

## **Proposta de uma Intervenção Didático-Pedagógica para Abordar Concepções Alternativas sobre Corrente Elétrica em Circuitos Simples, Fazendo Uso de Experimentos de Baixo Custo**



**Francisco Cristiano Barbosa Lima**  
**Autor**

**Carlos Alberto dos Santos e Geovani Ferreira Barbosa**  
**Orientadores**

## Apresentação

Consiste o presente produto educacional em uma proposta de intervenção didático-pedagógica para abordar concepções alternativas sobre corrente elétrica em circuitos simples, fazendo uso de experimentos de baixo custo construídos pelos próprios estudantes. Em sua concepção, o produto engloba elementos do método de ensino baseado em projetos a partir do uso de materiais de baixo custo, da teoria de aprendizagem de David Ausubel, bem como ideias de Vygotsky para o processo de socialização durante a aprendizagem.

O ponto de partida da intervenção é o conhecimento das concepções alternativas apropriadas pelos alunos. A alternativa mais simples e universalmente utilizada é a aplicação de testes especialmente elaborados para esse tipo de averiguação. A alternativa mais complexa e de difícil execução seria fazer a averiguação por meio de entrevistas clínicas com todos os alunos. Propomos em nossa intervenção o uso de um teste e a realização de entrevistas com uma amostragem da população, escolhida de acordo com alguns critérios de desempenho, quer seja na resposta ao teste, ou no rendimento escolar usual.

No que se segue apresentaremos uma revisão da literatura internacional a respeito das concepções alternativas pertinentes ao tema do presente produto educacional e um guia do professor baseado em nossa experiência em sala de aula.

A intervenção didática foi realizada em turmas da 3<sup>a</sup> Série da Escola de Ensino Médio João Barbosa Lima, na cidade de Itaiçaba – CE, ao longo de 28 horas-aula, de 50 minutos.

## Sumário

<b>APRESENTAÇÃO</b> .....	<b>2</b>
<b>1 CORRENTE ELÉTRICA EM CIRCUITOS ELÉTRICOS SIMPLES</b> .....	<b>4</b>
1.1 INTRODUÇÃO.....	4
1.2 NATUREZA E SENTIDO DA CORRENTE ELÉTRICA EM CIRCUITOS SIMPLES .....	4
1.3 MODELO MICROSCÓPICO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA NOS METAIS .....	7
1.4 O PAPEL DAS CARGAS SUPERFICIAIS EM CIRCUITOS SIMPLES .....	12
<b>2 GUIA DO PROFESSOR</b> .....	<b>15</b>
2.1 AMBIENTAÇÃO MATEMÁTICA COM O GEOPLANO .....	16
2.2 ATIVIDADES EM SALA DE AULA .....	17
2.3 SUBSUNÇORES .....	19
2.4 DIFERENCIAÇÃO PROGRESSIVA.....	19
2.5 RECONCILIAÇÃO INTEGRADORA .....	19
2.6 SOCIABILIDADE .....	20
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>21</b>

# 1 Corrente elétrica em circuitos elétricos simples

## 1.1 Introdução

O título sugere tratar-se de algo trivial. Os livros didáticos, do ensino médio ao universitário sugerem isso. No entanto, trata-se de uma questão extremamente complexa. Não é por nada que Haertel assim intitulou um dos seus artigos sobre essa questão: *O chamado circuito elétrico simples - não é tão simples* (HAERTEL, 2012b). Mostraremos na sequência como alguns livros didáticos tratam essa questão, e como ela deve ser tratada de modo a evitar algumas das concepções alternativas recorrentemente relatadas na literatura.

No capítulo 3 da dissertação foram apresentadas as principais concepções alternativas exibidas por alunos de todos os níveis educacionais, da escola secundária à universidade, em qualquer que seja a localização da escola. Como veremos a seguir, há consenso de que parte dessas concepções originam-se nos principais livros didáticos, ou seja na forma como o assunto é tratado em sala de aula.

A literatura didática, do ensino médio ao básico universitário ainda resiste à utilização de modelos microscópicos no ensino de eletricidade e magnetismo, e principalmente apresentam a eletrodinâmica completamente desconectada da eletrostática (FERREIRA; FIGUEIREDO, 2003; JACKSON, 1996; SHERWOOD; CHABAY, [S.d.]; WELTI, 2005). Ainda não está bem difundida a ideia de usar o modelo de Drude para o tratamento da condutividade em metais, de modo um tratamento microscópico, embora clássico, possa ser apresentado. Neste sentido, nos parece perfeitamente possível uma transposição didática do conteúdo disponível no capítulo 4 (Correntes elétricas) do livro de física da Universidade de Berkeley (PURCELL, 1970) para uma linguagem apropriada ao ensino médio, sobretudo no que se refere ao modelo de elétrons livres de Drude, que é adequado para explicar vários fenômenos em circuitos simples. Essa ideia de um tratamento unificado de eletrostática e circuitos é fortemente defendida por Sherwood e Chabay desde o início dos anos 1990, mas ainda não teve a devida receptividade na literatura. Mais adiante voltaremos a essa questão.

## 1.2 Natureza e sentido da corrente elétrica em circuitos simples

Uma das concepções alternativas mais recorrentes e persistentes tem a ver com a noção do que seja a corrente elétrica. Alguns livros didáticos transmitem noções equivocadas ou noções que

podem gerar equívocos, a partir da análise de circuitos simples, como uma bateria ou pilha ligada a um resistor ou uma lâmpada. É provável que parte desses equívocos estejam ligados à precisão conceitual da natureza da corrente elétrica.

Vejamos como esses conceitos são apresentados em três bons livros frequentemente adotados no ensino médio e no clássico Halliday-Resnick adotado em cursos universitários.

Antônio Máximo e Beatriz Alvarenga afirmam que (MÁXIMO; ALVARENGA, 2006):

(...) o estabelecimento de um campo elétrico em um fio metálico provoca um fluxo de elétrons neste condutor, fluxo este que é denominado corrente elétrica.

Em um condutor metálico, sabemos que a corrente real é constituída por elétrons em movimento. Entretanto, vamos imaginá-la substituída pela corrente convencional, de cargas positivas, movendo no sentido do campo elétrico. (Cap. 20).

No tópico 1, da parte II de sua obra, Gualter José Biscuola e colaboradores (BISCUOLA; BÔAS; DOCA, 2013) definem corrente elétrica como sendo “o movimento ordenado, isto é, com direção e sentido preferenciais, de portadores de carga elétrica.” Ao discutir a causa da corrente elétrica, esses autores afirmam que:

Quando o fio é ligado entre as placas A e B, um campo elétrico é estabelecido no interior do fio, orientado do potencial maior para o menor. Como a carga elétrica dos elétrons é negativa, surgem neles forças elétricas de sentido oposto ao do campo. Dessa forma, os elétrons livres passam a se deslocar de B para A, criando-se, então, a corrente elétrica no fio.

Para introduzir o conceito de gerador elétrico, Biscuola e colaboradores ensinam:

Imagine que, na situação apresentada no item anterior, fosse possível acontecer o seguinte: todo elétron que chegasse à placa A fosse transportado por alguém até a placa B (...) Dessa forma, os potenciais elétricos nunca se igualariam e a corrente elétrica no fio seria mantida.

Os dois livros citados acima, expõem a analogia comumente utilizada entre corrente elétrica e fluido de água. Essa analogia é uma das fontes de concepções alternativas relatadas na literatura (STOCKLMAYER; TREAGUST, 1996), e no cap. 5 de sua obra, Alberto Gaspar (GASPAR, 2010) teve o cuidado de chamar a atenção para a inadequação dessa analogia, afirmando que:

A analogia entre corrente elétrica e água corrente tem pelo menos três grandes inadequações. A primeira se

refere a aquilo que se movimenta (...). A segunda inadequação se refere à velocidade do deslocamento (...). A terceira inadequação se refere à forma de propagação da corrente elétrica (...).

Todavia, apesar de fazer essas ressalvas mais do que procedentes, Alberto Gaspar faz uma concessão perigosa, ao afirmar que “a analogia da corrente elétrica com a água corrente só faz algum sentido em relação à corrente contínua, na qual os portadores de carga movem-se num único sentido”. Mas, a nosso ver a analogia não faz qualquer sentido. É um equívoco dizer que “faz algum sentido”. O próprio autor (GASPAR, 2010) reproduz uma descrição contraditória muito frequente em textos didáticos:

Se houver um campo elétrico uniforme no interior [de um] condutor, [os] elétrons, apesar de continuar a se mover em todos os sentidos, passam a ter um movimento médio resultante em um sentido determinado – o condutor é percorrido por uma corrente elétrica contínua. Se o campo elétrico no interior for oscilante, os elétrons têm também um movimento médio resultante, no entanto não mais em um único sentido, eles oscilam em torno de posições fixas – o condutor é percorrido por uma corrente elétrica alternada.

Desse tipo de afirmação surge a ideia equivocada de que na corrente contínua os portadores de carga se deslocam de um polo a outro da bateria. O tratamento que se dá à ideia da velocidade de arrastamento ou de deriva não tem sido suficiente para evitar a concepção equivocada. De um modo ou de outro, resta a ideia de que é o “movimento ordenado” dos elétrons que produz a corrente, e que esse “movimento ordenado” faz com que elétrons em uma corrente contínua se “desloquem” em um sentido, quem sabe percorrendo uma grande distância, e que elétrons em uma corrente alternada fiquem oscilando em torno de uma posição de equilíbrio. Obviamente isso é contraditório. Por que na corrente contínua o elétron precisa se deslocar e na alternada basta que ele fique no vai-e-vem em um torno de uma posição fixa?

Alguns estudos têm demonstrado que a forma como o assunto é tratado em alguns livros didáticos do ensino médio estão associadas a muitas das concepções alternativas identificadas nos diversos testes relatados na literatura (HAERTEL, H., 1982, 2012). A sensação que se tem é que ainda não se achou uma linguagem, uma metáfora ou analogia adequadas para realizar a transposição didática do que se entende cientificamente por corrente elétrica. A questão básica que está por trás deste cenário pedagógico talvez possa ser expressa pelo título de um artigo de 1963: o que faz a corrente elétrica fluir? (ROSSER, 1963). Nesse artigo, Rosser discute qualitativamente a importância das cargas superficiais como guia da corrente elétrica.

Antes de discutirmos essa questão crucial, cabe ressaltar que essa associação da corrente elétrica às cargas superficiais não é adotada pelos principais autores de livros didáticos, nem mesmo nos cursos universitários. Halliday-Resnick (cap. 28) apresenta o modelo de corrente elétrica como movimento ordenado dos elétrons sem entretanto referir que o campo elétrico existente internamente aos condutores é dependente de cargas na superfície dos mesmos (HALLIDAY; RESNICK, 1981):

Campos elétricos atuam no interior [do condutor], exercendo forças sobre os elétrons de condução e estabelecendo uma corrente. Depois de um curto espaço de tempo, o fluxo de elétrons alcança uma condição estável. A situação é, então, análoga à do fluxo fluido constante (...).

A adição de uma bateria impõe uma diferença de potencial. Um campo elétrico surge dentro do condutor e produz cargas que se movimentam ao redor da malha, constituindo uma corrente.

É inevitável associar o texto acima à ideia equivocada de que na corrente contínua o elétron sai de um polo e chega ao outro.

Existem duas formas de abordar a corrente elétrica, ou mais especificamente, a condutividade elétrica nos metais. Uma é a partir do modelo de Drude, ou modelo de elétrons livres, a outra é a partir do papel das cargas superficiais em circuitos simples.

### **1.3 Modelo microscópico da condutividade elétrica nos metais**

Ao nível do ensino médio e básico da universidade, quando se fala em modelo microscópico da condutividade elétrica nos metais, estamos nos referindo ao modelo de Drude, ou modelo de elétrons livres. Dos livros de ensino médio mais utilizados no Brasil (BARRETO FILHO; SILVA, 2013; BISCUOLA; BÔAS; DOCA, 2013; GASPAR, 2010; BONJORNIO *et al.*, 2013; MÁXIMO; ALVARENGA, 2006), apenas Bonjornio e Gaspar fazem uma breve referencia ao modelo de elétrons livres, sem no entanto mencionar a autoria de Drude. Dos livros de física básica para cursos universitários (PURCELL, 1970; HALLIDAY; RESNICK, 1981; NUSSENZVEIG, 1997), os que apresentam abordagens mais apropriadas para se efetuar uma transposição didática são (PURCELL, 1970; HALLIDAY; RESNICK, 1981). Além disso, há um artigo muito interessante em comemoração ao centenário do modelo de Drude, publicado no Caderno Catarinense de Ensino de Física (PÉREZ, 2000). Portanto, o que se segue nesta seção será baseado nessas três referências.

Drude propôs seu modelo em 1900 para descrever microscopicamente a condução elétrica e térmica em metais. O modelo, baseado em um gás de elétrons livres, os quais se movem através de uma rede cristalina de íons positivos fixos, prediz muito bem a lei de Ohm. Durante o movimento, os elétrons chocam-se entre si, através de colisões elásticas. Pelo fato de ser muito simples, o modelo falha na interpretação de outros fenômenos, que não serão tratados aqui.

De acordo com Pérez (2000), as considerações básicas nas quais fundamenta-se o modelo de Drude são as seguintes:

1. Entre uma colisão e outra, as forças de interação elétron-elétron e elétron-íon são desprezíveis: todos os cálculos desenvolvem-se como se os elétrons de condução pudessem se mover livremente para qualquer parte no interior do metal. A energia total é cinética; a energia potencial é desprezada. A omissão da interação elétron-elétron entre as colisões é denominada aproximação do elétron independente. A correspondente omissão da interação elétron-íon é conhecida como aproximação do elétron livre. Atualmente é possível afirmar que a aproximação do elétron independente é, em muitos contextos, surpreendentemente boa. Enquanto que a aproximação do elétron livre apresenta-se inadequada até para poder obter uma compreensão qualitativa de muitas propriedades metálicas.
2. As colisões das partículas do gás são consideradas eventos instantâneos que abruptamente alteram a velocidade dos elétrons. Mas, ao contrário do gás ideal na teoria cinética, omitem-se as colisões entre as partículas do gás: somente são consideradas as colisões dos elétrons com os íons da rede cristalina. Na verdade, a imagem clássica dos elétrons ricocheteando de um íon para outro está longe da realidade. Afortunadamente, para uma compreensão qualitativa, e muitas vezes quantitativa, do fenômeno da condução metálica só se faz necessário levar em consideração que existe um mecanismo de espalhamento das partículas.
3. O elétron colide aleatoriamente contra um íon em um dado instante, tendo em média viajado livremente durante um tempo, desde sua última colisão, e viaja em média livremente durante um tempo, até sua próxima colisão. O tempo, denominado tempo de relaxação, tempo livre médio entre colisões, ou ainda, tempo médio de espalhamento, é considerado independente da posição e da velocidade do elétron.
4. O equilíbrio térmico do sistema é mantido através das colisões de elétrons com a rede de íons: este é o único mecanismo possível quando admitidas as aproximações do elétron independente e do elétron livre. O equilíbrio é mantido da seguinte forma: imediatamente após cada colisão, o elétron movimenta-se em direção aleatória com uma velocidade que não tem relação nenhuma com a velocidade antes do choque, mas o módulo é apropriado à temperatura do lugar onde ocorreu a colisão. Quanto mais alta for a temperatura do lugar onde se dá a colisão, mais rapidamente se movimentará o elétron após o choque.

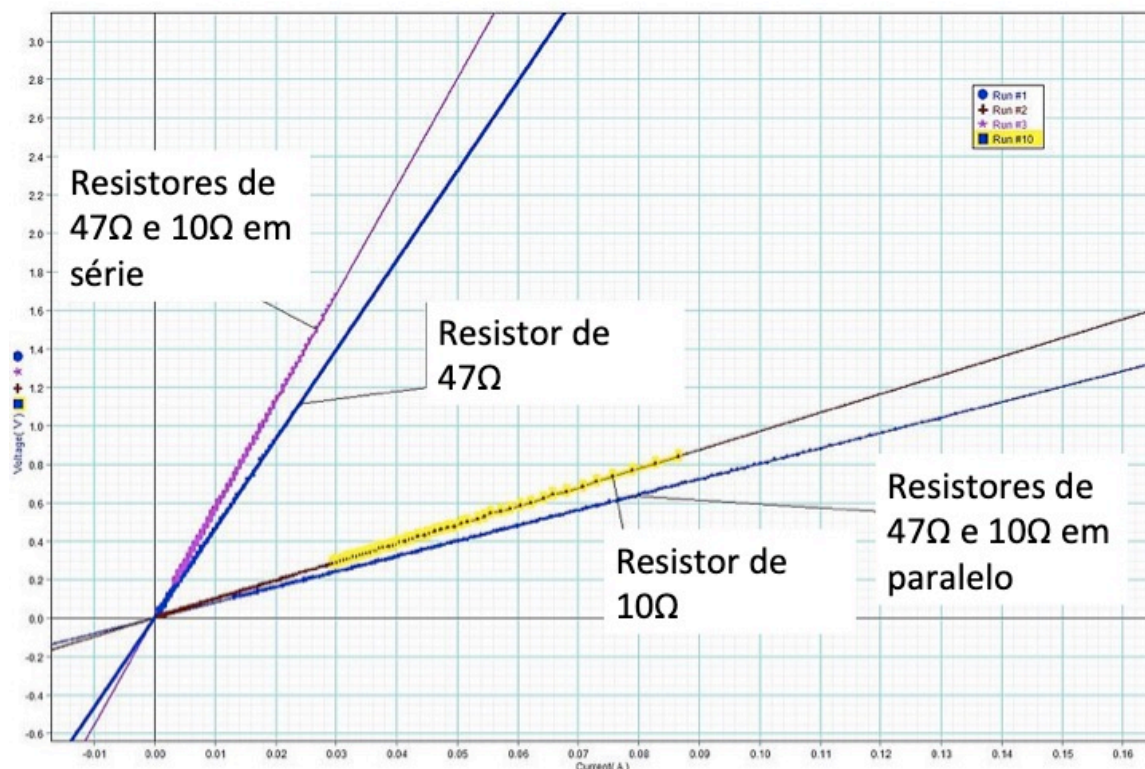


Bem antes desse modelo microscópico, exatamente em 1827, Georg Simon Ohm publicou seu famoso livro "*Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet*", no qual apareceu aquilo que se denomina *lei de Ohm*<sup>1</sup>. Quase todos os autores (PÉREZ, 2000; PURCELL, 1970; GASPAR, 2005; NUSSENZVEIG, 1997), apresentam a lei de Ohm pela expressão

$$V = Ri. \quad (1)$$

Na verdade, esta equação representa simplesmente a definição de resistência. O que a lei de Ohm diz é que para alguns materiais, ditos materiais ôhmicos, a razão  $V/i$  é constante (HALLIDAY; RESNICK, 1981). Uma bela ilustração da equação (1) é apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Experimentos com a lei de Ohm, com dois resistores ( $47\Omega$  e  $10\Omega$ ). O eixo Y representa a voltagem, e o X a corrente. O coeficiente angular fornece o valor da resistência. A reta superior foi obtida com os dois resistores em série. Na segunda reta os dados referem-se ao resistor de  $47\Omega$ , e na terceira referem-se ao resistor de  $10\Omega$ . A reta de baixo foi obtida com os dois resistores em paralelo. Adaptada de <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ohm%27s\\_law\\_experiment\\_with\\_two\\_resistors.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ohm%27s_law_experiment_with_two_resistors.jpg)>. Acesso em 9/9/2018.



<sup>1</sup> [https://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/mod06/m\\_s04.html](https://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/mod06/m_s04.html). Acesso em 10/4/2018.

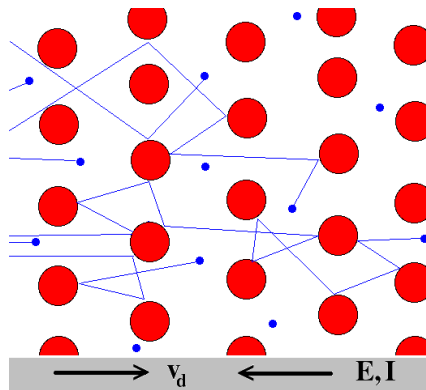
Antes de mostrarmos como o modelo de Drude nos leva à lei de Ohm, vamos detalhar um pouco mais essa lei. A equação (1) diz que a diferença de potencial ( $V$ ) entre dois pontos de um condutor é igual ao produto da resistência entre esses dois pontos pela corrente que atravessa esse segmento do resistor. A resistência é um parâmetro que só depende da geometria do resistor e de suas características elétricas representadas pela sua resistividade. Ou seja,

$$R = \rho \frac{L}{A}, \quad (2)$$

onde  $\rho$  é a resistividade do material,  $L$  é comprimento do resistor e  $A$  é a área da sua seção reta.

Todas as grandezas envolvidas nas equações (1) e (2) são macroscópicas. Diz-se que essas equações são as equações dos engenheiros eletricitistas (PURCELL, 1970). Ao físico interessa compreender os mecanismos microscópicos que originam essas equações macroscópicas. Foi o que fez Drude com o seu modelo, cuja representação esquemática é apresentada na Figura 2.

Figura 2 – Representação esquemática do modelo de Drude. Disponível em <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electrona\\_in\\_crystallo\\_fluentia.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electrona_in_crystallo_fluentia.png)>. Acesso em 9/9/2018.



As equações (1) e (2) podem ser manipuladas de modo que propriedades macroscópicas sejam substituídas por propriedades microscópicas. Inicialmente, substituímos a resistividade,  $\rho$ , pelo seu inverso, a condutividade,  $\sigma$ . Com essa substituição, a equação (2) transforma-se em

$$\sigma = \frac{1}{R} \frac{L}{A}. \quad (3)$$

Tirando o  $R$  de (1) e substituindo em (3), obtém-se

$$\sigma = \frac{i L}{AV}. \quad (4)$$

Na equação (4),  $i/A$  é a densidade de corrente,  $J$ , e  $V/L$  é o campo elétrico dentro do condutor. Portanto, a equação (4) pode ser escrita da seguinte forma:

$$J = \sigma E. \quad (5)$$

A equação (5) é a lei de Ohm em sua forma microscópica. Neste caso ela não depende nem das dimensões, nem do formato do condutor. Depende apenas das propriedades do material, representadas pela condutividade.

Vejam agora como o modelo de Drude nos leva à equação (5). Como vimos acima, no modelo de Drude, os elétrons livres dos metais devem se movimentar aleatoriamente, com velocidade média igual a zero (um movimento em zig-zag), formando uma espécie de gás ideal. Quando um campo elétrico,  $\vec{E}$ , é aplicado no interior do condutor, o primeiro efeito é levar os elétrons a um movimento ordenado, por conta da força  $\vec{F} = -e\vec{E}$ . Mas, esse movimento ordenado dura pouco tempo, porque os elétrons são espalhados pelos íons positivos<sup>2</sup>.

Qualitativamente, o que acontece é o seguinte: sob a ação do campo elétrico os elétrons começam a se mover, mas logo são espalhados e mudam de direção. Na sequência são novamente conduzidos pelo campo elétrico, na direção anterior, ou seja na direção contrário à do campo elétrico. Depois de um longo tempo, o que se observa é que aquele gás de elétrons apresenta uma velocidade média, conhecida como velocidade de deriva. Vejamos isso quantitativamente.

Vamos supor que no interior do condutor existam  $n$  elétrons livres por unidade de volume, deslocando-se com a velocidade  $v_d$ , após a ação do campo elétrico. Ao longo de um tempo  $dt$ , o elétron percorrerá uma distância  $v_d dt$ , na direção contrária ao campo. Nesse intervalo de tempo,  $nv_d A dt$  elétrons atravessarão a área,  $A$ , transversal à direção do deslocamento. Ou seja,  $-nev_d A dt$  é a carga que atravessa a área, ou a seção reta do condutor. Portanto,  $-nev_d A$  será a corrente que circula no condutor. Assim, a densidade de corrente  $J=i/A$  é dada pela equação

$$J = nev_d. \quad (6)$$

---

<sup>2</sup> Essa questão do espalhamento pelos íons foi um dos equívocos no modelo de Drude, que foi corrigido por outros estudiosos. Não discutiremos essa questão aqui. Vamos considerar aqui o modelo puro de Drude

Pela segunda lei de Newton,  $\vec{F} = -e\vec{E} = m_e\vec{a} \rightarrow a = \frac{eE}{m_e}$ . Supondo que  $\tau$  seja o tempo entre colisões subsequentes, tem-se que

$$v_d = eE\tau/m_e. \quad (7)$$

Combinando as equações (6) e (7),

$$J = \left(\frac{ne^2\tau}{m_e}\right)E. \quad (8)$$

Comparando as equações (5) e (8), obtém-se a condutividade em termos de parâmetros microscópicos:

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m_e}. \quad (9)$$

Portanto, o modelo de Drude satisfaz a lei de Ohm.

A abordagem da corrente elétrica a partir de transposições didáticas desse modelo microscópico, inevitavelmente leva à questão: onde estão as cargas que produzem o campo elétrico? Geralmente, essa abordagem leva à analogia entre corrente elétrica e fluxo de água, que originam concepções alternativas danosas para a aprendizagem. Uma alternativa científica mais aceitável é tratar a questão a partir do conceito de potencial, mas esse conceito é muito abstrato e também dificulta a aprendizagem. Além do mais, sabemos que, excetuando campos magnéticos variáveis, cargas são as únicas fontes de campo elétrico. A abordagem apresentada a seguir é uma alternativa para tratar essa questão, embora ainda não esteja consolidada na literatura didática.

#### 1.4 O papel das cargas superficiais em circuitos simples

No levantamento que fizemos na literatura, recuperamos 11 artigos sobre essa questão (FERREIRA; FIGUEIREDO, 2003; HAERTEL, 2012a; HEALD, 1984; HERNANDES; NOGUEIRA, 2016; JACKSON, 1996; MARCUS, 1941; PARKER, 1970; ROSSER, 1963; RUSSELL, 1968; SHERWOOD; CHABAY, [S.d.]; WELTI, 2005). Vamos discutir essa questão usando um princípio ausubeliano, ou seja, inicialmente vamos resumir o que tratam esses artigos, no contexto do presente trabalho e depois vamos apresentar a formalização do problema.

Não importa aqui saber precisamente como funciona uma fonte de força-eletromotriz, até porque existem diferentes tipos, com diferentes mecanismos para produzir o mesmo efeito, qual

seja a acumulação de cargas positivas em um dos seus polos, e de negativas no outro, e a capacidade de repor essas cargas por meio de forças não eletrostáticas. O fato primordial no presente contexto, é que ao ser ligada a fonte, essas cargas geram campos elétricos, os quais afetam as cargas nas proximidades, com efeito inversamente proporcional ao quadrado da distância, conforme as leis de Coulomb e de Gauss. O que acontece nos momentos imediatos em todo o circuito e no espaço externo é formalmente muito complexo, mas podemos definir um cenário qualitativamente compreensível.

Depois de um curto intervalo de tempo inicial, denominado transiente, os elétrons livres migram para as superfícies dos condutores metálicos, formando uma estrutura de cargas superficiais, as quais geram campos eletrostáticos responsáveis pela circulação de corrente no interior dos condutores. Ou seja, o fluxo de corrente é determinado pela ação da fonte de força eletromotriz (bateria, pilha ou gerador) e pelos campos eletrostáticos criados pelas cargas superficiais negativas ou positivas. Os sinais de campo elétrico que conduzem a corrente são transmitidos a velocidades próximas à da luz (no espaço vazio esses sinais são transmitidos exatamente à velocidade da luz). Isso faz com que na prática possamos imaginar a transmissão instantânea do sinal elétrico.

Em suma, não é o elétron que sai do polo negativo e eventualmente chega ao polo positivo o responsável pela corrente elétrica. A corrente elétrica é consequência de campos elétricos criados pelas cargas superficiais e pela transmissão quase instantânea das variações de campos elétricos no interior do condutor<sup>3</sup>.

A maioria dos artigos supra referidos, tratam essa questão qualitativamente, como fizemos nos dois parágrafos anteriores. Da literatura à nossa disposição, a primeira abordagem quantitativa foi apresentada por John David Jackson (1996), autor de um livro de eletromagnetismo avançado geralmente usado na pós-graduação em física. Em seu artigo publicado na RBEF, Ferreira e Figueiredo (2003) usam modelos apresentados por Arnold Sommerfeld, em seu livro de 1952, *Electrodynamics* e por M. Jouguet no livro *Le Champ Électromagnétique*, publicado em 1948. Isso dá ideia da raridade com que o assunto é tratado na literatura.

Para abordar a questão formalmente, utilizando técnicas matemáticas e computacionais típicas de problemas de contorno, Jackson foi obrigado a usar uma geometria tipo cabo coaxial, não usual na descrição dos circuitos simples. O detalhamento do formalismo usado não cabe aqui,

---

<sup>3</sup> Um bom material em português sobre as cargas superficiais e a corrente elétrica encontra-se em Cargas Superficiais – O Elo Perdido dos Circuitos (<http://www.energiaeletrica.net/cargas-superficiais/> - acessado em 2/4/2018).

mas suas interpretações podem ser utilizadas para uma apropriada transposição didática, quer seja no nível do ensino médio, ou mesmo no universitário.

Os resultados obtidos por Jackson aplicam-se aos circuitos usuais, estabelecendo o cenário por ele descrito (1996):

Para simplificar, considere um circuito que consiste em um resistor conectado por fios a uma bateria. Suponha que a resistência do resistor seja grande em comparação com a resistência interna da bateria e a dos fios. O circuito é aberto e fechado, removendo e inserindo o resistor, com os fios e a bateria permanecendo inalterados. Quando o circuito está aberto, cargas são distribuídas ao longo das superfícies dos fios de uma maneira que o potencial de cada fio é constante e o mesmo que no terminal correspondente da bateria. No final de cada fio, onde o resistor estaria, há uma maior acumulação de carga, com sinais opostos, para criar o campo elétrico através da lacuna deixada pelo resistor. Quando o circuito é fechado pela inserção do resistor, a corrente flui e há mudanças nas cargas superficiais e no potencial de várias partes do circuito. O potencial em qualquer ponto ao redor do circuito é determinado pela conservação de corrente e pela lei de Ohm dentro dos fios e do resistor, independentemente da configuração geométrica do circuito. Mas, como a resistência do resto do circuito é pequena comparada com a do resistor, praticamente toda queda de potencial ocorre através do resistor. (Tradução nossa).

Essa descrição pode ser utilizada quando o conceito de capacitor e capacitância forem introduzidos, uma vez que a retirada do resistor, deixando a lacuna, ou seja o circuito aberto, é similar à presença de um capacitor. Aliás, em sua abordagem do mesmo problema, Sherwood e Chabay usam um capacitor carregado no lugar de uma bateria.

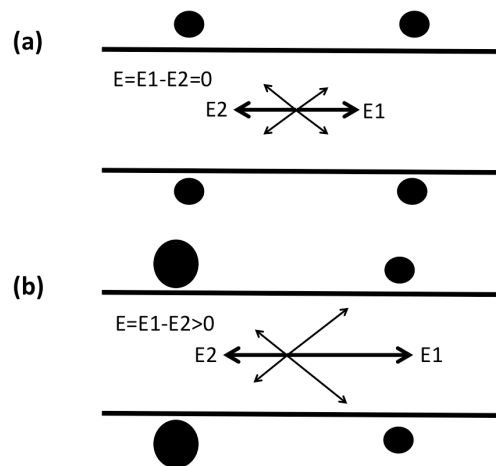
Vamos construir modelos simplificados a partir das soluções numéricas apresentadas no artigo de Jackson.

Para a criação do campo elétrico e a consequente existência de corrente, é necessário que haja um gradiente de cargas superficiais ao longo do circuito. Ou seja, que a distribuição de cargas não seja uniforme ao longo do circuito. Um modelo simples para ilustrar este resultado é apresentado na Figura 3.

A figura é apenas ilustrativa. Não está em escala, e vale para cargas positivas e negativas, bastando compatibilizar os sentidos dos vetores para cada caso. No caso da figura, as cargas são positivas. O condutor é considerado infinito, razão pela qual a simetria permite considerar apenas essas quatro cargas do circuito. Como se vê, se a distribuição é uniforme, Figura 3(a), o campo

será nulo no interior do condutor. Um campo resultante surge apenas quando há um gradiente de cargas, como ilustra a Figura 3(b).

Figura 3 – Modelo ilustrativo para discutir a necessidade de gradiente na distribuição de cargas superficiais em circuitos elétricos.



Ferreira e Figueiredo (2003) chamam a atenção para o fato de que Ohm estabeleceu sua lei para justificar o aparecimento de um campo elétrico através de um gradiente de carga volumétrica, mas foi Kirchhoff quem mostrou, por volta de 1850, que uma corrente uniforme necessitava apenas de um gradiente de carga superficial.

## 2 Guia do Professor

A presente proposta de intervenção didático-pedagógica pode ser usada com qualquer referencial teórico, ou mesmo do modo usualmente adotado pelo professor. No nosso caso ela foi usada com o objetivo de abordar concepções alternativas recorrentemente relatadas na literatura. Foi por isso que apresentamos uma breve revisão da literatura na introdução. Do mesmo modo, também fizemos na introdução, breves referências às abordagens pedagógicas de Ausubel (AUSUBEL, 1960; MOREIRA, 1979) e Vygotsky (JÓFILI, 2002; VYGOTSKY, 1991).

A seguir apresentaremos como a intervenção pode ser aplicada seguindo princípios ausubelianos e vygotkianos. Mais detalhes sobre essas questões didático-pedagógicas encontram-se na dissertação do autor (LIMA, 2018). Todavia, cabe aqui destacar os seguintes aspectos:

1. As concepções alternativas apropriadas pelos alunos foram investigadas por meio de um teste elaborado a partir de propostas disponíveis na literatura (MCDERMOTT; SHAFFER, 1992; SILVEIRA; MOREIRA; AXT, 1989). Denominamos esse teste SMAMcD;

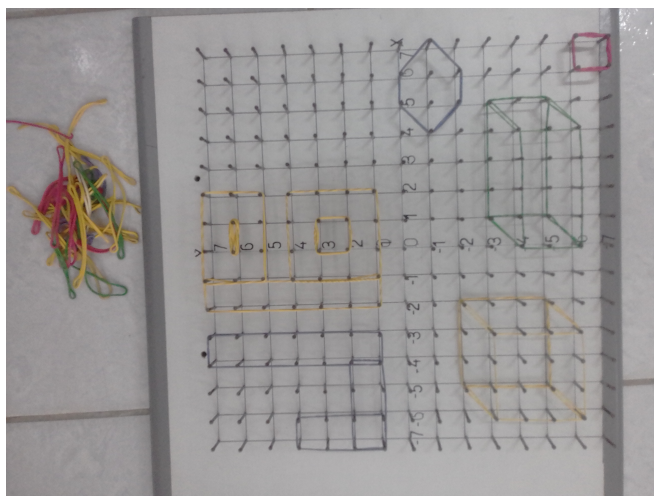
2. Entrevistas clínicas foram realizadas conforme modelo sugerido por Posner e Gertzog (POSNER; GERTZOG, 1982);
3. Aulas convencionais foram ministradas no primeiro semestre com o intuito de fornecer subsunções relevantes, conforme a teoria de aprendizagem de Ausubel (AUSUBEL, 1960; MOREIRA, 1979).

## 2.1 Ambientação Matemática com o Geoplano

Como é do conhecimento de todos que atuam no ensino médio, é grande a deficiência dos alunos em relação às ferramentas matemáticas indispensáveis para o bom aproveitamento das atividades de ensino e aprendizagem de física. Uma grande parte dos alunos têm dificuldades até mesmo no tratamento das quatro operações aritméticas. Em função dessa realidade, decidimos iniciar nossa intervenção didática com o que chamamos de ambientação matemática, a qual consiste no uso do geoplano para abordar vários conceitos matemáticos. Esse dispositivo, criado pelo matemático inglês Caleb Gattegno (FELTRIN *et al.*, 2013), consiste em uma tábua com pregos, e pode ser manipulado com elásticos.

Assim como no caso dos circuitos, discutido mais adiante, os alunos participaram da construção do geoplano que seria usado por cada grupo. Uma vez construídos todos os 16 geoplanos, iniciamos as atividades de ambientação matemática por meio de tarefas simples (adição, subtração, multiplicação e divisão) com o uso exclusivo do geoplano (Figura 4). Na sequência trabalharam com questões de funções, gráficos, calcular áreas e perímetros de figuras.

Figura 4 –Geoplano construído por um grupo de alunos.





## 2.2 Atividades em sala de aula

Os alunos foram divididos em grupos de cinco alunos para construírem os dez circuitos das questões do teste SMAMcD. A turma do matutino respondeu o teste antes do início das montagens, a título de pré-teste. Os alunos do vespertino e do noturno responderam o teste manipulando os circuitos. Durante a montagem, os alunos manipulavam os circuitos para responder as questões do teste, ao mesmo tempo em que retomávamos a discussão de conceitos vistos no primeiro semestre e pertinentes às questões do teste SMAMcD.

Ao lado dessa abordagem teórica dos conceitos, realizamos atividades para o manuseio de multímetros e fontes de tensão e de como ligar fios, interruptores, etc. Uma observação interessante, é que alguns alunos que demonstravam dificuldades nas aulas convencionais, apresentavam-se com desenvoltura nas montagens dos circuitos e melhoraram sua articulação verbal em relação aos conceitos.

Cada aluno teve a oportunidade de manipular os dez circuitos montados, e demonstravam prazer em comentar o que estava acontecendo nos circuitos ligados. Era evidente também a satisfação pelo fato de terem eles construído todos aqueles dispositivos.

As Figuras 5a a 5d ilustram fases da montagem.

Quando todos os grupos concluíram suas tarefas, organizamos um concurso para escolher os 10 melhores circuitos, tendo como único critério a estética, uma vez que todos os circuitos funcionavam corretamente. Com esses circuitos selecionados, tivemos uma aula para socialização de tudo que foi trabalhado com o produto. Nessa aula foi dada a oportunidade para cada discente se expressar em relação a esse tipo de intervenção didático-pedagógica. Todos os alunos apreciaram essa forma de ensino-aprendizagem. A maioria jamais tinha manipulado um circuito elétrico, e ninguém tinha construído algo similar.

Depois dessa fase, 12 alunos foram selecionados para uma entrevista clínica, conforme critérios que serão apresentados mais adiante.

As Figuras 6a a 6f, ilustram momentos de manipulação dos circuitos para discutir as questões do teste SMAMcD.

Figura 5: (a) e (b) Montagem dos circuitos; (c) e (d) Vistas das conexões.

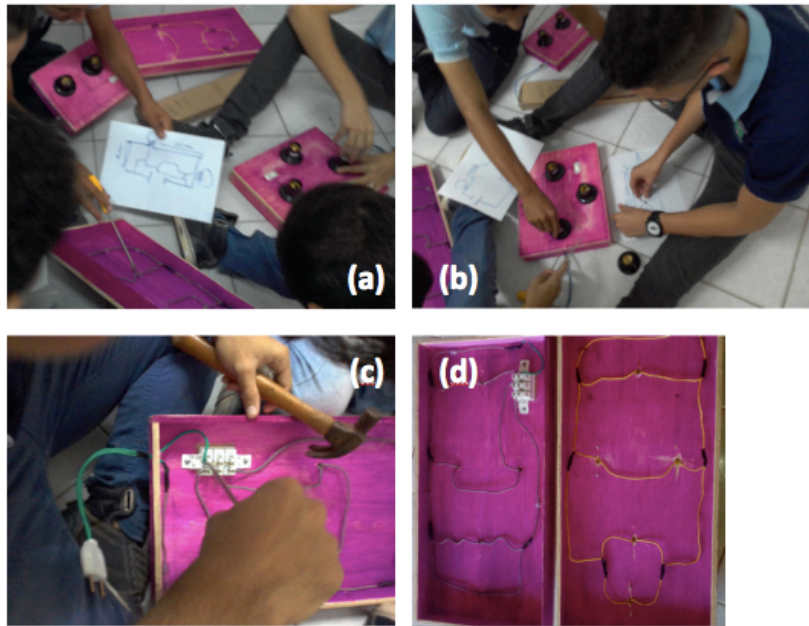
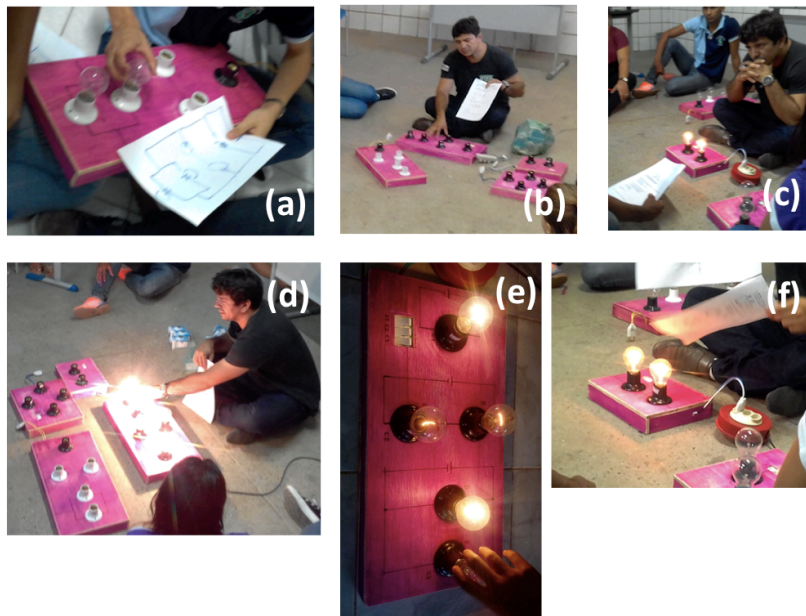


Figura 6: (a) Aluno testando o circuito; (b) e (d) Professor discute uma das questões com os alunos;; (c) e (f) Manipulando o circuito para responder a questão 6; (e) Manipulando o circuito para responder a questão 1.



## 2.3 Subsunoçores

Um elemento importante na teoria de Ausubel são os subsunoçores. Para Ausubel, aprendizagem significativa se dá por um mecanismo de ancoragem do material a ser aprendido a uma estrutura de subsunoçores, que representa a estrutura cognitiva anterior à aprendizagem (AUSUBEL, 1963; MOREIRA, 1979). Utilizamos o primeiro semestre para o provimento dos subsunoçores relevantes ao tema central da intervenção didática, ou seja corrente elétrica em circuitos simples. Isso foi feito por meio de abordagem didática habitual a partir do livro-texto adotado na escola (BISCUOLA; BÔAS; DOCA, 2013). Durante o semestre foram tratados os seguintes assuntos:

Noção de carga elétrica; Corpo eletricamente neutro e corpo eletrizado; Quantização da carga elétrica; Princípios da eletrostática; Eletrização; Lei de Coulomb (Força elétrica de atração e repulsão); Conceito e descrição de campo elétrico; Campo elétrico de uma e de várias cargas puntiformes; Linhas de força; Campo elétrico de um condutor esférico; Campo elétrico uniforme; Trabalho e Potencial elétrico; Conceitos fundamentais; Condutor em equilíbrio; Capacitância; Capacidade de um condutor esférico; Energia potencial eletrostática de um condutor; Associação de capacitores; Causa, intensidade e sentido da corrente elétrica; Leis de Ohm; Potência elétrica; Energia elétrica; Associações de resistores (série, paralelo e mista); Reostatos; Curto-circuito; Medidas elétricas.

Se o professor não tiver tempo de seguir a sequência aqui proposta, é necessário que ele trate, na forma de organizadores avançados (AUSUBEL, 1960) os seguintes conceitos, antes de iniciar o uso desse produto educacional: campo elétrico, potencial elétrico, força elétrica, carga elétrica.

## 2.4 Diferenciação progressiva

À medida que os alunos vão construindo e manipulando seus circuitos para responder as questões do teste SMAMcD, o professor retoma conceitos discutidos no primeiro semestre e os coloca no contexto do experimento. Esse é o processo que Ausubel denominou *Diferenciação Progressiva* (AUSUBEL, 1963; MOREIRA, 1979).

## 2.5 Reconciliação integradora

Ao final das atividades experimentais, o professor coordena um processo que Ausubel denominou *Reconciliação Integradora* (MOREIRA, 1979). Essa etapa, conduzida em aproximadamente três

aulas, tem por finalidade rever as situações-problemas apresentadas e discutidas nas primeiras aulas.

A análise do professor será discutida com a turma, em uma aula tipicamente dialógica, como preconiza Paulo Freire (FREIRE, 1970).

## **2.6 Sociabilidade**

As atividades em grupo, em função de sua capacidade de articulação e de sua prática, podem ser identificados como elementos vygotskianos, como bem destaca Jófili (2002):

Desenvolvendo sua teoria, Vygotsky demonstra a efetividade da interação social no desenvolvimento de altas funções mentais tais como: memória voluntária, atenção seletiva e pensamento lógico. Sugere, também, que a escola atue na estimulação da zona de desenvolvimento proximal, pondo em movimento processos de desenvolvimento interno que seriam desencadeados pela interação da criança com outras pessoas de seu meio. Uma vez internalizados, esses atos se incorporariam ao processo de desenvolvimento da criança.

Conforme Moreira e Massoni(2015), para Vygotsky:

os processos ou funções mentais superiores (pensamento, linguagem, comportamento volitivo) têm origem em processos ou funções sociais; o desenvolvimento cognitivo é a conversão de relações sociais em funções mentais; é por meio da socialização que se dá o desenvolvimento dos processos mentais superiores.

## Referências

- ASSIS, A. K. T. Circuit theory in Weber electrodynamics. *European Journal of Physics*, v. 18, p. 241–246, 1997.
- AUSUBEL, D. P. Cognitive structure and the facilitation of meaningful verbal learning. *Journal of Teacher Education*, v. 14, n. 2, p. 217–222, 1963.
- AUSUBEL, D. P. The use of advance organizers in the learning and retention of meaningful verbal material. *Journal of Educational Psychology*, 1960.
- BENIGNO BARRETO FILHO; CLAUDIO XAVIER DA SILVA. *Física aula por aula: eletromagnetismo, ondulatória, física moderna*. São Paulo: FTD, 2013.
- BISCUOLA, G. J.; BÔAS, N. V.; DOCA, R. H. *Física 3: Eletricidade, Física Moderna, Análise Dimensional*. São Paulo: Editora Saraiva, 2013.
- CARLOS ARIEL SAMUNDIO PÉREZ. O modelo do elétron livre de Drude completa 100 anos. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 17, n. 3, p. 348–359, 2000. Disponível em: <file:///Users/cas/Downloads/6766-20469-1-PB.pdf>. Acesso em: 12 set. 2018.
- EDWARD M. PURCELL. *Eletricidade e Magnetismo. Curso de Física de Berkeley, Vol.2*. Rio de Janeiro: Edgard Blücher Ltda, 1970.
- FELTRIN, D. A. *et al.* Geoplanos: atividades utilizando geoplanos manipuláveis e digitais. 2013, Curitiba: Sociedade Brasileira de Educação Matemática, 2013. p. 1–10.
- FERREIRA, G. F. L.; FIGUEIREDO, M. T. DE. A Eletrostática na Corrente Elétrica em Fios. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 25, n. 4, p. 374–377, 2003.
- FREIRE, P. *Pedagogia do Oprimido*. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1970.
- GASPAR, A. *ATIVIDADES EXPERIMENTAIS DE DEMONSTRAÇÕES EM SALA DE AULA: UMA ANÁLISE SEGUNDO O REFERENCIAL DA TEORIA DE VYGOTSKY (Experimental activities of classroom demonstrations: an analysis according to Vygotsky theory)*. . [S.l: s.n.], 2005.
- GASPAR, A. *Compreendendo a física: eletromagnetismo e física moderna*. São Paulo: Editora Ática, 2010.

HAERTEL, H. Tensão e cargas superficiais – o que Wilhelm Weber já sabia há 150 anos. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 29, n. 3, 20 dez. 2012a. Disponível em: <<http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/27435>>. Acesso em: 9 set. 2018.

HAERTEL, H. The Electric Circuit as a System: A New Approach. *European Journal of Science Education*, v. 4, n. 1, p. 45–55, 1982.

HAERTEL, H. *The so-called simple electric circuit-it is not that simple*. . [S.l: s.n.], 2012b. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/311102570>>.

HAERTEL, H. *The so-called simple electric circuit - it is not that simple*.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. *Física Básica, vol. 3*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1981.

HEALD, M. A. Electric fields and charges in elementary circuits. *American Journal of Physics*, 1984.

HERNANDES, J. A.; NOGUEIRA, G. T. The electric field and surface charges far and close to the battery for the transmission line. *European Journal of Physics*, 2016.

JACKSON, J. D. Surface charges on circuit wires and resistors play three roles. *American Journal of Physics*, v. 64, n. 7, p. 855–870, 1996.

JÓFILI, Z. Piaget, Vygotsky, Freire e a construção do conhecimento na escola. *Educação: Teorias e Práticas*, v. 2, n. 2, p. 191–208, 2002.

JOSÉ ROBERTO BONJORNO *et al.* *Física: eletromagnetismo e física moderna*. São Paulo: FTD, 2013.

LIMA, F. C. B. *Experimentos de baixo custo para abordar concepções alternativas sobre corrente elétrica em circuitos simples*. 2018. 125 f. Universidade Federal Rural do Semiárido, 2018.

MARCUS, A. The Electric Field Associated with a Steady Current in Long Cylindrical Conductor. *Citation: Am. J. Phys*, v. 9, p. 225, 1941.

MÁXIMO, A.; ALVARENGA, B. *Curso de Física. Vol. 3*. São Paulo: Editora Scipione, 2006.

MCDERMOTT, L. C.; SHAFFER, P. S. Research as a guide for curriculum development: An

example from introductory electricity. Part I: Investigation of student understanding. *American Journal of Physics*, v. 60, n. 11, p. 994–1003, 1992.

MOREIRA, M. A. *A Teoria de Aprendizagem de David Ausubel como Sistema de Referência para a Organização de Conteúdo de Física\**. *Revista Brasileira de Física*. [S.l: s.n.], 1979.

NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física Básica. Eletromagnetismo*. São Paulo: Edgard Blücher, 1997.

PARKER, S. Electrostatics and Current Flow. *Citation: Am. J. Phys*, v. 38, p. 720, 1970.

POSNER, G. J.; GERTZOG, W. A. The clinical interview and the measurement of conceptual change. *Science Education*, 1982.

ROSSER, W. G. V. What Makes an Electric Current “Flow”. *American Journal of Physics*, 1963.

RUSSELL, B. R. Surface Charges on Conductors Carrying Steady Currents. *Citation: Am. J. Phys*, v. 36, p. 527, 1968.

SHERWOOD, B. A.; CHABAY, R. W. *A unified treatment of electrostatics and circuits*. . [S.l: s.n.], [S.d.].

SILVEIRA, F. L.; MOREIRA, M. A.; AXT, R. Validação de um teste para verificar se o aluno possui concepções científicas sobre corrente elétrica em circuito simples. *Ciência e Cultura*, v. 41, n. 11, p. 1129–1133, 1989.

STOCKLMAYER, S. M.; TREAGUST, D. F. Images of electricity: How do novices and experts model electric current? *International Journal of Science Education*, 1996.

VYGOTSKY, L. S. *A formação social da mente*. São Paulo: Livraria Martins Fontes, 1991.

WELTI, R. Las cargas superficiales y el flujo de energía en un circuito simple. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 27, n. 4, p. 577–582, 2005.