Fórmula ciclotrónica: $p = B.q.R$

momento linear — $p = m.v$; campo magn.; carga; raio de curvatura

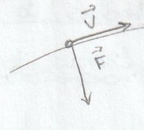
$\vec{F}_m = q\,(\vec{v} \times \vec{B})$

força magnética → ñ produzem trabalho!

Força de Lorentz

$dW = \vec{F}.d\vec{l} = \vec{F}.(\vec{v}.dt) = q.(\vec{v}\times\vec{B}).\vec{v}.dt = 0$

produto escalar é sempre perpendicular aos dois vetores



Magnetoestática

campos magnéticos estáticos → correntes estacionárias $\boxed{\vec{\nabla}.\vec{j} = 0}$

aceleração centrípeta: $a_c = \frac{v^2}{R}$

velocidade com que a carga vai; produto escalar

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Força que uma carga (q) é sujeita; campo magnético!

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E}(\vec{r}, t) = \frac{1}{\varepsilon_0}\rho(\vec{r}, t) \quad \text{Lei de Coulomb ou de Gauss} \tag{1a}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B}(\vec{r}, t) = 0 \tag{1b}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}, t) = -\frac{\partial}{\partial t}\vec{B}(\vec{r}, t) \quad \text{Lei de Faraday} \tag{1c}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B}(\vec{r}, t) = \frac{1}{c^2}\frac{\partial}{\partial t}\vec{E}(\vec{r}, t) + \frac{1}{\varepsilon_0 c^2}\vec{j}(\vec{r}, t) \quad \text{Lei de Ampére} \tag{1d}$$

$Q(t) = I.t$

$\Downarrow$

$\frac{\partial Q}{\partial t} = I$

na magnetostática isto desaparece

$$\boxed{c^2 = \frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

⚠ Para uma única carga q, ñ temos uma corrente estacionária!!!

$B(\vec{r}) \neq \frac{\mu_0}{4\pi} . q \frac{\vec{v} \times \hat{r}}{|r|^2}$

densidade de corrente:

$j = \frac{dI}{da}$ → área ?

$I_{int} = \int j . da$

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{a} = \frac{1}{\varepsilon_0}\int_V \rho(\vec{r}, t) d\vec{v} = \frac{Q}{\varepsilon_0} \tag{2a}$$

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{a} = 0 \tag{2b}$$

Fluxo Magnético

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int_S \vec{B}(\vec{r}, t) \cdot d\vec{a} \tag{2c}$$

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \frac{1}{c^2}\int_S \left(\frac{1}{\varepsilon_0}\vec{j}(\vec{r}, t) + \frac{\partial}{\partial t}\vec{E}(\vec{r}, t)\right) \cdot d\vec{a} \tag{2d}$$

$\oint_C \vec{A}.d\vec{l} = \oint_S \vec{B}.d\vec{a}$

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \tag{3}$$

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V - \frac{\partial}{\partial t}\vec{A} \tag{4}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \tag{5}$$

Corrente Superficial!

$\vec{j} = \sigma . \vec{v}$ ↳ dens. superficial ⇒ $F_{mg} = \int_S (\vec{j} \times \vec{B})\, da$

Lei de Lorentz!

Corrente Volumétrica!

$\vec{j} = \rho . \vec{v}$ ↳ dens. volumétrica ⇒ $F_{mg} = \int_V (\vec{j} \times \vec{B})\, dv$

(*) → vetor tangente à trajetória, apontando sempre no sentido da corrente em determinado ponto → e direção

$$V(\vec{r}) = -\int_O^r \vec{E}(\vec{r}) \cdot d\vec{l} \tag{6}$$

corrente elétrica (sempre a mesma)

Força magnética numa corrente

$$\vec{F}_m = I\int_{\text{corpo}} (d\vec{l} \times \vec{B})$$

(*) ⇒ Força magnética numa distribuição contínua de cargas

densidade de corrente elétrica

$\vec{A}$ tem direção da corrente:

distribuição de correntes em volume ⇒

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi}\int_V \frac{\vec{j}(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|}dv' \tag{7}$$

distribuição de corrente em linha (num fio) ⇒

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0 I}{4\pi}\int_C \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|}d\vec{l}' \tag{8}$$

por onde passa o fio

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi}\int_V \frac{\vec{j}(\vec{r}') \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3}d^3\vec{r}'$$

$d^3\vec{r}'$ → dv'

para densidade de corrente volúmica

$\Downarrow$

Lei de Biot-Savart

Como $\vec{j} = j(x', y', z')$ e $\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x}\hat{x} + \frac{\partial}{\partial y}\hat{y} + \frac{\partial}{\partial z}\hat{z}$, então

$\vec{\nabla}.\vec{j} = 0$

$\vec{j}$ depende de $\vec{r}'$ e ñ de $\vec{r}$

Através do Teorema de Poynting!

Energia do campo eletromagnético:

$U = \int_V \frac{1}{2}\left(\varepsilon_0 \cdot E^2 + \frac{1}{\mu_0} \cdot B^2\right) dv$

Potencial Vetor (A)

↳ mesma direção que I(j)

$(*^2)$ indica a conservação de energia

Neste caso, $B = \frac{E}{c}$ e $u_m = 0$

Campo magnético no fio de corrente

$\nabla^2 A = \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} A) = \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2}$

sai se assumirmos que é const. na linha toda!

$$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int_{C \,(\text{fio})} \frac{d\boldsymbol{l}' \times \hat{\mathbf{s}}}{s^2}$$

$\boldsymbol{s} = \boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}'$

lei de Biot-Savart

Lei de Ampère

$$\oint_C \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{l} = \mu_0 I_{inc}$$

orientado

→ corrente que passa dentro da curva

U tbm. pode ser obtido por:

$U = \int_V u \, dv$

Condições Fronteira

$$\vec{B}_{\oplus\,(\text{acima})} - \vec{B}_{\ominus\,(\text{abaixo})} = \mu_0 (\boldsymbol{J} \times \boldsymbol{n})$$

→ ⊥ à superfície

descontinuidade tem dir. perpend. à corrente

$$\vec{m} = I \int_S d\vec{a}$$

momento dipolar magnético

elemento de área → $d\vec{a} = \vec{n} \cdot da$

representa a intens. da fonte magnética

$\vec{P} = \varepsilon_0 \cdot \chi_e \cdot \vec{E}$ $\quad \vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E}$

$\vec{M} = \chi_m \cdot H$ $\quad \vec{H} = \frac{1}{\mu} \cdot \vec{B}$

magnetização

momento dipolar

$\vec{M} = \frac{d\vec{m}}{dv}$ (A/m)

$$\nabla \cdot \boldsymbol{D} = \rho_{livre}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{B}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} + \boldsymbol{j}_{livre}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{M} \neq 0$$

Eq. Maxwell para materiais polarizáveis e magnetizáveis

densidade de cargas livres

corrente de deslocamento:

$\vec{j}_d = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$

escondemos a polarização do material : deslocamento elétrico

$$\boldsymbol{D} = \varepsilon_0 \boldsymbol{E} + \boldsymbol{P}$$

polarização elétrica do material

escondemos a magnetização do material : Intensidade magnética

$$\boldsymbol{H} = \frac{1}{\mu_0}\boldsymbol{B} - \boldsymbol{M}$$

magnetização

Equações constitutivas

$\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H}$ → para campos pequenos

$$\mu = \mu_0 (1 + \chi_m)$$

permeabilidade magnética do meio

suscetibilidade magnética do meio $(*')$

$\varepsilon = \varepsilon_0 (1 + \chi_e)$

$\frac{1}{c^2} = \mu_0 \cdot \varepsilon_0$

$$\boldsymbol{S} = \frac{1}{\mu_0}(\boldsymbol{E} \times \boldsymbol{B}) \tag{9}$$

vetor de Poyting

densidade do fluxo de energia

densidade de energia total do campo eletromagnético

$$u = \frac{1}{2}\left(\varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2\right)$$

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ N/A²

$\varepsilon_0 = 8{,}85 \times 10^{-12}$ C²/Nm²

onde plana

$$\nabla \cdot \boldsymbol{S} + \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \tag{10}$$

→ $(*2)$

No vácuo

$B_0 = c \cdot \frac{E_0}{c}$

$B = \frac{E}{c}$

$c = \frac{\omega}{k}$

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

$f = \frac{c}{\lambda}$

$(*')$

- $\chi_m < 0$: mat. diamagnético ($\bar{n}$ possuem momento magnético permanente)

- $\chi_m > 0$: pode ser paramagnético ou ferromag.
  - ↳ se χ_m for pequeno ($10^{-5} \sim 10^{-3}$) é param.
    - ↳ são materiais que ñ possuem mom. magnét. perman.
  - ↳ se χ_m for grande é ferromagnético:
    - ↳ podem se tornar permanentemente imãs casos estejam em presença de campo magnético, respondendo fortemente a esse campo

$$\nabla^2 \boldsymbol{E} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial t^2} = 0 \tag{11}$$

$$\nabla^2 \boldsymbol{B} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \boldsymbol{B}}{\partial t^2} = 0 \tag{12}$$

no vácuo

$\vec{K} \perp \vec{E}$

$\vec{K} \perp \vec{B}$

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

↳ Eq. de Laplace

No vácuo:

$\vec{j} = 0$; $\rho = 0$ ⇒ $\vec{P} = 0 \wedge \vec{M} = 0$

$\varepsilon = \varepsilon_0$

$\mu = \mu_0$

permeabilidade relativa:

$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 + \chi_m$

suscetibilidade magnética