
TENSÃO E CARGAS SUPERFICIAIS – O QUE WILHELM WEBER JÁ SABIA HÁ 150 ANOS^{+*1}

*H. Härtel*²

Institut für Theoretische Physik und Astrophysik
Universität Kiel
Kiel – Alemanha

Resumo

É apresentada uma descrição qualitativa da voltagem elétrica em termos da existência de cargas superficiais, antes de se introduzir a definição abstrata de “habilidade de realizar trabalho por uma fonte de energia” ou a definição quantitativa com “energia por unidade de carga”. Essas cargas superficiais e os campos elétricos associados a elas podem ser demonstradas experimentalmente e fornecem uma explicação causal dos processos e das leis que precisam ser compreendidos e aprendidos.

Palavras-chave: *Diferença de potencial. Cargas superficiais. Correntes elétricas. Wilhelm Weber.*

⁺ Voltage and surface charges: what Wilhelm Weber already knew 150 years ago

^{*} *Recebido: outubro de 2012.
Aceito: outubro de 2012.*

¹ Esta é uma tradução para o português de um artigo que saiu publicado originalmente em alemão: H. Härtel, Spannung und Oberflächenladungen – Was Wilhelm Weber schon vor mehr als 150 Jahren wusste, Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule, v. 5, p. 25-31, 2012. **Tradução de A. K. T. Assis.**

² Cientista visitante do Institut für Theoretische Physik und Astrophysik.

Abstract

The abstract definition of electric tension as “the ability of an energy source to do work” or quantitatively as “energy per unit charge” is preceded by a qualitative description in terms of the existence of surface charges. These surface charges and the associated electric fields can be demonstrated experimentally and allow us a causal explanation of the processes and laws to be understood and learned.

Keywords: *Voltage. Surface charges. Steady currents. Wilhelm Weber.*

I. Diferença de potencial – um dos termos mais difíceis

A corrente elétrica é usualmente descrita qualitativamente como sendo devida a um fluxo de elétrons. Contudo, raramente se encontra nos livros didáticos uma descrição qualitativa correspondente para os termos “voltagem” ou “diferença de potencial”. A voltagem é descrita como a capacidade de realizar trabalho de uma fonte de energia elétrica, sendo definida quantitativamente como energia por carga. De um ponto de vista físico, não há nada errado com essa descrição matematicamente elegante, mas ela não fornece uma explicação causal para os processos internos que ocorrem nos circuitos elétricos.

Para ilustrar essa dificuldade, podemos levantar algumas questões simples. Na figura 1, que tipo de diferença no estado físico (em nível microscópico) entre os pontos A e B ao redor de uma resistência ligada a uma fonte de tensão é responsável pela existência de uma diferença de potencial entre esses pontos? Na figura 2 há um campo elétrico dentro do resistor que é muito mais intenso do que o fraco campo elétrico nos condutores conectados ao resistor. Como essa diferença pode ser explicada em termos da definição de “energia por carga”?

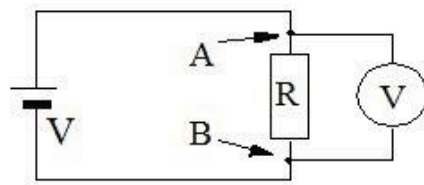


Figura 1: Uma fonte de tensão ligada a um resistor. Qual é a diferença que existe entre os condutores em A e B?

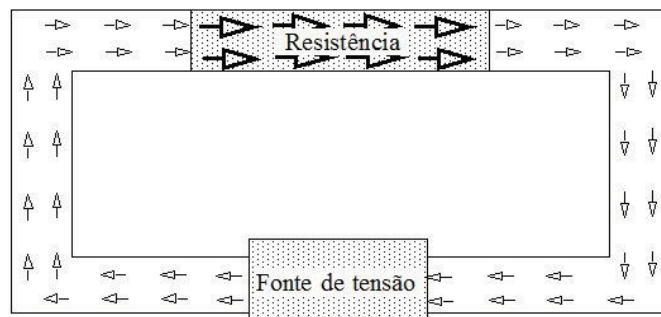


Figura 2: Quais cargas geram o intenso campo elétrico no interior do resistor?

Um último exemplo. O campo elétrico dentro de um condutor ligado a uma bateria é constante e está orientado axialmente na direção do condutor, independente do comprimento do condutor e de sua curvatura, figura 3. Por qual motivo isso ocorre? De acordo com a lei de Coulomb (a relação mais básica entre carga e campo), as cargas separadas nos terminais da bateria só podem causar um campo elétrico que dependa da distância até a bateria.

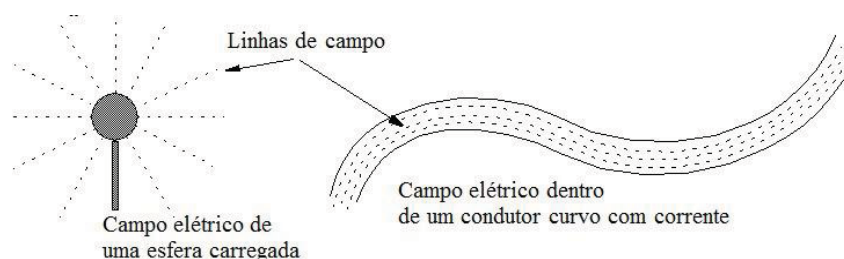


Figura 3: Por qual motivo o campo elétrico no interior do condutor ligado a uma bateria é constante e independente da distância até a bateria?

Testes escolares mostram^[1] que essas questões e outras similares a elas não podem ser respondidas pela grande maioria dos alunos ou até mesmo por muitos professores de Física. Entrevistas revelam que os estudantes consideram o conceito de voltagem difícil ou incompreensível. Não é conhecido o número de alunos que perdeu interesse na Física devido ao fato de não compreenderem conceitos básicos, mas esse número pode ser elevado e, portanto, é surpreendente que

essa situação insatisfatória seja aceita pela maioria dos professores de Física e pelos autores de livros didáticos, já que uma explicação alternativa já era conhecida há mais de cem anos.

II. Voltagem e cargas superficiais

A solução foi descrita há 150 anos. Em 1852, Wilhelm Weber afirmou que embora um condutor com corrente seja globalmente neutro, ele carrega em sua superfície cargas com densidades superficiais que variam ao longo do condutor^[2]. Ao perceber que uma diferença de potencial entre dois pontos de um circuito elétrico está relacionada com uma diferença nas cargas superficiais, pode-se responder às questões apresentadas anteriormente:

Na figura 1, o condutor nos pontos A e B possui cargas superficiais positivas e negativas, respectivamente.

Na figura 2, as regiões internas aos condutores e resistores possuem condutividades que diferem por muitas ordens de grandeza. Elétrons e cargas positivas vão acumular-se nas interfaces condutor-resistor e o campo surgindo dessas cargas vai forçar a corrente através do resistor (figura 4). Esse resultado pode ser deduzido diretamente da lei de Gauss, segundo a qual o fluxo do campo elétrico através de uma superfície fechada é proporcional às cargas internas. Ao colocar uma superfície cilíndrica ao redor da interface condutor-resistor (indicada por uma linha tracejada na figura 5), obtém-se um fluxo diferente do campo elétrico através das duas extremidades A e B do cilindro. Portanto, existe uma carga correspondente nas regiões de transição entre alta e baixa condutividade.

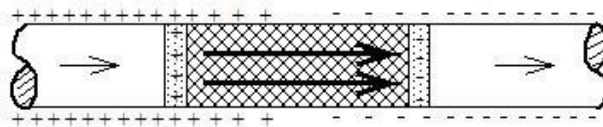


Figura 4: Seção retas carregadas nas interfaces condutor-resistor.

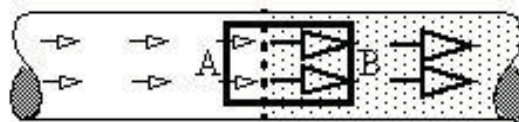


Figura 5: Aplicação da lei de Gauss na interface entre um condutor e um resistor.

Apresenta-se, agora, a explicação do campo elétrico no interior do condutor da figura 3. Cargas superficiais ao longo de um condutor reto infinitamente longo produzem um campo elétrico constante orientado axialmente, caso o gradiente da densidade superficial seja linear (figura 6). Caso o condutor seja curvo, o gradiente da densidade superficial de carga deixará de ser linear. Uma quantidade maior de elétrons irá acumular-se no lado de “fora” do condutor do que no lado de dentro, gerando uma trajetória curva e orientada axialmente para os elétrons de condução (figura 7). Um argumento similar aplica-se para as seções do condutor que estão eletrizadas positivamente.

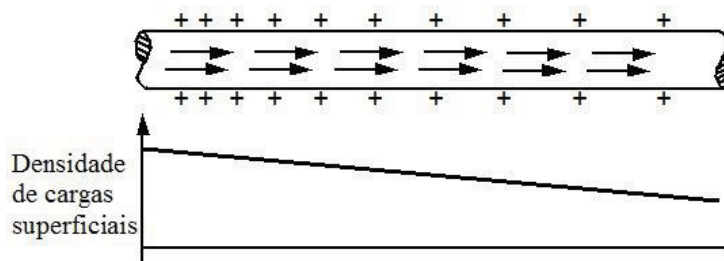


Figura 6: Gradiente linear da densidade superficial de carga.

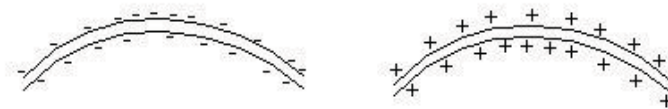


Figura 7: Distribuição (qualitativa) das cargas superficiais sobre condutores curvos.

A literatura contém várias referências discutindo a relação entre voltagem e cargas superficiais^[3-8], mas essa relação tem recebido pouca atenção na comunidade científica. É razoável supor que essa falha ao relacionar as cargas superficiais com a voltagem tenha dificultado a compreensão dos conceitos básicos por muitos estudantes, tendo, dessa forma, levado a uma perda de interesse no assunto. Seria útil uma investigação apropriada sobre essa hipótese. Uma descrição do desenvolvimento histórico sobre o conhecimento das cargas superficiais em qualquer condutor conduzindo corrente, detalhes das experiências para detectar essas cargas

superficiais e uma dedução teórica detalhada foi fornecida por Assis e Hernandes^[9].

III. Instruções para o ensino

Caso o conceito de voltagem ou diferença de potencial seja inicialmente relacionado com as cargas superficiais e a descrição quantitativa em termos da energia por carga seja introduzida apenas mais tarde, então certos fatos precisam ser ensinados no começo. Além disso, são necessárias algumas etapas particulares de aprendizagem, acompanhadas, obviamente, de demonstrações apropriadas e atividades em sala de aula.

III.1 Carga, força de Coulomb e eletrização de um metal (gaiola de Faraday)

É necessário um conhecimento inicial do fenômeno de carga elétrica, juntamente com alguns fatos básicos sobre a natureza da interação entre condutores de carga com polaridades diferentes (lei de Coulomb). Também tem de ser conhecido que cargas resultantes não podem existir no interior de um condutor metálico e que um condutor eletrizado possui cargas adicionais não neutralizadas apenas em sua superfície. Não é fácil explicar o motivo pelo qual a superfície de um metal atua como uma barreira para os elétrons; por hora, isso tem de ser aceito como um fato. Contudo, deve ser observado que essa barreira superficial não é intransponível. Antes dos tubos eletrônicos serem substituídos por transistores, eram produzidos elétrons livres fora de condutores metálicos ao aquecer um condutor com corrente

III.2 Funcionamento de uma fonte de tensão

Além disso, tem de ser conhecido que uma bateria, ou em geral uma fonte de tensão, sempre possui dois contatos metálicos. Essa fonte tem uma propriedade adicional essencial: ela pode aplicar uma força sobre os elétrons internos para deslocá-los de um contato externo em direção ao outro contato. O tipo de força varia dependendo do tipo de fonte de tensão. Dentro de uma bateria são ativas forças químicas; dentro de um gerador são aplicadas forças eletromagnéticas. Embora o tipo de força seja diferente, a ação dessa força é sempre a mesma: elétrons vão acumular-se sobre um dos contatos externos. Esses elétrons estão em falta no outro contato, dando origem a uma carga positiva (figura 8).

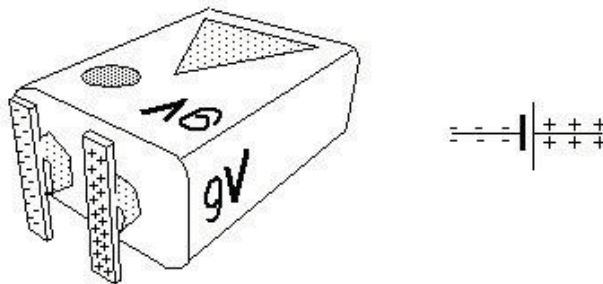


Figura 8: Uma bateria como fonte de tensão com cargas superficiais sobre seus contatos metálicos.

Quanto maior for a densidade adicional de cargas negativas nas superfícies dos contatos metálicos, maior será a repulsão entre elas. O mesmo vale para as cargas positivas no outro contato, sendo que estas cargas positivas atraem os elétrons afastados. É alcançado um limite, que é característico para cada fonte de tensão específica, no qual essas forças de Coulomb repulsivas e atrativas vão evitar quaisquer acúmulos adicionais de elétrons. Então, é estabelecido um estado de equilíbrio entre a força interna da fonte de tensão e as forças de Coulomb.

III.3 Cargas superficiais sobre condutores

Em princípio, conectar os contatos de uma fonte de tensão com condutores metálicos não é diferente de aumentar a superfície desses contatos (figura 9). Em um esforço para minimizar a repulsão mútua entre elas, essas cargas vão se redistribuir sobre essa superfície ampliada e, dessa forma, vão reduzir suas densidades. Isso vai implicar um curto período sem que haja equilíbrio entre a força interna da fonte de tensão e as forças de Coulomb, durante o qual elétrons adicionais serão forçados para essas superfícies ampliadas até que a densidade original seja re-estabelecida, gerando um novo equilíbrio entre as forças envolvidas.

III.4. Cargas superficiais em circuitos fechados

Ao conectar os condutores por um resistor, supondo que a fonte de tensão seja forte o suficiente para substituir os elétrons que estão fluindo através do resistor, será produzida uma corrente elétrica, da qual participarão todos os elétrons dentro dos condutores (figura 10). Enquanto a fonte de tensão não estiver “gasta” e

se mantiver constante sua força motora para separar e deslocar cargas, vão existir cargas adicionais sobre as superfícies dos condutores. Contudo, essas cargas superficiais vão, então, participar do movimento de arraste dos elétrons de condução internos.

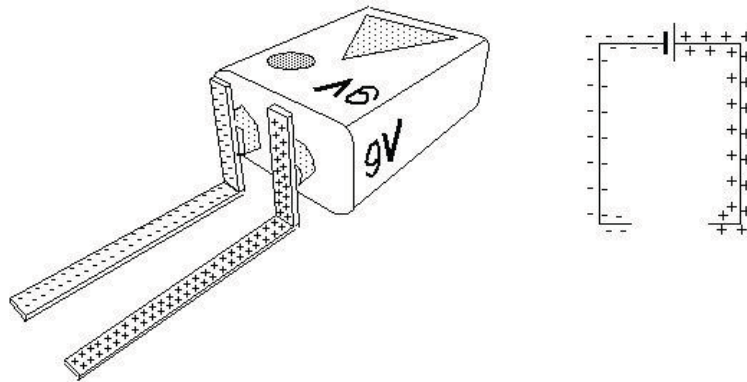


Figura 9: Fonte de tensão conectada a condutores metálicos e as cargas superficiais sobre eles.

IV. Diferença de potencial e diferença de pressão na circulação da água

Um sistema mecânico tal como um circuito de circulação da água pode ser considerado um modelo para o circuito elétrico, tratando dos fenômenos de corrente e pressão como análogos à corrente elétrica e voltagem. Para utilizar a circulação da água como um modelo para o circuito elétrico, a energia cinética da água fluindo tem de ser desprezível, o que significa que a velocidade de arraste da água tem de ser pequena. Para obter uma transferência significativa de energia, é necessário suportar grandes diferenças de pressão. A distribuição da pressão pode ser demonstrada nos circuitos em série e paralelo com a ajuda de medidores de pressão ou colunas de água; uma analogia poderá, então, ser feita com circuitos elétricos.

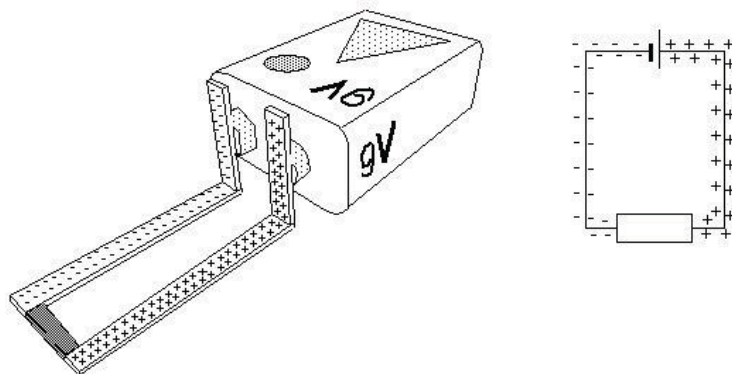


Figura 10: Um circuito fechado e as cargas superficiais.

Esse método foi aplicado durante o desenvolvimento da unidade de ensino do Instituto Leibniz para a Educação Científica e Matemática (IPN) relacionada com circuitos elétricos. Essa unidade foi apoiada pelas figuras e montagens experimentais que seguem (figura 11).

A experiência adquirida durante o desenvolvimento dessa unidade de ensino no IPN mostrou que o modelo de circulação da água ajudou na comunicação entre professores e alunos, enquanto esses últimos tentavam desenvolver sua compreensão do circuito elétrico, um conceito que não é diretamente acessível aos nossos sentidos^[10]. Contudo, como mostrado detalhadamente em um artigo anterior e confirmado por estudos prévios^[11], não se deve esperar muito da analogia entre diferença de pressão e diferença de potencial no que diz respeito à aprendizagem e compreensão desse assunto. A diferença na pressão em um líquido é causada por sua compressibilidade, sendo o líquido diferentemente comprimido em locais diferentes. Os estudantes geralmente não sabem disso e, portanto, não podem dominar completamente o assunto simplesmente falando sobre compressibilidade. É necessária uma análise cuidadosa e sofisticada para determinar o gradiente de pressão ao longo de circuitos em série e paralelo, assim como para explicar as condições de estado estacionário.

Se puder ser realizada essa análise, pode ser útil considerar um fluxo de água como movimento de uma frente de onda de compressão. Quando tal frente de onda incide sobre um resistor, é criado um fluxo contrário por um acúmulo de água de curta duração na frente do resistor. Esse fluxo contrário reduz a taxa incidente até que seja alcançado um estado estacionário entre os fluxos que estão chegando e

saindo. Para manter um fluxo constante através de qualquer resistor, a pressão de entrada tem de exceder a pressão de saída, o que significa que é reduzida a compressão do fluxo de água na saída. Em outras palavras, a água expande-se ao atravessar um resistor. A mesma situação acontece em todo resistor que a frente de onda tem de atravessar, em sua trajetória ao redor do circuito. No estado de equilíbrio existirá uma diferença de pressão ao longo de cada resistor, proporcional à sua resistência.

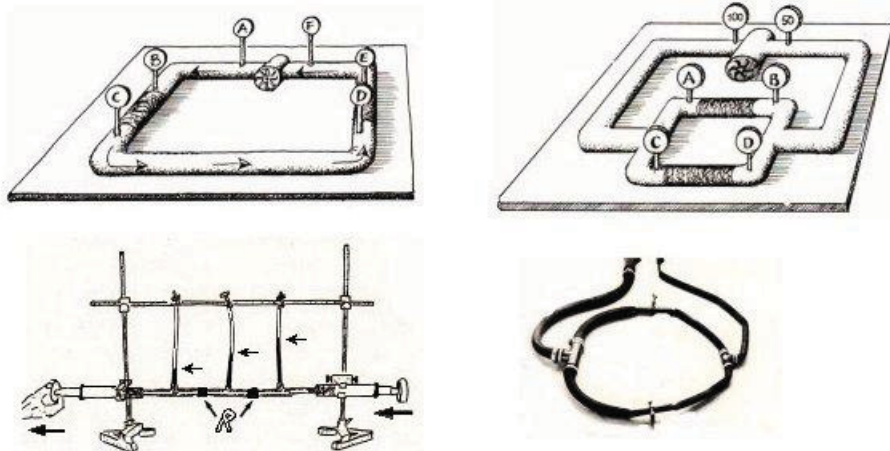


Figura 11: Figuras e arranjos experimentais para demonstrar as diferenças de pressão ao longo de circuitos de água.

A mesma análise pode ser aplicada para explicar a origem e distribuição das cargas superficiais em um condutor com corrente. Os elétrons de condução podem ser considerados um tipo de “gás de elétrons” que pode ser um pouco comprimido ou expandido por uma fonte de tensão. Contudo, isso causa apenas uma compactação ou diluição do “gás de elétrons” nas superfícies do condutor e não, como no caso de um fluxo mecânico de água, ao longo de toda a seção reta. As moléculas da água só podem reagir devido às forças de curto alcance com as moléculas imediatamente vizinhas e, portanto, a água pode ser condensada ao longo de toda a seção reta. Os elétrons, por outro lado, interagem através de forças de Coulomb de longo alcance, eles repelem-se a grandes distâncias e no interior de um condutor metálico só podem ser neutralizados por uma quantidade exatamente igual de cargas positivas.

V. Possibilidades experimentais

V.1. Demonstração das cargas superficiais

Em 1962, Jefimenko demonstrou de forma bem simples a existência de cargas superficiais ao longo de resistores com corrente^[12] (figura 12). Faixas de tinta vermelha pintadas sobre placas de vidro funcionavam como resistores aos quais era aplicada uma voltagem relativamente alta ($> 10\text{kV}$). A visualização de um campo elétrico dentro e fora do resistor era obtida espalhando sementes de grama que se alinham com o campo elétrico. Essas sementes são caracterizadas por pontas bem afiadas em cada extremidade que, na presença de um campo elétrico, favorecem a formação de um momento de dipolo relativamente grande. Além disso, as sementes de grama ficam apoiadas sobre uma pequena área, o que reduz o atrito quando elas se movimentam. Ao bater levemente na placa de vidro que as apoia, fazemos com que as sementes se alinhem com o campo elétrico.

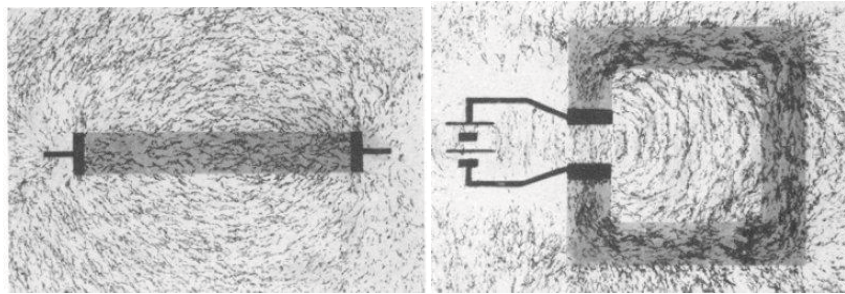


Figura 12: Campos elétricos dentro e fora de várias resistências. Esses campos podem ser visualizados com sementes de grama espalhadas sobre o vidro^[12].

V.2. Interação das cargas superficiais com cargas externas

Pode ser obtida a detecção direta da interação das cargas superficiais com um corpo externo eletrizado se forem utilizadas resistências grandes e altas diferenças de potencial. Nessas condições experimentais, uma folha metálica eletrizada móvel indica claramente uma deflexão ao longo de uma sequência de resistores com corrente (figura 13). Nessa experiência, é aplicada uma voltagem de 10 kV a um circuito com resistências em série, consistindo de quatro resistores, e a deflexão de uma lâmina metálica eletrizada é estudada quando é colocada em locais

diferentes ao longo do circuito^[13]. A experiência demonstra claramente uma falta de interação nas proximidades do centro do circuito. Porém, quando é colocada em contato com as duas extremidades do circuito, a lâmina passa a ser visivelmente repelida devido à carga adquirida por indução eletrostática. Ao substituir a lâmina metálica por um isolante eletrizado (um canudinho suspenso pelo centro), pode ser demonstrada a polaridade diferente das cargas superficiais nas extremidades da cadeia de resistores (figura 14).

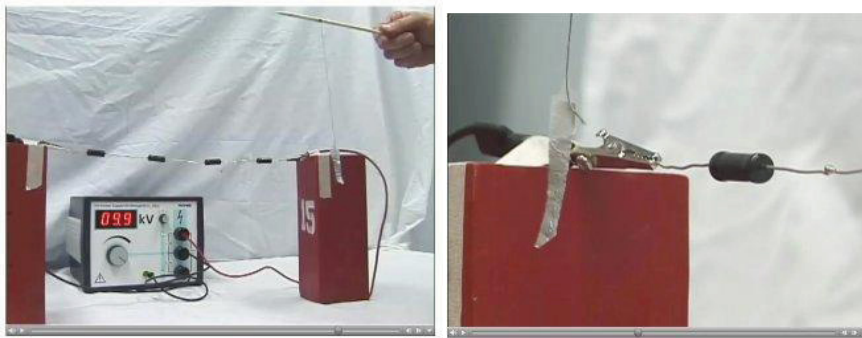


Figura 13: Interação entre um condutor com corrente e uma folha metálica eletrizada para a demonstração das cargas superficiais.

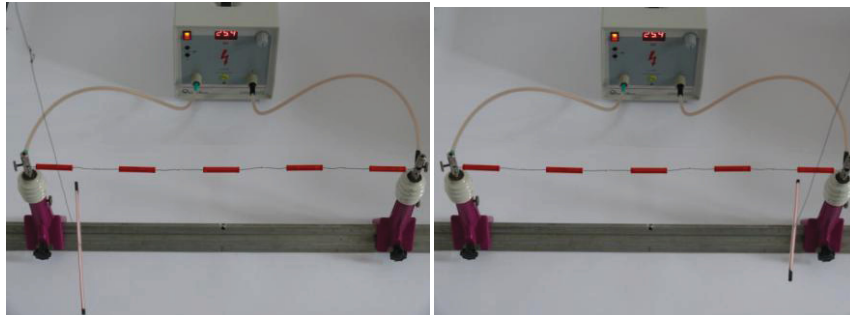


Figura 14: Interação entre um circuito condutor com corrente e um canudinho eletrizado para a demonstração das cargas superficiais.

VI. Um curso bem sucedido apresentado como um desafio

Foi publicado um curso nos EUA, “Electric and Magnetic Interaction”, que utiliza amplamente as imagens^[15] reproduzidas na figura 15. Essas imagens são utilizadas para explicar a origem da força motora sobre elétrons deslocando-se em um condutor de forma arbitrária, o motivo pelo qual, ao reduzir a seção reta de um fio, faz com que aumente sua resistência, tais são as cargas relacionadas com o alto campo elétrico no interior de um resistor. Mesmo quando incompletas, essas imagens podem estimular discussões em sala de aula ou podem ser utilizadas como um exercício para desenvolver uma compreensão mais precisa e detalhada do circuito elétrico como um sistema que é, simultaneamente, simples e complexo.

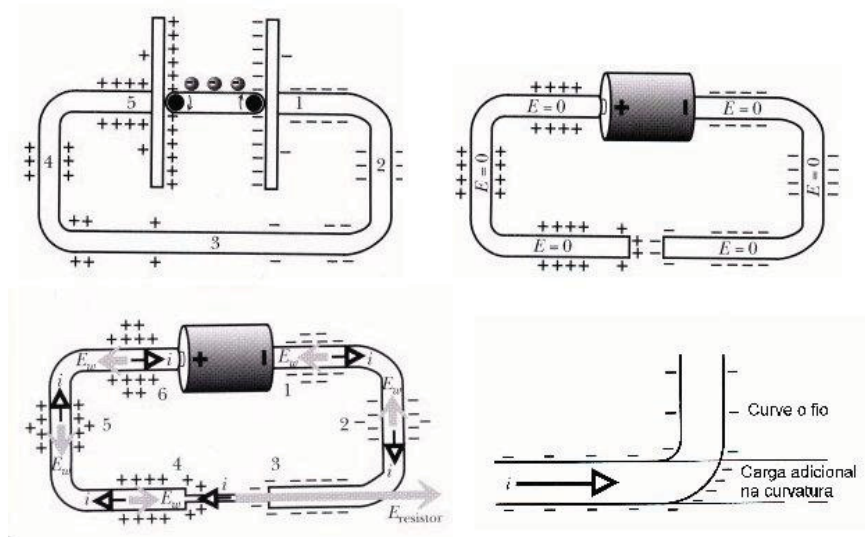


Figura 15: Imagens de um curso norte-americano representando as cargas superficiais^[15].

VII. Conclusão

A introdução da diferença de potencial ou voltagem como sendo a capacidade de realizar trabalho de uma bateria, assim como seu conceito quantitativo como sendo energia por carga, é unilateral em sua orientação matemática. De um ponto de vista pedagógico, esse enfoque pode ser criticado por ser abstrato e não

intuitivo: ele esconde a relação da voltagem com as cargas superficiais e, dessa forma, retira dos alunos a possibilidade de desenvolverem suas intuições físicas.

Assim, mesmo quando os alunos não perguntam espontaneamente o que é uma voltagem, eles devem ser encorajados a fazer tais questões e a encontrar respostas ao estudar os exemplos dados anteriormente. De qualquer forma, os argumentos apresentados aqui devem ser introduzidos em um plano de aula qualificado, de tal forma que os professores possam lidar a qualquer momento de forma apropriada com as questões dos alunos, ou possam estimular a discussão, ao levantarem tais questões.

Bibliografia

[1] HÄRTEL, H. et al. **Test about Voltage – A Basic Term in Electricity Results**, 2005.

<http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/Spannung/voltage_test_result.pdf>.

[2] WEBER, W. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere Widerstandsmessungen. *Abhandlungen der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften, mathematisch-physische Klasse*, 1, 1852. p. 199-381. Reimpresso em *Wilhelm Weber's Werke*, v. 3, WEBER, H. (Ed.). Springer, Berlin, 1993. p. 301-471.

[3] MARCUS, A. The electric field associated with a steady current in a long cylindrical conductor. **American Journal of Physics**, v. 9, p. 225-226, 1941.

[4] ROSSER, W. G. V. What makes an electric current flow. **American Journal of Physics**, v. 31, p. 884-885, 1963.

[5] SOMMERFELD, A. **Elektrodynamik**. Leipzig, p. 113-117, 1964.

[6] HÄRTEL, H. Zur Einführung des Spannungsbegriffs in der Sek. I. In: HÄRTEL, H. (Ed.). **Zur Didaktik der Physik und Chemie**. Hannover: Schroedel, 1979. p. 154-156.

[7] WALZ, A. **E-Felder um stationäre Ströme**. PU 2, 1984. p. 61-68.

[8] HÄRTEL, H. (1985): The electric voltage: What do students understand? What can be done to help for a better understanding? In: DUIT, R.; JUNG, W.; RHÖNECK, C. von (Eds.). **Aspects of Understanding Electricity**. Proceedings of an International Workshop. IPN-Arbeitsberichte 59. Kiel: IPN, 353-362.

[9] ASSIS, A. K. T.; HERNANDES, J. **The Electric Force of a Current**. Apeiron, Montreal, 2007. Disponível em: <<http://www.ifi.unicamp.br/~assis>>.

[10] HÄRTEL, H. IPN-Unterrichtseinheit “Stromstärke, Spannung, Widerstand” für das 7. Bis 8. Schuljahr, Klett, 1981. (versão trabalhada e resumida disponível em <<http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/PUB/UE-7.pdf>>).

[11] SCHWEDES, H.; DUDECK, W.-G.; SEIBEL, C. **Elektrizitätslehre mit Wassermodellen, Praxis der Naturwissenschaften** – Physik. 44, p. 28-36, 1995.

[12] JEFIMENKO, O. **American Journal of Physics**, v. 30, p. 19-21, 1962.

[13] Um vídeo sobre esta experiência encontra-se em:
<<http://matterandinteractions.org/Content/Materials/Videos/SurfaceCharge.mov>>.

[14] Um vídeo sobre esta experiência encontra-se em: <<http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/PUB/straw.htm>>.

[15] CHABAY, R.; SHERWOOD, B. **Matter and Interaction**. Electric & Magnetic Interaction. John Wiley, 2002. v. II.