

# INDUÇÃO MAGNÉTICA

## Material Utilizado:

- uma bobina de campo ( $l = 750$  mm,  $n = 485$  espiras / mm) (PHYWE 11006.00)
- um conjunto de bobinas de indução com número de espiras  $N$  e diâmetro  $D$  diversos ( $N = 300 / D = 40$  mm,  $N = 300 / D = 32$  mm,  $N = 300 / D = 25$  mm,  $N = 200 / D = 40$  mm,  $N = 100 / D = 40$  mm) (PHYWE 11006.01–05)
- um gerador de sinais senoidais (0 – 10 kHz) (PASCO PI-9587C)
- um milivoltímetro de CA (10.000 mV, 5 kHz) (ENGENHO, K1403)
- um miliamperímetro de CA (2000 mA, 5 kHz) (ENGENHO, K1403)
- cabos de conexão elétrica

**Objetivo do Experimento:** Verificar quantitativamente a lei de indução de Faraday.

---

## INTRODUÇÃO

A lei de indução de Faraday (uma das equações de Maxwell) estabelece que a força eletromotriz  $\varepsilon$  induzida por um campo magnético  $B$  (variável no tempo) ao longo de um percurso fechado é igual à taxa de variação temporal do fluxo magnético  $\phi$  através de uma superfície fechada delimitada por tal percurso:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}, \quad (1)$$

onde a f.e.m. induzida é definida como a integral de percurso do campo elétrico  $E$  induzido:

$$\varepsilon = \oint E \cdot dl \quad (2)$$

e o fluxo magnético como a integral de superfície do campo magnético  $B$  :

$$\phi = \int B \cdot dS, \quad (3)$$

sendo que  $dl$  e  $dS$  denotam elementos de percurso e de superfície, respectivamente (o sentido do percurso e a orientação da superfície estão relacionados pela usual “regra da mão direita”).

O principal propósito deste experimento é a verificação quantitativa da lei de Faraday. Neste experimento esta verificação será feita da seguinte forma. Considere uma bobina (aqui denominada de indução) de  $N$  espiras circulares (justapostas) de diâmetro  $D$  e suponha que esta bobina seja submetida a

um campo magnético homogêneo de magnitude  $B$ , paralelo ao eixo da bobina. Então o fluxo magnético total através desta bobina é dado, através de (3), por  $\phi = (\pi / 4) N B D^2$  (uma vez que  $\pi D^2 / 4$  é a área de cada espira). Um campo magnético (aproximadamente) homogêneo pode ser obtido inserindo a bobina no interior de um solenóide (aqui denominada bobina de campo) (e próximo ao centro deste) com  $n$  espiras por unidade de comprimento, percorrido por uma corrente  $i$ , caso em que  $B = \mu_0 n i$ , onde  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo, como pode ser facilmente deduzido da lei de Ampère. Tem-se então  $\phi = (\pi / 4) \mu_0 n N i D^2$ . Consideremos o caso particular em que a corrente  $i$  que gera o campo magnético é uma corrente alternada de frequência  $f$  ou frequência angular  $\omega (= 2\pi f)$ , o que pode ser expresso por  $i = i_0 \cos(\omega t + \delta)$ , onde  $i_0$  é a amplitude da corrente. Fazendo uso de (1), obtém-se

$$\varepsilon = (\pi / 4) \mu_0 n \omega N i_0 D^2 \text{ sen}(\omega t + \delta),$$

o que significa que a amplitude  $\varepsilon_0$  da força eletromotriz induzida é dada por  $\varepsilon_0 = (\pi / 4) \mu_0 n \omega N i_0 D^2 = (\mu_0 n / 2) f N i_0 D^2$ . Esta última relação pode ser convenientemente expressa em termos de valores “eficazes” ou “quadrático médios” de força eletromotriz e corrente, definidos por  $\varepsilon_{\text{ef}} = \varepsilon_0 / \sqrt{2}$  e  $i_{\text{ef}} = i_0 / \sqrt{2}$ . Tem-se então

$$\varepsilon_{\text{ef}} = (\pi^2 / 2) \mu_0 n i_{\text{ef}} f N D^2 \quad (4).$$

Valores eficazes de força eletromotriz e corrente podem ser diretamente medidos por meio de um voltímetro e de um amperímetro, respectivamente, e a frequência da corrente alternada pode ser facilmente fornecida por um freqüencímetro. Desta forma a relação (4) oferece uma forma conveniente de verificação da lei de Faraday, ao longo das seguintes linhas (i) dependência da força eletromotriz induzida  $\varepsilon$  com a corrente  $i$  que gera o campo magnético (ou, equivalentemente, com o campo magnético  $B$ , tendo em vista a proporcionalidade entre  $B$  e  $i$ ), (ii) dependência da força eletromotriz induzida  $\varepsilon$  com a frequência  $f$  do campo magnético, (iii) dependência da força eletromotriz induzida  $\varepsilon$  com o número  $N$  de espiras da bobina (de indução), e (iv) dependência da força eletromotriz induzida  $\varepsilon$  com a área ( $\pi D^2 / 4$ ) de cada espira (de indução).

A figura 1 representa o circuito elétrico a ser utilizado no experimento. Um gerador de ondas senoidais alimenta diretamente a bobina de campo (que gera o campo magnético homogêneo). A corrente nesta é diretamente medida por um amperímetro. A força eletromotriz induzida na bobina de indução é diretamente medida fazendo-se uso de um voltímetro. Observe que a bobina de indução é representada esquematicamente no circuito ao lado da bobina de campo, enquanto que, na realidade, ela deve ser colocada no interior desta última, próxima a seu centro.

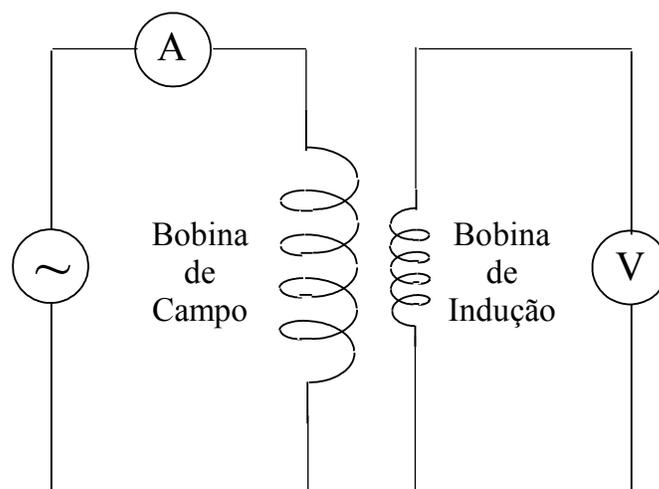


Figura 1 – Montagem para investigação quantitativa da indução magnética (Fotografia e esquema de circuito elétrico)

## PROCEDIMENTO

A frequência do sinal a ser fornecido à bobina de campo deve ser restrita ao intervalo de 1 kHz a 5 kHz, uma vez que abaixo de 0.5 kHz a bobina de campo praticamente constitui um curto circuito e acima de 5 kHz as medidas fornecidas pelo amperímetro e voltímetro não são confiáveis.

### **Parte A - Dependência da Força Eletromotriz Induzida com a Corrente de Campo**

1. Inicialmente, escolha como bobina de indução a bobina de 100 espiras ( $D = 40$  mm). Monte o circuito conforme representado na figura, *com o gerador de funções desligado e tendo sua chave seletora de amplitude na posição de mínimo*. Estabeleça fundos de escala apropriados para o amperímetro e o voltímetro (como você não conhece, em princípio, os valores da corrente e f.e.m. que se estabelecerão na bobina de campo e na bobina de indução, é apropriado selecionar, inicialmente, os fundos de escala mais elevados).
2. Verifique a voltagem de operação do gerador de funções e conecte-o à rede.
3. Confira a montagem com seu professor.
4. Ligue em seguida o gerador de funções e coloque chave seletora de forma de sinais na posição correspondente a ondas senoidais.
5. A partir deste ponto você deverá investigar a dependência da força eletromotriz induzida com a corrente de campo. Selecione um valor de frequência aproximadamente igual a 1 kHz (escolha a faixa de frequência com resolução de 0,1 Hz). Gire um pouco o potenciômetro seletor de amplitude no sentido horário (de forma a obter uma amplitude moderada no sinal fornecido pelo gerador). Meça e registre os valores eficazes correspondentes  $\epsilon_{ef}$  e  $i_{ef}$  da força eletromotriz induzida e da corrente de campo. Se necessário reduza os fundos de escala do voltímetro e do amperímetro. Aumentando gradualmente a amplitude do sinal do gerador, meça e registre pelo menos outros nove pares de valores ( $\epsilon_{ef}$ ,  $i_{ef}$ ).

### **Parte B - Dependência da Força Eletromotriz Induzida com a Frequência da Corrente de Campo**

O idéia nesta parte do experimento é investigar a dependência do força eletromotriz induzida  $\epsilon_{ef}$  com a frequência  $f$  do campo magnético oscilante. Entretanto, é possível que a corrente de campo (fornecida pelo gerador) não se mantenha constante à medida que sua frequência é variada. Para contornar este problema, investiga-se então a dependência da razão  $\epsilon_{ef} / i_{ef}$  com a frequência  $f$ .

6. Mantenha o potenciômetro seletor de amplitude numa posição fixa. Considere o intervalo de frequências (1 kHz, 5 kHz). Divida este intervalo de forma a obter (pelo menos dez) incrementos de frequência aproximadamente iguais, a partir do valor inicial  $f = 1$  kHz. Meça e registre, para cada valor de frequência selecionado, os valores correspondentes  $\epsilon_{ef}$  e  $i_{ef}$  da força eletromotriz induzida e da corrente de campo.

7. Reestabeleça a frequência do sinal fornecido do gerador a seu valor inicial  $f = 1$  kHz e reduza sua amplitude a zero.

### **Parte C - Dependência da Força Eletromotriz Induzida com o Número de Espiras da Bobina de Indução**

Aqui o objetivo é investigar a dependência do força eletromotriz induzida  $\epsilon_{ef}$  com o número de espiras da bobina de indução. Nesta parte do experimento você trabalhará com o conjunto de bobinas de indução de número de espiras  $N$  e diâmetro  $D$  dados por ( $N = 100 / D = 40$  mm,  $N = 200 / D = 40$  mm,  $N = 300 / D = 40$  mm). A magnitude  $i_{ef}$  e a frequência  $f$  da corrente de campo deverão ser mantidas constantes.

8. Mantenha a frequência do sinal fornecido do gerador em seu valor inicial  $f = 1$  kHz aumente sua amplitude para um valor arbitrário (mas moderado).
9. Para a bobina de indução presentemente inserida na montagem ( $N = 100 / D = 40$  mm), meça e registre os valores correspondentes  $\epsilon_{ef}$  e  $i_{ef}$  da força eletromotriz induzida e da corrente de campo.
10. Reduza sua amplitude do sinal fornecido do gerador a zero.
11. Substitua a bobina de indução de 100 espiras pela bobina de 200 espiras. Aumente a amplitude do sinal fornecido pelo gerador de forma a obter o mesmo valor  $i_{ef}$  da corrente de campo empregada para a bobina de 100 espiras. Meça e registre a força eletromotriz induzida.
12. Reduza sua amplitude do sinal fornecido do gerador a zero.
13. Substitua a bobina de indução de 200 espiras pela bobina de 300 espiras. Aumente a amplitude do sinal fornecido pelo gerador de forma a obter o mesmo valor  $i_{ef}$  da corrente de campo empregada para as bobinas de 100 e 200 espiras. Meça e registre a força eletromotriz induzida.

### **Parte D - Dependência da Força Eletromotriz Induzida com o Diâmetro da Bobina de Indução**

Aqui o objetivo é investigar a dependência do força eletromotriz induzida  $\epsilon_{ef}$  com o diâmetro da bobina de indução. Nesta parte do experimento você trabalhará com o conjunto de bobinas de indução de número de espiras  $N$  e diâmetro  $D$  dados por ( $N = 300 / D = 25$  mm,  $N = 300 / D = 32$  mm,  $N = 300 / D = 40$  mm). A magnitude  $i_{ef}$  e a frequência  $f$  da corrente de campo deverão ser mantidas constantes.

14. Mantenha a frequência do sinal fornecido do gerador em seu valor inicial  $f = 1$  kHz aumente sua amplitude para um valor arbitrário (mas moderado).
15. Para a bobina de indução presentemente inserida na montagem ( $N = 300 / D = 40$  mm), meça e registre os valores correspondentes  $\epsilon_{ef}$  e  $i_{ef}$  da força eletromotriz induzida e da corrente de campo.
16. Reduza sua amplitude do sinal fornecido do gerador a zero.
17. Substitua a bobina de indução de diâmetro  $D = 40$  mm pela bobina de diâmetro  $D = 32$  mm. Aumente a amplitude do sinal fornecido pelo gerador de forma a obter o mesmo valor  $i_{ef}$  da corrente de campo empregada para a bobina de diâmetro  $D = 40$  mm. Meça e registre a força eletromotriz induzida.
18. Reduza sua amplitude do sinal fornecido do gerador a zero.
19. Substitua a bobina de indução de diâmetro  $D = 32$  mm pela bobina de diâmetro  $D = 25$  mm. Aumente a amplitude do sinal fornecido pelo gerador de forma a obter o mesmo valor  $i_{ef}$  da corrente de campo empregada para as bobinas de diâmetros  $D = 40$  mm e  $D = 32$  mm. Meça e registre a força eletromotriz induzida.
20. Construa um gráfico  $\epsilon_{ef}$  versus  $i_{ef}$  com os dados obtidos na Parte A.
21. Tendo em vista a relação teórica (4), espera-se que a curva experimental sugira uma relação de proporcionalidade entre  $\epsilon_{ef}$  e  $i_{ef}$ . Tal relação é confirmada no gráfico? Explique.
22. Até que ponto a proporcionalidade entre  $\epsilon_{ef}$  e  $i_{ef}$  é confirmada no gráfico anterior? Responda a esta pergunta propondo um ajuste linear da curva experimental na forma  $\epsilon_{ef} = \alpha_1 i_{ef} + \beta_1$ , e com base nos valores obtidos para os parâmetros de ajuste  $\alpha_1$  e  $\beta_1$ .
23. Construa um gráfico  $\epsilon_{ef} / i_{ef}$  versus  $f$  com os dados obtidos na Parte B.
24. Tendo em vista a relação teórica (4), espera-se que a curva experimental sugira uma relação de proporcionalidade entre  $\epsilon_{ef} / i_{ef}$  e  $f$ . Tal relação é confirmada no gráfico? Explique.
25. Até que ponto a proporcionalidade entre  $\epsilon_{ef} / i_{ef}$  e  $f$  é confirmada no gráfico anterior? Responda a esta pergunta propondo um ajuste linear da curva experimental na forma  $\epsilon_{ef} / i_{ef} = \alpha_2 f + \beta_2$ , e com base nos valores obtidos para os parâmetros de ajuste  $\alpha_2$  e  $\beta_2$ .

26. Construa um gráfico  $\epsilon_{ef}$  versus  $N$  com os dados obtidos na Parte C.
27. Tendo em vista a relação teórica (4), espera-se que a curva experimental sugira uma relação de proporcionalidade entre  $\epsilon_{ef}$  e  $N$ . Tal relação é confirmada no gráfico? Explique.
28. Até que ponto a proporcionalidade entre  $\epsilon_{ef}$  e  $N$  é confirmada no gráfico anterior? Responda a esta pergunta propondo um ajuste linear da curva experimental na forma  $\epsilon_{ef} = \alpha_3 N + \beta_3$ , e com base nos valores obtidos para os parâmetros de ajuste  $\alpha_3$  e  $\beta_3$ .
29. Construa um gráfico  $\epsilon_{ef}$  versus  $D^2$  com os dados obtidos na Parte D.
30. Tendo em vista a relação teórica (4), espera-se que a curva experimental sugira uma relação de proporcionalidade entre  $\epsilon_{ef}$  e  $D^2$ . Tal relação é confirmada no gráfico? Explique.
31. Até que ponto a proporcionalidade entre  $\epsilon_{ef}$  e  $D^2$  é confirmada no gráfico anterior? Responda a esta pergunta propondo um ajuste linear da curva experimental na forma  $\epsilon_{ef} = \alpha_4 D^2 + \beta_4$ , e com base nos valores obtidos para os parâmetros de ajuste  $\alpha_4$  e  $\beta_4$ .

## FOLHA DE DADOS E RESULTADOS

### *Experimento - Indução Magnética*

Data \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

#### COMPONENTES DO GRUPO

NOME \_\_\_\_\_

NOME \_\_\_\_\_

NOME \_\_\_\_\_

NOME \_\_\_\_\_

#### CARACTERIZAÇÃO DA BOBINA DE CAMPO

$n =$  \_\_\_\_\_ espiras / mm

#### DEPENDÊNCIA DA FORÇA ELETROMOTRIZ INDUZIDA COM A CORRENTE DE CAMPO

Bobina de indução:

$N =$  \_\_\_\_\_ espiras

$D =$  \_\_\_\_\_ mm

Frequência da corrente de campo:  $f =$  \_\_\_\_\_ Hz

$i_{ef}$ (mA)										
$\varepsilon_{ef}$ (mV)										

## DEPENDÊNCIA DA FORÇA ELETROMOTRIZ INDUZIDA COM A FREQUÊNCIA

Bobina de indução:

$N =$  \_\_\_\_\_ espiras

$D =$  \_\_\_\_\_ mm

$f$ (Hz)										
$i_{ef}$ (mA)										
$\varepsilon_{ef}$ (mV)										
$\varepsilon_{ef} / i_{ef}$ ( $\Omega$ )										

## DEPENDÊNCIA DA FORÇA ELETROMOTRIZ INDUZIDA COM O NÚMERO DE ESPIRAS DA BOBINA DE INDUÇÃO

Diâmetros das bobinas de indução:  $D =$  \_\_\_\_\_ mm

Frequência da corrente de campo:  $f =$  \_\_\_\_\_ Hz

$N$			
$i_{ef}$ (mA)			
$\varepsilon_{ef}$ (mV)			
$\varepsilon_{ef} / i_{ef}$ ( $\Omega$ )			

DEPENDÊNCIA DA FORÇA ELETROMOTRIZ INDUZIDA  
COM O DIÂMETRO DA BOBINA DE INDUÇÃO

Número de espiras das bobinas de indução:  $N =$  \_\_\_\_\_

Frequência da corrente de campo:  $f =$  \_\_\_\_\_ Hz

$D$ (mm)			
$i_{ef}$ (mA)			
$\epsilon_{cf}$ (mV)			
$\epsilon_{cf} / i_{ef}$ ( $\Omega$ )			