



**FEUP**

**ELECTROMAGNETISMO**

**MIIEEC - EEC0012**

**2016/2017**

**Trabalhos de Laboratório**

**Luís Miguel Martelo**

**Departamento de Engenharia Física  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**



## **Introdução**

A unidade curricular de Electromagnetismo do MIEEC reveste-se de um penhor teórico relativamente elevado. Com estas experiências de laboratório, pretende-se motivar os estudantes, fazendo-se uma ligação entre a teoria electromagnética e os circuitos eléctricos. Nomeadamente, a dedução da Lei de Ohm a partir da teoria microscópica, bem como a determinação da capacidade de um condensador.





## Objectivo

Verificação experimental da Lei de Ohm.

## A Lei de Ohm

A Lei de Ohm foi publicada em 1827 por Georg Ohm (1789-1854). Quando a diferença de potencial  $\Delta V$  entre os terminais de um dispositivo eléctrico é proporcional à corrente eléctrica  $I$  que o percorre, o dispositivo obedece à Lei de Ohm e diz-se um dispositivo óhmico. A constante de proporcionalidade é a grandeza física designada por resistência eléctrica  $R$ , sendo a sua unidade SI o ohm ( $\Omega$ ). A Lei de Ohm traduz-se pela seguinte expressão,

$$\Delta V = RI \quad (1)$$

A resistência eléctrica  $R$  de um dispositivo óhmico é uma característica do mesmo, sendo independente da intensidade da corrente que o percorre e da diferença de potencial a que está sujeito, e obviamente de este estar ligado ou desligado. Assim, afirma-se que um dado dispositivo óhmico possui uma resistência eléctrica, e.g., de  $R = 100 \Omega$ . Quando um dispositivo eléctrico não obedece à Lei de Ohm diz-se um dispositivo não-óhmico (exemplos: lâmpadas de filamento, díodos, LEDs, LDRs, termistores, etc.).

## Montagem experimental

Material (ver Fig. 1):

- Fonte de tensão contínua (ajustável);
- Resistências eléctricas;
- Multímetro (para funcionar como voltímetro);
- Multímetro (para funcionar como amperímetro);
- Placa de teste (ou *breadboard*);
- Cabos de ligação.

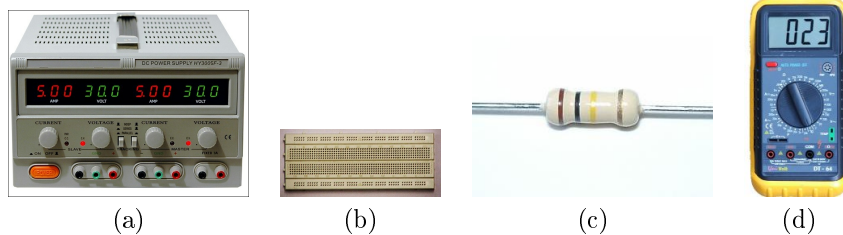


Figura 1: (a) Fonte de tensão contínua ajustável; (b) Placa de teste (ou *breadboard*), (c) Resistência eléctrica, (d) Multímetro.

Neste trabalho, usaremos resistências eléctricas conforme as da Fig. 1(c). O valor da resistência eléctrica indicado pelo fabricante é dado por um código de cores (ver Fig. 2).

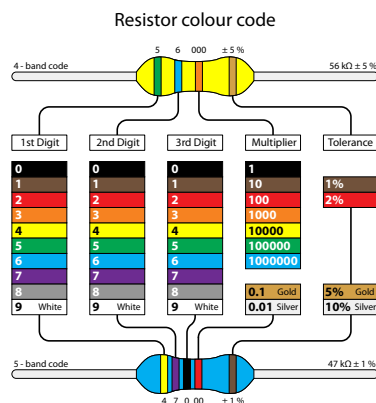
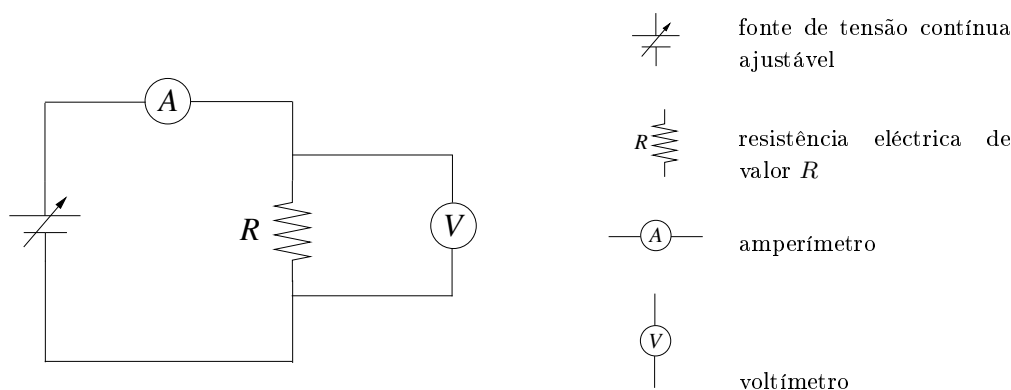


Figura 2: Código de cores para resistências eléctricas. Imagem obtida do site [www.imajeenyus.com](http://www.imajeenyus.com).

Procedimento experimental:

1. Certifique-se que a fonte de alimentação se encontra desligada.
2. Desligue todos os fios de ligação e organize todo o material existente na mesa de trabalho de modo a poder usá-lo correctamente.
3. Seleccione uma resistência eléctrica (na gama de 100 Ω a 10 kΩ) e registre o seu valor usando o código de cores.
4. Monte o seguinte circuito:



O amperímetro mede correntes eléctricas e deve ser ligado em *série* com a resistência eléctrica. A sua resistência interna deveria idealmente ser nula, de modo a não possuir uma diferença de potencial entre os seus terminais (na realidade aquela é muito baixa, tipicamente da ordem de 1 Ω). Deve-se prestar especial atenção à ligação em série do amperímetro, pois caso contrário pode-se danificá-lo. O voltmímetro mede diferenças de potencial e deve ser ligado em *paralelo* com a resistência eléctrica. A sua resistência interna deveria idealmente ser infinita, de modo a não ser percorrido por uma corrente eléctrica entre os seus terminais (na realidade aquela é muito elevada, tipicamente da ordem de  $10^7$  Ω).

5. Usando o ajuste da fonte de tensão seleccione vários valores da tensão da fonte  $V_{\text{fonte}}$  na gama de 0 a cerca de 10 V. Para cada valor da fonte de tensão registre os valores de  $V_{\text{fonte}}$ , da diferença de potencial  $\Delta V$  e da corrente eléctrica  $I$  lidos nos multímetros numa tabela e calcule  $R = \Delta V / I$  comparando a cada passo com o valor de  $R$  indicado pelo fabricante. Indique sempre as unidades SI de cada grandeza.
6. Faça um gráfico de  $\Delta V$  em função de  $I$  usando os valores registados. Verifique a dependência linear de  $\Delta V$  em função de  $I$ , i.e., a Lei de Ohm. Através do declive da recta obtém-se o valor da resistência eléctrica  $R$ .

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Departamento de Engenharia Física



FEUP

Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
Electromagnetismo - EEC0012

Trabalho Laboratorial - Lei de Ohm  
Luís Miguel Martelo

Folha de registos e discussão de resultados (versão 22.7.2016)

Turma: \_\_\_\_\_ Grupo: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_\_

Nome: \_\_\_\_\_

Nome: \_\_\_\_\_

Nome: \_\_\_\_\_

## Resultados das medições

Nota: Indique sempre as unidades SI de cada grandeza.

Valor da resistência eléctrica e respectiva tolerância indicados pelo fabricante:  $R =$  \_\_\_\_\_

$V_{\text{fonte}}$ ( )	$\Delta V$ ( )	$I$ ( )	$R = \Delta V/I$ ( )

Tabela 1: Tabela de registos

$V_{\text{fonte}}$ ( )	$\Delta V$ ( )	$I$ ( )	$R = \Delta V/I$ ( )

Tabela 2: Tabela de registos (continuação)

Faça o gráfico de  $\Delta V$  em função de  $I$  usando os valores registados na Tabela de registo usando a Fig. 1. Indique as grandezas físicas representadas em cada eixo bem como as suas unidades SI.

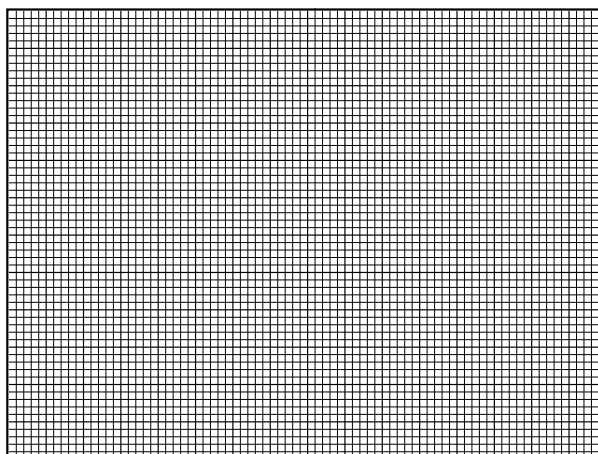


Figura 1: Gráfico

Obtenha e trace a recta que melhor se ajusta aos pontos experimentais por regressão linear usando o método dos mínimos quadrados para obter o declive da recta, a sua ordenada na origem e o seu coeficiente de correlação:

Declive da recta:  $m =$  \_\_\_\_\_

Ordenada na origem:  $b =$  \_\_\_\_\_

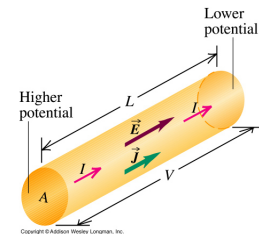
Coefficiente de correlação:  $r =$  \_\_\_\_\_

Valor obtido experimentalmente da resistência eléctrica usada:

$R =$  \_\_\_\_\_

## Questões

1. Verificou-se a dependência linear de  $\Delta V$  em função de  $I$ , i.e., a Lei de Ohm? Comente.
2. Na montagem usada qual das suas grandezas  $\Delta V$  e  $I$  é correctamente medida (a menos da precisão do aparelho, e de outros erros experimentais)? A outra grandeza é subestimada ou sobestimada? De modo a inverter a situação, poder-se-ia ter efectuado outra montagem semelhante. Qual? Justifique as suas respostas.
3. Compare o valor de  $R$  indicado pelo fabricante com o valor obtido na experiência. Comente.
4. Comente o valor da ordenada na origem.
5. A teoria clássica do campo electromagnético afirma que para meios lineares, isotrópicos e homogéneos (LIH) a densidade de corrente eléctrica  $\vec{J}$  ( $A/m^2$ ) num dado ponto desse meio é proporcional ao campo eléctrico  $\vec{E}$  nesse ponto:  $\vec{J} = \sigma_e \vec{E}$ , onde  $\sigma_e$  é a condutividade eléctrica do material (uma constante característica do meio LIH em causa). A expressão anterior é por vezes conhecida como a Lei de Ohm microscópica.  
 Considere um conductor cilíndrico com secção recta  $A$  e comprimento  $L$ , feito de um material linear, isotrópico e homogéneo de condutividade eléctrica  $\sigma_e$  sujeito a uma diferença de potencial  $V$  e percorrido por uma corrente eléctrica  $I$  (ver figura ao lado). Admita que o campo eléctrico  $\vec{E}$  dentro do conductor é uniforme. Partindo da expressão da Lei de Ohm microscópica obtenha a Lei de Ohm  $V = RI$  e a expressão da resistência eléctrica  $R$ , a qual só pode depender de características do conductor.





---

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Departamento de Engenharia Física



Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
Electromagnetismo - EEC0012

Trabalho Laboratorial - Determinação da Capacidade de um Condensador  
Luís Miguel Martelo  
Guião (versão 22.7.2016)

---

## Objectivo

Determinação experimental da capacidade eléctrica de um condensador.

## Introdução aos condensadores

Um condensador é essencialmente um dispositivo feito de duas placas condutoras, separadas por um meio dieléctrico (isolador), as quais encontrando-se a uma diferença de potencial  $\Delta V$  armazenam carga eléctrica  $Q$  igual em módulo, mas de sinais contrários. O valor absoluto da carga armazenada em cada placa num condensador é proporcional à diferença de potencial entre os seus terminais. A constante de proporcionalidade é a grandeza física designada por capacidade eléctrica  $C$ , sendo a sua unidade SI o farad (F). Assim,

$$Q = C\Delta V \quad (1)$$

Um condensador serve (entre muitas outras coisas) para armazenar carga eléctrica nas suas placas. A capacidade eléctrica  $C$  de um condensador é uma característica do mesmo, sendo independente da carga eléctrica nele armazenada e da diferença de potencial a que está sujeito. Assim, afirma-se que um dado condensador possui uma capacidade eléctrica, e.g., de  $C = 10 \mu\text{F}$ .

## Montagem experimental

Material (ver Fig. 1):

- Gerador de sinais;
- Osciloscópio de 2 canais;
- Condensador;
- Resistência;
- Pontas de prova;
- Cabos de ligação.

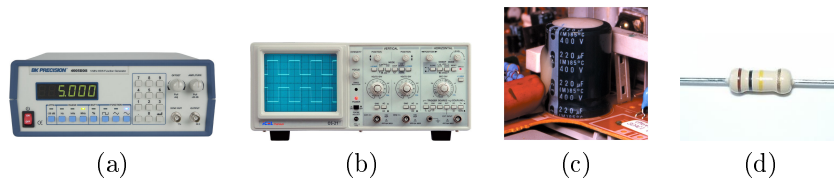


Figura 1: (a) Gerador de sinais; (b) Osciloscópio; (c) Condensador; (d) Resistência eléctrica.

Procedimento experimental:

O que vamos fazer é produzir sequências de carga-descarga do condensador usando um gerador de sinais produzindo um sinal quadrado entre 0 V (condensador a descarregar) e uma tensão não-nula constante (condensador a carregar). O sinal de tensão produzido pelo gerador em função do tempo  $V_S(t)$  e a diferença de potencial nos terminais do condensador em função do tempo  $V_C(t)$  estão ilustrados na Figura 2.

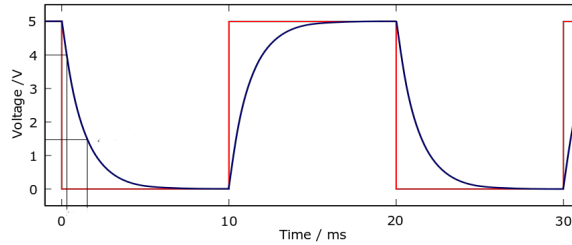


Figura 2: Sinal de tensão quadrado produzido pelo gerador em função do tempo  $V_S(t)$  (linha a vermelho) e diferença de potencial nos terminais do condensador em função do tempo  $V_C(t)$  (linha a azul).

1. Certifique-se que o gerador de sinais se encontra inicialmente desligado. Desligue todos os fios de ligação e organize todo o material existente na mesa de trabalho de modo a poder usá-lo correctamente.
2. Implemente o circuito da Fig. 3, usando um condensador com capacidade da ordem de  $C \sim 1 \mu\text{F}$  e uma resistência com resistência eléctrica da ordem de  $R \sim 1 \text{ k}\Omega$ , e ligando o gerador de sinais  $S$  ao canal 1 (CH1) do osciloscópio e os terminais da resistência ao canal 2 (CH2). Tenha em atenção que as pontas de prova que se ligam ao osciloscópio devem ter o mesmo ponto de terra. Ajuste o gerador de sinais para sinais quadrados, simétricos, entre  $V_S = 0$  e  $V_S = 10 \text{ V}$  (use a função OFFSET), a cerca de 40 Hz.

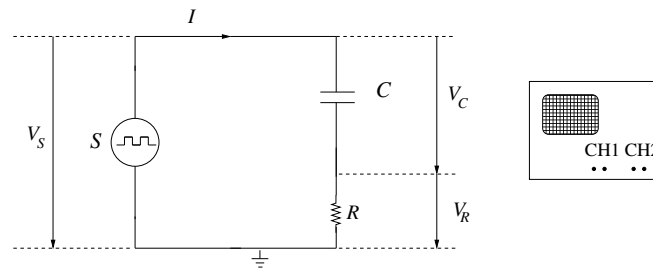


Figura 3:

3. Regule o osciloscópio, de modo a visualizar bem no canal 1 (CH1) do osciloscópio o sinal (diferença de potencial) do gerador,  $V_S(t) \equiv V_{CH1}(t)$ , e no canal 2 (CH2) o sinal (diferença de potencial) na resistência,  $V_R(t) \equiv V_{CH2}(t)$ .
4. Ajuste uma curva de "descarga"  $V_R(t)$  de modo ao seu zero coincidir com o zero do sinal do gerador. Este passo deve ser feito com especial cuidado. Certifique-se também que na descarga o condensador descarregou totalmente, i.e.,  $V_R = V_{S,máx}$  e que na carga carregou totalmente, i.e.,  $V_R = 0$ .
5. A diferença de potencial no condensador após a sua carga total é igual à tensão máxima  $V_{R,máx}$ . Registe o seu valor.
6. Faça uma tabela com as entradas  $t$ ,  $V_R(t)$  e  $I(t)$  as quais correspondem ao tempo (lido no osciloscópio), à diferença de potencial na resistência em função do tempo e à corrente no condensador calculada através da Lei de Ohm:  $I(t) = V_R(t)/R$ . Usando os cursores do osciloscópio, meça as coordenadas  $(t, V_R)$  de uns 40 pontos sobre toda uma curva de descarga.
7. A carga  $\Delta Q$  ganha ou perdida pelo condensador num intervalo de tempo  $t = t_1$  até um tempo  $t = t_2$  é dada por  $\Delta Q = \int_{t_1}^{t_2} I(t)dt$  onde  $I(t)$  é a corrente que percorreu o condensador. Faça o gráfico da corrente  $I(t)$  em função do tempo  $t$ . Como  $V_R(t)$  foi medido em toda a curva de descarga o integral de  $I(t)$  dá-nos a carga total  $Q_{total}$  armazenada no condensador. Utilize um método numérico à sua escolha para obter este valor <sup>1</sup>.
8. Determine a capacidade do condensador usando a Eq. (1):

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \equiv \frac{Q_{total}}{V_{R,máx}} \quad (2)$$

<sup>1</sup>Por exemplo, pode usar a regra trapezoidal: num domínio discreto de  $N$  pontos  $x_i$  uniformemente espaçados  $a = x_1 < x_2 < \dots < x_N = b$ , o espaçamento entre os pontos  $x_i$  é dado por  $\Delta x = \frac{(b-a)}{N-1}$  e a aproximação do integral é dada por

$$\int_a^b f(x)dx \approx \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{2} (f(x_{i+1}) + f(x_i)) \Delta x$$

onde  $f(x_i)$  são os valores conhecidos de  $f(x)$  nos pontos  $x_i$ .



Faça o gráfico da corrente  $I(t)$  em função do tempo  $t$  usando os valores registados na tabela anterior usando a Fig. 1. Indique as grandezas físicas representadas em cada eixo bem como as suas unidades SI.

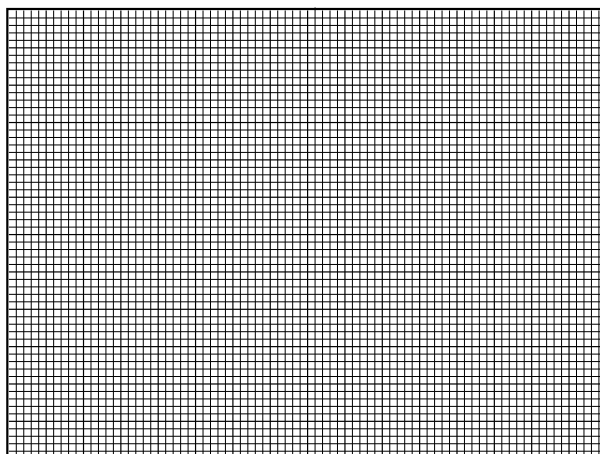


Figura 1: Gráfico

Obtenha a carga total  $Q_{total}$  armazenada no condensador, integrando a corrente  $I(t)$  no tempo  $t$  usando um método numérico à sua escolha (por exemplo, o método sugerido no guião da experiência). Descreva sucintamente o método usado.

$$Q_{total} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Determine, justificando devidamente, o valor obtido experimentalmente da capacidade eléctrica do condensador usado:

$$C = \underline{\hspace{2cm}}$$

## Questões

1. Compare o valor de  $C$  indicado pelo fabricante com o valor obtido na experiência. Comente.
2. Um condensador plano é constituído por duas placas planas paralelas condutoras de área  $A$  separadas por uma distância  $d$  e existindo entre elas um meio dieléctrico (ver figura).

Considere o meio dieléctrico como sendo linear, isotrópico e homogéneo (LIH), caracterizado portanto por uma permitividade eléctrica  $\epsilon$  constante. Partindo da definição da capacidade eléctrica apresentada no guião da experiência, obtenha a expressão da capacidade eléctrica  $C$  deste condensador, a qual só pode depender de características do condensador.

