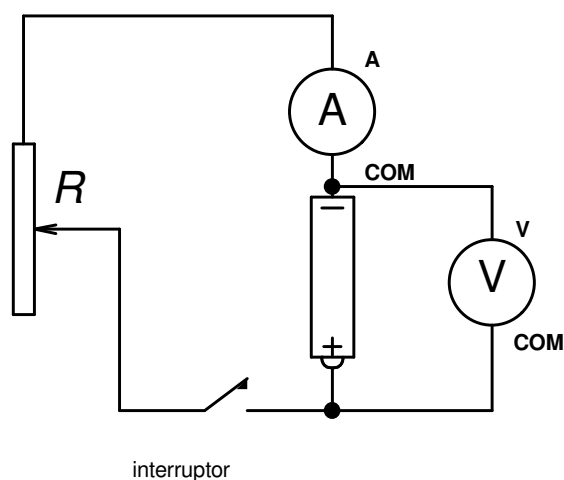


Força Eletromotriz e Fontes

As fontes de alimentação elétrica são de fundamental importância em qualquer circuito elétrico. As experiências desta semana exploram os conceitos relacionados: força eletromotriz, resistência interna de uma fonte, fontes ideais de voltagem e corrente.

Tarefa 1:

Fig. 1 Circuito para determinar a relação entre corrente e voltagem de uma pilha.

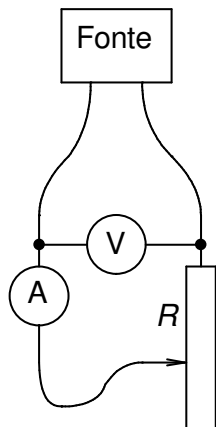


- Monte o circuito da figura 1 usando o potenciômetro linear como resistor variável (reostato). Use o próprio fio de laboratório com “conector banana” como interruptor.
- Meça a voltagem com o interruptor aberto (isto é, com $I = 0$).
- Prepare uma folha de papel milimetrado para desenhar os valores de tensão (eixo horizontal) e corrente (eixo vertical) nas medidas com o circuito da figura 1.
- Meça as voltagens e correntes para várias posições do reostato começando com grandes valores de R . Em cada medida feche o circuito apenas por poucos segundos para não gastar a pilha. Termine com um R que corresponde apenas à resistência dos fios e da resistência interna do amperímetro. Depois de cada medida desenhe o ponto experimental no gráfico e use esta representação para escolher os valores apropriados das posições do potenciômetro.
- Faça agora as medidas do item c) em ordem inversa, começando com $R \approx 0$ e terminando com $R = \infty$. Represente os valores da voltagem na mesma folha gráfica com símbolos diferentes.
- Ajuste uma reta nos dados da ida ou da volta e use esta reta para determinar a resistência interna da pilha.

Tarefa 2:

- a) Regule a fonte regulável numa voltagem de 10V e coloque o botão da direita (limitação de corrente) numa posição entre 0 e 0,2 A que corresponde aproximadamente ao valor de 0,1A.
- b) Sem alterar as posições dos botões da fonte, monte o circuito da figura 2.

Fig. 2 Circuito para determinar I versus V para a fonte estabilizada.



- c) Determine a curva I versus V para a fonte e indique no gráfico as regiões nas quais a fonte opera como uma fonte ideal de voltagem e como uma fonte ideal de corrente. Varie apenas as posições do contato central do reostato sem alterar os botões da fonte.

Tarefa 3: Amarre um fio de cobre num fio de constantan¹ torcendo os dois fios. Ligue os outros extremos destes fios num

voltímetro com fundo de escala mais sensível. Depois esquite a junção dos dois fios com uma chama de vela e observe as voltagens indicadas no voltímetro. Tente também com dois fios do mesmo material.

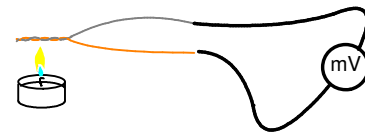


Fig. 3 Termopar

Tarefa 4: Escreva um relatório sucinto sobre os resultados das tarefas 1, 2 e 3.

Explicações sobre os conceitos envolvidos nas experiências

Força Eletromotriz e resistência interna de uma fonte

Lembremos da lei de Ohm, que dizia que a corrente num condutor é proporcional à voltagem $I \propto V$. Poderíamos encarar esta lei ainda de outra forma: a corrente que se estabelece num condutor vai depender de alguma forma da voltagem que existe no condutor $I = F(V)$ com alguma função F . Se esta função for matematicamente bem comportada deve ser possível desenvolvê-la numa série de Taylor, ou seja, deve ser possível escrevê-la como uma série de potências de V :

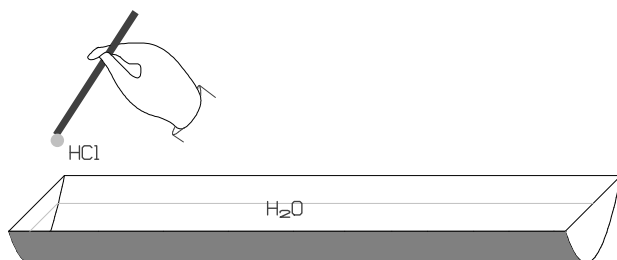
$$I(V) = a_0 + a_1V + a_2V^2 + a_3V^3 + a_4V^4 + \dots \quad (4.1)$$

A lei de Ohm simplesmente diz que, para as voltagens normalmente empregadas no laboratório, os termos quadráticos, cúbicos, etc. são desprezíveis. Então ficamos com uma

¹ Constantan é uma liga especial que tem resistividade que muda pouco com a temperatura (fica constante daí o nome).

dependência linear. - Cuidado! - Vamos pensar melhor: argumentamos de forma um pouco generosa demais. Desprezar os termos quadráticos, cúbicos, etc. não significa que a corrente seja proporcional à voltagem. Ainda tem o termo de ordem zero que denominamos de a_0 na expansão (1). Bem, poderíamos dizer: o a_0 é naturalmente zero, pois este termo corresponderia a uma corrente que flui mesmo não tendo voltagem alguma no condutor. Sem voltagem os portadores de carga não teriam motivo para fluir. Então com esta suposição natural teríamos a lei de Ohm $I(V) = a_1 V$. O coeficiente a_1 seria o inverso da resistência do condutor: $a_1 = 1/R$.

Será que a suposição $a_0 = 0$ é mesmo sempre válida? A resposta é **não!** Além de campos elétricos existem outras causas para um fluxo de carga elétrica. Uma causa não elétrica de corrente elétrica é chamada de *força eletromotriz*. Este nome é um tanto infeliz porque na maioria dos casos não se trata de forças no sentido da segunda lei de Newton. Um nome mais apropriado seria *causa eletromotriz*.



Vejam alguns exemplos de força eletromotriz: imagine que você deixa uma gota de ácido clorídrico cair numa das extremidades de uma canaleta cheia de água.

Fig. 4 Força eletromotriz numa canaleta de água.

Na água, o ácido dissocia-se em H^+ e Cl^- . Estes íons sofrem a ação da agitação térmica e com isto se espalharão pela água da canaleta. Acontece que este processo de *difusão* é muito mais rápido para os íons de H^+ do que para os íons Cl^- . Nos primeiros minutos após ter deixado a gota de ácido cair na água, poderíamos até desprezar a difusão do Cl^- completamente. A difusão dos íons de H^+ constitui uma corrente cuja causa não seria um campo elétrico, mas a simples agitação térmica junto com a condição inicial que todos os íons estavam inicialmente localizados numa extremidade da canaleta. Este exemplo de força eletromotriz tem duas características em comum com muitas outras forças eletromotrices: 1) o sistema está fora do equilíbrio termodinâmico e 2) há dois processos que levam o sistema para o equilíbrio (a difusão de H^+ e a difusão de Cl^-) e um dos dois é muito mais lento que o outro.

Vejam um outro exemplo, o da pilha comum. Imagine que você joga um pedacinho de zinco (Zn) num recipiente de ácido, tampa o recipiente e guarda-o por muito tempo, digamos alguns anos. Após um tempo suficiente o zinco teria desaparecido, teríamos íons de zinco na solução Zn^{2+} , encontraríamos hidrogênio e o número de íons de hidrogênio do ácido teria diminuído. Teria acontecido a seguinte reação química:



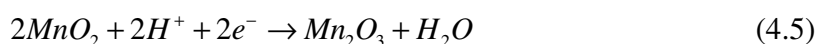
Esta reação consiste de duas partes:



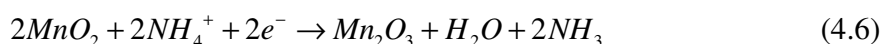
e



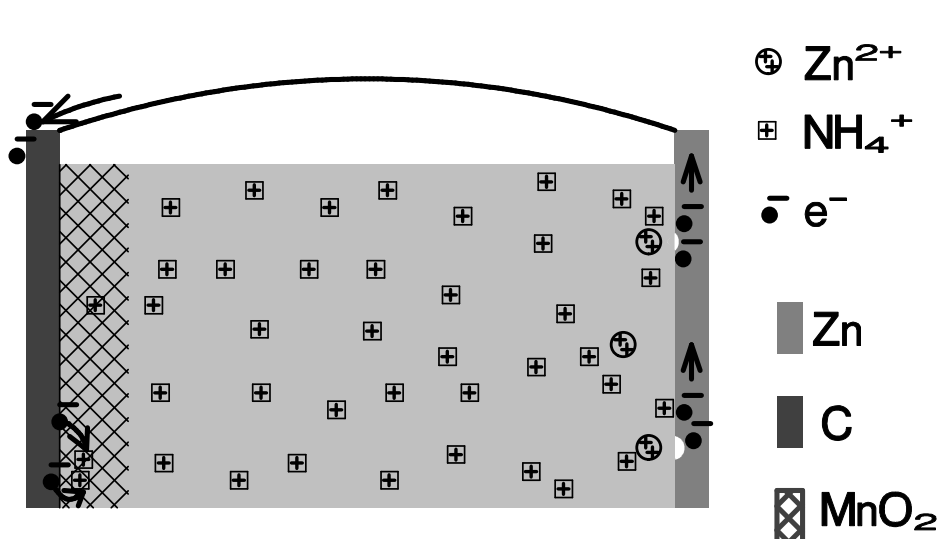
Acontece que a segunda parte (4.4) é lenta, devido ao fato que os elétrons do zinco teriam que vencer uma barreira de energia potencial antes de se ligar nos prótons H^+ . O segredo da pilha é um agente que acelera a segunda parte, isto é, a transformação de H^+ numa espécie eletricamente neutra, e que este agente é colocado espacialmente separado da região onde acontece a reação (4.3). Este agente é um eletrodo de grafite, que fornece os elétrons, junto com a substância oxidante MnO_2 , que fica em torno do eletrodo. A reação seria a seguinte:



O ácido usado é o NH_4Cl , e a reação (4.5) seria mais precisamente



Se ligássemos um fio grosso de cobre entre grafite e zinco poderíamos observar uma corrente elétrica saindo da grafite, que corresponde a um fluxo de elétrons passando do cobre para a grafite, aqueles que entram no lado esquerdo da equação (4.6). No lado do zinco observaríamos uma corrente entrando na pilha que corresponde a elétrons do lado direito da reação (4.3). Estas correntes iriam parar em pouquíssimo tempo, sendo freadas por campos elétricos, se não existisse uma corrente elétrica no seio do eletrólito. Esta corrente seria uma corrente de difusão dos íons Zn^{2+} e NH_4^+ . Na medida em que a reação (4.3) joga íons de zinco na solução e com isto cria uma concentração alta destes íons perto do zinco, a agitação térmica tem mais probabilidade de afastar um íon Zn^{2+} do zinco do que aproximar um destes íons do metal. Com os íons de NH_4^+ acontece algo análogo: na medida que a reação (4.6) elimina íons de NH_4^+ na região perto do carbono, a agitação térmica tem mais probabilidade de aproximar um íon NH_4^+ do grafite do que afastar um. A figura 5 mostra estes processos simbolicamente:



Para evitar que o MnO_2 saia da região do eletrodo de grafite e para evitar problemas de vazamentos

de líquidos, todo eletrólito é misturado com amido formando uma massa pastosa. Esta pilha foi inventada por George Laclanché, em 1865. A tabela mostra ainda outras pilhas usadas.

Nome	Reações	Voltagem
Pilha Alcalina	$Zn + 2OH^- \rightarrow ZnO + H_2O + 2e^-$ $2MnO_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow Mn_2O_3 + 2OH^-$	1,5V
Bateria de Chumbo	$Pb + SO_4^{2-} \rightarrow PbSO_4 + 2e^-$ $PbO_2 + SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e^- \rightarrow PbSO_4 + 2H_2O$	2V
Pilha de Mercúrio	$Zn + 2OH^- \rightarrow ZnO + H_2O + 2e^-$ $HgO + H_2O + 2e^- \rightarrow Hg + 2OH^-$	1,5V
Bateria de Níquel-Cádmio	$Cd + 2OH^- \rightarrow Cd(OH)_2 + 2e^-$ $2NiO(OH) + 2H_2O + 2e^- \rightarrow 2Ni(OH)_2 + 2OH^-$	1,4V
Pilha de Lítio	$2Li \rightarrow 2Li^+ + 2e^-$ $I_2 + 2e^- \rightarrow 2I^-$	2,8V
Célula de Combustível	$2H_2 + 4OH^- \rightarrow 4H_2O + 4e^-$ $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$	1V

Como podemos ver, a maioria destas células eletroquímicas emprega substâncias altamente tóxicas e poluentes. Com exceção das pilhas comuns, como regra geral, não devemos desmontar baterias. **Baterias de telefones celulares, calculadoras, filmadoras etc. não devem ser jogadas no lixo e muito menos no mato, nos rios ou outros lugares fora do nosso controle!!!!**

Discutimos a pilha comum numa situação de curto circuito, isto é, com um fio condutor ligado entre grafite e zinco. Se tirarmos este fio, os movimentos dos íons descritos acima carregarão a grafite positivamente e o zinco negativamente. O campo elétrico gerado por estas cargas atuará sobre os íons com uma força elétrica (força no sentido da segunda lei de Newton) e esta força se opõe ao fluxo químico. Rapidamente se estabelece um equilíbrio no qual a corrente elétrica será zero. Com a equação (4.1) e desprezando os termos de ordem superior teríamos para este equilíbrio

$$0 = I = a_0 + a_1 V_{EQUIL.} \quad (4.7)$$

e a voltagem entre zinco e grafite seria

$$V_{EQUIL.} = -\frac{a_0}{a_1} \quad (4.8)$$

O negativo da voltagem de equilíbrio é chamado de *valor da força eletromotriz* ou simplesmente *força eletromotriz*, geralmente escrito com o símbolo \mathcal{E} .

$$\mathcal{E} \stackrel{\text{def.}}{=} -V_{EQUIL.} = \frac{a_0}{a_1} \quad (4.9)$$

O inverso do coeficiente a_1 é chamado de resistência interna da pilha:

$$R_{\text{int}} \stackrel{\text{def.}}{=} \frac{1}{a_1} \quad (4.10)$$

Usando estas grandezas e desprezando os termos de ordem superior, a equação (4.1) toma a forma

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_{\text{int}}} + \frac{1}{R_{\text{int}}} V \quad (4.11)$$

De acordo com esta equação a resistência interna da pilha é o inverso da inclinação da reta de ajuste do gráfico da tarefa 1f.

Quando queremos verificar a lei de Ohm ou medir, no caso geral, a função $I = F(V)$ para um condutor, usamos o seguinte circuito:

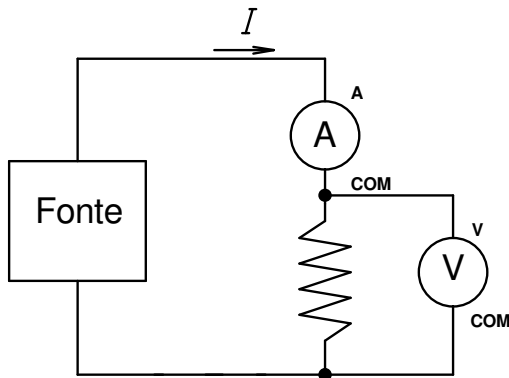


Fig. 6 Circuito para medir as características de um condutor.

O mesmo circuito pode ser usado para medir a dependência da corrente com a voltagem no caso em que o condutor é uma pilha. Basta substituir o resistor da figura 6 pela pilha. Se nos limitarmos a voltagens no intervalo $[-\mathcal{E}, 0]$ podemos até simplificar o circuito e substituir a fonte de alimentação por um resistor, pois a própria pilha vai fornecer a corrente. Para obter vários pontos de medida pode-se variar o valor deste resistor utilizando um reostato. Então resulta o circuito da figura 1.

Para obter vários pontos de medida pode-se variar o valor deste resistor utilizando um reostato. Então resulta o circuito da figura 1.

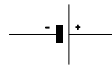
Cabe um comentário sobre a escolha das orientações dos instrumentos de medida:

A orientação do amperímetro e voltímetro no circuito da figura 1 é escolhida tal que as correntes medidas serão positivas enquanto as voltagens serão negativas, dando origem a um gráfico no segundo quadrante (como o da figura 7). Por que esta escolha estranha? Tratamos aqui a pilha como um condutor qualquer e devemos adotar a mesma convenção que usamos na experiência da lei de Ohm. Num resistor o produto de voltagem e corrente mede a potência transferida **para** o condutor. No caso de uma pilha (no uso comum dela como fonte) esta potência é negativa, pois o fluxo de energia é do condutor para o campo eletromagnético, inverso do caso do resistor. Conseqüentemente o produto VI deve ser negativo no caso da pilha e V e I tem sinais opostos.

Você encontrará que a aproximação de desprezar os termos de ordem superior da equação (1) no caso da pilha não é uma aproximação excelente. Além disso, pode ocorrer que as

medidas da tarefa 1e não fiquem na mesma linha das da tarefa 1d. Isto indica que a pilha mostra efeitos de memória. O fato que a pilha já fora usada em medidas, altera as medidas subseqüentes. Isto significa que neste caso a corrente não é apenas uma função da voltagem, mas depende também da história da pilha. No entanto, como uma aproximação grosseira, podemos ajustar uma reta nos pontos.

A figura 7 mostra as relações I versus V de uma pilha de resistência interna baixa e de uma pilha de resistência interna alta. Como podemos ver, na pilha de resistência interna baixa a corrente pode variar muito sem alterar a voltagem apreciavelmente. Esta é certamente uma propriedade de uma boa pilha. O caso idealizado de uma bateria de resistência interna nula chama-se uma *fonte ideal de voltagem*. Usa se o símbolo



para este tipo de fonte. Uma fonte de voltagem ideal mantêm sempre a mesma voltagem nos seus terminais independente da corrente.

Pode-se pensar ainda num caso ideal oposto a este: uma fonte que fornece sempre a mesma corrente independente da voltagem. Este tipo de força eletromotriz idealizada é chamada *fonte de corrente ideal*. O símbolo usado é

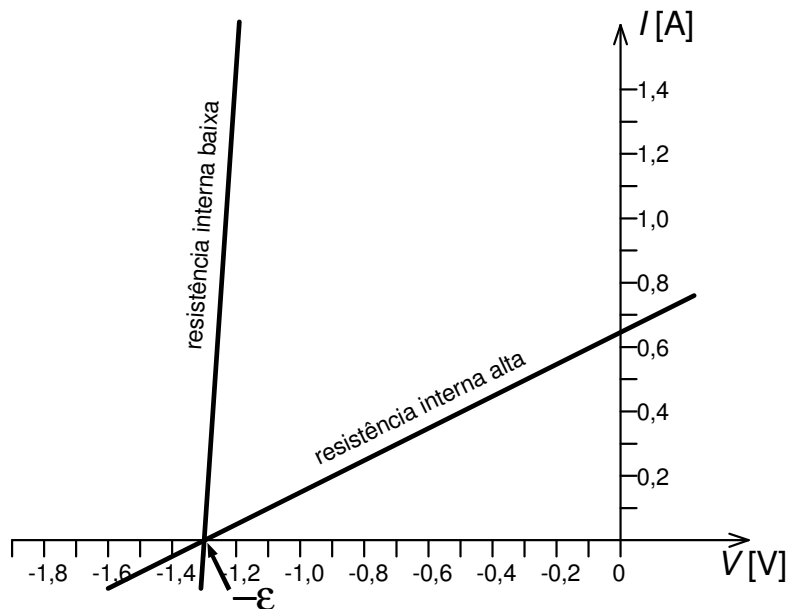
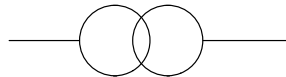


Fig 7 Curvas de I versus V de duas pilhas, uma com resistência interna baixa e outra com resistência interna alta.

Uma maneira de construir uma fonte de corrente quase ideal é usar uma fonte de voltagem muito alta e colocar um resistor muito grande em série.

Hoje em dia pode-se chegar bem perto dos casos ideais com fontes eletronicamente estabilizadas. O nosso laboratório de Física III usa fontes que podem funcionar como fontes

de voltagem ou fontes de corrente. Com os botões da esquerda podemos escolher a voltagem desejada da fonte de voltagem. Um medidor interno verifica se a voltagem nos terminais corresponde ao valor escolhido e um circuito regula esta voltagem para eliminar um possível desvio. Se ligarmos um resistor na fonte, fluirá a corrente V/R . Se diminuirmos o valor do resistor cada vez mais esta corrente sobe até chegar num valor limite. A partir deste valor uma diminuição do resistor não alteraria mais o valor da corrente. Isto significa que, a partir deste ponto, a fonte funciona como uma fonte de corrente. O valor da corrente limite pode ser escolhido com os botões da direita. Na tarefa 2 você pode conhecer um pouco melhor as nossas fontes reguladas do laboratório.

Potenciais de contato, efeito termo-elétrico e revisão crítica dos voltímetros

Quando resolvemos problemas de eletrostática com a presença de corpos metálicos é frequente encontrar situações com descontinuidades do campo elétrico na superfície de um metal. Por exemplo, podemos ter um campo elétrico diferente de zero fora de um objeto metálico carregado e dentro do metal vale $\vec{E} = 0$. Exatamente na superfície o campo seria indefinido. Esta situação seguramente não corresponde à verdade. O campo deve ser definido em todos os pontos do espaço e ele deve ser sempre uma função contínua. Qual é a origem do resultado errado no tratamento teórico da eletrostática de metais? Nas aulas de Física III argumentamos que dentro de um metal temos que ter $\vec{E} = 0$ numa situação de equilíbrio, caso contrário os portadores móveis de carga dentro do metal mover-se-iam empurrados pela força elétrica. Este argumento deve receber duas críticas:

1) Ao nível microscópico certamente há campos elétricos diferentes de zero dentro de um metal mesmo no equilíbrio, pois entre um núcleo de átomo e elétron de uma camada interna de um átomo certamente há um campo elétrico diferente de zero. Quando se afirma $\vec{E} = 0$ trata-se de um campo médio macroscópico que resulta de uma média tomada sobre pequenos volumes contendo muitos átomos. É de se esperar que esta média deixe aparecer os campos microscópicos quando estamos muito perto de uma superfície, pois nesta região o número de átomos dentro do volume de média necessariamente diminui.

2) Na implicação “ausência de corrente $\Rightarrow \vec{E} = 0$ ” usamos tacitamente a lei de Ohm. Mas, na presença de forças eletromotrizes vimos que isto não é correto. Na equação (4.7) temos uma corrente zero com diferença de potencial diferente de zero devido ao termo $a_0 = \mathcal{E}/R_{\text{int}}$.

Quando obtemos na Física III um campo elétrico descontínuo na superfície de um metal fazemos uma simplificação macroscópica. Na verdade o campo médio deve cair de valores diferentes de zero para o valor zero dentro de uma região fina que corresponde a poucas camadas de átomos. Quando se fala na aula de Física III que carga elétrica num condutor fica na superfície, ela fica na verdade nesta camada fina de poucos nanômetros de espessura. Nesta camada temos geralmente campos elétricos diferentes de zero mesmo numa situação de equilíbrio. Na nossa linguagem devemos então atribuir às camadas superficiais de metais uma força eletromotriz. Será que poderíamos alimentar um circuito com esta força eletromotriz? Sim e Não! – A coisa não é tão simples. Veremos os detalhes:

Para alimentar um circuito teríamos que fechar um circuito. Então temos que encostar condutores no metal. De fato quando encostamos um metal A num metal B em geral

aparece uma diferença de potencial entre os dois corpos, algo na ordem de 0,1V a 1 V. Esta diferença de potencial é justamente provocada pelas forças eletromotrizes existentes nas superfícies metálicas. Mas, se você tenta medir esta diferença de potencial com um voltímetro você terá uma grande decepção. O voltímetro indicaria zero. Surgem então duas perguntas: como se sabe que existe mesmo uma diferença de potencial ente os metais se o voltímetro indica zero? E por que não aparece esta diferença de potencial no mostrador do voltímetro?

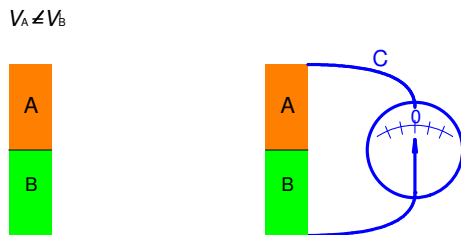


Fig. 8 Uma diferença de potencial entre dois blocos de metal que não é indicada pelo voltímetro.

A primeira pergunta pode ser respondida com uma outra maneira de medir. Historicamente a diferença de potencial entre dois metais foi descoberta pelo fato que os dois ficam eletricamente carregados depois de separá-los. Pode-se medir a diferença de potencial também com o seguinte arranjo: Conecta-se uma placa do metal A no bloco A e uma do material B no bloco B, como indicado na figura 9, e verifica-se com uma carga teste que existe um campo elétrico entre as placas.

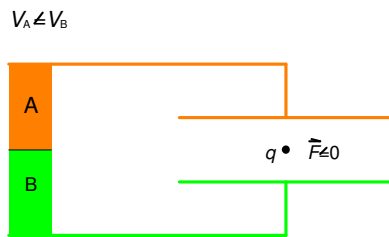


Fig. 9 Medida de diferença de potencial entre A e B.

A segunda pergunta é respondida por uma lei empírica conhecida como lei de Volta²: Se as diferenças de potencial entre os metais A, B, C, ... são $V_{A,B}$, $V_{A,C}$, $V_{B,C}$ etc. então valem as seguintes

relações:

$$V_{A,B} = -V_{B,A} \quad (4.12)$$

e

$$V_{A,C} = V_{A,B} + V_{B,C} \quad (4.13)$$

Vamos supor que os dois fios do voltímetro sejam de um material C. Se o potencial da primeira entrada do voltímetro (aquela ligada no metal B) for V_1 então o potencial do metal B seria $V_B = V_{B,C} + V_1$. O potencial de A seria $V_A = V_{A,B} + V_{B,C} + V_1$ e o potencial da segunda entrada do voltímetro seria $V_2 = V_{C,A} + V_{A,B} + V_{B,C} + V_1$. Mas, com as equações (4.13) e (4.12) obtemos

$$V_2 = V_{C,A} + \underbrace{V_{A,B} + V_{B,C}}_{=V_{A,C}} + V_1 \quad (4.14)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{=0}$

² Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta descobriu os potenciais de contato e esta lei nos anos 1792-96.

Então $V_2 = V_1$ e o voltímetro não vai indicar nada. Os condutores que obedecem às relações (4.12) e (4.13) chamam-se condutores de primeira espécie. Estas relações impedem que utilizemos as forças eletromotrizes existentes nas superfícies metálicas para alimentar circuitos, pois com o circuito aconteceria a mesma coisa que aconteceu com o voltímetro. O que está por trás da lei de Volta é a segunda lei da termodinâmica. Não podemos ganhar trabalho de qualquer natureza, incluindo trabalho elétrico, a partir de um sistema em equilíbrio termodinâmico. Existem condutores que não obedecem às relações (4.12) e (4.13). Estes são necessariamente sistemas fora do equilíbrio termodinâmico. As nossas pilhas são exemplos de condutores da segunda espécie. Eles têm dentro de si substâncias químicas que poderiam reagir e não o fazem por causa de um campo elétrico. Quando se diminui este campo ligando a pilha num circuito, a reação avança para levar a pilha para um estado de equilíbrio. Enquanto este processo ocorre, a pilha pode alimentar o circuito.

Com as forças eletromotrizes das superfícies metálicas podemos também alimentar um circuito se tirarmos o sistema dos dois metais fora do equilíbrio térmico. É isto que vocês fizeram na tarefa 3. Nesta situação os metais também são condutores da segunda espécie. Se juntarmos dois fios de metais diferentes nas duas extremidades e se mantivermos uma diferença de temperatura entre uma junção e a outra teremos uma corrente elétrica passando nos fios. Este arranjo pode ser usado como uma máquina térmica. Como máquina térmica este efeito não tem grande utilidade por causa de baixo rendimento, mais o efeito é frequentemente usado para medir diferenças de temperatura.

Finalmente cabe um comentário crítico a respeito dos voltímetros. Primeiramente vimos que o voltímetro não mede a diferença de potencial entre dois pontos no circuito. Tem sempre potenciais de contato no meio. Isto impediu a medição da diferença de potencial entre dois metais com um voltímetro. Segundo, o voltímetro que mede com uma corrente somente indica diferenças de potencial se todo o trajeto do condutor que constitui o voltímetro obedecer à lei de Ohm sem nenhum termo de força eletromotriz (o voltímetro não pode funcionar como uma pilha). Com a tarefa 3, que mostrou um tipo de força eletromotriz criada por diferenças de temperatura, vimos que esta condição pode ser um fator complicador em medidas de alta precisão quando há diferenças de temperatura envolvidas. Justamente em medidas de calibração de alta precisão isto acontece. Os padrões modernos de Volt e de Ohm são realizados com elementos em temperaturas de poucos Kelvin e os instrumentos de medida se encontram na temperatura ambiente. Nesta situação o experimentador tem que prestar muita atenção para não permitir que pares de junções de diferentes metais fiquem em temperaturas diferentes.