



## BCJ-0203 Fenômenos Eletromagnéticos

### Experimento 4 #

## Indução Eletromagnética

Nota
------

Professor	Data / / 2018
-----------	------------------

Grupo	
Nome	RA

### Introdução e Objetivos

No experimento 3, analisamos o campo magnético gerado por correntes elétricas. Observamos experimentalmente a validade da Lei de Biot-Savart

$$d\vec{B} = \frac{\mu}{4\pi} \frac{id\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad (1)$$

no caso particular de um fio reto e longo transportando uma corrente elétrica. Para o fio reto e infinito, a soma de todos os elementos de corrente  $i d\vec{l}$  resulta num comportamento do campo magnético com o inverso da distância ao fio. Se imaginarmos agora um caso fora de um circuito fechado, uma carga pontual em movimento, nesse caso  $i d\vec{l} = q d\vec{l}/dt$ . Obviamente, uma carga elétrica tem um campo elétrico a ela associado. Se esta carga está em movimento, o campo elétrico varia no

tempo e a Eq.(1) mostra que temos também a geração de um campo magnético. Isso levou os físicos do século XIX à seguinte conjectura: se um campo elétrico variável gera um campo magnético, talvez o inverso também seja verdade, ou seja, uma variação no campo magnético deve provocar o surgimento de um campo elétrico. Michael Faraday, através de numerosos experimentos, descobriu que a variação temporal do fluxo magnético

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (2)$$

causa o surgimento de um campo elétrico. Se considerarmos agora um circuito fechado, a variação do fluxo magnético através desse circuito induz uma força eletromotriz proporcional à variação temporal de  $\Phi_B$ ,

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (3)$$

Esse resultado é conhecido como Lei de Faraday da Indução. Para se ter uma noção da importância dessa lei, a força eletromotriz induzida pela variação do fluxo magnético num circuito é a base do funcionamento de qualquer antena, qualquer circuito receptor.

A melhor maneira de se convencer da validade da Eq.(3) é determinar a força eletromotriz (*fem*) induzida num caso simples como o descrito na Seção 23.2 do livro texto<sup>1</sup>. Naquele caso, você nem sequer precisa utilizar explicitamente a Eq.(3) para determinar a *fem*. No entanto, o experimento descrito naquela seção embora seja de fácil análise teórica, é muito difícil de ser realizado na prática. Uma solução alternativa é obter uma *fem* induzida em um solenoide atravessado por um campo magnético que pode ser variado no tempo de maneira controlada. Assim, o objetivo desse experimento é estudar a *fem* induzida num circuito simples – um solenoide – através do fluxo do campo magnético gerado por outro solenoide pelo qual passa uma corrente controlada por uma fonte geradora de funções de potencial.

## Teoria

Considere um solenoide com  $n$  espiras por unidade de comprimento, como ilustrado esquematicamente na Figura1 abaixo.

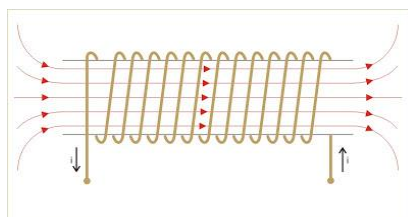


Figura 1. Esquema de um solenoide com suas linhas de campo magnético.

<sup>1</sup> R.A. Serway e J.W. Jewett Jr., Princípios de Física, Vol. 3, Eletromagnetismo, 3ª ed. (Cengage Learning, São Paulo, 2009)

Utilizando a Lei de Ampère, podemos mostrar facilmente que o campo magnético no interior de um solenoide ideal percorrido por uma corrente elétrica  $i$  é dado por:

$$B = \mu_0 n i \quad (4)$$

Utilizando um gerador de funções, pode-se aplicar uma diferença de potencial que depende do tempo  $V(t)$ . Quando conectamos o solenoide a esse gerador de funções, a corrente elétrica que o percorre também depende do tempo, ou seja,  $i(t) = V(t)/R$ , onde  $R$  é a resistência conjunta do solenoide, dos cabos a ele conectados e também da resistência interna do gerador de funções. Assim, considerando a Eq.(4), o campo magnético no interior do solenoide é dado por:

$$B(t) = \frac{\mu_0 n}{R} V(t) \quad (5)$$

Considerando-se um solenoide com diâmetro  $D$ , o fluxo de campo magnético no seu interior será dado por

$$\Phi_B(t) = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = \mu_0 n \frac{\pi D^2}{4} \frac{V(t)}{R} \quad (6)$$

Quando envolvemos outro circuito ao redor desse solenoide, o fluxo de campo magnético nesse segundo circuito será dado pela Eq.(6), se considerarmos que, para o solenoide ideal, o campo magnético externo é nulo. Se o segundo circuito for composto por outro solenoide com  $N$  espiras, o campo atravessa  $N$  superfícies e, portanto, o fluxo de campo será multiplicado por  $N$ .

## Procedimento Experimental, Coleta e Análise de Dados

Nesse experimento, iremos utilizar um gerador de funções, um osciloscópio, uma caneta para quadro branco (como suporte), um paquímetro, um resistor de 100 Ohms, 2 cabos BNC/jacaré, uma ponta de prova de osciloscópio, um cabo banana-banana preto e um cabo banana-banana vermelho.

### ATIVIDADE 1

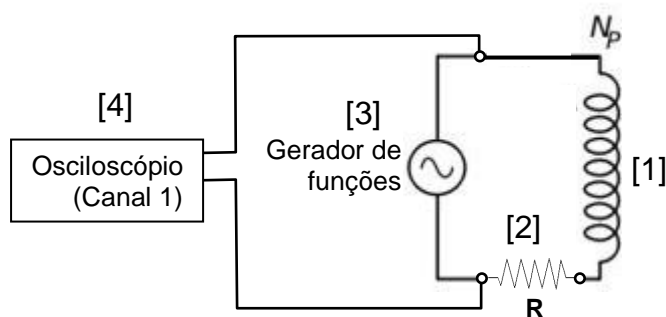
#### Construção e caracterização do solenoide primário

1. Enrole o cabo flexível preto ao redor da caneta, de modo a formar um solenoide, fixando-o com fita adesiva. Em seguida, (a) conte o número de voltas  $N_p$  do fio, (b) utilizando um paquímetro, meça o diâmetro  $D$  e (c) o comprimento  $L$  do solenoide assim formado. Lembre-se de considerar o diâmetro finito do cabo na incerteza de  $D$  e  $L$  (metade da espessura do fio). Anote os valores encontrados na Tabela 1.

**Tabela 1. Parâmetros do solenoide primário.**

Parâmetro (unidade)	Valor medido	± Incerteza
$N_p$ (voltas)		X
$L$ ( $\times 10^{-2}$ m)		
$D$ ( $\times 10^{-2}$ m)		

2. Conecte o resistor R a uma das pontas do cabo (Figura 1).
3. Conecte o solenoide preto ao gerador de funções através de um cabo BNC-jacaré.
4. Acople a ponta de prova no Canal 1 do osciloscópio e a conecte em paralelo com o solenoide, conforme mostrado no esquema da Figura 2. A corrente no solenoide poderá assim ser medida e monitorada pelo osciloscópio através da medida da tensão sobre R.



**Figura 2. Esquema da montagem do enrolamento primário.**

5. Enrolamento secundário: enrole uma volta do cabo vermelho ao redor do solenoide preto (veja Figura 3).
6. Ligue os terminais do cabo vermelho ao Canal 2 do osciloscópio através de um cabo BNC-jacaré.

#### **Usando o osciloscópio**

- Configure o osciloscópio no modo “Aquisição” > “Médias” para eliminar os ruídos de origem eletromagnética que surgem especialmente em sinais de baixa intensidade.
- Para fazer medidas, utilize a função “Cursors”. Use os dois cursores para medir a amplitude da *fem* induzida e sua incerteza.



Figura 3. Montagem experimental utilizando uma caneta de quadro branco como suporte dos solenoides. O solenoide montado com cabo preto é o gerador de campo magnético. A variação do fluxo de campo magnético induz uma força eletromotriz no solenoide vermelho.

### Questão 1 (10 pontos)

Neste experimento, não vamos medir o campo magnético gerado pelo solenoide primário, mas podemos calcular a sua intensidade, bem como o seu fluxo, para se adquirir uma noção da magnitude desses valores sob as condições deste experimento. Assim, a partir das medidas do solenoide e considerando a resistência do conjunto solenoide + gerador de funções  $R = 100\Omega$ , determine, juntamente com suas incertezas:

- (a) o número de espiras por unidade de comprimento  $n$  do solenoide primário (2 pontos).

$n = ( \quad \pm \quad ) \text{ m}^{-1}$

- (b) a intensidade do campo magnético  $B$  no interior do solenoide para uma diferença de potencial de 1 volt no gerador de funções (4 pontos).

$B(1\text{Volt}) = ( \quad \pm \quad ) \text{ T}$

(c) o fluxo de campo magnético  $\Phi_B$  em seu interior para o campo gerado com a diferença de potencial de 1 volt aplicada no solenoide (4 pontos).

$$\Phi_B(1V) = ( \quad \pm \quad ) \text{T.m}^2$$

### Questão 2 (5 pontos)

Suponha que tenha ocorrido uma variação linear de 8 volts no potencial do solenoide primário em um intervalo de 2  $\mu\text{s}$ . Calcule o valor esperado (teórico) da força eletromotriz que seria induzida na espira do solenoide secundário (vermelho).

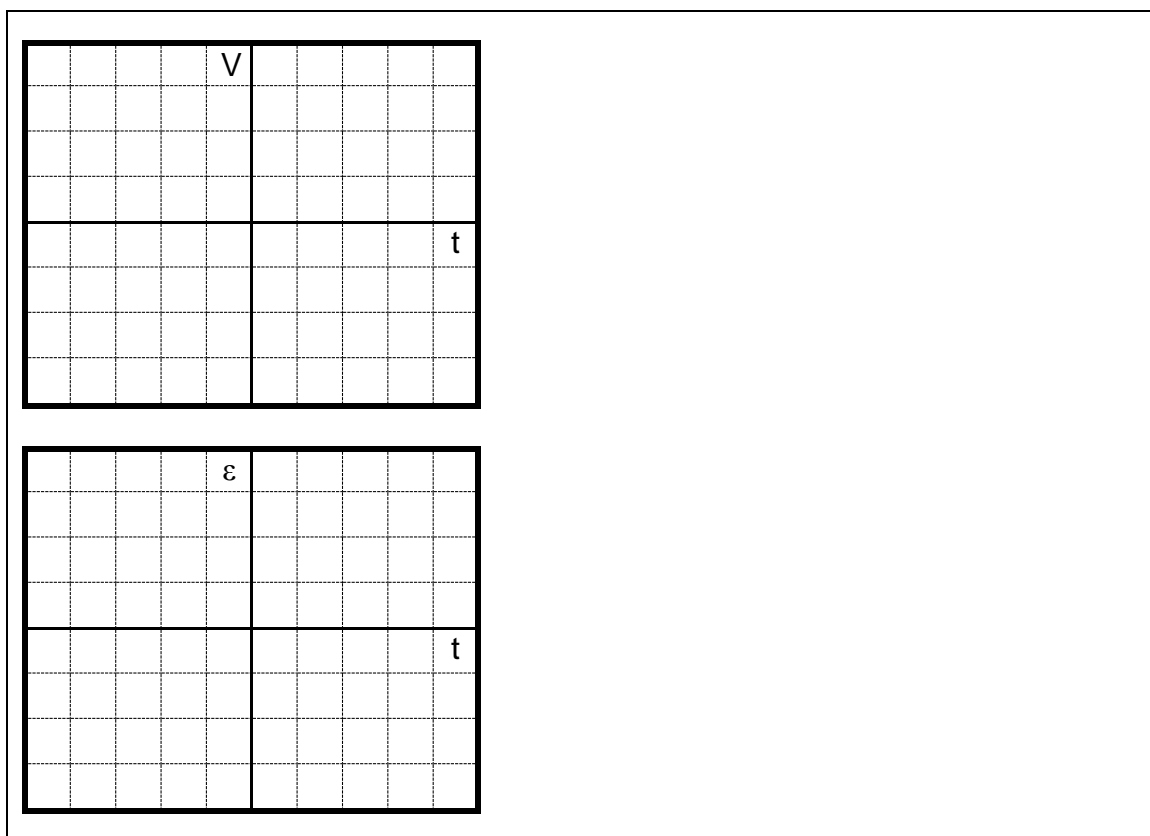
### ATIVIDADE 2

Análise da força eletromotriz  $\varepsilon$  induzida no solenoide secundário por um potencial periódico aplicado no solenoide primário que varia linearmente no tempo.

1. Selecione uma função de onda triangular no gerador de funções e fixe sua frequência em 250 kHz.
2. Ajuste a amplitude da onda triangular em 8 volts pico a pico.

### Questão 3 (5 pontos)

Observe o osciloscópio e esboce abaixo  $V(t)$  no primário, bem como o comportamento da *fem*  $\varepsilon(t)$  induzida na espira do solenoide secundário (vermelho). Compare seu resultado com o que seria esperado pela Lei de Faraday da Indução. Para isso, aplique as equações (3) e (6) a este caso específico.



### ATIVIDADE 3

**Análise da força eletromotriz  $\varepsilon$  induzida no solenoide secundário em função do número de voltas  $N_s$  de seu enrolamento.**

1. Selecione uma função de onda triangular no gerador de funções e fixe sua frequência.
2. Ajuste a amplitude da onda triangular em 8 volts pico a pico.
3. Varie o número de voltas do enrolamento do solenoide secundário (vermelho) e meça a amplitude pico a pico da força eletromotriz induzida  $\varepsilon$  para cada valor de  $N_s$ .

*Sugestão: fixe a frequência do potencial no primário em um valor alto (250 kHz) para que os sinais menos intensos possam ser medidos mais facilmente.*

**Questão 4 (30 pontos)**

Preencha a tabela a seguir (Tabela 1) e construa o gráfico da amplitude da *fem* induzida em função de  $N_s$  (Gráfico 1).

Tabela 1 (10 pontos): \_\_\_\_\_

$N_s$	<i>fem</i> PICO A PICO (V)	$\sigma_{fem}$ (V)
1		
2		
3		
4		
5		
6		

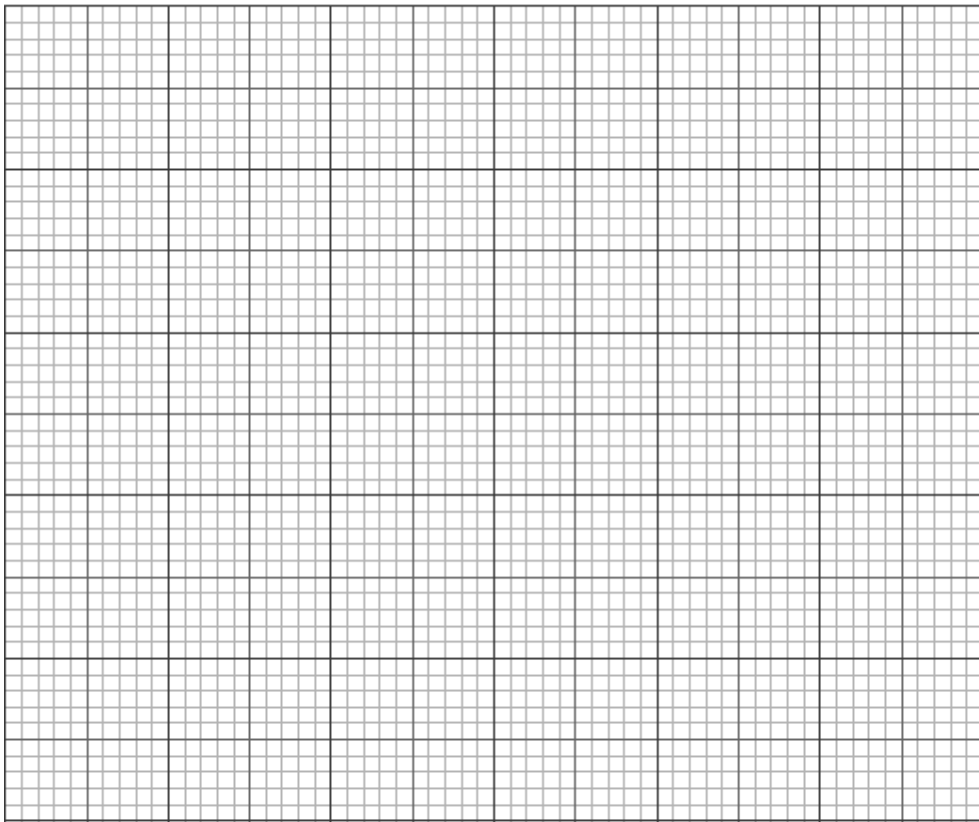


Gráfico 1 (20 pontos): \_\_\_\_\_



#### ATIVIDADE 4

Análise da força eletromotriz  $\varepsilon$  induzida no solenoide secundário em função da frequência de oscilação  $f$  do potencial aplicado no solenoide primário.

1. Selecione uma função de onda triangular no gerador de funções.
2. Ajuste a amplitude da onda triangular em 8 volts pico a pico.
3. Com o número de espiras do solenoide secundário (vermelho) constante, varie a frequência da onda triangular no primário e meça a amplitude pico a pico da  $fem$  induzida.

*Sugestão: use o maior número de espiras possível no secundário para que os sinais menos intensos possam ser medidos mais facilmente.*

#### Questão 5 (30 pontos)

Preencha a tabela abaixo (Tabela 2) e construa o gráfico da amplitude da  $fem$  induzida em função da frequência  $f$  (Gráfico 2).

Tabela 2 (10 pontos):

$f$ ( kHz)	$fem$ (V)	$\sigma_{fem}$ (V)
5		
10		
25		
50		
100		
200		

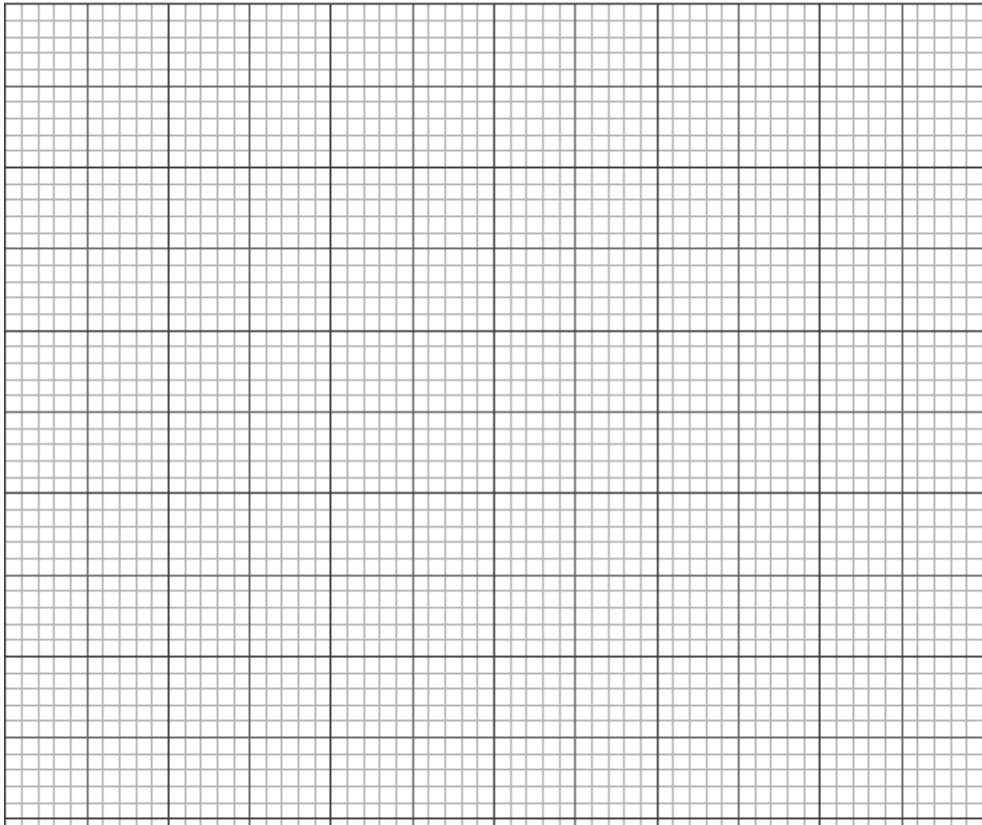


Gráfico 2 (20 pontos): \_\_\_\_\_

**Questão 6 (10 pontos)**

Explique o comportamento observado no gráfico 2 em termos da Lei de Faraday da Indução. Dica: utilize a equação (6) e a Lei de Faraday para mostrar a relação entre  $fem$  induzida e a frequência observada no gráfico. Lembre-se das definições de frequência e de derivada.

