

5.6 Instrumentos de medidas elétricas

Os fatos experimentais expressos pelas fórmulas (5.1.3) (primeira lei de Faraday) e (5.1.4) garantem que é possível construir amperímetros baseados em eletrólise e força magnética. Em ambos os casos a corrente a ser medida tem que atravessar o instrumento de medida. Se eu afirmar que as fórmulas (5.1.3) e (5.1.4) garantem a possibilidade de construir amperímetros, quero dizer que podemos fazer aparatos de tal forma que os valores indicados no mostrador do instrumento realmente correspondem aos valores das correntes que passam pelo medidor. Mas isto ainda não é o suficiente para o instrumento ser um bom amperímetro. O medidor indica corretamente a corrente que passa por ele, mas em determinadas situações ele não indica o valor da corrente que queríamos medir.

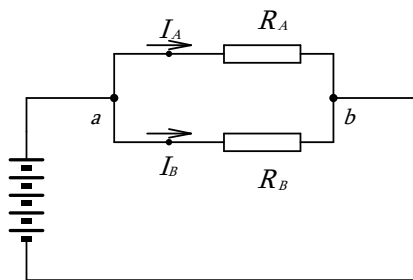
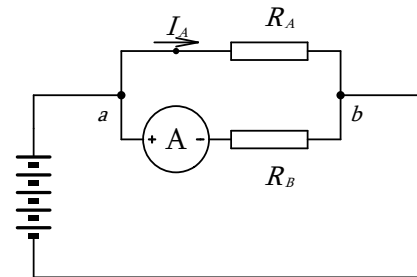


Fig. 6.6.1 A corrente I_B deve ser medida.

Veremos um exemplo desta situação. A figura 6.6.1 mostra exatamente o circuito que discutimos na seção 5.2 (Fig. 5.2.3), agora representado com a simbologia dos resistores. Queremos medir a corrente I_B . Então temos que inserir o instrumento de medida no ponto onde a corrente I_B foi definida. Mas isto modifica o circuito. O novo circuito está mostrado na figura 5.6.2.

Fig. 6.6.2 Circuito com amperímetro

O amperímetro está representado por um círculo com a letra A. Indiquei ainda sinais de orientação do instrumento¹. O amperímetro é um condutor e possui alguma resistência, que vamos chamar de resistência interna do amperímetro; $R_{\text{int Amp.}}$. Então a corrente que passa pelo instrumento não será a corrente I_B que existia no circuito original, mas



uma que flui num circuito com um resistor R_A em paralelo com uma associação em série de um resistor $R_{\text{int Amp.}}$ com o R_B . Mesmo que o instrumento indique corretamente a corrente que passa por ele, teremos uma ideia falsa sobre a corrente I_B . A discrepância entre I_B e a corrente realmente medida fica pequena se $R_{\text{int Amp.}}$ for muito menor que a resistência R_B . Então um bom amperímetro deve ter uma resistência interna muito pequena. No caso ideal sua resistência interna seria zero.

Vimos que as contribuições de resistores e fontes para a integral $\oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell}$ da lei das malhas eram dadas pelas fórmulas (5.5.2) e (5.5.4). A contribuição de um amperímetro é $R_{\text{int Amp.}} I$ e no caso de um amperímetro ideal isto seria zero.

É interessante saber como são os valores típicos das resistências internas de amperímetros comuns que se vendem nas lojas de eletrônica. A tabela 5.6.1 mostra

¹ Nos instrumentos comerciais o lado marcado com o sinal “+” geralmente tem um born com marca vermelha ou com o sinal “+” ou com um sinal “A” e o lado com o sinal “-” tem um born preto ou cinza frequentemente com a marca “COM”.

valores típicos para diferentes fundos de escala. Chamamos de *fundo de escala* o valor máximo que pode ser medido com o instrumento na modalidade usada. O complemento “na modalidade usada” é necessário porque muitos instrumentos podem ser usados de diferentes formas, às vezes como amperímetro e às vezes como medidor de outra grandeza. Estes instrumentos que servem para diversas medidas elétricas se chamam *multímetros*.

Tabela 5.6.1 Valores típicos de resistências internas de amperímetros comerciais.

Fundo de escala	$R_{\text{int Amp.}}$
2 mA	$1 \times 10^2 \Omega$
20 mA	$1 \times 10^1 \Omega$
200 mA	$2 \times 10^0 \Omega$
10 A	$3 \times 10^{-1} \Omega$

Muitos dos amperímetros baseados na força magnética têm como peça principal uma bobina girante num campo magnético. A bobina tem muitas espiras de arame extremamente fino e ela está presa em molas de constante de mola muito pequena de tal forma que este galvanômetro possui grande sensibilidade. Tipicamente uns $50 \mu\text{A}$ são suficientes para girar a bobina pelo ângulo máximo permitido pela geometria do instrumento. Mesmo amperímetros que servem para medir dezenas de ampères costumam ter dentro deles um destes galvanômetros sensíveis. Um fundo de escala de dezenas de ampères se consegue colocando um resistor desvio paralelo ao galvanômetro. Desvio, em Inglês dos ferroviários, se chama “shunt” (pronúncia como se fosse xant em Português) e é este nome que se costuma usar na eletrônica também em Português e em outros idiomas. A figura 5.6.3 mostra o esquema de um amperímetro feito com um galvanômetro e um shunt. Agora o leitor deve ter os conhecimentos suficientes para poder calcular o fundo de escala e a resistência interna de tal tipo de amperímetro a partir do fundo de escala, da resistência interna do galvanômetro e do valor da resistência do shunt (veja o exercício 5.6.1).

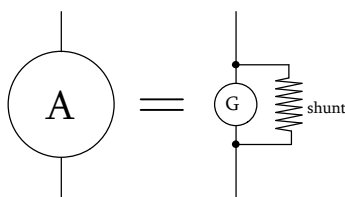


Fig. 5.6.3 Amperímetro feito com um galvanômetro e um shunt.

É muito frequente que o engenheiro ou técnico de eletrônica precise medir a diferença de potencial entre dois pontos num circuito. O instrumento usado nesta tarefa é chamado de *voltímetro*. A experiência que descrevi na seção 5.2 como “comprovação” experimental da lei de Ohm e da existência do potencial fornece um método para medidas deste tipo. A experiência, cujo esquema estava representado na figura 5.2.3 ou equivalentemente pela 5.6.2, mostrou a proporcionalidade de correntes numa bifurcação com condutores Ôhmicos. A corrente I_B informa sobre a diferença de potencial entre os pontos *a* e *b* do circuito, desde que os valores de R_B e da resistência interna do amperímetro sejam conhecidos. Temos

$$V(a) - V(b) = (R_B + R_{\text{int Amp.}}) I_B \quad (5.6.1)$$

Com medidas de voltagem feitas através de medidas de corrente usando a lei de Ohm, há o mesmo tipo de problema como com as medidas de correntes; a própria medida pode alterar o valor da grandeza que se pretende medir. No caso do circuito da figura 5.6.2, isto aconteceria se a fonte elétrica tivesse uma resistência interna apreciavelmente alta ou se tivesse mais um resistor depois do ponto b . Então vamos considerar o seguinte circuito: uma fonte está ligada num resistor R_A e depois vem um resistor R e o circuito é fechado voltando para a fonte como mostrado na figura 5.6.4. Queremos medir a diferença de potencial entre os pontos a e b . Com o intuito de medir esta diferença de potencial usando a fórmula (5.6.1), vamos acoplar um resistor R_B e um amperímetro entre estes pontos como mostra a figura 5.6.5

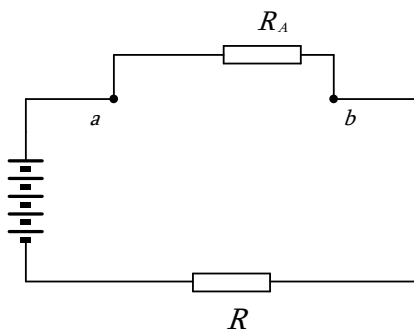


Fig. 5.6.4 Tarefa de medir a diferença de potencial entre dois pontos a e b num circuito de uma malha com fonte e dois resistores.

De novo, este ato de medida modifica o circuito. Mesmo que o instrumento indique corretamente a diferença de potencial entre os pontos a e b , o valor indicado não é a diferença de potencial que existia entre estes pontos no circuito original da figura 5.6.4.

Fig. 5.6.5 Medida da diferença de potencial entre os pontos a e b usando uma combinação de amperímetro e resistor como voltímetro.

A discrepância entre o valor indicado e o valor da diferença de potencial no circuito original é devido a um aumento de queda de tensão no resistor R e na resistência interna da fonte provocado pela corrente que passa através do voltímetro. Então para manter esta discrepância pequena devemos construir o voltímetro de tal forma que a corrente que passa pelo instrumento seja a menor possível. Um voltímetro ideal teria uma resistência interna infinitamente alta de tal forma que não passe nenhuma corrente pelo instrumento.

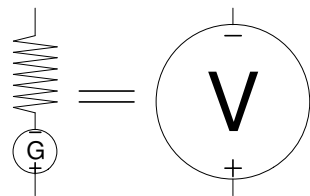
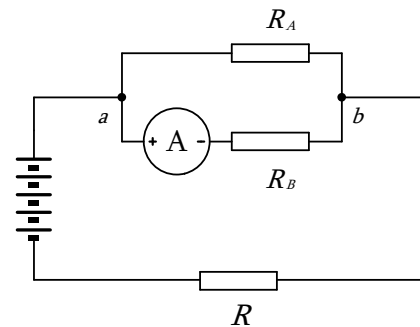


Fig. 5.6.6 Galvanômetro com resistor em série formando um voltímetro.

No caso de um voltímetro feito com uma combinação em série de amperímetro e resistor R_B , devemos escolher um valor alto de resistência deste resistor. Mas isto significa que as correntes I_B serão muito pequenas e o amperímetro tem que ser muito sensível. É esta a razão por que no século passado a indústria de fabricação de instrumentos de medida elétrica não poupava esforços de desenvolver galvanômetros cada vez mais sensíveis. No uso de um amperímetro para medir voltagem não faria nenhum sentido usar um shunt, que torna o amperímetro menos sensível. Então se usa o galvanômetro diretamente, como na figura 5.6.6.

A resistência interna deste instrumento é a soma da resistência interna do galvanômetro $R_{\text{int } G}$ e a resistência R_B do resistor que colocamos em série com o galvanômetro.

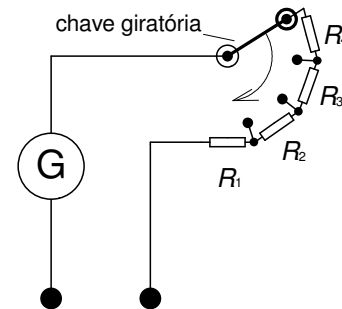
$$R_{\text{int } V} = R_{\text{int } G} + R_B \quad (5.6.2)$$

Se o fundo de escala do galvanômetro é I_{max} , então o fundo de escala do voltímetro é

$$V_{\text{max}} = R_{\text{int } V} I_{\text{max}} \quad (5.6.3)$$

Obviamente é bem fácil construir um multímetro com diversos fundos de escala com um único galvanômetro. Basta colocar diversos resistores em série com o galvanômetro, como indicado na figura 5.6.7. Uma chave giratória permite escolher o valor da resistência posta em série. No esquema da figura, as opções seriam os valores R_1 , $R_1 + R_2$, $R_1 + R_2 + R_3$ e $R_1 + R_2 + R_3 + R_4$.

Fig. 5.6.7 Esquema de um voltímetro com quatro diferentes fundos de escala. Uma chave giratória permite escolher entre quatro valores de resistência em série com o galvanômetro. Na posição da chave mostrada o valor da resistência é $R_1 + R_2 + R_3 + R_4$.



Todos estes fundos de escala têm o valor de I_{max}

como uma característica comum, pois este valor é uma característica do galvanômetro. Geralmente os fabricantes informam o inverso deste valor no painel do instrumento usando a unidade $\text{k}\Omega/\text{V}$. Um valor típico é $20 \text{ k}\Omega/\text{V}$. Então um instrumento deste, com um fundo de escala de 50 V , teria uma resistência interna de $20 \text{ k}\Omega\text{V}^{-1} \times 50 \text{ V} = 1,0 \text{ M}\Omega$. Estes voltímetros analógicos que usam um galvanômetro são raros hoje em dia. Eles são substituídos por instrumentos digitais. No apêndice descrevemos os princípios básicos destes instrumentos digitais.

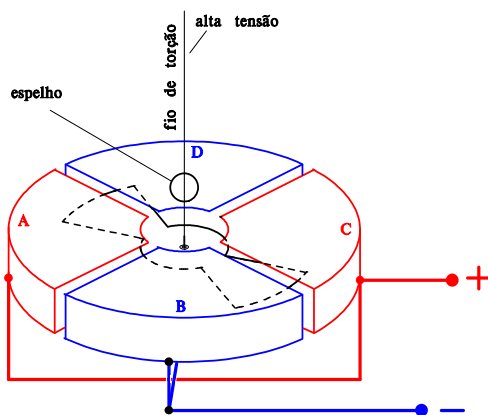


Fig. 5.6.8 Eletrômetro de quadrantes como exemplo de voltímetro que não usa corrente.

Nem todos os voltímetros usam uma corrente junto com a lei de Ohm para medir uma diferença de potencial. Por exemplo, o eletrômetro de quadrantes, que mencionamos na discussão dos piezoelétricos, não usa uma corrente. O condutor em forma de borboleta está ligado a uma tensão elevada de um valor fixo e com isto fica eletricamente carregado. Quando existe uma

diferença de potencial entre os pares de quadrantes, aparece um campo elétrico que exerce um torque sobre a “borboleta” e este torque provoca uma reorientação do espelho fixo no fio de torção. A orientação do espelho é lida opticamente. Aqui a grandeza usada para a medição é a força elétrica e não uma corrente. Também os transistores de efeito campo, que descrevemos no apêndice B da seção 5.2, podem ser usados para medidas de tensão sem uso de correntes. Então estes voltímetros chegam muito perto do caso ideal de resistência interna infinita. Mesmo estes instrumentos possuem alguma resistência interna finita, pois o melhor que seja a isolação dos

contatos, há uma possibilidade de fuga de carga entre os contatos ou borns do instrumento².

A tarefa de medir uma diferença de potencial sem alterar o valor pelo próprio ato de medida nos leva a uma consideração muito interessante a respeito do campo elétrico em condutores e materiais isolantes ou no vácuo. Imagine uma pilha voltaica como aquela da figura 5.6.9. A pilha não está ligada a nenhum circuito e conseqüentemente há uma diferença de potencial considerável entre a primeira placa de zinco e a última placa de cobre. Então haverá um campo elétrico não nulo no espaço em volta da pilha. Esbocei este campo qualitativamente ao longo de uma linha de força (sem garantir a exatidão do desenho).

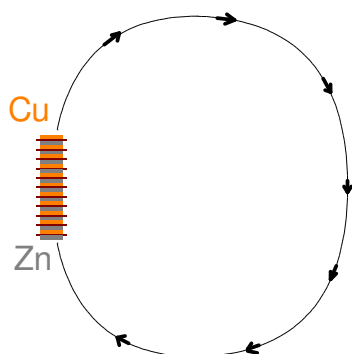


Fig. 5.6.9 Pilha Voltaica com esboço qualitativo de uma linha de campo e vetores indicando o campo elétrico fora da pilha.

Dentro da pilha há lugares com altos valores do campo elétrico, a saber, nas interfaces de metal e eletrólito. Este campo aponta verticalmente para baixo. Uma integral de linha que leva da última placa de cobre para a primeira placa de zinco resulta num valor positivo independente da escolha do caminho, dentro ou fora da pilha. É isto que permite falar de uma diferença de potencial entre estas placas.

Agora vamos medir esta diferença de potencial com um voltímetro ideal. Este instrumento é uma pequena caixinha com dois fios de cobre saindo dela. Vamos imaginar que liguemos estes fios nas placas da pilha. Podemos colocar a caixinha do voltímetro em qualquer lugar fora da pilha e podemos dar aos fios de cobre qualquer forma. Eu, no exemplo, escolhi para os fios exatamente a forma da antiga linha de campo da figura 5.6.9. Falei antiga linha de campo, pois com o voltímetro ligado na pilha o campo não será o mesmo de antes.

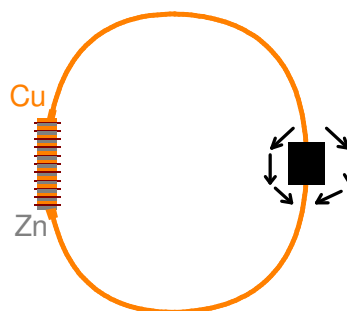


Fig. 5.6.10 Voltímetro ligado nos polos de uma pilha Voltaica. O campo elétrico fora da pilha foi modificado pela presença do voltímetro.

Como o voltímetro supostamente era ideal, não haverá corrente nos fios do voltímetro. Então temos aqui dois pedaços de metal num equilíbrio eletrostático. Conseqüentemente o campo macroscópico dentro dos fios será zero. Com a lei da existência do potencial, a componente tangencial do campo elétrico na superfície do fio tem que ser contínua. Então em volta dos fios não haverá o campo que existia antes. Mas como o voltímetro

² Há uma técnica de diminuir estas fugas de carga ainda com a ajuda de um amplificador que “amplifica” a voltagem por exatamente 1 e coloca esta voltagem “amplificada” em condutores que rodeiam os borns do instrumento. Desta forma a corrente de fuga é fornecida pelo amplificador e não pelo circuito a ser medido. Estes instrumentos chegam realmente extremamente perto de um voltímetro ideal. O papel do amplificador de fator 1 é de substituir a fonte a ser medida por uma com maior potencial de fornecer corrente.

era ideal, sua aplicação não alterou o valor da diferença de potencial entre as placas da pilha. Então a integral de caminho tem que dar o antigo valor. Como o campo macroscópico dentro dos fios é zero, deve haver um campo razoavelmente intenso dentro e em volta da caixinha do voltímetro. A figura 5.6.10 mostra esta situação qualitativamente. Dentro da pilha não alteramos as densidades de correntes (elas continuam zero), e a lei de Ohm generalizada local (5.4.1) e a lei de Ohm local (5.2.13) garantem que o campo elétrico não sofre nenhuma alteração.

Percebemos que o campo elétrico dentro de condutores é robusto. Enquanto não alteramos as densidades de correntes, a lei de Ohm generalizada local e a lei de Ohm local garantem que o campo elétrico macroscópico não sofre alteração dentro dos condutores. Fora dos condutores o campo elétrico é facilmente alterado pela mera presença de condutores nas proximidades. Dentro dos condutores o campo elétrico é geralmente³ muito fraco, isto é, ele tem valores pequenos, mas ele é robusto. Esta robustez é um detalhe essencial nas aplicações de circuitos. Por exemplo, o seu MP3-Player funcionará do mesmo jeito pendurando-o num fio de náilon ou colocando-o numa mesa de metal, desde que o metal da mesa não encoste nos condutores do circuito.

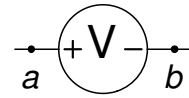
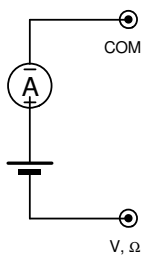


Fig. 5.6.11 A integral de caminho do campo elétrico indo de a até b é o valor indicado pelo instrumento.

Para os amperímetros informamos quanto vale a contribuição para a integral $\oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell}$ da lei das malhas. Faremos o mesmo para os voltímetros. A integral de caminho que atravessa o voltímetro indo do ponto a da figura 5.6.11 até o ponto b vale simplesmente aquele valor que seria indicado pelo mostrador do voltímetro no caso da medida: V_{leitura} .

$$V_{\text{leitura}} = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{\ell} \quad (5.6.4)$$

Para terminar esta seção discutiremos ainda medidores de resistências elétricas. Estes instrumentos são chamados de *Ohmímetros*. A forma mais simples destes instrumentos consiste em uma fonte de tensão (geralmente uma pilha) em série com um amperímetro como mostra a figura 5.6.12.



↑Fig. 5.6.12 Ohmímetro simples.

Fig. 5.6.12 Multímetro analógico. A escala da função de ohmímetro é a primeira contando de cima para baixo. →

O resistor a ser medido é conectado nos dois borns do instrumento. Com a eletromotância da pilha, com sua resistência interna e com a resistência



³ Há exceções, por exemplo, na interface de metal e eletrólito o campo elétrico pode ter valores consideravelmente altos.

interna do amperímetro pode-se calcular o valor da resistência do resistor. Para não ter que fazer muita conta, os instrumentos analógicos já vêm com uma escala adequada que corre no sentido oposto da escala do amperímetro. Na figura 5.6.12 podemos ver tal escala numa fotografia de um multímetro que une amperímetro, voltímetro e ohmímetro. A figura 5.6.13 mostra o mesmo instrumento por trás aberto. Percebemos a bobina girante e os resistores em série para a função de voltímetro e os shunts para a função de amperímetro.

Às vezes um ohmímetro é usado para avaliar algum componente eletrônico que não é resistor e que pode ser destruído se for conectado a uma tensão com polaridade errada. Então é importante saber o que “sai” dos fios de um ohmímetro. Repare na figura 5.6.11! Justamente o fio do born “- COM” (geralmente de cor preta) fornece uma voltagem positiva e o outro fio “+” (geralmente o vermelho) é o negativo! Porém nos instrumentos digitais isto é invertido; o vermelho que está ligado no born “V,Ω” é o positivo e o fio preto ligado no born “COM” é o negativo.

Fig. 5.6.13 O multímetro analógico da figura 5.6.12 aberto.



Os ohmímetros simples não têm muita precisão. Para algumas aplicações é preciso medir resistências com precisão relativa na ordem de uma parte em 10^6 ou mais. Um caso típico são medidas precisas de temperatura através de medidas da resistência de condutores de platina. Nestas aplicações a mera resistência dos fios do instrumento já acrescenta um erro intolerável. Este tipo de erro pode ser evitado com uma configuração diferente de ohmímetro. Esta configuração é conhecida com o nome de quatro fios (4W). Esta maneira de medir resistência funciona da seguinte forma: uma fonte de corrente é ligada ao resistor a ser medido com dois fios. Esta corrente é medida com um amperímetro muito preciso, mas que não precisa ter uma resistência interna baixa. A diferença de potencial que aparecerá no resistor é monitorada ligando um voltímetro (quase que) ideal com mais dois fios no resistor. A figura 5.6.14 mostra o esquema desta medida. Nesta configuração a queda de potencial que aparece nos fios que levam a corrente para o resistor não entra na avaliação do valor da resistência. Por outro lado, nos fios que servem para o monitoramento da diferença de potencial no resistor não aparece praticamente nenhuma queda de potencial, porque o voltímetro é muito próximo do caso ideal e praticamente não permite passagem de corrente.

↓Fig. 5.6.14 Ohmímetro de quatro fios.

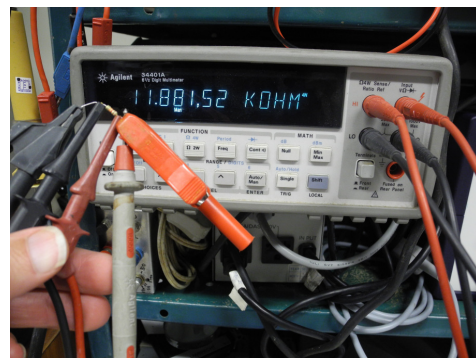
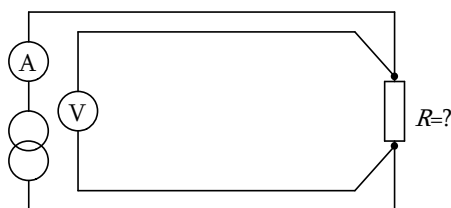


Fig. 5.6.15 Medida de resistência na configuração de quatro fios. Repare no número de algarismos do instrumento!

A figura 5.6.15 mostra uma medida de resistência na configuração 4W.

Exercícios:

E 5.6.1 Você possui um amperímetro muito sensível cujo ponteiro se move até o fundo da escala quando se injeta nele apenas $10\mu\text{A}$. A resistência interna deste instrumento vale $0,4\ \Omega$. Determine os elementos que se precisam colocar adicionalmente neste medidor para transformá-lo num voltímetro de fundo de escala $V_F = 10\text{V}$ ou num amperímetro com fundo de escala $I_F = 100\text{mA}$.

E 5.6.2: Certa vez eu encontrei uma pilha velha na desordem do meu laboratório e queria testar se esta pilha ainda prestava. Peguei um multímetro analógico, como aquele da figura 5.6.12, e medi a voltagem sem prestar atenção no fundo de escala do instrumento. O ponteiro do instrumento saía do ponto zero apenas por um ângulo muito pequeno. Aí olhei o fundo de escala. A chave giratória estava na posição de 250 V. Então a pequena deflexão do ponteiro estava explicada. Olhando com atenção vi que o ângulo da deflexão era bem compatível com o valor esperado de 1,5 V. Claro, com este fundo de escala inadequado, não se podia avaliar o valor de 1,5 V com precisão. Podia ser também 0,5 V. Então eu quis usar o fundo de escala correto. Girei a chave, passando por 50 V, 10 V até chegar ao fundo de escala apropriado de 2,5 V. Pela minha grande surpresa a deflexão do ponteiro resultou praticamente no mesmo ângulo pequeno em todos estes fundos de escala. Mesmo girando mais, até o fundo de escala de 0,25 V, obtive praticamente o mesmo ângulo de deflexão. Explique este fenômeno! Como podemos caracterizar esta pilha?

E 5.6.3: Um voltímetro real pode ser representado por uma combinação de um voltímetro ideal e um resistor. Desenhe este circuito equivalente que corresponda a um voltímetro real.

E 5.6.4: Escreva os pontos de destaque desta seção.

5.6 Apêndice Voltímetros digitais.

Nos voltímetros digitais mais comuns há um circuito eletrônico que converte a tensão aplicada nos borns do voltímetro numa corrente. Isto significa que a saída deste circuito é uma fonte ideal de corrente com um valor de corrente que é proporcional ao valor da voltagem aplicada. Com esta corrente se carrega um capacitor durante um tempo fixo. Depois este capacitor é descarregado com uma corrente constante e bem conhecida. Um relógio eletrônico mede o tempo que precisa para descarregar o capacitor. Este tempo é proporcional à voltagem aplicada. O tempo corresponde a um número de oscilações de um oscilador e o valor sai em forma digital. Todo o processo parece ser bem complicado. Mas esta forma de transformação de uma voltagem num número digital acaba sendo muito insensível a alterações dos componentes envolvidos. Por exemplo, se houver uma modificação do valor da capacitância, por exemplo, causado por uma alteração da temperatura, esta alteração influencia tanto o processo de carregar o capacitor quanto o processo de descarregá-lo, e estes dois efeitos cancelam no resultado final da medida. Os detalhes dos circuitos que fornecem correntes constantes são assuntos de disciplinas mais específicas de circuitos eletrônicos.