



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**

Instituto de Física

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Mestrado Profissional em Ensino de Física

Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física



## **A eletrostática oculta na eletrodinâmica dos circuitos de corrente constante**

**Anderson José da Fonseca**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

**Orientador: Germano Maioli Penello**

**Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2020**

# **A eletrostática oculta na eletrodinâmica dos circuitos de corrente constante**

**Anderson José da Fonseca**

**Orientador: Germano Maioli Penello**

Resumo da Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada por:

---

Dr. Germano Maioli Penello (Presidente) - IF/UFRJ

---

Dr. Reinaldo Faria de Melo e Souza - IF/UFRJ

---

Dr. Carlos Farina de Souza - IF/UFRJ

---

Dr. Marcos Gonçalves de Menezes - IF/UFRJ

**Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2020**

F676e      Fonseca, Anderson José da  
                    A eletrostática oculta na eletrodinâmica dos circuitos de  
                    corrente constante / Anderson José da Fonseca – Rio de Janeiro, 2020.  
                    179 f.  
                    Orientador: Germano Maioli Penello  
                    Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio de  
                    Janeiro, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Ensino  
                    de Física, 2020.  
                    Referências Bibliográficas: f. 93-99.  
                    1. Ensino de Física. 2. Circuito elétrico. 3. Densidade  
                    superficial de carga. 4. Corrente estacionária. 5. Campo elétrico. I.  
                    Penello, Germano Maioli, orient. II. A eletrostática oculta na eletro-  
                    dinâmica dos circuitos de corrente constante.

Aos profissionais da educação.

# Agradecimentos

A minha esposa Deise, pelo carinho e cumplicidade inestimáveis. Sua paciência e afeto foram inabaláveis ao longo dessa jornada.

Ao meu orientador Germano, que compartilhou comigo sabedoria e entusiasmo. Sua perseverança foi decisiva para conclusão desse trabalho.

Àqueles que têm me incentivado a consolidar minha formação.

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

Ao Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (ProFis) e à Sociedade Brasileira de Física (SBF) pela coordenação do programa.

# Resumo

## A eletrostática oculta na eletrodinâmica dos circuitos de corrente constante

Anderson José da Fonseca

**Orientador: Germano Maioli Penello**

Resumo da Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Apresentamos o desenvolvimento de uma abordagem de ensino de circuitos elétricos de corrente constante baseada na distribuição superficial das cargas elétricas dos componentes do circuito. Primeiramente, recuperamos o resultado que mostra que a solução dos problemas eletrostáticos pode ser aplicada aos meios condutores ôhmicos homogêneos transportando uma corrente estacionária. Como uma consequência das equações de Maxwell combinadas com a condição de corrente estacionária, essa conclusão nos permitiu determinar a configuração esperada para o campo elétrico no condutor. Examinando um caso especial, a origem desse campo é identificada. Consolidado o modelo teórico, utilizamos seus resultados para analisar um circuito composto por uma bateria, fios condutores e um resistor através de uma sequência de ensino que possibilita ao estudante resgatar o seu conhecimento sobre a interação entre as cargas elétricas e empregá-lo para compreender os processos físicos que ocorrem nos componentes do circuito à medida que suas conexões são estabelecidas. Diferentemente do que propõe a análise habitual, fundamentada na diferença de potencial ou na corrente elétrica, a carga superficial assume o protagonismo da

relação causal. Dadas as circunstâncias fenomenológicas dessa investigação, a necessidade do uso de imagens que permitam a construção mental dos acontecimentos é indiscutível. A metodologia estimula o surgimento de discussões ao longo dos estágios de construção do circuito possibilitando que o aprendiz faça previsões sobre o comportamento da estrutura dos componentes. Juntamente com a descrição detalhada da intervenção didática encontra-se o relato da sua implementação com alunos do ensino médio de uma escola pública estadual.

**Palavras-chave:** Ensino de Física, circuito elétrico, carga superficial.

**Rio de Janeiro**  
**Fevereiro de 2020**

# Abstract

## The hidden electrostatics in the electrodynamics of direct current circuits

Anderson José da Fonseca

**Orientador: Germano Maioli Penello**

Abstract of master's thesis submitted to Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, in partial fulfillment of the requirements for the degree Mestre em Ensino de Física.

We present the development of a teaching approach of direct current electrical circuits based on the surface distribution of the electrical charges of the circuit components. First, we retrieve the result that shows that the solution of electrostatic problems can be applied to homogeneous ohmic conductive media carrying a steady current. As a consequence of Maxwell's equations combined with the stationary condition, this conclusion allowed us to determine the expected configuration for the electric field in the conductor. By examining a special case, the origin of this field is identified. With the theoretical model consolidated, we use its results to analyze a circuit composed by a battery, conductor wires and a resistor through a teaching sequence that allows the student to recover his knowledge about the interaction between the electric charges and to use it to understand the physical processes that occur in circuit components as their connections are established. In contrast to the usual analysis, based on the potential difference or the electric current, the surface charge is the protagonist of the causal relationship. Given the phenomenological circumstances of this investigation, the use of images that allow the mental construction of events is

unquestionable. The methodology encourages discussions along the circuit construction stages allowing the learner to make predictions about the behavior of each component structure. The report of the implementation with highschool students of a state public school is presented along with the detailed description of the didactic intervention.

**Keywords:** Physics teaching, electrical circuit, surface charge.

**Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2020**

# Sumário

Sumário	x
Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xviii
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2 A eletrodinâmica dos circuitos de corrente constante</b>	<b>7</b>
2.1 Qual a origem do campo elétrico que provoca a corrente elétrica nos fios condutores? . . . . .	7
2.2 Sobre a existência de cargas distribuídas sobre a superfície de condutores conduzindo corrente constante . . . . .	11
2.3 Caracterização dos campos elétricos de um fio resistivo conduzindo uma corrente estacionária . . . . .	16
2.3.1 Condições de contorno para condutores ôhmicos conduzindo correntes constantes . . . . .	22
2.3.2 Campo elétrico produzido por um fio resistivo ôhmico conduzindo uma corrente constante . . . . .	26
2.4 Metodologia de ensino de circuitos elétricos baseada na análise da distribuição superficial de carga . . . . .	28

2.4.1	Conectando os fios condutores aos contatos da bateria . . . . .	33
2.5	Completando o circuito . . . . .	34
<b>3</b>	<b>Estrutura e aplicação da sequência didática</b>	<b>44</b>
3.1	Estrutura . . . . .	46
3.2	Aplicação . . . . .	48
3.2.1	Primeiro encontro . . . . .	50
3.2.2	Segundo encontro . . . . .	56
3.2.3	Terceiro encontro . . . . .	61
<b>4</b>	<b>Avaliação da aplicação</b>	
	da sequência didática e do impacto da metodologia de ensino no processo	
	de aprendizagem	<b>74</b>
<b>5</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>90</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>93</b>
<b>A</b>	<b>Material didático instrucional</b>	<b>100</b>
<b>B</b>	<b>Atividades realizadas durante a sequência de ensino</b>	<b>124</b>
<b>C</b>	<b>Respostas das atividades de acompanhamento do aprendiz</b>	<b>144</b>

# Lista de Figuras

2.1	(a) Diferentes orientações do campo elétrico no interior do fio condutor de um circuito percorrido por corrente constante; (b) o fio é curvado em <b>M</b> e o campo elétrico nesse ponto e nas suas redondezas tem a sua direção modificada. Os módulos e orientações dos campos elétricos nos pontos <b>K</b> , <b>L</b> , <b>N</b> , <b>O</b> e <b>P</b> não foram alterados pela torção ocorrida em <b>M</b> . . . . .	9
2.2	(a) Nesta configuração a lâmpada brilha normalmente; (b) os fios são torcidos um sobre o outro e não se observa qualquer mudança no brilho da lâmpada. . . . .	10
2.3	Contrariando a hipótese do campo elétrico no filamento ter sua origem nas cargas da bateria, o brilho da lâmpada não aumenta quando ela é aproximada da fonte de tensão. . . . .	10
2.4	Resultados experimentais obtidos por Jefimenko [10]. (a) Campo elétrico de um condutor retilíneo; (b) campo elétrico de dois condutores retilíneos que se cruzam; (c) campo elétrico de um anel condutor circular; (d) campo elétrico de um anel condutor de formato quadrado. . . . .	15
2.5	Variação linear da densidade de carga na superfície de um fio condutor ôhmico retilíneo e infinitamente longo. Imagem extraída do trabalho de H. Härtel [29]. . . . .	20
2.6	Suposta não-uniformidade do campo elétrico no interior do fio condutor. Imagem extraída do livro de R. Chabay e B. Sherwood [1] (adaptada). . .	21

2.7	Processo de acúmulo de carga na curva de fio condutor. Imagem extraída do livro de R. Chabay e B. Sherwood [1]. . . . .	22
2.8	Volume cilíndrico atravessando a interface de dois meios condutores. . . . .	23
2.9	(a) Aplicação da lei de Gauss nas interfaces de um condutor e um resistor. (b) Camadas de separação carregadas entre um resistor e um condutor. Imagem extraída do trabalho de H. Härtel [29] (adaptada). . . . .	24
2.10	Percurso retangular atravessando a fronteira de dois meios condutores. . . . .	26
2.11	Campo elétrico resultante de dois anéis com densidade de carga elétrica superficial desigual. Imagem extraída do trabalho de B. Sherwood e R. Chabay [35]. . . . .	27
2.12	Campos elétricos e distribuição de carga de um fio cilíndrico conduzindo uma corrente constante. Imagem extraída do trabalho de S. Parker [11] (adaptada). . . . .	28
2.13	Modelo de um circuito elétrico e partículas com progressivamente menos energia. Imagem extraída do trabalho de H. Härtel [39]. . . . .	29
2.14	Modelo de uma “bateria mecânica. Imagem extraída do livro de R. Chabay e B. Sherwood [1]. . . . .	31
2.15	Transiente da eletrização pelo contato. Neste momento não está sendo discutida a distribuição de cargas nas torções ou extremidades do fio. . . . .	34
2.16	Estados transiente e estático durante a conexão dos fios com a bateria. A forma como as cargas se distribuem nas torções ou extremidades do fio não está sendo explorada. . . . .	35
2.17	Bateria e fios condutores conectados em equilíbrio eletrostático. A região destacada será analisada antes da conexão da extremidades. Imagem extraída do livro de R. Chabay e B. Sherwood [1]. . . . .	36

2.18	Campos produzidos pelas cargas das paredes do vão ( $\vec{E}_{parede}$ ) e de todas as outras cargas da superfície dos fios ( $\vec{E}_{outras}$ ). Imagem extraída do livro de R. Chabay e B. Sherwood [1]. . . . .	37
2.19	Campos produzidos apenas pelas cargas da superfície dos fios. Imagem extraída do livro de R. Chabay e B. Sherwood [1] (adaptada). . . . .	37
2.20	Densidade superficial de carga diluída pouco tempo depois que ocorre a junção das extremidades dos fios. Imagem extraída do livro de R. Chabay e B. Sherwood [1]. . . . .	38
2.21	Campo elétrico, corrente elétrica e distribuição superficial de carga aproximada ao longo do circuito no regime estacionário. Apenas a componente normal do campo elétrico externo foi representada. . . . .	39
2.22	Representação de um resistor conectado aos fio condutores. (a) visualização da rede de íons do resistor e das regiões de transição com os fios condutores; (b) distribuição das densidades de elétrons livres no condutor, no resistor e nas regiões de transição. Imagem extraída do trabalho de H. Härtel [39] (adaptada). . . . .	41
2.23	Campo elétrico no interior do condutor e do resistor acompanhado das respectivas distribuições de carga elétrica. . . . .	42
2.24	Representação do campo elétrico e da distribuição superficial de carga aproximada nos fios e no resistor de um circuito. O campo elétrico externo não foi representado. . . . .	43
3.1	Caderno de anotações: atividade 1. . . . .	51
3.2	Diagrama da situação-problema. . . . .	52
3.3	Caderno de anotações: atividade 2. . . . .	53
3.4	Caderno de anotações: atividade 3. . . . .	54
3.5	Caderno de anotações: atividade 4. . . . .	55

3.6	Caderno de anotações: atividade 5. . . . .	58
3.7	O brilho da lâmpada varia conforme ela se aproxima ou se afasta da pilha?	60
3.8	Caderno de anotações: atividade 6. . . . .	64
3.9	Caderno de anotações: atividade 6. . . . .	65
3.10	Caderno de anotações: atividade 7. . . . .	66
3.11	Caderno de anotações: atividade 7. . . . .	67
3.12	Caderno de anotações: atividade 8. . . . .	68
3.13	Caderno de anotações: atividade 8. . . . .	69
3.14	Caderno de anotações: atividade 9. . . . .	71
3.15	Caderno de anotações: atividade 9. . . . .	72
3.16	Caderno de anotações: atividade 10. . . . .	73
4.1	Exemplos de representações elaboradas pelos alunos do circuito que faz a lâmpada acender: <b>(a)</b> uso de simbologia técnica; <b>(b)</b> e <b>(c)</b> conexões incorretas dos fios com a lâmpada; <b>(d)</b> diagrama correto. . . . .	77
4.2	Representação elaborada por um aluno sobre comportamento dos elétrons de condução nos fios durante o regime transiente. . . . .	82
4.3	Representações elaboradas pelos alunos mostrando a distribuição de carga e o campo elétrico nos fios no equilíbrio eletrostático: <b>(a)</b> o aluno representou apenas a distribuição de carga nos fios; <b>(b)</b> além da distribuição de carga o aluno indicou que o campo elétrico no interior dos fios é nulo; <b>(c)</b> o aluno mostrou a distribuição de carga e o campo elétrico próximo à superfície externa do condutor; <b>(d)</b> descrição realizada por um aluno da carga superficial nos fios, bem como o campo elétrico interno e próximo à superfície externa (a orientação do campo externo no fio inferior está incorreta). . . . .	84

4.4	Diagramas feitos por alunos representando a distribuição de carga e os campos elétricos no fio e sua componente normal externa. Em <b>(a)</b> a observação do aluno está incorreta. A densidade de carga aumenta à medida que se aproxima dos contatos da pilha; <b>(b)</b> o sentido do campo elétrico no interior do fio é oposto ao que foi representado pelo aluno. . . . .	85
4.5	Diagrama elaborado por um aluno representando as distribuições de carga nos fios e no resistor juntamente com os respectivos campos elétricos e suas componentes normais externas. . . . .	87
4.6	Resposta à pergunta: por que a lâmpada acende quase instantaneamente quando acionamos o interruptor? . . . . .	87
4.7	Resposta à pergunta motivacional reunindo boa parte do conteúdo discutido durante a sequência de ensino. . . . .	88
A.1	Esquema do circuito elétrico usado para fazer a lâmpada acender. . . . .	102
A.2	Pilha. . . . .	104
A.3	Modelo de uma “pilha mecânica”. Imagem extraída do livro de R. Chabay e B. Sherwood [1] (adaptada). . . . .	104
A.4	Rede de íons. Imagem extraída do livro de M. A. Almeida [43]. . . . .	105
A.5	Movimento dos elétrons através da rede. Imagem extraída do livro de M. A. Almeida [43]. . . . .	107
A.6	O brilho da lâmpada muda quando ela se aproxima ou se afasta da pilha? .	108
A.7	Processo de eletrização pelo contato. . . . .	109
A.8	Estados transiente e estático durante a conexão dos fios com a bateria. . .	111
A.9	Campos produzidos pelas cargas das paredes do vão ( $\vec{E}_{parede}$ ) e de todas as outras cargas da superfície dos fios ( $\vec{E}_{outras}$ ). Imagem extraída do livro de R. Chabay e B. Sherwood [1]. . . . .	113

A.10 Campos produzidos apenas pelas cargas da superfície dos fios. Imagem extraída do livro de R. Chabay e B. Sherwood [1] (adaptada). . . . .	113
A.11 Carga elétrica superficial “diluída” pouco tempo depois que ocorre a junção das extremidades dos fios. Quanto maior a quantidade de sinais (+) ou (−) e mais próximos eles estiverem significa que a quantidade de carga localizada desse sinal naquela região é maior. Imagem extraída do livro de R. Chabay e B. Sherwood [1]. . . . .	114
A.12 Distribuição aproximada da carga elétrica na superfície do fio depois que o estado estacionário foi alcançado. Imagem extraída do trabalho de H. Härtel [29] (adaptada). . . . .	116
A.13 Campo elétrico interior e distribuição de carga aproximada em um fio reto no regime estacionário. Externamente, o campo apresenta duas componentes: uma paralela à superfície e outra perpendicular a ela. Apenas a componente perpendicular do campo elétrico foi representada. . . . .	118
A.14 Campo elétrico, corrente elétrica e distribuição superficial de carga aproximada ao longo do circuito no regime estacionário. Externamente, apenas a componente perpendicular do campo elétrico foi representada. . . . .	119
A.15 Representação de um resistor ligado aos fio condutores. Somente os elétrons livres dos fios, do resistor e das regiões de transição estão sendo mostradas. Imagem extraída do trabalho de H. Härtel [39] (adaptada). . . . .	121
A.16 Representação do campo elétrico e da distribuição de carga aproximada nos fios e no resistor durante o estado estacionário. Imagem extraída do trabalho de H. Härtel [29] (adaptada). . . . .	122
A.17 Representação do campo elétrico e da distribuição superficial de carga aproximada nos fios e no resistor de um circuito no estado estacionário. Externamente, apenas a componente perpendicular do campo está sendo representada. . . . .	123

# Lista de Tabelas

4.1	Respostas da Atividade 2. . . . .	78
4.2	Respostas da Atividade 3. . . . .	78
4.3	Respostas da Atividade 4. . . . .	79
4.4	Respostas da Atividade 5. . . . .	80
4.5	Respostas da Atividade 6. . . . .	81
4.6	Respostas da Atividade 7. . . . .	82
4.7	Discriminação das respostas sobre a localização da carga e do campo da Atividade 7. . . . .	83
4.8	Respostas da Atividade 8. . . . .	85
4.9	Respostas da Atividade 9 (fio condutor). . . . .	86
4.10	Respostas da Atividade 9 (filamento da lâmpada). . . . .	86

# Capítulo 1

## Introdução

A compreensão dos fenômenos naturais tem sido um dos maiores empreendimentos do intelecto humano. No que se refere à matéria, diferentes aspectos do seu comportamento inspiraram a elaboração de modelos para a sua estrutura interna que pudessem reproduzir, em sua essência, as características e propriedades observadas. Nesse percurso, um dos maiores desafios da Física consiste em explicar o comportamento macroscópico de um sistema a partir de um modelo microscópico. Presume-se que as manifestações macroscópicas, cujas grandezas observáveis a elas relacionadas serão objeto de medidas e que servirão para verificação ou refutação do modelo, serão reveladas através do conhecimento de algum mecanismo que incorpore as interações entre as entidades microscópicas que constituem o sistema, os conceitos e leis físicas universais. O eletromagnetismo é um exemplo desse paradigma.

Penetrar o universo invisível no ensino médio não é uma tarefa simples. Ela exige uma imaginação aguçada e treinada. Espera-se do professor a habilidade para conduzir os alunos nessa jornada, fornecendo-lhes as informações sobre as características desse ambiente e ensinando-lhes a reconhecer as interações entre os seus constituintes, o que em outras palavras significa estabelecer os alicerces da interpretação teórica dos processos microscópicos. Os alunos precisam ser contagiados pelo entusiasmo da descoberta das potencialidades que uma representação simplificada da realidade (mas, ao mesmo tempo, repleta de novas complexidades) oferece ao confrontarem as previsões de um modelo com

os resultados das medidas de uma propriedade macroscópica do objeto de estudo. Competirá com essa motivação a constatação de que os conceitos que constituem a gênese do modelo não estarão sujeitos a uma verificação direta, apenas uma confirmação indireta deles poderá ser realizada. Não obstante, a atenção dos alunos pode ser assegurada argumentando-se que, mesmo possuindo características que não são passíveis de uma comprovação direta, a confiabilidade do modelo pode ser demonstrada pela sua abrangência e sua capacidade de prever fenômenos ainda não observados.

Na escola, o aluno começa a se familiarizar com as quantidades ínfimas que constituem a matéria no último ano do ensino fundamental, no componente curricular Ciências da Natureza. Ao final dessa etapa da educação formal, espera-se que os estudantes tenham alcançado a compreensão de que uma série de processos naturais pode ser explicada a partir de combinações estabelecidas entre blocos estruturais diminutos que participam da composição da matéria. O detalhamento sobre a estrutura elementar da matéria e sua natureza elétrica são competências do ensino médio.

Tradicionalmente, durante a formação escolar básica, há dois conteúdos que recebem atenção privilegiada quando o eletromagnetismo é abordado, estudados em sequência, mas sem que sua conexão seja claramente evidenciada: a interação entre as cargas elétricas, que integra o cerne da eletrostática, e a análise dos circuitos de corrente constante. Apesar de não se tratar de um campo de estudo meramente introdutório, a eletrostática é pouco (ou quase nada) aplicada quando se quer examinar a dinâmica de um circuito elétrico. Essa, por sua vez, resume-se ao cálculo de distribuições de correntes elétricas, diferenças de potencial e potências dissipadas. O circuito, mesmo se considerado o mais simples (constituído apenas de bateria, fio condutor e resistor), não é explorado em sua complexidade sistêmica. A estrutura conceitual e os métodos operacionais analíticos desenvolvidos durante o estudo da eletrostática não são utilizados na metodologia empregada. Tomam o seu lugar as leis de Ohm e de Kirchhoff. Por exemplo, o surgimento de uma corrente elétrica não é justificado pela interação das cargas com um campo elétrico, mas pela

existência de uma diferença de potencial.

De fato, é mais simples explorar as características funcionais de um circuito elétrico a partir de quantidades como corrente elétrica, resistência, voltagem e potência, do que apoiando-se em grandezas praticamente inacessíveis ou formalmente mais complexas relacionadas à interpretação microscópica, como cargas elétricas e campos elétrico e magnético. Por outro lado, uma exploração minuciosa do assunto estabelece as condições conceituais adequadas para se testar o potencial explicativo da teoria, abordando aspectos que de outra forma seriam negligenciados e, conseqüentemente, suscitando discussões e aguçando a curiosidade dos alunos, dois elementos fundamentais para o aprendizado.

Buscando estabelecer a integração dos processos físicos elementares com as suas conseqüências observáveis, apresentaremos e discutiremos uma proposta para análise de circuitos elétricos baseada na distribuição superficial de cargas, que permite conciliar os conceitos estudados em eletrostática com a eletrodinâmica dos circuitos de corrente constante. Nossa intenção é demonstrar as potencialidades de uma abordagem pedagógica alternativa, que explora a relação causal/efetiva de uma interpretação microscópica, para a explicação dos fenômenos relacionados com o funcionamento de um circuito elétrico. Implicitamente, essa proposta também encoraja uma reavaliação do enfoque que geralmente é dado ao estudo dos problemas eletrostáticos e ao conceito de circuito. Na eletrostática, as distribuições de carga, campo e potencial elétricos recebem um tratamento puramente abstrato, desvinculado dos processos dinâmicos em curso nos circuitos, nos quais estão diretamente envolvidos. Quando se considera o comportamento microscópico, a distribuição superficial de carga ao longo do circuito assume o papel de protagonista dos fenômenos que serão explicados. Conseqüentemente, o circuito não pode ser interpretado apenas como um caminho condutor estabelecido entre os terminais de uma fonte de tensão, em que diferentes componentes estão organizados de uma forma objetiva, pois cada um deles interfere na densidade local de cargas e tem seu desempenho influenciado por ela.

Outro benefício proporcionado por uma intervenção instrucional desse tipo é a am-

pliação do espectro de problemas que podem ser discutidos dentro do mesmo conteúdo. Exemplo disso, é a investigação sobre o que acontece no circuito durante o curto intervalo de tempo até que o regime estacionário seja atingido. Essa análise foge do propósito que o tratamento convencional destina aos circuitos. Entretanto, sua apreciação permite que o conhecimento adquirido sobre a interação entre cargas estáticas possa ser aplicado para entender o que acontecerá no circuito.

Para descrever os detalhes dessa proposta pedagógica elegemos o circuito frequentemente utilizado como exemplo (chamado de circuito “simples”) para definir o significado dessa estrutura, apresentar as características e finalidades dos seus componentes e começar a familiarizar os estudantes com as leis e princípios que serão utilizados para examinar circuitos de corrente constante em funcionamento. O circuito “simples” é composto por uma bateria, fios condutores e um resistor. Privilegiamos essa composição pois ela reúne os elementos principalmente encontrados quando a eletrodinâmica dos circuitos é discutida e porque permite que uma investigação em nível microscópico seja realizada logo que o tema circuitos elétricos é introduzido. Como veremos, a declarada simplicidade do circuito se revelará apenas aparente.

A justificativa teórica do modelo físico empregado nessa estratégia de ensino será apresentada no capítulo 2, com uma descrição da teoria eletromagnética aplicada aos circuitos resistivos de corrente constante. Os resultados que serão encontrados nessa seção exigem o conhecimento de recursos matemáticos que só recebem atenção no ensino superior. Ainda assim, o aspecto conceitual do modelo será explorado de forma que suas ideias centrais estejam adequadas ao ensino médio.

No capítulo 3, apresentaremos como a abordagem de ensino foi consumada, discutindo seus aspectos estruturais e metodológicos, e descrevendo em detalhes o desenvolvimento de uma sequência didática que exemplifica como uma interpretação microscópica dos fenômenos pode ser conduzida para explicar de forma significativa o funcionamento de um circuito elétrico. Integra o instrumento pedagógico uma série de atividades elaboradas

com o objetivo de avaliar os efeitos provocados pelo modelo instrucional na compreensão dos estudantes acerca da fenomenologia dos processos microscópicos e sua relação com o comportamento macroscópico dos componentes do circuito.

Os resultados das atividades realizadas durante a execução da abordagem instrucional serão apresentados no capítulo 4. A análise das informações obtidas procurou identificar a presença dos elementos conceituais discutidos durante a aplicação da sequência de ensino e como os estudantes os utilizaram para compreender as transformações características de cada etapa da análise. Além disso, como o público contemplado com a proposta metodológica já possuía alguma experiência com a análise de circuitos elétricos, foi possível expôr modos de raciocínio equivocados e interpretações conceituais distorcidas sobre grandezas e o funcionamento de um circuito.

Reservamos o capítulo 5 para considerações sobre as características da estratégia de ensino, salientando a importância de se observarem seus elementos estruturantes e metodológicos durante a concepção do instrumento pedagógico e o potencial elucidativo que as relações causais microscópicas oferecem para a compreensão dos fenômenos relativos aos circuitos elétricos. Uma vez mais, reiteramos a convicção de que, dadas as características conciliadoras da abordagem, sua metodologia pode ser usada para desenvolver o estudo da eletrostática em conjunto com a eletrodinâmica dos circuitos de corrente constante.

No apêndice A encontra-se o material didático elaborado para suportar a sequência de ensino aplicada. Ainda que se encontre na forma de um texto, ele contém em si a sucessão de etapas observadas na abordagem instrucional. Possibilita, portanto, que o professor e/ou os estudantes o utilizem sem a necessidade de adequações. O apêndice B traz o conjunto de atividades realizadas pelos alunos ao longo do desenvolvimento do processo instrucional. As respostas das atividades encontram-se no apêndice C.

É importante deixar claro que ao se enfatizar o exame das particularidades dos circuitos através de processos microscópicos não há qualquer pretensão em substituir a análise via leis de Ohm e de Kirchhoff, mas fazer dela uma aliada na compreensão dos fenômenos e

uma ferramenta para explorar fatos que não são alcançados pela abordagem tradicional.

# Capítulo 2

## A eletrodinâmica dos circuitos de corrente constante

Circuitos de corrente constante integram tradicionalmente o currículo de física, seja na educação básica ou superior. O tratamento habitual desse tópico se baseia nos conceitos de diferença de potencial e corrente elétrica para descrever o comportamento observado ou esperado do circuito e dos seus componentes. A análise dos campos elétrico e magnético é realizada dentro de um contexto que envolve o conhecimento das equações de Maxwell, resumindo-se à demonstrações das leis e teoremas que posteriormente serão empregadas no exame do arranjo. A importância desses campos para a compreensão da dinâmica do circuito, mesmo que implícita, não parece integrada a ela. Explorar o papel desempenhado pela distribuição de carga na superfície dos componentes de um circuito de corrente constante possibilita unificar a abordagem tradicional com a análise do campo eletromagnético.

### 2.1 Qual a origem do campo elétrico que provoca a corrente elétrica nos fios condutores?

Em nosso contexto<sup>1</sup>, cargas são a única fonte de campos elétricos. É bastante comum encontrar entre os que iniciam o estudo sobre circuitos elétricos de corrente constante,

---

<sup>1</sup>Não abordaremos nesse trabalho o fenômeno da indução eletromagnética.

que a resposta à pergunta desta seção é que a origem do campo se encontra nas cargas localizadas na bateria. Analisaremos a seguir algumas situações que demonstrarão que esta resposta não é capaz de explicar o que ocorre com o campo elétrico no interior dos condutores em todos os pontos do circuito e que apresentarão indícios de onde se encontra a fonte responsável pelo campo elétrico que provoca a corrente.

Considere um circuito composto por um fio resistivo e uma fonte de tensão constante, como mostra a Fig. 2.1(a). Para impulsionar os elétrons ao longo do fio, provocando a mesma corrente elétrica em cada ponto do condutor, tem que existir uma componente do campo elétrico cuja direção acompanha os contornos do fio, tal como o faz a corrente elétrica. Desse modo, como explicar a mudança de orientação do campo ao longo do circuito? Se supusermos que a fonte do campo elétrico em todos os pontos reside nas cargas localizadas na bateria, teremos que admitir também que a configuração espacial do campo depende da forma assumida pelo circuito, pois se curvamos o fio em alguma região o campo ali modifica sua orientação. Porém, a alteração do campo deveria se refletir em todos os pontos do circuito e não apenas onde o fio estiver sendo curvado, uma vez que supomos que ele é produzido pela bateria. Para vermos como a suposição do campo originado nas cargas da bateria falha, imagine que o fio condutor seja torcido apenas na região que contém o ponto **M**, como mostra a Fig. 2.1(b). O campo nesse trecho e em regiões próximas sofre uma mudança de orientação, porém permanece inalterado nas demais regiões do circuito (isto é, nos pontos **K**, **L**, **N**, **O** e **P**). Alguma modificação local associada à torção realizada no fio parece ter sido responsável pela mudança de orientação do campo elétrico, visto que o campo dentro do condutor modificou-se apenas no ponto **M** e em suas proximidades.

Continuando a abordar a possibilidade das cargas localizadas na fonte de tensão serem a origem do campo elétrico em todos os pontos do fio, podemos adicionar ao circuito uma lâmpada incandescente e analisar o que deveria acontecer com o seu brilho quando os fios condutores são torcidos, como mostrado na Fig. 2.2.

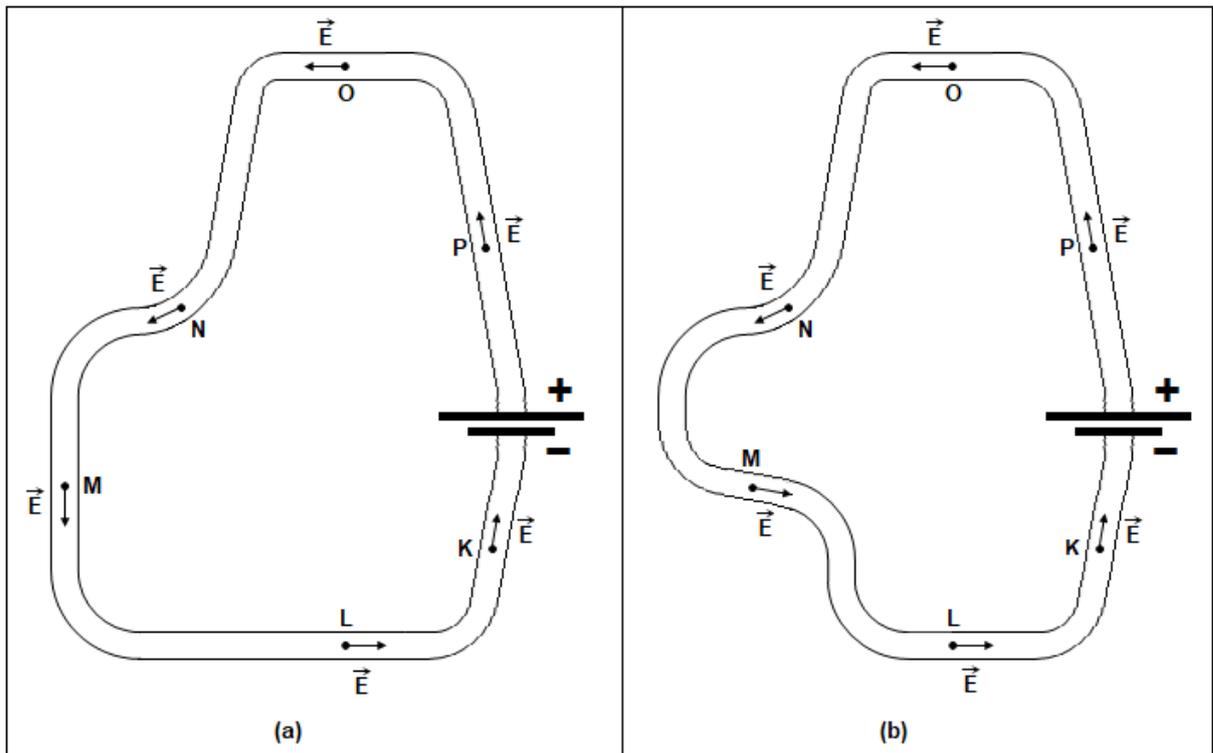


Figura 2.1: **(a)** Diferentes orientações do campo elétrico no interior do fio condutor de um circuito percorrido por corrente constante; **(b)** o fio é curvado em **M** e o campo elétrico nesse ponto e nas suas redondezas tem a sua direção modificada. Os módulos e orientações dos campos elétricos nos pontos **K**, **L**, **N**, **O** e **P** não foram alterados pela torção ocorrida em **M**.

Se o campo elétrico na região em que os fios foram torcidos fosse produzido unicamente pelas cargas localizadas na bateria, alguma alteração no brilho da lâmpada deveria ser verificada, por causa da superposição dos campos naquele trecho. A lâmpada poderia até mesmo apagar. Como nenhuma redução no brilho da lâmpada é observada, concluímos que as cargas na bateria não podem ser as únicas responsáveis pelo campo elétrico no interior dos fios condutores e do filamento da lâmpada.

Outro aspecto que pode ser analisado para refutar a concepção de que o campo elétrico em todos os pontos de um circuito é produzido exclusivamente pelas cargas da bateria, se refere à dependência que o brilho da lâmpada deveria possuir com a distância à fonte de tensão. Caso as cargas da bateria fossem as únicas fontes do campo elétrico no interior

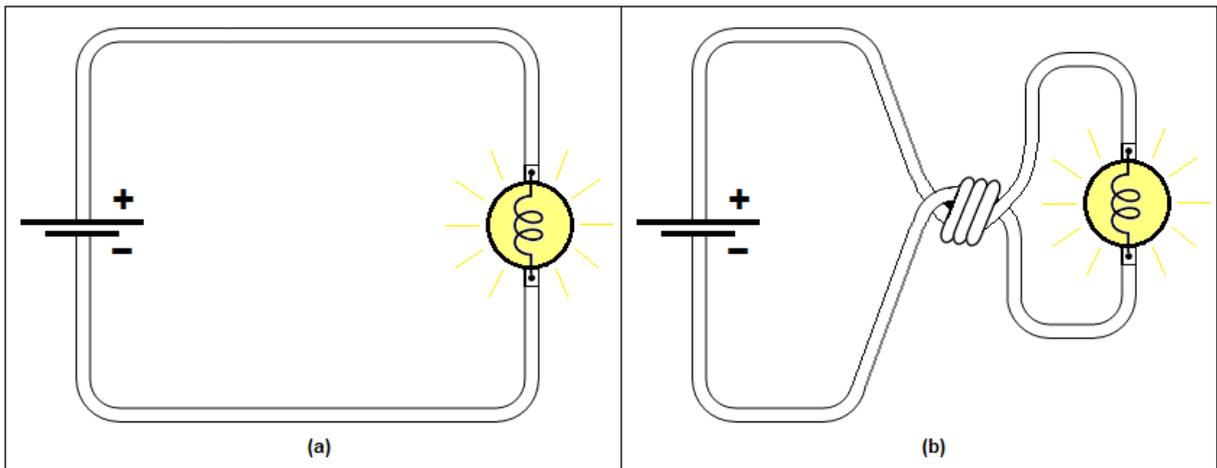


Figura 2.2: **(a)** Nesta configuração a lâmpada brilha normalmente; **(b)** os fios são torcidos um sobre o outro e não se observa qualquer mudança no brilho da lâmpada.

do filamento da lâmpada, aproximando-a da bateria seu brilho deveria aumentar. Mais uma vez a observação contradiz expectativa criada pela suposição a respeito da fonte do campo elétrico, pois não se constata nenhuma alteração no brilho da lâmpada.

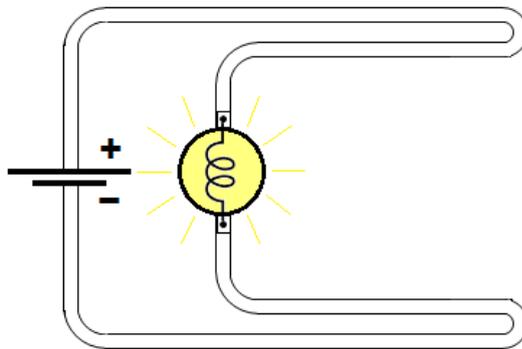


Figura 2.3: Contrariando a hipótese do campo elétrico no filamento ter sua origem nas cargas da bateria, o brilho da lâmpada não aumenta quando ela é aproximada da fonte de tensão.

As situações que foram discutidas ainda não respondem a pergunta, mas nos levam a abandonar a ideia de que as cargas da bateria são a fonte do campo elétrico responsável pela corrente elétrica em todos os pontos do circuito. Além disso, elas revelam uma pista de onde procurar as cargas elétricas que produzem o campo elétrico no interior dos fios. Uma mudança local na forma do condutor altera a orientação do campo elétrico no local.

A forma do fio não produz campo elétrico, mas se existirem cargas sobre a superfície dele sua distribuição dependerá da geometria do condutor e, como se sabe, a configuração do campo depende da densidade superficial das cargas elétricas. Isso pode ser um indicativo de que existam cargas espalhadas sobre a superfície do fio. Veremos nas seções e capítulos posteriores que a existência de uma densidade de carga na superfície dos condutores é capaz de explicar as características do campo elétrico nos diferentes pontos do circuito.

## 2.2 Sobre a existência de cargas distribuídas sobre a superfície de condutores conduzindo corrente constante

O estudo da distribuição da carga elétrica na superfície de condutores e da configuração do campo elétrico associado é discutido frequentemente no âmbito da eletrostática, sendo encontrado facilmente nos livros-texto de uso corrente. Em contrapartida, pouquíssimas obras do gênero enfatizam a existência de uma densidade de cargas elétricas na superfície de um condutor percorrido por uma corrente constante [1] ou analisam em detalhe sua distribuição e seus efeitos [2, 3, 4]. Uma discussão sobre os motivos que levaram tantos pesquisadores a desconsiderarem a presença de cargas na superfície de condutores percorridos por correntes elétricas constantes pode ser encontrada em Assis e Hernandez [4]. Comentaremos brevemente algumas interpretações fenomenológicas que nos permitirão localizar temporalmente a persistência dessa concepção entre os pesquisadores.

A suposição de que um fio resistivo em repouso transportando uma corrente elétrica constante é neutro interna e superficialmente leva a conclusão de que, se colocada uma carga elétrica próxima e em repouso em relação a ele, não haverá qualquer força agindo sobre ela.<sup>2</sup> Essa constatação foi reconhecida por Clausius<sup>3</sup> como um princípio, estando, segundo ele, em acordo com a experiência. Em 1877, ele declarou: “Aceitamos como

---

<sup>2</sup>Desconsidera-se o fato de a carga em repouso induzir cargas na superfície do condutor.

<sup>3</sup>Rudolf J. E. Clausius (1822-1888), físico alemão reconhecido por sua notável contribuição à termodinâmica.

critério o resultado experimental de que uma corrente constante fechada fluindo em um condutor estacionário não exerce força sobre uma carga parada.”<sup>4</sup> (*apud* Assis; Hernandez, 2009, p. 25)

Feynman, Leighton e Sands [5] demonstram concordância com a neutralidade interna e superficial de um condutor transportando uma corrente elétrica quando analisam a relatividade dos campos elétricos e magnéticos a partir do comportamento de uma carga negativa que se move com velocidade  $v_0$  paralela a um fio que conduz uma corrente, sob o ponto de vista de dois referenciais:  $S$ , solidário ao fio, e  $S'$ , fixo na carga.

Em um condutor normal, como o cobre, as correntes elétricas são provenientes dos movimentos de alguns elétrons negativos - chamados de elétrons de condução - enquanto as cargas nucleares positivas e os demais elétrons permanecem fixos no corpo do material. Seja  $\rho_-$  a densidade dos elétrons de condução e  $v$  sua velocidade no referencial  $S$ . A densidade das cargas em repouso em  $S$  é  $\rho_+$  que deve ser igual ao negativo de  $\rho_-$ , uma vez que estamos considerando um fio descarregado. Portanto, não existe nenhum campo elétrico no exterior do fio e a força na partícula que se move é simplesmente  $\vec{F} = q\vec{v}_0 \times \vec{B}$ .

Em relação ao sistema de referência  $S$ , se considerada a carga elétrica superficial no condutor, a força sobre a carga seria  $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B})$ , onde  $\vec{u}$  é a velocidade da carga em relação a  $S$  e  $\vec{E}$  o campo elétrico externo criado pelo fio.

Adiante, ao analisarem o fluxo de energia do campo eletromagnético criado por um fio resistivo conduzindo uma corrente, Feynman, Leighton e Sands consideram agora a existência de um campo elétrico externo paralelo à superfície do condutor.

[...] perguntamos o que acontece em um pedaço de fio resistivo quando ele está conduzindo uma corrente. Como o fio possui uma resistência, existe um campo elétrico ao longo do seu interior, dirigindo a corrente. Devido à queda de potencial ao longo do fio, também existe um campo elétrico exterior ao fio, paralelo a sua superfície [...]. Além disso, existe um campo magnético que rodeia o fio, por causa da corrente. Os campos  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  são perpendiculares; então existe um vetor de Poynting dirigido radialmente para dentro [...]. Existe um fluxo de energia entrando no fio vindo do espaço a sua volta. Ele é, obviamente,

---

<sup>4</sup>Segundo Assis e Hernandez [4] não há registros sobre tais experimentos.

igual à energia que está sendo perdida pelo fio em forma de calor. Então a nossa teoria “maluca” afirma que os elétrons estão obtendo energia para gerar calor por causa da energia fluindo para dentro do fio vinda do campo externo. A intuição nos diria que os elétrons estão obtendo energia por serem empurrados ao longo do fio. Então a energia deveria estar fluindo para baixo (ou para cima) ao longo do fio. Mas a teoria afirma que os elétrons estão sendo empurrados na verdade por um campo elétrico que veio de algumas cargas muito distantes, e que os elétrons obtêm a sua energia para gerar calor a partir destes campos. De alguma maneira, a energia flui das cargas distantes até uma vasta área de espaço e então para dentro do fio.

A dificuldade encontrada em explicar o fluxo de energia para o fio é resolvida levando-se em conta a componente normal do campo elétrico devido a distribuição superficial de cargas. O vetor de Poynting deixa de ser radial e torna-se oblíquo à superfície do condutor. Uma das componentes desse vetor corresponde a que foi analisada pelos autores enquanto a outra permite identificar de onde a energia está fluindo. Outro aspecto que deve ser mencionado é que a origem do campo elétrico diretor da corrente elétrica no fio se encontra predominantemente nas cargas espalhadas sobre a superfície dele.

A crença na ausência de cargas superficiais nos condutores parece ser compartilhada também por Reitz, Milford e Christy [6]. Ao considerarem o campo elétrico em um fio condutor reto de seção uniforme submetido a uma diferença de potencial constante, os autores concluem que a inexistência de uma distribuição de carga na superfície do condutor decorre da condição de corrente estacionária<sup>5</sup>,  $\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0$ . O argumento é verdadeiro para o interior do fio, porém dada a descontinuidade da componente normal do campo elétrico a inexistência de uma distribuição superficial de carga não pode ser concluída a partir da condição de corrente estacionária.

É claro que não pode haver componente, em estado estacionário de campo elétrico, perpendicular ao eixo do fio já que, pela Eq. (7-10) [ $\vec{J} = g\vec{E}$ ], isso produziria uma carga contínua na superfície do fio. Dessa forma, o campo elétrico é puramente longitudinal.

---

<sup>5</sup>Tal condição será demonstrada na seção 2.1.

Embora a componente normal do campo elétrico próxima à superfície de um condutor transportando uma corrente elétrica venha sendo negligenciada ao longo de décadas, a indicação teórica da sua existência é conhecida desde o século XIX com os trabalhos de G. Kirchhoff [7] e W. Weber<sup>6</sup>. Segundo Varney e Fisher [8], C. Schaefer<sup>7</sup> apresentou em 1932 a análise do caso de um fio retilíneo longo transportando uma corrente constante cercado por um condutor cilíndrico oco coaxial aterrado, mas que não transportava corrente, e sua solução mostrava a distribuição da carga, do campo e do potencial elétricos no fio. Marcus [9], em 1941, e Sommerfeld [2], em 1948, abordaram situações semelhantes<sup>8</sup> a analisada por Schaefer, encontrando resultados essencialmente iguais.

A existência de cargas superficiais em condutores percorridos por corrente constante foi demonstrada experimentalmente em 1962 por Jefimenko [10] utilizando modelos condutores de vários formatos impressos sobre placas de vidro com uma tinta condutora transparente, submetidos a uma fonte de alta voltagem (cerca de  $10^4$  V) e baixa corrente elétrica. Inspirados pelos experimentos de Jefimenko, Parker [11] e Moreau *et al* [12] elaboraram modelos experimentais demonstrativos que possibilitam a exploração dos efeitos decorrentes da presença de cargas elétricas distribuídas na superfície de condutores percorridos por uma corrente para ampliar a compreensão sobre os conceitos associados à eletrodinâmica e aproximar a eletrostática do ensino de circuitos elétricos. A figura 2.4 mostra alguns dos resultados encontrados por Jefimenko para condutores de várias geometrias, demonstrando ótimo acordo entre a teoria e o resultado experimental<sup>9</sup>.

As soluções encontradas por Marcus e Sommerfeld mostram que o campo elétrico no interior de um fio retilíneo transportando uma corrente constante é gerado pelas cargas

---

<sup>6</sup>Uma discussão dos trabalhos de Kirchhoff e Weber pode ser encontrada em [4].

<sup>7</sup>O resultado de Schaefer foi publicado no terceiro volume da sua coleção *Einführung in die Theoretische Physik*.

<sup>8</sup>Marcus e Sommerfeld consideraram a situação em que o fio condutor retilíneo tinha ao seu redor um cilindro oco e coaxial com o fio, através do qual a corrente retornava à bateria. Entretanto, enquanto Marcus assume que o cilindro é perfeitamente condutor, Sommerfeld admite que a condutividade dele é finita.

<sup>9</sup>Para maiores detalhes sobre esse e outros experimentos que investigaram a existência de campos elétricos fora de condutores resistivos percorridos por correntes constantes confira Assis e Hernandez [4].

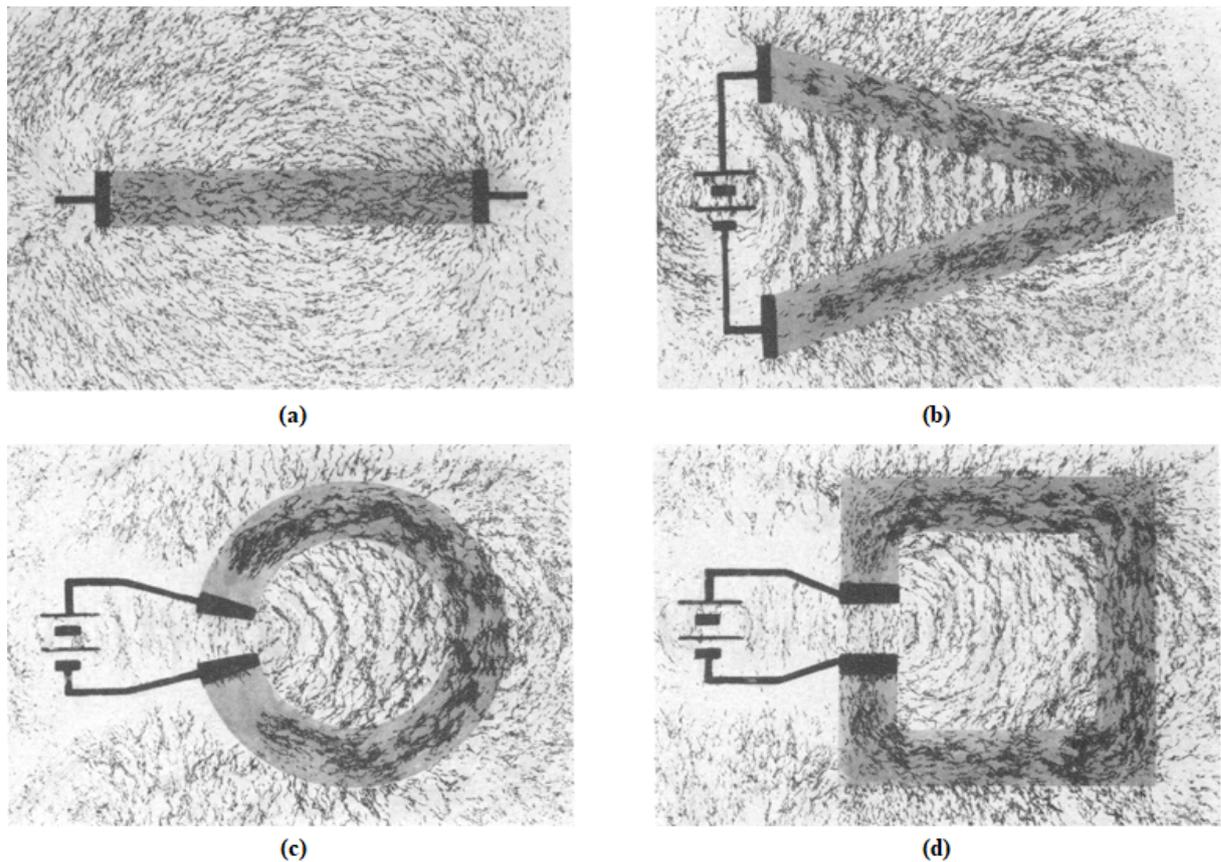


Figura 2.4: Resultados experimentais obtidos por Jefimenko [10]. **(a)** Campo elétrico de um condutor retilíneo; **(b)** campo elétrico de dois condutores retilíneos que se cruzam; **(c)** campo elétrico de um anel condutor circular; **(d)** campo elétrico de um anel condutor de formato quadrado.

elétricas espalhadas na superfície do condutor. Jackson [13] identificou que a densidade superficial de cargas desempenha três papéis: *(i)* manter o potencial ao redor do circuito; *(ii)* fornecer o campo elétrico ao espaço externo dos condutores; *(iii)* e garantir o fluxo confinado da corrente. Os cálculos realizados por Rosser [14] demonstraram que a configuração do campo elétrico é particularmente sensível à mudanças extremamente pequenas na distribuição das cargas. Dessa forma, uma dificuldade evidente que se apresenta aos que se propõem a determinar analiticamente a densidade superficial de carga em circuitos percorridos por corrente reside na dependência que a distribuição de carga tem com a geometria do condutor. De fato, as soluções analíticas encontradas na literatura

têm se encarregado das configurações geométricas mais simples, como pode ser verificado nos trabalhos de Jackson [13], Hernandez e Assis [15] e Heald [16]. Para contornar essa dificuldade, diferentes estratégias têm sido empregadas para definir formas de explorar a interpretação microscópica dos processos físicos em curso nos circuitos elétricos, seja para investigar a distribuição superficial de carga ou o fluxo de energia entre a bateria e os elementos do circuito: abordagens qualitativas ou semiquantitativas [17, 18, 19, 20, 21], uso de algoritmos computacionais [23, 24] e método de construção gráfica das linhas equipotenciais [22].

## 2.3 Caracterização dos campos elétricos de um fio resistivo conduzindo uma corrente estacionária

Consideremos um condutor ôhmico conduzindo uma corrente elétrica de intensidade  $i = \frac{dq}{dt}$  através de uma superfície arbitrária  $\mathcal{S}$ , fixa ao longo do tempo. Se  $\mathcal{S}$  for uma superfície fechada, envolvendo uma região de volume  $\mathcal{V}$ , a quantidade de carga dentro de  $\mathcal{S}$  pode ser escrita em termos da densidade volumétrica de carga  $\rho(\vec{r}, t)$  como

$$q(t) = \int_{\mathcal{V}} \rho dV. \quad (2.1)$$

Dessa forma,

$$i = \frac{d}{dt} \int_{\mathcal{V}} \rho dV = \int_{\mathcal{V}} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV, \quad (2.2)$$

onde incorporamos a derivada temporal à integração, lembrando que ela só atua sobre  $\rho(\vec{r}, t)$ .

A conservação da carga elétrica nos diz que a variação da quantidade de carga no volume  $\mathcal{V}$  é igual a quantidade de carga que passa através da superfície  $\mathcal{S}$ , entrando ou saindo dela. Para determinar a quantidade de carga que atravessa a superfície  $\mathcal{S}$  definimos a densidade de corrente  $\vec{J}(\vec{r}, t)$ , tal que  $di = \vec{J}(\vec{r}, t) \cdot \hat{n} dS$ . Assim sendo, a taxa de variação

da quantidade de carga encerrada no volume  $\mathcal{V}$  é dada por

$$\frac{dq}{dt} = - \oint_S \vec{J} \cdot \hat{n} dS, \quad (2.3)$$

onde  $\hat{n}$  é o vetor unitário normal à fronteira  $\mathcal{S}$ , orientado para fora da superfície.

De acordo com o teorema da divergência

$$\int_{\mathcal{V}} \vec{\nabla} \cdot \vec{J} dV = \oint_S \vec{J} \cdot \hat{n} dS. \quad (2.4)$$

Combinando as Eqs. 2.2, 2.3 e 2.4 podemos escrever

$$\int_{\mathcal{V}} \vec{\nabla} \cdot \vec{J} dV = - \int_{\mathcal{V}} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV$$

ou

$$\int_{\mathcal{V}} \left( \vec{\nabla} \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) dV = 0. \quad (2.5)$$

Tal como a superfície,  $\mathcal{V}$  é arbitrário. Isso implica que o integrando obrigatoriamente deve ser nulo. Sendo assim, chegamos à equação de continuidade que relaciona a densidade de corrente  $\vec{J}(\vec{r}, t)$  às variações na densidade de carga  $\rho(\vec{r}, t)$  e expressa a conservação local da carga elétrica:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0. \quad (2.6)$$

Como estamos interessados em correntes estacionárias, a densidade de carga não depende explicitamente do tempo e a Eq. 2.6 reduz-se à condição de corrente estacionária

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0. \quad (2.7)$$

Se nos detivermos apenas aos condutores cujo comportamento obedeça a lei de Ohm, sabemos que é constante a razão entre a densidade de corrente e o campo elétrico [25, 26]:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}. \quad (2.8)$$

A constante de proporcionalidade  $\sigma$  é a condutividade elétrica do material e é independente do campo elétrico.

Podemos adicionar a nossa análise o fato de correntes estacionárias produzirem campos magnéticos independentes do tempo. Dessa forma, a lei de Faraday nos diz que

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \vec{0}. \quad (2.9)$$

Obtivemos, portanto, um conjunto de equações que definem o fluxo de corrente em um meio ôhmico não dispersivo e estacionário [27]:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0.$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}.$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \vec{0}.$$

As Eqs. 2.7, 2.8 e 2.9, combinadas com a lei de Gauss  $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ , nos levam às seguintes conclusões:

1. *Neutralidade interior do condutor.* Substituindo a Eq. 2.8 na Eq. 2.7 encontramos  $\sigma \vec{\nabla} \cdot \vec{E} + \vec{E} \cdot \vec{\nabla} \sigma = 0$ . Como  $\sigma$  é uniforme, resulta que  $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$ . Portanto, a densidade de carga elétrica  $\rho$  no interior do condutor deve ser nula;
2. *Solução análoga a de um problema eletrostático.* Como consequência da lei de Gauss e da Eq. 2.9, temos que  $\vec{E} = -\vec{\nabla} \phi$ . E já que  $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$ , encontramos a equação de Laplace,  $\nabla^2 \phi = 0$ . Como resultado, o potencial elétrico escalar  $\phi(\vec{r})$  de um condutor transportando uma corrente constante pode ser encontrado da mesma forma que nas distribuições estáticas de carga, tomando-se o cuidado de fixar as condições de contorno adequadas.

Portanto, o regime estacionário de corrente em um fio condutor ôhmico, independentemente da sua geometria, é caracterizado por: **(i)**  $\sigma$  uniforme; **(ii)**  $\rho = 0$ ; **(iii)**  $\nabla^2\phi = 0$ .

Sabemos, agora, que podemos aplicar a solução dos problemas eletrostáticos às situações envolvendo correntes estacionárias respeitando as condições de contorno apropriadas. Entretanto, a solução da equação  $\nabla^2\phi = 0$  é dificultada pela geometria do condutor, pois dela depende a distribuição superficial de cargas. Felizmente, como demonstrou Russel [28], em condutores retilíneos longos constituídos de material homogêneo e isotrópico, possuindo seções transversais de forma arbitrária, cercados por um meio isolante de permissividade elétrica constante  $\epsilon$ , conduzindo correntes constantes, o potencial elétrico (dentro e fora do condutor) e a densidade superficial de carga variam linearmente com a distância ao longo do eixo do condutor<sup>10</sup>. A descoberta de Russell se baseou no fato de que no interior dos condutores percorridos por corrente elétrica constante, o campo elétrico tem a mesma componente ao longo do eixo do condutor, o que decorre da combinação das Eqs. 2.7, 2.8 e 2.9. A Fig. 2.5, extraída do trabalho de Härtel [29], ilustra qualitativamente o resultado encontrado por Russell.

É oportuno mencionar que como observaram Matzek e Russel [30] e Miranda [31], devido à ação do campo magnético interno gerado pela própria corrente elétrica, os elétrons de condução sofrem a ação de uma força direcionada para o eixo do fio. Se a densidade de corrente  $\vec{J}$  é uniforme e paralela ao eixo do condutor, a componente radial da força de Lorentz sobre os portadores de carga livres deve ser nula. Sendo assim, a força responsável por equilibrar o termo proporcional a  $\vec{v} \times \vec{B}$  deve ser causada por uma componente radial campo elétrico, em contradição com o que determina o conjunto de eqs. 2.7, 2.8 e 2.9. Entretanto, como foi demonstrado por Assis *et al* [32], o módulo dessa componente é desprezível quando comparada com a intensidade do campo elétrico longitudinal.

De acordo com a análise que foi apresentada, podemos concluir que o campo elétrico

---

<sup>10</sup>As hipóteses de Russell são boas aproximações mesmo para circuitos realistas, desde que estejamos analisando pontos do fio longe de seus terminais e de qualquer região na qual o fio esteja fazendo uma curva.

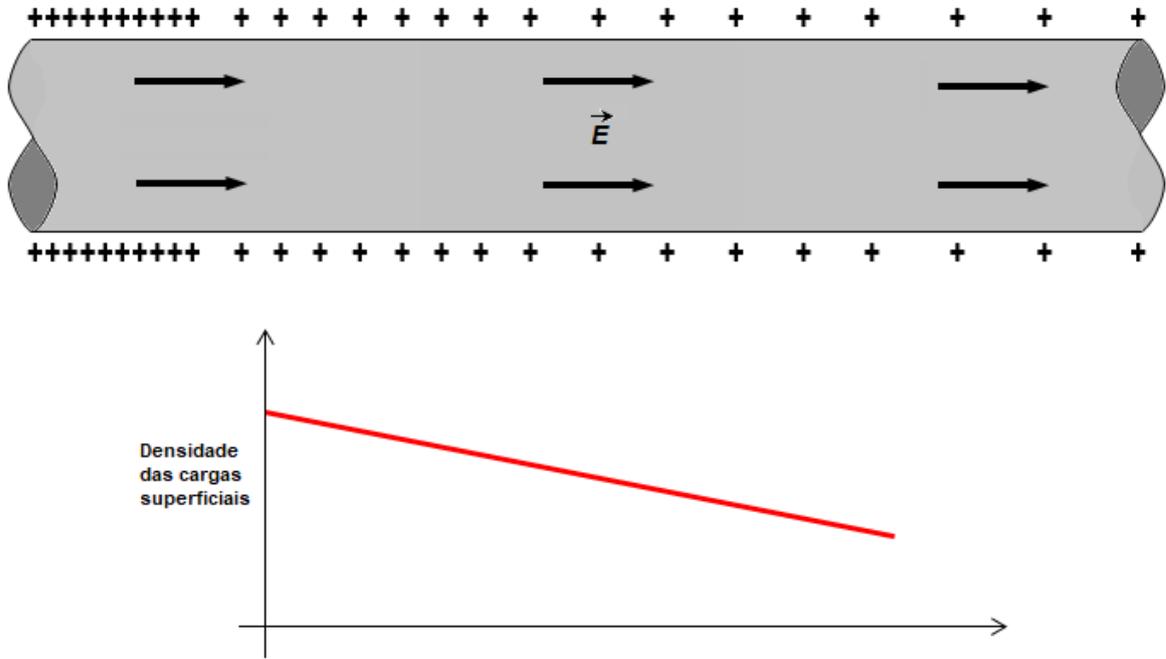


Figura 2.5: Variação linear da densidade de carga na superfície de um fio condutor ôhmico retilíneo e infinitamente longo. Imagem extraída do trabalho de H. Härtel [29].

no interior de um fio condutor percorrido por uma corrente elétrica constante é uniforme e deve ser paralelo ao fio em todas as posições. Uma forma de se demonstrar que o campo elétrico (e, por conseguinte, a densidade de corrente) deve ser uniforme em toda a seção transversal de um fio transportando corrente elétrica constante é apresentada no livro de Chabay e Sherwood [1]. Os autores consideram um fio homogêneo, uniformemente resistivo e de seção transversal arbitrária uniforme, transportando uma corrente elétrica constante, conforme a Fig. 2.6.

Consideremos o percurso  $ABCD$  tal que,  $AB$  e  $CD$  sejam paralelos ao eixo do condutor e  $BC$  e  $DA$  sejam perpendiculares a esse eixo. Ao longo da trajetória retangular  $ABCD$  a diferença de potencial é nula. Podemos, então, escrever que

$$\Delta\phi_{ABCD} = -\oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -\left(\int_A^B \vec{E}_1 \cdot d\vec{\ell} + \int_B^C \vec{E}_2 \cdot d\vec{\ell} + \int_C^D \vec{E}_3 \cdot d\vec{\ell} + \int_D^A \vec{E}_4 \cdot d\vec{\ell}\right) = 0.$$

As contribuições das integrais de linha do campo elétrico nos trechos  $BC$  e  $DA$  são nulas, pois  $\vec{E}$  e  $d\vec{\ell}$  são perpendiculares, uma vez que no estado estacionário o campo elétrico tem que ser paralelo ao eixo do fio. Conclui-se, portanto, que  $E_1$  e  $E_3$  têm que ser

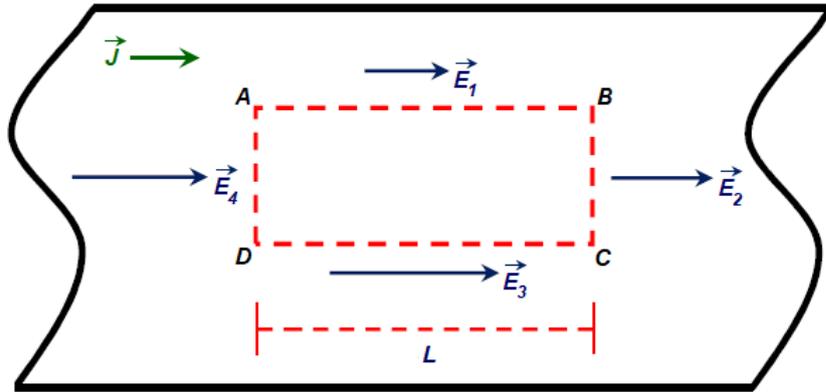


Figura 2.6: Suposta não-uniformidade do campo elétrico no interior do fio condutor. Imagem extraída do livro de R. Chabay e B. Sherwood [1] (adaptada).

iguais. Como  $\vec{J} = \sigma \vec{E}$  e  $\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0$ , resulta que tanto o campo elétrico quanto a densidade de corrente são uniformemente distribuídos em toda a seção transversal do fio condutor.

Nas regiões torcidas do fio o campo elétrico permanece com a mesma intensidade, mas sua direção se modifica mantendo-se paralelo ao eixo do fio. O que explica a mudança de direção do campo elétrico é a modificação local na distribuição superficial de cargas elétricas nas redondezas do segmento do fio que foi encurvado, uma vez que são essas cargas que produzem o campo elétrico no interior do condutor e que sua densidade varia de acordo com o formato do fio. O trabalho de Sefton [33] pode nos ajudar a entender qualitativamente a mudança na densidade superficial de carga quando um fio retilíneo conduzindo uma corrente constante é curvado, como representado na Fig. 2.7.

Um elétron de condução precisa estar sujeito à ação de uma força resultante fora da sua direção de movimento para que ele possa contornar a curva do fio. Caso contrário, os elétrons continuarão sua trajetória de aproximação terminando por acumularem-se na parte externa da curva. Cada porção de carga acumulada na curva contribui para o aumento da força que desvia os outros elétrons que se aproximam. Esse processo cumulativo se encerra quando a região adquire carga superficial suficiente para desviar os elétrons o necessário para percorrermos a curva seguindo a direção do eixo do fio.

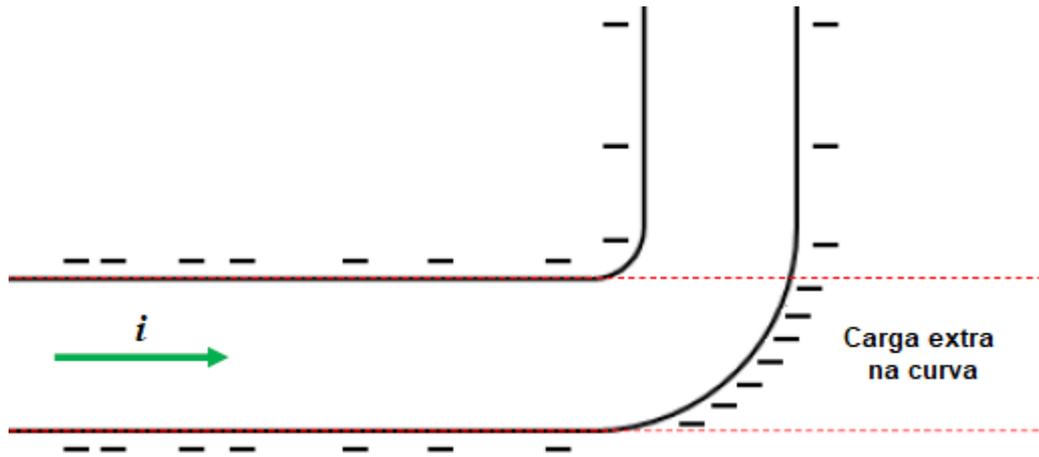


Figura 2.7: Processo de acúmulo de carga na curva de fio condutor. Imagem extraída do livro de R. Chabay e B. Sherwood [1].

### 2.3.1 Condições de contorno para condutores ôhmicos conduzindo correntes constantes

Como visto, a metodologia empregada para a solução de problemas eletrostáticos através da teoria do potencial elétrico pode ser usada para encontrar  $\vec{E}$  e  $\vec{J}$  em um condutor ôhmico homogêneo transportando uma corrente elétrica constante. Para tanto, é necessário fixar apropriadamente as condições de contorno na interface entre dois meios, sejam eles condutores ou um condutor e um dielétrico. Ademais, examinar as condições que definem o comportamento do campo elétrico na fronteira entre dois meios condutores nos permitirá conduzir a análise baseada no modelo de carga superficial para além de um circuito composto por um fio resistivo e uma bateria como fizemos até agora. Poderemos incluir em nosso arranjo o resistor, um elemento que configura um trecho do circuito que apresenta maior resistência à passagem dos elétrons que os outros.

Analisemos primeiro o fluxo da densidade de corrente que atravessa o volume cilíndrico de base  $dS$  e altura  $L$  desprezível colocado sobre a interface de meios de condutividades elétricas  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ , como mostrado na Fig. 2.8.

Já sabemos que no estado de corrente estacionária  $\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0$ . Assim, levando em conta

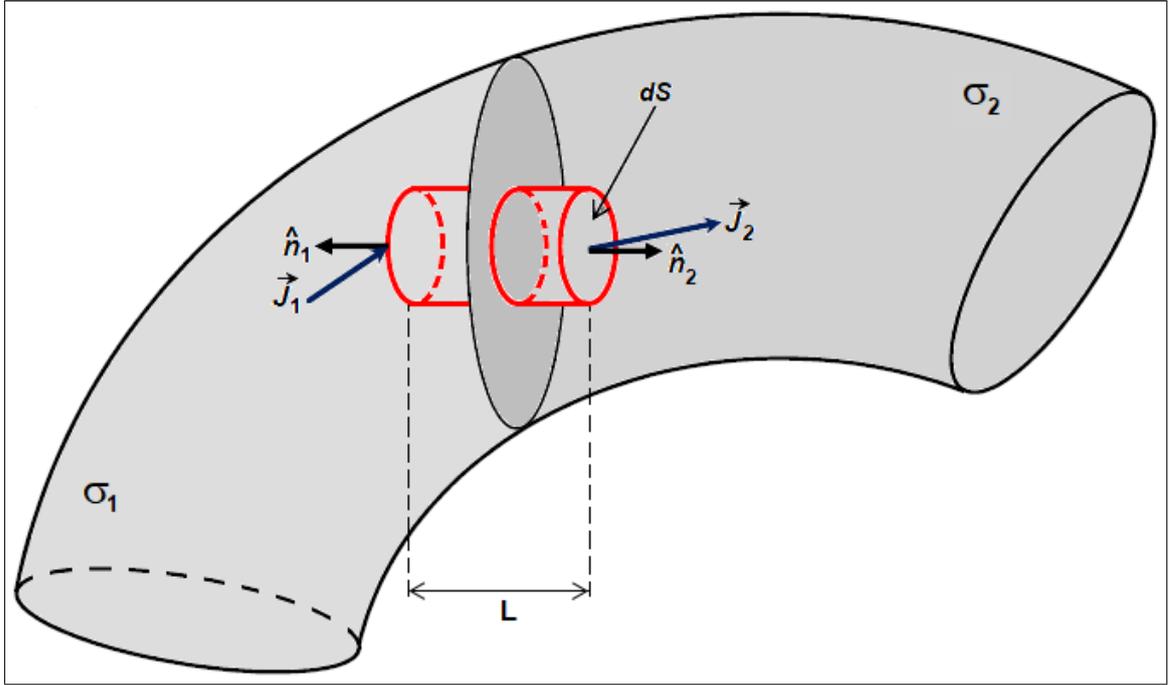


Figura 2.8: Volume cilíndrico atravessando a interface de dois meios condutores.

que  $dS_1 = dS_2$  e que  $\hat{n}_1 = -\hat{n}_2$ , o teorema da divergência nos informa que

$$\int \vec{\nabla} \cdot \vec{J} dV = \oint \vec{J} \cdot \hat{n} dS$$

$$0 = \int \vec{J}_1 \cdot \hat{n}_1 dS_1 + \int \vec{J}_2 \cdot \hat{n}_2 dS_2$$

$$0 = \int (\vec{J}_1 \cdot \hat{n}_1 - \vec{J}_2 \cdot \hat{n}_2) dS.$$

Desse modo, obtemos a condição de continuidade da componente normal da densidade de corrente  $\vec{J}$  (ou do campo elétrico  $\vec{E}$ ) na fronteira entre dois meios condutores:

$$\hat{n} \cdot (\vec{J}_1 - \vec{J}_2) = 0 \quad \text{ou} \quad \hat{n} \cdot (\sigma_1 \vec{E}_1 - \sigma_2 \vec{E}_2) = 0, \quad (2.10)$$

onde  $\hat{n}$  é o vetor unitário normal à interface.

Para explorarmos uma consequência da condição de contorno encontrada na Eq. 2.10 consideremos a conexão condutor-resistor. Suponhamos que as interfaces dos meios mostradas na Fig. 2.9 sejam perpendiculares ao eixo do conjunto condutor-resistor-condutor

e que as condutividades elétricas do condutor e do resistor sejam  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ , respectivamente, tais que  $\sigma_1 > \sigma_2$ . Desse modo, no estado de corrente estacionária,  $\hat{n}$  e  $\vec{E}$  são paralelos, o que nos leva a escrever que  $E_2 = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} E_1$  e concluir que  $E_2 > E_1$ . Avaliando a causa para o aumento na intensidade do campo elétrico no meio mais resistivo observamos, como um resultado direto da aplicação da lei de Gauss, que haverá presença de uma carga superficial em cada interface da junção condutor-resistor, pois as componentes normais do campo elétrico sobre elas não são nulas. Os contatos do resistor ficam, portanto, cobertos com uma carga superficial que polariza o resistor e produz o campo elétrico extra que compensa a menor condutividade do meio, mantendo a intensidade da corrente elétrica constante. Convém salientar que as cargas distribuídas nas junções não são obrigatoriamente de sinais opostos como pode sugerir a Fig. 2.9(b). Ambas podem ser positivas ou negativas, mas com densidades diferentes.

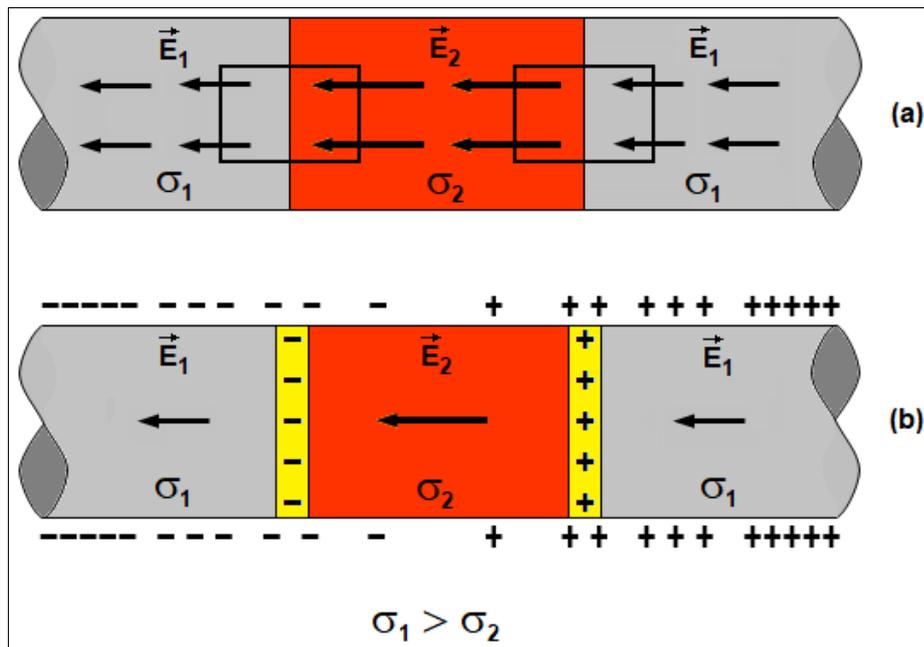


Figura 2.9: (a) Aplicação da lei de Gauss nas interfaces de um condutor e um resistor. (b) Camadas de separação carregadas entre um resistor e um condutor. Imagem extraída do trabalho de H. Härtel [29] (adaptada).

Vale comentar que se um dos meios anteriores for um dielétrico (como em um capacitor,

por exemplo), no estado estacionário de corrente, a condição de contorno apropriada<sup>11</sup> que relaciona as componentes normais dos campos na fronteira entre os meios é dada por  $\hat{n} \cdot (\epsilon_1 \vec{E}_1 - \epsilon_2 \vec{E}_2) = \kappa$ , onde  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$  são as permissividades elétricas dos meios e  $\kappa$  é a densidade de cargas superficiais na interface.

Agora, consideremos um circuito retangular que atravesse a fronteira entre os dois meios condutores como representado na Fig. 2.10. Façamos a integral de linha de  $\vec{E} \cdot d\vec{\ell}$  sobre a trajetória fechada  $ABCD$  admitindo que  $L$  seja suficientemente pequeno, de tal forma que as contribuições provenientes dos segmentos  $BC$  e  $DA$  à soma sejam ignoradas. Aproveitando que no percurso fechado considerado  $d\vec{\ell}_1 = -d\vec{\ell}_2$  e o fato de que é nula a circulação de um campo vetorial expresso como o gradiente de uma função, podemos escrever

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = \int_A^B \vec{E}_1 \cdot d\vec{\ell}_1 + \int_C^D \vec{E}_2 \cdot d\vec{\ell}_2 = \int_A^B (\vec{E}_1 - \vec{E}_2) \cdot d\vec{\ell}_1 = 0$$

$$\vec{E}_1 \cdot d\vec{\ell}_1 = \vec{E}_2 \cdot d\vec{\ell}_2 \quad \text{ou} \quad \hat{n} \times (\vec{E}_1 - \vec{E}_2) = 0 \quad (2.11)$$

onde  $\hat{n}$  é o vetor unitário normal à interface. A Eq. 2.11 nos diz que a componente tangencial do campo elétrico na fronteira que separa dois meios condutores é contínua, de forma que  $E_{t_1} = E_{t_2}$ .

Portanto, além dos argumentos apresentados na seção anterior, podemos ver que a existência de um campo elétrico externo a um condutor transportando uma corrente elétrica constante resulta das próprias condições de contorno. No interior do fio, de fato, o campo é puramente paralelo à superfície. Como a componente tangencial é contínua, existe fora do fio uma componente do campo paralela a ele. Na presença de uma densidade superficial de cargas, a componente normal do campo é descontínua. Como tal componente é nula dentro do fio, ela não pode ser nula fora dele.

---

<sup>11</sup> Admitindo que na região da interface envolvida pelo cilindro haja uma densidade de carga superficial  $\kappa$ , aplicando a lei de Gauss para obter o fluxo do deslocamento elétrico através da superfície do cilindro, obtém-se  $\hat{n} \cdot (\vec{D}_1 - \vec{D}_2) = \kappa$ , onde  $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$  é o deslocamento elétrico e  $\epsilon$  é a permissividade elétrica do material.

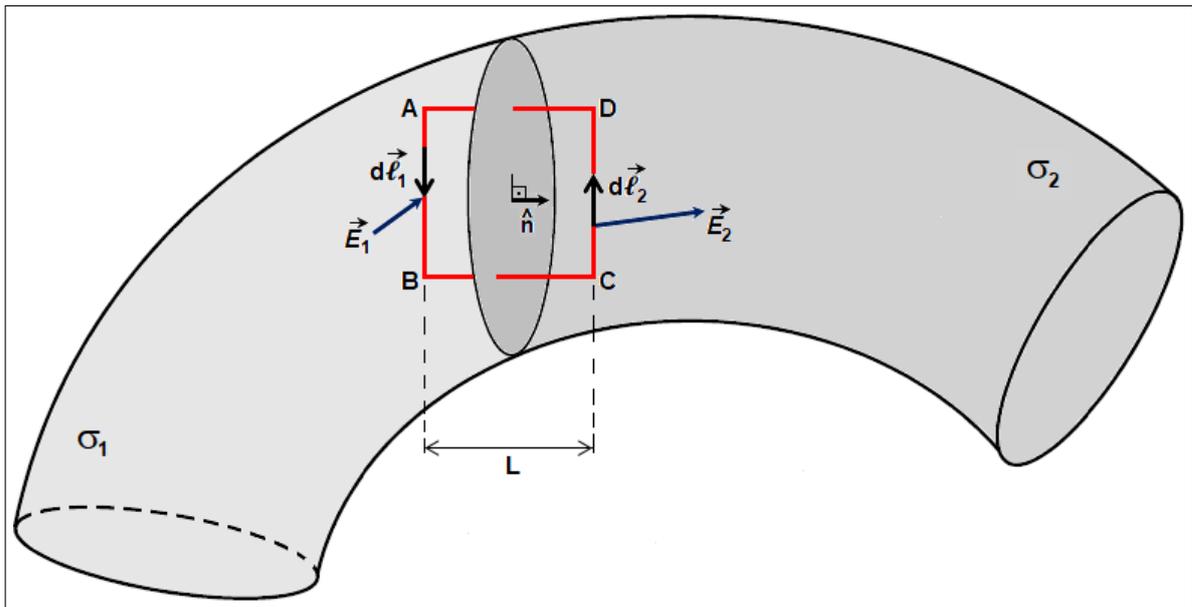


Figura 2.10: Percurso retangular atravessando a fronteira de dois meios condutores.

### 2.3.2 Campo elétrico produzido por um fio resistivo ôhmico conduzindo uma corrente constante

Até agora fundamentamos as características do campo elétrico de um condutor transportando uma corrente elétrica constante e assinalamos que são as cargas elétricas distribuídas sobre ele a origem desse campo. Tal distribuição de carga depende significativamente da geometria do condutor e, por conta disso, a solução analítica da equação de Laplace torna-se bastante comprometida.

Qualitativamente, o campo elétrico de um fio cilíndrico em um ponto do espaço pode ser obtido pela superposição dos campos produzidos pela sucessão de anéis carregados de largura infinitesimal que compõem o fio. Considerando que a densidade superficial de cargas em cada anel é constante, mas varia ao longo do comprimento do fio, utilizando argumentos de simetria, pode-se mostrar que as cargas distribuídas na superfície do fio são responsáveis pela existência de um campo elétrico no eixo do fio. Como o campo elétrico produzido por um anel carregado uniformemente em um ponto sobre o seu eixo de simetria é orientado ao longo desse mesmo eixo, em um ponto  $P$  sobre o eixo de

simetria do condutor e equidistante dos anéis haverá um campo elétrico resultante devido à desigualdade nas densidades de carga dos anéis.

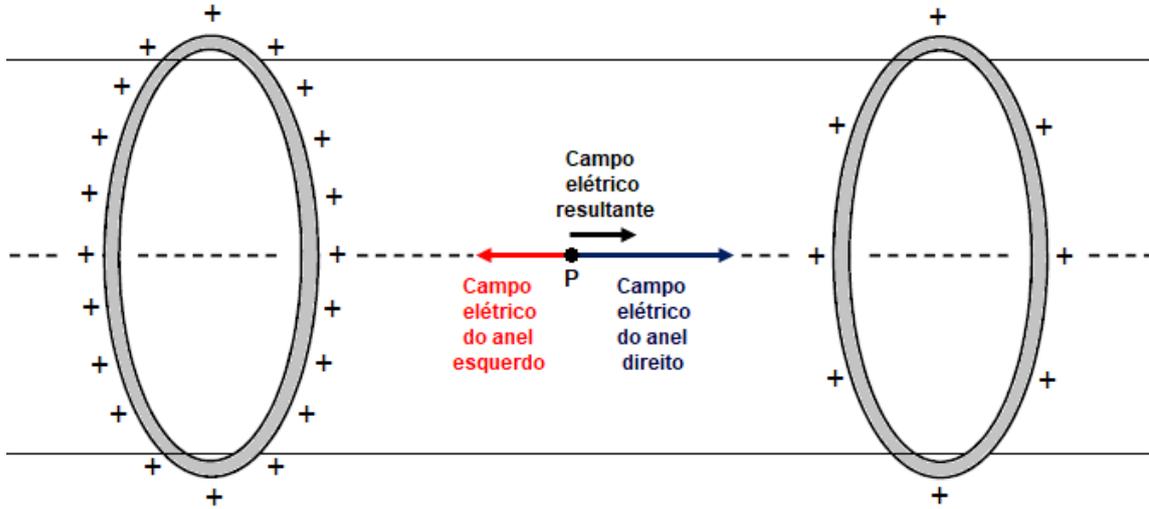


Figura 2.11: Campo elétrico resultante de dois anéis com densidade de carga elétrica superficial desigual. Imagem extraída do trabalho de B. Sherwood e R. Chabay [35].

Se quisermos encontrar as características do campo elétrico produzido por nosso fio cilíndrico em um ponto qualquer do espaço teremos que solucionar a equação  $\nabla^2\phi = 0$  ou encontrar o potencial a partir de uma distribuição de carga prescrita e, em seguida, obter o campo por  $\vec{E} = -\vec{\nabla}\phi$ . Os leitores interessados em se familiarizar com os detalhes matemáticos envolvidos na solução do problema de se determinar a configuração do campo elétrico produzido por um fio resistivo ôhmico longo, retilíneo e de seção circular, com uma condutividade elétrica  $\sigma$  uniforme, percorrido por uma corrente elétrica de intensidade constante  $i$  a partir de uma densidade superficial de carga preestabelecida poderá consultar os trabalhos de Assis *et al* [32] e Coombes e Laue [34]. De forma alternativa, consta no **Apêndice A** uma sequência de argumentos que pode ser utilizada para se concluir, de forma qualitativa, que o campo elétrico no interior do condutor é constante e paralelo à superfície do fio. Não obstante, a combinação das equações de Maxwell com a condição de corrente estacionária, lei de Ohm e condições de contorno apropriadas possibilita demonstrar que o campo elétrico interno é constante e sua direção é paralela ao

eixo do condutor em quaisquer pontos muito distantes das extremidades do fio. Externamente, além de uma componente paralela ao eixo do condutor, existe uma componente perpendicular à superfície do fio. A Fig. 2.12 ilustra essas conclusões.

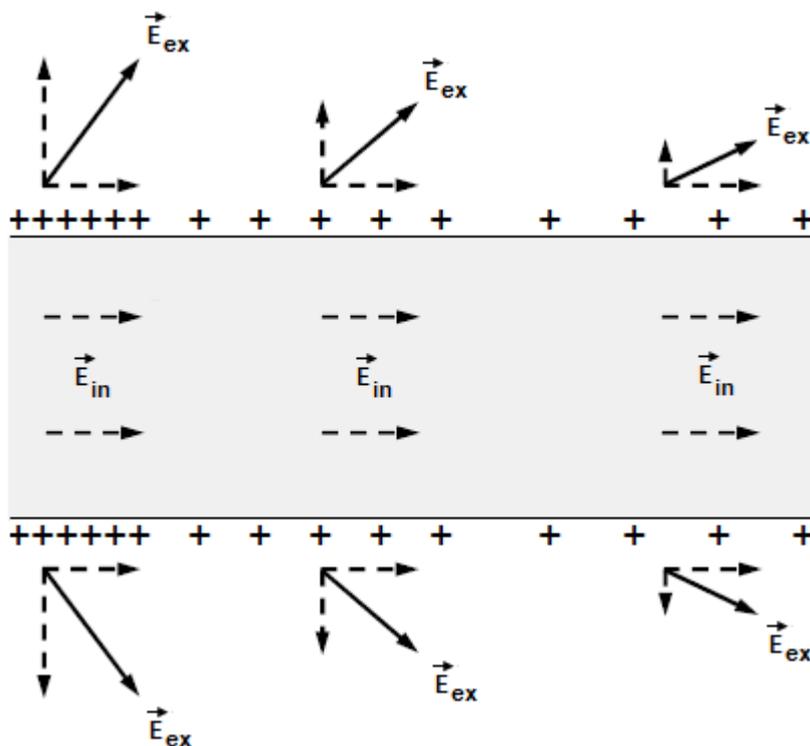


Figura 2.12: Campos elétricos e distribuição de carga de um fio cilíndrico conduzindo uma corrente constante. Imagem extraída do trabalho de S. Parker [11] (adaptada).

## 2.4 Metodologia de ensino de circuitos elétricos baseada na análise da distribuição superficial de carga

Quando os estudantes iniciam seu estudo a respeito de circuitos elétricos se considera que eles já estejam familiarizados com os conceitos de resistência, diferença de potencial, corrente elétrica e energia. Embora pouco se explore sobre o significado dessas grandezas quando se trata da análise de um diagrama representativo de um circuito, as investigações sobre as concepções dos alunos envolvendo esses elementos conceituais relatam a presença de modos de raciocínio confusos ou equivocados, revelando inconsistências com

a interpretação científica e deficiências do modelo tradicional de ensino com relação à fundamentação e ao esclarecimento dessas ideias [36, 37]. Os resultados dessas pesquisas indicam que a forma como muitos estudantes visualizam e interpretam a dinâmica de um circuito elétrico está de acordo com o modelo apresentado na Fig. 2.13. A imagem mostra partículas elétricas com e sem energia percorrendo circuito. Conforme essa interpretação, a energia recebida da bateria fica localizada nas partículas, sendo consumida nos componentes do circuito ao longo do percurso de volta à fonte de tensão [38].

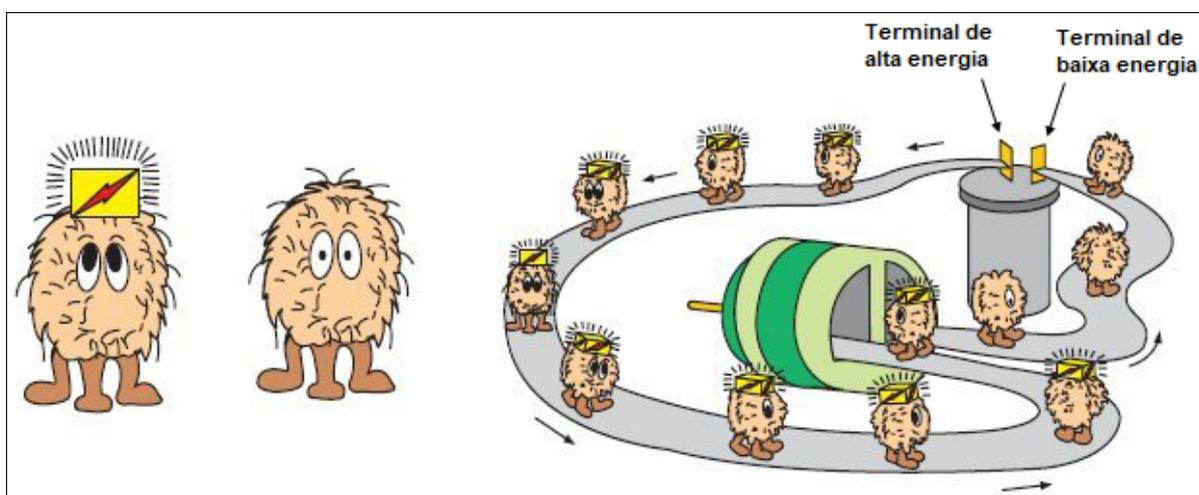


Figura 2.13: Modelo de um circuito elétrico e partículas com progressivamente menos energia. Imagem extraída do trabalho de H. Härtel [39].

A origem e a persistência de concepções como as mostradas na Fig. 2.13 é um campo de pesquisa que vem sendo explorado ao longo de décadas e que tem confirmado a presença de tais formas de raciocínio em alunos de diferentes países. Em vista disso, a observação dos modelos interpretativos utilizados pelos aprendizes requer a atenção dos educadores que se propõem a elaborar sequências didáticas que permitam esclarecer de forma efetiva os conceitos que são utilizados na análise dos circuitos elétricos.

A metodologia de análise de circuitos elétricos que apresentaremos está fundamentada principalmente no trabalho de Härtel [39] e no já citado livro-texto de Chabay e Sherwood. Como esses autores, exploraremos o aspecto fenomenológico dos processos físicos que ocorrem nos componentes de um circuito através do exame da distribuição de cargas

elétricas em sua superfície, enfatizando sua importância como a fonte do campo elétrico que produz e mantém a corrente elétrica nos fios condutores.

A abordagem de ensino envolve a análise de um circuito elétrico composto por uma fonte de tensão constante, um resistor e fios condutores resistivos. Eventualmente, uma chave interruptora poderá ser incorporada ao arranjo, porém sua presença ou ausência não comprometerá a análise que será efetuada. Princípios por uma breve exposição das características dos componentes do circuito:

### (1) **Bateria**

Além de ser uma fonte portátil de energia, os processos químicos que ocorrem no interior de uma bateria fazem com que elétrons sejam removidos de um dos seus contatos metálicos e transportados para o outro, resultando em um acúmulo de carga elétrica sobre cada um deles. Esse dispositivo consegue manter constante a densidade de carga elétrica nos seus contatos e, por isso, exerce um papel fundamental no circuito: sustentar a distribuição das cargas elétricas superficiais nos diferentes pontos do circuito. A Fig. 2.14 apresenta a analogia usada por Chabay e Sherwood com uma “bateria mecânica” e pode auxiliar a compreensão do trabalho interno realizado pelas forças não-conservativas na bateria. Um motor move uma esteira que retira elétrons de uma placa, deixando-a positiva e os transporta até a outra placa, tornando-a negativa. Esse processo mantém constante a densidade de carga em cada terminal e envolve o dispêndio de energia para o motor funcionar. De forma análoga, as forças não-conservativas realizam trabalho à custa da energia liberada nas reações químicas.

### (2) **Fio condutor**

Consideramos um fio condutor como um objeto metálico cuja estrutura é descrita conforme o modelo de condução elétrica de Drude. Supõe-se que quando os átomos de um metal formam suas ligações, os elétrons da camada de valência se separam dos átomos originais e passam a transitar livremente pelo volume do objeto. Dessa

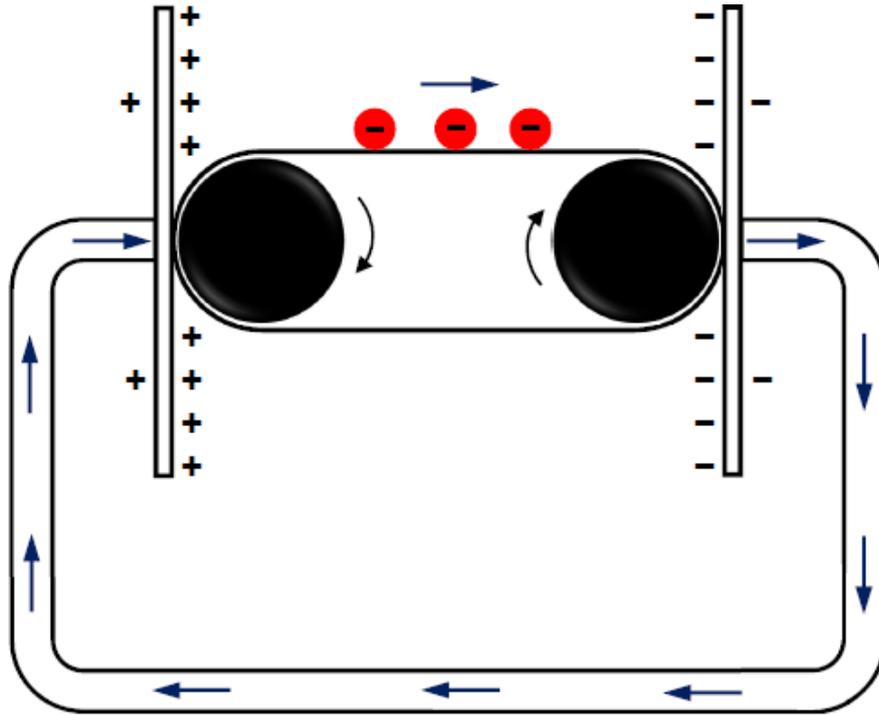


Figura 2.14: Modelo de uma “bateria mecânica. Imagem extraída do livro de R. Chabay e B. Sherwood [1].

forma, um fio condutor é visualizado como uma rede de íons positivos estacionários permeada por um “mar” de elétrons que se deslocam desordenadamente através dela com velocidade média nula, comportando-se como um gás de partículas livres. Enquanto o campo elétrico no interior do condutor é nulo, somente as colisões mecânicas das partículas do gás (elétrons) com os íons da rede são consideradas. Esses eventos são tratados como instantâneos e ocorrem com uma probabilidade por unidade de tempo dada por  $1/\tau$ , onde  $\tau$  é um parâmetro fenomenológico denominado tempo de relaxação, considerado independente da posição e da velocidade do elétron. Devido às colisões, os elétrons são espalhados em todas as direções, percorrendo em seguida trajetórias retilíneas com uma energia cinética média que depende da temperatura absoluta local, em acordo com a teoria cinética dos gases. Embora as interações eletromagnéticas tipo elétron-elétron e elétron-íon sejam desprezadas no modelo original, consideraremos que as repulsões mútuas entre os elétrons livres (ou elétrons de

condução) sejam equilibradas pelas atrações dos íons positivos. Desse modo, como a força resultante sobre um elétron livre é nula, admitiremos que ele efetivamente se move livremente pela rede de íons.

Estando neutro ou transportando corrente elétrica constante a neutralidade global de um condutor é garantida porque a densidade de carga positiva existente na rede de íons é igual a do mar de elétrons em todas as regiões<sup>12</sup>. Quando o condutor sustenta uma corrente elétrica o movimento dos elétrons de condução é retardado por causa das suas colisões com a rede de íons. Macroscopicamente esse retardamento é justificado pela existência da resistência elétrica. Microscopicamente, a condutividade elétrica do material reúne as informações cinemáticas associadas à dinâmica dessas colisões.

### (3) **Resistor**

Tal como o fio, o resistor também é um condutor. Contudo, sua condutividade elétrica é muito inferior a dos fios condutores do circuito. Desse modo, os fenômenos observados nos resistores são semelhantes aos encontrados nos condutores, variando de intensidade conforme a dependência com a condutividade elétrica. Por exemplo, da mesma forma que nos condutores, em um resistor conduzindo uma corrente constante alguma quantidade de energia é transmitida à rede de íons durante as colisões com os elétrons de condução, provocando o aumento da sua agitação térmica e resultando no aquecimento do resistor. Essa energia originalmente encontrava-se na forma de energia potencial elétrica que é mediada pelo campo elétrico. Isso quer dizer que quanto maior for a intensidade o campo elétrico, maior será a quantidade de energia potencial disponível. A redução da energia potencial acarreta o aumento da energia cinética que é dissipada nas colisões. Conseqüentemente, como o campo elétrico no interior do resistor é maior que no fio, por causa da menor condutividade elétrica

---

<sup>12</sup>Desprezaremos a diferença existente entre as densidades de carga positiva e negativa provocada pelo movimento dos elétrons de condução em relação à rede de íons, como demonstrado por M. A. Matzek e B. R. Russell [30]

( $E = J/\sigma$ ), a quantidade de energia transferida nas colisões com os íons do resistor é maior que nas ocorridas com os íons do fio, o que explica porque o resistor aquece mais que o fio.

### 2.4.1 Conectando os fios condutores aos contatos da bateria

Examinar a conexão de um fio condutor neutro com o contato de uma bateria não é diferente de analisar a ligação do mesmo fio condutor com um objeto condutor eletrizado. Conforme é mostrado na Fig. 2.15, quando o contato é estabelecido, sob a ação do campo elétrico do objeto eletrizado, os elétrons de condução do fio condutor ficam submetidos à força  $\vec{F} = q\vec{E}$  que provoca o seu deslocamento em direção ao objeto eletrizado, dando origem a uma corrente elétrica transitória. À medida que esse processo se desenvolve a quantidade de carga excedente no objeto originalmente eletrizado diminui e, conseqüentemente, o mesmo acontece com a sua habilidade de atrair os elétrons. Enquanto isso, devido à redução do número de elétrons livres e a sua redistribuição por causa da repulsão mútua, a densidade de íons positivos do fio excederá a dos elétrons de condução. No equilíbrio, os elétrons de condução serão tão fortemente atraídos pela rede de íons quanto pelo objeto eletrizado, interrompendo o fluxo de cargas e retornando ao estado em que a velocidade média dos elétrons livres é nula. Ao final, a quantidade de carga distribuída sobre os dois objetos é igual a que existia no objeto eletrizado, como exige o princípio de conservação da carga elétrica. Além disso, dada a condição de que no equilíbrio eletrostático o fluxo de cargas é interrompido, toda carga residual encontrar-se-á na superfície do fio e do objeto. O campo elétrico no interior do fio e do objeto é nulo, porém imediatamente fora deles é diferente de zero e perpendicular à superfície. Caso contrário, sob influência do campo elétrico, haveria um deslocamento orientado das partículas móveis carregadas, o que contraria o estado de equilíbrio. Nos condutores eletrizados positivamente o mar de elétrons cobre parcialmente a rede, expondo seu caráter positivo. Quando um condutor está eletrizado negativamente o mar de elétrons cobre completamente a rede de íons.

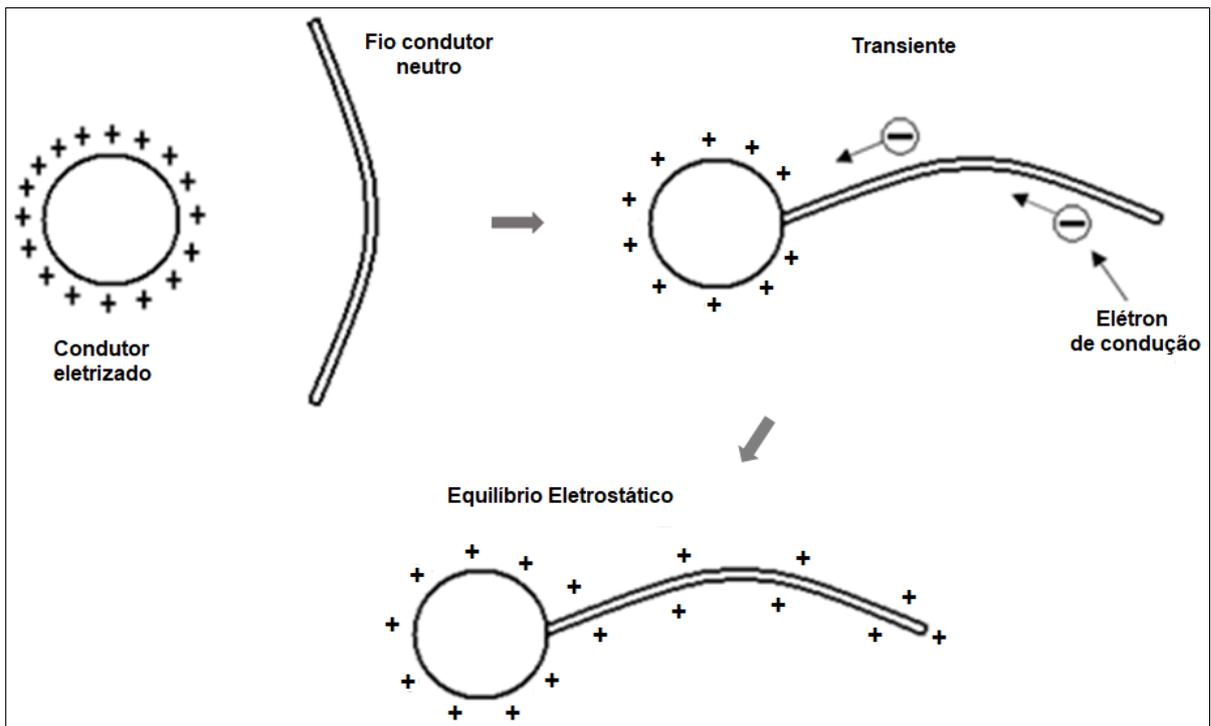


Figura 2.15: Transiente da eletrização pelo contato. Neste momento não está sendo discutida a distribuição de cargas nas torções ou extremidades do fio.

O mesmo processo acontece quando o fio é conectado ao contato da bateria (veja Fig. 2.16). A diferença é que devido à ação das forças não-conservativas existentes no interior da bateria a densidade de carga sobre o contato é mantida constante. Desse modo, a densidade de carga que fica distribuída no fio é igual a do contato da bateria. O fio se transforma num prolongamento do contato e por efeito da repulsão mútua entre os elétrons de condução, o mar de elétrons se distribui pela superfície do condutor de acordo com a sua geometria. No equilíbrio, se o fio for cilíndrico, à exceção das curvas e das extremidades, a distribuição de carga será uniforme ao longo do condutor.

## 2.5 Completando o circuito

Antes de conectarmos as extremidades livres dos fios da Fig. 2.16 é importante analisar mais detalhadamente a configuração do campo elétrico e da distribuição de cargas nessas regiões quando ainda existe entre elas um vão, como ilustrado na Fig. 2.17. A distribuição

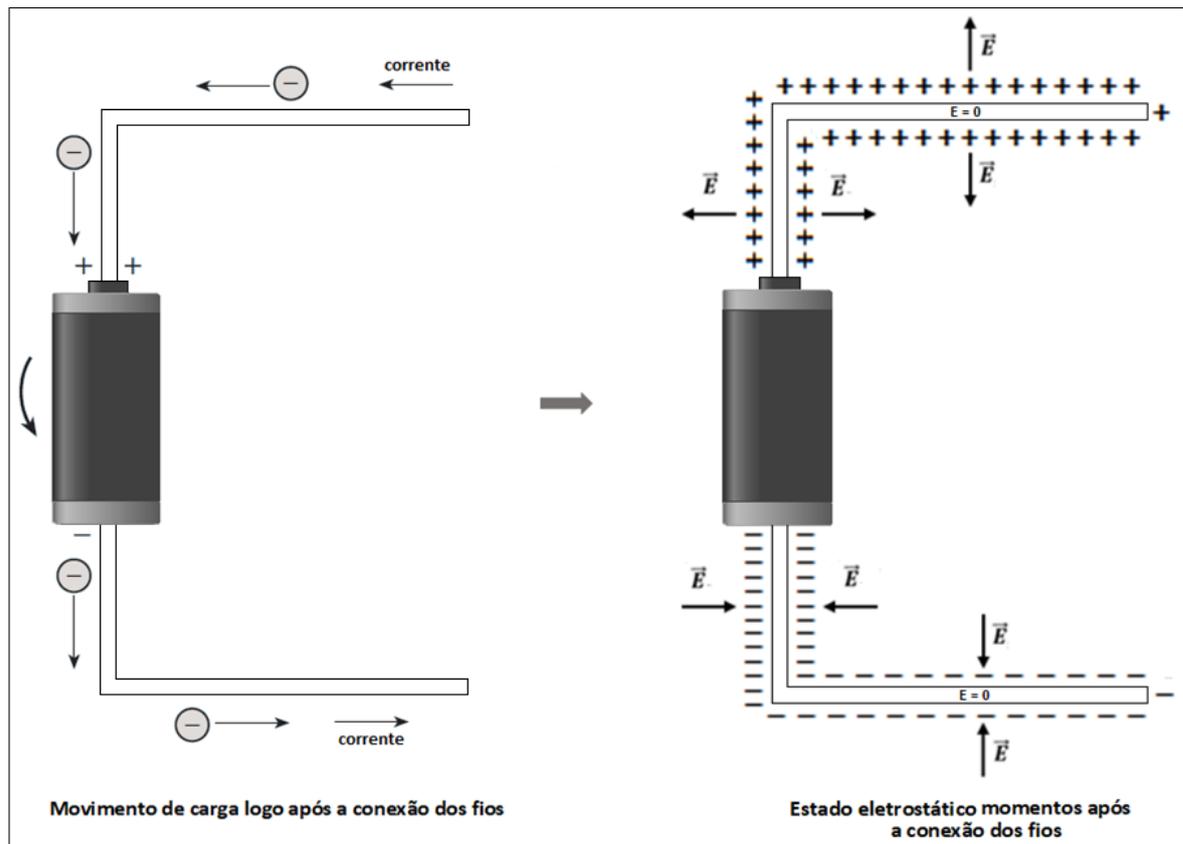


Figura 2.16: Estados transiente e estático durante a conexão dos fios com a bateria. A forma como as cargas se distribuem nas torções ou extremidades do fio não está sendo explorada.

das cargas nas extremidades dos fios é bem mais complexa do que a forma como estamos representando. Contudo, podemos explorar a distribuição apresentada para determinar o efeito produzido pelas cargas no interior dos fios sem prejudicar o resultado final. Para não sobrecarregar a análise a forma como as cargas se distribuem nas torções ou extremidades do fio não será explorada.

Como o sistema está em equilíbrio, o campo elétrico no interior dos condutores é nulo. Sendo assim, em qualquer ponto interno os campos elétricos produzidos pelas cargas que se encontram nas paredes do vão e aqueles produzidos por todas as outras cargas da superfície do fio se equilibram (Fig. 2.18).

Quando eliminamos o vão conectando as extremidades dos fios as cargas distribuídas

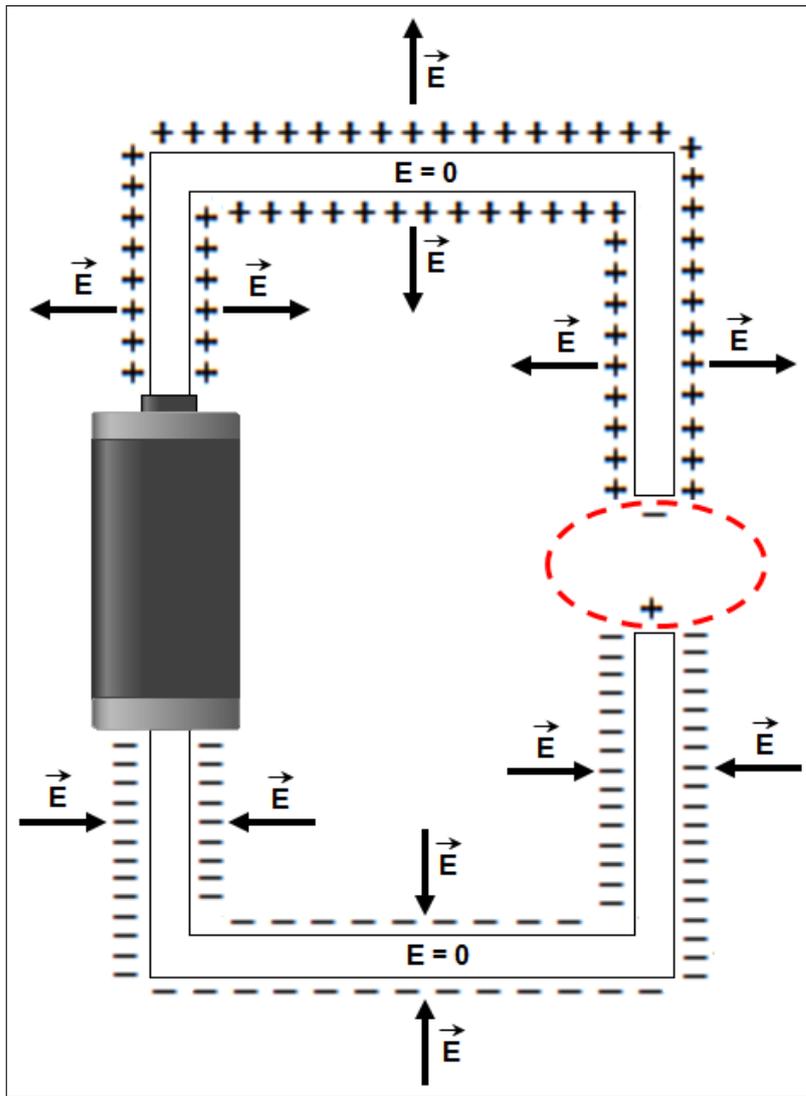


Figura 2.17: Bateria e fios condutores conectados em equilíbrio eletrostático. A região destacada será analisada antes da conexão das extremidades. Imagem extraída do livro de R. Chabay e B. Sherwood [1].

sobre as paredes neutralizam a região interna e o campo devido a elas deixa de existir, restando apenas os campos devido às outras cargas superficiais e uma descontinuidade instantânea na densidade superficial de carga na região onde ocorreu a conexão. Por causa do campo restante, os elétrons de condução serão colocados em movimento provocando a diluição da distribuição superficial de carga e eliminando a descontinuidade. Esse efeito pode ser visualizado observando a Fig. 2.19: na porção esquerda da junção elétrons

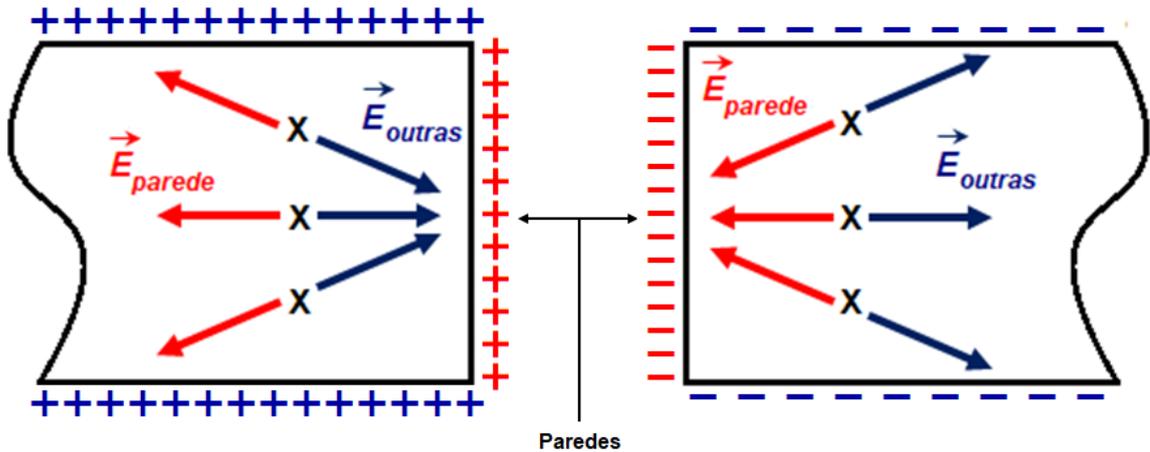


Figura 2.18: Campos produzidos pelas cargas das paredes do vão ( $\vec{E}_{parede}$ ) e de todas as outras cargas da superfície dos fios ( $\vec{E}_{outras}$ ). Imagem extraída do livro de R. Chabay e B. Sherwood [1].

livres serão deslocados para a superfície tornando menos positiva a densidade superficial de carga; na porção direita, elétrons se afastarão da superfície deixando a distribuição superficial de carga mais positiva. Na Fig. 2.20 é mostrada a distribuição superficial de carga decorrido um intervalo de tempo muito curto após a junção das extremidades, mas não o suficiente para que o estado estacionário tenha sido alcançado. A movimentação de portadores de carga livres já foi capaz de alterar a densidade superficial de carga se aproximando de uma variação gradual. Em nossa simbologia, quanto maior o número de + ou -, maior a densidade de carga.

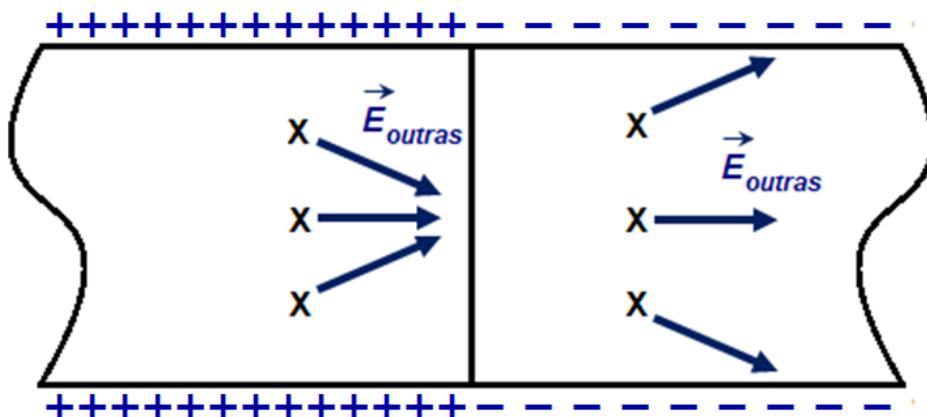


Figura 2.19: Campos produzidos apenas pelas cargas da superfície dos fios. Imagem extraída do livro de R. Chabay e B. Sherwood [1] (adaptada).

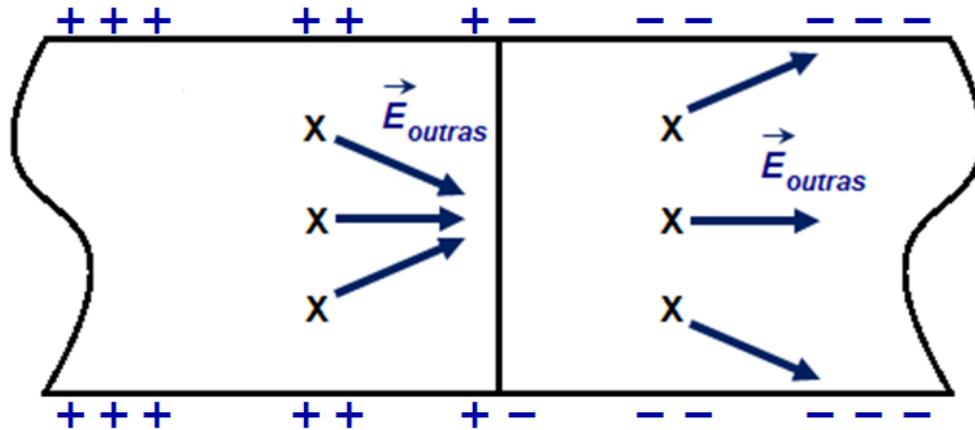


Figura 2.20: Densidade superficial de carga diluída pouco tempo depois que ocorre a junção das extremidades dos fios. Imagem extraída do livro de R. Chabay e B. Sherwood [1].

As mudanças na densidade superficial de carga são induzidas pelo campo elétrico interior gerado pelas próprias cargas superficiais. À medida que a distribuição de carga é modificada, o campo elétrico no interior do condutor assume uma nova configuração e essas modificações se propagam com uma rapidez  $v$  comparável à velocidade da luz no vácuo [40]. Isso quer dizer que em pontos distantes do local onde houve a conexão (de onde se encontra a chave interruptora, por exemplo), as cargas da superfície permanecem distribuídas conforme se encontravam durante o equilíbrio eletrostático até que a informação (o campo elétrico) de que o circuito se completou as alcance. O intervalo de tempo que o campo elétrico resultante da distribuição superficial de carga no fio demora para alcançar uma região do condutor a uma distância  $d$  de onde o circuito se completou é dado por  $\Delta t = d/v$ . Logo, em pouquíssimo tempo a distribuição superficial de carga e, conseqüentemente, o campo elétrico deixam de variar com o tempo, significando que o estado estacionário foi alcançado. O campo elétrico é, então, caracterizado por apresentar em todos os pontos de uma seção reta qualquer do fio o mesmo módulo e ser paralelo à superfície do condutor<sup>13</sup>. O resultado dessa configuração é a existência de uma corrente elétrica de intensidade constante percorrendo o circuito. Assim, podemos entender por

<sup>13</sup>Externamente, além da componente paralela ao eixo do condutor, existe uma componente perpendicular à superfície dele.

que ao acionarmos o interruptor a lâmpada acende quase instantaneamente. A configuração do campo elétrico e da distribuição superficial de carga aproximada no regime estacionário está ilustrada na Fig. 2.21.

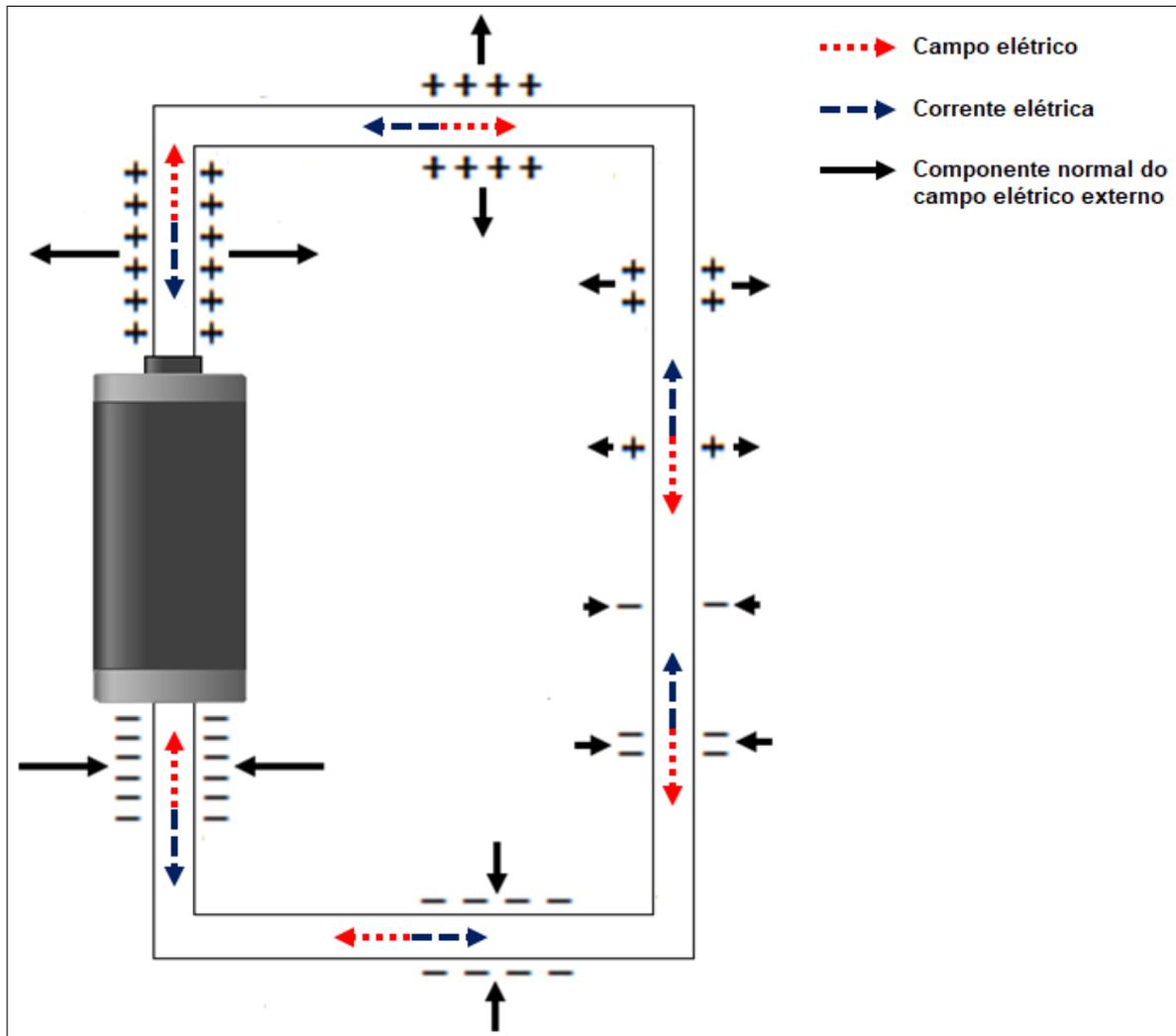


Figura 2.21: Campo elétrico, corrente elétrica e distribuição superficial de carga aproximada ao longo do circuito no regime estacionário. Apenas a componente normal do campo elétrico externo foi representada.

Agora que já ampliamos nossa compreensão sobre como se comportam o campo elétrico e a distribuição de carga nos condutores quando o estado estacionário é atingido, podemos retornar ao momento em que o arranjo se encontrava em equilíbrio (veja Fig. 2.17) e, diferentemente do que fizemos, preencher o vão com um resistor, que pode representar

o filamento de uma lâmpada incandescente. Precisamos analisar quais as modificações que esse elemento traz à distribuição de carga no aspecto local (no próprio resistor) e global (nos fios condutores). Como esse elemento nada mais é que pedaço de fio com uma condutividade elétrica muito inferior a dos demais condutores do circuito podemos esperar que haja alguma alteração na densidade de carga nas conexões entre o resistor e os fios, pois nessas regiões ocorre uma mudança na condutividade elétrica. A Fig. 2.22 mostra uma representação, com as dimensões exageradas, da estrutura de um resistor e as regiões onde há a transição com o fio condutor, mostrando na parte superior a rede de íons e na inferior a densidade de elétrons livres. A condutividade elétrica de um material é influenciada, entre outros fatores, pelas características da sua rede de íons e pela sua densidade de elétrons livres. Aspectos relacionados à rede de íons interferem na distância média que os elétrons percorrem entre uma colisão e outra. Qualitativamente, os íons da rede representam os obstáculos encontrados pelo fluxo de elétrons (veja a parte (a) da Fig. 2.22).

A dependência da condutividade com a densidade de elétrons de condução é própria da interpretação da condução elétrica pelo modelo de Drude. Consideremos então o que acontece com a velocidade de deriva dos elétrons ao passarem do condutor para o resistor. No regime estacionário o fluxo de cargas através de qualquer seção reta deve ser o mesmo, seja no fio ou no resistor, onde a densidade de elétrons livres é menor (observe a parte (b) da Fig. 2.22). Dessa forma, para que o mesmo número desses portadores de carga atravesse uma seção reta igual no resistor, a velocidade de deriva deles precisa ser maior que no condutor. Em consequência, o campo elétrico no resistor precisa ser maior que no fio.

Retornemos à parte (b) da Fig. 2.22, mas analisando o que acontece com as regiões de transição durante o estado transiente. Lembremos que nesse período, o campo elétrico e a distribuição superficial de carga sofrem mudanças continuamente. As transformações na densidade de carga da superfície são provocadas pelo deslocamento dos elétrons livres

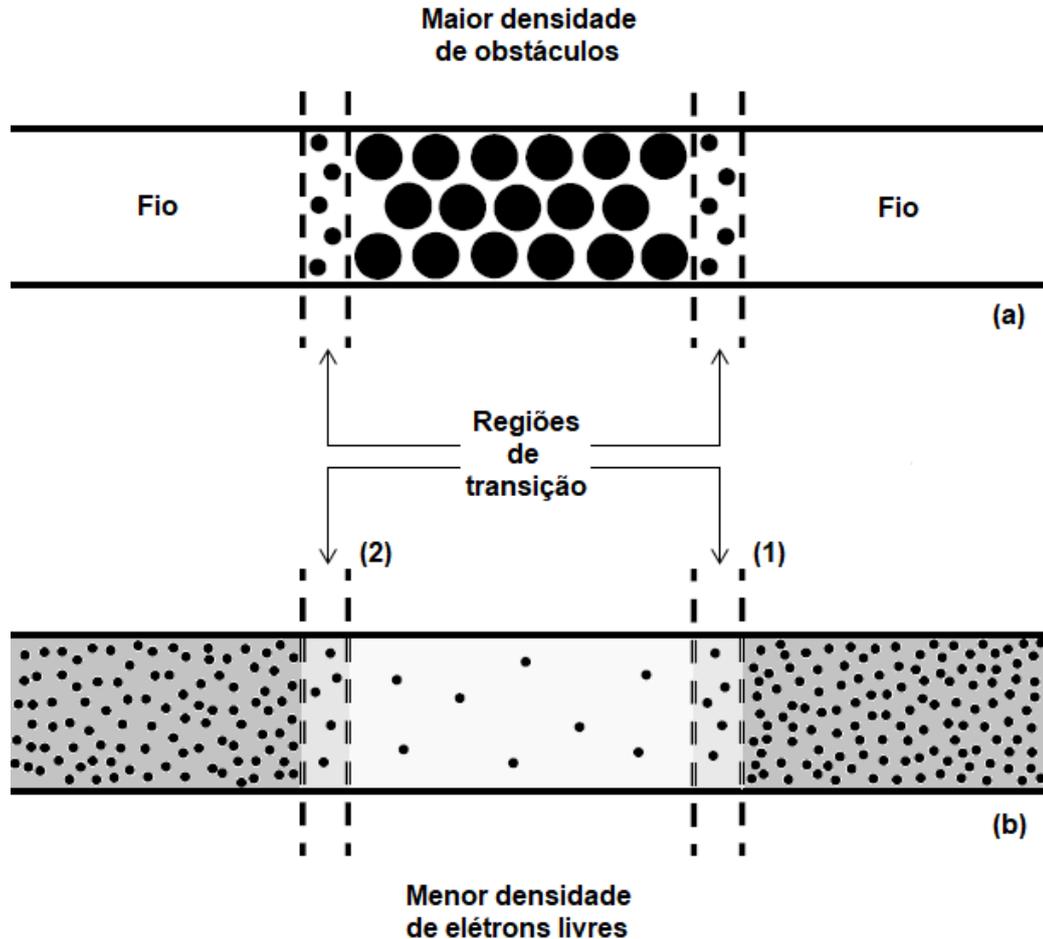


Figura 2.22: Representação de um resistor conectado aos fio condutores. (a) visualização da rede de íons do resistor e das regiões de transição com os fios condutores; (b) distribuição das densidades de elétrons livres no condutor, no resistor e nas regiões de transição. Imagem extraída do trabalho de H. Härtel [39] (adaptada).

devido ao campo elétrico. Sendo assim, certo número de elétrons do fio será deslocado através da região de transição 1 a caminho do resistor. Porém, mesmo se consideramos que o campo elétrico no resistor é igual ao do fio, como a densidade de elétrons livres no resistor é menor, a quantidade de elétrons que é deslocada dentro do resistor é inferior àquela que chegou à região de transição. Em outras palavras, chegam mais elétrons à região de transição 1 do que saem dela. Resulta que o excesso de elétrons fica acumulado na região de transição. Ao mesmo tempo, a região de transição 2 acumulará um deficiência de elétrons, pois a quantidade de partículas negativas que são drenadas dessa região é

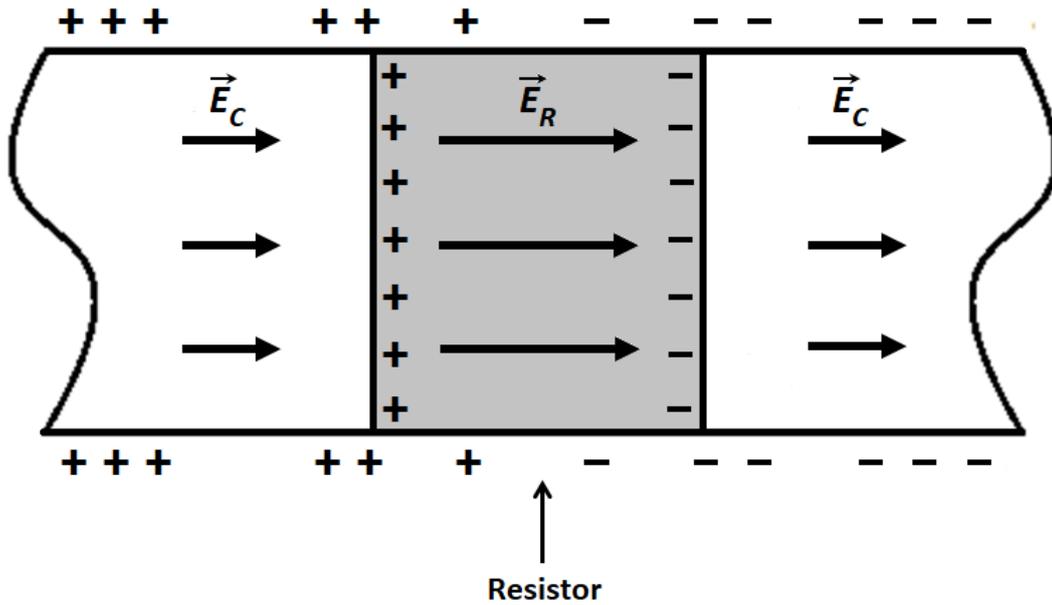


Figura 2.23: Campo elétrico no interior do condutor e do resistor acompanhado das respectivas distribuições de carga elétrica.

maior que aquela que se move pelo resistor e chega até ela. À medida que o campo e a distribuição de cargas superficiais se transformam, essa acumulação (de elétrons e de deficiência de elétrons) continua, reduzindo sua intensidade devido ao surgimento do campo interno no resistor, até atingir o limite quando o estado estacionário é alcançado. A partir daí, a região 1 fica polarizada negativamente e a região 2, positivamente. Essa é a fonte do campo elétrico extra que aumenta a velocidade média de deslocamento dos elétrons no resistor, garantindo que a corrente elétrica seja a mesma em todos os pontos do circuito. A Fig. 2.23 mostra a configuração do campo elétrico no interior do condutor e do resistor e as distribuições de carga em cada um deles.

O circuito agora está completo. A Fig. 2.24 mostra o campo elétrico no interior dos fios condutores e do resistor, bem como suas distribuições de carga elétrica aproximada particulares.

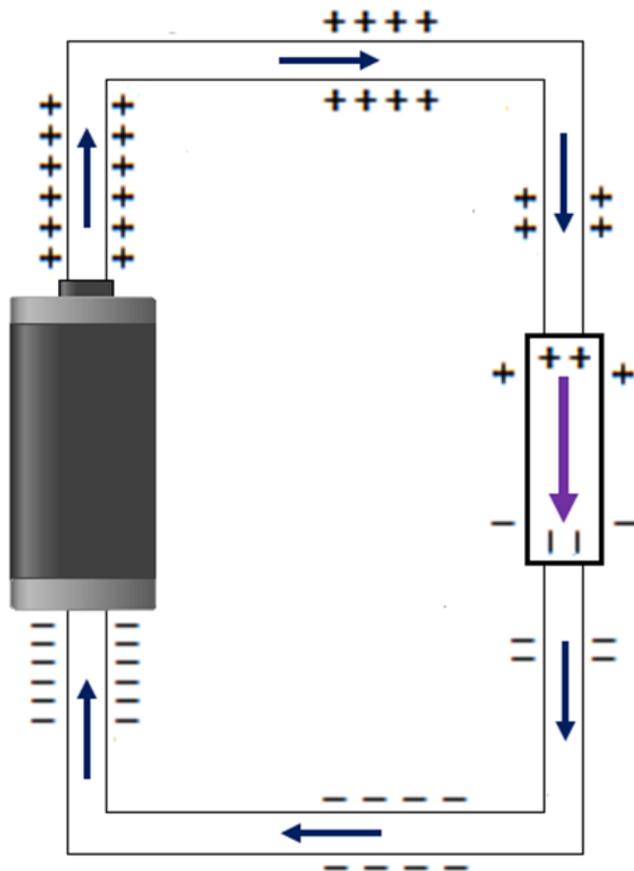


Figura 2.24: Representação do campo elétrico e da distribuição superficial de carga aproximada nos fios e no resistor de um circuito. O campo elétrico externo não foi representado.

## Capítulo 3

# Estrutura e aplicação da sequência didática

O desenho da sequência de ensino que será apresentada nas próximas seções considerou a importância de duas concepções orientadoras: a estrutural e a metodológica. As informações que os alunos detêm a respeito do assunto que será examinado referem-se à estrutura, uma vez que definem os limites da modelagem abstrata; o apelo ao uso de representações dos objetos, eventos e grandezas, e a exploração de uma situação-problema concreta e acessível como instrumento motivador, fazem parte da metodologia de ensino, porém não deixam de participar da organização conceitual da abordagem instrucional.

Antes de começarmos a descrever as concepções que orientaram a organização e a aplicação da sequência didática, faremos algumas considerações gerais a respeito do nosso entendimento sobre os componentes estruturantes e metodológicos, a fim de dirimir dúvidas e auxiliar na elaboração de aplicações alternativas da abordagem que eventualmente possam acontecer.

Em princípio, pode parecer uma condição que, para se efetuar a análise de um circuito elétrico à luz dos fenômenos microscópicos, dever-se-ia realizar *a priori* um estudo completo dos fundamentos da eletrodinâmica. De fato, o detalhamento dos processos físicos microscópicos em curso num circuito elétrico depende do conhecimento da natureza da interação eletromagnética. Entretanto, acreditamos que uma abordagem desse tipo possa

ser consumada ainda que o conhecimento dos aprendizes a respeito da estrutura da matéria limite-se à identificação dos seus constituintes básicos, desde que seja respeitada a fase do seu desenvolvimento intelectual. Com isso, queremos deixar claro que a proposta de ensino que vem sendo desenvolvida ao longo desse trabalho não precisa ser descartada ao se constatar que o público-alvo não detém os requisitos necessários para serem orientados na construção de uma descrição completa e consistente do modelo. A falta de determinados pré-requisitos não deve ser encarada como um fator impeditivo, apenas limitador do nível de aprofundamento que a análise alcançará. Nesse sentido, sugere-se que o professor realize um exame diagnóstico sobre o que os alunos sabem acerca da estrutura da matéria pois, a partir desse inventário, ele poderá estabelecer o grau de sofisticação da modelagem que empreenderá com os alunos. Ademais, identificar o conhecimento que o público-alvo detém a respeito do tema será fundamental para potencializar o seu engajamento no processo de aprendizagem. Não obstante, deve-se salientar que esse levantamento estabelece um marco diretor e sua realização é essencial para a adequação da sequência didática ao grupo de trabalho. Contudo, não deve ser tratado como um elemento estruturante definitivo, uma vez que, à medida que a sequência de ensino for executada, novos elementos conceituais serão incorporados a ela, ampliando gradativamente a complexidade das representações que serão utilizadas pelos alunos.

Dada a natureza do tema, consideramos que a sequência de ensino exige a exploração de recursos que possibilitem a visualização das transformações na microestrutura dos objetos. Isso pressupõe que o professor tenha a sua disposição instrumentos que permitam a ele ilustrar com clareza as consequências dos processos microscópicos que serão discutidos ao longo das etapas da sequência didática. É conveniente enfatizar que a construção do cenário microscópico não deve ser considerado como um exercício exclusivo da habilidade criativa dos alunos. Ao contrário, a apresentação das imagens consequentes da aplicação do modelo precisa ser usada para recuperar o discurso dos alunos, permitindo que eles identifiquem em suas representações os aspectos que concordam e os que divergem dos

resultados das previsões teóricas, a fim de destacar e fortalecer a importância do uso dos elementos da análise microscópica para a construção de uma representação coerente com uma interpretação científica. Portanto, a forma como os alunos elaboram suas representações do que acontece microscopicamente e o grau de detalhamento abstrato que o enredo da instrução poderá alcançar devem dialogar permanentemente.

O resultado da aplicação de uma metodologia de ensino está condicionado a sua capacidade de despertar a motivação do aluno e sustentar o comprometimento dele com as atividades que serão propostas. Acreditamos que o envolvimento do público com as etapas do processo (que, em parte, representa o sucesso do método de ensino) é facilitado quando ele é instigado a encontrar a solução para um problema real, dentro de um contexto que lhe seja familiar. O desafio conquistará a atenção dos alunos se conseguir despertar neles a curiosidade e a convicção de que podem resolvê-lo. Daí a importância de se escolher uma situação que esteja ao alcance da interpretação dos alunos. Com isso, incorpora-se significado à aprendizagem da metodologia que se quer ensinar. Os alunos podem, então, ser encorajados e orientados a buscarem a resposta através de uma análise do problema fundamentada no modelo proposto com a garantia de que não só a solução do problema será encontrada, mas que entrarão em contato com uma forma mais refinada de interpretar os fenômenos naturais e que ampliará sua compreensão deles. É, portanto, um convite ao aluno para conhecer uma instância superior da compreensão humana da natureza.

Passaremos agora a descrever como foi elaborada a sequência didática executada conforme as concepções sobre a estrutura e a metodologia de aplicação descritas.

### **3.1 Estrutura**

O objetivo da sequência didática que foi executada era realizar a investigação do funcionamento de um circuito elétrico sob o ponto de vista microscópico, partindo de uma situação vivenciada pelos alunos. Como o público-alvo já estava familiarizado com

os fundamentos da eletrostática, o detalhamento conceitual da dinâmica dos processos microscópicos pôde explorar a configuração do campo elétrico em alguns componentes do circuito, a saber: os fios condutores e o resistor.

O formato de apresentação da abordagem de ensino privilegiou o uso de diagramas e vídeos que permitissem a visualização do resultado das interações microscópicas. Cada imagem apresentada retratava o momento específico da análise que estava sendo estudado, cuidando para que elas não fossem sobrecarregadas com informações que pudessem ocultar a característica principal e favorecendo o amadurecimento gradual das representações mentais elaboradas pelos alunos.

O desenvolvimento da sequência didática foi concebido como um processo dinâmico, na medida que a transição entre os estágios de investigação deveria ser acompanhada por discussões e modos de raciocínio. Essa característica, atrelada à forma como o assunto foi organizado e apresentado ao grupo de trabalho, atuou de modo decisivo para manter o engajamento dos alunos com as atividades propostas.

Sempre que uma etapa da instrução era concluída solicitava-se aos alunos a realização de atividades onde eles pudessem demonstrar o seu entendimento sobre o assunto. Isso foi feito com o uso de ilustrações que representavam as características decorrentes das interações microscópicas e correlações entre essas características e os componentes de algum arranjo específico. Esse registro era feito em um documento nomeado *Caderno de Anotações* e permitiu que o professor pudesse acompanhar a compreensão dos alunos acerca das consequências dos processos microscópicos analisados e que verificasse a adequação das etapas da sequência didática ao público.

Finalmente, a sequência didática deveria ser capaz de articular conceitos, fenômenos e interpretações, de tal maneira que os alunos constatassem que as etapas do processo de investigação estavam correlacionadas entre si e com a situação concreta que desencadeou a análise. Sob a perspectiva de implementação de uma metodologia de ensino que abordasse uma análise cíclica do conteúdo estudado, a adoção dessa conduta foi essencial, pois

permitiu que as bases do modelo interpretativo fossem revisitadas e relacionadas com os novos elementos conceituais que estavam sendo incorporados.

## 3.2 Aplicação

A sequência didática foi aplicada para alunos das 1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> séries do ensino médio, do curso de técnico em eletrotécnica da Escola Técnica Estadual Juscelino Kubitschek, localizada em Jardim América, bairro da zona norte da cidade do Rio de Janeiro. A escola atende alunos residentes em diferentes bairros da zona norte da capital e em municípios da Baixada Fluminense. A distribuição de idades por série é, em média: 1<sup>a</sup> série: 14 - 15 anos; 2<sup>a</sup> série: 15 - 16 anos; 3<sup>a</sup> série: 16 - 17 anos.

O público-alvo da sequência de ensino foi composto exclusivamente com alunos do curso técnico em eletrotécnica, tendo em vista sua familiaridade com a análise de circuitos elétricos. Todos os alunos matriculados nas três séries do referido curso foram convidados a participar da aplicação dessa abordagem de ensino, que ocorreu durante o período regular das aulas durante o mês de junho de 2019. A sequência foi aplicada ao longo de três encontros com os alunos das 1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> séries, distribuídos durante a mesma semana. A duração aproximada de cada encontro foi de 100 minutos. O quantitativo de alunos por série em cada encontro foi oscilante, conseqüentemente, nem todos participaram de todas as etapas da sequência.

A sequência de ensino se encarregou de:

- apresentar o problema a ser investigado;
- estudar os conceitos fundamentais da eletrostática;
- analisar microscopicamente os componentes, realçando os aspectos diretamente relacionados com o modelo interpretativo e revisar conceitos fundamentais da eletrostática;

- construir gradativamente o circuito, analisando o comportamento do arranjo segundo os estados transiente, estático e estacionário;
- sistematizar o conhecimento adquirido e elaborar uma resposta para o problema.

No que diz respeito aos conteúdos curriculares que imediatamente têm relação com a estratégia instrucional, tem-se a relatar que:

- o estudo da eletrostática não estava previsto no currículo da formação técnica do curso de eletrotécnica, tampouco da componente curricular Física<sup>1</sup>;
- quando a aplicação da sequência didática ocorreu, os alunos da 1ª série realizavam o estudo de alguns dos teoremas utilizados para análise de circuitos elétricos<sup>2</sup>, enquanto os alunos das 2ª e 3ª séries já o haviam concluído.

No que concerne a execução da abordagem de ensino, para atender suas necessidades intrínsecas, foi utilizado um projetor de imagens multimídia. Ele se revelou um instrumento fundamental para o desenvolvimento da sequência, pois todas as representações decorrentes da aplicação da metodologia de análise, vídeos, fragmentos de texto que destacavam informações importantes e as atividades propostas, foram reproduzidos utilizando esse equipamento.

---

<sup>1</sup>Atendendo a uma solicitação da coordenação do curso técnico em eletrotécnica, durante o mês de março, em caráter extraordinário, foram realizados três encontros, cada um estendendo-se por cerca de 100 minutos, objetivando estudar especificamente os fundamentos da eletrostática, com atenção especial ao potencial elétrico. O comparecimento aos encontros foi considerado obrigatório para os alunos da 1ª série e opcional para as demais. Como os alunos das 2ª e 3ª séries não frequentaram os encontros, com o intuito de minimizar a defasagem entre o conhecimento deles a respeito do conteúdo supracitado, em relação ao dos alunos da 1ª série, a eles foram oportunizadas duas aulas, com cerca de 100 minutos cada. O objetivo desse nivelamento era garantir que os alunos 2ª e 3ª séries se familiarizassem com as grandezas físicas que fazem parte da análise que seria efetuada, permitindo que a abordagem instrucional pudesse alcançar o nível de detalhamento que se pretendia.

<sup>2</sup>O currículo do curso técnico de eletrotécnica prevê que durante a 1ª série sejam estudados, além das leis de Kirchhoff, os seguintes teoremas para a análise de circuitos elétricos: superposição, Thévenin e Norton

### 3.2.1 Primeiro encontro

Para atrair a atenção dos alunos, o interruptor das lâmpadas da sala de aula foi acionado repetidamente, fazendo com que elas acendessem e apagassem. Esse fato, em nada surpreendente, a não ser pelo comportamento inusitado do professor, serviu como um incentivo para a apresentação da indagação sobre o porquê do acendimento quase imediato das lâmpadas logo que o interruptor era acionado. Apesar da simplicidade do evento observado, a pergunta foi capaz de despertar o interesse dos alunos para um aspecto em particular: a rapidez com que as transformações no circuito se processam.

A fim de que a situação motivacional fosse devidamente concebida e pudesse ser explorada por uma análise microscópica, o problema real foi simplificado e apresentado da seguinte forma:

*Podemos fazer uma lâmpada acender usando uma pilha, uma chave interruptora e fios condutores. Por que, ao se ligar a chave interruptora, a lâmpada acende quase instantaneamente?*

Com o propósito de deixar os alunos à vontade com a situação-problema e desencadear o seu envolvimento com ela, eles foram estimulados a declarar o que acreditavam ser capaz de explicá-la. Ademais, essa estratégia foi utilizada como uma forma de inventariar, de acordo com o vocabulário utilizado, as grandezas e os conceitos que os alunos associaram à situação problematizadora à medida que argumentavam sobre ela.

Como os alunos já estavam habituados com a representação de circuitos elétricos, lhes foi solicitado que fizessem um esquema composto por pilha, fios condutores e lâmpada que, por analogia, representasse o circuito que estava sendo analisado. A Fig. 3.1 mostra como a atividade foi apresentada ao aluno.

Após a realização dessa tarefa não foi difícil convencer os alunos de que esses elementos não podiam ser conectados entre si de qualquer maneira e que o diagrama apresentado mostrava como as ligações entre eles deveriam ser efetuadas. Destacaram-se dessa

Você possui uma pilha, fios condutores e uma lâmpada. Faça um esquema de um circuito elétrico que faça a lâmpada acender. Para isso utilize os seguintes símbolos:

		
<b>Pilha</b>	<b>Lâmpada</b>	<b>Fios condutores</b>

Você encontrou alguma dificuldade para completar essa tarefa?

Não.

Sim. \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Figura 3.1: Caderno de anotações: atividade 1.

discussão algumas observações importantes: *(i)* os elementos (pilha, fios condutores e lâmpada) não serão arrumados de qualquer maneira; *(ii)* essa arrumação, com os integrantes conectados entre si, recebe o nome de circuito elétrico; *(iii)* os componentes do circuito e a forma como eles são conectados uns aos outros determinarão o papel que

cada um deles irá desempenhar, seu comportamento e do circuito como um todo; *(iv)* um circuito é um sistema, isto é, um conjunto de elementos com características individuais, porém, interdependentes e organizados de forma que o comportamento de cada componente é influenciado e influencia os demais.

Essa atividade foi importante para reforçar a percepção do circuito como um sistema, onde processos microscópicos acontecem em cada um dos seus componentes quando estão ligados entre si de uma forma específica, resultando em uma resposta final que pode ser observada. Dessa forma, pôde-se argumentar com solidez que se quiséssemos entender porque a lâmpada acende tão rapidamente precisaríamos começar entendendo o que acontece no interior dos componentes do circuito. A representação abstrata da situação que pretendia ser investigada foi, enfim, configurada e apresentada conforme a sequência da Fig. 3.2:

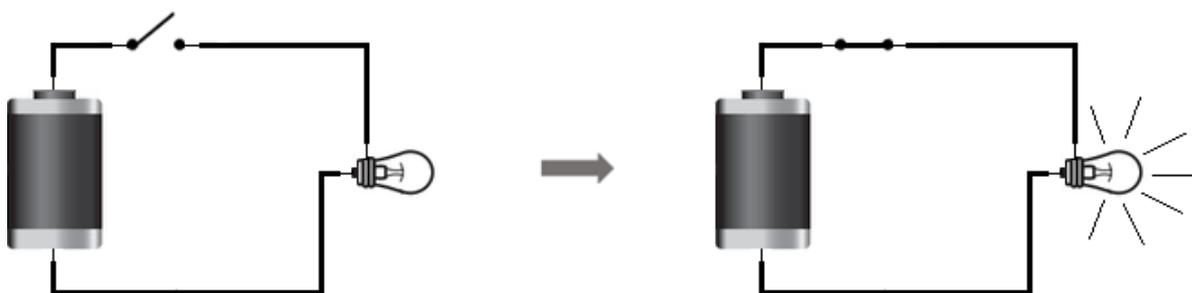


Figura 3.2: Diagrama da situação-problema.

Retornando às informações apresentadas pelos alunos, solicitou-se que eles correlacionassem as grandezas identificadas como as que deveriam ser consideradas para se encontrar a solução do problema, com os componentes do circuito simplificado. Dessa forma, os alunos começaram a estabelecer as conexões entre algo concreto (o circuito) e entidades cuja representação precisavam recorrer a uma elaboração mental, que poderia ser puramente abstrata (*p. ex. campo elétrico*) ou associada a um objeto (*p. ex. elétrons*).

As figuras a seguir reproduzem como a correlação foi formalmente apresentada aos alunos. Os estudantes deveriam associar à pilha, aos fios condutores e à lâmpada a

presença de características como carga elétrica localizada, campo elétrico, diferença de potencial, resistência elétrica e corrente elétrica. A Fig. 3.3 apresentava os componentes desconectados; a Fig. 3.4 se referia ao circuito com a chave interruptora aberta; a Fig. 3.5 mostrava o circuito com a chave interruptora fechada.

A seguir, estão representados três componentes de um circuito elétrico que se encontram **DESCONECTADOS**.



**Pilha**



**Lâmpada**



**Fio condutor**

Na tabela abaixo, cada um dos campos em branco relaciona uma característica a um dos componentes apresentados na figura acima. Ao marcar com um **X** no campo, você está indicando que naquele elemento existe a presença daquela característica. Você pode marcar mais de um campo para cada componente. Seguindo essa orientação, marque adequadamente com **X** os campos em branco da tabela a seguir:

	Carga elétrica localizada	Campo elétrico	Diferença de potencial	Resistência elétrica	Corrente elétrica
<b>Pilha</b>					
<b>Fio condutor</b>					
<b>Lâmpada</b>					

Houve alguma dúvida ao relacionar a presença da característica ao componente?

( ) Não.

( ) Sim. Em qual(is) componente(s)? ( ) **Pilha**   ( ) **Fio condutor**   ( ) **Lâmpada**

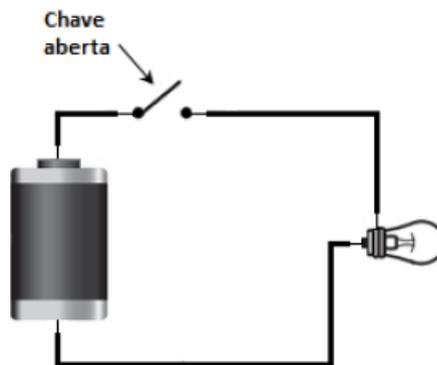
Qual(is) dúvida(s)? \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Figura 3.3: Caderno de anotações: atividade 2.

O esquema abaixo mostra uma pilha, fios condutores e uma lâmpada conectados entre si e a uma chave interruptora que está **ABERTA**.



Na tabela abaixo, cada um dos campos em branco relaciona uma característica a um dos componentes apresentados na figura acima. Ao marcar com um **X** no campo, você está indicando que naquele elemento existe a presença daquela característica. Você pode marcar mais de um campo para cada componente. Seguindo essa orientação, marque adequadamente com **X** os campos em branco da tabela a seguir:

	Carga elétrica localizada	Campo elétrico	Diferença de potencial	Resistência elétrica	Corrente elétrica
<b>Pilha</b>					
<b>Fios condutores</b>					
<b>Lâmpada</b>					

Houve alguma dúvida ao relacionar a presença da característica ao componente?

( ) Não.

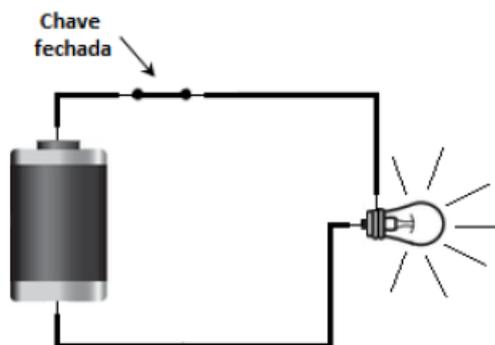
( ) Sim. Em qual(is) componente(s)? ( ) Pilha ( ) Fios condutores ( ) Lâmpada

Qual(is) dúvida(s)? \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Figura 3.4: Caderno de anotações: atividade 3.

A correlação estabelecida anteriormente pôde ser usada como justificativa para a realização de uma revisão conceitual da eletrostática, especificamente: natureza da carga

O esquema abaixo mostra uma pilha, fios condutores e uma lâmpada conectados entre si e a uma chave interruptora que está **FECHADA**.



Na tabela abaixo, cada um dos campos em branco relaciona uma característica a um dos componentes apresentados na figura acima. Ao marcar com um **X** no campo, você está indicando que naquele elemento existe a presença daquela característica. Você pode marcar mais de um campo para cada componente. Seguindo essa orientação, marque adequadamente com **X** os campos em branco da tabela a seguir:

	Carga elétrica localizada	Campo elétrico	Diferença de potencial	Resistência elétrica	Corrente elétrica
Pilha					
Fios condutores					
Lâmpada					

Houve alguma dúvida ao relacionar a presença da característica ao componente?

( ) Não.

( ) Sim. Em qual(is) componente(s)? ( ) Pilha ( ) Fios condutores ( ) Lâmpada

Qual(is) dúvida(s)? \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Figura 3.5: Caderno de anotações: atividade 4.

elétrica, princípio da atração e da repulsão das cargas, processos de eletrização, lei de Coulomb, campo elétrico, princípio da superposição, potencial elétrico, condutores em

equilíbrio eletrostático e blindagem eletrostática. Com o objetivo de dinamizar esse momento da aplicação, vídeos de curta duração<sup>3</sup> abordando esses conceitos e fenômenos foram disponibilizados previamente para os alunos e reapresentados durante a aplicação.

### 3.2.2 Segundo encontro

O encontro começou com uma apresentação do estágio da análise da problematização em que nos encontrávamos, considerando a definição propriamente dita do que estávamos investigando e a revisão dos elementos conceituais da eletrostática.

A essa altura, alguns alunos já começavam a demonstrar a percepção de que o elemento chave da análise é quantidade de carga elétrica excedente localizada. Em relação aos estudantes que ainda não haviam aprimorado sua interpretação quanto a essa característica, o professor os orientou até que realizassem essa descoberta, já que o próximo passo da abordagem instrucional seria o exame dos integrantes do circuito de acordo com esse parâmetro. Essa atitude representou um momento importante do processo de aprendizagem, pois constituiu um refinamento na análise do problema.

Cada um dos componentes do diagrama passou a ser examinado microscopicamente, destacando o papel do elemento chave que integrou toda a discussão do modelo microscópico que estava sendo utilizado: a carga elétrica ou, mais especificamente, a densidade superficial de cargas elétricas. Todos os conceitos que foram de alguma forma abordados ao longo do desenvolvimento da instrução estiveram relacionados com esse elemento-chave, significando que as discussões sempre retornaram a ele. O vínculo com o objetivo imediato da proposta, ou seja, a busca pela resposta ao problema apresentado, norteou a incorporação de novos conceitos. Portanto, foram proporcionados aos alunos argumentos que justificavam a incorporação de novas grandezas e que estas fossem reconhecidas por eles como instrumentos pertinentes à análise da situação.

Em relação à bateria, a orientação da abordagem não se ateve a uma descrição das

---

<sup>3</sup>A relação dos recursos audiovisuais disponibilizados para os alunos se encontra nas referências bibliográficas [44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53].

interações físico-químicas que ocorrem em seu interior, ressaltando apenas que esse componente consegue manter uma separação das cargas elétricas entre seus contatos metálicos, devido a ocorrência de um conjunto de processos internos que realizam esse trabalho. Desse modo, atenção dos alunos pôde ser direcionada para as regiões onde há um acúmulo de carga. Ao enfatizar que uma quantidade de carga elétrica excedente permanece distribuída em cada um dos polos da pilha, os conceitos de campo e potencial elétricos puderam ser resgatados e introduzidos no modelo interpretativo em construção. A relevância dessa inclusão tornou-se evidente à medida que os demais elementos do circuito foram considerados. Terminada a análise da bateria, solicitou-se aos alunos que realizassem a atividade proposta na Fig. 3.6.

Ao examinar a estrutura do fio condutor e o seu comportamento quando submetida à ação de um campo elétrico externo, o orientador da sequência de ensino pôde conduzir uma discussão sobre o modelo clássico da condução de eletricidade. Com efeito, ao encaminhar um debate sobre as consequências que adviriam da ação de um campo elétrico externo sobre o mar de elétrons que permeia a rede cristalina de íons, o conceito de corrente elétrica surgiu como resultado da aplicação das leis do movimento aos elétrons de condução. Em sintonia com o curso dessa análise, a imagem dos portadores de carga em movimento através da rede cristalina e, conseqüentemente, das colisões entre os elétrons de condução e os íons da rede, criou as condições para a introdução da noção de resistência elétrica.

Ao investigarem as propriedades da chave interruptora e do filamento da lâmpada, os alunos puderam constatar semelhanças com aquelas que identificaram no fio condutor. Percebendo que a chave não exhibe qualquer fenômeno diferente daqueles encontrados no fio, ela passou a ser considerada uma extensão dele e tratada apenas como um instrumento para abrir ou fechar o circuito elétrico. No filamento da lâmpada, pelo contrário, o fato de ocorrer uma dissipação de energia na forma de calor mais acentuada e emissão de luz levou os alunos a refletirem sobre as causas desse comportamento.

Abordando o fenômeno da transformação de energia num condutor transportando

Abaixo encontra-se representada uma pilha.



Na tabela abaixo, cada um dos campos em branco relaciona uma característica ao componente apresentado na figura acima. Ao marcar com um **X** no campo, você está indicando que aquela característica está presente no elemento. Você pode marcar mais de um campo se julgar conveniente. Seguindo essa orientação, marque adequadamente com **X** os campos em branco da tabela a seguir:

	Carga elétrica localizada	Campo elétrico	Diferença de potencial	Resistência elétrica	Corrente elétrica
<b>Pilha</b>					

Há alguma outra característica que você gostaria de relacionar a esse componente?

( ) Não.

( ) Sim.

Qual? \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Figura 3.6: Caderno de anotações: atividade 5.

corrente elétrica argumentou-se que nas colisões dos elétrons com a rede de íons ocorre uma dissipação de energia cinética em energia térmica, ocasionando o aquecimento do condutor. Foi esclarecido que o espectro da energia emitida para o entorno só alcança a região do visível a partir de uma dada temperatura. Nessa perspectiva, os alunos concluíram que o filamento da lâmpada aquece mais porque possui uma resistência maior.

A análise foi orientada para identificar o que poderia esclarecer a diferença entre a resistência do filamento da lâmpada e a do fio e resultou no reconhecimento da dependência

da resistência do condutor com algo que estivesse relacionado com o material que o constitui e com suas características geométricas, possibilitando que se realizasse um estudo a respeito da condutividade (e da resistividade) elétrica. Comparando os valores da condutividade de diferentes substâncias os alunos concluíram que, em relação a esse parâmetro, o filamento da lâmpada (feito de tungstênio) tinha uma resistência elétrica da mesma ordem de grandeza que a de um pedaço de fio condutor de cobre com as mesmas dimensões. Entretanto, ao se discutir o que a redução no diâmetro do filamento poderia causar, os alunos constataram que a resistência do filamento seria muito maior que a de um fio do mesmo comprimento. Isso parece ter reforçado a convicção dos alunos de que o que explicava a diferença entre o aquecimento do filamento da lâmpada e do fio era a diferença de resistência entre os dois.

Em conformidade com esse encadeamento de ideias os alunos foram provocados com a questão a seguir:

- Se a resistência é maior no filamento da lâmpada, a velocidade de arraste dos elétrons (e, portanto, a corrente elétrica) ali não deveria ser menor?

Os alunos concordaram que a velocidade média de deslocamento dos elétrons deveria diminuir, mas discordaram que a corrente elétrica fosse menor, o que gerou um impasse. Os estudantes foram orientados a perceberem que, baseando-se na conservação da carga elétrica, o fluxo de elétrons deveria ser o mesmo no filamento e no fio, ou seja, a quantidade de elétrons que atravessava uma seção do fio deveria ser a mesma que cruzava uma seção igual do filamento, no mesmo intervalo de tempo. Dessa forma, a velocidade média de arraste deveria ser maior no filamento que no fio. Recorrendo-se à definição do campo elétrico e à segunda lei de Newton, para garantir que a velocidade média de deslocamento dos elétrons fosse maior no filamento a força que impulsiona o movimento dos elétrons precisava ser maior. Concluiu-se, então, que no filamento deveria existir um campo elétrico adicional responsável por esse aumento na velocidade média de arraste. Essa conclusão

ainda precisava ser justificada pelo modelo.

Para ativar a curiosidade dos alunos e sustentar a motivação do grupo para o próximo encontro, essa etapa foi encerrada com a seguinte provocação:

- Será que as cargas localizadas nos contatos da pilha são a fonte do campo elétrico que provoca a corrente elétrica?

Os alunos foram estimulados a elaborem suas respostas baseadas no modelo interpretativo que estava em desenvolvimento. Era preciso observar como o discurso argumentativo deles foi modificado depois que eles tiveram contato com o método de investigação em curso. Os alunos apresentaram dificuldade em sistematizar o conhecimento adquirido durante a análise dos componentes do circuito e foram induzidos a uma resposta positiva pelo aspecto funcional que atribuem à bateria. Para auxiliá-los na elaboração de uma resposta consistente, foi apresentada uma proposição que os conduziu a uma contradição entre as características do campo elétrico e a observação do comportamento da lâmpada. A situação está esquematizada na Fig. 3.7.

- Se a fonte do campo elétrico no filamento da lâmpada são as cargas que se encontram nos polos da pilha, a lâmpada não deveria brilhar mais quando colocada mais perto dela?

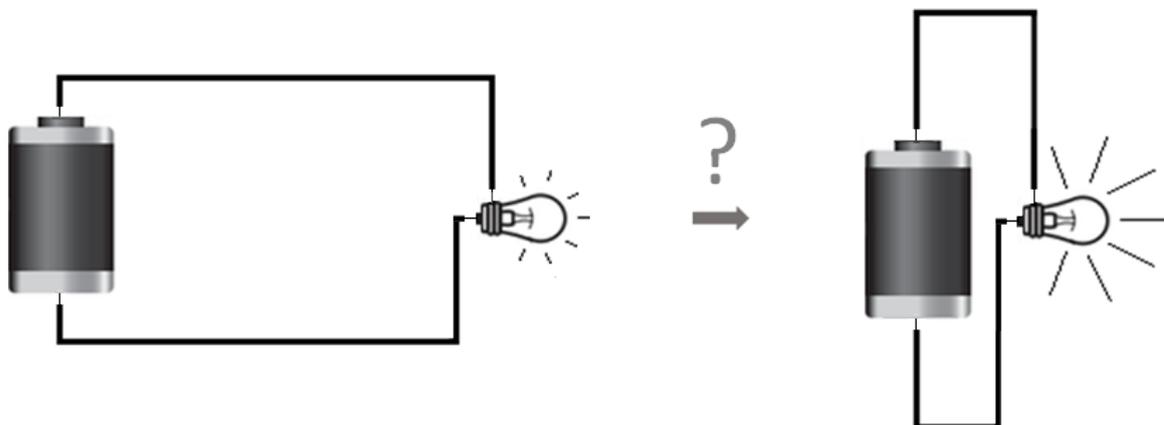


Figura 3.7: O brilho da lâmpada varia conforme ela se aproxima ou se afasta da pilha?

Quando concluíram que a pilha não podia ser a fonte do campo elétrico que provocava a corrente elétrica no fio, os alunos ficaram instigados a encontrá-la em outro componente do circuito. Mas, para tanto, novos detalhes precisavam ser expostos antes que uma resposta definitiva fosse apresentada.

### 3.2.3 Terceiro encontro

Esse encontro começou lembrando algumas das características estruturais dos componentes do circuito, a saber:

- a pilha é um tipo de fonte portátil de energia. Ela consegue manter uma separação de cargas elétricas entre seus contatos metálicos, o que significa que eles são fontes de campo e potencial elétricos;
- os fios, a chave interruptora e o filamento da lâmpada apresentam um comportamento microscópico semelhante: sua estrutura é formada por uma rede de íons preenchida por um “mar” de elétrons deslocalizados que se comporta como um gás de partículas livres. A principal diferença entre esses componentes é que no filamento a resistência elétrica é maior que nos fios condutores e na chave interruptora;
- quando os elétrons de condução deslocam-se através a rede de íons eles colidem com ela. Macroscopicamente, o efeito dessas colisões é interpretado como uma resistência elétrica ao fluxo dos elétrons de condução;
- o movimento orientado de portadores de carga constitui uma corrente elétrica;
- a ação de um campo elétrico externo sobre os elétrons de condução orienta o seu movimento;
- alguma quantidade de energia (que estava armazenada na bateria) é transmitida à rede de íons, provocando o aumento da sua agitação térmica. Macroscopicamente, observa-se o aquecimento do fio e do filamento da lâmpada.

Como estratégia norteadora, a construção do circuito foi elaborada de forma que, quando evidenciadas as transformações microscópicas ocorridas nos componentes ao serem conectados uns aos outros, os alunos pudessem observar a importância de se tratar o arranjo como um sistema.

A primeira conexão que foi examinada é a que se estabelece entre os fios condutores e os contatos metálicos da bateria. Ao longo da discussão foi-se demonstrando que conectar um fio condutor ao polo de uma pilha não é muito diferente de se estabelecer o contato de um objeto condutor eletrizado com um fio condutor neutro. Dessa forma, pôde-se vincular a situação investigada com o já estudado fenômeno da eletrização pelo contato. A aproximação com uma situação que já possuíam alguma familiaridade, deixou os alunos mais à vontade para externar seus modos de raciocínio. Concluiu-se que nos dois casos haveria um deslocamento de elétrons através do fio condutor durante o transiente, terminando com o fio em equilíbrio eletrostático e com cargas em excesso localizadas em sua superfície externa, distribuídas uniformemente sobre ela<sup>4</sup>. Os fios condutores transformam-se, desse modo, em prolongamentos dos contatos metálicos da bateria e, como eles, em fontes de campo elétrico.

No que se refere à fonte de tensão, destacou-se que, como ela consegue manter uma quantidade constante de carga distribuída em cada polo, em seu interior também haverá um fluxo de carga entre os seus terminais durante o transiente.

As interações entre os portadores de carga foram discutidas para explicar tanto o surgimento de uma corrente elétrica transitória como a distribuição de cargas que se estabeleceu no condutor quando o regime estático foi alcançado. Explorando o conceito de equilíbrio eletrostático em condutores e recordando o fenômeno da blindagem eletrostática, pôde-se determinar a configuração do campo elétrico no fio.

De modo alternativo, a discussão anterior foi conduzida explorando-se o potencial elétrico, sendo esse conceito interpretado estritamente como a capacidade que uma dis-

---

<sup>4</sup>A não-uniformidade na distribuição das cargas nas torções e extremidades do fio foi desprezada.

tribuição de carga possui de atrair ou repelir portadores de carga de si. O deslocamento dos elétrons foi explicado como consequente da existência de uma diferença de potencial, que é a grandeza utilizada na análise tradicional dos circuitos elétricos.

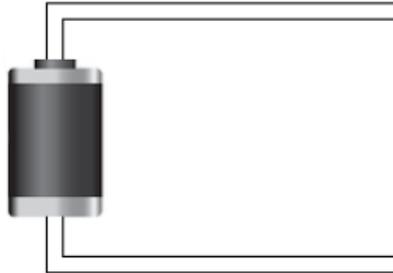
Como uma forma de avaliar a compreensão dos alunos, principalmente a respeito do significado das representações, foram propostas duas atividades envolvendo os estados transiente e estático. Os alunos deveriam, primeiro, correlacionar características observadas com os componentes do arranjo (Fig. 3.8) e, em seguida, representar o que acontecia nos fios condutores durante o transiente (Fig. 3.9).

Em relação à situação estática, os alunos inicialmente precisavam correlacionar características observadas com os componentes do arranjo, estando atentos à região do condutor (Fig. 3.10), e depois, representar o vetor campo elétrico e a distribuição de carga elétrica nos fios condutores (Fig. 3.11).

O passo seguinte da análise consistiu em estabelecer as conexões entre as extremidades do resistor e dos fios condutores. Antes, porém, foi conveniente examinar o que aconteceria com o arranjo quando as extremidades dos fios condutores fosse conectada. Para que o encadeamento de ideias se tornasse claro, o campo elétrico na região da conexão foi examinado em três estados: *(i)* enquanto existe um vão entre as extremidades dos fios em equilíbrio eletrostático; *(ii)* assim que o vão é eliminado; *(iii)* quando a situação estacionária é alcançada. Toda a análise foi pautada pelo comportamento da distribuição das cargas superficiais do condutor.

Primeiramente, chamou-se a atenção dos alunos para o fato do campo elétrico resultante ser nulo em pontos interiores ser uma consequência de uma distribuição peculiar de cargas na superfície. Assim, quando a conexão foi realizada, a configuração das cargas foi modificada e a condição que garantia a configuração do campo elétrico durante o período estático foi perdida. Ao concluírem que o campo elétrico interior deixava de ser nulo, os alunos passaram a analisar as consequências da ação dele sobre os elétrons de condução. Com a orientação do professor os estudantes conseguiram perceber que o

O esquema abaixo mostra uma pilha e fios condutores ligados aos seus contatos. Faça a análise da situação considerando que ela se passa no período conhecido como **TRANSIENTE**, isto é, o intervalo de tempo desde a conexão dos fios condutores aos contatos da pilha até o regime permanente ser estabelecido.



Na tabela abaixo, cada um dos campos em branco relaciona uma característica a um dos componentes apresentados na figura acima. Ao marcar com um **X** no campo, você está indicando que naquele elemento existe a presença daquela característica. Você pode marcar mais de um campo para cada componente. Seguindo essa orientação, marque adequadamente com **X** os campos em branco da tabela a seguir:

	Carga elétrica localizada	Campo elétrico	Diferença de potencial	Resistência elétrica	Corrente elétrica
Pilha					
Fios condutores					

Houve alguma dúvida ao relacionar a presença da característica ao componente?

Não.

Sim. Em qual(is) componente(s)?  Pilha     Fios condutores     Lâmpada

Qual(is) dúvida(s)? \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Figura 3.8: Caderno de anotações: atividade 6.

deslocamento dos elétrons, provocado pelo campo elétrico interno, acarretaria uma modificação na distribuição de cargas ao longo da superfície do condutor, exceto na região do contato com os polos da pilha. Determinar qual a forma da nova distribuição de cargas

A figura da atividade anterior foi reproduzida no quadro abaixo. Faça uma representação do que ocorre na **PILHA** e nos **FIOS CONDUTORES** durante o **TRANSIENTE**.

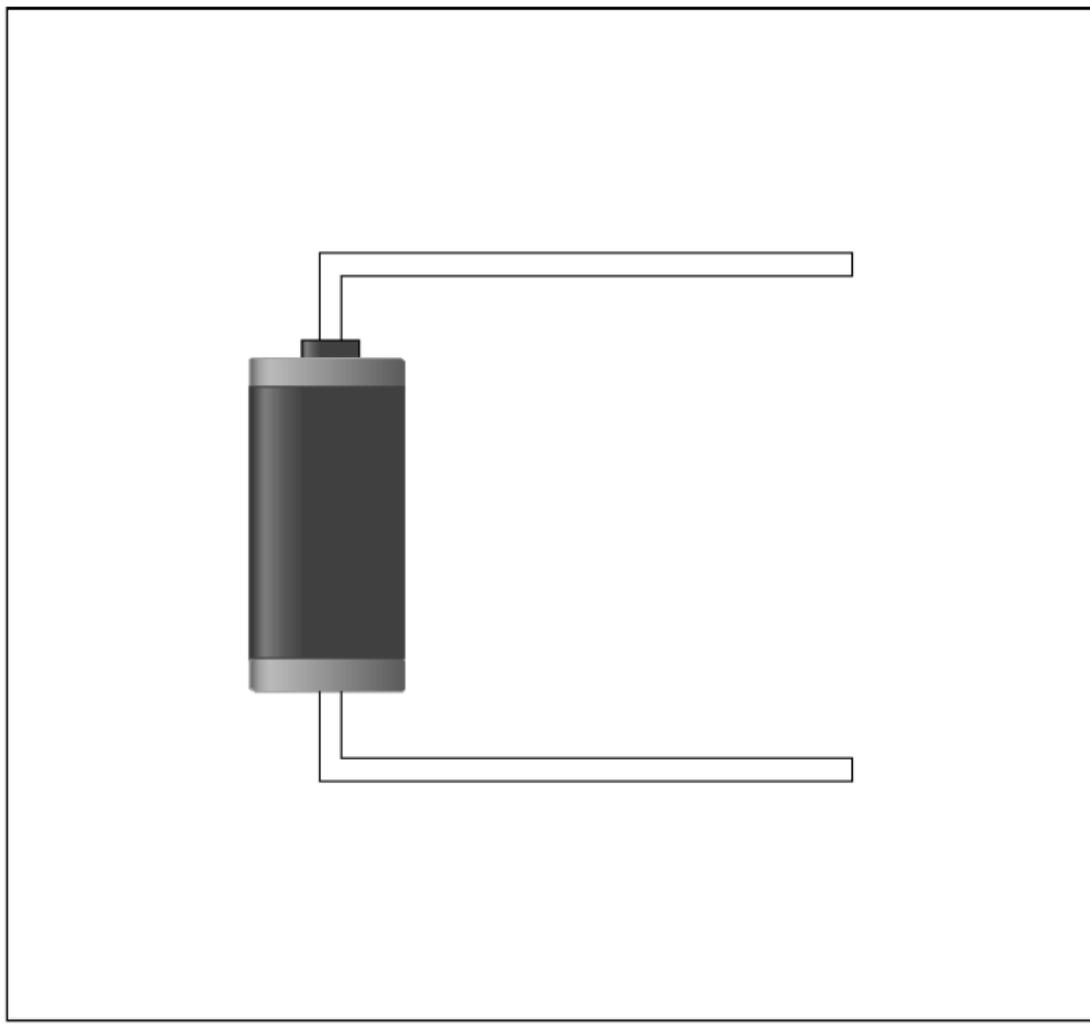
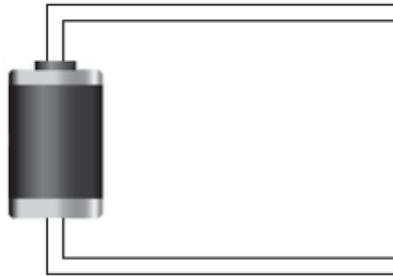


Figura 3.9: Caderno de anotações: atividade 6.

seria um exercício mental que poderia alongar desnecessariamente o tempo de aplicação da sequência de ensino. Foi mais interessante apresentar esquemas com diferentes possibilidades de distribuição e deixar que os estudantes elessem a que melhor se adaptava aos critérios estabelecidos pelo modelo interpretativo que vinha sendo utilizado. O novo arranjo das cargas levou à conclusão de que o campo elétrico no interior do condutor deixava de ser nulo e, por conseguinte, sua ação sobre os elétrons de condução provocaria

O esquema abaixo mostra uma pilha e fios condutores ligados aos seus contatos. Faça a análise da situação considerando que ela se passa depois que o regime **ESTÁTICO** foi alcançado.



Na tabela abaixo, cada um dos campos em branco relaciona uma característica a um dos componentes apresentados na figura acima. Ao marcar com um **X** no campo, você está indicando que aquela característica está presente no elemento. Você pode marcar mais de um campo se julgar conveniente. Seguindo essa orientação, marque adequadamente com **X** os campos em branco da tabela a seguir:

	Carga elétrica localizada	Campo elétrico	Diferença de potencial	Resistência elétrica	Corrente elétrica
Fios condutores	( ) no interior	( ) no interior			
	( ) na superfície	( ) na superfície			

Houve alguma dúvida ao relacionar a presença da característica ao componente?

( ) Não.

( ) Sim. Em qual(is) componente(s)? ( ) Pilha ( ) Fios condutores ( ) Lâmpada

Qual(is) dúvida(s)? \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Figura 3.10: Caderno de anotações: atividade 7.

o aparecimento de uma corrente elétrica permanente<sup>5</sup>.

<sup>5</sup>Demonstrar que durante o regime estacionário o campo elétrico no interior do condutor é constante e paralelo à superfície e, como resultado, o surgimento de uma corrente elétrica constante, implica em assumir uma série de condições e a utilização de recursos do cálculo diferencial e integral. Esse grau de sofisticação encontra-se além dos objetivos dessa abordagem instrucional quando aplicada ao ensino médio.

A figura da atividade anterior foi reproduzida no quadro abaixo. Faça uma representação do **VETOR CAMPO ELÉTRICO** e da **DISTRIBUIÇÃO DAS CARGAS ELÉTRICAS** nos **FIOS CONDUTORES** considerando que o regime **ESTÁTICO** já foi alcançado.

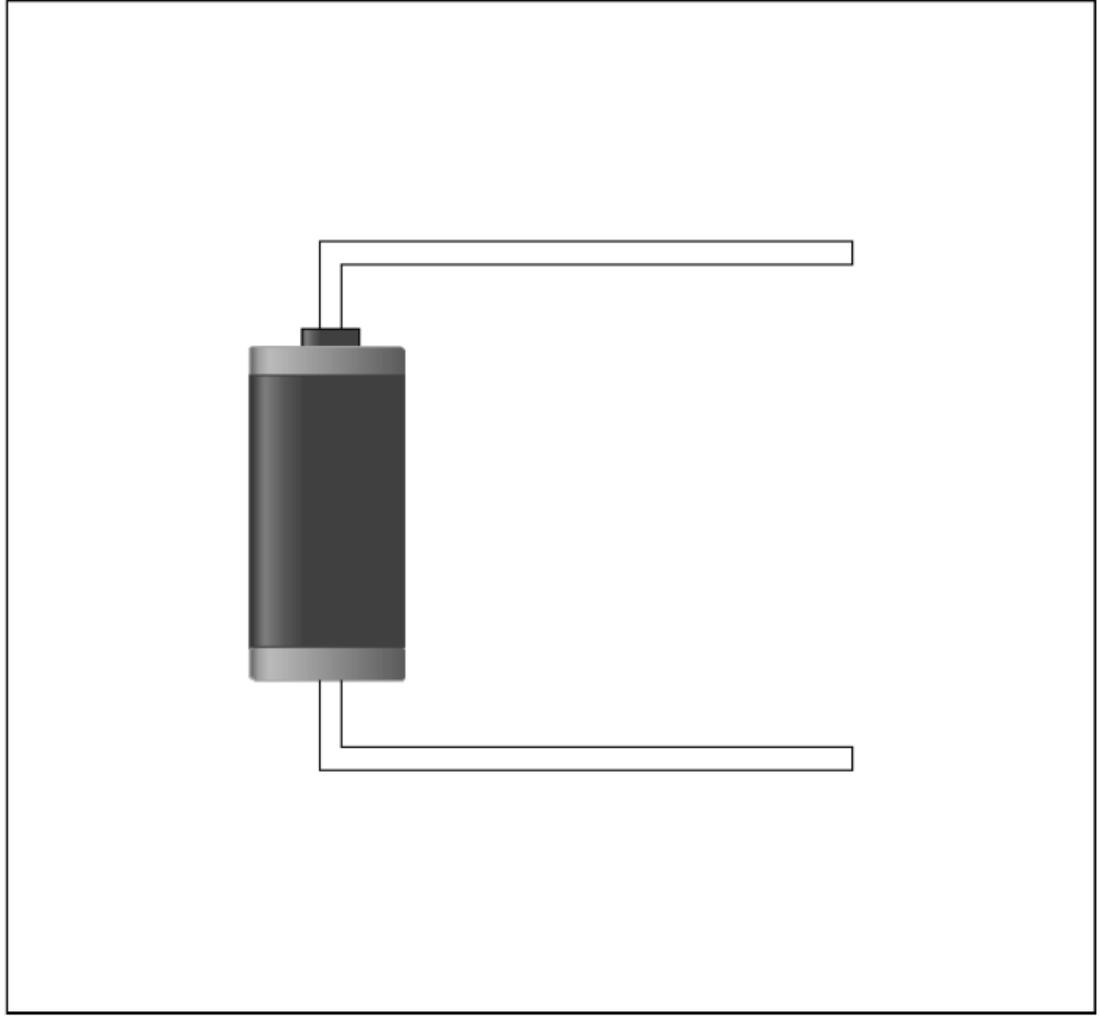
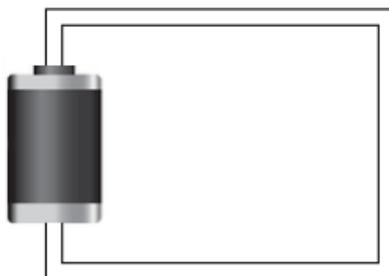


Figura 3.11: Caderno de anotações: atividade 7.

Solicitou-se, então, que os alunos demonstrassem sua compreensão da análise que tinham acabado de participar em uma atividade que envolvia a correlação entre componente e características observadas no fio condutor (Fig. 3.12) e a representação da configuração do campo elétrico e da distribuição das cargas elétricas durante o estado estacionário (Fig. 3.13).

Logo que essa etapa foi concluída alguns alunos começaram a demonstrar em suas

O esquema abaixo mostra uma pilha e um fio condutor ligado aos seus contatos. Faça a análise da situação considerando que ela se passa depois que o regime **ESTACIONÁRIO** foi alcançado.



Na tabela abaixo, cada um dos campos em branco relaciona uma característica a um dos componentes apresentados na figura acima. Ao marcar com um **X** no campo, você está indicando que aquela característica está presente no elemento. Você pode marcar mais de um campo se julgar conveniente. Seguindo essa orientação, marque adequadamente com **X** os campos em branco da tabela a seguir:

	Carga elétrica localizada	Campo elétrico	Diferença de potencial	Resistência elétrica	Corrente elétrica
Fio condutor	( ) no interior ( ) na superfície	( ) no interior ( ) na superfície			

Houve alguma dúvida ao relacionar a presença da característica ao componente?

( ) Não.

( ) Sim. Em qual(is) componente(s)? ( ) Pilha ( ) Fios condutores ( ) Lâmpada

Qual(is) dúvida(s)? \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Figura 3.12: Caderno de anotações: atividade 8.

declarações que a causa do aparecimento de uma corrente elétrica no fio condutor eram as cargas que ficavam distribuídas sobre ele. Assim sendo, o professor pôde retornar à pergunta provocativa efetuada no final do segundo encontro, permitindo que todos os alunos concluíssem que a fonte do campo elétrico que provoca a corrente elétrica no fio e

A figura da atividade anterior foi reproduzida no quadro abaixo. Faça uma representação do VETOR CAMPO ELÉTRICO e da DISTRIBUIÇÃO DAS CARGAS ELÉTRICAS nos FIOS CONDUTORES considerando que o regime ESTACIONÁRIO já foi alcançado.

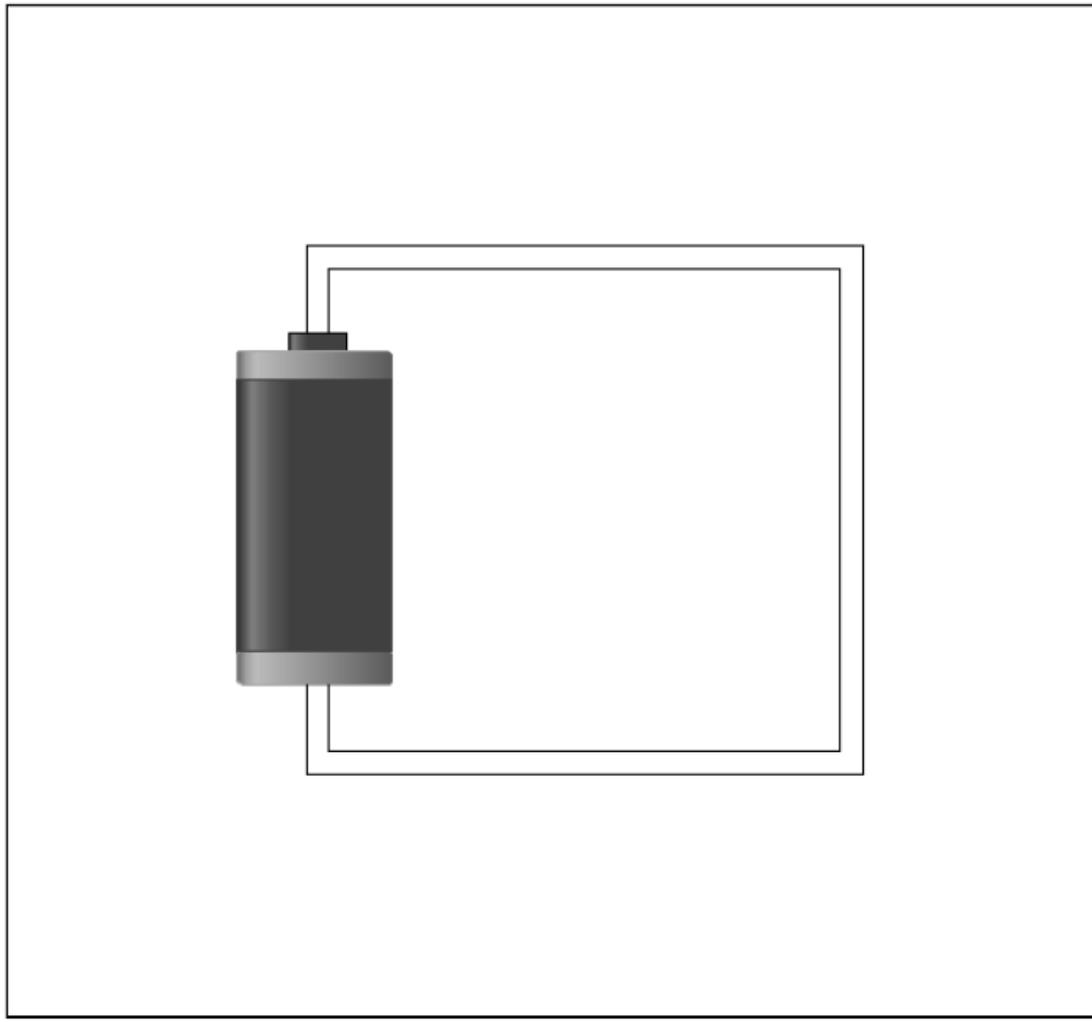


Figura 3.13: Caderno de anotações: atividade 8.

no filamento da lâmpada está distribuída sobre eles mesmos.

Para terminar a análise, um resistor foi inserido entre as extremidades dos fios condutores, ao invés de conectá-los como anteriormente. Esse componente passou a desempenhar o papel do filamento da lâmpada. A atenção foi direcionada para as superfícies onde ocorreram os contatos entre os fios condutores e o resistor.

Para esclarecer o que acontece no resistor, argumentou-se que durante o transiente a

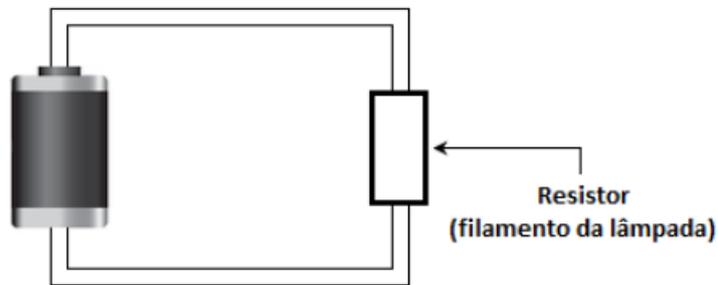
distribuição de cargas e o campo elétrico no circuito ainda passam por transformações. Enquanto o campo elétrico dentro do fio desloca uma quantidade de elétrons para a fronteira com o resistor, ele coloca em movimento dentro do resistor (afastando-se da fronteira) uma quantidade menor de elétrons, pois a condutividade elétrica no resistor é menor. Dessa forma, chegam mais elétrons do que saem da fronteira. Com a ajuda da conservação da carga elétrica os alunos puderam perceber que uma parcela de carga negativa deveria ficar acumulada na fronteira com o condutor. De modo semelhante, no outro extremo do resistor, a quantidade de elétrons que chega é menor do que a que sai fronteira, expondo o caráter positivo da rede de íons. Como esse processo continua até que o estado estacionário seja atingido, seguindo esse raciocínio, os alunos concluíram que uma extremidade do resistor acumularia uma densidade de carga negativa e a outra uma densidade de carga positiva. Eles puderam constatar que devido à diferença de condutividade, as regiões onde ocorrem as conexões do resistor com o condutor ficam polarizadas, o que dá origem ao campo elétrico extra que garante que a velocidade média de deslocamento dos elétrons no resistor seja maior que a dos elétrons no fio.

Quando a análise foi encerrada os alunos foram convidados mais uma vez a realizar uma atividade que visava observar o impacto da abordagem de ensino sobre a sua compreensão a respeito do funcionamento do circuito elétrico. Ele deveriam correlacionar componentes e características observadas (Fig. 3.14), e depois, representar a configuração dos campos elétricos e distribuições de carga sobre os fios condutores e sobre o resistor (Fig. 3.15).

As informações necessárias para que os alunos pudessem elaborar uma resposta para a pergunta que desencadeou essa análise foram descobertas ao longo das discussões realizadas nas etapas de construção do circuito. Havia, portanto, a necessidade de recapitulá-las e organizá-las.

Durante a sistematização do que foi discutido ao longo da instrução, os alunos perceberam que a conexão estabelecida entre as extremidades do fio não é diferente da ligação realizada ao se acionar a chave interruptora e completar o circuito. Também era impor-

O esquema abaixo mostra uma pilha e um resistor (filamento da lâmpada) interligados por fios condutores. Faça a análise da situação considerando que ela se passa depois que o regime **ESTACIONÁRIO** foi alcançado.



Na tabela abaixo, cada um dos campos em branco relaciona uma característica a um dos componentes apresentados na figura acima. Ao marcar com um **X** no campo, você está indicando que naquele elemento há presença daquela característica. Você pode marcar mais de um campo para cada componente. Seguindo essa orientação, marque adequadamente com **X** os campos em branco da tabela a seguir:

	Carga elétrica localizada	Campo elétrico	Diferença de potencial	Resistência elétrica	Corrente elétrica
Fios condutores	( ) no interior ( ) na superfície	( ) no interior ( ) na superfície			
Resistor (filamento da lâmpada)	( ) no interior ( ) na superfície	( ) no interior ( ) na superfície			

Houve alguma dúvida ao relacionar a presença da característica ao componente?

( ) Não.

( ) Sim. Em qual(is) componente(s)? ( ) Pilha ( ) Fios condutores ( ) Lâmpada

Qual(is) dúvida(s)? \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Figura 3.14: Caderno de anotações: atividade 9.

A figura da atividade anterior foi reproduzida no quadro abaixo. Faça uma representação do **VETOR CAMPO ELÉTRICO** e da **DISTRIBUIÇÃO DAS CARGAS ELÉTRICAS** nos **FIOS CONDUTORES** e no **RESISTOR** depois que o regime **ESTACIONÁRIO** foi alcançado.

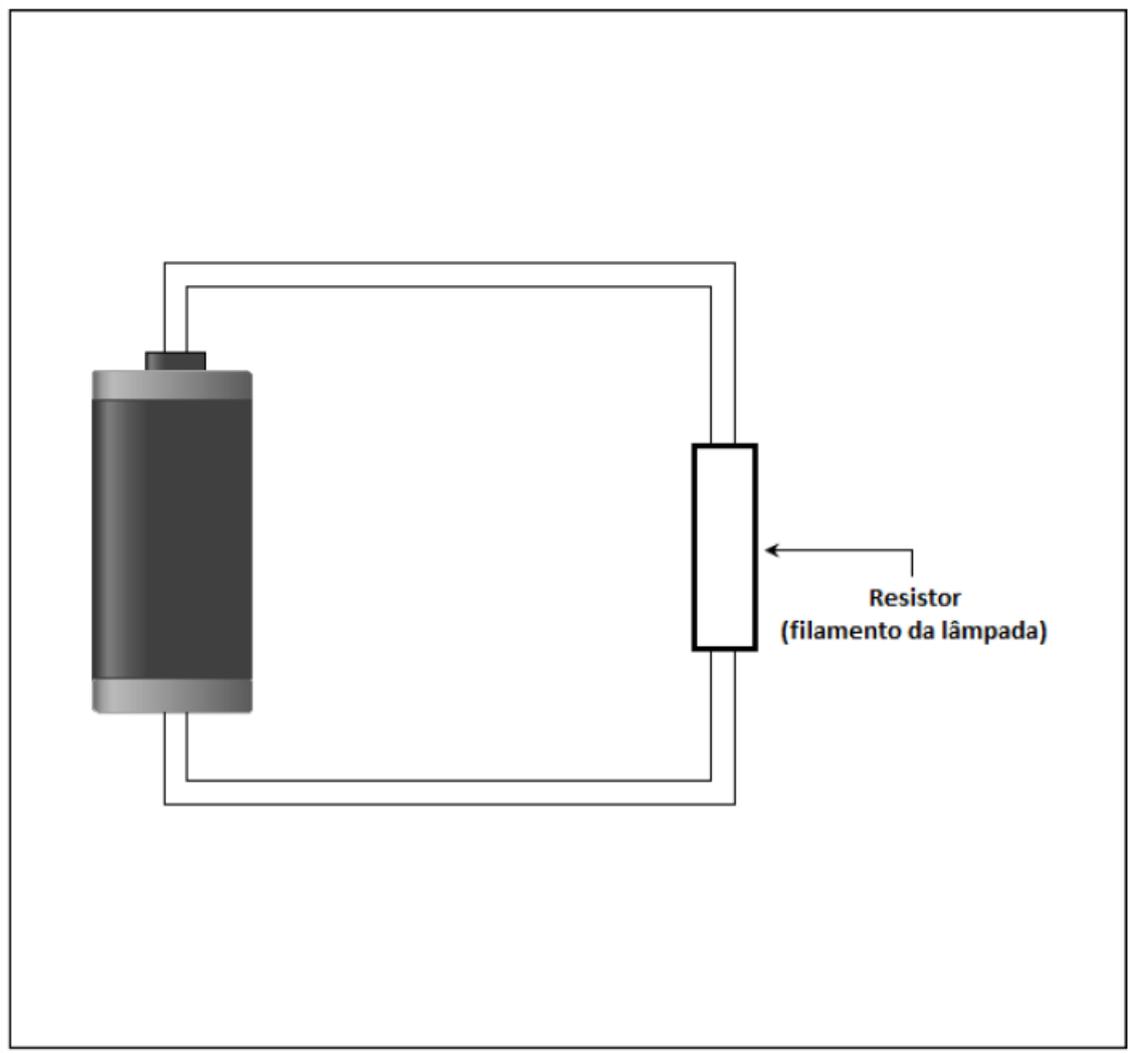


Figura 3.15: Caderno de anotações: atividade 9.

tante que os alunos constatassem que ao se efetuar a junção a mudança na densidade superficial de carga sobre os elementos do circuito não acontece instantaneamente. Ao contrário, o intervalo de tempo necessário para que uma distribuição de carga distante do ponto onde houve o fechamento do circuito receba a informação de que houve a ligação, depende da rapidez com que esse sinal viaja através do condutor. Para alcançarem essa

compreensão os alunos foram lembrados de que, em consequência da mudança na distribuição de cargas no ponto onde ocorreu a união entre as extremidades livres do fio, resultou um campo elétrico diferente de zero no interior dele, e que este induziu uma nova redistribuição das cargas, criando uma sequência de transformações até que o estado estacionário foi atingido. Em seguida, os estudantes foram informados que a rapidez com que o campo elétrico se propaga no condutor corresponde à velocidade da luz nesse meio. Reunindo essas informações, os alunos conseguiram concluir que o rearranjo das cargas elétricas estender-se-ia por todo o circuito aproximadamente à mesma velocidade do campo elétrico. Assim, em um circuito com 30 de metros, o intervalo de tempo entre o momento em que o interruptor é acionado e aquele em que a lâmpada acende seria da ordem de 100 nanossegundos, o que é, para todos os efeitos, instantâneo.

Por fim, os alunos deveriam responder à pergunta: por que, ao se ligar o interruptor, a lâmpada acende quase instantaneamente? Essa atividade foi apresentada aos alunos conforme mostra a Fig. 3.16.

Agora que você já ampliou o seu conhecimento sobre o circuito elétrico que faz uma lâmpada acender, elabore uma resposta para a pergunta: ***por que, ao se ligar o interruptor, a lâmpada acende quase instantaneamente?***

---

---

---

---

---

Figura 3.16: Caderno de anotações: atividade 10.

## Capítulo 4

# Avaliação da aplicação da sequência didática e do impacto da metodologia de ensino no processo de aprendizagem

A aplicação da sequência didática possibilitou a observação de aspectos relevantes tanto em relação à estrutura elaborada para a execução da abordagem quanto no que concerne ao seu impacto sobre o entendimento das interações microscópicas que conduzem a um comportamento macroscópico. No que se refere ao comportamento dos alunos diante da abordagem instrucional, especificamente, quanto à adequação das ações desenvolvidas em cada encontro, observamos que a situação-problema desempenhou com sucesso a tarefa de conquistar a atenção e o envolvimento dos estudantes. Compartilhando do mesmo êxito, a Atividade 1 conseguiu sustentar o engajamento do público-alvo no momento em que eram criadas as condições que justificaram a necessidade de uma análise microscópica dos elementos do circuito. Contudo, a postura dos alunos durante o período em que se realizou a revisão não demonstrou a mesma motivação. Mesmo explorando a correlação realizada com as características dos componentes, os alunos reagiram ao conteúdo que nos propusemos revisar como se ele estivesse isolado do contexto. Em parte, isso pode ser explicado pela importância dispensada à realização de um detalhamento do campo elétrico e da sua configuração nos condutores quando em equilíbrio eletrostático, já que esse

compromisso foi estabelecido na estrutura da abordagem de ensino. De forma semelhante, observamos que o tempo destinado à análise das interações microscópicas parece ter se estendido além do necessário, fazendo com que os alunos se desconcentrassem da situação examinada.

Apesar disso, os alunos se mostraram bastante receptivos à metodologia utilizada para analisar o circuito. A construção do circuito por etapas, nas quais as interações microscópicas e suas consequências eram investigadas valendo-se apenas do conhecimento sobre a atração e a repulsão de cargas elétricas e do conceito de campo elétrico, parece ter permitido que os alunos se envolvessem e acompanhassem a sucessão de transformações na estrutura dos componentes até a conclusão da construção do circuito.

De modo igual, a exploração de imagens que permitiam a visualização de um momento específico da análise contribuiu significativamente para que a sequência didática alcançasse o objetivo de fazer com que os estudantes “interagissem” ativamente com a método de ensino. De fato, a atitude dos alunos durante a narrativa dos processos microscópicos demonstrou que eles se sentiam menos à vontade para se pronunciar (sendo provocados ou não) do que quando o objeto do discurso podia ser visualizado por eles. A articulação dos conceitos, as dúvidas e os comentários acerca dos fenômenos eram expostos com maior clareza quando os alunos possuíam uma representação da situação com a qual podiam “dialogar”. Isso confirmou a nossa expectativa de que exibir a imagem em vez de transformá-la em um exercício criativo decorrente do entendimento do assunto, facilita a organização da sequência de eventos que resulta na configuração apresentada, contribuindo para a melhor compreensão do tema da instrução. Esse pode ser um indício da dificuldade que os alunos enfrentam para construir uma representação mental do conjunto de informações recebidas durante a explicação de um conteúdo, reforçando a concepção de que uma intervenção didática precisa considerar o estágio em que os aprendizes se encontram no que se refere a sua forma de visualização da estrutura conceitual e da sua habilidade de manipular seu modo particular de representação.

De mais a mais, a apresentação de outras situações problematizadoras, autocontidas e vinculadas à problematização original, funcionaram como uma alavanca para a manutenção do caráter dialógico do método de ensino. Exemplo disso foram as provocações apresentadas durante o segundo encontro. Com elas, pôde-se expor um aparente conflito entre o modelo teórico e a observação, justificando a necessidade de maiores investigações até que a resposta pudesse ser encontrada e criando as condições motivacionais que ajudaram a sustentar a conclusão da abordagem de ensino.

As informações que sustentam nossas considerações sobre o que a metodologia de ensino refletiu no processo de aprendizagem, foram extraídas da sequência de atividades desenvolvidas pelos alunos ao longo da execução da intervenção didática e que compuseram o que foi chamado de *Caderno de Anotações* de cada estudante.

Apesar do contingente esperado, o número de alunos que participaram das etapas da sequência de ensino não foi fixo. Dessa forma, nossa análise se importou com os dados que refletissem a compreensão do aspecto geral da aplicação do modelo microscópico para interpretação do comportamento dos componentes e do circuito. Além disso, como esse tipo de análise era inédito para todos os alunos, não faremos distinção entre eles em relação à série.

Em relação à **Atividade 1** (Fig. 3.1), os alunos não relataram terem encontrado dificuldade em executar a tarefa. Todavia, dos 54 alunos que desenvolveram a atividade, 50 não reconheceram a necessidade de se estabelecer adequadamente as conexões dos fios condutores com os contatos da lâmpada, respeitando a forma como esse componente havia sido simbolizado, ou de utilizarem símbolos alternativos para representarem a pilha e a lâmpada. Ainda assim, verificou-se que em todos os casos a ligação dos fios com a lâmpada foi efetuada em seus contatos metálicos. Isso parece indicar que os alunos sabiam como as conexões deviam ser realizadas, mas foram displicentes em relação às orientações recebidas. A Fig.4.1 mostra exemplos dos diagramas elaborados pelos alunos.

Como as atividades **2** (Fig. 3.3), **3** (Fig. 3.4) e **4** (Fig. 3.5) foram aplicadas depois que

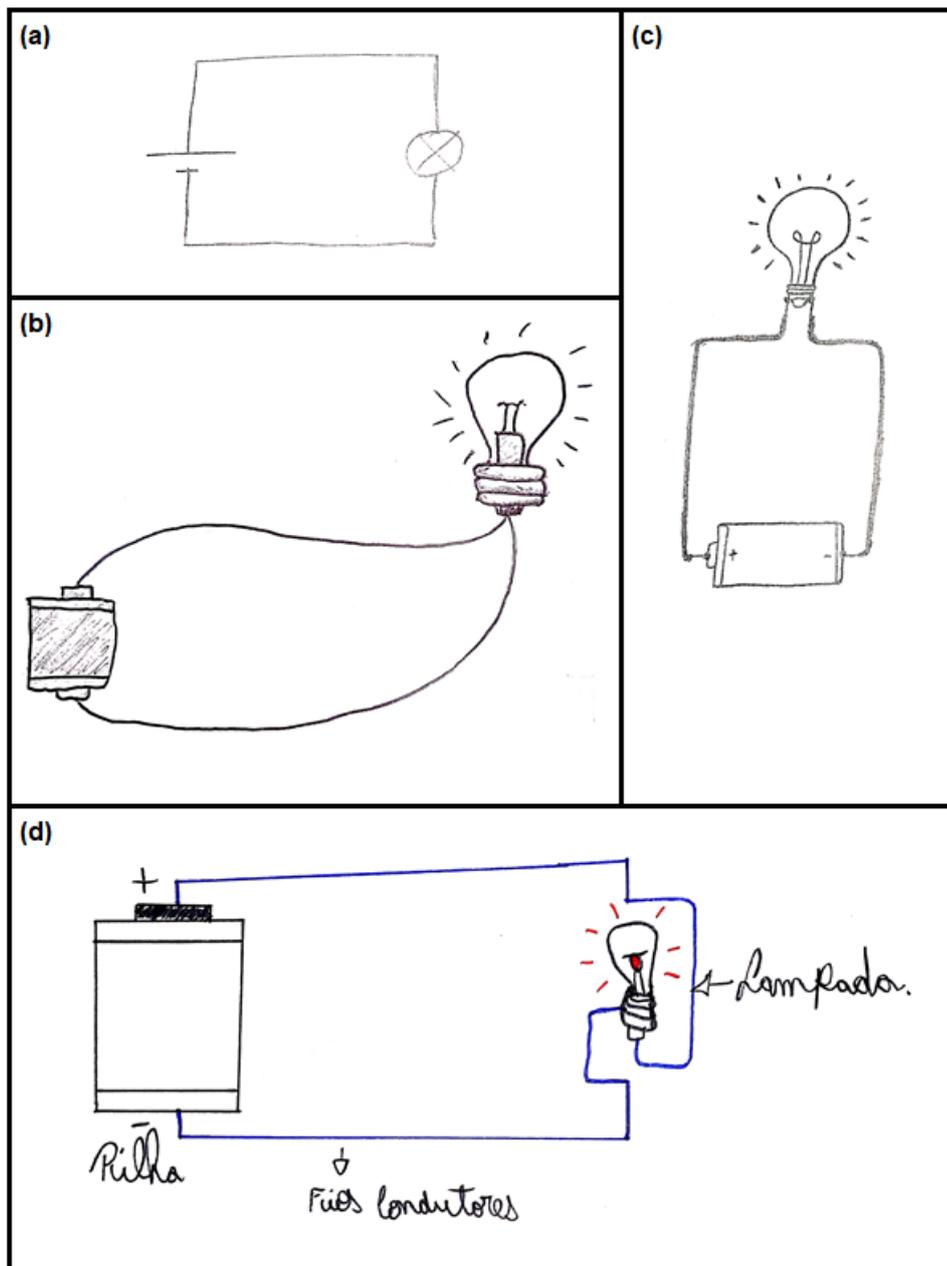


Figura 4.1: Exemplos de representações elaboradas pelos alunos do circuito que faz a lâmpada acender: (a) uso de simbologia técnica; (b) e (c) conexões incorretas dos fios com a lâmpada; (d) diagrama correto.

os fundamentos da eletrostática foram revisados, mas antes que a análise microscópica dos componentes fosse realizada, as informações que foram obtidas serviram para estabelecer um referencial a respeito do entendimento dos alunos sobre o conjunto de conceitos que permeou toda a intervenção didática e que também foram objeto de investigação nas ativi-

dades que as sucederam. Posto isso, as observações quanto às evidências de aprendizagem ou da persistência de modos de raciocínio utilizaram os dados obtidos dessas atividades como instrumento de comparação e fundamentação das nossas afirmações. Ainda assim, discutiremos os resultados dessas atividades para tentar descrever a forma como os alunos interpretam as características que foram examinadas nessas investigações. As tabelas a seguir apresentam as respostas dos alunos nessa sequência de atividades.

Componente \ Característica presente	Carga elétrica localizada	Campo elétrico	Diferença de potencial	Resistência elétrica	Corrente elétrica
	Número de alunos que assinalaram a presença dessa característica				
Pilha	53	27	38	6	13
Fio condutor	7	17	8	32	25
Lâmpada	17	14	14	44	6
<b>Total de alunos que participaram da atividade: 55</b>					

Tabela 4.1: Respostas da Atividade 2.

Componente \ Característica presente	Carga elétrica localizada	Campo elétrico	Diferença de potencial	Resistência elétrica	Corrente elétrica
	Número de alunos que assinalaram a presença dessa característica				
Pilha	53	27	39	8	11
Fio condutor	12	11	6	32	20
Lâmpada	13	15	10	48	4
<b>Total de alunos que participaram da atividade: 55</b>					

Tabela 4.2: Respostas da Atividade 3.

O comportamento geral das respostas encontradas nas tabelas 4.1 e 4.2 parece indicar que para os alunos as duas situações são semelhantes. Isso demonstra que, estando o circuito aberto, os estudantes não reconhecem que ocorram alterações microscópicas na estrutura dos componentes quando eles estão conectados entre si, corroborando a afirmação

Característica presente Componente	Carga elétrica localizada	Campo elétrico	Diferença de potencial	Resistência elétrica	Corrente elétrica
	Número de alunos que assinalaram a presença dessa característica				
Pilha	53	33	40	8	21
Fio condutor	25	28	16	36	54
Lâmpada	31	31	28	47	35
<b>Total de alunos que participaram da atividade: 55</b>					

Tabela 4.3: Respostas da Atividade 4.

de que o circuito não é encarado por eles como um sistema. Essa constatação pode estar relacionada ao fato de que os aprendizes nunca são estimulados a analisar o circuito quando ele está “desligado”. Essa realização os levaria a empreender uma investigação fundamentada nas interações microscópicas que ocorrem na estrutura dos componentes e os faria perceber que as duas situações são, de fato, distintas.

O fato de quase todos os alunos reconhecerem a presença de carga elétrica localizada na pilha não é surpreendente, pois a existência dessa característica está presente até no vocabulário empregado referir-se à utilidade desse componente: *“a bateria está carregada”*. Porém, foi inesperado observar que os alunos indicaram a ocorrência de corrente elétrica quando os componentes estavam desconectados e o circuito estava aberto.

Também é interessante notar que os alunos assumem que a resistência elétrica é uma característica própria do componente, independentemente da circulação ou não de corrente elétrica. É possível que essa convicção tenha origem, e de certo modo seja reforçada, na forma como essa grandeza é tradicionalmente avaliada no ensino da eletrodinâmica: após a sua definição, os alunos são ensinados a determinar o valor da resistência de um condutor ou do resistor equivalente em associações desses elementos, desconectados de uma fonte de tensão e sem que se mencione em ambos os casos que está implícita uma situação dinâmica.

Comparando os dados registrados na **Atividade 4** (Tab. 4.3) com os obtidos nas

atividades **2** (Tab. 4.1) e **3** (Tab. 4.2), chamamos atenção para o aumento significativo no número de respostas atestando a presença de carga elétrica localizada e campo elétrico no fio condutor e na lâmpada, e à presumível existência de uma correlação que os alunos tenham expressado entre essas duas características. Entretanto, não se pode afirmar que essa correspondência tenha sido efetuada com clareza, a julgar pelas informações anotadas em relação à pilha.

A Tab. 4.4 mostra o resultado encontrado após a realização de uma análise das características da fonte de tensão explorando o modelo microscópico:

Característica presente Componente	Carga elétrica localizada	Campo elétrico	Diferença de potencial	Resistência elétrica	Corrente elétrica
	Número de alunos que assinalaram a presença dessa característica				
Pilha	57	56	53	53	12
<b>Total de alunos que participaram da atividade: 59</b>					

Tabela 4.4: Respostas da Atividade 5.

As respostas obtidas na **Atividade 5** (Tab. 4.4) demonstram que ocorreu uma repercussão positiva da sequência didática relativamente à identificação da existência de campo elétrico e diferença de potencial. Contudo, para que esse resultado seja um indicador de que houve uma aprendizagem efetiva do modelo interpretativo, os alunos precisam reconhecer a correlação existente entre esses elementos conceituais nas demais situações. Ademais, como os conceitos de resistência e corrente elétricas não foram abordados nessa etapa da instrução, o quantitativo de registros que apontam a presença dessas grandezas, juntamente com os que foram observados nas atividades **2** (Tab. 4.1) e **3** (Tab. 4.2), sugerem a utilização de algum modo de raciocínio anterior à metodologia de ensino que foi apresentada.

A tabela 4.5 mostra as respostas obtidas na atividade que procurou investigar os efeitos da aplicação da metodologia instrucional sobre a compreensão dos alunos a respeito de como a estrutura dos fios condutores e da pilha reage quando a conexão entre eles é

estabelecida (Fig. 3.8). Além de procurarmos uma quantidade significativa de registros que tenham apontado a existência de carga elétrica localizada, campo elétrico e diferença de potencial, pois queremos saber se os alunos conseguiram estabelecer a correlação entre os três conceitos, outro aspecto particularmente interessante é observação de respostas que indiquem a ocorrência de uma corrente elétrica transitória, característica dessa etapa.

Característica presente Componente	Carga elétrica localizada	Campo elétrico	Diferença de potencial	Resistência elétrica	Corrente elétrica
	Número de alunos que assinalaram a presença dessa característica				
Pilha	42	36	40	38	7
Fio condutor	23	31	7	30	36
<b>Total de alunos que participaram da atividade: 44</b>					

Tabela 4.5: Respostas da Atividade 6.

Conforme se pode observar na Tab. 4.5, os alunos identificaram satisfatoriamente a presença de carga elétrica localizada, campo elétrico e diferença de potencial na fonte de tensão. Todavia, essa conclusão não pode ser estendida ao fio condutor. Apesar de mais da metade dos alunos assinalarem a presença de carga elétrica localizada e campo elétrico no fio condutor, o mesmo contingente não indicou a existência de uma diferença de potencial nesse componente. Isso parece sugerir que a correlação entre carga elétrica localizada e o conceito de potencial elétrico não foram suficientemente esclarecidos. Em relação à presença de uma corrente elétrica transitória no fio condutor, o número de alunos que apontaram a ocorrência dessa característica parece indicar que a metodologia instrucional foi bem sucedida. Infelizmente, o mesmo comportamento não foi verificado em relação à pilha.

Analisando as ilustrações realizadas pelos alunos para descrever o comportamento dos fios condutores durante o transiente, 24 dos 44 alunos que participaram da atividade indicaram a existência de uma corrente elétrica transitória. A Fig. 4.2 mostra a representação elaborada por um aluno que reconheceu a existência de uma corrente transitória.

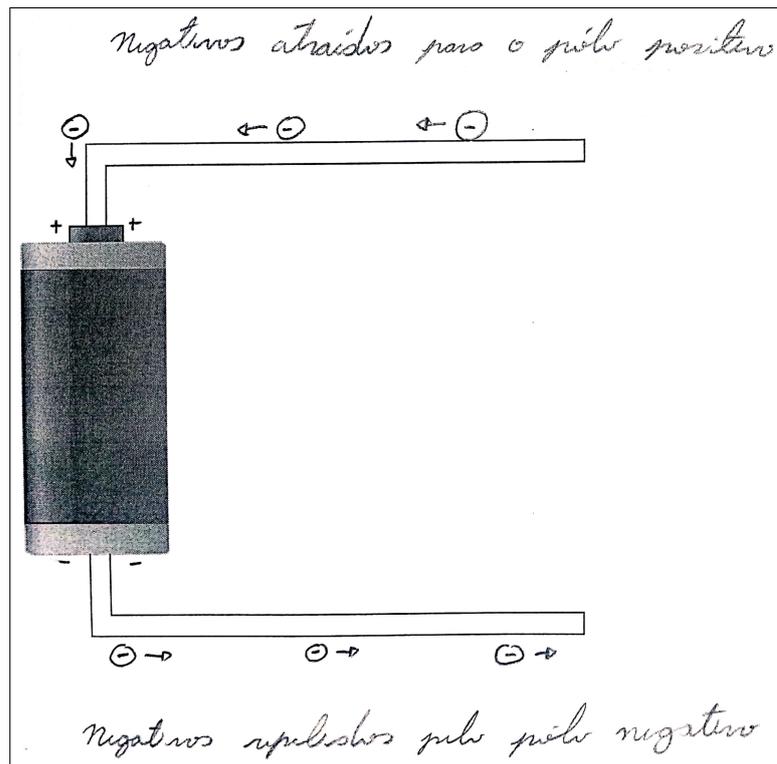


Figura 4.2: Representação elaborada por um aluno sobre comportamento dos elétrons de condução nos fios durante o regime transiente.

O resultado da **Atividade 7** (Fig. 3.10), mostrado na Tab. 4.6, nos possibilitou a realização de uma comparação com os da **Atividade 3** (Tab. 4.2), a fim de verificarmos o impacto da instrução pedagógica.

Característica presente / Componente	Carga elétrica localizada	Campo elétrico	Diferença de potencial	Resistência elétrica	Corrente elétrica
	Número de alunos que assinalaram a presença dessa característica				
Fio condutor	45	45	6	34	21
Total de alunos que participaram da atividade: 46					

Tabela 4.6: Respostas da Atividade 7.

Pode-se perceber um reflexo positivo da metodologia de ensino em relação à identificação da presença de carga elétrica localizada, campo elétrico e diferença de potencial no fio condutor. Apesar disso, como mostra a Tab. 4.7, ao analisarmos o que dizem

os alunos a respeito da distribuição da carga elétrica, a instrução não obteve o mesmo êxito. Diferentemente, a maioria dos estudantes assinalou corretamente a existência de um campo elétrico na superfície do fio condutor na situação estática. Mais uma vez, a abordagem de ensino se mostrou ineficiente no sentido de modificar o entendimento dos alunos relativamente à resistência e corrente elétricas.

Característica presente Componente	Carga elétrica localizada				Campo elétrico			
	I	S	I+S	N	I	S	I+S	N
Fio condutor	26	19	0	1	8	36	1	1
<b>Total de alunos que participaram da atividade: 46</b>								

**I: Interior**  
**S: Superfície**  
**I + S: Interior e superfície**  
**N: Não há no interior ou na superfície**

Tabela 4.7: Discriminação das respostas sobre a localização da carga e do campo da Atividade 7.

As ilustrações do arranjo fios condutores-bateria realizadas pelos alunos demonstraram que eles não encontraram dificuldade em representar a distribuição de carga nos fios condutores, porém apenas 15 dos 46 alunos conseguiram informar alguma característica a respeito da configuração do campo elétrico no fio condutor, seja internamente ou na superfície. A Fig. 4.3 mostra algumas representações realizadas pelos alunos.

A Tab. 4.8 mostra as respostas encontradas quando os alunos analisaram um circuito fechado composto apenas pelo fio condutor e a fonte de tensão proposto na **Atividade 8** (Fig. 3.12). Nesse caso, preferimos discutir apenas o resultado em relação à distribuição da carga elétrica e campo elétrico no fio condutor, pois eles são os elementos conceituais mais importantes dessa análise.

De forma satisfatória, os alunos identificaram a presença de carga elétrica localizada e campo elétrico, contudo, a atividade foi capaz de identificar que os alunos demonstram

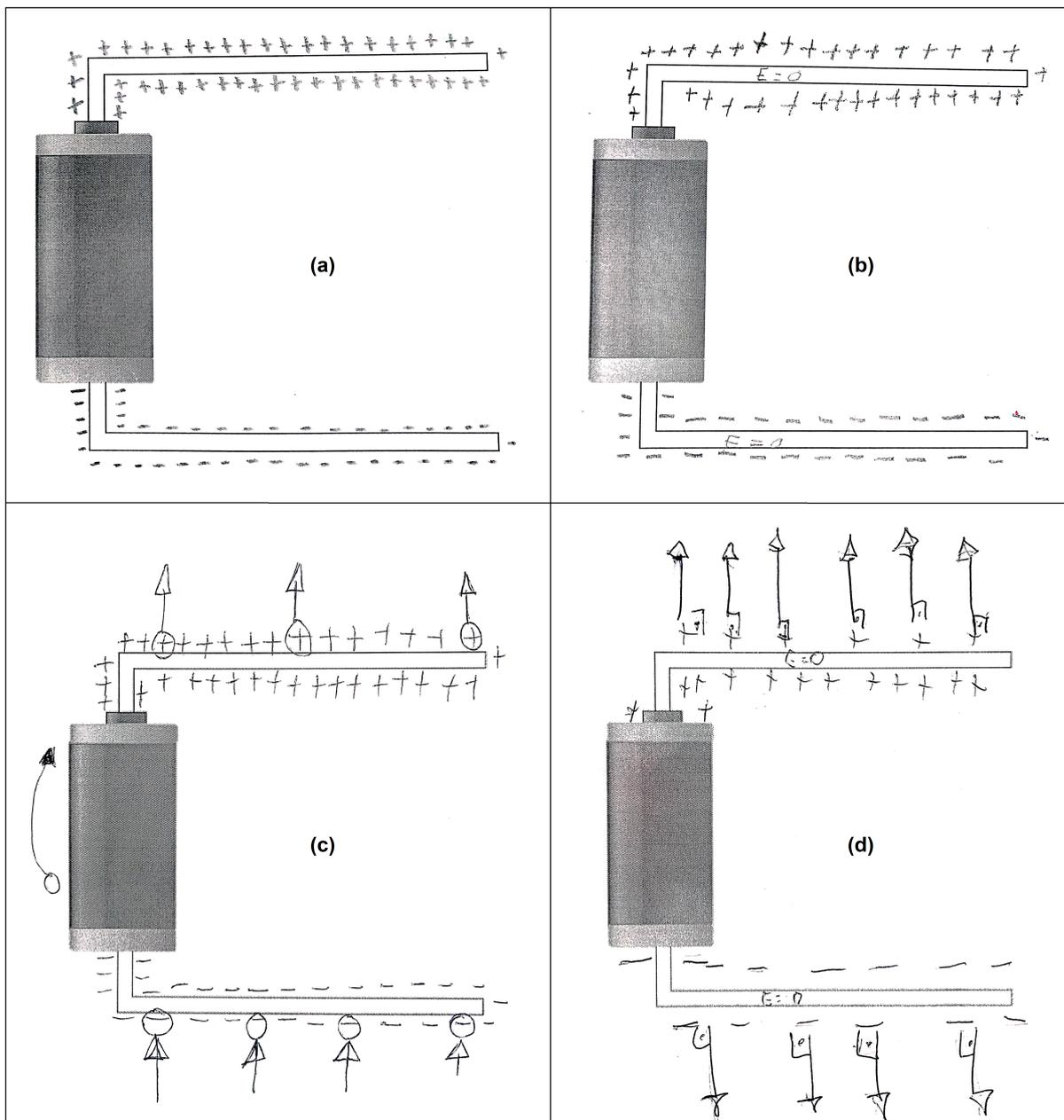


Figura 4.3: Representações elaboradas pelos alunos mostrando a distribuição de carga e o campo elétrico nos fios no equilíbrio eletrostático: **(a)** o aluno representou apenas a distribuição de carga nos fios; **(b)** além da distribuição de carga o aluno indicou que o campo elétrico no interior dos fios é nulo; **(c)** o aluno mostrou a distribuição de carga e o campo elétrico próximo à superfície externa do condutor; **(d)** descrição realizada por um aluno da carga superficial nos fios, bem como o campo elétrico interno e próximo à superfície externa (a orientação do campo externo no fio inferior está incorreta).

Característica presente Componente	Carga elétrica localizada				Campo elétrico			
	I	S	I+S	N	I	S	I+S	N
Fio condutor	26	19	0	1	8	37	1	0
Total de alunos que participaram da atividade: 46								

**I: Interior**  
**S: Superfície**  
**I + S: Interior e superfície**  
**N: Não há no interior ou na superfície**

Tabela 4.8: Respostas da Atividade 8.

dificuldade em determinar a configuração do campo elétrico e a distribuição de carga no fio condutor. Essa constatação também foi corroborada pelas ilustrações realizadas pelos alunos acerca do comportamento da estrutura dos componentes do circuito.

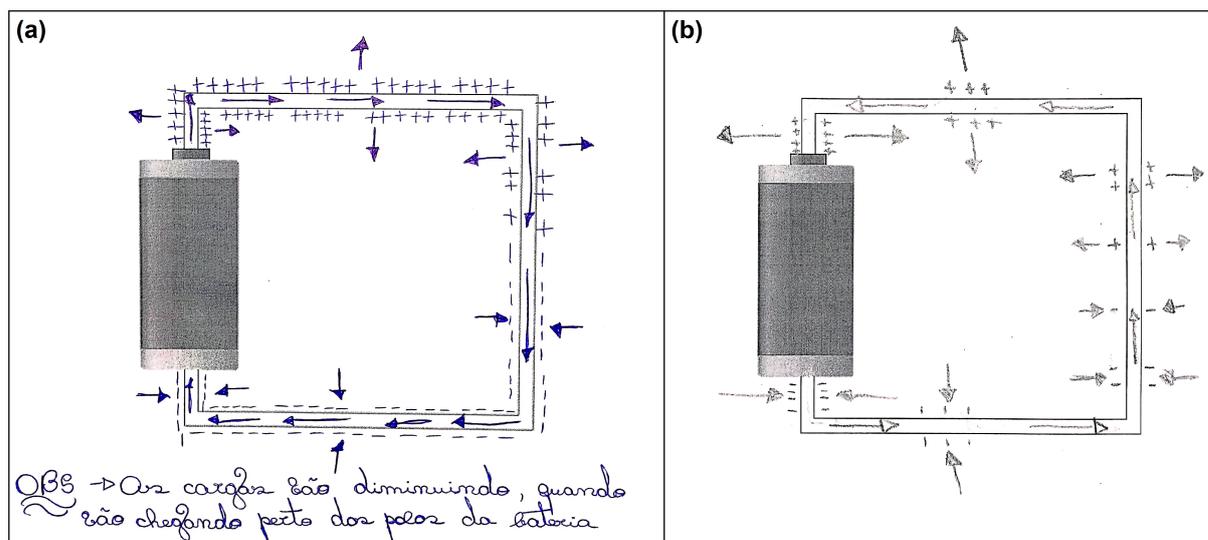


Figura 4.4: Diagramas feitos por alunos representando a distribuição de carga e os campos elétricos no fio e sua componente normal externa. Em (a) a observação do aluno está incorreta. A densidade de carga aumenta à medida que se aproxima dos contatos da pilha; (b) o sentido do campo elétrico no interior do fio é oposto ao que foi representado pelo aluno.

O circuito apresentado na **Atividade 9** (Fig. 3.14) exigiu que os estudantes analisas-

sem tanto a distribuição da carga elétrica no fio condutor quanto a do resistor (filamento da lâmpada). As respostas apresentadas nas tabelas 4.9 e 4.10 correspondem, respectivamente, ao fio condutor e ao resistor.

Característica presente Componente	Carga elétrica localizada				Campo elétrico			
	I	S	I+S	N	I	S	I+S	N
Fio condutor	15	20	2	1	18	12	8	0
<b>Total de alunos que participaram da atividade: 38</b>								

**I: Interior**  
**S: Superfície**  
**I + S: Interior e superfície**  
**N: Não há no interior ou na superfície**

Tabela 4.9: Respostas da Atividade 9 (fio condutor).

Característica presente Componente	Carga elétrica localizada				Campo elétrico			
	I	S	I+S	N	I	S	I+S	N
Lâmpada	22	15	5	0	25	8	9	0
<b>Total de alunos que participaram da atividade: 42</b>								

**I: Interior**  
**S: Superfície**  
**I + S: Interior e superfície**  
**N: Não há no interior ou na superfície**

Tabela 4.10: Respostas da Atividade 9 (filamento da lâmpada).

As tabelas 4.9 e 4.10 mostram que os estudantes não compreenderam a distribuição das cargas e dos campos elétricos, seja no condutor ou no resistor. Contudo, alguns alunos conseguiram construir representações desse circuito detalhando a distribuição das cargas elétricas, assim como a configuração do campo elétrico. A Fig. 4.5 exemplifica uma dessas representações.

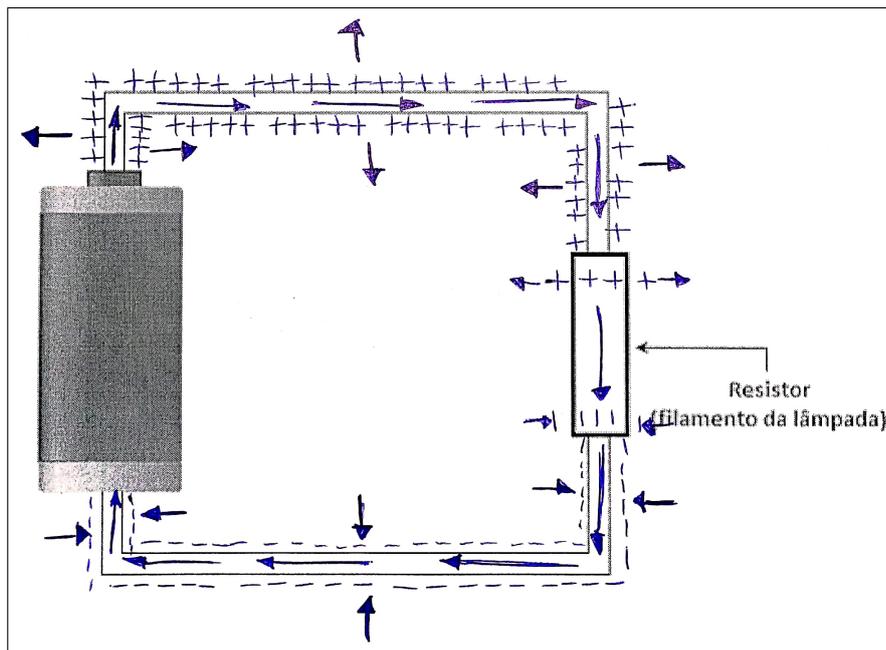


Figura 4.5: Diagrama elaborado por um aluno representando as distribuições de carga nos fios e no resistor juntamente com os respectivos campos elétricos e suas componentes normais externas.

Considerando a **Atividade 10** (3.16), observamos que alguns alunos conseguiram reunir boa parte dos conceitos discutidos durante as etapas da abordagem didática ao responderem à pergunta que desencadeou a análise desenvolvida. Nas figuras 4.6 e 4.7 apresentamos duas respostas encontradas nessa atividade.

Porque a carga localizada cria um campo elétrico que empurra os elétrons de condução e como o campo elétrico se espalha por todo o fio condutor à velocidade da luz, ele praticamente instantaneamente acende a lâmpada.

Figura 4.6: Resposta à pergunta: por que a lâmpada acende quase instantaneamente quando acionamos o interruptor?

Em dezembro de 2019, cerca de cinco meses após a aplicação da sequência de ensino, duas novas atividades foram propostas a 57 alunos que participaram do desenvolvimento da intervenção pedagógica. As situações-problema correspondiam à duas questões explo-

Ao acionarmos o interruptor, fechamos o circuito e fazemos com que cargas se espalhem quase instantaneamente sobre o condutor. Carga elétrica localizada é fonte de campo elétrico. Os campos paralelos e perpendiculares fazem com que as cargas se movimentem gerando corrente elétrica. Para explicar como temos a mesma corrente no resistor e no condutor se são resistências de valores diferentes, dizemos que há outro campo na lâmpada, um campo extra, isso é explicado devido as cargas que se acumulam no resistor, Este é o campo campo necessário para manter a mesma corrente durante todo o circuito. Corrente gera calor e este é transformado em energia luminosa (luz)

Figura 4.7: Resposta à pergunta motivacional reunindo boa parte do conteúdo discutido durante a sequência de ensino.

radas pelo Exame Nacional do Ensino Médio (Enem) e permitiam investigar as repercussões proporcionadas pela abordagem instrucional ao aprendizado dos estudantes sobre circuitos elétricos. Na **Atividade 11** (Apêndice C) [41], 33 alunos identificaram corretamente os esquemas que fariam a lâmpada acender. Quando comparado com os diagramas

obtidos na **Atividade 1**, esse resultado mostra que uma parcela significativa dos alunos têm, de fato, dificuldade em reconhecer as conexões adequadas dos polos da pilha com os contatos da lâmpada, principalmente porque foi observado que 9 estudantes assinalaram a alternativa **C** que incluía o esquema estabelecendo a ligação de uma extremidade do fio com o bulbo da lâmpada. Na **Atividade 12** (Apêndice C) [42], 32 estudantes reconheceram que a quase instantaneidade do acendimento da lâmpada é explicada pela rapidez com que o campo elétrico se propaga no circuito, demonstrando a persistência da conclusão encontrada em um estudo baseado na investigação que levou em consideração aspectos que tradicionalmente não são abordados e com os quais não possuíam familiaridade, confirmando o potencial que a metodologia didática apresenta para o aprendizado de circuitos elétricos, notadamente ao que se refere às particularidades inerentes ao regime transiente.

# Capítulo 5

## Considerações Finais

A realização de uma investigação dos processos microscópicos que ocorrem em um circuito elétrico, objetivando em primeira instância estabelecer uma relação causal com os fenômenos macroscópicos observados, revelou-se um instrumento poderoso de avaliação da compreensão que os aprendizes têm das grandezas e conceitos que tradicionalmente são utilizadas na análise dos circuitos elétricos. Contrapondo-se a uma análise baseada na enunciação de um conjunto leis e estratégias de solução, cujo propósito é o de se determinar quantitativamente as grandezas associadas a um arranjo específico dos componentes, sem discutir as alterações provocadas em sua estrutura, das quais o seu comportamento decorre, a metodologia de ensino que foi apreciada privilegiou o exame qualitativo das interações microscópicas ocorridas na estrutura dos elementos do circuito para construir o significado dos conceitos e grandezas que se tornam objeto da abordagem tradicional, e interpretar o fenômeno observado. A possibilidade de se discutir as entidades abstratas da eletrostática em um circuito de corrente constante, além de reforçar e recuperar a importância desse campo de estudo, amplia enormemente a abrangência do aprendizado que a eletrodinâmica dos circuitos tem oferecido.

A forma como a sequência didática foi desenvolvida pode ser estendida a diversas situações correlatas, permitindo que se explorem circuitos além dos puramente resistivos. Ademais, ao avaliar as interações microscópicas, à medida que as conexões entre os componentes são estabelecidas, a metodologia de ensino aplicada possibilita o estudo do

comportamento do arranjo em três estados, classificados de acordo com a velocidade média de deriva das cargas móveis. No ensino médio, geralmente, apenas o regime estacionário é investigado. Quanto a isso, o exame do arranjo durante o transiente reúne condições excelentes para conduzir uma discussão sobre o comportamento do circuito extrapolando os limites da corrente constante. Esse parece ser um caminho interessante para se desenvolver a intuição dos alunos acerca da reação dos componentes quando submetidos a uma fonte de tensão oscilante.

Destacamos a importância que uma situação física concreta representou para a elaboração e execução da instrução pedagógica. O fato da sequência de ensino ter sido construída a partir de um problema real vivenciado pelos alunos os deixou confortáveis o suficiente para que expusessem seus modos de raciocínio, dinamizando a sucessão das etapas que conduziram a construção do modelo interpretativo. Ao serem imersos na metodologia de análise do problema, os alunos acabaram exercitando essa característica do saber científico, adquirindo o conhecimento necessário para compreenderem o potencial de generalização e as fragilidades daquela representação simplificada do fenômeno. A exploração de imagens como recurso para concretizar a narrativa dos eventos consequentes da análise dos processos físicos permitiu que os alunos pudessem interagir com maior segurança com o modelo explicativo e aperfeiçoassem sua forma particular de visualização da situação investigada. Incorporar essa conduta ao raciocínio dos estudantes significa um passo essencial para a compreensão dos modelos científicos e das inovações tecnológicas.

Os resultados encontrados nas atividades que foram apresentadas no decurso da execução da sequência de ensino explicitaram dificuldades de compreensão e interpretações equivocadas a respeito das grandezas habitualmente utilizadas no exame de circuitos elétricos. Isso demonstra que, embora saibam determinar o valor dessas quantidades físicas, seu significado não está claro para os alunos. O desentendimento entre os resultados de uma análise baseada na determinação quantitativa das grandezas e os oriundos de uma inspeção sobre o entendimento do que essas quantidades representam pode ser resolvido

se os alunos puderem identificar uma precisa relação causal. Nesse sentido, atividades que analisem as transformações ocorridas na distribuição de carga elétrica em diferentes etapas da construção do circuito, reúnem condições ótimas para se avaliar tanto a compreensão dos alunos a respeito das grandezas associadas às interações microscópicas como aquelas relacionadas com o comportamento macroscópico.

Em última análise, consideramos que os objetivos da abordagem instrucional devem ser referenciados por uma investigação sobre o conhecimento do público-alvo a respeito da estrutura da matéria. Assim sendo, reiteramos que esse modelo pedagógico de instrução pode ser consumado com alunos que conhecem muito pouco (ou nada) de eletrostática, podendo ser utilizado como uma introdução ao estudo do eletromagnetismo. Nesse caso, o estudo pode ser iniciado examinando a matéria com o fenômeno da eletrização, construindo a partir daí o modelo para sua estrutura fundamental. Os conceitos discutidos e estabelecidos poderão ser resgatados nas etapas de construção do circuito, sendo gradativamente introduzidos observando sua relevância para explicar o comportamento observado. Conduzindo a instrução dessa forma consegue-se dar sentido ao tipo de interpretação que se quer levar adiante e maior solidez conceitual às grandezas físicas. Mesmo em um contexto onde os alunos já possuam alguma familiaridade com os conceitos da eletrostática, o professor pode julgar conveniente abrir mão do detalhamento efetuado sobre o campo elétrico e se ater à explicação sobre o surgimento da corrente elétrica no circuito. Em cursos introdutórios de nível superior, à análise do circuito pode-se acrescentar o exame do campo magnético, propiciando uma discussão sobre a transferência de energia através da avaliação do vetor de Poynting, um conceito que normalmente só é introduzido no contexto das ondas eletromagnéticas.

# Referências Bibliográficas

- [1] CHABAY, R. W.; SHERWOOD, B. A. **Matter and interactions: electric and magnetic interactions**. 4th edn. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2015. xii, xiii, xiv, xvi, xvii, 11, 20, 21, 22, 31, 36, 37, 38, 104, 113, 114
- [2] SOMMERFELD, A. **Lectures on theoretical physics: electrodynamics**. Translated by Edward G. Ramberg. 2nd edn. New York, NY: Academic Press, 1952. 11, 14
- [3] JEFIMENKO, O. D. **Electricity and magnetism: an introduction to the theory of electric and magnetic fields**. 2nd edn. Star City, WV: Electret Scientific Company, 1989. 11
- [4] ASSIS A. K. T.; HERNANDES, J. K. **A força elétrica de uma corrente: Weber e as cargas superficiais de condutores resistivos com correntes constantes**. São Paulo, SP: Edusp; Maceió, AL: EdUFAL, 2009. 11, 12, 14
- [5] FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. **The Feynman lectures on physics: mainly electromagnetism and matter**. Menlo Park, CA: Addison-Wesley, 1963. 12
- [6] REITZ, J.; MILFORD, F.; CHRISTY, R. **Fundamentos da teoria eletromagnética**. Tradução de Renê Balduino Sander e Carlos Duarte. 3ed. Rio de Janeiro, RJ: Editora Campus, 1982. 13

- [7] KIRCHHOFF, G. On a deduction of Ohm's laws, in connexion with the theory of electro-statics. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 37, n. 252, p. 463-468, 1850. 14
- VARNEY, R. N.; FISHER, L. H. Electric fields associated with stationary currents. **American Journal of Physics**, v. 52, n. 12, p. 1097-1099, 1984.
- [8] VARNEY, R. N.; FISHER, L. H. Electric fields associated with stationary currents. **American Journal of Physics**, v. 52, n. 12, p. 1097-1099, 1984. 14
- [9] MARCUS, A. The electric field associated with a steady current in long cylindrical conductor. **American Journal of Physics**, v. 9, n. 4, p. 225-226, 1941. 14
- [10] JEFIMENKO, O. Demonstration of the electric fields of current-carrying conductors. **American Journal of Physics**, v. 30, n. 1, p. 19-21, 1962. xii, 14, 15
- [11] PARKER, S. Electrostatics and current flow. **American Journal of Physics**, v. 38, n. 6, p. 720-723, 1970. xiii, 14, 28
- [12] MOREAU, W. R. et al. Charge density in circuits. **American Journal of Physics**, v. 53, n. 6, p. 552-553, 1985. 14
- [13] 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. 15, 16
- [14] ROSSER, W. G. V. Magnitudes of surface charge distributions associated with electric current flow. **American Journal of Physics**, v. 38, p. 265-266, 1970. 15
- [15] HERNANDES, J. A.; ASSIS, A. K. T. The potential, electric field and surface charges for a resistive long straight strip carrying a steady current. **American Journal of Physics**, v. 71, n. 9, p. 938-942, 2003. 16

- [16] HEALD, M. A. Electric fields and charges in elementary circuits. **American Journal of Physics**, v. 52, n. 6, p. 522-526, 1984. 16
- [17] GALILI, Igal; GOIHBARG, Elisabetta. Energy transfer in electrical circuits: A qualitative account. **American journal of physics**, v. 73, n. 2, p. 141-144, 2005. 16
- [18] SILVA, A. A.; SOARES, R. Voltage versus current, or the problem of the chicken and the egg. **Physics Education**, v. 42, n. 5, p. 508, 2007. 16
- [19] MATAR, M.; WELTI, R. La física que está oculta en un circuito eléctrico simple. **Revista de enseñanza de la física**, v. 23, n. 1 e 2, p. 85-94, 2010. 16
- [20] HARBOLA, M. K. Energy flow from a battery to other circuit elements: Role of surface charges. **American Journal of Physics**, v. 78, n. 11, p. 1203-1206, 2010. 16
- [21] HÄRTEL, H. Tensão e cargas superficiais: o que Wilhelm Weber já sabia há 150 anos. Tradução de André Koch Torres Assis. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 29, n. 3, p. 1015-1029, 2012. 16
- [22] MÜLLER, Rainer. A semiquantitative treatment of surface charges in DC circuits. **American Journal of Physics**, v. 80, n. 9, p. 782-788, 2012. 16
- [23] PREYER, N. W. Surface charges and fields of simple circuits. **American Journal of Physics**, v. 68, n. 11, p. 1002-1006, 2000. 16
- [24] MAJCEN, S.; HAALAND, R. K.; DUDLEY, S. C. The Poynting vector and power in a simple circuit. **American Journal of Physics**, v. 68, n. 9, p. 857-859, 2000. 16
- [25] MACHADO, K. D. **Teoria do eletromagnetismo**. Ponta Grossa, PR: UEPG, 2002. v.2. 17

- [26] GRIFFITHS, D. J. **Introduction to Electrodynamics**. 4th edn. Englewood Cliffs, NJ: Pearson, 2013. 17
- [27] ZANGWILL, A. **Modern Electrodynamics**. New York, NY: Cambridge University Press, 2012 18
- [28] RUSSELL, B. R. Surface charges on conductors carrying steady currents. **American Journal of Physics**, v. 36, n. 6, p. 527-529, 1968. 19
- [29] HÄRTEL, H. Voltage and surface charges: what Wilhelm Weber already knew 150 years ago. Translated by Hermann Härtel. **Praxis der Naturwissenschaften-Physik in der Schule**, v. 5, p. 25-31, 2012. xii, xiii, xvii, 19, 20, 24, 116, 122
- [30] MATZEK, M. A.; RUSSELL, B. R. On the transverse electric field within a conductor carrying a steady current. **American Journal of Physics**, v. 36, n. 10, p. 905-907, 1968. 19, 32
- [31] MIRANDA, Enrique N. The fields inside a conductor carrying a steady current. **European journal of physics**, v. 20, n. 2, p. 97, 1999. 19
- [32] ASSIS, A. K. T.; RODRIGUES, W. A.; MANIA, A. J. The electric field outside a stationary resistive wire carrying a constant current. **Foundations of Physics**, v. 29, n. 5, p. 729-753, 1999. 19, 27
- [33] SEFTON, I. M. Understanding electricity and circuits: what the text books don't tell you. In: Science Teachers' Workshop, 2002. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/45f8/8e04e25cdcd59d79b8140ed6d2a856275ad4.pdf>>. Acesso em: 21 de julho de 2018. 21
- [34] COOMBES, C. A.; LAUE, H. Electric fields and charge distributions associated with steady currents. **American Journal of Physics**, v. 49, n. 5, p. 450, 1981. 27

- [35] SHERWOOD, B. A.; CHABAY, R. W. **A unified treatment of electrostatics and circuits**. Disponível em: <<https://matterandinteractions.org/wp-content/uploads/2016/07/circuit.pdf>>. Acesso em: 21 de julho de 2018. xiii, 27
- [36] PACCA, J. L. A. et al. Corrente elétrica e circuito elétrico: algumas concepções do senso comum. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 20, n. 2, p. 151-167, 2003. 29
- [37] ANDRADE, F. A. L. et al. Recorrência de concepções alternativas sobre corrente elétrica em circuitos simples. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, n. 3, 2018. 29
- [38] HÄRTEL, H. The electric circuit as a system: a new approach. **European Journal of Science Education**, v. 4, n. 1, p. 45-55, 1982. 29
- [39] HÄRTEL, H. A qualitative approach to electricity: a guide to visualising electro-dynamics using symbols and images (versão eletrônica revisada). Palo Alto Research Center, Palo Alto, setembro de 1987. Disponível em: <<http://www1.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/PUB/Quality-Electricity.pdf>>. Acesso em: 21 de julho de 2018. xiii, xiv, xvii, 29, 41, 121
- [40] ROSSER, W. G. V. What makes an electric current flow. **American Journal of Physics**, v. 31, n. 11, p. 884-885, 1963. 38
- [41] BRASIL. Ministério da Educação. **Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (INEP)**. Exame Nacional do Ensino Médio, 2011. Disponível em: <[http://download.inep.gov.br/educacao\\_basica/enem/provas/2011/02\\_AMARELO\\_GAB.pdf](http://download.inep.gov.br/educacao_basica/enem/provas/2011/02_AMARELO_GAB.pdf)>. Acesso em: 7 de abril de 2018. 88
- [42] BRASIL. Ministério da Educação. **Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (INEP)**. Exame Nacional do Ensino Médio, 2013.

- Disponível em: <[http://download.inep.gov.br/educacao\\_basica/enem/provas/2013/caderno\\_enem2013\\_sab\\_amarelo.pdf](http://download.inep.gov.br/educacao_basica/enem/provas/2013/caderno_enem2013_sab_amarelo.pdf)>. Acesso em: 7 de abril de 2018. 89
- [43] ALMEIDA, M. A. **Introdução às Ciências Físicas 2**. Rio de Janeiro, RJ: Cederj, 2014. vol1. xvi, 105, 107
- [44] LABORATÓRIO DIDÁTICO DE FÍSICA (LADIF/UFRJ). **Eletromagnetismo: blindagem eletrostática**. 2013. (15min16s). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=qj-c6UHkmV0>>. Acesso em: 7 de abril de 2018. 56, 112
- [45] ALMEIDA, M. A. **Linhas do campo elétrico: anéis carregados**. 2013. (1min04s) Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=YUWEKRChEME>>. Acesso em: 7 de abril de 2018. 56, 112
- [46] ALMEIDA, M. A. **Linhas do campo elétrico: linhas circular e não circular carregadas**. 2013. (1min12s) Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=yOipO2Tr03c>>. Acesso em: 7 de abril de 2018. 56, 112
- [47] ALMEIDA, M. A. **Linhas do campo elétrico: dipolo elétrico**. 2013. (1min13s) Disponível em: <[https://www.youtube.com/watch?v=N3UVw\\_Yuu7Y](https://www.youtube.com/watch?v=N3UVw_Yuu7Y)>. Acesso em: 7 de abril de 2018. 56
- [48] ALMEIDA, M. A. **Linhas do campo elétrico: linhas de carga paralelas**. 2013. (1min07s) Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=ytMZiKyCsQo>>. Acesso em: 7 de abril de 2018. 56
- [49] ALMEIDA, M. A. **Linhas do campo elétrico: carga elétrica pontual e anel carregado**. 2013. (1min59s) Disponível em:

<<https://canal.cecierj.edu.br/recurso/10553>>. Acesso em: 7 de abril de 2018.

56

- [50] LABORATÓRIO DIDÁTICO DE FÍSICA (LADIF/UFRJ). **Eletromagnetismo: cargas elétricas**. 2013. (7min46s). Disponível em: <[https://www.youtube.com/watch?v=dmvGS\\_Sx8GE](https://www.youtube.com/watch?v=dmvGS_Sx8GE)>. Acesso em: 7 de abril de 2018. 56
- [51] LABORATÓRIO DIDÁTICO DE FÍSICA (LADIF/UFRJ). **Eletromagnetismo: forças elétricas em corpos neutros**. 2013. (10min09s). Disponível em: <[https://www.youtube.com/watch?v=\\_V2XTXPra6Y](https://www.youtube.com/watch?v=_V2XTXPra6Y)>. Acesso em: 7 de abril de 2018. 56
- [52] LABORATÓRIO DIDÁTICO DE FÍSICA (LADIF/UFRJ). **Eletromagnetismo: isolantes e condutores**. 2013. (15min11s). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=bm8ApY7qedo>>. Acesso em: 7 de abril de 2018. 56
- [53] GLOBONEWS (Jornal das Dez). **Imagens mostram o maior avião comercial do mundo sendo atingido por raios**. 2011. (00min44s). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=N-AhT-FqHck>>. Acesso em: 7 de abril de 2018. 56
- [54] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. Wikipedia, the free encyclopedia. **Incandescent light bulb**. Disponível em: <[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Incandescent\\_light\\_bulb&oldid=934962836](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Incandescent_light_bulb&oldid=934962836)>. Acesso em: 10 de dezembro de 2019. 119

# Apêndice A

## Material didático instrucional

Texto elaborado para auxiliar a condução da análise de um circuito elétrico composto por pilha, lâmpada incandescente, fios condutores resistivos e chave interruptora, enfatizando a importância do exame da distribuição das cargas elétricas para compreensão das características do circuito. A estrutura desse instrumento pedagógico foi concebida de uma forma que pudesse ser utilizada diretamente pelo estudante, mas também apresenta a aparência de uma sequência de ensino. Assim, inspirado nesse modelo, o professor pode construir sua própria sequência didática ou utilizá-lo como está, agregando a ele sua experiência docente com recursos, exemplos e analogias que privilegiem o aprendizado de forma significativa. Esse material pressupõe que os alunos já tenham estudado os fundamentos da eletrostática e a lei de Ohm. Entretanto, o professor pode adequá-lo para ser o ponto de partida para o estudo do eletromagnetismo.



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**

Instituto de Física

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Mestrado Profissional em Ensino de Física

Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física



## **A eletrostática oculta na eletrodinâmica dos circuitos de corrente constante**

**Anderson José da Fonseca**

**Germano Maioli Penello**

Produto educacional elaborado para ser utilizado como instrumento pedagógico auxiliar para o ensino de um circuito elétrico composto por pilha, lâmpada incandescente, fios condutores resistivos e chave interruptora, enfatizando a importância do exame da distribuição das cargas elétricas como alternativa à abordagem habitual. Esse material integra a dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

**Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2020**

## Distribuição de cargas elétricas e campo elétrico em um circuito elétrico simples

Com certeza você já observou que uma lâmpada acende quase imediatamente após o acionamento do interruptor. Na verdade, tão rapidamente quanto a lâmpada acende a campainha soa ou as pás de um ventilador começam a girar assim que um botão é acionado. Mas, você sabe explicar o porquê?

Vamos simplificar a situação estudando um circuito composto por uma pilha, fios resistivos, uma lâmpada incandescente e uma chave interruptora. Observe a situação representada na sequência de imagens:

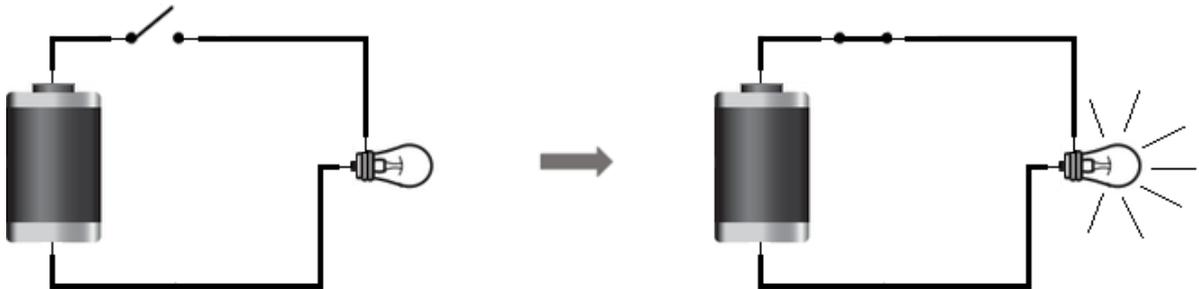


Figura A.1: Esquema do circuito elétrico usado para fazer a lâmpada acender.

### Para começar...

Os elementos (pilha, fios condutores, chave interruptora e lâmpada) não foram arrumados de qualquer maneira. Eles foram ligados entre si com um objetivo: fazer a lâmpada brilhar. Essa arrumação, com os integrantes conectados entre si, recebe o nome de circuito elétrico. Os componentes do circuito e a forma como eles são conectados uns aos outros determinarão o seu comportamento e do circuito como um todo. Um circuito é, portanto, um sistema. Isto é, um conjunto de elementos com características individuais porém, interdependentes e organizados de forma que o comportamento de cada componente é influenciado e influencia os demais. Assim, para entendermos como a lâmpada acende tão rapidamente, precisamos começar entendendo o que acontece no interior dos

componentes do circuito. Para o nosso circuito simples, dois deles são fundamentais: a pilha e os fios condutores.

## A pilha

A pilha ou bateria é conhecida como um tipo de fonte portátil de energia. Ou seja, é um dispositivo que armazena energia, permitindo que ela possa ser transportada de um lugar para outro (no nosso bolso, por exemplo). Quando a pilha é conectada de forma adequada aos demais elementos do nosso circuito, algo funciona. Nossa lâmpada acende!!! Mas, qual o papel desempenhado pela pilha em nosso circuito? Por processos internos relacionados às reações químicas que ocorrem em seu interior, uma pilha consegue manter uma separação de cargas elétricas entre seus contatos metálicos (terminais ou polos). Os processos químicos em ação dentro da pilha fazem com que elétrons sejam deslocados e acumulados sobre um dos contatos externos, dando origem a uma região com uma concentração de cargas negativas (o polo negativo). Esses elétrons, estão em falta no outro contato (lembre-se do princípio de conservação da carga elétrica de um sistema), dando origem a uma região com concentração de carga positiva (o polo positivo). Quanto mais cargas se acumularem em cada um dos contatos, maior será a repulsão entre elas. Com o tempo, ficará cada vez mais difícil remover elétrons do polo positivo por causa da força de atração entre o polo e o elétron. De modo semelhante, a repulsão dificultará que elétrons adicionais sejam acumulados no polo negativo. O acúmulo de cargas em cada terminal atinge o limite quando a força interna da pilha (que provoca a separação) se equilibra com as forças atrativas e repulsivas.

A Fig. A.3 apresenta uma analogia com uma “pilha mecânica” e pode ajudá-lo a compreender o que acontece no interior dela durante o processo de separação das cargas. Um motor move uma esteira que remove elétrons de uma placa deixando-a positiva e os transporta esses até a outra placa, tornando-a negativa. Esse processo mantém constante a quantidade de carga em cada terminal e envolve um gasto de energia para o motor

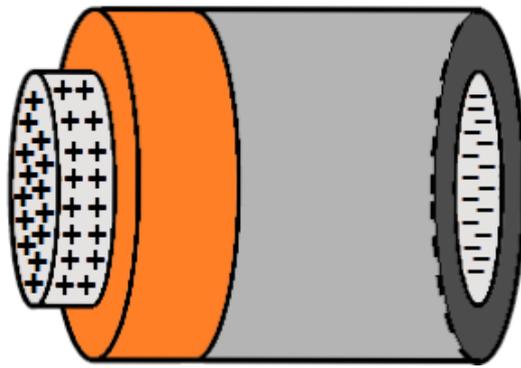


Figura A.2: Pilha.

funcionar. Da mesma forma, as forças que realizam o trabalho de transportar os elétrons do polo positivo para o negativo (contrariando a ação do campo) consomem a energia liberada nas reações químicas.

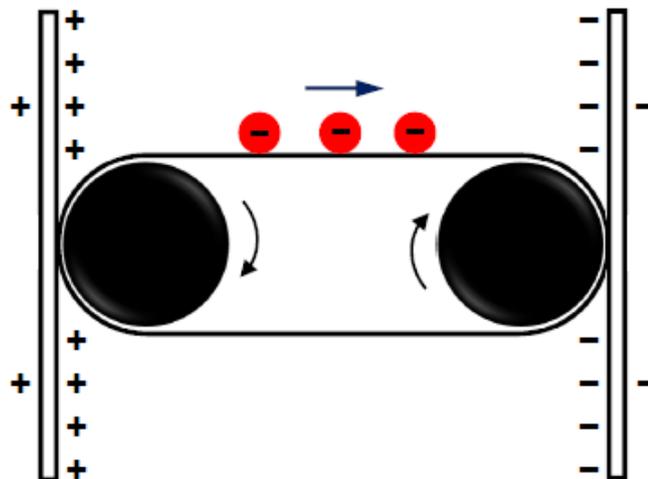


Figura A.3: Modelo de uma “pilha mecânica”. Imagem extraída do livro de R. Chabay e B. Sherwood [1] (adaptada).

Existe algo importante que devemos lembrar: uma concentração de carga positiva ou negativa é uma fonte de campo elétrico!

## Os fios condutores

Relembrando o processo de eletrização por contato, os objetos condutores eram aqueles que, estando inicialmente neutros, quando entravam em contato com um objeto eletrizado, toda a sua superfície ficava eletrizada. Sendo assim, podiam transmitir a eletricidade de

um ponto ao outro. Nos sólidos metálicos os elétrons das últimas camadas podem transitar livremente através da estrutura do material. Adotaremos um modelo no qual os fios condutores são formados por uma rede de íons estacionários (carregados positivamente) preenchida com um “mar” de elétrons, como um gás de elétrons “livres”. Esses elétrons são chamados de elétrons de condução e se movem incessantemente e desordenadamente pela rede de íons, colidindo frequentemente com os íons da rede. Como o movimento dos elétrons de condução é aleatório, sua velocidade vetorial média é nula.

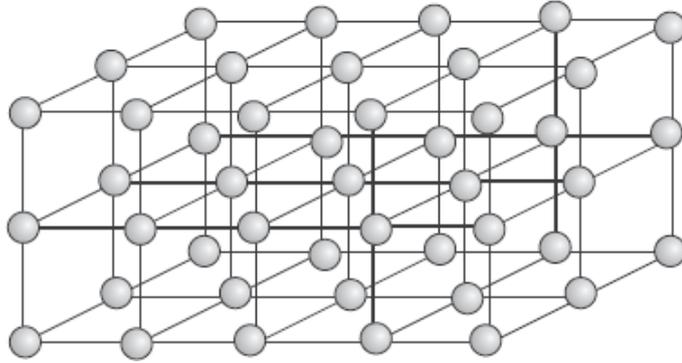


Figura A.4: Rede de íons. Imagem extraída do livro de M. A. Almeida [43].

Se o fio condutor ficar sob a ação de um campo elétrico  $\vec{E}$ , os componentes do nosso modelo de condução (os íons da rede e os elétrons de condução) ficarão sujeitos a uma força elétrica (lembre-se que  $\vec{F} = q\vec{E}$ ). Porém, só elétrons de condução podem se movimentar pela rede! Eles terão, então, seu movimento orientado por esse campo (lembre-se  $\vec{F} = m\vec{a}$ ), originando uma corrente elétrica! Em um sólido metálico, a corrente elétrica consiste no fluxo dos elétrons de condução através da rede de íons. Observe que se esse fluxo fosse determinado apenas pela ação do campo elétrico a velocidade dos elétrons aumentaria continuamente ao longo do tempo de uma quantidade igual a  $\frac{qE}{m}$ . Porém, lembre-se que em seu movimento através da rede de íons os elétrons de condução colidem frequentemente com ela. Nessas colisões, os elétrons transmitem toda sua energia cinética à rede íons. Imediatamente após colidirem os elétrons retomam o seu movimento, pois absorvem energia do sistema. Você pode estar pensando que nada deve mudar, afinal tudo o que os

elétrons ganham eles perdem. Mas, espere um pouco! Devido a interação com o campo elétrico a energia cinética dos elétrons foi aumentada. Portanto, os elétrons receberam energia de um agente externo e depositaram essa energia na rede de íons. Isso deve ter provocado alguma consequência sobre ela. E provoca! Durante as colisões, alguma quantidade de energia (que no princípio estava armazenada na bateria) é transmitida à rede de íons, aumentando a sua agitação térmica. Como resultado, o fio aquece. Além disso, como os elétrons estão sendo empurrados pelo campo elétrico, a velocidade vetorial média deles deixa de ser nula e faz com que eles se desloquem lentamente pelo condutor.

Pelo que vimos, os elétrons são arrastados através da rede de íons pela ação de um campo elétrico externo que tem origem em algum lugar. A dificuldade enfrentada pelo fluxo dos elétrons de condução ao atravessarem a rede de íons positivos é interpretada macroscopicamente como a resistência elétrica. Microscopicamente, existe uma grandeza que reúne as informações relacionadas a essas colisões e, portanto, está relacionada com a resistência elétrica. Essa grandeza é chamada de condutividade elétrica do material ( $\sigma$ ). O inverso da condutividade elétrica é a resistividade elétrica ( $\rho$ ).

Esqueça a ideia de que o movimento dos elétrons ocorre em linha reta. A trajetória é mais parecida com um zigue-zague, ricocheteando nos íons da rede e espalhando-se por ela, avançando lentamente no condutor (veja a Fig. A.5). De fato, a velocidade vetorial média de percurso dos elétrons (conhecida como velocidade de deriva ou de arraste) é muito baixa. Para se ter uma ideia, a velocidade de uma lesma é cerca de  $2,8 \text{ mm/s}$  enquanto a velocidade média de um elétron em um fio condutor de cobre, de seção transversal igual  $A = 2,5 \text{ mm}^2$ , percorrido por uma corrente elétrica de  $1,0 \text{ A}$ , é aproximadamente,  $0,029 \text{ mm/s}$ . É importante que você não confunda a velocidade que os elétrons possuem entre duas colisões com aquela relacionada ao seu movimento ordenado através do condutor. Entre uma colisão e outra os elétrons podem atingir velocidades da ordem de  $10^6 \text{ m/s}$ .

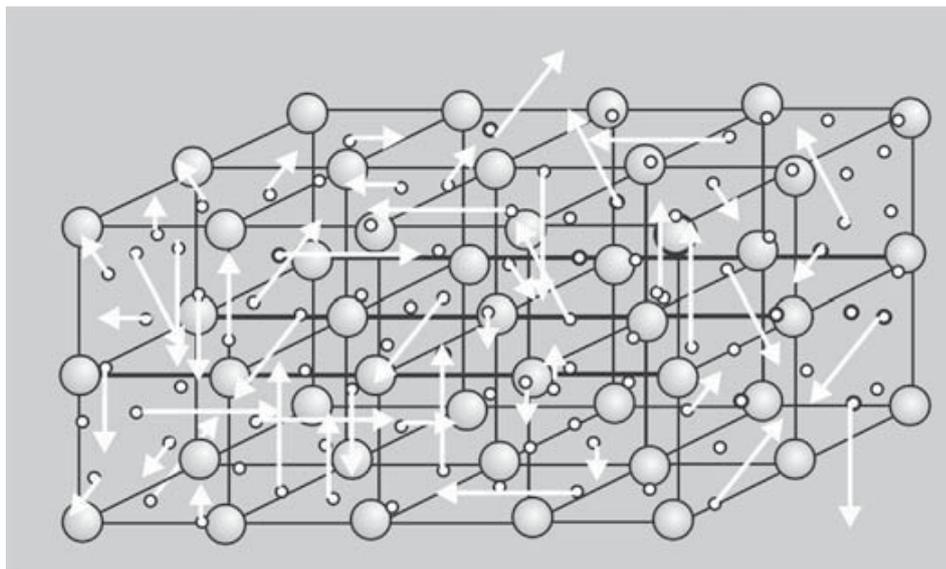


Figura A.5: Movimento dos elétrons através da rede. Imagem extraída do livro de M. A. Almeida [43].

## O filamento da lâmpada

O filamento da lâmpada nada mais é do que um fio condutor, porém com uma resistência elétrica mais elevada que a dos fios condutores do circuito. Da mesma forma que nos fios condutores, uma parcela da energia armazenada na pilha é transformada em energia térmica. A diferença é que no filamento a quantidade de energia que é transformada em energia térmica e que provocará o aquecimento é muito maior. Ela é capaz de aumentar tanto a temperatura do filamento que radiação é emitida na forma de luz.

**Mas, se a resistência é maior no filamento da lâmpada, a velocidade de arraste dos elétrons (e, portanto, a corrente elétrica) não deveria ser menor?**

Sim!!! E para que a velocidade de deriva dos elétrons (e, portanto, a corrente elétrica) através do filamento da lâmpada seja a mesma, uma força de maior intensidade deve atuar sobre os elétrons. Retornando à relação entre a força elétrica e o campo elétrico  $\vec{F} = q\vec{E}$  e lembrando que o que provoca o movimento ordenado (fluxo) dos elétrons de condução é a ação de um campo elétrico sobre eles, chegamos à conclusão que se a força elétrica deve aumentar de intensidade para manter o fluxo de elétrons, significa que o valor do campo

elétrico no filamento tem que ser maior. E é!!! Mas, como isso é possível? Teremos que explicar isso também!



Será que já encontramos a nossa resposta?  
Isto é, se a pilha é uma fonte de campo  
elétrico, será esse campo o responsável  
por fazer a lâmpada brilhar?

Vamos pensar um pouco sobre isso...

Já vimos que o campo elétrico diminui de intensidade à medida que nos afastamos da fonte do campo e aumenta quando nos aproximamos dela. Vale recordar: para uma carga puntiforme o valor do campo elétrico é calculado por:

$$E = k \frac{Q}{d^2}.$$

Sendo assim:

Se a fonte do campo elétrico no filamento da lâmpada são as cargas que se encontram nos polos da bateria, a lâmpada não deveria brilhar mais quando colocada mais perto dela?

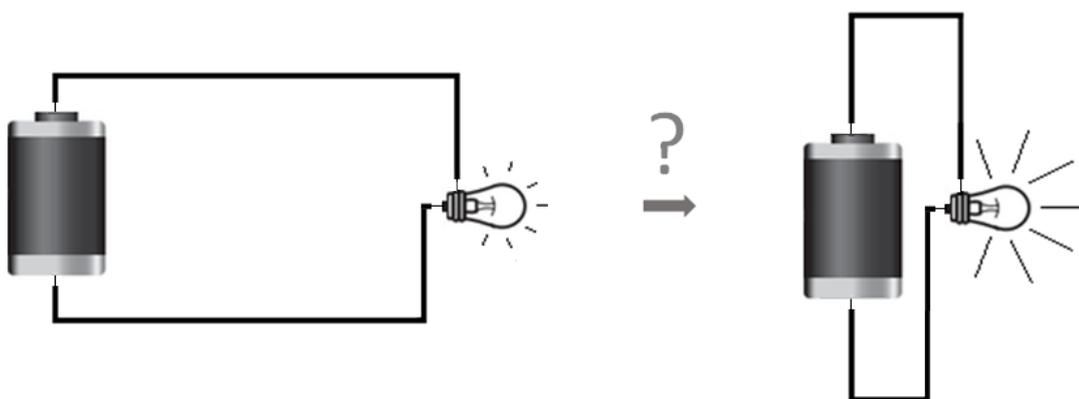


Figura A.6: O brilho da lâmpada muda quando ela se aproxima ou se afasta da pilha?

Como o brilho da lâmpada não se altera, a pilha não pode ser a fonte do campo elétrico que provoca a corrente elétrica!

Ainda não encontramos nossa resposta!



Vamos investigar o que acontece com os fios condutores quando os conectamos aos contatos da pilha.

Conectar um condutor ao polo de uma pilha não é muito diferente de estabelecer o contato de um condutor eletrizado com um condutor neutro. A diferença é que a pilha consegue manter constante a quantidade de carga em seu terminal. Vamos lembrar o que acontece no processo de eletrização por contato, pois isso vai nos ajudar a entender o que acontece quando conectamos o condutor ao contato da pilha. Observe a sequência mostrada na Fig. A.7.

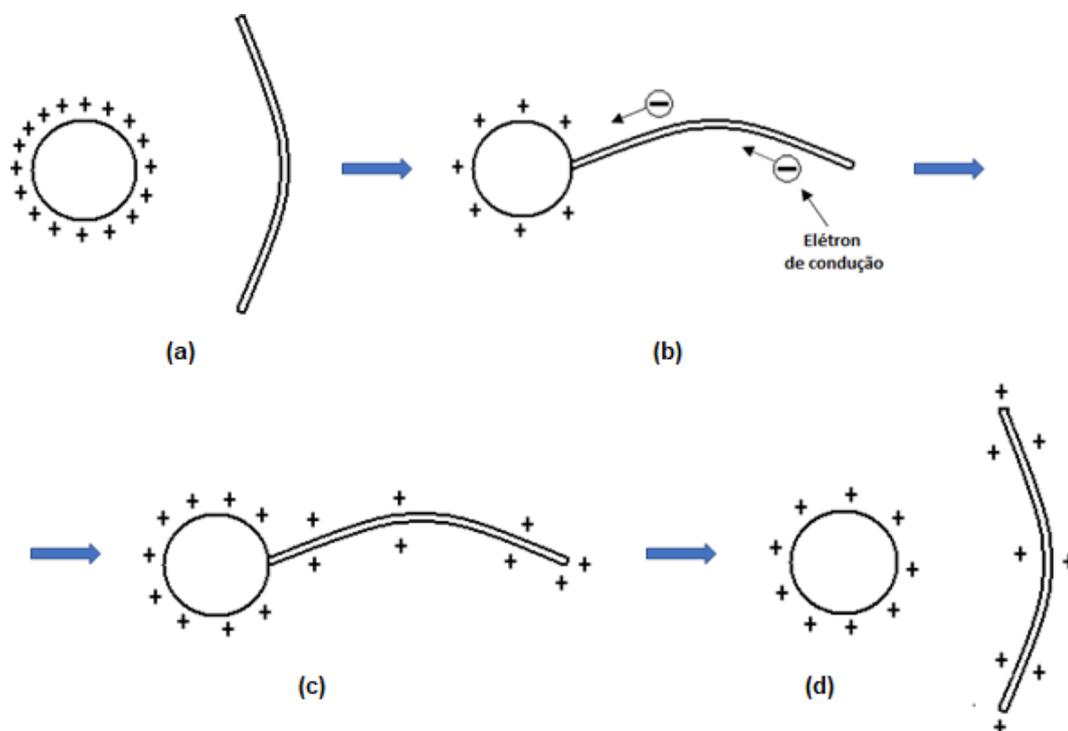


Figura A.7: Processo de eletrização pelo contato.

Quando estabelecemos o contato de um condutor eletrizado positivamente com um objeto condutor neutro (um fio, por exemplo), os elétrons de condução do fio condutor são atraídos pelas cargas positivas excedentes do condutor eletrizado. Ocorre uma migração de elétrons do fio para o condutor eletrizado, deixando para trás regiões sobre o fio com falta de elétrons (portanto, eletrizadas positivamente) (Fig. A.7**(b)**). Quando ocorre o equilíbrio entre as forças de atração sobre os elétrons de condução, exercidas pelos íons da rede do fio e pelas cargas positivas que existem no objeto condutor, o fluxo é interrompido (Fig. A.7**(c)**). Ao serem separados, os dois objetos estão eletrizados positivamente (Fig. A.7**(d)**). A quantidade de carga em cada um dos objetos é uma porção da carga elétrica total do sistema antes do contato (ou seja, a do objeto eletrizado, já que o fio condutor era neutro), de forma que a soma das quantidades de carga no objeto e no fio condutor (nosso sistema) quando forem separados (Fig. A.7**(d)**) é igual a quantidade de carga do sistema antes do contato (Fig. A.7**(a)**). Não foram criadas cargas elétricas ao encostar os dois condutores! Uma vez que o nosso sistema é isolado, a quantidade de carga nele permanece constante. Esse é o princípio de conservação das cargas elétricas. Uma situação semelhante aconteceria se o objeto eletrizado estivesse carregado negativamente. A diferença é que ocorreria uma migração de elétrons do objeto eletrizado para o fio condutor inicialmente neutro. Ao final, ambos ficariam carregados negativamente.

## Conectando os fios aos polos da pilha

Quando o fio condutor, inicialmente neutro, é colocado em contato com o polo positivo da pilha (lembre-se, ele é uma fonte de campo elétrico) os elétrons de condução são atraídos ( $\vec{F} = q\vec{E}$ ) por ele e mergulham nele, deixando o fio com uma falta de cargas negativas (acompanhe pela Fig. A.8). Para simplificar a nossa análise a forma como as cargas se distribuem nas curvas ou extremidades do fio não será explorada.

Esse processo continua até que haja o equilíbrio entre as forças de atração sobre

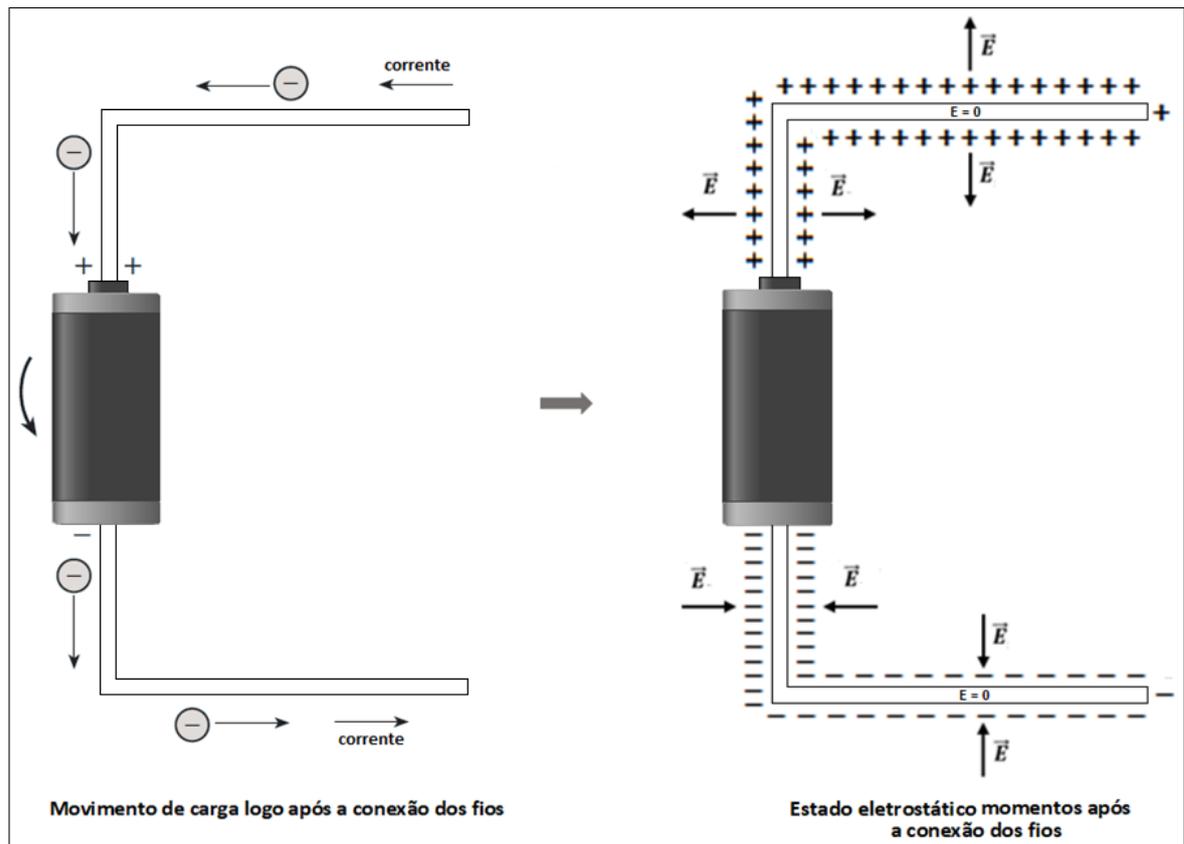


Figura A.8: Estados transiente e estático durante a conexão dos fios com a bateria.

os elétrons de condução exercidas pelos íons da rede do fio e pelas cargas positivas que existem no contato da pilha. No polo negativo os elétrons são repelidos e mais elétrons são adicionados ao fio, deixando-o com um excesso de partículas negativas. Essa transferência de elétrons do polo para o fio permanece até que ocorra o equilíbrio entre as forças de repulsão entre os elétrons do contato e o excesso que foi adicionado ao fio. Lembre-se: apesar de um contato receber elétrons (polo positivo) e outro perder elétrons (polo negativo), a pilha consegue manter constante a quantidade de carga em cada polo. Quando o equilíbrio é atingido, mais nenhum elétron é adicionado ou removido dos fios. Eles ficam carregados com a mesma densidade de carga que existe em cada um dos contatos da pilha, transformando-se em prolongamentos deles. Pensando em fios com uma geometria especial (cilíndrica) e desprezando o que acontece nas curvas e nas extremidades, a carga se distribui uniformemente pela superfície dos fios deixando o campo elétrico no interior

do fio igual a zero e imediatamente fora da superfície diferente de zero e perpendicular a ela. Está lembrado do que acontece com condutores eletrizados quando alcançam o equilíbrio eletrostático? Não? Assista os vídeos indicados nos links a seguir:

- (1) <https://www.youtube.com/watch?v=qj-c6UHkmV0> (gaiola de Faraday) [44];
- (2) <https://www.youtube.com/watch?v=YUWEKRCHeME> (anéis carregados) [45];
- (3) <https://www.youtube.com/watch?v=yOipO2Tr03c> (anel deformado) [46].

Se você prestar atenção os elétrons de condução apresentam dois comportamentos em relação ao seu movimento. Um deles é o que ocorre antes que o equilíbrio eletrostático seja alcançado: existe um fluxo de elétrons no fio se aproximando de um contato da pilha (positivo) e se afastando de outro (negativo) e a velocidade média dos elétrons é diferente de zero durante esse período. Esse estado é conhecido como **transiente**. O outro é caracterizado pela ausência de fluxo de elétrons e começa quando o equilíbrio é atingido. Esse estado é chamado de **estático** e os elétrons de condução voltam a se movimentar desordenadamente como em um condutor neutro. No equilíbrio eletrostático a velocidade média dos elétrons é nula.

O próximo passo é ligar as extremidades dos condutores. Mas, antes de efetuarmos essa ligação observe mais de perto o que se passa no interior do condutor, principalmente na região das pontas dos fios que serão conectadas. Como o arranjo está em equilíbrio eletrostático o campo elétrico no interior do condutor é nulo. Mas, isso não quer dizer que as cargas situadas na superfície do fio não estejam agindo sobre as cargas do interior. O que acontece é que a soma dos campos elétricos gerados por todas as cargas da superfície em qualquer ponto do interior do condutor é zero. Observe a Fig. A.9

Em cada ponta do fio, prestando atenção nos locais marcados com  $\mathbf{X}$ , o campo elétrico produzido pelas cargas na parede ( $\vec{E}_{\text{parede}}$ ) equilibra-se com o campo gerado por todas as outras cargas ( $\vec{E}_{\text{outras}}$ ) localizadas na superfície do fio. Se não fosse assim o campo elétrico no interior do fio não seria nulo e o arranjo não estaria em equilíbrio.

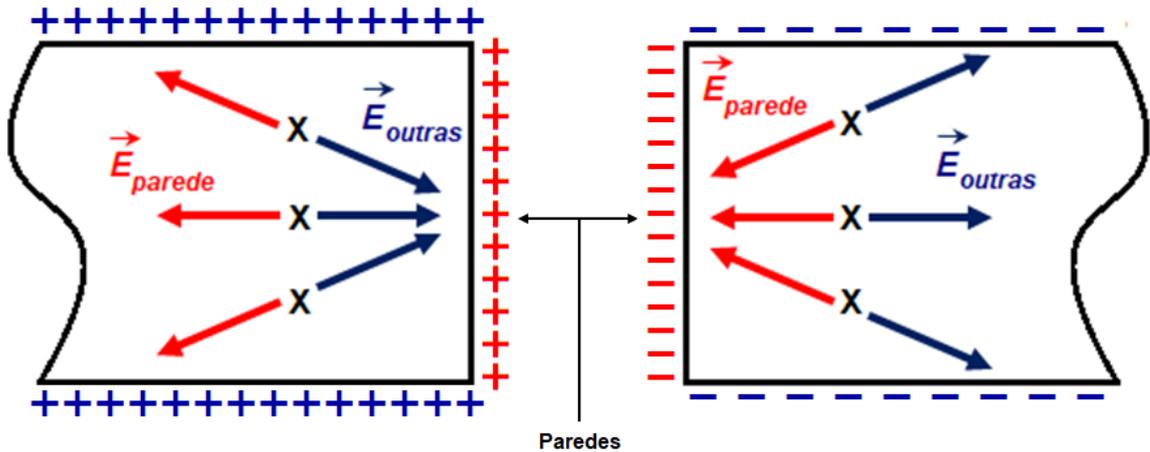


Figura A.9: Campos produzidos pelas cargas das paredes do vão ( $\vec{E}_{parede}$ ) e de todas as outras cargas da superfície dos fios ( $\vec{E}_{outras}$ ). Imagem extraída do livro de R. Chabay e B. Sherwood [1].

Imagine que você pudesse congelar o tempo e só o deixasse voltar a fluir quando quisesse ou que o tempo passasse tão lentamente que você pudesse acompanhar as transformações que ocorrerão no fio quando você unir as paredes das pontas dos fios. Se você juntar as duas paredes, as cargas sobre elas neutralizam a região interna, porém as cargas da superfície permanecem agindo sobre as cargas no interior do fio. Se você tivesse paralisado o tempo no momento da união veria algo como mostrado na Fig. A.10.

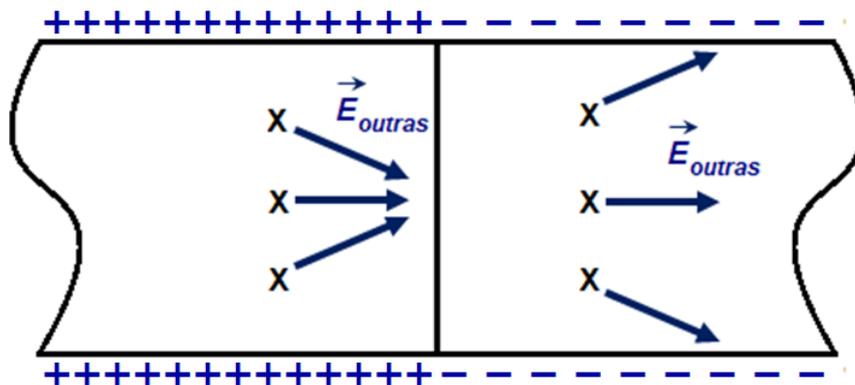


Figura A.10: Campos produzidos apenas pelas cargas da superfície dos fios. Imagem extraída do livro de R. Chabay e B. Sherwood [1] (adaptada).

Contudo, repare na distribuição das cargas elétricas superficiais na região onde houve o contato entre as extremidades. A passagem imediata da região positivamente carregada

para a negativamente carregada parece estranha. E realmente é! Isso se chama descontinuidade e a ação mútua entre as cargas fará com que ela desapareça. Além disso, o campo elétrico no interior do condutor não é mais igual a zero. Se você seguir a direção dos vetores representados na Fig. A.10, à medida que for deixando o tempo fluir, vai verificar que, como a força tem sentido oposto ao do campo, pois as cargas móveis são negativas ( $\vec{F} = q\vec{E}$ ), alguns elétrons deverão se mover para uma região com falta de elétrons, diminuindo a quantidade de carga positiva dela. Outros elétrons deverão se afastar das áreas com grande quantidade de carga negativa, tornando-as mais positivas. Depois de algum “tempinho” (uma fração de nanossegundo) você observará que houve uma “diluição” nas cargas da superfície (veja Fig. A.11).

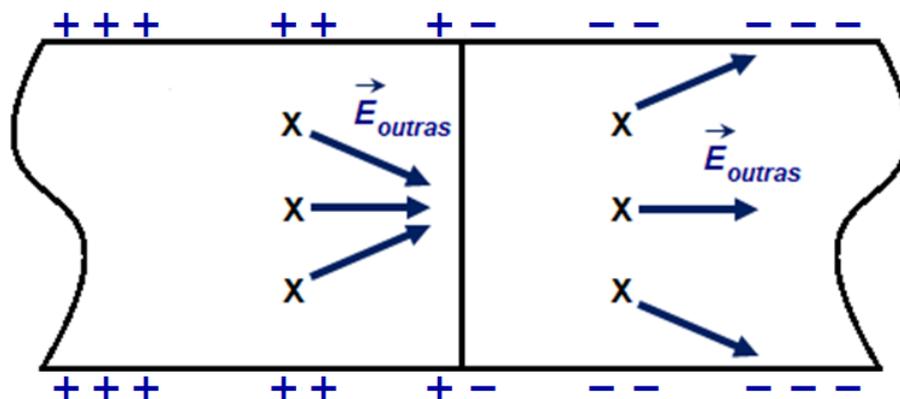


Figura A.11: Carga elétrica superficial “diluída” pouco tempo depois que ocorre a junção das extremidades dos fios. Quanto maior a quantidade de sinais (+) ou (-) e mais próximos eles estiverem significa que a quantidade de carga localizada desse sinal naquela região é maior. Imagem extraída do livro de R. Chabay e B. Sherwood [1].

É importante que você perceba e guarde a seguinte informação: o campo elétrico no interior do fio é produzido pelas cargas elétricas localizadas na superfície dele e as características desse campo (módulo e orientação) dependem de como essas cargas estão distribuídas por lá. Do mesmo modo como aconteceu quando as pontas do fio foram unidas, qualquer mudança na distribuição de cargas da superfície altera o campo elétrico no interior do fio. Além disso, como o campo elétrico se estende pelo espaço, sua ação produzirá nas cargas móveis distribuídas ao longo do fio o mesmo efeito que você observou

nas cargas próximas do local onde as extremidades dos fios foram unidas. Mas, para isso, ele tem que se propagar até elas.

**TÔ VENDO UMA  
ESPERANÇA!**

**Você já vai começar a entender porque a lâmpada do nosso circuito acende quase instantaneamente.**



Já que estamos falando sobre a propagação do campo elétrico, existe uma informação fundamental a respeito disso: a rapidez com que o campo elétrico se propaga em um meio é igual a da luz. No vácuo, a velocidade da luz atinge seu maior valor, cerca de  $c = 300.000$  km/s. Em meios materiais, essa velocidade é menor, porém da mesma ordem de grandeza ( $10^5$  km/s). Sendo assim, qualquer mudança na arrumação das cargas elétricas provoca uma mudança no campo elétrico que viaja tão rapidamente que parece instantâneo. O tempo que a informação leva para chegar até as cargas, ou seja, que o campo elétrico se propague até elas percorrendo uma distância  $d$  é  $\Delta t = d/v$ . E como  $v$  é da ordem de  $10^5$  km/s, o tempo de espera será muitíssimo curto. Se você pensar em um circuito com o comprimento igual ao diâmetro da Terra, a lâmpada acenderá em menos de meio segundo. Confira!!! Essa é, aproximadamente, a rapidez com que tudo acontece durante o estado transiente.

Se você pudesse deixar o tempo passar muito lentamente veria as mudanças na arrumação das cargas elétricas da superfície do fio se estendendo por todo o fio até que não houvesse mais variações nessa distribuição e no campo elétrico. Nesse estado as cargas se arrumaram de tal forma que próximo aos polos da pilha a concentração de cargas é maior,

diminuindo gradativamente ao longo do fio. Algo parecido com o que é mostrado na Fig. A.12. Lembre-se que quanto maior a quantidade de sinais (+) ou (-) e mais próximos eles estiverem significa que a quantidade de carga localizada desse sinal naquela região é maior.

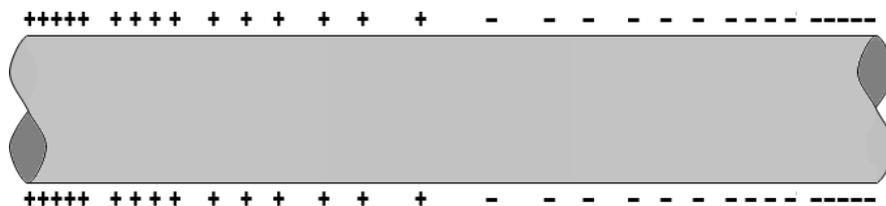


Figura A.12: Distribuição aproximada da carga elétrica na superfície do fio depois que o estado estacionário foi alcançado. Imagem extraída do trabalho de H. Härtel [29] (adaptada).

A partir do que já vimos, vamos pensar um pouco sobre as consequências de termos cargas elétricas distribuídas não-uniformemente sobre o fio:

- (a) longe dos contatos da pilha são as cargas elétricas localizadas na superfície do fio que geram campo elétrico tanto no interior do fio quanto do lado de fora dele;
- (b) logo depois que as pontas dos fios foram ligadas, a arrumação das cargas elétricas da superfície passou a mudar porque o campo elétrico interno deixou de ser nulo (veja Fig. A.11) ficando em alguns lugares orientado para o exterior (retirando elétrons da superfície), em outros ficava direcionado para dentro do fio (levando elétrons para a superfície do fio) e em outros era paralelo à superfície do fio (movimentando os elétrons nessa direção);
- (c) depois de um curtíssimo intervalo de tempo a arrumação das cargas da superfície não muda mais.

Para mudar a arrumação das cargas na superfície é preciso levar elétrons para lá ou tirar elétrons de lá. Como foi destacado no item **(b)** isso acontecia porque em alguns lugares o campo elétrico era orientado para a superfície e em outros para dentro do fio

(direções transversais), e por causa da quantidade de elétrons chegando nesses locais e saindo deles, movendo-se paralelamente à superfície do fio. Então, se na superfície as cargas não mudam mais a sua arrumação, como dito no item **(c)**, é porque o campo elétrico não apresenta mais as direções transversais e o fluxo de elétrons paralelo à superfície se tornou constante. Mas, como visto no item **(a)**, tem que existir um campo elétrico no interior do fio. Qual a orientação desse campo, então? A única direção que restou é a que permanece paralela à superfície do fio. Mas, ela também desloca os elétrons, fazendo-os chegar e sair de um local qualquer no fio. Isso não provocaria uma mudança na arrumação das cargas? Sim!!! Mas, se essa arrumação não muda mais é porque a quantidade de elétrons que chega também sai, ou seja, um fluxo constante de cargas. Isso é verdade porque estamos pensando que nosso fio é homogêneo, com a mesma condutividade elétrica em todos os lugares. Veremos, quando introduzirmos um resistor em nosso arranjo, que ocorre uma alteração na distribuição das cargas devido à mudança de condutividade elétrica. A velocidade média dos elétrons de condução é, portanto, a mesma em todos os pontos do fio. Para mover os elétrons dessa maneira o campo elétrico precisa ter o mesmo valor no fio todo. Sendo assim, as características do campo elétrico no fio são

- (1) módulo: constante;
- (2) direção: paralela à superfície do fio;
- (3) sentido: das regiões mais positivas para as mais negativas.

O resultado da ação desse campo é que, em qualquer lugar do fio, você verá passando uma quantidade igual de elétrons no intervalo de tempo que você escolher. Isso quer dizer que existe uma corrente elétrica constante (fluxo constante) percorrendo todo o fio. A intensidade dessa corrente elétrica é calculada por

$$i = \frac{q}{\Delta t}.$$

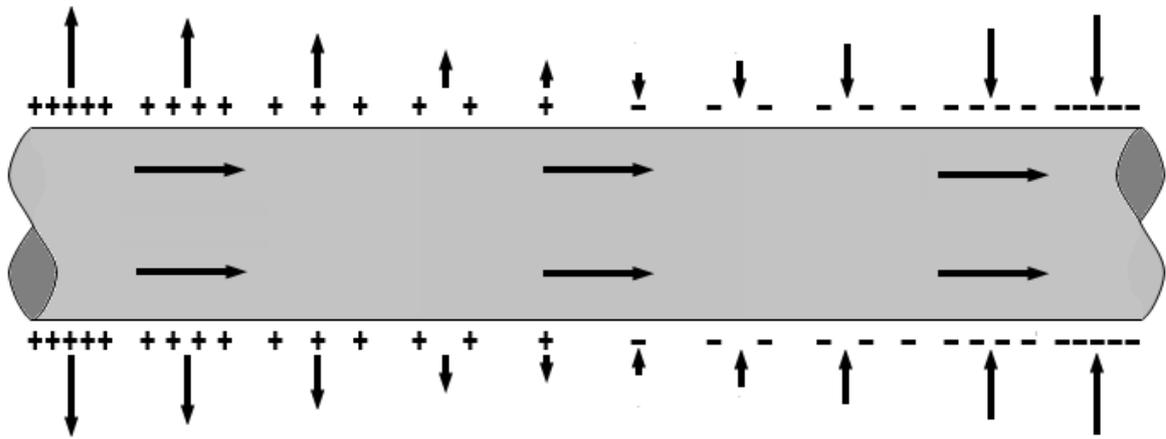


Figura A.13: Campo elétrico interior e distribuição de carga aproximada em um fio reto no regime estacionário. Externamente, o campo apresenta duas componentes: uma paralela à superfície e outra perpendicular a ela. Apenas a componente perpendicular do campo elétrico foi representada.

O estado no qual a arrumação das cargas na superfície, o campo elétrico e a corrente elétrica permanecem constantes ao longo do tempo é conhecido como **estado estacionário**. O campo elétrico fora do fio varia sua intensidade e sua orientação à medida que nos afastamos ou nos aproximamos do fio e também quando percorremos o comprimento dele porque, além da componente paralela à superfície do fio, existe outra que é perpendicular à superfície (veja Fig. A.13).

Agora, você já possui as informações para entender tudo o que está representado no circuito, mostrado na Fig. A.14. Você imaginava que pudesse aprender tanta coisa interessante tentando entender o que se passa quando você liga as pontas de um pedaço de fio aos polos de uma pilha?

Mas ainda falta algo: a lâmpada! Como você viu, o filamento da lâmpada nada mais é que um pedaço de fio condutor, porém feito de um material que possui uma condutividade elétrica mais baixa que os fios usados para interligar os componentes do circuito. Aliado as suas características geométricas, sua resistência se torna muito mais elevada que a dos fios de ligação (lembre-se que  $R = \rho \frac{\ell}{A}$ )<sup>1</sup>. Para você ter uma ideia, vamos

<sup>1</sup>A resistividade elétrica  $\rho$  é o inverso da condutividade  $\sigma$ : ( $\rho = 1/\sigma$ ).

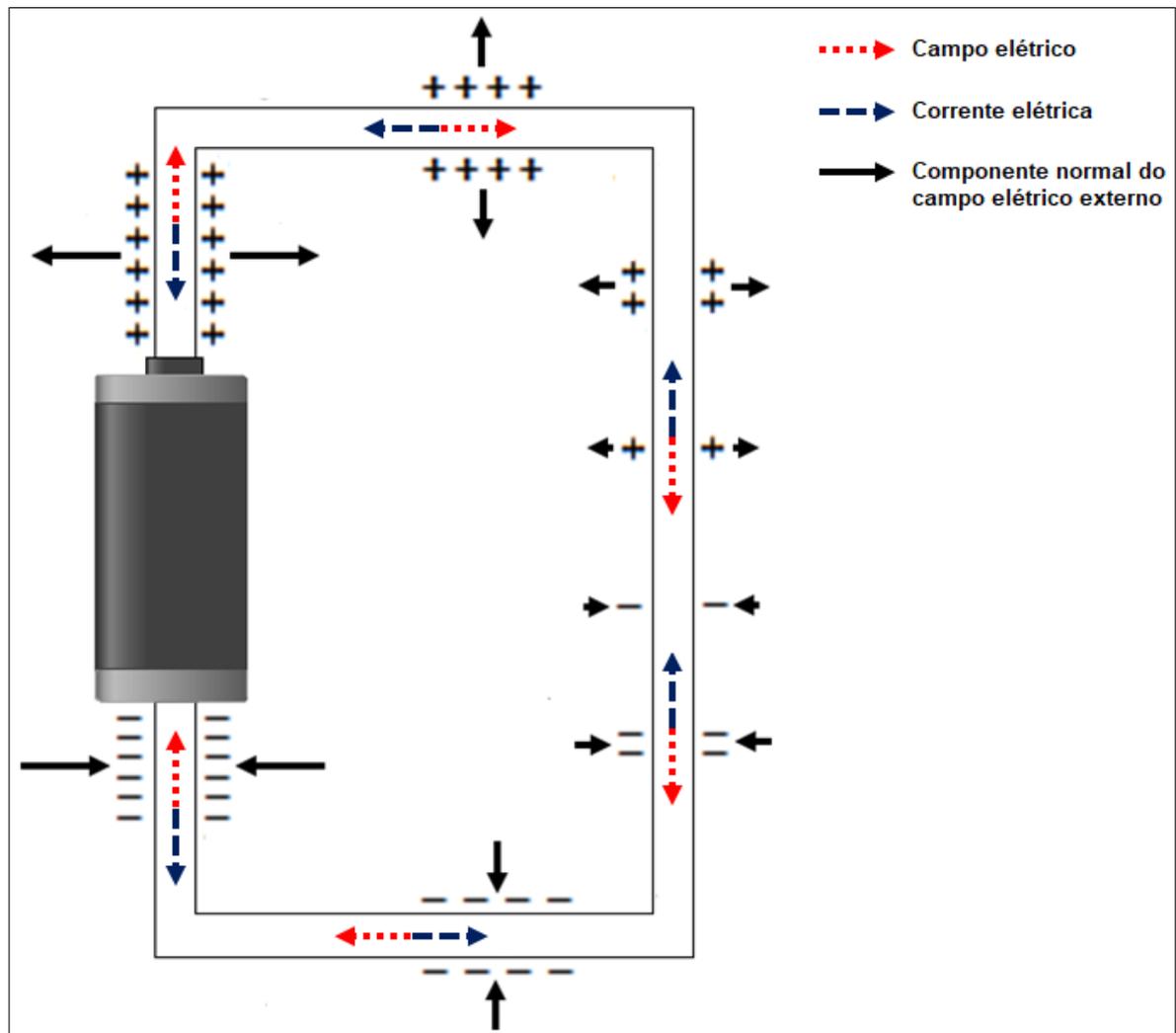


Figura A.14: Campo elétrico, corrente elétrica e distribuição superficial de carga aproximada ao longo do circuito no regime estacionário. Externamente, apenas a componente perpendicular do campo elétrico foi representada.

comparar a resistência do filamento de uma lâmpada incandescente com a de um pedaço de fio de cobre de seção transversal igual a  $1,5 \text{ mm}^2$ . O filamento de uma lâmpada incandescente de 60 watts de potência e que funciona sob tensão de 120 volts possui  $0,58 \text{ m}$  de comprimento (esticado)<sup>2</sup> e um diâmetro de  $0,046 \text{ mm}$ , feito de tungstênio que apresenta uma resistividade elétrica  $\rho_W = 52,8 \times 10^{-9} (\Omega\text{m})$  a  $20^\circ\text{C}$  [54]. A resistividade elétrica do cobre na mesma temperatura é igual a  $\rho_{Cu} = 16,8 \times 10^{-9} (\Omega\text{m})$ . A  $20^\circ\text{C}$ ,

<sup>2</sup>O fio do filamento é torcido em forma de espiral e depois enrolado da mesma forma.

a resistência do filamento é aproximadamente 2837 vezes maior que a de um pedaço de fio de cobre do mesmo comprimento. O fio de cobre precisaria apresentar cerca de 1645 metros de comprimento para possuir a mesma resistência do filamento<sup>3</sup>.

Vamos examinar primeiro o que muda em relação à distribuição de cargas quando existe um trecho do circuito com uma resistência elétrica diferente. A corrente elétrica corresponde ao fluxo de elétrons através de uma região (seção transversal) do fio ou do resistor e sua intensidade é determinada pela quantidade de carga que passa por essa área em determinado intervalo de tempo, ou seja, se fixarmos o tempo de espera em 1 segundo, o que importa são quantos elétrons por segundo passam pela região escolhida. Sendo assim, dois fatores influenciam a intensidade da corrente: **(1)** a quantidade de elétrons de condução que existem na região; **(2)** a rapidez com que esses elétrons se deslocam através do condutor. Como assim? Pense no fluxo como o resultado da contagem dos elétrons que passam pela seção transversal. A redução no número de elétrons livres de um local para outro pode ser compensada com o aumento na velocidade média dos elétrons.

Mas, o que isso tem a ver com o resistor? Tudo! No resistor a quantidade de elétrons livres é menor que no condutor, pois esse é um dos fatores que determinam a condutividade elétrica do material. Para que a contagem dos elétrons que passam por uma seção transversal do fio seja igual a de uma região com a mesma área no resistor, a velocidade de deriva dos elétrons de condução precisa ser maior. E por que queremos que o fluxo de carga seja o mesmo? Porque no estado estacionário a intensidade da corrente elétrica tem que ser a mesma no fio e no resistor, caso contrário a conservação da carga elétrica nos diz que elétrons ficarão acumulados ou em falta nas fronteiras entre os dois componentes. Nós já tínhamos percebido que haveria esse aumento na velocidade média dos elétrons no resistor quando falamos dele. Ainda não explicamos o porquê, mas já temos uma pista do que pode ser: um campo elétrico extra, além daquele que as cargas distribuídas na

---

<sup>3</sup>A resistência dos condutores aumenta com o aquecimento por causa da dependência da resistividade com a temperatura. Se os cálculos fossem realizados com a lâmpada em seu funcionamento normal, a resistência do filamento seria muito maior.

superfície produzem dentro do resistor, provocaria o aumento da velocidade de deriva do elétrons. Porém, onde se encontra a fonte desse campo elétrico?

Até agora, a estratégia adotada para você entender o que acontece no circuito foi: **o comportamento no estado estacionário é um resultado do que acontece no regime transiente.** Vamos continuar com esse raciocínio. Durante o transiente os elétrons ainda estão se arrumando no circuito. A conservação da carga elétrica nos diz que o número de elétrons que entra numa região tem que ser igual à quantidade desses portadores de carga que ficam acumulados nela somada à que saem dela. Isso é verdade tanto no regime estacionário quanto no transiente. Perceba que entendendo dessa maneira o número de elétrons que ficam na região pode ser positivo ou negativo. Quando positivo, significa que a região ficou com um excesso de elétrons. Sendo negativo, houve uma redução no número de elétrons que já existiam na região. Durante o regime transiente a quantidade de elétrons que penetram nas regiões de transição não precisa ser a mesma que a que sai delas. Esse comportamento é obrigatório no estado estacionário!

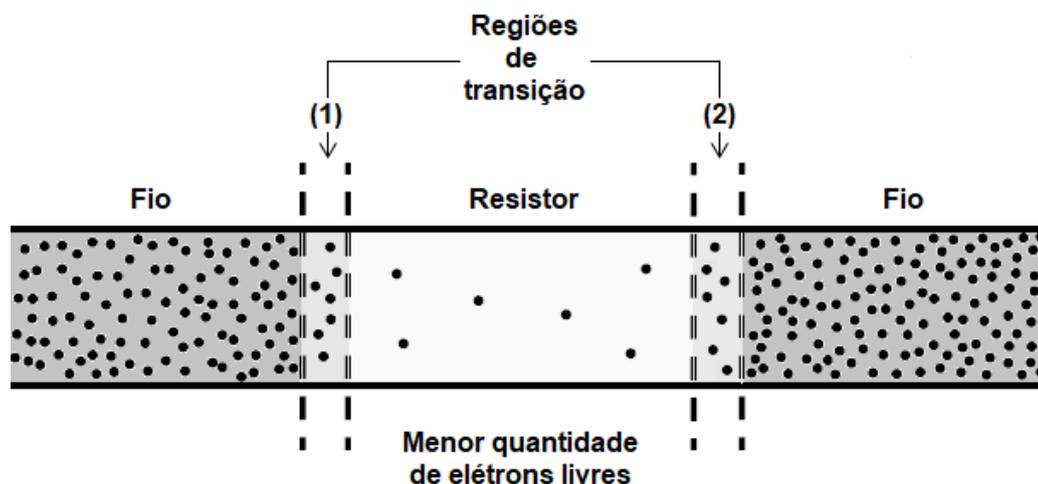


Figura A.15: Representação de um resistor ligado aos fio condutores. Somente os elétrons livres dos fios, do resistor e das regiões de transição estão sendo mostradas. Imagem extraída do trabalho de H. Härtel [39] (adaptada).

Na Fig. A.15 está representado um resistor ligado aos fios condutores. Para você entender o que acontece durante o transiente, somente os elétrons livres dos fios, do

resistor e das regiões de transição estão sendo mostradas. Acompanhando o movimento dos elétrons da esquerda para a direita, você verá que a quantidade de elétrons livres que penetram na região de transição **(1)** é menor que aquela que sai dela, porque não existem tantos elétrons de condução ali como no fio. Na região de transição **(2)** acontece o oposto: chegam menos elétrons do que saem, pois existe um número menor de cargas negativas móveis no resistor. Não há problema nisso. Lembre-se que no regime transiente o número de elétrons que entram na região não precisa ser igual ao que sai dela. E de fato não é! Usando a conservação da carga elétrica você concluirá que a região **(1)** acumulará elétrons e a **(2)** apresentará falta deles. Esse processo acaba quando o estado estacionário é alcançado. Como consequência das mudanças ocorridas durante o transiente formaram-se duas camadas carregadas localizadas nas regiões de transição (veja a Fig. A.16). O campo elétrico extra no interior do resistor é devido à existência dessas camadas.

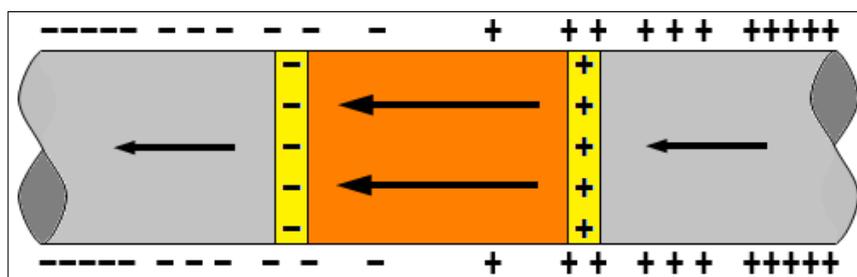


Figura A.16: Representação do campo elétrico e da distribuição de carga aproximada nos fios e no resistor durante o estado estacionário. Imagem extraída do trabalho de H. Härtel [29] (adaptada).

Conseguimos completar nosso circuito! Já sabemos também porque os elétrons movem-se mais rapidamente nos resistores que nos condutores. Falta apenas respondermos por que ao se ligar o interruptor a lâmpada acende quase instantaneamente? Então, vamos lá! Quando a chave interruptora é fechada o campo elétrico no interior do fio no local do fechamento deixa de ser zero e passa deslocar os elétrons de condução, modificando a distribuição deles ao longo do fio e dos demais componentes do circuito. Como essa mudança é provocada pelo campo elétrico, ela acontece praticamente com a mesma rapidez

com que o campo elétrico se propaga através dos fios, isto é, com a mesma ordem de grandeza da velocidade da luz no vácuo (300.000 km/s). Rapidamente, as cargas se arrumam de tal forma que uma corrente elétrica constante é estabelecida. Portanto, a lâmpada acende quase instantaneamente porque a informação (campo elétrico) de que o circuito se completou viaja a uma velocidade da ordem de  $10^5$  km/s. A Fig. A.17 representa o circuito formado pelos fios condutores, lâmpada e pilha.

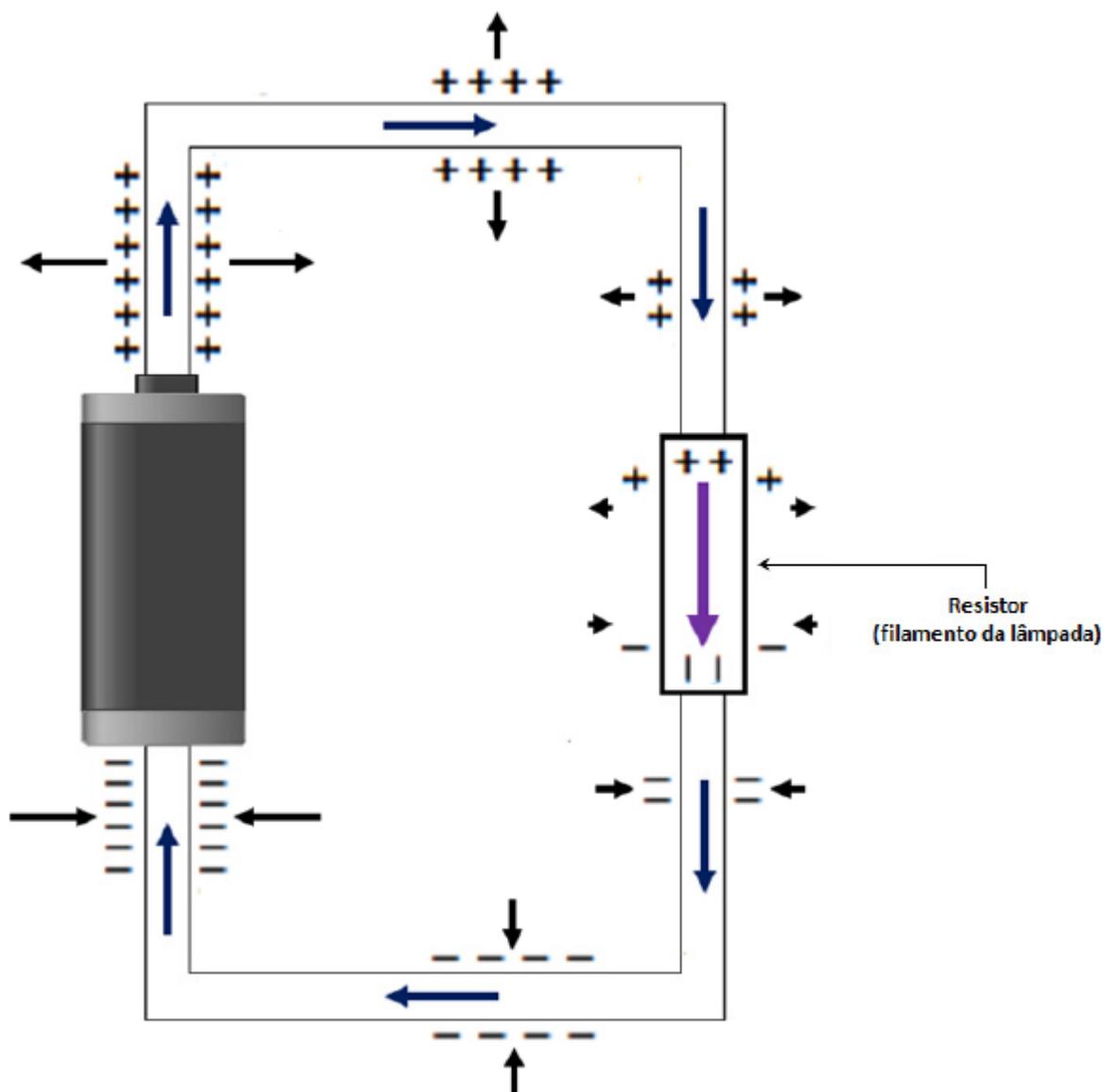


Figura A.17: Representação do campo elétrico e da distribuição superficial de carga aproximada nos fios e no resistor de um circuito no estado estacionário. Externamente, apenas a componente perpendicular do campo está sendo representada.

## Apêndice B

### Atividades realizadas durante a sequência de ensino



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**

Instituto de Física

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Mestrado Profissional em Ensino de Física

Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física



# **A eletrostática oculta na eletrodinâmica dos circuitos de corrente constante (Caderno de Anotações)**

**Anderson José da Fonseca**

**Germano Maioli Penello**

Atividades pedagógicas realizadas durante a aplicação da sequência de ensino e concebidas como um instrumento auxiliar para o acompanhamento do aprendizado. Esse material integra a dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

**Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2020**

Podemos fazer uma lâmpada acender usando uma pilha, um interruptor e fios condutores.

Por que ao se ligar o interruptor a lâmpada acende quase instantaneamente?

## Caderno de Anotações

Aluno: \_\_\_\_\_

Escola: \_\_\_\_\_

## Apresentação

Caro aluno,

Este material foi desenvolvido para você registrar e organizar as ideias que o ajudarão a responder: **por que ao se ligar o interruptor a lâmpada acende quase instantaneamente?** Com suas anotações, esperamos que você possa comparar o seu conhecimento inicial com o que será apresentado e discutido, e reunir as informações necessárias para elaborar a sua resposta.

Esse **Caderno de Anotações** foi elaborado para ser usado como um instrumento de acompanhamento do aprendizado. Durante a exposição e discussão do conteúdo, periodicamente, você será convidado a preenchê-lo com informações sobre o seu entendimento a respeito do comportamento dos componentes em um circuito elétrico. Os registros serão feitos com o auxílio de tabelas, perguntas e figuras. Nas tabelas você encontrará determinadas características relacionadas aos componentes de um circuito elétrico, que serão examinadas à medida que eles forem sendo interligados. Toda vez que um componente for adicionado, o comportamento dele e daqueles que já estiverem presentes sofrerá nova análise para que você possa perceber e registrar suas características, verificando se houve alguma alteração devido à associação dele com os outros componentes, enfatizando a visão do circuito como um sistema. Você também terá a oportunidade de relatar suas dúvidas ao preencher as tabelas, acrescentar informações e demonstrar seu conhecimento usando figuras. É fundamental que você acompanhe com atenção a exposição do conteúdo e participe das discussões, expressando o seu entendimento e manifestando suas dúvidas, além de preencher de forma honesta e sincera esse caderno.

Vamos começar?!

Bom trabalho!

1) Você possui uma pilha, fios condutores e uma lâmpada. Faça um esquema de um circuito elétrico que faça a lâmpada acender. Para isso utilize os seguintes símbolos:



**Pilha**



**Lâmpada**



**Fios condutores**

Você encontrou alguma dificuldade para completar essa tarefa?

Não.

Sim. \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Aluno:** \_\_\_\_\_

**Escola:** \_\_\_\_\_

2) A seguir, estão representados três componentes de um circuito elétrico que se encontram **DESCONECTADOS**.



**Pilha**



**Lâmpada**



**Fio condutor**

Na tabela abaixo, cada um dos campos em branco relaciona uma característica a um dos componentes apresentados na figura acima. Ao marcar com um **X** no campo, você está indicando que naquele elemento existe a presença daquela característica. Você pode marcar mais de um campo para cada componente. Seguindo essa orientação, marque adequadamente com **X** os campos em branco da tabela a seguir:

	<b>Carga elétrica localizada</b>	<b>Campo elétrico</b>	<b>Diferença de potencial</b>	<b>Resistência elétrica</b>	<b>Corrente elétrica</b>
<b>Pilha</b>					
<b>Fio condutor</b>					
<b>Lâmpada</b>					

Houve alguma dúvida ao relacionar a presença da característica ao componente?

( ) **Não.**

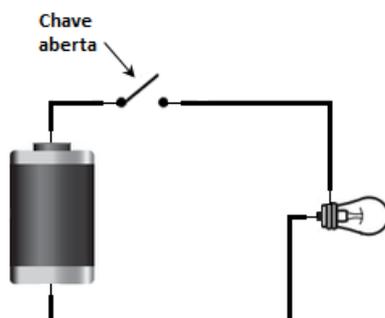
( ) **Sim.** Em qual(is) componente(s)? ( ) **Pilha** ( ) **Fio condutor** ( ) **Lâmpada**

Qual(is) dúvida(s)? \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

**Aluno:** \_\_\_\_\_

**Escola:** \_\_\_\_\_

3) O esquema abaixo mostra uma pilha, fios condutores e uma lâmpada conectados entre si e a uma chave interruptora que está **ABERTA**.



Na tabela abaixo, cada um dos campos em branco relaciona uma característica a um dos componentes apresentados na figura acima. Ao marcar com um **X** no campo, você está indicando que naquele elemento existe a presença daquela característica. Você pode marcar mais de um campo para cada componente. Seguindo essa orientação, marque adequadamente com **X** os campos em branco da tabela a seguir:

	<b>Carga elétrica localizada</b>	<b>Campo elétrico</b>	<b>Diferença de potencial</b>	<b>Resistência elétrica</b>	<b>Corrente elétrica</b>
<b>Pilha</b>					
<b>Fios condutores</b>					
<b>Lâmpada</b>					

Houve alguma dúvida ao relacionar a presença da característica ao componente?

( ) **Não.**

( ) **Sim.** Em qual(is) componente(s)? ( ) **Pilha** ( ) **Fios condutores** ( ) **Lâmpada**

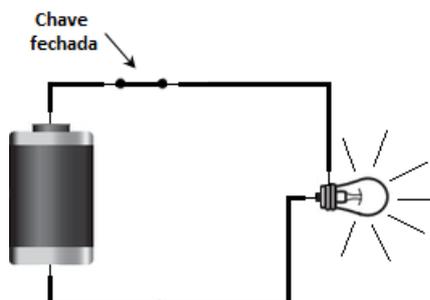
Qual(is) dúvida(s)? \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Aluno:** \_\_\_\_\_

**Escola:** \_\_\_\_\_

- 4) O esquema abaixo mostra uma pilha, fios condutores e uma lâmpada conectados entre si e a uma chave interruptora que está **FECHADA**.



Na tabela abaixo, cada um dos campos em branco relaciona uma característica a um dos componentes apresentados na figura acima. Ao marcar com um **X** no campo, você está indicando que naquele elemento existe a presença daquela característica. Você pode marcar mais de um campo para cada componente. Seguindo essa orientação, marque adequadamente com **X** os campos em branco da tabela a seguir:

	Carga elétrica localizada	Campo elétrico	Diferença de potencial	Resistência elétrica	Corrente elétrica
<b>Pilha</b>					
<b>Fios condutores</b>					
<b>Lâmpada</b>					

Houve alguma dúvida ao relacionar a presença da característica ao componente?

( ) Não.

( ) Sim. Em qual(is) componente(s)? ( ) Pilha ( ) Fios condutores ( ) Lâmpada

Qual(is) dúvida(s)? \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Aluno: \_\_\_\_\_

Escola: \_\_\_\_\_

5) Abaixo encontra-se representada uma pilha.



Na tabela abaixo, cada um dos campos em branco relaciona uma característica ao componente apresentado na figura acima. Ao marcar com um **X** no campo, você está indicando que aquela característica está presente no elemento. Você pode marcar mais de um campo se julgar conveniente. Seguindo essa orientação, marque adequadamente com **X** os campos em branco da tabela a seguir

	<b>Carga elétrica localizada</b>	<b>Campo elétrico</b>	<b>Diferença de potencial</b>	<b>Resistência elétrica</b>	<b>Corrente elétrica</b>
<b>Pilha</b>					

Há alguma outra característica que você gostaria de relacionar a esse componente?

Não.

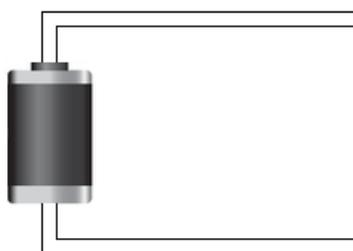
Sim.

Qual? \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**Aluno:** \_\_\_\_\_

**Escola:** \_\_\_\_\_

6) O esquema abaixo mostra uma pilha e fios condutores ligados aos seus contatos. Faça a análise da situação considerando que ela se passa no período conhecido como **TRANSIENTE**, isto é, o intervalo de tempo desde a conexão dos fios condutores aos contatos da pilha até o regime permanente ser estabelecido.



Na tabela abaixo, cada um dos campos em branco relaciona uma característica a um dos componentes apresentados na figura acima. Ao marcar com um **X** no campo, você está indicando que naquele elemento existe a presença daquela característica. Você pode marcar mais de um campo para cada componente. Seguindo essa orientação, marque adequadamente com **X** os campos em branco da tabela a seguir:

	<b>Carga elétrica localizada</b>	<b>Campo elétrico</b>	<b>Diferença de potencial</b>	<b>Resistência elétrica</b>	<b>Corrente elétrica</b>
<b>Pilha</b>					
<b>Fios condutores</b>					

Houve alguma dúvida ao relacionar a presença da característica ao componente?

**Não.**

**Sim.** Em qual(is) componente(s)?  **Pilha**     **Fios condutores**     **Lâmpada**

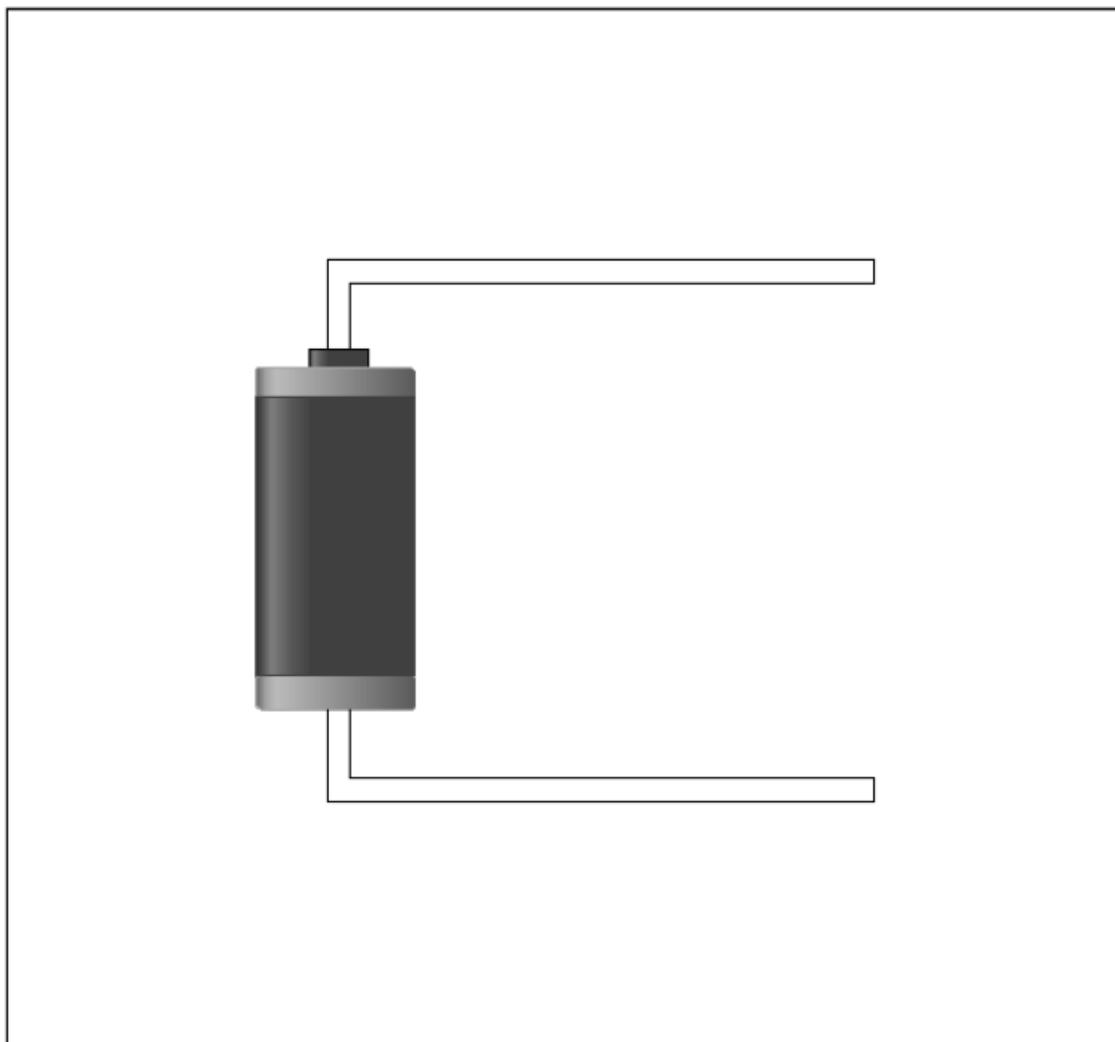
Qual(is) dúvida(s)? \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Aluno:** \_\_\_\_\_

**Escola:** \_\_\_\_\_

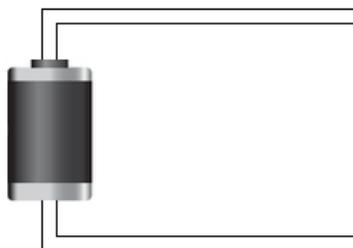
A figura da atividade anterior foi reproduzida no quadro abaixo. Faça uma representação do que ocorre nos **FIOS CONDUTORES** durante o **TRANSIENTE**.



Aluno: \_\_\_\_\_

Escola: \_\_\_\_\_

7) O esquema abaixo mostra uma pilha e fios condutores ligados aos seus contatos. Faça a análise da situação considerando que ela se passa depois que o regime **ESTÁTICO** foi alcançado.



Na tabela abaixo, cada um dos campos em branco relaciona uma característica a um dos componentes apresentados na figura acima. Ao marcar com um **X** no campo, você está indicando que aquela característica está presente no elemento. Você pode marcar mais de um campo se julgar conveniente. Seguindo essa orientação, marque adequadamente com **X** os campos em branco da tabela a seguir:

	<b>Carga elétrica localizada</b>	<b>Campo elétrico</b>	<b>Diferença de potencial</b>	<b>Resistência elétrica</b>	<b>Corrente elétrica</b>
<b>Fios condutores</b>	<input type="checkbox"/> no interior	<input type="checkbox"/> no interior			
	<input type="checkbox"/> na superfície	<input type="checkbox"/> na superfície			

Houve alguma dúvida ao relacionar a presença da característica ao componente?

Não.

Sim. Em qual(is) componente(s)?  Pilha     Fios condutores     Lâmpada

Qual(is) dúvida(s)? \_\_\_\_\_

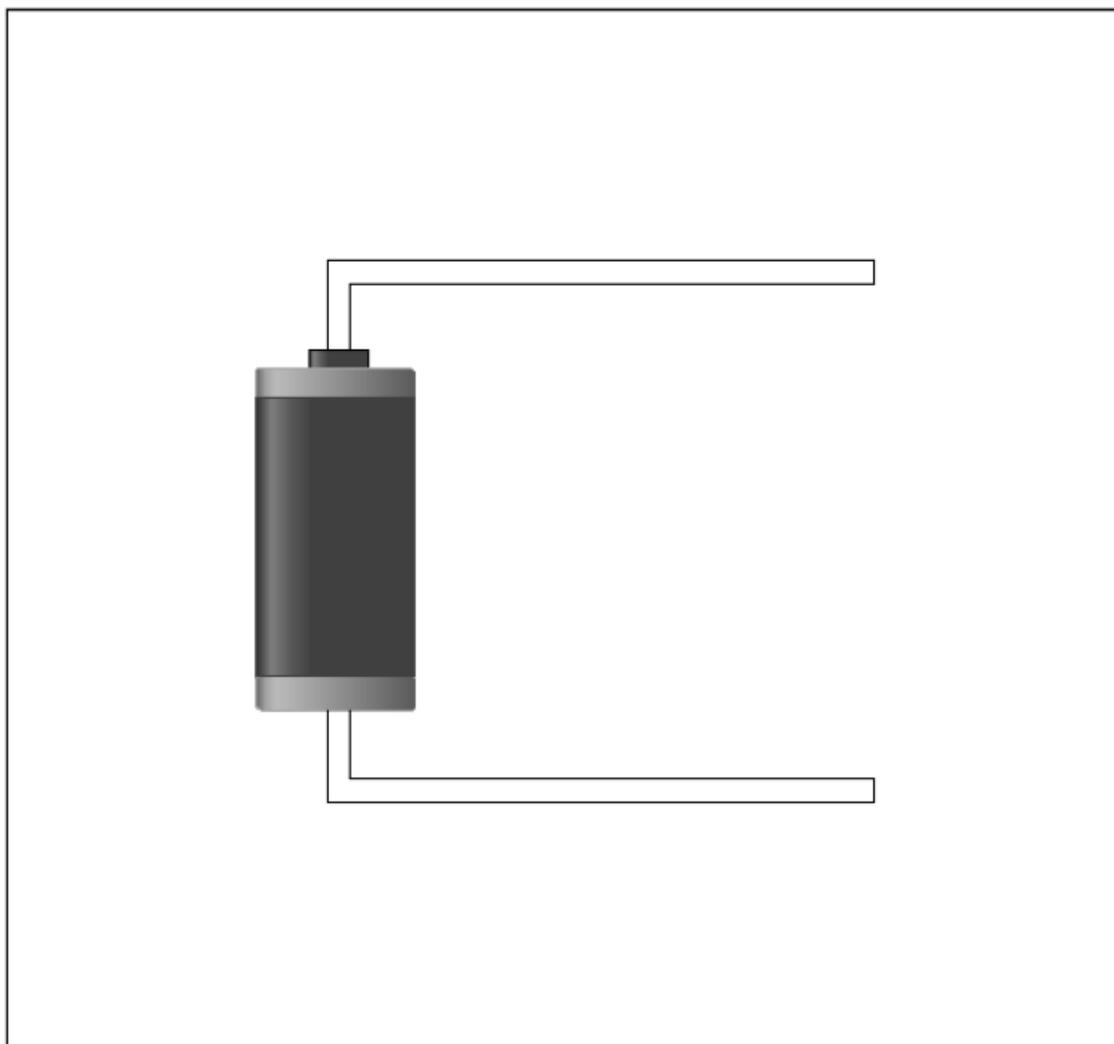
\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Aluno:** \_\_\_\_\_

**Escola:** \_\_\_\_\_

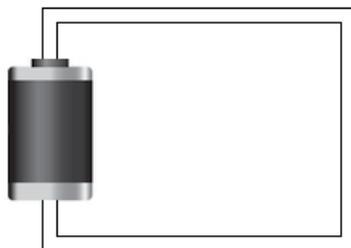
A figura da atividade anterior foi reproduzida no quadro abaixo. Faça uma representação do **VETOR CAMPO ELÉTRICO** e da **DISTRIBUIÇÃO DAS CARGAS ELÉTRICAS** nos **FIOS CONDUTORES** considerando que o regime **ESTÁTICO** já foi alcançado .



Aluno: \_\_\_\_\_

Escola: \_\_\_\_\_

8) O esquema abaixo mostra uma pilha e um fio condutor ligado aos seus contatos. Faça a análise da situação considerando que ela se passa depois que o regime **ESTACIONÁRIO** foi alcançado.



Na tabela abaixo, cada um dos campos em branco relaciona uma característica a um dos componentes apresentados na figura acima. Ao marcar com um **X** no campo, você está indicando que aquela característica está presente no elemento. Você pode marcar mais de um campo se julgar conveniente. Seguindo essa orientação, marque adequadamente com **X** os campos em branco da tabela a seguir:

	<b>Carga elétrica localizada</b>	<b>Campo elétrico</b>	<b>Diferença de potencial</b>	<b>Resistência elétrica</b>	<b>Corrente elétrica</b>
<b>Fio condutor</b>	<input type="checkbox"/> no interior	<input type="checkbox"/> no interior			
	<input type="checkbox"/> na superfície	<input type="checkbox"/> na superfície			

Houve alguma dúvida ao relacionar a presença da característica ao componente?

Não.

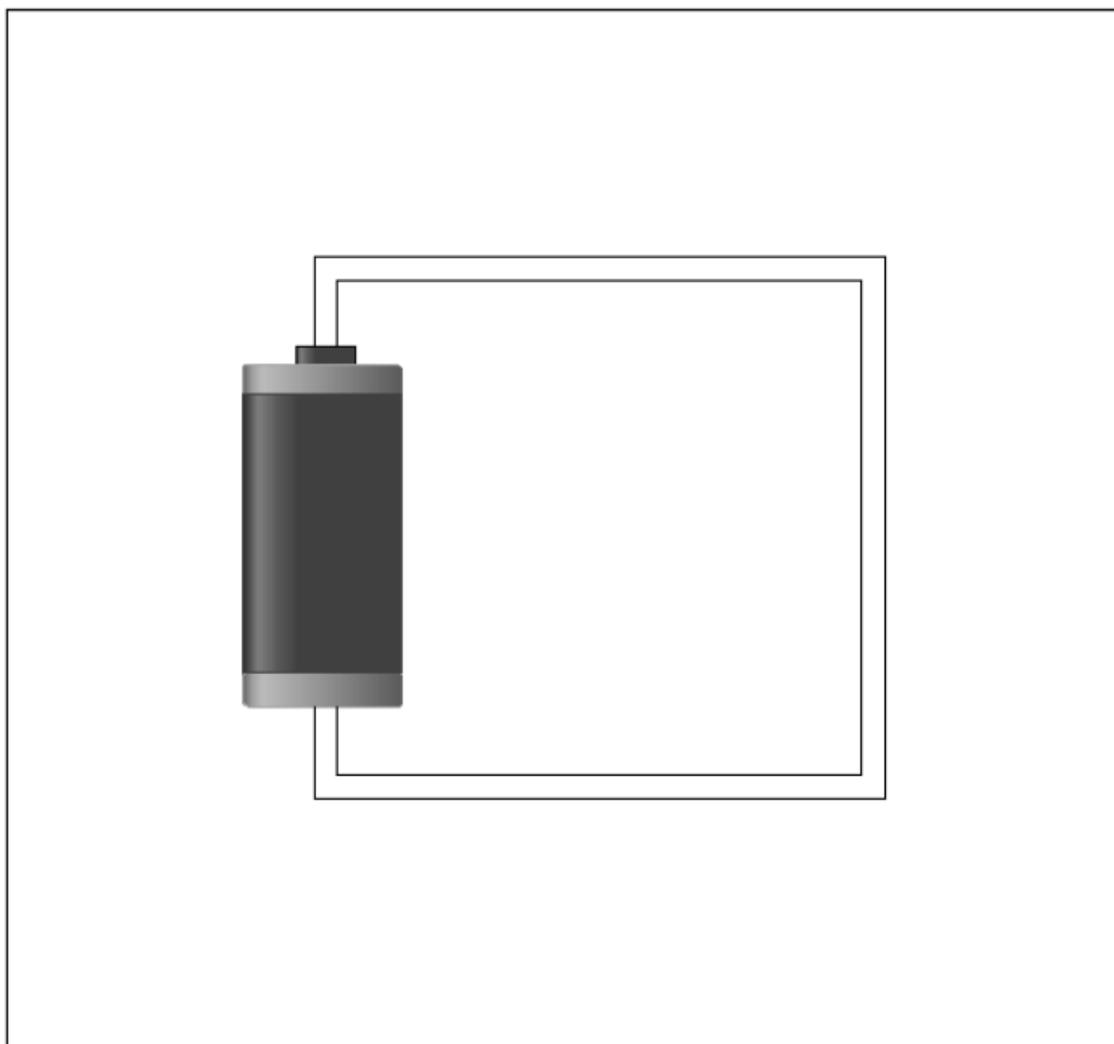
Sim. Em qual(is) componente(s)?  Pilha     Fios condutores     Lâmpada

Qual(is) dúvida(s)? \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

**Aluno:** \_\_\_\_\_

**Escola:** \_\_\_\_\_

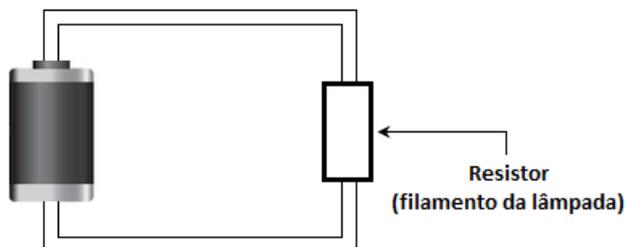
A figura da atividade anterior foi reproduzida no quadro abaixo. Faça uma representação do **VETOR CAMPO ELÉTRICO** e da **DISTRIBUIÇÃO DAS CARGAS ELÉTRICAS** nos **FIOS CONDUTORES** considerando que o regime **ESTACIONÁRIO** já tenha sido alcançado.



Aluno: \_\_\_\_\_

Escola: \_\_\_\_\_

9) O esquema abaixo mostra uma pilha e um resistor (filamento da lâmpada) interligados por fios condutores. Faça a análise da situação considerando que ela se passa depois que o regime **ESTACIONÁRIO** foi alcançado.



Na tabela abaixo, cada um dos campos em branco relaciona uma característica a um dos componentes apresentados na figura acima. Ao marcar com um **X** no campo, você está indicando que naquele elemento há presença daquela característica. Você pode marcar mais de um campo para cada componente. Seguindo essa orientação, marque adequadamente com **X** os campos em branco da tabela a seguir:

	<b>Carga elétrica localizada</b>	<b>Campo elétrico</b>	<b>Diferença de potencial</b>	<b>Resistência elétrica</b>	<b>Corrente elétrica</b>
<b>Fios condutores</b>	( ) no interior ( ) na superfície	( ) no interior ( ) na superfície			
<b>Resistor (filamento da lâmpada)</b>	( ) no interior ( ) na superfície	( ) no interior ( ) na superfície			

Houve alguma dúvida ao relacionar a presença da característica ao componente?

( ) Não.

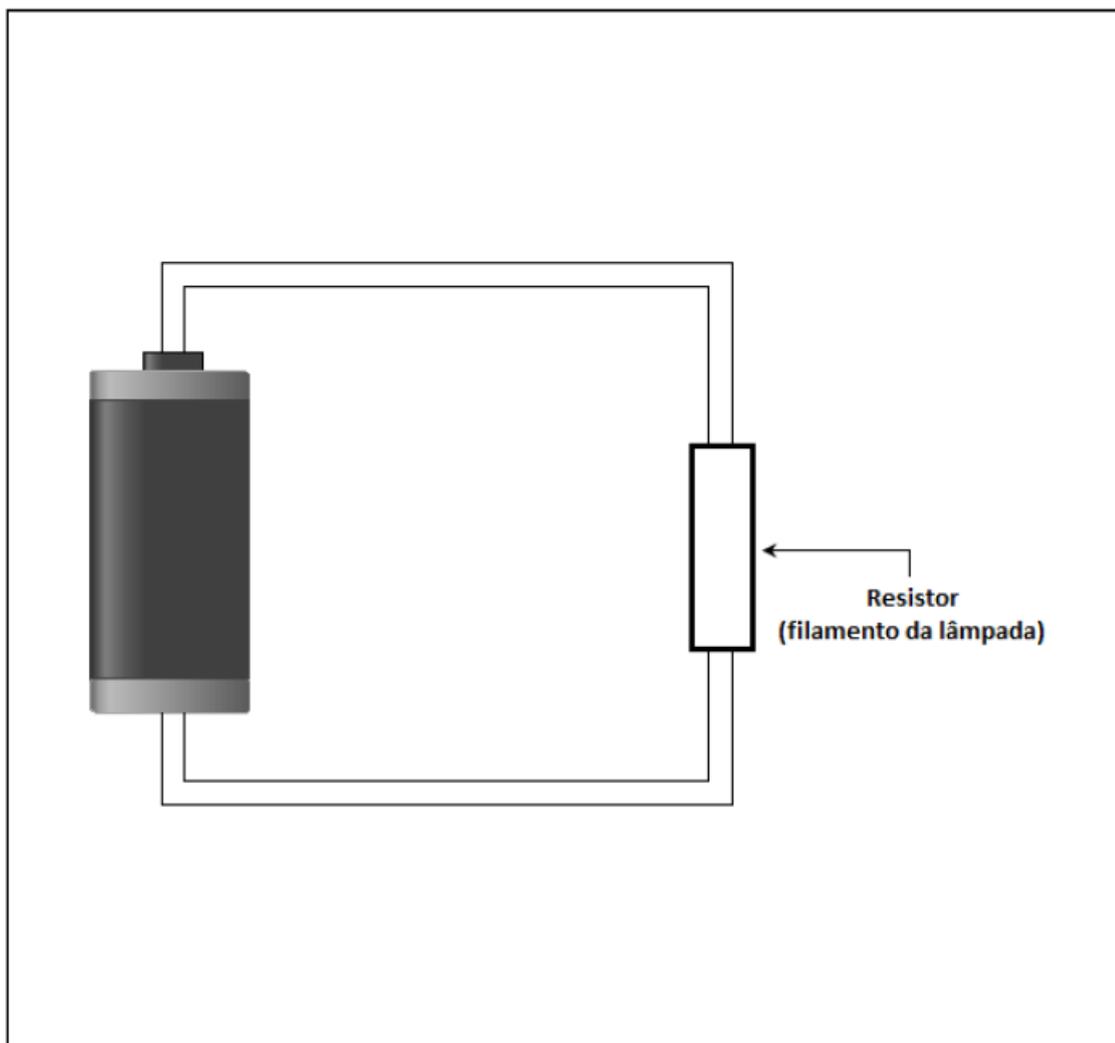
( ) Sim. Em qual(is) componente(s)? ( ) Pilha ( ) Fios condutores ( ) Lâmpada

Qual(is) dúvida(s)? \_\_\_\_\_

Aluno: \_\_\_\_\_

Escola: \_\_\_\_\_

A figura da atividade anterior foi reproduzida no quadro abaixo. Faça uma representação do **VETOR CAMPO ELÉTRICO** e da **DISTRIBUIÇÃO DAS CARGAS ELÉTRICAS** nos **FIOS CONDUTORES** e no **RESISTOR** considerando que o regime **ESTACIONÁRIO** já foi alcançado.

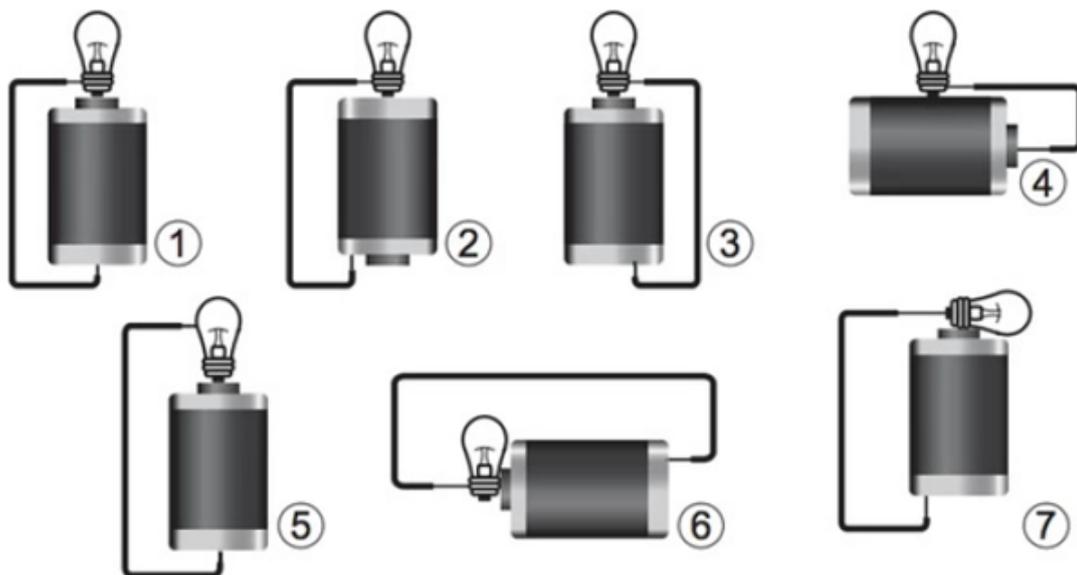


Aluno: \_\_\_\_\_

Escola: \_\_\_\_\_



11) Um curioso estudante, empolgado com a aula de circuito elétrico que assistiu na escola, resolve desmontar sua lanterna. Utilizando-se da lâmpada e da pilha, retiradas do equipamento, e de um fio com as extremidades descascadas, faz as seguintes ligações com a intenção de acender a lâmpada:



GONÇALVES FILHO, A.; BAROLLI, E. **Instalação Elétrica: investigando e aprendendo.** São Paulo: Scipione, 1997 (adaptado).

Tendo por base os esquemas mostrados, em quais casos a lâmpada acendeu?

- (A) (1), (3), (6)
- (B) (3), (4), (5)
- (C) (1), (3), (5)
- (D) (1), (3), (7)
- (E) (1), (2), (5)

**Aluno:** \_\_\_\_\_

**Escola:** \_\_\_\_\_

12) Um circuito em série é formado por uma pilha, uma lâmpada incandescente e uma chave interruptora. Ao se ligar a chave, a lâmpada acende quase instantaneamente, irradiando calor e luz. Popularmente, associa-se o fenômeno da irradiação de energia a um desgaste da corrente elétrica, ao atravessar o filamento da lâmpada, e à rapidez com que a lâmpada começa a brilhar. Essa explicação está em desacordo com o modelo clássico de corrente.

De acordo com o modelo mencionado, o fato de a lâmpada acender quase instantaneamente está relacionado à rapidez com que

- (A) o fluido elétrico se desloca no circuito.
- (B) as cargas negativas móveis atravessam o circuito.
- (C) a bateria libera cargas móveis para o filamento da lâmpada.
- (D) o campo elétrico se estabelece em todos os pontos do circuito.
- (E) as cargas positivas e negativas se chocam no filamento da lâmpada.

**Aluno:** \_\_\_\_\_

**Escola:** \_\_\_\_\_

## Apêndice C

### Respostas das atividades de acompanhamento do aprendizado



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**

Instituto de Física

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Mestrado Profissional em Ensino de Física

Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física



# **A eletrostática oculta na eletrodinâmica dos circuitos de corrente constante (Respostas das atividades propostas)**

**Anderson José da Fonseca**

**Germano Maioli Penello**

Respostas das atividades pedagógicas realizadas durante a aplicação da sequência de ensino e concebidas como um instrumento auxiliar para o acompanhamento do aprendizado. Esse material integra a dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

**Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2020**

1) Você possui uma pilha, fios condutores e uma lâmpada. Faça um esquema de um circuito elétrico que faça a lâmpada acender. Para isso utilize os seguintes símbolos:



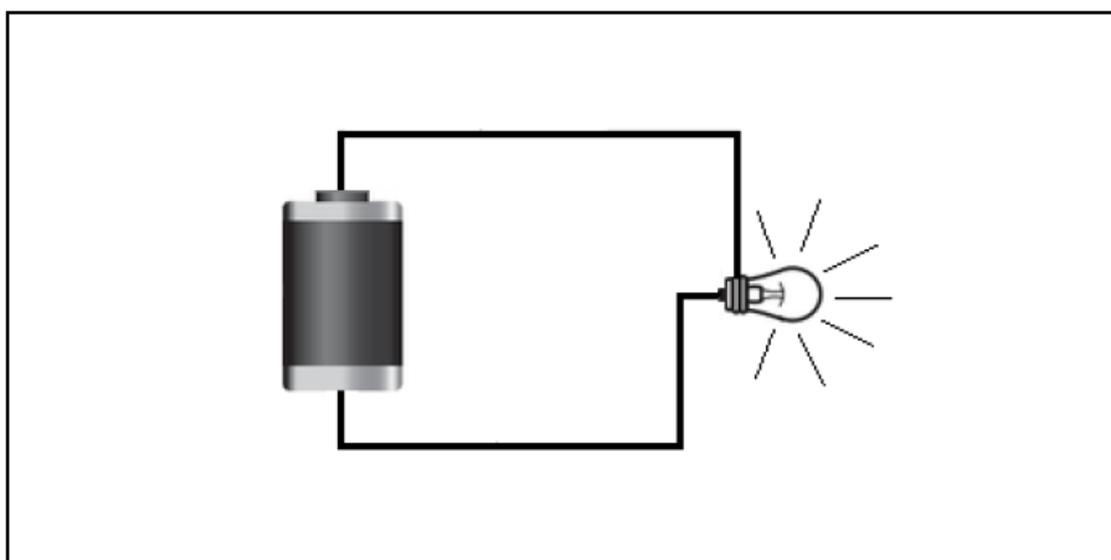
**Pilha**



**Lâmpada**



**Fios condutores**



2) A seguir, estão representados três componentes de um circuito elétrico que se encontram **DESCONECTADOS**.



**Pilha**



**Lâmpada**

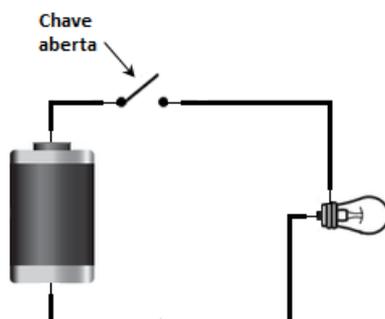


**Fio condutor**

Na tabela abaixo, cada um dos campos em branco relaciona uma característica a um dos componentes apresentados na figura acima. Ao marcar com um **X** no campo, você está indicando que naquele elemento existe a presença daquela característica. Você pode marcar mais de um campo para cada componente. Seguindo essa orientação, marque adequadamente com **X** os campos em branco da tabela a seguir:

	<b>Carga elétrica localizada</b>	<b>Campo elétrico</b>	<b>Diferença de potencial</b>	<b>Resistência elétrica</b>	<b>Corrente elétrica</b>
<b>Pilha</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>		
<b>Fio condutor</b>					
<b>Lâmpada</b>					

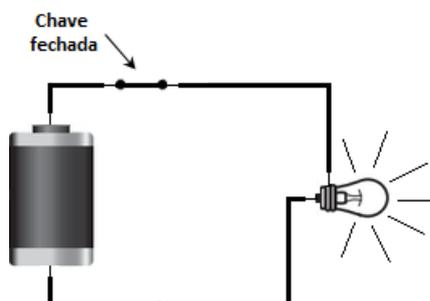
- 3) O esquema abaixo mostra uma pilha, fios condutores e uma lâmpada conectados entre si e a uma chave interruptora que está **ABERTA**.



Na tabela abaixo, cada um dos campos em branco relaciona uma característica a um dos componentes apresentados na figura acima. Ao marcar com um **X** no campo, você está indicando que naquele elemento existe a presença daquela característica. Você pode marcar mais de um campo para cada componente. Seguindo essa orientação, marque adequadamente com **X** os campos em branco da tabela a seguir:

	<b>Carga elétrica localizada</b>	<b>Campo elétrico</b>	<b>Diferença de potencial</b>	<b>Resistência elétrica</b>	<b>Corrente elétrica</b>
<b>Pilha</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>		
<b>Fios condutores</b>	<b>X</b>	<b>X</b>			
<b>Lâmpada</b>	<b>X</b>	<b>X</b>			

- 4) O esquema abaixo mostra uma pilha, fios condutores e uma lâmpada conectados entre si e a uma chave interruptora que está **FECHADA**.



Na tabela abaixo, cada um dos campos em branco relaciona uma característica a um dos componentes apresentados na figura acima. Ao marcar com um **X** no campo, você está indicando que naquele elemento existe a presença daquela característica. Você pode marcar mais de um campo para cada componente. Seguindo essa orientação, marque adequadamente com **X** os campos em branco da tabela a seguir:

	<b>Carga elétrica localizada</b>	<b>Campo elétrico</b>	<b>Diferença de potencial</b>	<b>Resistência elétrica</b>	<b>Corrente elétrica</b>
<b>Pilha</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
<b>Fios condutores</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
<b>Lâmpada</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>

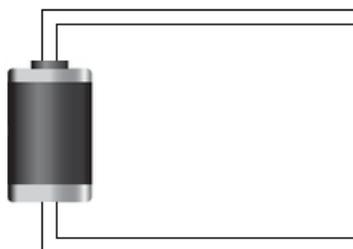
5) Abaixo encontra-se representada uma pilha.



Na tabela abaixo, cada um dos campos em branco relaciona uma característica ao componente apresentado na figura acima. Ao marcar com um **X** no campo, você está indicando que aquela característica está presente no elemento. Você pode marcar mais de um campo se julgar conveniente. Seguindo essa orientação, marque adequadamente com **X** os campos em branco da tabela a seguir

	<b>Carga elétrica localizada</b>	<b>Campo elétrico</b>	<b>Diferença de potencial</b>	<b>Resistência elétrica</b>	<b>Corrente elétrica</b>
<b>Pilha</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>		

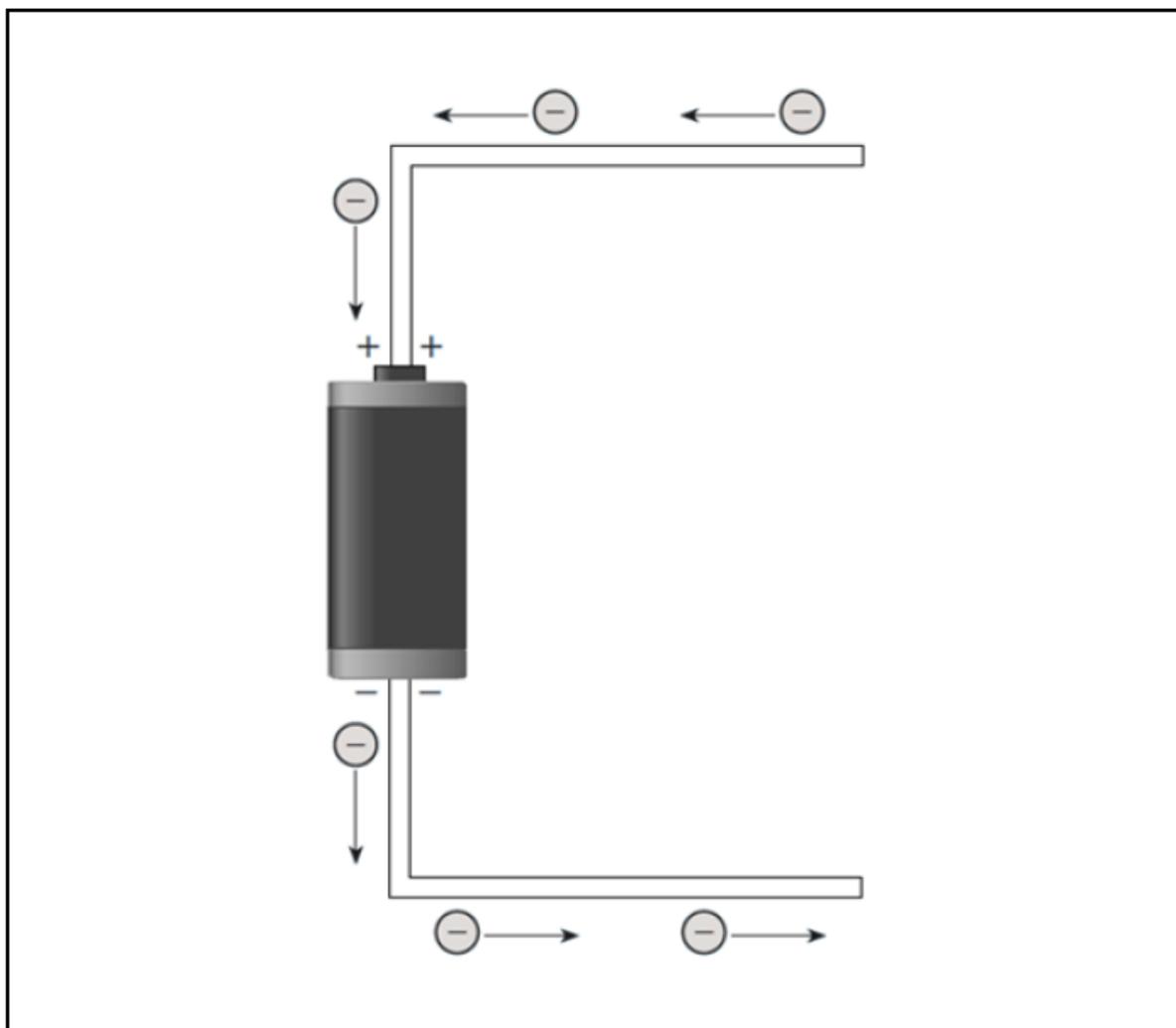
- 6) O esquema abaixo mostra uma pilha e fios condutores ligados aos seus contatos. Faça a análise da situação considerando que ela se passa no período conhecido como **TRANSIENTE**, isto é, o intervalo de tempo desde a conexão dos fios condutores aos contatos da pilha até o regime permanente ser estabelecido.



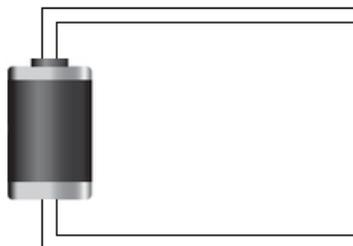
Na tabela abaixo, cada um dos campos em branco relaciona uma característica a um dos componentes apresentados na figura acima. Ao marcar com um **X** no campo, você está indicando que naquele elemento existe a presença daquela característica. Você pode marcar mais de um campo para cada componente. Seguindo essa orientação, marque adequadamente com **X** os campos em branco da tabela a seguir:

	<b>Carga elétrica localizada</b>	<b>Campo elétrico</b>	<b>Diferença de potencial</b>	<b>Resistência elétrica</b>	<b>Corrente elétrica</b>
<b>Pilha</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
<b>Fios condutores</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>

A figura da atividade anterior foi reproduzida no quadro abaixo. Faça uma representação do que ocorre nos **FIOS CONDUTORES** durante o **TRANSIENTE**.



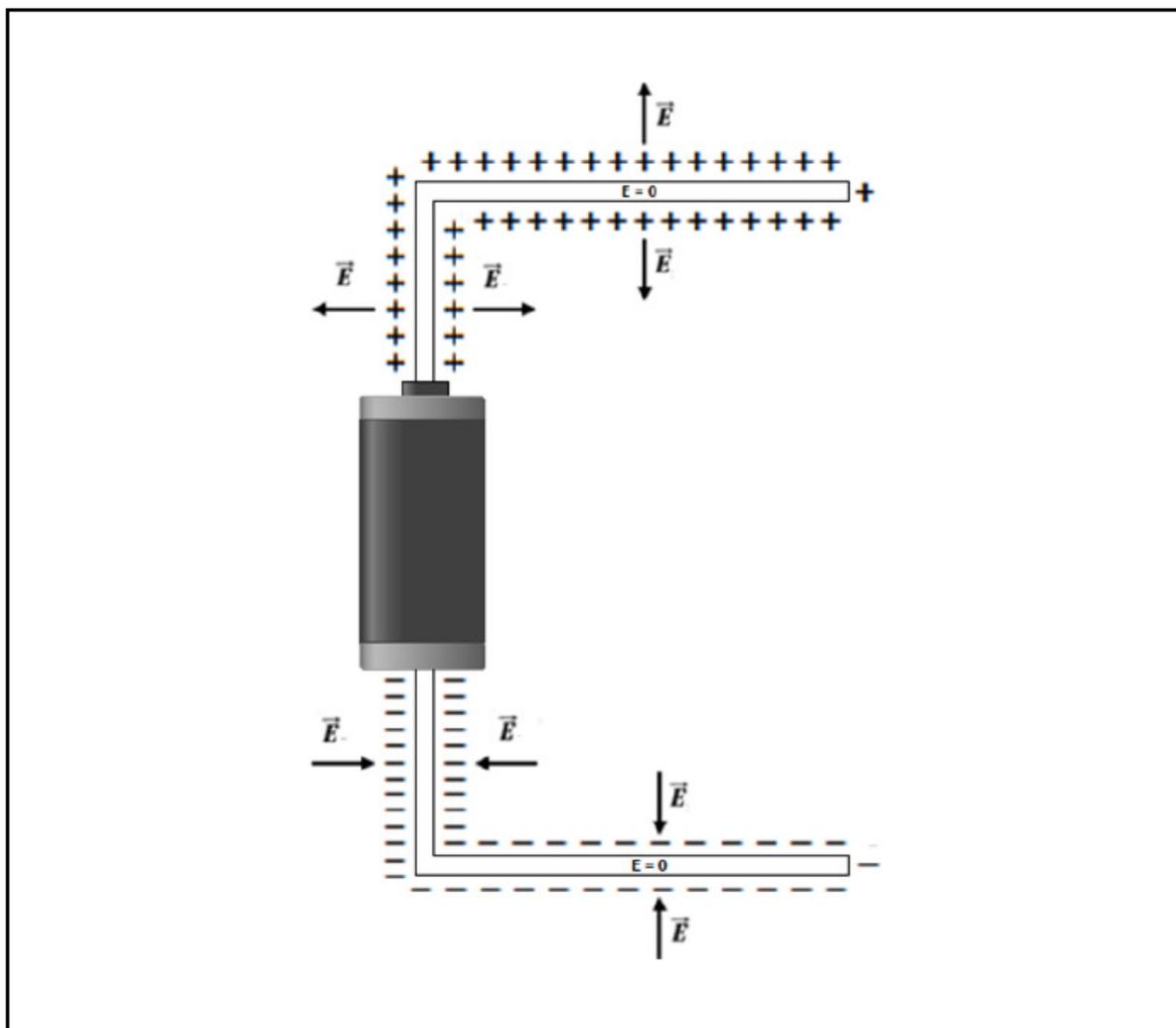
- 7) O esquema abaixo mostra uma pilha e fios condutores ligados aos seus contatos. Faça a análise da situação considerando que ela se passa depois que o regime **ESTÁTICO** foi alcançado.



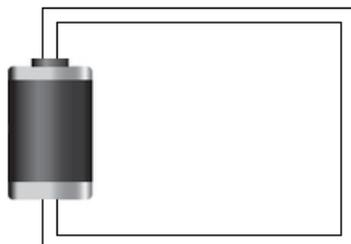
Na tabela abaixo, cada um dos campos em branco relaciona uma característica a um dos componentes apresentados na figura acima. Ao marcar com um **X** no campo, você está indicando que aquela característica está presente no elemento. Você pode marcar mais de um campo se julgar conveniente. Seguindo essa orientação, marque adequadamente com **X** os campos em branco da tabela a seguir:

	<b>Carga elétrica localizada</b>	<b>Campo elétrico</b>	<b>Diferença de potencial</b>	<b>Resistência elétrica</b>	<b>Corrente elétrica</b>
<b>Fios condutores</b>	( ) no interior <b>(X)</b> na superfície	( ) no interior <b>(X)</b> na superfície			

A figura da atividade anterior foi reproduzida no quadro abaixo. Faça uma representação do **VETOR CAMPO ELÉTRICO** e da **DISTRIBUIÇÃO DAS CARGAS ELÉTRICAS** nos **FIOS CONDUTORES** considerando que o regime **ESTÁTICO** já foi alcançado .



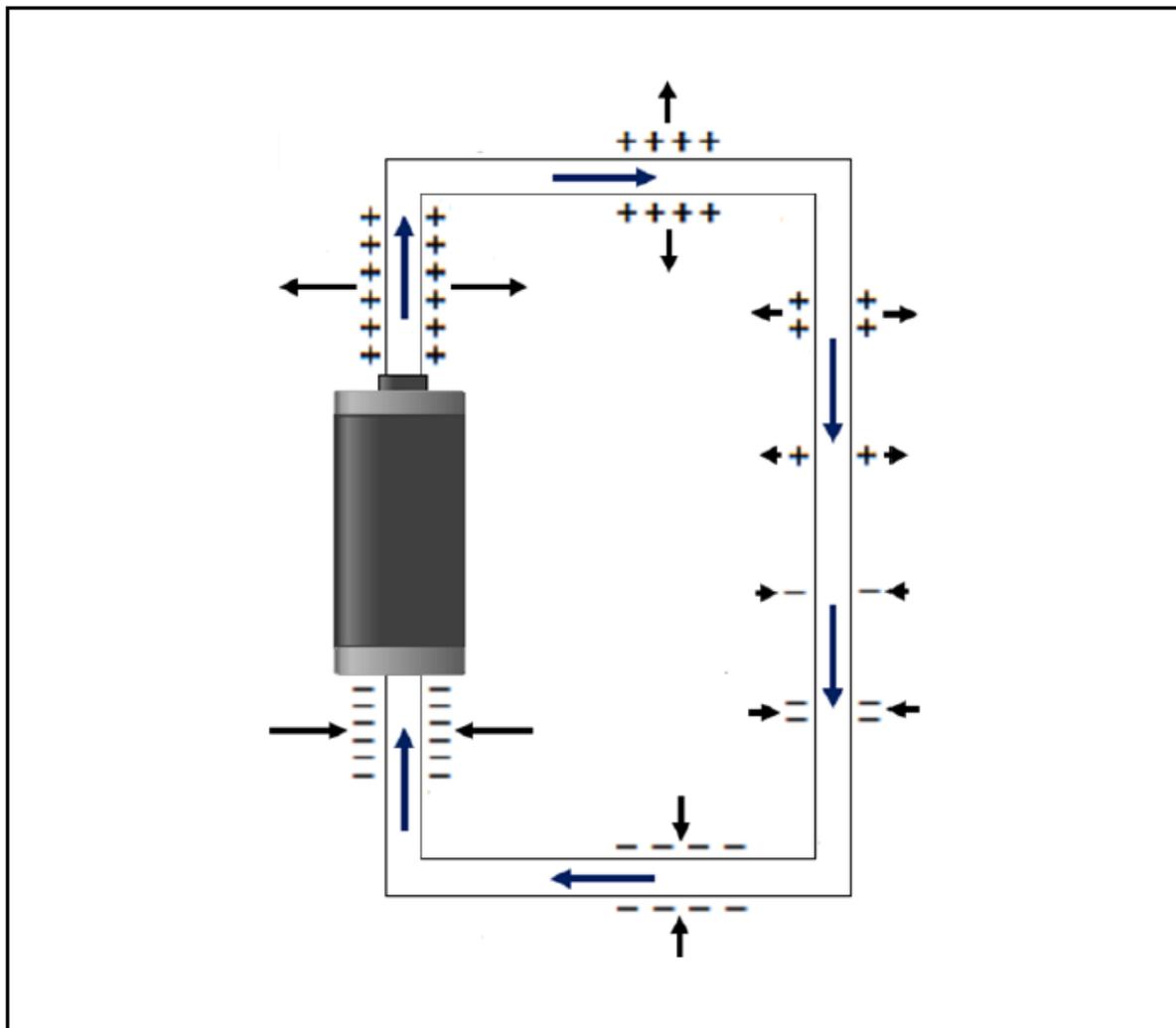
- 8) O esquema abaixo mostra uma pilha e um fio condutor ligado aos seus contatos. Faça a análise da situação considerando que ela se passa depois que o regime **ESTACIONÁRIO** foi alcançado.



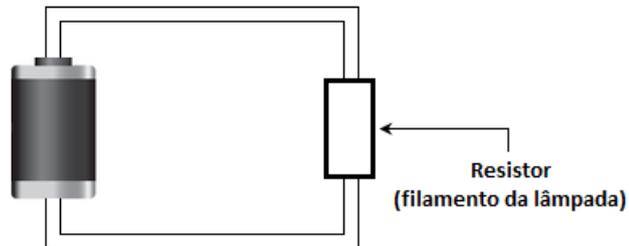
Na tabela abaixo, cada um dos campos em branco relaciona uma característica a um dos componentes apresentados na figura acima. Ao marcar com um **X** no campo, você está indicando que aquela característica está presente no elemento. Você pode marcar mais de um campo se julgar conveniente. Seguindo essa orientação, marque adequadamente com **X** os campos em branco da tabela a seguir:

	Carga elétrica localizada	Campo elétrico	Diferença de potencial	Resistência elétrica	Corrente elétrica
<b>Fio condutor</b>	( ) no interior ( <b>X</b> ) na superfície	( <b>X</b> ) no interior ( <b>X</b> ) na superfície	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>

A figura da atividade anterior foi reproduzida no quadro abaixo. Faça uma representação do **VETOR CAMPO ELÉTRICO** e da **DISTRIBUIÇÃO DAS CARGAS ELÉTRICAS** nos **FIOS CONDUTORES** considerando que o regime **ESTACIONÁRIO** já tenha sido alcançado.



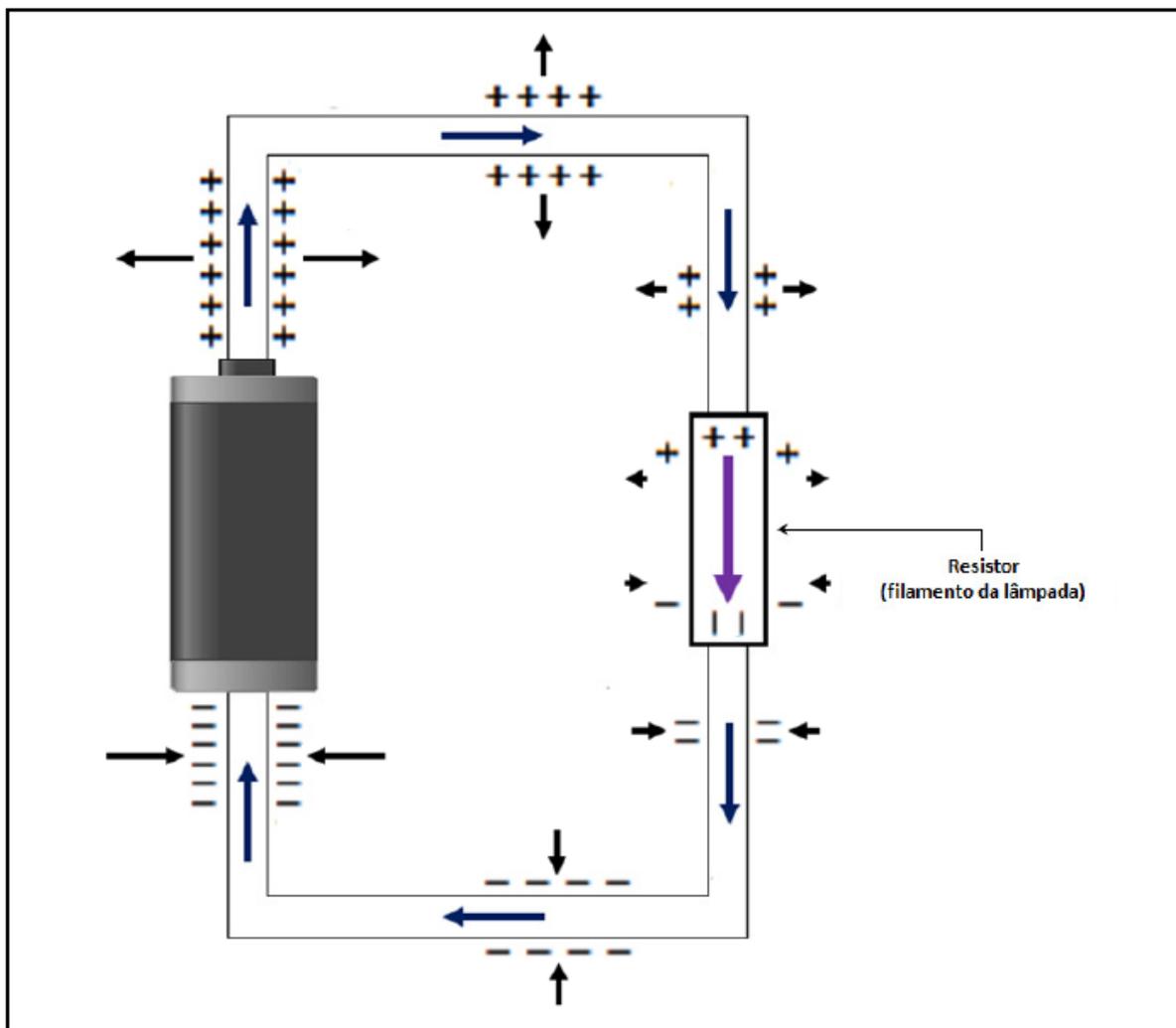
9) O esquema abaixo mostra uma pilha e um resistor (filamento da lâmpada) interligados por fios condutores. Faça a análise da situação considerando que ela se passa depois que o regime **ESTACIONÁRIO** foi alcançado.



Na tabela abaixo, cada um dos campos em branco relaciona uma característica a um dos componentes apresentados na figura acima. Ao marcar com um **X** no campo, você está indicando que naquele elemento há presença daquela característica. Você pode marcar mais de um campo para cada componente. Seguindo essa orientação, marque adequadamente com **X** os campos em branco da tabela a seguir:

	Carga elétrica localizada	Campo elétrico	Diferença de potencial	Resistência elétrica	Corrente elétrica
<b>Fios condutores</b>	( ) no interior (X) na superfície	(X) no interior (X) na superfície	X	X	X
<b>Resistor (filamento da lâmpada)</b>	(X) no interior (X) na superfície	(X) no interior (X) na superfície	X	X	X

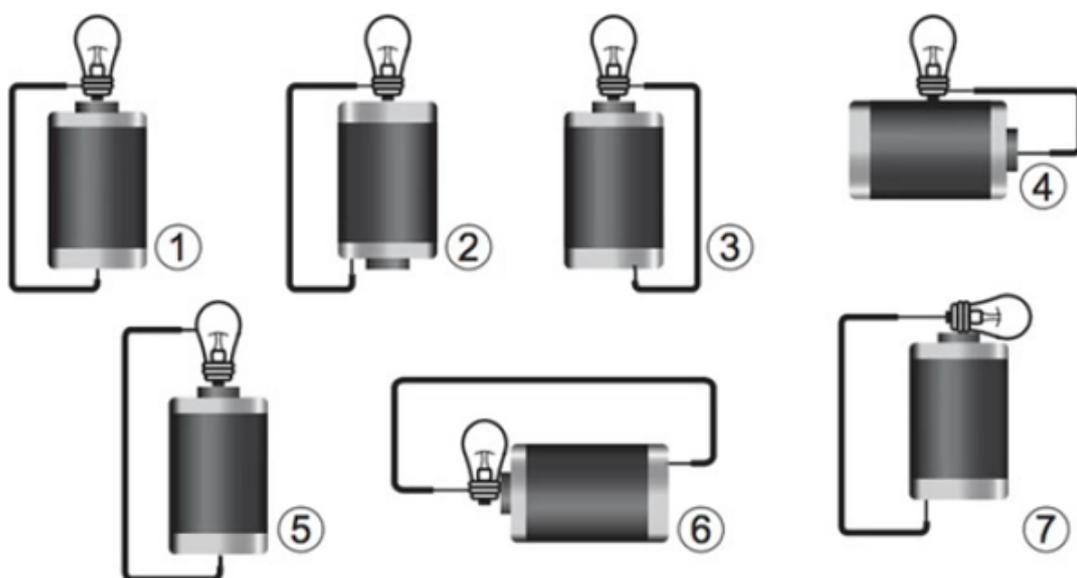
A figura da atividade anterior foi reproduzida no quadro abaixo. Faça uma representação do **VETOR CAMPO ELÉTRICO** e da **DISTRIBUIÇÃO DAS CARGAS ELÉTRICAS** nos **FIOS CONDUTORES** e no **RESISTOR** considerando que o regime **ESTACIONÁRIO** já foi alcançado.



10) Agora que você já ampliou o seu conhecimento sobre o circuito elétrico que faz uma lâmpada acender, elabore uma resposta para a pergunta: **por que ao se ligar o interruptor a lâmpada acende quase instantaneamente?**

Quando a chave interruptora é fechada o campo elétrico no interior do fio no local do fechamento deixa de ser zero e passa deslocar os elétrons de condução, modificando a distribuição deles ao longo do fio e dos demais componentes do circuito. Como essa mudança é provocada pelo campo elétrico, ela acontece praticamente com a mesma rapidez com que o campo elétrico se propaga através dos fios, isto é, com a mesma ordem de grandeza da velocidade da luz no vácuo (300.000 km/s). Rapidamente, as cargas se arrumam de tal forma que uma corrente elétrica constante é estabelecida. Portanto, a lâmpada acende quase instantaneamente porque a informação (campo elétrico) de que o circuito se completou viaja a uma velocidade da ordem de  $10^5$  km/s.

11) Um curioso estudante, empolgado com a aula de circuito elétrico que assistiu na escola, resolve desmontar sua lanterna. Utilizando-se da lâmpada e da pilha, retiradas do equipamento, e de um fio com as extremidades descascadas, faz as seguintes ligações com a intenção de acender a lâmpada:



GONÇALVES FILHO, A.; BAROLLI, E. **Instalação Elétrica: investigando e aprendendo.** São Paulo: Scipione, 1997 (adaptado).

Tendo por base os esquemas mostrados, em quais casos a lâmpada acendeu?

- (A) (1), (3), (6)
- (B) (3), (4), (5)
- (C) (1), (3), (5)
- (D) (1), (3), (7)
- (E) (1), (2), (5)

**Alternativa D.**

12) Um circuito em série é formado por uma pilha, uma lâmpada incandescente e uma chave interruptora. Ao se ligar a chave, a lâmpada acende quase instantaneamente, irradiando calor e luz. Popularmente, associa-se o fenômeno da irradiação de energia a um desgaste da corrente elétrica, ao atravessar o filamento da lâmpada, e à rapidez com que a lâmpada começa a brilhar. Essa explicação está em desacordo com o modelo clássico de corrente.

De acordo com o modelo mencionado, o fato de a lâmpada acender quase instantaneamente está relacionado à rapidez com que

- (A) o fluido elétrico se desloca no circuito.
- (B) as cargas negativas móveis atravessam o circuito.
- (C) a bateria libera cargas móveis para o filamento da lâmpada.
- (D) o campo elétrico se estabelece em todos os pontos do circuito.
- (E) as cargas positivas e negativas se chocam no filamento da lâmpada.

**Alternativa D.**