www.estudar.com.vc

Física III

Fuja do Nabo P3 2018.1

Resumo e Lista de Exercícios

Resumo

1. Corrente de Deslocamento

Primeiramente, vamos lembrar a Lei de Ampère. Ela era a seguinte equação:

$$\oint_{\gamma} \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I_c$$

Em que $\vec{B}$ é o vetor campo magnético, γ é o Circuito de Ampère adotado, μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} T \cdot m/A$) e I_c é a corrente que passa internamente pelo Circuito de Ampère adotado.

O que acontece é que essa equação está incompleta nessa forma escrita. Foi então que, no desenvolvimento da teoria do eletromagnetismo, Maxwell introduziu a **corrente de deslocamento**, dada por:

$$I_d = \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

E, assim, a Lei de Ampère-Maxwell na sua forma geral e completa fica:

$$\oint_{\gamma} \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I_c + \mu_0 \underbrace{\varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}}_{I_d}$$

Lembrando que ε_0 é a permissividade elétrica no vácuo.

O que precisamos entender agora é o que é Φ_E, que é chamado de **fluxo elétrico**. Em suma, ele é o **produto escalar entre o vetor área $\vec{A}$ e o vetor campo elétrico $\vec{E}$**. De maneira geral, o fluxo elétrico é:

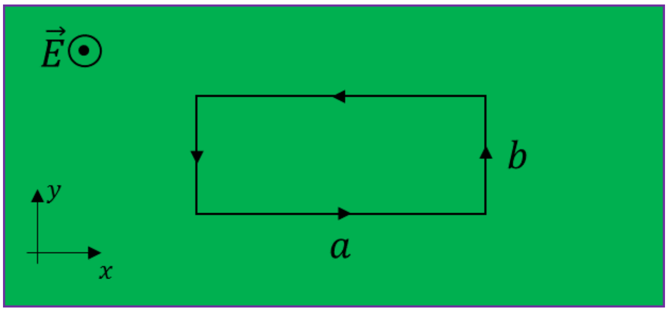
$$\Phi_E = \int \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

A área que a gente usa é a área referente à superfície do Circuito de Ampère que é adotado na Lei de Ampère-Maxwell. A direção é perpendicular à superfície e o sentido é indicado pela **regra da mão direita**, basta girar a mão no sentido adotado no Circuito.

Vamos ver alguns exemplos de cálculo de Φ_E.

a. Campo Elétrico Homogêneo e Área Total

Na imagem abaixo, o campo elétrico $\vec{E}$ é uniforme na região em verde, e é dado por $\vec{E} = E\hat{k}$.



O Circuito de Ampère adotado é o retângulo com sentido anti-horário. Nesse caso, o vetor área desse circuito é:

$$\vec{A} = ab\hat{k}$$

Como o campo elétrico é homogêneo e ele está distribuído em toda a área do circuito, o fluxo vira:

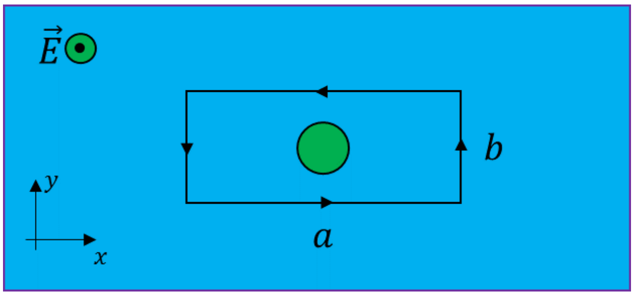
$$\Phi_E = (E\hat{k}) \cdot (ab\hat{k})$$

$$\Phi_E = Eab$$

Observação: Caso o sentido do circuito fosse horário, o vetor área seria do tipo $-ab\hat{k}$, e o fluxo daria negativo.

b. Campo Elétrico Homogêneo e Área Parcial

Agora imagine que o campo elétrico $\vec{E} = E\hat{k}$, também homogêneo, é concentrado em uma área circular de raio c (Circunferência C) interna ao retângulo.



Nesse caso, como o campo elétrico é aplicado em uma pequena região, quando fizermos a integral:

$$\Phi_E = \int \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

Na região em que não atua campo elétrico ($\vec{E} = \vec{0}$), teríamos o equivalente a:

$$\Phi_E = \int \vec{0} \cdot d\vec{A}$$

E na região total do retângulo R, a gente teria:

$$\Phi_E = \int_{R-C} \vec{0} \cdot d\vec{A} + \int_{C} \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

Basicamente o que queremos dizer é: para ter fluxo elétrico, precisa ter campo elétrico, ou seja, as regiões que possuem campo elétrico nulo não contribuem para o fluxo elétrico. Então caso o campo elétrico esteja concentrado em uma região, use apenas a área efetiva dessa região (e não a do circuito todo).

Temos, então, que $\vec{A} = \pi c^2 \hat{k}$ e $\vec{E} = E\hat{k}$, de forma que:

$$\Phi_E = E\pi c^2$$

c. Campo Elétrico Variável
Usando a mesma imagem do exemplo **a**, agora imagine que o campo elétrico atuante nessa região seja do tipo $\vec{E} = \alpha y$ e que a base inferior do circuito comece em $y = 0$.

Como aqui temos um campo variável, precisamos integrar. Usaremos a diferencial de área $d\vec{A} = (ady)\hat{k}$ (lembrando que a direção e sentido são dados pela regra da mão direita) para fazer a integral:

$$\Phi_E = \int \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

Dessa forma, ficamos com:

$$\Phi_E = \int (\alpha y\hat{k}) \cdot (ady\hat{k})$$

E essa integral vira:

$$\Phi_E = \alpha a \int_0^b y dy$$

E, por fim:

$$\Phi_E = \frac{\alpha a b^2}{2}$$

Uma coisa que devemos reparar na Lei de Ampère-Maxwell que a gente enunciou:

$$\oint_\gamma \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I_c + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

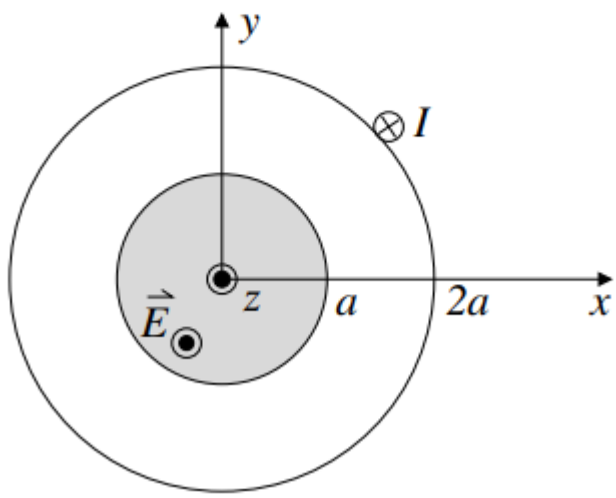
O que gera campo magnético circulante é a corrente elétrica e a **variação** do fluxo elétrico. Então, apenas ter um fluxo elétrico propriamente dito, não implica em muita coisa, apenas no fato de que ele está lá. Agora, caso ele varie no tempo, aí podemos afirmar que há o campo magnético circulante igual ao da corrente.

Exercícios de Fixação

1. Corrente de Deslocamento

P3 2017

Em uma casca cilíndrica de comprimento infinito, raio $2a$ e coaxial com o eixo z, passa uma corrente I, uniformemente distribuída, que flui no sentido de z negativo. No interior desta casca cilíndrica existe uma região cilíndrica (região cinza na figura) também de comprimento infinito, raio a e coaxial com o eixo z onde há um campo elétrico uniforme $\vec{E}(t) = Kt\hat{k}$, onde K é uma constante positiva e t é o tempo.

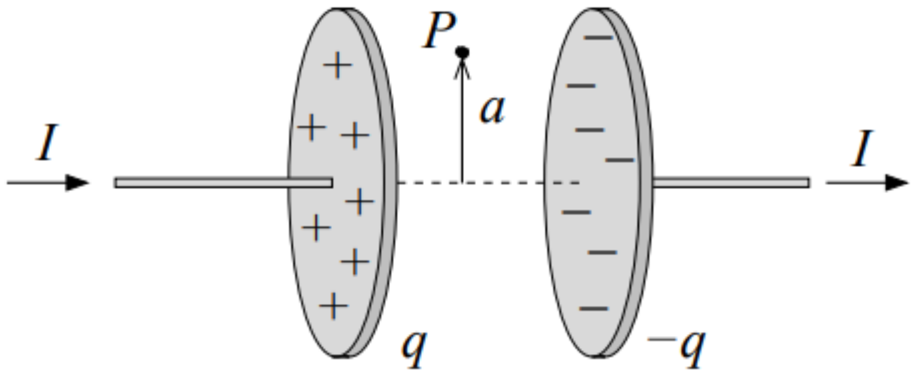


a. Desconsiderando a casca cilíndrica por onde passa corrente, calcule o vetor campo magnético em todo o espaço (regiões $r < a$ e $r > a$, onde r é distância ao eixo z).
b. Determine o vetor campo magnético devido somente à corrente que passa pela casca cilíndrica em todo o espaço.
c. Calcule o valor da corrente I para que o campo magnético seja nulo para $r > 2a$.

2. Corrente de Deslocamento

P3 2016

Um capacitor de placas paralelas circulares, no vácuo, está sendo carregado, como indica a figura abaixo. As placas têm raio R e a corrente de condução nos fios no instante t é igual a $I(t)$.



Calcule o campo magnético no ponto P a uma distância $a < R$ do eixo do capacitor, conforme a figura. Dado: o campo elétrico dentro do capacitor é $E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$, onde σ é a densidade superficial de carga.

2. Lei de Faraday-Lenz

A última Lei do eletromagnetismo vista nesse curso é a **Lei de Faraday-Lenz**. Essa Lei tem um princípio parecido com a Lei de Ampère-Maxwell e a corrente de deslocamento, mas agora dizemos que **a variação no fluxo magnético negativa produz um campo elétrico circulante**. Podemos dizer que:

$$\oint_{\gamma} \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Por mais que pareça a mesma coisa de sempre, devemos lembrar que a integral na esquerda da igualdade era igual à **diferença de potencial**.

Isso significa que **a variação negativa no fluxo magnético induz uma força eletromotriz (ε) que produz corrente em um condutor fechado (espira)**. Ou seja:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Devemos enfatizar o sinal negativo que vem da **Lei de Lenz**. Ela nos diz que **a corrente induzida se opõe à variação do fluxo magnético**. Se, por exemplo, o fluxo aumentar, a corrente que passa pela espira em questão produzirá um campo magnético que irá se opor a esse aumento.

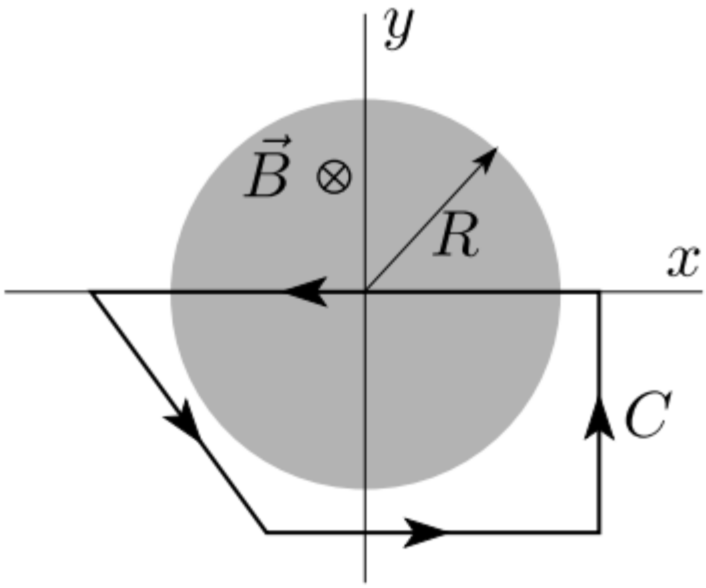
Uma forma fácil de saber o sentido da corrente induzida é pela circuitação. Primeiro, você adota o circuito γ tendo o formato da espira e adota um sentido para esse circuito (horário ou anti-horário). Se nas contas aparecer $\varepsilon > 0$, significa que o sentido adotado de circuito é o da corrente. Caso $\varepsilon < 0$, então o sentido é oposto. Use a mesma regra para o vetor área.

Exercícios de Fixação

3. Lei de Faraday-Lenz

P3 2014

O campo magnético em todos os pontos de uma região cilíndrica de raio R é uniforme e direcionado para dentro da página, variando com o tempo segundo $B = Kt$, onde K é uma constante positiva.



a. Determine a integral $\oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell}$ do campo elétrico ao longo do circuito C indicado na figura.

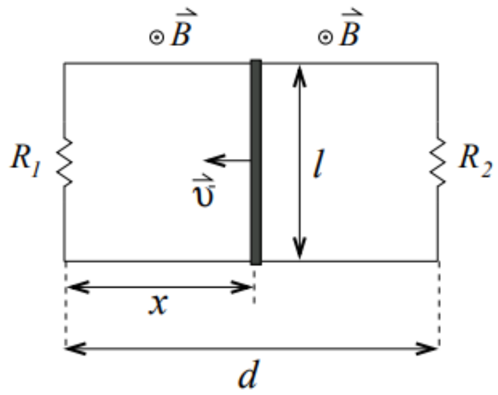
b. Determine o vetor campo elétrico $\vec{E}$ fora da região cilíndrica de raio R.

c. Determine o vetor campo elétrico $\vec{E}$ dentro da região cilíndrica de raio R.

4. Lei de Faraday-Lenz

P3 2011

Uma barra condutora perfeita (com resistência nula) desliza sem atrito com velocidade v, para a esquerda, sobre dois fios condutores também perfeitos. Dois resistores R_1 e R_2 estão conectados às extremidades dos dois fios, formando o circuito mostrado na figura. A distância entre os fios horizontais é l, entre os resistores é d, e da barra ao resistor R_1 é x. Um campo magnético uniforme e constante de intensidade B é aplicado perpendicularmente ao circuito, para fora da página. *Ao calcular o fluxo magnético através de qualquer superfície, adote o vetor normal à superfície, na mesma direção e sentido do campo magnético.*



a. Determine o sentido (horário ou anti-horário) da corrente na porção do circuito à direita da barra justificando a sua resposta por meio da lei de Lenz.

b. Calcule o fluxo magnético através da porção do circuito à direita da barra. Determine a corrente que atravessa o resistor R_2 por meio da lei de Faraday.

c. Determine o sentido (horário ou anti-horário) da corrente na porção do circuito à esquerda da barra justificando a sua resposta por meio da lei de Lenz.

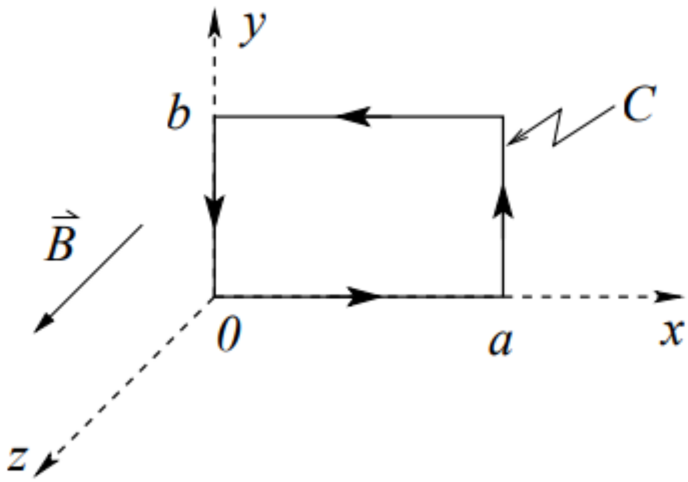
d. Calcule o fluxo magnético através da porção do circuito à esquerda da barra. Determine a corrente que atravessa o resistor R_1 por meio da lei de Faraday.

e. Calcule a intensidade e a direção da força magnética exercida sobre a barra. Essa força é de aceleração ou de frenagem?

5. Lei de Faraday-Lenz

P3 2015

O campo elétrico na região considerada na figura é dado por $\vec{E}(y) = Ky\hat{\imath}$ sendo K uma constante positiva.

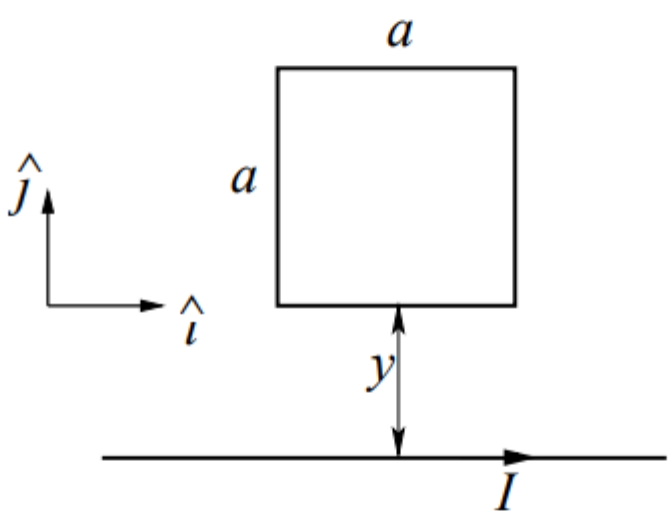


a. Calcule a integral de linha $\oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell}$ ao longo do retângulo C de largura a e altura b, orientado como é mostrado na figura.
b. Além do campo elétrico na região considerada há também um campo magnético uniforme $\vec{B}(t) = B(t)\hat{k}$ cuja intensidade depende do tempo. Em $t = 0, B(0) = B_0$. Utilizando a lei de Faraday na forma integral determine $B(t)$.
c. Calcule a densidade de carga na região.

6. Lei de Faraday-Lenz

P3 2014

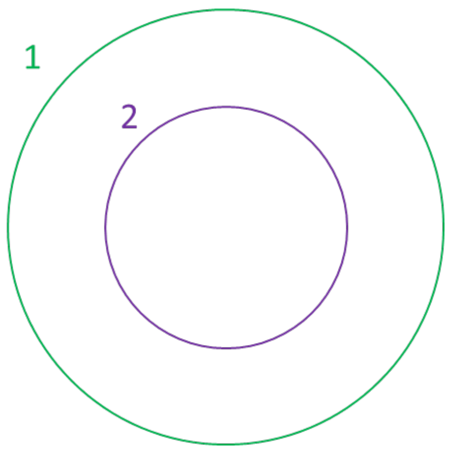
Uma espira quadrada de lado a e resistência R está sobre uma mesa, a uma distância y de um fio muito longo sobre o eixo x que transporta uma corrente I, conforme mostra a figura. O módulo do campo produzido pelo fio é $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$, onde r é a distância até o fio.



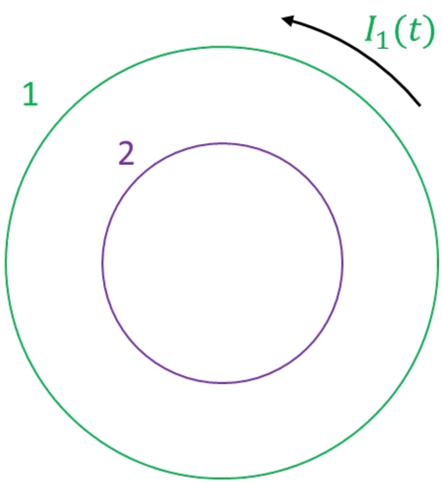
a. Calcule o fluxo do campo magnético, produzido pelo fio, através da espira.
b. A espira é movimentada na direção y, afastando-se do fio com velocidade $v = \frac{dy}{dt}$. Use a lei de Lenz para determinar o sentido da corrente induzida na espira (horário ou anti-horário), justificando sua resposta. Calcule a corrente induzida I.
c. Determine o valor da corrente induzida se a espira é movimentada para a direita (direção x) mantendo constante a distância y até o fio.

3. Indutância

Em indutância, estudamos os efeitos da Lei de Faraday-Lenz em solenoides devido ao efeito único de **variação de corrente**. Primeiramente, vamos falar de indutância mútua e, para isso, imagine dois solenoides com N_1 e N_2 voltas e que seus eixos de simetria sejam concêntricos.



Inicialmente, não há corrente em nenhum dos dois. Imagine que no solenoide 1 surja uma corrente variando no tempo $I_1(t)$.



Essa corrente irá gerar um fluxo magnético variável no solenoide 2, de forma que apareça uma corrente induzida.

A ideia da indutância mútua é relacionar a *f.e.m* induzida no solenoide 2 pelo 1 com a variação temporal da corrente em 1. Para isso, definimos a indutância mútua, dada por:

$$M = \frac{N_2 \Phi_2}{I_1}$$

Na verdade, a indutância mútua (M) é apenas uma constante de proporcionalidade entre Φ_2 (fluxo magnético total no solenoide 2) e a corrente que gera esse fluxo ($I_1(t)$), de forma que M seja uma constante.

E a *f.e.m* induzida em 2 será:

$$\varepsilon_2 = -M \frac{dI_1}{dt}$$

Repare que adotamos arbitrariamente que a corrente apareceria em 1. Poderia ser que a corrente aparecesse em 2. A indutância mútua, nesse caso, é a **mesma**, ou seja:

$$M = \frac{N_2 \Phi_2}{I_1} = \frac{N_1 \Phi_1}{I_2}$$

Além da indutância mútua, também temos o efeito de **auto-indução**. Esse fenômeno ocorre quando a corrente de um solenoide muda, de forma que o campo magnético gerado por esse solenoide também mude. Isso tudo resulta em uma variação do fluxo magnético e, consequentemente, em uma *f.e.m* auto-induzida.

A auto-indutância (L) é calculada por:

$$L = \frac{N\Phi}{I}$$

Em que N é o número de voltas do solenoide, Φ é o fluxo magnético de uma única volta do solenoide e I é a corrente variável que passa pelo solenoide.

A *f.e.m* auto-induzida é:

$$\varepsilon = -L\frac{dI}{dt}$$

E antes de passar para os exercícios de fixação, assim como tínhamos a densidade de energia elétrica, também temos a densidade de energia magnética, dada por:

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

E a energia em um indutor é do tipo:

$$E = \frac{LI^2}{2}$$

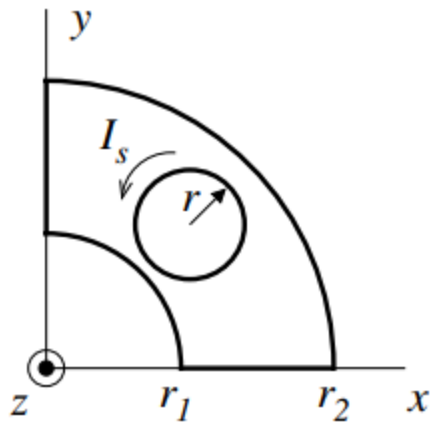
Observação: Solenoide, como descrito nesse resumo, pode ser tanto o cilíndrico, quanto o toroidal ou até mesmo um plano, com $N = 1$ *(exemplo: anel).*

Exercícios de Fixação

7. Indutância Mútua

P3 2017

Um circuito com resistência R, contido no plano xy, é constituído por dois arcos de circunferência com raios r_1 e r_2 e por dois segmentos retos. Este circuito envolve um solenoide muito longo, com eixo paralelo ao eixo z, n espiras por unidade de comprimento e raio r tal que $2r < r_2 - r_1$, conforme a figura. Pelo solenoide passa uma corrente I_s que flui no sentido anti-horário. I_s cresce com o tempo com taxa $\beta = \frac{dI_s}{dt} > 0$. Desprezando efeitos de borda, a intensidade do campo magnético no interior do solenoide é $B = \mu_0 n I_s$.



a. Calcule o fluxo do campo do solenoide através do circuito.
b. Calcule o coeficiente de mútua indutância entre o solenoide e o circuito.
c. Calcule o sentido (horário ou anti-horário) e a magnitude da corrente I induzida no circuito.

8. Auto-Indutância

P3 2014

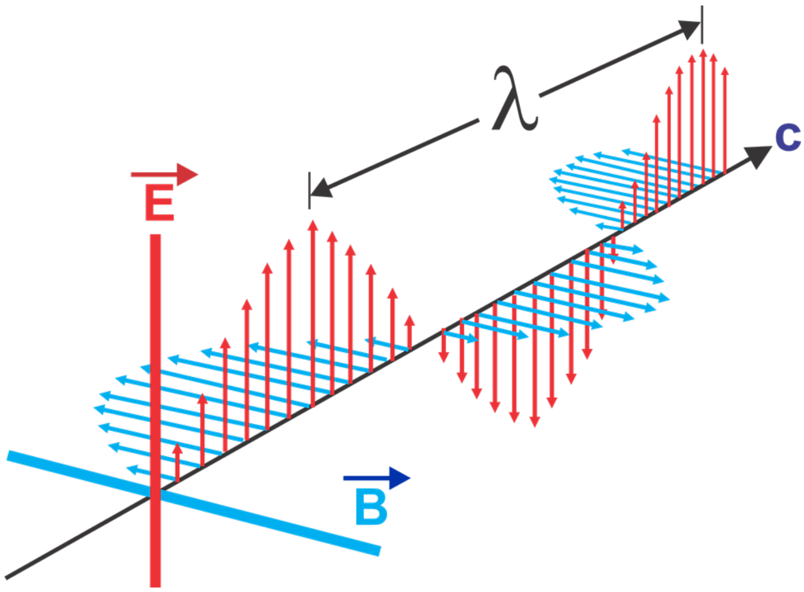
Um solenoide longo de comprimento h e raio R $(h \ >> \ R)$ tem um enrolamento com N espiras. O módulo do campo no interior do solenoide é $B = \frac{\mu_0 NI}{h}$.

a. Calcule a auto-indutância do solenoide.
b. Repita o cálculo do item **a** para o caso em que o solenoide está preenchido com um material de suscetibilidade χ_m.

4. Ondas Eletromagnéticas

Aqui é o momento em que se mata saudades de Física II. As ondas eletromagnéticas são uma solução da natureza da luz que, até hoje, é utilizada (em conjunto com o conceito de fótons).

Essas ondas são compostas por **campo elétrico** e **campo magnético**, que ficam sempre **ortogonais**. Um esquema dessa onda pode ser visto abaixo:



Com as Equações de Maxwell, pôde-se calcular teoricamente, pela primeira vez, a velocidade da luz, com a seguinte relação:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$$

E esse valor se aproxima de $c = 3 \cdot 10^8\ m/s$ (faça a conta, usando $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ T \cdot m/A$ e $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ F/m$).

O que vamos ver agora são algumas relações nas ondas eletromagnéticas.

A **relação escalar entre o campo elétrico $\boldsymbol{E}$ e o magnético $\boldsymbol{B}$** é:

$$E = cB$$

O **sentido de propagação** da onda é dado por:

$$\vec{E} \times \vec{B}$$

A onda eletromagnética pode ser descrita por **ondas harmônicas** de campo elétrico e magnético (em vetor). Um exemplo é:

$$\vec{E}(x,t) = E_0 \cos(kx - \omega t + \delta)\,\hat{\jmath}$$

$$\hat{B}(x,t) = B_0 \cos(kx - \omega t + \delta)\,\hat{k}$$

Em que a onda se propaga na direção positiva de x com velocidade $\frac{\omega}{k}$. A relação entre as duas é dada pelas fórmulas acima. Caso queira relembrar o equacionamento desse tipo de onda, veja o resumo sobre ondas. Sugiro ler as partes de onda progressiva, onda harmônica e onda estacionária.

O último tópico a ser abordado é o **Vetor de Poynting**. Ele é definido como vetor de fluxo de energia, isto é, ele aponta na direção da propagação da onda eletromagnética e é a intensidade instantânea da onda. Ele é dado por:

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

Ele é um fluxo de energia por unidade de tempo e área. Na maioria das vezes, devido à alta frequência das ondas eletromagnéticas, calculamos a **média** do módulo do vetor de Poynting para obter intensidade média.

$$I = < S >$$

Sendo que a notação de $< f >$ é denominada média da grandeza f. Para ondas senoidais ou cossenoidais, o valor médio é conhecido e dado por:

$$I = \frac{EB}{2\mu_0}$$

E se ainda substituirmos B por $\frac{E}{c}$ e $\mu_0 = \frac{1}{c^2 \varepsilon_0}$, temos:

$$I = \frac{\varepsilon_0 c E_0^2}{2}$$

Todas as médias de funções relevantes serão fornecidas no formulário.

Observação: no exemplo das ondas harmônicas, sabemos que a propagação ocorre em x positivo porque era a coordenada descrita na equação $y(x, y, z, t)$. Outras coordenadas, como y e z também poderiam ser usadas, caso a propagação ocorresse em algum dos outros dois eixos. Em propagação 3D, ao invés de número de onda k, usamos o vetor de onda $\vec{k} = k_x\hat{\imath} + k_y\hat{\jmath} + k_z\hat{k}$ e o vetor posição $\vec{r} = x\hat{\imath} + y\hat{\jmath} + z\hat{k}$, e a equação de onda ficaria:

$$\mathrm{y}(\mathrm{x}, \mathrm{y}, \mathrm{z}, \mathrm{t}) = \mathrm{A} \cos\left(\vec{\mathrm{k}} \cdot \vec{\mathrm{r}} - \omega \mathrm{t} + \delta\right)$$

Exercícios de Fixação

9. Onda Eletromagnética

PSub 2017

Considere uma onda eletromagnética plana que se propaga no vácuo com campo elétrico dado por $E(z,t) = E_0 \cos(kz - \omega t)\,\hat{\imath}$

a. Escreva a expressão para campo magnético correspondente, justificando sua resposta.

b. Calcule o vetor de Poynting $\vec{S}$ e a intensidade I da onda.

c. Suponha que essa onda incide normalmente sobre um disco, de raio R, perfeitamente absorvedor. Calcule a energia que atravessa o disco num intervalo de tempo igual ao período da onda.

10. Onda Eletromagnética

PRec 2015

Uma onda eletromagnética plana monocromática que se propaga no vácuo possui um campo elétrico descrito pela expressão:

$$\vec{E}(z,t) = E_0 \sin[2\pi(az + bt)]\hat{\imath}$$

onde a e b são constantes positivas.

a. Determine a direção e o sentido de propagação da onda. Calcule o comprimento de onda e a frequência da onda em função das constantes a e b.

b. Qual relação deve haver entre a e b para que $\vec{E}(z,t)$ satisfaça a equação de onda da luz se propagando no vácuo?

c. Determine o vetor $\vec{B}$ em função de E_0, a, b e da velocidade da luz no vácuo c.

d. Calcule o vetor de Poynting instantâneo e a densidade de energia média desta onda.

5. Equações de Maxwell

A tabela abaixo contém todas as 4 Equações de Maxwell na forma diferencial e integral. A maior parte do curso foca na intuição da forma integral, mas alguns exercícios cobram o uso da diferencial. Não se esqueça de lembrar o que é o operador **rotacional** e o operador **divergente**.

Lei	Forma Integral	Forma Diferencial
Gauss ($\vec{E}$)	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{int}}{\varepsilon_0}$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$
Gauss ($\vec{B}$)	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$
Ampère-Maxwell	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \Phi_E}{\partial t}$	$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$
Faraday-Lenz	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t}$	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$

Gabarito

1.

a. $\vec{B}(r) = \begin{cases} \frac{\mu_0 \varepsilon_0 K r}{2} \hat{\theta}, para\ r < a \\ \frac{\mu_0 \varepsilon_0 K a^2}{2r} \hat{\theta}, para\ r > a \end{cases}$

b. $\vec{B}(r) = \begin{cases} \vec{0}, para\ r < 2a \\ -\frac{\mu_0 I}{2\pi r} \hat{\theta}, para\ r > 2a \end{cases}$

c. $I = \varepsilon_0 K a^2 \pi$

2. $B = \frac{\mu_0 a I}{2\pi R^2}$

3.

a. $\frac{K\pi R^2}{2}$

b. $\vec{E} = \frac{KR^2}{2r} \hat{\theta}$

c. $\vec{E} = \frac{Kr}{2} \hat{\theta}$

4.

a. Horário

b. $I_2 = -\frac{Blv}{R_2}$

c. Anti-horário

d. $\frac{Blv}{R_1}$

e. $F = \frac{B^2 l^2 v^2 (R_1 + R_2)}{R_1 R_2}$, de frenagem (esquerda para direita)

5.

a. $-Kba$

b. $B(t) = B_0 + Kt$

c. $\rho = 0$

6.

a. $\Phi_m = \frac{\mu_0 I a}{2\pi} \ln\left(\frac{y+a}{y}\right)$

b. $I = \frac{\mu_0 I a^2 v}{2\pi y(y+a)R}$, no sentido anti-horário

7.

a. $\Phi_m = \mu_0 n I \pi r^2$

b. $M = \mu_0 n \pi r^2$

c. $I = \frac{\mu_0 n \beta \pi r^2}{R}$, no sentido horário

8.

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

b. $L = \frac{(1+\chi_m)\mu_0 N^2 \pi R^2}{h}$

9.

a. $\vec{B} = \frac{E_0}{c}\cos(kz - \omega t)\,\hat{\jmath}$

b. $\vec{S} = \frac{E_0^2}{\mu_0 c}\cos^2(k - \omega t)\,\hat{k}$ e $I = \frac{E_0^2}{2\mu_0 c}$

c. $U = \frac{\pi^2 R^2 E_0^2}{\mu_0 c \omega}$

10.

a. Propagação em z negativo. $\lambda = a^{-1}$ e $f = b$.

b. $c = \frac{b}{a}$

c. $\vec{S} = -\frac{E_0^2}{\mu_0 c}\sin^2[2\pi(az + bt)]\,\hat{k}$

d. $u = \frac{E_0^2}{2\mu_0 c^2}$