

Física para Farmácia

4310181

3º Experimento

**Propriedades de Transporte Eletrônico e
Iônico**

Renato F. Jardim, rjardim@if.usp.br

Instituto de Física, Universidade de São Paulo
São Paulo

2014

Introdução

Certamente você não pode imaginar um mundo sem energia elétrica e seus penduricalhos, ou seja, tudo que funciona quando espetado em uma tomada ou movido a uma bateria. Esse mundo sem dúvida já existiu, e a humanidade sobreviveu a ele mas vivendo de forma completamente diferente da que vivemos hoje. É notável observar o número de coisas que dependem de energia elétrica e mais precisamente de circuitos elétricos. Isso nos leva a uma simples conclusão: é necessário entender um pouco de circuitos elétricos e mais apropriadamente de fenômenos relacionados ao transporte de cargas elétricas. Sendo assim, e primeiramente, parece importante conhecer o indivíduo que ajudou bastante o entendimento de fenômenos elétricos e magnéticos: **Charles Augustin de Coulomb**. Este físico experimental francês, que viveu na segunda metade do século XVIII, foi meio que responsável pelo início da combinação quantitativa/qualitativa da eletricidade e do magnetismo. Em particular, ele foi o primeiro indivíduo a propor uma relação para descrever a força que atua entre cargas elétricas e de cargas elétricas na presença de um campo elétrico E .

A força de Coulomb F_c , que atua em um corpo carregado com carga q no interior de um campo elétrico E é muito bem conhecida e dada por $F_c = qE$. Assumindo que os mesmos conceitos desenvolvidos para cargas e campos estudados no espaço livre (ou vácuo) possam ser utilizados em um meio material, é possível compreender aspectos elétricos e eletrônicos da matéria assim como o funcionamento de elementos de circuitos elétricos e dispositivos de maneira geral. Nesse contexto, vamos primeiramente pensar no elemento mais simples de um sistema elétrico: um resistor, ou mais apropriadamente o seu oposto, um condutor. Este condutor pode ser, por exemplo, um fio de um elemento metálico como o cobre ou mesmo uma liga metálica qualquer. A característica fundamental de um condutor é que ele contém cargas elétricas (no caso elétrons) quase livres, de maneira similar às moléculas em um gás ideal e, de certa forma, uma dada quantidade de íons em uma solução. O fato curioso aqui é que tanto um condutor como uma solução rica em íons livres terão, quando posicionados no interior de um campo elétrico E , suas propriedades elétricas ou eletrônicas alteradas. Essa alteração é relacionada primariamente com a força de Coulomb, que atuará no sentido de promover o movimento dessas cargas e/ou íons através do meio.

Por outro lado, diferentemente do vácuo, as cargas negativas em um condutor (elétrons) estão imersas em um aglomerado de átomos, ou para ser mais preciso, da ordem do número de Avogadro de átomos, ou seja, da ordem de 10^{23} átomos por centímetro cúbico. Com todo esse número de átomos, o movimento de um elétron é limitado pelo número excessivo de

colisões que ele experimenta quando em movimento devido a presença de um campo elétrico E . Esse processo de colisão, e conseqüentemente perda de energia, é a razão pela qual a “resistência elétrica” R de um condutor é definida. Acerca desse processo acredita-se que a chamada lei de Ohm compreende a relação que captura perfeitamente a situação física do fenômeno, relacionando a quantidade de carga fluindo em um intervalo de tempo t , definida como corrente elétrica $I = q/t$, com o campo elétrico E , que força estas cargas a se movimentarem e, finalmente, a resistência R (neste caso elétrica) que tende a frear este movimento de carga. Sendo assim, tanto a lei de Ohm como outros pontos de interesse são discutidos abaixo.

Resistência elétrica: lei de Ohm e as curvas características $I \times V$

Cargas, a priori livres, só conseguirão fluir através de um meio material se houver um campo elétrico presente ou aplicado ao meio. Vamos nos concentrar em um fio condutor longo, de comprimento l . Ainda, vamos aplicar nas extremidades desse fio um campo elétrico E . Uma vez que existe uma associação imediata entre o campo elétrico E e uma diferença de potencial ou tensão $V = V_a - V_b$, é possível mostrar que essa relação é dada por $V = E l$. Isso é importante para a discussão envolvendo condutores e movimento de cargas, como descrito abaixo.

Na há dúvida de que a vida no interior de um condutor é muito cheia de eventos. Para ter uma idéia disso, pense em um único elétron: ele certamente estará cercado de bilhões de outros elétrons pertencentes aos átomos vizinhos. Se esse elétron, na presença de um campo elétrico E , experimenta um movimento qualquer, a probabilidade de que ele se choque com algum outro elétron desses bilhões ao seu redor ou outro ente qualquer é muito grande, essencialmente 100%. E isso corresponde exatamente a realidade, ou seja, as cargas livres (elétrons) no interior de um condutor estão se chocando com as outras e com os átomos do material a todo momento. Define-se aqui uma grandeza de interesse chamada de livre caminho médio l_m , que é nada mais nada menos do que a distância que uma carga livre percorre em um condutor sem se chocar ou interagir com qualquer outro elétron ou com as vibrações térmicas dos átomos que compõem o material. O valor de l_m em condutores é muito pequeno (da ordem de 10^{-9} m) e de certa forma restringe a velocidade dos elétrons quando o condutor é submetido a um campo elétrico E . Quando a força de Coulomb atua em um dado elétron, este é acelerado, aumenta sua velocidade mas logo perde energia cinética devido às colisões, que é transferida ao condutor. Em qualquer ponto de um condutor, sua energia cinética é essencialmente zero, mas não o produto $(V_a - V_b)q$, como seria

esperado no vácuo. Em analogia com o escoamento de um fluido através de um tubo (como no Viscosímetro de Ostwald), o movimento de elétrons depende da força aplicada (diferença de pressão) e da resistência (diâmetro do tubo). Sendo assim, tanto a lei de Ohm como outros pontos de interesse são discutidos abaixo.

Retornando ao ponto da lei de Ohm, assumo um fio condutor longo, de comprimento l que é submetido a uma diferença de potencial $V = V_a - V_b$, ou seja, $V = E l$, onde E é o campo elétrico. Aqui vale lembrar a analogia com o escoamento de um fluido através de tubos, ou seja, a voltagem ou diferença de potencial entre dois pontos de um condutor pode ser pensada como sendo uma pressão que força o movimento dos elétrons ao longo do fio condutor. Por outro lado, a resistência elétrica desse mesmo condutor é uma medida do quanto é difícil “empurrar” esses elétrons ao longo do condutor. Usando a analogia do escoamento de um fluido, a resistência elétrica é similar a viscosidade. Para a água escoando através de um tubo, certamente haverá maior resistência ao movimento da água em um tubo longo e de diâmetro pequeno do que um relativamente curto e de diâmetro grande. O mesmo aplica-se aqui para o movimento de cargas em um condutor: fios longos e com diâmetros pequenos apresentam maior resistência elétrica do que os fios pequenos e com diâmetros grandes.

A resistência elétrica R do fio, de geometria cilíndrica, então depende do seu comprimento l , da seção transversal A , e da sua resistividade elétrica ρ :

$$R = \rho (l/A). \quad (1)$$

A resistividade elétrica ρ é a grandeza de interesse na caracterização das propriedades de transporte eletrônico nos materiais e relaciona-se com a resistência elétrica R segundo a Equação 1. Adicionalmente, assim como define-se a resistividade elétrica de um dado material segundo a Eq. 1, a condutividade elétrica $\sigma = 1/\rho$ também é muito utilizada. Baseado nessas grandezas, conclui-se que bons condutores de corrente elétrica devem apresentar baixos valores de ρ enquanto condutores ruins ou isolantes têm ρ muito altas (podem ser 20 ordens de magnitude maiores que ρ de um condutor).

A resistência elétrica de um condutor também depende da temperatura T . De forma geral, R aumenta com o aumento T . Para pequenas variações de T , digamos $T - T_0$, a alteração de ρ com T , é proporcional a alteração em $T = T - T_0$, ou seja

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (2)$$

ou equivalentemente

$$R = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (3)$$

No limite de baixas temperaturas, alguns materiais, conhecidos como supercondutores, apresentam resistividade elétrica nula ($\rho = 0$). Como a resistência elétrica em fios condutores resulta em perdas de energia (geralmente na forma de calor – efeito Joule), materiais com resistência elétrica nula não apresentam perda de energia quando uma corrente elétrica I flui através dele. Isso tem um poder de aplicação tecnológica bastante grande.

Na maioria dos materiais, a diferença de potencial ou voltagem ou tensão V e a resistência elétrica R são conectadas via a chamada lei de Ohm

$$V = R I \quad (4)$$

onde V é dado em Volts (V), I em Ampere (A) e R em Ohm (símbolo Ω).

Essa relação entre V e R pode ser muito mais complicada em diversas famílias de materiais. Esses materiais são chamados de não-ôhmicos.

Retornando à lei de Ohm descrita pela Eq. 4, observa-se que a relação pode ser materializada via uma representação gráfica de V versus I ou vice-versa. Um exemplo disso é mostrado na Fig. 1. Esse tipo de curva é chamada de curva característica I versus V (ou V versus I) e é muito utilizada na averiguação de componentes e materiais e fornece uma classificação para os mesmos, ou mais apropriadamente, dos que obedecem ou não a lei de Ohm.

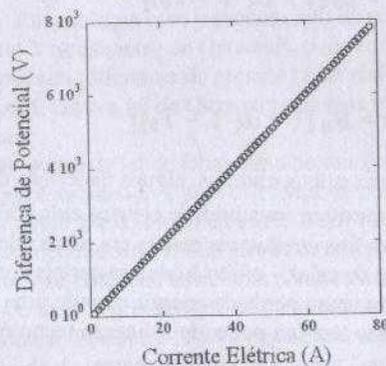


Figura 1 – Curva característica IxV de um resistor ou condutor que obedece a lei de Ohm.

Uma inspeção cuidadosa dos dados de I versus V da Fig. 1 indica que o comportamento é linear, ou seja, $V = RI$, onde a resistência elétrica do material R é obtida via a derivada da curva. Nota-se também que este comportamento linear é mantido em todo o intervalo de V e I , conferindo ao material a característica de ser ôhmico. Obviamente que existem materiais que não obedecem a lei de Ohm. Nestes casos, a linearidade entre V e I observada na Fig. 1 não é observada. Este ponto de interesse será abordado sob o ponto de vista experimental na sua próxima aula.

A lei de Ohm e soluções aquosas

Discussão similar àquela feita para condutores pode ser feita também aplicada no estudo do comportamento da corrente elétrica em soluções aquosas. Apesar da água ser um péssimo condutor de eletricidade (o que faz com que estejamos vivos), a presença de íons em solução diminui sua resistência elétrica R consideravelmente. A condutividade elétrica σ destas soluções eletrolíticas depende obviamente da concentração de íons presente na solução, da natureza desses íons (suas cargas e mobilidades), e o comportamento da resistência elétrica R como função da concentração é diferente para os chamados eletrodos fracos e fortes.

As soluções eletrolíticas, de maneira geral, obedecem a lei de Ohm, como já discutido para os condutores. Sendo assim, a corrente elétrica I passando através de uma solução é proporcional à diferença de potencial V aplicada à solução. A resistência elétrica R da solução é então dada pela lei de Ohm $R = (V/I)$, assim como é válida para soluções aquosas a relação descrita pela Eq. 1, envolvendo os parâmetros geométricos da amostra.

Um cuidado a ser tomado quando da avaliação da resistência elétrica R em soluções aquosas é com a utilização do tipo de corrente elétrica ou diferença de potencial utilizada na determinação de R . Acerca desse ponto, no item a seguir são discutidas as formas das correntes e tensões utilizadas em circuitos elétricos.

Correntes Contínuas (DC) e Alternadas (AC)

Agora que já temos uma certa familiaridade e entendimento dos conceitos básicos do movimento de cargas é necessário olhar com um pouco mais de detalhe a própria corrente elétrica I ou a tensão ou diferença de potencial V presentes em um circuito elétrico. Acerca desse ponto, a corrente elétrica gerada por fontes e baterias pode ser de duas formas: a corrente contínua e a corrente alternada, as quais são discutidas abaixo.

Corrente Contínua DC

Uma pilha ou bateria usada para a produção de corrente/voltagem gera um tipo de corrente chamada de contínua ou DC. Isso simplesmente significa que a corrente flui *com magnitude constante* no circuito e em uma única direção. O fato da corrente fluir em uma única direção de um circuito elétrico implica necessariamente na existência de uma polaridade (positiva + ou negativa -), como você deve ter observado em uma bateria ou pilha.

Para ter uma idéia de como este tipo de excitação pode ser compreendida, a Figura 2, mostrada abaixo, descreve a evolução temporal de uma corrente elétrica DC em um circuito elétrico. Nota-se claramente uma característica de interesse: o valor da corrente elétrica I , dada em Amperes, assume valor constante e igual a $I = 9$ A, em todo o intervalo de tempo. Desnecessário dizer que a tensão ou diferença de potencial V em um circuito sujeito a uma corrente elétrica DC também terá comportamento similar ao mostrado na Figura 2.

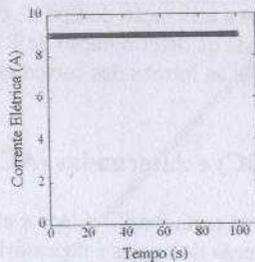


Figura 2 – Dependência temporal da corrente elétrica I , dada em Ampere, no modo contínuo, ou seja, DC.

Este tipo de corrente elétrica DC é o que usamos principalmente nos circuitos elétricos e eletrônicos de baixa potência, como aqueles que são alimentados com baterias, células solares, células de combustível e alguns geradores. Na verdade, a esmagadora maioria dos circuitos elétricos presentes no interior das televisões e rádios são alimentados por correntes elétricas DC.

Corrente Alternada AC

A abreviação AC (do inglês **alternating current**) refere-se a corrente alternada. Isso significa que, ao contrário da corrente contínua DC, a corrente elétrica fluindo em um circuito está constantemente sendo alterada em seu sinal, ou seja, não flui em apenas uma direção. O comportamento temporal da corrente alternada I em um dado circuito pode ser visto na Figura 3.

A corrente elétrica da sua casa, ou mais apropriadamente, a corrente que sai das tomadas da sua casa é uma corrente alternada AC. Ela é produzida em usinas e enviada via as linhas de transmissões até as residências, escritórios etc. Como pode ser visto na Figura 3, a corrente elétrica é alterada de sinal com uma dada frequência, que aqui no Brasil é de 60 Hz. Portanto, em cada 60 segundos, a corrente elétrica altera seu sinal de positivo para negativo. Via de regra, essa alternância da corrente elétrica em frequências da ordem de 60 Hz implica na alteração da direção da corrente em um circuito na mesma taxa temporal. Porém, muitos dos componentes que necessitam de corrente elétrica para funcionarem, como uma lâmpada por exemplo, podem operar tanto em correntes DC ou AC.

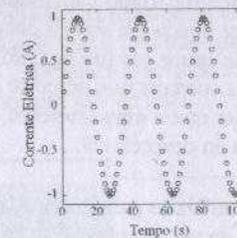


Figura 3 – Dependência temporal da corrente alternada I em um dado circuito elétrico. Comportamento similar com o tempo é observado na diferença de potencial ou tensão V .

Experimento

Um circuito elétrico é formado quando um canal de condução elétrica é criado, possibilitando que elétrons livres possam se movimentar de forma contínua. Esse movimento contínuo de elétrons livres através dos condutores de um circuito é chamado de corrente elétrica I e é frequentemente referida como “fluxo”, como no caso do fluxo de um fluido através de um tubo ou duto. Isso introduz o conceito de resistência elétrica R e, conseqüentemente, da lei de Ohm. Portanto, o objetivo maior deste experimento está na averiguação se diversos componentes elétricos (resistores, porcelana, lâmpada e uma cuba com H_2O) obedecem ou não a lei de Ohm. Isso pode ser comprovado, de maneira imediata, via a construção de curvas características I versus V para estes componentes. Sendo assim, conclui-se que a prática experimental deverá ser centrada na determinação experimental de curvas características I versus V para alguns componentes de circuitos elétricos. Para cumprir esses objetivos, alguns materiais e equipamentos a serem utilizados nos experimentos devem ser apresentados, o que é feito a seguir.

Materiais e Equipamentos a serem usados no experimento

Alem dos elementos/componentes a serem estudados (resistor, porcelana, lâmpada e a cuba), cabos elétricos e fontes de tensão/baterias são necessários para a realização dos experimentos. Estes equipamentos/aparelhos são utilizados para as medições de corrente elétrica I , voltagem V e, eventualmente, resistência elétrica R . Uma breve descrição desses equipamentos, assim como de circuitos elétricos simples é feita abaixo.

Amperímetro: este equipamento é usado para medir a intensidade de corrente elétrica I . Ele deve ser ligado em série a um circuito elétrico, ou seja, a corrente elétrica tem que entrar por um lado do aparelho e sair pelo outro lado, de forma que toda a corrente que percorre o circuito também passe pelo aparelho. Isso requer que o **amperímetro** deva ter uma resistência interna muito baixa ou desprezível.

Voltímetro: este aparelho é utilizado para medir a diferença de potencial ou tensão V dos componentes de um circuito. Ele, portanto, deve ser ligado em paralelo a um circuito elétrico, ou seja, a entrada do componente deve coincidir com a entrada do voltímetro e a saída do componente deve coincidir com a saída do mesmo voltímetro. Isso tudo sugere que a corrente elétrica que percorre o circuito não deve passar pelo voltímetro de modo a não interferir nos valores de corrente elétrica. Isso requer, portanto, que o voltímetro deva ter uma resistência elétrica interna elevada ou, de preferência, ordens de grandeza maior que a apresentada pelos componentes do circuito.

Ohmímetro: este é um outro aparelho/equipamento de medida mas que não faz parte dos integrantes de um circuito elétrico. Ele é usado para medir a resistência elétrica de um material ou componente quando o mesmo encontra-se fora do circuito elétrico. Ele deve ser ligado aos extremos do componente ou resistor, por exemplo, que se pretende avaliar a resistência elétrica. Entretanto, é importante salientar uma vez mais que esse componente ou resistor deve estar fora do circuito elétrico, ou seja, por ele não deve estar passando qualquer corrente elétrica I .

Multímetro: este é um aparelho de medida que pode operar em um dado circuito elétrico como amperímetro ou voltímetro (ohmímetro também mas fora do circuito). Este tipo de aparelho é o que será utilizado durante o experimento a ser executado em sala de aula.

Montagem de Circuitos Simples

Como o objetivo do experimento é comprovar ou não a validade da lei de Ohm em algumas situações, é importante dizer ressaltar que circuitos elétricos devem ser montados e que grandezas elétricas sejam avaliadas. Acerca desse ponto, é importante salientar que serão utilizadas montagens de circuitos relativamente simples, cujo desenho esquemático pode ser visto na Figura 4. Nesse desenho são mostrados os equipamentos/aparelhos a serem usados como o voltímetro (V) e o

amperímetro (A) assim como o componente a ser avaliado. A fonte de tensão (ou corrente) DC também é mostrada. Configuração similar a esta será montada para a avaliação da resistência elétrica em soluções aquosas com a pequena diferença de que a fonte de corrente (tensão) DC será substituída por uma AC. Detalhes acerca de todo o procedimento experimental serão dados em sala de aula.

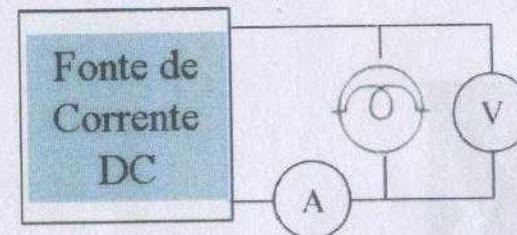


Figura 4 – Desenho esquemático de um circuito elétrico para avaliar as propriedades de um componente.

Física para Farmácia – 4310181 - 2014

Equipe

Prof. Renato de Figueiredo Jardim, rjardim@if.usp.br, IFUSP, Ed. Mario Schenberg, sala 213.

Profa. Carla Eliete Iochims dos Santos, ciochims@if.usp.br, IFUSP, Ed. Basílio Jafet, sala 228.

Prof. Flávio Moraes, fmoraes@if.usp.br, IFUSP, Ed. Mario Schenberg, sala 112.

Prof. Pablo Leite Bernardo, pablopb@if.usp.br, IFUSP, Ed. Alessandro Volta, sala 108.

Prof. Fábio Santos Alves Abud, fabio.abud@usp.br, IFUSP, Ed. Mario Schenberg, sala 101.

Amperímetro: este equipamento é usado para medir a intensidade de corrente elétrica I . Ele deve ser ligado em série a um circuito elétrico, ou seja, a corrente elétrica tem que entrar por um lado do aparelho e sair pelo outro lado, de forma que toda a corrente que percorre o circuito também passe pelo aparelho. Isso requer que o **amperímetro** deva ter uma resistência interna muito baixa ou desprezível.

Voltímetro: este aparelho é utilizado para medir a diferença de potencial ou tensão V dos componentes de um circuito. Ele, portanto, deve ser ligado em paralelo a um circuito elétrico, ou seja, a entrada do componente deve coincidir com a entrada do voltímetro e a saída do componente deve coincidir com a saída do mesmo voltímetro. Isso tudo sugere que a corrente elétrica que percorre o circuito não deve passar pelo voltímetro de modo a não interferir nos valores de corrente elétrica. Isso requer, portanto, que o voltímetro deva ter uma resistência elétrica interna elevada ou, de preferência, ordens de grandeza maior que a apresentada pelos componentes do circuito.

Ohmímetro: este é um outro aparelho/equipamento de medida mas que não faz parte dos integrantes de um circuito elétrico. Ele é usado para medir a resistência elétrica de um material ou componente quando o mesmo encontra-se fora do circuito elétrico. Ele deve ser ligado aos extremos do componente ou resistor, por exemplo, que se pretende avaliar a resistência elétrica. Entretanto, é importante salientar uma vez mais que esse componente ou resistor deve estar fora do circuito elétrico, ou seja, por ele não deve estar passando qualquer corrente elétrica I .

Multímetro: este é um aparelho de medida que pode operar em um dado circuito elétrico como amperímetro ou voltímetro (ohmímetro também mas fora do circuito). Este tipo de aparelho é o que será utilizado durante o experimento a ser executado em sala de aula.

Montagem de Circuitos Simples

Como o objetivo do experimento é comprovar ou não a validade da lei de Ohm em algumas situações, é importante dizer ressaltar que circuitos elétricos devem ser montados e que grandezas elétricas sejam avaliadas. Acerca desse ponto, é importante salientar que serão utilizadas montagens de circuitos relativamente simples, cujo desenho esquemático pode ser visto na Figura 4. Nesse desenho são mostrados os equipamentos/aparelhos a serem usados como o voltímetro (V) e o

amperímetro (A) assim como o componente a ser avaliado. A fonte de tensão (ou corrente) DC também é mostrada. Configuração similar a esta será montada para a avaliação da resistência elétrica em soluções aquosas com a pequena diferença de que a fonte de corrente (tensão) DC será substituída por uma AC. Detalhes acerca de todo o procedimento experimental serão dados em sala de aula.

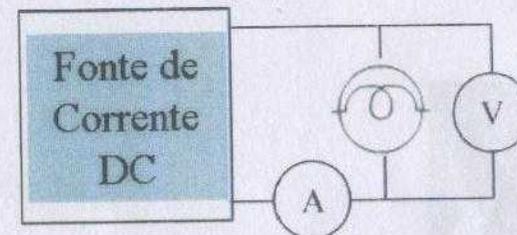


Figura 4 – Desenho esquemático de um circuito elétrico para avaliar as propriedades de um componente.

Física para Farmácia – 4310181 - 2014

Equipe

Prof. Renato de Figueiredo Jardim, rjardim@if.usp.br, IFUSP, Ed. Mario Schenberg, sala 213.

Profa. Carla Eliete Iochims dos Santos, ciochims@if.usp.br, IFUSP, Ed. Basílio Jafet, sala 228.

Prof. Flávio Moraes, fmoraes@if.usp.br, IFUSP, Ed. Mario Schenberg, sala 112.

Prof. Pablo Leite Bernardo, pablopb@if.usp.br, IFUSP, Ed. Alessandro Volta, sala 108.

Prof. Fábio Santos Alves Abud, fabio.abud@usp.br, IFUSP, Ed. Mario Schenberg, sala 101.