

filio infinito: $\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2\lambda}{r} \hat{r}$

$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2R\pi} \hat{e}_\phi$

$C = 4\pi\epsilon_0 r$ (condutor isolado)

plano delimitado: $\vec{E} = \pm \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \hat{e}_z$

$W' = \frac{1}{2} \sum Q_i V_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(4 \cdot \frac{Q^2}{a} + 2 \frac{Q^2}{a\sqrt{2}} \right)$

$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r^2} \hat{r}$

Expressões

$\vec{E}_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_{0i}^2} \hat{r}_{0i}$ ✓	$V_A - V_B = \int \vec{E} \cdot d\vec{r}$ ✓ $W = q \Delta V = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r} \right)$	$\vec{J} = Nq\vec{v} = \rho\vec{v} = \frac{Q}{\pi R^2} \omega \hat{e}_\phi$	$\vec{J} = \sigma_c \vec{E}$ ✓
$I = \iint_S \vec{J} \cdot \vec{n} dS$ ✓ $I = \int A$	$R = \frac{\rho_c \ell}{A}$; $\rho_c = \frac{1}{\sigma_c}$ ✓	$C = \frac{Q}{V}$ $C = \frac{\epsilon_0 S}{d}$ (placa paralela) $C = \frac{4\pi\epsilon_0 R_1 R_2}{(R_2 - R_1)}$ (caso)	$I = \frac{dQ}{dt}$ ✓ $\theta = \omega t$
$\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ ✓	$V = RI$ ✓ $\mathcal{E} = RI$	$P = VI$ ✓ $\vec{p}_{m} = \vec{F} \cdot \vec{v}$	Fluxo magnético $\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{S}$ $\Phi = LI$ ✓ $\phi = N \int \vec{B} \cdot \vec{n} dS$ $\Phi = N I \int \vec{B} \cdot \vec{n} dS$
Bobina $V_L = L \frac{dI}{dt}$ ✓ $Z_L = i\omega L$ $\vec{B} = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + z^2)^{3/2}} \hat{e}_z$	$V_C = \frac{1}{C} \int I dt$ $Z_C = \frac{1}{i\omega C}$	Condensador $U_C = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{Q^2}{2C}$ ✓ $u_E = \frac{1}{2} \vec{E} \cdot \vec{D} = \frac{1}{2} \epsilon E^2$ ✓	Solenóide $U_L = \frac{1}{2} LI^2$ ✓ $\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$ $u_B = \frac{1}{2} \vec{B} \cdot \vec{H} = \frac{1}{2\mu} B^2$ ✓ $B_z = \mu_0 n I$
$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$ ✓ $F_{mag} = q\vec{v} \times \vec{B}$	$\vec{F}_m = \int I d\vec{\ell} \times \vec{B}$ ✓ $= I \int d\vec{\ell} \times \vec{B}$ $\vec{B} \perp \vec{\ell}$	$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I d\vec{x}}{r^2} \hat{e}_r \times \hat{e}_r$ ✓	$a_N = \frac{v^2}{r}$ $F_{mag} = q\vec{v} \times \vec{B}$ $\vec{v} \perp \vec{B}$ $m \frac{v^2}{r} = qvB$ $E_m = 2qV_0$
$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$ ($\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$) ✓	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$ ✓	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ ✓	$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ ✓ $\vec{W} = q\vec{v} \times \vec{B}$
$\oiint_S \vec{D} \cdot \vec{n} dS = Q_{int}$ ✓ $\oiint_S \vec{E} \cdot \vec{n} dS = \frac{Q_{int}}{\epsilon}$	$\oiint_S \vec{B} \cdot \vec{n} dS = 0$ ✓ $\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 \sum I_{int}$	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$ ✓	$\oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = I_{int} + \left(\frac{d\Phi_D}{dt} \right)$ ✓
$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$ ✓ $\Delta U = U_{int} - U_{ext}$ $\vec{P} = \epsilon_0 \chi_e \vec{E}$ ✓ $U = -pE \cos\theta$ $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ ✓ $p = qd \cos\theta$ $\epsilon = \epsilon_0 (1 + \chi_e)$ ✓ $\sigma_{pol} = \vec{P} \cdot \vec{n}_D$ ✓ $\rho_{pol} = -\nabla \cdot \vec{P}$ ✓	$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$ ✓ $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$ $\vec{H} = \frac{1}{\mu} \vec{B}$ ✓ $M = \chi_m H$ $\mu = \mu_0 (1 + \chi_m)$ ✓ $\vec{J}_m = \vec{M} \times \vec{n}_C$ ✓ $\vec{J}_M = \nabla \times \vec{M}$ ✓	$\langle U_{em} \rangle = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_0^2$ $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} = \frac{1}{\mu} \vec{E} \times \vec{B}$ ✓ $I = \langle \vec{S} \rangle = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E_0^2 = c \langle U_{em} \rangle$ $P = \iint_S \vec{S} \cdot \vec{n} dS$ ✓ $\vec{E} = E_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \phi)$ $I = I_0 e^{-\lambda x} \cos(\omega t + \phi)$ $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \lambda^2}$	$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$ ✓ $\nabla^2 \vec{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0$ ✓ $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3.0 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ ✓ $c_m = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_m \mu_m}}$ ✓ $\frac{\mu_e}{\mu_0} = 1$
$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ✓ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$ ✓ $q_e = 1.609 \times 10^{-19} \text{ C}$ ✓ $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ✓	$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ $\lambda = \frac{R}{2L}$	$\vec{E}' = E_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \phi)$ $I = I_0 e^{-\lambda x} \cos(\omega t + \phi)$ $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \lambda^2}$	$F_x _{Q=Cte} = -\frac{\partial U}{\partial x}$ ✓ $F_x _{V=Cte} = \frac{\partial U}{\partial x}$ ✓
$f = \frac{1}{T}$ ✓ $\omega = \frac{2\pi}{T}$ ✓ $\omega = \frac{v}{\lambda}$ ✓ $\lambda = vT$ ✓ $k = \frac{2\pi}{\lambda}$	$n_m = \frac{c}{c_m}$	$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$	
$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$ $\tan \theta_B = \frac{n_2}{n_1}$	$d \sin \theta = m\lambda$	$d \sin \theta = m\lambda + \frac{\lambda}{2}$	$a \sin \theta = m\lambda$ $\frac{ \vec{F} }{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d}$

Efeito Hall

$\Delta V_H = \frac{R_H I B}{t}$

$R_H = \frac{1}{Nq}$

distância
densidade portadores carga

$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,9877 \times 10^9 \text{ N m}^2 / \text{C}^2$

$v = \frac{R I}{N a^2} (\vec{B} \cdot \vec{a})$

$l = 2\pi r N$

(unipolar)

Sup. esférica: $4\pi r^2$

Sup. cilíndrica: $2\pi r h$

Lei de Coulomb: $|\vec{F}_{12}| = |\vec{F}_{21}| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1 q_2|}{r_{12}^2}$ Exp. Coulomb: $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$
Exp. Coulomb: $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$

Princípio da Superposição: $\vec{E}_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_{ip}^2} \vec{e}_{r_{ip}}$

$$\vec{F}_e = -q_0 \vec{E}$$

(N)

Força elétrica - força criada na carga q_0 pelo campo elétrico $\vec{E}$

$$W_e = \int_A^B -q_0 \vec{E} d\vec{r}$$

(J)

Trabalho da força elétrica - energia gasta para transportar uma carga de A a B

$$V(P) = \frac{W_e}{q_0} = \int_A^B \vec{E} d\vec{r} \quad dV = \vec{E} d\vec{r}$$

($\frac{J}{C} = \text{Volt}$)

potencial elétrico - energia potencial para transportar uma carga de A a B: $(V_A - V_B)$

$$\vec{E}_1 = \frac{F_{e0}}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r_1^2} \vec{e}_{r_1}$$

($\frac{N}{C}$)

Campo elétrico - força por unidade de carga num dado ponto do espaço

$$\vec{E} = -\nabla V$$

$$V(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i}$$

potencial elétrico a uma distância r de uma carga pontual

Formulas Generalizadas para uma distribuição contínua

$$|\vec{p}| = |q \vec{d}|$$

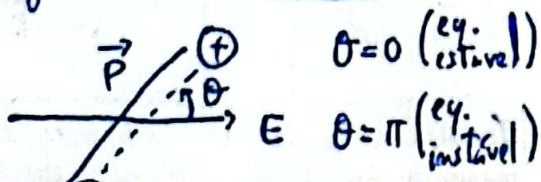
distância

Momento dipolar -

duas cargas simétricas q à distância d quando se separam geram momento

$$U = -\vec{p} \cdot \vec{E} = -pE \cos\theta$$

Energia Potencial de um dipolo



$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r^2} \vec{e}_r$$

($\frac{N}{C}$)

Campo elétrico

$$\vec{V} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r}$$

($\frac{J}{C}$) $\approx$ Volt

potencial elétrico

Volume $dq = \rho dV$
Superfície $dq = \sigma dS$
Linha $dq = \lambda dl$

$$\phi = \oint_S \vec{E} \cdot \vec{n} dS = \frac{\sum Q_i}{\epsilon_0} \quad d\phi = \vec{E} \cdot \vec{n} dS \Rightarrow \text{Cargas exteriores não contribuem para o fluxo}$$

$$= \vec{E} \cdot d\vec{A} = E \cos \alpha dA$$

fluxo elétrico - medida da quantidade de campo elétrico a passar numa dada superfície

$$\phi = \frac{\sum Q_i}{\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0} \iiint_V \rho dv \quad \text{Fluxo por unidade de volume}$$

$$\boxed{\text{div } E = \frac{\rho}{\epsilon_0}} \quad \nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

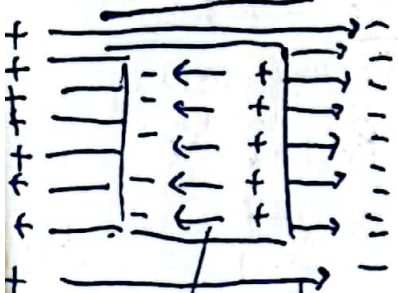
Num condutor:

$$\vec{E}_{int} = 0 \quad (\text{Não há cargas})$$

$$\Rightarrow \nabla V = \vec{0}$$

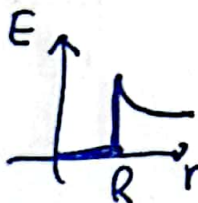
$$\Rightarrow V_{int} = \text{Constante}$$

$$\Rightarrow \rho_{int} = 0$$



Campo elétrico = campo elétrico aplicado

Num esfera condutora



→ Campo eletrostático é um campo conservativo ($\vec{E} = -\nabla V$)

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$$

integral cíclico do campo eletrostático

$$\boxed{\text{rot } \vec{E} = 0}$$

O campo eletrostático não tem linhas de força fechadas

$$\nabla \times \vec{E} = 0$$

limite circulação por unidade de área

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2\lambda}{r}$$

plano dielétrico

$$\vec{E} = \pm \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \vec{e}_z$$

Teorema dos elementos correspondentes

Coefficientes de capacidade:

n condutores



$$Q_n = C_{n1}V_1 + C_{n2}V_2 + \dots + C_{nn}V_n$$

$C_{ij} \rightarrow$ coeficiente de capacidade

As cargas correspondentes ao mesmo conjunto de linhas de força nos dois condutores têm mesmo módulo e sinais contrários

Condensador: dispositivo para acumular energia de energia elétrica

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

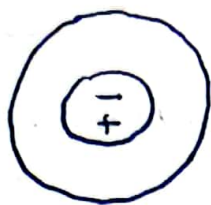
$$\boxed{C = \frac{\epsilon_0 S}{d}} \quad \vec{E} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \text{ (plano)}$$

$$\boxed{C = \frac{4\pi\epsilon_0 R_1 R_2}{(R_2 - R_1)}}$$

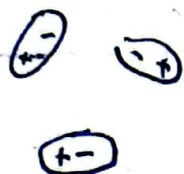
$$Q = \oint \sigma ds \quad \left(\frac{C}{V}\right) = (F)$$

Capacidade condensador plano e cilíndrico Capacidade condensador esférico

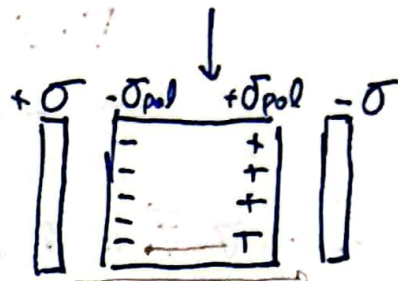
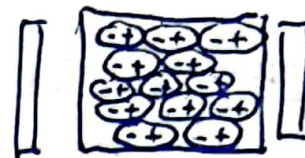
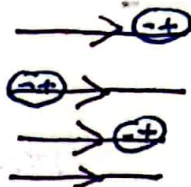
3 Campo elétrico na presença de dielétricos:



polariização
por deformação



polariização
por orientação



$$p = qd$$

Dipolo elétrico (momento dipolar) - momento quando se separam duas cargas

Vetor
Polarização

$$\vec{P} = \frac{\sum \vec{p}}{\text{Vol}} = Nq\vec{d}$$

Se os dipolos estarem alinhados

Polarização (macroscópica): momento dipolar induzido por unidade de volume

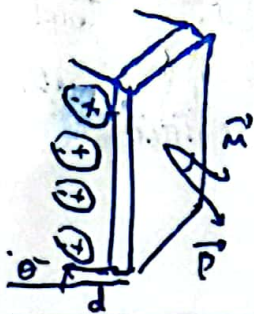
$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi_E \vec{E}$$

susceptibilidade elétrica

Polarização em meios lineares homogêneos e isótopos (LHI).

$$q_{pol} = q' = NqV = Nq(Sd \cos \theta)$$

Lucro de polarização



$$\sigma_{pol} = \vec{P} \cdot \vec{n}$$

$$\epsilon > \epsilon_0 \Rightarrow E(\text{elétrico}) < E_0(\text{sl dielétrico})$$

porque $\vec{E}$ do dielétrico tem sentido oposto ao $\vec{E}'$ do condensador

$$\sigma_{pol} = \sigma' = - \frac{q_{pol}}{S} = - Nq d \cos \theta$$

Densidade superficial de carga de polarização

$$\rho' = \frac{dq'}{dV}$$

$$\sigma' = \frac{dq'}{dS}$$

$$q' = q_{pol} = \iiint_V \rho' dV + \oint_S \sigma' ds = 0$$

$$= \iiint_V \rho' dV + \oint_S \underbrace{\vec{P} \cdot \vec{n} ds}_{T. Gauss} = 0$$

$$\Rightarrow \iiint_V (\rho' + \nabla \cdot \vec{P}) dV = 0$$

$$\boxed{\sigma_{pol} = \vec{P} \cdot \vec{n}} \quad \boxed{\rho_{pol} = - \nabla \cdot \vec{P}}$$

No vácuo:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

e

$$\oint_S \vec{E} \cdot \vec{n} dS = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q_{int}$$

Na presença de dielétricos; ou seja, na presença de cargas de polarização

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho + \rho'}{\epsilon_0}$$

e

$$\oint_S \vec{E} \cdot \vec{n} dS = \frac{1}{\epsilon_0} \sum (q_{int} + q'_{int})$$

$$\epsilon_0 \cdot \nabla \cdot \vec{E} = \rho - \nabla \cdot \vec{P}$$

substituindo em (1) $\vec{P} = \epsilon_0 \chi_E \vec{E}$

$$\Rightarrow \epsilon_0 \nabla \cdot \vec{E} + \nabla \cdot \vec{P} = \rho$$

$$\Rightarrow \vec{D} = \epsilon_0 (1 + \chi_E) \vec{E}$$

$$\Rightarrow \nabla \cdot (\epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}) = \rho$$

$$\Rightarrow \nabla \cdot \vec{D} = \rho$$

$$\Rightarrow \oint_S \vec{D} \cdot \vec{n} dS = \sum q_{int}$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad \left(\frac{C}{m^2} \right)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (1)$$

$$\epsilon = \epsilon_0 (1 + \chi_E) \quad \left(\frac{F}{m} \right)$$

Vetor deslocamento elétrico:

Só depende das cargas livres: q, ρ, σ

Não depende das cargas de polarização

Permitividade elétrica

do meio: quanto mais permitividade do material, polariza melhor na presença de um campo elétrico

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

$$\oint_S \vec{E} \cdot \vec{n} dS = \frac{1}{\epsilon} \sum q_{int}$$

$$\oint_S \vec{D} \cdot \vec{n} dS = \sum q_{int}$$

$$\Rightarrow D_{1N} - D_{2N} = \sigma$$

$$D_{1N} = D_{2N} = \sigma$$

$$E_{1N} = E_{2N} = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

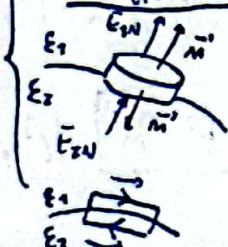
$$\frac{E_{1N}}{E_{2N}} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$$

$$\Rightarrow E_{1T} - E_{2T} = 0$$

$$E_{1T} = E_{2T}$$

Condições fronteira entre dois dielétricos



$$D_{1N} - D_{2N} = \sigma$$

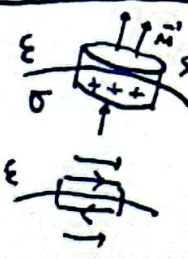
$$E_{1N} - E_{2N} = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$$

$$\Rightarrow E_{1T} - E_{2T} = 0$$

$$E_{1T} = E_{2T} = 0$$

Condições de fronteira entre condutor e dielétrico



$$q_{int} = 0 = E_{2T}$$

$$W^e = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i V_i \quad (J)$$

Energia do campo elétrico:

energia para trazer todas as cargas do infinito até às respectivas posições/trabalho para formar o sistema.

$$W^e = \frac{1}{2} \sum Q_i V_i \quad \text{Energia elétrica de um sistema de condutores}$$

$$W^e = \iiint_V \frac{1}{2} \epsilon E^2 dV = \iiint_V \frac{1}{2} \vec{E} \cdot \vec{D} dV$$

Energia elétrica - expressão Maxwell

Formula generalizada para distribuições de carga contínuas:

$$W^e = \frac{1}{2} \iint_S \sigma V ds + \frac{1}{2} \iiint_V \rho V dV$$

Energia campo elétrico

$$W^e = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} C V^2$$

Energia elétrica de um condensador

$$u_E = \frac{dW^e}{dV} = \frac{1}{2} \epsilon E^2 = \frac{1}{2} \vec{E} \cdot \vec{D}$$

Densidade de energia elétrica

Método dos trabalhos virtuais: $dU + dW = 0$ (Lei de conservação de energia)

$$F \times l_{const} = - \frac{dU}{dx}$$

Carga constante: Sistema Isolado

$$F \times l_{const} = \frac{dU}{dx}$$

Potencial constante: Sistema não Isolado

$$P = \frac{F}{A}$$

Pressão

$$\vec{J} = Nq\vec{v}$$

$$\rho = Nq = \frac{dQ}{dV}$$

$$I = \iint_S \vec{J} \cdot \vec{m} dS \quad \text{Fluxo de } \vec{J}$$

Vetor densidade de corrente

N - densidade portadores carga [m^{-3}]

q - carga portadores carga

$\vec{v}$ - velocidade dos portadores

Densidade carga associada aos portadores de carga

Corrente elétrica (intensidade de corrente: quantidade de carga que passa por uma dada área num dado tempo

$$\oiint_S \vec{J} \cdot \vec{m} dS = - \frac{d}{dt} \iiint_V \rho dV$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0$$

Corrente elétrica estacionária:

O valor da corrente é o mesmo em qualquer seção de um condutor independente da sua área

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad \left(\frac{C}{s} \right)$$

$$\Rightarrow \iiint_V (\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t}) dV = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

Equação da continuidade



$$\vec{J} = \sigma_c \vec{E}$$

↑
condutividade elétrica

$$V = RI$$

Lei de Ohm

$$I = \iint_S \vec{J} \cdot \vec{n} \, dS = |\vec{J}| A = \sigma_c |\vec{E}| A \Rightarrow |\vec{E}| = \frac{I}{\sigma_c A}$$

Como $V = |\vec{E}| l \Rightarrow V = \frac{l}{\sigma_c A} I$

$$R_c = \frac{l}{\sigma_c A}$$

Resistência Elétrica

Caso geral:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{\int \vec{E} \cdot d\vec{l}}{\iint_S \sigma_c \vec{E} \cdot \vec{n} \, dS}$$

Resistência elétrica
(para um condutor de seção uniforme)

$$R = \frac{l}{\sigma_c A} = \frac{\rho_c l}{A}$$

$$dW_e = dQ \cdot V \quad P = \frac{dW_e}{dt} = \frac{dQ}{dt} \cdot V = IV$$

$$P = \frac{dW_e}{dt} = VI$$

Potência Elétrica: energia para transportar cargas ao longo do tempo

$$P = RI^2$$

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

que é o Tempo relaxação (?)

$$\mathcal{E} = RI$$

Força eletromotriz: energia por unidade de carga (tensão nos terminais da bateria)

Fonte tensão ideal: $\mathcal{E}$ é constante (independentemente do circuito exterior) (carga)

Fonte tensão real: $-\mathcal{E} + r_i I + RI = 0$

$$V_R = \left(\frac{R}{R+r_i} \right) \mathcal{E} \quad V_R \approx \mathcal{E} (R \gg r_i)$$

resistência interna da fonte

$$\sum_{k \in \text{mó}} I_k = 0$$

1ª Lei de Kirchhoff (Lei dos Nós):

A soma das correntes que saem de uma superfície fechada é nula. (corrente que entra igual à que sai)



$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

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

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

Resistência em série
em regime estacionário

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

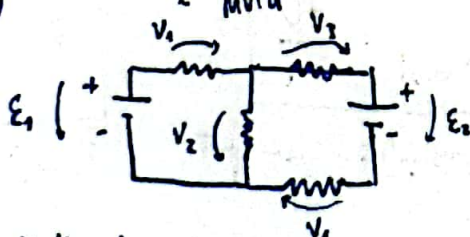
$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Resistência em paralelo
em regime estacionário

$$\sum_{k \in \text{malha}} V_k = 0$$

2ª Lei de Kirchhoff (Lei das Malhas):

A soma das tensões ao longo de um caminho fechado num circuito (malha) é nula



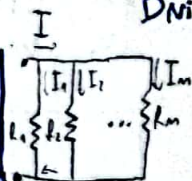
Malha 1: $-\mathcal{E}_1 + V_1 + V_2 = 0$

Malha 2: $\mathcal{E}_2 + V_4 - V_2 + V_3 = 0$

Malha 1-2: $-\mathcal{E}_1 + V_1 + V_3 + \mathcal{E}_2 + V_4 = 0$

$$V_i = \left(\frac{R_i}{R_1 + R_2 + \dots + R_n} \right) V$$

Divisor de tensão



$$I_i = \left(\frac{R_i}{R_1 + R_2 + \dots + R_n} \right) I$$

Divisor de corrente

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

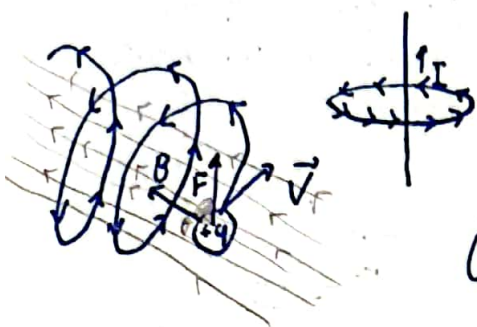
Força de Lorentz

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

Força magnética

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

Campo magnético



$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I}{R} \vec{e}_\phi$$

Campo magnético de um fio infinito

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_L \frac{I \cdot d\vec{l} \times \vec{e}_r}{r^2}$$

Lei de Biot-Savart

Trabalho campo magnético

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2R} \vec{e}_\phi$$

Campo magnético num ponto do eixo simétrico de uma espira

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} (\sin\theta_2 - \sin\theta_1) \vec{e}_\phi$$

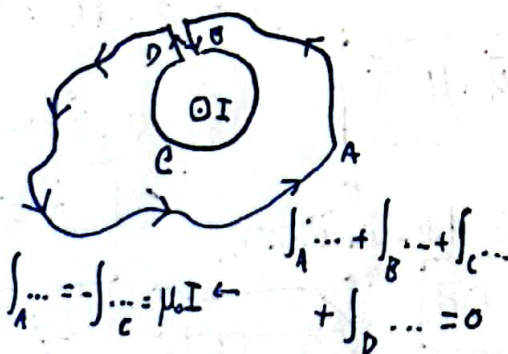
Campo magnético de um fio finito

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = -\mu_0 I$$

Circunferência e circulação em sentido contrário ao da regra da mão direita relativamente a I.

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

Lei de Ampère



$$\oint_{ABCD} \vec{B} \cdot d\vec{l} = 0$$

Trabalho nulo

Linha fechada e corrente no exterior

$$B_z = \mu_0 n I$$

Campo magnético solenoide



$n = \frac{N}{l}$ (Número de espiras por unidade de comprimento)
condutor retilíneo, campo uniforme

$$R = \frac{mv}{qB} = \frac{P}{qB}$$

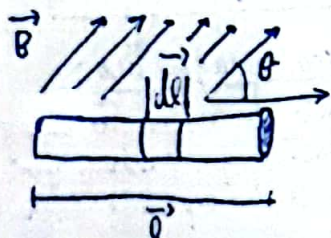
$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{qB}{m}$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \frac{qB}{m}$$

Partículas carregadas num campo B constante, uniforme e $\perp$ a $\vec{v}$

$$\vec{F}_m = \int I (d\vec{l} \times \vec{B}) = I l B \sin\theta \vec{e}_\perp$$

Interação entre um campo magnético e corrente elétrica



Ciclotrão (Lawrence)



- Em cada volta a partícula recebe uma energia $E_m = 2qV_0$

$$\vec{m} = I A \vec{n}'$$

Momento dipolar magnético

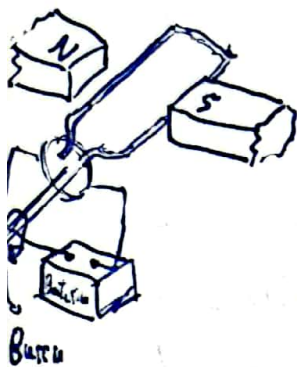
$$M = \vec{m} \times \vec{B}$$

Bimário exercido por um campo magnético sobre um dipolo

$$U = -\vec{m} \cdot \vec{B}$$

Energia potencial de um dipolo magnético na presença de um campo magnético

Exemplo aplicação:

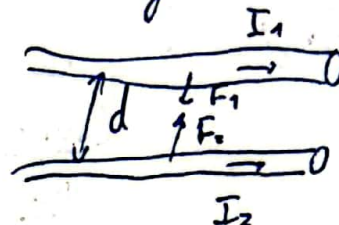


Motor de Corrente Contínua

$$\frac{|\vec{F}|}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d}$$

Força entre duas correntes paralelas (Força por unidade comprimento).

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



⇒ Quando as correntes têm o mesmo sentido a força é atrativa, quando não é repulsiva.

$$\oint \vec{B} \cdot \vec{n} \, dS = 0 \Rightarrow \nabla \cdot \vec{B} = 0$$

Teorema de Gauss para vetor B

As linhas do campo $\vec{B}$ são sempre fechadas. Não existem polos magnéticos, apenas dipolos.

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$$

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

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

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

Lei de Ampère

Indução Magnética:

Oersted 1820:

Correntes elétricas (mesmo estacionária, $I = \text{cte}$)

Faraday 1831:

Campos magnéticos variáveis ($\frac{dB}{dt} \neq 0$)

⇒ Correntes Elétricas (Quando se liga e desliga o interruptor)

Campos magnéticos estacionários ($\frac{dB}{dt} = 0$)

⇒ Correntes Elétricas

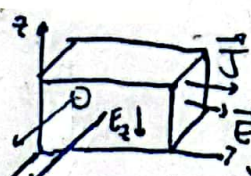
Efeito Hall

$$\Delta V_H = \frac{R_H}{t} I B$$

$$R_H = \frac{1}{Nq}$$

Coefficiente de Hall

⇒ Campos Magnéticos



separam-se as cargas positivas e negativas devido ao $\vec{B}$ e dessa forma cria-se um $\vec{E}_z$

$$\mathcal{E} = \int \vec{F} \cdot d\vec{l}$$

Força Eletromotriz

trabalho realizado por uma força para deslocar uma unidade de carga ao longo de um circuito

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

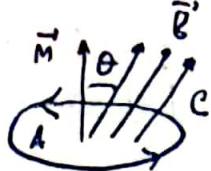
Lei da indução de Faraday

$$\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot \vec{n} \, dS$$

Fluxo magnético:

número de linhas do campo magnético que passam por uma dada superfície fechada

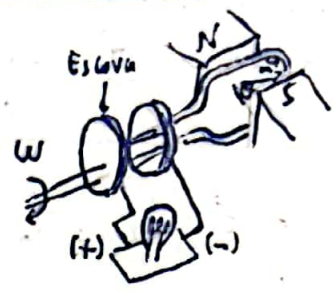
$$\mathcal{E} = - \frac{d\phi}{dt}$$



$$I(t) = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{NBA\omega}{R} \sin(\omega t + \alpha)$$

Equação da corrente elétrica de um gerador

Convertendo a energia mecânica da rotação do eixo numa variação do campo magnético por pela Lei de Faraday leva à indução de tensões nos terminais gerando energia elétrica.



$$\mathcal{E} = - \frac{d}{dt} \left(\iint_S \vec{B} \cdot \vec{n} dS \right)$$

$\vec{B}$ uniforme na superfície

$$\Rightarrow \mathcal{E} = - \frac{d}{dt} [BA \cos \theta]$$

$$\mathcal{E} = - \frac{dB}{dt} [A \cos \theta]$$

Intensidade $\vec{B}$ varia no tempo. A e θ constantes

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

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_C \frac{I d\vec{l}}{r}$$



$$\frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

Equação do transformador

O transformador troca potencial elétrico por corrente elétrica num circuito sem afetar a potência elétrica

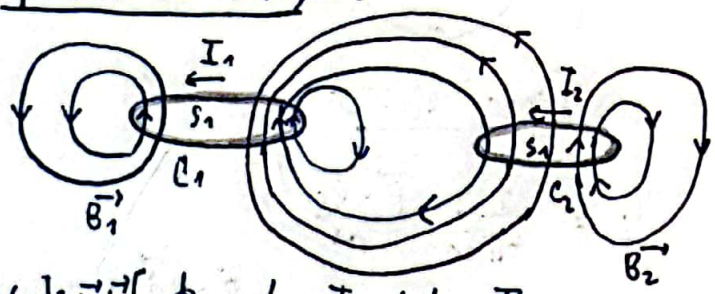
Potencial Magnético: trabalho necessário para mover uma unidade de um polo norte até outro ponto no infinito

Coefficientes de indução:

$$\text{Para } \phi_1: \phi_1 = \iint_{S_1} (\vec{B}_1 + \vec{B}_2) \cdot \vec{n} dS$$

$$\Rightarrow \phi_1 = \oint_{C_1} \vec{A}_1 \cdot d\vec{l}_1 + \oint_{C_2} \vec{A}_2 \cdot d\vec{l}_1$$

$$\Rightarrow \phi_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{C_1} \oint_{C_2} \frac{I_1 d\vec{l}_1 \cdot d\vec{l}_2}{r_{12}} + \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{C_1} \oint_{C_2} \frac{I_2 d\vec{l}_2 \cdot d\vec{l}_1}{r_{12}}$$



$$\begin{cases} \phi_1 = L_{11} I_1 + L_{12} I_2 \\ \phi_2 = L_{21} I_1 + L_{22} I_2 \end{cases}$$

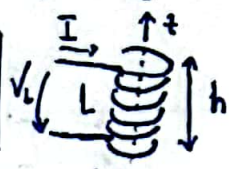
$L_{11}; L_{22} \rightarrow$ coeficientes de autoindução
 $L_{12}; L_{21} \rightarrow$ coeficientes de indução mútua

$$\text{Logo, } L_{11} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{C_1} \oint_{C_1} \frac{d\vec{l}_1 \cdot d\vec{l}_1}{r_{11}}; L_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{C_1} \oint_{C_2} \frac{d\vec{l}_1 \cdot d\vec{l}_2}{r_{12}}$$

$$\phi = LI$$

Fluxo magnético
 L : coeficiente indução

$$V_L = L \frac{dI}{dt}$$



Potencial de uma bobina:
Bobina (indutor): Armazena energia magnética

$$L = \frac{\mu_0 N^2 \pi R^2}{h}$$

Coefficiente de autoindução de uma bobina

$$\mathcal{E} = - \frac{d\phi}{dt} = - \frac{d}{dt} \left(\iint_S \vec{B} \cdot \vec{n} dS \right)$$

$$\Rightarrow \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \left(\iint_S \vec{B} \cdot \vec{n} dS \right)$$

$$\Rightarrow \iint_S (\nabla \times \vec{E}) \cdot \vec{n} dS = \iint_S \left(- \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) \cdot \vec{n} dS$$

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

A lei de Ampère é válida em termos exatos no caso da corrente elétrica estacionária. No entanto, para campos variáveis tem um problema (caso em que $\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$)

A solução do problema (por Maxwell em 1865) $\Rightarrow$ introduzindo $\nabla \times \vec{B} = \mu_0 (\vec{J} + \vec{X})$

$$\vec{X} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \vec{X} = -\nabla \cdot \vec{J}$$

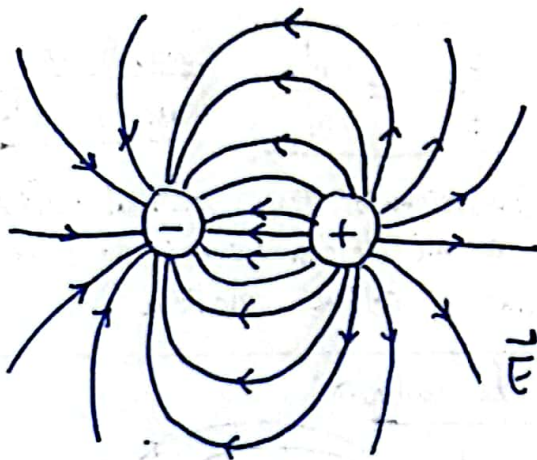
$$\nabla \cdot \vec{X} = \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

Corrente elétrica deslocamento

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left[\sum I_{int} + \frac{d\Phi_D}{dt} \right]$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \underbrace{\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}}_{\vec{J}_{desl}}$$

Lei de Ampère - Maxwell

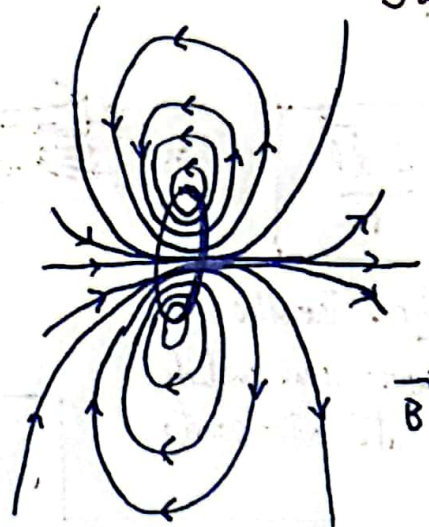


Dipolo elétrico

$$V_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{p} \cdot \vec{e}_r}{r^2}$$

$$\vec{E}_p = -\nabla V_p \quad \vec{p} = q\vec{d}$$

$$\vec{E}_p = \frac{p \cdot (2\cos\theta \cdot \vec{e}_r + \sin\theta \cdot \vec{e}_\theta)}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$



Dipolo magnético

$$\vec{A}_p = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{IA \sin\theta \vec{e}_\varphi}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\vec{m} \times \vec{e}_r}{r^2}$$

$$\vec{B}_p = \nabla \times \vec{A}_p \quad \vec{m} = IA \vec{e}_z$$

$$\vec{B}_p = \frac{\mu_0 m \cdot (2\cos\theta \cdot \vec{e}_r + \sin\theta \cdot \vec{e}_\theta)}{4\pi r^3}$$

$$\vec{m} = \frac{q}{2m} \vec{L}$$

Relação entre momento magnético e momento angular

$$\vec{\mu}_l = \frac{e\hbar}{2m_e} \frac{\vec{L}}{\hbar} = \mu_B \frac{\vec{L}}{\hbar}$$

Momento magnético orbital do elétron

$$\vec{\mu}_s = -2 \times \frac{e\hbar}{2m_e} \frac{\vec{S}}{\hbar} = -2\mu_B \frac{\vec{S}}{\hbar}$$

Momento magnético de spin do elétron

Substâncias

repelido em todas as situações

Diamagnéticas

sem momentos magnéticos intrínsecos
repelidas pelo campo magnético

Paramagnéticas

com momentos magnéticos intrínsecos
sem magnetização permanente
facilmente atraídas pelo campo magnético

Ferromagnéticas

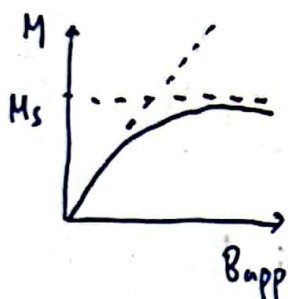
com momentos magnéticos intrínsecos
com magnetização permanente
fortemente atraídas pelo campo magnético

campo aplicado

$$M = \frac{1}{3} \frac{\mu B_{app} M_s}{kT}$$

Lei de Curie:

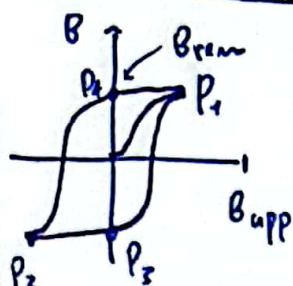
Magnetização em função do campo aplicado num material paramagnético



⇒ Nas substâncias ferromagnéticas os momentos magnéticos intrínsecos tendem a alinhar-se com o campo formado pelos vizinhos

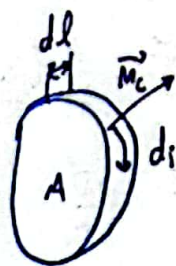
⇒ O alinhamento dos momentos dipolares magnéticos intrínsecos dá-se abaixo de uma dada temperatura (T_c - temperatura de Curie)

Ciclo de Histerese



Material ferromagnético

Histerese - tendência de um sistema para manter as suas propriedades na ausência de um estímulo que as gerou



⇒ $\vec{M}$ - vetor magnetização macroscópica (Momento magnético por unidade de volume)



⇒ $d_i = d_m =$ corrente equivalente de Ampère na secção do condutor de comprimento dl



⇒ $|\vec{m}| = d_i \cdot a$ - momento dipolar magnético microscópico da corrente equivalente de Ampère ($A = \sum a$)

⇒ dN - número de dipolos magnéticos no volume dV

⇒ $\vec{M}$ - vetor normal à exterior da corrente superficial de magnetização

⇒ $\vec{j}_M$ - densidade de corrente superficial de magnetização

$$|\vec{M}| = |\vec{j}_M| \quad dN/dV = d_i/a$$

$$\vec{j}_M = \vec{M} \times \vec{M}_c$$

$$\vec{M} = \frac{dN}{dV} \vec{m}$$

$$\vec{J}_M = \nabla \times \vec{M}$$

Corrente ^{de magnetização} por unidade de superfície

$$\vec{J} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} \times \vec{m}'$$

Corrente por unidade de comprimento

$$\vec{J}_M = \vec{M} \times \vec{m}'$$

Densidade de corrente superficial de magnetização

No vácuo :

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Na presença de matéria :

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 (\vec{J} + \vec{J}_{desl} + \vec{J}_p + \vec{J}_M)$$

Corrente
condução

Corrente
deslocamento

Corrente
polarização

Corrente
Magnetização

$$\vec{J}$$

$$\epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\vec{J}_p = \frac{\partial \vec{P}}{\partial t}$$

$$\vec{J}_M = \nabla \times \vec{M}$$

$$\vec{J}_p = \frac{\partial \vec{P}}{\partial t}$$

Densidade de corrente de polarização

⇒ Corrente de polarização : resulta do movimento de cargas elétricas no processo de polarização

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \left[\vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{P}}{\partial t} + (\nabla \times \vec{M}) \right]$$

$$\Rightarrow \nabla \times \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} \right) - (\nabla \times \vec{M}) = \vec{J} + \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_0 \vec{E} + \vec{P})$$

$$\Rightarrow \nabla \times \left(\underbrace{\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}}_{\vec{H}} \right) = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\Rightarrow \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

Campo da corrente de condução

$$\vec{B} = \mu (\vec{H})$$

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

μ - Permeabilidade Magnética

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H}$$

Magnetização

χ_m - Suscetibilidade Magnética

$$\Rightarrow \iint_S (\nabla \times \vec{H}) \cdot \vec{n} ds = \iint_S \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot \vec{n} ds$$

$$\Rightarrow \oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_S \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot \vec{n} ds$$

Lei de Ampère-Maxwell na presença de matéria

Condições da fronteira na superfície de separação entre dois meios com permeabilidades magnéticas diferentes:

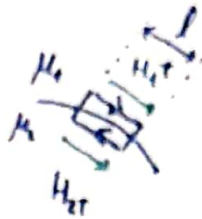


$B_{1N} H_{2T}$

$$\oint_S \vec{B} \cdot \vec{n} ds = 0$$

$$B_{1N} - B_{2N} = 0$$

$$\Rightarrow \frac{H_{1N}}{H_{2N}} = \frac{\mu_2}{\mu_1}$$



$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_S \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot \vec{n} ds$$

$$\Rightarrow H_{1T} l - H_{2T} l = 0$$

$$\Rightarrow \boxed{H_{1T} = H_{2T}}$$

$$W_m = U_L = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{2} \Phi I$$

Energia Magnética de um solenoide

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

Densidade de energia magnética

$$P = \iiint_V \vec{E} \cdot \vec{J} dV = - \oint_S \vec{S} \cdot \vec{n} ds - \frac{d}{dt} \iiint_V (u_E + u_B) dV$$

Teorema de Poynting - Potência

densidade de energia elétrica

densidade de energia magnética

$$\vec{E} \cdot \vec{J}$$

Densidade de potência
no vol. dV associada
ao movimento de
cargas elétricas

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} = \frac{1}{\mu} (\vec{E} \times \vec{B})$$

Vetor de Poynting: Fluxo de
potência por unidade de área
na superfície S

① Se não houver movimento
de cargas (vácuo)

$$P = \iiint_V \vec{E} \cdot \vec{J} dV = 0$$

② Se as densidades elétricas e
magnéticas são constantes e há
movimento de cargas

$$P = \iiint_V \vec{E} \cdot \vec{J} dV = - \oint_S \vec{S} \cdot \vec{n} ds$$

Ondas:

$$f = \frac{1}{T}$$

frequência

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

velocidade de fase

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0$$

Equação de onda

$$\phi = \phi(u) \\ \Rightarrow u = x \pm vt$$

Solução da equação de onda

$$\phi(x,t) = A \sin[k(x-vt)]$$

$$x = \lambda \Rightarrow k\lambda = 2\pi$$

$$t = T \Rightarrow \omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$\omega = kv = \frac{2\pi}{\lambda} v$$

Onda sinusoidal produzida por uma dipolo

$$= A \cos(kx - \omega t + \alpha)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \xrightarrow{\nabla \times} \nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{B}) = \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \Rightarrow \nabla^2 \vec{E} - \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

$$\nabla \times \vec{B} = \epsilon \mu \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \xrightarrow{\nabla \times} \nabla \times (\nabla \times \vec{B}) = \epsilon \mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{E}) = -\epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \Rightarrow \nabla^2 \vec{B} - \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0$$

$$\text{Nota: } \nabla \times (\nabla \times \vec{f}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{f}) - \nabla^2 \vec{f}$$

este sistema de
 $\frac{1}{c_m^2} = \mu \epsilon$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Velocidade de propagação do campo eletromagnético no vácuo

$$c_m = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_m \mu_m}}$$

velocidade de propagação do campo eletromagnético num certo meio

$$\vec{E} = E_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \phi) \\ = \text{Re} \{ E_0 e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \phi)} \}$$

Ondas eletromagnéticas planas sinusoidais

$$\vec{e}_p = \frac{\vec{E}_0}{|\vec{E}_0|}$$

Onda polarizada linearmente

(direção de polarização)

$$k_x \vec{e}_x + k_y \vec{e}_y + k_z \vec{e}_z = |\vec{k}| \vec{n} = k \vec{n} \\ |\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Vetor onda

$$\vec{n} = \frac{\vec{k}}{|\vec{k}|} = \frac{k_x \vec{e}_x + k_y \vec{e}_y + k_z \vec{e}_z}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}}$$

Direção de propagação

$$\vec{E} = E_0 e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \phi)}$$

Expressão campo elétrico

$$\vec{B} = B_0 e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \phi)}$$

Expressão campo magnético

Assim para ondas eletromagnéticas planas sinusoidais

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = E_0 e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \phi)}$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = i \vec{k} \cdot \vec{E}$$

$$\nabla \times \vec{E} = i(\vec{k} \times \vec{E})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \vec{E}(\vec{r}, t) = i\omega \vec{E}(\vec{r}, t)$$

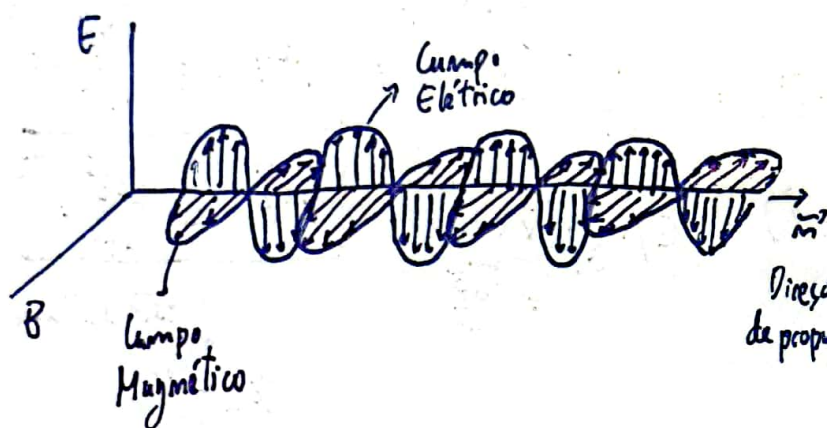
(idem para o campo $\vec{B}$)

$$\begin{cases} -i(\vec{k} \times \vec{E}) = i\omega \vec{B} \\ -i(\vec{k} \times \vec{B}) = i\omega \epsilon \mu \vec{E} \end{cases}$$

$$\frac{\vec{k}}{\omega} = \frac{\vec{k} \vec{m}}{\omega} = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \frac{\vec{m}}{2\pi f} = \frac{\vec{m}}{\lambda f} = \frac{\vec{m}}{c_m}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \vec{B} = \left(\frac{\vec{k}}{\omega}\right) \times \vec{E} \\ \vec{E} = -\frac{1}{\epsilon \mu} \left(\frac{\vec{k}}{\omega}\right) \times \vec{B} \end{cases} \quad \frac{1}{\epsilon \mu} = c_m^2$$

$$\begin{cases} \vec{B} = \frac{1}{c_m} (\vec{m} \times \vec{E}) \\ \vec{E} = -c_m (\vec{m} \times \vec{B}) \end{cases}$$



$$|\vec{B}| = \frac{|\vec{E}|}{c_m}$$

$$U_{EM} = U = U_E + U_B = \epsilon E^2$$

$$\langle U_{EM} \rangle = \epsilon \langle E^2 \rangle = \frac{1}{2} \epsilon E_0^2$$

Densidade de energia média de uma OEM não polarizada ou polarizada linearmente

$$\vec{S} = \epsilon_0 c_m E^2 \vec{m} = c_m U_{EM} \vec{m}$$

Vetor de Poynting numa OEM

$$I = \langle |\vec{S}| \rangle = \epsilon c_m \langle E^2 \rangle = \frac{1}{2} \epsilon c_m E_0^2$$

Intensidade de uma OEM não polarizada ou polarizada linearmente