



GALVANI, VOLTA E OS EXPERIMENTOS CRUCIAIS: A EMBLEMÁTICA CONTROVÉRSIA DA ELETRICIDADE ANIMAL

Galvani, Volta and the Crucial Experiments: The Emblematic Controversy of Animal Electricity

Anabel Cardoso Raicik [anabelraicik@gmail.com]

Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica (Egressa)

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Florianópolis, Santa Catarina, Brasil

Resumo

A controvérsia entre Galvani e Volta, acerca da eletricidade animal, pode ser considerada uma das maiores da história da ciência. Ao longo dessa querela, os pressupostos teóricos de cada um dialogaram proficuamente com inúmeros experimentos desenvolvidos. Os experimentos, carregados de teoria, fizeram do sapo o melhor amigo ou inimigo, por tanto ‘sofrer’ de ambos; satisfazia os desejos de cada um, voltando-se tanto à eletrobiologia quanto a eletrofísica. Resgatando sucintamente este embate, esse artigo discute alguns experimentos desenvolvidos por esses dois estudiosos, que ilustram a concepção steinleana de experimentação exploratória, ressalta alguns aspectos relativos à Natureza da Ciência nesse percurso, discorre em que sentido alguns experimentos podem, em princípio, serem considerados cruciais na controvérsia e evidencia implicações para o ensino de ciências.

Palavras-chave: Galvani; Volta; controvérsia científica; experimento crucial; ensino de ciências.

Abstract

The controversy between Galvani and Volta about animal electricity can be considered one of the greatest in the history of science. Throughout this quarrel, the theoretical presuppositions of each one dialogued proficuamente with numerous experiments developed. The experiments, loaded with theory, made the frog the best friend (or enemy, for suffering too much) of both; satisfying the desires of each, turning to both electrobiology and electrophysics. Briefly rescuing this conflict, this article discusses some experiments developed by these two scholars, which illustrates the Steinle's conception of exploratory experimentation, discusses in what sense some experiments may in principle be considered crucial in the controversy and emphasizes implications for science education.

Keywords: Galvani; Volta; scientific controversy; crucial experiment; science education.

INTRODUÇÃO

A publicação de o *De viribus electricitatis in motu musculari* (Comentários sobre o efeito da eletricidade nos movimentos musculares), datado de 1791, mas veiculado no ano seguinte, foi um marco para a ciência no final do século XVIII. Com a admirável teoria¹ da eletricidade animal, e o apelo experimental que naquele contexto científico era imprescindível, o seu autor, o anatomista de Bolonha Luigi Galvani (1737-1798), apresentava um novo conhecimento. O físico Alessandro Volta (1745-1827), por exemplo, reconheceu a teoria como “*uma daquelas grandes e brilhantes descobertas, que merecem ser apreciadas como definidoras de uma era no campo das ciências físicas e médicas*” (Volta, 1967, p. 371). Essa consideração de Volta, no entanto, foi efêmera e ele trava com Galvani uma das maiores controvérsias da história da ciência.

Galvani sustenta que há uma forma intrínseca de eletricidade envolvida na condução nervosa e na contração muscular; ele propôs, então, uma explicação neuroelétrica para esse movimento. O anatomista

¹ O termo teoria, neste artigo, muitas vezes é utilizado como sinônimo de hipótese.

admite que há um desequilíbrio elétrico presente em tecidos animais (Raicik, 2019). Volta, por sua vez, se opõe a eletricidade animal, propondo a teoria de contato metálico. “*Neste dilema aparentemente insuperável entre eletricidade animal e metálica, como única causa possível e suficiente de condução nervosa, reside o coração do problema na controvérsia Galvani-Volta*” (Piccolino & Bresadola, 2013, p. 18).

Como todo novo conhecimento na ciência, a teoria da eletricidade animal abordada no *De viribus* e em outros manuscritos do autor não surgiu e foi aceita acriticamente e passivamente. As divergências entre essa teoria com as concepções de Volta surgem semanas depois deste último ter tido acesso à obra. Na época da divulgação da teoria do anatomista bolonhês, Volta ocupava um cargo de professor de física experimental na Universidade de Pávia. Além de lecionar, centrava esforços na pesquisa em eletricidade fraca, o que o levou a ter, ainda mais, interesse pelo tema. As contrações musculares dos sapos nos experimentos galvânicos manifestavam uma eletricidade tão débil que não era detectada por nenhum eletrômetro até então desenvolvido. Nesse sentido, Volta viu o preparado de sapo de Galvani como um eletrômetro animal extremamente sensível, o que possibilitava e representava ser uma importante ferramenta para os seus interesses elétricos (Piccolino & Bresadola, 2013).

O certo é que com a originalidade da sua teoria – em termos de argumentos e legitimidade pautada, sobretudo, no componente empírico – Galvani fez emergir na comunidade científica o brilho, a curiosidade, a desconfiança ao propor e sustentar a existência de uma forma intrínseca de eletricidade envolvida na condução nervosa e na contração muscular. Como ressalta o historiador da ciência Walter Bernardi (2000), antes mesmo do embate com Volta, as primeiras cópias do *De viribus* já provocou uma polêmica entre a teoria galvânica e os adeptos da teoria da irritabilidade de Albrecht von Haller (1708-1777). Giovanni Aldini (1762-1834), assistente e sobrinho de Galvani, foi protagonista de muitos desses debates, atuando não apenas como defensor, mas porta voz de seu tio. A propósito, a reedição de o *De viribus*, transformada em livro, contou com introdução e notas de sua autoria, com o intuito, principalmente, de contra argumentar e explicitar a insuficiência de críticas hallerianas.

Conquanto, a querela Galvani-Volta é fascinante. Nela evidencia-se o respeito e a admiração mútua de seus protagonistas, “*mesmo quando suas opiniões começaram a divergir cada vez mais à medida que a controvérsia sobre a eletricidade animal progredia*” (Piccolino & Bresadola, 2013, p. 142). O resgate histórico-epistemológico dessa discussão calorosa, contrapõe-se a ideia limitada de uma “*uma ciência que se apresenta aproblemática, linear e cumulativa aos olhos do espectador, que mostra apenas os seus produtos, cobrindo com um véu denso e intransponível os processos de sua construção*” (Peduzzi & Raicik, 2019, p. 39). Ela faz emergir o pensamento divergente, torna visível as rupturas teóricas, metodológicas, permite analisar o papel dos experimentos ‘cruciais’ em momentos fervorosos da ciência e, sobretudo, evidenciar a função do componente empírico para escolhas teóricas. Embora muitas vezes de extrema importância, este último não dita, por si, essa escolha.

Ao longo dessa querela, os pressupostos teóricos de cada um dialogaram proficuamente com inúmeros experimentos desenvolvidos. Esses experimentos, longe de visarem apenas a corroborar ou teste de teorias, evidenciam um ‘procedimento explorador’, no sentido apresentado pelo físico e historiador da ciência alemão Friedrich Steinle. As experimentações exploratórias (Steinle, 2016, 2006, 2002, 1997), embora não prescindam de um corpo teórico mais bem consolidado, são guiadas por pensamentos e objetivos epistêmicos. Por certo, nenhum experimento apresenta neutralidade ou resultados imparciais.

“Os pensamentos e objetivos epistêmicos que orientam um experimento não precisam ser teóricos no sentido estrito [...]. Existe uma ampla gama de pensamentos potencialmente-orientadores de ação e de interesses epistêmicos, entre o jogo desprezioso com aparatos, por um lado, e a reflexão propriamente teórica de outro” (Steinle, 2016, p. 313).

Diferentemente de experimentos que são concebidos, projetados, realizados e avaliados à luz de um corpo de conhecimento já definido e estabelecido e, por consequência, apresentam um rigor experimental que dificulta a possibilidade de resultados não pré-concebidos, as experiências exploratórias têm uma função construtiva essencial; fazem parte da própria construção de conhecimentos. Elas permitem um caminho mais flexível na sempre efervescente busca por descobrir, compreender, entender os enigmas da natureza, do conhecimento... O sapo, na controvérsia, evidencia isso. Volta e Galvani foram trilhando vias distintas a partir de fatores circunstanciais (materiais, objetos, habilidades) além de preferências pessoais que estavam orientando a pesquisa nesse percurso. A pluralidade metodológica e interpretativa permitiu que o sapo satisfizesse os “desejos” de cada um. O conjunto desses fatores, juntamente com “*estruturas teóricas e conceituais, dados biográficos, e a pura chance histórica é eminentemente típica da prática experimental e do progresso das ciências experimentais*” (Steinle, 2016, p. 305).

Depois da publicação da obra máxima de Galvani, três momentos marcam profundamente a controvérsia: um experimento (considerado em princípio) ‘crucial’, em prol de Galvani, a reação de Volta a esse experimento e, em seguida, um experimento ‘crucial’ desenvolvido por cada um dos lados. Decerto, há todo um contexto por trás desses momentos, que será contextualizado sucintamente neste artigo. Apesar do apelo dos experimentos em muitos momentos, e do caráter crucial atribuído a alguns deles, tanto por autores que resgatam e analisam o embate, quanto pelos próprios protagonistas, que viam os experimentos como decisivos, eles não atuam como um árbitro imparcial. Em que sentido, então, pode-se dizer que os experimentos foram cruciais?

Os experimentos são carregados de teoria, nesse caso em específico, uma voltada à eletrobiologia e outra a eletrofísica. As relações entre hipótese e experimentação estão intimamente ligadas ao processo de construção do conhecimento, seja aquele da eletricidade animal, seja o alusivo à eletricidade por contato. Em analogia à concepção introduzida por Francis Bacon (1561-1626) de *instantia crucis*², posteriormente traduzida como ‘experimento crucial’, um experimento pode refutar determinadas explicações ao mesmo tempo em que confirma causas de outra natureza (Raicik, Peduzzi, & Angotti, 2017a). Como Bacon (1979) explicitou, os experimentos cruciais não precisam suspender a busca por novas respostas, a incumbência de interpretação.

Nesse sentido, e restringindo-se à controvérsia da eletricidade animal em torno de Galvani e Volta, este artigo visa resgatar certas características desse embate, apreciando criticamente alguns dos experimentos exploratórios desenvolvidos por esses dois estudiosos. No âmbito do ensino de ciências, e à luz da temática da Natureza da Ciência (NdC), discorre-se, entre outras coisas, em que sentido certos experimentos podem (ou não) ser considerados cruciais.

O ENIGMA DA CONTRAÇÃO MUSCULAR: O ANATOMISTA, O FÍSICO E A RÃ SURPREENDENTE

Em um manuscrito de 1782, Galvani frisa que decidiu realizar experimentos nos nervos de animais com fluido elétrico, singularmente em rãs³, com o intuito de “*revelar a verdade ou pelo menos contribuir para lançar alguma luz sobre a obscuridade dos fenômenos dos nervos*” (Pera, 1992, p. 64). Desde a Antiguidade, estudiosos buscavam explicar e entender o mecanismo responsável pelas contrações musculares (Home, 1970). Conhecimentos precedentes, além de indispensáveis para o desenvolvimento científico, fundamentam, instigam e abrem caminhos para novas pesquisas e esclarecimentos. Os preparos experimentais usuais de Galvani consistiam, essencialmente, em cortar rãs de modo a deixar apenas os seus membros inferiores, esfolados e esvaziados, unidos ao nervo crural. O nervo poderia ficar livre e solto ou ligado à medula espinhal. A primeira fase de suas pesquisas envolve o uso da eletricidade artificial e a verificação da atuação do estímulo: no nervo ou músculo. Conquanto, análises do papel da eletricidade atmosférica, da eletricidade a distância e por contato nas contrações foram igualmente desenvolvidas (Raicik, 2019; Piccolino & Bresadola, 2013; Pera, 1992).

Galvani, e seus assistentes, entre eles sua esposa Lucia Galeazzi (1743-1788), realiza vários experimentos que apresentam autonomia quanto a um corpo teórico bem fundamentado e estabelecido. Não obstante, à luz de uma concepção contemporânea de experimentação, entende-se que eles podem ser sistemáticos e dirigidos, inclusive epistemicamente: objetivam, por vezes, entender, compreender, ‘descobrir’ enigmas da natureza. O anatomista de Bolonha, a partir da preparação usual de rãs, aplica descargas elétricas em sua medula espinhal, nervo crural e músculos; ele usa fios e diferentes objetos metálicos para direcionar o estímulo elétrico. Após uma série de experimentos dialogados proficuamente com distintas hipóteses, com diversas variações experimentais, repetições e, inclusive, o uso de outros animais, Galvani chega à sua teoria da eletricidade animal: “*não há dúvida sobre a existência de uma eletricidade animal comum e universal*” (Galvani, 1841; Piccolino & Bresadola, 2013, p. 131).

A contextualização dos experimentos galvânicos pode contribuir para minimizar o estereótipo de que a experimentação possui um papel limitado na ciência; como fonte (no sentido de gênese) de conhecimento ou corroboradora de teorias. As experimentações desenvolvidas pelo anatomista e seus assistentes ressaltam que, em determinados momentos da história, o jogo dialógico entre constructos teóricos e a investigação empírica possibilita que o ‘cientista’ seja livre para variar, duvidar, analisar resultados esperados e, inclusive e principalmente, desprovidos de expectativas (Raicik, 2019). Características que apareceram,

² No livro II do *Novum Organum*, Bacon (1979) discorre sobre vinte e sete instâncias prerrogativas que faziam parte de seu método experimental.

³ Neste artigo sapos e rãs serão utilizados como sinônimos.

inclusive, em meio a controvérsia com Volta, onde o componente experimental representa um movimento realmente formidável no difícil jogo que estavam ‘disputando’ (Piccolino & Bresadola, 2013).

Em síntese, no *De viribus* e em algumas de suas Notas anteriores a esta publicação, a partir de um modelo explicativo para o sistema neuromuscular, baseado por analogia à garrafa de Leiden, o anatomista atribui ao músculo a função de acumular eletricidade, de forma que o desequilíbrio elétrico se mantém entre as superfícies interna e externa das fibras musculares. O nervo atua como um condutor de eletricidade que, possuindo uma camada externa isolante (oleosa), impede sua dispersão. Nesse sentido, a conexão músculo-nervo por meio de um arco metálico permite que o fluido elétrico se movimente do interior do músculo, através do canal interno das fibras nervosas, para o seu exterior, estabelecendo um circuito. Esse mecanismo estabelece uma descarga elétrica que fornece, a princípio, às fibras musculares irritáveis, um estímulo elétrico capaz de provocar contrações. Contudo, Galvani admite que a maneira como as contrações são induzidas continua obscura, uma vez que, para além de uma perspectiva em termos de irritabilidade⁴, elas poderiam resultar da passagem extremamente rápida do fluido elétrico pelas fibras musculares de modo a provocar atrações violentas e peculiares das partículas que as compõem (Raicik, 2019). Em relação à natureza da eletricidade animal, o anatomista acredita estar no cérebro, assim como os seguidores da concepção de ‘espíritos animais’.

A eletricidade animal mantinha-se, então, como um dos temas mais debatidos e investigados nas últimas décadas do século XVIII. Visando a replicação de suas experiências por seus pares, um meio de legitimação no período em questão, Galvani apresenta uma descrição detalhada de suas preparações animais, dos arranjos desenvolvidos e dos seus resultados. Relatos experimentais que facilitassem a reprodução de experimentos, seja por seus recursos linguísticos, quer pelas imagens apresentadas, eram uma maneira de garantir o depoimento coletivo (Raicik, Peduzzi, & Angotti, 2017b).

Em 5 de maio de 1792, Volta publica sua primeira *Memorie sull’eletricit à animale* (Memória sobre eletricidade animal), em que afirma ter reproduzido experiências galvânicas. Neste estudo, já se percebe que o entusiasmo inicial de Volta começa a ceder lugar para dúvidas que, em parte, distanciava-o da ideia de Galvani. Conquanto, ele mantém a noção de eletricidade animal juntamente com a concepção preambular de eletricidade por contato; concepção que permanece como elemento central na querela que travam (Kragh, 2000).

As primeiras considerações do físico foram direcionadas à análise de três aspectos: a quantidade, a qualidade e o modo da teoria da eletricidade animal galvânica (Pera, 1992). Decerto, experiências prévias ou correlatas ao interesse em questão, fornecem algumas ideias de onde começar, isto é, evidenciam que parâmetros podem ser mais relevantes e quais não (Steinle, 2002). O interesse de Volta em eletricidade fraca contribui consideravelmente em sua reação ao *De viribus* e ele utiliza, para sua análise inicial, parâmetros já empregados em pesquisas anteriores. No que se refere ao primeiro aspecto, Volta determina a carga mínima necessária para que as contrações ocorressem. A localização dos polos positivos e negativos do animal, o que chamou de qualidade da teoria, foi identificada em seguida. Corrigindo a hipótese de Galvani – baseada na analogia com a garrafa de Leiden -, o físico conclui a partir de experimentos concretos, que o nervo ou a superfície interna do músculo é negativa, enquanto a superfície externa do músculo carrega a eletricidade positiva [fig. 1]⁵. Isto é, enquanto Galvani admitia que o excesso de fluido elétrico encontrava-se no nervo e na superfície interna do músculo, Volta identificou esse excesso de fluido na parte externa do músculo.

No que se refere ao modo como a eletricidade animal atua, Volta realiza experimentos com animais inteiros e intactos – não aplicando o preparo usual de Galvani, ou seja, não dissecando as rãs de forma a deixar apenas os seus membros inferiores, esfolados e esvaziados, unidos ao nervo crural. Neste caso, contrações musculares só foram observadas quando “*um pedaço de chumbo fino ou tira de estanho*” foi aplicado a uma parte do sapo (coluna, costas), enquanto “*uma chave, uma moeda [...] de um metal diferente do estanho ou chumbo*” era aplicado a outra parte como pernas e coxas ou, ainda, quando “*as duas armaduras foram colocadas em contato diretamente [...] ou através de um terceiro metal*” no animal (Volta, 1967, p. 383). O físico admite que dentro do tecido animal há um fluxo contínuo de eletricidade, e afirma que as contrações ocorriam quando, por algum motivo, perturbava-se “*o movimento natural e harmônico do fluido elétrico*” (Volta, 1967, p. 384). Isto é, o nervo e o músculo eram igualmente dotados de um fluido elétrico que

⁴ Para maiores esclarecimentos acerca da teoria da irritabilidade e, conseqüentemente, do contexto inicial que levou Galvani à sua teoria, sugere-se a leitura de Raicik (2019), Pera (1992), Piccolino e Bresadola (2013), Home (1970), Koehler, Finger e Piccolino (2009).

⁵ A ideia aqui é a de excesso de fluido elétrico (positivo) e escassez desse fluido (negativo).

é deslocado pelo contato com o arco metálico, gerando contrações. Nesse sentido, por acelerar o movimento desse fluido, os metais passam a possuir um papel ativo, tornando-se causa das contrações (Pera, 1992).



Figura 1 – a) Modelo neuromuscular galvânico: em analogia à garrafa de Leiden, o nervo e a superfície interna do músculo acumulam eletricidade positiva, enquanto a região exterior do músculo detém eletricidade negativa; b) identificação dos polos positivo e negativo na perspectiva de Volta, a partir de experimentos: nervo ou superfície interna do músculo com eletricidade negativa e face externa do músculo com eletricidade positiva.

O problema da eficácia de diferentes metais nas contrações musculares foi objeto de uma análise mais minuciosa na segunda Memória (*Memorie seconda sull'eletricit à animale*) publicada por Volta em 14 de maio de 1792, seguida de contra-argumentos à teoria da eletricidade animal.

Volta prepara uma rã de forma a isolar seu nervo crural e reveste com tiras de metais (ou grampos) dois de seus pontos, conectando-os a uma garrafa de Leiden [fig. 2]. Nesse momento, constata contrações musculares no animal, sem que o músculo fizesse parte do circuito estabelecido. Ele admite, então, que o movimento do músculo é um efeito secundário da excitação dos nervos, centrando-se nesse último a atuação do fluido elétrico, e não no músculo, como acreditava Galvani. “O músculo obedece ao nervo” (Volta, 1967, p. 410), declara o físico de Como.

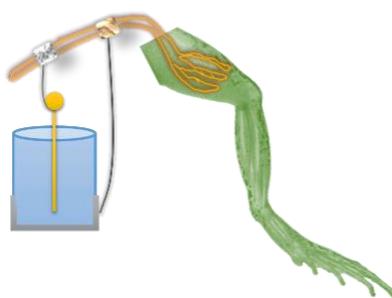


Figura 2 – Com uso de eletricidade artificial, Volta estabelece um circuito apenas com pontos do nervo crural de uma rã, sem estabelecer contato com o músculo, e constata contrações.

Em um experimento derivado do anterior, sem o uso de eletricidade artificial, o físico verifica contração muscular ao conectar os dois revestimentos colocados no nervo por um arco de metal – ou, simplesmente, fazendo com que as armaduras se encostassem [fig. 3]. Neste caso, fica mais evidente, para ele, a necessidade do uso de distintos metais para que ocorra a contração muscular. “Quando a ação é exercida apenas nos nervos, de fato, em um pequeno segmento do tronco do nervo, há uma resposta do movimento dos músculos subordinados aos nervos, mesmo que a corrente elétrica não atinja esses músculos” (Volta, 1967, p. 410). Com efeito, e contrariando a analogia de Galvani, Volta afirma que a fibra muscular não deveria ser comparada a uma garrafa de Leiden, pois o desequilíbrio elétrico já existia no nervo. “O membro [músculo] não foi tocado, e é inconcebível que ele possa ter sido alcançado pelo fluido elétrico que se restringiu, de fato, às duas partes adjacentes do nervo” (p. 410).



Figura 3- Experimentos desenvolvidos por Volta sem eletricidade artificial que acentua, ainda mais, que o fluido elétrico atua nos nervos, sendo o movimento do músculo um efeito secundário da excitação nervosa. À esquerda, os dois revestimentos aplicados em um segmento do nervo encontram-se unidos por um arco metálico (não necessariamente composto por um terceiro tipo de metal). No segundo caso, à direita, os revestimentos encontram-se, simplesmente, unidos. Em ambos os casos se percebeu contrações musculares.

Paradoxalmente, essas conclusões de Volta podem ser contraditas com experimentos que ele mesmo desenvolveu anteriormente, aqueles em que constata contração muscular em animais inteiros e intactos apenas usando metais dissimilares e aplicando-os na coluna ou costas e nas pernas ou coxas. Acerca desse ponto, e fazendo uso de uma retórica aguçada, ele sustenta que, enquanto demonstra que a eletricidade age no nervo, sem contato algum com músculo, não havia como precisar que, quando uma corrente de fluido elétrico fosse aplicada ao músculo – ou a um segmento do mesmo – os filamentos nervosos espalhados por ele não seriam atingidos.

Além disso, e partindo de um critério meritório – a necessidade de demonstração experimental –, o físico descreve experimentos de extrema significância na sua crítica subsequente à eletricidade animal. Inicialmente, ele aplica dois revestimentos de metal em sua língua, uma moeda de ouro ou prata e uma lâmina (ou colher) de estanho, zinco ou chumbo e, ao estabelecer contato entre eles, sente apenas sabor ácido; sem contração ou movimento da mesma [fig. 4]. A partir dessa constatação, ele nutre, ainda mais, sua concepção de que não são as fibras musculares, mas as papilas nervosas da língua, nesse caso, que são imediatamente afetadas pelo fluido elétrico (Piccolino & Bresadola, 2013). *“Embora nenhum experimento pudesse provar que o fluido elétrico atuava diretamente nos músculos, havia experiências diretas [como essa] provando o contrário”* (Pera, 1992, p. 107)

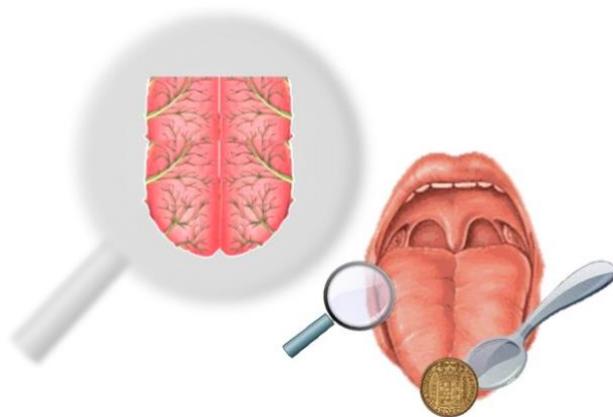


Figura 4 – Experimento de Volta em que estabelece contato entre dois metais e sua língua e, por consequência, sente um sabor ácido. Em síntese, ele atribui o resultado à ação do fluido elétrico imediatamente ao nervo, sendo sua ação no músculo um efeito (na melhor das hipóteses) apenas secundário.

Essas experiências, no entanto, não possibilitavam a Volta explicar como o fluido poderia se mover entre dois pontos do nervo simplesmente revestindo-os com armaduras metálicas e conectando-as. O que se poderia assinalar é que, nesses casos específicos, o fluido elétrico se manifesta pela dissimilaridade das armaduras, logo um efeito causado pelos metais.

“Se, pelo menos em certos casos, armaduras diferentes não são apenas úteis, mas necessárias para obter contrações (o sinal seguro do fluxo de fluido elétrico), então não se pode dizer que esse fluxo de fluido é causado por um desequilíbrio natural

existente no animal, pois isso também seria revelado por um arco de um único metal. Em vez disso, o fluxo deve ser causado, de uma maneira ainda a ser descoberta, por um desequilíbrio artificial criado pelas armaduras” (Pera, 1992, p. 109).

Isto é, Volta estava convencido de que o uso de distintos metais era imprescindível para obter contrações em alguns casos, independente do arranjo experimental ou do ponto de aplicação.

Em suas duas primeiras Memórias, Volta lança dúvida à explicação de Galvani acerca das contrações musculares a partir da analogia com a garrafa de Leiden. Em poucas semanas ele desenvolve hipóteses consistentes, de seu ponto de vista, que não lhe permitem mais admitir os experimentos de Galvani sem considerar inconsistências, de ordem metodológica e teórica. Atribuir ao metal a capacidade de produzir ou promover o desequilíbrio elétrico significava reconhecer um novo conceito na física até então nunca imaginado. Portanto, nas entrelinhas de sua construção teórica inicial, ele ainda admitia a coexistência das duas possibilidades para explicar a contração muscular. Não obstante, isso tende a se extinguir e o físico passa a descartar a explicação galvânica sobre o movimento muscular. Como frisa Steinle, a tentativa de formular regularidades empíricas requer, por vezes, a formação de novos conceitos e categorias em uma área da ciência. “*É no reino da formação conceitual que a experimentação exploratória tem seu poder e importância mais singulares*” (Steinle, 2002, p. 419). Na medida em que tais conceitos codificam novos *insights* empíricos, os experimentos exploratórios têm uma relevante função epistêmica, não previamente reconhecida (Feest & Steinle, 2012).

Volta e os metais: a teoria especial da eletricidade por contato

Em junho de 1792, Volta escreve um documento de forma anônima ao *Opuscoli Scelti sulle Scienze e sulle Arti* – periódico italiano voltado à divulgação científica, na época editado por Carlo Amoretti (1741-1816) (Jensen & Prestes, 2008). Nessa publicação ele afirma que “*os metais não devem ser considerados como meros condutores, mas como verdadeiros motores da eletricidade*” (Volta, 1792a, p. 215). Ele continua:

“Finalmente, tendo avançado o Senhor Volta [se auto mencionando] na investigação não apenas das propriedades físicas, mas químicas desse mesmo fluido, como já descobriu uma nova, e de fato notável [propriedade], que é o sabor, quem sabe isso não nos leva a conhecer a verdadeira natureza e constituição [desse fluido elétrico]?” (Volta, 1792a, p. 215).

No mesmo ano, em carta a Tommaselli e devidamente assinada, ele enfatiza novamente que “*metais são, portanto, não apenas condutores perfeitos, mas motores de eletricidade [...] Esta é uma nova virtude de metais, que ninguém ainda suspeitou, e que fui levado a descobrir por meus experimentos*” (Volta, 1792b, p. 117). Em continuação, Volta destaca que os metais, não apenas facilitam a passagem do fluido elétrico, como eles mesmos “*produzem e promovem um desequilíbrio na extração ou introdução desse fluido*” (p. 117).

Enquanto Galvani admite que o metal (ou arco bimetálico⁶) tem apenas a função passiva de levar a eletricidade através das fibras nervosas que, de fato, atuam como condutores do fluido elétrico contido no desequilíbrio entre as superfícies externa e interna das fibras musculares, Volta atribui uma função ativa ao metal. Volta colocou a teoria eletrobiológica de Galvani sob uma perspectiva eletrofísica, ao fazer das contrações musculares um caso especial de desequilíbrio de fluido elétrico em condutores. Ainda assim, ele precisava lidar com inconsistências empíricas, como aquelas em que há contrações quando do uso de apenas metais do mesmo tipo, como em alguns experimentos de Galvani. Em princípio, o físico buscou limitar esses experimentos como casos particulares, mas isso foi temporário. Ele utilizou, fundamentalmente, uma hipótese *ad hoc* para salvar sua teoria: os metais poderiam diferir de outra forma, em sua dureza, suavidade, etc., e portanto apresentarem heterogeneidade. Deveras, o apelo a uma hipótese para este propósito, “*ilustra a convicção do cientista à teoria, a sua relutância em abandoná-la pura e simplesmente se, em princípio, há (boas) razões para continuar acreditando em sua validade*” (Peduzzi & Raicik, 2019, p. 32).

Em sua terceira Memória (*Memorie terza sull'eletricità à animale*), endereçada em forma de carta para Aldini em 24 de novembro de 1792, Volta torna cada vez mais sistemática a sua conjectura. “*A teoria e as explicações de Galvani*”, diz ele, “*que você se esforça para apoiar, desmoronam largamente, e todo o edifício*

⁶ Galvani observou, durante alguns de seus experimentos, a necessidade de utilizar distintos metais. Não obstante, ele negou um papel ativo e relevante aos diferentes metais; a bimetalidade era apenas um melhor estímulo ao fluxo do fluido elétrico (Raicik, 2019).

ameaça arruinar-se” (Volta, 1967, p. 424). A física estava ganhando um novo conceito que abriria portas a luzes ainda não vistas (Piccolino, 1998).

Não obstante, Volta não havia demonstrado que sinais elétricos poderiam ser produzidos unindo metais sem corpos de animais. Do mesmo modo, Galvani não tinha verificado contrações ligando partes do animal sem o uso de corpos metálicos. No ano de 1793, apesar de a situação entre as teorias divergentes ficar paralisada, é publicada em janeiro, na *Philosophical Transactions*, uma carta que Volta havia encaminhado ao físico e membro da Royal Society Tiberius Cavallo (1749-1809). Neste documento, entre realçar que o *De viribus* contém “uma das mais belas e surpreendentes descobertas e o embrião de várias outras” (Volta, 1793, p. 10), ele enfatiza, rejeitando a teoria da eletricidade animal, que “gostava de pensar como o Sr. Galvani [...] mas repito, tive que renunciar [...] a todas essas belas ideias, pelas quais nos pareceu possível explicar as coisas maravilhosamente” (Volta, 1793, p. 36).

Como nuvens carregadas que se formam mesmo em um dia de Sol, a calmaria cederia lugar a momentos tempestuosos, embora sempre respeitáveis, entre eles. Os dois mantiveram uma cordialidade elegante, elogiando-se e em geral reconhecendo a relevância e meticulosidade no trabalho um do outro.

“Havia mais neste papel teatral do que o orgulho dos cientistas, a teimosia de personalidades fortes, ou a defesa subjetiva dos protagonistas – e o compromisso – com as suas próprias explicações. Em vez disso, em seu confronto inicial, as duas teorias não eram objetivamente mais do que hipóteses plausíveis, cada uma dotada de suporte empírico e âncoras teóricas credíveis, mas cada uma com suas próprias dificuldades. Na verdade, o antigo dilema de Galvani - eletricidade animal ou eletricidade metálica - embora reforçada por novos dados, ainda aguardava a prova decisiva que traria sua solução. Infelizmente, o destino considerou adequado distribuir essa prova de maneira equitativa entre os dois campos. Como resultado, cada um tem sua própria experiência crucial” (Pera, 1992, p. 116).

Os manifestos às concepções apresentadas por Volta, referentes a teoria da eletricidade por contato, surgem no ano de 1794 com experimentos desenvolvidos por Aldini, Eusebio Valli (1755-1816) e Galvani. Aldini mostrou que contrações poderiam ser obtidas com metais homogêneos e para isso desenvolveu experimentos com arco de mercúrio. Fazendo uso de sua hipótese *ad hoc* supracitada, Volta minimiza a relevância dessa constatação. Valli, por sua vez, antecipa a essência de um experimento produzido independentemente por Galvani, no mesmo ano, em que estabelece comunicação entre nervo e músculo sem condutores metálicos, usando somente seu próprio corpo. Os metais, ele afirma, “*não possuem nenhuma virtude mágica secreta*” (Pera, 1992, p. 123).

GALVANI E O TRATADO DO ARCO CONDUTOR: O ANÔNIMO CRÍTICO DE VOLTA

O livro *Dell'uso e dell'attivit à dell'arco conduttore nelle contrazioni dei muscoli* (Do uso e atividade do Arco Condutor nas contrações musculares), organizado na forma de um Tratado e publicado anonimamente em abril de 1794, traz algumas críticas à Volta, dentre elas o “terceiro experimento”⁷ galvânico. Galvani, o seu autor, preferiu o anonimato possivelmente para refletir a contribuição de seus assistentes, sobretudo a de seu sobrinho Aldini⁸ (Piccolino & Bresadola, 2013). Nessa obra, ele apresenta uma estrutura expositiva cujo tema central é, como indica o seu título, o arco condutor; uma expressão usada de forma ampla que diz respeito tanto ao arco de metal propriamente dito, quanto ao circuito que compreendia máquinas eletrostáticas (ou dispositivos) e a própria preparação do animal. Envolvida em uma perspectiva empírica não dissociada do diálogo com pressupostos teóricos explícitos, a sua tese elementar é que a eletricidade, normalmente, age em um corpo quando faz parte de um circuito (ou arco, artificial ou não) de materiais condutores dos quais o fluído elétrico flui sob a forma de “atual” ou “torrente”. Esses termos, assim como o de “transfluxo”, também foram utilizados por Volta para descrever o circuito entre dois metais (Piccolino & Bresadola, 2013).

No prefácio do Tratado, ele enfatiza que se debruça em apresentar vários tipos de arcos que podem ser formados (arcos simples, homogêneo de uma ou mais peças, arcos compostos, dissimilares de uma ou

⁷ Há, na literatura, a especificação de três importantes, famosos e impactantes experimentos desenvolvidos por Galvani em seus estudos da eletricidade animal, conhecidos como o primeiro, segundo e terceiro experimentos (Hoff, 1936; Dibner, 1971; Pera, 1992; Piccolino & Bresadola, 2013). Os dois primeiros foram descritos no *De viribus* (1791); o terceiro, apresentado no Tratado de 1794, é considerado e chamado por muitos autores como um experimento crucial (Pera, 1992; Piccolino & Bresadola, 2013; Mauro, 1969; Verkhrastry, Kristal, & Peterson, 2006; Parent, 2004). Pera (1992), ainda denomina de o “quarto experimento”, um experimento variante do terceiro e desenvolvido em 1797.

⁸ Historiadores também atribuem ao anonimato a relutância de Galvani em participar diretamente da polêmica gerada pela sua principal obra, o *De viribus*, e ao seu provável desejo de aumentar a credibilidade de suas críticas a partir de um ponto de vista “impessoal” (Piccolino & Bresadola, 2013).

mais peças) e, em seguida, as atividades que exercem no processo de contração. Partindo da suposta necessidade e atividade do arco condutor, ele investiga as consequências que podem ser tiradas com seu uso:

“Examinando de forma imparcial se realmente levam a reconhecer, como autor das contrações excitadas, uma real eletricidade, ou não; e [...] se é preciso acreditar que esta eletricidade é extrínseca ao animal e comum, ou mesmo intrínseca e toda sua; e se eu a reconhecer devido ao animal, então passarei da atividade e necessidade do arco artificial para a busca do arco natural [...]. Ao fazê-lo, não me abandonarei à mera força do raciocínio e apenas conjecturas, mas também vou usar a confiança de experimentos” (Galvani, 1841, p. 156).

O apelo à imparcialidade nada mais representa que uma retórica perspicaz. Galvani estava imbuído da ideia de eletricidade animal há mais de uma década e, de acordo com o percurso da controvérsia com Volta, a sagacidade nesse caso estava em refutar a noção de agente ativo dos arcos metálicos e buscar ainda mais evidências empíricas favoráveis à eletricidade animal, e não na possibilidade de verificar, como causa das contrações, uma eletricidade extrínseca. O desejo de parecer um ‘observador imparcial’ e aumentar a credibilidade de suas considerações é atestada também, pelo anonimato do Tratado, como supracitado. As experimentações, com efeito, estão imbricadas em pressupostos teóricos e subordinadas a interrogatórios – nada isentos – de respostas não definitivas, às vezes não previstas e tantas outras surpreendentes (Praia, Cachapuz, & Gil Pérez, 2002).

O anatomista evidencia que se um mesmo tipo de arco pode produzir contrações em um animal e não em outro, isso depende da ‘força muscular natural’ do animal, e não pura e simplesmente das características do arco. Ele apresenta três graus da ‘força animal’ – máxima, média e mínima (Galvani, 1841, p. 159-160): a) para o grau máximo, isto é, o primeiro, ele reconhece que para excitar a contração dos músculos o uso de um arco homogêneo e de uma única peça é suficiente; b) para o segundo grau, nomeadamente médio, *“aquele em um [arco] homogêneo não é suficiente, convém usar um arco heterogêneo e mais peças”*; c) o grau mínimo é aquele em que nem mesmo um arco heterogêneo é suficiente para provocar contrações, *“às vezes é, às vezes não”*, e portanto, deve ser evitado, pois uma falsa e precipitada percepção da eficácia dos arcos utilizados poderia ser erroneamente concluída. Nem todo animal apresentará os diferentes estados da ‘força animal’ e, conforme ele frisa, não há um tempo específico para a sua duração: *“tudo depende da robustez natural e da energia do animal antes da sua preparação”* (Galvani, 1841, p. 160). Com efeito, a estabilidade, mais do que a generalidade, é um requisito essencial para variações experimentais bem-sucedidas (Steinle, 2002).

É nesse sentido que Galvani é enfático ao desaprovar aqueles que ignoravam a preparação usual de rãs nos experimentos; uma clara menção a forma como Volta, por vezes, desenvolvia experimentos com sapos vivos e intactos. *“Reside aqui”*, pondera o anatomista, *“a fonte do resultado variado dos experimentos, da discórdia e das várias opiniões dos experimentadores”* (Galvani, 1841, p. 161). No âmbito de uma experimentação exploratória, restrições demasiadas podem inviabilizar uma ampla gama de resultados experimentais. A flexibilidade abre espaço para, além de otimização, variação experimental que pode, inclusive, apresentar efeitos inesperados (Steinle, 2016). Além disso, vê-se uma nítida crítica ao argumento de Volta acerca dos arcos bimetálicos, isto é, a partir de diversos experimentos e a ‘força variável’ do animal, Galvani consegue sustentar com mais propriedade o que já defendia no *De viribus*: arcos bimetálicos apenas potencializam o fenômeno das contrações.

No Tratado, Galvani reformula a sua hipótese original de “garrafa de Leiden animal”, como se verá a seguir.

O “terceiro experimento” de Galvani e seu apelo crucial

O chamado “terceiro experimento” galvânico por historiadores e pesquisadores é particularmente relevante no âmbito da controvérsia com Volta. O experimento consistia em colocar o nervo crural, de uma rã devidamente preparada, em contato com a superfície de sua perna, por meio de um material isolante, sem nenhum tipo de corpo extrínseco condutor e, a partir disso, obter contrações [fig. 5]. Como Galvani afirma: este experimento *“é decisivo [...], na minha opinião”* (Galvani, 1841, p. 212, grifo nosso).



Figura 5 - O “terceiro experimento” de Galvani: contrações obtidas pelo contato direto entre nervo e músculo, apenas com a utilização de um corpo isolante.

A experiência parecia, em princípio, conclusiva e inquestionável (Piccolino, 1998). Galvani a descreveu como um experimento definitivo, que *“provava definitivamente a existência de uma eletricidade animal”* (Hoff, 1936, p. 159). Bernardi (2000) sobreleva a sua importância, ao mencionar estudiosos que no início aceitaram a teoria da eletricidade animal, passaram a ficar adeptos de Volta, mas voltaram a seguir ideais galvânicos depois do “terceiro experimento”. Mauro (1969, p. 144) afirma, inclusive, que esta parecia *“a única experiência lógica, naquele momento, que poderia contrariar o argumento”* de seu adversário. Por certo, Galvani havia conseguido causar *“um forte golpe na teoria de Volta, descrevendo contrações consistindo apenas de nervo e músculo”* (Kipnis, 1987, p. 120-121). Não obstante, Volta se recusou a ver no experimento uma evidência definitiva, inquestionável, de uma eletricidade intrínseca. A ideia de que somente a evidência empírica é suficiente e permite uma tomada de decisão acaba negligenciando outros aspectos (valores) podem influenciar forte e igualmente os estudiosos na escolha teórica.

O certo é que Galvani conseguiu provocar contrações em um animal, devidamente preparado, sem o uso de arco externo ou metal. Isto é, o experimento evidenciava que o desequilíbrio elétrico *era “naturalmente encontrado no animal”* (Galvani, 1841, p. 205). *“Era necessário”,* frisa o anatomista, *“reconhecer nele uma máquina particular, capaz de produzir e manter naturalmente tal desequilíbrio”* (Galvani, 1841, p. 205). Novamente fazendo analogia à garrafa de Leiden, mas agora modificando o seu modelo apresentado no *De viribus*, ele admitiu que essa máquina animal (pequena máquina ou *macchinetta*), comportava:

“[...] a ideia de que existia no animal uma circulação contínua do fluido elétrico, ‘uma torrente contínua’ que fluía do interior do músculo através das fibras nervosas – definida por Galvani como ‘arco interno’ – e então saía dos nervos para alcançar a parte externa do músculo através dos tecidos úmidos e dos “invólucros” ou “membranas” que circundavam o nervo e o músculo (o chamado arco externo natural)” (Piccolino & Bresadola, 2013, p. 168).

Nesse novo modelo, a garrafa propriamente dita representa o músculo, ao passo que o nervo é representado pelo condutor que comunica as partes interna e externa do músculo. A camada isolante que reveste o condutor, de cera por exemplo, era perfurada – em semelhança ao nervo: uma substância sólida, com partes oleosas misturadas com partes condutoras – de modo a que esses pequenos buracos permitissem a entrada moderada de água ou outro fluído nesses orifícios e viabilizasse contato direto com o condutor. Nesse sentido, as contrações ocorriam quando a torrente elétrica era alterada de forma que aumentasse sua “velocidade e força”, em condições fisiológicas ou experimentais; neste segundo caso, isso poderia ser obtido com a aplicação de um arco condutor artificial.

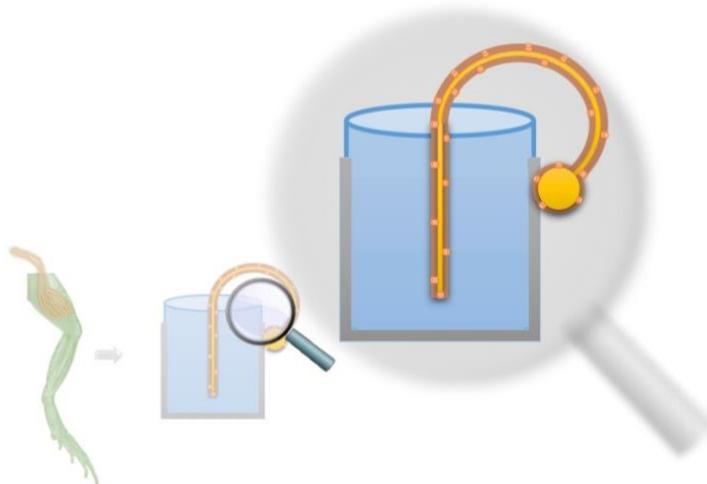


Figura 6 – Representação da ‘pequena máquina’ de Galvani. No esquema, por analogia, a garrafa simboliza o músculo, enquanto a haste condutora (amarela) revestida de uma camada isolante perfurada (marrom) representa o nervo.

Apesar da relevância de seu novo modelo, a *macchinetta* não atraiu muito a atenção dos estudiosos, sobretudo porque muitos deles, inclusive galvanistas, não liam italiano e permaneceram com a versão apresentada em sua obra máxima – *De viribus* –, publicada em latim (Trumpler, 1992). Além disso, havia a possibilidade de explicar seu funcionamento em termos de uma eletricidade intrínseca animal, como também de uma eletricidade comum que poderia fluir em qualquer outro corpo (Piccolino & Bresadola, 2013).

Entretanto, com seu protótipo apresentado no Tratado, Galvani centra esforços para explicar a eficiência de distintos metais nas contrações musculares; ponto fulcral em sua controvérsia com Volta. Para o anatomista, a heterogeneidade aumentava o fluxo elétrico animal e, por certo, ainda mais a ‘força’ e a facilidade das contrações, ao alterar a torrente elétrica. A despeito disso, o seu ‘terceiro experimento’ evidenciava que o uso de metais, especialmente dissimilares, embora facilitasse a produção de contrações, não era condição necessária para que elas ocorressem. Ademais, ele apresenta a noção de ‘arco oculto’, uma hipótese *ad hoc* que lhe permitia explicar alguns experimentos de Volta com a aplicação de um arco em dois pontos de um mesmo nervo [fig. 3]. Havia uma comunicação entre músculo e nervo por meio de uma umidade procedente dos tecidos animais, ainda que não fosse visível. “A umidade adequada e íntima do animal” constituía a parte ‘oculta’ do arco.

Ainda no âmbito do Tratado, Galvani faz “*algumas reflexões sobre os experimentos de Volta envolvendo sensações*” (Galvani, 1841, p. 235), especificamente aquele em que o físico sente um sabor ácido ao estabelecer contato entre dois metais e sua língua. Essas reflexões, no entanto, aparecem como críticas severas. Apesar de Volta apresentar uma demonstração experimental [fig. 4], realizada inclusive em si mesmo, a hipótese de que o fluído elétrico se manifestava pela dissimilaridade das armaduras, a partir da sensação sentida, não era “*suficientemente segura e firme*”, afirma o anatomista. “*Nada é mais traiçoeiro e mais inconstante*”, continua ele, “*do que a sensação de gosto*” (p. 235).

O certo é que Volta logo esboça, empírica e teoricamente, uma reação às novas constatações de Galvani.

REAÇÃO DE VOLTA: A TEORIA GERAL DA ELETRICIDADE POR CONTATO

O “terceiro experimento” de Galvani, por certo, havia evidenciado que contrações poderiam ser produzidas sem o uso de metais. A teoria especial da eletricidade por contato de Volta havia sido refutada. Mesmo sua hipótese *ad hoc* atribuída anteriormente – de que metais poderiam diferir, em sua dureza, suavidade, etc. – não o ‘salvaria’ agora. Com efeito e não raramente, os estudiosos não renunciavam facilmente às suas crenças. Como afirma Karl Popper (1902-1994) (1979, p. 68): “*se nos sujeitarmos à crítica com demasiada facilidade nunca descobriremos onde está a verdadeira força das nossas teorias*”. É com esse espírito, e suficientemente convicto de que não poderia haver uma eletricidade animal, que o físico sustenta cada vez mais sua teoria da eletricidade por contato.

Em agosto de 1794, Volta escreve uma carta a Antonio Maria Vassali (1761-1825) apresentando dois pontos centrais: o desenvolvimento de sua teoria do poder eletromotriz dos metais e críticas e objeções aos

novos experimentos apresentados por Galvani. Em relação a este último ponto, o físico afirma que os resultados do anatomista se devem a “*uma irritação mecânica [...] o que torna tudo inconclusivo*” (Volta, 1967, p. 450). Retomando sua teoria da eletricidade por contato, ele dividiu corpos condutores em duas classes distintas: os de primeira classe, a qual chama de condutores metálicos e os de segunda, que designa de condutores úmidos. “*Os condutores de primeira classe*”, diz ele em carta a Vassali agora em 1795, “*têm um poder eletromotriz gerado pelo contato com condutores de segunda classe*” (Volta, 1967, p. 454).

Essa concepção abrange, portanto, três hipóteses para o poder eletromotriz dos metais [fig. 7]: i) um metal cede fluido elétrico a um corpo úmido que, por sua vez, oferece fluido elétrico a outro metal distinto; ii) dois metais recebem fluido elétrico, em distintos níveis, de um corpo úmido; iii) dois metais comunicam fluido a um corpo úmido.

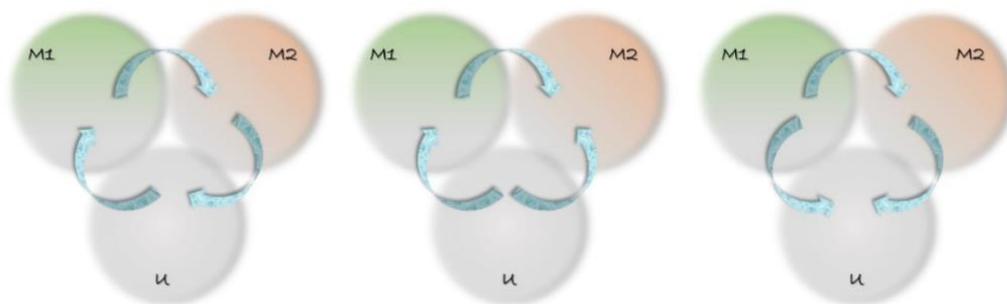


Figura 7 – Hipóteses de Volta acerca do poder eletromotriz: No primeiro caso, da esquerda para a direita, um metal M2 cede fluido elétrico ao corpo úmido que, por sua vez, oferece fluido elétrico ao metal M1. Na segunda situação os metais M1 e M2 recebem fluido elétrico, em distintos níveis, do corpo úmido u. Na terceira possibilidade ambos os metais, M1 e M2, comunicam fluido ao corpo úmido u em diferentes graus. Imagem adaptada de Pera (1992).

Os metais têm um poder eletromotriz que reside no contato entre dois metais dissimilares e um corpo úmido. Cabe ressaltar que essas ideias foram sendo modificadas, aperfeiçoadas e reiteradas em diversas cartas, como Volta afirma: “*Eu tinha essas ideias desde o começo e as expliquei a alguns amigos e correspondentes, incluindo o Sr. Abade Tommaselli, de Verona, e o Dr. Van Marum, famoso físico holandês, em algumas cartas escritas no verão de 1792*” (Volta, 1967, p. 465).

O terceiro experimento de Galvani, no entanto, fez Volta estender sua concepção. “*Eu fui mais longe, como podemos ver, das ideias que tive por um longo tempo [...] Atribuí um pouco dessa excitação à virtude dos condutores não-metálicos*” (Volta, 1967, p. 467). Ele generaliza o seu princípio:

“[...] a qualquer momento que dois condutores diferentes estão conectados, surge uma ação que empurra mais ou menos o fluido elétrico; de tal forma que, na medida em que o circuito esteja fechado [por um terceiro condutor] entre eles, seja o que for [de primeira ou de segunda classe], com a condição de que eles sejam diferentes entre si, alguma corrente resulta constantemente animada, seja modesta, seja fraca ou muito fraca” (Volta, 1967, p.469-470).

Em outras palavras, ele propôs que diferentes condutores, não apenas metais, mas particularmente corpos úmidos de diferentes composições poderiam gerar uma ‘força elétrica’ quando postos em contato (Piccolino, 1998). Isso explicaria as contrações produzidas ao se utilizar metais dissimilares em contato com a rã, como também poderia justificar o ‘terceiro experimento’ de Galvani em que dois condutores úmidos (o nervo e o músculo) foram colocados em contato por meio de um corpo mediador – os fluídos do animal (sangue, saliva, etc.). Apesar de os condutores de primeira classe serem ‘motores’ mais eficientes, os de segunda classe, ou úmidos, eram igualmente capazes de impulsionar eletricidade. A partir de uma perspectiva contemporânea de experimentação, esse processo denota que revisar, formar, estabilizar categorias e/ou conceitos é fundamental e característico de experimentações exploratórias. “*Qualquer novo conceito tem que permitir a formulação de regularidades cada vez mais estáveis e gerais*” (Steinle, 2002, p. 421).

De qualquer forma, pode-se dizer que a teoria geral da eletricidade por contato ainda era uma hipótese *ad hoc*, uma vez que ela ‘salvava’ os fenômenos observados. Nesse sentido, “*os dois concorrentes poderiam esperar conquistar a vantagem por meio de experiências cruciais. Galvani já havia produzido uma, mas Volta ainda não. Nessas circunstâncias, ele poderia, na melhor das hipóteses, lançar dúvidas sobre a teoria rival, mas não provar a sua*” (Pera, 1992, p. 139). Volta, no entanto, foi atrás de uma evidência “decisiva”.

Nova teoria geral da eletricidade por contato: o apelo crucial do experimento de Volta

Em uma carta encaminhada a Francesco Mocchetti (1766-1839), ainda em 1795, Volta elucida novamente sua crítica ao ‘terceiro experimento’ galvânico:

“O ruído, que os partidários da eletricidade animal no sentido de Galvani trouxeram com as experiências que muitas vezes excitam convulsões, também fortes, em sapo fresco preparado sem a intervenção de qualquer metal [...]. Este grande barulho que você viu, meu querido amigo, para onde foi: como esses experimentos, com os quais os galvanistas acreditavam triunfar [...], não apenas nada provam a favor da suposta carga, ou desequilíbrio de fluido elétrico nos nervos e músculos do animal preparado; mas sim confirmam [...] o que eu rapidamente indiquei em minha carta anterior dirigida a você [...]: a saber, que o acoplamento de condutores diferentes é a causa real, que perturba o equilíbrio do fluido elétrico, o remove do repouso e o coloca em corrente contínua [...]” (Volta, 1795, p. 5-6).

Ainda nesse ano, Volta encaminha outra carta a Vassali relatando a continuidade de seus estudos, sobretudo com testes sistemáticos de circuitos formados por três ou mais condutores distintos, a fim de procurar combinações mais poderosas de “eletromotores” (Heilbron, 2007). Além disso, ele desenvolve escalas de condutores de segunda classe, uma vez que já havia feito para os de primeira classe anos antes. No ano seguinte, 1796, na primeira carta a Carl Friedrich Gren (1760-1798) ele sintetiza que há três formas de incitar o fluido elétrico de modo a provocar contrações e sensações sempre com, pelo menos, três condutores diferentes: i) dois metais, ou condutores de primeira classe, em contato com um condutor de segunda classe; ii) um metal, ou condutor de primeira classe, em contato com dois condutores úmidos diferentes; iii) três condutores úmidos distintos (Volta, 1967).

Em segunda carta a Gren, Volta retoma as hipóteses desenvolvidas anteriormente do poder eletromotriz [fig.7]. “*Alguns fatos novos que descobri [...] convenceram-me*”, diz o físico, de que:

“Do contato mútuo entre prata e estanho, por exemplo, nasce uma força, um esforço, pelo qual o primeiro oferece fluido elétrico e o segundo recebe: a prata tende a soltá-lo e liberá-lo para o estanho. Essa força ou esforço produz uma corrente, se o circuito também contiver condutores úmidos, um fluxo contínuo do fluido, que circula na direção indicada acima da prata para o estanho e do estanho retorna para a prata, por meio do condutor úmido, e depois volta para o estanho, etc. Se o circuito não estiver completo, se os metais estiverem isolados, tem-se um acúmulo do fluido elétrico no estanho à custa da prata; isto é, eletricidade positiva, ou mais eletricidade, no primeiro e uma eletricidade negativa, ou menos no segundo” (Volta, 1967, p. 484).

Nesse sentido, Volta estabelece uma hipótese definitiva para explicar o poder eletromotriz dos metais: um metal emite fluido elétrico, o outro recebe e o condutor úmido restaura o equilíbrio [fig. 8].

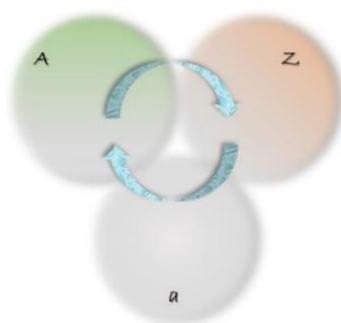


Figura 8- Hipótese final de Volta do poder eletromotriz dos metais. A e Z são condutores de primeira classe, metais, enquanto a representa um condutor de segunda classe, úmido. Imagem adaptada de Pera (1992).

Em continuidade, Volta admite que “*a eletricidade é fraca e abaixo do grau necessário para mover eletrômetros comuns*” (Volta, 1967, p. 484). Não obstante, isso já representava mais do que ele poderia ensinar, “*consegui torná-la mais sensível do que esperava e até consegui faíscas, com a ajuda do meu*

capacitor elétrico, e melhor com o duplicador [...] de [William] Nicholson⁹ baseado nos mesmos princípios que o [meu] condensador” (Volta, 1967, p. 484-485). No ano de 1797, em terceira carta a Gren, o físico afirma que apresentará um “*experimento tão mais simples quanto claro e decisivo*” (Volta, 1967, p. 498) utilizando, nesse caso, seu próprio eletrômetro condensador. “*A minúscula eletricidade gerada do contato entre uma lâmina de prata e uma de zinco foi capaz de provocar movimento nos indicadores de seu condensador*” (Piccolino, 1998, p. 389).

Esse dispositivo [fig. 9] consiste em duas placas metálicas, separadas por uma camada isolante, acopladas a um eletrômetro; a placa superior possui uma haste isolante. Carrega-se a placa inferior e toca-se na superior com um dedo para aterrará-la, em seguida, ergue-se a placa superior pela sua haste e observa-se um desvio das folhas do eletrômetro. Isso evidencia que a placa inferior possuía uma carga oposta à da placa superior.

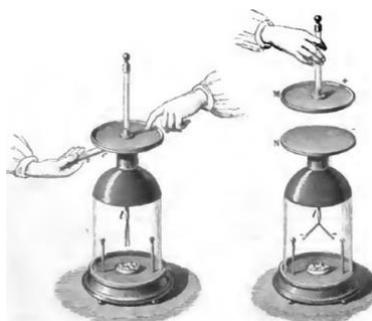


Figura 9- Experiência de Volta com seu eletrômetro de condensação em que constata eletricidade metálica. Extraída de Ganot (1859).

Entre 1796 e 1797 Volta apresenta novos resultados, à luz de uma pesquisa em que constructos teóricos, sobretudo com a verificação da combinação de condutores de primeira classe, dialogam proficuamente com os diversos experimentos desenvolvidos. Conjunto de experimentos, inclusive, pelo qual prevaleceu a diversidade de metais, condutores... que evidenciam de maneira cada vez mais ‘física’, sem o intermédio do componente orgânico, a força eletromotriz de um par de metais diferentes. Essa variação de parâmetro experimentais, com os seus materiais, suas condições, etc., e a análise do efeito dessas alterações, típica de experiências exploratórias e exemplificadas com os estudos de Volta, são procedimentos epistêmicos essenciais para a estabilização, por exemplo, de resultados experimentais.

Em síntese, esse período pode ser considerado “*como um divisor de águas no caminho que o levou à descoberta da bateria elétrica*” (Pancaldi, 1990, p. 124). Volta mostrava a existência de eletricidade devido ao contato de diferentes metais, sem utilizar um sapo ou qualquer detector fisiológico, como sua língua. Por certo, Volta havia encontrado um experimento ‘crucial’ (Pera, 1992). É nessa fase, também, que surge o termo “galvanismo”, utilizado nos títulos às cartas enviadas para Gren.

A ÚLTIMA MEMÓRIA DE GALVANI: O “QUARTO EXPERIMENTO” E SUA INVOCAÇÃO CRUCIAL

Depois da publicação do Tratado, em 1794, Galvani centra suas atenções no torpedo, sem deixar de lado, é claro, sua pesquisa com arcos condutores. Sua próxima publicação ocorre em setembro de 1797, uma última correspondência, antes de sua morte precoce no ano seguinte. É provável que ele não tenha lido as últimas ponderações de Volta, acima mencionadas, uma vez que foram publicadas, praticamente, em concomitância com suas Memórias (Piccolino & Bresadola, 2013).

Em *Memorie sulla elettricità animale* (Memórias sobre eletricidade animal), composta por cinco memórias encaminhadas à Lazzaro Spallanzani (1729-1799), Galvani responde às críticas de Volta sobre o “terceiro experimento”, apresenta novas objeções às colocações do físico e alguns argumentos sobre a teoria geral da eletricidade por contato, em termos do que Volta publicara até 1795. Além disso, descreve um experimento com apelo crucial. “*A memória representa, portanto, um texto fundamental, uma espécie de legado científico de Galvani*” (Piccolino & Bresadola, p. 187).

⁹ Willian Nicholson (1753-1815), em 1788, aperfeiçoou o dobrador (duplicador) de Abraham Bennet (1750-1799). “O dobrador de Bennet consiste de três placas condutoras isoladas entre si, que através de movimentos e conexões cíclicas realiza um processo que dobra a carga em duas das placas, a cada ciclo completado” (Junior, 2008, p. 24), por processo manual. O processo, no entanto, foi imediatamente mecanizado por Nicholson (Heilbron, 1979).

“[...] Por uma questão de clareza e ordem, decidi dividir meu trabalho em várias Memórias, as quais eu dirijo a você, e as submeto ao seu discernimento [...]. Você conhece a doutrina e a engenhosidade deste ilustre filósofo [Volta]. Você conhece os diversos experimentos belíssimos que ele realizou, você também sabe como eles tendem a destruir a eletricidade desse tipo [animal], e estabelecer a máquina animal [...] como, nada mais, do que um mero corpo úmido; tudo o oposto do que eu acredito, e estudei para demonstrar com o esforço e a labuta de muitos anos” (Galvani, 1797, p. 2).

Na primeira memória, Galvani apresenta objeções às críticas de Volta acerca de seu “terceiro experimento”. Seguindo o que havia argumentado no Tratado, ele reforça que a causa das contrações, no experimento com contato direto músculo-nervo, não pode ser uma irritação mecânica. Em *“um crescente de criatividade laboratorial”* (Piccolino & Bresadola, 2013, p. 188), ele faz variações importantes no experimento, dialogando-o profundamente com sua hipótese a fim, sobretudo, de refutar o argumento do físico.

É nesse sentido que, variando sistematicamente os componentes do experimento, e *“convencido da importância de fornecer novos fatos em controvérsias científicas [...]”* ele desenvolve, na segunda Memória, um *“experimento que foi considerado ‘o mais importante da eletrofisiologia’, a base real dessa nova ciência”* (Piccolino, 1998, p. 389). O que pode ser chamado de “quarto experimento” (Pera, 1992) de Galvani consistia em obter contrações nas pernas de um sapo, devidamente preparado da maneira usual, conectando exclusivamente matéria nervosa, isto é, completamente homogênea. *“Para destruir qualquer sombra de dúvidas”*, diz ele, referindo-se à existência da eletricidade animal e não de uma eletricidade comum oriunda da dissimilaridade de condutores, é que *“fiz o seguinte experimento”* (Galvani, 1797, p. 16).

O anatomista separou as duas pernas de uma rã, com seus respectivos nervos ciáticos cortados perto da medula espinhal [fig. 10]. Um dos nervos foi dobrado na forma de um pequeno arco; o nervo da outra perna foi levantado com um bastão de vidro e deixado cair levemente sobre o primeiro nervo. Nesse momento houve contrações em uma ou até nas duas pernas. Galvani ressalta, no entanto, que o nervo que caiu tocou o que estava dobrado em dois pontos, um deles sendo o orifício no nervo. Essa observação é importante, pois em termos atuais pode-se dizer que esse orifício do nervo expõe a parte interna das fibras nervosas que apresentam um potencial elétrico distinto da parte externa.

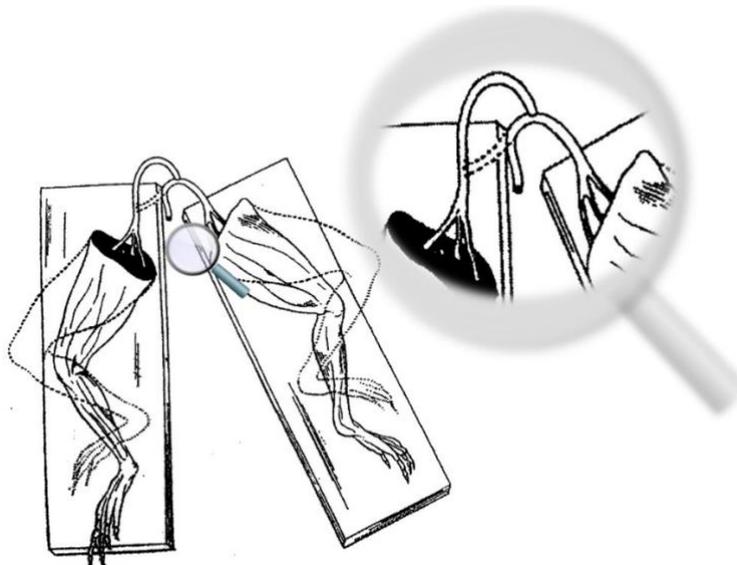


Figura 10- O “quarto experimento” de Galvani. Contrações foram obtidas com a ligação nervo-nervo. Adaptada de Piccolino e Bresadola, 2013.

A obtenção de contrações a partir de substância exclusivamente orgânica e homogênea parecia, em princípio, capaz de enfrentar qualquer objeção. *“Parece-me, portanto, que existe outra série de contrações obtidas sem estímulo, sem metal e sem o menor sinal de dissimilaridade e, portanto, produzido por um circuito de eletricidade intrínseca ao animal e naturalmente desequilibrado nele”* (Galvani, 1797, p. 17). A ideia central da *Memorie*, em termos epistemológicos, era de que, para além do raciocínio lógico, as experiências deveriam igualmente ser respondidas com novos experimentos, e este parecia um experimento decisivo. Essa concepção é uma alusão clara à visão de mundo que permeava o ambiente científico na época, influenciado

pela concepção experimental newtoniana. Não obstante, a nova teoria geral da eletricidade por contato de Volta havia evidenciado, experimentalmente também, a geração de uma eletricidade com o uso restrito de metais, ainda que o anatomista não o tivesse lida.

Na terceira memória, Galvani repete e varia alguns dos experimentos desenvolvidos ao longo de sua controvérsia com Volta, inclusive aqueles com apelo crucial. Ainda que a intenção fosse a de clarificar sua teoria da eletricidade animal, ele não poderia, mesmo se quisesse, refutar a nova teoria da eletricidade por contato de Volta (Pera, 1992). O certo é que, para ele, essas variações – ilustradas em duas placas na obra – representavam oito combinações [fig. 11] experimentais possíveis e suficientes entre um sapo preparado, as armaduras e o arco capazes de evidenciar que a causa das contrações em cada caso era devido a uma eletricidade intrínseca do animal.

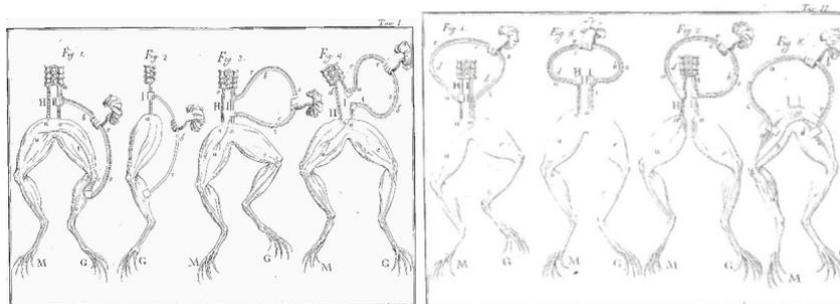


Figura 11- Placa 1 apresentada na Memória de Galvani (1797) com quatro representações: as duas primeiras configurações experimentais com um arco entre nervo e músculo e as duas subsequentes com um arco conectado apenas no nervo. Placa 2, também apresentada na Memória de Galvani (1797), com quatro representações: os três primeiros esquemas experimentais com um arco entre dois nervos e o último com um arco entre dois músculos. Extraídas de Galvani (1797).

Usadas como uma forma de persuasão, e embora fossem fruto de um intenso trabalho experimental, de longos anos, dialogando proficuamente com a hipótese da eletricidade intrínseca do sapo, as figuras evidenciavam, forçadamente ou não, a circulação da eletricidade nos termos galvânicos, a saber, provocada pelo músculo através do nervo e do arco. Os arranjos experimentais assim esboçados:

“[...] Colocavam diante do leitor as circunstâncias fundamentais necessárias para a produção de um fenômeno particular e isso explicava [ainda mais] a sua importância. [...] Embora desenhadas com elegância formal, as figuras do Memorie aparentam ser mecanismos gráficos adequados para ilustrar claramente o fluxo elétrico que Galvani acreditava ter demonstrado em suas experiências” (Piccolino & Bresadola, 2013, p. 198).

Ainda em sua terceira Memória Galvani salienta que, “antes de mais nada”, é preciso “colocar a questão da forma mais clara possível” (Galvani, 1797, p. 31). Nesse sentido, ele resgata a proposta contida no *De viribus*, juntamente com seus novos achados, e sintetiza em sete pontos a sua teoria.

- I. Que a eletricidade que induz as contrações musculares, se encontra singularmente reunida e acumulada no músculo, ou seja, na fibra muscular, mas num estado diferente [...], isto é, em estado de desequilíbrio, qualquer que seja a causa [...].*
- II. Que em virtude desse desequilíbrio é feita a circulação de eletricidade no músculo.*
- III. Que tal circulação consiste na eletricidade deixando o músculo, e retornando com todo esforço, por lei inviolável, para o mesmo [...].*
- IV. Que tal circulação ocorre da seguinte maneira: a eletricidade deixando o músculo por meio do nervo; chegando ao lugar do nervo, que foi atraída pela força da armadura e do arco; saindo do nervo [...] saindo com as mesmas forças [isto é, sendo atraída da mesma forma que o nervo]; entrando no arco e, por meio dele, finalmente retornando com todo o poder para o músculo, de onde partiu.*
- V. Que devido a essa tendência e a esse esforço que a eletricidade usa para retornar ao músculo, ela sempre escolhe o caminho mais curto para chegar ali; propriedade que ninguém pode negar ser a mesma observada com a eletricidade da garrafa de Leiden, ou do quadrado mágico [de Franklin].*

VI. Que os nervos, como é evidente pelo que foi exposto, são os condutores naturais e particulares da referida eletricidade [...].

VII. Por último, que os nervos naturalmente exercem tal ofício com sua substância íntima e medular [...] (Galvani, 1797, p. 30-31).

As contrações nas rãs eram, portanto, devidas a uma corrente elétrica que flui do músculo para o nervo, e retorna ao músculo. Isso, como evidenciado no Tratado, dependia de uma máquina particular do animal, que matinha a eletricidade em estado de desequilíbrio.

Em suas quarta e quinta Memórias, Galvani se debruça, respectivamente, sobre os arcos heterogêneos e os peixes elétricos¹⁰. Nestes últimos, ele desenvolve uma série de experimentos envolvendo o torpedo. Utilizando armaduras metálicas em seus nervos, ele conclui que essas armaduras “*não são responsáveis pelo desequilíbrio da eletricidade, nem fornecem eletricidade própria; só podem aumentar um pouco a força elétrica quando esta é fraca*” (Galvani, 1797, p. 69). Por isso, no caso de peixe elétrico, o seu uso era indiferente. Isso lhe permite contrapor, ainda mais, o poder eletromotriz dos metais atribuído por Volta. Ao mencionar uma experiência em que manteve um sapo preparado atrás de um torpedo sobre uma mesa, ele relata que foi “*um show alegre vê-los todos se mover de uma só vez e, eu diria, saltitar*”. O anatomista reitera, nesse sentido, que a eletricidade dos peixes elétricos e a eletricidade animal não diferem, concepção que já se fazia presente em seus estudos na década de 1780.

Cabe ressaltar que no início da *Memorie*, Galvani ainda chega a cogitar a possibilidade, embora remota e sem modificar ou eliminar qualquer convicção em sua própria teoria, de que pudessem coexistir as duas eletricidades (animal e de contato) para situações distintas. Poderia “*permanecer a dúvida*”, afirma, de que além das contrações dependentes da eletricidade animal, outras contrações “*poderiam ser produzidas a partir de eletricidade extrínseca e comum ou existente nos mesmos metais que são usados para armaduras ou arcos*” (Galvani, 1797, p. 17).

Não obstante, o anatomista esperava que seu “quarto experimento”, juntamente com a clarificação de sua concepção com as placas apresentadas, pudesse convencer Volta e seus partidários da existência real de uma eletricidade animal. Isso, no entanto, não ocorre; “*mesmo na ciência, nada é tão autoevidente a ponto de obter aceitação geral de maneira simples e indiscutível*” (Piccolino, 1998, p. 389). Nesse sentido, Volta contra-ataca em 1798.

O CONTRA-ATAQUE (FINAL) DE VOLTA

Em abril de 1798 Volta encaminha, de forma anônima, duas cartas à Aldini, nas quais rebate as colocações que Galvani apresentou em sua última memória. Com tom estarrecedor, o físico questiona:

“Mas você acredita, meu caro Aldini, acredita de boa-fé, hoje, que esta é uma eletricidade animal real e própria [...] como Galvani já reivindicou, e outros com ele, e o mesmo ainda se esforça para apoiar em seu último trabalho publicado há meses atrás? [...] Eu acredito, e sustento constantemente, que é de fato uma eletricidade meramente artificial e extrínseca, que é movida pelo contato mútuo dos condutores [...] os quais são diferentes uns dos outros [...]” (Volta, 1967, p. 502).

Fazendo menção aos seus experimentos anteriores – inclusive os apresentados em carta a Vassali e Gren – em que mostra a existência de eletricidade devido ao contato de diferentes metais, sem utilizar um sapo ou qualquer detector fisiológico, Volta salienta que “*o assunto agora é levado a tal grau de evidência, que não pode sofrer mais nenhum conflito*” (Volta, 1967, p. 502) e, para além disso, afirma que está “*convencido de que Galvani ignorou tais experiências decisivas, quando ele publicou seu último trabalho*” (p. 506). Como frisado, no entanto, Galvani pode nem ter lido essas publicações.

Para Volta (1967, p. 506), “*essas experiências fora do Galvanismo, em que não se utiliza nenhum corpo ou órgão animal*”, eram decisivas e debilitavam fortemente a teoria galvânica. Em termos do exposto por Galvani em sua *Memorie*, o físico afirma que os argumentos do anatomista “*de certa forma, foram dissolvidos, de modo que não tinham mais aquela força aparente*” (p. 502); como teve o *De viribus*, por exemplo, uma vez que derradeiramente Volta havia constatado que, embora condutores de primeira classe

¹⁰ Na década de 1770 havia evidências claras de que os choques produzidos por alguns peixes, como os torpedos, tinham natureza elétrica. Os estudos de John Walsh (1726-1795), John Hunter (1728-1793) e Henry Cavendish (1731-1810), por exemplo, contribuíram consideravelmente nesse sentido (Koehler, Finger, & Piccolino, 2009).

fossem motores de eletricidade muito mais fortes que os corpos de segunda classe (úmidos), estes últimos eram capazes de gerar ‘força elétrica’.

O “quarto experimento” de Galvani era ‘facilmente’ explicado pela teoria de Volta, na visão do físico; nos casos em que a ligação ocorre entre nervo-nervo ou mesmo músculo-músculo, ainda que não haja uma heterogeneidade perceptível, deve-se supor que:

“também ali, há alguma heterogeneidade, alguma diferença, se não substancial, pelo menos accidental, entre as partes dadas ao contato, ou as outras que compõem o círculo, alguma diferença que é suficiente para incitar e mover o fluido elétrico um pouco, e assim produzir o efeito observado de contrações musculares” (Volta, 1798a, p. 528).

No final, Volta indaga: *“agora, portanto, que a coisa não só é provada, mas colocada sob os olhos das experiências [...] o que você diz, meu querido Aldini, e o que mesmo Galvani dirá?” (Volta, 1798a, p. 555).*

Em outubro do mesmo ano, em carta a Luigi Valentino Brugnatelli (1761-1818), Volta admite que mesmo *“depois de ter feito e escrito tanto para demonstrar como infundada a alegação de uma eletricidade animal” (Volta, 1798b, p. 560-561)*, ele reconhece uma eletricidade animal real, mas somente no torpedo, na enguia e peixes que produzem choque. A eletricidade, nesses casos, seria genuína do animal, pois *“depende da alma, isto é, obedece à vontade” (p. 561)*. Essa vontade estava ausente nos experimentos galvânicos em que o modo usual de preparação de rãs envolvia sua dissecação. Nos experimentos de Galvani, o fluido elétrico *“não é movido por um princípio interno”*, mas por uma causa externa, a saber, a aplicação de condutores dissimilares; esses condutores *“são motores reais”* diz ele, *“como argumentei, e ainda continuo argumentando tendo [apresentado] evidências mais diretas disso” (p. 561)*.

Não obstante, ele visa uma reconciliação, ainda que superficialmente e admitindo-a como uma hipótese que, portanto, não teria o mesmo peso que argumentos amparados experimentalmente. Assim, cogita que:

*“Até certo ponto, portanto, esses motores externos substituem o motor interno, que no estado natural da vida é a vontade do animal. Se os galvanistas tiverem o prazer de reduzir a eletricidade animal nesses termos, eu ficaria feliz em concordar com eles. Se, no entanto, eles continuarem a rejeitar esse modo de conciliação, que estou oferecendo [...], se eles não se renderem a tal projeto de reconciliação, talvez eu possa retirar até isto, ou seja, não mais cogitar sequer aquela outra eletricidade animal dependente e movida pela vontade no ser vivo e intacto, exceto no torpedo e outros animais elétricos, pois, afinal, isso é **uma mera hipótese**, e só por essa razão eu pretendia avançar” (Volta, 1798b, p. 561, grifo nosso).*

O anatomista que *“juntou ao gênio mais eminente, o conjunto de qualidades mais preciosas do coração” (Alibert, 1806, p. 332)*, infelizmente, não pôde responder as colocações de Volta por sua morte precoce em 4 de dezembro daquele mesmo ano. *“Sua alma”*, declara poeticamente Alibert (1806, p. 332), *“uma pintura onde a virtude parecia ter sido pintada com todos os seus encantos e atrações”*, adormece. No céu estrelado da controvérsia, apaga-se uma luz. Na resplandecência de uma ciência dinâmica, Galvani ilumina os caminhos da eletrofisiologia e Volta os da física, com a apresentação da pilha.

Em carta¹¹ a Joseph Banks (1743-1820) em 20 de março de 1800, Volta apresenta seu “órgão elétrico artificial” (Volta, 1800). Este trabalho é tido como um dos *“mais importantes da história do eletromagnetismo e desencadeou uma revolução na ciência e na tecnologia” (Magnaghi & Assis, 2008, p. 119)*; mas é claro que não pode ser visto de forma isolada. Conforme se procurou evidenciar, o contexto da descoberta não dissociado da justificativa mostra uma longa história de pesquisa até a invenção da pilha.

Por certo, para muitos, e isto inclui Volta, o problema da eletricidade animal parecia estar resolvido e isso fez com que a teoria galvânica fosse deixada em segundo plano (Steinle, 2016). No entanto, em uma ciência permeada por valores e seus juízos, é difícil conceber que um invento possa resolver uma querela em definitivo. Nas nuances de um processo não estático, e em retrospectiva, percebe-se que distintos valores, epistêmicos e não epistêmicos, tiveram um papel relevante nesse momento da história.

¹¹ Carta traduzida e comentada por Magnaghi e Assis (2008).

Apenas com o desenvolvimento posterior da eletrofisiologia pode-se entender e afirmar que o impasse entre Galvani e Volta era “*um falso dilema, porque uma terceira possibilidade existia [...] Havia, de fato, outra explicação capaz de esclarecer a necessidade da eletricidade animal invocada por Galvani e do poder eletromotriz dos metais concebidos por Volta*” (Piccolino & Bresadola, 2013, p. 269). No entanto, essa questão foi objeto de pesquisa da eletrofisiologia nos últimos dois séculos. Com os estudos do fisiologista Alan Hodgkin (1914-1998) e seus colaboradores, entre 1934 e 1952, mostrou-se, então, que os sinais nervosos são um fenômeno genuinamente elétrico, pois, como havia suposto Galvani, há uma condição de desequilíbrio nos tecidos animais. Além disso, Hodgkin – que está imerso em um contexto que advém de dois séculos de pesquisas sobre isso – explica a necessidade de haver um desequilíbrio para que a eletricidade animal possa ser colocada em movimento e produzir o sinal nervoso. Os arcos metálicos, nos experimentos de Volta, produziam esse desequilíbrio (Piccolino & Bresadola, 2013). Por certo, aqui se tem uma rica continuação histórica, matéria para outros trabalhos.

A CRUCIALIDADE DOS EXPERIMENTOS NA CONTROVÉRSIA: IMPLICAÇÕES (SEMPRE INACABADAS) PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS

O debate caloroso travado por Galvani e Volta, ao longo dos anos, evidencia a beleza de uma ciência que não se apresenta apática para os que dela analisam e se apropriam de todo o seu contexto; e não apenas de seus produtos. Apresentando argumentos e contra-argumentos, uma dinâmica evidente entre hipótese e experimentação, envolvendo a comunidade científica, abarcando um tema de extrema relevância para os instruídos (conhecedores de sua importância), acendendo a chama de uma ciência viva e dinâmica, esta é uma das maiores controvérsias da história da ciência (Bernardi, 2000).

Galvani, em princípio, apresenta dois experimentos com apelo crucial – o “terceiro” e o “quarto” – enquanto Volta, antes da publicação sobre a pilha, desenvolve um. No âmbito de um jogo profícuo, onde os pressupostos teóricos de cada um dialogam proficuamente com os (copiosos) experimentos desenvolvidos, de que forma é possível atribuir a alguns experimentos um caráter crucial como muitos autores o confere, e por vezes os próprios estudiosos? (Piccolino & Bresadola, 2013; Pera, 1992; Mauro, 1969; Verkhratsky, Krishtal, & Petersen, 2006; Parent, 2004).

Não é incomum, no ensino de ciências, persistir a ideia de que existem experimentos definidores e incontestáveis que permitem decidir entre teorias rivais (Carmo, Medeiros, & Medeiros, 2000; Cupani & Pietrocola, 2002; Hodson, 1988; Schiedecke & Porto, 2015; Silva, 2010). Não obstante, esse entendimento limitado da experimentação, e da própria construção de conhecimento, carrega a presunção de que evidências independentes de pressupostos teóricos estão disponíveis, isto é, de que existe ‘neutralidade’ empírica e, por consequência, que não pode haver ambiguidade interpretativa de resultados empíricos. A rã enigmática nos estudos de Galvani e Volta elucidada, justamente, o quanto as observações são carregadas de teorias. Por certo, exemplos históricos são úteis para propiciar discussões e compreensões sobre a ciência (Clough & Oslon, 2008). “*Um olhar epistemológico da história da ciência, particularmente de controvérsias envolvendo cientistas, tem o potencial de ilustrar e contextualizar discussões sobre diversos aspectos relativos à temática NdC*” (Martins, 2015, p. 727), dentre os quais, a relatividade do significado e atribuição de um experimento como crucial.

A noção de experimento crucial remete à ideia baconiana de *instacia crucis* (Raicik, Peduzzi, & Angotti, 2017a). Francis Bacon, em sua obra máxima, o *Novum Organum*, publicada em 1620, salienta que essas instâncias podem indicar um caminho a ser seguido quando, “*na investigação de uma natureza, o intelecto se acha inseguro e em vias de se decidir entre duas ou mais naturezas que se devem atribuir à causa da natureza examinada*” (Bacon, 1979, II, XXXVI, p. 161). Isto é, quando duas ou mais causas parecem responder igualmente bem a uma determinada natureza, faz-se necessário encontrar um fato que pode ser explicado por uma delas, somente. É como se os estudiosos se deparassem com uma encruzilhada e essa *instacia crucis*, ou mesmo instância decisiva, como o filósofo também permite que seja chamada, se mostrasse como “*muito esclarecedora e com significativa autoridade*” (p. 161).

O “terceiro experimento” de Galvani, apresentado com apelo crucial, em princípio, parecia pôr fim à controvérsia, isto é, eliminaria qualquer possível contraponto de seu adversário. Como o próprio anatomista frisa, o experimento “*é decisivo [...], na minha opinião*” (Galvani, 1841, p. 212). Ele “*estava convencido de que o Tratado resolveria todas as dúvidas e acabaria com qualquer controvérsia, esclarecendo o problema da existência de eletricidade animal e do mecanismo de contração muscular*” (Piccolino & Bresadola, 2013, p. 179). O experimento evidenciava a contração muscular de uma rã sem o uso de qualquer metal, o que, por certo, refutava a teoria especial de contato de Volta. O caráter refutador de um experimento crucial é frisado por Popper. O filósofo afirma que: “*enquanto Bacon acreditava que uma experiência crucial poderia demonstrar ou verificar uma teoria, diremos que ela pode na melhor das hipóteses refutá-la*” (Popper, 1982,

p. 139). Não obstante, Volta não apresentava um “intelecto inseguro”, ou seja, em vias de se decidir em meio a uma encruzilhada, pelo contrário, a réplica, o contraponto, vem logo em seguida com argumentos que colocariam em dúvida a crucialidade do experimento apresentado. No âmbito de um ensino pouco contextualizado histórica e filosoficamente, “*é enganoso apresentar aos alunos a ideia de que as teorias são abandonadas por causa de alguns “resultados negativos”*” (Hodson, 1988, p. 55). Os pressupostos teóricos dos envolvidos em uma controvérsia, com frequência, não se abalam prontamente mesmo sob forte evidência empírica. O que parecia um experimento conclusivo e inquestionável, evidencia o quanto a ciência é complexa, permeada por valores, pressupostos teóricos. Volta, literalmente, se recusou a ver no experimento uma prova definitiva da existência real da eletricidade animal (Piccolino, 1998).

Rigorosamente, além disso, quando Galvani apresenta seu “terceiro experimento” não há duas causas que parecem responder bem à questão, a ponto de uma *instancia crucis* permitir que o estudioso tome uma decisão. Nesse caso, ambos estavam confiantes de suas próprias hipóteses. Há uma eletricidade animal para Galvani que lhe permite explicar bem seu experimento, como há, a todo custo, uma eletricidade externa que, de uma forma ou de outra, deveria explicar o feito galvânico à luz da perspectiva de Volta.

Por certo, para Galvani o terceiro experimento pode ter sido crucial por confirmar a sua hipótese, e o caráter confirmador de uma instancia crucial também é enfatizado por Bacon. Contudo, caso “*considere-se a causa como duvidosa*” (Bacon, 1979, II, XXXVI, p. 167) – como na alegação de Volta de que o resultado encontrado poderia surgir devido a uma irritação mecânica – precisa-se prosseguir na investigação. Como, de fato, ocorreu. Nenhum conjunto de dados, nenhum experimento, mesmo que possua caráter confirmador, propicia uma conclusão definitiva, “*pois esta está sempre vulnerável ao perigo do confronto com uma instância contraditória*” (Silva, 2008, p. 14).

Não raro, na divulgação da ciência por seus diversos meios, e inclusive em sala de aula, é comum considerar-se que o papel dos dados experimentais é o de propiciar aceitação ou rejeição a uma teoria (Niaz, 2010). Porém, a ciência é demasiadamente dinâmica para se generalizar e balizar a função do componente empírico de forma tão incauta. Apesar de parecer que “*contrações sem metais poderiam levar a controvérsia a um fim em favor de Galvani*” (Piccolino & Bresadola, 2013, p. 166), esse experimento (e tudo o que vem com ele) serviu, também, para que Volta repensasse sua teoria especial e propusesse uma teoria geral da eletricidade por contato. Em retrospectiva, fazendo alusão parcial à concepção de Imre Lakatos (1922-1974), o experimento pode ser visto como crucial por ter “aberto” os olhos de Volta e encaminhado e conduzido a controvérsia para novos rumos. Não obstante, interromper a história aqui seria deturpar a própria importância de Galvani.

O “quarto experimento” galvânico pode, à luz de um distanciamento histórico, ser crucial à eletrofisiologia (Piccolino & Bresadola, 2013), um experimento fundamental para a fundação dessa área. Ainda assim, essa consideração é, novamente, parcial, pois não é um experimento, *per se*, que carrega consigo esse peso, mas todo um contexto histórico que, inclusive, apresenta um conjunto de experimentos exploratórios desenvolvidos ao longo de anos e dialogados constantemente com hipóteses. Imerso nesse processo construtivo é que Galvani pôde dizer que o experimento poderia “*destruir qualquer sombra de dúvidas*” (Galvani, 1797, p. 16). Com efeito, como ressalta Lakatos (1978, p. 164), “*nenhuma experiência é crucial na altura em que é realizada (exceto talvez psicologicamente)*”.

A reação de Volta, com sua nova teoria geral da eletricidade por contato, evidencia o quanto a ideia de um experimento definidor, incontestável e que permite decidir instantaneamente entre concepções divergentes, é um mito. Não obstante, o físico também considera seu experimento “*tão mais simples quanto claro e decisivo*” (Volta, 1967, p. 498). A experiência em que constata eletricidade metálica a partir de seu eletroímetro de condensação parecia, por certo, trazer tenras perspectivas à física. Mais uma vez, em retrospectiva, ela representa um novo e importante contributo para a história da ciência.

Enquanto Galvani desenvolvia seu último experimento com apelo crucial em favor da teoria da eletricidade animal, Volta estava, igualmente, realizando um para apoiar o poder dos metais na geração de eletricidade artificial. Isso evidencia o quanto o componente empírico pode ser limitado em momentos calorosos na ciência. Como explicita Pierre Duhem (1861-1916), em crítica contundente à ideia de experimento crucial, “a verdade de uma teoria física não se decide no cara ou coroa”, isto é, “*um físico [estudioso] nunca está seguro de ter esgotado todas as hipóteses imagináveis*” (Duhem, 1984, p. 556). Isso desmorona qualquer alusão a experimentos decisivos. Para Duhem, não é possível a existência de experimentos cruciais na ciência. Nenhum teste empírico é uma resolução definitiva.

Cabe destacar que a concepção do que é, e se realmente existe experimento crucial na ciência, é relativa. Muitas análises do conceito na filosofia da ciência deturpam em maior ou menor grau a ideia inicial

advinda de Bacon (Hacking, 2012) e, além disso, evidenciam a complexidade do tema e sua interpretação. Em síntese, e recorrendo novamente a Lakatos (1987, p. 284-285), *“nenhum experimento isolado pode desempenhar um papel decisivo, muito menos ‘crucial’”*. A partir de uma análise de experimentos exploratórios em episódios da ciência, essa colocação pode ficar mais clara.

As características da experimentação exploratória valorizam a relevância epistêmica da experimentação que, quando contextualizada histórica e filosoficamente, pode englobar a própria ideia de experiência crucial. Estes experimentos, como frisa Bacon (1979), pertencentes à construção de conhecimentos, são elucidativos; em meio à sombra, podem fornecer luz. Steinle (1997) defende que as funções epistêmicas da experimentação, que fogem à ideia ‘padrão’ de apenas servir à teoria, merecem mais atenção do que têm recebido, inclusive no ensino. *“Nos livros didáticos”,* enfatiza ele, *“temos talvez a mais clara manifestação da ideia de que o conhecimento científico pode ser apresentado e estabelecido - ou, em outras palavras, ser justificado - sem qualquer consideração por sua gênese e desenvolvimento histórico”* (Steinle, 2006, p. 189). É nesse sentido que, inadvertidamente, o uso descontextualizado do termo experimento crucial, tão somente com apelo retórico e como forma de legitimação da ciência, evidencia uma clara distinção entre gênese e validade do conhecimento.

Um resgate histórico-filosófico da experimentação exploratória (Steinle, 2002), pode trazer à tona as distintas funções do experimento para o desenvolvimento científico, permite compreender a limitação em se atribuir a um experimento a função crucial de decisão imediata e inequívoca, propicia uma reflexão da sua dependência com o contexto em que está inserida, seja histórico, cultural, epistemológico. A análise desses experimentos mostra que os caminhos científicos podem levar a um:

“um beco sem saída, às vezes a sucessos totalmente inesperados [...]. Essa mistura impura de princípios epistêmicos gerais e constelações históricas, materiais e biográficas específicas é [...], característico não apenas da pesquisa experimental, mas do desenvolvimento científico em geral” (Steinle, 2002, p. 427).

E, por certo, uma maneira de especificar, analisar e refletir sobre este tipo de experimentação pode ser encontrada estudando-se detalhadamente a pesquisa científica sem dicotomizar seu processo e produto.

Não obstante, a controvérsia entre Galvani e Volta é tão fértil em termos histórico-epistemológicos que sua implicação não se limita à discussão epistêmica da experimentação, a não neutralidade, a seletividade da observação, a importância de conhecimentos precedentes, a dinâmica científica, plural metodologicamente, etc. Esse episódio suscita, ainda, uma série de outras questões como:

i) que tipo de controvérsia se deu entre Galvani e Volta? A título de exemplo, Raicik, Peduzzi e Angotti (2018), caracterizam três tipos de controvérsias científicas: analíticas, resistivas e argumentativas, que ressaltam as peculiaridades dessas querelas em distintos momentos da ciência e permite analisá-las e classificá-las à luz dessas características. Discussões pontuais, à luz do que os autores abordam, poderia ser feita com o debate aqui apresentado, evidenciando, por exemplo, a disputa pré-paradigmática em uma controvérsia analítica.

ii) Que valores epistêmicos ou não foram mais preponderantes no percurso do debate? A visão kuhniiana de valores (Kuhn, 2011), igualmente, permite analisar a limitação do componente empírico na ciência. Thomas Kuhn (1922-1996) salienta que na escolha de teorias os membros de uma comunidade compartilham, normalmente, de um conjunto de valores, como precisão, consistência, simplicidade, fecundidade e abrangência, que evidenciam boas razões para a tomada de decisão. Com efeito, *“a disputa de teorias pela hegemonia do conhecimento envolve tanto aspectos de natureza interna quanto externa à ciência; podem ser bastante complexos e sutis os mecanismos envolvidos na aceitação de um novo conhecimento”* (Peduzzi & Raicik, 2019, p. 27). Além disso, ainda seria possível discutir em que medida a controvérsia foi ou não resolvida. Ernan McMullin (1924-2011) (2003), ao apresentar uma classificação para o término de uma controvérsia, explicita que nem sempre elas são resolvidas, mas podem ser apenas encerradas ou abandonadas.

Estas questões, não discutidas no presente trabalho, fornecem subsídios para a discussão de outros aspectos relativos à Natureza da Ciência no ensino de ciências. Uma discussão específica acerca dos estudos iniciais de Galvani, como feito por Raicik (2019) estabelecendo um vínculo da ideia de experimentação exploratória, de acordo com Steinle, e a noção de experientia literata baconiana, pode também contribuir para minimizar o estereótipo de que a experimentação possui um papel limitado na ciência como fonte (no sentido de gênese) ou corroboradora de corpos teóricos. Ademais, um estudo detalhado sobre a pilha e seu impacto na sociedade pode, igualmente, contribuir para um ensino não apenas *da*, mas *sobre* a ciência. Diversos

trabalhos se debruçaram sobre isto, com diferentes enfoques; a título de exemplo, cita-se Martins (1999), Oliveira e Oliveira (2001), Kipnis (2001), Germano, Lima e Silva (2012), Santos e Silva (2015), Jardim e Guerra (2018).

Por fim, cabe destacar que a discussão de controvérsias científicas, por meio da história da ciência, em sala de aula é uma forma profícua de “*despertar o interesse pela ciência em alguns alunos*” (Kipnis, 2001, p. 33). Além de mostrar uma ciência mais humana, passível de subjetividades, influências históricas, sociais, epistemológicas, pode inspirar o uso de estratégias que sugerem que “*olhar de diferentes perspectivas para um conceito científico pode facilitar a sua compreensão*” (p. 33). Conceito, nesse caso, podendo inclusive ser entendido como concepções científicas, ideias, características da ciência.

Agradecimento

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- Alibert, J. L. (1806). *Éloges: Historiques composés pour la société médicale de Paris*. Paris, France: Crapelet.
- Bacon, F. (1979). *Novum Organum ou verdadeiras indicações acerca da interpretação da natureza*. Nova Atlântica. São Paulo, SP: Abril Cultural.
- Bernardi, W. (2000). The controversy on animal electricity in eighteenth-century Italy: Galvani, Volta and others. In F. Bevilacqua, & L. Fregonese (Eds.). *Nuova Voltiana: Studies on Volta and his times* (101-114). Recuperado de <http://www.edumed.org.br/cursos/neurociencia/controversy-bernardi.pdf>
- Carmo, L. A., Medeiros, A., & Medeiros, C. F. (2000). Distorções conceituais em imagens de livros textos: o caso do experimento de Joule com o calorímetro de pás. In *Atas do VII Encontro de Pesquisadores em Ensino de Física*. Florianópolis, SC, Brasil. Recuperado de https://www.if.ufrgs.br/~lang/Textos/AlexMed/Exp_Joule.pdf
- Clough, M. P., & Oslon, J. K. (2008). Teaching and assessing the nature of science: An Introduction. *Science & Education*, 17, 143-145. <https://doi.org/10.1007/s11191-007-9083-9>
- Cupani, A., & Pietrocola, M. (2002). A relevância da epistemologia de Mario Bunge para o ensino de ciências. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 19(n. esp.), 100-125. <https://doi.org/10.5007/%25x>
- Dibner, B. (1971). *Luigi Galvani: An expanded version of a biography prepared for the forthcoming edition of the Encyclopaedia Britannica*. Norwalk, United States of America: Burndy Library.
- Duhem, P. (1984). Teoria física y experimento. *Teorema*, 14(3), 547- 582.
- Feest, U., & Steinle, F. (2012). Scientific Concepts and Investigative Practice: Introduction. In U. Feest, & F. Steinle (Eds.). *Scientific Concepts and Investigative Practice* (1-22). Berlim, Germany: Walter de Gruyter GmbH.
- Galvani, L. (1841). *Opere edite ed inedite del professore Luigi Galvani*. Raccolte e pubblicate per cura dell'Accademia delle Scienze dell'Istituto di Bologna. Bologna, Italia, Dall'Olmo.
- Galvani, L. (1797). *Memorie sulla elettricità animale di Luigi Galvani P. Professore di notomia nella Università di Bologna al celebre Abate Lazzaro Spallanzani Pubblico professore nella Università di Pavia. Aggiunte alcune elettriche esperienze di Gio Aldini P. prof. di física*. Bologna, Italia: Sassi.
- Ganot, A. (1859). *Cours de physique*. Paris, France: Chez L'Auteur-Éditeur.
- Germano, M. G., Lima, I. P. C., & Silva, A. P. B. (2012). Pilha Voltaica: entre rãs, acasos e necessidades. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 29(1), 145-155.

<https://doi.org/10.5007/2175-7941.2012v29n1p145>

- Hacking, I. (2012). *Representar e Intervir*. tópicos introdutórios de filosofia da ciência natural. Rio de Janeiro, RS: Eduerj.
- Heilbron, J. L. (2007). Volta, Alessandro. In C. C. Gillispie (Ed.). *Dicionário de biografias científicas* (2552-2565). Rio de Janeiro, RJ: Contraponto.
- Heilbron, J. L. (1979). *Electricity in the 17th & 18th Centuries*. Berkeley, United States of America: University of California Press.
- Hodson, D. (1988). Experiments in science and science teaching. *Educational Philosophy and Theory*, 20(2), 53-66. <https://doi.org/10.1111/j.1469-5812.1988.tb00144.x>
- Hoff, H. E. (1936). Galvani and the pre-Galvanian electrophysiologists. *Annals of Science*, 1(2), 157-172. <https://doi.org/10.1080/00033793600200131>
- Home, R. W. (1970). Electricity and the nervous fluid. *Journal of the History of Biology*, 3(2), 235-251. <https://doi.org/10.1007/BF00137353>
- Jardim, W. T., & Guerra, A. (2018). Práticas científicas e difusão do conhecimento sobre eletricidade no século XVIII e início do XIX: possibilidades para uma abordagem histórica da pilha de volta na educação básica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 40(3), e3603. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2017-0329>.
- Jensen, G. M., & Prestes, M. E. B. (2008). Experimentos de Lazzaro Spallanzani com um “instrumento minerográfico”: como testar alegada habilidade de uma pessoa detectar depósitos de metais e água subterrânea?. *Filosofia e História da Biologia*, 3, 157-177. Recuperado de <http://www.abfhib.org/FHB/FHB-03/FHB-v03-09-Gerda-Jensen-Maria-Elice-Prestes.pdf>
- Junior, J. B. R. F. (2008). História do desenvolvimento das máquinas eletrostáticas como estratégia para o ensino de conceitos de eletrostática. (Monografia. Licenciatura em Física). Faculdade de Física da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. Recuperado de <http://revistaseletronicas.pucrs.br/ojs/index.php/graduacao/article/view/4122/3123>
- Kipnis, N. (2001). Scientific controversies in teaching science: the case of Volta. *Science & Education*, 10, 33-49. <https://doi.org/10.1023/A:1008760521211>
- Kipnis, N. (1987). Luigi Galvani and the debate on animal electricity, 1791-1800. *Annals of Science*, 44, 107-142. <https://doi.org/10.1080/00033798700200151>
- Koehler, P. J., Finger, S., & Piccolino, M. (2009). The ‘Eels’ of south America: Mid-18th-century dutch contributions to the theory of animal electricity. *Journal of the History of Biology*, 42(4), 715-763. <https://doi.org/10.1007/s10739-009-9186-z>
- Kragh, H. (2000). Confusion and controversy: Nineteenth-century theories of the voltaic pile. In F. Bevilacqua, & L. Fregonese (Eds.). *Nuova voltiana: Studies in volta and his times* (133–157). Università Degli Studi di Pavia, Italia. Recuperado de <http://ppp.unipv.it/pagesIT/NuovaVoltFrame.htm>
- Kuhn, T. S. (2011). *A tensão essencial: estudos selecionados sobre tradição e mudança científica*. São Paulo, SP: Unesp.
- Lakatos, I. (1987). *Matemáticas, ciencia y epistemologia*. Madrid, España: Alianza Editorial.
- Lakatos, I. (1978). *Falsificação e metodologia dos programas de investigação científica*. Lisboa, Portugal: Edições 70.
- Magnaghi, C. P., & Assis, A. K. T. (2008). Sobre a eletricidade excitada pelo simples contato entre substâncias condutoras de tipos diferentes - Uma tradução comentada do artigo de Volta de 1800 descrevendo sua invenção da pilha elétrica. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 25(1), 118-140. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2008v25n1p118>

- Martins, A. F. P. (2015). Natureza da Ciência no ensino de ciências: uma proposta baseada em 'temas' e 'questões'. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 32(3), 703-737. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2015v32n3p703>
- Martins, R. A. (1999). Alessandro Volta e a invenção da pilha. *Acta Scientiarum*, 21(4), 823-835. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v21i0.3079>
- Mauro, A. (1969). The role of the Voltaic Pile in the Galvani-Volta controversy concerning animal vs. metallic electricity. *Journal of the History of Medicine and Allied Sciences*, 24(2), 140-150. <https://doi.org/10.1093/jhmas/XXIV.2.140>
- McMullin, E. (2003). Scientific controversy and its termination. In H. T. Engelhardt, & A. L. Caplan (Eds.). *Scientific controversies: Case studies in the resolution and closure of disputes in Science and technology* (49-92). New York, United States of America: Cambridge University Press.
- Niaz, M. (2010). Science curriculum and teacher education: The role of presuppositions, contradictions, controversies and speculations vs Kuhn's 'normal Science'. *Teaching and Teacher Education*, 26, 891-899. <https://doi.org/10.1016/j.tate.2009.10.028>
- Oliveira, A. G. M. I., & Oliveira, I. T. P. (2001). Construção de uma pilha didática de baixo custo. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 18(1), 101-107. <https://doi.org/10.5007/%25x>
- Pancaldi, G. (1990). Electricity and Life. Volta's Path to the Battery. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 21(1), 123-160. <https://dx.doi.org/10.2307/27757657>
- Parent, A. (2004). Giovanni Aldini: from animal electricity to human brain stimulation. *The Canadian Journal of Neurological Sciences*, 31(4), 576-584. <https://doi.org/10.1017/S0317167100003851>
- Peduzzi, L. O., & Raicik, A. C. (2019). *Sobre a natureza da ciência: asserções comentadas para uma articulação com a história da ciência*. Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina. Recuperado de www.evolucaodosconceitosdafisica.ufsc.br
- Pera, M. (1992). *The ambiguous frog*. Princeton, United Kingdom: Princeton University Press.
- Piccolino, M., & Bresadola, M. (2013). *Shocking Frogs*. New Your: Oxford Press.
- Piccolino, M. (1988). Animal electricity and the birth of electrophysiology: The legacy of Luigi Galvani. *Brain Research Bulletin*, 46(5), 381-407. [https://doi.org/10.1016/S0361-9230\(98\)00026-4](https://doi.org/10.1016/S0361-9230(98)00026-4)
- Popper, K. R. (1982). *Conjecturas e Refutações*. Brasília, DF: Editora Universidade de Brasília.
- Popper, K. R. (1979). A ciência normal e seus perigos. In I. Lakatos, & A. Musgrave (Eds.). *A crítica e o desenvolvimento do conhecimento* (63-71). São Paulo, SP: Cultrix.
- Praia, J., Cachapuz, A., & Gil Perez, D. (2002). A hipótese e a experiência científica em educação em ciência: contributos para uma reorientação epistemológica. *Ciência & Educação (Bauru)*, 8(2), 253-262. <https://doi.org/10.1590/S1516-73132002000200009>
- Raicik, A. C. (2019). A rã enigmática e os experimentos exploratórios: dos estudos iniciais de Galvani à sua teoria da eletricidade animal. *Revista Brasileira de História da Ciência*, 12(1), 114-137. Recuperado de https://www.sbhcc.org.br/revistahistoria/view?ID_REVISTA_HISTORIA=62
- Raicik, A.C., Peduzzi, L. O. Q., & Angotti, J. A. P. (2018). A estrutura conceitual e epistemológica de uma controvérsia científica: implicações para o ensino de ciências. *Experiências em Ensino de Ciências*, 13(1), 42-62. Recuperado de http://if.ufmt.br/eenci/artigos/Artigo_ID456/v13_n1_a2018.pdf
- Raicik, A. C., Peduzzi, L. O. Q., & Angotti, J. A. P. (2017a). Da *instantia crucis* ao experimento crucial: diferentes perspectivas na filosofia e na ciência. *Investigações em Ensino de Ciências*, 22(3), 192-206. <http://dx.doi.org/10.22600/1518-8795.ienci2017v22n3p192>

- Raicik, A. C., Peduzzi, L. O. Q., & Angotti, J. A. P. (2017b). Uma análise da ilustração do experimentum crucis de Newton em materiais de divulgação científica. *Física na Escola*, 15(2), 24-30. Recuperado de <http://www1.fisica.org.br/fne/phocadownload/Vol15-Num2/a05.pdf>
- Santos, M. E. M., & Silva, E. L. (2015). Aspectos sócio-históricos relativos à eletricidade e pilha: contribuições para a formação de professores. *Scientia Plena*, 11(6), 1-8. Recuperado de <https://www.scientiaplenu.org.br/sp/article/view/2535/1232>
- Schmiedecke, W. G., & Porto, P. A. (2015). A história da ciência e a divulgação científica na TV: subsídios teóricos para uma abordagem crítica dessa aproximação no ensino de ciências. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, 15(2), 627-643. Recuperado de <https://periodicos.ufmg.br/index.php/rbpec/article/view/4332/2898>
- Silva, B. V. C. (2010). A Natureza da Ciência pelos alunos do ensino médio: um estudo exploratório. *Lat. Am. J. Phys. Educ.*, 4(3), 670-677. Recuperado de http://www.lajpe.org/sep10/417_Boniek_da_Cruz_Silva.pdf
- Silva, F. M. S. (2008). Sobre a indução em Francis Bacon. *Revista Urutáguia: revista acadêmica interdisciplinar*, 14, 1-17. Recuperado de http://www.urutagua.uem.br/014/14silva_fernando.PDF
- Steine, F. (2016). *Exploratory Experiments: Ampère, Faraday, and the Origins of Electrodynamics*. USA: University of Pittsburgh Press.
- Steinle, F. (2006). Concept formation and the limits of justification: "Discovering" the two electricities. In J. Schickore, & F. Steinle (Eds.). *Revisiting Discovery and Justification* (183-195). Netherlands: Springer. https://doi.org/10.1007/1-4020-4251-5_11
- Steinle, F. (2002). Experiments in History and Philosophy of Science. *Perspectives on Science*, 10(4), 408-432. <https://doi.org/10.1162/106361402322288048>
- Steinle, F. (1997). Entering new fields: exploratory uses of experimentation. *Philosophy of Science*, 64, 565-574. <https://doi.org/10.1086/392587>
- Trumpler, M. J. (1992). *Questioning Nature: Experimental Investigations of Animal Electricity in Germany, 1791-1810*. Yale University.
- Verkhatsky, A., Krishtal, O. A., & Petersen, H. O. (2006). From Galvani to patch clamp: the development of electrophysiology. *Pflugers Arch – Eur J Physiol*, 453, 233-247. <https://doi.org/10.1007/s00424-006-0169-z>
- Volta, A. (1967). *Opere Scelte*, Ed. M. Gliozzi. Turin: Utet.
- Volta, A. (1800). On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of diferente species. Letter to Sir Joseph Banks, March, 20, 1800. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 90, 403-431. <https://doi.org/10.1098/rstl.1800.0018>
- Volta, A. (1798a). *Lettere del Citt. N. N. di Como al Citt. Aldini Professore a Bologna intorno alla pretesa Elettricità Animale nelle Sperienze del Galvanismo - Lettera Seconda*. Digitized by: Università degli Studi di Pavia, Italia. Recuperado de <https://echo.mpiwg-berlin.mpg.de/content/electricity/volta>
- Volta, A. (1798b). *Minuta di Lettera al Prof. Brugnatelli*, Digitized by: Università degli Studi di Pavia. Recuperado de <https://echo.mpiwg-berlin.mpg.de/content/electricity/volta>
- Volta, A. (1795). *Lettere al Prof. Francesco Mocchetti - Lettera Seconda*. Digitized by: Università degli Studi di Pavia. Recuperado de <https://echo.mpiwg-berlin.mpg.de/content/electricity/volta>
- Volta, A. (1793). IV. Account of some discoveries made by Mr. Galvani, of Bologna; with experiments and observations on them. In two letters from Mr. Alexander Volta, F. R. S. Professor of Natural Philosophy in the University of Pavia, to Mr. Tiberius Cavallo, F. R. S. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 83, 10-44. <https://doi.org/10.1098/rstl.1793.0005>

Volta, A. (anônimo). (1792a). Transunto di osservazioni sull'elettricità animale ed alcune nuove proprietà del fluido elettrico. In G. Marelli (Ed.). *Opuscoli Scelti sulle scienze e sulle arti*, Tomo XV, 213-215.

Volta, A. (1792b). *Risposta alle Domande dell'Abate Tommaselli*. Digitized by: Università degli Studi di Pavia. Recuperado de <https://echo.mpiwg-berlin.mpg.de/content/electricity/volta>

Recebido em: 17.06.2019

Aceito em: 14.02.2020