



**Formulário**

$$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}, \quad d\vec{F}_m = Id\vec{\ell} \times \vec{B}, \quad \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0, \quad d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{\ell} \times \hat{r}}{r^2}, \quad \vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B},$$

$$I = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{A}, \quad \vec{J} = qn\vec{v}, \quad \vec{J} = \sigma\vec{E}, \quad \oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I_{\text{enc}} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}, \quad \epsilon_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi_B}{dt}.$$

**Seção 1. Falso ou Verdadeiro (10×0,3 = 3,0 pontos)**

Indique com **V** se a afirmação é verdadeira, ou **F**, se falsa. Note que há a seguinte **PENALIZAÇÃO**: cada questão erradamente indicada corresponderá a uma diminuição de 0,2 ponto da nota do estudante obtida nesta seção. Caso não queira correr o risco de penalização, deixe a resposta em branco!

\_\_\_\_\_ Uma partícula carregada pode ter um movimento retilíneo uniforme em uma região do espaço contendo campos elétrico e magnético uniformes, se eles forem perpendiculares entre si.

\_\_\_\_\_ Quando uma espira condutora e outra isolante, ambas rígidas e em repouso, são posicionadas perpendicularmente a um campo magnético uniforme que varia no tempo, surge uma força eletromotriz induzida apenas na espira condutora.

\_\_\_\_\_ Ao fazermos passar uma corrente estacionária através das espiras helicoidais de uma mola feita de material condutor, as espiras se aproximam, como se a mola fosse comprimida.

\_\_\_\_\_ Em um fio condutor ôhmico dado, ao dobrarmos a diferença de potencial entre suas extremidades, dobramos sua resistência.

\_\_\_\_\_ O fluxo do campo magnético da Terra através da superfície correspondente ao território brasileiro é igual, em módulo, ao fluxo do campo magnético da Terra através da superfície correspondente a todo o resto do globo terrestre.

\_\_\_\_\_ A lei de Ampère afirma que, para correntes estacionárias, o fluxo do campo magnético através de uma superfície  $\mathcal{S}$  é igual a  $\mu_0$  vezes a corrente que atravessa  $\mathcal{S}$ .

\_\_\_\_\_ Uma espira retangular de metal, originalmente sem corrente, está próxima de um fio longo e retilíneo, que transporta corrente, com dois de seus lados paralelos ao fio. O fio e a espira se encontram no mesmo plano. Quando a corrente do fio está diminuindo, a espira é atraída pelo fio.

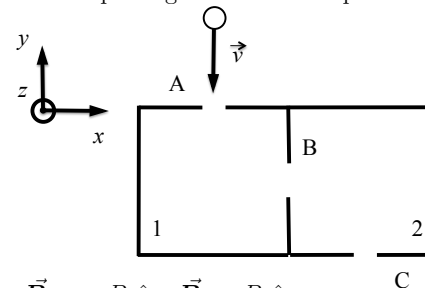
\_\_\_\_\_ Para um condutor usual, como o cobre, o aumento da temperatura aumenta as vibrações moleculares, provocando maior espalhamento dos elétrons, o que faz com que sua resistividade diminua.

\_\_\_\_\_ Se a circulação do campo magnético ao longo de um caminho fechado for nula, não haverá nenhuma partícula carregada em movimento atravessando uma superfície aberta delimitada pela curva que descreve esse caminho.

\_\_\_\_\_ A força magnética sobre uma espira carregando uma corrente estacionária, localizada em uma região de campo magnético uniforme é sempre nula, independentemente do formato da espira.

**Seção 2. Múltipla escolha (7×0,6 = 4,2 pontos)**

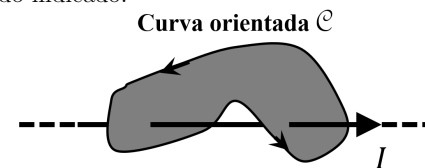
- Uma partícula carregada com carga  $q > 0$  se desloca com velocidade constante  $\vec{v} = -v\hat{y}$ , ( $v > 0$ ). Ela então entra através da abertura  $A$  numa caixa que é dividida em duas partes (chamadas 1 e 2), onde podem ser aplicados campos magnéticos uniformes e estacionários em cada uma delas. Na placa que separa as duas metades existe uma abertura  $B$  para permitir a passagem da partícula. Observa-se que em seguida a partícula sai da caixa através da abertura  $C$  com a mesma velocidade  $\vec{v} = -v\hat{y}$ . Sejam  $B_1$  e  $B_2$  os módulos do campo magnético nas partes 1 e 2, respectivamente, com  $B_1 > 0$  e  $B_2 > 0$ . Dentre as opções abaixo, qual delas melhor descreve os vetores campo magnético nas duas partes da caixa?
- Um próton  $p$  e uma partícula alfa  $\alpha$  (formada por dois prótons e dois nêutrons) penetram em uma região de campo magnético uniforme, de forma que suas velocidades iniciais são idênticas e perpendiculares à direção do campo. Considerando que a massa do próton é aproximadamente igual à massa do nêutron, a razão entre os raios das trajetórias circulares do próton e da partícula alfa ( $R_p/R_\alpha$ ), nessa região, vale:



- $\vec{B}_1 = -B_1\hat{z}$  e  $\vec{B}_2 = B_2\hat{z}$ ,
- $\vec{B}_1 = B_1\hat{z}$  e  $\vec{B}_2 = -B_2\hat{z}$ ,
- $\vec{B}_1 = -B_1\hat{z}$  e  $\vec{B}_2 = -B_2\hat{z}$ ,
- $\vec{B}_1 = B_1\hat{z}$  e  $\vec{B}_2 = B_2\hat{z}$ ,
- $\vec{B}_1 = -B_1\hat{x}$  e  $\vec{B}_2 = B_2\hat{y}$ .

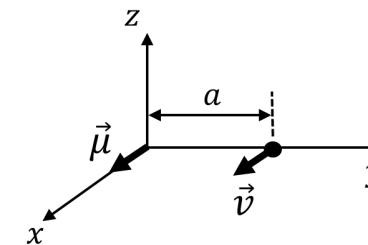
- 4
- 2
- 1
- 1/2
- 1/4

- A figura abaixo mostra uma curva  $\mathcal{C}$  fechada, orientada, e um trecho de um fio retilíneo, longo, pelo qual passa uma corrente estacionária de intensidade  $I$ , no sentido indicado.



Podemos afirmar que:

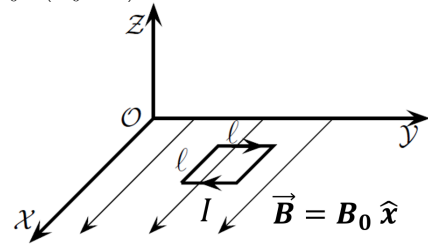
- $\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I$ ;
- $\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = -\mu_0 I$ ;
- $\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = 2\mu_0 I$ ;
- $\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = -2\mu_0 I$ ;
- $\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = 0$ ;



Podemos afirmar que, no instante em questão, a força magnética sobre a partícula:

- tem sentido  $\hat{x}$ ;
- tem sentido  $-\hat{x}$ ;
- tem sentido  $\hat{y}$ ;
- tem sentido  $-\hat{y}$ ;
- tem sentido  $\hat{z}$ ;
- tem sentido  $-\hat{z}$ ;
- é nula.

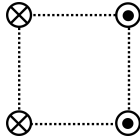
5. Uma espira quadrada, de arestas de comprimento  $\ell$ , pela qual flui uma corrente estacionária de intensidade  $I$ , está no plano  $\mathcal{OXY}$ , com dois de seus lados paralelos ao eixo  $\mathcal{OX}$ , como mostrado na figura abaixo. A corrente na espira flui no sentido horário para um observador localizado no semi-eixo positivo  $\mathcal{OZ}$ . Na região onde a espira se encontra há um campo magnético constante (estacionário e uniforme)  $\vec{B} = B_0 \hat{x}$  ( $B_0 > 0$ ).



O torque sobre a espira é dado por:

- $\vec{\tau} = I\ell^2 B_0 \hat{y}$ .
- $\vec{\tau} = -I\ell^2 B_0 \hat{y}$ .
- $\vec{\tau} = I\ell^2 B_0 \hat{z}$ .
- $\vec{\tau} = -I\ell^2 B_0 \hat{z}$ .
- $\vec{\tau} = -\frac{1}{2} I\ell^2 B_0 \hat{y}$ .
- $\vec{\tau} = \frac{1}{2} I\ell^2 B_0 \hat{z}$ .
- $\vec{\tau} = -2I\ell^2 B_0 \hat{z}$ .
- Nulo.

6. Quatro fios retilíneos e infinitos são paralelos e carregam correntes estacionárias de mesma intensidade  $I$ , com sentidos indicados na figura abaixo.



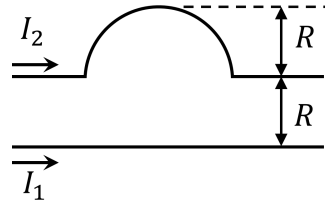
Eles são posicionados de forma que, num corte transversal, ocupam os vértices de um quadrado, como mostrado na figura. Sobre esse sistema, considere as seguintes afirmativas:

- O campo magnético no centro do quadrado tem direção vertical e aponta para baixo.
- A força magnética resultante sobre qualquer um dos fios tem direção paralela a uma das diagonais do quadrado.

São VERDADEIRAS as afirmativas:

- I
- II
- Todas elas.
- Nenhuma delas.

7. Considere os dois fios condutores mostrados na figura abaixo. Um deles é retilíneo e infinito, enquanto o outro é retilíneo e infinito, exceto por uma parte dobrada na forma de um semicírculo de raio  $R$ . Os fios carregam correntes estacionárias de intensidades  $I_1$  e  $I_2$  no mesmo sentido, respectivamente, e a distância entre eles também vale  $R$ . Qual deve ser a razão  $I_1/I_2$  para que o campo magnético no centro do semicírculo seja nulo?



- $\pi/2$
- $\pi$
- $1/2$
- 1
- $1/\pi$
- O campo nunca pode ser nulo neste ponto, pois as correntes tem o mesmo sentido.

Todas as respostas devem ter justificativas!

1. [2,8 pontos]

Uma barra metálica horizontal  $PQ$ , de comprimento  $\ell$  e massa  $m$ , pode escorregar sem atrito sobre dois trilhos verticais condutores, que estão unidos por uma haste horizontal fixa de resistência  $R$ . As resistências da barra e do trilho são desprezíveis. O conjunto está em uma região onde há um campo magnético  $\vec{B} = -B\hat{z}$  constante (uniforme e estacionário, com  $B > 0$ ). Suponha que, no instante  $t = 0$ , a barra tenha sido abandonada do repouso e durante seu movimento ela não tenha perdido o contato com os trilhos verticais. Denote por  $g$  o módulo da aceleração da gravidade ( $\vec{g}$  tem sentido  $\hat{y}$ ). Despreze quaisquer efeitos capacitivos ou indutivos no circuito.

- (a) Determine o sentido da corrente induzida no circuito. [0,6 ponto]

- (b) Calcule a intensidade da corrente induzida no circuito em um instante genérico  $t$ , em função de  $B$ ,  $\ell$ ,  $R$  e  $v_y$ . Considere que em  $t = 0$  a barra ocupava a posição  $y = 0$ . [0,8 ponto]

- (c) Determine a força magnética,  $\vec{F}_m$ , (módulo, direção e sentido) atuando na barra, num instante de tempo  $t$ , quando a velocidade da mesma tem módulo  $v_y$ . [0,6 ponto]

- (d) Após algum tempo, a barra entra em movimento uniforme (suponha que esse regime seja atingido antes da barra atingir o solo). Nesse regime, sua velocidade tem módulo  $v_T$  (velocidade terminal). Obtenha a expressão para  $v_T$  em termos de  $B$ ,  $\ell$ ,  $R$ ,  $m$  e  $g$ . [0,8 ponto]

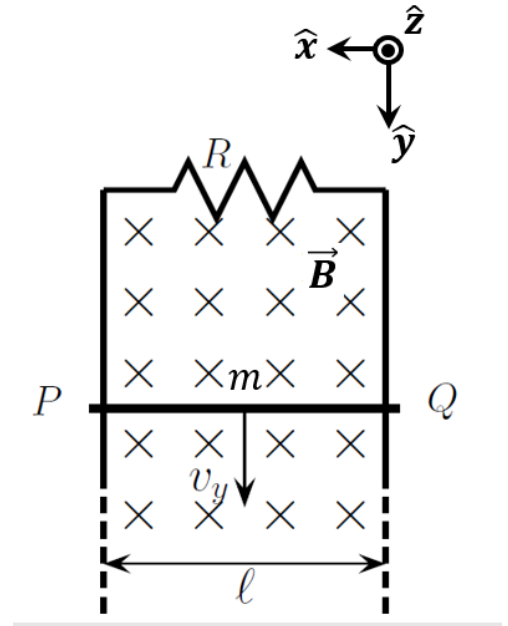


Figura 1: Questão discursiva 1.

**Seção 1. Falso ou Verdadeiro (10×0,3 = 3,0 pontos)**

- V Uma partícula carregada pode ter um movimento retilíneo uniforme em uma região do espaço contendo campos elétrico e magnético uniformes, se eles forem perpendiculares entre si.
- F Quando uma espira condutora e outra isolante, ambas rígidas e em repouso, são posicionadas perpendicularmente a um campo magnético uniforme que varia no tempo, surge uma força eletromotriz induzida apenas na espira condutora.
- V Ao fazermos passar uma corrente estacionária através das espiras helicoidais de uma mola feita de material condutor, as espiras se aproximam, como se a mola fosse comprimida.
- F Em um fio condutor ôhmico dado, ao dobrarmos a diferença de potencial entre suas extremidades, dobramos sua resistência.
- V O fluxo do campo magnético da Terra através da superfície correspondente ao território brasileiro é igual, em módulo, ao fluxo do campo magnético da Terra através da superfície correspondente a todo o resto do globo terrestre.
- F A lei de Ampère afirma que, para correntes estacionárias, o fluxo do campo magnético através de uma superfície  $\mathcal{S}$  é igual a  $\mu_0$  vezes a corrente que atravessa  $\mathcal{S}$ .
- V Uma espira retangular de metal, originalmente sem corrente, está próxima de um fio longo e retilíneo, que transporta corrente, com dois de seus lados paralelos ao fio. O fio e a espira se encontram no mesmo plano. Quando a corrente do fio está diminuindo, a espira é atraída pelo fio.
- F Para um condutor usual, como o cobre, o aumento da temperatura aumenta as vibrações moleculares, provocando maior espalhamento dos elétrons, o que faz com que sua resistividade diminua.
- F Se a circulação do campo magnético ao longo de um caminho fechado for nula, não haverá nenhuma partícula carregada em movimento atravessando uma superfície aberta delimitada pela curva que descreve esse caminho.
- V A força magnética sobre uma espira carregando uma corrente estacionária, localizada em uma região de campo magnético uniforme é sempre nula, independentemente do formato da espira.

**Seção 2. Múltipla escolha (7×0,6 = 4,2 pontos)**

- |        |        |
|--------|--------|
| 1. (a) | 5. (b) |
| 2. (c) | 6. (a) |
| 3. (d) | 7. (a) |
| 4. (g) |        |

**Seção 3. Questões discursivas (1×2,8 = 2,8 pontos)**

1. **Resolução:**

(a) Orientando o vetor de área no sentido  $-\hat{z}$ , temos que o fluxo do campo magnético na espira formada pelo segmento  $PQ$  e pelo trilho é positivo e está aumentando com o tempo. Assim, pela lei de Lenz, a corrente induzida no circuito, deve se opor ao aumento do fluxo, para isso, ela circula no sentido anti-horário. Nessa situação, o campo magnético produzido pela corrente induzida na espira tem sentido contrário ao campo aplicado.

■

(b) Para encontrarmos a corrente induzida precisamos primeiramente determinar a fem induzida. Para tal utilizaremos a lei de Faraday. Para utilizarmos a lei de Faraday, orientamos o vetor de área no sentido  $-\hat{z}$  de acordo com o sistema de coordenadas indicado na Figura 1. Para essa escolha de vetor de área, o sentido positivo da fem é horário, dado pela regra da mão direita. O fluxo do campo magnético é então dado por:

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A} = \int_S (-B\hat{z}) \cdot (-dA\hat{z}),$$

$$\Phi_B = BA(t) = B\ell y(t).$$

Assim, a fem induzida,  $\mathcal{E}$ , é dada por:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -B\ell \frac{dy}{dt} = -B\ell v_y(t).$$

O sinal negativo da fem significa que os sentidos reais, da fem e da corrente induzida, são contrários ao sentido positivo que foi definido quando fizemos a escolha do vetor de área para o cálculo do fluxo. Ou seja, a fem e a corrente induzida para este caso, têm sentido anti-horário, em acordo com o resultado encontrado utilizando a lei de Lenz. A intensidade da corrente induzida  $i_{ind}$  que circula no trilho e na barra é dada por:

$$i_{ind} = \frac{|\mathcal{E}|}{R},$$

$$\rightarrow i_{ind} = \frac{B\ell v_y}{R}.$$

■

(c) A força magnética atuando na barra, quando a mesma se desloca com velocidade  $\vec{v} = v_y\hat{y}$ , é dada por:

$$\vec{F} = i_{ind}\vec{L} \times \vec{B} = \frac{B\ell v_y}{R}(-\ell\hat{x}) \times (-B\hat{z}),$$

$$\rightarrow \vec{F}_m = -\frac{B^2\ell^2 v_y}{R}\hat{y}.$$

■

(d) Após decorrido um intervalo de tempo grande o suficiente, a soma da força magnética  $\vec{F}_m = -i_{ind}\ell B\hat{y}$  com a força peso,  $\vec{P} = mg\hat{y}$ , atuando sobre a barra, anula-se. Nesta situação a barra se desloca com velocidade constante  $v_T$ , que é obtida igualando-se os módulos da força peso e da força magnética atuando na barra. Ou seja:

$$mg = \frac{B\ell v_T}{R} \times \ell B,$$

logo:

$$\rightarrow v_T = \frac{mgR}{B^2\ell^2}.$$

■



**Formulário**

$$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}, \quad d\vec{F}_m = Id\vec{\ell} \times \vec{B}, \quad \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0, \quad d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{\ell} \times \hat{r}}{r^2}, \quad \vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B},$$

$$I = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{A}, \quad \vec{J} = qn\vec{v}, \quad \vec{J} = \sigma\vec{E}, \quad \oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I_{\text{enc}} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}, \quad \epsilon_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi_B}{dt}.$$

**Seção 1. Falso ou Verdadeiro (10×0,3 = 3,0 pontos)**

Indique com **V** se a afirmação é verdadeira, ou **F**, se falsa. Note que há a seguinte **PENALIZAÇÃO**: cada questão erradamente indicada corresponderá a uma diminuição de 0,2 ponto da nota do estudante obtida nesta seção. Caso não queira correr o risco de penalização, deixe a resposta em branco!

\_\_\_\_\_ Ao fazermos passar uma corrente estacionária através das espiras helicoidais de uma mola feita de material condutor, as espiras se aproximam, como se a mola fosse comprimida.

\_\_\_\_\_ Uma partícula carregada pode ter um movimento retilíneo uniforme em uma região do espaço contendo campos elétrico e magnético uniformes, se eles forem perpendiculares entre si.

\_\_\_\_\_ Se a circulação do campo magnético ao longo de um caminho fechado for nula, não haverá nenhuma partícula carregada em movimento atravessando uma superfície aberta delimitada pela curva que descreve esse caminho.

\_\_\_\_\_ Para um condutor usual, como o cobre, o aumento da temperatura aumenta as vibrações moleculares, provocando maior espalhamento dos elétrons, o que faz com que sua resistividade diminua.

\_\_\_\_\_ A lei de Ampère afirma que, para correntes estacionárias, o fluxo do campo magnético através de uma superfície  $\mathcal{S}$  é igual a  $\mu_0$  vezes a corrente que atravessa  $\mathcal{S}$ .

\_\_\_\_\_ O fluxo do campo magnético da Terra através da superfície correspondente ao território brasileiro é igual, em módulo, ao fluxo do campo magnético da Terra através da superfície correspondente a todo o resto do globo terrestre.

\_\_\_\_\_ Em um fio condutor ôhmico dado, ao dobrarmos a diferença de potencial entre suas extremidades, dobramos sua resistência.

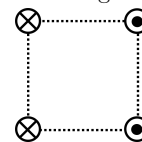
\_\_\_\_\_ A força magnética sobre uma espira carregando uma corrente estacionária, localizada em uma região de campo magnético uniforme é sempre nula, independentemente do formato da espira.

\_\_\_\_\_ Quando uma espira condutora e outra isolante, ambas rígidas e em repouso, são posicionadas perpendicularmente a um campo magnético uniforme que varia no tempo, surge uma força eletromotriz induzida apenas na espira condutora.

\_\_\_\_\_ Uma espira retangular de metal, originalmente sem corrente, está próxima de um fio longo e retilíneo, que transporta corrente, com dois de seus lados paralelos ao fio. O fio e a espira se encontram no mesmo plano. Quando a corrente do fio está diminuindo, a espira é atraída pelo fio.

**Seção 2. Múltipla escolha (7×0,6 = 4,2 pontos)**

1. Quatro fios retilíneos e infinitos são paralelos e carregam correntes estacionárias de mesma intensidade  $I$ , com sentidos indicados na figura abaixo.



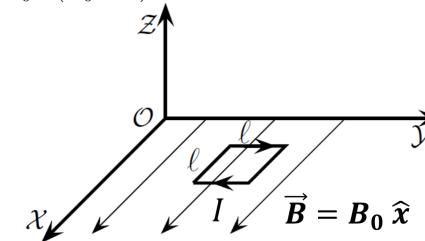
Eles são posicionados de forma que, num corte transversal, ocupam os vértices de um quadrado, como mostrado na figura. Sobre esse sistema, considere as seguintes afirmativas:

- (I) O campo magnético no centro do quadrado tem direção vertical e aponta para baixo.  
 (II) A força magnética resultante sobre qualquer um dos fios tem direção paralela a uma das diagonais do quadrado.

São VERDADEIRAS as afirmativas:

- (a) I  
 (b) II  
 (c) Todas elas.  
 (d) Nenhuma delas.

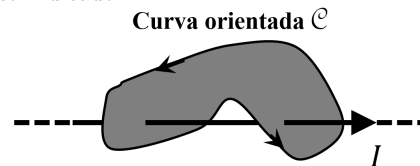
3. Uma espira quadrada, de arestas de comprimento  $\ell$ , pela qual flui uma corrente estacionária de intensidade  $I$ , está no plano  $\mathcal{OXY}$ , com dois de seus lados paralelos ao eixo  $\mathcal{OX}$ , como mostrado na figura abaixo. A corrente na espira flui no sentido horário para um observador localizado no semi-eixo positivo  $\mathcal{OZ}$ . Na região onde a espira se encontra há um campo magnético constante (estacionário e uniforme)  $\vec{B} = B_0 \hat{x}$  ( $B_0 > 0$ ).



O torque sobre a espira é dado por:

- (a)  $\vec{\tau} = I\ell^2 B_0 \hat{y}$ .  
 (b)  $\vec{\tau} = -I\ell^2 B_0 \hat{y}$ .  
 (c)  $\vec{\tau} = I\ell^2 B_0 \hat{z}$ .  
 (d)  $\vec{\tau} = -I\ell^2 B_0 \hat{z}$ .  
 (e)  $\vec{\tau} = -\frac{1}{2} I\ell^2 B_0 \hat{y}$ .  
 (f)  $\vec{\tau} = \frac{1}{2} I\ell^2 B_0 \hat{z}$ .  
 (g)  $\vec{\tau} = -2I\ell^2 B_0 \hat{z}$ .  
 (h) Nulo.

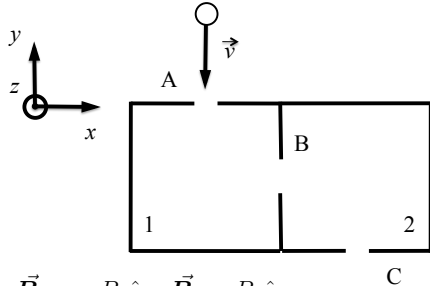
2. A figura abaixo mostra uma curva  $\mathcal{C}$  fechada, orientada, e um trecho de um fio retilíneo, longo, pelo qual passa uma corrente estacionária de intensidade  $I$ , no sentido indicado.



Podemos afirmar que:

- (a)  $\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I$ ;  
 (b)  $\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = -\mu_0 I$ ;  
 (c)  $\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = 2\mu_0 I$ ;  
 (d)  $\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = -2\mu_0 I$ ;  
 (e)  $\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = 0$ ;

4. Uma partícula carregada com carga  $q > 0$  se desloca com velocidade constante  $\vec{v} = -v\hat{y}$ , ( $v > 0$ ). Ela então entra através da abertura  $A$  numa caixa que é dividida em duas partes (chamadas 1 e 2), onde podem ser aplicados campos magnéticos uniformes e estacionários em cada uma delas. Na placa que separa as duas metades existe uma abertura  $B$  para permitir a passagem da partícula. Observa-se que em seguida a partícula sai da caixa através da abertura  $C$  com a mesma velocidade  $\vec{v} = -v\hat{y}$ .  
Sejam  $B_1$  e  $B_2$  os módulos do campo magnético nas partes 1 e 2, respectivamente, com  $B_1 > 0$  e  $B_2 > 0$ . Dentre as opções abaixo, qual delas melhor descreve os vetores campo magnético nas duas partes da caixa?

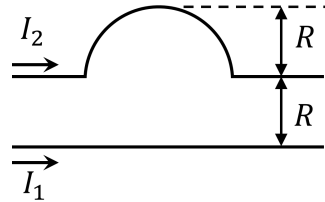


- (a)  $\vec{B}_1 = -B_1\hat{z}$  e  $\vec{B}_2 = B_2\hat{z}$ ,  
(b)  $\vec{B}_1 = B_1\hat{z}$  e  $\vec{B}_2 = -B_2\hat{z}$ ,  
(c)  $\vec{B}_1 = -B_1\hat{z}$  e  $\vec{B}_2 = -B_2\hat{z}$ ,  
(d)  $\vec{B}_1 = B_1\hat{z}$  e  $\vec{B}_2 = B_2\hat{z}$ ,  
(e)  $\vec{B}_1 = -B_1\hat{x}$  e  $\vec{B}_2 = B_2\hat{y}$ .

5. Um próton  $p$  e uma partícula alfa  $\alpha$  (formada por dois prótons e dois nêutrons) penetram em uma região de campo magnético uniforme, de forma que suas velocidades iniciais são idênticas e perpendiculares à direção do campo. Considerando que a massa do próton é aproximadamente igual à massa do nêutron, a razão entre os raios das trajetórias circulares do próton e da partícula alfa ( $R_p/R_\alpha$ ), nessa região, vale:

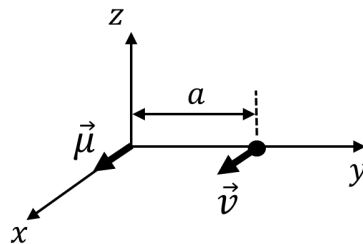
- (a) 4  
(b) 2  
(c) 1  
(d) 1/2  
(e) 1/4

6. Considere os dois fios condutores mostrados na figura abaixo. Um deles é retilíneo e infinito, enquanto o outro é retilíneo e infinito, exceto por uma parte dobrada na forma de um semicírculo de raio  $R$ . Os fios carregam correntes estacionárias de intensidades  $I_1$  e  $I_2$  no mesmo sentido, respectivamente, e a distância entre eles também vale  $R$ . Qual deve ser a razão  $I_1/I_2$  para que o campo magnético no centro do semicírculo seja nulo?



- (a)  $\pi/2$   
(b)  $\pi$   
(c) 1/2  
(d) 1  
(e)  $1/\pi$   
(f) O campo nunca pode ser nulo neste ponto, pois as correntes tem o mesmo sentido.

7. Um dipolo magnético puntiforme, de momento de dipolo  $\vec{\mu} = \mu_0\hat{x}$  ( $\mu_0 > 0$ ), está localizado na origem de um sistema de eixos cartesianos, como indicado na figura abaixo. Em um dado instante, uma partícula de carga positiva  $q$  tem vetor posição  $\vec{r} = a\hat{y}$  e velocidade  $\vec{v} = v_0\hat{x}$ , onde  $a$  e  $v_0$  são constantes positivas.



Podemos afirmar que, no instante em questão, a força magnética sobre a partícula:

- (a) tem sentido  $\hat{x}$ ;  
(b) tem sentido  $-\hat{x}$ ;  
(c) tem sentido  $\hat{y}$ ;  
(d) tem sentido  $-\hat{y}$ ;  
(e) tem sentido  $\hat{z}$ ;  
(f) tem sentido  $-\hat{z}$ ;  
(g) é nula.

### Seção 3. Questões discursivas (1×2,8 = 2,8 pontos)

Todas as respostas devem ter justificativas!

1. [2,8 pontos]

Uma barra metálica horizontal  $PQ$ , de comprimento  $\ell$  e massa  $m$ , pode escorregar sem atrito sobre dois trilhos verticais condutores, que estão unidos por uma haste horizontal fixa de resistência  $R$ . As resistências da barra e do trilho são desprezíveis. O conjunto está em uma região onde há um campo magnético  $\vec{B} = -B\hat{z}$  constante (uniforme e estacionário, com  $B > 0$ ). Suponha que, no instante  $t = 0$ , a barra tenha sido abandonada do repouso e durante seu movimento ela não tenha perdido o contato com os trilhos verticais. Denote por  $g$  o módulo da aceleração da gravidade ( $\vec{g}$  tem sentido  $\hat{y}$ ). Despreze quaisquer efeitos capacitivos ou indutivos no circuito.

- (a) Determine o sentido da corrente induzida no circuito. [0,6 ponto]

- (b) Calcule a intensidade da corrente induzida no circuito em um instante genérico  $t$ , em função de  $B$ ,  $\ell$ ,  $R$  e  $v_y$ . Considere que em  $t = 0$  a barra ocupava a posição  $y = 0$ . [0,8 ponto]

- (c) Determine a força magnética,  $\vec{F}_m$ , (módulo, direção e sentido) atuando na barra, num instante de tempo  $t$ , quando a velocidade da mesma tem módulo  $v_y$ . [0,6 ponto]

- (d) Após algum tempo, a barra entra em movimento uniforme (suponha que esse regime seja atingido antes da barra atingir o solo). Nesse regime, sua velocidade tem módulo  $v_T$  (velocidade terminal). Obtenha a expressão para  $v_T$  em termos de  $B$ ,  $\ell$ ,  $R$ ,  $m$  e  $g$ . [0,8 ponto]

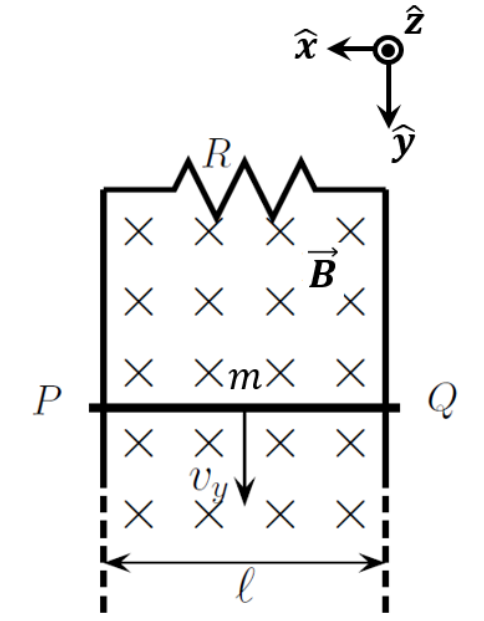


Figura 1: Questão discursiva 1.



**Seção 1. Falso ou Verdadeiro (10×0,3 = 3,0 pontos)**

- V   Ao fazermos passar uma corrente estacionária através das espiras helicoidais de uma mola feita de material condutor, as espiras se aproximam, como se a mola fosse comprimida.
- V   Uma partícula carregada pode ter um movimento retilíneo uniforme em uma região do espaço contendo campos elétrico e magnético uniformes, se eles forem perpendiculares entre si.
- F   Se a circulação do campo magnético ao longo de um caminho fechado for nula, não haverá nenhuma partícula carregada em movimento atravessando uma superfície aberta delimitada pela curva que descreve esse caminho.
- F   Para um condutor usual, como o cobre, o aumento da temperatura aumenta as vibrações moleculares, provocando maior espalhamento dos elétrons, o que faz com que sua resistividade diminua.
- F   A lei de Ampère afirma que, para correntes estacionárias, o fluxo do campo magnético através de uma superfície  $\mathcal{S}$  é igual a  $\mu_0$  vezes a corrente que atravessa  $\mathcal{S}$ .
- V   O fluxo do campo magnético da Terra através da superfície correspondente ao território brasileiro é igual, em módulo, ao fluxo do campo magnético da Terra através da superfície correspondente a todo o resto do globo terrestre.
- F   Em um fio condutor ôhmico dado, ao dobrarmos a diferença de potencial entre suas extremidades, dobramos sua resistência.
- V   A força magnética sobre uma espira carregando uma corrente estacionária, localizada em uma região de campo magnético uniforme é sempre nula, independentemente do formato da espira.
- F   Quando uma espira condutora e outra isolante, ambas rígidas e em repouso, são posicionadas perpendicularmente a um campo magnético uniforme que varia no tempo, surge uma força eletromotriz induzida apenas na espira condutora.
- V   Uma espira retangular de metal, originalmente sem corrente, está próxima de um fio longo e retilíneo, que transporta corrente, com dois de seus lados paralelos ao fio. O fio e a espira se encontram no mesmo plano. Quando a corrente do fio está diminuindo, a espira é atraída pelo fio.

**Seção 2. Múltipla escolha (7×0,6 = 4,2 pontos)**

- |        |        |
|--------|--------|
| 1. (a) | 5. (d) |
| 2. (c) | 6. (a) |
| 3. (b) | 7. (g) |
| 4. (a) |        |

**Seção 3. Questões discursivas (1×2,8 = 2,8 pontos)**

1. **Resolução:**

(a) Orientando o vetor de área no sentido  $-\hat{z}$ , temos que o fluxo do campo magnético na espira formada pelo segmento  $PQ$  e pelo trilho é positivo e está aumentando com o tempo. Assim, pela lei de Lenz, a corrente induzida no circuito, deve se opor ao aumento do fluxo, para isso, ela circula no sentido anti-horário. Nessa situação, o campo magnético produzido pela corrente induzida na espira tem sentido contrário ao campo aplicado.

■

(b) Para encontrarmos a corrente induzida precisamos primeiramente determinar a fem induzida. Para tal utilizaremos a lei de Faraday. Para utilizarmos a lei de Faraday, orientamos o vetor de área no sentido  $-\hat{z}$  de acordo com o sistema de coordenadas indicado na Figura 1. Para essa escolha de vetor de área, o sentido positivo da fem é horário, dado pela regra da mão direita. O fluxo do campo magnético é então dado por:

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A} = \int_S (-B\hat{z}) \cdot (-dA\hat{z}),$$

$$\Phi_B = BA(t) = B\ell y(t).$$

Assim, a fem induzida,  $\mathcal{E}$ , é dada por:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -B\ell \frac{dy}{dt} = -B\ell v_y(t).$$

O sinal negativo da fem significa que os sentidos reais, da fem e da corrente induzida, são contrários ao sentido positivo que foi definido quando fizemos a escolha do vetor de área para o cálculo do fluxo. Ou seja, a fem e a corrente induzida para este caso, têm sentido anti-horário, em acordo com o resultado encontrado utilizando a lei de Lenz. A intensidade da corrente induzida  $i_{ind}$  que circula no trilho e na barra é dada por:

$$i_{ind} = \frac{|\mathcal{E}|}{R},$$

$$\rightarrow i_{ind} = \frac{B\ell v_y}{R}.$$

■

(c) A força magnética atuando na barra, quando a mesma se desloca com velocidade  $\vec{v} = v_y\hat{y}$ , é dada por:

$$\vec{F} = i_{ind}\vec{L} \times \vec{B} = \frac{B\ell v_y}{R}(-\ell\hat{x}) \times (-B\hat{z}),$$

$$\rightarrow \vec{F}_m = -\frac{B^2\ell^2 v_y}{R}\hat{y}.$$

■

(d) Após decorrido um intervalo de tempo grande o suficiente, a soma da força magnética  $\vec{F}_m = -i_{ind}\ell B\hat{y}$  com a força peso,  $\vec{P} = mg\hat{y}$ , atuando sobre a barra, anula-se. Nesta situação a barra se desloca com velocidade constante  $v_T$ , que é obtida igualando-se os módulos da força peso e da força magnética atuando na barra. Ou seja:

$$mg = \frac{B\ell v_T}{R} \times \ell B,$$

logo:

$$\rightarrow v_T = \frac{mgR}{B^2\ell^2}.$$

■



**Formulário**

$$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}, \quad d\vec{F}_m = Id\vec{\ell} \times \vec{B}, \quad \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0, \quad d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{\ell} \times \hat{r}}{r^2}, \quad \vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B},$$

$$I = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{A}, \quad \vec{J} = qn\vec{v}, \quad \vec{J} = \sigma\vec{E}, \quad \oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I_{\text{enc}} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}, \quad \epsilon_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi_B}{dt}.$$

**Seção 1. Falso ou Verdadeiro (10×0,3 = 3,0 pontos)**

Indique com **V** se a afirmação é verdadeira, ou **F**, se falsa. Note que há a seguinte **PENALIZAÇÃO**: cada questão erradamente indicada corresponderá a uma diminuição de 0,2 ponto da nota do estudante obtida nesta seção. Caso não queira correr o risco de penalização, deixe a resposta em branco!

\_\_\_\_\_ Se a circulação do campo magnético ao longo de um caminho fechado for nula, não haverá nenhuma partícula carregada em movimento atravessando uma superfície aberta delimitada pela curva que descreve esse caminho.

\_\_\_\_\_ Uma espira retangular de metal, originalmente sem corrente, está próxima de um fio longo e retilíneo, que transporta corrente, com dois de seus lados paralelos ao fio. O fio e a espira se encontram no mesmo plano. Quando a corrente do fio está diminuindo, a espira é atraída pelo fio.

\_\_\_\_\_ Ao fazermos passar uma corrente estacionária através das espiras helicoidais de uma mola feita de material condutor, as espiras se aproximam, como se a mola fosse comprimida.

\_\_\_\_\_ A força magnética sobre uma espira carregando uma corrente estacionária, localizada em uma região de campo magnético uniforme é sempre nula, independentemente do formato da espira.

\_\_\_\_\_ Quando uma espira condutora e outra isolante, ambas rígidas e em repouso, são posicionadas perpendicularmente a um campo magnético uniforme que varia no tempo, surge uma força eletromotriz induzida apenas na espira condutora.

\_\_\_\_\_ Uma partícula carregada pode ter um movimento retilíneo uniforme em uma região do espaço contendo campos elétrico e magnético uniformes, se eles forem perpendiculares entre si.

\_\_\_\_\_ A lei de Ampère afirma que, para correntes estacionárias, o fluxo do campo magnético através de uma superfície  $\mathcal{S}$  é igual a  $\mu_0$  vezes a corrente que atravessa  $\mathcal{S}$ .

\_\_\_\_\_ Em um fio condutor ôhmico dado, ao dobrarmos a diferença de potencial entre suas extremidades, dobramos sua resistência.

\_\_\_\_\_ Para um condutor usual, como o cobre, o aumento da temperatura aumenta as vibrações moleculares, provocando maior espalhamento dos elétrons, o que faz com que sua resistividade diminua.

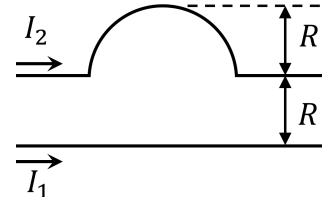
\_\_\_\_\_ O fluxo do campo magnético da Terra através da superfície correspondente ao território brasileiro é igual, em módulo, ao fluxo do campo magnético da Terra através da superfície correspondente a todo o resto do globo terrestre.

**Seção 2. Múltipla escolha (7×0,6 = 4,2 pontos)**

1. Um próton  $p$  e uma partícula alfa  $\alpha$  (formada por dois prótons e dois nêutrons) penetram em uma região de campo magnético uniforme, de forma que suas velocidades iniciais são idênticas e perpendiculares à direção do campo. Considerando que a massa do próton é aproximadamente igual à massa do nêutron, a razão entre os raios das trajetórias circulares do próton e da partícula alfa ( $R_p/R_\alpha$ ), nessa região, vale:

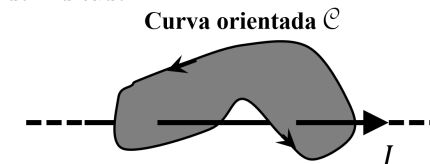
- (a) 4
- (b) 2
- (c) 1
- (d) 1/2
- (e) 1/4

2. Considere os dois fios condutores mostrados na figura abaixo. Um deles é retilíneo e infinito, enquanto o outro é retilíneo e infinito, exceto por uma parte dobrada na forma de um semicírculo de raio  $R$ . Os fios carregam correntes estacionárias de intensidades  $I_1$  e  $I_2$  no mesmo sentido, respectivamente, e a distância entre eles também vale  $R$ . Qual deve ser a razão  $I_1/I_2$  para que o campo magnético no centro do semicírculo seja nulo?



- (a)  $\pi/2$
- (b)  $\pi$
- (c) 1/2
- (d) 1
- (e)  $1/\pi$
- (f) O campo nunca pode ser nulo neste ponto, pois as correntes tem o mesmo sentido.

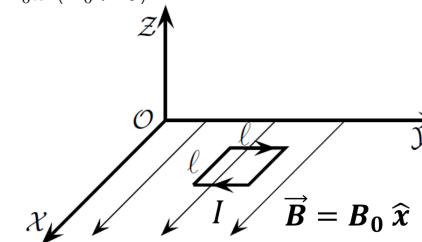
3. A figura abaixo mostra uma curva  $\mathcal{C}$  fechada, orientada, e um trecho de um fio retilíneo, longo, pelo qual passa uma corrente estacionária de intensidade  $I$ , no sentido indicado.



Podemos afirmar que:

- (a)  $\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I$ ;
- (b)  $\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = -\mu_0 I$ ;
- (c)  $\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = 2\mu_0 I$ ;
- (d)  $\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = -2\mu_0 I$ ;
- (e)  $\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = 0$ ;

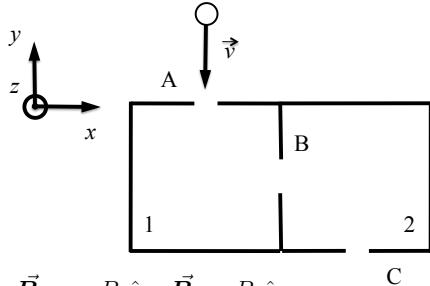
4. Uma espira quadrada, de arestas de comprimento  $\ell$ , pela qual flui uma corrente estacionária de intensidade  $I$ , está no plano  $\mathcal{OXY}$ , com dois de seus lados paralelos ao eixo  $\mathcal{OX}$ , como mostrado na figura abaixo. A corrente na espira flui no sentido horário para um observador localizado no semi-eixo positivo  $\mathcal{OZ}$ . Na região onde a espira se encontra há um campo magnético constante (estacionário e uniforme)  $\vec{B} = B_0 \hat{x}$  ( $B_0 > 0$ ).



O torque sobre a espira é dado por:

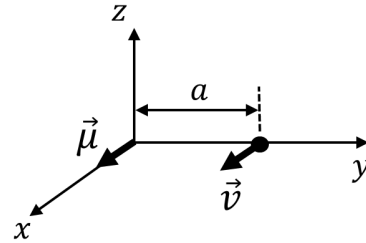
- (a)  $\vec{\tau} = I\ell^2 B_0 \hat{y}$ .
- (b)  $\vec{\tau} = -I\ell^2 B_0 \hat{y}$ .
- (c)  $\vec{\tau} = I\ell^2 B_0 \hat{z}$ .
- (d)  $\vec{\tau} = -I\ell^2 B_0 \hat{z}$ .
- (e)  $\vec{\tau} = -\frac{1}{2} I\ell^2 B_0 \hat{y}$ .
- (f)  $\vec{\tau} = \frac{1}{2} I\ell^2 B_0 \hat{z}$ .
- (g)  $\vec{\tau} = -2I\ell^2 B_0 \hat{z}$ .
- (h) Nulo.

5. Uma partícula carregada com carga  $q > 0$  se desloca com velocidade constante  $\vec{v} = -v\hat{y}$ , ( $v > 0$ ). Ela então entra através da abertura  $A$  numa caixa que é dividida em duas partes (chamadas 1 e 2), onde podem ser aplicados campos magnéticos uniformes e estacionários em cada uma delas. Na placa que separa as duas metades existe uma abertura  $B$  para permitir a passagem da partícula. Observa-se que em seguida a partícula sai da caixa através da abertura  $C$  com a mesma velocidade  $\vec{v} = -v\hat{y}$ .  
Sejam  $B_1$  e  $B_2$  os módulos do campo magnético nas partes 1 e 2, respectivamente, com  $B_1 > 0$  e  $B_2 > 0$ . Dentre as opções abaixo, qual delas melhor descreve os vetores campo magnético nas duas partes da caixa?



- (a)  $\vec{B}_1 = -B_1\hat{z}$  e  $\vec{B}_2 = B_2\hat{z}$ ,  
(b)  $\vec{B}_1 = B_1\hat{z}$  e  $\vec{B}_2 = -B_2\hat{z}$ ,  
(c)  $\vec{B}_1 = -B_1\hat{z}$  e  $\vec{B}_2 = -B_2\hat{z}$ ,  
(d)  $\vec{B}_1 = B_1\hat{z}$  e  $\vec{B}_2 = B_2\hat{z}$ ,  
(e)  $\vec{B}_1 = -B_1\hat{x}$  e  $\vec{B}_2 = B_2\hat{y}$ .

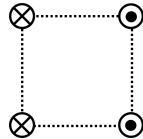
6. Um dipolo magnético puntiforme, de momento de dipolo  $\vec{\mu} = \mu_0\hat{x}$  ( $\mu_0 > 0$ ), está localizado na origem de um sistema de eixos cartesianos, como indicado na figura abaixo. Em um dado instante, uma partícula de carga positiva  $q$  tem vetor posição  $\vec{r} = a\hat{y}$  e velocidade  $\vec{v} = v_0\hat{x}$ , onde  $a$  e  $v_0$  são constantes positivas.



Podemos afirmar que, no instante em questão, a força magnética sobre a partícula:

- (a) tem sentido  $\hat{x}$ ;  
(b) tem sentido  $-\hat{x}$ ;  
(c) tem sentido  $\hat{y}$ ;  
(d) tem sentido  $-\hat{y}$ ;  
(e) tem sentido  $\hat{z}$ ;  
(f) tem sentido  $-\hat{z}$ ;  
(g) é nula.

7. Quatro fios retilíneos e infinitos são paralelos e carregam correntes estacionárias de mesma intensidade  $I$ , com sentidos indicados na figura abaixo.



Eles são posicionados de forma que, num corte transversal, ocupam os vértices de um quadrado, como mostrado na figura. Sobre esse sistema, considere as seguintes afirmativas:

- (I) O campo magnético no centro do quadrado tem direção vertical e aponta para baixo.  
(II) A força magnética resultante sobre qualquer um dos fios tem direção paralela a uma das diagonais do quadrado.

São VERDADEIRAS as afirmativas:

- (a) I  
(b) II  
(c) Todas elas.  
(d) Nenhuma delas.

### Seção 3. Questões discursivas (1×2,8 = 2,8 pontos)

Todas as respostas devem ter justificativas!

1. [2,8 pontos]

Uma barra metálica horizontal  $PQ$ , de comprimento  $\ell$  e massa  $m$ , pode escorregar sem atrito sobre dois trilhos verticais condutores, que estão unidos por uma haste horizontal fixa de resistência  $R$ . As resistências da barra e do trilho são desprezíveis. O conjunto está em uma região onde há um campo magnético  $\vec{B} = -B\hat{z}$  constante (uniforme e estacionário, com  $B > 0$ ). Suponha que, no instante  $t = 0$ , a barra tenha sido abandonada do repouso e durante seu movimento ela não tenha perdido o contato com os trilhos verticais. Denote por  $g$  o módulo da aceleração da gravidade ( $\vec{g}$  tem sentido  $\hat{y}$ ). Despreze quaisquer efeitos capacitivos ou indutivos no circuito.

- (a) Determine o sentido da corrente induzida no circuito. [0,6 ponto]

- (b) Calcule a intensidade da corrente induzida no circuito em um instante genérico  $t$ , em função de  $B$ ,  $\ell$ ,  $R$  e  $v_y$ . Considere que em  $t = 0$  a barra ocupava a posição  $y = 0$ . [0,8 ponto]

- (c) Determine a força magnética,  $\vec{F}_m$ , (módulo, direção e sentido) atuando na barra, num instante de tempo  $t$ , quando a velocidade da mesma tem módulo  $v_y$ . [0,6 ponto]

- (d) Após algum tempo, a barra entra em movimento uniforme (suponha que esse regime seja atingido antes da barra atingir o solo). Nesse regime, sua velocidade tem módulo  $v_T$  (velocidade terminal). Obtenha a expressão para  $v_T$  em termos de  $B$ ,  $\ell$ ,  $R$ ,  $m$  e  $g$ . [0,8 ponto]

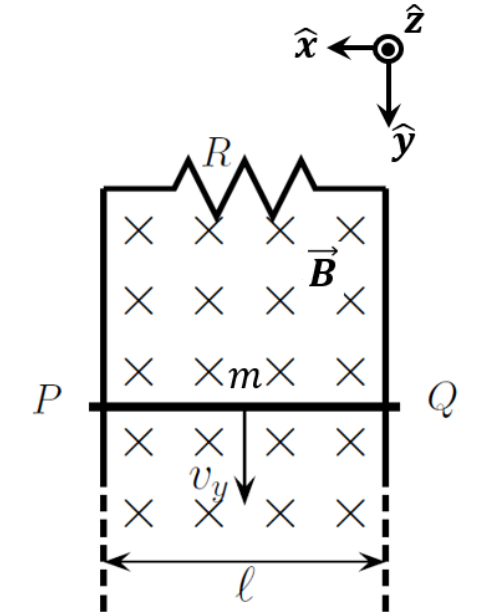


Figura 1: Questão discursiva 1.



**Seção 1. Falso ou Verdadeiro (10×0,3 = 3,0 pontos)**

- F Se a circulação do campo magnético ao longo de um caminho fechado for nula, não haverá nenhuma partícula carregada em movimento atravessando uma superfície aberta delimitada pela curva que descreve esse caminho.
- V Uma espira retangular de metal, originalmente sem corrente, está próxima de um fio longo e retilíneo, que transporta corrente, com dois de seus lados paralelos ao fio. O fio e a espira se encontram no mesmo plano. Quando a corrente do fio está diminuindo, a espira é atraída pelo fio.
- V Ao fazermos passar uma corrente estacionária através das espiras helicoidais de uma mola feita de material condutor, as espiras se aproximam, como se a mola fosse comprimida.
- V A força magnética sobre uma espira carregando uma corrente estacionária, localizada em uma região de campo magnético uniforme é sempre nula, independentemente do formato da espira.
- F Quando uma espira condutora e outra isolante, ambas rígidas e em repouso, são posicionadas perpendicularmente a um campo magnético uniforme que varia no tempo, surge uma força eletromotriz induzida apenas na espira condutora.
- V Uma partícula carregada pode ter um movimento retilíneo uniforme em uma região do espaço contendo campos elétrico e magnético uniformes, se eles forem perpendiculares entre si.
- F A lei de Ampère afirma que, para correntes estacionárias, o fluxo do campo magnético através de uma superfície  $\mathcal{S}$  é igual a  $\mu_0$  vezes a corrente que atravessa  $\mathcal{S}$ .
- F Em um fio condutor ôhmico dado, ao dobrarmos a diferença de potencial entre suas extremidades, dobramos sua resistência.
- F Para um condutor usual, como o cobre, o aumento da temperatura aumenta as vibrações moleculares, provocando maior espalhamento dos elétrons, o que faz com que sua resistividade diminua.
- V O fluxo do campo magnético da Terra através da superfície correspondente ao território brasileiro é igual, em módulo, ao fluxo do campo magnético da Terra através da superfície correspondente a todo o resto do globo terrestre.

**Seção 2. Múltipla escolha (7×0,6 = 4,2 pontos)**

- |        |        |
|--------|--------|
| 1. (d) | 5. (a) |
| 2. (a) | 6. (g) |
| 3. (c) | 7. (a) |
| 4. (b) |        |

**Seção 3. Questões discursivas (1×2,8 = 2,8 pontos)**

1. **Resolução:**

(a) Orientando o vetor de área no sentido  $-\hat{z}$ , temos que o fluxo do campo magnético na espira formada pelo segmento  $PQ$  e pelo trilho é positivo e está aumentando com o tempo. Assim, pela lei de Lenz, a corrente induzida no circuito, deve se opor ao aumento do fluxo, para isso, ela circula no sentido anti-horário. Nessa situação, o campo magnético produzido pela corrente induzida na espira tem sentido contrário ao campo aplicado.

■

(b) Para encontrarmos a corrente induzida precisamos primeiramente determinar a fem induzida. Para tal utilizaremos a lei de Faraday. Para utilizarmos a lei de Faraday, orientamos o vetor de área no sentido  $-\hat{z}$  de acordo com o sistema de coordenadas indicado na Figura 1. Para essa escolha de vetor de área, o sentido positivo da fem é horário, dado pela regra da mão direita. O fluxo do campo magnético é então dado por:

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A} = \int_S (-B\hat{z}) \cdot (-dA\hat{z}),$$

$$\Phi_B = BA(t) = B\ell y(t).$$

Assim, a fem induzida,  $\mathcal{E}$ , é dada por:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -B\ell \frac{dy}{dt} = -B\ell v_y(t).$$

O sinal negativo da fem significa que os sentidos reais, da fem e da corrente induzida, são contrários ao sentido positivo que foi definido quando fizemos a escolha do vetor de área para o cálculo do fluxo. Ou seja, a fem e a corrente induzida para este caso, têm sentido anti-horário, em acordo com o resultado encontrado utilizando a lei de Lenz. A intensidade da corrente induzida  $i_{ind}$  que circula no trilho e na barra é dada por:

$$i_{ind} = \frac{|\mathcal{E}|}{R},$$

$$\rightarrow \boxed{i_{ind} = \frac{B\ell v_y}{R}}.$$

■

(c) A força magnética atuando na barra, quando a mesma se desloca com velocidade  $\vec{v} = v_y\hat{y}$ , é dada por:

$$\vec{F} = i_{ind}\vec{L} \times \vec{B} = \frac{B\ell v_y}{R}(-\ell\hat{x}) \times (-B\hat{z}),$$

$$\rightarrow \boxed{\vec{F}_m = -\frac{B^2\ell^2 v_y}{R}\hat{y}}.$$

■

(d) Após decorrido um intervalo de tempo grande o suficiente, a soma da força magnética  $\vec{F}_m = -i_{ind}\ell B\hat{y}$  com a força peso,  $\vec{P} = mg\hat{y}$ , atuando sobre a barra, anula-se. Nesta situação a barra se desloca com velocidade constante  $v_T$ , que é obtida igualando-se os módulos da força peso e da força magnética atuando na barra. Ou seja:

$$mg = \frac{B\ell v_T}{R} \times \ell B,$$

logo:

$$\rightarrow \boxed{v_T = \frac{mgR}{B^2\ell^2}}.$$

■



**Formulário**

$$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}, \quad d\vec{F}_m = Id\vec{\ell} \times \vec{B}, \quad \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0, \quad d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{\ell} \times \hat{r}}{r^2}, \quad \vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B},$$

$$I = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{A}, \quad \vec{J} = qn\vec{v}, \quad \vec{J} = \sigma\vec{E}, \quad \oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I_{\text{enc}} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}, \quad \epsilon_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi_B}{dt}.$$

**Seção 1. Falso ou Verdadeiro (10×0,3 = 3,0 pontos)**

Indique com **V** se a afirmação é verdadeira, ou **F**, se falsa. Note que há a seguinte **PENALIZAÇÃO**: cada questão erradamente indicada corresponderá a uma diminuição de 0,2 ponto da nota do estudante obtida nesta seção. Caso não queira correr o risco de penalização, deixe a resposta em branco!

\_\_\_\_\_ Se a circulação do campo magnético ao longo de um caminho fechado for nula, não haverá nenhuma partícula carregada em movimento atravessando uma superfície aberta delimitada pela curva que descreve esse caminho.

\_\_\_\_\_ Uma partícula carregada pode ter um movimento retilíneo uniforme em uma região do espaço contendo campos elétrico e magnético uniformes, se eles forem perpendiculares entre si.

\_\_\_\_\_ Quando uma espira condutora e outra isolante, ambas rígidas e em repouso, são posicionadas perpendicularmente a um campo magnético uniforme que varia no tempo, surge uma força eletromotriz induzida apenas na espira condutora.

\_\_\_\_\_ Em um fio condutor ôhmico dado, ao dobrarmos a diferença de potencial entre suas extremidades, dobramos sua resistência.

\_\_\_\_\_ Para um condutor usual, como o cobre, o aumento da temperatura aumenta as vibrações moleculares, provocando maior espalhamento dos elétrons, o que faz com que sua resistividade diminua.

\_\_\_\_\_ Uma espira retangular de metal, originalmente sem corrente, está próxima de um fio longo e retilíneo, que transporta corrente, com dois de seus lados paralelos ao fio. O fio e a espira se encontram no mesmo plano. Quando a corrente do fio está diminuindo, a espira é atraída pelo fio.

\_\_\_\_\_ A lei de Ampère afirma que, para correntes estacionárias, o fluxo do campo magnético através de uma superfície  $\mathcal{S}$  é igual a  $\mu_0$  vezes a corrente que atravessa  $\mathcal{S}$ .

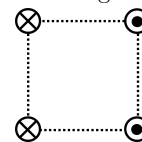
\_\_\_\_\_ A força magnética sobre uma espira carregando uma corrente estacionária, localizada em uma região de campo magnético uniforme é sempre nula, independentemente do formato da espira.

\_\_\_\_\_ O fluxo do campo magnético da Terra através da superfície correspondente ao território brasileiro é igual, em módulo, ao fluxo do campo magnético da Terra através da superfície correspondente a todo o resto do globo terrestre.

\_\_\_\_\_ Ao fazermos passar uma corrente estacionária através das espiras helicoidais de uma mola feita de material condutor, as espiras se aproximam, como se a mola fosse comprimida.

**Seção 2. Múltipla escolha (7×0,6 = 4,2 pontos)**

1. Quatro fios retilíneos e infinitos são paralelos e carregam correntes estacionárias de mesma intensidade  $I$ , com sentidos indicados na figura abaixo.



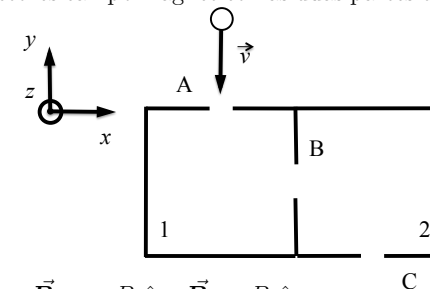
Eles são posicionados de forma que, num corte transversal, ocupam os vértices de um quadrado, como mostrado na figura. Sobre esse sistema, considere as seguintes afirmativas:

- (I) O campo magnético no centro do quadrado tem direção vertical e aponta para baixo.  
 (II) A força magnética resultante sobre qualquer um dos fios tem direção paralela a uma das diagonais do quadrado.

São VERDADEIRAS as afirmativas:

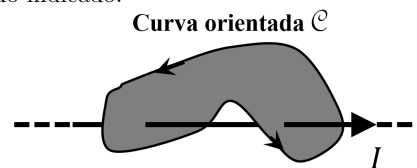
- (a) I  
 (b) II  
 (c) Todas elas.  
 (d) Nenhuma delas.

3. Uma partícula carregada com carga  $q > 0$  se desloca com velocidade constante  $\vec{v} = -v\hat{y}$ , ( $v > 0$ ). Ela então entra através da abertura  $A$  numa caixa que é dividida em duas partes (chamadas 1 e 2), onde podem ser aplicados campos magnéticos uniformes e estacionários em cada uma delas. Na placa que separa as duas metades existe uma abertura  $B$  para permitir a passagem da partícula. Observa-se que em seguida a partícula sai da caixa através da abertura  $C$  com a mesma velocidade  $\vec{v} = -v\hat{y}$ . Sejam  $B_1$  e  $B_2$  os módulos do campo magnético nas partes 1 e 2, respectivamente, com  $B_1 > 0$  e  $B_2 > 0$ . Dentre as opções abaixo, qual delas melhor descreve os vetores campo magnético nas duas partes da caixa?



- (a)  $\vec{B}_1 = -B_1\hat{z}$  e  $\vec{B}_2 = B_2\hat{z}$ ,  
 (b)  $\vec{B}_1 = B_1\hat{z}$  e  $\vec{B}_2 = -B_2\hat{z}$ ,  
 (c)  $\vec{B}_1 = -B_1\hat{z}$  e  $\vec{B}_2 = -B_2\hat{z}$ ,  
 (d)  $\vec{B}_1 = B_1\hat{z}$  e  $\vec{B}_2 = B_2\hat{z}$ ,  
 (e)  $\vec{B}_1 = -B_1\hat{x}$  e  $\vec{B}_2 = B_2\hat{y}$ .

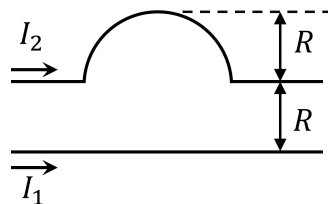
2. A figura abaixo mostra uma curva  $\mathcal{C}$  fechada, orientada, e um trecho de um fio retilíneo, longo, pelo qual passa uma corrente estacionária de intensidade  $I$ , no sentido indicado.



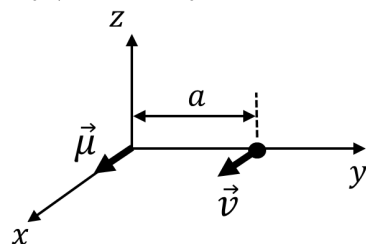
Podemos afirmar que:

- (a)  $\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I$ ;  
 (b)  $\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = -\mu_0 I$ ;  
 (c)  $\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = 2\mu_0 I$ ;  
 (d)  $\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = -2\mu_0 I$ ;  
 (e)  $\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = 0$ ;

4. Considere os dois fios condutores mostrados na figura abaixo. Um deles é retilíneo e infinito, enquanto o outro é retilíneo e infinito, exceto por uma parte dobrada na forma de um semicírculo de raio  $R$ . Os fios carregam correntes estacionárias de intensidades  $I_1$  e  $I_2$  no mesmo sentido, respectivamente, e a distância entre eles também vale  $R$ . Qual deve ser a razão  $I_1/I_2$  para que o campo magnético no centro do semicírculo seja nulo?



- (a)  $\pi/2$   
 (b)  $\pi$   
 (c)  $1/2$   
 (d)  $1$   
 (e)  $1/\pi$   
 (f) O campo nunca pode ser nulo neste ponto, pois as correntes tem o mesmo sentido.
5. Um dipolo magnético puntiforme, de momento de dipolo  $\vec{\mu} = \mu_0 \hat{x}$  ( $\mu_0 > 0$ ), está localizado na origem de um sistema de eixos cartesianos, como indicado na figura abaixo. Em um dado instante, uma partícula de carga positiva  $q$  tem vetor posição  $\vec{r} = a \hat{y}$  e velocidade  $\vec{v} = v_0 \hat{x}$ , onde  $a$  e  $v_0$  são constantes positivas.



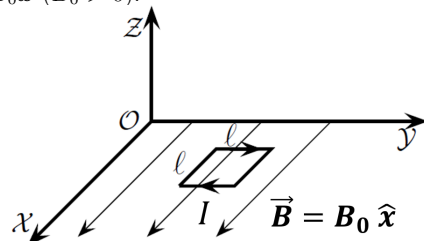
Podemos afirmar que, no instante em questão, a força magnética sobre a partícula:

- (a) tem sentido  $\hat{x}$ ;  
 (b) tem sentido  $-\hat{x}$ ;  
 (c) tem sentido  $\hat{y}$ ;  
 (d) tem sentido  $-\hat{y}$ ;  
 (e) tem sentido  $\hat{z}$ ;  
 (f) tem sentido  $-\hat{z}$ ;  
 (g) é nula.

6. Um próton  $p$  e uma partícula alfa  $\alpha$  (formada por dois prótons e dois nêutrons) penetram em uma região de campo magnético uniforme, de forma que suas velocidades iniciais são idênticas e perpendiculares à direção do campo. Considerando que a massa do próton é aproximadamente igual à massa do nêutron, a razão entre os raios das trajetórias circulares do próton e da partícula alfa ( $R_p/R_\alpha$ ), nessa região, vale:

- (a) 4  
 (b) 2  
 (c) 1  
 (d)  $1/2$   
 (e)  $1/4$

7. Uma espira quadrada, de arestas de comprimento  $\ell$ , pela qual flui uma corrente estacionária de intensidade  $I$ , está no plano  $\mathcal{OXY}$ , com dois de seus lados paralelos ao eixo  $\mathcal{OX}$ , como mostrado na figura abaixo. A corrente na espira flui no sentido horário para um observador localizado no semi-eixo positivo  $\mathcal{OZ}$ . Na região onde a espira se encontra há um campo magnético constante (estacionário e uniforme)  $\vec{B} = B_0 \hat{x}$  ( $B_0 > 0$ ).



O torque sobre a espira é dado por:

- (a)  $\vec{\tau} = I\ell^2 B_0 \hat{y}$ .  
 (b)  $\vec{\tau} = -I\ell^2 B_0 \hat{y}$ .  
 (c)  $\vec{\tau} = I\ell^2 B_0 \hat{z}$ .  
 (d)  $\vec{\tau} = -I\ell^2 B_0 \hat{z}$ .  
 (e)  $\vec{\tau} = -\frac{1}{2} I\ell^2 B_0 \hat{y}$ .  
 (f)  $\vec{\tau} = \frac{1}{2} I\ell^2 B_0 \hat{z}$ .  
 (g)  $\vec{\tau} = -2I\ell^2 B_0 \hat{z}$ .  
 (h) Nulo.

### Seção 3. Questões discursivas (1×2,8 = 2,8 pontos)

Todas as respostas devem ter justificativas!

1. [2,8 pontos]

Uma barra metálica horizontal  $PQ$ , de comprimento  $\ell$  e massa  $m$ , pode escorregar sem atrito sobre dois trilhos verticais condutores, que estão unidos por uma haste horizontal fixa de resistência  $R$ . As resistências da barra e do trilho são desprezíveis. O conjunto está em uma região onde há um campo magnético  $\vec{B} = -B\hat{z}$  constante (uniforme e estacionário, com  $B > 0$ ). Suponha que, no instante  $t = 0$ , a barra tenha sido abandonada do repouso e durante seu movimento ela não tenha perdido o contato com os trilhos verticais. Denote por  $g$  o módulo da aceleração da gravidade ( $\vec{g}$  tem sentido  $\hat{y}$ ). Despreze quaisquer efeitos capacitivos ou indutivos no circuito.

- (a) Determine o sentido da corrente induzida no circuito. [0,6 ponto]

- (b) Calcule a intensidade da corrente induzida no circuito em um instante genérico  $t$ , em função de  $B$ ,  $l$ ,  $R$  e  $v_y$ . Considere que em  $t = 0$  a barra ocupava a posição  $y = 0$ . [0,8 ponto]

- (c) Determine a força magnética,  $\vec{F}_m$ , (módulo, direção e sentido) atuando na barra, num instante de tempo  $t$ , quando a velocidade da mesma tem módulo  $v_y$ . [0,6 ponto]

- (d) Após algum tempo, a barra entra em movimento uniforme (suponha que esse regime seja atingido antes da barra atingir o solo). Nesse regime, sua velocidade tem módulo  $v_T$  (velocidade terminal). Obtenha a expressão para  $v_T$  em termos de  $B$ ,  $l$ ,  $R$ ,  $m$  e  $g$ . [0,8 ponto]

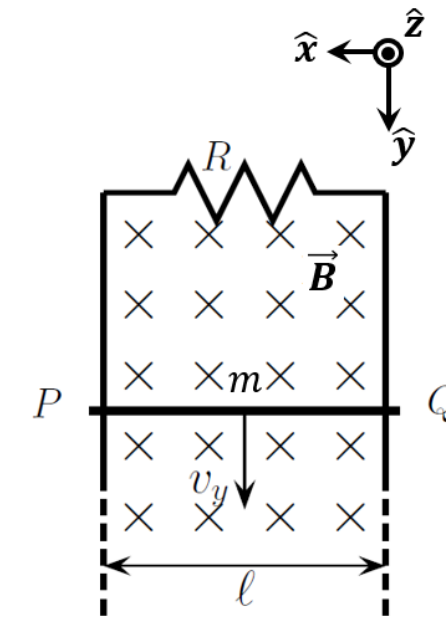


Figura 1: Questão discursiva 1.

**Seção 1. Falso ou Verdadeiro (10×0,3 = 3,0 pontos)**

- F Se a circulação do campo magnético ao longo de um caminho fechado for nula, não haverá nenhuma partícula carregada em movimento atravessando uma superfície aberta delimitada pela curva que descreve esse caminho.
- V Uma partícula carregada pode ter um movimento retilíneo uniforme em uma região do espaço contendo campos elétrico e magnético uniformes, se eles forem perpendiculares entre si.
- F Quando uma espira condutora e outra isolante, ambas rígidas e em repouso, são posicionadas perpendicularmente a um campo magnético uniforme que varia no tempo, surge uma força eletromotriz induzida apenas na espira condutora.
- F Em um fio condutor ôhmico dado, ao dobrarmos a diferença de potencial entre suas extremidades, dobramos sua resistência.
- F Para um condutor usual, como o cobre, o aumento da temperatura aumenta as vibrações moleculares, provocando maior espalhamento dos elétrons, o que faz com que sua resistividade diminua.
- V Uma espira retangular de metal, originalmente sem corrente, está próxima de um fio longo e retilíneo, que transporta corrente, com dois de seus lados paralelos ao fio. O fio e a espira se encontram no mesmo plano. Quando a corrente do fio está diminuindo, a espira é atraída pelo fio.
- F A lei de Ampère afirma que, para correntes estacionárias, o fluxo do campo magnético através de uma superfície  $\mathcal{S}$  é igual a  $\mu_0$  vezes a corrente que atravessa  $\mathcal{S}$ .
- V A força magnética sobre uma espira carregando uma corrente estacionária, localizada em uma região de campo magnético uniforme é sempre nula, independentemente do formato da espira.
- V O fluxo do campo magnético da Terra através da superfície correspondente ao território brasileiro é igual, em módulo, ao fluxo do campo magnético da Terra através da superfície correspondente a todo o resto do globo terrestre.
- V Ao fazermos passar uma corrente estacionária através das espiras helicoidais de uma mola feita de material condutor, as espiras se aproximam, como se a mola fosse comprimida.

**Seção 2. Múltipla escolha (7×0,6 = 4,2 pontos)**

- |        |        |
|--------|--------|
| 1. (a) | 5. (g) |
| 2. (c) | 6. (d) |
| 3. (a) | 7. (b) |
| 4. (a) |        |

**Seção 3. Questões discursivas (1×2,8 = 2,8 pontos)**

1. **Resolução:**

(a) Orientando o vetor de área no sentido  $-\hat{z}$ , temos que o fluxo do campo magnético na espira formada pelo segmento  $PQ$  e pelo trilho é positivo e está aumentando com o tempo. Assim, pela lei de Lenz, a corrente induzida no circuito, deve se opor ao aumento do fluxo, para isso, ela circula no sentido anti-horário. Nessa situação, o campo magnético produzido pela corrente induzida na espira tem sentido contrário ao campo aplicado.

■

(b) Para encontrarmos a corrente induzida precisamos primeiramente determinar a fem induzida. Para tal utilizaremos a lei de Faraday. Para utilizarmos a lei de Faraday, orientamos o vetor de área no sentido  $-\hat{z}$  de acordo com o sistema de coordenadas indicado na Figura 1. Para essa escolha de vetor de área, o sentido positivo da fem é horário, dado pela regra da mão direita. O fluxo do campo magnético é então dado por:

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A} = \int_S (-B\hat{z}) \cdot (-dA\hat{z}),$$

$$\Phi_B = BA(t) = B\ell y(t).$$

Assim, a fem induzida,  $\mathcal{E}$ , é dada por:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -B\ell \frac{dy}{dt} = -B\ell v_y(t).$$

O sinal negativo da fem significa que os sentidos reais, da fem e da corrente induzida, são contrários ao sentido positivo que foi definido quando fizemos a escolha do vetor de área para o cálculo do fluxo. Ou seja, a fem e a corrente induzida para este caso, têm sentido anti-horário, em acordo com o resultado encontrado utilizando a lei de Lenz. A intensidade da corrente induzida  $i_{ind}$  que circula no trilho e na barra é dada por:

$$i_{ind} = \frac{|\mathcal{E}|}{R},$$

$$\rightarrow i_{ind} = \frac{B\ell v_y}{R}.$$

■

(c) A força magnética atuando na barra, quando a mesma se desloca com velocidade  $\vec{v} = v_y\hat{y}$ , é dada por:

$$\vec{F} = i_{ind}\vec{L} \times \vec{B} = \frac{B\ell v_y}{R}(-\ell\hat{x}) \times (-B\hat{z}),$$

$$\rightarrow \vec{F}_m = -\frac{B^2\ell^2 v_y}{R}\hat{y}.$$

■

(d) Após decorrido um intervalo de tempo grande o suficiente, a soma da força magnética  $\vec{F}_m = -i_{ind}\ell B\hat{y}$  com a força peso,  $\vec{P} = mg\hat{y}$ , atuando sobre a barra, anula-se. Nesta situação a barra se desloca com velocidade constante  $v_T$ , que é obtida igualando-se os módulos da força peso e da força magnética atuando na barra. Ou seja:

$$mg = \frac{B\ell v_T}{R} \times \ell B,$$

logo:

$$\rightarrow v_T = \frac{mgR}{B^2\ell^2}.$$

■