FORÇA MAGNÉTICA SOBRE CONDUTORES

Ao final deste capítulo você deverá ser capaz de:

- Explicar a ação de um campo magnético sobre um condutor conduzindo corrente.
- Calcular forças sobre condutores percorridos por correntes, na presença de campos magnéticos
- Calcular torques sobre espiras percorridas por correntes, na presença de campos magnéticos.

10.1 - EFEITO DE UM ÍMÃ EM UM FIO CONDUZINDO CORRENTE

Considere o campo magnético uniforme entre os pólos de um imã permanente, como pode ser visto na figura 10.1.

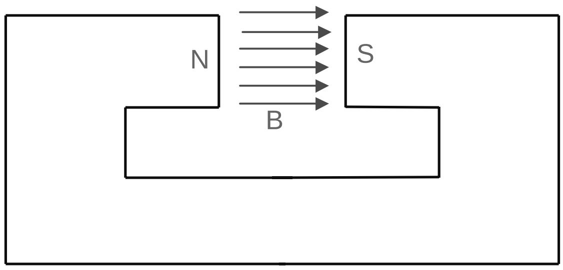

figura 10.1 - Campo magnético de um imã permanente

Se introduzirmos um condutor conduzindo uma corrente I A na presença deste campo magnético, conforme a figura 10.2, termos uma alteração no campo resultante. Se o condutor tem a direção perpendicular à figura, com a corrente saindo, o campo magnético provocado pelo condutor reforçará o campo do imã permanente na parte de baixo do campo, e o enfraquecerá na parte de cima. Consequentemente, haverá uma força tendendo a empurrar o condutor na direção do campo mais fraco.

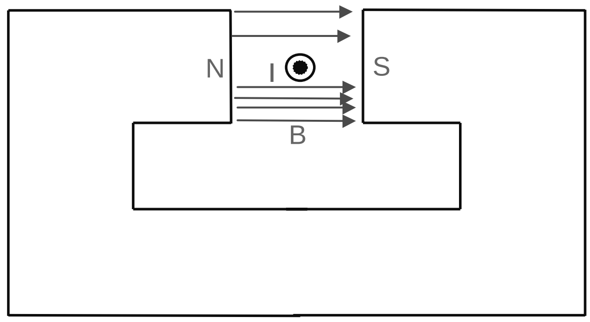

figura 10.2 - Condutor conduzindo corrente imerso em um campo magnético.

A força que atua sobre o condutor será expressa por:

$$F = IBL \text{ (N)} \qquad (10.1)$$

onde:

L	(m)	Comprimento do condutor
B	(Wb/m^2)	Magnitude da indução magnética
I	(A)	Corrente no condutor

Se o condutor não cortar o campo perpendicularmente (figura 10.3), a força F será expressa por:

$$F = IBL \operatorname{sen} \theta \text{ (N)} \qquad (10.2)$$

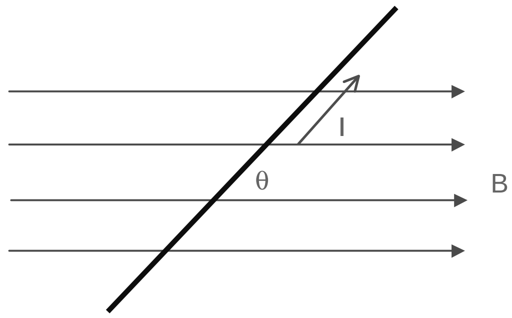

figura 10.3 - condutor cortando campo magnético

Para um elemento de corrente:

$$dF = IBdL \operatorname{sen} \theta \text{ (N)} \qquad (10.3)$$

As equações 10.2 e 10.3 são equações básicas para explicar o funcionamento de motores elétricos.

Resumindo, podemos utilizar notação vetorial e escrever:

$$d\vec{F}=I(d\vec{L}\times\vec{B})\ (N) \qquad (10.4)$$

onde:

$d\vec{F}$	(N)	Vetor indicando a magnitude e direção da força em um elemento de condutor
I	(A)	Corrente no condutor
$\vec{B}$	(T)	Vetor indicando a magnitude e direção da densidade de fluxo
$d\vec{L}$	(m)	Vetor com direção do elemento de condutor.

10.2 - FORÇA ENTRE DOIS CONDUTORES LINEARES E PARALELOS

Considere dois condutores lineares e paralelos de comprimento L m, separados de uma distancia R m no ar, como na figura 10.4. O condutor 1 é percorrido por uma corrente I A, e o condutor 2 por uma corrente I' A em direção contrária.

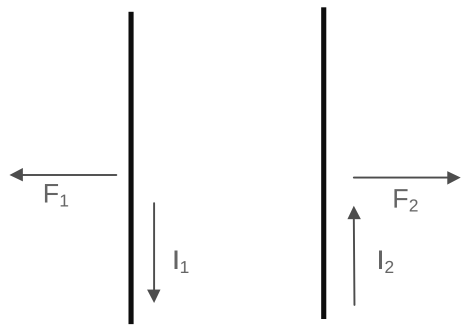

figura 10.4 - Dois condutores paralelos percorridos por correntes

O campo magnético resultante é mais forte entre os dois condutores do que fora deles, conforme é sugerido na figura 10.5. Assim, intuitivamente podemos perceber que a força entre eles será de repulsão (Isso pode ser confirmado pela regra da mão esquerda). Se as correntes forem na mesma direção, a força será de atração.

figura 10.5 - Campo magnético entre dois condutores paralelos

A magnitude da força sobre o condutor 2 é:

$$F = I'B\int_0^L dL = I'BL \ (N) \quad (10.5)$$

Aproveitando o resultado do exemplo 10.1, o campo magnético provocado pela corrente do condutor 1, na posição do condutor 2 será:

$$B = \frac{\mu I}{2\pi R} \ (Wb/m^2) \quad (10.6)$$

Assim, para F teremos:

$$F = \frac{\mu_0 II'}{2\pi R} L \ (N) \quad (10.7)$$

Desde que os condutores possuem mesmo comprimento, e a equação 10.7 é simétrica em I e I', a magnitude da força F' sobre o condutor 1 terá a mesma magnitude da força sobre o condutor 2.

Dividindo a equação 10.7 por L, teremos a força por unidade de comprimento:

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0 II'}{2\pi R} \ (N/m) \quad (10.8)$$

Se I = I', e introduzindo o valor de μ_0,

$$F = 2\times10^{-7}\frac{I^2 L}{R} \ (N) \quad (10.9)$$

Se L = R = 1m, F = 2×10^{-7} N, então teremos I = 1 A. Essa medida é utilizada para definir a unidade de corrente Ampére (A).

Fixando e memorizando ...

Antes de prosseguir, refaça as passagens realizadas nesta seção:

1. Explique a ação de um campo magnético sobre um condutor conduzindo corrente.
2. Obtenha a expressão vetorial para a força magnética sobre um condutor conduzindo corrente.

Exemplo 10.1

Um fio transportando uma corrente 2I A é colocado entre 2 fios que transportam uma corrente I A cada um. Os fios são paralelos e mantém entre si a mesma distância. As três correntes estão no mesmo sentido. Determine a força magnética sobre cada um dos condutores.

Solução

$$F_{1,2} = F_{2,1} = \frac{\mu_0 2I^2}{2\pi d} \text{ (N)}$$

onde :

$F_{1,2}$ = Força sobre o condutor 1, devido à interação entre a corrente no condutor 1 e o campo produzido pela corrente do condutor 2.

$F_{2,1}$ = Força sobre o condutor 2, devido à interação entre a corrente no condutor 2 e o campo produzido pela corrente do condutor 1.

$$F_{2,3} = F_{3,2} = \frac{\mu_0 2I^2}{2\pi d} \text{ (N)}$$

onde:

$F_{2,3}$ = Força sobre o condutor 2, devido à interação entre a corrente no condutor 2 e o campo produzido pela corrente do condutor 3.

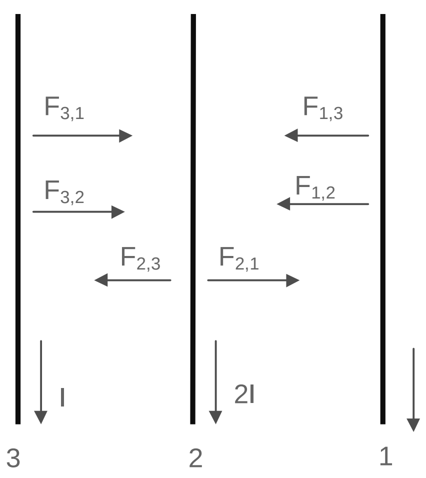

figura - 10.6 - 3 condutores conduzindo corrente

$F_{3,2}$ = Força sobre o condutor 3, devido à interação entre a corrente no condutor 3 e o campo produzido pela corrente do condutor 2.

$$F_{1,3} = F_{3,1} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi d} \text{ (N)}$$

onde:

$F_{1,3}$ = Força sobre o condutor 1, devido à interação entre a corrente no condutor 1 e o campo produzido pela corrente do condutor 3.

$F_{3,1}$ = Força sobre o condutor 3, devido à interação entre a corrente no condutor 1 e o campo produzido pela corrente do condutor 1.

As forças sobre o condutor 2, $F_{2,1}$ e $F_{2,3}$ possuem a mesma magnitude, porém estão em direções opostas. Portanto :

$$\vec{F}_2 = \vec{F}_{2,1} + \vec{F}_{2,3} = 0$$

A força sobre o condutor 1 será:

$$F_1 = F_{1,2} + F_{1,3} = \frac{5\mu_0 I^2}{4\pi d} \text{ (N)}$$

A força sobre o condutor 3 será:

$$F_3 = F_{3,1} + F_{3,2} = \frac{5\mu_0 I^2}{4\pi d} \text{ (N)}$$

Refaça este exemplo ...

Antes de prosseguir, refaça o exemplo acima:

1. Calcule a força sobre o condutor 1, devido ao campo magnético produzido pelos demais condutores.
2. Calcule a força total sobre o condutor 1.
3. Repita para os condutores 2 e 3.

10.3 - TORQUE SOBRE UMA ESPIRA PERCORRIDA POR CORRENTE - MOMENTO MAGNÉTICO

Quando uma espira de corrente é colocada em um campo magnético, as forças que atuam sobre a espira tendem a fazê-la girar. A força tangencial vezes a distancia radial é chamada de **torque**. O torque (representado pela letra T) tem dimensão de força x distância (N.m).

A força em qualquer elemento $d\vec{L}$ da espira será:

$$d\vec{F} = (d\vec{L} \times \vec{B}) I \text{ (N)} \tag{10.10}$$

Se a normal ao plano da espira faz um ângulo θ com o campo magnético B, a força tangencial sobre cada condutor ativo é:

$$F_t = ILB \operatorname{sen}\theta \text{ (N)} \tag{10.11}$$

e o torque será:

$$T = 2F_t \frac{L}{2} = IL^2 B \operatorname{sen}\theta \text{ (N.m)} \tag{10.12}$$

onde $L^2 = A$ é a área da espira. Assim:

$$T = IAB \operatorname{sen}\theta \text{ (N.m)} \tag{10.13}$$

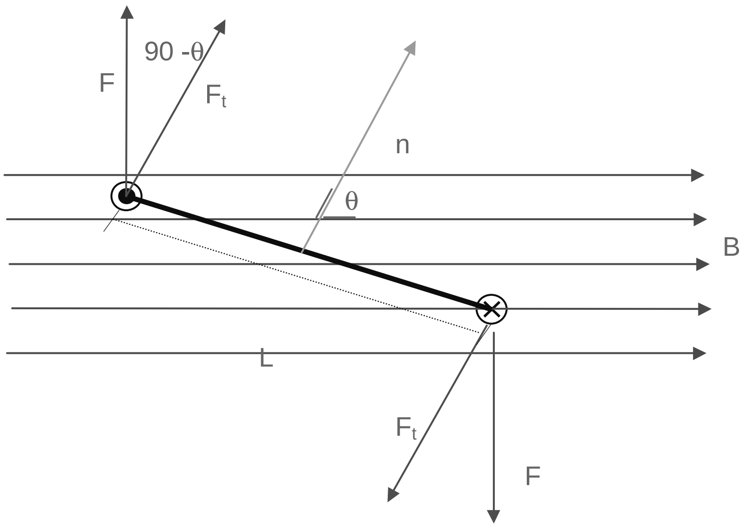

figura 10.7- Torque sobre uma espira conduzindo corrente, imersa em um campo magnético

O produto IA tem dimensão de corrente x área, e é o **momento magnético** da espira. Ele é expresso em Ampéres x metro quadrado. Designando o momento magnético pela letra m:

$$T = mB\,\text{sen}\,\theta \ (\text{N.m}) \tag{10.14}$$

Se a espira tem N voltas, o momento magnético será:

$$m = N.I.A \quad (\text{A.m}^2) \tag{10.15}$$

Finalmente, o momento magnético poderá ser representado vetorialmente como:

$$\vec{m} = m\hat{n} \ (\text{A.m}^2) \tag{10.16}$$

e o torque será expresso pelo produto vetorial:

$$\vec{T} = \vec{m} \times \vec{\mathbf{B}} \ (\text{N.m}) \tag{10.17}$$

Fixando e memorizando ...

Obtenha a expressão para o torque eletromagnético em uma espira imersa em um campo magnético.

Exemplo 10.2

Uma bobina retangular com 200 espiras de 0.3x0.15 m com uma corrente de 5,0 A, está em um campo uniforme de 0,2 T. Encontre o momento magnético e o torque máximo.

Solução

$$A=0.3\times 0.15=0.045 m^2$$

$$m=nIA=200\times 5\times 0.045=45 A.m^2$$

$$T_{max}=mB=45\times 0.2=9 N.m$$

Exemplo 10.3

Um medidor de movimento tem um campo radial uniforme de 0.1 Wb/m^2, e uma mola de torção com torque Tm = 5,87x10^{-5}θ N.m, θ em radianos. A bobina tem 35 espiras, e dimensões 23x17 mm. Qual é o ângulo de rotação que resulta de uma corrente de 15 mA na bobina?

Solução

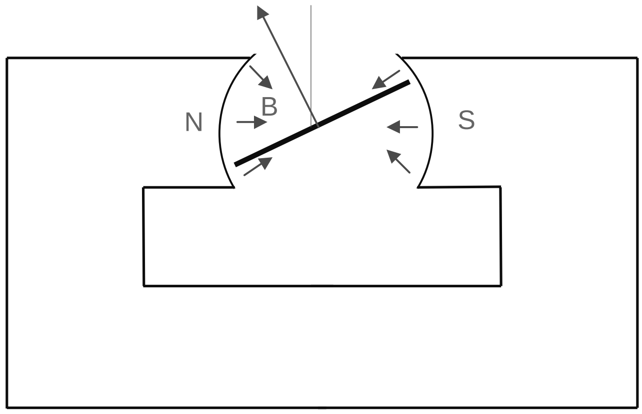

figura 10.8 - Medidor de D'Arsonval

$$\vec{T}=\vec{m}\times\vec{B} \text{ (N.m)}$$

$$T=mB \text{ sen } \gamma \quad (\gamma=90^\circ)$$

$$m=NIA$$

$$m=35\times 15\times 10^{-3}\times 23\times 17\times 10^{-6}=0,205\times 10^{-3} A.m^2$$

$$T_e = 0,205\times 10^{-3}\times 0,1 = 2,05\times 10^{-5} \text{ N.m}$$

No equilíbrio:

$$T_e=T_m$$

$$2,05\times 10^{-5}=5,87\times 10^{-5}\theta$$

$$\theta=0,35 rad \Rightarrow \theta\cong 20^\circ$$

Refaça este exemplo ...

Antes de prosseguir, refaça o exemplo acima:

1. Calcule o momento magnético m.
2. Calcule o conjugado eletromagnético.
3. iguale-o ao conjugado da mola, e encontre θ.

EXERCÍCIOS

1) - Uma película de correntes, $K = 30\ \hat{a}_y$ A/m está localizada no plano z = 6 m. Um condutor filamentar está sobre o eixo y, conduzindo 6,0 A na direção $\hat{a}_y$. Calcule a força por unidade de comprimento.

2) - Uma espira circular de raio a m, conduzindo uma corrente I A está no plano z = h m, paralela a uma película uniforme de corrente $K = K_0 a_y$ A/m localizada em z = 0. Expresse a força sobre um comprimento infinitesimal da espira. Integre este resultado e mostre que a força total é nula.

3) - Uma barra de 3 Kg, condutora, horizontal, com 800 mm de comprimento, faz um ângulo de 60º em relação a um campo magnético horizontal de 0.5 T. Que corrente é necessária na barra para fazê-la flutuar contra a ação da gravidade ?

4) - Dois condutores de comprimento L m são normais a B. A separação fixa entre eles é w m. Mostre que o torque relativo a qualquer eixo paralelo aos condutores é dado por $BILw\cos\theta$ N.m.

5) - Uma espira circular de corrente de raio r m e corrente I A está localizada sobre o plano z = 0. Calcule o torque que resulta se a corrente está na direção a_ϕ e existe um campo uniforme $B = B_0(a_x + a_z)/\sqrt{2}$ (T) .

6) - Duas espiras são separadas por uma distância d m entre os seus centros, e orientadas de forma tal que os seus planos são perpendiculares entre si. Mostre que o torque de uma espira sobre a outra é dado por:

$$T = \frac{\mu_0 m m'}{2\pi d^3}\ (\text{N.m})$$

onde m é o momento magnético da espira 1 e m' o momento magnético da espira 2.

7) - Um elemento de corrente de 3 m de comprimento acha-se ao longo do eixo y, centrado na origem. A corrente vale 6 A na direção $\hat{a}_y$. Se o elemento experimenta uma força de $1{,}5(a_x + a_z)/\sqrt{2}$ N, devido a um campo uniforme B, calcule B.