

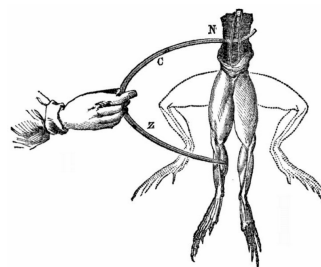
5.1 Corrente elétrica

Até este momento estudamos apenas situações de equilíbrio. Quando aproximamos um bastão eletrizado de um corpo condutor, criamos uma situação fora do equilíbrio. Mas rapidamente as cargas no condutor se redistribuem até chegar a um novo equilíbrio, que é caracterizado por um mínimo de energia livre. Agora queremos estudar os fenômenos que se apresentam durante os processos de chegar ao equilíbrio.

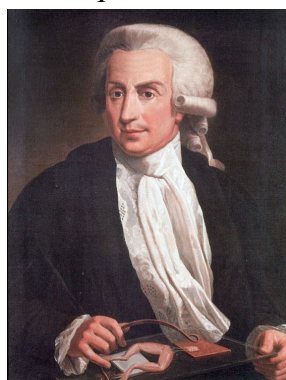
Este estudo seria muito difícil com as configurações que usamos até agora. Com bastões atritados, esferas metálicas e formas de pizza etc., os processos de estabelecer um equilíbrio acontecem em alguns picossegundos. Um estudo experimental iria requerer instrumentos muito sofisticados para poder acompanhar mudanças tão rápidas. A rapidez do estabelecimento do equilíbrio é principalmente causada pelo tamanho pequeno do estoque de desequilíbrio, ou seja, a diferença entre a energia livre inicial e a final é muito pequena nas experiências que usamos até agora. Para podermos observar o fluxo de carga elétrica com calma, precisamos de estoques enormes de desequilíbrio. A química pode fornecer situações que envolvem estoques enormes de energia livre. A ciência que estuda especificamente a combinação de química e eletricidade se chama eletroquímica.

Fig. 5.1.1 Experiência de Galvani. (Imagem da Wikipedia)

Com o uso de reações químicas no estudo da eletricidade, entramos num mundo de fenômenos muito diferentes. As tensões que antes tinham tipicamente milhares de volts agora serão de poucos volts e os corpos estudados estão quase neutros. Mas, por outro lado, estes fenômenos envolvem deslocamentos de quantidades enormes de carga.



Por serem tão diferentes os fenômenos da eletroquímica daqueles que estudamos nas seções anteriores, não é nada óbvio que se trata da mesma eletricidade. Historicamente foi uma feliz coincidência que



levou os pesquisadores à percepção de que estas experiências químicas envolviam fenômenos elétricos. A descoberta pivô foi feita pelo médico, biólogo e filósofo Luigi Aloisio Galvani¹. A área principal de pesquisa de Galvani era a anatomia, mas ele também se interessava pela eletricidade.

Fig. 5.1.2 Luigi Aloisio Galvani com uma rã dissecada. (Imagem da Wikipedia)

Num dia em 1780 ele tinha dissecado uma rã e um assistente tocava com a ponta do bisturi num nervo da rã e isto acontecia na proximidade de uma máquina de eletrizar. A perna da rã morta se contraía violentamente. Um assistente acreditava ter visto uma faísca no momento do toque². Isto levou Galvani a investigar estas contrações musculares aparentemente provocadas por descargas elétricas. Ele tentou verificar também se a eletricidade atmosférica poderia ter este efeito. Mas pouco a pouco ficava claro que não precisava de descargas elétricas e nem de eletricidade atmosférica. As contrações musculares aconteciam também quando Galvani tocava nos nervos com arames longe

¹ Luigi Aloisio Galvani 09/09/1737 – 04/12/1798 Bologna.

² Aloisii Galvani, *De Viribus Electricitatis in Motu Musculari Commentarii Bononiensi vii* (1791) p.363.

de máquinas de eletrizar e dentro de uma sala fechada, portanto com a experiência não exposta à eletricidade atmosférica. Mas a ideia da contração ser provocada por algum agente elétrico já estava fixada na mente, e então Galvani interpretou tudo como uma eletricidade gerada pela rã, ou seja, uma “eletricidade animal”. Galvani notava que a intensidade da contração muscular dependia do metal que tocava no nervo e, de fato, as experiências sempre envolviam dois metais diferentes. Não se conseguia provocar uma contração muscular com materiais isolantes, como âmbar e borracha. O fato de que somente condutores elétricos provocavam a contração muscular era um indício de que o efeito realmente tinha alguma ligação com a eletricidade.

Alessandro Volta³ se deu conta da importância desta descoberta e repetia estas experiências⁴. Inicialmente ele acreditava na interpretação baseada numa eletricidade



animal, mas pouco a pouco ele chegou a uma interpretação diferente. A carne da rã não gerava a eletricidade, mas ela tinha apenas duas funções; ela era um condutor aquoso e ela indicava a passagem de corrente elétrica com as contrações musculares. No entanto, a ideia de Galvani que seres vivos pudessem gerar eletricidade não era falsa. Mas no caso desta experiência não precisava de uma “eletricidade animal” para explicar o fenômeno.

Fig. 5.1.3 Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta. Na mesa aparece uma pequena pilha voltaica com os discos empilhados entre quatro palitos de madeira. (Imagem da Wikipedia)

Volta percebeu que o essencial era a presença de dois metais diferentes e a presença de um condutor aquoso⁵. Ele tinha conhecimento da eletricidade animal, ele conhecia o peixe elétrico *poraquê* (*Electrophorus electricus*). Mas com a combinação de dois metais e um condutor aquoso ele conseguiu criar um “peixe elétrico artificial”. Ele empilhou muitos discos de zinco, discos de papelão umedecidos com água salgada e discos de cobre formando uma enorme pilha, como mostra a figura 5.1.4. A palavra “pilha” que vocês usam para aqueles palitos redondos que servem para fornecer energia elétrica em pequenos equipamentos eletrônicos tem a sua origem nestas pilhas de Volta⁶.

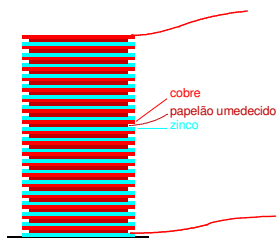


Fig. 5.1.4 Pilha voltaica

Tocando com as duas mãos nos extremos destas pilhas, Volta levava fortes choques. Ele conseguia gerar faíscas com estas pilhas muito parecidas com as faíscas que se conseguem com grandes bancos de capacitores carregados. Mas um detalhe

que diferencia os bancos de capacitores das pilhas chamou muita atenção: depois de gerar uma faísca com um banco de capacitores, este não gera mais nenhuma faísca enquanto os capacitores não forem recarregados. Mas as pilhas geravam faíscas

³ Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta (18/02/1745 – 05/03/1827).

⁴ Volta, A.: Account of some discoveries made by Mr Galvani, of Bologna Phil Trans Roy Soc Lond 1, (1793);

⁵ Volta, A. On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. Philosophical Transactions of the Royal Society London 90, 403-431(1800).

⁶ Na verdade a palavra está mal empregada, porque estes palitos redondos não têm nada empilhado, trata-se de uma única célula eletroquímica. Então a próxima vez que você entrar numa loja para comprar este objeto pergunte ao vendedor por uma célula eletroquímica! O que mereceria o nome pilha são estas “baterias de 9 V”. Elas sim são pilhas de seis células eletroquímicas. A palavra “bateria” tem a sua origem no jargão militar e tem o significado de um grupo de canhões. Na eletricidade esta palavra também está mal empregada, pois nas baterias elétricas as células eletroquímicas são geralmente postas em série e não uma ao lado da outra como os canhões.

consecutivamente, aparentemente sem fim. Isto era algo extraordinário. Não apenas Volta ficou impressionado; também as personalidades históricas da época se impressionavam. Uma pintura mostra uma demonstração da pilha para Napoleão. A invenção da pilha voltaica acendeu uma nova etapa nas investigações científicas, e um dos nomes que se destacavam nestas pesquisas era Faraday.

Ligando uma pilha voltaica de muitas camadas num eletroscópio sensível e comparando as reações do eletroscópio com aquelas obtidas com âmbar ou vidro atritado, chega-se à conclusão de que a pilha realmente pode gerar corpos eletricamente carregados. E se verifica que a extremidade de cobre fica com carga positiva e a extremidade com a placa de zinco com carga negativa. Correspondentemente vamos chamar a extremidade de cobre de polo positivo da pilha e a outra de polo negativo.

Com uma pilha voltaica pode-se manter carga fluindo dentro de um condutor por muitas horas sem chegar ao equilíbrio. O estoque de energia livre na pilha é enorme. Existem ainda outros estoques enormes de energia livre. Por exemplo, $2,9 \times 10^7 \text{ m}^3$ de água numa altura de $2 \times 10^2 \text{ m}$ acima do nível do mar na represa de Itaipu. No equilíbrio esta massa de água estaria no nível do mar. Com processos que estudaremos mais tarde, a companhia de eletricidade consegue converter uma fração pequena deste estoque de energia livre em energia elétrica, e na tomada temos esta energia a nossa disposição. Tenho aqui um aparelho, mostrado na figura 5.1.5, que converte esta energia elétrica em energia elétrica com características muito parecidas com aquelas das pilhas voltaicas. Se a pilha era um “peixe elétrico artificial”, o aparato da figura 5.1.5 é uma “pilha voltaica artificial”. Em muitas experiências vamos usar este aparato no lugar de uma pilha voltaica. Este equipamento se chama “fonte elétrica regulável”.

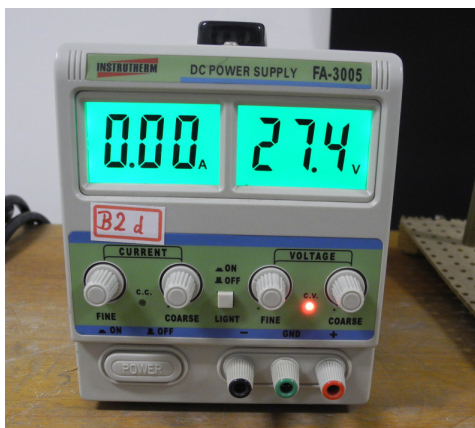


Fig. 5.1.5 Fonte elétrica regulável.

Girando um botão no painel deste aparato posso escolher o número de andares na “pilha artificial”, ou seja, tornar a pilha mais alta ou mais baixa. No lugar das duas extremidades da pilha, a fonte elétrica regulável possui dois contatos, chamados *borns*, onde podemos encaixar fios de cobre com um terminal adequado, chamado de *pino banana*. Para manter um fluxo de carga num condutor, basta ligar este condutor nestes contatos.

O fluxo de carga elétrica num condutor, que chamamos de *corrente*, é um fenômeno que se esquia da observação direta porque não conseguimos ver as cargas. A existência de uma corrente elétrica num condutor se nota apenas através de fenômenos secundários. Mostro aqui três destes fenômenos secundários.



Fig. 5.1.6 Born e pino banana com fio.

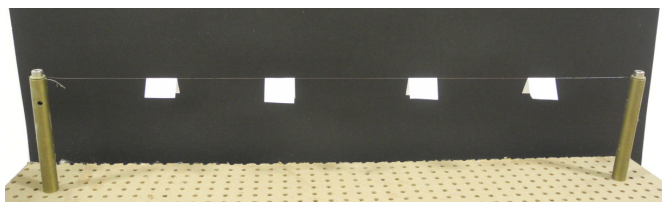


Fig. 5.1.7 Fio de aço esticado entre postes de latão. Pedacos de papel estão pendurados para facilitar a visibilidade do arame.

Na figura 5.1.7 temos um arame fino de aço esticado entre dois postes de latão. Para facilitar a visualização do arame, pendurei pedacinhos de papel como se fossem peças de roupa num varal. Agora conecto os dois extremos do arame com os contatos da fonte elétrica. A figura 5.1.8 mostra o resultado. Evidentemente o arame arriou e estamos vendo fumaça saindo dos pedaços de papel. A deformação do arame se explica com dilatação térmica. Obviamente a passagem de corrente resultou na geração de energia térmica.

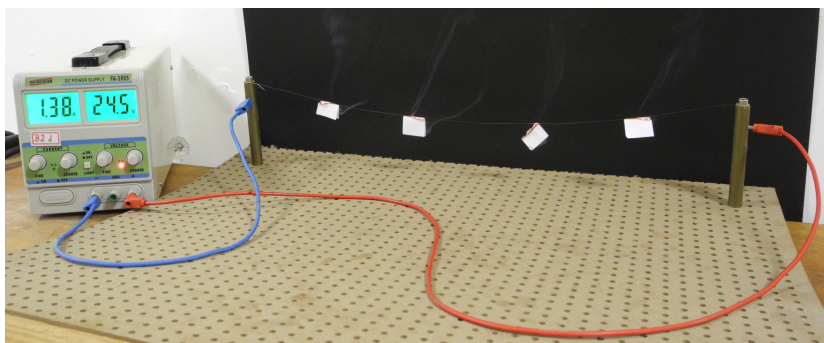
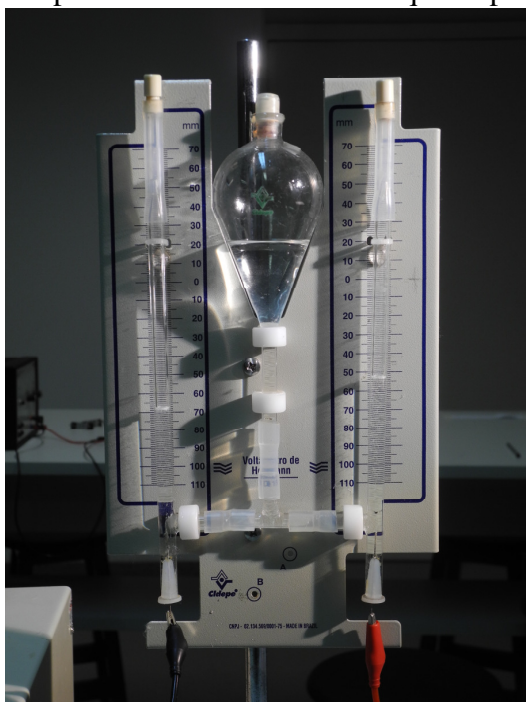


Fig. 5.1.8 A passagem de corrente pelo arame da figura 5.1.7 elevou a temperatura a tal ponto que o arame dilatou visivelmente e os pedaços de papel estão pegando fogo. O terceiro pedaço já queimou tanto que ficou pendurado apenas num canto.

As figuras 5.1.9 e 5.1.10 mostram mais uma manifestação secundária da passagem de corrente. Desta vez, a corrente atravessa um condutor aquoso. Coloquei uma solução de NaOH (hidróxido de sódio) em H₂O num recipiente de vidro. Dois contatos metálicos, chamados de eletrodos, conectam um canal de líquido à fonte regulável. Percebemos na figura 5.1.10 que pequenas bolhas de gás são formadas na superfície do eletrodo. O recipiente tem uma forma adequada para poder coletar os gases que se formam. Uma análise destes gases mostra que se trata de oxigênio, formado no polo positivo, e hidrogênio, formado no polo negativo. Este fenômeno se chama eletrólise. No caso temos uma eletrólise que decompõe a água. Existem outras eletrólises com outras reações químicas. Por exemplo, podemos passar corrente através de uma solução contendo íons de um metal e observamos um depósito deste metal num dos condutores sólidos que conectam o condutor líquido com a fonte.

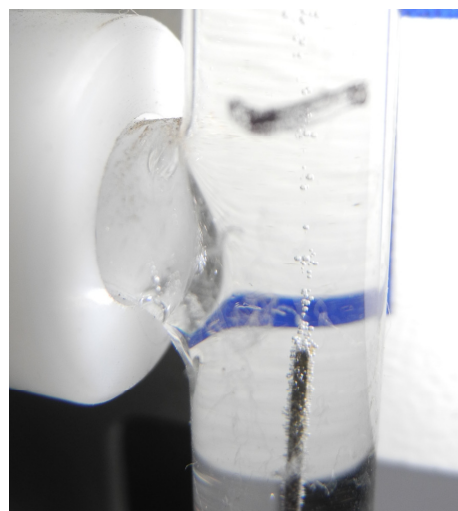


Uma análise destes gases mostra que se trata de oxigênio, formado no polo positivo, e hidrogênio, formado no polo negativo. Este fenômeno se chama eletrólise. No caso temos uma eletrólise que decompõe a água. Existem outras eletrólises com outras reações químicas. Por exemplo, podemos passar corrente através de uma solução contendo íons de um metal e observamos um depósito deste metal num dos condutores sólidos que conectam o condutor líquido com a fonte.

Fig. 5.1.9 Aparato de eletrólise da água ligada numa fonte.

Fig. 5.1.10 Formação de bolhas de gás na interface do eletrodo e do líquido. →

Na figura 5.1.11 vemos um condutor metálico em forma de um balanço. A haste horizontal deste balanço se encontra entre os polos de dois ímãs. Não estudamos ainda as forças magnéticas, mas



todo mundo conhece os ímãs e sabe que eles atraem o ferro. Com uma bússola ou com qualquer pedaço de ferro, podemos nos convencer facilmente de que os dois objetos em forma de U pintados de duas cores são realmente ímãs. Agora ligo os suportes do balanço na fonte regulável para estabelecer uma corrente, que atravessa a parte horizontal do balanço. Percebem-se faíscas na hora de estabelecer o contato elétrico e o balanço muda sua posição de equilíbrio. A figura 5.1.12 mostra o balanço na nova posição de equilíbrio. Podemos concluir que perto de um ímã uma força atua num condutor com corrente elétrica. Quando trocamos os fios que ligam o balanço na fonte de tal forma que o extremo da haste horizontal que antes estava ligado no pólo positivo da fonte está agora ligado no polo negativo, observamos que o balanço se inclina para o lado oposto.

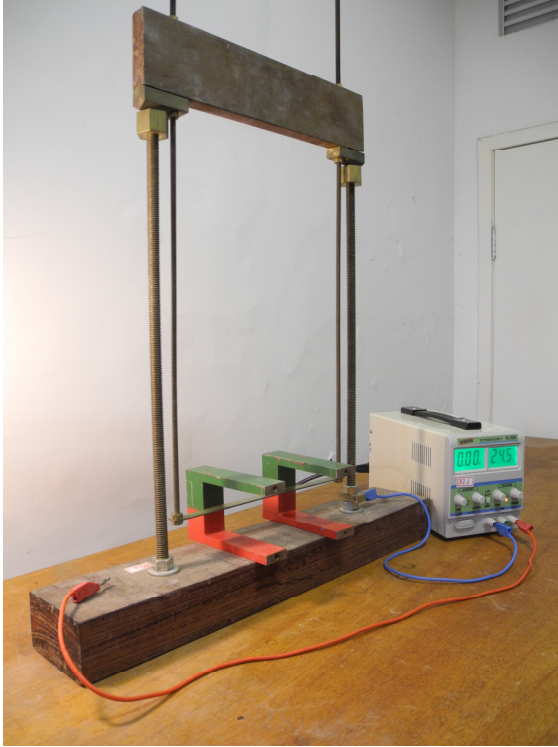


Fig. 5.1.11 Balanço condutor com ímãs.



Fig. 5.1.12 Demonstração de força magnética.

Apesar da impossibilidade de observar corrente elétrica diretamente, temos uma ideia clara da natureza da corrente. Trata-se da taxa da passagem de carga através de uma superfície. Discutimos este tipo de grandeza na seção 2.2. No caso da corrente elétrica num fio, imaginamos uma superfície que atravessa o fio transversalmente. Lembrem-se da discussão na seção 2.2 em que mencionamos que um medidor de fluxo tem uma orientação que define qual sentido do fluxo será considerado positivo. Num desenho de circuito elétrico representamos o fio por uma linha e quando falamos de corrente, devemos indicar no circuito em que ponto se encontra a superfície transversal à qual se refere a corrente. Ao lado deste ponto devemos desenhar uma seta que indica a orientação tomada como corrente positiva. É importante notar que esta seta não precisa coincidir com o sentido do movimento da carga. Se a carga positiva se move no sentido contrário da seta, temos simplesmente uma corrente negativa.

Seja $Q(t)$ a quantidade de carga que já passou pela superfície imaginada no instante t , contado a partir de algum momento inicial qualquer. A corrente que passa pela superfície no instante t é a taxa de variação da grandeza $Q(t)$ neste instante, ou seja,

$$I(t) = \frac{dQ(t)}{dt} \quad (5.1.1).$$

Mas não podemos medir nem $Q(t)$ e nem $I(t)$ diretamente. Temos apenas as manifestações secundárias à nossa disposição. Será que uma ou várias destas manifestações poderiam ser usadas para quantificar a corrente? Será que a quantidade de calor gerada por tempo, ou a quantidade de gás gerada por tempo ou a força magnética se relacionam com a corrente de forma linear? Parece ser impossível responder a esta pergunta. Como posso verificar se uma grandeza y que pode ser medida é proporcional a uma grandeza x que não pode ser medida? É extremamente surpreendente que tal verificação ou falsificação seja possível. Esta façanha funciona da seguinte maneira:

Primeiramente usamos o feliz fato de que os estoques de desequilíbrio nas pilhas voltaicas ou nas represas hidroelétricas são quase infinitamente grandes, se olhados numa escala de tempo das nossas experiências no laboratório. Podemos ligar um condutor numa fonte elétrica e observar qualquer um dos fenômenos secundários durante horas sem notar nenhuma variação destes fenômenos. Então concluímos que temos uma corrente estacionária nesta situação, ou seja, a carga flui sempre do mesmo jeito. Podemos concluir isto, mesmo se a relação entre $I(t)$ e o fenômeno secundário fosse não linear.

Para fluxos estacionários de uma grandeza conservada, podemos formular uma lei muito simples: numa bifurcação de caminho o fluxo que entra na bifurcação tem que ser igual à soma dos fluxos que saem da bifurcação. Então se ligamos fios condutores na forma de um Y, como indicado na figura 5.1.13, podemos afirmar que no caso de fluxos estacionários a fórmula 5.1.2 vale para as correntes definidas na figura 5.1.13.

$$I = I_1 + I_2 \quad (5.1.2).$$

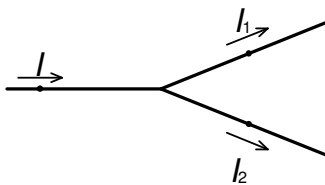


Fig. 5.1.13 Uma bifurcação de fio condutor com definição de três correntes I , I_1 e I_2 .

Então a pesar de não podermos ver as correntes, podemos realizar somas de correntes experimentalmente. É disto que precisamos para a verificação da linearidade de uma função. Espero que o leitor ainda se lembre da definição de linearidade!⁷ Na seção 1.3 falamos de combinações lineares para definir linearidade. Mas basta investigar o comportamento de uma função em relação à formação de somas, pois podemos escrever uma corrente $3I_1$ também como $I_1 + I_1 + I_1$. Então podemos montar experiências com correntes estacionárias numa bifurcação e podemos inserir nos três braços da bifurcação três aparatos idênticos de eletrólise ou três balanços com ímãs idênticos, ou podemos medir a produção de calor nos três braços. Para o caso de inserir aparatos de eletrólise da água nos ramos da bifurcação, sejam $v(t)$, $v_1(t)$ e $v_2(t)$ os volumes de oxigênio gerados antes e depois da bifurcação respectivamente. No caso do uso do balanço magnético, sejam F , F_1 e F_2 as forças magnéticas exercidas sobre a parte horizontal dos respectivos balanços. No caso da geração de calor, sejam P , P_1 e P_2 as respectivas potências de calor. Fazendo este tipo de experiência se verifica que

⁷ O leitor que precisa abrir a seção 1.3 para ver a definição de linearidade não aprendeu ainda a perceber quando algo é importante e a organizar a cabeça por ordem de importância.

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{dV_1(t)}{dt} + \frac{dV_2(t)}{dt} \quad (5.1.3),$$

$$F = F_1 + F_2 \quad (5.1.4),$$

mas

$$P \neq P_1 + P_2 \quad (5.1.5).$$

Então o calor não serve para quantificar a corrente de forma simples. Mas a taxa de produção de oxigênio e a força magnética servem. No caso da eletrólise isto se verifica também para outros tipos de reações químicas envolvendo outras substâncias. Quem verificou este fato foi Faraday. A fórmula (5.1.3) pode ser encarada como parte⁸ da formulação de uma lei conhecida como a *primeira lei de Faraday*.

Estas investigações de Faraday sobre a eletrólise tiveram enorme importância para o desenvolvimento da ciência. Pois a quantificação precisa de corrente com a eletrólise permitiu, pela primeira vez, estabelecer um padrão razoavelmente preciso para a carga elétrica. A sugestão por Gauss de quantificar carga pela lei de Coulomb é teoricamente simples, mas experimentalmente imprecisa. De 1904 até 1948 se adotou a seguinte definição para a unidade de carga elétrica:

1 Coulomb (1C) é a quantidade de carga que é capaz de depositar 1,118 mg de prata numa eletrólise de um sal de prata. (Definição válida desde 1904 até 1948).

Tendo uma unidade de carga, é natural definir uma unidade associada de corrente como C/s . Como esta combinação de unidades aparece frequentemente, foi definida uma abreviação. Ela é chamada de ampère:

$$\boxed{A \underset{def.}{=} \frac{C}{s}} \quad (5.1.6)$$

Em equipamentos eletrônicos 1 ampère seria uma corrente bastante elevada. Em instalações elétricas domésticas 1 ampère é um valor bastante comum.

Que motivou a escolha do valor de 1,118 mg de prata para a definição de Coulomb? Historicamente definiu-se primeiramente uma unidade da voltagem. O químico John Frederic Daniell⁹ tinha melhorado as pilhas de Volta mergulhando o cobre numa solução de sulfato de cobre e o zinco numa solução de sulfato de zinco. As duas soluções tinham contato elétrico através de uma membrana de cerâmica. Quando não há corrente, existe uma diferença de potencial muito estável nos polos desta célula eletroquímica. Os pesquisadores usaram esta diferença de potencial como um padrão. Primeiramente este padrão foi chamado de daniell e depois de volt. Na definição de coulomb tentou-se fazer uma escolha tal que valesse a relação

$$\boxed{1V \times 1C = 1J} \quad (5.1.7)$$

⁸ Esta lei diz ainda que a relação entre volume de gás (ou quantidade de substância depositada no caso de outras reações químicas) e carga independe da concentração da solução.

⁹ John Frederic Daniell (12/03/1790 – 13/03/1845) inventou além de uma célula eletroquímica também um higrômetro baseado no ponto de orvalho e o pirômetro (instrumento para medir temperaturas através da radiação térmica).

Com o volt dado pela célula de Daniell, isto resultou para a definição de 1 Coulomb na escolha do valor de 1,118 mg de prata para a eletrólise. Uma vez feita esta escolha, o padrão do volt foi então desligado da célula de Daniell e foi definido através da relação (5.1.7). Depois de 1948 a definição do coulomb mudou. Hoje se usa uma definição que discutiremos num capítulo que trata de campos magnéticos. Com a definição moderna do ampère mudou também o valor do volt, sempre mantendo a relação (5.1.7) como válida. Na escala moderna a célula de Daniell sem corrente fornece uma voltagem de 1,10 V.

A fórmula (5.1.3) constitui a parte essencial da primeira lei de Faraday. Quando se fala de primeira lei de Faraday deve haver também uma *segunda lei de Faraday*. De fato Faraday fez mais uma descoberta fundamental sobre a eletrólise. Fazendo eletrólise com diferentes substâncias, ele descobriu que a quantidade de carga necessária para depositar um mol de substância é sempre um múltiplo inteiro de certa quantidade de carga Q_1 . Isto sugere definir uma constante $F \stackrel{def.}{=} Q_1 / \text{mol}$ que recebeu o nome de *constante de Faraday* e tem o valor

$$F = 96485 \text{ C mol}^{-1} \quad (5.1.8).$$

Esta segunda lei de Faraday sugere que as partículas que transportam a carga dentro da solução aquosa são átomos ou moléculas eletricamente carregados com algum número inteiro de cargas elementares¹⁰. O número inteiro é uma característica da substância química envolvida. Faraday chamou estas partículas eletricamente carregadas de íons¹¹. Com esta interpretação da segunda lei de Faraday baseada na hipótese de íons que têm múltiplos da carga elementar, existe uma relação fundamental entre a constante de Faraday, da carga elementar e do número de moléculas dentro de um mol N_A (constante de Avogadro).

$$F = e \times N_A \quad (5.1.9).$$

A força magnética que um ímã exerce sobre um fio elétrico com corrente pode também ser usada para medir corrente elétrica. Este método de medida é muito mais prático que o método eletrolítico. Para aumentar a sensibilidade do instrumento, costuma-se usar uma geometria que permite aproveitar a mesma corrente diversas vezes. Nestes instrumentos o condutor que recebe a força não tem forma de balanço, mas é um fio encapado com uma fina camada de verniz enrolado numa moldura retangular. Dois lados desta bobina retangular são expostos a um ímã cujos polos têm forma de semilua. Se há N voltas de arame enrolado na moldura, a força magnética aumenta por um fator N em comparação com uma única passagem da corrente. A bobina pode girar em torno de um eixo e ela é presa em duas molas que definem uma orientação de equilíbrio e servem também para levar a corrente até a bobina. A orientação da moldura pode ser lida com a ajuda de um ponteiro. Uma determinada corrente provocará uma determinada mudança de orientação de equilíbrio e esta mudança de ângulo é usada

¹⁰ Esta interpretação da segunda lei de Faraday em termos de cargas elementares foi dada por Helmholtz em 1881 na sua famosa "Faraday Lecture" (<http://www.chemteam.info/Chem-History/Helmholtz-1881.html>). Antes já em 1874, George Johnstone Stoney percebeu que a segunda lei de Faraday indica uma quantização da carga e ele até estimou o valor da carga elementar com estimativas do número de Avogadro. Sua estimativa (em termos de unidades modernas) era $e \approx 10^{-20} \text{ C}$.

¹¹ O nome vem do grego *íón* (aquele que anda) que é derivado do verbo *íévαι* (andar). Os íons são as partículas que andam na solução aquosa durante uma eletrólise.

para medir a corrente. A figura 5.1.14 mostra a parte central deste tipo de medidor que é chamado de *galvanômetro*. A figura 5.1.15 mostra um instrumento inteiro deste tipo.

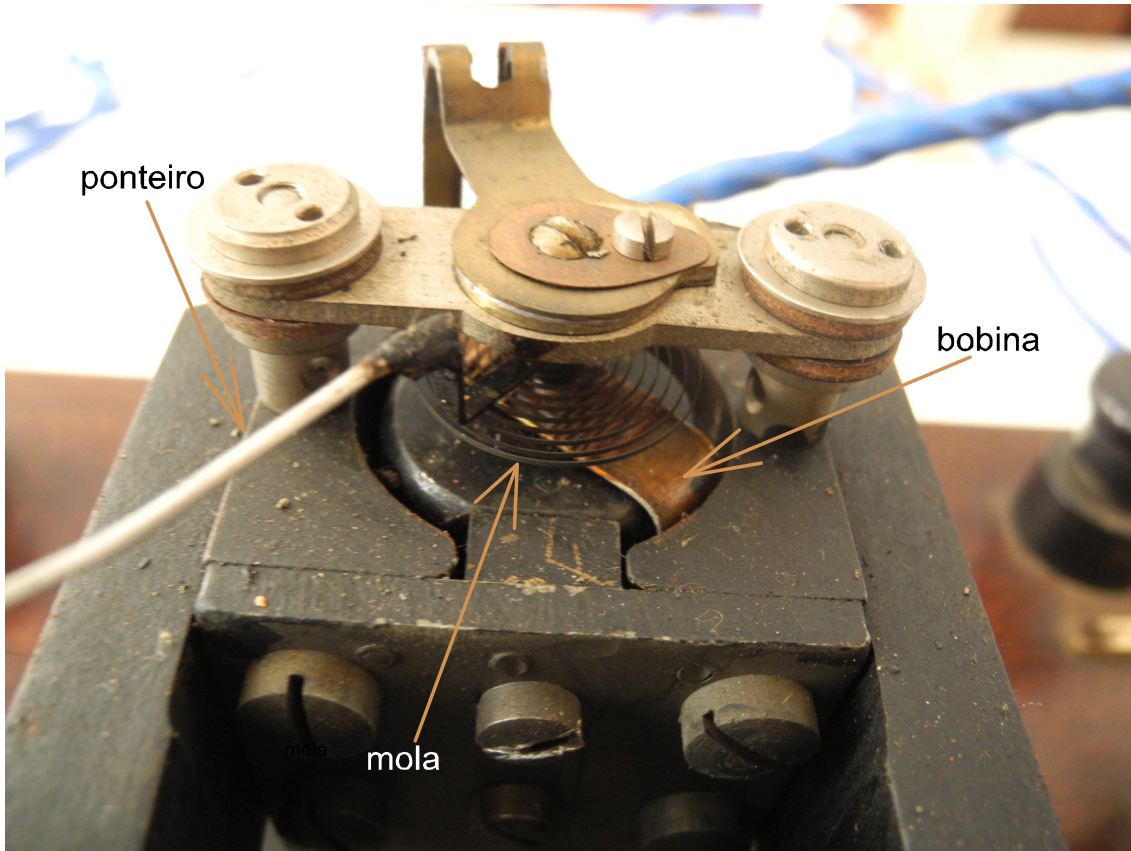


Fig. 5.1.14 Parte central de um galvanômetro. O fio de cobre enrolado na moldura retangular é tão fino e as espiras são tão densas que os fios não aparecem individualmente na fotografia. Dos quatro lados da bobina apenas um fica visível na imagem e este não recebe a ação do ímã. Os lados expostos ao ímã são aqueles que descem na fenda entre os polos do ímã (semiluas) e um cilindro maciço de ferro cujo eixo de simetria coincide com o eixo de rotação da bobina. Este cilindro ajuda a criar um campo magnético cujo módulo tem o mesmo valor para todas as orientações da bobina. A bobina retangular pode ser considerada como um balanço duplo. A fotografia foi tirada de uma peça do acervo histórico da Universidade Federal de Juiz de Fora.



Fig. 5.1.15 Galvanômetro. A fotografia foi tirada de uma peça do acervo histórico da Universidade Federal de Juiz de Fora. Agradecemos ao Professor Paulo Noronha por ter disponibilizado as peças das figuras 5.1.14 e 15.

A relação entre ângulo e corrente depende do ímã usado. Para calibrar o instrumento pode-se colocá-lo em série com um equipamento de eletrólise para poder comparar as taxas de deposição de matéria com os ângulos de deflexão do ponteiro do medidor magnético como mostrado na

figura 5.1.16. Este método de calibração usa mais uma propriedade das correntes estacionárias. Já usamos o fato de que corrente estacionária se divide numa bifurcação sem perdas e sem acréscimos (fórmula (5.1.2)). Num trajeto condutivo sem bifurcações, uma corrente estacionária tem que ter o mesmo valor em todos os pontos do trajeto, como indicado na figura 5.1.17. Ambas as propriedades são consequências da conservação de carga elétrica. Então no arranjo da figura 5.1.16 a mesma corrente que atravessa o galvanômetro atravessa também o aparato de eletrólise. Isto permite estabelecer a relação entre ângulo de deflexão do ponteiro do galvanômetro com a corrente medida eletroliticamente.

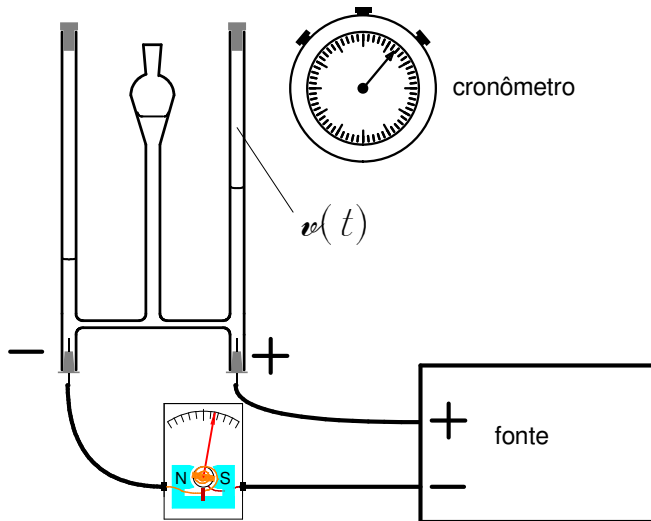
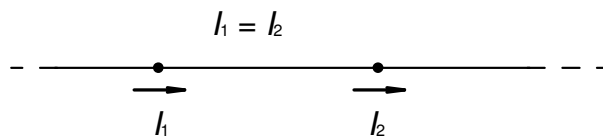


Fig. 5.1.16 Calibração de um galvanômetro.

Os galvanômetros foram usados durante muitas décadas. Hoje é relativamente raro encontrar este tipo de medidor num laboratório. Eles foram substituídos por instrumentos eletrônicos digitais. Mais tarde comentaremos sobre o princípio de funcionamento destes instrumentos modernos.

Fig. 5.1.17 Em regime estacionário, todos os pontos num trajeto condutivo sem bifurcações levam a mesma corrente.



Exercícios:

E 5.1: Construa um galvanômetro em casa.

E 5.2: Procure os valores da carga elementar e do número de Avogadro numa tabela de constantes e verifique a relação (5.1.9).

E 5.3: Escreva os pontos de destaque desta seção.