θ_i para uma orientação final θ_f e se o dipolo permanece estacionário antes e depois da mudança de orientação, o trabalho W_a realizado pelo campo magnético sobre o dipolo magnético é dado por:

$$W_a = \Delta U = U_f - U_i$$

Energia potencial final [J] Energia potencial inicial [J]

Campo Magnético Gerado por um Fio

Campo gerado por uma Carga Pontual em Movimento



Permeabilidade no vácuo
 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A}$

Vetor velocidade da carga [m/s]

Vetor radial unitário

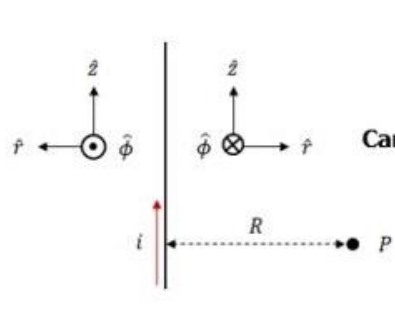
Campo Magnético [T]

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} q \frac{\vec{v} \times \hat{r}}{r^2}$$

Carga elétrica [C]

Distância entre a carga q e o ponto P [m]

Campo gerado por um Fio Infinito



Corrente elétrica no fio [A]

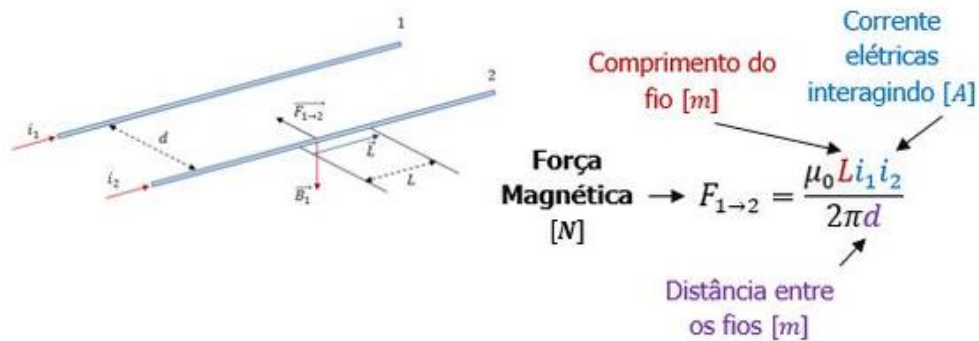
Campo Magnético [T]

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \hat{\phi}$$

Distância entre o fio e o ponto P [m]

Vetor tangencial unitário

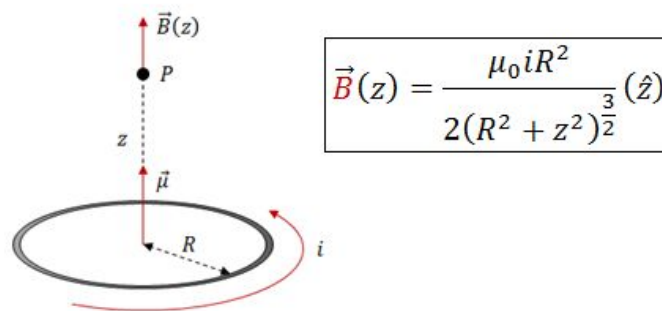
Força entre Correntes Paralelas



- Correntes **paralelas** → Os fios **se atraem**;
- Correntes **antiparalelas** → Os fios **se repelem**;

Campo Magnético Gerado por uma Bobina

Campo Magnético Gerado por uma Espira



Nessa equação tem duas situações que vale darmos uma olhada, que correspondem ao campo elétrico: para pontos muito distantes ($z \gg R$) e no centro da espira ($z = 0$).

$$\vec{B}(z) \approx \frac{\mu_0 i R^2}{2z^3} (\hat{z})$$

($z \gg R$)

$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_0 i}{2R} (\hat{z})$$

($z = 0$)

Campo Magnético Gerado por uma Bobina

Uma bobina nada mais é do que um arranjo com N espiras. Dessa forma, o campo magnético gerado por ela, em pontos muito distantes ($z \gg R$), é dado por:

$$\vec{B}(z) \approx \frac{\mu_0 N i R^2}{2z^3} (\hat{z})$$

Podemos ainda escrever essa equação em função do **momento dipolo magnético** ($\mu = N i A$), onde a $A = \pi R^2$ corresponde à área da espira.

$$\vec{B}(z) \approx \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\vec{\mu}}{z^3} (\hat{z})$$

Lei de Biot-Savart Geral

Permeabilidade magnética no vácuo

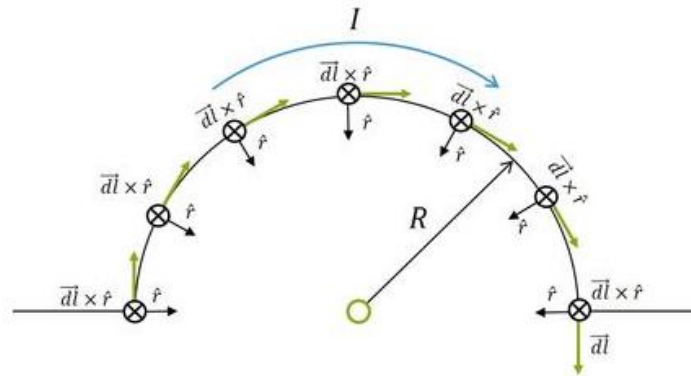
Corrente elétrica

Campo Magnético

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\text{corpo}} I \frac{d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$$

Distância entre o fio e o ponto onde estamos calculando \vec{B}

- O vetor $d\vec{l}$ (em verde) é tangente ao fio, sempre no sentido da corrente;
- O vetor unitário \hat{r} aponta do fio para o ponto onde estamos calculando o campo magnético;



Quando a Lei de Biot-Savart é útil?

- Para calcular o campo magnético gerado por segmentos **retilíneos**;
- Para calcular o campo magnético gerado por segmentos **circulares** (ou semicirculares), que **costumam aparecer bastante**;

Lei de Ampère

Campo magnético

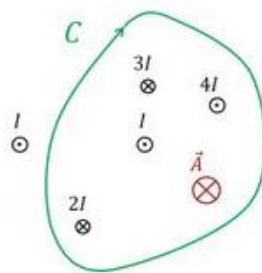
Permeabilidade magnética no vácuo

Corrente elétrica no interior da amperiana

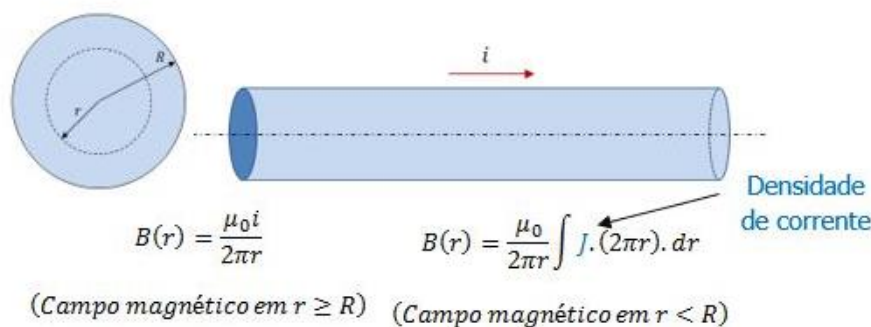
$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{int}$$

- Na Lei de Ampère a nossa integral é numa **CURVA**! Esta curva é chamada de Amperiana;
- O vetor $d\vec{l}$ em questão é o vetor infinitesimal que é **tangente** à curva C em todos os pontos;
- Por se tratar de uma integral de linha, a curva C deve estar **orientada**;

- I_{int} é uma corrente **constante** que passa por dentro da nossa curva C ;



Campo magnético no interior de um condutor

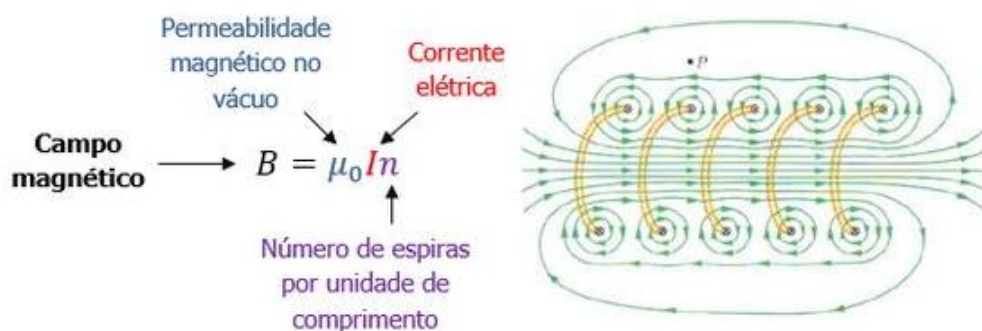


Condutor com corrente uniformemente distribuída

$$J = \frac{I}{A} = \text{const.} \longrightarrow B(r) = \frac{\mu_0 i r}{2\pi R^2}$$

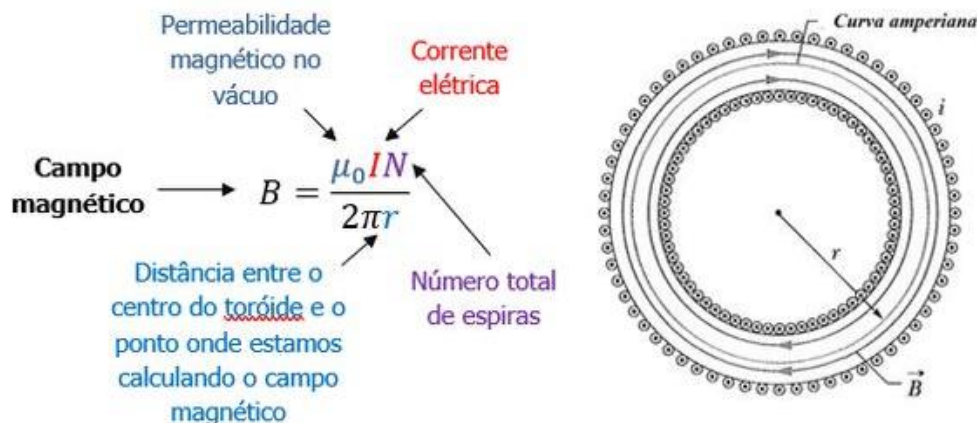
Lei de Ampère em Solenóides

Um solenóide é uma bobina helicoidal formada por espiras circulares muito próximas.



Lei de Ampère em Toróides

Um toróide pode ser descrito como um solenóide cilíndrico que foi encurvado até as extremidades se tocarem, formando assim um anel.



Materiais Magnéticos

A permeabilidade magnética (μ) pode ser diferente dependendo do meio.

- Mas como relacionar esse μ especial com o valor de μ_0 que estamos acostumados?

O diagrama estabelece a relação entre a permeabilidade magnética de um meio (μ) e a permeabilidade magnética no vácuo (μ_0). A permeabilidade relativa do meio (K_m) é definida como $K_m = \frac{\mu}{\mu_0}$. A permeabilidade magnética do meio (μ) é expressa como $\mu = (1 + \chi_m)\mu_0$, onde χ_m é a suscetibilidade magnética do meio. A relação $K_m = 1 + \chi_m$ é também indicada. O valor de μ_0 é dado como $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A}$.

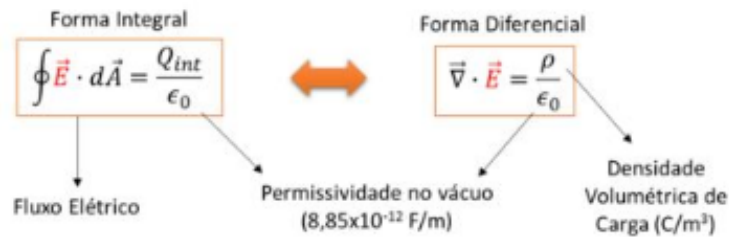
Em relação aos valores de χ_m , podemos concluir algumas coisas:

- Se $\chi_m < 0$, o material é **diamagnético**. São materiais que não possuem momento magnético permanente e nem podem ser imantados.
- Se $\chi_m > 0$, o material pode ser **paramagnético** ou **ferromagnético**.
 - Se χ_m for positivo porém pequeno (10^{-5} a 10^{-3}) então o material será **paramagnético**: são materiais que não possuem momento magnético permanente mas que podem ser imantados um pouquinho caso estejam em um campo magnético forte.
 - Se χ_m for positivo e grande, temos o **ferromagnetismo**: são materiais que podem se tornar permanentemente ímãs caso estejam em presença de campo magnético, respondendo fortemente a esse campo.

Equações de Maxwell

$$\vec{\nabla} = \hat{x} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{z} \frac{\partial}{\partial z}$$

Lei de Gauss

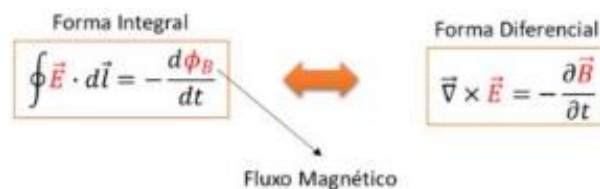


Lei de Gauss Magnética

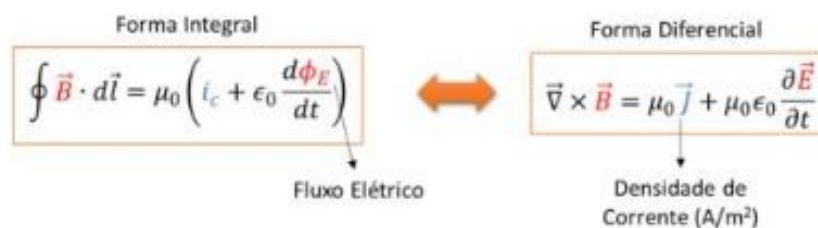
Como não existem monopólos magnéticos:



Lei de Faraday-Lenz



Lei de Ampère-Maxwell



Equações da Onda Eletromagnética

Usando a propriedade matemática:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{F}) = \nabla (\nabla \cdot \vec{F}) - \nabla^2 \vec{F}$$

$$\nabla^2 \vec{F} = \left(\frac{\partial^2 F_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 F_z}{\partial z^2} \right)$$

Chegamos nas seguintes equações:

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

Que são equações de onda tridimensionais do tipo:

$$\nabla^2 \vec{F} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{F}}{\partial t^2}$$

Onde:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = c \left(\text{velocidade da luz} \right)$$

Propriedades Ondulatórias da Luz

Ondas Eletromagnéticas

Campos Elétrico e Magnético

$$\vec{E} \perp \vec{B}$$

Frequência e Comprimento de Onda

The diagram shows the equation $c = \lambda f = \frac{\omega}{k}$ with four arrows pointing from the variables to their units:

- Red arrow from λ to "Comprimento de onda [m]"
- Green arrow from ω to "Frequência angular [rad/s]"
- Purple arrow from f to "Frequência [s⁻¹ ou Hz]"
- Orange arrow from k to "Número de onda [m⁻¹]"

$$\omega = 2\pi f \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad E = cB$$

Propagação das Ondas Eletromagnéticas

Direção de Propagação (\hat{k})

$$\hat{k} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{\|\vec{E} \times \vec{B}\|}$$

Número de Onda (\vec{k})

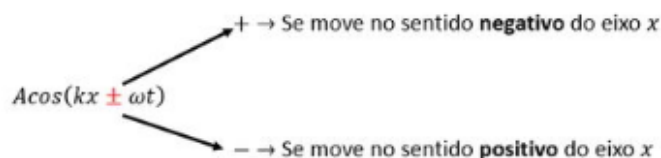
$$\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \hat{k}$$

Campo Elétrico em uma Direção \hat{k} Qualquer

$$\vec{E} = E_{max} \cos\left(\vec{k} \bullet \vec{r} \mp \omega t + \phi\right) \hat{n}$$

onde $\vec{r} = x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z}$

Sentido da propagação



Energia da Onda Eletromagnética

Densidade de Energia (u)

$$u = \frac{\text{Energia}}{\text{Volume}}$$

Densidade de Energia do Campo Elétrico (u_E)

$$u_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$$

Densidade de Energia do Campo Magnético (u_B)

$$u_B = \frac{1}{2\mu_0} B^2$$

Densidade de Energia da Onda Eletromagnética (u)

$$u = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2$$

Usando as relações:

$$E = cB$$

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

$$u = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2 = \epsilon_0 E^2$$

Vetor de Poynting e Intensidade

Fluxo de Energia (S)

$$\text{Fluxo de Energia} = \frac{\text{Potência}}{\text{Área}}$$

$$S = \frac{1}{A} \frac{dU}{dt}$$

Fluxo de Energia da Onda Eletromagnética

$$S = \epsilon_0 c E^2 = \frac{EB}{\mu_0}$$

Vetor de Poynting (\vec{S})

$$\|\vec{S}\| = \frac{EB}{\mu_0}$$

\vec{S} é paralelo a \hat{k} e também a $(\vec{E} \times \vec{B})$.

$$\vec{S} \parallel \vec{k} \parallel \vec{E} \times \vec{B}$$

$$\vec{S} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{\mu_0}$$

Intensidade da Radiação (I)

$$I = S_{\text{médio}} = \frac{1}{2} \frac{E_{\text{máx}} B_{\text{máx}}}{\mu_0}$$

Potência da Luz (P)

Em uma superfície fechada, calculamos a potência total emitida por uma fonte

$$P = \oint \vec{S} \cdot d\vec{A}$$

Numa fonte pontual,

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

A potência em uma certa área A é

$$P = \int_{\text{área}} \vec{S} \cdot d\vec{A}$$