Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 48, e20260262 (2026)
www.scielo.br/rbef
DOI: https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2026-0262

Licença Creative Commons

Tradução comentada do artigo de 1826 de Ohm no qual apresentou sua lei da condução elétrica

Annotated translation of Ohm's 1826 article presenting his law of electrical conduction

André K.T. Assis*[1]

[1]Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Física Gleb Wataghin, 13083-859, Campinas, SP, Brasil.

Recebido em 02 de junho de 2026. Revisado em 05 de agosto de 2026. Aceito em 23 de agosto de 2026.

O ano de 2026 marca o bicentenário da publicação do artigo fundamental de Georg Simon Ohm (1789–1854) no qual apresentou a lei que leva seu nome. Apresento uma tradução comentada dessa obra fundamental do eletromagnetismo a partir do texto original em alemão.
Palavras-chave: Georg Simon Ohm, lei de Ohm, tensão, resistência, corrente elétrica, eletromagnetismo.

The year 2026 marks the bicentennial of the publication of Georg Simon Ohm's (1789–1854) seminal article, in which he presented the law that bears his name. I present an annotated translation of this fundamental work of electromagnetism based on the original German text.
Keywords: Georg Simon Ohm, Ohm's law, voltage, resistance, electric current, electromagnetism.

1. Introdução

O ano de 2026 marca o bicentenário da publicação do artigo fundamental do físico alemão Georg Simon Ohm (1789–1854), Figura 1, no qual apresentou a lei que leva seu nome.

Título do artigo original em alemão: Bestimmung des Gesetzes, nach welchem Metalle die Kontakt-Elektrizität leiten, nebst einem Entwurfe zu einer Theorie des Voltaschen Apparates und des Schweiggerschen Multiplikators (Determinação da Lei Segundo a Qual os Metais Conduzem a Eletricidade de Contato, Juntamente com um Esboço de uma Teoria do Aparelho de Volta e do Multiplicador de Schweigger). Apresento aqui uma tradução comentada dessa obra fundamental do eletromagnetismo a partir de sua versão original em alemão.[1] Diversos autores analisaram o trabalho de Ohm nesses últimos 200 anos [4–13].

A lei de Ohm é uma das relações mais importantes de todo o eletromagnetismo relacionando a voltagem aplicada a um resistor com a corrente elétrica fluindo por ele. Ela é razoavelmente simples, aparecendo em quase todos os livros que lidam com a eletricidade, tanto em nível de ensino médio quanto universitário. Ela também é explorada a nível experimental nos laboratórios de física básica. Contudo, na época de Ohm haviam muitas dificuldades em relacionar os conceitos de corrente e tensão, além da compreensão acerca da estrutura dos materiais (resistência) utilizados nos experimentos. Seu trabalho marcou para sempre o desenvolvimento do eletromagnetismo e da teoria elétrica.



Figura 1: Georg Simon Ohm (1789–1854).

Nos livros didáticos de física é comum encontrar a primeira e segunda leis de Ohm. A primeira é usualmente apresentada da seguinte maneira: quando se aplica uma

*Endereço de correspondência: assis@ifi.unicamp.br

Editor-Chefe: Marcello Ferreira

[1] [1]. Há uma tradução quase completa para o inglês em [2], faltando apenas as Notas de rodapé escritas por Ohm. Há também uma tradução parcial para o inglês em [3].

tensão ou diferença de potencial U entre as extremidades de um condutor metálico mantido a uma temperatura constante, flui por ele uma corrente elétrica I proporcional à tensão. A razão entre a tensão aplicada e a corrente é, portanto, constante, sendo chamada de resistência elétrica R. Matematicamente essa lei é expressa pela seguinte equação:

$$U = RI. \tag{1}$$

No Sistema Internacional de Unidades a tensão U é medida em volts, V, a resistência R é medida em ohms, Ω, enquanto que a corrente I é medida em amperes, A. Quando um material segue essa lei diz-se que ele é um condutor ôhmico. Essa lei também é chamada muitas vezes nos livros didáticos simplesmente como lei de Ohm.

A segunda lei de Ohm estabelece que a resistência é diretamente proporcional ao comprimento x de um condutor metálico homogêneo, inversamente proporcional à sua área de seção transversal S, dependendo ainda das características físicas e do material de que ele é feito. Matematicamente essa lei é expressa por:

$$R = \rho\frac{x}{S}, \tag{2}$$

onde ρ é denominada de resistividade do resistor. Ela depende da natureza do material (se é feito de cobre, prata, ...) e de sua temperatura, sendo medida em $\Omega\cdot$m. A condutividade elétrica σ é definida como o inverso da resistividade, $\sigma = 1/\rho$. Às vezes a condutividade também é chamada de poder condutor. Os limites de validade da lei de Ohm foram discutidos por Silveira [14].

2. Trabalhos Anteriores de Outros Autores

Inicialmente listo alguns trabalhos fundamentais feitos antes de Ohm e que têm uma ligação direta com sua pesquisa.

Entre 1777 e 1787 o engenheiro francês Charles Augustin de Coulomb (1736–1806) criou a balança de torção e chegou na lei de torção mostrando que o torque exercido por ela é proporcional ao ângulo de torção entre o topo e a base do filamento de sustentação. Com isso foi possível medir forças e torques extremamente pequenos, o que permitiu a Coulomb chegar também na lei de força entre dois pequenos corpos eletrizados, assim como na lei de força entre dois polos magnéticos. As principais obras de Coulomb sobre torção, eletricidade e magnetismo já se encontram traduzidas e comentadas em português.[2] Em seus artigos de 1825 e 1826 Ohm utilizou uma balança de torção para determinar a ação magnética de um condutor com corrente sobre uma agulha imantada.

Em 1800 o físico e químico italiano Alessandro Volta (1745–1827) apresentou ao mundo sua maior invenção, a pilha ou bateria elétrica. Essa descoberta foi anunciada em um artigo que já se encontra traduzido em português [17]. Em um de seus formatos originais a pilha era composta de discos alternados de cobre e zinco separados por discos de papelão umedecidos de solução condutora. Quando as extremidades da pilha eram conectadas por um condutor, diversos efeitos elétricos, térmicos e químicos podiam ser observados. Com isto foi possível obter uma corrente elétrica constante em um circuito por meio de um fio metálico conectando os dois terminais de uma pilha voltaica. Em seu artigo de 1825 Ohm utilizou uma pilha voltaica como sua fonte de tensão, discutindo também diversos experimentos com essa bateria em seu trabalho de 1826.

Quando uma bússola é livre para girar em um plano horizontal ao redor de um eixo vertical passando ao longo de seu centro de gravidade ela se orienta no equilíbrio ao longo do meridiano magnético local. Em 1820 o físico e químico dinamarquês Hans Christian Ørsted (1777–1851) observou a deflexão de uma agulha imantada em relação ao meridiano magnético quando passava uma corrente elétrica por um longo fio horizontal colocado abaixo ou acima da bússola. Apresentou sua descoberta em um texto em latim de 4 páginas que enviou a diversos cientistas. Esse trabalho já está traduzido em português.[3] Ele criou o termo eletromagnetismo para caracterizar a interação entre ímãs e condutores com corrente. Ohm utilizou essa descoberta de Ørsted como base de seu galvanômetro.

Entre 1820 e 1827 o físico francês André-Marie Ampère (1775–1836), motivado pelo trabalho de Ørsted, criou toda a ciência da eletrodinâmica descrevendo a interação entre condutores com corrente. Além disso, conseguiu unificar a eletrodinâmica e o magnetismo ao supor a existência de correntes elétricas no interior dos ímãs e da Terra, utilizando para isso a força entre elementos de corrente que obteve. Supôs que essa força é proporcional ao produto das intensidades de corrente nos dois elementos. Sua obra fundamental foi publicada em 1826, estando totalmente disponível em português [21]. Ampère mostrou que o desvio de uma bússola colocada à mesma distância nas proximidades de um fio ligado aos terminais de uma pilha galvânica era o mesmo em todos os pontos do circuito, até mesmo quando a bússola era colocada sobre a pilha. Isso levou ao conceito de uma corrente elétrica fechada tendo a mesma intensidade em todos os pontos do circuito. Ele propôs utilizar o desvio da agulha como medidor da intensidade de corrente. Ohm assumiu que a ação magnética de um fio com corrente ao atuar sobre uma agulha imantada colocada em suas proximidades, apoiada pelo filamento de uma balança de torção, era proporcional ao ângulo de torção do filamento.

Utilizando a descoberta de Ørsted, o químico, físico e matemático alemão Johann Schweigger (1779–1857)

[2] [15]. Para uma análise dos estudos elétricos antes de Coulomb ver [16].

[3] [18]. Ver também [19] e [20].

 DOI: https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2026-0262

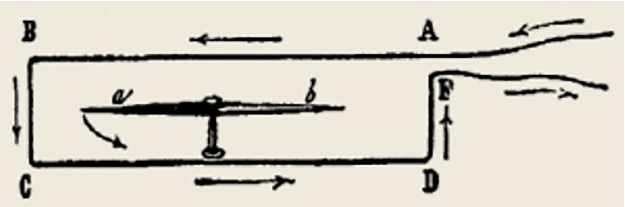


Figura 2: Uma espira retangular com corrente fluindo ao redor de uma agulha imantada.

construiu um dos primeiros galvanômetros em 1820. Seu princípio de funcionamento pode ser ilustrado pela Figura 2 [11].

As duas porções de corrente AB e CD de sentidos opostos combinam seus torques ao atuar sobre a agulha imantada no centro, o mesmo ocorrendo com as porções BC e DF. Ele amplificou o efeito observado por Ørsted ao formar uma bobina com várias espiras enroladas ao redor de uma estrutura retangular, no centro da qual estava suspensa uma agulha imantada. Ao supor que o torque exercido pela bobina sobre a bússola era proporcional à intensidade de corrente na bobina, era possível determinar essa corrente elétrica. Esse instrumento foi chamado de multiplicador, por ampliar o efeito de um único fio.[4] O galvanômetro de Schweigger foi discutido por Ohm em seus artigos de 1825 e 1826.

A partir de 1820 alguns pesquisadores como o químico britânico Humphry Davy (1778–1829), o físico e matemático britânico Peter Barlow (1776–1862) e o físico francês Antoine-César Becquerel (1788–1878) pesquisaram o poder condutor de fios metálicos ligados a uma pilha voltaica. Eles concluíram que a ação da corrente sobre uma agulha imantada colocada em suas proximidades diminui quando se aumenta o comprimento do fio ligado aos terminais da bateria ou quando é diminuída a área de seção reta do fio. Eles também compararam as condutividades de fios constituídos de metais diferentes. Obtiveram resultados contraditórios em suas pesquisas [29–32]. Essas pesquisas foram citadas por Ohm em seus artigos de 1825 e 1826.

Em 1821 o físico nascido na Estônia de origem germano-báltica, Thomas Johann Seebeck (1770–1831), também influenciado pela descoberta de Ørsted, descobriu o que ficou conhecido como efeito Seebeck, posteriormente denominado como efeito termoelétrico. Seu trabalho publicado em alemão já está parcialmente traduzido em português.[5] Ele encontrou que um circuito formado por dois metais diferentes desviava a agulha de uma bússola localizada entre os dois condutores quando as duas junções dos metais eram mantidas a

[4] [22] e [23, 24] com tradução para o francês em [25]; e [26]. Ver também [27] e [28].

[5] [33] e [34] com tradução parcial para o português em [35]. Ver também [36–42], [7, Cap. 11], [20, 43] e [44].

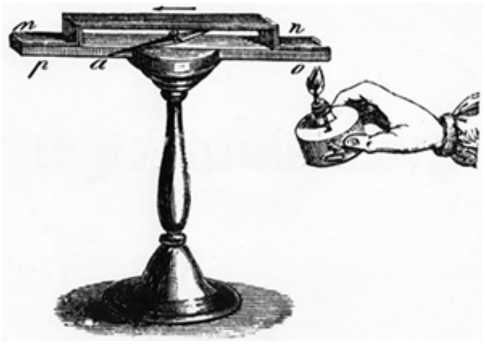


Figura 3: Efeito termoelétrico.

temperaturas diferentes, como representado na Figura 3 [45, Figura 553, pág. 707].

Duas barras mn e po, constituídas de metais diferentes, são soldadas em suas extremidades. Quando as extremidades estão na mesma temperatura a agulha imantada a aponta ao longo do meridiano magnético. Se uma das duas junções é aquecida, a bússola é desviada. Na maioria de seus experimentos utilizou cobre, bismuto e antimônio. Ele acreditava que esse efeito era devido a um magnetismo dos metais induzido pela diferença de temperatura. Ele falava de uma "tensão magnética". Concluiu ainda, de forma qualitativa e fenomenológica, que a intensidade dessa tensão magnética no circuito era proporcional à diferença de temperatura entre as duas junções. Contudo, foi percebido rapidamente por Ørsted, Fourier e outros que uma força termoelétrica era criada pela diferença de temperatura, induzindo uma corrente elétrica no circuito, sendo que essa corrente elétrica é que desviava a agulha imantada [35–38]. Mais especificamente, a diferença de temperatura produz uma voltagem ou diferença de potencial elétrico que gera uma corrente elétrica em um circuito fechado. Se temos 2 condutores metálicos A e B de natureza diferentes acoplados em dois pontos, como no caso de um anel em que cada metade é feita de um metal diferente, com esses pontos de contato mantidos a temperaturas diferentes, surge uma força eletromotriz no circuito fazendo com que circule uma corrente elétrica por ele que pode ser indicada pela deflexão de uma agulha imantada colocada no centro do anel. Os dois metais diferentes são denominados de termopar. Ohm substituiu a pilha voltaica que havia utilizado em 1825 por um termopar como sua fonte de tensão em seu artigo de 1826. Concluiu que a força de excitação desse circuito, análoga ao conceito moderno de tensão elétrica, era quantitativamente proporcional à diferença de temperatura entre as duas junções.

Em 1825 o físico italiano Leopoldo Nobili (1784–1835) melhorou o multiplicador de Schweigger ao utilizar duas agulhas imantadas de mesmo momento magnético, mas com seus polos invertidos. Com isso eliminou a influência do magnetismo terrestre sobre esse sistema, tornando o galvanômetro mais sensível [46, 47]. O trabalho de Nobili foi discutido por Ohm em 1826.

3. O Contexto do Trabalho de Ohm

Na época de Ohm não estava clara a distinção entre tensão e corrente elétrica. Ampère foi um dos primeiros pesquisadores a distinguir claramente entre esses conceitos em seu primeiro artigo sobre eletrodinâmica de 1820 pelos efeitos que produziam em diversas circunstâncias. Esse trabalho em duas partes já se encontra traduzido e comentado em português [21, Caps. 23 e 24]. Ele criou os termos *eletrostática* para caracterizar os fenômenos ligados à eletricidade em repouso (atração de corpos leves por substâncias eletrizadas por atrito, tensão elétrica, acúmulo de cargas opostas em capacitores, polarização elétrica, produção de faíscas etc.) e *eletrodinâmica* para caracterizar os fenômenos ligados à eletricidade em movimento (corrente elétrica, desvio de uma bússola pela corrente, decomposição química na eletrólise e em uma pilha etc.). O conceito de resistência elétrica também ainda não era totalmente claro na época de Ohm.

Uma dificuldade encontrada por diversos pesquisadores nesses anos iniciais é que ocorriam flutuações nos desvios das bússolas colocadas nas proximidades de um fio que era ligado aos terminais de uma pilha voltaica. Além disso, as primeiras pilhas voltaicas perdiam rapidamente a potência quando um fio era ligado aos seus terminais, fechando o circuito. Isso dificultava bastante a obtenção de uma lei matemática que explicasse os diversos fatos experimentais observados. Em 1825 Ohm chegou a uma lei (alterada em seu artigo de 1826) utilizando em seus experimentos uma pilha voltaica. Essa lei funcionava de forma aproximada para fios curtos, mas não descrevia corretamente suas observações no caso de fios longos. No artigo de 1826 alterou a fonte de tensão para um termopar, conseguindo assim uma fonte de corrente que mantinha uma potência constante por um longo intervalo de tempo ao manter invariáveis as temperaturas diferentes nas duas junções de seu termopar. Chegou então à lei final que descrevia de forma satisfatória não apenas os seus experimentos, mas também aqueles realizados por outros pesquisadores de sua época.

Na época de Ohm, quando várias pilhas voltaicas eram ligadas em série em circuito aberto, alguns fenômenos eram ampliados em relação a uma única pilha, tais como os choques ou descargas elétricas produzidas, o ângulo de abertura de um eletroscópio ligado a um dos terminais da pilha etc. Por outro lado, ao fechar o circuito com um fio condutor, alguns fenômenos permaneciam quase que com as mesmas intensidades do que no caso de uma única pilha, tais como os desvios de uma bússola colocada nas proximidades do circuito. Parecia que os efeitos da tensão elétrica e da corrente eram independentes. Isso era misterioso. Um dos objetivos de Ohm em seu trabalho de 1826 foi obter uma teoria que esclarecesse o funcionamento de uma pilha voltaica com um circuito fechado, como indicado no título de seu artigo [4, 6, 7, 11–13]. Esse mistério só foi esclarecido com o trabalho de Ohm ao introduzir o conceito de resistência interna da fonte de tensão (pilha voltaica ou termopar), juntamente com o conceito de resistência externa ligada ao fio que fechava o circuito conectando os dois polos da pilha (ou conectando os polos extremos de um sistema com várias pilhas ligadas em série).

Embora o galvanômetro de Schweigger tenha sido denominado de "multiplicador", a corrente elétrica indicada pelo desvio de uma bússola colocada em seu centro não era proporcional ao número de espiras de seu instrumento. Em particular, ao aumentar o número de espiras, o ângulo da agulha imantada em relação ao meridiano magnético atingia um máximo e depois diminuía. Isso também era misterioso e interessou a Ohm, como indicado no próprio título de seu artigo. Isso só foi esclarecido pelos conceitos de resistência interna (ligada à fonte de tensão, sendo um fator constante) e externa (ligada ao fio de conexão que fechava o circuito, aumentando com seu comprimento) apresentados por Ohm.

4. O Artigo de 1825 de Ohm

Ohm também foi motivado a pesquisar o eletromagnetismo pela descoberta de 1820 de Ørsted. Publicou seu primeiro trabalho em 1825 no qual chegou a uma primeira formulação de sua lei: Vorläufige Anzeige des Gesetzes, nach welchem Metalle die Kontakt-Elektrizität leiten (Apresentação preliminar da lei segundo a qual os metais conduzem a eletricidade de contato) [10, 11, 48, 49]. Essa primeira formulação de sua lei foi alterada depois em seu artigo de 1826. A representação desse experimento aparece na Figura 4 [11].

Nesse primeiro artigo utilizou uma pilha voltaica como fonte de corrente. Ligou os terminais da pilha a dois fios de cobre A e B de comprimentos fixos. Eles mergulhavam em recipientes com mercúrio M e N. Ligou um outro fio de cobre C de comprimento fixo entre os recipientes de mercúrio M e O. Acima do fio C colocou sua balança de torção. Os recipientes de mercúrio N e O eram ligados pelo fio de cobre D, fechando o circuito. Esse fio D era o fio de teste. Ohm podia mudar o material de que era feito, podia variar seu comprimento x, assim como sua área de seção reta S. Estimou a intensidade de corrente pelo torque que atuava sobre uma agulha imantada. Essa agulha era suspensa na extremidade inferior de um filamento vertical, sendo este instrumento uma balança

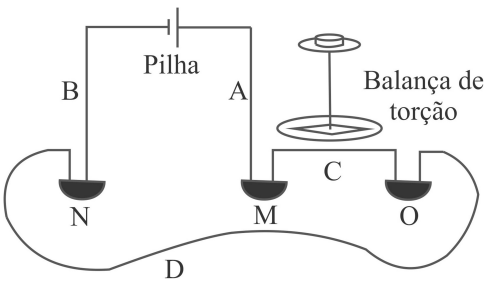


Figura 4: Esquema do experimento de Ohm de 1825.

 DOI: https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2026-0262

de torção inspirada naquelas construídas por Coulomb. Ela possuía um botão graduado na extremidade superior com 100 divisões. Ou seja, uma volta completa do botão era igual a 100 divisões, que correspondia a um ângulo de 360°. Logo cada divisão correspondia a um giro de $3,6°$. Essa agulha ficava inicialmente orientada ao longo do meridiano magnético quando não passava corrente no circuito. Nessa situação o fio não estava torcido e o botão superior da balança indicava o zero. Quando o circuito era fechado, a agulha era desviada, como na experiência de Ørsted. Quando ela atingia o equilíbrio nessa nova situação ela estava sob a ação de três torques: o torque exercido pela corrente, aquele exercido pelo magnetismo terrestre, e o torque devido à torção do filamento. Ohm girava então o botão superior para trazer a agulha de volta ao meridiano magnético. Nesta situação final ela ficava sob a ação de dois torques iguais e opostos, a saber, aquele exercido pelo fio C com corrente e o torque exercido pela torção do filamento. Ohm sabia, pelo trabalho de Coulomb, que o torque exercido pelo filamento era proporcional ao seu ângulo de torção. Esse ângulo era então uma medida do torque exercido pelo fio com corrente. Ohm tinha então um galvanômetro supondo que esse torque era proporcional à intensidade de corrente elétrica fluindo pelo fio. Ohm não utilizou a expressão "intensidade de corrente". Em vez disso falava da "força ou ação magnética" exercida pelo fio com corrente sobre a agulha imantada de sua balança de torção. Podemos assumir que essas duas grandezas são equivalentes ou proporcionais.

Com o auxílio desse instrumento ele buscou uma relação entre o comprimento x do condutor variável e a perda de força magnética que ocorria ao aumentar esse comprimento. Inicialmente colocou entre os recipientes de mercúrio N e O da Figura 4 um condutor curto de grande diâmetro, que supunha não introduzir qualquer perda significativa de força magnética e que denominou de fio "normal". Alternou a colocação desse fio normal com outros cinco fios de cobre com comprimentos variando de cerca de dez centímetros a mais de oito metros. Denominou de X_o à força medida com seu condutor normal e X à força medida com os outros condutores. Definiu a perda de força v como a diminuição relativa da força, a saber, $v = (X_o - X)/X_o$. A partir de suas experiências obteve a seguinte relação empírica entre a perda de força v e o comprimento x de seus condutores:

$$v = m \log\left(1 + \frac{x}{a}\right). \tag{3}$$

A grandeza a nessa equação representa o comprimento ao qual o restante do circuito é equivalente (em termos modernos, esse comprimento representa a resistência da parte formada pelos condutores fixos A e B, juntamente com a resistência interna da bateria), sendo m outra grandeza característica do circuito. Ele concluiu que essa equação representava bem seus dados experimentais para fios curtos, não sendo tão boa para fios longos. Em 1826 ele chegou em outra relação matemática que descreveu muito bem seus dados experimentais e os de outros pesquisadores. Nesse primeiro artigo ele não se interessou particularmente na questão da tensão da pilha voltaica.

5. O Artigo de 1826 de Ohm

Ohm forneceu o seguinte título ao seu trabalho: "**Determinação da Lei Segundo a Qual os Metais Conduzem a Eletricidade de Contato, Juntamente com um Esboço de uma Teoria do Aparelho de Volta e do Multiplicador de Schweigger**". A expressão "eletricidade de contato" (*Kontakt-Elektrizität* em alemão) refere-se aos fenômenos elétricos associados com uma pilha voltaica. Com essa expressão estava distinguindo os fenômenos que estudou dos fenômenos usuais da eletricidade estática obtida por atrito, denominada de triboeletricidade ou eletrização por atrito, como no efeito âmbar da atração de corpos leves por uma substância eletrizada por atrito [50, 51]. Havia um grande debate sobre o funcionamento da pilha elétrica. Volta defendia que a eletricidade era colocada em movimento pelo simples contato entre dois metais diferentes. Davy e outros defendiam que eram reações químicas no interior da pilha que colocavam a eletricidade em movimento.

Um dos problemas encontrados em seu artigo original foi a flutuação e a perda de potência de sua bateria voltaica. Quando o artigo de Ohm foi publicado nos *Annalen der Physik* de 1825, seu editor, o físico alemão Johann Christian Poggendorff (1796–1877), acrescentou a seguinte nota:[6]

> Espera-se que o autor encontre tempo para empreender esta e outras investigações semelhantes utilizando o chamado circuito termoelétrico. Os efeitos deste circuito são muito mais estáveis do que os do chamado circuito hidroelétrico e, por isso, permitem medições muito precisas.

As expressões circuito termoelétrico e circuito hidroelétrico são devidas a Ørsted [36–38]. O circuito hidroelétrico refere-se a um circuito ligado a uma bateria voltaica (constituída, por exemplo, por placas de cobre e zinco imersas em ácido sulfúrico diluído), ou seja, uma pilha que utilizava um eletrólito líquido para gerar eletricidade. O circuito termomagnético ou circuito termoelétrico refere-se a um circuito ligado a uma bateria constituída por um termopar que funciona pelo efeito termoelétrico associado a uma diferença de temperatura entre as junções do termopar.

Uma representação de sua experiência aparece na Figura 5.

A nova montagem experimental de Ohm tinha uma barra de bismuto no formato da letra U invertida representada pela linha grossa pontilhada na Figura 5.

[6] [49, pág. 83] e [5, pág. 542].

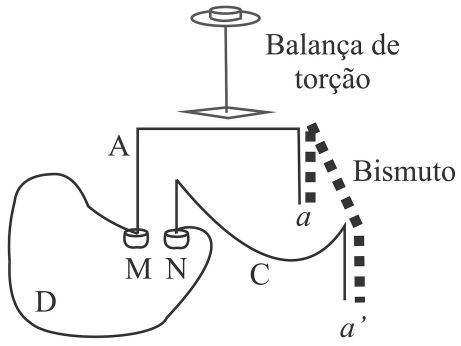


Figura 5: Esquema da experiência de Ohm de 1826.

Em suas duas pernas eram fixadas duas tiras de cobre A e C. O fio A era ligado ao recipiente M preenchido com mercúrio. Acima desse fio estava sua balança de torção com o botão graduado na extremidade superior e a agulha imantada suspensa na extremidade inferior de seu filamento de sustentação. O outro fio de cobre C era ligado a um outro recipiente de mercúrio N. Esses dois recipientes de mercúrio eram ligados por um terceiro fio de cobre D. Este era o fio de teste. Ohm podia variar o material de que esse fio era feito, podia alterar seu comprimento x, assim como sua área de seção reta S. As duas pernas da barra de bismuto ligadas aos dois fios de cobre, representadas pelas letras a e a' na Figura 5, eram inseridas em dois recipientes com água que não estão indicados nessa Figura.

No artigo de 1826 Ohm obteve sua classificação dos metais de acordo com seu poder de condução. Ele também concluiu de seus experimentos, como haviam feito Davy e Becquerel, que o valor da condutividade de um fio cilíndrico não era modificado se multiplicarmos seu comprimento e sua seção reta por um mesmo fator. Em outras palavras, esse resultado experimental representa aquilo que é denominado nos livros didáticos como segunda lei de Ohm, equação (2).

A parte principal do artigo analisa a influência do comprimento x do fio de teste, assim como a influência das temperaturas T_a e $T_{a'}$ nas junções do termopar, ou seja, nas pernas a e a' da Figura 5 onde as barras de bismuto são fixadas aos dois fios de cobre. As medições foram feitas com oito fios denominados de condutores número 1 até 8, com comprimentos que variavam de 2 a 130 polegadas, todos com diâmetro de 7/8 de linha. Ohm utilizava as unidades francesas: 1 pé = 12 polegadas = 144 linhas = 0,3248 m = 32,48 cm. Logo 1 polegada = 12 linhas = 0,02707 m = 2,707 cm. Já 1 linha = 0,002256 m = 0,2256 cm. Com isso vem que seus fios iam de 5,4 cm a 3,5 m, todos com diâmetro $D = 1,97$ mm. Supondo uma resistividade do cobre de $\rho = 1,7 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot \mathrm{m}$ vem pela Equação (2), $R = \rho x/S = 4\rho x/(\pi D^2) = 0,005577x$, que seus fios tinham as seguintes resistências indicadas na Tabela 1.

Quando as duas pernas do U invertido estavam à mesma temperatura, a agulha imantada apontava ao longo do meridiano magnético, o filamento da balança não estava torcido e o botão superior da balança apontava para o zero. As duas junções ou pernas do U invertido foram então inseridas em dois recipientes contendo água fervente (80º Réaumur ou 100º Celsius) e gelo derretido (0º Réaumur ou 0º Celsius). A agulha foi desviada do meridiano magnético. Quando ela estava nessa segunda posição de equilíbrio, ela estava sob a ação de três torques, a saber, aquele exercido pelo fio com corrente, o torque exercido pelo magnetismo terrestre, e o torque exercido pelo fio de torção. Ohm girou então o botão superior de sua balança de torção até que a agulha voltasse a apontar ao longo do meridiano magnético. Nessa situação de equilíbrio final ela ficava sob a ação de dois torques iguais e opostos, a saber, aquele exercido pela corrente e o torque exercido pela torção do filamento. Esse torque era proporcional ao ângulo de torção do filamento entre sua extremidade superior com o botão graduado e sua extremidade inferior na qual estava a agulha. A medida desse ângulo forneceu então a Ohm o valor do torque exercido pelo fio com corrente sobre a agulha imantada.

Ohm obteve então uma expressão matemática que se ajustou muito bem aos seus dados experimentais, tanto para fios curtos quanto para fios longos, a saber:

$$X = \frac{a}{b + x}. \tag{4}$$

Nessa equação a grandeza X que Ohm denominou de "força magnética" ou "intensidade da ação magnética" representava o torque exercido pelo fio com corrente sobre a agulha imantada. Esse torque foi medido pelo ângulo de torção do filamento de sua balança. Um giro de 360º correspondia a 100 divisões do círculo graduado superior de sua balança. Logo cada divisão correspondia a $3,6$º. Supondo que o torque era proporcional à corrente no fio, vem que esse ângulo era proporcional à intensidade de corrente fluindo pelo fio de cobre localizado abaixo da agulha imantada. Além disso, x era o comprimento do fio que estava testando, enquanto que a e b eram duas constantes. Como Ohm forneceu suas medidas de x em polegadas, a grandeza b

Tabela 1: Comprimento x e resistência R dos fios de cobre testados por Ohm.

Nº do condutor	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
x em polegadas	2	4	6	10	18	34	66	130
x em metros	0,054	0,108	0,162	0,271	0,487	0,920	1,787	3,519
R em ohms (Ω)	0,0003	0,0006	0,0009	0,0015	0,0027	0,0051	0,0100	0,0196

 DOI: https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2026-0262

Tabela 2: Comparação entre os valores experimentais e os valores teóricos fornecidos pela Equação (4) com uma diferença de temperatura de 80° Réaumur entre as duas junções do termopar.

	Condutor							
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Valor experimental X_e	326,75	300,75	277,75	238,25	190,75	134,5	83,25	48,5
Valor teórico X_t	328	300,5	277,5	240,75	190,5	134,5	84,25	48,5
Diferença percentual	0,38%	0,08%	0,09%	1,04%	0,13%	0%	1,19%	0%

também estava em polegadas. Ohm denominou de "comprimento de resistência" ou de "comprimento reduzido" à constante b, estando ela associada essencialmente à resistência interna de sua fonte de tensão (termopar ou pilha voltaica). Para ajustar seus dados experimentais à fórmula (4), com x variando de 2 a 130 polegadas, ele usou $b = 20\frac{1}{4} = 20,25$ polegadas.

Apresento na Tabela 2 os valores de X_e da primeira série experimental de Ohm para os oito fios. Cada um desses valores corresponde ao número de divisões do círculo graduado superior de sua balança de torção. Apresento também na segunda linha os valores teóricos X_t que obteve usando a Equação (4) com $a = 7285$ e $b = 20\frac{1}{4} = 20,25$ polegadas. Na terceira linha coloco a diferença percentual entre esses valores, ou seja, $[(|X_t - X_e|)/X_t] \times 100\%$:

Ou seja, a equação (4) ajusta-se extremamente bem aos dados experimentais que obteve, com diferenças da ordem de 1% ou ainda menos. Ohm obteve resultados equivalentes a esses em suas quatro séries experimentais seguintes.

A equação (4) é análoga à seguinte equação moderna:

$$I = \frac{U}{R_i + R}. \tag{5}$$

Nessa equação a grandeza I representa a corrente elétrica I (medida em amperes) fluindo por um condutor metálico de resistência R (medida em ohms) quando o fio é ligado aos terminais de uma bateria que gera uma tensão ou diferença de potencial U entre seus terminais (medida em volts). Além disso, R_i representa a resistência interna da fonte de tensão, juntamente com a resistência de outras partes fixas do circuito, como os fios A e C da Figura 5 (com exceção do fio D de resistência R).

Podemos estimar o valor da resistência interna R_i do termopar utilizado por Ohm (juntamente com a resistência da parte invariante do circuito que inclui os fios fixos, com exceção do fio de comprimento x que está testando) utilizando a Equação (2) na equação (5). Essa substituição fornece a seguinte equação:

$$I = \frac{US/\rho}{SR_i/\rho + x} = \frac{US/\rho}{b + x}. \tag{6}$$

Isto é, $b = SR_i/\rho$ ou $R_i = b\rho/S$. Com os valores anteriores de $b = 20,25$ polegadas $= 0,548$ m, $\rho = 1,7 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot$ m e $S = \pi D^2/4 = 3,05 \times 10^{-6}$ m^2 vem

$$R_i = 0,0031\ \Omega. \tag{7}$$

Para esclarecer o significado físico das constantes a e b, Ohm repetiu suas medições, reduzindo agora a temperatura da junção quente à temperatura ambiente, aproximadamente $7,5°$ Réaumur ou $9,375°$ Celsius. Como o valor de b permaneceu o mesmo, ele deduziu que essa constante dependia apenas dos elementos invariantes do circuito, em particular do próprio termopar. Essa constante b é proporcional ao que denominamos de resistência interna da fonte de tensão (pilha ou termopar), juntamente com a resistência de outras partes fixas do circuito, tais como fios de ligação, mas não envolvendo o fio de comprimento x que está sendo estudado. Em contrapartida, o valor de a mostrou-se proporcional à diferença de temperatura entre as duas junções, levando Ohm a concluir que a constante a caracteriza a força de excitação do par termoelétrico. Vou analisar esse aspecto mais detalhadamente pois ele é extremamente importante.

Ohm tinha uma diferença de temperatura inicial entre as duas junções do termopar de 80° Réaumur = 100° Celsius. Em seguida passou para $7,5°$ Réaumur $= 9,375°$ Celsius. A razão entre essas diferenças de temperatura é de $80/7,5 = 100/9,375 = 10,666$. Caso a diferença de potencial do termopar seja proporcional à diferença de temperatura entre as junções, ela deve ter diminuído na razão de 10,666 ao abaixar a temperatura da fonte quente de 80° Réaumur para $7,5°$ Réaumur. Na Tabela 3 coloco na primeira linha os valores experimentais $X_e^{7,5}$

Tabela 3: Comparação entre os valores experimentais e teóricos fornecidos pela Equação (4) com uma diferença de temperatura de $7,5°$ Réaumur.

	Condutor							
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Valor experimental $X_e^{7,5}$	27,375	25,125	23,417	20	15,5	10,75	6,5	3,667
Valor teórico X_t	27,37	25,11	23,2	20,13	15,92	11,23	7,06	4,05
Diferença percentual	0,02%	0,06%	0,94%	0,65%	2,64%	4,27%	7,93%	9,46%

Tabela 4: Estimativas das correntes fluindo nos condutores de Ohm.

Nº do condutor	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Corrente I em amperes (A)	1,38	1,27	1,18	1,02	0,81	0,57	0,36	0,21

da série experimental de Ohm com uma diferença de temperatura de $7,5^{o}$ Réaumur (fazendo a média entre as duas medidas que forneceu para os primeiros sete condutores, sendo que apresentou apenas uma medida para o oitavo condutor), na segunda linha coloco o valor teórico X_t obtido com a Equação (4) com os valores obtidos por Ohm para esse caso com $a = 609$ e $b = 20\frac{1}{4} = 20,25$, e na terceira linha a diferença percentual entre esses valores, ou seja, $[|(X_t - X_e^{7,5})|/X_t] \times 100\%$:

Como esses valores são bem próximos, Ohm concluiu que a Equação (4) era válida não apenas para altas forças de excitação com uma diferença de temperatura entre as junções de seu termopar de 80^{o} Réaumur, mas também para pequenas forças de excitação com uma diferença de temperatura de apenas $7,5^{o}$ Réaumur. Concluiu ainda que a força do circuito termoelétrico era proporcional à grandeza a, sendo ela diretamente proporcional à diferença de temperatura entre as duas junções do termopar.

É possível compreender essa conclusão fazendo a seguinte conta. A força de excitação dada por Ohm quando havia uma diferença de temperatura de 80° Réaumur entre as junções, após seu termopar ter-se estabilizado, era de $a = 6800$, como será visto na tradução de seu artigo. Já quando a diferença de temperatura baixou para $7,5^{\circ}$ Réaumur, essa força de excitação foi de $a = 609$. A razão das diferenças de temperatura é dada por 80/7,5 = 10,67, já a razão entre as forças de excitação é dada por 6800/609 = 11,16. A diferença percentual entre esses valores é de $[(10,67-11,16)/10,67]\times 100\% = 4,6\%$. É essa pequena diferença percentual que justifica sua conclusão de que a força de excitação do circuito termoelétrico é diretamente proporcional à diferença de temperatura entre as junções. Com isso Ohm conseguiu mostrar que sua fórmula funcionava bem com fios de diferentes comprimentos, assim como ao variar ao redor de 11 vezes a força de excitação de seu termopar. Utilizando a nomenclatura moderna, ao diminuir a tensão elétrica de seu termopar ao redor de 11 vezes (como medido pelas diferenças de temperatura entre as junções), mantendo constantes todos os outros parâmetros do circuito, Ohm constatou que a corrente elétrica (como medida pelo ângulo de torção da agulha imantada em relação ao meridiano magnético, utilizando sua balança de torção) também diminuía ao redor de 11 vezes. Essa é uma das formulações possíveis da chamada primeira lei de Ohm.

Nas unidades de hoje em dia temos que a força eletromotriz de um termopar de cobre e bismuto puros com uma diferença de temperatura de 100^{o} Celsius entre as duas junções é de aproximadamente 8×10^{-3} volts. Engels e Riess, que fizeram uma reconstrução do experimento de Ohm, obtiveram que um elemento de Seebeck de cobre e bismuto nessa diferença de temperatura produziu uma voltagem máxima medida de 4,7 mV [12]. Utilizando essa voltagem na Equação (5), juntamente com a resistência interna estimada na Equação (7), obtemos na Tabela 4 as seguintes estimativas das correntes elétricas obtidas por Ohm expressas em amperes:

Ohm considerou que essa nova fórmula, Equação (4), também se aplicava ao caso da pilha voltaica. A força eletromotriz de um único elemento de uma pilha voltaica é da ordem de 1 volt. Além disso, a resistência interna de um termopar é muito menor do que a resistência interna de uma pilha voltaica. Seus experimentos de 1825 realizados com pilhas voltaicas implicavam valores de a e b muito maiores do que com a pilha termoelétrica utilizada em 1826. Além disso ele mostrou que se tivermos m pilhas conectadas em série, cada uma com uma força de excitação a e um comprimento de resistência b (proporcional à resistência interna da pilha), sendo o circuito fechado por um condutor de comprimento x, a fórmula anterior devia ser generalizada para a seguinte equação:

$$X = \frac{am}{bm + x}. \tag{8}$$

Ohm analisou os casos em que x era muito menor ou muito maior do que bm, explicando assim diversos aspectos que até então eram misteriosos relacionados com pilhas voltaicas. Explicou também com suas fórmulas o funcionamento do multiplicador de Schweigger e sua dependência em relação ao número de espiras.

Apresento aqui brevemente um dos experimentos com pilhas voltaicas discutidos por Ohm nesse artigo de 1826, contrastando-o com seu experimento com um termopar. É um artigo de 1825 do químico alemão Karl Gustav Bischof (1792–1870) com um circuito ligado a pilhas voltaicas [52]. Nesse trabalho Bischof utilizou a quantidade de gás produzida durante a decomposição da água por eletrólise para determinar a ação química de uma pilha voltaica. Ele afirmou que o padrão de medida podia ser tanto a quantidade de gás produzida em intervalos de tempo iguais, quanto o intervalo de tempo em que quantidades iguais de gás são liberadas. Preferiu o segundo método por permitir determinações mais precisas. Além disso, assumiu que a ação química é inversamente proporcional ao intervalo de tempo em que quantidades iguais de gás são liberadas. Conectou de 1 a 4 pilhas voltaicas em série no seu aparelho de decomposição da água e apresentou valores numéricos correspondendo ao inverso dos intervalos de tempo em que uma quantidade igual de gás era liberada, com esses números representando o que denominou de "força

 DOI: https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2026-0262

de decomposição da água" (*die wasserzersetzende Kraft* em alemão). Ou seja, a força ativa para produzir a decomposição da água na eletrólise. O que Bischof e Ohm denominaram de força de decomposição da água, é uma grandeza diretamente proporcional à intensidade da corrente elétrica. Posteriormente foi determinado com precisão pelo físico e químico britânico Michael Faraday (1791–1867) que a massa de substância liberada ou depositada nos eletrodos era diretamente proporcional à intensidade da corrente elétrica fluindo pelo circuito e ao intervalo de tempo em que a corrente atuava. Ohm mostrou nesse artigo de 1826 que os valores numéricos do experimento de Bischof eram representados com grande precisão por sua fórmula, Equação (8), que é análoga à moderna Equação (5), com m variando de 1 a 4 pilhas em série.

Comparando esses dois trabalhos com a terminologia moderna temos o seguinte:

1. Ohm utilizou como fonte de tensão um termopar, enquanto Bischof utilizou pilhas voltaicas.
2. Ohm variou em quase 11 vezes a tensão de seu termopar ao variar em quase 11 vezes a diferença de temperatura nas duas junções de seu termopar. Bischof, por sua vez, variou em até 4 vezes a tensão de seu aparelho ao conectar de 1 a 4 pilhas voltaicas em série em seu circuito.
3. Ohm estimou a intensidade de corrente pelo torque que ela produzia em uma agulha imantada colocada em suas proximidades, com esse torque indicado pelo ângulo de torção do filamento de sua balança de torção no qual estava suspensa sua agulha. Já Bischof estimou a intensidade de corrente pelo intervalo de tempo em que quantidades iguais de gás eram liberadas nos eletrodos de seu aparelho.
4. Como esses dois fenômenos foram explicados quantitativamente pela mesma fórmula, Ohm mostrou que esses dois fenômenos tão diferentes da corrente elétrica são proporcionais.
5. Além disso, mostrou que as intensidades de corrente são proporcionais às tensões elétricas aplicada ao circuito.

Tudo isso mostrou uma bela confirmação da fórmula de Ohm tanto no caso da tensão produzida por um termopar que era proporcional à diferença de temperatura entre suas junções de metais diferentes, quando no caso da tensão produzida por pilhas voltaicas, tensão essa que era proporcional ao número de pilhas ligadas em série.

Passo agora à tradução do artigo de Ohm de 1826.

6. Tradução do Texto Alemão Original

Determinação da Lei Segundo a Qual os Metais Conduzem a Eletricidade de Contato, Juntamente com um Esboço de uma Teoria do Aparelho de Volta e do Multiplicador de Schweigger

G. S. Ohm[7,8]

No ano passado, publiquei neste periódico[9,10] um relato preliminar da lei segundo a qual os metais conduzem eletricidade, e relatei várias séries de experimentos que foram realizados com todo o cuidado e precisão que o assunto merece e permite. Quase ao mesmo tempo, recebi do exterior relatos sobre o mesmo assunto de dois pesquisadores igualmente renomados, Barlow e Becquerel,[11,12] e foi impressionante que os resultados desses dois estudiosos, na medida em que se estendiam à influência do comprimento do fio condutor, diferissem tanto entre si quanto da lei determinada por meus experimentos. Sempre levei em consideração o trabalho deles, até onde pude conhecer, em meus experimentos posteriores, e assim cheguei à convicção de que nem as leis expressas por esses cientistas naturais a respeito do comprimento do condutor, nem aquela que anunciei, são universais e livres da interferência de forças que não pertencem à questão em discussão. Por outro lado, espero agora poder reconciliar as partes e estabelecer uma lei que, tanto pela perfeita concordância com as experiências realizadas até o limite, quanto, sobretudo, pela unidade que permeia todas as experiências relativas à corrente elétrica, se proclame como uma lei pura da natureza – uma unidade que só pode ser vista no rastro da verdade.

Essa lei, contudo, aplica-se apenas à condução da eletricidade através de metais e não leva em conta a função do condutor líquido no circuito galvânico. Ainda não considero completos os meus experimentos sobre a influência de líquidos no circuito elétrico, embora estejam gradualmente se tornando mais claros; mas, precisamente por essa razão, devo me contentar, por ora, em apenas delinear brevemente os resultados já obtidos, reservando-me o direito de apresentar posteriormente uma teoria mais detalhada e matematicamente elaborada do circuito elétrico, incorporando fenômenos

[7] [1] com tradução quase completa para o inglês, faltando apenas as Notas de rodapé escritas por Ohm, em [2], e tradução parcial para o inglês em [3].

[8] As palavras entre colchetes, [ ], no meio de algumas sentenças foram inseridas pelo tradutor para esclarecer o significado dessas frases. Utilizo ≈ como símbolo de valor aproximado. As Notas de rodapé de Ohm são representadas por [Nota de Ohm:]. Já as Notas de C. Piel retiradas de [53] são representadas por [Nota de Piel:]. Todas as outras Notas de rodapé foram acrescentadas por mim.

[9] [Nota de Ohm:] Nova série, Volume 14, Número 1.

[10] [48] reimpresso em [49]. Título: *Anúncio preliminar da lei segundo a qual os metais conduzem a eletricidade de contato.*

[11] [Nota de Piel:] Peter Barlow (1780–1862), professor de física em Londres, estudou eletromagnetismo e inventou uma roda que gira quando uma corrente elétrica a atravessa em um campo magnético. Antoine C. Becquerel (1788–1878), professor do Museu de História Natural de Paris e avô do descobridor dos "raios de Becquerel", foi um pesquisador muito prolífico, especialmente na área da eletricidade.

[12] [30, 31] e [32].

químicos e eletroscópicos. Os obstáculos que minha posição como professor do ensino secundário impõem a qualquer trabalho minucioso em um grau extraordinário podem me desculpar se esse tratado for publicado após um período de tempo maior do que o que parece razoável.[13,14]

Para evitar repetições desnecessárias, darei continuidade ao texto a partir do ponto em que o anúncio citado no início termina, e, portanto, peço ao leitor que leve isso em consideração.

A constante flutuação da força[15,16] que ocorre ao abrir e fechar a corrente, ou ao trocar condutores com valores diferentes de condutividade[17] como elo de fechamento do circuito, complica bastante os experimentos. Para dar uma ideia da magnitude e duração dessa flutuação, não será supérfluo descrever aqui alguns dos inúmeros experimentos que realizei para determinar sua natureza.

O circuito foi fechado com o condutor *o* e a posição da agulha [imantada] foi observada a cada 5 minutos; os seguintes resultados foram gradualmente obtidos:[18] 180, 150, 135, $125\frac{1}{2}$, $119\frac{1}{2}$, 115, $111\frac{3}{4}$, $109\frac{1}{2}$, $107\frac{3}{4}$, $106\frac{3}{4}$, $105\frac{3}{4}$, 105, $104\frac{1}{2}$, uma hora depois $100\frac{1}{2}$, de modo que no total passaram-se 2 horas e 5 minutos. Após alguns minutos, durante os quais o circuito permaneceu aberto, o ponteiro, que havia sido trazido para o campo de visão o mais rápido possível (o que pode ser conseguido em pouco tempo com alguma prática, girando-o na direção oposta às suas oscilações), voltou a mostrar mais de 180 divisões por um período de tempo mais longo. O circuito foi aberto novamente e o ponteiro foi forçado a permanecer na linha de visão por um obstáculo colocado ao lado; então, o botão foi ajustado para 500 e o circuito foi fechado pelo condutor *o*, – e eis que o ponteiro repousou no lado oposto, onde também havia um obstáculo a certa distância, por vários segundos.[19,20,21] No entanto, essa flutuação da força já não era de magnitude considerável, mesmo com o condutor de 75 pés de comprimento.

Pelo que sei, existe apenas uma maneira de tornar essa flutuação de força praticamente inofensiva, que consiste em manter o circuito fechado por um longo período antes do início dos experimentos e nunca abri-lo durante os próprios experimentos; ou seja, fechá-lo com o próximo condutor antes de remover o condutor anterior do circuito. Em experimentos nos quais condutores com valores de condutividade aproximadamente iguais são inseridos alternadamente no circuito, esse obstáculo pode ser considerado inexistente se a precaução mencionada for observada, e tais experimentos, portanto, permitem um alto grau de precisão.

Dessa forma, determinei o poder condutor[22] de vários metais. Utilizei fios cilíndricos da mesma espessura, mas de materiais diferentes, introduzi um após o outro no circuito, usando dois alternadamente, e encurtei aquele que mais enfraquecia a corrente até que apresentasse valor de condutividade aproximadamente igual à dos demais. A melhor abordagem consiste em calcular a média de duas determinações muito próximas, sendo que uma delas resulta em um valor muito alto e a outra em um valor muito baixo. Assim, cheguei às seguintes proporções para os comprimentos dos diferentes metais nos quais eles possuem o mesmo valor de condutividade:

Cobre 1000, *ouro* 574, *prata* 356, *zinco* 333, *latão* 280, *ferro* 174, *platina* 171, *estanho* 168, *chumbo* 97.[23]

No ano passado, quando realizei esses experimentos, repeti cada um diversas vezes sob diferentes condições e sempre obtive os mesmos resultados com mínimas variações; desde então, porém, tive experiências que me levaram a desconfiar de quaisquer afirmações desse tipo. Pois quando, cerca de seis meses depois, quis repetir os mesmos experimentos, começando com cobre, ouro e prata, para minha surpresa, a prata apresentou um desempenho significativamente melhor do que o cobre. Felizmente, eu ainda possuía o pedaço de fio de prata com o qual havia realizado meus experimentos anteriores e, para minha surpresa, ele voltou exatamente para sua posição original. Ambas as amostras de prata eram feitas de prata córnea[24,25] e, portanto, igualmente puras; elas não diferiam entre si em nada, exceto pelo fato de que a superfície da mais recente estava cuidadosamente limpa, enquanto a da mais antiga estava coberta por uma película oleosa[26] que se formara durante o processo de trefilação. Essa circunstância me levou a suspender meus experimentos por enquanto. Eu os teria retomado com prazer usando o aparato descrito a seguir, que fornece resultados extremamente confiáveis, mas eu não tinha a

[13] [Nota de Piel:] Este tratado, "Die mathematisch bearbeitete Theorie der Kette" foi publicado em Berlim em 1827.
[14] [54] com tradução para o inglês em [55] e tradução para o francês em [56].
[15] [Nota de Ohm:] No local especificado, página 116.
[16] Em alemão: *Wogen der Kraft*. Ver [48, pág. 116] e [49].
[17] Em alemão: *ungleichen Leitungswerth*.
[18] Cada um dos próximos valores corresponde ao número de divisões que o botão superior da balança de torção da Figura 4 teve de ser girado para que a agulha voltasse a apontar ao longo do meridiano magnético. Por exemplo, 180 = 180 divisões. Como cada divisão corresponde a $3,6^{\circ}$ graus, ver a Seção 4, temos um ângulo de 648° graus que corresponde a 1,8 volta do ponteiro do botão superior.
[19] [Nota de Ohm:] Não é, portanto, de admirar que a breve remoção do aparelho incandescente de Wollaston do líquido faça com que o fio já extinto se reacenda. Compare na obra citada, página 117.
[20] [48, pág. 117] e [49].
[21] William Hyde Wollaston (1766–1828) foi um químico britânico. Ver [57].
[22] Em alemão: *Leitungsvermögen*. Essa expressão pode ser traduzida como poder condutor, poder de condução ou condutividade.
[23] [Nota de Piel:] De acordo com medições modernas, a condutividade desses metais é aproximadamente: Cobre 1000, ouro 833, prata 1090, zinco 281, latão 277, ferro 193-116, platina 163, estanho 144, chumbo 85.
[24] [Nota de Piel:] Hornsilber = AgCl é um mineral de prata.
[25] Em alemão: *Hornsilber*. A cerargirita ou clorargirita, conhecida como prata córnea, é a forma mineral do cloreto de prata (AgCl), um minério de prata secundário que se forma na oxidação de depósitos.
[26] [Nota de Piel:] A "película de óleo" surge porque os orifícios nas pedras – como o rubi – usados para puxar os fios são lubrificados.

 DOI: https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2026-0262

quantidade necessária de metais; espero poder retornar a este assunto em uma data posterior.

Além disso, utilizei fios do mesmo material e com diferentes espessuras, entre 0,12 e 1,40 linha,[27] e os tratei exatamente como se faz para determinar o poder condutor dos metais. Assim, obtive a seguinte lei: *condutores cilíndricos do mesmo tipo e com diferentes diâmetros têm o mesmo valor de condutividade se seus comprimentos forem proporcionais às suas seções transversais.*[28] Barlow e Becquerel também chegaram a essa lei por meio de seus experimentos.

Deve-se notar também que o fio mais grosso sempre se desviava da norma em maior ou menor grau; mas permanecia como estava, com uma superfície mais ou menos puramente metálica, enquanto os outros ficavam cobertos de maneira bastante uniforme por uma película após serem trefilados. Em meus experimentos posteriores, sempre levei essa circunstância em consideração.

Em experimentos relacionados ao comprimento do condutor, essa flutuação de força tem um efeito muito prejudicial, porque condutores de valores muito desiguais são colocados sucessivamente no circuito, resultando em uma incerteza que é apenas aumentada pela contínua mudança na constituição química que o líquido e as superfícies metálicas em contato com ele sofrem. Em meus experimentos anteriores, tentei contornar essa deficiência garantindo que as observações individuais se seguissem em intervalos regulares e selecionando apenas os períodos em que a ação do circuito era menos variável. Contudo, embora isso tenha confinado os erros de observação a limites bastante estreitos, não podia esperar descobrir a verdadeira lei da condução dessa maneira.[29,30,31] Portanto, recorri ao circuito termomagnético,[32,33] cuja estabilidade me fora recomendada pelo Sr. Poggendorff.[34] Visto que as experiências adquiridas dessa forma revelam decisivamente a lei da condução, não considero supérfluo descrever em detalhes o aparato que utilizei, para que o grau de confiança que os fatos resultantes merecem possa ser determinado com mais facilidade.

Uma peça de bismuto $abb'a'$ (Figura 1), fundida no formato de um colchete retangular, cujo lado maior bb' media $6\frac{1}{2}$ polegadas e cujas pernas menores ab e $a'b'$ mediam $3\frac{1}{2}$ polegadas cada, tinha 9 linhas de largura e 4 linhas de espessura. A cada uma dessas pernas, fixei, por meio de dois parafusos, tiras de cobre $abcd$ e $a'b'c'd'$, que tinham 9 linhas de largura, 1 linha de espessura e, juntas, 28 polegadas de comprimento, e foram dobradas de modo que suas extremidades livres cd e $c'd'$ se projetassem em dois recipientes cheios de mercúrio m e m' fixados à estrutura de madeira $fghi$ quando todo o aparelho estava assentado sobre a estrutura.

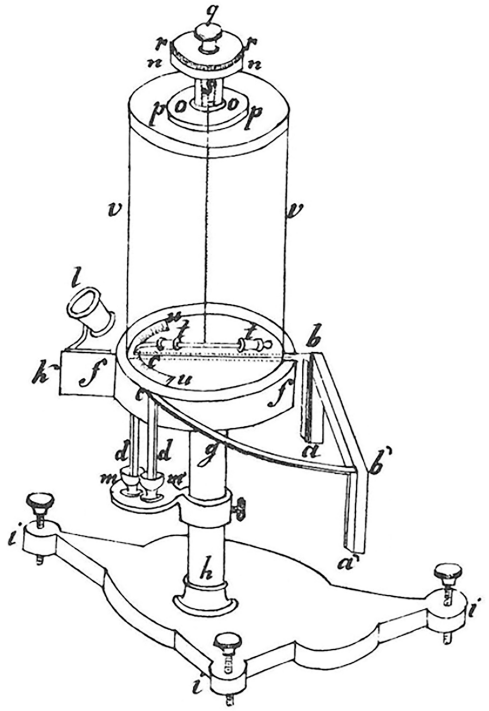


Figura 1.[35]

Na placa superior ff da estrutura encontra-se a balança de torção, cuja descrição detalharei um pouco, visto que apresenta algumas diferenças em relação ao projeto usual. O cilindro de vidro vv sobre o qual ela se apoia tem 6 polegadas de altura e $4\frac{1}{2}$ polegadas de largura. Ela própria consiste em duas partes: uma parte nop possui uma cavidade ligeiramente cônica e está firmemente fixada à placa superior do cilindro de

[27] Ohm utilizava as unidades francesas: 1 pé = 12 polegadas = 144 linhas = 0,3248 m = 32,48 cm. Logo 1 polegada = 12 linhas = 0,02707 m = 2,707 cm enquanto que 1 linha = 0,002256 m = 0,2256 cm. Portanto, os diâmetros de seus fios, variando entre 0,12 e 1,40 linha, vão de 0,271 a 3,16 mm.

[28] Ou seja, se temos dois condutores cilíndricos de mesmo material, o primeiro de comprimento ℓ_1, raio r_1 e área de seção reta a_1, enquanto o segundo tem comprimento ℓ_2, raio r_2 e área a_2, a condutividade de 1 será igual à de 2 caso $\frac{\ell_1}{r_1^2} = \frac{\ell_2}{r_2^2}$ ou quando $\frac{\ell_1}{a_1} = \frac{\ell_2}{a_2}$.

[29] [Nota de Ohm:] Convenci-me de que o que afirmei no meu artigo anterior na página 115 não era uma verdade universal, utilizando um condutor de 300 pés cuja seção transversal era 5 vezes menor que a [seção transversal] dos outros, representando assim um condutor de 1500 pés. Ele forneceu um valor de $2\frac{3}{4}$ sob uma força normal de 139 e de $1\frac{1}{2}$ sob uma força normal de 76 divisões.

[30] [Nota de Piel:] De acordo com a fórmula do artigo anterior obtém-se $v = 0,452\log(1 + 1500/4,5) = 1,14$, ou seja, uma perda de mais de 100%.

[31] [48, pág. 115].

[32] [Nota de Piel:] Termomagnético = termoelétrico.

[33] Ver a Seção 5.

[34] Johann Christian Poggendorff editou os *Annalen der Physik und Chemie* de 1824 a 1876. Ohm publicou nesse periódico alguns de seus artigos, [49, 58, 59] e [60]. Os modernos *Annalen der Physik* são os sucessores deste periódico. A sugestão de Poggendorff foi apresentada na Seção 5.

[35] $abb'a'$ – Tira de bismuto; $abcd$ e $a'b'c'd'$ – tiras de cobre; m e m' – recipientes com mercúrio; vtv – cilindro de vidro; nop – parte fixa da cabeça da balança de torção; qrs – parte móvel da cabeça da balança de torção; tI – agulha magnética com tampas cilíndricas de marfim; uu – arco graduado de latão; k – projeção de suporte da lente; l – lente com distância focal de 1 polegada.

vidro; a outra parte qrs, com seus pinos cônicos de 8 linhas de espessura, encaixa-se precisamente na cavidade da primeira e, com seu disco rr de 3 polegadas de largura, repousa sobre o disco nn de largura equivalente da primeira parte. No pivô qs, o centro de rotação foi cuidadosamente marcado no torno mecânico por meio de um delicado recorte cônico, e então o pivô foi lixado em meia polegada de seu comprimento até que a superfície plana resultante formasse um triângulo perfeito. Por meio de um dispositivo especial, o filamento ao qual a agulha [imantada] está presa é fixado ao pino de tal forma que seu centro coincida exatamente com a ponta do triângulo.[36]

A agulha magnética tt é feita de fio de aço com 0,8 linha de espessura e não chega a 2 polegadas de comprimento; suas duas extremidades são fixadas em peças cilíndricas de marfim, uma das quais contém um fio de latão delicadamente pontiagudo, ligeiramente curvado para baixo. Essa ponta de latão, que serve como ponteiro, fica próxima ao arco de latão uu, que repousa sobre a estrutura e é dividido em graus. Inicialmente, eu havia feito a agulha tão longa que uma extremidade pairava diretamente acima do arco de latão com as marcações de graus; mas a inércia que ela exibia, evidenciada pelo pequeno número de suas oscilações, me lembrou a experiência recente de Arago e motivou a modificação mencionada anteriormente.[37,38]

A agulha assim preparada é sustentada por uma tira de fio de ouro de 5 polegadas de comprimento, que é fixada à balança de torção precisamente no centro de rotação. Em minha experiência, essas tiras de metal são muito mais adequadas para experimentos com a balança de torção do que fios cilíndricos. A tira que utilizo na minha balança de torção, apesar de seu comprimento conveniente em muitos aspectos, ainda possui, em alto grau, todas as qualidades necessárias para os experimentos de rotação, de modo que, após a tira ter sido submetida a uma tensão de mais de três rotações completas, a agulha retorna à sua posição original quando a tensão é liberada. Mesmo assim, após cada experimento, observei a agulha em repouso para ter certeza de que o aparato não havia sofrido absolutamente nenhuma alteração. A propósito, creio que devo observar que as experiências anteriores realizadas com uma tira semelhante de latão, fixada no eixo, me convenceram de que as oscilações, sejam elas pequenas ou grandes (observei-as desde duas voltas completas até poucos graus), sempre se completam no mesmo tempo; portanto, não há nada a temer nesse aspecto.

A balança de torção foi firmemente fixada à placa superior da estrutura, de tal modo que uma linha reta traçada no meio da tira de cobre bc – alinhada com a marca central do arco graduado uu e com um fio de seda simples esticado verticalmente imediatamente antes desse arco – e a agulha magnética estivessem situadas no meridiano magnético, enquanto o ponteiro da balança de torção estava ajustado para zero. Na projeção k da moldura, uma lente convexa l com distância focal de uma polegada foi montada na direção e distância necessárias, através da qual a escala inferior era visualizada. Para evitar qualquer paralaxe, o olho era sempre posicionado durante a observação de modo que o fio de seda e a divisão central do arco graduado coincidissem. A observação era realizada de tal forma que, a cada vez que a agulha era desviada pela corrente elétrica do aparelho, a tira era girada na direção oposta pela parte móvel da balança de torção até que a ponta de latão da agulha se posicionasse atrás do fio de seda na divisão central da escala. Em seguida, a magnitude da rotação era lida no topo da balança de torção em centésimos de uma volta completa,[39] um número que, como se sabe, expressa a força que agiu sobre a agulha.[40,41]

As extremidades dos condutores utilizados nos experimentos foram imersas no mercúrio dos recipientes m e m', sobre os quais foi colocado um dispositivo simples por razões de segurança. Esse dispositivo garantia que as extremidades de cada condutor sempre entrassem em contato com o mercúrio da mesma maneira. Além disso, todas as extremidades dos condutores, onde o contato com o mercúrio era relevante, foram revestidas com resina. As bases dos condutores foram então limadas até um acabamento metálico com uma lima fina e revestidas novamente a cada vez. Uma conexão completamente metálica das partes individuais é uma condição indispensável para experimentos desse tipo, pois, caso contrário, não é possível obter concordância nas observações.

[36] [Nota de Ohm:] Segundo minhas informações, esta balança de torção foi feita pelo habilidoso mecânico Sr. Mauch, daqui da região. No armário local, há duas balanças de torção comuns que vieram de Estrasburgo, mas logo percebi que eram completamente inadequados para experimentos de precisão, pois apresentavam erros de 30 divisões ou mais.

[37] [Nota de Piel:] Dominique François Arago (1786–1853) foi professor na Escola Politécnica de Paris.

[38] O físico francês François Arago observou que uma agulha magnética, quando suspensa e oscilando sobre um disco de cobre, tinha suas oscilações amortecidas rapidamente, diminuindo a amplitude sem alterar significativamente o período de oscilação. Ele apresentou sua descoberta à Academia de Ciências de Paris nas reuniões de 22 de novembro de 1824, 7 de março de 1825 e 3 de julho de 1826, [61, 62] e [63]. Esses artigos também foram incluídos em suas obras completas, [64].

[39] Ou seja, existem 100 divisões no botão superior da balança de torção correspondendo a uma revolução completa, isto é, $360^{o} = 100$ divisões.

[40] [Nota de Ohm:] A agulha e a tira haviam adquirido tal relação que, para avançar a agulha um grau na divisão inferior, a balança precisava ser girada em 10 divisões. Com a configuração escolhida, no entanto, não era difícil ver claramente 1/40 de um grau inferior e, portanto, perceber claramente 1/4 de uma divisão superior. Ao mesmo tempo, isso ilustra como um desvio do ponto de inflexão de menos de meia linha poderia levar a erros de 20 divisões ou mais; portanto, o cuidado meticuloso com que construí minha balança não deve parecer surpreendente. Talvez seja precisamente por isso que outros, além de Coulomb, não conseguiram obter resultados consistentes usando a balança de torção.

[41] As principais obras de Coulomb sobre torção, eletricidade e magnetismo já se encontram traduzidas e comentadas em português: [15].

 DOI: https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2026-0262

Data de observação	Série experimental	Condutor							
		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
8 de janeiro	I.	$326\frac{3}{4}$	$300\frac{3}{4}$	$277\frac{3}{4}$	$238\frac{1}{4}$	$190\frac{3}{4}$	$134\frac{1}{2}$	$83\frac{1}{4}$	$48\frac{1}{2}$
11 de janeiro	II.	$311\frac{1}{4}$	287	267	$230\frac{1}{4}$	$183\frac{1}{2}$	$129\frac{3}{4}$	80	46
11 de janeiro	III.	307	284	$263\frac{3}{4}$	$226\frac{1}{4}$	181	$128\frac{3}{4}$	79	$44\frac{1}{2}$
15 de janeiro	IV.	$305\frac{1}{4}$	$281\frac{1}{2}$	259	224	$178\frac{1}{2}$	$124\frac{3}{4}$	79	$44\frac{1}{2}$
15 de janeiro	V.	305	282	$258\frac{1}{4}$	$223\frac{1}{2}$	178	$124\frac{3}{4}$	78	44

Para garantir uma diferença de temperatura constante nas partes do aparelho onde o bismuto e o cobre entravam em contato, mandei fazer dois recipientes de estanho, cujas seções transversais são mostradas em escala maior (Figura 2).

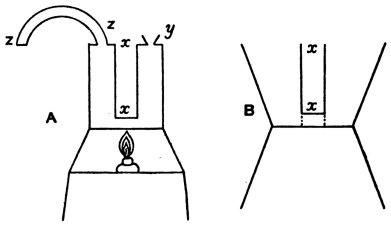


Figura 2.[42]

Cada um possuía uma câmara interna xx, aberta na parte superior, mas fechada em todas as outras extremidades, projetada para conter as partes ab e $a'b'$. Em uma delas, A, a água era mantida em constante ebulição; essa câmara, portanto, possuía uma abertura em y que podia ser fechada com uma rolha, para permitir a entrada de água no recipiente, e do outro lado um tubo zz para liberar o vapor; na outra câmara, colocava-se neve ou gelo picado. Os segmentos ab e $a'b'$ foram revestidos com tecido de seda fino, mas denso, depois introduzidos nos compartimentos xx, que foram, por fim, preenchidos com areia fina até uma altura de cerca de uma polegada e, por fim, totalmente cobertos com vidro finamente triturado. Dessa forma, todos os pontos de contato entre o bismuto e o cobre estavam localizados dentro do espaço condutor de calor preenchido com chumbo, e o teto de vidro protegia esse espaço de rápidas variações de temperatura causadas pelo ar circundante.

Após esta longa descrição do aparelho, passo agora aos experimentos que realizei com ele. Preparei oito condutores diferentes, que designarei posteriormente como 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8, com comprimentos de 2, 4, 6, 10, 18, 34, 66 e 130 polegadas e espessura de $\frac{7}{8}$ de linha, respectivamente,[43] todos cortados de um único pedaço de fio de cobre revestido e preparados da maneira descrita anteriormente. Após a água ter fervido por meia hora, os condutores foram colocados no circuito um após o outro. Entre cada par de testes no mesmo dia, que duravam de 3 a 4 horas, havia sempre um intervalo de uma hora durante o qual se adicionava água fresca, já aquecida, que rapidamente atingia a fervura. Em seguida, os condutores eram colocados no circuito um após o outro, mas em ordem inversa. Foi assim que cheguei aos seguintes resultados:[44]

É notório que a intensidade diminui consideravelmente de um dia para o outro. Se a razão para essa diminuição reside numa mudança nos pontos de contato ou talvez no fato de que os dias 8 e 11 de janeiro foram muito frios e o recipiente de gelo ainda estava no parapeito da janela de um cômodo mal aquecido e bem protegido, não me atrevo a afirmar; apenas sinto que devo acrescentar que, a partir do dia 15, não consegui mais perceber nenhuma diferença significativa.

Deve-se enfatizar particularmente o fato de que nenhum vestígio da flutuação da força descrita anteriormente, como ocorre no circuito hidroelétrico,[45] pode ser observado aqui. A agulha permanece imóvel no mesmo ponto em que estava quando foi trazida ao repouso. Observei-a por meia hora de cada vez após os experimentos anteriores e não percebi a menor mudança. Sim, quando a agulha foi equilibrada com o condutor 1 e mantida firmemente nessa posição por um obstáculo lateral, ela não se moveu minimamente para o lado oposto quando o circuito foi fechado usando o mesmo condutor, que havia sido removido por um período mais longo. Isso justifica a conclusão de que *essa flutuação se deve a uma mudança no fluido, causada pela própria corrente elétrica, que sobe e desce com ela.* Ao que tudo indica, a eletricidade em movimento provoca uma distribuição de certos componentes no líquido, que segue exatamente as mesmas leis observadas na distribuição causada pela eletricidade estacionária; um aumento na força resulta

[42] A – Aquecedor; B resfriador; xx – cavidades para encaixe das junções de cobre-bismuto; y – abertura para entrada de água; zz – saída para vapor.

[43] [Nota de Piel:] A resistência dos 8 fios varia de 0,3 a 19,5 miliohm; Ohm teve que escolher um valor menor porque a força eletromotriz do termopar é menor que a da célula voltaica.

[44] Cada um dos valores dessa tabela corresponde ao número de divisões que o botão superior da balança de torção teve de ser girado para que a agulha voltasse a apontar ao longo do meridiano magnético. Por exemplo, $326\frac{3}{4} = 326\frac{3}{4}$ divisões. Como cada divisão corresponde a $3,6^{\circ}$ graus, ver a Nota de rodapé 39, temos um ângulo de $1176,3^{\circ}$ graus que corresponde a 3,2675 voltas do ponteiro do botão superior.

Em princípio deveria se esperar que os valores de uma única coluna fossem todos iguais, caso o termopar mantivesse uma diferença de potencial constante durante todos os dias. No próximo parágrafo Ohm apresenta alguns possíveis motivos disso não ocorrer. Engels e Riess, que fizeram uma reconstrução do experimento de Ohm, observaram em seu arranjo que os pontos de contato entre o bismuto e o cobre estão sujeitos a um certo envelhecimento. Além disso, a penetração de umidade no sistema pela condensação que escorre pelo lado frio do termopar pode levar a uma menor tensão termoelétrica, [12].

[45] Ver a Seção 5.

em um aumento na separação desses componentes, uma diminuição na força faz com que esses componentes se reunifiquem parcialmente, que se completa quando a força desaparece completamente. É muito provável, e as evidências disso serão encontradas mais adiante, que essa distribuição do fluido pela corrente implique uma mudança não apenas na força de excitação do circuito, mas também na condutividade do fluido, e é precisamente essa multiplicidade de variabilidade no circuito hidroelétrico que torna a lei da condução tão complicada e, portanto, difícil de desvendar. Ao mesmo tempo, também fica claro que, se o único objetivo é determinar a influência dos metais na condução da corrente elétrica, o circuito hidroelétrico é totalmente inadequado, pois gera inúmeros erros; em contrapartida, o circuito termoelétrico é ideal para esse propósito.[46] Vejamos agora o que ele oferece.[47,48]

Os valores anteriores podem ser adequadamente representados pela equação

$$X = \frac{a}{b+x},$$

onde X é a intensidade da ação magnética sobre o condutor,[49] cujo comprimento é x, enquanto que a e b são constantes que dependem da força de excitação e da resistência de condução das demais partes do circuito.[50] Se atribuirmos o valor $20\frac{1}{4}$ à grandeza b e os valores de a de acordo com as diferentes séries de testes: 7285, 6965, 6885, 6800, 6800, então as seguintes determinações são obtidas por cálculo:[51,52]

[46] Ver a Seção 5.

[47] [Nota de Piel:] Essa visão dos processos em células galvânicas baseia-se em ideias que Michael Faraday contestou e refutou por meio de experimentos. Compare com o número 86 dos *Klassiker* de Ostwald.

[48] [65].

[49] Em alemão: *die Stärke der magnetischen Wirkung auf den Leiter*.

[50] [Nota de Piel:] O valor do tratado de Ohm reside na comunicação desta lei simples. As constantes a e b são corretamente identificadas: a, a força eletromotriz do termopar, só poderia ser determinada indiretamente por Ohm, uma vez que não existiam voltímetros para uma grandeza tão pequena; b é a resistência "interna", corretamente entendida aqui. Para determinar essas duas constantes, Ohm necessita, portanto, de pelo menos duas medições. A precisão das 40 medições é evidente pelo fato de que os valores medidos nunca se desviam dos valores calculados em mais de 1%.

[51] [Nota de Piel:] Em unidades modernas, uma linha da tabela, arredondada para o número inteiro mais próximo, fica assim, considerando que a força eletromotriz do elemento [termopar] seja de 9 milivolts:

Condutor	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Intensidade de corrente em A	2,7	2,4	2,3	2,0	1,6	1,1	0,7	0,4

[52] Na Seção 5 apresentei os valores das correntes elétricas obtidas por Ohm supondo uma força eletromotriz do termopar de 4,7 milivolts e com uma resistência interna de $0,0031\ \Omega = 3,1\ \mathrm{m}\Omega$.

Série experimental	Condutor 1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
I.	328	$300\frac{1}{2}$	$277\frac{1}{2}$	$240\frac{3}{4}$	$190\frac{1}{2}$	$134\frac{1}{2}$	$84\frac{1}{4}$	$48\frac{1}{2}$
II.	313	$287\frac{1}{4}$	$265\frac{1}{3}$	$230\frac{1}{4}$	182	$128\frac{1}{3}$	$80\frac{3}{4}$	$46\frac{1}{3}$
III.	$309\frac{1}{2}$	284	$262\frac{1}{3}$	228	180	127	$79\frac{3}{4}$	$45\frac{3}{4}$
IV.	$305\frac{1}{2}$	$280\frac{1}{2}$	259	$224\frac{3}{4}$	$177\frac{3}{4}$	$125\frac{1}{4}$	79	45
V.	$305\frac{1}{2}$	$280\frac{1}{2}$	259	$224\frac{3}{4}$	$177\frac{3}{4}$	$125\frac{1}{4}$	79	45

Comparando esses valores obtidos por meio de cálculo com aqueles previamente descobertos pela experiência, torna-se evidente que as diferenças são tão pequenas quanto se pode razoavelmente esperar em experimentos desse tipo.[53] No entanto, não quis parar por aí, mas sim – o que é mais útil para determinar a validade geral de uma lei deduzida a partir de alguns casos – verificar a exatidão da fórmula anterior nos limites da sua aplicação.

Para isso, formei 4 condutores a, b, c, d, com comprimentos sucessivos de 2, 4, 8 e 16 polegadas, a partir do fio de latão com 0,3 linhas de espessura que havia utilizado em experiências anteriores com o circuito hidroelétrico; estes [condutores] forneceram no circuito, sucessivamente, $111\frac{1}{2}$, $64\frac{3}{4}$, 37, $19\frac{3}{4}$ divisões, enquanto o condutor 1 forneceu 305 divisões no circuito. Se procurarmos os comprimentos correspondentes à equação anterior, encontramos $40\frac{3}{4}$, $84\frac{3}{4}$, $163\frac{1}{2}$ e 324, números que expressam, em grande concordância, que uma polegada de fio de latão é equivalente a $20\frac{1}{2}$ polegadas de fio revestido. Após essa preparação, conectei o condutor de 23 pés de comprimento, feito do mesmo fio de latão e designado como 5 no meu Anúncio, à corrente; ele produziu $1\frac{1}{4}$.[54,55] E, de fato, esse número é obtido quase perfeitamente substituindo $23 \cdot 12 \cdot 20\frac{1}{2} = 5658$ por x na expressão. Disso, pode-se observar que essa equação se aproxima bastante da experiência até que a força seja quase completamente extinta pela resistência dos condutores.[56]

[53] Vou calcular aqui as diferenças percentuais entre esses valores teóricos calculados por Ohm com base na fórmula $X = a/(b+x)$, que vou denominar como X_t, com os seus valores experimentais que vou denominar como X_e, ou seja, $[(|X_t - X_e|)/X_t] \times 100\%$. No caso da primeira linha de suas duas tabelas vem então:

Condutor	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Diferença percentual	0,38%	0,08%	0,09%	1,04%	0,13%	0%	1,19%	0%

Percebe-se que as diferenças são realmente mínimas, como observado por Ohm.

[54] [Nota de Piel:] 1,25 divisões da balança de torção equivalem a aproximadamente 10 miliamperes. A comparação entre cobre e latão nesta seção já não é totalmente precisa com os valores numéricos atuais.

[55] Ohm está se referindo aqui ao condutor e descrito em seu artigo anterior, que tinha 23 pés de comprimento, ao invés de ser o condutor 5 como escreveu aqui por um descuido, [48].

[56] Nesse parágrafo Ohm substituiu os oito condutores de cobre anteriores por quatro condutores de latão que possuem resistências

 DOI: https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2026-0262

Além disso, mantive uma extremidade da combinação de cobre-bismuto em gelo a uma temperatura de 0°, enquanto a outra extremidade permaneceu exposta à temperatura ambiente, onde um termômetro suspenso pelo aparelho sempre mostrou $7\frac{1}{2}^{\circ}$ R sem qualquer desvio perceptível durante o experimento.[57] Os condutores, colocados no circuito na seguinte ordem 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1, produziram os seguintes números em sucessão: 27, 25, $23\frac{1}{3}$, 20, $15\frac{1}{2}$, $10\frac{3}{4}$, $6\frac{1}{2}$, $3\frac{2}{3}$, $6\frac{1}{2}$, $10\frac{3}{4}$, $15\frac{1}{2}$, 20, $23\frac{1}{2}$, $25\frac{1}{4}$, $27\frac{3}{4}$. No entanto, se substituirmos $b = 20\frac{1}{4}$ na expressão anterior e determinarmos a de forma que $\frac{a}{22\frac{1}{4}} = 27\frac{3}{8}$,[58,59,60] obteremos valores que diferem dos valores observados em não mais do que meia divisão, o que demonstra suficientemente que a equação anterior permanece válida para qualquer magnitude da força de excitação. Dois outros pontos importantes também se destacam nesses últimos experimentos. Em primeiro lugar, é notável que o valor de b permaneça inalterado, enquanto a força diminui mais de dez vezes, de modo que a parece depender unicamente da força de excitação e b unicamente da parte constante do circuito. Em segundo lugar, esses experimentos parecem indicar que a força do circuito termoelétrico é exatamente proporcional à diferença de temperatura em seus dois pontos de excitação.

Não posso deixar de mencionar, ao final destes experimentos, uma observação que confirma a conclusão de Davy[61] de que a condutividade dos metais[62] aumenta com a diminuição da temperatura e diminui com o seu aumento. Peguei um condutor de latão de 4 polegadas e o coloquei no circuito; isso resultou em 159 divisões. Ao aquecê-lo em seu centro com uma chama de álcool, a força diminuiu gradualmente em 20 divisões ou mais, e o efeito permaneceu o mesmo mesmo se eu direcionasse a chama mais para uma extremidade ou outra do condutor. No entanto, se eu colocasse um disco de neve congelada sobre ele, a força aumentava em 2 divisões. A temperatura da sala era de $8\frac{1}{4}^{\circ}$ Réaumur. Este fato não está fora de lugar aqui, pois pode dar origem a pequenas anomalias.

Uma vez que nossa equação já se revelou, de forma suficientemente comprovada, como representante válida da natureza, através da fidelidade com que reproduz repetidamente todos os resultados obtidos em larga escala pelo circuito termoelétrico, queremos explorá-la mais a fundo para descobrir o que mais ela guarda em seu interior.

Aplicando esses princípios aos experimentos hidroelétricos realizados anteriormente,[63] os condutores mais curtos sempre produzem valores menores para a e b do que os mais longos, confirmando assim a conjectura já vagamente expressa de que *o líquido se torna um condutor melhor na medida em que uma maior distribuição dentro dele é provocada pela corrente, mas que também na mesma medida, embora não na mesma proporção, ocorre uma força excitante oposta que, em combinação com a mudança na condutividade do líquido, produz o fenômeno de flutuação frequentemente discutido.*

Basta uma simples análise da equação para perceber que a variação da força para um determinado valor de x deve ser tanto menor quanto maior for b, e mesmo uma comparação superficial dos resultados obtidos pelos circuitos termoelétricos e hidroelétricos revela *que o valor de b é, nestes últimos, muitas centenas de vezes maior do que nos primeiros*, o que decorre, evidentemente, ao líquido servir como condutor. No entanto, experimentos foram conduzidos com recipientes cuja superfície de um único lado excedia 200 polegadas quadradas, e como placas menores, de acordo com todos os experimentos realizados até o momento, aumentam a resistência do líquido pelo menos proporcionalmente ao seu tamanho, conclui-se que, *com um par de placas de apenas algumas polegadas quadradas de área superficial, b deve ter um valor milhares de vezes maior do que no caso do circuito termoelétrico descrito anteriormente.* Ao mesmo tempo, também ficará evidente, a partir dessa comparação, *que a força de excitação no circuito hidroelétrico é muito maior do que no termoelétrico.*[64]

Se supusermos que o comprimento x de um fio condutor é aumentado de uma quantidade h, e denotarmos por V a diminuição que X sofre em consequência disso, obteremos então, a partir da nossa equação e de acordo com regras bem conhecidas:

$$\frac{V}{X} = \frac{h}{b+x} - \frac{h^2}{(b+x)^2} + \frac{h^3}{(b+x)^3} - \dots$$

Consequentemente, se h for muito pequeno em comparação com $b + x$, podemos, sem erro, colocar

$$\frac{V}{X} = \frac{h}{b+x}.$$

bem maiores do que as dos condutores de cobre. Apesar disso, observou que sua Equação (4) ainda funcionou muito bem, obtendo assim mais uma confirmação de sua validade.

[57] A temperatura de $7,5^{\circ}$ Réaumur corresponde a $9,375^{\circ}$ Celsius.

[58] Piel coloca aqui $a : 10,6 = 619$ no lugar da expressão original de Ohm, a saber, $\frac{a}{22\frac{1}{4}} = 27\frac{3}{8}$, tal que para Ohm $a = 609$. A justificativa para isso aparece na próxima Nota de rodapé. Na Seção 5 coloquei os valores de X calculados com o valor original de Ohm, $a = 609$.

[59] [Nota de Piel:] 619 significa aproximadamente 0,84 milivolts. O texto original contém um erro de impressão, corrigido de acordo com a tradução de Fechner no livro de Biot.

[60] Piel está se referindo aqui à tradução do livro *Précis élémentaire de Physique expérimentale* de J. B. Biot traduzido por G. T. Fechner sob o título *Lehrbuch der Experimental-physik oder Erfahrungs-naturlehre*. Fechner introduziu diversas notas de sua própria autoria nessa tradução.

[61] [Nota de Piel:] H. Davy (1778–1829) é o mentor, professor e antecessor de M. Faraday.

[62] Em alemão: *die Leitungsfähigkeit der Metalle* .

[63] Ver [48].

[64] Ou seja, Ohm concluiu que em geral os valores de a e b para as pilhas voltaicas que utilizou são muito maiores do que os valores de a e b para seu termopar.

Portanto, sob a hipótese dada, a variação da força é proporcional ao aumento do comprimento do fio condutor. Essa lei é a mesma que Becquerel[65,66] obteve utilizando seu aparelho. De fato, em seus experimentos, h já é muito pequeno em comparação com x, e além disso, como ele usou o multiplicador, esse físico parece ter experimentado com pequenos pares de placas, de modo que x provavelmente se torna muito pequeno novamente em comparação com b. Essa é provavelmente a razão pela qual mesmo a multiplicação da ação pelo multiplicador permaneceu infrutífera.[67,68]

Aplicar nossa equação à *teoria do aparelho de Volta* proporciona uma solução inesperada dos mais diversos fenômenos.

Se colocarmos a força de excitação de um par metálico como 1, então um aparelho voltaico composto por m pares metálicos desse tipo deve possuir uma força de excitação igual a m, visto que cada um contribui para a geração da corrente elétrica sob condições completamente idênticas.[69] Se medirmos agora a resistência que um par de metais (incluindo, quando necessário, o condutor úmido associado, mas sem levar em conta as mudanças decorrentes do líquido na força excitadora e na própria resistência) opõe à corrente elétrica pelo comprimento de um corpo cilíndrico, que permanece constante em sua natureza e serve como padrão, e se chamarmos o comprimento no qual ele oferece à corrente uma resistência exatamente igual àquela a ser medida de *comprimento de resistência* do par de metais,[70] é imediatamente óbvio que o comprimento de resistência de todos os m pares será m vezes o de um único par, já que todos são considerados exatamente iguais. Se agora expressarmos a força da corrente elétrica[71] de um único par de acordo com a equação anterior como

$$\frac{a}{b+x},$$

onde x representa o comprimento de resistência do condutor intermediário que fecha o circuito, segue-se que a força resultante da combinação formada por m pares desse tipo será obtida se

1. substituirmos a por am; pois foi constatado experimentalmente que a é proporcional à força de excitação;
2. substituirmos b por mb; pois, como foi constatado experimentalmente que b é independente da força de excitação, a própria natureza da expressão revela que b deve representar o comprimento de resistência do par metálico sem o condutor intermediário.[72]

Se assumirmos ainda que o comprimento de resistência do condutor intermediário permanece o mesmo em ambos os casos, obtemos a seguinte expressão para a

[65] [Nota de Ohm:] Davy já havia chegado a essa conclusão por um caminho completamente diferente (*Anais* de Gilbert, Última Série, Volume XI, página 252). Lá (página 253), se posso confiar no meu extrato, a seguinte passagem aparece textualmente:

> "Descobri ainda que, em baterias voltaicas do tipo e número de pares de placas descritos, a condutividade elétrica de um fio *é quase diretamente proporcional à sua massa*, como seria de se esperar. Se, por exemplo, um certo comprimento de fio de platina descarregasse uma bateria, então o mesmo comprimento de fio, seis vezes mais pesado, seria suficiente para descarregar seis dessas baterias, o que eu mesmo comprovei com dois fios de platina, cujos pedaços de um pé de comprimento, pesavam 1,13 e 6,7 grãos; e o resultado foi exatamente o mesmo, quer, no segundo caso, eu usasse um único fio com seis vezes a massa ou seis fios pequenos em contato uns com os outros, desde que os fios fossem mantidos frios em água. Este resultado por si só prova que a condutividade não é proporcional à área da superfície, pelo menos não para eletricidade desse tipo. O seguinte experimento direto demonstra isso ainda mais claramente: *peguei dois fios de platina de igual comprimento e peso, achatados, de modo que sua área superficial fosse de 6 a 7 vezes maior, e comparei a condutividade de ambos.* No ar, o fio achatado mostrou-se o melhor condutor, pois esfriou mais rapidamente. No entanto, quando ambos os fios foram imersos em água, nenhuma diferença em sua condutividade pôde ser observada."

Não sem razão suspeito de um erro de tradução neste ponto, um erro que valeria a pena localizar. A expressão "é quase diretamente proporcional à sua massa" só está correta, de acordo com meus experimentos, se os fios forem considerados de igual comprimento. Isso poderia ser atribuído a uma indeterminação da expressão, mas essa suposição, e os próprios experimentos de Davy, contradizem a frase que vem logo em seguida: "De dois fios de igual comprimento..."

[66] Ludwig Wilhelm Gilbert (1769–1824) foi um físico e químico alemão, professor de física na Universidade de Leipzig. De 1799 a 1824, ele publicou os "Annalen der Physik", usualmente conhecidos como os *Anais* de Gilbert, do qual o periódico "Annalen der Physik und Chemie" de Poggendorff foi uma continuação. Ver, em particular, [29].

[67] [Nota de Ohm:] Que essas circunstâncias de fato se combinaram nos experimentos de Becquerel, deduzo da seguinte observação. Em seu aparelho, $x = 200$ dm e h assumia gradualmente os valores 1, 2, 3, etc., dessas unidades. O quanto Becquerel progrediu na alteração de h não pode ser determinado pelo anúncio no *Boletim Universal*. No entanto, supondo que ele tivesse parado em $h = 5$ dm, então $\frac{h}{x} = \frac{1}{40}$; se $\frac{h}{b+x}$ não tivesse se tornado consideravelmente menor, logo seu aparelho extremamente sensível certamente ainda teria indicado a influência do segundo termo no desenvolvimento anterior.

[68] Ver [31].

[69] Ohm está considerando aqui os m pares metálicos conectados em série.

[70] Em seus textos posteriores Ohm vai utilizar a expressão "reduzierte Länge" (comprimento reduzido) no lugar de "Widerstandslänge" (comprimento de resistência).

[71] Em alemão: *die Kraft des elektrischen Stromes*. O que Ohm denominou aqui de "força da corrente elétrica" é uma grandeza que pode ser medida pelo ângulo de torção do filamento de sua balança de torção. Ou seja, essa "força da corrente elétrica" é proporcional à intensidade da corrente elétrica passando pelo circuito e defletindo a agulha imantada de sua balança de torção.

[72] [Nota de Ohm:] Seria possível, no entanto, que b contivesse uma parte constante além do comprimento de resistência; este caso, que discutirei em outro lugar, deixarei completamente de lado aqui.

 DOI: https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2026-0262

pilha voltaica composta por m pares de metais:[73]

$$\frac{am}{bm+x}.$$

Comparando esta expressão com a encontrada para o circuito simples, chega-se às seguintes conclusões:

1. *Se $x = 0$, então a força do aparelho de Volta [com m pares] é exatamente igual à força do circuito simples, desde que ambos sejam compostos pelos mesmos elementos.* Isso contém a lei deduzida por Fourier e Ørsted[74,75] a partir de seus experimentos (este *Jahrbuch*, Volume XI, página 48) com a corrente termoelétrica. Além disso, essa igualdade de ação será sempre, pelo menos parcialmente, alcançada quando x se tornar muito pequeno em comparação com b, como geralmente ocorre em experimentos magnéticos e de incandescência em circunstâncias normais.

   Se $x = 0$ e, além disso, o [valor de] b da combinação voltaica for m vezes menor que o [valor de] b do circuito simples, então a força nesse aparelho será m vezes maior que naquele. Os experimentos de Fourier e Ørsted também provaram que ela é maior; mas quando esses dois homens ilustres afirmam que o efeito da combinação constituída por vários elementos é muito menor que a soma dos efeitos de todos os elementos individuais, isso não prova nada contra a lei que decorre de nossa equação, que contradiz essa afirmação, visto que, como eles mesmos observam, essa afirmação se baseia em uma medida incorreta da ação, a saber, os ângulos de desvio.
2. *Se x for muito grande em comparação com bm e, portanto, ainda maior em comparação com b, então a ação da bateria galvânica será aproximadamente m vezes maior do que a [ação] de um circuito simples.* Este caso pode ser aplicado a experimentos de decomposição da água com poucas placas grandes e, se forem usados aparelhos como o de Children,[76,77] até mesmo a experimentos magnéticos e de incandescência. No entanto, como o líquido desempenha um papel não insignificante na ação combinada, abstenho-me de quaisquer outras conclusões.
3. *Em todos os outros casos, a intensidade da ação do aparelho de Volta situa-se entre os dois limites encontrados.*

Para testar esta teoria extremamente simples da pilha galvânica, utilizo os experimentos sobre as ações químicas da pilha de Volta, meticulosamente conduzidos pelo Professor G. Bischof[78] e publicados no *Archiv* de Kastner, Volume 4, Número 1.[79] É certo que pode parecer questionável aplicar a expressão anterior a um aparelho hidroelétrico, onde a e b, como demonstrado, variam simultaneamente com a ação [da corrente], mas a lei que rege essa variação ainda é desconhecida. Essas dúvidas são dissipadas pela observação de que, como também mencionado anteriormente, a variação da corrente causada pelo líquido diminui a uma taxa muito maior do que a própria corrente. No presente caso, em que o condutor x incorporava um comprimento considerável de água pura e, além disso, apresentava pequenas superfícies de contato metálicas, a intensidade da corrente deve ter sido tão baixa que os valores de a e b podem ser considerados constantes sem hesitação. De acordo com esses experimentos, a força de decomposição da água[80]

devida a	1	2	3	4	pilhas
compostas de	51	102	153	204	pares de placas
é proporcional aos números	37	62	83	100.	

Se definirmos o comprimento de resistência de uma pilha como $= 1$ e, consequentemente, determinarmos $x = 5{,}6$ e a força de excitação de uma pilha como $= 240$, obteremos, por meio de cálculo, os valores $36\frac{1}{3}$, 63, $83\frac{3}{4}$, 100, com uma correspondência que expressa a correção da fórmula e a precisão dos experimentos assim combinadas na mesma medida.[81] Essa aplicação, contudo, pressupõe, ou melhor, demonstra, que a força

[73] [Nota de Piel:] A aplicação da lei define, pela primeira vez, de forma correta os critérios segundo os quais várias fontes de corrente devem ser conectadas.

[74] [Nota de Piel:] J. B. J. Baron de Fourier (1768–1821) e H. Chr. Ørsted (1777–1851) são físicos renomados, um como teórico do calor e o outro como descobridor do eletromagnetismo.

[75] Ver [38].

[76] [Nota de Piel:] J. G. Children (1777–1852) melhorou as pilhas galvânicas.

[77] O químico e mineralogista britânico John George Children (1777–1852) construiu baterias de tamanho enorme, por meio das quais produzia grandes faíscas que chegavam a provocar o derretimento de metais, [66].

[78] [Nota de Piel:] K. G. Bischof (1792–1870) era professor titular de geologia e química em Bonn.

[79] Karl Gustav Bischof (1792–1870), geólogo e geoquímico alemão, publicou em 1825 esse artigo no periódico *Archiv für die gesammte Naturlehre*, editado por K. W. G. Kastner, [52].

[80] Em alemão: *die wasserzersetzende Kraft*, ou seja, a força ativa para produzir a decomposição da água na eletrólise. Os valores numéricos apresentados por Bischof correspondem ao inverso dos intervalos de tempo em que uma quantidade igual de gás era liberada. O que Bischof e Ohm denominaram de força de decomposição da água, é uma grandeza diretamente proporcional à intensidade da corrente elétrica. Posteriormente foi determinado com precisão por Michael Faraday que a massa de substância liberada ou depositada nos eletrodos é diretamente proporcional à intensidade da corrente elétrica fluindo pelo circuito e ao intervalo de tempo em que a corrente atua.

[81] Para chegar nesses valores Ohm utilizou a fórmula $X = \frac{am}{bm+x}$ com m representando o número de pilhas ligadas em série. Em todos os casos vai usar $a = 240$, $b = 1$ e $x = 5{,}6$. Por exemplo, com $m = 1$ vem que $X = \frac{a}{b+x} = \frac{240}{1+5{,}6} = 36{,}36 \approx 36\frac{1}{3}$. Com $m = 2$ vem que $X = 63{,}16 \approx 63$. Com $m = 3$ vem que $X = 83{,}72 \approx 83\frac{3}{4}$. E com $m = 4$ vem que $X = 960/9{,}6 = 100$.

Na próxima Tabela coloco na primeira linha os valores experimentais X_e que correspondem à força de decomposição da

de decomposição da água no circuito é proporcional à força magnética.[82]

Não me deterei mais nesta teoria da pilha, para cuja completude são necessárias mais investigações que, atualmente, lhe faltam, mas passarei, em vez disso, à igualmente surpreendente *teoria do multiplicador*,[83,84] que já pode ser apresentada de forma mais completa.

Suponha que um condutor intermediário com comprimento de resistência ml seja inserido em um circuito galvânico cuja força de excitação é a e comprimento de resistência b, então a força magnética deste circuito é

sem o condutor intermediário $= \frac{a}{b}$,
com o condutor intermediário $= \frac{a}{b+ml}$.

Se o condutor intermediário for disposto em m espiras completamente idênticas, cada uma de comprimento l, partindo do pressuposto de que, por uma questão de brevidade, todas essas espiras podem ser referidas como uma só, então a força magnética dessas m espiras em relação à força de uma espira idêntica do circuito sem condutor intermediário estará na proporção de

$$\frac{am}{b+ml} : \frac{a}{b}.$$

Portanto, assumindo que a e b são quantidades constantes, o fator de amplificação do multiplicador é $\frac{bm}{b+ml}$, do qual se pode ver que *uma amplificação da ação [da corrente] pelo multiplicador só é possível enquanto* $ml < (m-1)b$, *ou seja, apenas se uma espira do multiplicador oferecer menos resistência à corrente elétrica do que todo o circuito sem condutores intermediários.*

Se $b = ln$, a amplificação torna-se $\frac{mn}{m+n}$, do que se segue que *um máximo da amplificação é atingido quando n se anula em comparação com m e que este máximo é indicado pelo número n, o que mostra quantas vezes a resistência que uma espira do multiplicador opõe à corrente está contida na resistência que o circuito oferece a ela, excluindo o multiplicador.*

A ação do multiplicador, após a amplificação máxima ter ocorrido, é expressa por $\frac{a}{l}$ e,[85] portanto, é completamente independente da condutividade do fluido; apenas o número de espiras deve mudar nos diferentes casos. Em outras palavras, a expressão encontrada pode ser enunciada da seguinte forma: *A magnitude da ação de um mesmo multiplicador em diferentes metais de excitação é proporcional à tensão entre os dois metais; e as magnitudes das ações de dois multiplicadores feitos de fios diferentes com espiras do mesmo tamanho e formato, no mesmo metal de excitação, são inversamente proporcionais ao comprimento de resistência de uma espira de cada um.* Em ambos os casos, porém, assume-se a ação máxima.

Para confirmar as leis anteriores deduzidas de nossa equação, recorro aos experimentos de Poggendorff (*Isis* 1821, Edição 1), que demonstram que elas estão de acordo com as determinações aqui desenvolvidas:[86]

1. Que o efeito máximo do multiplicador não pode ser excedido.
2. Esse valor máximo permanece o mesmo para pares de placas grandes e pequenas, mas o número de espiras necessárias no multiplicador depende do tamanho dos pares de placas, tornando-se maior para placas menores.[87]
3. Que o multiplicador formado por um fio mais grosso proporciona uma ação máxima maior.

Os experimentos de Poggendorff, que, aliás, também são interpretados em outros trabalhos com base nas fórmulas anteriores, não são adequados para deduzir determinações numéricas, uma vez que faltam as informações necessárias; além disso, um obstáculo extremamente problemático parece ter surgido nos experimentos com o fio de fechamento grosso, como fica evidente não só pela inconsistência de seus dados, mas também pelo fato de que os resultados no caso do circuito pequeno com o mesmo fio de fechamento foram tão extraordinariamente variáveis que foi impossível chegar a uma conclusão suficiente a partir deles. Portanto,

água nesses experimentos, na segunda linha os valores teóricos X_t obtidos por Ohm de acordo com sua fórmula com $a = 240$, $b = 1$ e $x = 5{,}6$, assim como a diferença percentual entre eles na terceira linha, ou seja, $[(X_e - X_t)/X_t] \times 100\%$:

Valor experimental X_e	37	62	83	100
Valor teórico X_t	36,33	63	83,75	100
Diferença percentual	1,84%	1,59%	0,90%	0%

Essa ótima concordância mostrou em um exemplo concreto que a fórmula de Ohm aplica-se também às pilhas voltaicas ligadas em série.

[82] O que Ohm denominou de "força magnética" é o torque exercido pelo fio com corrente ao atuar sobre uma agulha imantada colocada em suas proximidades. Ele mediu esse torque pelo ângulo de torção do filamento de sua balança de torção. Esse torque é proporcional à intensidade de corrente elétrica passando pelo fio. O que ele denominou de "força de decomposição da água" é a quantidade de água decomposta em experimentos de eletrólise em um certo intervalo de tempo. Ele está concluindo aqui que esta quantidade de água decomposta também é proporcional à intensidade de corrente elétrica fluindo pelo circuito no qual está ocorrendo a eletrólise.

[83] [Nota de Piel:] A intensidade do campo magnético de uma corrente elétrica é proporcional ao número de ampere-espiras por centímetro; o aparelho deve seu nome a esse fato. A agulha da bússola fica perpendicular às linhas do campo, e sua deflexão é uma medida da intensidade da corrente.

[84] Deve ser enfatizado que Ampère jamais trabalhou com o conceito de campo magnético. Ver, em particular, [21, Seção 16.5: "Ampère" contra o conceito de campo], [67, Seção 16.5: "Ampère" against the field concept], [68, Seção 25.4: The so-called "Ampère's circultal law" is a misnomer and should not be attributed to Ampère] e [69, Cap. 28: Newton, Coulomb, Ampère e Weber nunca trabalharam com o conceito de campo].

[85] [Nota de Piel:] $a : l$ é obtido colocando inicialmente $b = nl$ e depois $n = 0$ na equação $X = am : (b + ml)$.

[86] [70].

[87] [Nota de Piel:] Portanto, foram construídos "galvanoscópios" com dois enrolamentos, um com poucas voltas de fio grosso e outro com muitas voltas de fio fino.

 DOI: https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2026-0262

construí dois multiplicadores revestidos com cera de lacre, cada um com 220 espiras. Um deles era feito de fio com 1/5 de linha de espessura, e o outro do mesmo fio, quatro vezes mais comprido. Cada multiplicador foi dividido em dois anéis circulares iguais, com $5\frac{1}{2}$ linhas de largura, separados por 5 linhas e com 2 polegadas de diâmetro. Entre eles, uma agulha de 18 linhas de comprimento flutuava exatamente no centro. O arranjo foi feito de forma que os dois multiplicadores pudessem ser inseridos alternadamente e com segurança sob a agulha, sem perda de tempo. Placas de cobre e zinco com $3\frac{1}{4}$ polegadas de diâmetro serviram como excitadores, e uma solução líquida concentrada de cloreto de amônio (pois descobri que o efeito era mais confiável dessa forma do que com um disco de pano embebido na solução, desde que o líquido fosse usado em grandes quantidades) serviu como condutor aquoso. A determinação da força foi realizada de maneira semelhante aos experimentos descritos anteriormente e resultou em 263 divisões para o fio mais grosso e 68 divisões para o fio mais fino, confirmando plenamente a lei descoberta.

Assim como o multiplicador produz um aumento na força até um certo máximo quando $ml < (m-1)b$, inversamente, quando $ml > (m-1)b$, ele causa um enfraquecimento da força até um certo mínimo, regido pelas mesmas leis que acabamos de estabelecer para o aumento. Sua aplicação não pode ser discutida aqui, onde minha única intenção é demonstrar a validade geral da equação encontrada. Desejo apenas salientar que elas explicam por que o multiplicador enfraquece a ação do circuito termoelétrico na maioria dos casos; pois é improvável que uma espira do multiplicador ofereça menos resistência à corrente elétrica do que o próprio circuito termoelétrico.

Portanto, se Nobili[88,89,90] obteve efeitos tão expressivos com o uso do multiplicador, isso se deveu à sensibilidade de sua agulha e não ao funcionamento do multiplicador, como pude comprovar através do seguinte experimento. Uma agulha fabricada inteiramente de acordo com suas instruções, quando utilizada com um multiplicador de 60 espiras de fio de cobre com espessura de 1/5 de linha, cada espira com $2\frac{1}{2}$ polegadas de diâmetro, apresentou desvios que nunca ultrapassaram 20 graus quando o circuito foi tocado com a mão aquecida. Contudo, quando o mesmo circuito foi utilizado sozinho, com uma única espira do mesmo tamanho das do multiplicador, ao ser tocado com a mão aquecida, fazia com que a agulha se fixasse em um ângulo que sempre excedia 70 graus. Este dispositivo pode ser modificado de forma a não ser inferior em nada ao termoscópio mais sensível.

As teorias da pilha e do multiplicador, aqui apresentadas apenas em linhas gerais, confirmam a veracidade da lei da condução de eletricidade em metais, desenvolvida neste tratado, quase mais do que os próprios experimentos dos quais foram deduzidas. Os efeitos aparentemente díspares do circuito galvânico se organizam em toda a sua variedade, formando um belo conjunto. A importante descoberta de Seebeck[91,92] parece tecer o fio que nos guia para fora do labirinto em que a corrente elétrica se transformou.

7. Conclusão

Embora a terminologia original de Ohm não seja usual nos dias atuais, tentei indicar na Seção 3 o contexto histórico de seu trabalho. Com isso fica mais fácil relacionar sua pesquisa experimental e seus conceitos teóricos com a formulação moderna da lei de Ohm como ensinada nos ambientes formais apresentada na Seção 1. Embora o trabalho de Ohm seja um marco fundamental na história do eletromagnetismo, sua recepção pelos contemporâneos não foi simples. Ele sofreu uma oposição de alguns pesquisadores e levou algum tempo até que sua obra fosse aceita pela comunidade científica. Está além dos objetivos desse artigo explorar esses tópicos. Contudo, para quem quiser se aprofundar no assunto, existem alguns trabalhos muito bons analisando não apenas esse relevante tema, mas também o trabalho experimental e teórico de Ohm sob diferentes pontos de vista.[93]

Agradecimentos

Agradeço Peter Heering, Ana Paula Bispo da Silva e aos revisores por informações, sugestões e referências importantes relacionadas a esse artigo.

Disponibilidade de Dados

Todo o conjunto de dados que dá suporte aos resultados deste estudo foi publicado no próprio artigo.

Referências

[1] G.S. Ohm, Journal für Chemie und Physik **46**, 137 (1826).

[2] N.H.V. Heathcote, Science Progress in the Twentieth Century (1919–1933) **26**, 51 (1931).

[3] G.S. Ohm, em: *A Source Book in Physics*, editado por W.F. Magie (McGraw-Hill, New York, 1969).

[4] C. Ramsauer, em: *Grundversuche der Physik in historischer Darstellung: Von der Fallgesetzen bis zu den elektrischen Wellen* (Springer, Berlin, 1953), v. 1.

[88] [Nota de Ohm:] Neste *Jahrbuch*, Volume 15, Número 2.

[89] [Nota de Piel:] Leopoldo Nobili (1784–1835), professor de física em Florença, inventou a termopilha e o par de agulhas astáticas.

[90] Leopoldo Nobili (1784–1835), físico italiano. Ver [46] e [47].

[91] [Nota de Piel:] Th. Seebeck (1770–1831) professor de física em Berlim descobriu a termoeletricidade.

[92] Thomas Johann Seebeck descobriu em 1821 o efeito que leva seu nome e que mais tarde foi denominado de efeito termoelétrico. Ver [33] e [34] com tradução parcial para o português em [35]. Ver também [36–42] e [43].

[93] Ver, por exemplo, [4–6], [7, Cap. 12], [8–12] e [13].

[5] M. Schagrin, American Journal of Physics **31**, 536 (1963).

[6] T. Atherton, Electronics & Power **32**, 467 (1986).

[7] M. Achilles, *Historische Versuche der Physik nachgebaut und kommentiert* (Wötzel, Frankfurt, 1996), 2 ed.

[8] P. Marazzini, *Le Leggi di Ohm* (Minerva Scuola, Pavia, 2005). Disponível em: https://fisica.unipv.it/percorsi/pdf/ohm.pdf.

[9] N. Kipnis, Science & Education **18**, 349 (2009).

[10] P. Heering, J. Keck e A. Rohlfs, Berichte zur Wissenschaftsgeschichte **43**, 7 (2020).

[11] C. Blondel e B. Wolff, *La loi d'Ohm: la délicate genèse d'une loi «simple»*, disponível em: https://ampere-archives.fr/histoire-electricite/parcours-historique/lois-courants/ohm.

[12] W. Engels e F. Riess, Bulletin of the Scientific Instrument Society **155**, 10 (2022).

[13] W. Engels e F. Riess, em: *Kanonische Experimente der Physik*, editado por P. Heering (Springer Spektrum, Berlin, 2022).

[14] F.L. Silveira, *Validade da lei de Ohm*, disponível em: https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=validade-da-lei-de-ohm.

[15] A.K.T. Assis, *Tradução Comentada das Principais Obras de Coulomb sobre Eletricidade e Magnetismo* (Apeiron, Montreal, 2022).

[16] L.M.C. Nardi e C.C. Silva, Revista Brasileira de Ensino de Física **43**, e20200396 (2021).

[17] C.P. Magnaghi e A.K.T. Assis, Caderno Brasileiro de Ensino de Física **25**, 118 (2008).

[18] H.C. Ørsted, Cadernos de História e Filosofia da Ciência **10**, 115 (1986).

[19] R.A. Martins, Cadernos de História e Filosofia da Ciência **10**, 89 (1986).

[20] K.L. Caneva, Historical Studies in the Physical and Biological Sciences **35**, 175 (2005).

[21] A.K.T. Assis e J.P.M.C. Chaib, *Eletrodinâmica de Ampère: Análise do Significado e da Evolução da Força de Ampère, Juntamente com a Tradução Comentada de Sua Principal Obra sobre Eletrodinâmica* (Editora da Unicamp, Campinas, 2011).

[22] J.S. Schweigger, Allgemeine Literatur-Zeitung **296**, 622 (1820).

[23] J.S. Schweigger, Journal für Chemie und Physik **31**, 1 (1821).

[24] J.S. Schweigger, Journal für Chemie und Physik **31**, 7 (1821).

[25] J.S. Schweiger, Bibliotheque Universelle des Sciences, Belles-Lettres, et Arts **16**, 197 (1821).

[26] J.S. Schweigger, Journal für Chemie und Physik **31**, 35 (1821).

[27] R.A. Chipman, Bulletin of the United States National Museum **240**, 121 (1964).

[28] A.R.S. Lima, A.P.B. Silva e L.F. Nascimento, Experiências em Ensino de Ciências **16**, 185 (2021).

[29] H. Davy, Annalen der Physik **71**, 241 (1822).

[30] P. Barlow, The Edinburgh Philosophical Journal **12**, 105 (1825).

[31] A.H. Becquerel, Bulletin des Sciences Mathématiques, Astronomiques, Physiques et Chimiques **3**, 293 (1825).

[32] A.H. Becquerel, Annales de Chimie et de Physique **32**, 420 (1826).

[33] T.J. Seebeck, em: *Abhandlungen der physikalischen Klasse der Königlisch-Preußsischen Akademie der Wissenschaften – Akademie der Wissenschaften zu Berlin aus den Jahren 1820-1821* (1822).

[34] T.J. Seebeck, em *Abhandlungen der Physikalischen Klasse der Königlisch-Preußsischen Akademie der Wissenschaften – Akademie der Wissenschaften zu Berlin aus den Jahren 1822-1823* (1825).

[35] É.J.B. Ferreira e A.P.B. Silva, Caderno Brasileiro de Ensino de Física **33**, 861 (2016).

[36] H.C. Oersted, Annales de Chimie et de Physique **22**, 199 (1823).

[37] J.B.J. Fourier e H.C. Oersted, Annales de Chimie et de Physique **22**, 375 (1823).

[38] J.B.J. Fourier e H.C. Oersted, Journal für Chemie und Physik **41**, 48 (1824).

[39] T.J. Seebeck, *Magnetische Polarisation der Metalle und Erze durch Temperatur-Differenz*, editado por A.J.v. Oettingen (Wilhelm Engelmann, Leipzig, 1895), v. 70. Disponível em: https://archive.org/details/magnetischepolar00seebuoft.

[40] T.J. Seebeck, Annalen der Physik und Chemie **6**, 1 (1826).

[41] T.J. Seebeck, Annalen der Physik und Chemie **6**, 133 (1826).

[42] T.J. Seebeck, Annalen der Physik und Chemie **6**, 253 (1826).

[43] A.P.B. Silva, em: *Objetivos Humanísticos, Conteúdos Científicos: Contribuições de História e da Filosofia da Ciência para o Ensino de Ciências*, editado por A.P.B. Silva e B.A. Moura (Eduepb, Campina Grande, 2019).

[44] J.A.F. Pinto, V. Santos e A.P.B. Silva, Ensino & Multidisciplinaridade **8**, e0122 (2022).

[45] A. Ganot, *Traité Élémentaire de Physique Expérimentale et Appliqué et de Météorologie* (L'Auteur, Paris, 1859), 8 ed.

[46] C.L. Nobili, Journal für Chemie und Physik **45**, 249 (1825).

[47] L. Possenti e S. Selleri, The Radio Science Bulletin **363**, 77 (2017).

[48] G.S. Ohm, Journal für Chemie und Physik **44**, 110 (1825).

[49] G.S. Ohm, Annalen der Physik **4**, 79 (1825).

[50] A.K.T. Assis, *Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade* (Apeiron, Montreal, 2010), v. 1.

[51] A.K.T. Assis, *Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade* (Apeiron, Montreal, 2018), v. 2.

[52] G. Bischof, Archiv für die gesammte Naturlehre **4**, 13 (1825).

[53] G.S. Ohm e G.T. Fechner, *Das Grundgesetz des elektrischen Stromes*, editado por C. Piel (Akad. Verlagsgesellsch., Leipzig, 1938), v. 244.

[54] G.S. Ohm, *Die Galvanische Kette, mathematisch bearbeitet* (T.H. Riemann, Berlin, 1827).

[55] G.S. Ohm, em: *Scientific Memoirs*, editado por R. Taylor (Johnson Reprint Corporation, New York, 1966), v. 2.

[56] G.S. Ohm, *Théorie Mathématique des Courants Électriques* (L. Hachette et Co., Paris, 1860).

[57] W.H. Wollaston, Annals of Philosophy **6**, 209 (1815).
[58] G.S. Ohm, Annalen der Physik und Chemie **6**, 459 (1826).
[59] G.S. Ohm, Annalen der Physik und Chemie **7**, 45 (1826).
[60] G.S. Ohm, Annalen der Physik und Chemie **7**, 117 (1826).
[61] F.J.D. Arago, Annales de Chimie et de Physique **27**, 363 (1824).
[62] F.J.D. Arago, Annales de Chimie et de Physique **28**, 325 (1825).
[63] F.J.D. Arago, Annales de Chimie et de Physique **32**, 213 (1826).
[64] F.J.D. Arago, em: *Oeuvres Complètes de François Arago*, editado por J.A. Barral (Gide et J. Baudry, Paris, 1854), v. 4.
[65] M. Faraday, *Experimental-Untersuchungen über Elektricität. III. bis V. Reihe (1833)*, editado por A.J. Oettingen (Wilhelm Engelmann, Leipzig, 1897), v. 86.
[66] J.G. Children, Philosophical Transactions of the Royal Society of London **105**, 363 (1815).
[67] A.K.T. Assis e J.P.M.C. Chaib, *Ampère's Electrodynamics – Analysis of the Meaning and Evolution of Ampère's Force between Current Elements, together with a Complete Translation of His Masterpiece: Theory of Electrodynamic Phenomena, Uniquely Deduced from Experience* (Apeiron, Montreal, 2015).
[68] A.K.T. Assis (editor), *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English: Unipolar Induction, Galvanometry, Biographical Studies, and Weber's Electrodynamics Versus Different Field Theories* (Apeiron, Montreal, 2024), v. 5.
[69] A.K.T. Assis, *Obras de Weber sobre Eletrodinâmica Traduzidas e Comentadas: Conservação da Energia, o Modelo Planetário de Weber para o Átomo, a Unificação do Eletromagnetismo com a Gravitação, e a Eletrodinâmica de Weber Contra as Teorias de Campo* (Apeiron, Montreal, 2025), v. 4.
[70] J.C. Poggendorff, Isis von Oken **1**, 687 (1821).