

Curvas características de Elementos Resistivos Lineares e não Lineares

Introdução

A proposta desta experiência é estudar alguns elementos resistivos através do levantamento de suas curvas características. Serão estudados elementos resistivos lineares e não-lineares, entre eles: **resistor comercial, lâmpada de filamento, diodo e pilha**. Os resultados experimentais serão comparados com valores esperados teoricamente.

Estas experiências serão realizadas em 3 (três) aulas e apresentadas em um relatório que deverá ser entregue uma semana após o término da última experiência (ou terceira aula).

Vamos apresentar um breve resumo dos conceitos mais importantes relativos a este estudo, sendo que mais detalhes podem ser encontrados no **capítulo 7** da **apostila de CFE**. Os alunos já familiarizados com este tema poderão ler diretamente os procedimentos experimentais nas páginas:

- **resistor de carvão na página 5;**
- **lâmpada de filamento na página 12;**
- **diodo na página 23;**
- **pilha na página 28.**

Fundamentos Teóricos

Define-se como corrente elétrica através de um condutor, o movimento dos elétrons livres do material do condutor numa direção preferencial. Quantitativamente a corrente pode ser escrita como a quantidade de carga que atravessa a seção reta do condutor por unidade de tempo:

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta q}{\Delta t} \right) = \frac{dq}{dt} \quad (2.1)$$

onde q é a carga e t é o tempo. A unidade de corrente é o **ampère** que corresponde ao fluxo de um **coulomb** de carga por **segundo**.

Quando os elétrons livres de um material condutor se movimentam eles sofrem choques sucessivos com outros elétrons livres e com os átomos do material e estão sujeitos às forças de atração e repulsão exercidas por eles. Tudo isso dificulta o trânsito das cargas livres e gasta energia, e, portanto, para manter esse trânsito, ou a corrente elétrica, deve-se fornecer energia de uma fonte externa. A dificuldade do trânsito das cargas livres através de um material é chamada de resistência à passagem de cargas através desse material ou resistência elétrica do material.

Como já foi visto na primeira experiência define-se quantitativamente a resistência elétrica de um elemento resistivo X como a razão entre a voltagem e a corrente que passa por esse elemento:

$$R_X = \frac{V_X}{I_X} \quad (2.2)$$

essa é a definição geral de resistência elétrica, seja o elemento resistivo ôhmico (linear) caso em que a resistência é constante seja qual for o valor de V_X e de i_X , seja ele não ôhmico (não linear) que é o caso em que a resistência varia para valores diferentes de V_X e i_X .

Para estudar elementos de circuito resistivos lineares (ôhmicos) ou não lineares levantamos suas curvas características. Uma curva característica de qualquer elemento de circuito é definida como sendo o gráfico da corrente i (ordenada) em função da tensão V (abscissa). Esse gráfico serve para caracterizar o comportamento do elemento sob determinadas condições ambientais. Para maiores detalhes sobre curvas características veja a **seção 3.1 da apostila de CFE (1ª parte) página 21**.

A definição (2.2) para um elemento resistivo assegura uma propriedade importante desses elementos que é $V_x=0$ quando $i_x=0$. Isso quer dizer que por mais complicada que seja sua curva característica, ela sempre passa pela origem do sistema de coordenadas. O valor da resistência elétrica em cada ponto da curva é o inverso do coeficiente angular da reta que passa pelos pontos O e P , como pode ser observado na **figura 2.1** a seguir. Veja mais sobre elementos resistivos na **seção 3.2 da apostila de CFE, 1ª parte, página 23**.

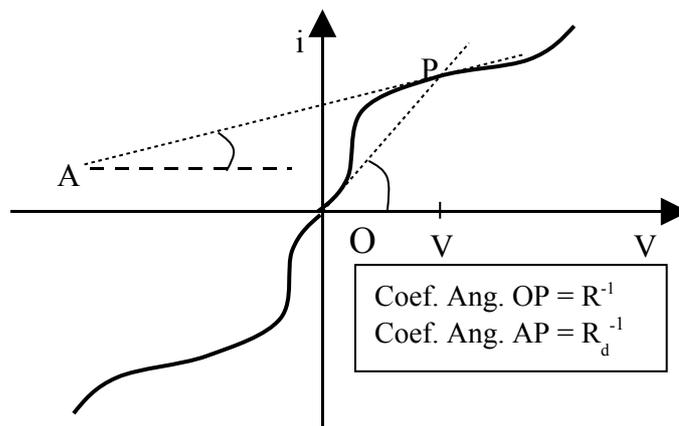


Figura 2.1: Curva característica de um elemento resistivo hipotético.

O circuito sugerido para esta experiência está descrito na **figura 2.2** a seguir, onde a resistência R_a é uma resistência auxiliar para a medida da corrente. Ela pode, também, servir de proteção para a fonte, caso seja necessário. O aluno deve julgar se é ou não, tendo como critério que a fonte de tensão não pode ser colocada em curto circuito, caso a resistência do elemento X seja muito baixa (mesmo que somente para alguns valores de tensão e corrente). Se julgar que é necessária deve escolher o valor adequado. Se não for necessária como proteção, seu valor deve ser tal que permita uma leitura, de tensão ou corrente, com erro aceitável, com o instrumento de medida que for utilizar. Ou seja, o valor, seja da corrente, seja da tensão, não pode ser tão baixo, que o instrumento de medida não seja capaz de realizar a medida.

A fonte de tensão contínua que vai alimentar esse circuito tem tensão máxima de **30V**. Antes de começar a medir, calcular a tensão máxima a que se pode chegar sem danificar os elementos do circuito, através dos valores nominais das resistências e da potência máxima dada pelo fabricante, ou, se for o caso, de tensões ou correntes máximas também especificadas pelo fabricante.

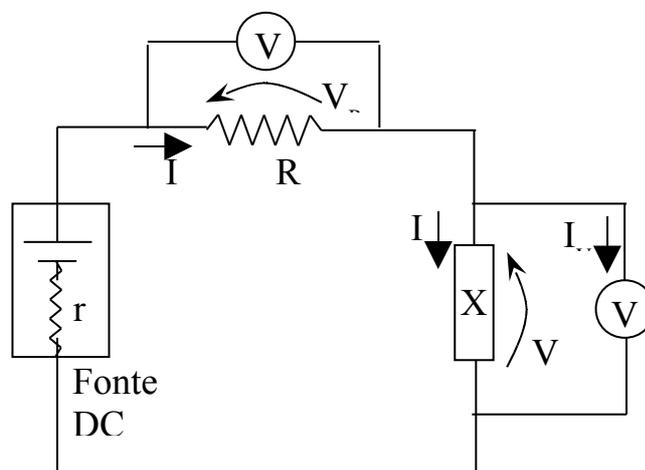


Figura 2.2: Circuito sugerido para se obter a curva característica de um elemento resistivo.

Resistor Comercial

O resistor comercial é construído de forma a obedecer a lei de Ohm dentro de certas condições de utilização, que são, em geral, definidas pelo fabricante. Veja **seção 3.3** da **apostila de CFE, 1ª parte, página 26**, sobre como são construídos esses resistores. O fabricante define a potência máxima que o resistor suporta e, então, esse valor vai definir o intervalo de corrente e tensão que se pode aplicar no elemento.

Procedimento para medir a curva característica de um resistor de carvão

Vamos levantar a curva característica de um resistor de carvão de resistência nominal conhecida. Para tanto sugerimos o circuito da **figura 2.3**.

Como já comentado na **experiência 1**, esse tipo de resistor, segundo o fabricante, obedece a lei de Ohm desde que as condições de utilização sejam respeitadas. Vamos, então, levantar a curva característica desse resistor até o limite de potência indicado pelo fabricante, ou próximo dele.

Com a fonte desligada e o circuito montado coloque o botão de corrente da fonte no máximo e o botão de tensão em zero. A seguir, ligue a fonte e comece a subir a tensão, anotando os valores das leituras nos dois voltímetros.

A leitura da tensão em R_a , V_{Ra} , dá a corrente que passa por R_x . Sugerimos medir uns **20** pontos distribuídos uniformemente sobre todo o intervalo de tensão. Anote os erros, construa uma tabela e **faça um gráfico da curva característica do resistor X, com as barras de erro**.

Faça um ajuste por mínimos quadrados para obter o valor experimental de R_x com o erro associado. Compare com o valor nominal e calcule o desvio relativo. Comente o resultado levando em conta a qualidade do ajuste, o erro experimental e o desvio relativo.

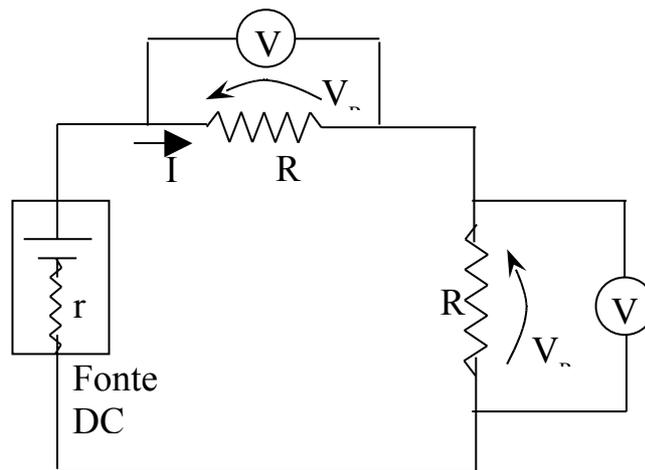


Figura 2.3: Circuito sugerido para se obter a curva característica de um resistor.

Pergunta: O resistor estudado comportou-se como um resistor ôhmico em todo o intervalo de tensão observado? Justifique sua resposta com base na curva característica medida e nos erros experimentais.

Lâmpada de filamento

Uma lâmpada de filamento metálico é um elemento resistivo não linear, embora a variação da resistência, nesse caso, seja efeito da variação de condições ambientais externas.

No caso da lâmpada essa variação é o grande aumento da temperatura do filamento, quando a corrente aumenta, não sendo possível manter constante a temperatura do filamento. A resistência elétrica de um metal aumenta com a temperatura. Numa lâmpada comum de filamento de tungstênio, o filamento fica num invólucro de vidro, que contém gás inerte a baixa pressão. A função do gás é inibir a sublimação do filamento, o que enegreceria o invólucro e encurtaria a vida do filamento. Por outro lado, a pressão do gás e a sua condutividade térmica devem ser suficientemente baixas para reduzir as perdas de calor por condução e convecção. Dessa maneira, o filamento pode atingir altas temperaturas sem se oxidar ou queimar, sem se sublimar, e, com perdas de energia sob forma de calor, por condução e convecção no gás, economicamente aceitáveis.

A potência elétrica transferida de um circuito para o filamento de uma lâmpada, percorrido por uma corrente i_L e sob tensão V_L é dada por:

$$P = V_L i_L \quad (2.3)$$

Ler a **seção 1.2 da apostila de CFE, página 3**, sobre a potência elétrica transferida para um bipolo.

A energia correspondente a essa potência se transforma em calor no filamento, e, em regime estacionário, o calor é transferido do filamento para o meio ambiente.

Quando um corpo é aquecido a uma temperatura T , usualmente ele vai transferir calor para o meio ambiente através dos seguintes mecanismos:

♦ **Emissão de radiação eletromagnética**, conforme a lei de Stefan-Boltzmann (emissão de luz visível, infravermelha ou ultravioleta).

♦ **Condução de calor** aos corpos sólidos adjacentes.

♦ **Condução de calor a um fluido (gás ou líquido) e convecção do fluido aquecido.**

Todos os objetos em equilíbrio térmico irradiam e absorvem energia radiante sob forma de ondas eletromagnéticas. Essa radiação é chamada de radiação térmica e sua fonte é a energia térmica que o objeto possui.

Em 1879 Josef Stefan, baseando-se em dados empíricos, verificou que um corpo aquecido irradia energia a uma taxa proporcional à quarta potência de sua temperatura, ou seja, a potência irradiada é proporcional à T^4 , onde T é a temperatura do corpo. A conclusão foi depois teoricamente provada por L. Boltzmann (1884), usando a **lei de radiação de Kirchhoff** e as **leis da termodinâmica** e resultou na **lei de Stefan-Boltzmann para a radiação de corpo negro**. Para ver com mais detalhes a teoria de radiação de corpo negro e a lei de Stefan-Boltzmann veja no livro **Curso de Física Básica - Ótica, Relatividade e Física Quântica de H. Nussenzveig, seção 7.2, página 246**.

Além da temperatura do corpo, a potência irradiada depende da área da superfície emissora e das propriedades que permitem que um corpo absorva ou emita radiação.

Vamos supor que essas propriedades que permitem que um corpo emita, ou absorva, radiação eletromagnética sejam caracterizadas por um coeficiente de emissão, ϵ , também chamado de **emissividade total**, e um coeficiente de absorção, ν , chamado de **absortividade total**. Precisamos também da definição de um corpo negro. O corpo negro ideal é ao mesmo tempo um emissor e um absorvedor perfeito de radiação.

A emissividade total é uma quantidade adimensional que assume valores entre **0** e **1**. Para uma superfície perfeitamente

refletora, $\epsilon=0$ (espelho perfeito) e, para uma superfície perfeitamente absorvedora, $\epsilon=1$ (corpo negro ideal).

A absorptividade total também é uma quantidade adimensional e assume valores semelhantes à emissividade total. Mas, em geral, a absorptividade total e a emissividade total dependem da temperatura, isto é, são diferentes para temperaturas T e T_0 diferentes.

Convém lembrar que nenhum objeto real é um corpo negro perfeito; carvão negro tem uma absorptividade (e emissividade) quase igual a **1**, mas somente para algumas frequências, que incluem a radiação visível. Sua absorptividade (e emissividade) é muito mais baixa no infra-vermelho distante. Por outro lado, outros objetos, como nós próprios, comportam-se quase como corpos negros perfeitos para a radiação infravermelha, mas certamente não para o caso de frequências mais altas. Para mais informações sobre a teoria da radiação de corpo negro, veja o livro “**Fundamentos de Física Moderna**” de **R. M. Eisberg**, capítulo **2**, ou o livro “**Conceitos de Física Moderna**”, de **A. Beiser**, capítulo **10**, e também “**Physics Calculus**” de **E. Hecht**, capítulo **30**, seção **30.1**, página **1120**.

Conforme a lei de Stefan-Boltzmann a potência que é irradiada para fora de um corpo à temperatura absoluta T , é dada por:

$$P_{em} = \epsilon \sigma_B S T^4 \quad (2.4)$$

na equação acima, σ_B é a **constante de Stefan-Boltzmann**, S é a área da superfície emissora, ϵ é a emissividade total e T é a temperatura em **Kelvin**.

Se o corpo se encontra num ambiente à temperatura T_0 , os corpos vizinhos também emitem radiação eletromagnética de acordo com a mesma lei. Assim o corpo aquecido também estará absorvendo uma potência igual a:

$$P_{abs} = \nu \sigma_B S T_0^4 \quad (2.5)$$

sendo que ν é a absorvidade total e as demais grandezas são as mesmas descritas para a **expressão 2.4**.

Portanto, a potência líquida que é irradiada por um corpo a uma temperatura T , P_{irr} é dada por:

$$P_{irr} = P_{em} - P_{abs} = \sigma_B S (\epsilon T^4 - \nu T_0^4) \quad (2.6)$$

Se o corpo está à mesma temperatura que seus vizinhos, ou seja, em equilíbrio térmico, e a emissividade total é igual à absorvidade total ($\epsilon = \nu$), a potência líquida irradiada é nula. Isto é, a potência emitida pelo corpo é igual à potência que ele absorve.

No caso em que o corpo está a uma temperatura muito maior que a temperatura do ambiente, T_0 , o termo proporcional a T_0^4 fica muito menor que o termo proporcional a T^4 e pode ser desprezado. Nesse caso pode-se considerar que a potência irradiada é dada por:

$$P_{irr} = P_{em} - P_{abs} \approx \epsilon \sigma_B S T^4 \quad \text{para } T \gg T_0 \quad (2.7)$$

Em razão da baixa pressão e da baixa condutividade do gás existente na lâmpada, da geometria do filamento e da lâmpada, vamos considerar, como primeira aproximação, que toda a potência elétrica recebida é irradiada. Além disso, a aproximação acima é válida porque a temperatura do filamento é muito maior que a temperatura do ambiente que o cerca.

O gráfico da **figura 2.4**, a seguir, mostra a relação empírica entre a resistência elétrica, R , e a temperatura, T , de um filamento de tungstênio, (representada pelos pontos) sendo R_0 a resistência desse filamento à temperatura ambiente, T_0 ($T_0 \approx 300^\circ\text{K}$).

Uma função que ajusta razoavelmente bem os dados da **figura 2.4**, da variação da resistência com a temperatura para um filamento de tungstênio, é:

$$\frac{R}{R_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,24}$$

(2.8)

O ajuste obtido com essa função está sobreposto aos dados da **figura 2.4**, representado pela linha cheia.

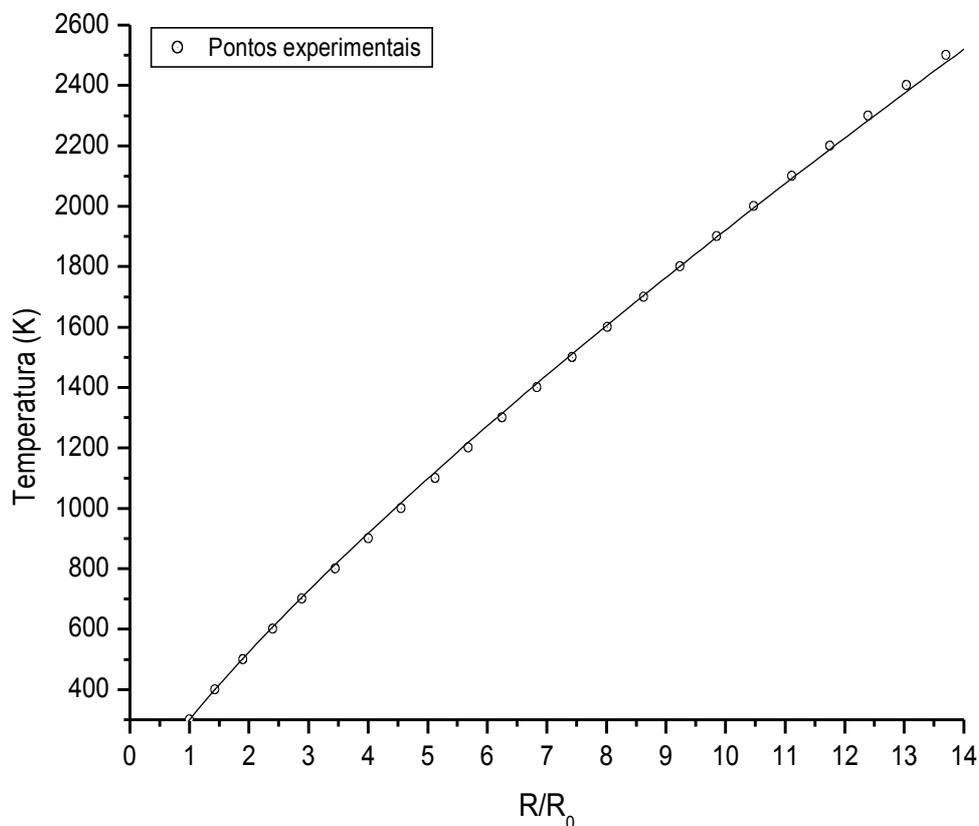


Figura 2.4: Temperatura de um filamento de tungstênio em função da resistência elétrica, conforme dados de Worthington and Forsythe - *Astrophys. J.*, Vol 61, (1925), p. 146.

A partir da curva característica do filamento, pode-se obter a potência elétrica, P_{el} , que foi dissipada no filamento, bem como as resistências R e R_0 . Com esses dados e a **equação 2.8** pode-se fazer uma verificação da dependência da potência irradiada pelo filamento com a temperatura do mesmo, **expressão 2.6**. A **expressão 2.7** pode ser linearizada usando logaritmos:

$$\log P_{el} \approx 4 \log T + b \quad \text{para } T \gg T_0 \quad (2.9)$$

ou seja, $\log P_{el} \times \log T$ deve ser uma reta de coeficiente angular igual a **4**, se as aproximações feitas forem válidas.

Procedimento para medir a curva característica de uma lâmpada de filamento

Os vários tipos de lâmpada são especificados pelos valores nominais da tensão e da corrente de operação. Esses valores são dados para o regime de operação normal. Geralmente, a lâmpada é projetada para suportar tensões bem maiores, mas sua duração nesse caso diminui muito. Entretanto, para obter a curva característica em medições feitas **rapidamente**, pode-se aplicar tensões desde zero até uma tensão **30%** acima da nominal, no máximo.

O circuito sugerido é o mesmo da **figura 2.2** com a lâmpada no lugar do elemento **X**, mas em vez dos voltímetros digitais vamos utilizar os voltímetros da interface para adquirir os dados diretamente no microcomputador.

Calcule qual o valor máximo de corrente e tensão da lâmpada em operação normal e calcule qual seria a potência dissipada ao subir a tensão até o valor nominal. Deve medir pelo menos **20 pontos experimentais** distribuídos de forma a permitir uma boa definição da curva característica da lâmpada. Isso deve ser previsto antes de começar a experiência.

Faça as ligações como indicado na **figura 2.5** a seguir. Nesse circuito a corrente é medida através da tensão em **R_a** (sugerimos **R_a = 100Ω**). Utilize os cabos apropriados para acoplar o canal **A** da interface à **R_a** e o canal **B**, à lâmpada.

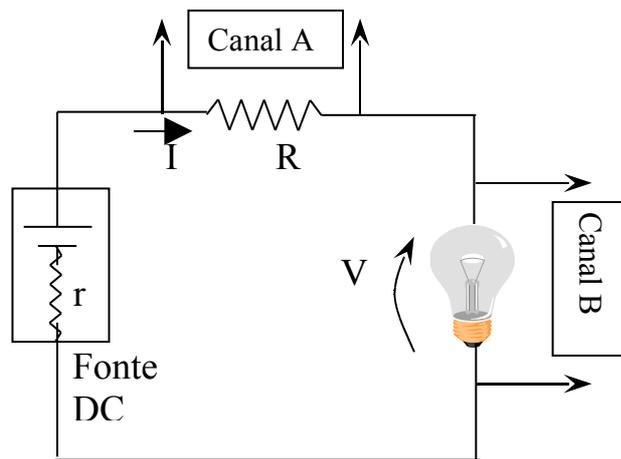


Figura 2.5: Circuito para a medida da curva característica de uma lâmpada de filamento.

Coloque o botão de corrente da fonte no máximo e o botão de tensão em zero.

Para iniciar a tomada de dados, abra no microcomputador o programa **DataStudio** e clique nos seguintes comandos:

create new activities

set up

connect – aparece uma série de instrumentos possíveis, escolha o **voltage sensor** e ligue um no canal **A** (clique no sensor e arraste até o canal **A**, onde está ligada a resistência auxiliar R_a) e outro no canal **B** (onde foi ligada a lâmpada)

graphic para abrir um gráfico

calculate para abrir a janela correspondente e nessa janela definir a corrente como sendo a grandeza x/R_a
definir x que é a voltagem medida no canal **A**

data measurement

arraste a corrente (x/R_a) para a ordenada

arraste a tensão (V do canal **B**) para a abcissa

set up

aparece a figura da interface, com os sensores **A** e **B**

sensor A (o que for feito num deles é transferido para o outro)

aparecem as opções **fast** e **slow**

slow e escolher **5** ou **10** segundos que será o tempo decorrido entre a aquisição de dois pontos, pelo programa **start**

Quando acionar o comando **start** o programa vai começar a adquirir um ponto no gráfico a cada **5** ou **10** segundos, conforme o intervalo escolhido. Assim que for adquirido um ponto o aluno deve subir a tensão da fonte para o próximo valor desejado e assim até o final.

Uma vez terminada a tomada de dados o aluno deve guardar o gráfico e a tabela de dados que também é gerada. Para obter a tabela clicar na palavra **table** da barra de ferramentas à esquerda do gráfico, na tela do **DataStudio**. Vai aparecer uma tabela de cada variável em função do tempo, para se obter a tabela de corrente em função da tensão na lâmpada, basta arrastar o símbolo $i \times V$ da barra, à esquerda do **DataStudio**, para dentro dessa tabela que a tabela desejada aparece.

Tanto o gráfico, quanto a tabela devem constar da folha de dados e do relatório. Não esquecer dos erros experimentais. O voltímetro da interface também tem erro de leitura e esses erros devem ser levados em conta. Veja no manual da interface com seu professor.

Uma vez tendo a curva característica da lâmpada, colocar as barras de erro e traçar uma curva lisa que passe por todos os pontos medidos. Comente a curva obtida, o que acontece com esse tipo de resistor quando a tensão aumenta? E se a tensão aumentar sem que a corrente aumente muito, o que espera que aconteça?

Para a **verificação da validade da lei de Stefan-Boltzmann**, é necessário determinar o valor da resistência da lâmpada à temperatura ambiente, R_0 , para obter o valor da temperatura do filamento, T , para cada valor de R/R_0 . Isso pode ser

feito de várias maneiras e são todas aproximadas, porque só é possível medir resistência elétrica fazendo passar uma corrente pela lâmpada e, quando passa uma corrente, ela vai se aquecer ficando a uma temperatura maior que a ambiente.

Pode-se medir a resistência elétrica da lâmpada com o ohmímetro, a corrente que o instrumento faz passar pela lâmpada deve ser muito pequena. O aluno pode ter uma idéia da ordem de grandeza verificando as características da fonte que o instrumento usa. Essa medida é aproximada, mas não deve estar muito longe do real.

A outra maneira é extrair o valor da curva característica da lâmpada (por extrapolação).

Ainda outra é utilizar o circuito que foi usado para a medida da curva característica da lâmpada, só que vamos colocar uma resistência bem alta no lugar de R_a para limitar a corrente ao menor valor possível de ser medido com um voltímetro digital. O aluno deve calcular o valor dessa resistência, considerando o voltímetro que tem à disposição. E a tensão na lâmpada mede-se com outro voltímetro digital. **Assim temos a corrente e a tensão na lâmpada e podemos calcular o valor de R , que, por ser a corrente muito pequena, vamos considerar que seja R_0 .**

O aluno deve utilizar os três métodos, avaliando o erro que afeta cada um deles e escolhendo o valor que considerar mais confiável, justificando a escolha.

A partir da curva característica calcular a resistência do filamento e a potência elétrica consumida pela lâmpada para cerca de 15 ou 20 pontos igualmente espaçados.

Com esses dados, o valor de R_0 e a equação 2.8, determinar a temperatura correspondente à potência dissipada para os pontos escolhidos acima.

Faça um gráfico para demonstrar a validade da lei de Stefan-Boltzmann, isto é, que a potência varia com a quarta potência da temperatura. Não esquecer as barras de erro.

Pergunta: O comportamento foi o esperado para todos os pontos? Se houve desvio em relação ao comportamento esperado, em que região da curva ocorreu e a que o atribui?

Diodo

O diodo ideal é um dispositivo que conduz perfeitamente a corrente elétrica num sentido (resistência zero) e não conduz no sentido inverso (resistência infinita).

O diodo real se comporta de maneira parecida, isto é, apresenta baixa resistência elétrica para a corrente fluindo num sentido e alta resistência elétrica para a corrente fluindo no sentido inverso.

Atualmente os diodos são construídos de materiais semicondutores como o germânio e o silício. Esses materiais são elementos tetravalentes (possuem 4 elétrons de valência) e podem formar monocristais. Os átomos do cristal se dispõem num reticulado cristalino de modo que cada átomo partilha seus quatro elétrons de valência com quatro outros átomos vizinhos, estabelecendo as chamadas ligações covalentes.

Em temperaturas muito baixas todos os elétrons estarão ligados à rede cristalina e o cristal se comporta como um isolante elétrico, por não dispor de cargas elétricas livres que possam participar da condução de correntes.

À temperatura ambiente ($\approx 300^{\circ}\text{K}$) a energia térmica é suficiente para romper algumas ligações covalentes, libertando um elétron e criando, na rede cristalina, uma vaga para outro elétron. O elétron liberado fica praticamente livre dentro do cristal e passa a se deslocar por acaso, por agitação térmica.

A vaga criada por esse elétron será logo ocupada por um outro elétron que também foi liberado pela agitação térmica, ou seja, a vaga foi transferida para outra ligação covalente. A continuação desse processo mostra que a vaga também migra erraticamente na rede cristalina. Essa vaga, na descrição teórica dos semicondutores, é descrita como uma partícula de carga positiva, igual à carga de um elétron e que chamaremos de lacuna.

Portanto o rompimento de uma ligação covalente cria um par elétron-lacuna que fica livre no interior do cristal. Elétrons e lacunas ao se encontrarem se recombinam desaparecendo como partículas livres. A concentração de elétrons e lacunas depende, portanto, da

temperatura, aumentando rapidamente com o aumento da temperatura. A presença dessas partículas carregadas livres dentro do material faz com que ele apresente uma condutividade elétrica não nula. A condução, exclusivamente por meio dos elétrons e lacunas, no mono-cristal puro é chamada de condução intrínseca e os elétrons e lacunas, nesse caso, são chamados de portadores intrínsecos.

Vamos supor, agora, que se introduza diminutas quantidades de impurezas especiais no cristal (tipicamente 1 impureza para 10^8 átomos do cristal), sem alterar a estrutura cristalina. Se a impureza introduzida for pentavalente (por exemplo, arsênico ou antimônio) cada átomo da impureza ocupará o lugar de um átomo de silício do mono-cristal; quatro de seus elétrons de valência serão absorvidos pelas ligações covalentes do silício e o quinto elétron fica “livre” (sob agitação térmica esse elétron não permanece ligado) no mono-cristal, criando portadores de carga negativos. Esse tipo de impureza torna o cristal um cristal **tipo N** por conter um excesso de portadores de carga **negativa** “livres”.

Por outro lado se substituirmos alguns átomos do cristal por impurezas trivalentes (por exemplo, gálio, boro, índio), uma das quatro ligações covalentes com o átomo de silício não vai se estabelecer, gerando uma lacuna ou portador de carga positiva. Esse tipo de impureza torna o mono-cristal um cristal **tipo P** por possuir um excesso de portadores de carga **positiva** “livres”.

Notar que, em ambos os casos, a **introdução de impurezas mantém o cristal eletricamente neutro**, pois os átomos introduzidos também são neutros. Como a impureza perde um elétron (caso do cristal tipo **N**) ou lacuna (caso do cristal tipo **P**) para a rede cristalina o átomo correspondente fica com carga **positiva** ou **negativa**, respectivamente.

Nos cristais **tipo N** ou **tipo P** a condutividade aumenta devido à presença dos portadores de cargas. Normalmente, para a utilização dos semicondutores os portadores devidos às impurezas devem ser muito mais numerosos que os portadores intrínsecos. Por isso os portadores consequentes de **impurezas** são chamados

de **portadores majoritários** e os **portadores intrínsecos** são chamados de **portadores minoritários**.

Para serem utilizáveis os monocristais de semicondutores devem ser perfeitos a menos das imperfeições controladas devidas à introdução de impurezas.

Quando um mono-cristal **tipo P** é posto em contato com um cristal **tipo N** obtém-se uma **junção P-N**. Quando isso acontece, as lacunas do cristal **P** tendem a se difundir para o cristal **N** onde se recombina e os elétrons da região **N** tendem a se difundir para o cristal **P**, onde também se recombina. Esse processo, que se deve exclusivamente à energia térmica, cria uma zona com carga espacial nas vizinhanças da junção chamada de **camada de depleção**.

A criação dessa região de carga espacial com densidade de carga **negativa** no **cristal P** e densidade de carga **positiva** no **cristal N** estabelece uma **barreira de potencial** nas vizinhanças da junção. Essa barreira de potencial impede o prosseguimento da difusão dos portadores e eventualmente a barreira se ajusta, de modo que, com o cristal em circuito aberto, as correntes pelo cristal se anulam. Esse comportamento está ilustrado nas **figuras 2.6 e 2.7** a seguir:

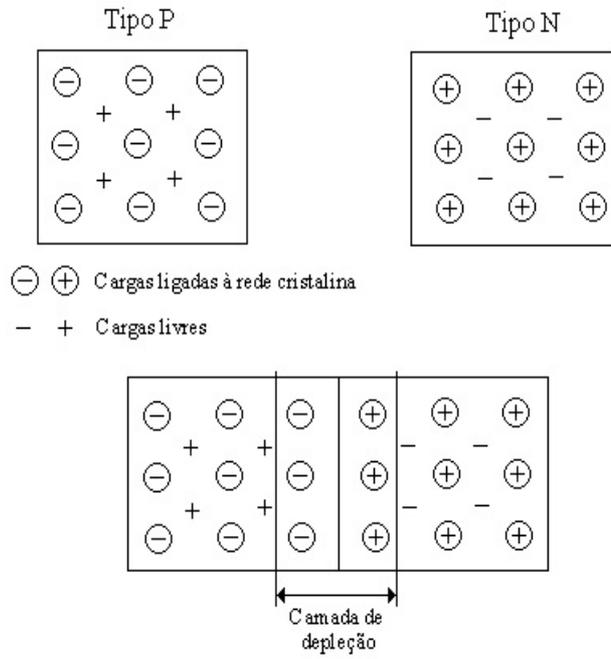


Figura 2.6: Formação de uma junção P-N.

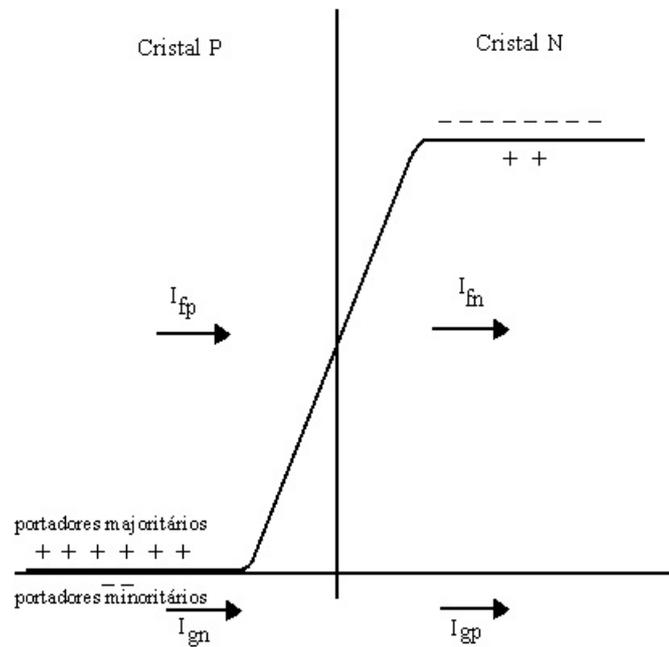


Figura 2.7: Correntes através de uma junção P-N.

Na **figura 2.7** acima, I_{fp} e I_{fn} são as correntes devidas aos portadores majoritários do tipo **P** e do tipo **N**, respectivamente; I_{gp} e I_{gn} são as correntes devidas aos portadores minoritários (intrínsecos) do tipo **P** e do tipo **N**, respectivamente; V_d é a altura da barreira de potencial que se estabelece

Se aplicarmos uma **polarização direta**, que quer dizer, terminal **negativo** da fonte ligado ao lado **N** da junção (que tem excesso de cargas **positivas**) e terminal **positivo** da fonte ligado ao lado **P** da junção (que tem excesso de cargas **negativas**), as correntes majoritárias aumentam rapidamente porque a altura da barreira de potencial diminui e haverá uma corrente circulando pelo cristal. Se aplicarmos uma **polarização inversa**, ou seja, terminal **negativo** da fonte ligado ao lado **P** da junção (que tem excesso de cargas **negativas**) e terminal **positivo** da fonte ligado ao lado **N** da junção (que tem excesso de cargas **positivas**) a altura da barreira de potencial cresce diminuindo a circulação de corrente de portadores majoritários, que atinge rapidamente um valor desprezível. Nessas condições vai predominar a corrente de portadores minoritários que é função só da temperatura. Essa corrente é chamada de **corrente de saturação**. Veja na **figura 2.8** a altura da barreira dependendo da ligação da fonte.

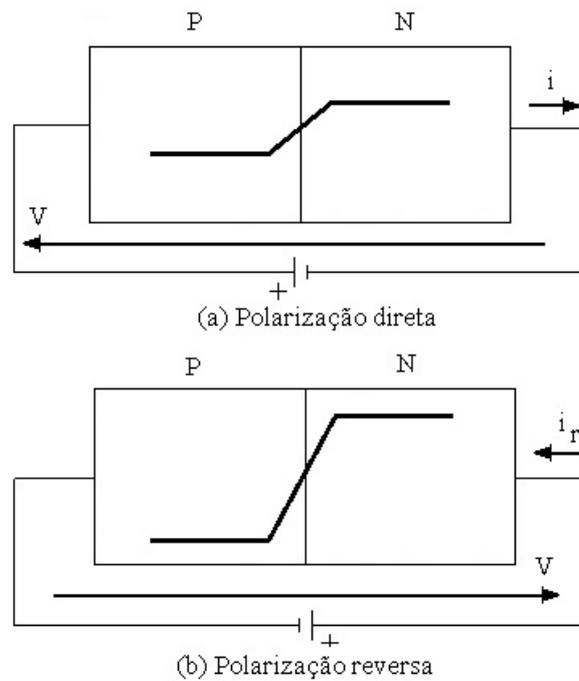


Figura 2.8: Polarização direta e inversa numa junção P-N.

Um estudo mais detalhado do funcionamento das junções P-N pode ser encontrado no livro **“Circuitos Eletrônicos”** de **L. Q. Orsini**, capítulo 2, seções 2.4; 2.5; 2.6 a partir da página 26. Há também o livro **“A Física da Eletrônica do Estado Sólido”** de **J. N. Shive**, capítulo 5.

O estudo quantitativo dos fenômenos que ocorrem na junção P-N conduz à seguinte relação entre a corrente de polarização direta, i_D , e a tensão, V , aplicada:

$$i_D = i_S \exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) + i_{reco} \exp\left(\frac{qV}{mk_B T}\right) \quad (2.10)$$

nessa equação, i_S é a corrente de saturação da junção; q é a carga do elétron; V é a voltagem aplicada à junção; k_B é a constante de Boltzmann; T é a temperatura do material da junção; i_{reco} é a corrente de recombinação de saturação; m é uma constante que dá

uma medida do efeito de recombinação de cargas na junção, na maioria dos diodos, $m=2$.

Em geral a corrente de recombinação é dominante para baixos valores de tensão direta aplicada, V , para diodos de silício em temperatura ambiente (ou abaixo). Para valores mais altos de tensão o termo cuja exponencial é $(qV/k_B T)$ domina porque ele cresce mais rapidamente que o termo $(qV/mk_B T)$, porque, em geral, $m=2$.

A teoria completa que leva à dedução da **equação 2.10** é algo complicada e não vamos considerá-la aqui, mas para os interessados está no livro **Physics of Semiconductor Devices** de **M. Shur, capítulo 2, página 140**.

Resumindo o que foi discutido acima, a curva característica do diodo em polarização direta, de acordo com a **equação 2.10**, pode apresentar dois regimes dependendo do grau de recombinação de cargas que ocorre na junção. E dependendo do valor da corrente de polarização direta que se atinge. Isso vai ser verificado experimentalmente.

Como já foi dito, um diodo real apresenta várias limitações, tais como, tensão direta não nula, o que significa que a resistência direta não é nula; resistência reversa finita, significando que existe uma pequena corrente reversa; e a existência de um valor máximo para a tensão reversa, além do qual o diodo conduz significativamente.

Há informações sobre diodos e suas curvas características também na **Apostila de CFE, 1ª parte, capítulo 3, seção 3.3, página 30**.

Procedimento para a medida da curva característica do diodo

Colocar o diodo no circuito da **figura 2.2** no lugar do elemento **X**.

A tensão sobre a resistência auxiliar, R_a , deve ser medida pelo voltímetro da interface, no canal **A** e a voltagem (polarização direta) sobre o diodo, no canal **B** da interface. Fazer as ligações como foram feitas para o caso da lâmpada.

Em vez de usar a fonte de tensão contínua que utilizamos para a resistência e para a lâmpada, poderíamos usar o gerador de funções da interface. Uma das possibilidades que esse gerador oferece é a função “**rampa**”, que começando do zero sobe a tensão continuamente até um determinado valor. Essa função poderia ser utilizada para obter a curva característica do diodo de maneira automática. Então, as saídas do circuito para a fonte devem ser ligadas, com os cabos apropriados, nas saídas da “**rampa**” da interface (as duas da extrema direita).

Em seguida abrir o programa **DataStudio** e repetir o procedimento que foi feito para o caso anterior com a diferença que temos que definir as características da fonte. Depois de definir os eixos do gráfico, clicar novamente no “**set up**” e a seguir clicar no “**function generator**”, cujo símbolo é (~). Abre-se uma janela com os tipos de função disponíveis, escolher o “**positive ramp up**” e a seguir definir os parâmetros da rampa:

- $V_{\text{máx}} = 5V$
- e o intervalo de tempo em que quer que a rampa chegue no valor máximo definido acima. Esse intervalo é dado em termos de frequência, por exemplo, se definir que é **0,05Hz**, a interface chega ao máximo da rampa em **20s**.

Voltar ao “**set up**”, abrir a figura com a interface e os sensores **A** e **B** e clicar num deles. Aparecem as opções “**fast**” e “**slow**”, escolher a “**fast**”. O programa vai pedir que coloque a frequência

com que os dados devem ser armazenados, se colocar, por exemplo, **1Hz**, o programa vai armazenar **20 pontos** em **20s**.

Assim que der o comando “**start**”, automaticamente uma curva característica do diodo é armazenada, definida pelos parâmetros que o experimentador forneceu. Talvez haja pontos demais na curva, ou de menos, portanto, os parâmetros do programa devem ser ajustados como for melhor para o estudo do elemento em questão.

Da mesma forma, como foi feito para a lâmpada, devem ser guardados tanto o gráfico da curva característica, quanto a tabela correspondente (**$i \times V$**).

Se a curva característica de um diodo é descrita pela **equação 2.10**:

$$i_D = i_S \exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) + i_{rec} \exp\left(\frac{qV}{mk_B T}\right) \quad (2.10)$$

como foi discutido, ela tem dois regimes distintos descritos pelas duas exponenciais. Então, se linearizarmos a curva característica experimental, podemos verificar se um desses regimes está predominando porque nesse caso vai se observar uma reta com um coeficiente angular relacionado a um ou outro desses regimes. O valor desses coeficientes deve corresponder a (**$q/k_B T$**) num caso e (**$q/mk_B T$**) no outro, com o valor esperado de **$m=2$** e **$T = 300^\circ\text{K}$** (temperatura da junção é a temperatura ambiente). Caso não obtenha uma reta, provavelmente os dois regimes estarão presentes, nesse caso tente linearizar separadamente a parte dos dados correspondentes às correntes mais baixas da parte correspondente às correntes mais altas. Fazer o gráfico apropriado para verificar quantitativamente esses coeficientes.

Discutir as propriedades da curva característica obtida. Ela está de acordo com a curva esperada para o diodo em polarização direta? Os dois regimes mencionados foram observados? Os valores dos coeficientes das exponenciais estão de acordo com o esperado? Caso haja discrepâncias discuti-las.

Pilha

A pilha é um gerador que converte energia química em energia elétrica. Um gerador é qualquer dispositivo que possa gerar e manter uma tensão elétrica a partir da conversão de outras formas de energia. Para informações mais detalhadas sobre geradores veja o **capítulo 2 da Apostila de Complementos de Física Experimental de J. C. Vuolo, página 11.**

A pilha seca foi inventada por Georges Lelanché em 1866. Esquemáticamente, ela consiste de dois eletrodos, em forma de barra, imersos em solução de sulfato de cobre, um de zinco e outro de cobre. As duas barras encontram-se interligadas eletricamente mediante um fio. Este dispositivo forma uma pilha.

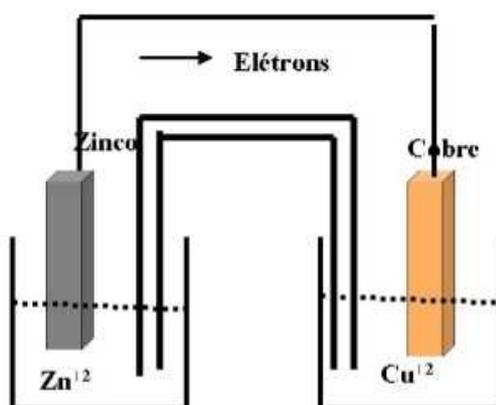


Figura 2.9: Modelo esquemático de pilha eletroquímica.

As barras de zinco e de cobre são denominadas eletrodos e fornecem a superfície na qual ocorrem as reações de oxidação e de redução. Se os eletrodos de zinco e de cobre forem ligados entre si, por meio de um circuito externo, haverá um escoamento de elétrons através desse circuito, do eletrodo de zinco para o de cobre, em cuja superfície se recombina com os íons Cu^{++} .

Normalmente a pilha é cilíndrica com eletrodos cilíndricos e concêntricos com uma parede permeável ou uma ponte salina (com ponte salina de cloreto de potássio, os íons Cl^- migram em direção

ao ânodo e os íons K^+ migram em direção ao cátodo) que faz o contato entre os dois eletrodos.

O terminal positivo é um metal preso a um pedaço de grafite, um bom condutor elétrico, e é cercado por uma pasta contendo cloreto de amônia e dióxido de manganês como oxidante. Os elétrons fluem da célula ao aparelho que queremos fazer funcionar, o zinco é oxidado e os íons amônio do cloreto de amônia são reduzidos.

Os produtos da reação de oxidação-redução misturam-se na pasta dentro da bateria, tornando impossível a recarga da bateria e a reversão da reação.

Baterias nas quais a energia química simplesmente é guardada chamam-se baterias primárias. Muitas baterias usadas para rádios, brinquedos, calculadoras, etc, são baterias primárias.

Outra bateria primária é a bateria alcalina. Pilhas alcalinas secas são semelhantes às pilhas de Lelanché, exceto que a mistura de eletrólitos contém hidróxido de potássio como base forte e a área superficial de zinco é aumentada.

O objetivo é construir e testar um modelo que descreva satisfatoriamente o funcionamento da pilha como gerador.

Um gerador ideal é aquele que fornece sempre a mesma diferença de potencial independente da carga. Em outras palavras, ele mantém a diferença de potencial para qualquer valor de corrente. Esse gerador não existe, é um modelo que é útil quando se vai modelar um gerador real. O modelo mais simples de gerador real consiste de um gerador ideal de força eletromotriz, associado em série a uma resistência, que representa a resistência interna total do gerador. Veja a descrição de um modelo simplificado de gerador na **página 16** da **Apostila de CFE volume 1, seção 2.3**.

Procedimento para o levantamento da curva característica de uma pilha.

Quando se quer levantar a curva característica de um elemento de circuito temos que variar a corrente nesse elemento e medir a variação correspondente de tensão sobre o mesmo. No caso da curva característica de uma pilha, que é um gerador de tensão constante, a variação da corrente se dá pela variação da resistência do circuito. Com o cuidado de garantir que, em nenhuma hipótese, vai-se colocar o gerador em curto. Ou seja, a resistência do circuito não pode jamais cair para valores muito baixos de maneira que o gerador em questão não suporte a corrente.

Tendo em vista as considerações acima, propõe-se o circuito da **figura 2.10** a seguir para a medida da curva característica da pilha.

O circuito consiste de um potenciômetro de $0 \rightarrow 11\Omega$, uma resistência auxiliar de 10Ω , dois voltímetros e a pilha. A corrente pode ser medida através da medida da tensão sobre a resistência auxiliar, que também garante que a pilha não vai ser colocada em curto-circuito quando o potenciômetro estiver com a resistência baixa. Os voltímetros serão os voltímetros dos canais **A** e **B** da interface **Pasco (voltage sensor)**. Antes de começar as medidas, ter certeza de que as resistências internas desses voltímetros não introduzem erro no circuito.

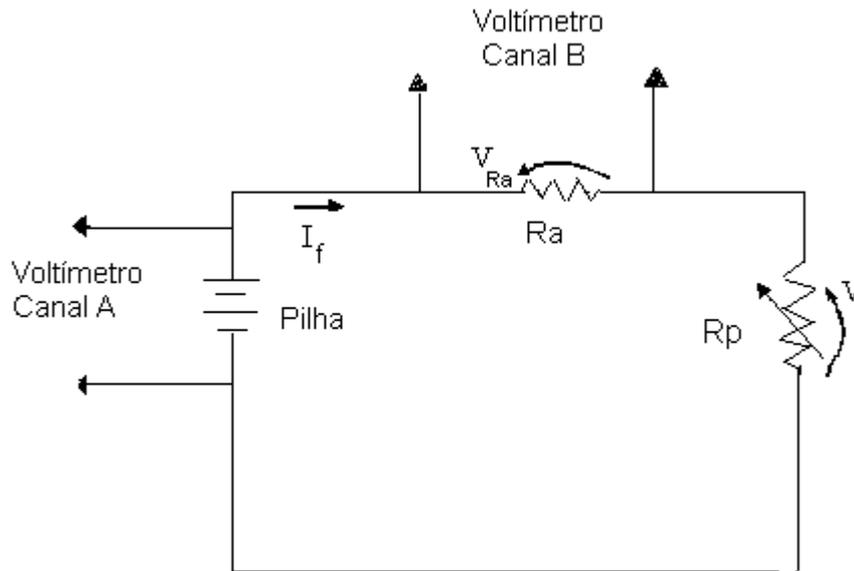


Figura 2.10: Circuito proposto para o levantamento da curva característica da pilha.

Variar a resistência do potenciômetro e anotar as tensões sobre a pilha e sobre a resistência auxiliar. Tomar um mínimo de dez pontos. Anotar os erros experimentais.

Construir a curva característica da pilha com as barras de erro. Desse gráfico, **obter o valor da resistência interna da pilha (R_{int})**. Também desse gráfico, da curva característica, **obter o valor da corrente de curto-circuito da pilha (i_{cc})**. Todos os valores obtidos devem estar acompanhados dos respectivos erros. **Compare esses valores com os correspondentes obtidos pelo resto da classe.** Essa comparação deve constar do relatório.

Exercício:

Calcular a potência elétrica dissipada na resistência “de carga” do circuito que consideraremos como sendo a resistência R_a mais a resistência do potenciômetro R_p , em função da resistência de carga

do circuito ($R_a + R_p$). Para qual valor da resistência de carga a transferência de potência da pilha para o circuito é máxima? Considere a força eletromotriz da pilha como sendo \mathcal{E} e sua resistência interna igual a R_{int} . Este exercício deve constar do seu relatório.

Para a tomada de dados, uma vez montado e ligado o circuito à interface, abrir o programa **DataStudio**, “clikando” nos seguintes comandos:

“**create new activities**”

“**set up**”

“**connect**” – aparece uma série de instrumentos possíveis, escolha o “**voltage sensor**” e ligue um no canal **A** (clique no sensor e arraste até o canal **A**, onde está ligada a pilha) e outro no canal **B** (onde está ligada a resistência R_a)

“**graphic**” para abrir um gráfico

“**calculate**” para abrir a janela correspondente. Aqui temos um problema que é um ruído que não é captado pelos multímetros, mas é captado pela interface. Para contornar esse problema vamos definir funções médias sobre um determinado intervalo de tempo, para i e para V_{pilha} . Com isso as curvas ficam aceitáveis (mais “lisas” e **deve-se atribuir erros levando em conta esse efeito**). Dentro da “**calculate**”:

“**special function**”

“**smooth**” que vai fazer uma média. Definir a corrente como sendo a grandeza **smooth (n,x)/ R_a** onde **n** é o número de pontos sobre o qual se faz a média. Definir **x** que é a voltagem medida no canal **B**.

Repetir o procedimento para V_{pilha} : **Smooth(n,x)** onde **x** é a voltagem no canal **A**. O valor de **n** deve ser o conveniente. Leia o procedimento até o fim, tem um exemplo.

“**data measurement**”

arraste a corrente para a abscissa
arraste a tensão V_{pilha} para a ordenada

“**set up**”

aparece a figura da interface, com os sensores **A** e **B**

“**sensor A**”

(o que for feito para um deles é transferido para o outro automaticamente) aparecem as opções “**fast**” e “**slow**” colocar

“**fast**”

e escolher a frequência adequada, que será a frequência de aquisição de pontos, pelo programa. Se o intervalo de aquisição for **20 segundos**, com uma frequência de **5Hz**, teríamos **100** pontos.

Mas como vai se fazer uma média sobre **n** pontos, se **n=10**, vamos ter **10 pontos** na curva. O aluno deve escolher esses valores como for mais conveniente.

“**start**”

da mesma forma que para o caso da lâmpada, quando acionar o comando “**start**” o programa vai começar a adquirir um ponto no gráfico a cada **5** ou **10 segundos**, conforme o intervalo escolhido. Assim que for adquirido um ponto o aluno deve ajustar o potenciômetro para mudar a corrente no circuito para o próximo valor desejado, e assim até o final.