

Trabalho 5: Lei de Ohm e Multímetro

Introdução à Física Experimental - 2019/20

Cursos: Engenharia Física e Física

Departamento de Física - Universidade do Minho

Este trabalho laboratorial tem por objectivo fornecer evidência experimental para a Lei de Ohm e para o efeito Joule. Pretende-se que os alunos sejam confrontados com a medida de grandezas físicas como Intensidade de Corrente Elétrica, Diferença de Potencial e Resistência Elétrica. Introduce-se o multímetro como aparelho de medida de grandezas elétricas em circuitos de corrente contínua, a fonte de tensão e seu uso em segurança. Faz-se uso do código de cores de resistências. Finalmente, é dada grande ênfase aos cuidados a ter num laboratório de eletricidade e às medidas de segurança que devem ser adoptadas tendo em vista evitar acidentes pessoais e a danificação do equipamento.

Leituras

Ao longo deste guia far-se-à referência a alguns textos das seguintes referências:

- Ref. [1], capítulo 27
- Ref. [2], Leitura e Apêndices 2 e 3.

Objectivo deste trabalho laboratorial:

- verificar experimentalmente a Lei de Ohm
- medir o valor ohmico de uma resistência de carbono
- estudar a dependência da resistividade de um metal com a temperatura

Registo de resultados

No final deste trabalho laboratorial, os alunos deverão ter registado os seguintes dados:

- 1 série de 10 resultados $\{I, V\}$ para a lei de Ohm com resistência, usando o amperímetro dentro do circuito do voltímetro.
- 1 série de 10 resultados $\{I, V\}$ para a lei de Ohm com resistência, usando o amperímetro fora do circuito do voltímetro.
- 1 série de 10 resultados $\{I, V\}$ para a lei de Ohm/efeito Joule com uma lâmpada incandescente.

I. INTRODUÇÃO

A. Diferença de Potencial Eléctrico

Sabemos da mecânica que a variação de energia potencial é igual ao trabalho necessário para deslocar, sem atrito, um objecto de uma posição para outra, num campo gravitacional. De modo análogo, a energia potencial eléctrica varia quando se realiza trabalho para deslocar uma carga eléctrica de um ponto para outro num campo eléctrico.

Define-se *diferença de potencial eléctrico* (ddp) como a variação de energia potencial eléctrica entre dois pontos por unidade de carga. A unidade do *sistema internacional* (S.I.) para ddp é, assim, o Joule/Coulomb¹ [J/C]. Dada a sua importância na Física, assim como no nosso dia-a-dia, esta unidade tem um nome específico, o volt [V].

Tal como no caso do campo gravitacional, também num campo eléctrico a ddp entre dois pontos não depende do caminho percorrido mas apenas da localização relativa desses pontos². Assim, no caso de termos um campo eléctrico constante E , a ddp entre dois pontos distanciados de uma distância d , será igual a³ $V = Ed$. A ddp é também usualmente designada por *tensão eléctrica* e representada pela letra V ⁴.

B. Corrente eléctrica

A aceleração de um feixe de electrões (no vácuo) numa região onde existe um campo eléctrico uniforme é o exemplo mais simples do efeito de um campo eléctrico sobre uma partícula carregada. Neste caso, os electrões

¹ Aqui, Joule [J] é a unidade S.I. de trabalho/energia e Coulomb [C] a unidade S.I. de carga eléctrica.

² A energia potencial de um grave à altura h é, na aproximação do campo gravitacional constante, igual a mgh . Esta quantidade não depende da forma como o grave percorreu o trajecto entre o chão (supostamente a energia potencial nula) e a sua posição final, com uma altura h : depende apenas de h , a distância entre

o ponto de partida e o ponto de chegada. Neste tipo de situações, dizemos estar perante um campo conservativo.

³ Esta expressão é usada para definir a unidade S.I. para campo eléctrico: o volt por metro [V/m].

⁴ É também frequente o uso da letra U para referir d.d.p., especialmente nas áreas da engenharia.

descrevem um movimento uniformemente acelerado⁵. Um outro exemplo comum é a passagem de corrente eléctrica num fio metálico quando se ligam as extremidades deste aos terminais de uma *fonte de tensão*, como por exemplo uma pilha⁶: a tensão aos terminais da pilha diz-nos qual é o valor da energia disponível por unidade de carga, quando estas se deslocam num circuito exterior como, por exemplo, o fio condutor. Por outro lado, um condutor apresenta, sempre, uma oposição à passagem da corrente eléctrica: o movimento ordenado dos eletrões em aceleração constante que se observa acontecer no vazio é substituído, num condutor real, pelo movimento em zigzag dos eletrões entre sucessivas colisões com os átomos do condutor. Ainda assim, e entre as muitas colisões pelo caminho, os eletrões vão progredindo na direcção de maior potencial eléctrico. A quantidade de carga positiva⁷ que passa por unidade de tempo numa secção recta do condutor, a que se dá o nome de intensidade de corrente eléctrica, referida habitualmente por I (que tem em conta o valor médio da progressão dos vários eletrões), é igual a (Serway: §27.1)

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} \quad (1)$$

Em unidades S.I., a corrente eléctrica tem dimensão de coulomb/segundo. Tal como para a ddp, também a intensidade de corrente eléctrica *merece* ter uma unidade própria: o ampère [A]⁸. Assim, 1 A é a corrente eléctrica que corresponde à passagem de um Coulomb de carga num intervalo de tempo de um segundo: note que a corrente de 1 A corresponde à situação física de termos cerca de 6×10^{18} eletrões a passar no condutor por segundo!

⁵ Sabemos da lei de Coulomb que a força eléctrica aplicada a uma partícula de carga q num campo eléctrico uniforme E é igual a $F = qE$. Assim, se a massa da partícula for m , a aceleração devido ao campo eléctrico é constante e igual a eE/q .

⁶ Na gíria eletrotécnica, ligar um fio condutor entre os terminais de uma fonte chama-se fazer um *curto-circuito* pois, normalmente, a resistência eléctrica de um condutor é muito pequena, dando origem a correntes eléctricas muito elevadas. No mundo real, assim como no laboratório, **deve-se evitar sempre esta situação**.

⁷ Aqui vale a pena chamar a atenção de que o *sentido convencional* da corrente eléctrica, do maior para o menor potencial, é o sentido contrário ao do movimento de progressão dos eletrões que são, de facto, os responsáveis pela condução eléctrica nos materiais condutores mais comuns. Diz-se habitualmente que este sentido, o dos eletrões, é o *sentido real* da corrente eléctrica (ver §27.1 do Serway).

⁸ Na realidade é o Ampère que é uma unidade básica do sistema S.I. e define o Coulomb. Um ampère é definido como a corrente

C. Resistência eléctrica e Lei de Ohm

Ao contrário do caso do movimento dos eletrões no vazio e num campo eléctrico uniforme, que é caracterizado por ser um movimento com uma aceleração constante, na maioria dos condutores, os eletrões, se sujeitos também a um campo eléctrico uniforme, progridem a uma *velocidade média* constante, a *velocidade de deriva* (em inglês, *drift speed*)⁹. Sendo esta velocidade constante, também o é a corrente eléctrica I . Como a velocidade de deriva é proporcional à ddp aplicada entre as extremidades do condutor, então temos que I é directamente proporcional a V . Ou seja, (Serway: §27.2; *Física Experimental: Lei de Ohm* na Leitura 4)

$$V = RI \quad (2)$$

onde R , a constante de proporcionalidade, é a *resistência eléctrica* do condutor, independente da tensão aplicada¹⁰. À expressão da Eq.2 dá-se o nome de lei de Ohm. A unidade S.I. de resistência eléctrica é o ohm e é representada pela letra grega Ω . Assim, se se aplicar uma d.d.p. de 1 V aos terminais de um condutor com uma resistência eléctrica de 1 Ω , teremos uma corrente eléctrica de 1 A a percorrer esse condutor.

No contexto do estudo da dinâmica de fluidos a lei de Poiseuille assemelha-se bastante à lei de Ohm, relacionando a *intensidade de fluxo*, ou caudal, de um fluido através de um tubo, em [m³/s], com a diferença de pressão entre as extremidades do tubo e a *resistência* oferecida por esse à passagem do fluido. Esta semelhança dá origem à analogia hidráulica de circuitos eléctricos.

A resistência eléctrica de um condutor depende não só do material de que é feito como também das suas características geométricas, tais como o seu comprimento e a sua secção recta: de facto, quanto **mais comprido e mais fino for o condutor, maior será a sua resistência** (Serway: §27.2). Se quisermos separar a influência da geometria do condutor da do material de que é feito, é necessário introduzir a noção de

necessária para produzir uma força atractiva, de origem magnética, de 2×10^{-7} newton por metro, de comprimento entre dois condutores infinitos e de secção transversal desprezável, dispostos paralelamente a 1 metro de distância entre si (ver 'http://en.wikipedia.org/wiki/International_System_of_Units' para uma revisão sobre as unidades base do sistema S.I.)

⁹ A velocidade de deriva num condutor de cobre, por exemplo, é de apenas 200 $\mu\text{m/s}$ (ver Exemplo 27.1 do Serway). Esta velocidade contrasta fortemente com a velocidade de transmissão de informação num cabo de cobre que se aproxima da velocidade da luz no vazio, i.e. $\approx 3 \times 10^8$ m/s. Este aparente paradoxo é facilmente resolvido se não se confundir a velocidade com que as cargas progridem no condutor com a velocidade de propagação do campo eléctrico nesse mesmo condutor. (Ver §27.3 do Serway sobre o *modelo de Drude* para a condução eléctrica.)

¹⁰ Esta é a definição de *material ohmico*: um material com uma resistência eléctrica que não depende da ddp aplicada aos seus terminais.

resistividade. Esta grandeza é usualmente representada pela letra grega ρ , e relaciona-se com a resistência R pela expressão

$$R = \rho l/A \quad (3)$$

onde l e A são o comprimento e a secção transversal do condutor, respectivamente. A unidade S.I. da resistividade é o ohm-metro [Ωm].

Uma característica importante de ρ é que varia fortemente com a temperatura. Nos metais, por exemplo, ρ normalmente aumenta com o aumento da temperatura¹¹, seguindo de forma aproximada uma lei de proporcionalidade linear com a temperatura dada por (Serway: §27.4)

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (4)$$

Neste última expressão, T_0 é uma temperatura de referência (normalmente igual a 20°C) e α é o coeficiente (linear) térmico da resistividade.

Na última parte do trabalho verificaremos qualitativamente a variação da resistência de um filamento de tungsténio com a temperatura. Para o fazer, registaremos a dependência de I para vários valores de ddp aplicada aos terminais de uma lâmpada incandescente. Um comportamento muito diferente do da lâmpada acontece nas vulgares resistências usadas em circuitos eletrónicos¹² que são fabricadas com o propósito específico de ter um valor ohmico que varie muito pouco com a temperatura: disso depende o bom funcionamento dos circuitos eletrónicos! Na primeira parte do trabalho prático faremos uso de um destes componentes para verificar experimentalmente a lei de Ohm.

D. Potência elétrica

Quando ligamos uma lâmpada incandescente, observamos que esta, além de emitir luz também aquece bastante. Mas porque aquece a lâmpada?

Ao se deslocarem no condutor, os eletrões são sujeitos a uma espécie de força *efectiva* de atrito, fruto do elevado número de colisões com a rede cristalina¹³. Durante uma colisão, parte da energia cinética do eletrão é transferida para a rede, sendo posteriormente dissipada para fora do condutor, ou seja, parte do trabalho realizado pelo campo sobre a carga é

transformada em energia térmica. No caso da lâmpada, o filamento aquece, ficando incandescente e irradiando energia (e apenas uma pequena parte desta sob a forma de luz visível). A este fenómeno dá-se o nome de **efeito Joule**.

A ddp (ou tensão) V é, como vimos, igual à quantidade de trabalho realizado por unidade de carga e a corrente I é a quantidade de carga que passa no condutor por unidade de tempo. A análise dimensional simples mostra que

$$[J/C] [C/s] = [J/s],$$

ou seja, que VI tem dimensão física de potência i.e., *trabalho por unidade de tempo*. Pode-se demonstrar de forma rigorosa que, de facto, a potência eléctrica dissipada por um condutor é igual a (Serway: §27.6)

$$P = VI = RI^2 = V^2/R \quad (5)$$

A unidade S.I. para potência é o watt [W].

E. Ordem de grandeza da corrente eléctrica e cuidados a ter no laboratório.

É sempre importante ter uma ideia, mesmo que apenas aproximada, sobre a magnitude das grandezas físicas envolvidas numa experiência. Este trabalho laboratorial não é excepção a esta regra, bem pelo contrário. A corrente eléctrica de 1 A é, na maior parte dos casos, considerada uma corrente elevada: por exemplo, nos equipamentos eletrónicos que usamos no nosso dia a dia a corrente eléctrica que percorre os seus componentes (resistências, díodos, transístores, etc) é em geral muito inferior a 1 A. Nestes casos é usual usarem-se sub-múltiplos do ampère¹⁴ como o mili-ampère [mA], igual a 10^{-3} A ou mesmo o micro-Ampère [μA], igual a 10^{-6} A. Neste trabalho, assim como nos que se seguem, a corrente eléctrica será sempre, no máximo, de algumas centenas de mA. **Ter sempre em atenção que não se deve aumentar I muito além desta ordem de grandeza evitando portanto acidentes pessoais e a danificação de equipamento do laboratório**, em especial o amperímetro (ver Apêndice A).

O valor típico da ddp usado em circuitos eletrónicos é à volta de 10 V. Assim, contrariamente ao caso da corrente, não é necessário fazer uso de sub-múltiplos para a ddp, sendo *confortável* utilizar o volt como unidade. Da lei de Ohm, vemos que para intensidades de correntes eléctricas e ddp de, respetivamente,

¹¹ Isto pode ser entendido como um aumento do número de colisões, por unidade de tempo, dos eletrões com os átomos da rede cristalina do metal. Com o aumento da temperatura, dá-se um aumento da agitação térmica da rede cristalina, aumentando com isso o número de colisões por segundo. Quanto maior for esta taxa de colisões menor é a velocidade de deriva dos eletrões e, logo, menor é o valor de I . Finalmente, e de acordo com a lei de Ohm, isto corresponde a um aumento do valor da resistência R .

¹² Note que aqui o termo 'resistência' é usado para designar um componente usado em eletrónica. Esta dupla utilização da

palavra *resistência* pode, por vezes, levar ao uso de uma linguagem confusa. Assim, é preferível dizer, p. ex., 'o valor ohmico desta resistência (o componente) é $10\ \Omega$ ' em vez de 'a resistência (grandeza física) desta resistência (o componente) é $10\ \Omega$ '.

¹³ O tempo médio entre duas colisões, por exemplo no cobre à temperatura ambiente, é de apenas 2.5×10^{-14} s! (Ver Exemplo 27.5 do Serway).

¹⁴ Ver também a Tabela 1.4 do Serway, para uma enumeração de todos os múltiplos e sub-múltiplos usados como prefixo das unidades S.I.

centenas de mA e alguns volt, a resistência eléctrica deverá ser da ordem de grandeza de dezenas de Ω ou de alguns kilo-ohm [$k\Omega$] (este último igual a $10^3 \Omega$). O uso de resistências muito superiores a $10 k\Omega$ dá origem a correntes eléctricas muito fracas e difíceis de medir (da ordem de μA); usar resistências de alguns Ω ou inferiores resultará, se for de forma inadvertida, em acidente! Um bom conselho é

Estimar sempre a magnitude das várias grandezas físicas envolvidas antes de ligar a fonte de tensão!

II. GUIA PARA O TRABALHO LABORATORIAL

A. Material necessário

O equipamento necessário para este trabalho laboratorial é o listado a seguir:

- uma resistência desconhecida
- uma fonte de tensão contínua
- dois multímetros
- placa de furos
- fios de ligação com banana (5 unifilares e 5 multifilares)
- módulo com lâmpada

Uma descrição breve sobre estes equipamentos é dada nos Apêndices deste guia. Informação mais detalhada pode (e deve!) ser encontrada nos Apêndices 2 e 3 do livro *Física Experimental*[2].

B. Procedimento Experimental

Consulte o professor após efectuadas as várias etapas propostas para este trabalho. Desligue sempre a fonte de tensão antes de desmontar um circuito. Sempre que tiver dúvidas sobre o bom funcionamento do circuito que montou, consulte o professor antes de ligar a fonte. Se precisar de ligar ou desligar a fonte, reduza primeiro até zero a tensão aos seus terminais. Quando ligar a fonte pela primeira vez, certifique-se que esta tem a regulação de tensão e de controle de corrente no mínimo. Depois, aumente gradualmente a tensão até ao valor máximo que se pretenda (neste trabalho, $\approx 12 V$), rectificando sempre que seja necessário, atuando no controle de limite de corrente a fim de manter a fonte em controlo de tensão. Note que este procedimento só funciona se a fonte puder debitar alguma corrente, ou seja, deverá ter uma carga (uma resistência) aos seus terminais.

Evite aumentar em demasia o limite de corrente, mantendo sempre no mínimo indispensável ao bom funcionamento do circuito: evitará prejuízos maiores caso aconteça um curto-circuito.

Registe convenientemente todas as observações experimentais, valores medidos e cálculos efectuados. Antes de começar o trabalho, verifique com o ohmímetro ou o “buzzer” se todos os fios a utilizar se encontram em bom estado e fazem bom contacto.

1. PARTE 1

Nesta primeira parte do trabalho pretende-se verificar experimentalmente a lei de Ohm, usando uma resistência de carbono. A questão à qual queremos responder é: qual é o valor ohmico da resistência e qual a melhor forma de a medir?

Experiência 1

1. Comece por medir o valor ohmico da resistência que vai usar, assim como o das resistências internas do voltímetro e do amperímetro. Não se esqueça de estimar sempre a incerteza das medidas.
2. Confirme o valor ohmico da resistência, lendo o seu código de cores: compare o valor medido usando o ohmímetro com o do código de cores, tendo em atenção tanto o erro de medida devido a precisão finita do aparelho de medida como a tolerância do valor da resistência (também dado pelo código de cores).
3. Faça uma estimativa rápida de qual é a corrente máxima que vai medir, sabendo que $V_{max} \approx 12 V$. Escolha, de acordo com a sua estimativa, a escala do amperímetro apropriada.
4. Monte o circuito da Figura 1-a).
5. Ligue a fonte de tensão, certificando-se primeiro de que o controle de corrente está no mínimo. Após ligada a fonte, aumente lentamente o controle de tensão e de corrente até atingir o valor máximo de tensão desejado.
6. Faça variar a tensão eléctrica da fonte desde 0 V até 12 V e meça o correspondente valor da intensidade de corrente e da ddp usando dois multímetros. Registe um conjunto de 10 pares $\{I \text{ vs } V\}$. Não se esqueça de ir estimando a incerteza de cada um dos valores registados

Experiência 2

- Depois de reduzir os controles de tensão e corrente da fonte, desmonte o circuito e monte o circuito mostrado na Figura 1 b). Repita todos os procedimentos anteriores.

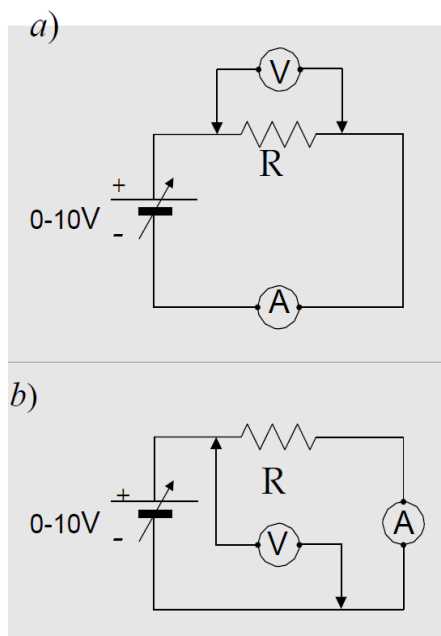


Figura 1 - Os dois circuitos a serem montados na 1ª parte do trabalho laboratorial.

2. PARTE 2

Nesta parte do trabalho, procuraremos estudar qualitativamente a dependência da resistência do filamento de uma lâmpada com a temperatura. O aumento da temperatura do filamento acontecerá devido à passagem de corrente elétrica, proporcional à ddp aplicada à lâmpada. O valor ôhmico do filamento será calculado, para cada ddp aplicada, usando a lei de Ohm.

Experiência 3

- Comece por medir o valor ôhmico da lâmpada a frio, i.e. à temperatura ambiente.
- Tendo em atenção as normas de segurança descritas para as Experiências 1 e 2, monte o circuito da Figura 1.a), substituindo a resistência pela lâmpada. Use o módulo da lâmpada e os fios multifilares para montar o circuito.
- Repita os procedimentos descritos na primeira parte do trabalho, registrando a tensão e a corrente aos terminais da lâmpada.

Apêndice A: O multímetro.

O multímetro é um aparelho de medida que, tal como o seu nome indica, é usado para medir várias grandezas elétricas (*Física Experimental: Apêndice 2*). Dependendo da função do multímetro seleccionada, este aparelho pode ser usado (entre outras funções não especificadas aqui) como

- Voltímetro - mede a ddp (ou tensão) aos terminais de uma fonte ou condutor (normalmente referida por queda de potencial)
- Amperímetro - mede a intensidade de corrente elétrica que percorre o condutor.
- Ohmímetro - mede a resistência elétrica.

Note que o nome de cada um destes aparelhos de medida deriva da unidade S.I. da respectiva grandeza física que mede.

1. Princípio de funcionamento do multímetro em corrente contínua.

Os multímetros analógicos baseiam o seu funcionamento num dispositivo designado por *galvanómetro*. Um galvanómetro faz uso da existência da força magnética (a força de Lorentz) que é aplicada a um condutor se for atravessado por uma corrente elétrica e quando imerso num campo magnético (homogêneo). Medindo de forma adequada essa força magnética, e sabendo *à priori* a magnitude do campo magnético, é possível aferir a intensidade de corrente elétrica que atravessa o condutor. A leitura da corrente elétrica com um galvanómetro é feita observando a rotação de um ponteiro, rotação essa proporcional à força magnética e logo à corrente elétrica (*Física Experimental: Apêndice 2*).

Para medir outras grandezas elétricas que não uma intensidade de corrente, o multímetro faz uso da lei de Ohm! O esquema de funcionamento simplificado é mostrado na Figura A.1.

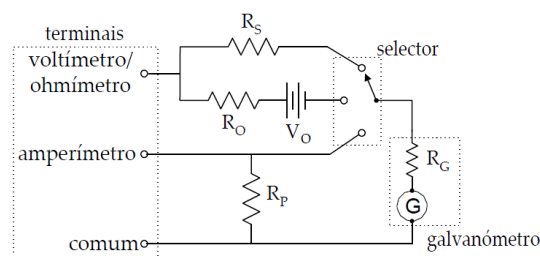


Figura A.1: Esquema de funcionamento de um multímetro baseado num galvanómetro. Ver detalhes no texto.

Assim, por exemplo, o valor V da medida de uma ddp é

feita no multímetro, medindo a corrente eléctrica i_G que atravessa o galvanómetro quando os terminais *comum* e *voltímetro* são colocados em paralelo com V . Com o seletor na posição do voltímetro essa corrente será igual a (ver Figura A.1) $i_G = V/(R_S + R_G)$, onde R_S é uma resistência ligada em série de valor ohmico elevado (da ordem de 10 M Ω) e R_G a resistência interna do galvanómetro. Sabendo o valor destas duas resistências (normalmente, resistências de precisão!) e do valor da corrente I , o multímetro dá o valor de V .

Querendo-se medir uma corrente eléctrica, os terminais a serem usados são o *comum* e o *amperímetro* da Figura A.1. Neste caso, a resistência R_P , de valor ohmico reduzido, é incluída em paralelo com o galvanómetro de forma a manter a resistência interna do amperímetro reduzida: isto fará com que as características do circuito externo não sejam muito alteradas com a inclusão do aparelho de medida (ver Apêndice B). A corrente a ser medida, I , relaciona-se com a corrente medida pelo galvanómetro como $i_G = (R_P/R_G)I$.

Finalmente, o ohmímetro é conseguido incluindo uma ddp V_0 em série com o galvanómetro e uma resistência de calibração R_0 , com o seletor na posição intermédia na Figura A.1. Se se fechar este circuito com uma resistência externa R entre os terminais *comum* e *ohmímetro*, a corrente do galvanómetro será igual a $i_G = V_0/(R + R_0 + R_G)$ e, então, o valor medido para a resistência igual a $R = V_0/i_G - R_0 - R_G$. Note que os terminais *ohmímetro* e *voltímetro* coincidem no mesmo *borne*, sem que haja conflito entre os dois circuitos. O mesmo não acontece com o amperímetro que, devido à existência da resistência R_P , necessita ter o seu terminal isolado do terminal *voltímetro/ohmímetro*.

2. Multímetro digital. Estimativa de erros nas medidas com o multímetro digital

Os multímetros usados no laboratório de Introdução à Física Experimental são multímetros digitais. O princípio de funcionamento de um multímetro digital é algo diferente daquele descrito atrás pelo facto de o elemento central não ser um sensor de corrente (o galvanómetro), mas um Conversor Analógico-Digital (ADC): este dispositivo mede tensões (analógicas) e devolve um sinal digital. Este sinal digital é depois reconvertido adequadamente (digitalmente) para ser mostrado num ecrã, usualmente de cristais líquidos.

Tipicamente, o número de dígitos que um multímetro digital apresenta é 4. Assim, medidas possíveis de ddp são, por exemplo, 0.123 V, 12.34 V ou ainda 123.4 V.

A **resolução** da medida para cada um destes casos é,

respectivamente, 1 mV, 10 mV e 0.1 V e corresponde à casa decimal do último dígito. É preciso ter em atenção que na maior parte dos multímetros a resolução da medida é diferente (menor) que a **precisão** da medida. Esta última é fornecida pelo fabricante do multímetro, descrita normalmente por uma expressão que envolve dois termos,

$$\delta X = X \cdot E_{rel} + n \cdot R \quad (B.1)$$

onde X é a medida efectuada, E_{rel} é um erro relativo (normalmente fornecido em valor percentual), R a resolução da medida e n um número inteiro. Nesta expressão, o primeiro termo é proporcional ao valor medido enquanto que o segundo é um termo *residual*, igual a um certo número n de dígitos de resolução: esta *imprecisão* está sempre presente, independentemente da magnitude do valor medido, X . Para valores de X pequenos, i.e., comparáveis à resolução, este segundo termo *domina* δX . Para valores grandes de X , o termo dominante é o que calcula a precisão da medida como proporcional ao valor medido.

Os parâmetros E_{rel} e n na Equação B1 variam, em geral, com a função e a escala que se escolha do multímetro. São, como se disse, fornecidos pelo fabricante do multímetro. Na Tabela I mostram-se estes parâmetros para um dos multímetros usados neste trabalho laboratorial. As tabelas para cada um dos aparelhos utilizados podem ser consultados no laboratório.

Tabela I Tabela para o cálculo da precisão do multímetro para várias escalas das funções *voltímetro* e *amperímetro* (em corrente contínua) e ohmímetro. A precisão é referida como $\pm(a\% + b)$, onde a é o erro relativo em percentagem do valor medido e b a precisão mínima (absoluta) da medida em número de *algarismos de resolução* do aparelho.

Voltímetro		
escala	resolução	precisão
40.00 mV	0.01 mV	$\pm(0.3\% + 5)$
400.0 mV	0.1 mV	$\pm(0.3\% + 1)$
4.000 V	0.001 V	$\pm(0.3\% + 1)$
40.00 V	0.01 V	$\pm(0.3\% + 1)$
Amperímetro		
escala	resolução	precisão
4.000 mA	0.001 mA	$\pm(0.5\% + 5)$
40.00 mA	0.01 mA	$\pm(0.5\% + 2)$
4.000 A	0.001 A	$\pm(0.3\% + 5)$
Ohmímetro		
escala	resolução	precisão
40.00 k Ω	0.01 k Ω	$\pm(0.4\% + 1)$
4.000 k Ω	0.001 k Ω	$\pm(0.4\% + 1)$
400.0 Ω	0.1 Ω	$\pm(0.4\% + 2)$
400.0 k Ω	0.1 k Ω	$\pm(0.4\% + 1)$

Exemplos:

1- Medida: 2.220 V - Escala: 3.200 V

Fórmula da precisão (retirada da tabela): $\pm(0.3 \% + 1)$

Nesta escala o dígito menos significativo equivale a 0.001V. Assim, de acordo com as especificações do multímetro, a precisão desta medida é:

$$\delta V = (0.3/100) \times 2.220 + 1 \times 0.001 = 0.00766$$

2- Medida: 12.22 V - Escala: 32.00 V

Fórmula da precisão (retirada da tabela): $\pm(0.3 \% + 1)$

Nesta escala o dígito menos significativo equivale a 0.01V. Assim, de acordo com as especificações do multímetro, o erro máximo desta medida é:

$$\delta V = (0.3/100) \times 12.22 + 1 \times 0.01 = 0.04666$$

Incerteza na medida com um multímetro.

Será o **erro** ou **incerteza da medida** igual à **precisão** do aparelho? Não necessariamente! A **incerteza da medida** pode ser afectada, por exemplo, por outros factores como:

- flutuação do valor observado no mostrador do multímetro
- um erro sistemático devido à influência não desprezável da resistência interna do aparelho de medida.

Assim, é importante saber distinguir entre **resolução**, **precisão** e **erro de medida** ao usarmos um multímetro.

3. Como usar um multímetro digital

Para seleccionar cada uma das funções do multímetro digital é necessário acionar um seletor que, na maior parte das vezes, é semelhante ao mostrado no lado esquerdo da Figura A.2. Utilizar o multímetro numa determinada função envolve não só escolher adequadamente a posição do seletor da função desejada, mas também (e muito especialmente!) na forma como o inserimos no circuito e na escolha dos seus terminais de ligação.

Normalmente um multímetro tem 4 terminais de ligação ou, na gíria eletrotécnica, bornes (ver imagem da direita da Figura A.2).



Figura A.2 Na lado esquerdo desta figura mostra-se o comutador de um multímetro digital semelhante aos usados nas aulas laboratoriais. As funções de voltímetro e amperímetro para *corrente contínua* correspondem às posições do comutador com os símbolos V e A respetivamente (note que, neste caso, o voltímetro tem duas escalas, uma delas para medir tensões fracas até 300 mV.) Outras funções úteis neste trabalho são a do ohmímetro, símbolo Ω no seletor, e do *buzzer*, a função que se segue (no sentido da rotação dos ponteiros dum relógio) a seguir à do ohmímetro. Do lado direito da imagem, mostra-se um (outro) multímetro digital, onde se podem observar os quatro bornes de ligação (ver texto).

Um destes bornes, tipicamente identificado com a cor preta, chama-se *borne comum* e é usado por todas as funções (i.e., deve estar sempre ligado!). As funções de voltímetro/ohmímetro usam o mesmo borne de ligação, devidamente identificado (tipicamente colocado do lado direito ou por cima do borne comum).

Uma outra função que usa o mesmo borne do voltímetro é o *medidor de continuidade*, normalmente referido por *buzzer* por fazer um ruído contínuo quando os seus terminais são ligados a um circuito de reduzida resistência eléctrica: serve, essencialmente, para ver se uma determinada ligação eléctrica está bem estabelecida.

O amperímetro, além do terminal comum, tem geralmente dois terminais, um para ser usado quando se medem correntes elevadas (até 10 A) e um outro para correntes eléctricas até centenas de mA.

Ao contrário do terminal V/Ω , estes dois terminais do amperímetro estão protegidos com fusíveis. A resistência interna de amperímetro é da ordem de apenas alguns ohm (a do voltímetro à volta de 10 M Ω !) e se, inadvertidamente, se colocar um amperímetro *em paralelo* com uma ddp (i.e., aplicar uma tensão entre os terminais do amperímetro), a corrente eléctrica resultante seria suficiente para danificar o aparelho. Assim, caso se cometa este tipo de imprudência, (considerado **um dos pecados capitais neste laboratório!**), o resultado é queimar um fusível.

Apêndice B: Inserção do voltímetro/amperímetro em circuitos eléctricos. Resistências internas dos aparelhos.

Como foi referido na secção anterior (§B), o voltímetro e o amperímetro têm resistências internas muito diferentes. De facto, caso fosse tecnicamente possível, o ideal seria que a resistência do voltímetro fosse infinita e a do amperímetro nula. Se assim fosse, a inserção dos aparelhos de medida num circuito não modificaria as suas características eléctricas. Na realidade isto não acontece e existe sempre uma pequena perturbação da grandeza medida devido à inclusão do aparelho de medida.

O voltímetro mede uma diferença de potencial! Assim, os seus dois terminais devem ser colocados em pontos do circuito com potenciais eléctricos diferentes. Se não quisermos modificar as propriedades do circuito (e assim também da medida), o ideal é que nenhuma corrente eléctrica flua através do voltímetro. Ou seja, seria ideal que a resistência interna do voltímetro fosse infinita!

O amperímetro mede uma corrente eléctrica que passa instantaneamente num determinado ponto do circuito. Neste caso, e ao contrário do voltímetro, a medida é *local* e, para inserirmos o amperímetro num qualquer ponto do circuito, temos que *abrir* primeiro o circuito nesse ponto e inserir o amperímetro *em série* (ver Figura B.1)¹⁵. Neste caso, como o amperímetro é inserido em série no circuito, ele só não teria influência no circuito se a sua resistência interna fosse zero.

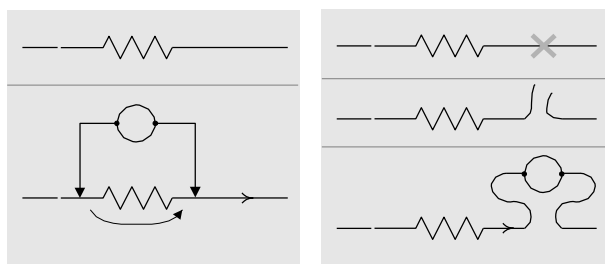


Figura B.1 Procedimento a seguir para se incluir um voltímetro (à esquerda) e um amperímetro (à direita) num circuito. A inclusão do voltímetro para medir a queda de potencial ΔV não oferece grande dificuldade: é apenas necessário ligar os seus terminais (ou pontas de prova) aos terminais da resistência. No caso da inclusão do amperímetro no circuito para medir a corrente que passa na resistência, é forçoso abrir primeiro o circuito (o que envolve, seguramente, desligar alguns dos seus fios ou cabos!)

¹⁵ Note que o uso do voltímetro pode ser feito sem nunca ter que alterar o circuito: é apenas necessário *encostar* as pontas de prova do aparelho nos pontos onde se pretende medir a ddp. É impossível medir uma corrente eléctrica de um circuito com um

A influência das resistências internas dos aparelhos de medida nos circuitos pode ser tomada em consideração nos cálculos que tenhamos que fazer, conhecendo os respectivos valores ohmicos e substituindo no esquema cada um dos aparelhos de medida pelo seu circuito equivalente. Assim, um voltímetro real pode ser visto como um voltímetro ideal (isto é, com resistência interna infinita) em paralelo com uma resistência R_V , a resistência interna real do aparelho (ver Figura B.2). O mesmo pode ser feito também para o amperímetro: aqui, o aparelho real é substituído pelo conjunto amperímetro ideal em série com a resistência r_A , a resistência interna do amperímetro.

Também as fontes de tensão apresentam resistências internas. Neste caso, a fonte real é formada por uma *força eletromotriz* em série com uma resistência. A queda de potencial nesta *resistência interna* reduz a tensão disponível aos terminais da fonte à medida que a corrente fornecida aumenta (*Física Experimental: Apêndice 2*). Neste trabalho vamos considerar que esta resistência interna é desprezável.

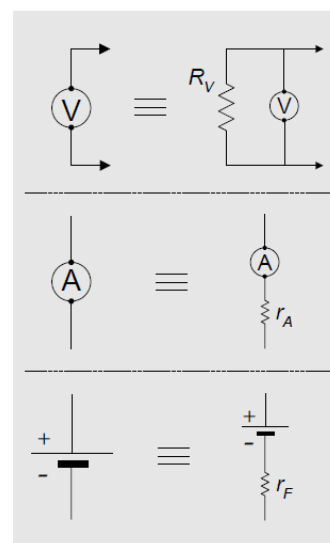


Figura B.2 Os instrumentos reais (lado esquerdo da figura) têm sempre uma resistência interna associada. Para cada um dos casos, é possível desenhar um circuito equivalente contruído à custa de instrumentos ideais e as suas resistências internas. Assim, um voltímetro ideal tem uma resistência infinita; um voltímetro real deve ser visto como tendo uma resistência elevada R_V em paralelo com um voltímetro ideal, R_V é tipicamente da ordem de 10 MΩ. Já o amperímetro real deve ser visto como um amperímetro ideal em série com a resistência interna r_A .

amperímetro sem ter de o modificar: temos sempre que incluir este aparelho de medida *dentro* do circuito, de forma que a corrente flua também através dele.

Apêndice C: Notas sobre análise dos resultados

Na análise dos resultados deve incluir os seguintes pontos.

Experiências 1 e 2 (Lei de Ohm)

1. Construa os gráficos V versus I . Verifique a proporcionalidade entre V e I , ajustando uma recta ao conjunto de pontos.
2. Compare o valor da resistência assim obtido com o valor lido com o multímetro. Analise os erros de medida em ambos os casos.
3. Compare os resultados obtidos nas duas experiências. Qual das montagens é a mais adequada para medir a resistência R ?

Experiências 3

4. Construa o gráfico V versus I . Verifique se a relação entre V e I é linear e interprete.

Referências

- [1] *Physics for scientists and engineers with modern physics* (4th Edition), Raymond A. Serway, Saunders College Publishing (1996)
- [2] *Física Experimental - Uma introdução*, M. C. Abreu, L. Matias, L. F. Peralta, Presença (1994)
- [3] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/eletric/watcir2.html>