

Exp. 8

Balança de torque magnético

FSC5143 - Laboratório de Física III

lemo.ufsc.br

Versão de 18 de novembro de 2022

1 Objetivos

Neste experimento, o aluno deverá determinar:

- a dependência do torque de espiras móveis, imersas em campo magnético uniforme, em função do módulo deste campo;
- a dependência angular do torque sobre uma espira móvel em campo magnético uniforme;
- a dependência dos torques sobre espiras móveis em função do número de espiras e de seus diâmetros.

2 Teoria Básica

Quando um fio metálico é percorrido por uma corrente elétrica, é produzido no entorno do fio um campo magnético. O sentido no qual o vetor campo magnético circunda o fio pode ser determinado pela regra da mão direita: ao apontar o seu polegar direito no sentido da corrente, o sentido em que seus outros dedos se fecham contra a palma da sua mão direita determina o sentido de circunferência do campo (ver Figura 1a).

De maneira geral, o cálculo do vetor campo magnético – provocado por uma *corrente estacionária* – num dado ponto do espaço passa pela aplicação da lei de Biot-Savart, que soma todas as contribuições de cada elemento de corrente para o campo naquele ponto. No caso de um circuito fechado, como o de uma espira, o cálculo consiste em uma integral de linha ao longo do circuito.

2.1 Campo magnético produzido por uma espira

Aplicando-se esta lei, é possível, por exemplo, calcular o campo gerado por uma corrente numa espira circular. Demonstra-se que o vetor campo magnético no centro da espira pode ser escrito como

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{2a} \hat{n}, \quad (1)$$

onde \hat{n} é o vetor unitário perpendicular ao plano da espira apontando no sentido definido pela regra da mão direita da Figura 1b, i é a corrente que percorre a espira, a é o raio da espira e $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Tm/A é a constante de permeabilidade magnética do vácuo. As unidades de campo magnético e de corrente elétrica no SI são, respectivamente, o tesla (T) e o ampère (A).

Se a espira for composta por um fio que dá N voltas (o que pode ser pensado como N espiras superpostas, cada uma percorrida por uma corrente i) o campo magnético no centro da espira é então multiplicado por um fator N :

$$\vec{B} = N \frac{\mu_0 i}{2a} \hat{n}, \quad \text{para } N \text{ espiras (fio com } N \text{ voltas).} \quad (2)$$

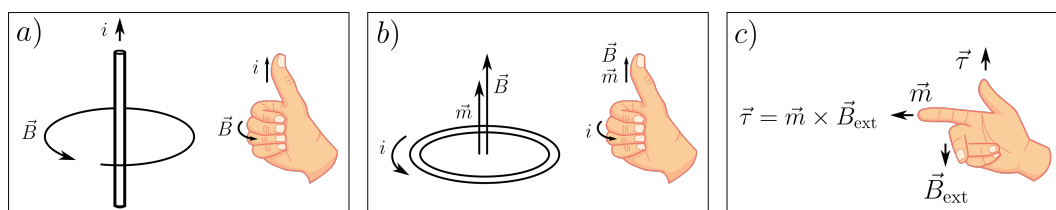


Figura 1 Regras da mão direita aplicadas a diferentes situações. a) campo magnético gerado por um fio retilíneo; b) momento magnético de uma espira; c) torque magnético aplicado a um momento magnético por campo externo.

É conveniente definir outra grandeza, o **momento de dipolo magnético** ou, simplesmente, **momento magnético** da espira, representado pelo vetor \vec{m} . Este vetor também é normal (perpendicular) ao plano da espira e seu sentido coincide com o do vetor campo magnético (conforme a Figura 1b). Seu módulo é dado por:

$$\vec{m} = N i A \hat{n}, \quad (3)$$

em que A é a área da espira com N voltas. Enfatizamos que a equação (3) vale para qualquer forma geométrica planar da espira. Se esta for circular, então a área será $A = \pi a^2$.

2.2 Campo magnético produzido por bobinas de Helmholtz

Quando duas bobinas de raio R são posicionadas paralelamente entre si e a uma distância R uma da outra, como na Figura 2, o campo magnético na região central do arranjo, entre as bobinas e sobre seu eixo, é praticamente constante. Esta propriedade torna o arranjo interessante para aplicações que necessitem de um campo magnético (ainda que aproximadamente) constante. Bobinas assim dispostas recebem o nome de *bobinas de Helmholtz*.

O cálculo do módulo do campo magnético no ponto central entre as bobinas fornece

$$B = \frac{8\mu_0 N i}{5^{3/2} R}, \quad (4)$$

onde i é a corrente elétrica que percorre as bobinas e N o número de espiras em cada bobina.

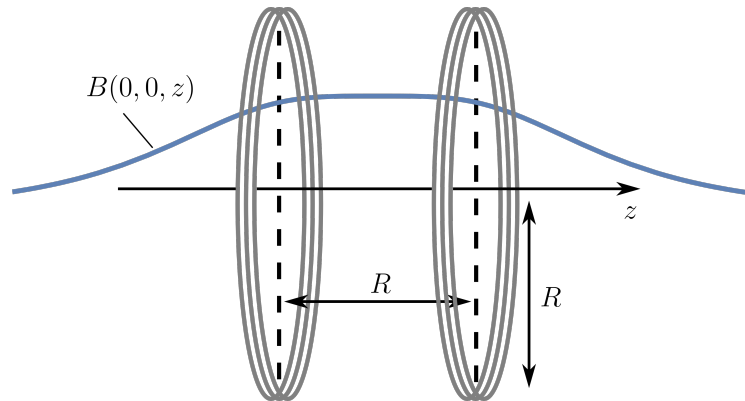


Figura 2 O campo magnético gerado por bobinas de Helmholtz é praticamente constante na região entre as bobinas e próxima ao eixo z .

2.3 Espiras imersas num campo externo uniforme

Se uma espira na qual circula uma corrente i for imersa num campo magnético externo \vec{B} , isto é, gerado por outro agente, as forças que atuam sobre a espira produzem um torque $\vec{\tau}$ que tende a orientar o seu vetor momento magnético \vec{m} na direção de \vec{B} . Matematicamente, o vetor torque, representado na Figura 3 com sentido saindo da página, é o produto vetorial entre o momento da espira e o campo externo:

$$\vec{\tau} = \vec{m} \times \vec{B}. \tag{5}$$

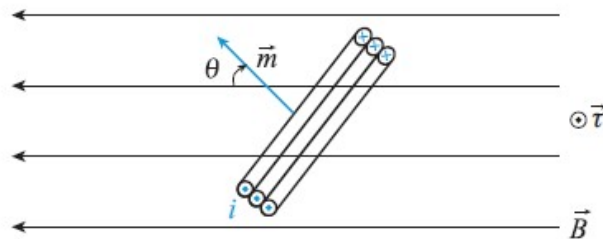


Figura 3 Vetores $\vec{\tau}$ (saindo da página), \vec{m} e \vec{B} (no plano do desenho) na espira de três voltas representada de perfil.

Pela regra da mão direita do produto vetorial (Figura 1c), o torque sai do plano da figura, o que corresponde a uma rotação da espira no sentido anti-horário, tendendo a alinhar \vec{m} com \vec{B} . O módulo de $\vec{\tau}$ é dado por:

$$\tau = mB \text{sen}\theta, \tag{6}$$

onde θ é o ângulo formado entre os vetores \vec{m} e \vec{B} .

3 Sobre a experiência

No laboratório, espiras circulares com diferentes raios ficarão suspensas em uma região com um campo magnético uniforme gerado por bobinas de Helmholtz de raio $R = 20\text{ cm}$ e $N = 154$ espiras cada.

O dispositivo experimental contém uma balança de torção constituída por uma fita metálica que pode ser torcida em um determinado ângulo α (que não deve ser confundido com θ). O fabricante calibrou esta balança de torção para fornecer diretamente os valores da força F , expressa em mN (milinewtons), para cada ângulo α . É essa força que produz o torque sobre a espira móvel. A escala de leitura de força do aparelho foi construída de tal forma que o módulo do torque é calculado multiplicando-se a força medida F pelo diâmetro $D = 2a$ da espira:

$$\tau = F \times 2a \quad (7)$$

onde τ é expresso em newton \times metro.

A equação (6), por outro lado, nos permite escrever o torque em termos das correntes i_e e i_b que fluem através da(s) espira(s) móvel(is) e das bobinas de Helmholtz, respectivamente:

$$\begin{aligned} \tau &= m_{\text{espira}} \cdot B_{\text{bobinas}} \cdot \text{sen}\theta \\ &= N_e i_e \pi a^2 \cdot \frac{8\mu_0 N_b i_b}{5^{3/2} R} \cdot \text{sen}\theta, \end{aligned} \quad (8)$$

onde N_e é o número de espiras móveis e N_b o número de espiras em cada bobina de Helmholtz.

Combinando as duas equações acima, chegamos numa relação afim entre a força medida pela balança e a corrente das bobinas:

$$F = \frac{4\pi a N_b N_e}{5^{3/2} R} \text{sen}\theta \mu_0 i_e i_b, \quad (9)$$

que é também uma relação afim entre a força e a corrente na(s) espira(s) móvel(is).

4 Referências Bibliográficas

- Halliday, Resnick & Walker, *Fundamentos de Física*, Vol. 3, Ed. LTC
- Moysés Nussenzveig, *Curso de Física Básica*, Vol. 3, Ed. Blucher
- Piacentini, Grandi, Hofmann, de Lima & Zimmerman, *Introdução ao Laboratório de Física*, Ed. da UFSC.
- Helene & Vanin, *Tratamento estatístico de dados em física experimental*, Ed. Blucher

5 Relação do material

- 2 fontes variáveis de tensão/corrente contínua
- 1 balança de torção e suportes
- 1 par de bobinas de Helmholtz e suportes
- 2 multímetros
- 1 espira com diâmetro 12 cm, $N = 3$
- 1 espira com diâmetro 12 cm, $N = 2$
- 1 espira com diâmetro 12 cm, $N = 1$
- 1 espira com diâmetro 8 cm, $N = 1$
- 1 espira com diâmetro 6 cm, $N = 1$
- 7 cabos para conexão elétrica, > 100 cm de comprimento
- 1 medidor de campo magnético (teslâmetro)

6 Esquema Experimental

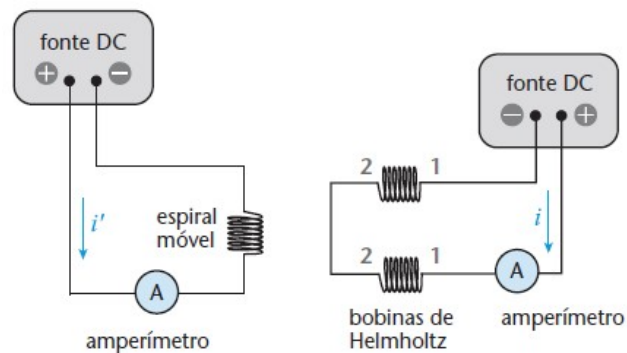


Figura 4 Esquema de montagem.

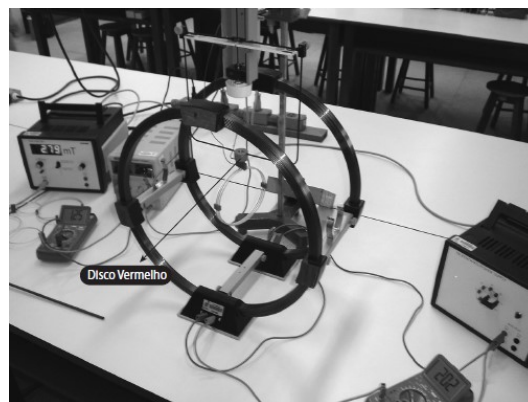


Figura 5 Foto da montagem.

7 Procedimento Experimental

Ajustes iniciais

A balança de torção é frágil. Manuseie-a com cuidado. O ponto zero da balança é ajustado com uma rotação do botão branco, de maneira que o quadro móvel que sustenta a espira circular fique alinhado com a travessa horizontal. Na parte superior da balança de torção, o cursor é ajustado para a indicação zero e deve ser reajustado após cada medida. A medida (leitura) do torque é feita indiretamente através da medida da força, em milinewtons, na escala graduada de 0 a 3, localizada na parte superior do suporte. O professor dará explicações detalhadas sobre o manuseio dessa balança de torção. A determinação da constante de torção do fio não será necessária neste experimento porque o equipamento já foi previamente ajustado pelo fabricante.

7.1 Momento magnético

1. Confira as conexões elétricas de acordo com o esquema. A polaridade da fonte de alimentação das bobinas de Helmholtz é arbitrária, entretanto, a polaridade do amperímetro deve estar de acordo com a da fonte. Selecione os cursores dos amperímetros na escala de 10 A. Coloque a espira móvel com $N = 3$ espiras e na posição $\theta = 90^\circ$ (plano da espira móvel paralelo ao campo magnético das bobinas). O ângulo entre a espira e o campo \vec{B} é indicado no pequeno disco vermelho que sustenta a espira, em divisões de 30° .
2. Ajuste o zero da balança de torção. O cursor deve estar indicando zero e o quadro móvel deve estar alinhado com a marca de referência sobre a travessa horizontal (fazendo ângulo zero com a travessa).
3. Antes de ligar a fonte de tensão que alimenta a espira, verifique se o seletor de tensões está no mínimo e o de corrente, no máximo. A espira suspensa no campo magnético suporta uma corrente máxima de 4,0 A. Ligue a fonte e aplique uma corrente i_e entre 2,0 e 3,0 A.
4. A fonte de tensão que alimenta as bobinas de Helmholtz permite selecionar saídas fixas de tensão. No início, verifique se a fonte está ajustada para 2,0 V. Ligue-a e anote a corrente, i_b . O quadro móvel que sustenta a espira deve ter se movido. Confira olhando sobre a travessa horizontal. Reposicione o quadro móvel da espira com o cursor graduado. Leia o valor da força na escala de 0 a 3 mN, para a esquerda ou para a direita.
5. Faça as medidas da força de torção (F_1) em função da tensão nas bobinas de Helmholtz aumentando até o valor máximo, depois diminuindo (F_2), seguindo a Tabela I. Para cada valor de tensão, meça a corrente e o campo magnético da bobina (B) no centro da espira móvel com o medidor de campo magnético (teslâmetro) fornecido.
6. Calcule os valores médios das forças medidas (\bar{F}) e os respectivos torques (equação 7). Anote na Tabela I.

7. Utilize o medidor de campo magnético para identificar o pólo norte das bobinas e da espira. Para verificar o campo produzido pela espira móvel, use uma corrente entre 2,5 A e 3,0 A e desconecte a tensão nas bobinas de Helmholtz. Identifique o sentido do campo. Agora aplique a maior tensão nas bobinas e desligue a alimentação da espira. Identifique o sentido do campo. Nos dois casos, também observe o sentido das correntes e confirme o pólo norte utilizando a regra da mão direita.

7.2 Dependência angular do torque

1. Utilizando as mesmas espiras móveis ($N = 3$) você agora vai verificar a dependência angular do torque.
2. A primeira medida será feita com a espira móvel na posição utilizada na primeira parte, isto é, $\theta = 90^\circ$. Ajuste o zero da balança conforme o item 2 da primeira parte. Aplique uma corrente i_e entre 2,0 e 3,0 A nas espiras móveis e uma tensão de 12,0 V ou 14,0 V nas bobinas. Mantenha a corrente e a tensão constantes neste experimento. Anote os valores na Tabela II.
3. Meça os valores de F_1 e F_2 em função do ângulo θ , seguindo a tabela.
4. Complete a tabela com os valores calculados da força média \bar{F} e do torque τ .

7.3 Torques sobre espiras de tamanhos variados

1. Nesta parte, você medirá as forças que atuam sobre espiras móveis com diferentes diâmetros e números de espiras, imersas em campo magnético uniforme.
2. Coloque todas as espiras com os momentos magnéticos perpendiculares ao campo magnético das bobinas, isto é, $\theta = 90^\circ$.
3. Lembre-se de zerar a balança antes de cada medida.
4. Fixe a tensão das bobinas em 12,0 ou 14,0 V e as correntes nas espiras móveis entre 2,0 e 3,0 A. Anote os valores na Tabela III.
5. Para cada espira, meça F_1 e F_2 .
6. Verifique os diâmetros das espiras e anote as forças e os torques até completar a Tabela III.

8 Questionário

1. Faça um desenho esquemático que mostre os sentidos das correntes elétricas nas bobinas e na espira móvel, o campo magnético das bobinas, o momento magnético da espira móvel e o torque nela exercido.
2. Usando os dados da Tabela I, verifique se a relação entre o campo magnético gerado pelas bobinas de Helmholtz, B , e a corrente nas bobinas, i_b , é linear, como prevê a equação (4).
3. Usando os dados da Tabela I, faça o gráfico de F em função de i_b e verifique a relação linear prevista pela equação (9). Para isso, calcule os coeficientes angular e linear da reta ajustada e compare-os com os valores esperados.
4. Usando os dados da Tabela II, faça o gráfico de τ em função de $\sin\theta$. Através de uma regressão linear, calcule os coeficientes linear e angular da reta, comparando o resultado com a previsão teórica (equação 8).
5. A componente horizontal do campo magnético terrestre afeta, de alguma maneira, seus resultados experimentais? Comente, justificando sua resposta (considere $B_{\text{hor}} = 25 \mu\text{T}$).
6. Observando os dados na Tabela III, descreva a dependência do torque com as características das espiras suspensas (número de voltas e diâmetro).

Exp. 8 - Balança de torque magnético

GRUPO: _____

ALUNOS: _____

TURMA: _____

DATA: _____

➤ Primeira Parte - Momento magnético (N = 3 espiras)

TABELA I

V (V)	i_b (A)	F_1 (10^{-3} N)	F_2 (10^{-3} N)	\bar{F} (10^{-3} N)	B (mT)	τ (10^{-4} N.m)
2,0						
4,0						
6,0						
8,0						
10,0						
12,0						
14,0						

$i_e =$

$\theta =$

$A =$

➤ Segunda Parte - Dependência angular do torque (N = 3 espiras)

TABELA II

θ (°)	F_1 (10^{-3} N)	F_2 (10^{-3} N)	\bar{F} (10^{-3} N)	τ (10^{-4} N.m)
90				
60				
45				
30				
0				

$V =$

$i_b =$

$i_e =$

➤ Terceira Parte - Torques sobre espiras de tamanhos variáveis

TABELA III

Nº de espiras	Diâmetro (cm)	F_1 (10^{-3} N)	F_2 (10^{-3} N)	\bar{F} (10^{-3} N)	τ (10^{-4} N.m)
3	12,0				
2	12,0				
1	12,0				
1	8,0				
1	6,0				

$V =$

$i_b =$

$i_e =$