



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

EVANDIR DOS SANTOS MOREIRA

FUNDAMENTOS DE ELETRÔNICA USANDO MULTISIM LIVE

FORTALEZA

2022

EVANDIR DOS SANTOS MOREIRA

FUNDAMENTOS DE ELETRÔNICA USANDO MULTISIM LIVE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos à obtenção do título de mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Humberto de Andrade Carmona.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M837f Moreira, Evandir dos Santos.

Fundamentos de eletrônica usando multisim live / Evandir dos Santos Moreira. – 2022.
177 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Física, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Humberto de Andrade Carmona.

1. Ensino de Física. 2. Simulador. 3. Eletricidade. I. Título.

CDD 530

EVANDIR DOS SANTOS MOREIRA

FUNDAMENTOS DE ELETRÔNICA USANDO MULTISIM LIVE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos à obtenção do título de mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Humberto de Andrade Carmona.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Humberto de Andrade Carmona (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Carlos Alberto Santos de Almeida
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Geraldo de Melo Pinheiro
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

A Deus.

Aos meus pais, Francisco de Sales Moreira e Maria Paula dos Santos Moreira, por proporcionar as condições necessárias à minha formação inicial, acreditar nas minhas potencialidades e dispor de paciência para colher os frutos após tantos anos de estudo.

AGRADECIMENTOS

À CAPES, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Ao Prof. Dr. Humberto de Andrade Carmona, pela excelente orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora Carlos Alberto Santos de Almeida e Francisco Geraldo de Melo Pinheiro pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos alunos que participaram da aplicação do produto, pelo tempo concedido durante as aulas no laboratório de informática.

Aos colegas da turma de mestrado, em especial ao amigo Thiago Câmara de Freitas, pelas reflexões, críticas e sugestões.

A minha esposa pelo incentivo, apoio e paciência.

“Um modelo matemático nunca é uma representação completamente precisa de uma situação física – é uma *idealização*. Um bom modelo simplifica a realidade o bastante para permitir cálculos matemáticos, mantendo, porém, precisão suficiente para conclusões significativas. É importante entender as limitações do modelo. A palavra final está na Mãe Natureza.” (STEWART, 2011, v. 1, p. 15)

RESUMO

É consenso entre professores que um ano letivo com aulas meramente expositivas é para o aluno exaustivo e desanimador, além de colocá-lo em posição de passividade frente ao conteúdo ministrado em sala. A condição de simples receptor de conhecimento é parcialmente interrompida quando o aluno interage e discute se tornando um agente ativo do conhecimento adquirido. Contudo, tal comportamento é, ainda, insuficiente. Uma educação efetiva exige que o aluno vivencie o conteúdo e literalmente “coloque a mão na massa”. Esse pensamento é corroborado pelo MEC quando fala que o Novo Ensino Médio pretende atender às necessidades e às expectativas dos jovens, fortalecendo o protagonismo juvenil, visto que garante aos estudantes a escolha do itinerário formativo no qual desejam aprofundar seus conhecimentos (Ministério da Educação e Cultura, 2018). Para contornar tais obstáculos, professores mais atenciosos elaboram, dentre outras atividades, aulas nos laboratórios físicos e/ou em simuladores. O objetivo desta dissertação de mestrado consiste em mostrar as potencialidades do simulador *Multisim Live* e como ele pode ser útil para facilitar o aprendizado dos alunos e excelente ferramenta para auxiliar professores a criar aulas mais interativas e agradáveis. Este trabalho tem por referência o *Produto Educacional*, que consiste em um livreto com o tema *Fundamentos de Eletrônica usando Multisim Live*, e o resultado de sua aplicação. Tal produto foi utilizado em duas turmas de terceiro ano do ensino médio, de um total de quatro. As outras duas turmas restantes foram utilizadas para comparar os resultados na aprendizagem dos alunos que fizeram uso do recurso com aqueles que não o fizeram. O método aplicado consistiu em utilizar o *software* para reforçar os conteúdos de eletricidade, mais especificamente o de eletrodinâmica, expostos previamente em sala durante aulas expositivas. Após as aulas com o *Multisim Live* todas as turmas responderam a uma lista de questões referentes aos conteúdos vistos em sala e reforçadas no simulador. Os resultados foram satisfatórios e mostraram um acentuado grau de acertos para os alunos que fizeram uso do *Multisim Live*. A princípio, podemos supor que sua utilização ofereceu benefícios ao aprendizado dos alunos e ao ensino da Física.

Palavras-chave: ensino de física; simulador; eletricidade.

ABSTRACT

It is a consensus among classes with only lectures is the exhausting student to discouraging, in addition to teachers and experience that allows the entry into content position to the content taught in the classroom. A simple receiver of knowledge condition is changed when the student interacts and discusses about an active agent of acquired knowledge. Such behavior is still abundant. Effective education requires the student to live the content and literally “put his hands on it” . This thought is corroborated by the MEC when it says that the New Education aims to meet the needs of young people, strengthening youth leadership, given that students choose the training itinerary in which they want to guarantee their knowledge (Ministry of Education and Culture, 2018). To circumvent such obstacles, more attentive teachers prepare, among the activities, classes in physical laboratories and/or simulators. The present master's dissertation consists of showing the potential of the Multisim Live simulator and how it can be useful to facilitate student learning and an excellent tool for assistant professors to create more objectives and additional objectives. This work has as reference the Educational Product, which consists of a booklet with the theme Electronics Fundamentals using Multisim Live, and the result of its application. This product was used in two third-year high school classes, out of a total of four. The other two remaining classes were used to compare the learning results of students who used the resources with those who did not. The applied method consists of the software to reinforce the elements of electrical use, more specifically in the use of electrical appliances, previously exposed in the classroom during lectures. After classes with Live, all classes answered a list of questions regarding the contents seen in the classroom and reinforced in the simulator. The results were approved according to the results of the students who took the Multisim Live Principle, we can support that its use was offered to the benefits of student learning and Physics teaching.

Keywords: physics teaching; simulator; electricity.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 1 | – Variação da resistividade ρ em função da temperatura | 18 |
| Figura 2 | – Fluxo de partículas carregadas através de um fio condutor | 19 |
| Figura 3 | – Sentidos convencional e real da corrente elétrica | 19 |
| Figura 4 | – Orientações da corrente elétrica e do vetor densidade de corrente elétrica | 20 |
| Figura 5 | – Vetor área e a densidade de corrente elétrica | 21 |
| Figura 6 | – Carga por unidade de volume em um fio condutor | 22 |
| Figura 7 | – Densidade de corrente elétrica e o sentido do campo elétrico | 25 |
| Figura 8 | – Corrente elétrica em um circuito elétrico simples | 26 |
| Figura 9 | – Campo elétrico gerado por cargas elétricas acumuladas | 27 |
| Figura 10 | – Corrente elétrica induzida numa espira | 29 |
| Figura 11 | – Experimentos de Faraday | 30 |
| Figura 12 | – Variação do campo magnético através de uma espira | 31 |
| Figura 13 | – Aprendizagem significativa – aprendizagem mecânica | 38 |
| Figura 14 | – EEM Professor Otávio Terceiro de Farias | 43 |
| Figura 15 | – Alunos da 3ª série D (lado esquerdo) | 44 |
| Figura 16 | – Alunos da 3ª série D (lado direito) | 44 |
| Figura 17 | – Alunos da 3ª série E (lado esquerdo) | 45 |
| Figura 18 | – Alunos da 3ª série E (lado direito) | 45 |
| Figura 19 | – Sentido convencional da corrente elétrica em um circuito elétrico | 47 |
| Figura 20 | – Sentido real da corrente elétrica em um circuito elétrico simples | 47 |
| Figura 21 | – Inserção de um amperímetro e de um voltímetro em um circuito | 48 |
| Figura 22 | – Corrente elétrica em uma associação de resistores em série | 48 |
| Figura 23 | – Tensão elétrica em uma associação de resistores em série | 49 |
| Figura 24 | – Corrente elétrica em uma associação de resistores em paralelo | 49 |

| | |
|--|----|
| Figura 25 – Tensão elétrica em uma associação de resistores em série | 50 |
| Figura 26 – Circuito elétrico simples com fusível | 51 |
| Figura 27 – Circuito elétrico simples com lâmpada incandescente | 51 |
| Figura 28 – Atuação de um fusível | 52 |
| Figura 29 – Opinião do Aluno 1 | 59 |
| Figura 30 – Opinião do Aluno 2 | 59 |
| Figura 31 – Opinião do Aluno 3 | 59 |
| Figura 32 – Opinião do Aluno 4 | 59 |
| Figura 33 – Opinião do Aluno 5 | 60 |
| Figura 34 – Opinião do Aluno 6 | 60 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfico 1 – Porcentagem de acertos no <i>Questionário sobre Teoria de Circuitos</i> | 55 |
| Gráfico 2 – Respostas ao Questionário de Satisfação | 58 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Valores da resistividade em temperatura ambiente (20 °C) | 24 |
| Tabela 2 – Percentual de alunos presentes na aplicação do produto | 46 |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 2 | FUNDAMENTOS DE FÍSICA | 17 |
| 2.1 | Tipos de materiais | 17 |
| 2.2 | Corrente elétrica | 18 |
| 2.2.1 | <i>Densidade de corrente</i> | 21 |
| 2.2.2 | <i>Densidade de corrente e velocidade de arrasto</i> | 22 |
| 2.3 | Lei de Ohm | 23 |
| 2.4 | Força eletromotriz | 26 |
| 2.5 | Indução eletromagnética | 28 |
| 2.5.1 | <i>A lei de indução de Faraday</i> | 29 |
| 2.5.2 | <i>A lei de Lenz</i> | 31 |
| 2.5.3 | <i>O campo elétrico induzido</i> | 32 |
| 3 | FUNDAMENTOS DE ENSINO | 34 |
| 3.1 | David Ausubel | 34 |
| 3.2 | A teoria da aprendizagem significativa | 35 |
| 3.2.1 | <i>As condições necessárias à aprendizagem significativa</i> | 36 |
| 3.2.2 | <i>A estrutura cognitiva</i> | 37 |
| 3.2.3 | <i>Os subsunçores ou ideias-âncora</i> | 37 |
| 3.2.4 | <i>A aprendizagem mecânica</i> | 38 |
| 3.2.5 | <i>Formas de aprendizagem significativa</i> | 39 |
| 3.2.6 | <i>Tipos de aprendizagem significativa</i> | 39 |
| 3.2.7 | <i>Avaliação na aprendizagem significativa</i> | 40 |
| 4 | REVISÃO DE LITERATURA | 41 |
| 5 | METODOLOGIA | 43 |
| 6 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 53 |
| 7 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 61 |
| | REFERÊNCIAS | 63 |
| | APÊNDICE A – LISTA DE ASSINATURA DA 3ª SÉRIE B MANHÃ | 66 |
| | APÊNDICE B – LISTA DE ASSINATURA DA 3ª SÉRIE C MANHÃ | 67 |
| | APÊNDICE C – LISTA DE ASSINATURA DA 3ª SÉRIE D MANHÃ | 68 |
| | APÊNDICE D – LISTA DE ASSINATURA DA 3ª SÉRIE E TARDE | 69 |

| | |
|--|-----------|
| APÊNDICE E – QUESTIONÁRIO SOBRE TEORIA DE CIRCUITOS ... | 70 |
| APÊNDICE F – QUESTIONÁRIO DE SATISFAÇÃO | 72 |
| APÊNDICE G – PRODUTO EDUCACIONAL | 74 |

1 INTRODUÇÃO

Lecionar Física não é uma tarefa simples, haja vista tratar-se de uma área do conhecimento repleta de conceitos abstratos. A essa característica, inerente à disciplina, acrescenta-se o fato de o professor ter que trabalhar com um público altamente heterogêneo que, em geral, apresenta rendimento insatisfatório em matemática, leitura e interpretação.

Diante desse contexto é justificável que alguns estudantes resumam o estudo da Física à memorização de equações, as quais preferem chamar de fórmulas.

Com o objetivo de contornar tais obstáculos o professor lança mão de projetos, jogos, aulas de campo, uso dos laboratórios e emprego de simuladores. Afinal de contas o ensino de Física não deve se concentrar apenas na memorização de equações ou repetição mecanizada de procedimentos, em situações artificiais ou extremamente abstratas, mas ganhar consciência de que é necessário lhe dar um significado, deixando claro seu sentido já no momento do aprendizado, na própria escola média (PCN+). Essas estratégias também ajudam ao professor se distancia das exaustivas e triviais aulas expositivas ao mesmo tempo que estimulam o protagonismo juvenil, tão em alta em nossos dias e defendido pelo MEC, quando afirma que o Novo Ensino Médio pretende atender às necessidades e às expectativas dos jovens, fortalecendo o protagonismo juvenil, visto que garante aos estudantes a escolha do itinerário formativo no qual desejam aprofundar seus conhecimentos (Ministério da Educação e Cultura, 2018).

O cerne deste trabalho é o *software* de simulação *Multisim Live* o qual, aliado à Teoria da Aprendizagem Significativa, de David Ausubel, acreditamos ser capaz de fornecer aos professores uma ferramenta que aproxime teoria e prática, tornando as aulas mais atrativas e dinâmicas. Aos alunos, um instrumento que os conduza do abstrato ao concreto de forma suave e gradual, para que possam começar a experimentar o verdadeiro sentido da máxima: “aprender fazendo”. Construindo o conhecimento estabelecendo uma relação entre a teoria vista em sala de aula e a realidade do mundo no qual está inserido.

Para atingir tais objetivos, nosso produto educacional insere o conteúdo de eletrodinâmica em uma área mais específica, a saber, a eletrônica. Isso porque o aluno deve ser capaz de articular o conhecimento físico com conhecimentos de outras áreas do saber científico (PCNEM). Cada elemento de circuito – fonte, resistor, capacitor, transformador, dentre outros componentes presentes em qualquer livro de física do ensino médio – é cuidadosamente trabalhado e ao final são utilizados no projeto de uma fonte de tensão retificada. Esses elementos trazem consigo conceitos considerados centrais em áreas de fenômenos de natureza física e pertencem ao conteúdo de Eletromagnetismo (PCN+). A escolha do projeto é justificada

pelos PCNEM os quais afirmam que compreender a física presente no mundo vivencial e nos equipamentos e procedimentos tecnológicos, além de descobrir o “como funciona” de aparelhos são competências e habilidades a serem desenvolvidas em física pelo aluno.

Isso mostra ao aluno o quanto a física é importante para outras áreas do conhecimento e o quanto ela permeia nossa vida.

Além disso, com a finalidade de facilitar o trabalho do professor e orientá-lo na utilização corretamente do *Multisim Live*, disponibilizamos um tutorial com as informações básicas referente ao acesso à plataforma, componentes disponíveis, dispositivos de medidas e obtenção de gráficos.

É fato que simuladores se utilizam de modelos idealizados que jamais irão substituir a riqueza de informações e experiências fornecidas por experimentos reais.

Um modelo matemático nunca é uma representação completamente precisa de uma situação física – é uma *idealização*. Um bom modelo simplifica a realidade o bastante para permitir cálculos matemáticos, mantendo, porém, precisão suficiente para conclusões significativas. É importante entender as limitações do modelo. A palavra final está na Mãe Natureza. (STEWART, 2011, v. 1, p. 15)

Contudo, o uso dessas ferramentas possui muitas vantagens, dentre as quais podemos citar: única opção de relacionar teoria e prática em escolas que não possuem laboratório, acesso virtual a equipamentos caros e de difícil aquisição, além de uma quantidade quase infinita de dispositivos tais como resistores, potenciômetros, lâmpadas, chaves e fontes. Além disso, não é raro encontrar alunos perdidos durante um experimento, sem saber manipular o equipamento ou, por exemplo, fazer as ligações corretas ao montar um circuito elétrico, o que prejudica completamente o entendimento do assunto explorado. O uso de *software* de simulação surge como uma etapa preparatória, que pode reduzir o impacto da transição de aulas puramente teóricas àquelas essencialmente experimentais.

Mas qual seria o diferencial do *Multisim Live* relativamente, por exemplo, ao *PhEt* – famosa e respeitada plataforma de simulação disponibilizada pela Universidade do Colorado? Embora altamente didática e rica em informações visuais que favorecem o aprendizado é impossível utilizá-la para a implementação completa de um projeto como aquele proposto pelo nosso produto educacional, a saber, uma fonte de tensão retificada.

Sendo mais específico e até mesmo técnico, o *Multisim Live* é um *IDE* (do inglês *Integrated Development Environment* ou Ambiente de Desenvolvimento Integrado) é um *software* de projeto de circuitos para o ensino e pesquisa de eletrônica analógica, digital e de potência. Incorpora a simulação *SPICE* padrão da indústria que disponibiliza um ambiente esquemático interativo para visualizar e analisar instantaneamente o comportamento de

circuitos eletrônicos (NATIONAL INSTRUMENTS CORP., 2022).

SPICE significa *Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis* (Programa de Simulação com Ênfase em Circuitos Integrados). Concebido por Laurence W. Nagel na Universidade da Califórnia em Berkeley, o programa SPICE teve sua primeira versão finalizada em 1972, escrito na linguagem FORTRAN IV. Cópias gratuitas do SPICE foram distribuídas entre universidades e indústrias de eletrônica. Com base nas necessidades dos usuários, o programa foi melhorado, chegando à sua segunda versão, o SPICE2. A partir de 1980 tornou-se disponível, através da Universidade da Califórnia em Berkeley, a versão SPICE3, cujo programa fonte codificado em linguagem “C” foi disponibilizado para Universidades e Centros de Pesquisa. [...] Em 1985 foi desenvolvido o primeiro programa comercial exclusivamente para ser usado em microcomputadores. É basicamente o programa SPICE2, que foi adaptado pela empresa MicroSim para uso em microcomputadores IBM-PC e posteriormente para workstations com sistema operacional UNIX. A grande vantagem em relação ao programa SPICE2 de Berkeley foi a apresentação de um programa associado chamado PROBE, de modo a permitir a visualização gráfica dos resultados da simulação de modo mais interativo que as listagens originais do SPICE2. (BONFIM, 2006, p. 1)

Sua interface intuitiva auxilia os educadores a reforçar a teoria dos circuitos e melhorar a compreensão e retenção dos conceitos teóricos em todo o currículo de engenharia. Ao acrescentar a simulação e análise de circuitos ao fluxo do projeto, o *Multisim* contribui com pesquisadores e projetistas a reduzir as interações dos protótipos de placas de circuito impresso (PCB) e minimizar seus custos de desenvolvimento (NATIONAL INSTRUMENTS CORP., 2022).

Porém, é pertinente questionar acerca das desvantagens desta ferramenta relativamente a outros *softwares*. Podemos afirmar que, sem sombra de dúvidas, a principal desvantagem do *Multisim* relativamente a outros simuladores é o seu preço. Uma versão completa do *Multisim* apresenta um custo que poderá inviabilizar a sua compra para a grande maioria dos utilizadores. Existe, no entanto, a versão *NI Multisim Student Edition* que, apesar de não integrar todas as ferramentas e dispositivos que o *Multisim* dispõe, apresenta um custo expressivamente inferior à versão completa. E, mais recentemente, a *National Instruments (NI)* lançou o *Multisim Live* que oferece a simulação SPICE em qualquer lugar, a qualquer hora e sem nenhum custo.

A plataforma permite que você aprenda eletrônica em um ambiente interativo, on-line, otimizado para touch que pode ser executado em qualquer dispositivo (NATIONAL INSTRUMENTS CORP., 2022).

Por se tratar de uma versão totalmente gratuita, o *Multisim Live* apresenta inúmeras limitações de recursos relativamente as versões pagas. No entanto, o que seria um inconveniente para estudos mais avançados em eletrônica, em nada afeta a manipulação de circuitos básicos, cerne do nosso produto.

2 FUNDAMENTOS DE FÍSICA

O Produto Educacional do qual versa esta dissertação tem por alicerce os conteúdos que fazem parte do escopo da Eletrodinâmica – segmento da Física que explora os fenômenos produzidos por cargas elétricas em movimento – acrescido da física do diodo semicondutor, visto que aborda os fundamentos da eletrônica com o auxílio do simulador *Multisim Live*.

Sendo assim, nesta seção abordaremos os princípios físicos que regem o comportamento dos circuitos elétricos e dos materiais semicondutores.

2.1 Tipos de materiais

Usando como parâmetro sua capacidade de conduzir eletricidade os materiais podem ser classificados como isolantes (dielétricos), condutores ou semicondutores.

Condutores são substâncias que permitem o deslocamento de cargas elétricas de um ponto do material para outro, com relativa facilidade (YOUNG; FREEDMAN, 2015, p. 5).

Nos metais os portadores de carga elétrica são elétrons que escapam da camada de valência por estarem fracamente ligados ao átomo e que podem vagar através da rede cristalina do elemento, por esse motivo são denominados elétrons livres ou elétrons de condução. O fluxo é estabelecido quando um campo elétrico é aplicado ao material (HALLIDAY; RESNICK; KRANE, 2017, p. 105).

Entretanto, os isolantes não apresentam elétrons livres, uma vez que a força entre eles e seu núcleo é muito intensa. Dessa forma, a aplicação de campos elétricos ordinários não produz qualquer fluxo de cargas.

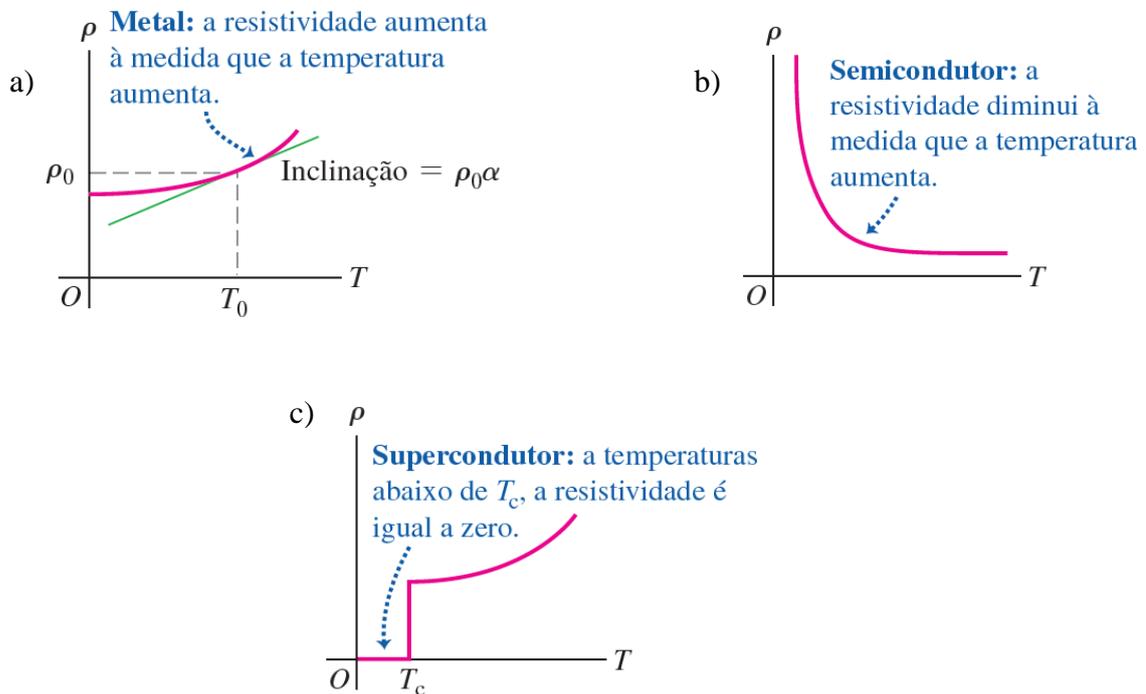
Isso permite que um isolante aglomere qualquer distribuição de cargas elétricas na sua superfície ou internamente, possibilitando a formação de campo elétrico no interior do dielétrico, fenômeno não permitido nos condutores por violar a condição de equilíbrio eletrostático (HALLIDAY; RESNICK; KRANE, 2017, p. 105).

Nos semicondutores, materiais localizados entre os isolantes e os condutores, a quantidade de elétrons de condução é diretamente proporcional à temperatura, ou seja, quanto maior a temperaturas, mais elevada é a quantidade de elétrons que “se desprendem” dos átomos e adquirem maior mobilidade (YOUNG; FREEDMAN, 2015, p. 152).

Existe materiais que, de forma abrupta, perdem completamente sua resistência ao ser submetido a temperaturas abaixo de $T_C = 4,2$ K, denominada temperatura crítica. A esse

fenômeno dá-se o nome de supercondutividade e os materiais que apresentam essa característica são designados supercondutores.

Figura 1 – Variação da resistividade r em função da temperatura absoluta T para (a) um metal normal, (b) um semicondutor e (c) um supercondutor. Em (a), a aproximação linear de ρ em função de T é indicada por um segmento de linha reta verde; a aproximação concorda com o valor da função para $T = T_0$ quando $\rho = \rho_0$.



Fonte: Young e Freedman (2015).

Mais recentemente, experimentos determinaram que a resistividade de um metal supercondutor não apenas é reduzida, mas é eliminada por completo. Os elétrons se movem pela estrutura do material sem nenhum atrito, e a carga permanece em movimento através de um supercondutor mesmo sem a presença de um campo elétrico externo (KNIGHT, 2009, p. 955).

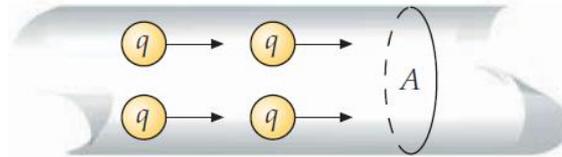
2.2 Corrente elétrica

Considerando os circuitos típicos da eletrônica, nos quais todos os elementos que os compõem são sólidos, corrente elétrica é o fluxo de elétrons através desses elementos (HALLIDAY; RESNICK; KRANE, 2017, p. 107).

É preciso lembrar que não são todos os elétrons de um átomo que participam desse fluxo, mas apenas os elétrons livres ou elétrons de condução.

Em sentido mais amplo a corrente elétrica pode ser composta por qualquer partícula provida de carga elétrica. Nas soluções eletrolíticas, a título de exemplo, a corrente elétrica é formada por íons e não por elétrons.

Figura 2 – Um segmento de um fio conduzindo corrente.



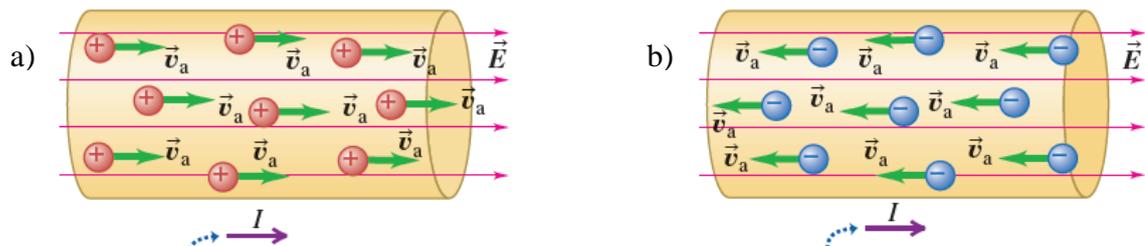
Fonte: Tipler e Mosca (2008).

Soluções eletrolíticas ou iônicas são aquelas capazes de conduzir corrente elétrica, a condutibilidade deve-se à presença de íons no meio (FOGAÇA, 2022).

Colocando-se sal de cozinha na água, a “extremidade negativa” de algumas moléculas de água tende a atrair os íons Na^+ do reticulado cristalino do sal; e a “extremidade positiva” de outras moléculas de água tende a atrair os íons Cl^- do reticulado. Desse modo, a água vai desfazendo o reticulado cristalino do NaCl , e os íons Na^+ e Cl^- entram em solução, cada um deles envolvido por várias moléculas de água. Esse fenômeno é denominado solvatação dos íons. (FELTRE, 2008, p. 21).

Já em um gás ionizado (plasma), como aquele presente no interior de uma lâmpada fluorescente, as partículas incluem elétrons e íons positivos. Enquanto que nos semicondutores a condução se dar pela cinesia de elétrons ou pela cinesia de vacâncias, comumente conhecidas como buracos, que são regiões da rede cristalina do semicondutor nas quais não existem elétrons e que possuem comportamento similar a cargas positivas (YOUNG; FREEDMAN, 2015, p. 147).

Figura 3 – A mesma corrente pode ser produzida por (a) cargas positivas que se deslocam no mesmo sentido do campo ou (b) por um número igual de cargas negativas se deslocando com a mesma velocidade no sentido contrário ao do campo



Uma corrente convencional é tratada como um fluxo de cargas positivas, não importando se as cargas livres no condutor são positivas, negativas ou ambas.

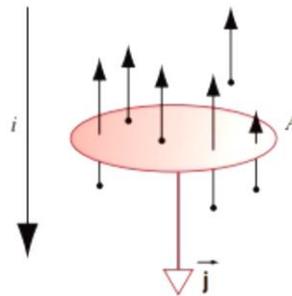
Em um condutor metálico, as cargas em movimento são elétrons — mas a corrente ainda aponta no sentido do movimento das cargas positivas.

Fonte: Young e Freedman (2015).

Quando circuitos elétricos são representados, a corrente elétrica é designada pela letra i e seu fluxo é orientado sempre no sentido do campo elétrico aplicado, como se fosse formada por cargas elétricas positivas. A esse fluxo dá-se o nome de sentido convencional da corrente elétrica. Mesmo para correntes formadas em fios, que sabemos serem comportadas por elétrons de condução e se deslocarem no sentido oposto ao do campo elétrico, essa representação é adotada. O sentido do movimento dos elétrons é designado sentido real da corrente elétrica. Contudo, em ambos os casos as partículas se movem com o que chamamos velocidade de arraste (v_a), outras literaturas preferem utilizar o termo velocidade de deriva (v_d).

Não podemos de forma alguma esquecer que embora usemos a palavra sentido de uma corrente, ela é uma grandeza escalar, não uma grandeza vetorial. Ao longo de um fio que transporta uma corrente, esta flui sempre ao longo do comprimento do fio, quer seja em fios retilíneos quer seja em fios curvos. Um único vetor jamais poderia descrever por completo a mesma grandeza ao longo de uma trajetória curva; isso explica o porquê da corrente não ser um vetor (YOUNG; FREEDMAN, 2015, p. 147).

Figura 4 – Os elétrons passam através de uma área A . Os sentidos da corrente elétrica i e o do vetor densidade de corrente \vec{j} são opostos ao movimento dos elétrons



Fonte: Halliday, Resnick e Krane (2017).

Imagine que uma quantidade infinitesimal de carga elétrica dq atravesse a superfície de área A durante um intervalo de tempo dt , também infinitesimal (Figura 4). A intensidade de corrente elétrica i é então definida como a razão entre a quantidade de carga que flui através da superfície pela unidade de tempo (HALLIDAY; RESNICK; KRANE, 2017, p. 108):

$$i = dq/dt$$

No sistema internacional de unidades (SI) a unidade adotada para a corrente elétrica é o ampère (A), cuja definição é

$$1 \text{ ampère} = 1 \text{ coulomb} / 1 \text{ segundo.}$$

Caso tenhamos interesse em determinar a carga que passa através da superfície em um intervalo de tempo dt , integramos a corrente nesse intervalo

$$q = \int i \cdot dt$$

A unidade de carga elétrica, no SI, é o coulomb (C).

2.2.1 Densidade de corrente

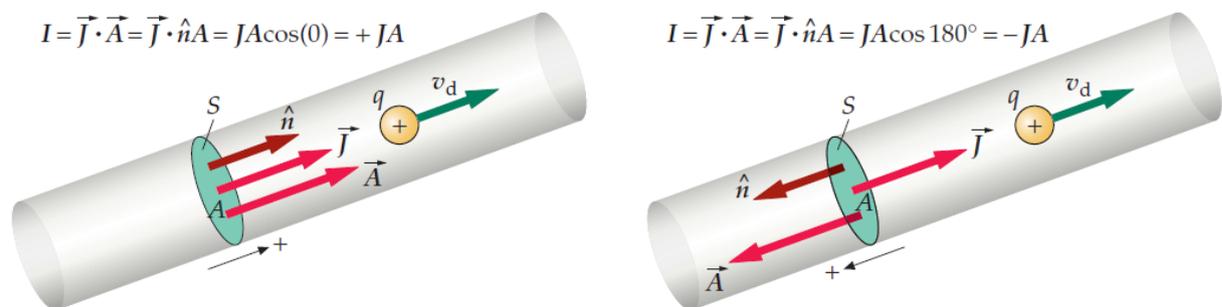
Uma grandeza vetorial que descreve o fluxo de cargas através da seção transversal de área A de um condutor em um ponto qualquer de um circuito é a densidade de corrente \mathbf{J} , ela tem a mesma direção e o mesmo sentido que a velocidade de deriva v_d das cargas que constituem a corrente elétrica se estas forem positivas e a mesma direção e o sentido oposto se estas forem negativas (HALLIDAY; RESNICK; WALKER 2017, p. 136).

O módulo (ou intensidade) da densidade de corrente é definido como

$$J = i/A.$$

Segundo essa equação a unidade de densidade de corrente no SI é o ampere por metro quadrado (A/m^2).

Figura 5 – A superfície plana S é perpendicular ao vetor densidade de corrente \mathbf{J} . O vetor área \mathbf{A} para a superfície S é definido como estando na mesma direção e sentido da normal $\hat{\mathbf{n}}$ à superfície. Entretanto, há duas possibilidades de escolha de $\hat{\mathbf{n}}$. (a) A corrente I através da superfície S é positiva se o sentido de $\hat{\mathbf{n}}$ é escolhido de forma tal que $\hat{\mathbf{n}}$ e \mathbf{J} estejam no mesmo sentido. (b) A corrente I através da superfície S é negativa se o sentido de $\hat{\mathbf{n}}$ é escolhido de forma tal que $\hat{\mathbf{n}}$ e \mathbf{J} tenham sentidos opostos.



Fonte: Tipler e Mosca (2008).

Para determinar a corrente que passa através de qualquer superfície, integramos a densidade de corrente sobre a superfície:

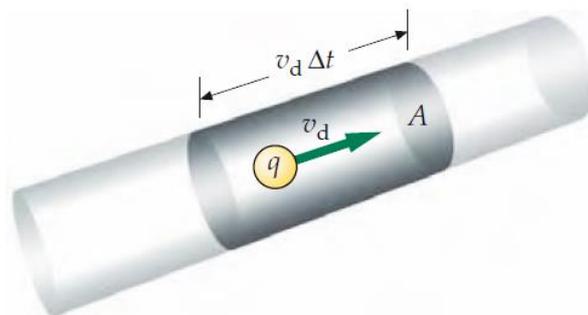
$$i = \int_s \mathbf{J} \cdot d\mathbf{A},$$

onde, $d\mathbf{A}$ é um elemento de área da superfície e a integral é calculada sobre toda a superfície através da qual desejamos obter a corrente. O elemento de área $d\mathbf{A}$ corresponde a um vetor orientado perpendicularmente à superfície, de tal forma que se o produto escalar $\mathbf{J} \cdot d\mathbf{A}$ for positivo, então, a corrente elétrica i também o será (HALLIDAY; RESNICK; KRANE, 2017, p. 108).

2.2.2 Densidade de corrente e velocidade de arraste

Em um fio metálico, no qual nenhum campo elétrico é aplicado, os elétrons livres se movem aleatoriamente em todos os sentidos (agitação térmica) com velocidades bem elevadas, que podem chegar a valores da ordem de 10^6 m/s. A aleatoriedade do movimento somado aos constantes choques com a rede cristalina do condutor proporciona a essas partículas velocidade média nula. Todavia, se um campo elétrico é aplicado ao condutor, seus elétrons livres sofrem a ação de uma força de origem elétrica (de módulo $F = -eE$) que possibilita a essas partículas um movimento residual em sentido contrário ao campo aplicado com uma pequena velocidade resultante denominada velocidade de deriva ou velocidade de arraste (TIPLER; MOSCA, 2009, p. 146).

Figura 6 – Durante o tempo Δt , todas as cargas livres que estavam inicialmente no volume sombreado passam através da área A . Se há n portadores de carga por unidade de volume, cada um com carga q , a carga livre total neste volume é $\Delta Q = qnAv_d\Delta t$, onde v_d é a rapidez de deriva dos portadores de carga.



Fonte: Tipler e Mosca (2008).

Considerando que existam n (denominado densidade de número de portadores de carga) partículas eletrizadas por unidade de volume em um fio metálico de seção reta A . Admitindo também que cada partícula possua carga elétrica q e velocidade de deriva v_d no sentido positivo do movimento. Isso elimina a possibilidade de surgir sinais negativos. Após um intervalo de tempo Δt , as partículas presentes no volume $Av_d\Delta t$ atravessam o elemento de

área A . Esse volume possui $nAv_d\Delta t$ portadores de carga elétrica livres cuja carga total é $\Delta Q = qnAv_d\Delta t$ (TIPLER; MOSCA, 2009, p. 146).

O que resulta em uma corrente elétrica

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = qnAv_d$$

e uma densidade de corrente $\mathbf{J} = qn\mathbf{v}_d$ cuja intensidade é

$$J = \frac{i}{A} = qnv_d$$

2.3 Lei de Ohm

Estímulo externo é necessário para que os elétrons livres da estrutura cristalina de um condutor abandonem a condição de movimento caótico produzido pela agitação térmica e passem a se deslocar ordenadamente, em um sentido preferencial, com velocidade de deriva. Para uma mesma substância estímulos mais intensos produzem correntes mais intensas.

Entretanto, estímulos de mesma intensidade quando aplicados a materiais distintos produzem correntes elétricas também distintas (GRIFFITHS, 2011, p. 198).

O que nos leva a pensar que existe alguma grandeza, inerente a cada substância, que interfere no quão forte será a intensidade de corrente que flui pelo condutor em resposta ao estímulo externo.

Com efeito, segundo Griffiths (2011), grande parte dos materiais tem sua densidade de corrente \mathbf{J} diretamente proporcional à *força por unidade de carga*, \mathbf{f} :

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{f}.$$

O termo σ , que confere à proporção *status* de equação, corresponde a condutividade do meio, uma grandeza empírica com unidades SI igual a $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ e que depende do material. Entretanto, é mais comum encontrarmos na literatura tabelas que enumeram uma outra grandeza, a resistividade ρ que corresponde ao inverso da condutividade: $\rho = 1/\sigma$. Sua unidade no SI, portanto, é $\Omega \cdot m$ (GRIFFITHS, 2011, p. 198).

Os dados apresentados na Tabela 1 nos permite verificar que não existe isolante perfeito, ou seja, sob condições extremas, mesmo os dielétricos podem conduzir eletricidade. Isso explica o fato de raios cortarem os céus durante uma tempestade, mesmo sendo o ar normalmente um isolante eficiente.

Apensar disso é notório a superior condutividade dos metais relativamente aos isolantes – por um fator de 10^{22} aproximadamente. O que lhes concede, para a maioria dos fins,

a designação de condutores perfeitos, com $\sigma = \infty$ (GRIFFITHS, 2011, p. 198).

Os estímulos externos que fazem os elétrons de condução adquirirem movimento ordenado são forças de origem eletromagnética. A equação para a densidade de corrente torna-se:

$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}).$$

Como já vimos, a velocidade de deriva (\mathbf{v} na equação acima) é extremamente baixa, dessa forma podemos desprezar o segundo termo da equação o que resulta em:

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

Essa equação corresponde a lei de Ohm e relaciona a densidade de corrente com o campo elétrico no interior dos condutores, campo este responsável pela corrente elétrica que flui através dos mesmos (GRIFFITHS, 2011, p. 198).

Tabela 1 – Valores da resistividade em temperatura ambiente (20 °C)

| Substância | | ρ ($\Omega \cdot \text{m}$) | Substância | ρ ($\Omega \cdot \text{m}$) |
|-----------------------------|------------|------------------------------------|------------------------|------------------------------------|
| Condutores | | | Semicondutores | |
| Metais | Prata | $1,47 \times 10^{-8}$ | Carbono puro (grafite) | $3,5 \times 10^{-5}$ |
| | Cobre | $1,72 \times 10^{-8}$ | Germânio puro | 0,60 |
| | Ouro | $2,44 \times 10^{-8}$ | Silício puro | 2.300 |
| | Alumínio | $2,75 \times 10^{-8}$ | Isolantes | |
| | Tungstênio | $5,25 \times 10^{-8}$ | Âmbar | 5×10^{14} |
| | Aço | 20×10^{-8} | Vidro | $10^{10} - 10^{14}$ |
| | Chumbo | 22×10^{-8} | Lucita | $> 10^{13}$ |
| | Mercúrio | 95×10^{-8} | Mica | $10^{11} - 10^{15}$ |
| | Ligas | Manganina (Cu 84%, Mn 12%, Ni 4%) | 44×10^{-8} | Quartzo (fundido) |
| Constantan (Cu 60%, Ni 40%) | | 49×10^{-8} | Enxofre | 10^{15} |
| Nicromo | | 100×10^{-8} | Teflon® | $> 10^{13}$ |
| | | | Madeira | $10^8 - 10^{11}$ |

Fonte: Young e Freedman (2015).

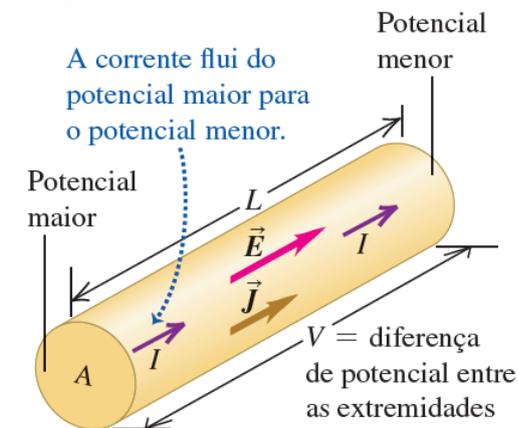
Em condutores perfeitos, para os quais considera-se $\sigma \rightarrow \infty$, temos $\mathbf{E} \rightarrow 0$, conclusão obtida por análise direta da equação $\mathbf{E} = \mathbf{J}/\sigma$ (SADIKU, 2012, p. 152).

A assertiva é verdadeira ainda que se tenha fluxo de corrente elétrica, visto que em condutores perfeitos o campo elétrico exigido para gerar movimento ordenado de portadores de carga é desprezível (GRIFFITHS, 2011, p. 199).

Concluimos que um condutor perfeito é um corpo equipotencial, ou seja, o potencial elétrico é o mesmo em todos os pontos do condutor. Dedução justificada pela relação $E = -\nabla V = 0$ (SADIKU, 2012, p. 152).

Consideremos agora um fio condutor de comprimento L , seção transversal uniforme com área A , submetido a uma diferença de potencial V positiva entre seus extremos e percorrido por uma corrente total I . Suponhamos ainda que as intensidades da densidade de corrente e do campo elétrico sejam uniformes através do fio. Isso nos permite escrever para o módulo da densidade de corrente $J = I/A$, e a para o módulo do campo elétrico, $E = V/L$ (YOUNG; FREEDMAN, 2015, p. 153).

Figura 7 – Um condutor com seção reta uniforme. A densidade de corrente é uniforme em qualquer seção reta, e o campo elétrico é constante ao longo do comprimento.



Fonte: Young e Freedman (2015).

Substituindo esses resultados na equação $E = J/\sigma$ obtemos

$$\frac{I}{A} = \sigma E = \frac{\sigma V}{L}$$

Portanto,

$$R = \frac{V}{I} = \frac{L}{\sigma A} = \frac{\rho L}{A}$$

ou

$$V = RI$$

que define a lei de Ohm na sua forma mais conhecida (SADIKU, 2012, p. 152).

A equação $V = RI$ é válida para situações em que ρ é constante, como no caso dos materiais ôhmicos, porque assim R também o será (YOUNG; FREEDMAN, 2015, p. 153).

O fator de proporcionalidade R é designado resistência elétrica, sendo uma grandeza dependente da geometria do fio e da condutividade do material do qual ele é feito (GRIFFITHS, 2011, p. 200). Sua unidade no SI é volt por ampere (V/A), também denominado Ohm (Ω).

Os resistores são componentes eletrônicos que contrariamente aos condutores perfeitos não possuem boa condutividade elétrica, dito de outra forma, resistores possuem elevada resistividade. Essa característica lhes permite, de forma extremamente eficiente, converter energia potencial elétrica em energia térmica, fenômeno conhecido por efeito Joule.

As colisões dos elétrons livres com os átomos da rede cristalina do resistor convertem o trabalho feito pela força elétrica em calor. A potência dissipada é dada pela lei de aquecimento de Joule

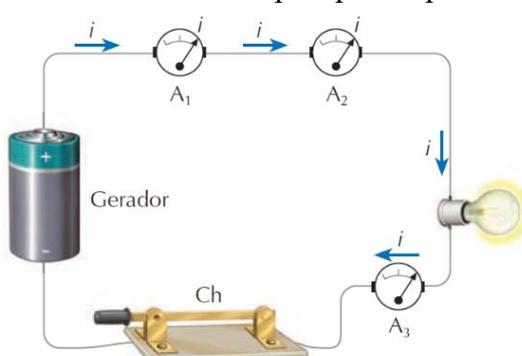
$$P = VI = I^2R = \frac{V^2}{R}$$

cuja unidade no SI é watts (W), ou seja, joules por segundo (J/s) (GRIFFITHS, 2011, p. 201).

2.4 Força eletromotriz

Observe o circuito elétrico simples representado *Figura 8*. Quando a chave (Ch) é fechada, todos os amperímetros registram simultaneamente a mesma corrente elétrica nos pontos em que foram instalados.

Figura 8 – Medida da corrente elétrica através de um circuito elétrico simples por amperímetros



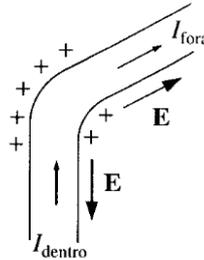
Fonte: Junior, Ferraro e Soares (2009, p. 116)

Parece contraintuitivo, haja vista o fato de que, aparentemente, a única força eletromotriz está contida no interior da bateria. Além disso, sabemos que a velocidade de deriva dos elétrons é diminuta (GRIFFITHS, 2011, p. 203).

Ocorre que se a corrente não fosse a mesma em todas as partes do circuito, haveria acúmulo de cargas em alguma região. Essas cargas represadas produziriam um campo elétrico que então normalizariam o escoamento de elétrons (GRIFFITHS, 2011, p. 203).

Para melhor compreensão, suponha que cargas estejam acumulando na região curva do fio representado na *Figura 9*.

Figura 9 – Campo elétrico gerado por cargas acumuladas na região curva de um fio



Fonte: Griffiths (2011, p. 203).

Em consequência, surge um campo elétrico que está direcionado para fora da curvatura. Esse campo é responsável por desacelerar os elétrons que estão entrando e acelerar aqueles que estão saindo até que o fluxo elétrico seja igualado em ambos os lados da curva, instante no qual não haverá mais cargas represadas e o equilíbrio é restaurando (GRIFFITHS, 2011, p. 203).

Fica evidente que para regular o fluxo de corrente em um circuito elétrico é necessário o “trabalho” conjunto de duas forças, a saber, a fonte f_s , normalmente integrada à uma bateria e a força eletrostática a qual é responsável por regular a corrente elétrica e transmitir a ação da fonte a todas as partes do circuito (GRIFFITHS, 2011, p. 203).

A força por unidade de carga presente no circuito é, portanto:

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}_s + \mathbf{E}$$

Não importa qual seja o agente físico responsável por f_s , o resultado de sua influência é determinado pela integral de linha de \mathbf{f} em torno de todo o circuito:

$$\varepsilon \equiv \oint \mathbf{f} \cdot d\mathbf{l} = \oint (\mathbf{f}_s + \mathbf{E}) \cdot d\mathbf{l}$$

Uma vez que $\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$ para campos eletrostáticos, temos:

$$\varepsilon \equiv \oint \mathbf{f} \cdot d\mathbf{l} = \oint \mathbf{f}_s \cdot d\mathbf{l}$$

Onde ε é designada *força eletromotriz*, ou *fem*, pertencente ao circuito (GRIFFITHS, 2011, p. 203).

Fontes ideais não possuem resistência interna e, em consequência, a força resultante atuando sobre as cargas é nula, o que acarreta em:

$$\mathbf{E} = -\mathbf{f}_s$$

Como resultado a diferença de potencial entre os terminais é dada por:

$$V = - \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_a^b \mathbf{f}_s \cdot d\mathbf{l} = \oint \mathbf{f}_s \cdot d\mathbf{l} = \varepsilon$$

A igualdade $\int_a^b \mathbf{f}_s \cdot d\mathbf{l} = \oint \mathbf{f}_s \cdot d\mathbf{l}$ é possível porque $\mathbf{f}_s = 0$ em todo circuito externo à fonte (GRIFFITHS, 2011, p. 203).

Segundo Griffiths (2011, p. 204) a bateria tem por finalidade criar e manter uma tensão igual a força eletromotriz, enquanto que a movimentação de corrente através do circuito externo à fonte é de responsabilidade do campo eletrostático resultante.

Para Griffiths (2011, p. 204) a força eletromotriz (ε) pode ser entendida como o *trabalho realizado por unidade de carga* pela bateria, uma vez que ε corresponde a integral de linha de \mathbf{f}_s , muito embora prefira a definição apresentada nesta seção.

2.5 Indução eletromagnética

Circuitos elétricos são *vias* construídas exclusivamente para o fluxo de corrente elétrica, as quais são produzidas por uma *força eletromotriz* ou *fem* (ε).

Os dispositivos e aparelhos eletroeletrônicos modernos - disponíveis em nossas residências, comércio e indústria – são, em sua maioria, dependentes de tomadas cuja fonte de *fem* não é uma bateria, mas uma usina geradora de energia elétrica: hidroelétricas, termoelétricas ou usina nuclear (YOUNG; FREEDMAN, 2015, p. 304).

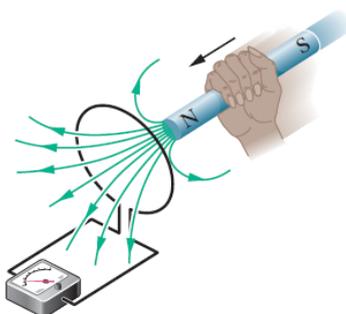
Essas usinas utilizam indução eletromagnética para conversão de alguma forma de energia (energia potencial gravitacional em usinas hidrelétricas, energia química em usinas termelétricas e energia nuclear em usinas nucleares) em energia elétrica (YOUNG; FREEDMAN, 2015, p. 304).

Sempre que o fluxo magnético variar através de um circuito elétrico, tem-se como resultado a indução de uma força eletromotriz e de corrente elétrica, a esse fenômeno denominamos indução eletromagnética (YOUNG; FREEDMAN, 2015, p. 304).

Para ilustrar essa ideia veja a *Figura 10* na qual tem-se um circuito simples composto por uma espira condutora, um resistor e um amperímetro, mas desprovido de qualquer bateria.

Espera-se, portanto, que nenhuma corrente seja registrada pelo amperímetro visto que, aparentemente, não há força eletromotriz associada ao arranjo (HALLIDAY; RESNICK; KRANE, 2017, p. 228).

Figura 10 – Um amperímetro registra uma corrente no laço do fio quando o ímã está se movendo em relação ao laço



Fonte: Halliday, Resnick e Walker (2012, p. 248).

Porém, algo surpreendente acontece quando aproximamos da espira o polo norte de um ímã em forma de barra: o amperímetro indica a passagem de corrente. Se afastamos o ímã da espira, a corrente torna a fluir através do circuito, mas dessa vez no sentido oposto. Importante destacar que a corrente desaparece sempre que o ímã está em repouso em relação à espira (HALLIDAY; RESNICK; WALKER 2012, p. 248).

Notamos ainda que se, ao invés de utilizar o polo norte, for empregado o polo sul do ímã, o amperímetro mais uma vez registrará fluxo de corrente, mas as deflexões do ponteiro terão o sentido invertido. Quanto maior a velocidade do ímã em relação à espira mais intensa a corrente verificada no amperímetro (HALLIDAY; RESNICK; KRANE, 2017, p. 228).

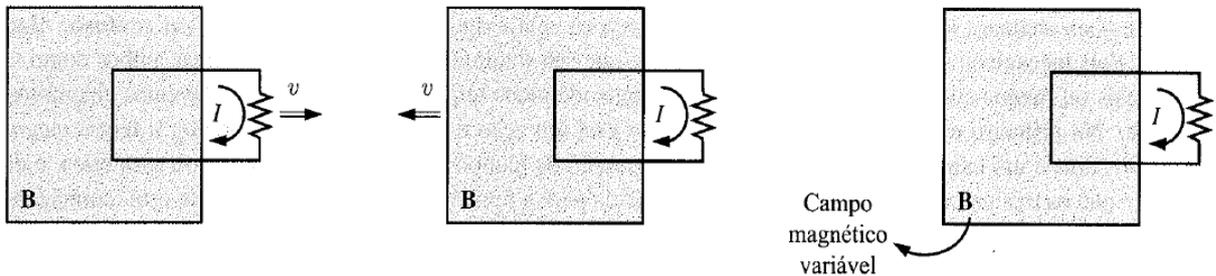
2.5.1 A lei de indução de Faraday

Em 1831, na Inglaterra, a lei de indução de Faraday é descoberta após vários experimentos realizados por Michael Faraday e, também, por Joseph Henry nos Estados Unidos aproximadamente na mesma época. Entretanto, por Faraday ter sido o primeiro a publicar os resultados de seus experimentos, foi dado a ele a prioridade da descoberta (HALLIDAY; RESNICK; KRANE, 2017, p. 228).

Dentre os vários experimentos realizados por Faraday podemos destacar três: no primeiro ele puxa uma espira condutora de fio para a direita através de um campo magnético, na segunda ele, agora, move o ímã para a esquerda, deixando a espira estacionária e, por fim,

no terceiro experimento, com a espira e o ímã em repouso, ele faz variar a intensidade do campo magnético. Em todos os experimentos a espira é percorrida por corrente elétrica, mesmo sem a presença de uma bateria no circuito (GRIFFITHS, 2011, p. 208).

Figura 11 – Experimentos de Faraday



Fonte: Fonte: Griffiths (2011, p. 209).

Os dois primeiros experimentos são, na verdade equivalentes, uma vez que o importante é o movimento relativo entre o ímã e a espira (HALLIDAY; RESNICK; KRANE, 2017, p. 228).

De fato, segundo a relatividade especial não tem como ser diferente. Quando ocorre movimento da espira é a força magnética que estabelece a *fem*, mas durante o deslocamento do ímã são os campos elétricos os responsáveis pela *fem*, mesmo que aparentemente não haja nenhum campo elétrico (GRIFFITHS, 2011, p. 209).

Faraday percebeu que um campo magnético variante induz um campo elétrico. É justamente esse tipo de campo elétrico induzido o responsável pela *fem* atribuída ao segundo experimento (GRIFFITHS, 2011, p. 209).

Portanto, seguindo esse raciocínio – de que a *fem* é igual a taxa de variação do fluxo – teremos:

$$\varepsilon = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Uma vez que:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \int_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{A}$$

então:

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\int_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{A}$$

Que corresponde a lei de Faraday na forma integral, a qual pode ser convertida na forma diferencial se aplicado o teorema de Stokes:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

Convém notar que caso \mathbf{B} seja constante a lei de Faraday torna-se $\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$, o que é equivalente a $\nabla \times \mathbf{E} = 0$ para a forma diferencial (GRIFFITHS, 2011, p. 209).

No terceiro experimento o campo magnético sofre variação, mas não por conta do movimento relativo entre o ímã e a espira. Mesmo assim, segundo a lei de Faraday, um campo elétrico será induzido e uma *fem* será originada (GRIFFITHS, 2011, p. 209).

Nas palavras de Griffiths (2011, p. 209), “existe uma espécie de *regra universal do fluxo*”:

Sempre que houver variação do fluxo magnético – independentemente de qual seja o motivo – através de uma espira condutora de fio, uma *fem*

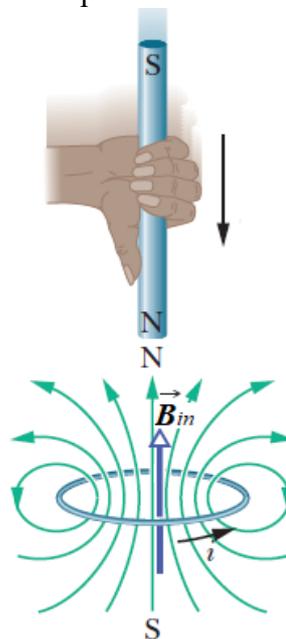
$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$$

surgirá na espira (GRIFFITHS, 2011, p. 209).

2.5.2 A lei de Lenz

Determinar o sinal na lei de Faraday pode não ser uma tarefa simples. Na verdade, temos aqui uma missão que em geral causa bastante confusão.

Figura 12 – O movimento do ímã cria um dipolo magnético que se opõe ao movimento.



Fonte: Halliday, Resnick e Walker (2012, com adaptações).

Para identificar o sentido no qual a corrente induzida flui, ao aplicarmos a Lei de Faraday, tomemos como exemplo um ímã que se aproxima de uma espira, conforme mostra a *Figura 12*.

A primeira alternativa consiste em aplicar a regra da mão direita. Para tanto, primeiro consideramos Φ positivo para baixo. Como resultado, o sentido positivo da corrente que flui através da espira será anti-horário, para quem a ver de baixo para cima (GRIFFITHS, 2011, p. 209).

Outra opção seria recorrer a lei de Lenz, cuja finalidade é facilitar a identificação do sentido tanto da *fem* quanto da corrente induzida.

Na visão de Griffiths (2011, p. 209), “A natureza abomina mudanças do fluxo.”

O que equivale a dizer que a corrente induzida em uma espira fluirá em um sentido tal que o campo magnético produzido *pela corrente induzida* se opõe ao campo magnético que induz a corrente (HALLIDAY; RESNICK; WALKER 2012, p. 248).

Observe na Figura 11 que à medida que o polo norte do ímã desce aproximando-se da espira, o fluxo magnético através desta aumenta, de forma que a corrente na espira tem de produzir um campo magnético para cima, em outros termos, a corrente induzida flui no sentido horário.

Convém notar que é a variação no fluxo magnético, e não o fluxo magnético em si que gera *fem* e corrente induzida (GRIFFITHS, 2011, p. 209).

Sinteticamente, a indução de Faraday, conjuntamente à lei de Lenz, nos diz que uma espira condutora sempre tentará manter constante o fluxo magnético através de si; caso algo tente alterar esse fluxo, a espira reage produzindo uma corrente que flui em um sentido cuja finalidade é eliminar a interferência externa. No entanto, o êxito é apenas em parte alcançado, uma vez que o fluxo gerado pela corrente induzida é frequentemente muito inferior ao original (GRIFFITHS, 2011, p. 209).

2.5.3 O campo elétrico induzido

Os experimentos de Faraday nos permitem concluir que existem dois tipos de campos elétricos, a saber, os que são originados diretamente por cargas elétricas – os quais podem ser deduzidos, em condições estáticas, por intermédio da lei de Coulomb – e aqueles que são atribuídos a variações nos campos magnéticos (GRIFFITHS, 2011, p. 211).

Por outro lado, em fenômenos que envolvam o segundo grupo, o campo elétrico pode ser calculado explorando a similaridade entre a lei de Faraday,

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

e a lei de Ampère,

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$$

em conjunto com o divergente desses campos. Ocorre que para campos elétricos produzidos exclusivamente por variações do campo magnético \mathbf{B} (o que implica $\rho = 0$), a lei de Gauss nos garante que

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$$

e que

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

para todas as situações. Ou seja, $\nabla \times \mathbf{E} = -(\partial \mathbf{B} / \partial t)$ determina os campos elétricos induzidos de Faraday (GRIFFITHS, 2011, p. 212).

Há casos para os quais a simetria é tal que é possível utilizarmos as sutilizas contidas na forma integral da lei de Ampère

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I_{enc}$$

cujo análogo a lei de Faraday é

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Aqui, a taxa com a qual o fluxo magnético varia através de uma espira imaginária (amperiana) possui função similar àquela que era atribuído a $\mu_0 I_{enc}$ (GRIFFITHS, 2011, p. 212).

3 FUNDAMENTOS DE ENSINO

A humanidade sempre foi fascinada pelo desconhecido e o fato de estarmos sempre à procura de respostas para fatos e acontecimentos, sejam eles oriundos das ciências ou de qualquer outra área do saber, é reflexo direto desse sentimento.

Dentre os vários temas que, apesar de grandes avanços, ainda se encontram parcialmente obscuros e esperando por respostas mais concretas e – se não for pedir demais – definitivas, remete-se aos processos envolvidos na aprendizagem humana.

Muitas foram as teorias – behavioristas, cognitivistas e aquelas que apresentam características comum a ambas – que tentaram explicar os processos envolvidos na absorção de conhecimento pelo homem.

Em meio a tantas opções, escolhemos a teoria da *Aprendizagem Significativa* de David Ausubel que, segundo Moreira e Masini (2002 *apud* FETTER; SILVA, 2020, p. 3), aborda a aprendizagem que ocorre predominantemente no ambiente da sala de aula, no cotidiano das instituições de ensino.

Uma escolha natural, visto que nosso produto foi aplicado a turmas do ensino médio.

Não trataremos aqui de todos os pormenores da teoria, mas apenas às características mais relevantes fundamente a sua compreensão.

3.1 David Ausubel

David Paul Ausubel (1918 – 2008) era filho de judeus, mas nasceu em Nova York, nos Estados Unidos (FERNANDES, 2011).

Com formação em Medicina e Psicologia obtendo notoriedade nas áreas de psicologia do desenvolvimento, psicologia educacional, psicopatologia e desenvolvimento do ego (AUSUBEL, 2006 *Apud* GOMES et al., 2010, p. 25).

Obteve o título de doutor em Psicologia do Desenvolvimento na Universidade de Columbia, instituição na qual foi professor no *Teachers College* por longo período. Concentrou seus esforços ao desenvolvimento de um olhar cognitivo para a Psicologia da Educação (MOREIRA, 2011, p. 14).

Foi o pesquisador que sugeriu o conceito de aprendizagem significativa. Sua teoria foi apresentada em 1963 no auge das ideias behavioristas, as quais defendiam a influência do

meio sobre o indivíduo, ignoravam qualquer conhecimento prévio dos estudantes e defendiam que os alunos só aprendiam de intermediados por outras pessoas (FERNANDES, 2011).

Os conceitos de ensino aprendizagem de David Ausubel vão de encontro aquelas defendidas pelos behavioristas. Talvez tenha sido esse o motivo, além de sua descendência judia, que levou os educadores da época a não reconhecer sua história pessoal (FERNANDES, 2011).

Ausubel defendia que a aprendizagem significativa expande e aprimora os conceitos que já integram a estrutura cognitiva do indivíduo, o que favorece o ato de relacionar e acessar conteúdos mais recentes (FERNANDES, 2011).

3.2 A teoria da aprendizagem significativa

A Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel foca sua atenção na aprendizagem de conceitos, o que ele chamou de significados, acreditando ser esse o método mais pertinente para a aquisição de novos conhecimentos pelos seres humanos. Ele defende que a aprendizagem ocorre predominantemente de forma receptiva, sendo esse o processo utilizado pela humanidade para perpetuar sua cultura ao longo dos tempos. Um ponto marcante da teoria de Ausubel consiste na discriminação entre aprendizagem significativa e a aprendizagem mecânica (TAVARES, 2003, 2004, p. 56).

Mas o que seria exatamente aprendizagem de significados?

A aprendizagem significativa corresponde ao método de aquisição de conhecimento no qual novos conceitos interagem cognitivamente com aqueles já existentes na estrutura neural do indivíduo, os quais guardam entre si uma alguma relação singular (MOREIRA, 2011, p. 13).

Vejamos um exemplo prático: para alunos já familiarizados com a Lei da Conservação de Energia Mecânica, solucionar problemas nos quais ocorre transformação entre energia potencial e energia cinética fortalece, estabiliza cognitivamente e desobscurece o conhecimento preexistente (MOREIRA, 2011, p. 13).

Esse conhecimento específico – um símbolo com prévio significado, um conceito, uma proposição, um modelo mental, uma imagem – já existente na estrutura cognitiva do sujeito aprendiz é chamado por Ausubel de subsunçor ou ideia-âncora (MOREIRA, 2011, p. 14).

No exemplo supracitado, o subsunçor ou ideia-âncora é a Lei da Conservação de Energia Mecânica.

Segundo Moreira (2011, p. 17) aprendizagem significativa não corresponde aquela na qual o indivíduo nunca mais esquecerá o conteúdo aprendido. Entretanto, se a aprendizagem

ocorreu de forma significativa, no caso de o indivíduo voltar a estudar Física, são grandes as chances de que tenha facilidade em “resgatar”, “reativar” ou “reaprender” a ideia-âncora Lei da Conservação de Energia Mecânica.

É natural que ao longo do tempo parte do conhecimento seja perdido, mas não completamente. Isso acontece quando a aprendizagem foi mecânica, ou seja, não significativa (MOREIRA, 2011, p. 18).

Queremos neste momento destacar um fato importante da aprendizagem significativa: existe situações nas quais o conhecimento preexistente dificulta a assimilação de novos conteúdos. Um exemplo disso seria a concepção de átomo como um sistema planetário, essa ideia dificulta a aprendizagem da estrutura atômica na visão da Mecânica Quântica (MOREIRA, 2011, p. 23).

Outro ponto de grande relevância é que aprendizagem significativa não significa necessariamente aprendizagem isenta de erros. Se a assimilação de novas ideias é feita ancorando-se em ideias preexistentes, a aprendizagem é significativa, mesmo que tais ideais não sejam aceitas em nenhuma área do conhecimento. Uma pessoa afirma que as variações de temperatura ocorridas nas diferentes estações do ano são explicadas pelo quão próximo estamos do sol é um exemplo de aprendizagem significativa porque pra ela isso lhe traz algum significado, muito embora não seja esta a explicação cientificamente correta (MOREIRA, 2011, p. 24).

3.2.1 As condições necessárias à aprendizagem significativa

Moreira (2011, p. 124) defende duas condições para que a aprendizagem significativa seja efetivada:

1 – Aos materiais disponíveis para aprender – que seriam livros, apostilas, aulas, aplicativos de celular, simuladores, dentre outros – se exige que sejam potencialmente significativos, ou seja, possuam relação com alguma estrutura cognitiva específica e relevante. Além disso, aquele que aprende deve possuir capacidade para aprender, isso significa que o estudante deve integrar em sua estrutura cognitiva ideias-âncora relevantes com as quais o material de estudo possa se associar.

2 – O aluno deve deixar evidente sua vontade de aprender e conectar novos conhecimentos aos preexistentes em sua estrutura cognitiva.

Tavares (2003, 2004, p. 56), no entanto, enumera três condições para a aprendizagem significativa, que podem ser resumidas da seguinte forma: 1 – material potencialmente lógico, 2 – capacidade de aprender e 3 – vontade óbvia de apreender.

O que Tavares faz é dividir em duas a primeira condição imposta por Moreira.

É preciso ficar claro que não existe material significativo, o que temos é material potencialmente significativo ou não significativo (MOREIRA, 2011, p. 25).

3.2.2 A estrutura cognitiva

Para Ausubel a estrutura cognitiva preexistente corresponde ao fator mais relevante para a absorção e fixação de novos conceitos (MOREIRA, 2011, p. 26).

Subsunçores (ideias-âncora) robustos e bem “enraizadas” implicam em maior facilidade para a aquisição de novos conhecimentos (MOREIRA, 2011, p. 26).

É importante destacar que a relação entre os subsunçores e os conhecimentos recentes é dinâmica, dito de outra forma, a interação entre os dois provoca modificações nos próprios subsunçores deixando-os mais claros, mais diferenciados e ainda mais capazes de ancorar novos conhecimentos. O termo ancoragem trata-se, portanto, de uma metáfora (MOREIRA, 2011, p. 27).

3.2.3 Os subsunçores ou ideias-âncora

Subsunçores são o mesmo que conceitos, tanto que as vezes são denominados conceitos subsunçores. Como já mencionado anteriormente, subsunçores são conhecimentos preexistentes na estrutura cognitiva do aprendiz e que guardam relação específica com novos conhecimentos (MOREIRA, 2011, p. 28).

De acordo com Moreira (2011, p. 28) os primeiros subsunçores são adquiridos por “inferência, abstração, discriminação, descobrimento, representação” e interação repetida do indivíduo com “instâncias de objetos, eventos e conceitos”, durante a infância.

Na fase adulta o processo de aprendizagem que prevalece é aquele que ocorre através dos subsunçores já existentes e por interferência de alguém (por exemplo a ajuda de um professor em sala de aula). A esse processo Ausubel dar o nome de assimilação (MOREIRA, 2011, p. 29).

3.2.4 Aprendizagem mecânica

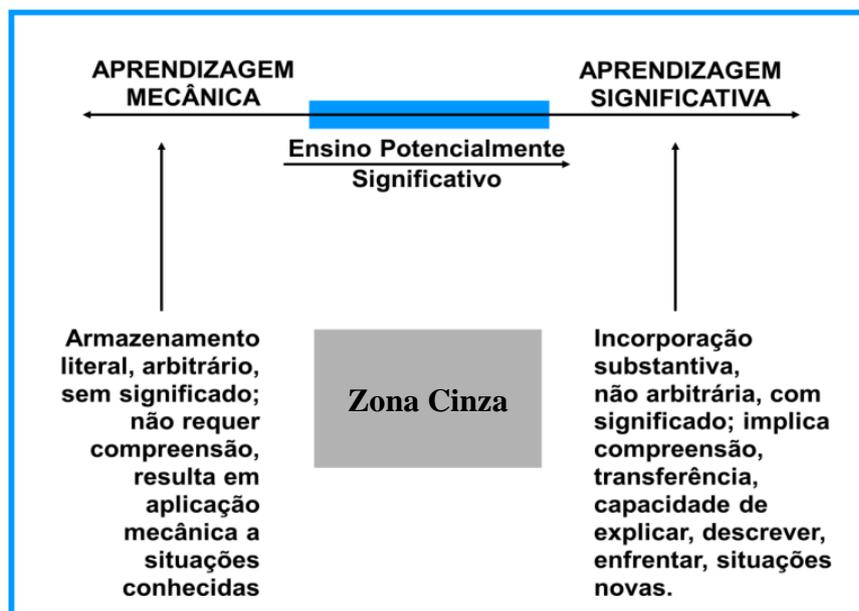
Ao contrário do que ocorre com a aprendizagem significativa a aprendizagem mecânica se dá praticamente sem significado, apenas por simples memorização dos conteúdos visando sua utilização em provas, depois das quais são esquecidos (MOREIRA, 2011, p. 32).

Segundo Fernandes (2011) a utilização desse método implica em conteúdos soltos ou fracamente ligados à estrutura mental dos estudantes. Eles se valem da memorização de frases ditas em sala de aula pelo professor ou de trechos lidos no livro didático.

A aprendizagem mecânica exige menos dedicação do aprendiz e por isso é o método mais utilizado por alunos que estão em período de provas escolares, sobretudo aquelas com questões de múltipla escolha que não requerem do aluno uma maior competência em desenvolver seu raciocínio através de um texto, tal como o que ocorre nas chamadas questões discursivas. No entanto a aprendizagem mecânica é volátil, com retenção mínima de conhecimentos quando se avalia a aprendizagem a médio e longo prazo (TAVARES, 2003, 2004, p. 56).

Ainda que distintas, a aprendizagem significativa e a aprendizagem mecânica não estão em lados opostos, mas fazem parte de um processo contínuo. (MOREIRA, 2011, p. 32).

Figura 13 – Uma visão esquemática do processo contínuo aprendizagem significativa-aprendizagem mecânica



Fonte: Moreira (2011, 2015, p. 4).

A *Figura 13* infere que, na prática, a aprendizagem ocorre em sua maior parte na chamada *Zona Cinza*, região localizada no “ponto médio” desse contínuo temporal. A passagem do aluno da zona cinza para uma aprendizagem significativa poderia ser facilitada por intermédio do ensino potencialmente significativo (MOREIRA, 2011, p. 32).

Sempre existirá momentos nos quais a memorização de informações é necessária, mesmo que elas sejam armazenadas de forma arbitrária e sem se relacionar com conceitos prévios. Contudo, para que o processo de aprendizagem seja fortalecido e efetivado são necessários outros momentos de ensino, bem como a interação com outros estudantes (FERNANDES, 2011).

No entanto, essa transição entre aprendizagem mecânica e aprendizagem significativa não é natural ou automática. É necessário que haja subsunçores apropriados, predisposição do estudante para aprender, materiais potencialmente significativos e da interferência do professor. A não observância desses requisitos implica no domínio da aprendizagem mecânica sobre a aprendizagem significativa (MOREIRA, 2011, p. 32).

3.2.5 Formas de aprendizagem significativa

Assim como os tipos, também temos três formas de aprendizagem significativa:

1 – Subordinada: a aprendizagem de novas ideias ocorre utilizando subsunçores mais gerais, mais amplos presentes na estrutura cognitiva do sujeito (MOREIRA, 2011, p. 36).

2 – Superordenada: acontece quando o sujeito não possui subsunçores mais gerais, mais amplos que possuam relação específica com o novo conhecimento. O processo de aprendizagem é feito por indução (MOREIRA, 2011, p. 37).

3 – Combinatória: as novas ideias interagem com vários subsunçores da estrutura cognitiva do indivíduo. No entanto, essas novas ideias não são nem mais abrangentes nem mais singular que as ideias originais (MOREIRA, 2011, p. 38).

3.2.6 Tipos de aprendizagem significativa

São definidos três tipos de aprendizagem significativa:

1 – Representacional: existe uma relação de exclusividade entre um objeto ou evento e o símbolo que o representa. Um exemplo seria o caso de uma criança que entende a palavra bicicleta como sendo apenas aquela que ela possui. Isso significa que o conceito geral

de bicicleta ainda não está formado, ela possui apenas uma representação (MOREIRA, 2011, p. 38).

2 – Conceitual: o aprendiz utiliza um símbolo para mais de um evento ou objeto. Para a criança do exemplo anterior bicicleta representa todas as bicicletas, ela criou o conceito de bicicleta (MOREIRA, 2011, p. 38).

3 – Proposicional: o que interessa, agora, não é no que símbolos isolados possam representar, mas dar significado a ideias que geram uma proposição ou a palavras que compõem uma sentença (MOREIRA, 2011, p. 39).

3.2.7 Avaliação da aprendizagem significativa

Segundo Moreira (2011, p. 51) a avaliação na aprendizagem significativa deve aferir o quanto o indivíduo compreendeu do conteúdo, como se deu a aquisição de significados e sua capacidade de relacionar o conhecimento absorvido a situações incomuns, fora da sua rotina.

Avaliação ideal é aquela que sugere ao estudante uma circunstância inédita, que exija a máxima transformação do conhecimento assimilado (MOREIRA, 2011, p. 51).

4 REVISÃO DA LITERATURA

Um ano letivo com aulas meramente expositivas é para o aluno exaustivo e desanimador, além de colocá-lo em posição de passividade frente ao conteúdo ministrado em sala. A condição de simples receptor de conhecimento é parcialmente interrompida quando o aluno interage e discute sobre o tema da aula, essa postura o torna agente ativo do próprio conhecimento.

Contudo, tal comportamento é, ainda, insuficiente. Uma educação efetiva exige que o aluno vivencie o conteúdo e literalmente “coloque a mão na massa”. Esse pensamento é corroborado pelo MEC quando fala que o Novo Ensino Médio pretende atender às necessidades e às expectativas dos jovens, fortalecendo o protagonismo juvenil, visto que garante aos estudantes a escolha do itinerário formativo no qual desejam aprofundar seus conhecimentos (Ministério da Educação e Cultura, 2018).

Para contorna tais obstáculo professores vêm aderindo as Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs).

Nos últimos anos a utilização das TICs têm experimentado um acentuado avanço tanto em potencial quanto em diversidade de utilização (MEDEIROS; MEDEIROS, p. 46).

Dentre os recursos disponível destacam-se os simuladores. Simuladores são amplamente utilizados em cursos de engenharia, sobretudo aquelas que trabalham com análise de circuitos ou de estruturas. Entretanto, tal recurso tem ganhado cada vez mais adeptos, também, no ensino médio. Além disso é crescente o número e a diversidade de áreas – cinemática, dinâmica, estática, óptica, eletrodinâmica, dentre outras – contempladas por esses softwares.

Simuladores proporcionam melhor assimilação dos conteúdos abordados em Física, além de tornar o aluno mais ativo no processo de ensino e aprendizagem (CARRARO, 2021).

Laboratórios virtuais são fundamentais para promover uma maior percepção dos fenômenos estudados, favorecendo à formação dos alunos. Dessa forma, esses ambientes possibilitam uma melhor interpretação dos fenômenos físicos (ARAÚJO; NETO; OLIVEIRA, 2021, p. 54).

Tais ferramentas possui muitas outras vantagens, dentre as quais podemos citar: única opção de relacionar teoria e prática em escolas que não possuem laboratório, acesso virtual a equipamentos caros e de difícil aquisição, além de uma quantidade quase infinita de dispositivos tais como resistores, potenciômetros, lâmpadas, chaves e fontes.

É comum situações em que é difícil ou impossível, no ambiente escolar, representarmos alguns fenômenos físicos. Isso se deve a vários fatores, dentre os quais podemos citar a falta de equipamentos nos laboratórios de Física. Esse problema pode ser contornado com o uso de simuladores (CARRARO; PEREIRA, 2014, p. 10).

Além disso, não é raro encontrar alunos perdidos durante um experimento, sem saber manipular o equipamento ou, por exemplo, fazer as ligações corretas ao montar um circuito elétrico, o que prejudica completamente o entendimento do assunto explorado. O uso de *software* de simulação surge como uma etapa preparatória, que pode reduzir o impacto da transição de aulas puramente teóricas àquelas essencialmente experimentais.

Software de simulação aperfeiçoam a compreensão dos conceitos, apresentam uma versão simplificada da realidade, tornam conceitos abstratos mais concretos, servem como uma preparação inicial para ajudar na compreensão do papel de um laboratório e fomentam uma compreensão mais profunda dos fenômenos físicos (MEDEIROS; MEDEIROS, p. 50).

As Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação (TDIC) deixaram evidente sua importância durante a pandemia causada pelo vírus SARS-coV-2, período em que foram exaustivamente utilizadas, visto a impossibilidade de aulas presenciais (SILVA, 2020, p. 3).

Ainda segundo Silva (2020, p. 5) os simuladores são os instrumentos mais adequados para serem utilizados em aulas virtuais, principalmente quando as atividades precisam transpor do presencial.

Os relatos supracitados nos permitem verificar o consenso entre os estudiosos sobre os benefícios da utilização de simuladores computacionais no ensino da Ciência.

5 METODOLOGIA

O produto educacional, intitulado *FUNDAMENTOS DE ELETRÔNICA USANDO MULTISIM LIVE*, de que trata essa dissertação consiste de um livreto que mostra as potencialidades do simulador *Multisim Live* para auxiliar o ensino do conteúdo de eletrodinâmica, mais especificamente a parte dedica a circuitos elétricos.

Na rede pública de ensino, o conteúdo de circuitos elétricos é abordado na terceira série do ensino médio, portanto, o público alvo do nosso produto é composto por alunos que estão nesse nível de escolaridade.

Diante da baixa carga horária – duas horas aula por turma – destinada à disciplina de Física, todas as turmas envolvidas no processo, primeiramente, tiveram aulas expositivas sobre cada um dos assuntos abordados na aplicação do produto, em seguida foram realizados exercícios de fixação com as respectivas resoluções para que quaisquer dúvidas fossem sanadas e, por fim, os alunos foram ao laboratório de informática para utilizarem o simulador.

A aplicação do produto ocorreu em 28 março do ano letivo de 2022 na Escola de Ensino Médio Professor Otávio Terceiro de Farias (Figura 14), localizada na Avenida C, 435 – José Walter, Fortaleza – Ceará.

Figura 14 – EEM Professor Otávio Terceiro de Farias



Fonte: <https://www.facebook.com/photo/?fbid=2185961198303128&set=a.2185955994970315> (2022).

Quatro turmas de terceira série do ensino médio (3ª B, 3ª C, 3ª D e 3ª E) participaram do processo, das quais duas (3ª D e 3ª E) utilizaram o simulador e outras duas (3ª B, 3ª C) foram destinadas à comparação de resultados, sem que tenham sido expostas ao produto.

Figura 15 – Alunos da 3ª série D no laboratório de informática para aplicação do produto (lado esquerdo)



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 16 – Alunos da 3ª série D no laboratório de informática para aplicação do produto (lado direito)



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 17 – Alunos da 3ª série E no laboratório de informática para aplicação do produto (lado esquerdo)



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 18 – Alunos da 3ª série E no laboratório de informática para aplicação do produto (lado direito)



Fonte: elaborada pelo autor.

Na EEM Professor Otávio Terceiro de Farias tem-se, em média, quarenta e cinco alunos por turma. No entanto, no dia da aplicação do produto choveu bastante, visto que a data

escolhida estava inserida na estação chuvosa desse Estado. Por conta disso ocorreu um número de faltas acima do que se considera normal.

A Tabela 2 mostra o percentual de alunos presentes em relação ao total em cada turma e os apêndices A, B, C e D exibem as listas de assinaturas utilizadas para controle. Os dados mostram que, em média, mais de 57% dos alunos de cada turma participaram do evento.

Tabela 2 – Percentual de alunos presentes na aplicação do produto

| Turmas | Alunos presentes | Alunos ausentes | Total |
|------------------|-------------------------|------------------------|--------------|
| 3 ^a B | 30 (67%) | 15 (33%) | 45 |
| 3 ^a C | 22 (47%) | 25 (53%) | 47 |
| 3 ^a D | 27 (61%) | 17 (39%) | 44 |
| 3 ^a E | 24 (53%) | 21(47%) | 45 |

Fonte: elaborada pelo autor.

No entanto, o ocorrido apesar de reduzir consideravelmente a quantidade de estudantes, permitiu que todos fossem para o laboratório de uma só vez, evitando que parte dos alunos ficassem em sala enquanto a outra estivesse no laboratório.

Os alunos envolvidos, sejam os que utilizaram o simulador ou os que contribuíram na comparação dos resultados, foram submetidos a um questionário (Apêndice E) sobre conceitos envolvendo os temas abordados na simulação. Além disso os primeiros também responderam um segundo questionário (Apêndice F) que versava sobre a impressão que os mesmos tiveram do simulador. Os dados coletados através dos questionários foram utilizados para elaborar uma análise de como o simulador poderia ter favorecido no aprendizado dos estudantes e qual seu nível de aceitação.

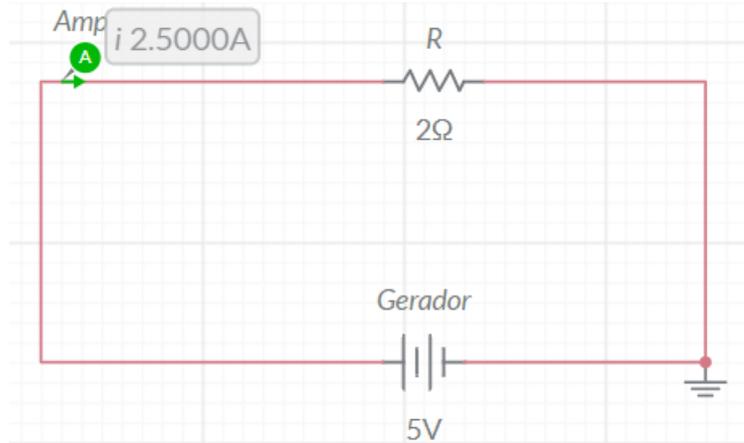
As referidas turmas foram escolhidas levando em conta a disponibilidade dos laboratórios de informática e por apresentarem aulas geminadas, o que favoreceu a aplicação do produto e a obtenção de dados através dos questionários.

Durante a aplicação foram abordados os seguintes conteúdos, considerados essenciais no que diz respeito ao aprendizado eficiente dos conceitos iniciais da Eletrodinâmica e Teoria de Circuitos: sentido convencional da corrente elétrica em um circuito simples, aparelhos de medida (amperímetro e voltímetro), dispositivos de proteção (fusível) e as peculiaridades (corrente e tensão elétrica) contidas na associação de resistores em série e em paralelo.

A aplicação do produto obedeceu aos seguintes passos:

1 – Montar e simular um circuito elétrico simples com amperímetro:

Figura 19 – Circuito elétrico simples com amperímetro

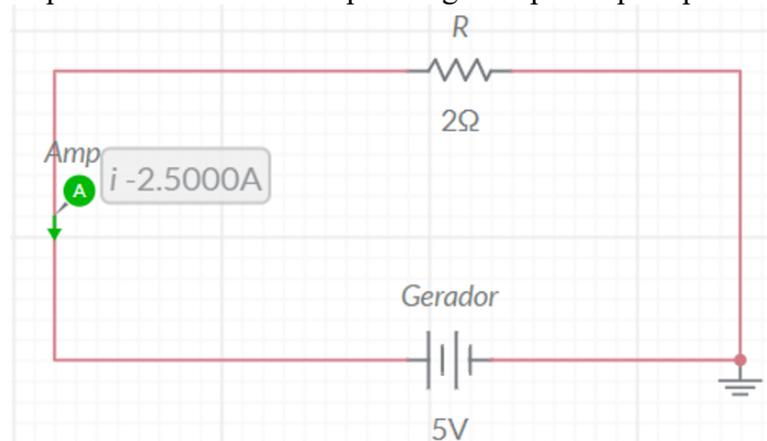


Fonte: elaborada pelo autor.

Com o circuito exploramos o fato de que os geradores são representados por barras paralelas de tamanhos diferentes, onde a barra maior corresponde ao polo positivo e a menor ao polo negativo. O circuito reforçou o fato de que o amperímetro é um aparelho de medida utilizado para medir corrente elétrica e que deve sempre ser inserido em série no circuito. Também lembramos que o sentido convencional da corrente elétrica é do polo positivo para o polo negativo, considerando o circuito externo à bateria, e que a seta do amperímetro deve ser disposta nesse sentido para indicar uma corrente elétrica com valor positivo.

2 – Montar e simular um circuito elétrico simples com a seta do amperímetro orientada do polo negativo para o polo positivo:

Figura 20 – Circuito elétrico simples com a seta do amperímetro orientada do polo negativo para o polo positivo



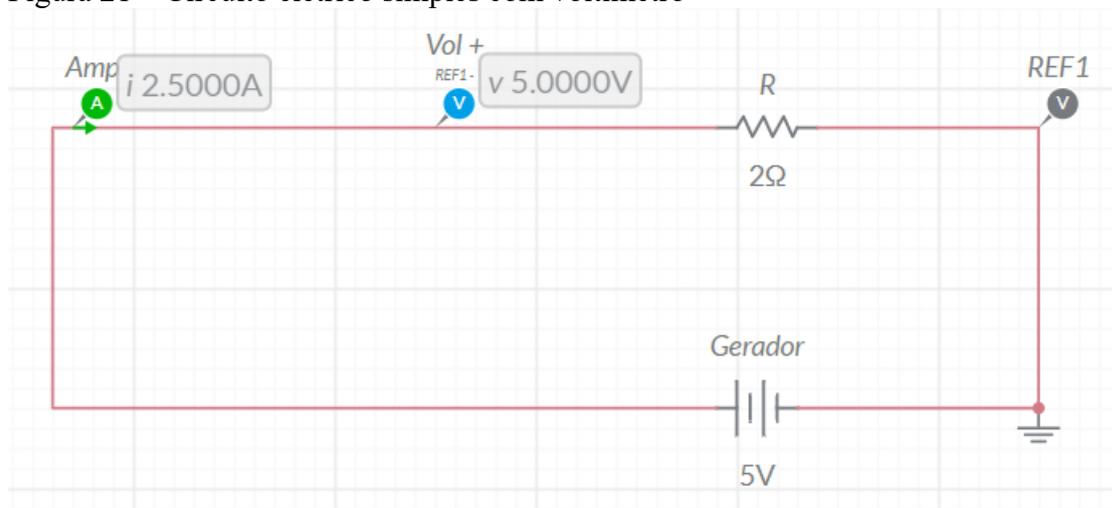
Fonte: elaborada pelo autor.

Os alunos foram alertados para o sinal negativo presente na leitura da corrente. Na ocasião explicamos que o sinal negativo evidencia que o sentido adotado para a orientação da seta do amperímetro não foi a mesma do sentido convencional da corrente, mas contrário a ele, ou seja, a seta estava orientada no sentido em que os elétrons livres estavam se movendo.

3 – Montar e simular o circuito elétrico simples com a seta do amperímetro corretamente orientada (do polo positivo para o polo) e nele acrescentar um voltímetro, conforme mostra a *Figura 21*, destinado à leitura da tensão elétrica sobre o resistor.

O circuito deveria reforçar nos alunos a função do voltímetro, a saber, indicar a tensão elétrica sobre determinado dispositivo e de que ele deve sempre ser inserido em paralelo.

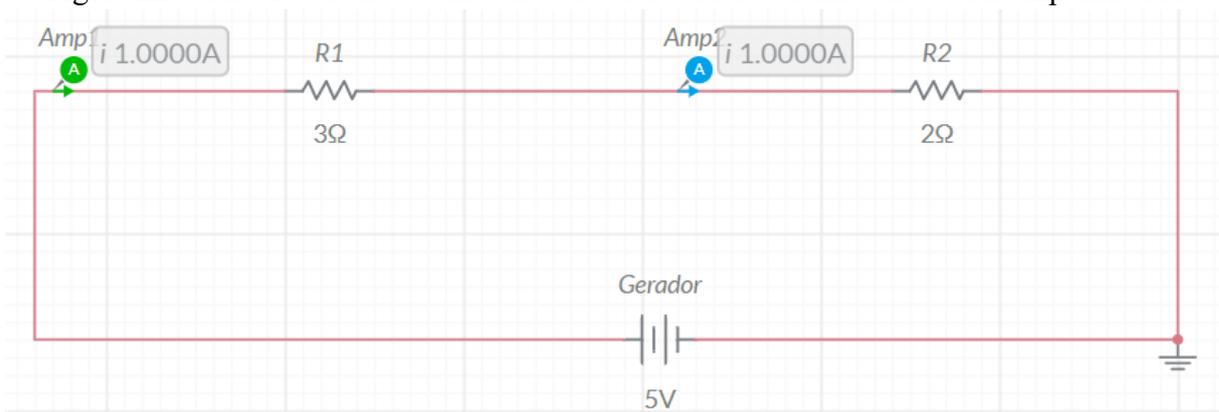
Figura 21 – Circuito elétrico simples com voltímetro



Fonte: elaborada pelo autor.

4 – Montar e simular um circuito com dois resistores associados em série e dois amperímetros, um para cada resistor:

Figura 22 – Circuito elétrico com dois resistores associados em série e dois amperímetros

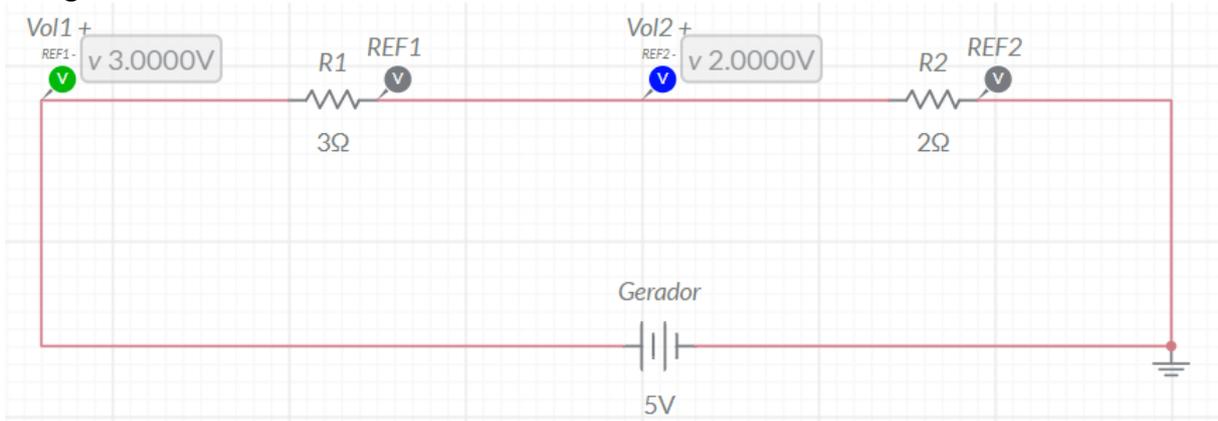


Fonte: elaborada pelo autor.

A intenção foi mostrar que em uma associação em série todos os resistores são percorridos pela mesma corrente e que ela diminui à medida que mais resistores são acrescentados ao circuito, sem que se altere a fonte de tensão.

Na sequência os alunos foram orientados a retirar os amperímetros e acrescentar em seus lugares dois voltmímetro, *Figura 23*. O objetivo foi mostrar que a tensão da bateria é dividida entre os resistores e quanto maior seu valor maior será a tensão adquirida por ele.

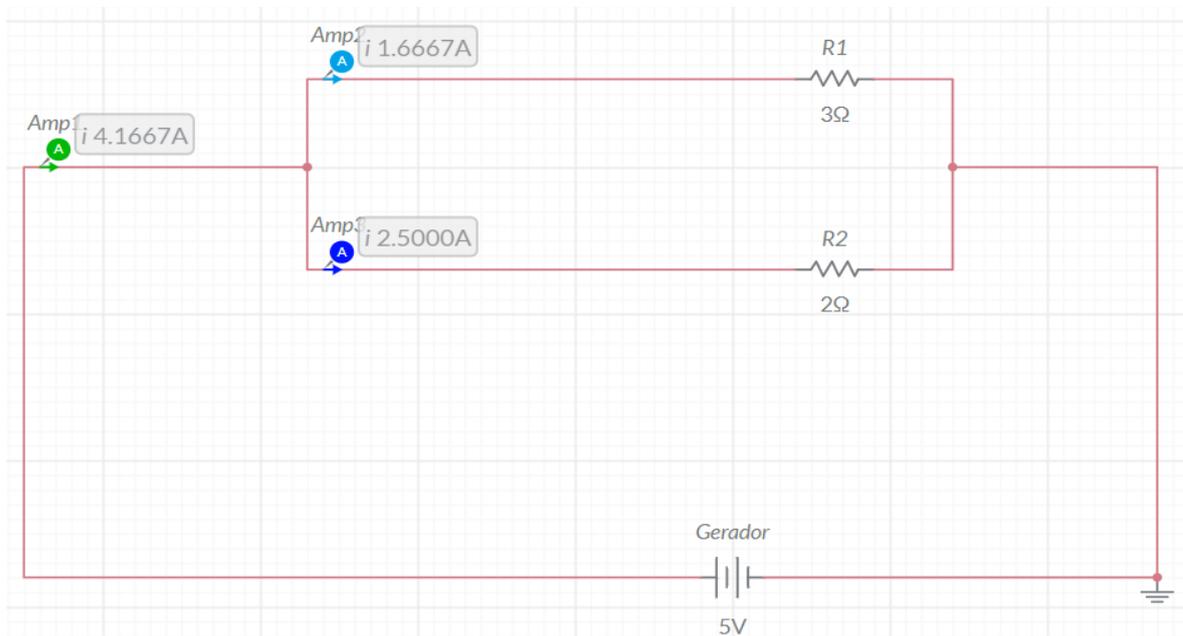
Figura 23 – Circuito elétrico com dois resistores associados em série e dois voltmímetro



Fonte: elaborada pelo autor.

5 – Montar e simular um circuito com dois resistores associados em paralelo e três amperímetros, organizados conforme *Figura 24*.

Figura 24 – Circuito elétrico com dois resistores associados em paralelo e três amperímetros

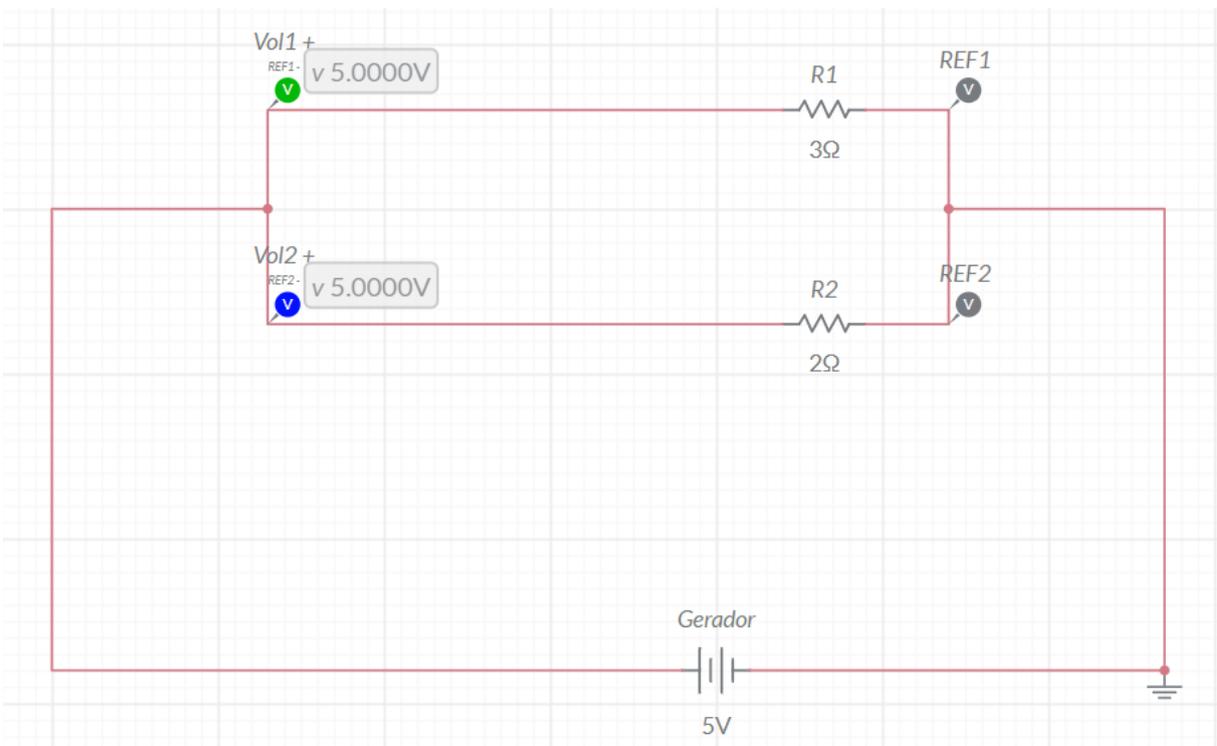


Fonte: elaborada pelo autor.

A configuração adotada foi útil para mostrar que a corrente total que saia da bateria era dividida entre os resistores e que quanto maior seu valor menor a intensidade de corrente elétrica que o percorre.

Em seguida os alunos foram orientados a retirar os amperímetros e acrescentar em seus lugares dois voltímetros, um para cada resistor conforme *Figura 25*.

Figura 25 – Circuito elétrico com dois resistores associados em paralelo e dois voltímetros

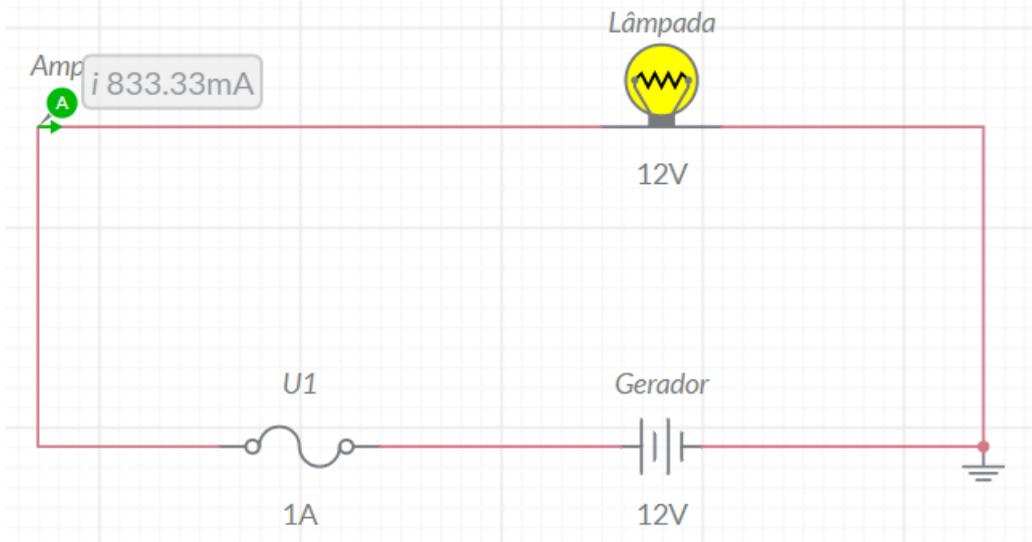


Fonte: elaborada pelo autor.

O objetivo foi mostrar que a tensão nos resistores seria a mesma da bateria, uma característica de dispositivos associados em paralelo.

6 – Montar e simular um circuito com uma lâmpada incandescente protegida por um fusível:

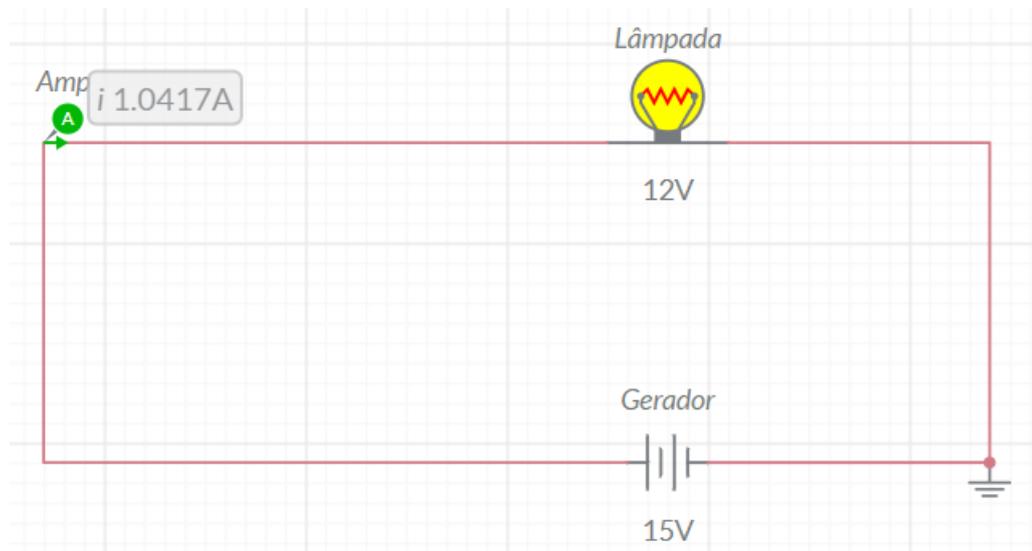
Figura 26 – Circuito elétrico com gerador, lâmpada incandescente e um fusível



Fonte: elaborada pelo autor.

A lâmpada em questão funciona bem se alimentada por uma bateria de 12 volts, ocasião em que é percorrida por uma corrente de aproximadamente 833 miliampères. Caso seja submetida a uma tensão de 15 volts, a lâmpada trabalhará em sobrecarga e nesta situação a corrente ultrapassa o valor de 1 ampère (*Figura 27*).

Figura 27 – Lâmpada incandescente submetida a tensão de 15 volts

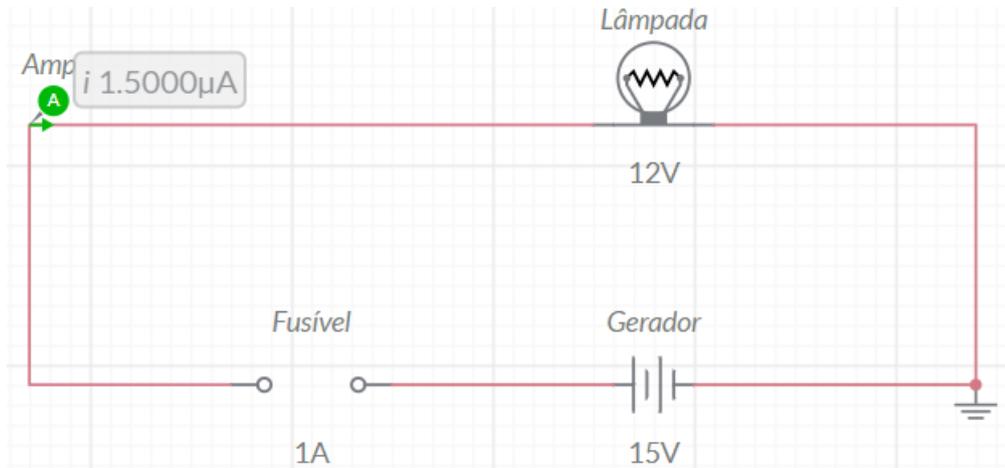


Fonte: elaborada pelo autor.

O fusível foi retirado para que a simulação pudesse ocorrer sem sua interrupção. A sobrecarga na lâmpada ficou evidente pela cor vermelha que ela adquiriu.

Logo em seguida, com a lâmpada ainda ligada ao gerador de 15 volts, o fusível foi acrescentado ao circuito:

Figura 28 – Lâmpada incandescente submetida a tensão de 15 volts protegida por fusível



Fonte: elaborada pelo autor.

Por se tratar de um fusível de 1 ampère e sendo a corrente elétrica maior que esse valor, o dispositivo de proteção queimou enquanto que a lâmpada permaneceu intacta. Dessa forma o fusível cumpriu, conforme o esperado, sua função de proteger a lâmpada.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como já mencionado, as turmas envolvidas no processo de aplicação do produto educacional foram submetidas a uma lista de questões intitulada *Questionário sobre Teoria de Circuito*. Totalizavam onze questões de múltipla escolha, com quatro alternativas em cada questão, das quais apenas uma continham a resposta correta.

Segue a lista com as onze sentenças sem as alternativas, o questionário na íntegra encontra-se no Apêndice E.

- 1 – Considerando o circuito externo à bateria, qual o sentido convencional da corrente elétrica?
- 2 – Considerando o circuito externo à bateria, qual o sentido do movimento dos elétrons?
- 3 – Fusível é um dispositivo de:
- 4 – Amperímetro é um dispositivo que mede:
- 5 – Voltímetro é um dispositivo que mede:
- 6 – No circuito elétrico, o amperímetro deve ser colocado em:
- 7 – No circuito elétrico, o voltímetro deve ser colocado em:
- 8 – Em uma associação em série os resistores apresentam, necessariamente, a mesma:
- 9 – Em uma associação em paralelo os resistores apresentam, necessariamente, a mesma:
- 10 – Quanto mais resistores em série com um gerador:
- 11 – Assinale o item no qual o amperímetro e o voltímetro estão ligados corretamente:

O leitor deve perceber que são sentenças elementares com o mínimo de dificuldade, utilizadas tão somente para obter uma resposta sobre a aplicação do produto.

Participaram da pesquisa um total de 103 alunos, dos quais 51 (49%) trabalharam com o produto educacional enquanto que 52 (51%) tiveram apenas aulas expositivas.

De todos os estudantes que responderam ao *Questionário sobre Teoria de Circuito*, tem-se o seguinte comparativo entre aqueles que foram ao laboratório e os quais apenas tiveram aulas expositivas ou grupo de controle:

1 – Sobre o sentido convencional da corrente elétrica, 43 (84%) dos alunos que foram ao laboratório responderam corretamente; para aqueles que tiveram apenas aulas expositivas o total de acertos foi de 35 (67%). O resultado mostra o quão eficiente foi a assimilação do conceito abordado pelos alunos que utilizaram o *Multisim Live*.

2 – Em se tratando do sentido do movimento dos portadores de carga elétrica em um fio, o total de acertos foi de 41 (80%) contra 14 (27%) do grupo de controle. Isso reflete o

quanto o *Multisim Live* fortaleceu a fixação da teoria exigida. Observa-se uma coerência entre o total de acertos das perguntas 1 e 2 para aqueles alunos que tiveram contato com o produto educacional. A observação é pertinente visto que as questões são complementares.

3 – A cerca da função desempenhada por um fusível em circuitos elétricos tem-se praticamente a mesma quantidade de acertos, 42 (82%) para o grupo do laboratório contra 41 (78%) para o grupo de controle. O resultado reflete o bom entendimento do funcionamento do fusível por quase que todos os alunos envolvidos no processo, visto que se trata de um conceito simples, fácil de assimilar. Ainda assim, o *Multisim Live* se mostrou útil em facilitar o aprendizado dos conceitos relacionados a circuitos elétricos.

4 – Relativamente a função exercida pelo amperímetro, a diferença de acertos é bem acentuada, 44 (86%) para os estudantes que usaram o simulador *Multisim Live* e apenas 24 (46%) para aqueles que não tiveram acesso à ferramenta do produto. O resultado retrata o quanto o *Multisim Live* auxiliou a aprendizagem do conceito abordado.

5 – A mesma diferença de acertos é observada quando se trata da função do voltímetro, 27 (53%) para os alunos do laboratório contra 18 (35%) para os estudantes expostos apenas às aulas convencionais. Mais uma vez o *Multisim Live* se mostra útil em facilitar a apropriação dos conceitos. Convém observar que, em ambos os grupos, mais alunos assimilaram a função do amperímetro em comparação à função do voltímetro. Essa assimetria é percebida tanto durante a exposição do conteúdo quanto na resolução de exercícios.

6 – No que se refere a colocação do amperímetro no circuito, 29 (57%) dos alunos que utilizaram o *software Multisim Live* acertaram, enquanto que no grupo que não utilizou a quantidade de acertos foi de 32 (62%). Isso mostra o quão complicado é para o aluno o entendimento de que para colocar o amperímetro em série no circuito. O fato de que fios devem ser desconectados do sistema e ligados nos terminais no amperímetro não é de fácil assimilação por parte dos alunos, até mesmo por aqueles que utilizaram o *Multisim Live*.

7 – Quanto a colocação do voltímetro no circuito, os estudantes que utilizaram o laboratório tiveram 31 (61%) versus 29 (56%) para o grupo de controle. Isso reflete o bom entendimento do funcionamento do voltímetro por boa fração dos alunos envolvidos no processo, visto que se trata de um conceito simples, fácil de assimilar. Ainda assim, os alunos que utilizaram o *Multisim Live* mostram-se mais assertivos que os demais, o que reflete a eficácia da ferramenta.

8 – Sobre a característica da corrente elétrica em uma associação de resistores em série, 27 (53%) dos alunos expostos ao produto obtiveram êxito, já o grupo submetido apenas

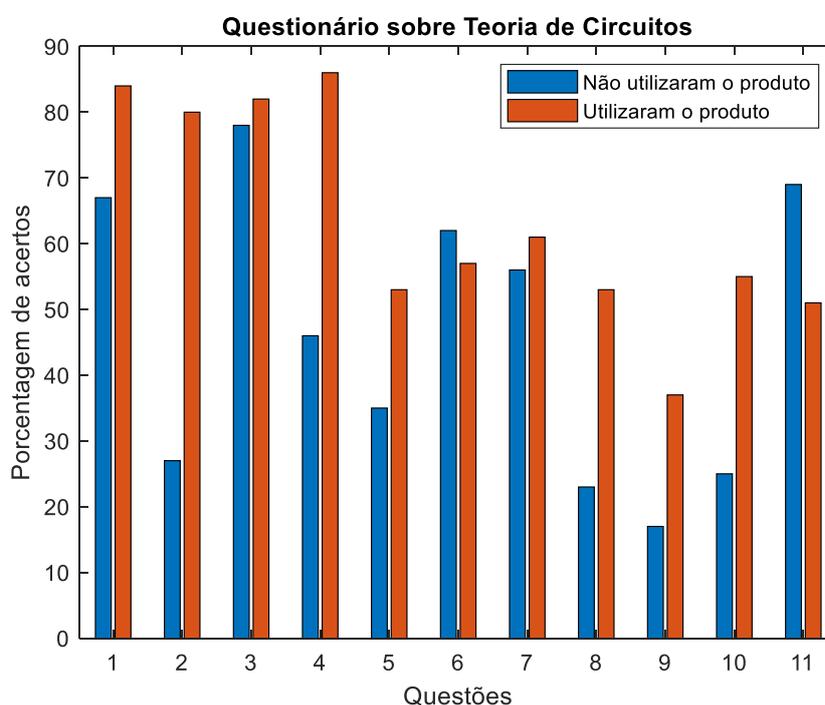
às aulas tradicionais o total de acertos foi apenas 12 (23%). Isso realça que o *Multisim Live* facilitou a apropriação do conceito abordado.

9 – No que concerne a característica da tensão elétrica em uma associação de resistores em paralelo o total de acertos foi de 19 (37%) para os alunos do laboratório contra 9 (17%) para o grupo de controle. A baixa quantidade de acertos por ambos os grupos mostra que o conceito abordado não é de fácil absorção. No entanto, o *Multisim Live* se mostra, mais uma vez, eficiente na sedimentação do conceito.

10 – Acerca do que acontece com a corrente elétrica em uma associação de resistores associação em série quando mais resistores são adicionados tem-se 28 (55%) de acertos para o grupo do simulador em comparação aos 13 (25%) acertos para os estudantes que não utilizam os computadores. O resultado é reflexo do quanto o *Multisim Live* facilita o processo de aprendizagem e de conceitos envolvendo circuitos elétricos.

11 – No que se refere a identificação de circuitos nos quais amperímetros e voltímetros são ligados corretamente, os alunos que utilizaram o *software* obtiveram 26 (51%) de acertos contra 26 (50%) dos estudantes que apenas tiveram aulas expositivas. Os valores mostram que praticamente metade dos alunos, mesmo àqueles que utilizaram o *Multisim Live*, têm dificuldade em identificar circuitos elétricos nos quais aparecem, simultaneamente, amperímetros e voltímetros ligados de forma correta.

Gráfico 1 – Porcentagem de acertos no *Questionário sobre Teoria de Circuitos*



Fonte: elaborado pelo autor.

Para facilitar uma visualização mais rápida dos resultados acima os percentuais de acertos de cada grupo foram plotados, simultaneamente, no *Gráfico 1*.

Após análise dos dados, sobretudo quando dispostos no *Gráfico 1*, ficou evidente que o grupo submetido ao produto educacional obteve maior percentual de acertos em praticamente todos os pontos do questionário, a exceção das questões 6 e 11. O que evidencia o êxito do produto educacional. No entanto, esperava-se que ambos os grupos obtivessem um rendimento superior ao apresentado, isso porque o conteúdo foi bastante discutido e exercitado em sala. É interessante evidenciar que a elevada expectativa se deveu, ainda, pela errônea suposição de que o rendimento dos alunos de 2022 seria equivalente ao rendimento dos estudantes de anos anteriores à pandemia. O que infelizmente não aconteceu. O resultado das provas parciais e bimestrais aplicadas no primeiro semestre de 2022, deixou claro o quão baixo está o nível dos alunos pós pandemia.

Os cinquenta e um alunos que participaram da aplicação do produto também foram submetidos a uma segunda lista de questões intitulada *Questionário de Satisfação* e tratava do quanto os alunos haviam gostado, ou não, do simulador. As respostas para todas as perguntas eram as mesmas: 1 – *Sim*, 2 – *Não* ou 3 – *Não sei responder*.

A seguir tem-se a lista com as 10 sentenças sem as alternativas, o questionário na íntegra encontra-se no Apêndice F.

- 1 – Usa *mouse* com frequência?
- 2 – Antes, já havia utilizado um simulador?
- 3 – Achou o simulador complicado de usar?
- 4 – Achou o simulador fácil de usar?
- 5 – Acha que o simulador facilita a compreensão da teoria?
- 6 – A interface do simulador é agradável?
- 7 – A organização das informações na tela do simulador é clara?
- 8 – Foi fácil encontrar os dispositivos que precisava?
- 9 – Recomenda aos colegas de outras salas o uso deste simulador?
- 10 – Gostaria de usar este simulador com frequência?

O resultado foi o seguinte:

1 – Sobre usar o *mouse* com frequência, 28 (55%) responderam que *Sim*, 23 (45%) marcaram *Não*. A pergunta foi relevante porque os computadores dos laboratórios de informática são *desktops* que utilizam *mouses*. A familiaridade com o periférico iria influenciar diretamente na construção dos circuitos exigidos durante a aplicação do produto. Por mais

incrível que pareça, vários alunos durante o uso do simulador apresentaram dificuldade em interligar os componentes eletrônicos necessários para montar os circuitos elétricos. Isso porque grande parte dos estudantes estão acostumados a utilizarem celulares, *tablets* e/ou *notebooks* que possuem a função *touch* na tela e/ou em área reservada para (o caso do uso de *notebooks*).

2 – A cerca de já ter utilizado um simulador, 11 (22%) responderam *Sim*, 40 (78%) responderam *Não*. Vale a pena comentar que um dos estudantes já operava o simulador utilizado no produto educacional no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, entidade na qual é aluno do curso de Eletrotécnica. Isso corrobora com um dos objetivos do produto educacional, a saber, apresentar aos estudantes uma ferramenta profissional de simulação, instrumento do qual certamente farão uso caso ingressem em cursos de graduação na área de ciência e/ou tecnologia.

3 – A respeito de julgar o simulador complicado, apenas 5 (10%) marcaram *Sim*, enquanto 46 (90%) falaram *Não*. Isso mostra o quanto o *Multisim Live* é intuitivo e de fácil manuseio.

4 – A despeito de considerar o simulador fácil de usar, 46 (90%) escolheram *Sim* em comparação aos 5 (10%) que marcaram *Não*.

As perguntas 3 e 4 são equivalentes e as respostas dos alunos foram coerentes e satisfatórias uma vez que o *Multisim Live* deve ser uma ferramenta que auxilie o processo de aprendizado, logo, ser fácil de manusear é primordial.

5 – Sobre considerar que o simulador facilita a compreensão da teoria, 49 (96%) concordaram que *Sim*, 1 (2%) escolheram *Não* e 1 (2%) marcou *Não sei responder*. O resultado reflete a importância do *Multisim Live* em facilitar o aprendizado dos conceitos que envolvem circuitos elétricos.

6 – Quanto a interface do simulador ser agradável, 46 (90%) julgaram que *Sim*, 3 (6%) avaliaram que *Não* e 2 (4%) marcaram *Não sei responder*. Essa é uma característica que permite ao aluno gostar de trabalhar com o *Multisim Live*, aspecto importante para quem deseja aprender usando o simulador. O resultado mostra aprovação quase que total.

7 – No tocante a organização das informações na tela do simulador ser clara, 47 (92%) escolheram *Sim* enquanto que 4 (8%) jugaram *Não*. Novamente o *Multisim Live* tem elevada aprovação, mostrando grande aceitação da ferramenta por parte daqueles que a utilizaram.

8 – A respeito de ser fácil encontrar os dispositivos que precisa, 46 (90%) marcaram que *Sim*, 4 (8%) jugaram *Não* e 1 (2%) marcou *Não sei responder*. Característica importante para qualquer ferramenta de simulação que precisa agradar usuários exigentes. O resultado

mostra mais uma elevada aprovação do *Multisim Live*.

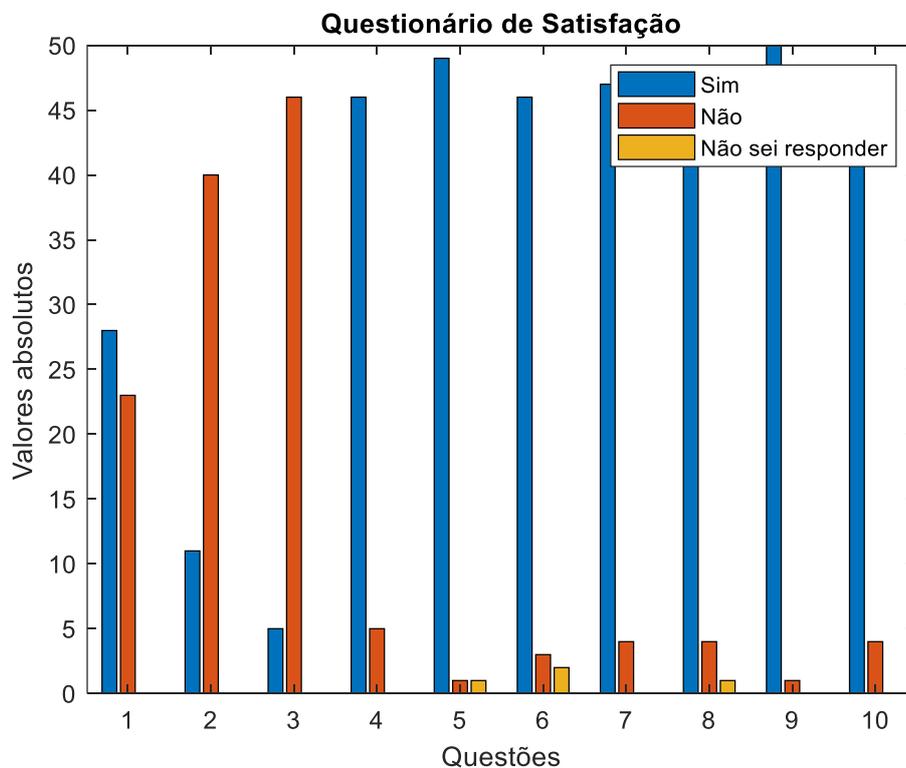
9 – Sobre recomendar aos colegas de outras salas o uso deste simulador, 50 (98%) optaram pelo Sim contra 1 (2%) escolheu *Não sei responder*. Isso mostra que o *Multisim Live* teve excelente aceitação.

10 – Se gostaria de usar este simulador com frequência, 47 (92%) escolheram *Sim* enquanto que 4 (8%) marcaram *Não*. Isso reflete o quanto os alunos gostaram do *Multisim Live* e desejam utilizá-lo para facilitar sua aprendizagem.

Feito isso, podemos afirmar que, analisando os dados acima, nota-se elevado percentual de aceitação do simulador pelos alunos que participaram da aplicação do produto o que permite considerar que a avaliação do produto foi excelente.

Os resultados com os valores absolutos das respostas (1 – *Sim*, 2 – *Não* ou 3 – *Não sei responder*) dos alunos são apresentados no *Gráfico 2*.

Gráfico 2 – Respostas ao *Questionário de Satisfação*



Fonte: elaborado pelo autor.

O questionário apresentava, ainda, uma décima terceira questão que instigava os estudantes a deixarem uma crítica ou sugestão:

11 – Sobre o simulador, deseja deixar alguma crítica ou sugestão?

Normalmente os estudantes não se sentem à vontade para responder esse tipo de questionamento e costumam ignorar tais perguntas, por esse motivo poucos foram os alunos que deixaram sua contribuição.

No entanto, alguns não deixaram passar a chance de opinar sobre o *Multisim Live* e tem-se na sequência algumas das críticas registradas:

Aluno 1: “*Um pouco complicado.*”

Figura 29 – Opinião do Aluno 1

11 Sobre o simulador, deseja deixar alguma crítica ou sugestão?

Um pouco complicado

Fonte: elaborada pelo autor.

Aluno 2: “*Um pouco complicado para quem não usa o mouse com frequência.*”

Figura 30 – Opinião do Aluno 2

11 Sobre o simulador, deseja deixar alguma crítica ou sugestão?

Um pouco complicado para quem não usa o mouse com frequência.

Fonte: elaborada pelo autor.

Aluno 3: “*Poderia simular a explosão da lâmpada.*”

Figura 31 – Opinião do Aluno 3

11 Sobre o simulador, deseja deixar alguma crítica ou sugestão?

poderia simular a explosão da lâmpada.

Fonte: elaborada pelo autor.

Aluno 4: “*Gostei da experiência, deixa a aula mais dinâmica e interativa.*”

Figura 32 – Opinião do Aluno 4

11 Sobre o simulador, deseja deixar alguma crítica ou sugestão?

Gostei da experiência, deixa a aula mais dinâmica e interativa.

Fonte: elaborada pelo autor.

Aluno 5: “Não, achei bem interessante e divertido. Fica melhor de aprender.”

Figura 33 – Opinião do Aluno 5

11 Sobre o simulador, deseja deixar alguma crítica ou sugestão?

Não, achei bem interessante e divertido
fica melhor de aprender.

Fonte: elaborada pelo autor.

Aluno 6: “Deveríamos usar mais vezes durante as aulas.”

Figura 34 – Opinião do Aluno 6

11 Sobre o simulador, deseja deixar alguma crítica ou sugestão?

Deveríamos ^{usar} ~~usar~~ mais vezes durante as aulas

Fonte: elaborada pelo autor.

Como previsto, os relatos mostram que alguns alunos sentiram dificuldade em manusear o *mouse*, o que pode ter favorecido para que julgassem o simulador complicado. No entanto, o mais importante é que os objetivos foram alcançados, a saber, tornar as aulas de Física – especificamente aquelas que abordam os circuitos elétricos – mais interativas, dinâmica, divertidas e produtivas. Características que permitiram a grande aprovação do *Multisim Live* pelos alunos que o utilizaram.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados coletados mostram que, em geral, os alunos submetidos ao produto educacional obtiveram um percentual de acertos superior aqueles que participaram apenas de aulas expositivas. No entanto, existem outras variáveis envolvidas no processo: facilidade em usar o computador (em especial o *mouse*), engajamento dos alunos no processo de aprendizagem e contato inicial dos conceitos expostos durante as aulas expositivas anteriores a utilização do *Multisim Live*.

Contudo, os resultados da análise somados as críticas e sugestões deixadas pelos estudantes participantes diretamente da aplicação do produto mostram o quão satisfeitos eles ficaram em utilizar o simulador e o quanto o *Multisim Live* facilitou o processo de aprendizagem dos alunos no que se refere a conceitos envolvendo circuitos elétricos

É preciso ficar claro que este produto não resolverá todos os problemas que envolve o aprendizado de circuitos elétricos, mas certamente será uma ferramenta valiosa a se ter em mãos.

O simulador mostra-se superior a outros *softwares* semelhantes e até mesmo ao *PhET* (plataforma que apresenta um conjunto de simulações) tão utilizados por professores, isso porque o *Multisim Live* permite estudos mais avançados em circuitos elétricos, eletrônicos e de potência.

É importante salientar que o professor que optar por utilizar o *Multisim Live* não deve suprimir as aulas experimentais realizadas em laboratório físico (quando disponível), uma vez que as experiências obtidas durante práticas realizadas em bancada são únicas.

É interessante que o *Multisim Live* não seja utilizado apenas para reforçar o aprendizado de determinado conteúdo, mas também durante o primeiro contato do aluno com o assunto a ser abordado, ou seja, o aluno poderá utilizar o software para aprender e não somente para revisar a matéria previamente apresentada. No entanto, para aqueles docentes que optarem por utilizar o *Multisim Live* apenas para reforçar os conhecimentos dos alunos, sugere-se que estes sejam encaminhados ao laboratório sempre após exposição a conceitos importantes, tais como corrente elétrica, associação de resistores, aparelhos de medida, dispositivos de proteção, dispositivos de manobra, dentre outros a critério do docente. De uma forma ou de outra o professor que escolher utilizar o *Multisim Live* encontrará neste trabalho instruções que permitem uma fácil assimilação das principais funções e ferramentas necessárias a simulação de qualquer circuito elétrico presente em livros didáticos utilizados em turmas do ensino médio.

Por fim, convém lembrar que o *Multisim Live* é um software poderoso que pode ser utilizado para além da simulação de circuitos elétricos. Ele abrange todo o conteúdo de eletrônica analógica, digital e de potência. Isso permite que ele seja um excelente instrumento a ser utilizado em projetos mais complexos tais como àqueles apresentados em feiras de ciências e nas disciplinas eletivas introduzidas pelo Novo Ensino Médio.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, Francisco Oliveira; NETO, Jonas Guimarães Paulo; OLIVEIRA, Francisco Leandro de. **Uso do Software de Simulação PHET como Recurso Metodológico no Ensino de Óptica**. Fortaleza, 2021. Disponível em: <https://revistadocentes.seduc.ce.gov.br/index.php/revistadocentes/article/view/319#:~:text=Com%20a%20utiliza%C3%A7%C3%A3o%20do%20PhET,no%20processo%20de%20ensino%20de%20aprendizagem>. Acesso em: 01 jun. 2022.
- BONFIM, Marlio. **Introdução ao Spice**. Fortaleza, 2020. Disponível em: <http://www.eletr.ufpr.br/marlio/labeng1/aulas/exp5.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2020.
- CARRARO, Francisco Luiz. **Sobre simuladores no ensino de Física**. 2021. Disponível em: <http://www.recursosdefisica.com.br/sobre-simulacoes-no-ensino-de-fisica.html>. Acesso em: 20 abr. 2022
- FELTRE, Ricardo. **Química: físico-química**. 7. ed. São Paulo: Moderna, 2008. 2 v.
- FETTER, Shirlei Alexandre; SILVA, Denise Regina Quaresma da. **Práticas com aprendizagem significativa para estudantes da Educação Básica**. Revista Educação Pública, v. 20, nº 35, 15 de setembro de 2020. Disponível em: <https://educacaopublica.cecierj.edu.br/artigos/20/35/praticas-com-aprendizagem-significativa-para-estudantes-da-educacao-basica>. Acesso em: 01 abr. 2022.
- FERNANDES, Elisângela. **David Ausubel e a aprendizagem significativa**. Revista Nova Escola, ed. 248, 12 de dezembro de 2011. Disponível em: <https://www.gastaoguimaraes.com.br/site/wp-content/uploads/2019/11/Nova-Escola-12-dez-2011.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2022.
- FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. **Manual da Química**. Fortaleza, 2022. Disponível em: <https://www.manualdaquimica.com/fisico-quimica/solucoes-ionicas-moleculares.htm>. Acesso em: 27 fev. 2022.
- GOMES *et al.* **Ensino de Ciências: dialogando com David Ausubel**. *Revista Ciência & Ideias*, v. 1, nº 1, 29 de março de 2009. Disponível em: <https://revistascientificas.ifrj.edu.br/revista/index.php/reci/article/view/28/69>. Acesso em: 01 abr. 2022.
- GRIFFITHS, David J. **Eletrodinâmica**. 3. ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2011.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; KRANE, Kenneth S. **Física**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. 3 v.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 3 v.
- KNIGHT, Randall D. **Física: uma abordagem estratégica**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 3 v.

MEDEIROS, Alexandre; MEDEIROS, Cleide Farias de. **Coleção Exploração o Ensino: física**. Presidência da República. Ministério da Educação. Secretaria Executiva. 7 v. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/EnsMed/expensfisica.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2022.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CULTURA. Fortaleza, 2022. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/component/content/article?id=40361>. Acesso em: 10 jan. 2022.

MOREIRA, Marco Antonio. **Aprendizagem Significativa: a teoria e textos complementares**. 1 ed. São Paulo: Livraria da Física, 2011.

MOREIRA, Marco Antonio. **Aprendizagem significativa, campos conceituais e pedagogia da autonomia: implicações para o ensino**. Disponível em: http://educonse.com.br/ixcoloquio/Artigo_Aprendizagem.pdf. Acesso em: 03 abr. 2022.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Support**. Fortaleza, 2020. Disponível em: <https://www.ni.com/pt-br/support/downloads/software-products/download.multisim.html#312060>. Acesso em: 10 abr. 2020.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Shop**. Fortaleza, 2022. Disponível em: <https://www.ni.com/pt-br/shop/electronic-test-instrumentation/application-software-for-electronic-test-and-instrumentation-category/what-is-multisim.html>. Acesso em: 11 fev. 2022.

PARÂMETROS CURRICULARES NACIONAIS (ENSINO MÉDIO). Fortaleza, 2022. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/ciencian.pdf>. Acesso em: 17 out. 2022

PARÂMETROS CURRICULARES NACIONAIS+ (ENSINO MÉDIO). Fortaleza, 2022. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/CienciasNatureza.pdf>. Acesso em: 17 out. 2022

RAMALHO JUNIOR, Francisco; FERRARO, Nicolau Gilberto; SOARES, Paulo Antônio de Toledo. **Física: os fundamentos de física**. 10. ed. São Paulo: Moderna, 2009. 3 v.

SADIKU, Matthew N. O. **Elementos de Eletromagnetismo**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

SILVA, Girleide Maria da. **Simuladores em Aulas de Física: quando utilizar?** Disponível em: <https://cietenped.ufscar.br/submissao/index.php/2020/article/view/1405>. Acesso em: 01 jun. 2022.

STEWART, James. **Cálculo**. 6. Ed. São Paulo, Cengage Learning, 2011. 1 v.

TAVARES, Romero. **Aprendizagem significativa**. Disponível em: http://www.projetos.unijui.edu.br/formacao/_medio/fisica/_MOVIMENTO/ufpb_energia/Textos/ASConceitos.pdf. Acesso em: 01 abr. 2022.

TIPLER, Paul A.; MOSCA, Gene. **Física para Cientistas e Engenheiros**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 2 v.

TIPLER, Paul A.; MOSCA, Gene. **Physics for Scientists and Engineers**. 6. ed. New York, W. H. Freeman and Company, 2008.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física**. 14. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015.

APÊNDICE A – LISTA DE ASSINATURA DA 3ª SÉRIE B MANHÃ

Aplicação do Produto Educacional Folha de Assinaturas

Local: EEM Professor Otávio Terceiro de Farias Turma: 3º B Turno: Manhã Data: 28/03/2022

| Nome | Assinatura |
|--|-------------------------------------|
| 1 ABRAAO FREIRE RIBEIRO | Abraão Freire Ribeiro |
| 2 ADYLA RODRIGUES DE ABREU | |
| 3 AMANDA HELLEN SOUZA DE LIMA | |
| 4 ANA ALICE LIMA FERREIRA | Ana Alice Lima Ferreira |
| 5 ANA KAYLANE SALES DOS SANTOS | Ana Kaylane Sales dos Santos |
| 6 ANA LETICIA NUNES DE SA | Ana Leticia Nunes de Sa |
| 7 ANA VITORIA MARQUES PITOMBEIRA | |
| 8 ANGELA CAROLINE SANTOS NOGUEIRA | |
| 9 ANNA BEATRIZ NASCIMENTO BATISTA | |
| 10 BEATRIZ FERREIRA DA SILVA | Beatriz Ferreira da Silva |
| 11 BEATRIZ PARANHOS CAVALCANTE | Beatriz Paranhos Cavalcante |
| 12 ENZO DE OLIVEIRA GONCALVES | Enzo de Oliveira Goncalves |
| 13 ERICK LEVI DE OLIVEIRA ARAUJO | |
| 14 ERISSON DE SOUSA TEIXEIRA | EriSSon de Sousa Teixeira |
| 15 EVANDEILSON DIAS DA SILVA | |
| 16 GABRIELA FERNANDES NASCIMENTO | Gabriela Fernandes Nascimento |
| 17 GIOVANNA DE CASTRO CAVALCANTE GURGEL | Giovanna de Castro |
| 18 HENDERSON DA SILVA GOMES CAVALCANTE | Henderson da Silva Gomes Cavalcante |
| 19 HESTER HELLEM FIDELIX SOARES | Hester Hellem Fidelix Soares |
| 20 ISMAEL LINHARES DE SOUZA | Ismael Linhares de Souza |
| 21 ISRAEL PIRES MACIEL | |
| 22 JESSYKA SANTOS DE SOUZA | Jessyka Santos de Souza |
| 23 JOAO FILIPE NASCIMENTO BATISTA | |
| 24 JOAO PEDRO FERNANDES DE LIMA | João Pedro Fernandes de Lima |
| 25 JOAO PEDRO PINHEIRO SUSSUARANA | |
| 26 JOAO VICTOR ARAUJO ALVES | |
| 27 KAIKE SILVA SANTANA | Kaike Silva Santana |
| 28 KAUA FERNANDO VIEIRA | Kauã F. Vieira |
| 29 KESLY DOS SANTOS RODRIGUES | Kesly dos Santos Rodrigues |
| 30 KRISLI AGAPITO CAVALCANTE | |
| 31 LEANDRA SUZY DA SILVA TEIXEIRA | Leandra Suzy |
| 32 LETICIA PEREIRA FONSECA | |
| 33 LUANA DE FREITAS MENDES | Luana de Freitas Mendes |
| 34 LUDMILA QUEIROZ PEREIRA DE LIMA | Ludmila Queiroz Pereira de Lima |
| 35 MANOEL VITOR DE SOUSA BARROS | Manoel Vitor de Sousa |
| 36 MARIA CLARA FRANCO LEMOS | Maria Clara Franco Lemos |
| 37 MARIA EDUARDA DA SILVA | |
| 38 MARILIA FELIPE POLICARPO | Marília Felipe Polcarpo |
| 39 MYLENA BARROS LIMA | Mylena Barros Lima |
| 40 PEDRO GABRIEL DO NASCIMENTO ALBUQUERQUE | Pedro Gabriel do Nascimento |
| 41 PEDRO RIAN DE SOUSA COELHO | Pedro Rian de Sousa Coelho |
| 42 RIQUELME HERCULES FIALHO GOMES DA SILVA | |
| 43 SAMARA VICTORIA MUNIZ DA SILVA | Samara Victoria Muniz da Silva |
| 44 STEFANY LOHANA DE SOUS | Stefany Lohana de Sousa Albuquerque |
| 45 Rayssa Kelly Gomes Ucheta | Rayssa Kelly Gomes Ucheta |
| 46 | |
| 47 | |

APÊNDICE B – LISTA DE ASSINATURA DA 3ª SÉRIE C MANHÃ

Aplicação do Produto Educacional

Folha de Assinaturas

Local: EEM Professor Otávio Terceiro de Farias

Turma: 3º C

Turno: Manhã

Data: 28/03/2022

| Nome | Assinatura |
|--|-----------------------------------|
| 1 AIRTON PINHEIRO AMORIM NETO | |
| 2 ALEXANDRA DA SILVA MOTA | |
| 3 ALEXSANDER DE OLIVEIRA BASILIO | Alexsander de Oliveira Basilio. |
| 4 ANA VALERIA NASCIMENTO BERNARDO | |
| 5 ANTONIA KEILA LIMA DA SILVA | |
| 6 ANTONIA STEFANY DOS SANTOS BARROS | Antonia Stefany |
| 7 ANTONIA VALERIA LOPES DO NASCIMENTO | Ant. Valéria Lopes do Nascimento |
| 8 ANTONIO CARLOS HENRIQUE LOPES BRAGA | |
| 9 BRUNA LETICIA OLIVEIRA DA SILVA | Bruna Leticia |
| 10 CAUA LIMA D OLIVEIRA | Cauã Lima De Oliveira |
| 11 DAVI RUBENS RODRIGUES GOMES | |
| 12 FELIPE MENDES FERREIRA CARVALHO | |
| 13 FRANCIELE WENDY SILVA | Franciele Wendy |
| 14 FRANCISCO LUCAS DO NASCIMENTO BARRETO | |
| 15 GABRIEL BRAZIL SILVA | Gabriel Brazil Silva. |
| 16 GABRIELA DA SILVA PEREIRA ALVES | Gabriele da Silva P. Alves |
| 17 GESSICA MARIA DOMINGOS SA | |
| 18 GRAZIELLA COSTA ALVES | |
| 19 IGOR DE FREITAS LOPES | |
| 20 ISABELE DE FATIMA DE FREITAS LIMA | Isabelle de Fatima |
| 21 ISABELLE ALVES OLVEIRA | Isabelle Alves Oliveira. |
| 22 JOAO HENRIQUE DA SILVA MENDES | |
| 23 JOAO LUCAS DE ASSIS PIRES OLIVEIRA | João Lucas de Assis |
| 24 JONAS LEVI MACIEL DE FREITAS | |
| 25 JONAS NASCIMENTO DE OLIVEIRA | Jonas Nascimento de Oliveira |
| 26 JULIA ARAUJO SILVESTRE MONTENEGRO | Julia Araujo Silvestre |
| 27 JULIANA DA SILVA JORGE | Juliana da Silva Jorge |
| 28 KAUE LIRA VIANA | |
| 29 KAYLANE DOS SANTOS FERREIRA | |
| 30 LUIZA ALEXIA ARRUDA DOS SANTOS | |
| 31 LYANDRA RIBEIRO CAVALCANTE | Lyandra Ribeiro Cav. |
| 32 MARCILIA PAULINO FERREIRA MARINHO | Marcilia Paulino F. Marinho |
| 33 MARIA BEATRIZ PEREIRA LOPES | |
| 34 MARIA CAMILLY SOUZA COSTA | Maria Camilly Souza Costa |
| 35 MARIA FERNANDA CAVALCANTE DA SILVA | Maria Fernanda |
| 36 MARIA GABRYELLE FERREIRA DA SILVA | Maria gabryelle Ferreira da Silva |
| 37 MICAEL RAMON DE ALMEIDA MALHEIROS | |
| 38 MIGUEL DOUGLAS DE SOUZA LIMA | |
| 39 MIRELLA EVELYN SILVA DE MORAIS | |
| 40 MORELLE ANDRADE PAZ | |
| 41 NICOLLY EVELY DE SOUSA BALTAZAR | |
| 42 PAMELA SUELLEN CARVALHO DIAS | |
| 43 PEDRO LUCAS DE ALMEIDA SILVA | |
| 44 PEDRO LUCAS DE ALMEIDA SILVA | |
| 45 Sabrina Samara de Sousa do N. | Sabrina Samara |
| 46 Rami Cavalcante de Souza | Rami Cavalcante |
| 47 Raissa Gino Rabelo | Raissa Gino |

APÊNDICE C – LISTA DE ASSINATURA DA 3ª SÉRIE D MANHÃ

Aplicação do Produto Educacional Folha de Assinaturas

Local: EEM Professor Otávio Terceiro de Farias

Turma: 3º D

Turno: Manhã

Data: 28/03/2022

| Nome | Assinatura |
|--|--------------------------------------|
| 1 ADAUTO SILVEIRA LEAL NETO | |
| 2 ALAN ICARO ALVES ARAUJO | Alan Icaro A. Araujo |
| 3 ALBERTO MADESON LIMA PONTES | |
| 4 ALISSON DO CARMO SANTANA | Alisson do Carmo Santana |
| 5 ANA CARLA FIALHO DAVID | Ana Carla Fialho David |
| 6 ANA CLARA CORDEIRO LUCAS | Ana Clara C. |
| 7 ANA KAYLANE DA SILVA SOUSA | |
| 8 ANA LUIZA MATIAS PEREIRA | |
| 9 ANA TEREZINHA RIBEIRO FREIRE | Ana Terezinha Ribeiro Freire |
| 10 ANDRESSA DA SILVA MARINHO | |
| 11 CLEVIA MILENNA BERNARDO ALVES | Clevia Milenna Bernardo Alves |
| 12 DANIEL PIMENTEL PEIXOTO | DANIEL PIMENTEL PEIXOTO |
| 13 DOUGLAS DANTAS SANTOS | |
| 14 ELIEZER FELIPE LIMA DA SILVA | Eliezer Felipe Lima da Silva |
| 15 FRANCISCO DAVI RODRIGUES DE OLIVEIRA | Fco Davi R. de Oliveira |
| 16 GABRIEL PARA SOARES | Gabriel Para Soares |
| 17 GEOVANA SOUSA RODRIGUES | Geovana Souza |
| 18 GUSTAVO ALVES BERNARDO DO NASCIMENTO | Gustavo Alves Bernardo do Nascimento |
| 19 HENRIQUE MELO BRANDAO | Henrique Melo Brandão |
| 20 ISABELLA CAETANO DE CASTRO | Isabella Caetano de Castro |
| 21 JAMILE COSTA DE LIMA | Jamile Costa de Lima |
| 22 JOAO GABRIEL COSTA DOS SANTOS | |
| 23 JOÃO PEDRO SALES DE HOLANDA GONÇALVES | |
| 24 JOAO PEDRO SIDOU ARAGAO | JOAO PEDRO SIDOU ARAGAO |
| 25 JOAO VITOR SOUZA BRITO | João Vitor Souza B. |
| 26 JORGE LUIS MILHOME CANDIDO | Jorge Milhome |
| 27 JOSE CLAUDIO BARBOSA LIMA FILHO | |
| 28 KAIRO SAMPAIO AQUINO | Kairo S. |
| 29 LETICIA PEREIRA DE SOUSA | Leticia Pereira |
| 30 LEVI MENDES DO NASCIMENTO | Levi Mendes do Nascimento |
| 31 LORRAN LUCAS FELIX DA SILVA | Lorran Lucas |
| 32 MARIANA DA SILVA RODRIGUES | Mariana da Silva R. |
| 33 MARIANA HELEN NUNES NOBRE | |
| 34 PEDRO GUILHERME OLIVEIRA SENA | Pedro Guilherme O. Sena |
| 35 PEDRO ITALO PEREIRA BORGES | Pedro Italo Pereira Borges |
| 36 RAYLA ALMEIDA FREITAS | |
| 37 REBECA SILVA DE QUEIROZ | Rebecca Queiroz |
| 38 SARA CATARINA MARINHO DA ROCHA | |
| 39 SARA GOMES DOS SANTOS | Sara Gomes dos Santos |
| 40 SUYANNE SOUZA DA SILVA | |
| 41 THAIS FREITAS DE SOUSA DOS SANTOS | |
| 42 VALESCA MARIA SOUSA AMARO | |
| 43 VANESSA MARIA SOUSA AMARO | |
| 44 VIVIAN GALVÃO GOMES | |
| 45 | |
| 46 | |
| 47 | |

APÊNDICE D – LISTA DE ASSINATURA DA 3ª SÉRIE E TARDE

Aplicação do Produto Educacional Folha de Assinaturas

Local: EEM Professor Otávio Terceiro de Farias

Turma: 3º E

Turno: Tarde

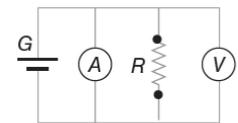
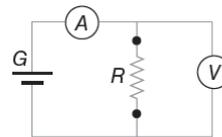
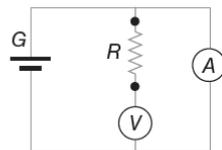
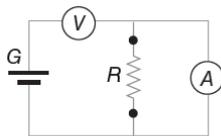
Data: 28/03/2022

| Nome | Assinatura |
|--|------------------------------------|
| 1 ALESSA LETICIA PONTES LOREDO | |
| 2 ANA BEATRIZ ALVÉS LACERDA | Beatriz Lacerda |
| 3 ANA BEATRIZ FREITAS DE CASTRO | |
| 4 ANA BEATRIZ MATOS BARBOSA | Beatriz matos |
| 5 ANA CLARA RODRIGUES FEITOSA | ANA CLARA |
| 6 ANA GABRIELE LOPES DO NASCIMENTO | ANA GABRIELE |
| 7 ANA KETLEN VASCONCELOS DE SOUSA | |
| 8 ANA TERCIA LOPES ARAUJO | Ana Tercia Lopes Araujo |
| 9 ANA VITÓRIA BARROSO CAMILO | |
| 10 ANA VITORIA DO NASCIMENTO SOARES | |
| 11 ANTONIO ALAN GOMES MONTEIRO | |
| 12 ARYANE COELHO CASTELO | |
| 13 CAMILE SILVA MORAIS | |
| 14 DAVI DA SILVA RODRIGUES | Davi da Silva |
| 15 DEBORA FERRER BEVENUTO | |
| 16 EDUARDO DE ARAUJO MENDES | |
| 17 ELLEN RAFAELE PATRIOLINO DA SILVA | Ellen Rafaela Patriolino da Silva |
| 18 FRANCISCO GABRIEL SANTANA FERREIRA | |
| 19 GLORIA MARIA PINTO CAETANA | Gloria Maria Pinto Caetano |
| 20 ISAAC TORRES TAVARES | |
| 21 IURI MARTINS FEITOSA | Iuri Martins |
| 22 JOAO GUILHERME NOGUEIRA ALVES DE LIMA | João Guilherme |
| 23 JOAO HENRIQUE ARAUJO OLIVEIRA | |
| 24 JOSE MURILO MACEDO DE SOUZA | |
| 25 KARLA LIMA TAVARES | Karla Lima |
| 26 KAYLANE PEREIRA SANTOS | Kaylane Pereira Santos |
| 27 KAYO BRUNO ALVES DE OLIVEIRA | Kathellyn Geizislane Araujo dos S. |
| 28 KTHELLYN GEIZISLANE ARAUJO DOS SANTOS | Kayo Bruno Alves de Oliveira |
| 29 LARA FABIA DE OLIVEIRA SILVA | |
| 30 LARISSA SANTOS NASCIMENTO | |
| 31 LETICIA PRATA COSMO | Leticia Prata |
| 32 LUCICLEYTON DOS SANTOS FLORENCIO | |
| 33 MARIA CINTIA RABELO AMARO | |
| 34 MARIA EDUARDA ALBUQUERQUE SILVA | Maria Eduarda Alves de Moraes |
| 35 MARIA EDUARDA ALVES DE MORAIS | Mirela de Sousa Pereira |
| 36 MIRELA DE SOUSA PEREIRA | Pedro Henrique |
| 37 PEDRO HENRIQUE OLIVEIRA CAVALCANTE | |
| 38 ROSE LIDICE DA SILVA MARTINS | |
| 39 SAMARA ARAUJO LINS | Samara Araujo Lins |
| 40 SOFIA KAREN ROCHA MEDEIROS | Sofia Karen Rocha Medeiros |
| 41 TALITA NOJOSA MORAIS | |
| 42 THAIS HENRIQUE DOS SANTOS | Thais Henrique |
| 43 VICTOR KAUAN GONALVES DE SOUSA | Victor Kauan |
| 44 WILLIAN MOTA ANDRADE | WILLIAN MOTA ANDRADE |
| 45 YARA KELLE PAIVA DO NASCIM | Yara Kelle P.N. |
| 46 | |
| 47 | |

APÊNDICE E – QUESTIONÁRIO SOBRE TEORIA DE CIRCUITOS

- 1 – Considerando o circuito externo à bateria, qual o sentido convencional da corrente elétrica?
 1. Do polo negativo para o polo positivo da bateria.
 2. Do polo positivo para o polo negativo da bateria.
 3. Sentido contrário ao do campo elétrico.
 4. Nenhuma das alternativas anteriores.
- 2 – Considerando o circuito externo à bateria, qual o sentido do movimento dos elétrons?
 1. Do polo negativo para o polo positivo da bateria.
 2. Do polo positivo para o polo negativo da bateria.
 3. No mesmo sentido do campo elétrico.
 4. Nenhuma das alternativas anteriores.
- 3 – Fusível é um dispositivo de:
 1. Manobra.
 2. Proteção.
 3. Medida.
 4. Controle.
- 4 – Amperímetro é um dispositivo que mede:
 1. Tensão elétrica.
 2. Corrente elétrica.
 3. Resistência elétrica.
 4. Condutividade elétrica.
- 5 – Voltímetro é um dispositivo que mede:
 1. Tensão elétrica.
 2. Corrente elétrica.
 3. Resistência elétrica.
 4. Condutividade elétrica.
- 6 – No circuito elétrico, o amperímetro deve ser coloca em:
 1. série.
 2. paralelo.
 3. série ou paralelo, não há diferença.
 4. Nenhuma das alternativas anteriores.
- 7 – No circuito elétrico, o voltímetro deve ser coloca em:
 1. série.

2. paralelo.
 3. série ou paralelo, não há diferença.
 4. Nenhuma das alternativas anteriores.
- 8 – Em uma associação em série os resistores apresentam, necessariamente, a mesma:
1. Tensão elétrica.
 2. Corrente elétrica.
 3. Resistência elétrica.
 4. Condutividade elétrica.
- 9 – Em uma associação em paralelo os resistores apresentam, necessariamente, a mesma:
1. Tensão elétrica.
 2. Corrente elétrica.
 3. Resistência elétrica.
 4. Condutividade elétrica.
- 10 – Quanto mais resistores em série com um gerador:
1. menor a tensão elétrica total.
 2. maior a tensão elétrica total.
 3. menor a corrente elétrica total.
 4. maior a corrente elétrica total.
- 11 – Assinale o item no qual o amperímetro e o voltímetro estão ligados corretamente:



ILUSTRAÇÕES: ADILSON SECCO

APÊNDICE F – QUESTIONÁRIO DE SATISFAÇÃO

1 – Usa *mouse* com frequência?

1. Sim.
2. Não.
3. Não sei responder.

2 – Antes, já havia utilizado um simulador?

1. Sim.
2. Não.
3. Não sei responder.

3 – Achou o simulador complicado de usar?

1. Sim.
2. Não.
3. Não sei responder.

4 – Achou o simulador fácil de usar?

1. Sim.
2. Não.
3. Não sei responder.

5 – Acha que o simulador facilita a compreensão da teoria?

1. Sim.
2. Não.
3. Não sei responder.

6 – A interface do simulador é agradável?

1. Sim.
2. Não.
3. Não sei responder.

7 – A organização das informações na tela do simulador é clara?

1. Sim.
2. Não.
3. Não sei responder.

8 – Foi fácil encontrar os dispositivos que precisava?

1. Sim.
2. Não.
3. Não sei responder.

9 – Recomenda aos colegas de outras salas o uso deste simulador?

1. Sim.
2. Não.
3. Não sei responder.

10 – Gostaria de usar este simulador com frequência?

1. Sim.
2. Não.
3. Não sei responder.

11 – Sobre o simulador, deseja deixar alguma crítica ou sugestão?

APÊNDICE G – PRODUTO EDUCACIONAL



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

EVANDIR DOS SANTOS MOREIRA

FUNDAMENTOS DE ELETRÔNICA USANDO MULTISIM LIVE

FORTALEZA

2022



EVANDIR DOS SANTOS MOREIRA

FUNDAMENTOS DE
ELETRÔNICA
usando MULT ISIM LIVE™



Initializing Multisim Live ...

Waiting for awesome

EVANDIR DOS SANTOS MOREIRA

FUNDAMENTOS DE
ELETRÔNICA
usando MULT ISIM LIVE™

SUMÁRIO

| | | |
|-------|---|-----|
| 1 | SOBRE A OBRA | 79 |
| 1.1 | Introdução | 80 |
| 1.2 | Objetivos | 80 |
| 1.3 | Divisão do conteúdo | 81 |
| 1.4 | Distribuição dos capítulos | 81 |
| 2 | MULTISIM LIVE | 83 |
| 2.1 | Introdução | 84 |
| 2.2 | Acesso ao Multisim Live | 84 |
| 2.3 | Projeto modelo | 88 |
| 2.3.1 | <i>Alterando o título do circuito e salvando alterações</i> | 88 |
| 2.3.2 | <i>Construindo o circuito</i> | 90 |
| 2.3.3 | <i>Simulação</i> | 95 |
| 3 | FONTE IDEAL DE TENSÃO | 98 |
| 3.1 | Introdução | 99 |
| 3.2 | Definição | 99 |
| 3.3 | Classificação das fontes de tensão | 100 |
| 3.3.1 | <i>Fonte ideal de tensão independente</i> | 100 |
| 3.3.2 | <i>Fonte ideal de tensão dependente (controladas)</i> | 102 |
| 4 | FONTE IDEAL DE CORRENTE | 106 |
| 4.1 | Introdução | 107 |
| 4.2 | Definição | 107 |
| 4.3 | Classificação das fontes de corrente | 107 |
| 4.3.1 | <i>Fonte ideal de corrente independente</i> | 107 |
| 4.3.2 | <i>Fonte ideal de corrente dependente (controlada)</i> | 110 |
| 5 | RESISTORES | 114 |
| 5.1 | Introdução | 115 |
| 5.2 | Definição | 115 |
| 5.2.1 | <i>Resistores fixos</i> | 115 |
| 5.2.2 | <i>Resistores variáveis</i> | 116 |
| 5.2.3 | <i>Termistores</i> | 122 |
| 5.2.4 | <i>Célula fotocondutora</i> | 122 |
| 5.2.5 | <i>Varistor</i> | 123 |
| 5.3 | Associação de resistores | 124 |
| 5.3.1 | <i>Resistores em série</i> | 124 |
| 5.2.2 | <i>Resistores em paralelo</i> | 126 |
| 6 | CAPACITORES | 130 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 6.1 | Introdução | 131 |
| 6.2 | Definição | 132 |
| 6.3 | Capacitância | 133 |
| 6.4 | Fase de carga | 134 |
| 6.5 | Fase de descarga | 141 |
| 7 | TRANSFORMADOR | 145 |
| 7.1 | Introdução | 146 |
| 7.2 | Definição | 147 |
| 8 | DIODO | 155 |
| 8.1 | Introdução | 156 |
| 8.2 | Definição | 157 |
| 8.2.1 | <i>Características elétricas</i> | 157 |
| 8.2.2 | <i>Região de ruptura</i> | 160 |
| 8.3 | Circuito equivalente simplificado do diodo | 161 |
| 8.4 | Circuitos retificadores | 162 |
| 8.4.1 | <i>Circuito retificador de meia-onda</i> | 162 |
| 8.4.2 | <i>Circuito retificador de onda completa</i> | 166 |
| 9 | FONTE RETIFICADA | 171 |
| 9.1 | Introdução | 172 |
| 9.2 | Definição | 172 |
| 9.3 | Filtro capacitivo | 173 |
| 9.4 | Implementação | 174 |
| | REFERÊNCIAS | 177 |

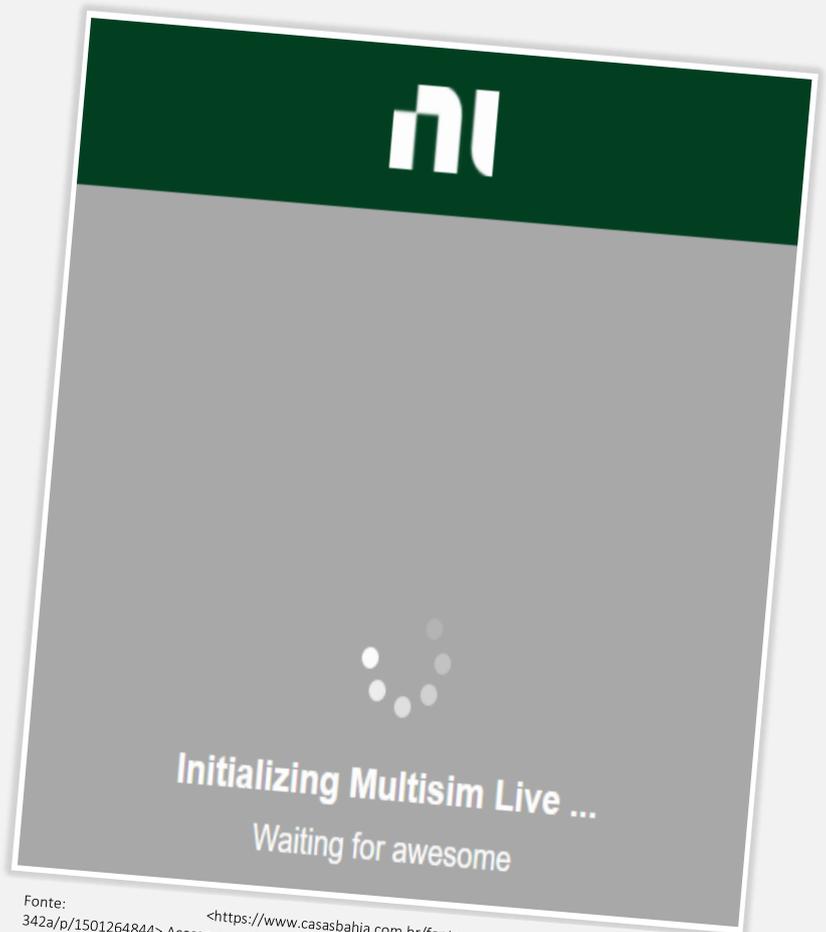
1

CAPÍTULO 1

Tópicos

- 1.1 Introdução
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Divisão do conteúdo
- 1.4 Distribuição dos capítulos

Sobre a obra



Fonte: <https://www.casasbahia.com.br/fonte-para-notebook-positivo-stilo-ds3000-19v-342a/p/1501264844> Acesso em: 10 jan 2021

▲ Para os fãs de simuladores, acreditamos que este livreto será muito bem-vindo. Esperamos conquistar aqueles que ainda relutam em utilizar tão magnífica ferramenta educacional. Boa leitura!

Neste capítulo falaremos um pouco sobre o objetivo da obra e a divisão do conteúdo através dos capítulos. Esperamos que este primeiro contato o incentive a ler todos os capítulos restantes e faça desse livreto uma ferramenta que o ajude a criar aulas ainda mais interessantes e dinâmicas, além de projetos de feiras de ciências mais atrativos e ricos em conteúdo.

1.1 Introdução

Este livreto é o resultado de um trabalho pedagógico desenvolvido ao longo de dois anos de curso e consiste no Produto Educacional elaborado para o Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) oferecido pela Sociedade Brasileira de Física (SBF), Universidade Federal do Ceará (UFC) - Polo 43. O trabalho consiste de vários experimentos virtuais envolvendo os dispositivos mais elementares da eletrônica, fontes de tensão e corrente, resistores, capacitores, transformadores e diodos, usando o *Multisim Live*, software free de simulação da *National Instruments (NI)*. Junto aos experimentos tivemos o cuidado de fornecer as instruções necessárias para que o leitor possa criar e executar as simulações sem maiores complicações.

1.2 Objetivos

Deve ficar claro que a intenção não é exaurir todo o assunto abordado em eletrônica. Muito distante disto! O texto limita-se aos componentes básicos presentes em qualquer livro de ensino médio. A este acrescentamos o diodo, visto que se trata de um elemento de circuito já abordado em vários livros didáticos, mesmo que seja apenas em textos extras ou em questões que envolvem resistência elétrica e a primeira lei de ohm. Ele também será necessário no processo de simulação de uma fonte de tensão retificada, que seria uma espécie de projeto final. A implementação física, no entanto, fica a critério do professor.

O objetivo é inserir o aprendizado do aluno em uma área mais específica do conhecimento, nesse caso a eletrônica, e que após ter armazenado quantidade suficiente de informações a respeito dos componentes básicos ele seja capaz de construir algum dispositivo útil e mais complexo, mesmo que seja em um simulador. Acreditamos que o aluno estará mais motivado a aprender se almejar um objetivo maior. Esse método também o faz entender que os conhecimentos não estão isolados, mas amplamente conectados. Através da construção e simulação de circuitos considerados básicos para o aprendizado de eletrônica, o aluno poderá ver no simulador os resultados que antes eram apresentados apenas como o produto da manipulação de fórmulas abstratas que infelizmente, para a maioria deles, não fazem o menor sentido. Além do mais, tentamos aqui, fornecer aos professores uma ferramenta que aproxime teoria e prática, tornando as aulas ainda mais atrativas e dinâmicas. Aos alunos, um instrumento que os conduza do abstrato ao concreto, para que possam começar a experimentar o verdadeiro sentido da máxima: “Aprender fazendo”. Além de construir o conhecimento estabelecendo uma relação entre a teoria vista em sala de aula e a realidade do mundo no qual está inserido. Não é objetivo produzir profissionais em eletrônica, mas tentamos fornecer uma resposta aquela pergunta que sempre ecoa de nossos alunos: “*Professor, onde eu vou usar isso na minha vida*”. Dessa forma, mostrá-los como a física permeia por uma infinidade de áreas do conhecimento, sobretudo nas engenharias.

Mas qual o diferencial desse simulador comparado a tantos outros, como por exemplo o *PhET*, de longe consagrado pelos professores da área

de

Nota!



Figura 1.1 Logotipo do *Multisim Live*

Fonte: Elaborado pelo autor.

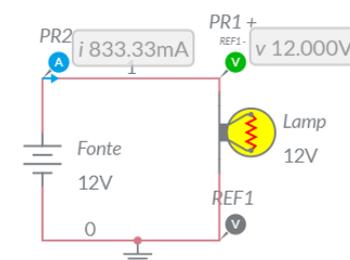


Figura 1.2 Modelo de simulação usando o *Multisim Live*

Fonte: elaborada pelo autor.

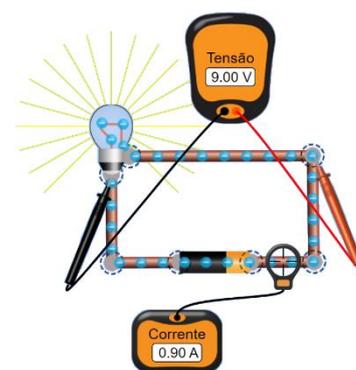


Figura 1.3 Modelo de simulação usando o *PhET*

Fonte: elaborada pelo autor.

física? O *Multisim Live* é um software de uso profissional e acadêmico, ou seja, é completo quando se trata de assuntos relacionados a circuitos elétricos e eletrônicos. Sendo assim, sua utilização insere o aluno nesse contexto o que poderá facilitar a escolha de sua futura profissão. Entretanto, não temos a intenção de fazer o professor abandonar outros simuladores, mas agregar ferramentas.

É fato que simuladores se utilizam de modelos idealizados que jamais irão substituir a riqueza de informações e sensações obtidas em experimentos reais. Contudo, o uso dessas ferramentas possui muitas vantagens, dentre as quais podemos citar: única opção de relacionar teoria e prática em escolas que não possuem laboratório, acesso virtual a equipamentos caros e de difícil aquisição sem a preocupação com “queima” de peças e falhas de instrumentos, além de uma quantidade quase infinita de dispositivos tais como resistores, potenciômetros, lâmpadas, chaves e fontes. Ademais, não é raro encontrar alunos perdidos durante um experimento, sem saber manipular o equipamento ou, por exemplo, fazer as ligações incorretas ao montar um circuito elétrico, o que prejudica consideravelmente o entendimento do assunto explorado. O uso de *software* de simulação surge como uma etapa preparatória, intermediária, que pode reduzir o impacto da transição de aulas puramente teóricas àquelas essencialmente experimentais. Os instrumentos e componentes são similares aos encontrados em um laboratório físico. Os alunos que manipulam esses instrumentos e componentes no *Multisim Live* podem transferir prontamente seus conhecimentos para a bancada.

Para refletir!

- Um modelo matemático nunca é uma representação completamente precisa de uma situação física – é uma *idealização*. Um bom modelo simplifica a realidade o bastante para permitir cálculos matemáticos, mantendo, porém, precisão suficiente para conclusões significativas. É importante entender as limitações do modelo. A palavra final está na Mãe Natureza”.

1.3 Divisão do conteúdo

Para que todos os objetivos supracitados sejam atingidos, este livreto divide-se, didaticamente, em duas partes. Na primeira parte, disponibiliza-se um tutorial com as informações básicas sobre acesso à plataforma e manipulação dos principais componentes disponíveis, o objetivo é orientar o professor a utilizar corretamente o *Multisim Live*. Na segunda parte, são fornecidos inúmeros modelos que auxiliarão no aprendizado dos alunos no que diz respeito aos circuitos fundamentais da eletrônica. Este estágio também é utilizado para nortear o trabalho do professor, principalmente aquele que tem, aqui, o primeiro contato com o *software*. Contudo, nada impede que, após o domínio da ferramenta, o professor possa lançar mão de seus próprios modelos e direcionar seu trabalho da forma que achar mais adequado às suas turmas e ao nível de seus alunos.

1.4 Distribuição dos capítulos

O primeiro capítulo traz uma breve apresentação dos objetivos e conteúdo deste livreto. Tratamos sobre o software, criação de conta e implementação do primeiro circuito passível de simulação no segundo capítulo. O capítulo três é reservado às fontes de tensão, enquanto o capítulo quatro aborda as fontes de corrente. Em seguida, no capítulo de número cinco, voltamos nossa atenção para os resistores. O capítulo seis foi reservado aos capacitores e o capítulo sete é dedicado aos transformadores.

Os diodos são introduzidos no oitavo capítulo, enquanto o nono contempla o projeto de uma fonte de tensão retificada.

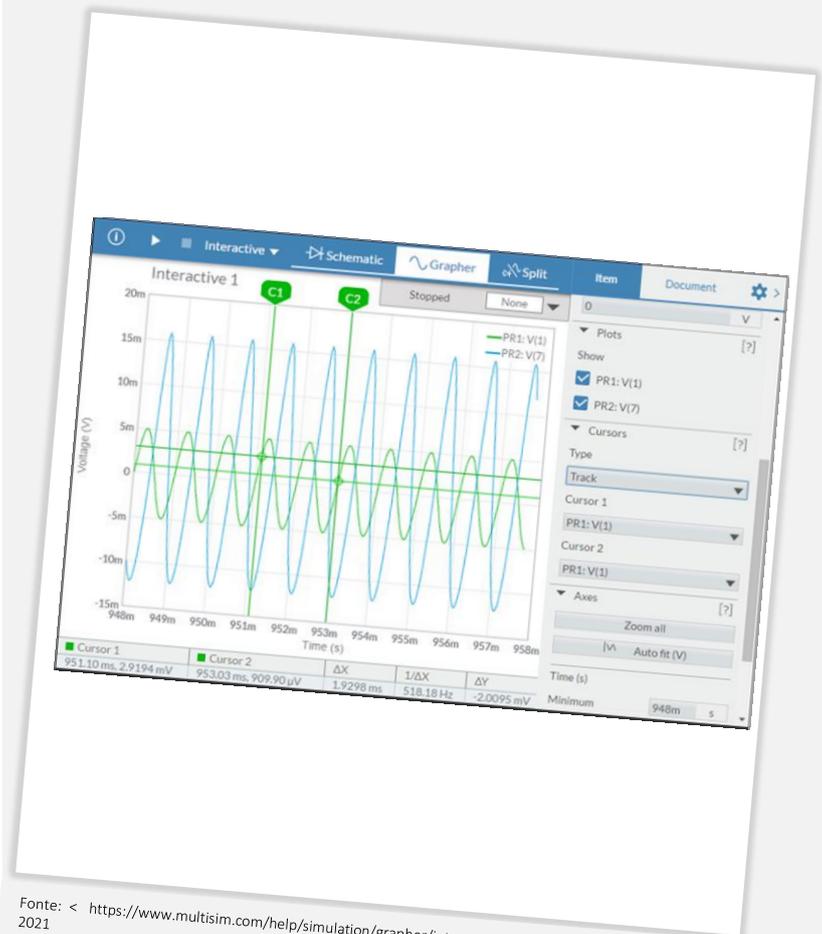
2

CAPÍTULO 2

Tópicos

- 2.1 Introdução
- 2.2 Acesso ao Multisim Live
- 2.3 Projeto modelo
- 2.4 Análise computacional

Multisim Live



Fonte: < <https://www.multisim.com/help/simulation/grapher/interactive-simulation/>> Acesso em: 13 jul. 2021

▲ Já imaginou utilizar um simulador profissional totalmente gratuito e sem instalação alguma? Pois é, ele existe! Estamos falando do *Multisim Live*, ferramenta disponibilizada pela *NATIONAL INSTRUMENTS (NI)*. Tudo que você precisa para começar a utilizar todos os recursos desse software é de um cadastro e de uma conexão com a

Neste capítulo daremos início ao estudo do *Multisim Live*. Mostraremos como fazer uma conta, acessar e manipular alguns dos dispositivos mais essenciais para a simulação de qualquer circuito elétrico ou eletrônico.

2.1 Introdução

O *Multisim* é um ambiente de desenvolvimento que permite a simulação e implementação de códigos de projetos de circuitos na área de eletrônica digital, analógica e de potência. Para tanto, utiliza a simulação *SPICE* padrão da indústria que é capaz de fornecer um ambiente esquemático interativo para visualizar e analisar em tempo real o comportamento de circuitos elétricos e eletrônicos (NI, 2021).

Ambientes de simulação ajudam estudantes de engenharia e ciências exatas a reforçar o aprendizado, lapidando a compreensão e absorção dos conceitos da teoria dos circuitos. Através de suas simulações altamente realistas, o *Multisim* permite que pesquisadores e projetistas reduzam a utilização dos protótipos de placas de circuito impresso (*PCB*) o que gera uma economia nos custos de desenvolvimento de projetos (NI, 2021). No entanto, apesar de todos os benefícios aqui apresentados, é sensato que o leitor se questione acerca das desvantagens desta ferramenta relativamente a outros *softwares*. Desconsiderando toda a parte técnica por trás dos resultados exibidos ao usuário, sem sombra de dúvidas, a principal desvantagem do *Multisim* relativamente a outros simuladores é o seu preço. Uma versão integral do *Multisim* apresenta um custo que poderá inviabilizar a sua compra para a grande maioria dos usuários. Existe, no entanto, a versão *NI Multisim Student Edition* que, apesar de não integrar todas as ferramentas e dispositivos que o *Multisim* dispõe, apresenta um custo expressivamente inferior à versão completa. Mais recentemente, a *National Instruments (NI)* lançou o *Multisim Live* que oferece a simulação *SPICE* em qualquer lugar, a qualquer hora e sem nenhum custo. A plataforma permite que o usuário aprenda eletrônica em um ambiente interativo, on-line que pode ser executado em qualquer dispositivo. Por se tratar de uma versão totalmente gratuita, o *Multisim Live* apresenta algumas limitações de recursos relativamente as versões pagas. No entanto, o que seria um inconveniente para estudos mais avançados em eletrônica, em nada afeta a manipulação de circuitos básicos, porém fundamentais, cerne deste trabalho.

2.1 Acesso ao Multisim Live

O *Multisim Live* é online, não sendo necessário baixar ou instalar qualquer linha de código, sem contar que o leitor não precisa arcar com nenhum ônus para trabalhar seus projetos de eletrônica, em outras palavras, o *Multisim Live* é grátis.

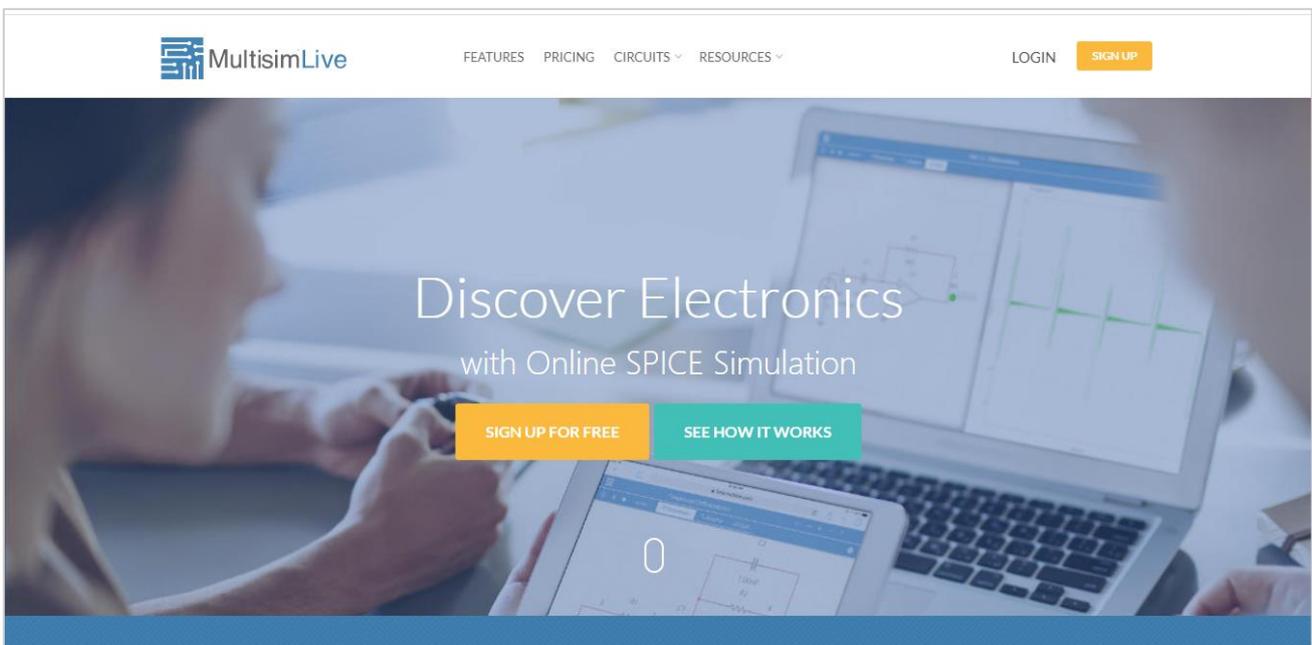
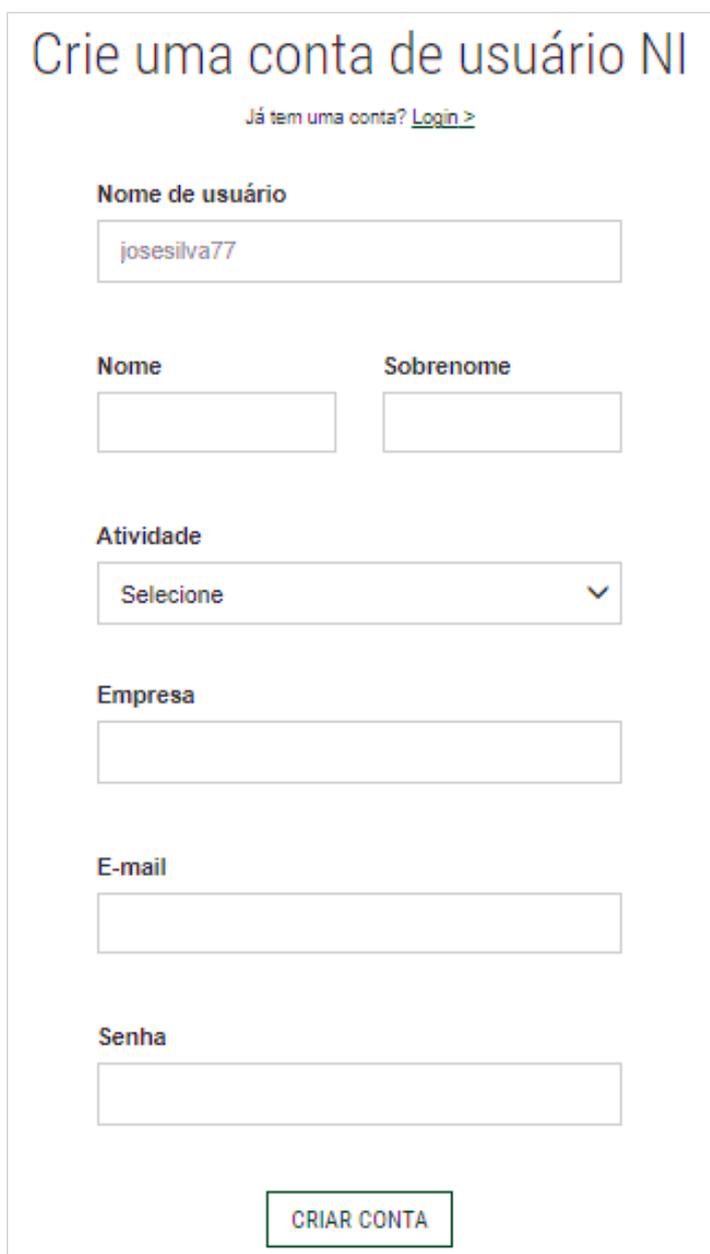


Figura 2.1 Tela inicial da página do *Multisim Live*

Fonte: elaborada pelo autor.

A única exigência para uso da ferramenta consiste na criação de uma conta. Para tanto, abra seu navegador de *internet* preferido e acesse a página do *Multisim Live* pelo link <https://www.multisim.com/>, em seguida, já no domínio da *National Instruments (NI)* (Fig. 2.1), clique em *SINGN UP* ou em *SIGN FOR FREE* localizados no canto superior direito e no centro da tela, respectivamente. Feito isso, uma nova página é aberta, na qual se encontra a ficha para cadastro (Fig. 2.2).



O formulário de criação de conta de usuário NI apresenta o seguinte layout:

- Titulo: **Crie uma conta de usuário NI**
- Link: [Já tem uma conta? Login >](#)
- Campo de texto: **Nome de usuário** (contendo o texto "josesilva77")
- Campos de texto: **Nome** e **Sobrenome**
- Menu suspenso: **Atividade** (com a opção "Selecione" e uma seta para baixo)
- Campo de texto: **Empresa**
- Campo de texto: **E-mail**
- Campo de texto: **Senha**
- Botão: **CRIAR CONTA**

Figura 2.2 Ficha de cadastro

Fonte: elaborada pelo autor.

Nota!

- Se no campo *ATIVIDADE* for selecionado a opção *ESTUDANTE* ou a opção *PROFESSOR/INSTRUTOR*, o campo *Empresa* é substituído pelo campo *Instituição de ensino*.

Preencha corretamente, memorize a senha e clique sobre *CRIAR CONTA*. Tudo estando correto e nenhum campo tenha sido deixado em branco, é exibida uma mensagem pedindo que o e-mail utilizado no cadastro seja verificado (Fig. 2.3). No e-mail a *NI* fornece um link para confirmação do cadastro na plataforma do *Multisim Live*.

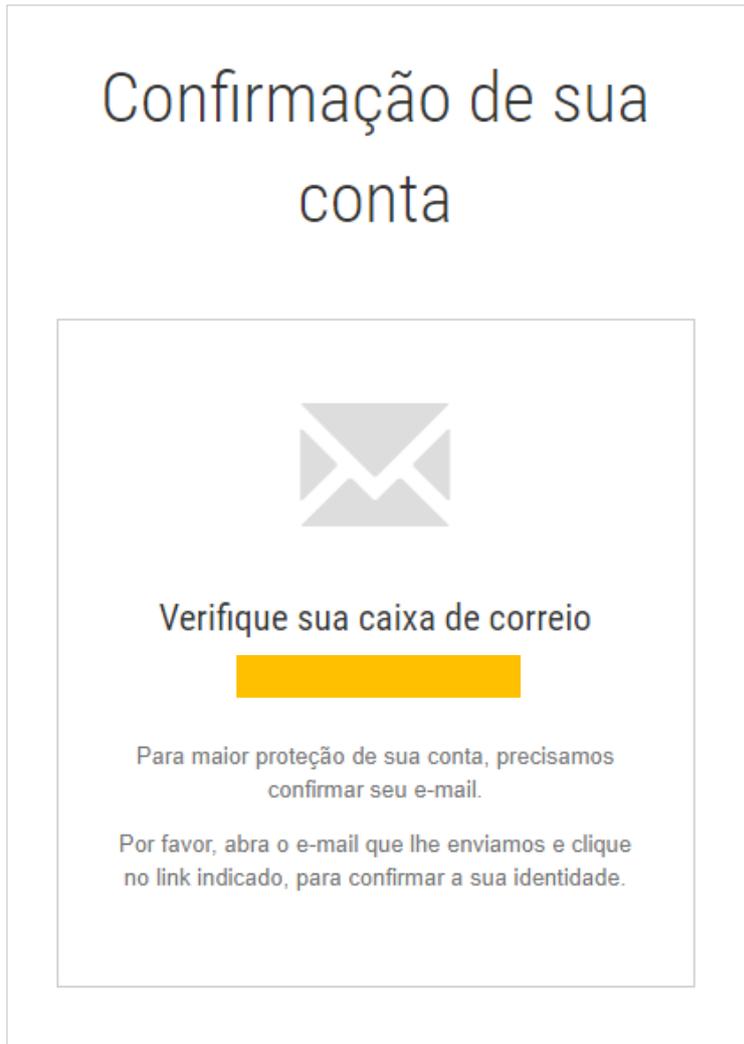


Figura 2.3 Tela de verificação do e-mail

Fonte: elaborada pelo autor.

Seguindo as instruções mencionadas, a tela de confirmação positiva é exibida (Fig. 2.4).



Figura 2.4 Tela de confirmação de conta

Fonte: elaborada pelo autor.

Finalmente, clicando em continuar, será apresentada a tela de *Login* (Fig. 2.5). Após digitar a senha e clicar em *LOGIN*, as informações da conta são exibidas (Fig. 2.6). E se você estiver ansioso para iniciar algum projeto deverá acessar o ambiente de simulação, o que pode ser feito clicando no botão *CREATE CIRCUIT* que está localizado no canto superior direito (Fig. 2.7).

Conta de usuário NI

Por favor, introduza sua senha novamente



Senha [Esqueceu sua senha?](#)

Permanecer logado

LOGIN

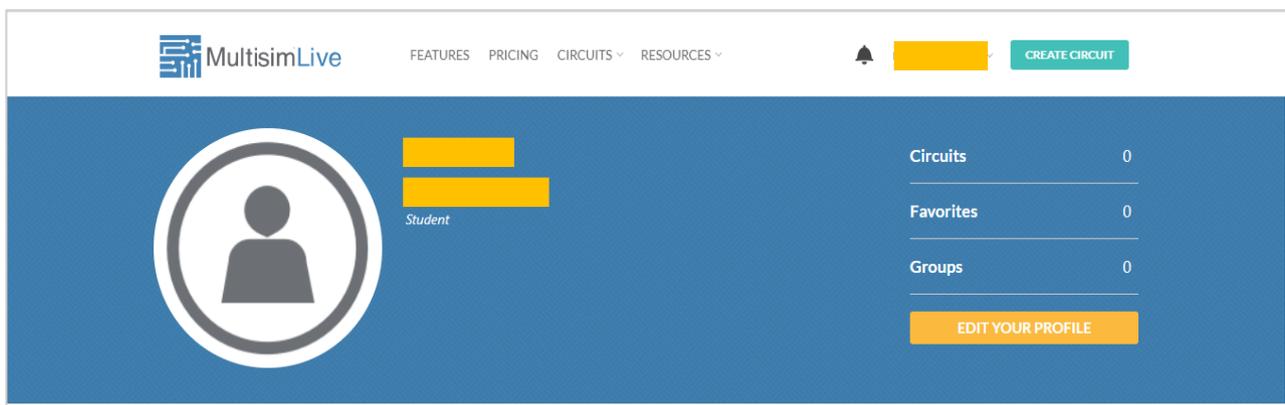
[Login com outra conta >](#)

Nota!

- É importante saber que a tela de *login*, conforme mostrado na Figura 2.5, aparece apenas na primeira vez que o leitor acessa sua conta, utilizando o *link* enviado por e-mail. Acessos posteriores devem ser realizados através da página <https://www.multisim.com/>.

Figura 2.5 Tela de *login*

Fonte: elaborada pelo autor.



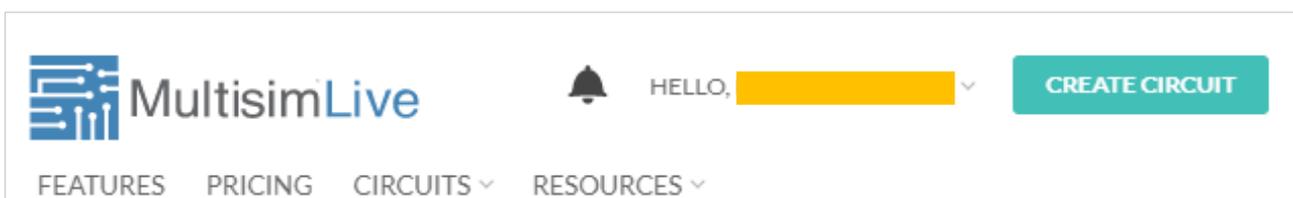
The dashboard features a navigation bar with 'MultisimLive', 'FEATURES', 'PRICING', 'CIRCUITS', and 'RESOURCES'. A user profile is shown with a 'Student' role and a 'CREATE CIRCUIT' button. A summary table displays:

| | |
|-----------|---|
| Circuits | 0 |
| Favorites | 0 |
| Groups | 0 |

An 'EDIT YOUR PROFILE' button is also visible.

Figura 2.6 Tela de boas-vindas

Fonte: elaborada pelo autor.



The header includes the MultisimLive logo, a 'HELLO, [user name]' greeting, a notification bell, and a prominent 'CREATE CIRCUIT' button. Navigation links for 'FEATURES', 'PRICING', 'CIRCUITS', and 'RESOURCES' are also present.

Figura 2.7 Botão *CREATE CIRCUIT*

Fonte: elaborada pelo autor.

Alguns segundos são necessários até que o simulado fique pronto e a área de projeto acessível.

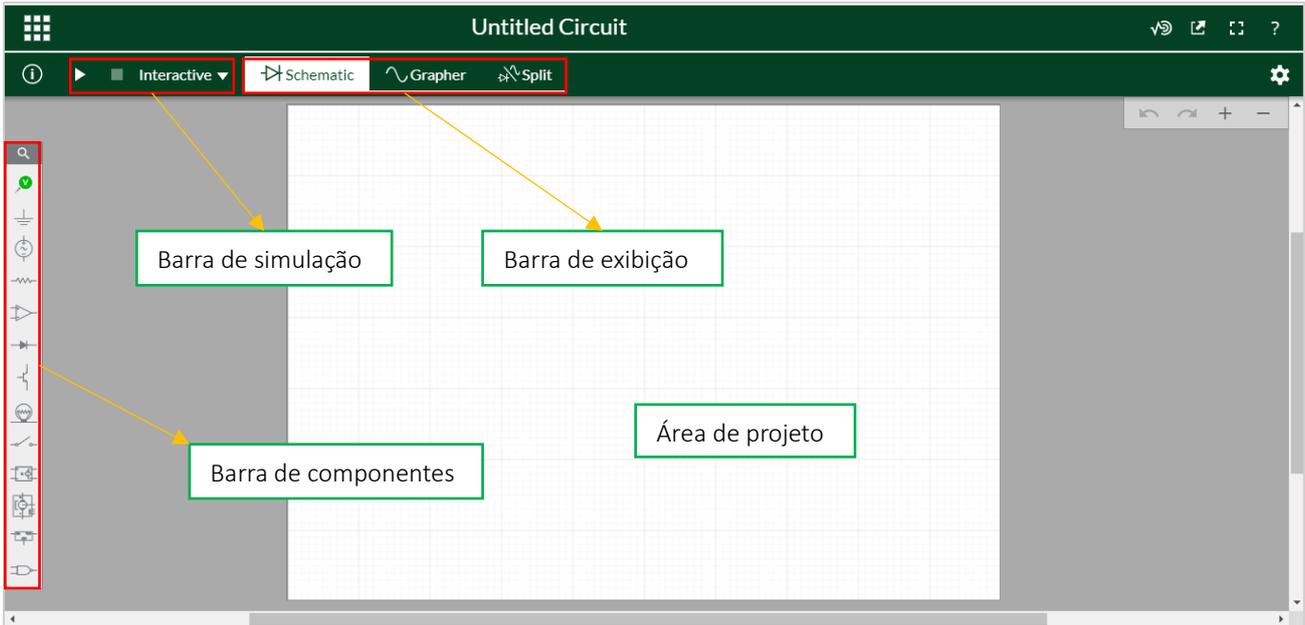


Figura 2.8 Tela do simulador

Fonte: elaborado pelo autor.

Além de um poderoso simulador, o *Multisim Live* também oferece uma tela simples e amigável, que facilita a criação e manipulação dos projetos. Contudo, a habilidade com as ferramentas e componentes depende muito de cada usuário, mas certamente aumenta à medida que mais horas são gastas projetando e simulando novos circuitos.

2.3 Projeto modelo

Como primeiro projeto, vamos construir e analisar o circuito básico, ou seja, aquele que apresenta uma fonte ideal de tensão contínua (*DC*) em série com um resistor (Fig. 2.9).

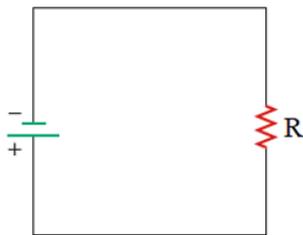


Figura 2.9 O circuito básico

Fonte: Serway e Jewett (2014, com adaptações).

Apesar de sua simplicidade, a construção e simulação desse circuito ajudará a compreender o básico sobre o simulador e aprender as instruções mínimas necessárias para construção e análise de circuitos mais complexos.

2.3.1 Alterando o título do circuito e salvando alterações

Observe que na parte superior central da tela do simulador está localizado o título do circuito: *Untitled Circuit* (Fig. 2.11). Por padrão todos

Nota!



Figura 2.10 Exemplo de circuito básico

Fonte: Ramalho, Nicolau e Toledo (2009, p. 134).

os novos circuitos são iniciados com esse título, que na verdade significa “Circuito sem Título”. Ou seja, ainda não foi atribuído um nome ao circuito.



Figura 2.11 Título atual do circuito

Fonte: elaborada pelo autor.

Vamos alterar o título para *Circuito Básico* (se desejar escolha um título que você julgue ser mais adequado e significativo). Clique sobre o nome atual do circuito para colocar sua caixa de texto no modo ativo (Fig. 2.12). Sempre que uma caixa de texto ou componente se encontra no modo ativo, significa que podem ser modificados.



Figura 2.12 Caixa de texto do título do circuito ativada

Fonte: elaborada pelo autor.

Após digitado o novo título, tecla *Enter* e o processo estará finalizado (Fig. 2.13).



Figura 2.13 Título do circuito alterado

Fonte: elaborada pelo autor.

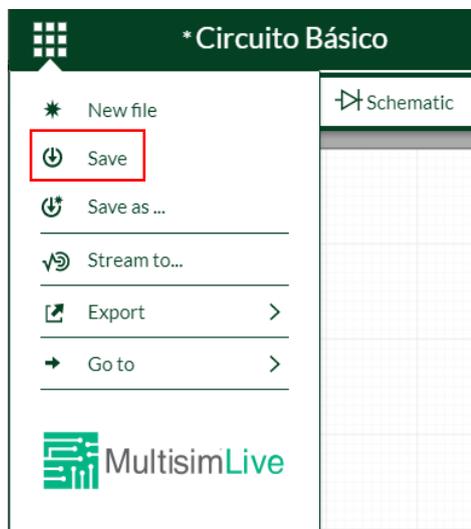


Figura 2.14 Salvando alterações no circuito

Fonte: elaborada pelo autor.

Entretanto, perceba a esquerda da caixa de texto a presença de um asterisco (*), ele aparece sempre que alguma alteração é feita no circuito sem que tenha sido salva. Para salvar qualquer modificação no circuito, clique em *File navigation menu* localizado no canto superior esquerdo da tela do simulador. Na janela que aparecer clique *Save* (Fig. 2.14).

Após salvar o arquivo o asterisco desaparece (Fig. 2.15), até que novas modificações sejam realizadas.



Figura 2.15 Alterações salvas

Fonte: elaborada pelo autor.

Existe a possibilidade de, ao mesmo tempo, modificar o nome do arquivo e salvar as alterações se em *File navigation menu* seleciona-se *Save as...* Na janela que abrir, basta digitar o novo nome em *Name* e clicar em *OK* para finalizar (Fig. 2.16).



Figura 2.16 Opção *Save as...*

Fonte: elaborada pelo autor.

2.3.2 Construindo o circuito

Agora, que já sabemos modificar o nome e salvar um projeto, é hora de iniciar a construção do circuito mostrado na Fig. 2.9.

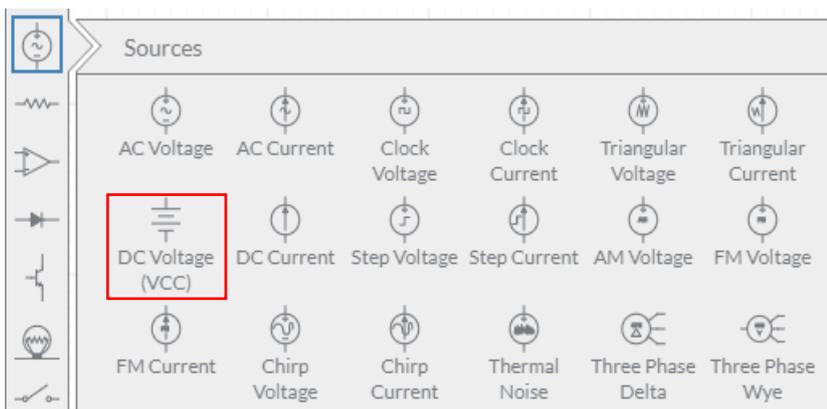


Figura 2.17 Adicionando uma fonte de tensão contínua

Fonte: elaborada pelo autor.

Nota!

- O *Multisim Live* não exige que o leitor salve um circuito, muitos menos que lhe dê um nome, para que possa executá-lo. Mas não custa alertá-lo sobre a dor de cabeça que pode ser não salvar determinado arquivo. Sem contar que nomear seus trabalhos mantém sua pasta organizada e facilita a localização de um projeto específico.

Clique com o botão esquerdo do mouse sobre a opção *Sources* da barra de dispositivos. Após essa ação, uma janela será exibida com todas as fontes disponíveis. Selecione a opção *DC Voltage* (Fig. 2.17) clicando uma vez com o botão esquerdo do mouse. O símbolo da bateria aparecerá na tela próximo à posição do cursor. Mova-o para o local desejado sobre a área de desenho e, com um único clique no botão esquerdo do mouse, a fonte será inserida. Caso deseje movê-la para outra posição, clique com o botão esquerdo do mouse sobre a mesma e segure, arraste até a posição desejada e solte o botão. Observe que agora o símbolo que representa a bateria está destacada, dizemos que se encontra em modo ativo (Fig. 2.18) e, como já foi mencionado, poderemos realizar algumas modificações.

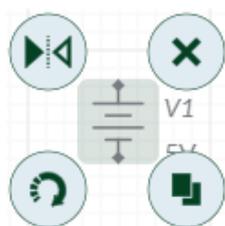


Figura 2.18 Fonte de tensão no modo ativo

Fonte: elaborada pelo autor.

Nesta configuração podemos apagar a fonte acionando a tecla *Delete* ou clicando no *X*, rotacionar com a seta, espelhar horizontalmente com os dois triângulos ou copiar com os dois retângulos. Para desmarcar a fonte e tirar do modo ativo basta clicar com o botão esquerdo do mouse em qualquer ponto da área de projeto. Vamos alterar o *ID* (identificação ou rótulo) da fonte de *V1* para *Fonte*, para tanto basta dar um duplo clique sobre o *ID* atual (*V1*), uma caixa de texto aparecerá, nela digite o novo rótulo (Fig. 2.19).

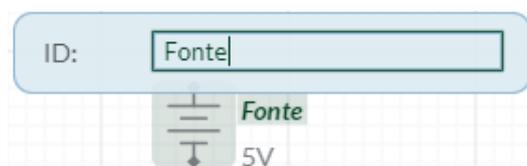


Figura 2.19 Modificando *ID* da fonte

Fonte: elaborada pelo autor.

Ao final, clique com o botão esquerdo do mouse em qualquer ponto da área de desenho que o novo *ID* estará salvo. Modifique o valor da tensão nominal da fonte para 5 volts. Para isso, dê um duplo clique sobre o valor atual e uma caixa de texto com um cursor será exibido. A modificação também pode ser realizada digitando o novo valor diretamente na caixa de texto, movendo o curso para os lados ou utilizando as setas verticais (Fig. 2.20).

Quando preciso, é possível trocar o sinal do valor nominal da fonte, bastando clicar sobre *+/-* no interior do círculo azul presente na Fig. 2.20. Esses procedimentos são bem intuitivos, sendo comum a todos os dispositivos que utilizaremos a partir de agora. Portanto, conclui-se que esses passos já estão compreendidos e não serão repetidos. Similarmente, de agora em diante, sempre que for mencionado um clique ou duplo clique entenda que é uma referência ao botão esquerdo do mouse. Cliques utilizando o botão direito sempre serão mencionados explicitamente.

Nota!

- Fique atento, o simulador aceita apenas ponto (.), dessa forma nunca utilize virgula (,) para indicar números não inteiros.

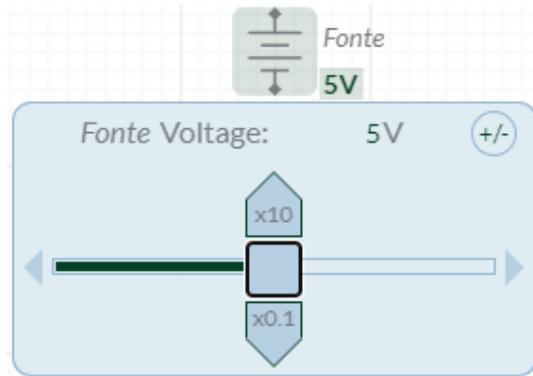


Figura 2.20 Modificando *tensão* da fonte

Fonte: elaborada pelo autor.

Continuando com a construção do circuito, é necessário inserir o resistor. Clique na opção *Passive* da barra de dispositivos. Uma janela é exibida com todos os componentes passivos disponíveis. Clique sobre a opção *Resistor* (Fig. 2.21).

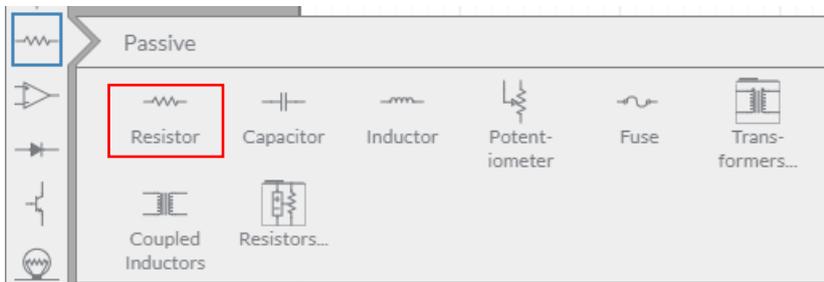


Figura 2.21 Adicionando um resistor

Fonte: elaborada pelo autor.

Como antes, o símbolo do resistor aparecerá na tela próximo à posição do cursor. Mova-o para o lado direito da fonte, coloque-o na direção vertical e utilize o valor nominal de 100 ohms. Você já é capaz de realizar essas alterações.

Os circuitos elétricos presentes nos livros de Física do ensino médio, raramente apresentam um ponto de ligação à Terra. Porém, o *Multisim Live* exige a presença desse ponto. Na barra de componentes clique *Schematic connectors* e na janela que abrir clique em *Ground* (Fig. 2.22). Na sequência, posicione-o conforme indicado na Fig. 2.23 (mas você deve ficar à vontade para criar um arranjo que julgar mais agradável).

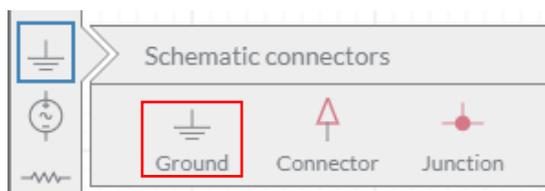


Figura 2.22 Adicionando aterramento

Fonte: elaborada pelo autor.

Tenha por hábito criar circuitos organizados e bem objetivos, isso facilita a compreensão do circuito como um todo por outras pessoas e, principalmente, por seus alunos.

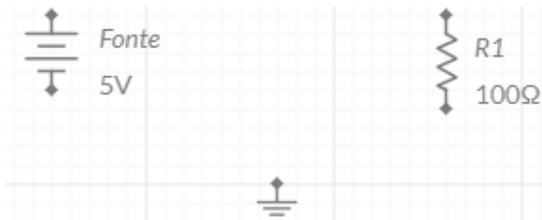


Figura 2.23 Configuração dos componentes

Fonte: elaborada pelo autor.

Com todos os componentes localizados e a disposição, o próximo passo consiste na interconexão entre eles. Posicione o cursor do mouse exatamente sobre a extremidade superior da fonte, note que o cursor se transforma em um carretel de fio. Quando isso acontecer dê um clique, em seguida arraste o carretel até a extremidade do próximo componente. Enquanto o carretel é arrastado surge um fio que fará a conexão entre os componentes (Fig. 2.24).



Figura 2.24 Conectando os componentes

Fonte: elaborada pelo autor.

Repita o procedimento até que todos os componentes estejam conectados. Dá mesma forma que os componentes podem ser deslocados ou apagados, o mesmo ocorre com os fios. Dessa forma é possível ajustar o circuito até a configuração desejada. O *Multisim Live* enumera os fios, e o zero sempre está relacionado aos fios conectados à terra.

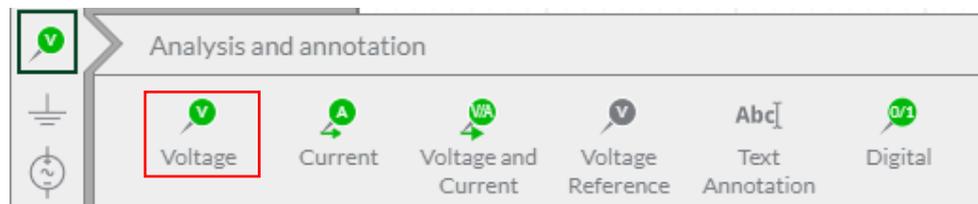


Figura 2.26 Selecionando um *PROBE* de tensão

Fonte: elaborada pelo autor.

Pronto, o circuito está finalizado e já se pode simular, correto? Não é bem assim, para que a simulação seja executada corretamente o *Multisim Live* exige a conexão de no mínimo um *PROBE* (ponta de prova). Se essa exigência não for cumprida, o simulador sinaliza erro. E faz sentido! Que utilidade teria a simulação de um circuito elétrico sem nenhum dispositivo que indique a tensão e/ou corrente que percorre a carga? Serão utilizados dois *PROBES*, um para indicar a tensão e outro para registrar a corrente através do resistor. Na barra de componentes, clique sobre *Analysis and annotation*, em seguida selecione *Voltage* (Fig. 2.26).

Nota!

- Facilita o processo se a tela de projeto é ampliada. Existe duas formas de se fazer isso, clicando sobre o botão + (*Zoom in*) localizado no canto superior direito (Fig. 2.25) ou rolando o *scroll* do mouse para a frente.



Figura 2.25 *Zoom in*

Fonte: elaborada pelo autor.

Posicione-o sobre o fio 1 (superior) e do lado direito deste (Fig. 2.27).

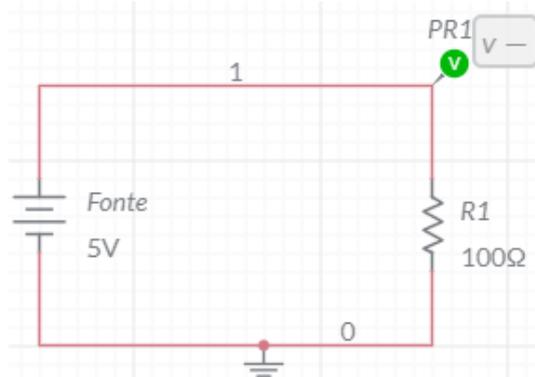


Figura 2.27 Posicionando o *PROBE* de tensão

Fonte: elaborada pelo autor.

Novamente, na barra de componentes, clique sobre *Analysis and annotation*, na janela que aparecer selecione o dispositivo *Current* (Fig. 2.28). Posicione-o sobre o fio 1 e do lado esquerdo (Fig. 2.29). Uma outra possibilidade é utilizar o *PROBE Voltage and Current*, ele fornece as duas leituras. Isso pode ajudar a organizar o circuito quando o mesmo apresentar muitos componentes.

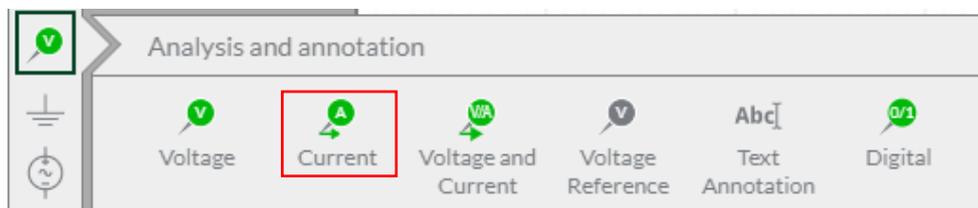


Figura 2.28 Selecionando um *PROBE* de corrente

Fonte: elaborada pelo autor.

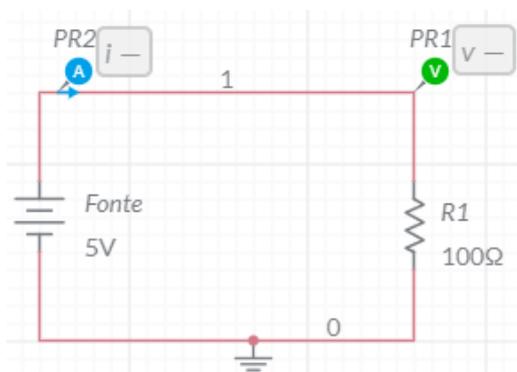


Figura 2.29 Posicionando o *PROBE* de corrente

Fonte: elaborada pelo autor.

Todo esse cuidado na localização dos dispositivos de medida e modificação na orientação dos componentes é essencial para uma boa visualização do circuito como um todo, isso evita que a leitura das tensões e correntes fiquem sobrepostas aos outros componentes e comprometa a leitura das medidas. Essa organização é imprescindível em circuitos mais complexos. Agora sim, está tudo pronto para a execução do programa e verificação dos resultados.

Nota!

- Não esqueça de salvar todas as alterações realizadas no projeto
- Convém destacar que o medidor de corrente não é exatamente um amperímetro (o qual necessita da abertura do circuito para sua inserção em série), mas sim uma simples ponta de prova (*PROBE*). O professor deve deixar claro a diferença entre as formas de trabalhar com uma ponta de prova e um amperímetro.

2.3.3 Simulação

A barra de simulação oferece muitas opções para realizar a análise de um circuito durante sua execução. Por padrão, o *Multisim Live* oferece o modo *Interactive* (Interativo). Todas as simulações de circuitos utilizando instrumentos ou pontas de prova podem ser executadas com esse tipo padrão. Dessa forma, esse modo servirá para a análise do circuito básico. Quando forem precisos outros tipos de visualização de resposta, então deve-se selecionar um outro tipo de simulação, mas em todo este livreto apenas o modo *Interactive* será utilizado.

Clicando sobre o triângulo do lado direito da barra de simulação (Fig. 2.30) você poderá verificar todos os tipos de simulação suportadas pelo *Multisim Live Free*.

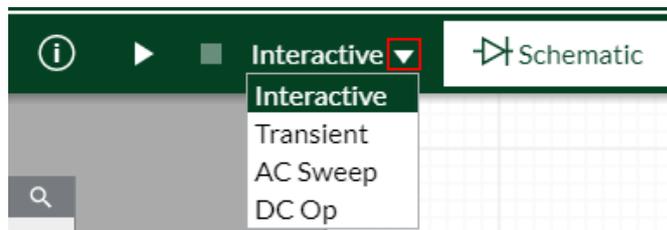


Figura 2.30 Tipos de modo de simulação disponíveis

Fonte: elaborada pelo autor.

Dito isso e o modo interativo já estando selecionado, a análise é iniciada clicando sobre o botão *Run simulation*, o triângulo localizado do lado esquerdo da barra de simulação (Fig. 2.31).



Figura 2.31 Botão de inicialização da simulação

Fonte: elaborada pelo autor.

No modo interativo, a simulação termina apenas quando você parar. Durante a execução é possível pausar e retomar a análise quantas vezes precisar. Enquanto não parar, o relógio vai marcando o tempo corrente, conforme Fig. 2.32.

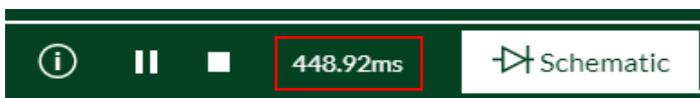


Figura 2.32 Modo interativo de simulação em execução

Fonte: elaborada pelo autor.

E o resultado da simulação, corrente e tensão através do resistor, é mostrado na Fig. 2.33.

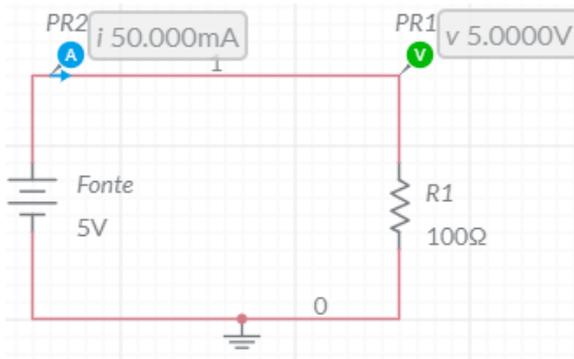


Figura 2.33 Leitura dos sinais nos PROBES de tensão e corrente

Fonte: elaborada pelo autor.

Lembre-se que o **PROBE** mostra a tensão de um ponto com relação ao **GROUND** (terra) do circuito. Para uma leitura de tensão com outro ponto de referência, clique sobre o **PROBE** de tensão para colocá-lo em modo ativo (Fig. 2.34). Na sequência clique em **V-**, fazendo isso o **PROBE** de referência fica perto do ponteiro do mouse. Fixe a referência abaixo, menor potencial, do resistor (Fig. 2.35). Pronto, agora o **PROBE** indicará a tensão em relação a referência que você acabou de criar. Isso significa dizer que, neste caso, teremos exatamente a tensão sobre o resistor. Note que o **ID** do medidor de potencial muda de **PROBE** para **PROBE PR1+** indicando que agora o medidor utiliza como referência o ponto no qual **REF1** está conectado.

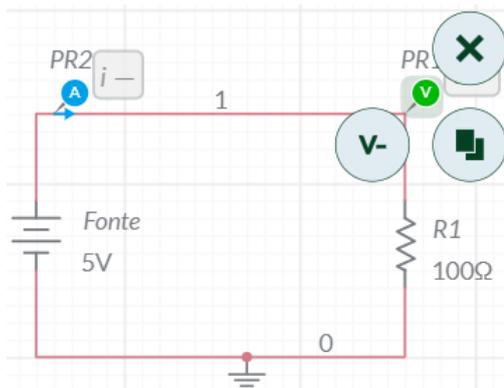


Figura 2.34 Colocando PROBE de tensão em modo ativo

Fonte: elaborada pelo autor.

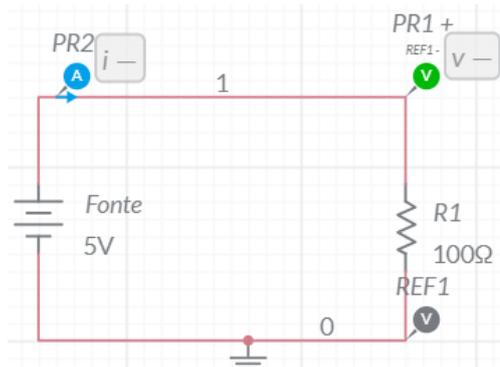


Figura 2.35 Criando novo ponto de referência para medida do potencial

Fonte: elaborada pelo autor.

Para retirar o *Grid* (malha quadriculada) da área de desenho, sem que nenhum dispositivo esteja selecionado, clique sobre *Open configuration pane* (Fig. 2.36), na janela que abrir deslize a barra para baixo e desmarque a seleção em *Grid* (Fig. 2.37).

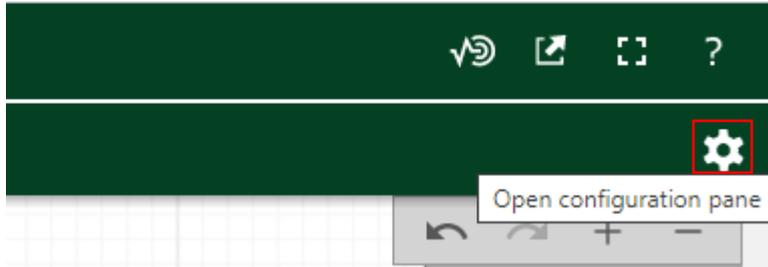


Figura 2.36 Botão *Open configuration pane*

Fonte: elaborada pelo autor.

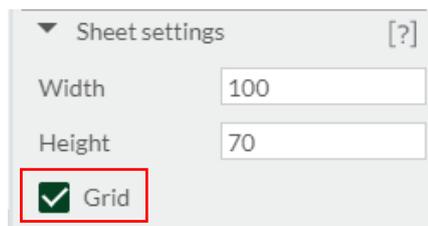


Figura 2.37 *Grid* ligado

Fonte: elaborada pelo autor.

Para alterar as dimensões da área de projeto é necessário modificar os valores contidos em *Width* (largura) e *Height* (altura) e teclar *Enter* após cada modificação.

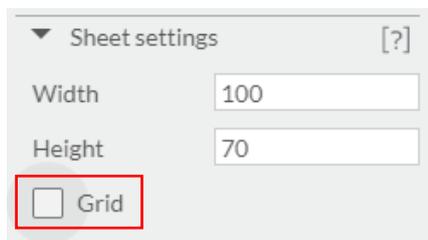


Figura 2.38 *Grid* desligado

Fonte: elaborada pelo autor.

3

CAPÍTULO 3

Tópicos

3.1 Introdução

3.2 Definição

3.3 Classificação das fontes de tensão

Fonte Ideal de Tensão



Fonte: <https://www.techtodo.com.br/dicas-e-tutoriais/noticia/2015/04/saiba-como-escolher-uma-bom-fonte-de-alimentacao-para-montar-um-pc-gamer.html>. Acesso em: 08 janeiro 2021.

▲ Esta é uma fonte ultra moderna para computadores de mesa, responsável por distribuir energia para todo o computador. Se a fonte é ruim, o computador não tem o rendimento esperado, principalmente se for preciso alta performance, como em um *PC gamer*.

Neste capítulo estudaremos um pouco sobre fontes de tensão, elementos tão importantes para o funcionamento de circuitos elétricos. Classificação, representação e características das fontes de tensão são alguns dos pontos abordados.

3.1 Introdução

Equipamentos eletroeletrônicos são projetados para as mais variadas funções, tais como, comunicação, computação, controle, potência, processamento de sinais e imagens, dentre outras. Muito embora sejam empregados em aplicações distintas todos têm em comum o fato de serem formados por circuitos que, por sua vez, por mais simples ou complexos que sejam, precisam de quantidades específicas de energia para funcionar. Em um laboratório de eletrônica, com o objetivo de suprir essa necessidade por energia, lançamos mão das fontes de tensão e das fontes de corrente, que nos permite controlar com precisão a tensão e a corrente elétrica que o circuito requer.

Também em nossas residências nos deparamos com esse probleminha, muitos dos dispositivos que utilizamos, celular, *laptop*, impressora, não podem ser ligados diretamente em tomadas, dessa forma os fabricantes desses equipamentos disponibilizam as fontes de alimentação, que nada mais são que um tipo de fonte de tensão. Para ilustrar a situação, verifique as especificações gravadas no carregador (fonte de alimentação) do seu celular. Os valores encontrados podem variar de um modelo para outro e entre as várias marcas existentes no mercado, contudo, servirá para que você tenha uma ideia do que estamos falando.

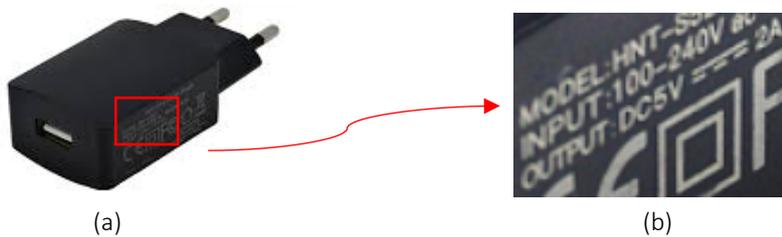


Figura 3.1 (a) Carregador de celular e (b) imagem ampliada com os valores nominais de entrada e saída

Fonte: <https://pixabay.com/pt/photos/carregador-usb-corrente-4904649/>. Acesso em: 04 dezembro 2020

Na Fig. 3.1 temos (a) um carregador de celular de uma das marcas mais populares no mercado e (b) a imagem ampliada da lateral do carregador na qual encontram-se os valores nominais de entrada e saída desse dispositivo. A imagem ampliada mostra que o modelo de fonte trabalha com os seguintes níveis de saída: tensão elétrica de 5 V e corrente elétrica de 2.0 A. Note, ainda, que esses valores são de tensão e corrente contínuas, bem diferentes dos 220 V de tensão alternada presente em nossas tomadas residenciais.

3.2 Definição

Fonte ideal de tensão é um elemento ativo de circuito que fornece uma tensão constante entre seus terminais não importando a carga a ela conectada. O termo ideal sugere que sua resistência interna é nula, tratando-se, portanto, de um modelo idealizado (Neste texto, sempre que uma fonte for mencionada, estará implícito que se trata de uma fonte ideal).

Lembre-se!

- **Circuito elétrico** consiste em uma interconexão de elementos elétricos através da qual pode haver um movimento ordenado de portadores e de carga elétrica (ALEXANDER; SADIKU, 2013, p. 4).

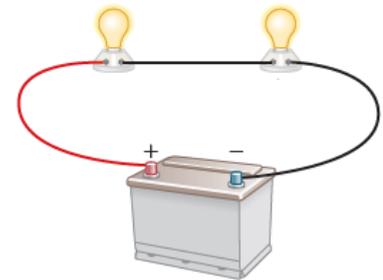


Figura 3.2 Circuito simples: Fonte: Serway e Jewett (2014, com adaptações)

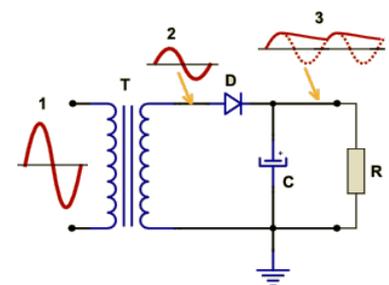


Figura 3.3 Circuito mais complexo: retificador de meia

Fonte: <http://www.eletronpi.com.br/ce-035-retificador-meia-onda.aspx>. Acesso em: 09 janeiro 2021.

Pertence ao grupo dos elementos ativos porque gera energia e fornece potência ao circuito, caso contrário seria denominada elemento passivo. Outros representantes dos elementos ativos são geradores, baterias e amplificadores operacionais. Exemplos de elementos passivos são resistores, capacitores e indutores (ALEXANDER; SADIKU, 2013, p. 12).



Figura 3.4 Fonte de alimentação para bancada

Fonte: <http://www.minipa.com.br/instrumentos-de-bancada/fontes-de-alimentacao/133-mpl-1305m>. Acesso em: 09 janeiro 2021.

As fontes de bancada, tais como as da Fig. 3.4, não são ideais, mas quanto melhor a qualidade dos componentes utilizados em sua fabricação mais próximas dessa condição elas operam. Pilhas e baterias, longe de serem fontes ideais, são recursos largamente utilizados para obtenção de energia, esses dispositivos são denominados geradores elétricos.



Figura 3.5 Geradores elétricos

Fonte: <https://universonerd.net/portal/ensino/dicas-e-curiosidades/mitos-e-verdades-sobre-pilhas-e-baterias/>. Acesso em: 09 janeiro 2021.

3.3 Classificação das fontes de tensão

Uma fonte de tensão pode ser classificada como **independente** ou **dependente** (que em alguns casos são denominadas controladas).

3.3.1 Fonte ideal de tensão independente

Uma fonte de tensão é denominada independente quando estabelece uma tensão constante entre seus terminais sem depender da

Lembre-se!

- Sempre que deslocamos uma carga pontual q de um ponto **A** até um ponto **B** através de um campo elétrico, a força elétrica realiza sobre a partícula um trabalho τ_{AB} , dado por:

$$\tau_{AB} = q(\vartheta_A - \vartheta_B)$$

em que ϑ_A é o potencial na posição inicial da carga q e ϑ_B , o potencial na posição final. Enquanto que a grandeza $\vartheta_A - \vartheta_B$ é a diferença de potencial (ddp) ou tensão elétrica entre os pontos A e B (BÔAS; DOCA; BISCUOLA, 2012, p. 71).

Escrevendo de uma outra forma...

A tensão elétrica entre os polos de um gerador corresponde a diferença de potencial existente entre os polos. Essa tensão elétrica será indicada por **U**, onde:

$$U = V_A - V_B$$

Nos circuitos elétricos não é conveniente trabalharmos com o valor do potencial de seus pontos, mas sim com a tensão entre eles (CALÇADA; SAMPAIO, 2012, p. 26).

tensão ou corrente de nenhum outro ponto do circuito. Nas palavras de Alexander e Sadiku (2013, p. 13), “[...] uma fonte de tensão independente ideal libera para o circuito a corrente que for necessária para manter a tensão em seus terminais”.

A Fig. 3.6 exibe os símbolos utilizados para representar fontes de tensão independente. Elas ficam bem definidas apenas com o valor da tensão fornecida (V_s) e sua polaridade de referência.

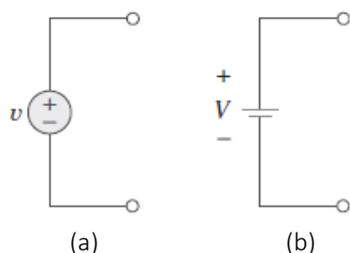


Figura 3.6 Símbolos para fontes de tensão independente: (a) usada para tensão constante ou variável com o tempo (AC); (b) utilizada para tensão constante (CC).

Fonte: Alexander e Sadiku (2013, p. 14).

No *Multisim Live*, as fontes de tensão contínua (CC) e as fontes de tensão alternante ou alternada (AC) são representadas conforme mostrado na figura abaixo:

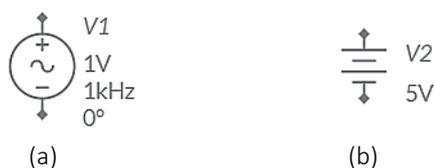


Figura 3.7 Símbolos para fontes de tensão independente: (a) usada para tensão variável com o tempo (AC); (b) utilizada para tensão constante (CC).

Fonte: elaborada pelo autor.

Agora, utilizaremos o *Multisim Live* para verificarmos o comportamento de uma fonte ideal de tensão independente. Primeiro desenhamos o circuito mostrado na Figura 3.8 onde, inicialmente, temos uma fonte ideal de tensão contínua de 5 volts em série com um resistor de 1 ohm, que fará o papel de carga e algumas pontas de prova para indicação dos potenciais nos terminais do resistor e da corrente através dele.

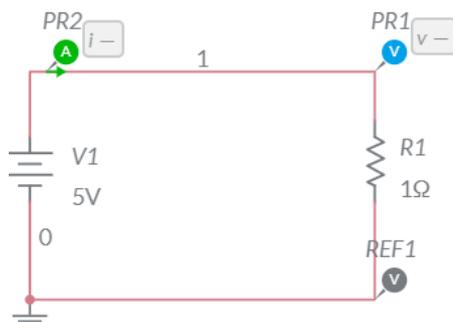


Figura 3.8 Fonte ideal de tensão contínua de 5 volts em série com um resistor de 1 ohm.

Fonte: elaborada pelo autor.

A ideia é fazer simulações nas quais o valor do resistor é alterado enquanto esperamos que a tensão da fonte seja mantida constante (Fig. 3.9).

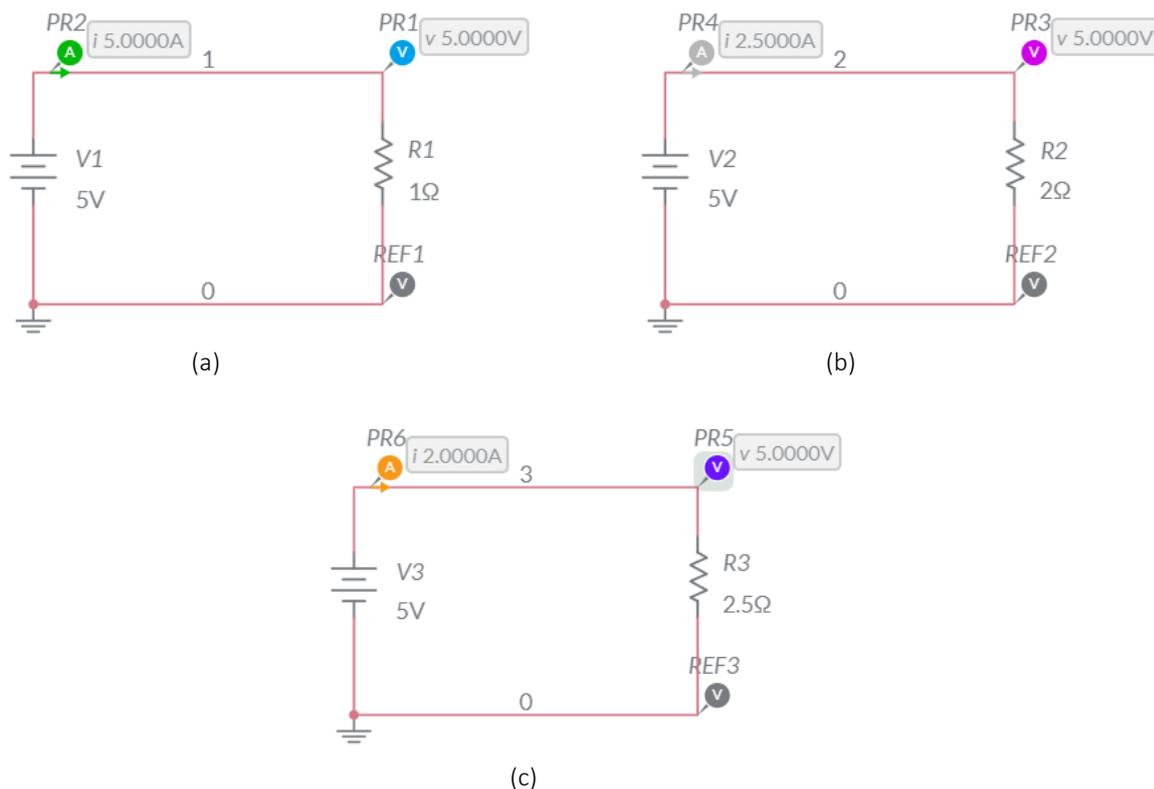


Figura 3.9 Fonte ideal de tensão contínua de 5 volts em série com um resistor de (a) 1 ohm, (b) 2 ohms e (c) 2,5 ohms.

Fonte: elaborada pelo autor.

A Fig. 3.9 nos mostra que a fonte ideal cumpriu o seu papel: manteve a tensão de 5 volts constante em todos os circuitos, a despeito do resistor utilizado como carga. Evidentemente que as correntes, obedecendo a primeira lei de ohm, será diferente para cada carga adicionada ao sistema.

3.3.2 Fonte ideal de tensão dependente (controladas)

Fontes dependentes estabelecem tensões cujas intensidades

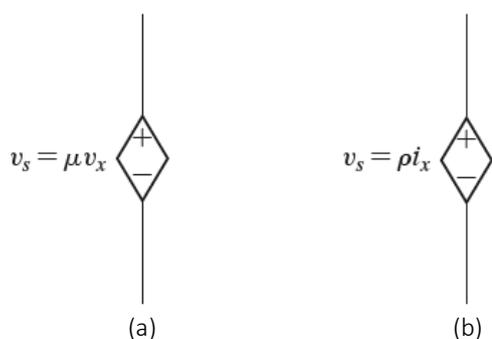


Figura 3.10 Símbolos de circuito para (a) uma fonte ideal de tensão com controle de tensão e (b) uma fonte ideal de tensão com controle de corrente.

Fonte: Nilsson e Riedel (2015, com adaptações).

depende do valor de uma tensão ou corrente em outro ponto do circuito. Quando se trata de fontes dependentes, são adotados os símbolos de circuito apresentados na Fig. 3.10. Enquanto que, para essas mesmas fontes, o *Multisim Live* utiliza as seguintes representações:



Figura 3.11 Símbolos de circuito para (a) uma fonte ideal de tensão com controle de tensão e (b) uma fonte ideal de tensão com controle de corrente.

Fonte: elaborada pelo autor.

Elas podem ser acessadas indo até a paleta de componentes, clicar em *modeling blocks* e, na subpaleta que aparece, selecionar *Voltage Controlled Voltage Source* se deseja uma fonte de tensão controlada por tensão ou *Current Controlled Voltage Source* para uma fonte de tensão controlada por corrente, conforme detalhado na Fig. 3.12.

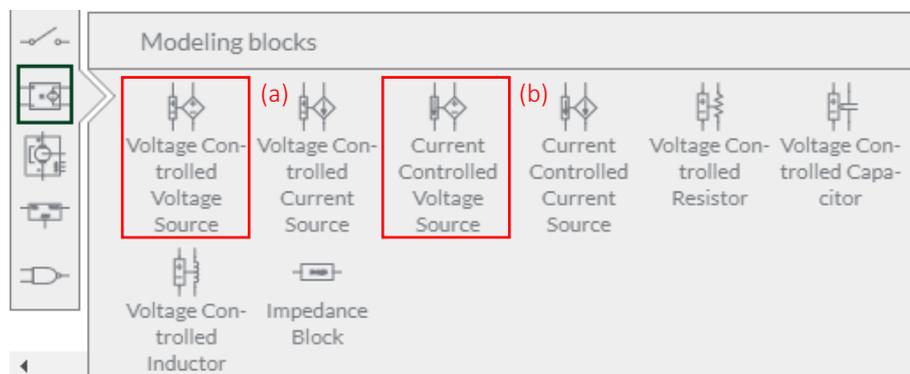


Figura 3.12 Seleção de (a) uma fonte ideal de tensão com controle de tensão e (b) uma fonte ideal de tensão com controle de corrente.

Fonte: elaborada pelo autor.

Para que uma fonte ideal de tensão dependente seja completamente especificada é necessário explicitar, junto ao símbolo, a tensão ou corrente de controle, a equação que permite calcular a tensão fornecida a partir da tensão ou corrente de controle e a polaridade de referência para a tensão fornecida. Especificar completamente uma fonte de tensão ideal dependente no circuito somente será possível se conhecermos o valor da tensão ou corrente da qual ela depende (NILSSON; RIEDEL, 2009, p. 16).

A Fig. 3.13 mostra um esquemático de todos os parâmetros que definem por completo uma fonte de tensão ideal dependente. Observe que μ é uma constante multiplicativa adimensional, por se tratar de uma fonte de tensão controlada por tensão.

O circuito da Fig. 3.14 nos ajudará a entender melhor como se dá o funcionamento de uma fonte de tensão dependente. Observe que no Circuito 1 a tensão da fonte é igualmente dividida entre os dois resistores, ou seja, R1 e R2 estão submetidos a uma tensão de 2,5 volts. Note ainda, que a fonte controlada está em paralelo com o resistor R2, o que significa que o Circuito 2 é controlado pela tensão nesse resistor.

Como a constante de multiplicação é 1V/V (1volt/1volt), significa dizer que a fonte controlada fornece uma tensão de 2,5 volts através do LED, o que nos é confirmado pela Fig. 3.15.

Nota!

- Transistores, amplificadores operacionais e circuitos integrados são alguns elementos de circuitos que podem ser modelados por fontes dependentes (ALEXANDER; SADIKU, 2013, p. 14).

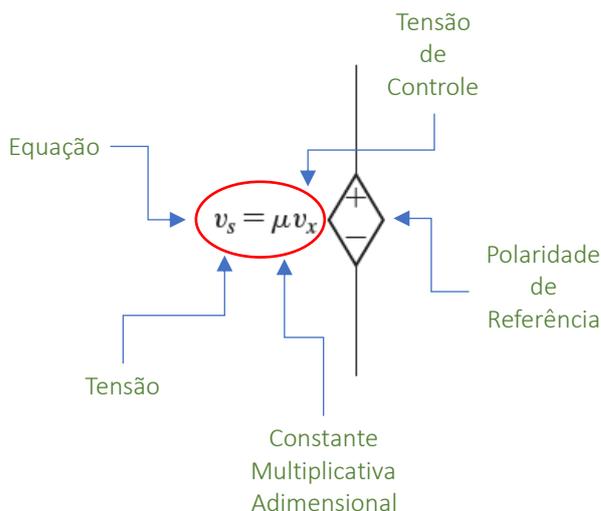


Figura 3.13 Especificações dos parâmetros de uma fonte ideal de tensão dependente controlada por tensão

Fonte: elaborada pelo autor.

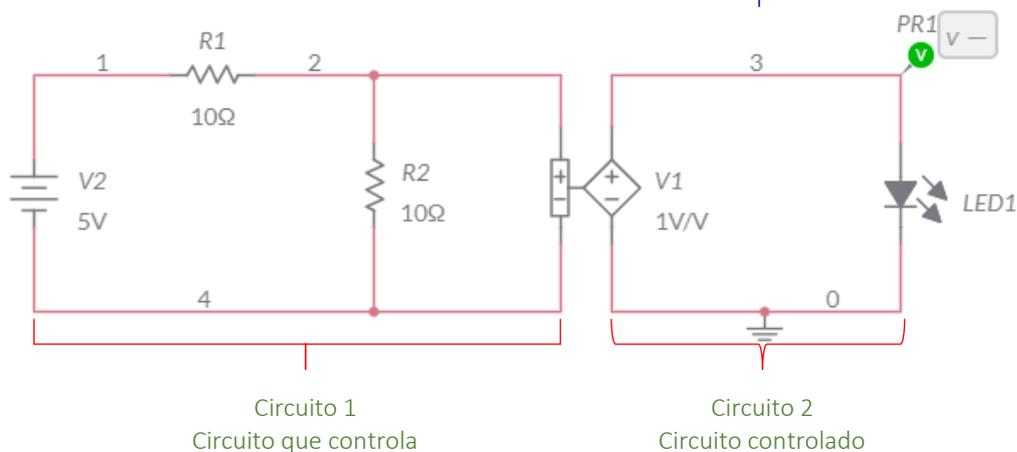


Figura 3.14 Circuito com fonte de tensão controlada por tensão na razão 1volt/1volt

Fonte: elaborada pelo autor.

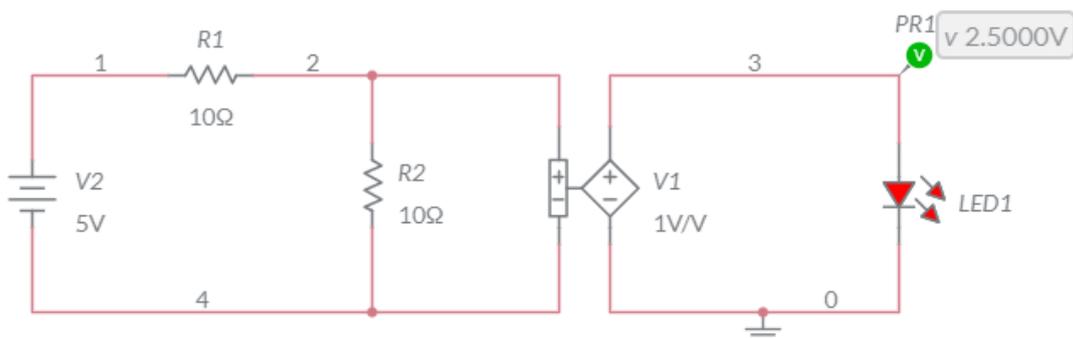
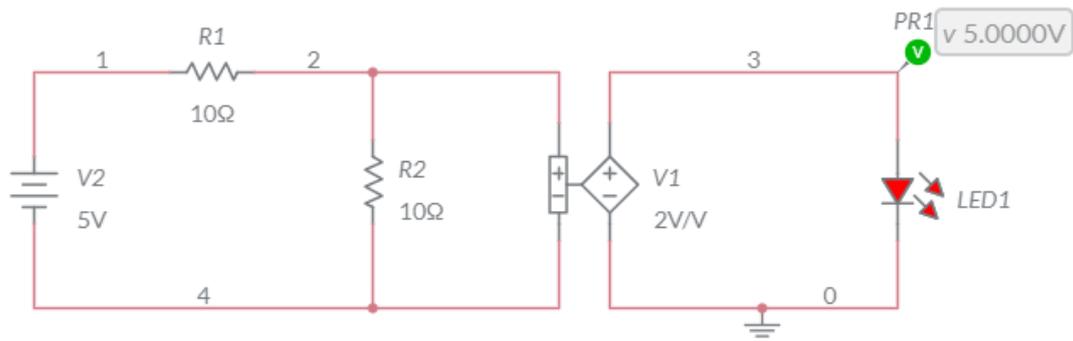


Figura 2.13 A fonte de tensão controlada é controlada pela tensão no resistor na razão 1volt/1volt

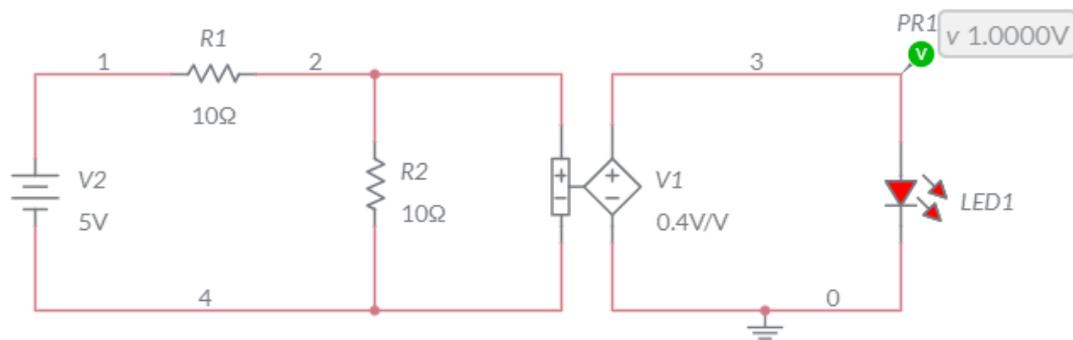
Fonte: elaborada pelo autor.

E para encerrar, vamos investigar o que acontece quando a constante de multiplicação é alterada para 2 volts/volt e depois para

0,4 volt/volt. Observe o resultado na figura seguinte.



(a)



(b)

Figura 2.13 Em (a) a fonte de tensão controlada é controlada pela tensão no resistor na razão 2volt/1volt e em (b) a fonte de tensão controlada é controlada pela tensão no resistor na razão 0,4 volt/1volt

Fonte: elaborada pelo autor.

A tensão através de R2 continua sendo 2,5 volts e essa será a tensão de controle. Na situação mostrada pela Figura 2.13(a) a constante de multiplicação é 2 volts/ volt, logo a fonte controlada fornece duas vezes a tensão que recebe ao LED. E por fim, na Figura 2.13(b) a tensão fornecida ao LED será 0,4 vezes 2,5 volts, o que resulta em 1 volt.

4

CAPÍTULO 4

Tópicos

4.1 Introdução

4.2 Definição

4.3 Classificação da fonte de corrente

Fonte Ideal de Corrente



Fonte: <https://www.casasbahia.com.br/fonte-para-notebook-positivo-stilo-ds3000-19v-342a/p/1501264844>. Acesso em: 10 janeiro 2021.

▲ Esta é uma fonte para *notebook* com corrente máxima de saída de 3,42 ampères. Você provavelmente não se preocupou em ler as especificações da fonte do seu *laptop*, mas se ele tem mais de dois anos é quase certeza de que você seja totalmente dependente dela.

Neste capítulo estudaremos um pouco sobre fontes de corrente, elementos tão importantes quanto as fontes de tensão. Classificação, representação e características das fontes de corrente são alguns dos pontos abordados.

4.1 Introdução

Em laboratórios de eletrônica é fundamental a presença de fontes de bancada que quase sempre possuem dupla função, ou seja, no mesmo *hardware* temos a fonte de tensão e corrente, bastando girar e/ou pressionar alguns botões para selecionar a função desejada (Fig. 3.1).



Figura 4.1 Fonte de bancada com dupla função: fonte de tensão e corrente

Fonte: <https://www.baudaeletronica.com.br/fonte-de-alimentacao-hikari-hf-3205.html>. Acesso em: 10 janeiro 2021.

Observe que na tela está indicando a tensão de 32 volts e a corrente de 3 ampères e logo abaixo da tela os botões que permitem controlar esses valores de saída.

4.2 Definição

Uma **fonte de corrente ideal** é um elemento ativo de circuito que fornece uma corrente constante entre seus terminais independentemente da carga a eles conectada. No capítulo anterior aprendemos a reconhecer elementos ativos e passivos, dessa forma, não nos repetiremos. Contudo, o termo ideal presente na definição merece uma atenção especial. Diferentemente da fonte de tensão, uma fonte de corrente somente será considerada ideal quando apresentar resistência

interna infinita quando compara à resistência da carga a ela conectada. Resistência infinita, da mesma forma que resistência nula, não existe e estamos mais uma vez utilizando um modelo idealizado.

4.3 Classificação das fontes de corrente

Uma fonte de corrente pode ser classificada como independente ou dependente.

4.3.1 Fonte ideal de corrente independente

Uma fonte ideal de corrente é denominada independente

Lembre-se!

- Corrente elétrica é nome dado ao movimento ordenado de portadores de carga elétrica. A corrente elétrica surge como consequência da diferença de potencial elétrico (ddp) ou tensão elétrica entre dois pontos de um circuito elétrico (BÔAS; DOCA; BISCUOLA, 2012, p. 113).

A definição acima é denominada sentido real da corrente elétrica. Entretanto nos circuitos elétricos utilizamos sempre o sentido convencional que é igual ao sentido do campo elétrico no interior do condutor (JUNIOR; FERRARO; TOLEDO, 2009, p. 114).

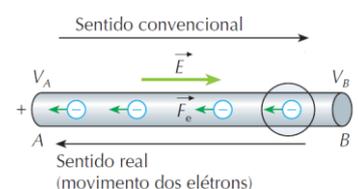


Figura 4.2 Representação gráfica dos sentidos real e convencional da corrente elétrica

Fonte: Ramalho, Nicolau e Toledo (2009, com adaptações).

quando estabelece uma corrente constante entre seus terminais sem depender da tensão ou corrente de nenhum outro ponto do circuito.

Na Fig. 4.3 temos os símbolos utilizados para representar fontes de corrente independente em esquemas de circuito. Para que essas fontes sejam bem definidas é necessário apenas o valor da corrente fornecida (I_s) e sua direção de referência.

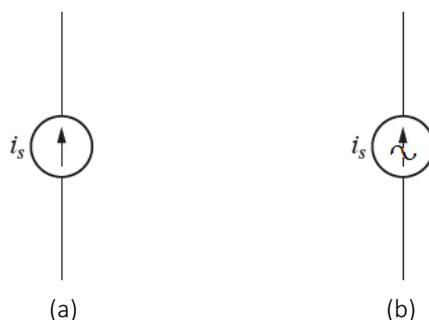


Figura 4.3 Símbolos para fontes de corrente independente: (a) usada para corrente constante ou variável com o tempo (AC); (b) utilizada para corrente variável (AC).

Fonte: Nilsson e Riedel (2015, com adaptações).

No *Multisim Live*, as fontes de corrente contínua (CC) e alternada (AC) são representadas conforme Fig. 4.4.



Figura 4.4 Símbolos para fontes de corrente independente: (a) utilizada para corrente constante (CC); (b) usada para corrente variável com o tempo (AC).

Fonte: elaborada pelo autor.

O circuito representado na Fig. 4.5 nos ajudará a investigar o comportamento de uma fonte ideal de corrente independente.

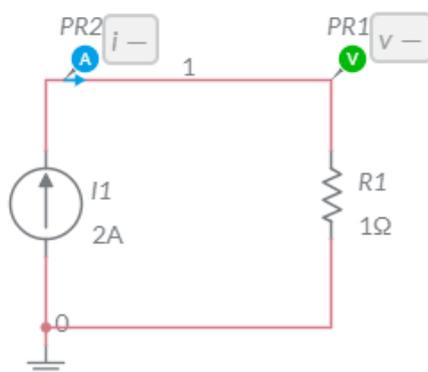


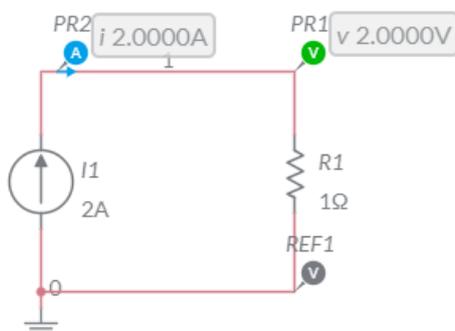
Figura 3.5 Fonte ideal de corrente contínua de 2 ampères em série com um resistor de 1 ohms.

Fonte: elaborada pelo autor.

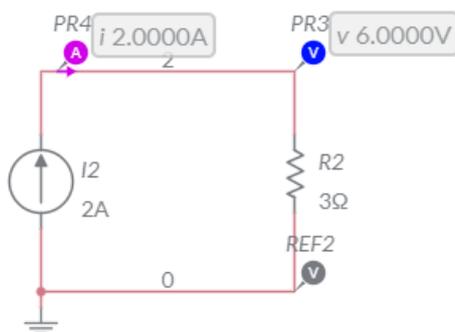
Inicialmente, temos uma fonte ideal de corrente contínua de 2 ampères em série com um resistor (nossa carga) de 1 ohm e algumas pontas prova de para indicação dos potenciais nos terminais do resistor e da corrente através dele.

A ideia é fazer simulações nas quais não modificamos a corrente da fonte, mas o valor do resistor é alterado (Fig. 4.6).

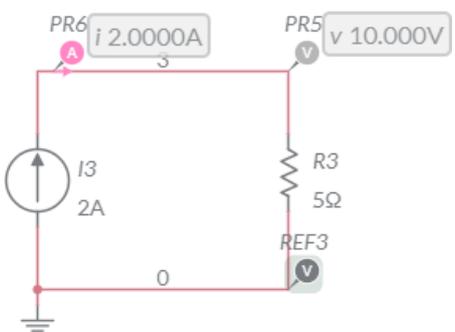
É possível ver claramente na figura 4.6 que a fonte ideal de corrente teve exatamente o comportamento esperado: entregou a cada um dos circuitos a corrente constante de 2 A, a despeito do resistor utilizado como carga. Evidentemente que as tensões, obedecendo a primeira lei de ohm, é diferente para cada carga adicionada ao sistema. Experimente desenhar circuitos mais complexos e tente estimar o que irá acontecer e comprove através do simulador se suas expectativas estavam corretas.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.6 Fonte ideal de corrente contínua de 2 volts em série com um resistor de (a) 1 ohm, (b) 3 ohms e (c) 5 ohms.

Fonte: elaborada pelo autor.

4.3.2 Fonte ideal de corrente dependente (controladas)

Fontes ideais de corrente dependentes estabelecem uma corrente cujo valor depende do valor de uma tensão ou corrente em outro ponto do circuito. Representações dos símbolos de circuito dessas fontes são exibidas a seguir:

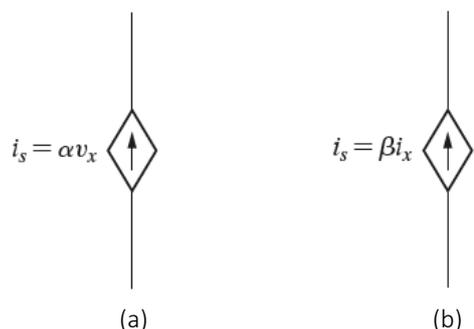


Figura 4.7 Símbolos de circuito para (a) uma fonte ideal de corrente com controle de tensão e (b) uma fonte ideal de corrente com controle de corrente.

Fonte: Nilsson e Riedel (2015, com adaptações).

Para que uma fonte ideal de corrente dependente seja completamente especificada, é necessário explicitar junto ao símbolo a tensão ou corrente de controle, a equação que permite calcular a corrente fornecida a partir da tensão ou corrente de controle e a direção de referência para a corrente fornecida. Especificar completamente uma fonte de corrente ideal dependente no circuito somente será possível se conhecermos o valor da tensão ou corrente da qual ela depende (NILSSON; RIEDEL, 2009, p. 16).

No *Multisim Live* as fontes ideais de corrente dependentes são representadas conforme vemos abaixo:



Figura 4.8 Símbolos de circuito para (a) uma fonte ideal de tensão com controle de tensão e (b) uma fonte ideal de tensão com controle de corrente.

Fonte: elaborada pelo autor

Tais fontes podem ser acessadas indo até a paleta de componentes, clicar em *modeling blocks* e, na subpaleta que aparece, selecionar *Current Controlled Voltage Source* se deseja uma fonte de corrente controlada por tensão ou *Current Controlled Current Source* para uma fonte de corrente controlada por corrente (Fig. 4.9). A Fig. 4.10 mostra um esquemático com todos os parâmetros que definem por completo uma fonte de corrente ideal dependente. Observe que β é uma constante multiplicativa adimensional, por se tratar de uma fonte de corrente controlada por corrente.

Nota!

- É muito importante compreender que para uma fonte de tensão, conhecemos a tensão, mas não a corrente por ela fornecida. Do mesmo modo, conhecemos a corrente fornecida por uma fonte de corrente, mas não a tensão nela. (ALEXANDER; SADIKU, 2013, p. 14).

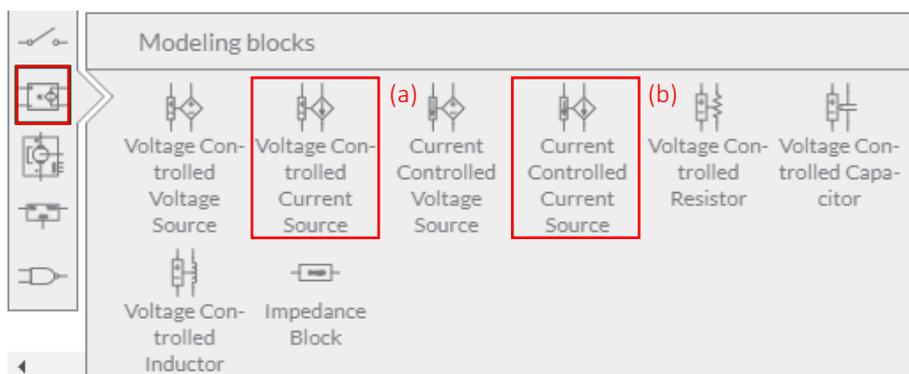


Figura 4.9 Seleção de (a) uma fonte ideal de corrente com controle de tensão e (b) uma fonte ideal de corrente com controle de corrente.

Fonte: elaborada pelo autor

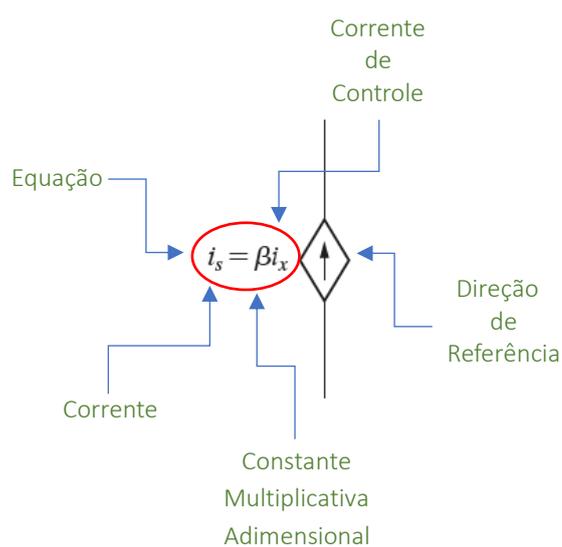


Figura 4.10 Especificações dos parâmetros de uma fonte ideal de corrente dependente controlada por corrente.

Fonte: elaborada pelo autor

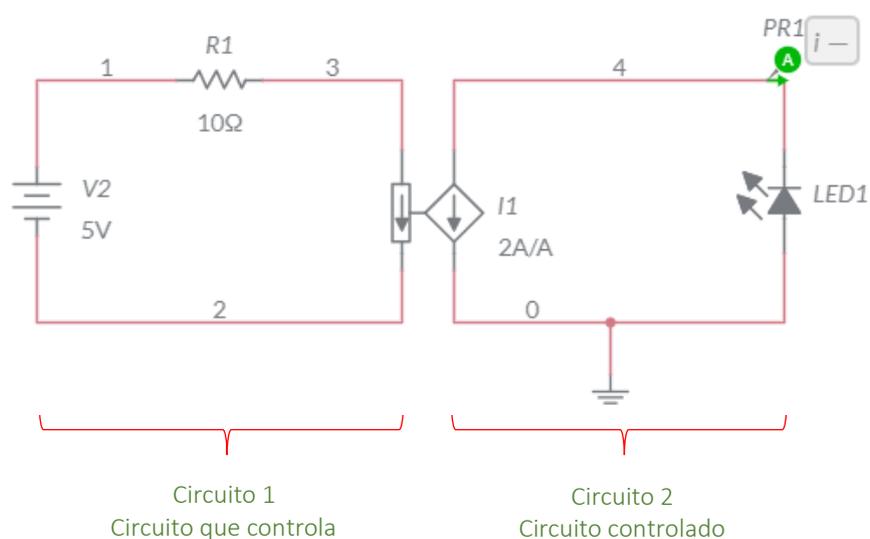


Figura 4.11 Circuito com fonte de corrente controlada por corrente na razão 2 ampères/1 ampère

Fonte: elaborada pelo autor

Agora, verificaremos o entendimento do assunto com a ajuda do *Multisim Live*. O circuito da Fig. 4.11 nos auxiliará a entender melhor como se dá o funcionamento de uma fonte ideal de corrente dependente. Observe que no Circuito 1 a tensão da fonte sendo de 5 volts, produzirá uma corrente de 0,5 ampères através do resistor R1. Essa é a mesma corrente recebida pela fonte de corrente controlada, o que significa que o Circuito 2 é controlado pela corrente desse resistor. Como a constante de multiplicação é 2A/A (2 ampères/1 ampère), significa dizer que a fonte controlada faz percorrer uma corrente de 1 ampère através do LED, o que nos é confirmado colocando a simulação para ser executada (Fig. 4.12)

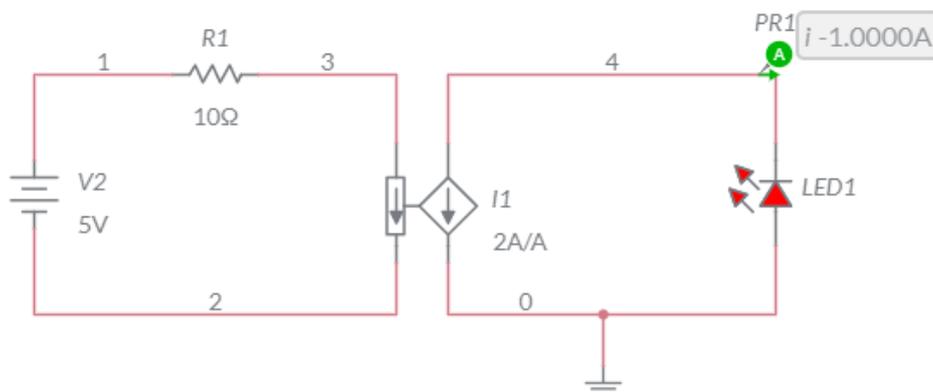
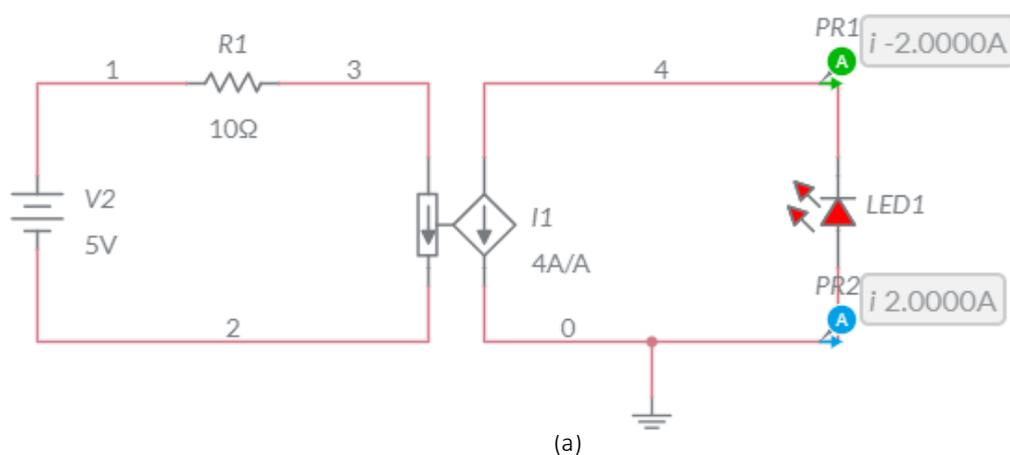
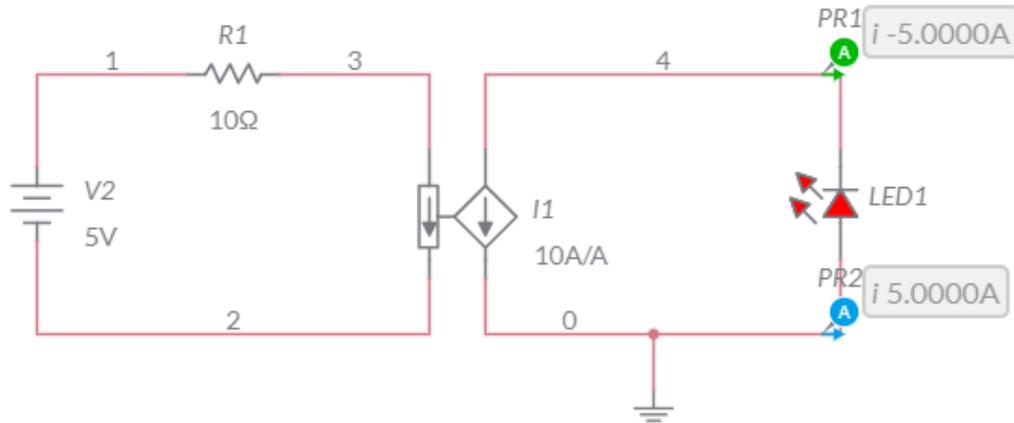


Figura 4.12 A fonte de tensão controlada fornece ao LED uma corrente igual ao dobro daquela que percorre o resistor

Fonte: elaborada pelo autor

Note o sinal negativo na indicação da corrente, isso acontece porque a orientação da ponta de prova é contrária a direção de referência presente na fonte controlada. Veremos mais adiante que se o sentido do LED também estivesse contrário ao da direção de referência, ele não emitiria luz. Encerraremos com mais duas simulações desse circuito, mas alterando a constante de multiplicação primeiro para 4 A/A e depois por 0,1 A/A. Também foi acrescentado outra ponta de prova para corrente, mas agora com indicação de sentido igual à direção de referência da fonte controlada. Verifique o resultado (Fig. 4.13). A corrente através de R1 continua sendo 0,5 ampères e essa será a corrente de controle. Na situação mostrada pela Figura 4.13(a) a constante de multiplicação é 4 A/A, logo a fonte controlada fornece quatro vezes a corrente que recebe ao LED.





(b)

Figura 4.13 A fonte de corrente com controle de corrente e constante de multiplicação (a) 4 A/A e (b) 10 A/A tensão no resistor na razão 1volt/1volt

Fonte: elaborada pelo autor

E por fim, na Fig. 4.13(b) a corrente fornecida ao *LED* será 10 vezes 0,5 ampères, o que resulta em 5 ampères.

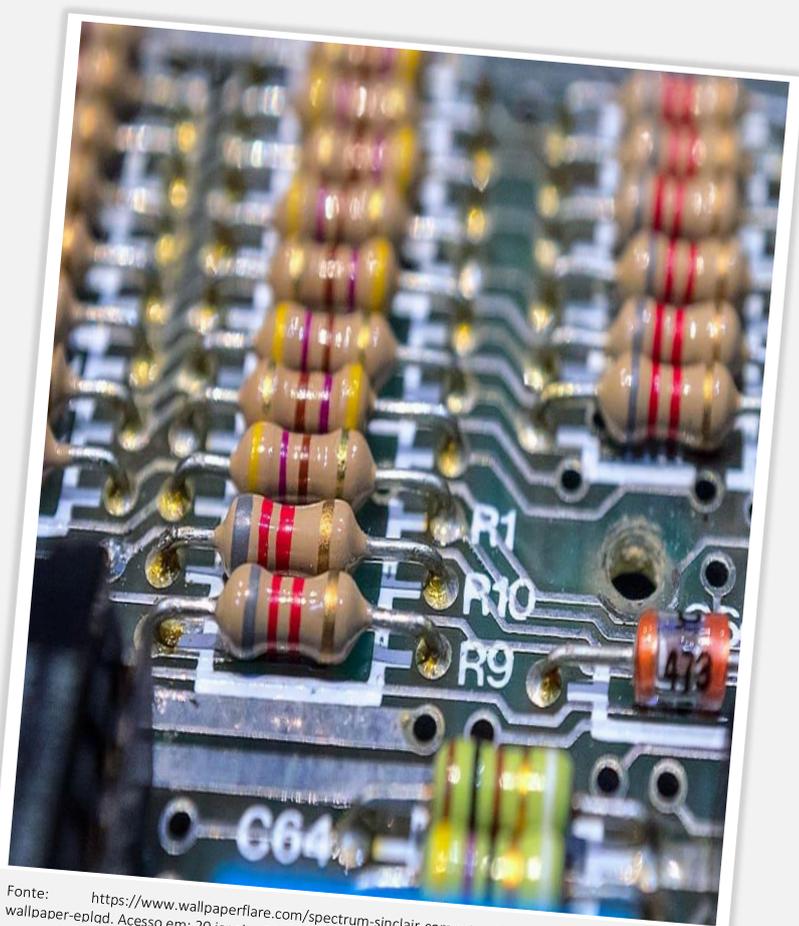
5

CAPÍTULO 5

Tópicos

- 5.1** Introdução
- 5.2** Definição
- 5.3** Associação de resistores

Resistores



Fonte: <https://www.wallpaperflare.com/spectrum-sinclair-computer-1982-plate-electronics-resistance-wallpaper-eplod>. Acesso em: 20 janeiro 2021.

▲ Resistores são os elementos mais simples de um circuito elétrico, mas isso não os tornam dispensáveis. Longe disso, eles estão presentes em praticamente todas os projetos de circuitos, o que demonstra sua importância.

Neste capítulo dá-se o estudo dos resistores. Classificação, representação e características dos resistores são alguns dos tópicos que serão detalhados aqui.

5.1 Introdução

Sempre que um aparelho eletroeletrônico é ligado inevitavelmente ele sofre aquecimento em seus circuitos. Não importa se é algo simples como um carregador de pilhas ou mais sofisticado como um *notebook*, eles sempre aquecem. Isso acontece porque a corrente elétrica em seu percurso através de um condutor, material presente em praticamente todos os componentes de um circuito, converte energia elétrica em energia térmica, devido a colisão entre os elétrons livres e os átomos desses condutores. Esse fenômeno recebe o nome de efeito Joule ou efeito térmico.

Por causa das colisões, os átomos do condutor passam a vibrar mais intensamente e, em consequência, ocorre elevação da temperatura do condutor (JUNIOR; FERRANO; SOARES, 2015, p. 140).

Esse é um fenômeno indesejado na maioria das vezes (Fig. 5.1).



Figura 5.1 Durante seu funcionamento as lâmpadas incandescentes convertem energia elétrica em luz e calor. Este último ocorre por efeito Joule e consiste num processo indesejado visto que provoca desperdício de energia elétrica.

Fonte: <https://pixabay.com/pt/photos/l%C3%A2mpada-ilumina%C3%A7%C3%A3o-luz-atual-4297600/>. Acesso em: 20 janeiro 2021.

Porém, existem aparelhos como os aquecedores elétricos, ferro de passar roupas, chuveiro elétrico, secador de cabelo, dentre outros, que se utilizam do efeito joule. Isso porque a função desses aparelhos depende justamente da transformação de energia elétrica em energia térmica. E para que possam ter êxito nessa função eles possuem em seu interior resistores elétricos, dispositivos caracterizados por apresentar grande resistência elétrica.

5.2 Definição

Um resistor é um elemento de circuito passivo simples que fornece uma resistência específica para o trecho de circuito no qual é conectado. Certamente é um dos componentes mais conhecidos, mesmo por aqueles que estejam apenas dando os primeiros passos no mundo da eletrônica. A Fig. 5.3 mostra um resistor de 6,5 MΩ.



Figura 5.3 Resistor de 6,5 MΩ

Fonte: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Metal_film_resistor.jpg. Acesso em: 20 janeiro 2021.

5.2.1 Resistores fixos

Lembre-se!

- Resistência elétrica (**R**) é a dificuldade oferecida ao fluxo de corrente elétrica. Essa é uma característica presente em grande parte dos materiais.



R

Figura 5.2 Símbolo da resistência elétrica e sua abreviação

Fonte: elaborada pelo autor.

A resistência de qualquer material depende, basicamente, de quatro fatores:

1. Material
2. Comprimento
3. Área do corte transversal
4. Temperatura do material (BOYLESTAD, 2012, p. 51).

Essa dependência é equacionada pela segunda lei de Ohm:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

Onde:

- ρ é a resistividade elétrica do condutor e representa o material
- A é a área do corte transversal
- l é o comprimento do fio

Os resistores são divididos em dois grandes grupos: fixos e variáveis.



Figura 5.4 Resistores fixos

Fonte: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Resistor_cropped.jpg. Acesso em: 25 janeiro 2021.

A Fig. 5.4 exhibe resistores do tipo fixo. Ele recebe essa classificação porque, como o próprio nome sugere, o valor de sua resistência não sofre variação. Esse tipo de resistor é o representante mais comum desses dispositivos.

Em simuladores como o *Multisim Live*, o resistor é representado pelo símbolo de sua resistência interna (Fig. 5.5). Por padrão, o simulador fornece um resistor com resistência de $1k\Omega$. Já aprendemos a modificar a resistência de um resistor. Fazer isso para um resistor fixo é o mesmo que trocarmos o resistor.

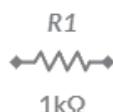


Figura 5.5 Símbolo de resistor fixo no Multisim Live

Fonte: elaborada pelo autor.

5.2.2 Resistores variáveis

Os resistores variáveis, por sua vez, podem ter sua resistência modificada através da utilização de um botão, parafuso ou outro mecanismo que permita essa alteração e a seleção do valor específico desejado. Eles podem ter dois ou três terminais, mas a maioria possui três. Quando um dispositivo de dois ou três terminais é usado como um resistor variável, geralmente ele é denominado reostato. Contudo, se um dispositivo de três terminais é usado para controlar níveis de potência, então ele é normalmente denominado potenciômetro. (BOYLESTAD, 2012, p. 62).

Na figura a seguir temos dois modelos de resistores com resistência variável, um reostato a toroide blindado e um potenciômetro com resistor de carbono

O símbolo de um potenciômetro de três terminais é mostrado na Fig. 5.7.



(a)



(b)

Figura 5.6 (a) um reostato a toroide blindado e (b) um potenciômetro com resistor de carbono

Fonte: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Reostato_a_toroide_blindato__Museo_scienza_tecnologia_Milano_11815.jpg. Acesso em: 25 janeiro 2021.

Lembre-se!

- A dependência com a temperatura é dada pela equação:

$$R_T = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

Onde:

- R_0 é a resistência a 0°C
- R_T é a resistência na temperatura T
- α é o coeficiente de temperatura do condutor

A unidade de resistência elétrica é Ohm (Ω).

O nome dessa relação assim como a unidade adotada é uma homenagem à Georg Simon Ohm (1787-1854), por ser o pioneiro no estudo sistemático sobre a resistência elétrica (SERWAY; JEWETT, 2014, p. 93)

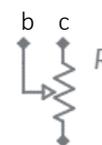


Figura 5.7 Símbolo de um potenciômetro

Fonte: elaborada pelo autor.

E para o reostato, o símbolo aceito universalmente é exibido na Figura 5.8.



Figura 5.8 Símbolo de um reostato

Fonte: elaborada pelo autor.

Quando usado como um reostato, o potenciômetro pode ser conectado ao circuito através da ligação dos terminais *a* e *b* a esse circuito, ficando o terminal *c* desligado. A resistência introduzida é determinada pela porção do elemento resistivo entre os pontos *a* e *b*.

Na Figura 5.9 temos a representação de um resistor variável no *Multisim Live*, que tanto pode ser usada como potenciômetro ou reostato.

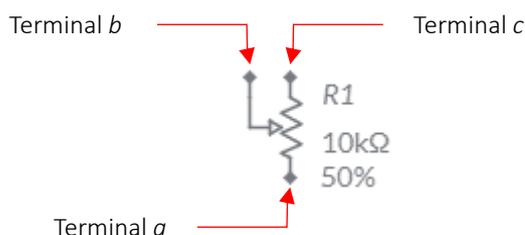


Figura 5.9 Símbolo de um potenciômetro (ou reostato) no *Multisim Live*

Fonte: elaborada pelo autor.

Para a utilização do potenciômetro no *Multisim Live*, na paleta de componentes clique em *Passive* e na subpaleta que abrir clique em *Potentiometer*. Por padrão a resistência total é 10 kΩ, mas apenas 50% está selecionado. Sendo necessário modificar esse percentual. Para isso, devemos clicar sobre a porcentagem (Fig. 5.10) e escrever o valor desejado ou utilizar o curso (recurso não muito preciso).

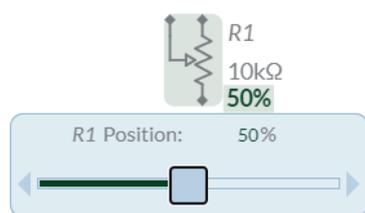


Figura 5.10 Modificando a porcentagem de resistência selecionada do reostato

Fonte: elaborada pelo autor.

Na Fig. 5.11 temos a posição do cursor para diferentes valores de resistência. As imagens evidenciam que a resistência introduzida no circuito é determinada pela porção do elemento resistivo entre os pontos *a* e *b*.

Agora, um potenciômetro será utilizado para variar a tensão sobre uma lâmpada incandescente à medida que alteramos sua resistência. Primeiro desenhamos o circuito da Fig 5.12.

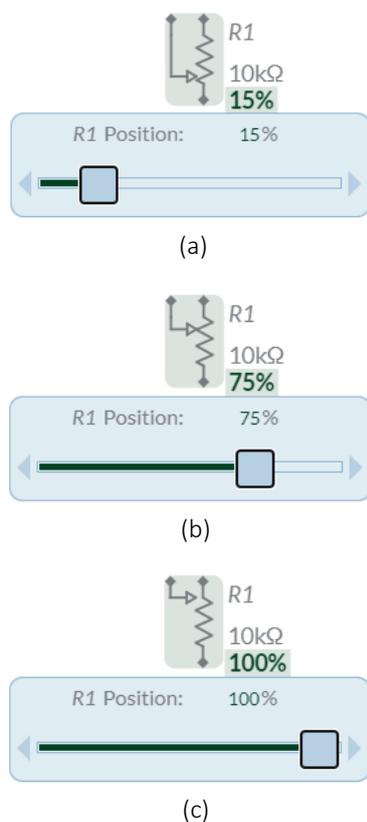


Figura 5.11 Modificando a porcentagem de resistência para (a) 15 %, (b) 75% e (c) 100%

Fonte: elaborada pelo autor.

Na Fig. 5.11 temos a posição do cursor para diferentes valores de resistência. As imagens evidenciam que a resistência introduzida no circuito é determinada pela porção do elemento resistivo entre os pontos *a* e *b*.

Agora, um potenciômetro será utilizado para variar a tensão sobre uma lâmpada incandescente à medida que alteramos sua resistência. Primeiro desenhamos o circuito da Fig 5.12.

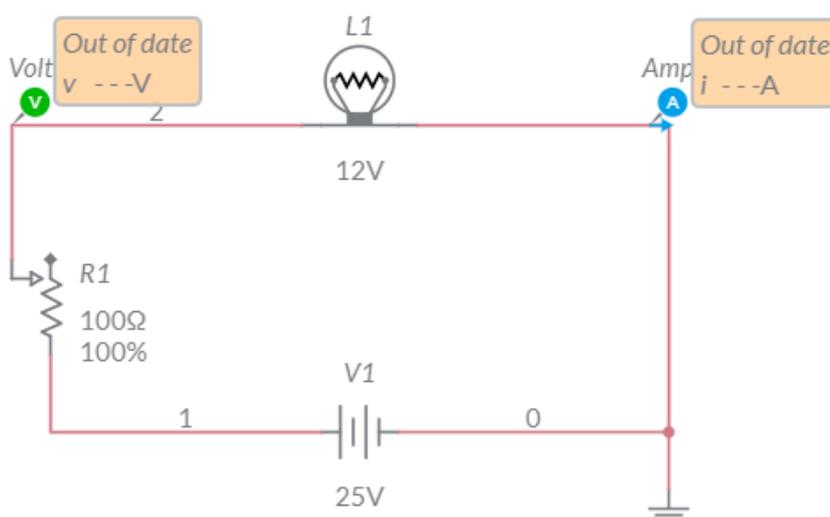


Figura 5.12 Circuito de uma lâmpada em série com um potenciômetro

Fonte: elaborada pelo autor.

Verifique as alterações realizadas na tensão da fonte, na resistência total do potenciômetro e no rótulo da lâmpada e pontas de prova.

Acessamos o potenciômetro devemos na paleta de componentes clicar em *Passive* e na subpaleta que abrir clicar em *Potentiometer* (Fig. 5.13).

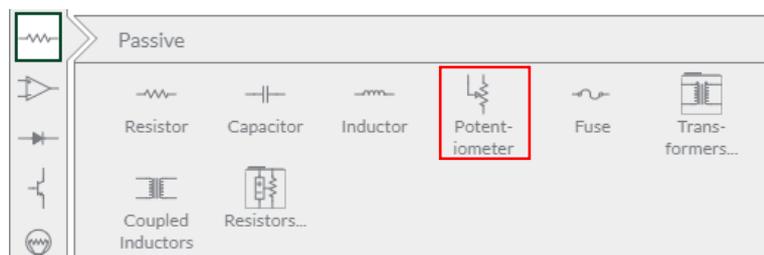


Figura 5.13 Adicionando o potenciômetro

Fonte: elaborada pelo autor.

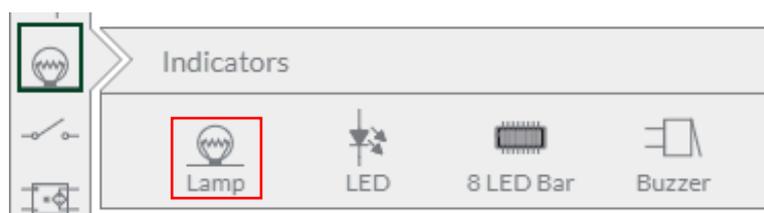


Figura 5.14 Adicionando a lâmpada incandescente

Fonte: elaborada pelo autor.

Antes de continuarmos é importante identificar os parâmetros para o bom funcionamento da lâmpada incandescente utilizada no circuito simulado. Para isso, clique sobre a lâmpada para colocá-la no modo ativo e em seguida clicar no botão *Open configuration pane*, no canto superior direito (Fig. 5.15).

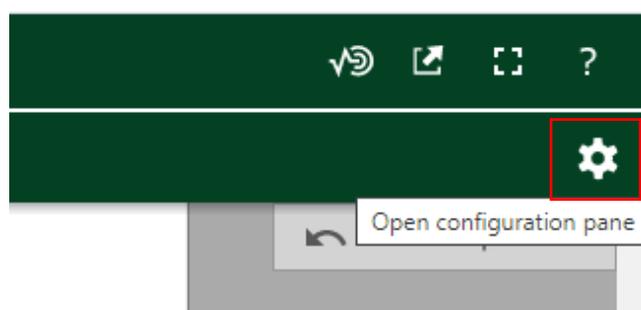


Figura 5.15 Botão Open configuration pane

Fonte: elaborada pelo autor.

Na aba que abrir, verificar a *Tensão nominal máxima* (*Maximum rated voltage*), *Tensão de queima* (*Burnout voltage*) e *Potência nominal máxima* (*Maximum rated power*) (Fig. 5.16). Segundo os parâmetros fornecidos, a lâmpada possui tensão nominal máxima de 12 V, potência nominal máxima de 10 W e tensão de queima de 15 V. Nesta aba também é possível modificar a *ID* do componente. Para fechar a aba, clicar no botão *Close configuration pane* (Fig. 5.17). Munido dessas informações daremos início a simulação do circuito.

Nota!

- Convém destacar que alguns elementos como as chaves possuem impedância. Uma característica de simuladores de boa qualidade como o *MULTISIM LIVE*. Dessa forma, para simular chaves ideais deve-se zerar sua impedância. Para tanto basta selecionar o dispositivo e acessar suas configurações para fazer qualquer alteração.

Inicialmente (Fig. 5.18) o potenciômetro está em 100%, dessa forma, mesmo que a fonte seja de 25 V não irá queimar a lâmpada pois a maior parte dessa tensão está sobre o potenciômetro.

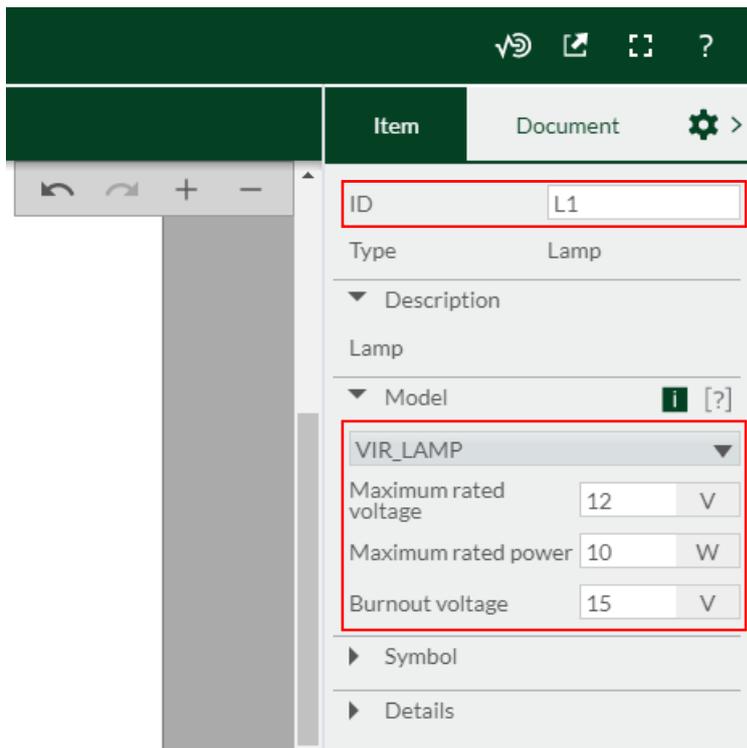


Figura 5.16 Parâmetros de funcionamento da lâmpada incandescente

Fonte: elaborada pelo autor.

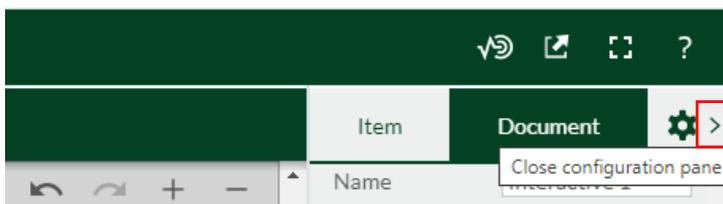


Figura 5.17 Botão Close configuration pane

Fonte: elaborada pelo autor.

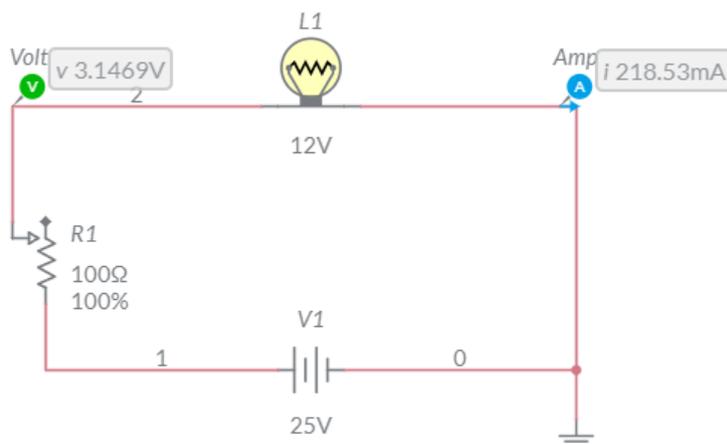


Figura 5.18 Potenciômetro em 100%

Fonte: elaborada pelo autor.

Nesta configuração a lâmpada possui brilho fraco, visto que apresenta, aproximadamente, apenas 1/3 dos 12 V de tensão nominal de que necessita para seu bom funcionamento. Dessa forma a potência dela é bem inferior aos 10 W de potência nominal máxima. Na próxima intervenção (Fig. 5.19) o potenciômetro é colocado em 25%. Agora a lâmpada brilha mais intensamente, isso porque dispõe de uma tensão de, aproximadamente, 9 V entre seus terminais, valor próximo do máximo suportado por ela. Enquanto isso a potência se eleva para pouco mais de 5,7 W.

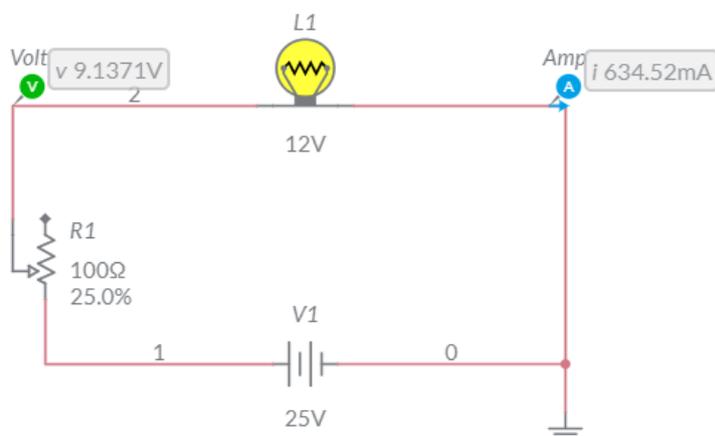


Figura 5.19 Potenciômetro em 25%

Fonte: elaborada pelo autor.

Na terceira alteração (Fig. 5.20) o potenciômetro é levado a 10%. Isso faz com que a tensão sobre a lâmpada quase ultrapassa o valor máximo suportado de 15 V. A lâmpada está na cor rubro, indicando que é iminente sua queima.

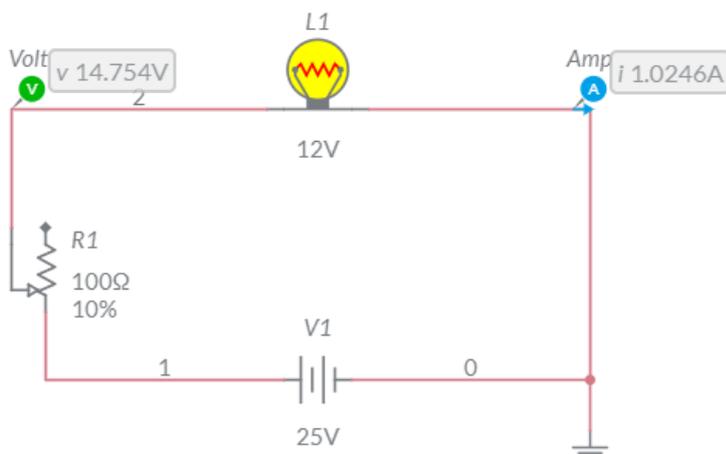


Figura 5.20 Potenciômetro em 10%

Fonte: elaborada pelo autor.

Em mais uma alteração (Fig. 4.21), o potenciômetro é levado a 9,5% o que acarreta a ruptura do filamento da lâmpada (queima) por excesso de tensão e potência sobre a mesma. Nessa configuração o potenciômetro não conseguiu proteger a lâmpada. Ao se romper a lâmpada abre o circuito e toda a tensão da fonte é transferida para seus terminais.

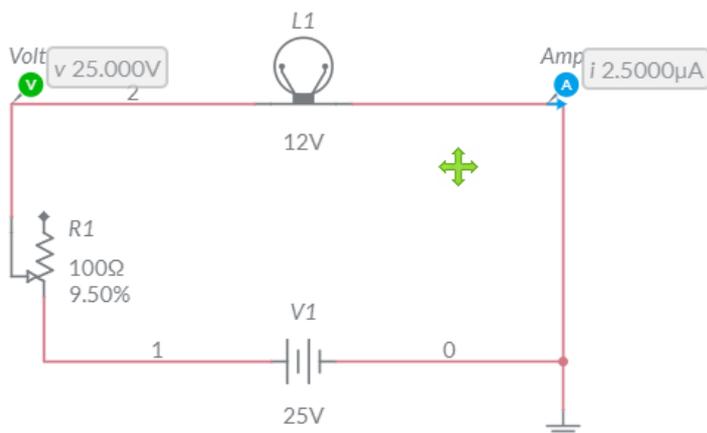


Figura 5.21 Potenciômetro em 9,5%

Fonte: elaborada pelo autor.

5.2.3 Termistores

Um **termistor** (Fig. 5.22) é um dispositivo de dois terminais constituído de material semicondutor cuja resistência depende da temperatura. Na Fig. 5.23 temos a curva característica típica de um termistor juntamente com seu símbolo gráfico.

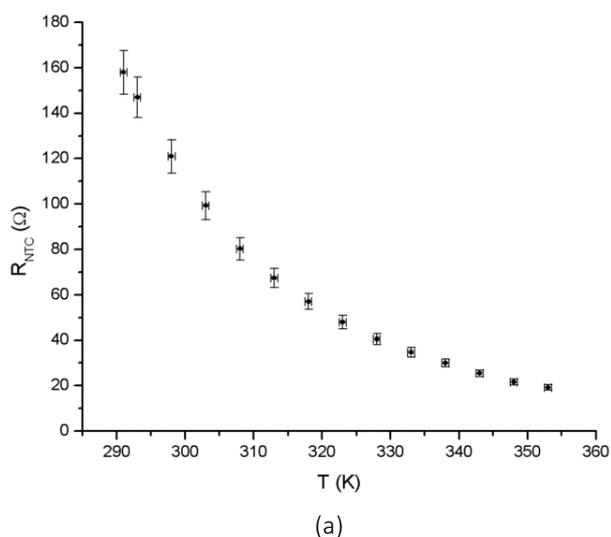


Figura 5.22 Termistor

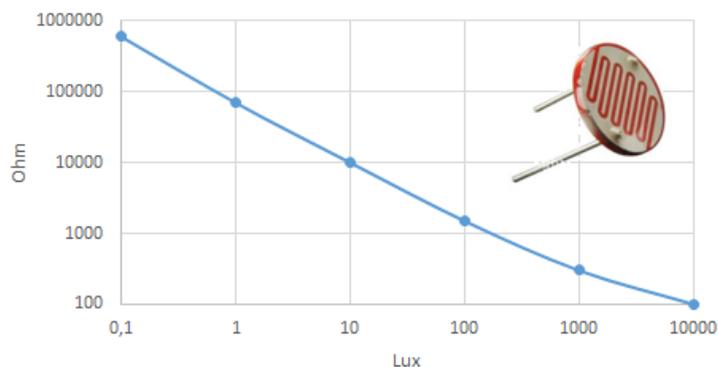
Fonte: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NTC_Thermistor.jpg. Acesso em: 30 janeiro 2021.

5.2.4 Célula fotocondutora

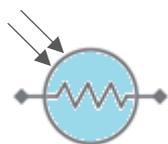
A célula fotocondutora ou **LDR** (*Light Dependent Resistor*) é um dispositivo semicondutor de dois terminais que possui resistência dependente da intensidade luminosa incidente sobre sua superfície. À medida que a iluminação aumenta de intensidade, aumenta o estado de energia dos elétrons e átomos da superfície, provocando

também o aumento do número de 'portadores livres' e a correspondente diminuição na resistência (BOYLESTAD, 2012, p. 74).

A Fig. 5.24 exibe uma célula fotocondutora comercial, sua curva característica e seu símbolo gráfico.



(a)



(b)

Figura 5.24 Célula fotocondutora: (a) imagem de uma unidade comercial e curva característica típica e (b) símbolo gráfico

Fonte: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LDR.png>. Acesso em: 30 janeiro 2021.

5.2.5 Varistor

Varistores são resistores não lineares, cuja resistência depende da tensão aplicada e são usados para suprimir transientes de alta tensão. Suas características permitem que limitem a tensão que pode aparecer entre os terminais de um dispositivo ou sistema sensível a tais transientes. Na Fig. 5.25 temos a foto de uma unidade comercial.



Figura 5.25 Varistor

Fonte: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Metal_Oxide_Varistor.jpg. Acesso em: 30 janeiro 2021.

Através de técnicas adequadas de projeto, esse dispositivo pode limitar a tensão aplicada a partes delicadas de um circuito. Sendo a corrente limitada pelo circuito ao qual está conectada (BOYLESTAD, 2012, p. 75). A curva característica de um varistor típico é detalhada na Fig. 4.26.

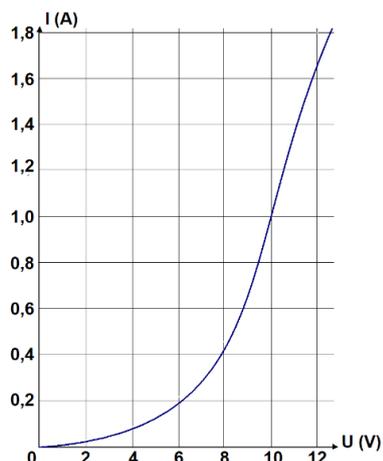


Figura 5.26 Curva característica de um varistor

Fonte: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c8/Kennlinie_VDR.png. Acesso em: 30 janeiro 2021.

5.3 Associação de resistores

É comum os resistores aparecerem em circuitos nos mais variados arranjos (Fig. 5.27), os quais denominamos associações. Considera-se que os resistores podem ser combinados de duas formas: série e paralelo.

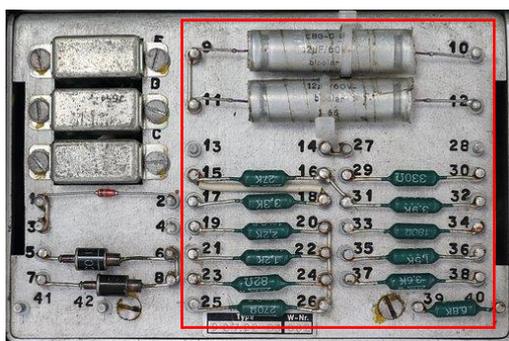


Figura 4.27 Associação de resistores

Fonte: <https://pixabay.com/photos/search/resistor/>. Acesso em: 30 janeiro 2021.

Freqüentemente ambos os modos de combinar estão presentes, a esse arranjo dá-se o nome de associação mista.

5.3.1 Resistores em série

Na associação em série, os resistores são ligados um após o outro, sendo percorridos pela mesma corrente elétrica. A tensão sobre cada resistor é diretamente proporcional a sua resistência e determinada pela relação $R = U \cdot I$. A Fig. 4.28, representa três resistores de resistências elétricas R_1 , R_2 e R_3 , associados em série. Observe que a corrente elétrica I que os percorre é a mesma e a tensão elétrica U é mais elevada naquele resistor cuja resistência é maior.

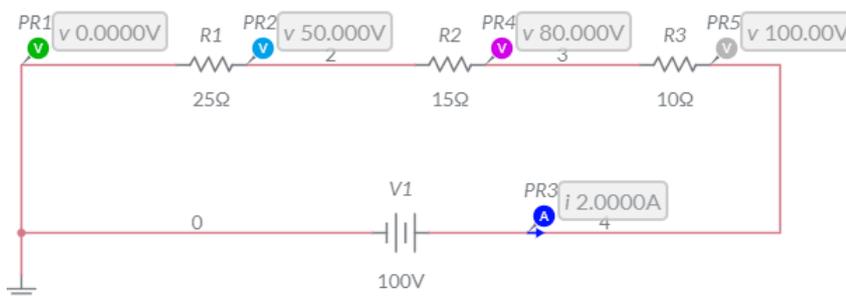


Figura 4.28 Tensão e corrente em resistores associados em série

Fonte: elaborada pelo autor

Sendo mais específico, todos os resistores são percorridos por uma corrente elétrica de intensidade $2A$. Enquanto as tensões elétricas nos resistores 25Ω , 15Ω e 10Ω são, respectivamente, $50V$, $30V$ e $20V$. Note, também, que a soma algébrica das tensões nos resistores é igual a tensão da fonte.

Analisemos agora o que acontece quando mais resistores são acrescentados em uma associação em série. Para tanto utilizamos a configuração mostrada na Fig. 5.29, em que 3 lâmpadas iguais, $L1$, $L2$ e $L3$, desempenhando a função de resistores. Todas têm tensão de queima de $15V$, não confundir com a tensão nominal máxima, que nesse caso é de $12V$. Inicialmente as lâmpadas $L1$ e $L2$ estão em curto-circuito, por intermédio das chaves $S1$ e $S2$ que se encontram fechadas, e toda a tensão da fonte ($15V$) está sobre a lâmpada $L3$, que brilha intensamente chegando ao rubro, indicando que está na iminência de queimar.

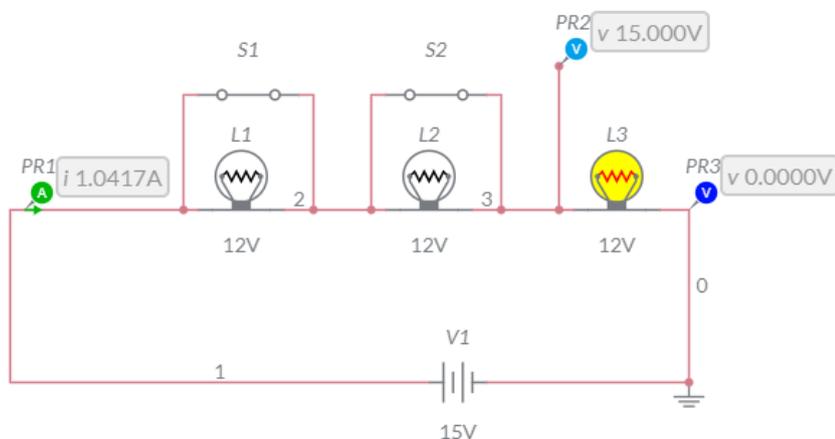


Figura 5.29 Lâmpadas em série com $L1$ e $L2$ curto-circuitadas

Fonte: elaborada pelo autor

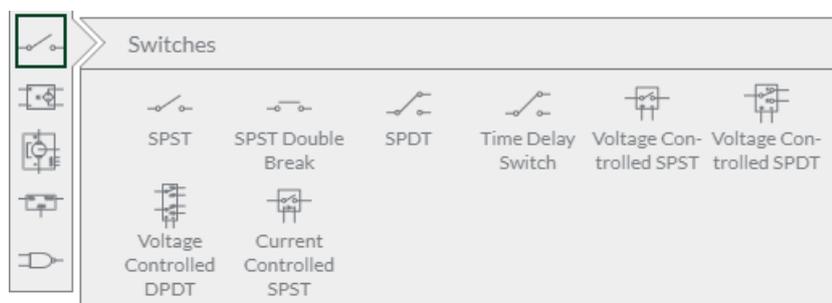


Figura 5.30 Adicionando chaves

Fonte: elaborada pelo autor

Para adicionar as chaves $S1$ e $S2$, na paleta de componentes clicar sobre *Switches* e na subpaleta que abrir clicar em *SPST* (Fig. 5.30). Em seguida a chave $S2$ é aberta (Fig. 5.31), o que provoca uma redução na corrente do circuito, visto que a resistência total aumenta. A tensão da fonte é dividida igualmente entre as lâmpadas $L2$ e $L3$

e com isso as lâmpadas brilham com mesma intensidade, mas o brilho é menor que na situação anterior, o que elimina o risco de $L3$ queimar.

E por fim, a chave $S1$ é abertura da segunda chave (Fig. 5.32) a corrente no circuito é ainda menor aquela da configuração anterior. A tensão da fonte é dividida entre as três lâmpadas o que faz o brilho delas reduzir ainda mais. Observe, portanto que quanto mais resistores são adicionados em uma associação em série menor é a corrente que percorre o circuito, deixando claro que a resistência total aumenta.

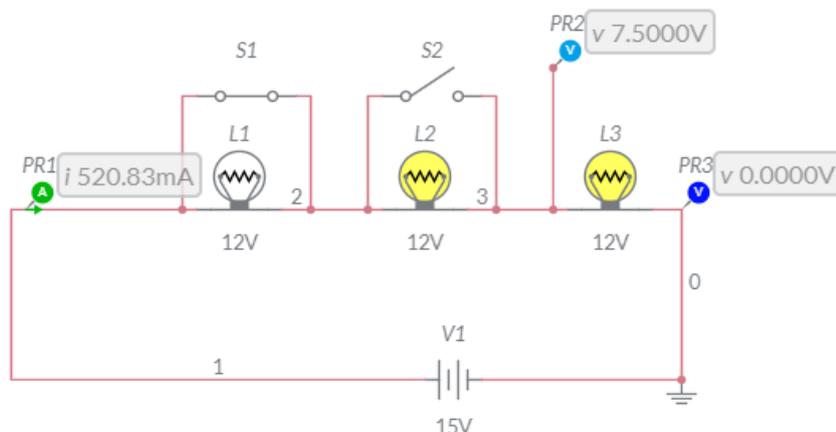


Figura 5.31 Lâmpadas em série com $L1$ em curto-circuito

Fonte: elaborada pelo autor

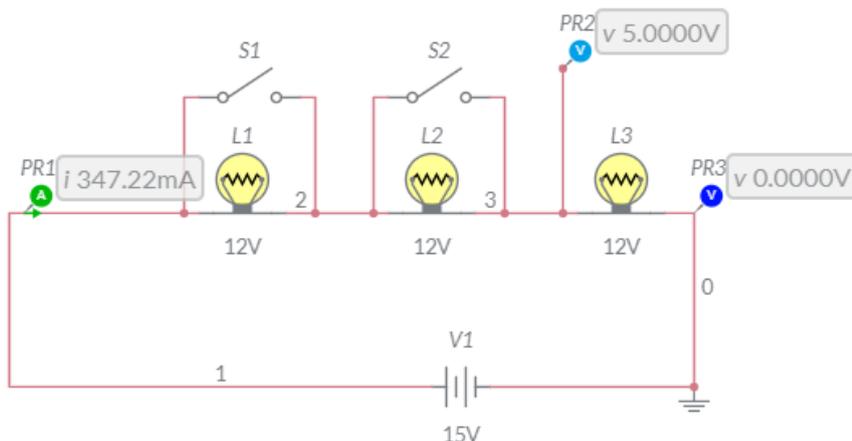


Figura 5.32 Lâmpadas em série e chaves abertas

Fonte: elaborada pelo autor

5.3.2 Resistores em paralelo

Na associação em paralelo, os terminais dos resistores são interligados de tal forma que todos compartilham da mesma tensão, a da fonte. A corrente elétrica que percorre cada resistor é inversamente proporcional a sua resistência e determinada pela equação $I = U/R$. Na Fig. 5.33 temos um circuito com três resistores, $R1$, $R2$ e $R3$, associados em paralelo.

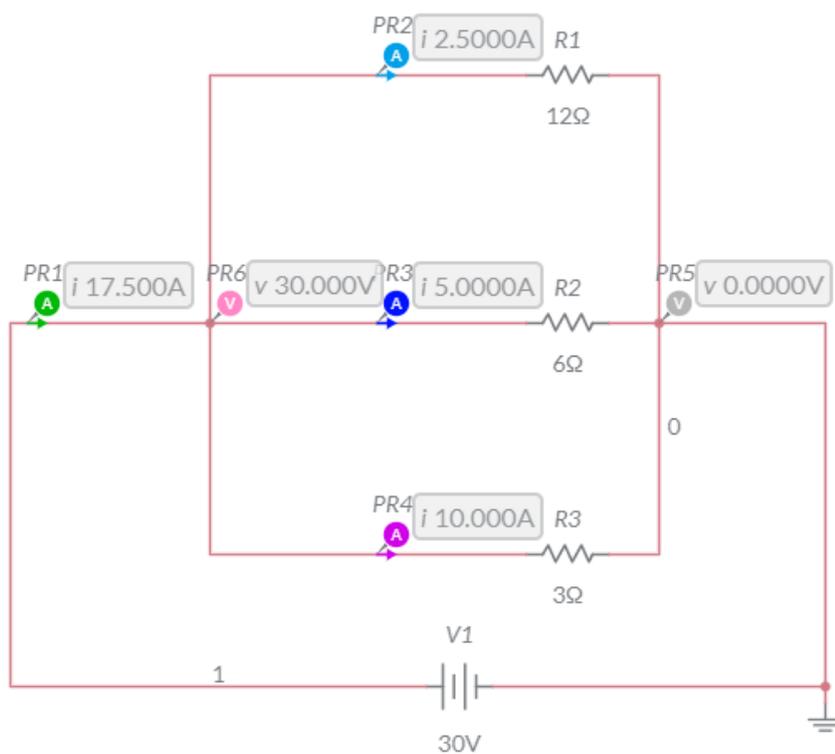


Figura 5.33 Tensão e corrente em resistores associados em paralelo

Fonte: elaborada pelo autor

As pontas de provas *PR5* e *PR6* mostram que a tensão em todos os resistores é $U = 30V$, a mesma da fonte e que o resistor de menor valor ($R3 = 3\Omega$) é percorrido pela corrente elétrica de maior intensidade ($i = 10A$). Note que a corrente total do circuito ($I = 17,5A$) é a soma algébrica das correntes individuais em cada resistor.

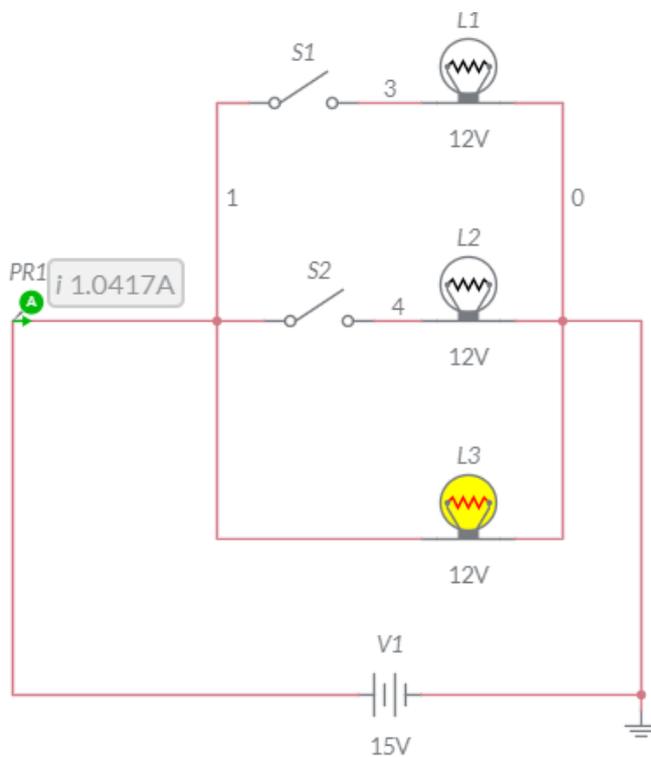


Figura 5.34 Lâmpadas em paralelo com *S1* e *S2* em aberto

Fonte: elaborada pelo autor

Análogo ao que fizemos para uma associação de lâmpadas em série, veremos o que acontece com a corrente de um circuito de lâmpadas associadas em paralelo. Para tanto, utilizamos o arranjo representado na Fig. 5.34.

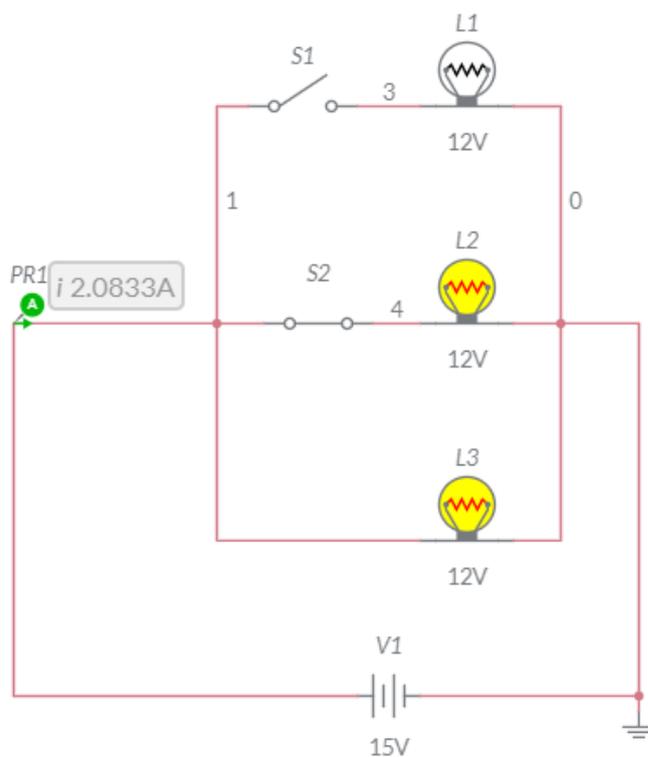


Figura 5.35 Lâmpadas em paralelo com S1 em aberto

Fonte: elaborada pelo autor

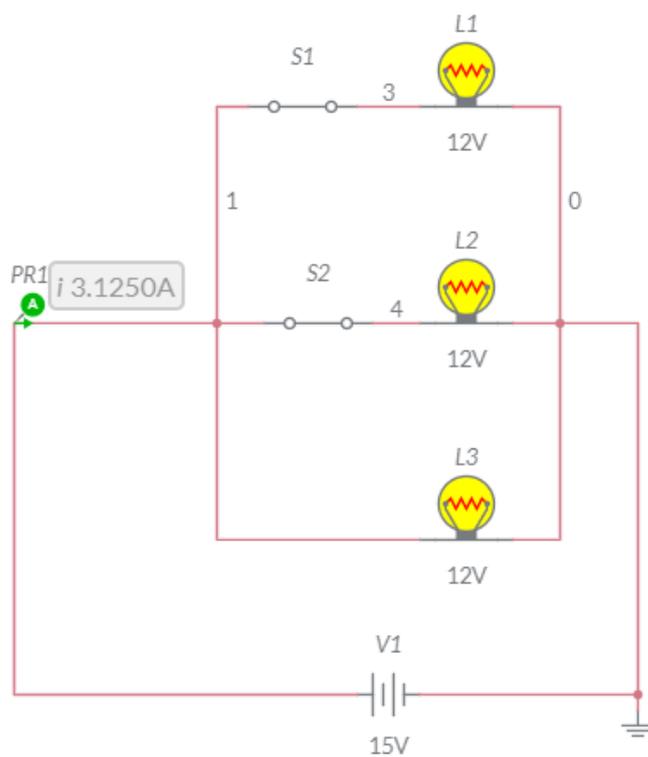


Figura 5.36 Lâmpadas em paralelo

Fonte: elaborada pelo autor

Inicialmente as chaves $S1$ e $S2$ estão abertas, dessa forma não circula corrente pelas lâmpadas $L1$ e $L2$ e elas ficam apagadas. Note que a tensão na lâmpada $L3$ é exatamente $15V$, por isso se encontra na iminência de queimar. Fechando a chave $S2$ (Fig. 5.35), observe que a corrente no circuito aumenta, evidenciando que a resistência do circuito diminui. Contudo o brilho da $L3$ permanece inalterado e esse brilho é o mesmo que agora aparece, também, na lâmpada $L2$, afinal recebem a mesma tensão de $15V$. A Fig. 5.36, na qual todas as chaves estão fechadas, completa a análise e nos permite concluir que, em uma associação de resistores em paralelo, o acréscimo de resistores no circuito aumenta a corrente que a fonte fornece. Isso equivale a dizer que a resistência total do circuito diminui.

6

CAPÍTULO 6

Tópicos

- 6.1** Introdução
- 6.2** Definição
- 6.3** Capacitância
- 6.4** Fase de carga
- 6.5** Fase de descarga

N

este capítulo dá-se o estudo dos capacitores. Representação e características dos capacitores são alguns dos tópicos que serão detalhados aqui.

Capacitores



Fonte: <https://pixnio.com/pt/objetos/dispositivos-eletronicos/componentes-do-computador/hardware-placa-mae-poder-resistor-semicondutores-tecnologia-transistor>. Acesso em: 29 dezembro 2020.

▲ Capacitores são dispositivos versáteis cuja função vai desde o simples armazenamento de energia até a participação em circuitos de filtros capacitivos utilizados, por exemplo em fonte retificadas e em processamento de sinais, elementos essenciais em telecomunicações.

6.1 Introdução

Hoje a maioria das pessoas utilizam o celular para tirar suas fotos, mas aqueles que não abrem mão de uma boa máquina fotográfica (Fig. 6.1) sabem que, ao utilizar o flash para capturar uma imagem, é necessário esperar um tempinho para que a próxima cena possa ser registrada. Isso ocorre porque a energia necessária para que a lâmpada ilumine o ambiente vem de um **capacitor** que precisa ser previamente carregado com energia da fonte. Claro que quanto melhor for a máquina fotográfica menor será esse tempo.



Figura 6.1 Máquina fotográfica com flash

Fonte: <https://pixabay.com/pt/photos/search/lente%20da%20c%C3%A2mera/>. Acesso em: 1 janeiro 2021.

Todos sabem que o *touchpad* de um *laptop* (Fig. 6.2) é usado para controlar a posição do ponteiro na tela do *laptop*, fornecendo um elo entre a posição de um dedo no *touchpad* com uma posição na tela. Entretanto, poucos sabem que essa tecnologia utiliza as propriedades dos capacitores.



Figura 6.2 Touchpad de um laptop

Fonte: <https://pixabay.com/pt/photos/search/touchpad/>. Acesso em: 1 janeiro 2021.

Há duas abordagens gerais para fornecer essa ligação: **sensibilidade de capacitância** (Fig. 6.3) e **sensibilidade de condutância**.

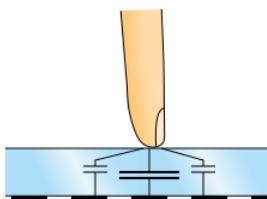


Figura 6.3 Sensibilidade de capacitância

Fonte: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TouchScreen_projective_capacitive.svg. Acesso em: 1 janeiro 2021.

A sensibilidade de capacitância depende da carga carregada pelo corpo humano, enquanto a sensibilidade de condutância exige somente que uma pressão seja aplicada a uma posição em particular no *touchpad*. Isso equivale dizer que, o uso de luvas ou um lápis não funcionará com a

Nota!



Figura 6.4 Limpadores de para-brisa são acionados com velocidades que podem variar e até mesmo parar por um determinado intervalo de tempo. Para tanto, usam temporizadores que são ativados por meio do processo de carga e descarga de um capacitor (JUNIOR; FERRARO; TOLEDO, 2009, p. 265).

Fonte: <https://www.pinterest.com.au/pin/829506825094661387/>. Acesso em: 1 janeiro 2021.



Figura 6.5 O desfibrilador aplica descargas elétricas provenientes de um capacitor no músculo cardíaco, restabelecendo seu ritmo normal (JUNIOR; FERRARO; TOLEDO, 2009, p. 265).

Fonte: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c6/Defibrillateur_501590_fh000003.jpg. Acesso em: 1 janeiro 2021.

sensibilidade de capacitância, mas é efetivo com a sensibilidade de condutância (BOYLESTAD, 2012, p. 335).



Figura 6.6 Motorista sintonizando estação de rádio

Fonte: <https://m.folha.uol.com.br/mercado/2017/01/1849248-283-radios-amigraram-para-a-faixa-fm-no-brasil-diz-ministerio.shtml>. Acesso em: 1 janeiro 2021.

Ao sintonizar sua estação de música favorita em um rádio (Fig. 6.6), você também está utilizando um capacitor. Mais especificamente, o capacitor utilizado é do tipo variável,

Os capacitores são dispositivos de construção relativamente simples, mas sua versatilidade abre a porta para implementações de projetos muito sofisticados, alguns dos quais acabamos de constatar.

6.2 Definição

O capacitor (Fig. 6.7) é um componente eletrônico passivo de dois terminais (assim como o resistor) constituído de duas peças condutoras denominadas **armaduras**. Entre elas geralmente existe um material dielétrico que pode ser, por exemplo, papel, óleo ou o próprio ar (Fig. 6.8).



FIGURA 5.7

Unidade comercial de um capacitor eletrolítico

Fonte: <https://www.distribuidorantv.com.br/som-automotivo/capacitores/50-capacitor-bipolar-47x100-e-50-capacito-poliester-2m2-250v>. Acesso em: 4 janeiro 2021.

A função básica de um capacitor é armazenar cargas elétricas em suas armaduras e, conseqüentemente, energia potencial eletrostática (ou elétrica) em seu campo elétrico. Contudo, diferentemente do resistor, no qual toda potência recebida é convertida em calor, a energia armazenada por um capacitor pode retornar ao sistema, isto significa que ele tem capacidade de memória.

Os capacitores podem ter vários formatos (Fig. 5.8), mas em esquemas de circuitos elétricos todos possuem a mesma representação (Fig. 6.11): dois traços retos de mesmo comprimento para capacitores fixos e dois traços retos de mesmo comprimento cortados por uma seta para capacitores variáveis. Entretanto, vale ressaltar que, infelizmente, o *Multisim Live* não apresenta capacitor variável (Fig. 6.10).

Lembre-se!



Figura 6.8 Capacitores de vários tipos e formatos

Fonte: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Capacitors_\(7189597135\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Capacitors_(7189597135).jpg). Acesso em: 1 janeiro 2021.

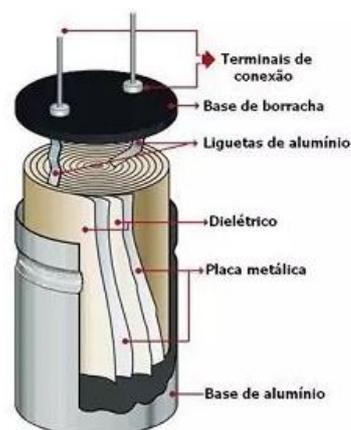


Figura 6.9

Representação das armaduras e dielétrico de um capacitor eletrolítico

Fonte: <https://www.mundodaeletrica.com.br/como-funcionam-os-capacitores/>. Acesso em: 4 janeiro 2021.



Figura 6.10 Capacitor variável

Fonte: <https://pt.dreamstime.com/photosimages/capacitor-vari%C3%A1vel.html>. Acesso em: 4 janeiro 2021.

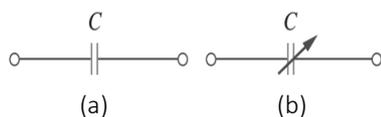


Figura 6.11 Representação em esquemas de circuitos de um capacitor (a) fixo e (b) variável

Fonte: Alexander e Sadiku (2013, p. 191)

6.3 Capacitância

Quando um capacitor é conectado a uma fonte de tensão U , como na Fig. 6.12, elétrons são retirados de uma das armaduras, que adquire uma carga positiva $+Q$, e depositados sobre a outra armadura, que passa a apresentar uma carga negativa $-Q$. Certamente a soma dessas cargas é igual a zero. Entretanto convencionou-se chamar de carga do capacitor o valor absoluto da carga de uma de suas armaduras. Dessa forma, a carga do capacitor é igual a Q .

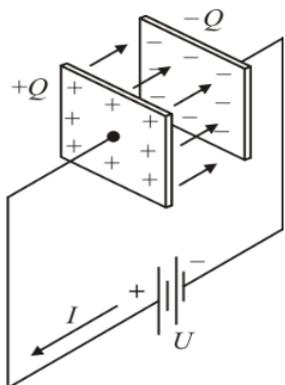


Figura 6.12 Capacitor com tensão aplicada U .

Fonte: <https://www.obaricentrodamente.com/2013/08/um-pouco-sobre-capacitores.html>. Acesso em: 4 janeiro 2021.

A quantidade de carga armazenada Q é diretamente proporcional à tensão aplicada U de modo que

$$Q = CU$$

onde C , a constante de proporcionalidade, é conhecida como a *capacitância* do capacitor, e sua unidade é o *farad* (F), em homenagem ao físico inglês Michael Faraday (1791-1867) (ALEXANDER; SADIKU, 2013, p. 190). Segue da equação, que *capacitância* é a razão entre a carga depositada em uma armadura de um capacitor e a diferença de potencial entre as duas armaduras, medidas em *farad* (F). Da mesma equação, podemos concluir que $1 \text{ farad} = 1 \text{ coulomb/volt}$.

Mesmo que a capacitância C de um capacitor seja a razão entre a carga Q por armadura e a tensão aplicada U , ela não depende de Q ou U , mas, sim, das dimensões físicas do capacitor (ALEXANDER; SADIKU, 2013, p. 191).

Para os capacitores planos (Fig. 6.12 e Fig. 6.13), verifica-se que a capacitância é diretamente proporcional a sua área A , inversamente

Lembre-se!

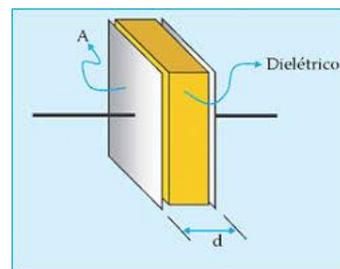


Figura 6.13 Representação das armaduras e dielétrico de um capacitor plano

Fonte: <https://interna.coceducacao.com.br/ebook/pages/8046.htm>. Acesso em: 4 janeiro 2021.

proporcional à distância d entre suas armaduras e depende da permissividade ϵ do dielétrico localizado entre essas armaduras. Essa relação é resumida na equação

$$C = \epsilon \frac{A}{d}$$

Agora, considere o capacitor cilíndrico da Fig. 6.14, que apresenta altura l , raio interno a e raio externo b .

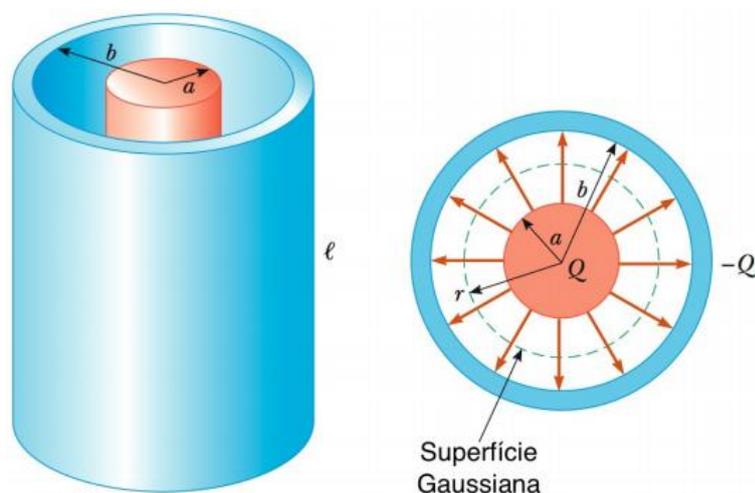


Figura 6.14 Campo elétrico uniforme formado entre as armaduras de um capacitor plano.

Fonte: Serway e Jewett (2014, p. 780).

Após um pouco de matemática avançada, sua capacitância pode ser calculada e a equação resultante é dada por

$$C = 2\pi\epsilon \frac{l}{\ln \frac{b}{a}}$$

Embora sejam apenas dois exemplos, podemos inferir a partir deles que apenas fatores físicos determinam o valor da capacitância de um capacitor.

6.4 Fase de carga

O circuito RC , no qual um capacitor é ligado em série com um resistor, conforme mostra a Fig. 6.15, é uma das configurações básicas mais importantes da eletrônica. Para se ter uma ideia, circuitos temporizadores ou *timers* (Fig. 6.16) são aqueles que através

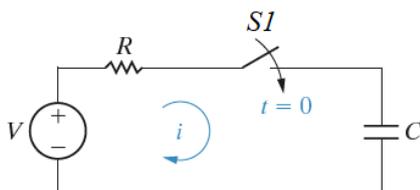


Figura 6.15 Circuito RC .

Fonte: Nilsson e Riedel (2015, com adaptações).

Nota!



Figura 6.16 Circuito integrado (CI) 555, famoso em projetos de circuitos temporizadores.

Fonte: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-889304010-ci-555-kit-5-unidades-_JM. Acesso em: 6 janeiro 2021.

de algum recurso geram retardos, tempos de acionamento ou desligamento, fazem sincronismo de dispositivos, dentre outras funções, são em sua maioria implementados usando redes RC para determinar os tempos desejados (BRAGA, 2012, p. 348).

Quando a chave *S1* é acionada, o capacitor inicia seu processo de carga, mas esse processo não ocorre de maneira instantânea. Em vez disso, ele ocorre através de um período de tempo determinado pelos componentes do circuito. Durante esse período, também denominado fase de carga, a fonte de tensão começa a remover elétrons de uma armadura e depositá-los na outra, resultando em armaduras com cargas de mesmo módulo e sinais opostos. A transferência de elétrons é muito rápida, inicialmente, ficando mais lenta à medida que a tensão entre os terminais do capacitor se aproxima da tensão da fonte. O movimento dos elétrons é interrompido no momento em que a tensão entre os terminais do capacitor se iguala à tensão da fonte, momento no qual as armaduras apresentam uma carga dada por $Q = CV$. Esse período de tempo durante o qual a carga está sendo depositada nas armaduras é chamado de **período transitório** – Um período de tempo em que a tensão ou a corrente muda de um nível de estado estacionário para outro. É importante observar que uma representação gráfica da tensão através do capacitor terá o mesmo formato que uma representação gráfica da carga nas armaduras com o tempo, visto que a tensão entre as armaduras está diretamente relacionada à carga nas armaduras por $V = Q/C$ (BOYLESTAD, 2012, p. 348)

Utilizaremos o *Multisim Live* para a análise da fase de carga de alguns circuitos RC. Iniciaremos desenhando o circuito da Fig. 6.17.

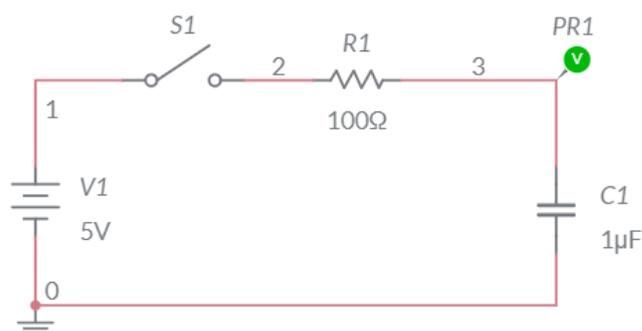


Figura 6.17 Circuito RC no Multisim Live.

Fonte: elaborada pelo autor.

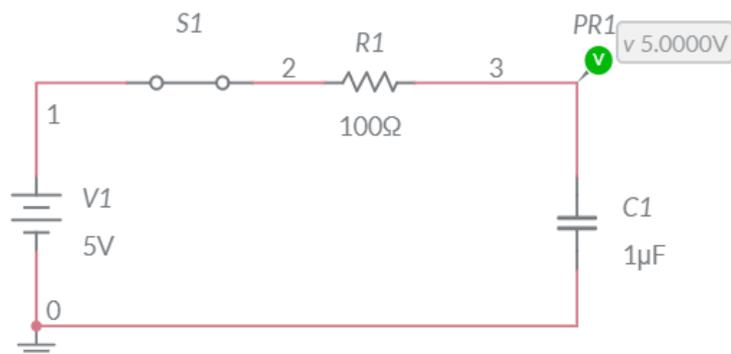


Figura 6.18 Tensão no capacitor após período de carga.

Fonte: elaborada pelo autor.

Lembre-se!

■ Campo elétrico e energia potencial eletrostática em um capacitor plano

Quando um capacitor está carregado, suas armaduras adquirem cargas (Q) de mesmo módulo e sinais opostos.

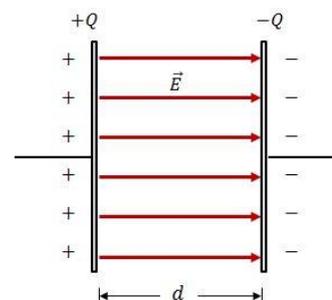


Figura 6.19 Campo elétrico uniforme formado entre as armaduras de um capacitor

Fonte:
<https://www.respondeai.com.br/conteudo/fisica/eletricidade/campo-e-energia-em-um-capacitor/344>. Acesso em: 1 janeiro 2021.

Essa configuração permite a formação de um campo elétrico uniforme entre elas, sendo este o responsável por armazenar a energia eletrostática no capacitor.

A **intensidade do campo elétrico** (E) entre as armaduras é determinada pela tensão (U) através das armaduras e pela distância (d) entre elas:

$$E = \frac{U}{d}$$

Enquanto sua energia potencial eletrostática (E_p) é dada por:

$$E_p = \frac{QU}{2}$$

Agora fechamos a chave *S1* antes de iniciar a simulação. Feito isso, a ponta de prova mostra que sobre o capacitor existe uma tensão de 5V (Fig. 5.18). Essa informação final não é relevante, porque já conhecemos. O que precisamos é verificar como a tensão varia com o tempo até que o capacitor esteja completamente carregado, ou seja, quando a tensão entre suas armaduras se iguala à tensão da fonte. Em outras palavras, precisamos acompanhar o período transiente. Para isso é necessário modificar o modo como o *Multisim Live* produz as simulações. Por padrão o tipo de simulação presente no simulador é *Interactive* (Fig. 6.20).



Figura 6.20 Modo padrão de simulação do *Multisim Live*.

Fonte: elaborada pelo autor.

O modo de simulação que permite a rápida visualização do período transitório é o modo *Transient* (Fig. 6.21). Esse modo evita que se perca algum tempo com configurações ou ajustes em tempo de execução.



Figura 6.21 Modificando modo de simulação do *Multisim Live* para *Transient*.

Fonte: elaborada pelo autor.

Agora, clique em *Open configuration pane* e em *Initial conditions* modifique a caixa de entrada para *User defined* (Fig. 6.22), isso evitará que os gráficos sejam compostos apenas por retas.

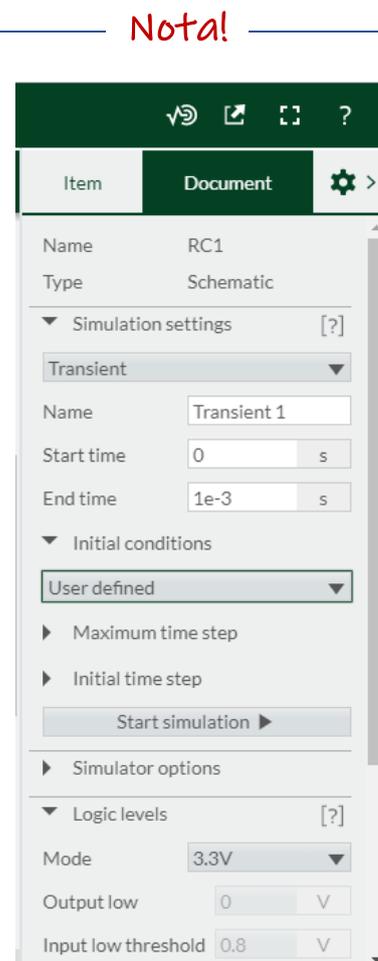


Figura 6.22 Modificando as condições iniciais (*Initial conditions*) do *Multisim Live*.

Fonte: elaborada pelo autor.

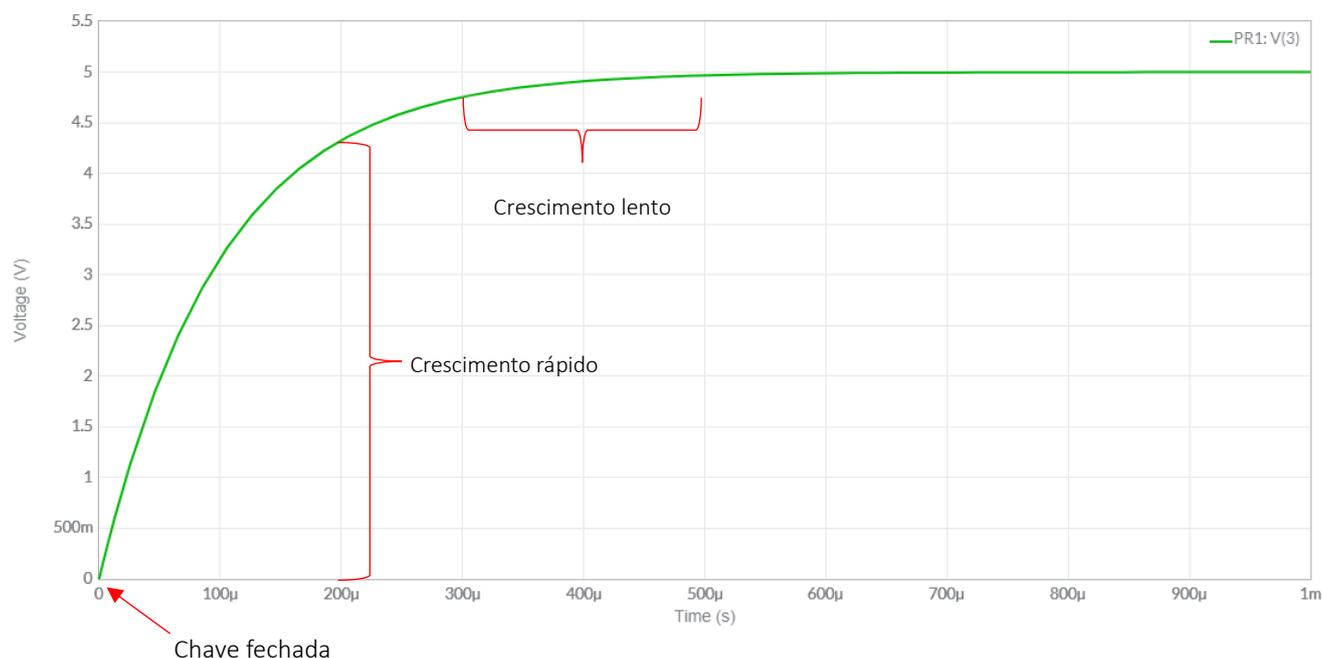


Figura 6.23 Período transitório: gráfico tensão (v_c) versus tempo (t).

Fonte: elaborada pelo autor.

Após as modificações tudo está preparado para dar início à simulação. A Fig. 6.23 nos permite verificar que a tensão através do capacitor é zero volt quando a chave está fechada ($t = 0$ s). ela então aumenta em um primeiro momento (de 0 s a $200 \mu\text{s}$), tendo em vista que a carga está sendo depositada a uma velocidade alta, o que corresponde a uma rápida transferência de elétrons entre as armaduras. Na medida em que o tempo passa, a carga é depositada a uma velocidade mais baixa, o que implica um menor fluxo de elétrons, e a mudança da tensão diminui. A tensão continua a crescer, mas a uma velocidade muito mais baixa. Na medida em que a tensão entre as placas se aproxima da tensão da fonte, a transferência de carga é muito baixa, até que finalmente a tensão entre as armaduras se iguala à tensão da fonte. Nesse momento temos o fim da fase transitória.

A forma de onda da Fig. 6.23 é descrita pela equação matemática

$$v_c = V(1 - e^{-t/\tau})$$

que relaciona a tensão sobre o capacitor (v_c) com a tensão da fonte (V) com o passar do tempo (t).

A tensão no capacitor (v_c) é escrita em minúsculo para destacar que ela é uma função que vai mudar com o tempo; ela não é constante. O expoente da função exponencial é o tempo (t) dividido por uma constante (τ), a letra grega *tau*, cuja quantidade é definida por:

$$\tau = RC$$

O fator τ é chamado de **constante de tempo** do circuito e tem as unidades de tempo. Como estamos usando todas as grandezas com as unidades do **Sistema Internacional de Unidades (SI)**, τ é dado em segundos (**s**) (BOYLESTAD, 2012, p. 350).

Para o circuito em análise, temos o seguinte cálculo para τ :

$$\tau = RC = 100 \Omega \times 1 \mu F = 100 \mu s$$

Observe, portanto, que o gráfico da Fig. 6.23 não está simplesmente em função do tempo (t), mas em função de τ , a constante de tempo do circuito (Fig. 6.24).

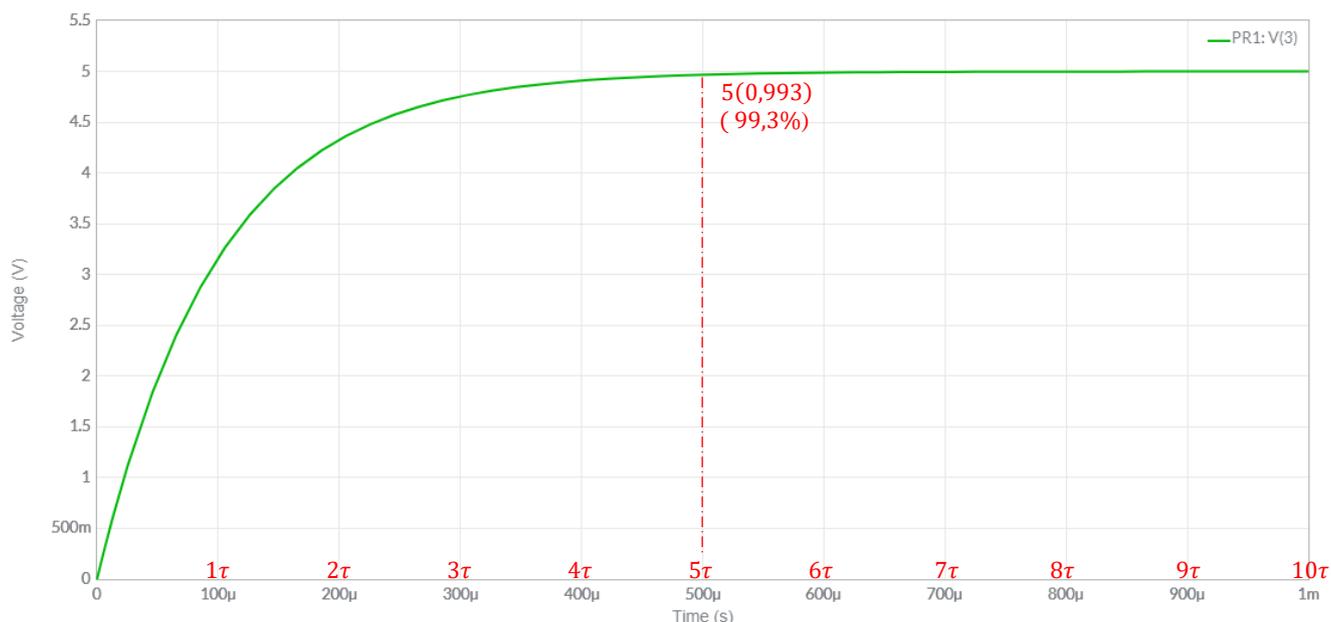


Figura 6.24 Período transitório: gráfico tensão (v_c) versus

Fonte: elaborada pelo autor.

À medida que o número de constantes de tempo aumenta, a tensão nos terminais do capacitor se aproxima da tensão aplicada pela fonte. Da Fig. 6.24 é possível precisar para cinco constantes de tempo o momento em que

praticamente cessa a transferência de carga entre as armaduras do capacitor ou, em outras palavras, a tensão através de um capacitor em um **circuito CC** é essencialmente igual à tensão aplicada pela fonte após cinco constantes de tempo (BOYLESTAD, 2012, p. 350). Essa informação pode ser confirmada utilizando a $v_c = V(1 - e^{-t/\tau})$, substituímos t por 5τ e lembrando que para o nosso circuito a fonte possui tensão de cinco volts. Assim, temos:

$$v_c = V \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = 5 \left(1 - e^{-\frac{5\tau}{\tau}}\right) = 5(1 - e^{-5}) \cong 5(1 - 0,007) \cong 5(0,993) \cong 4,965 \cong 5 \text{ volts}$$

Podemos então concluir que a fase transitória ou de carga de um capacitor essencialmente terminou após cinco constantes de tempo.

Iniciaremos agora, a análise do comportamento da corrente que percorre um circuito RC durante o período transitório.

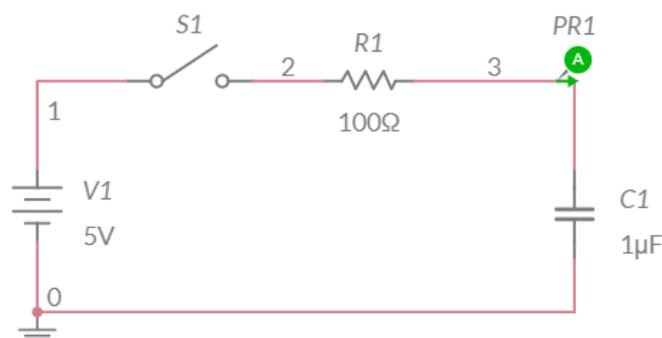


Figura 6.25 Circuito para análise de corrente

Fonte: elaborada pelo autor.

Para tanto, utilizaremos novamente o circuito da Fig. 6.17, mas antes trocamos a ponta de prova que indica valores de potencial por aquela que registra corrente elétrica (Fig. 6.25). Após esse pequeno acerto, damos início a simulação, cujo resultado é mostrado a seguir:

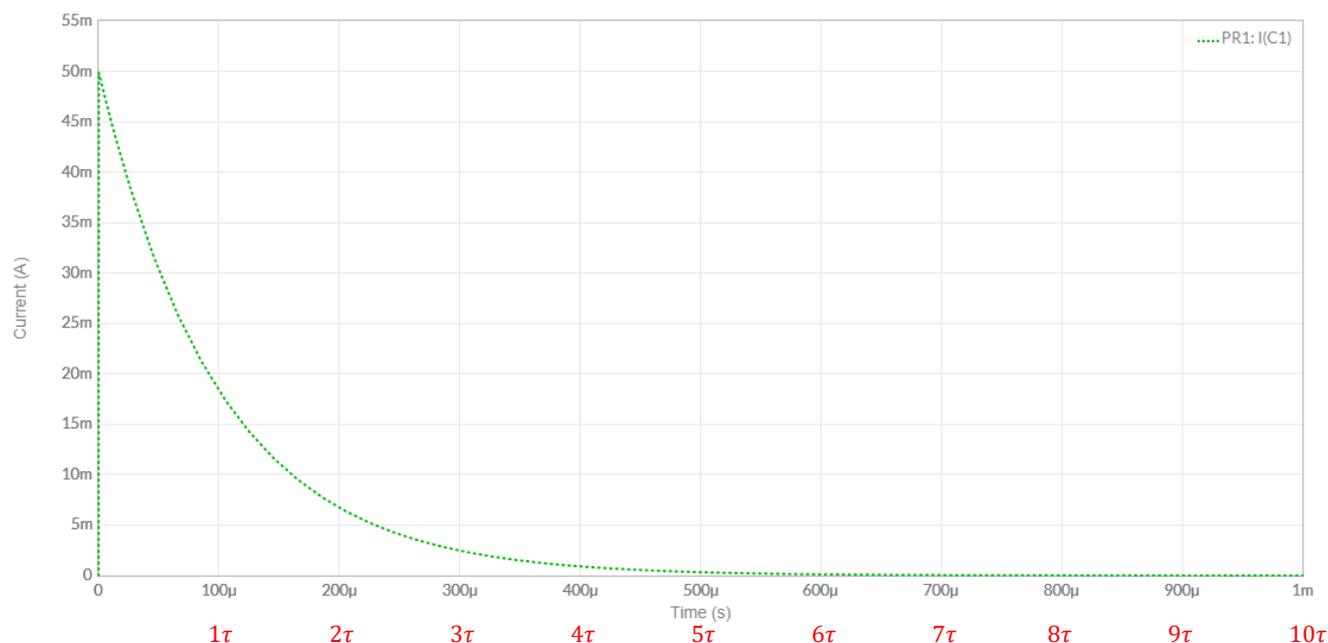


Figura 6.26 Período transitório: gráfico corrente (i_c) versus tempo (t).

Fonte: elaborada pelo autor.

Podemos constatar que no instante em que a chave $S1$ é fechada, o fluxo de carga ou de corrente salta muito rapidamente para um valor limitado pela tensão aplicada e pela resistência do circuito, sendo mais precisos, podemos calcular a corrente em $t = 0$ s:

$$i_c = \frac{V}{R} = \frac{5}{100} = 0,05 \text{ A} = 50 \text{ mA}$$

Então, a taxa de transferência de elétrons, conseqüentemente, a corrente, diminui muito rapidamente, até que, eventualmente, carga alguma seja depositada nas armaduras e a corrente caia a zero ampères.

A equação que determina o comportamento da corrente é

$$i_c = \frac{V}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Note que em $t = 0$ s, temos $i_c = V/R$, conforme anteriormente identificado. Calculando a corrente passados cinco constantes de tempo, obtemos:

$$i_c = \frac{5}{100} e^{-\frac{5\tau}{\tau}} = 0,05(e^{-5}) \cong 50m(0,0067) \cong 0,337m \cong 0,000337 \cong 0 \text{ ampère}$$

A Fig. 6.26 revela que a corrente de um circuito CC capacitivo é essencialmente zero ampère após cinco constantes de tempo da fase de carga terem passados. Também é importante reconhecer que durante a fase de carga, a principal mudança na tensão e na corrente ocorre durante a primeira constante de tempo (BOYLESTAD, 2012, p. 350).

Após análise dos gráficos podemos inferir, também, que um capacitor se comporta de forma similar a um curto circuito no momento em que a chave é fechada em um circuito RC em série sem carga e apresenta comportamento análogo a um circuito aberto assim que o período transitório é encerrado em um circuito de corrente contínua.

Copiamos o circuito da Fig. 6.17 duas vezes. Em seguida os capacitores foram modificados para os valores $C1 = 1,5\mu\text{F}$, $C2 = 2,0\mu\text{F}$ e $C3 = 2,5\mu\text{F}$, mas as resistências foram mantidas em 100Ω (Fig. 6.27).

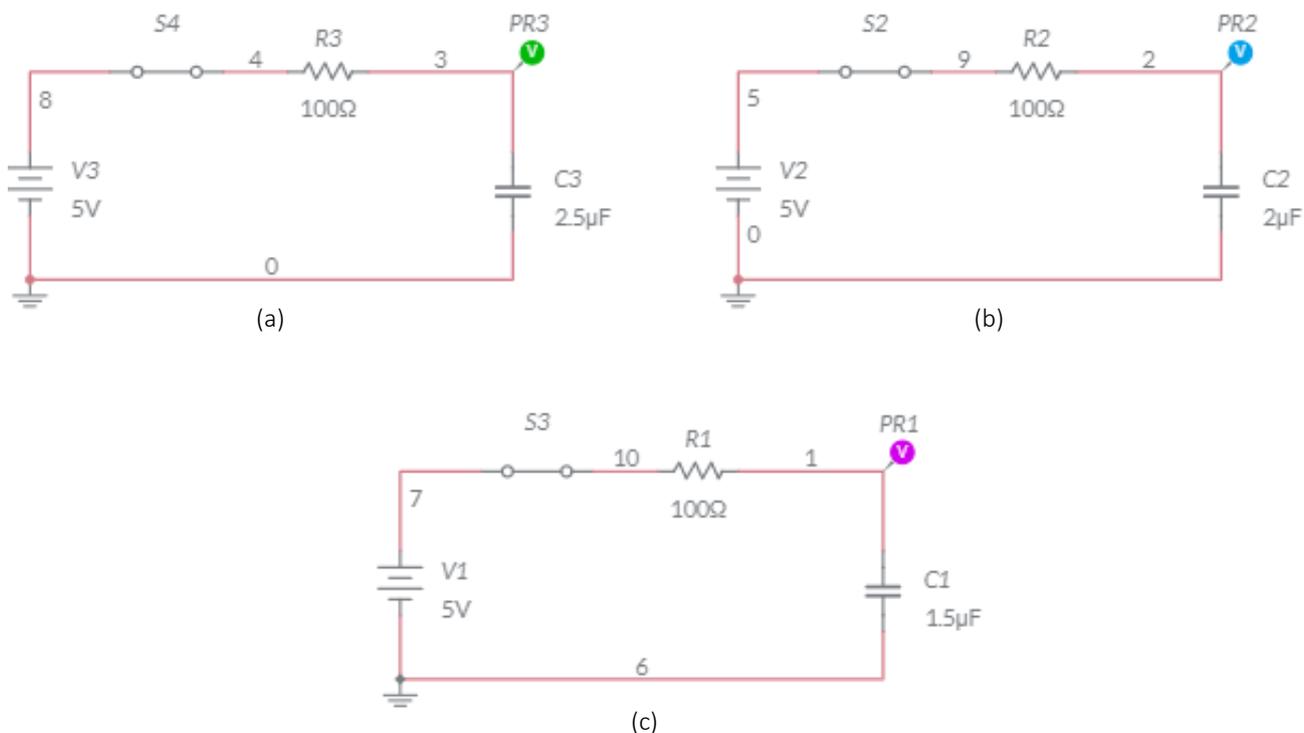


Figura 6.27 Circuitos RC com iguais valores para os resistores, mas com capacitores de (a) $2,5 \mu\text{F}$, (b) $2 \mu\text{F}$ e (c) $1,5 \mu\text{F}$.

Fonte: elaborada pelo autor.

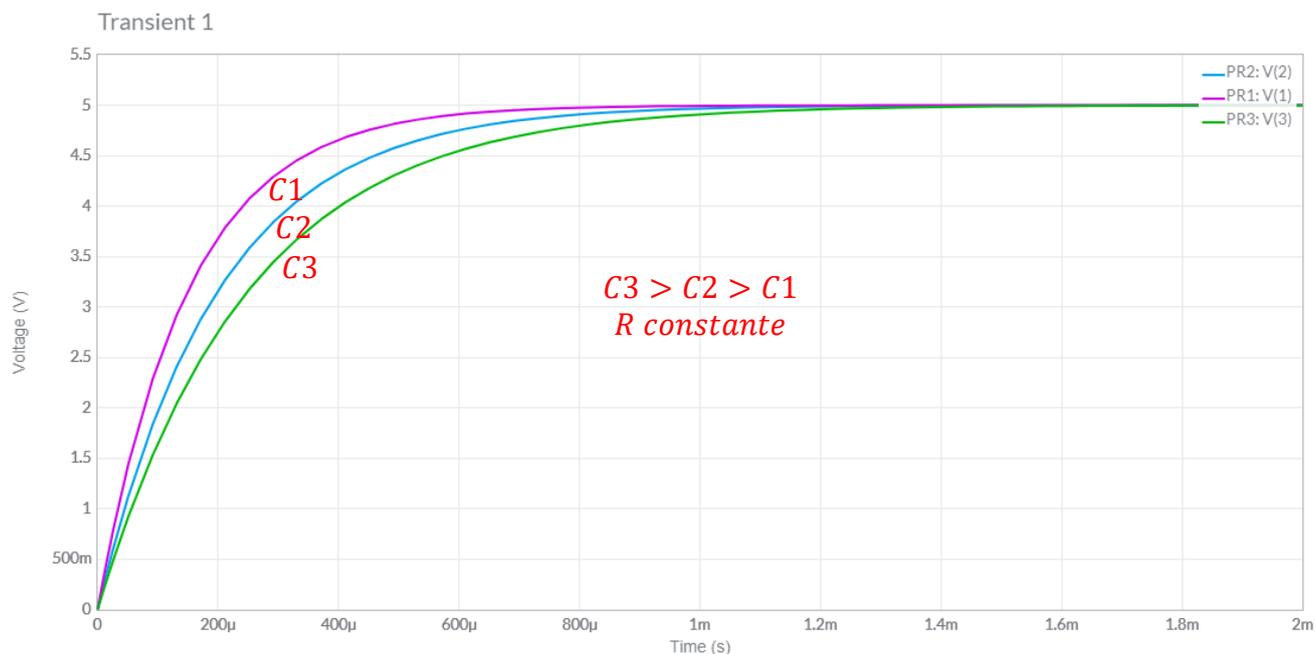


Figura 6.28 Efeito do aumento dos valores de C (com R constante) sobre a curva de carga para v_c .

Fonte: elaborada pelo autor.

Após o final da simulação (Fig. 6.28), nota-se que, para um circuito de resistência fixa, o aumento da capacitância e, por conseguinte, a constante de tempo RC , mais tempo o capacitor levará para ser carregado, isso porque ele suporta uma quantidade maior de carga. O mesmo efeito pode ser identificado se a capacitância é mantida constante e aumentado o valor da resistência, agora o tempo maior ocorre por conta das correntes mais baixas ocasionado pelos valores mais elevados das resistências. Verifique!

Para finalizar, nos circuitos da Fig. 6.27, todas as pontas de prova indicadoras de potencial foram trocadas por pontes indicadoras de corrente. O resultado da simulação é detalhado abaixo:

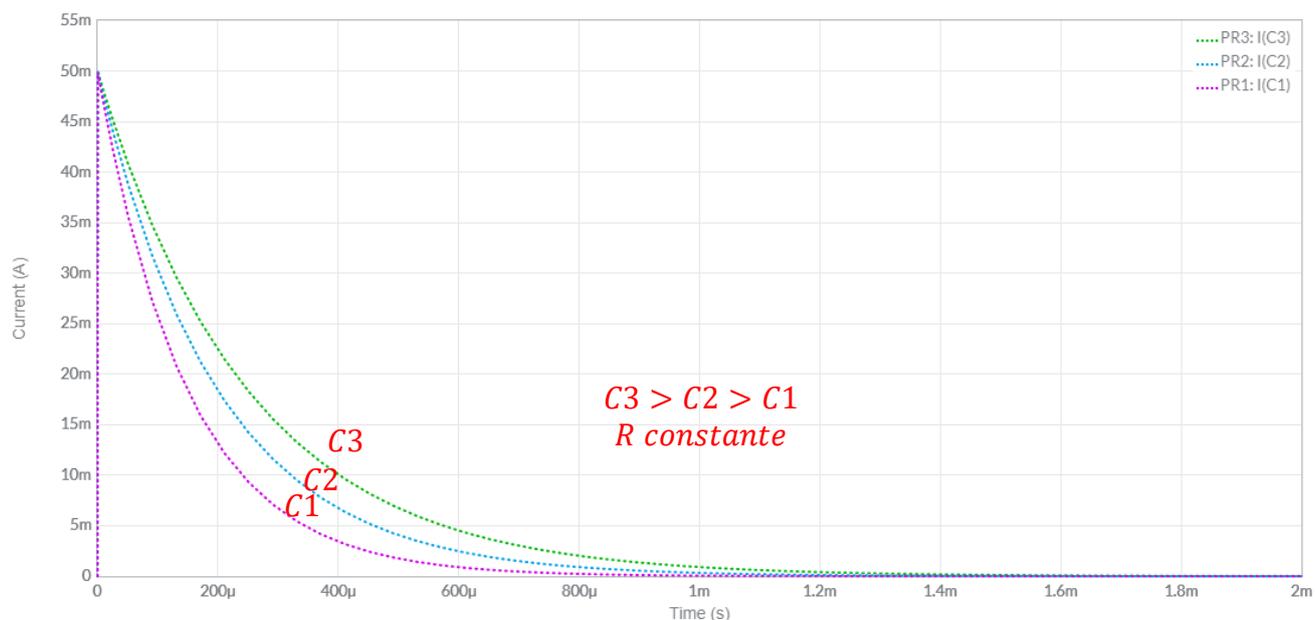


Figura 6.29 Efeito do aumento dos valores de C (com R constante) sobre a curva de carga para i_c .

Fonte: elaborada pelo autor.

Como deveria ser, quanto maior a capacitância mais carga para transferir e, por conseguinte, maior é o tempo que o circuito leva para descarregar completamente o capacitor.

6.5 Fase de descarga

Qual seria o comportamento da tensão e da corrente de um circuito RC, sem carga, na fase transitória de descarga? Para responder a esta pergunta, utilizaremos o circuito a seguir:

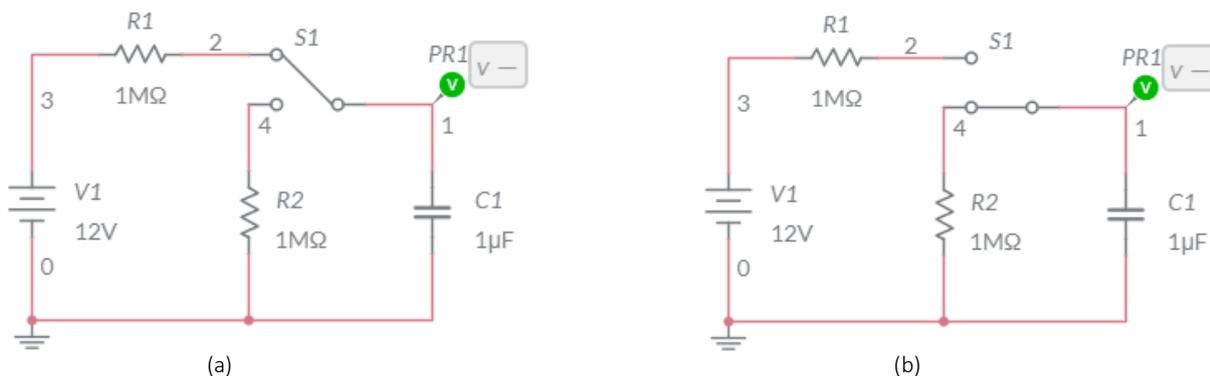


Figura 6.30 Circuito RC (a) na fase de carga e (b) em configuração de descarga.

Fonte: elaborada pelo autor.

Quando a chave S1 está para cima, o capacitor está no processo de carga e quando estiver para baixo o processo é de descarga. Esse modelo de chave é a *SPDT* e está disponível em *Switches* (Fig. 6.31).

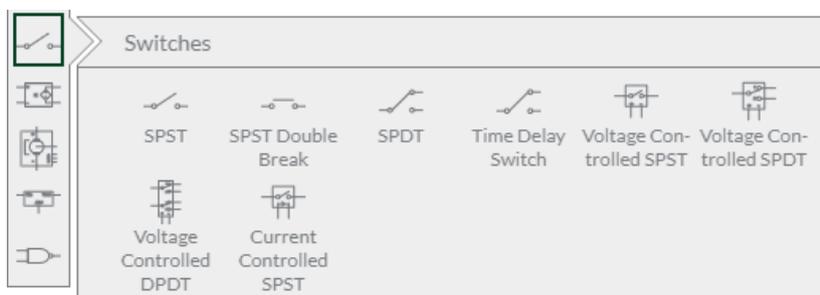


Figura 6.31 Selecionando a chave SPDT.

Fonte: elaborada pelo autor.

Vamos utilizar o modo *Interactive* (Fig. 6.32) do Multisim Live e, antes de iniciar a simulação verifique se a chave está na configuração de carga.



Figura 6.32 Selecionando o modo *Interactive*

Fonte: elaborada pelo autor.

Vamos iniciar a simulação apenas para ajustarmos alguns parâmetros, isso será necessário para uma boa visualização do gráfico. Clique sobre o botão *Grapher* (Fig. 6.33) e, em seguida, sobre *Open configuration pane* (Fig. 6.34)



Figura 6.33 Botão *Grapher*

Fonte: elaborada pelo autor.

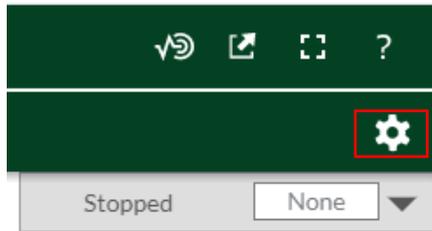


Figura 6.34 Botão *Open configuration pane*

Fonte: elaborada pelo autor.

Isso fará abrir uma grande janela do lado direito da tela. Nela, procure por *Axis* e clique sobre ele, uma outra janela se abrirá. Nesta localize a caixa *Time/Div* e coloque o valor *2s/div*. Logo em seguida, em *Voltage (V)*, preencha *Minimum* com zero volt (0 V) e *Maximum* com 15 volts. A Fig. 6.35 resume o passo a passo das instruções.

Como já foi mencionado, essas configurações possibilitam uma perfeita visualização do processo de carga e descarga do capacitor, isso porque nossa constante de tempo é

$$\tau = RC = 1M \times 1\mu = 1s$$

Logo, precisamos de uma escala de tempo próxima desse valor, isso explica a escolha de *2s/div*, também poderia ser *1s/div*. Já o valor mínimo da tensão em 0 V e o valor máximo em 15 V é necessário porque nossa bateria é de 12 V. Após todos os ajustes a visualização do gráfico será a melhor possível.

Finalizado esse processo, feche o *Open configuration pane* (é só clicar sobre a seta ao lado da engrenagem), em seguida clique sobre *Split* (Fig. 6.36), isso permitirá a visualização simultânea



Figura 6.36 Selecionando botão *Split*

Fonte: elaborada pelo autor.

Nota!

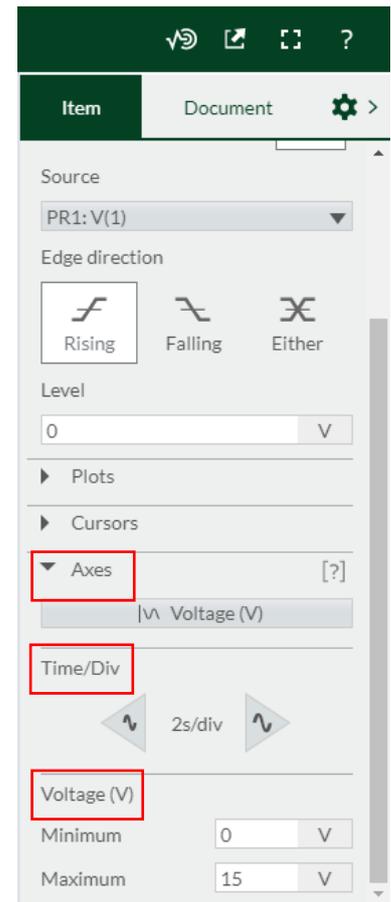


Figura 6.35 Passo a passo para configuração de *Axis*

Fonte: elaborada pelo autor.

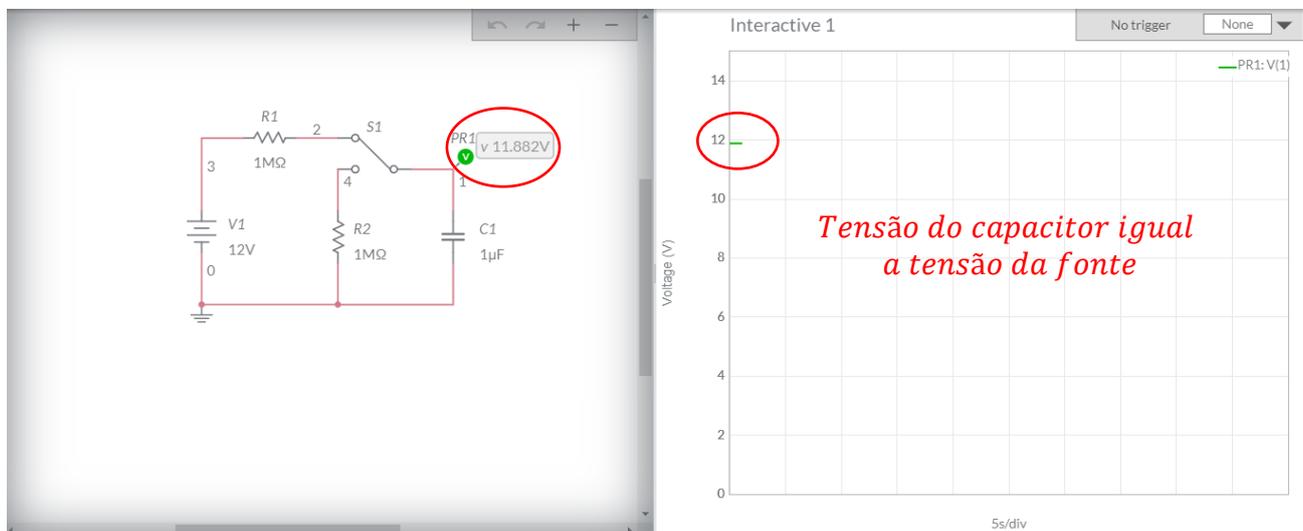


Figura 6.37 Visualização simultânea do circuito e do gráfico com botão *Split*

Fonte: elaborada pelo autor.

(Fig. 6.37) do circuito e do gráfico correspondente. Pare a simulação para resetar o gráfico e logo em seguida inicie novamente. Observe que ao resetar a simulação o gráfico é apagado, mas a tensão no capacitor é preservada, mais especificamente seu valor é exatamente 12 V, a mesma tensão fornecida pela fonte. O que significa que o capacitor está completamente carregado. Isso ocorre porque nossos ajustes de parâmetros foram realizados utilizando o processo de carga. É possível checar essa informação observando tanto o gráfico quanto o valor registrado na ponta de prova (Fig. 6.37).

Agora, clique sobre a chave para que ela desça e, assim, inicie o processo de descarga, você notará que o valor marcado pela ponta de prova irá decrescer, o mesmo ocorre no gráfico (Fig. 6.38).

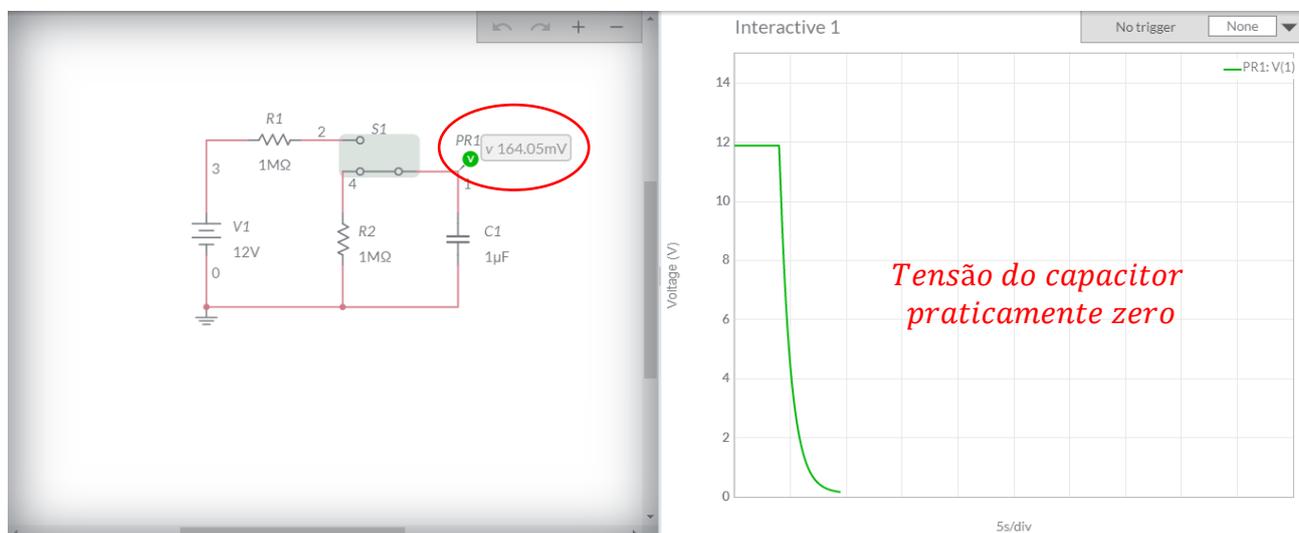


Figura 6.38 Gráfico da tensão do capacitor em função do tempo no processo de

Fonte: elaborada pelo autor.

Quando a tensão do capacitor chegar no seu valor mínimo (momento em que o valor registrado na ponta de prova estabiliza), acione novamente a chave para que o capacitor recomece o processo de carga, ao final desse processo, jogue novamente a chave para baixo para uma nova fase de descarga. Fazendo isso algumas vezes é possível visualizar vários ciclos de carga seguidos de ciclos de descarga (Fig. 6.39).

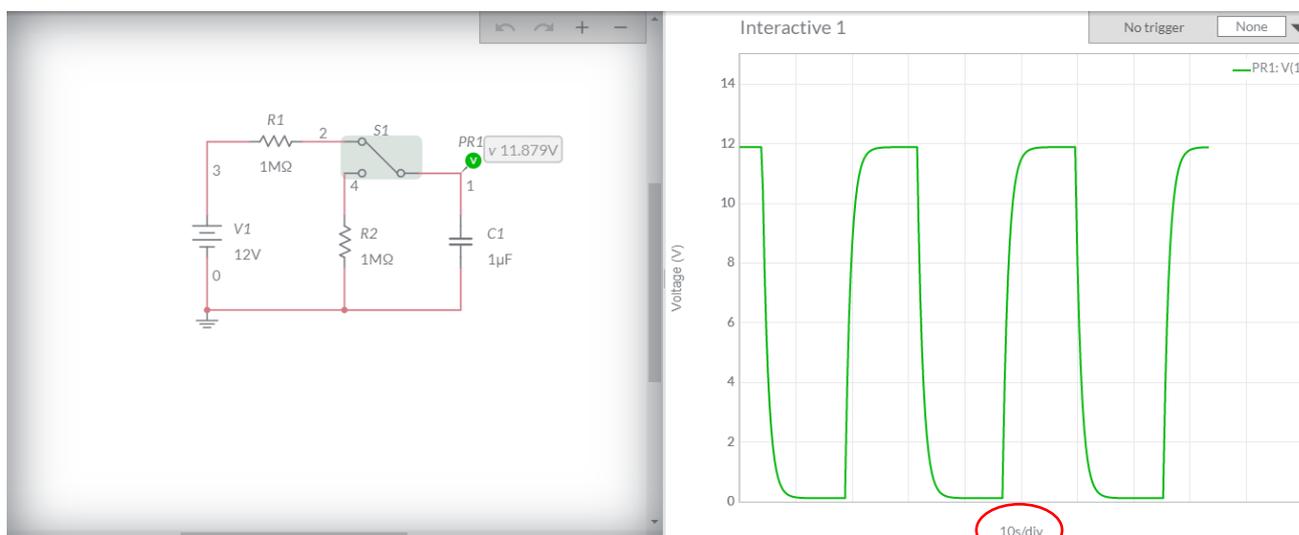


Figura 6.39 Gráfico da tensão do capacitor em função do tempo: ciclos de descarga e carga

Fonte: elaborada pelo autor.

É importante que se fique atento ao fato de que à medida que o gráfico vai aumentando é necessário mais

segundos por divisão. No gráfico acima já temos 10s/div . Podemos modificar esse valor em tempo de execução girando para frente ou para traz o botão *scroll* do *mouse*. Isso permitirá que todo o gráfico ou apenas uma porção específica seja visualizada.

Trocando a ponta de prova presente no circuito, podemos investigar como se comporta a corrente no processo de descarga (Fig. 6.40). Nesse momento toda a tensão através do capacitor aparece diretamente através do resistor, que estabelece uma corrente de descarga. Inicialmente, a corrente salta para um valor relativamente alto, decrescendo logo em seguida. Essa queda no valor da corrente ocorre porque a carga está deixando as armaduras do capacitor, o que provoca uma redução da tensão através do capacitor e, uma conseqüente redução de tensão através do resistor e na corrente resultante.

É importante salientar que a corrente i_c tem agora sentido posto (note o sinal negativo dos valores mostrado no gráfico e na ponta de prova) aquele do processo de carga, isso ocorre porque a tensão através do capacitor não inverte a polaridade, mas a corrente inverte o sentido.

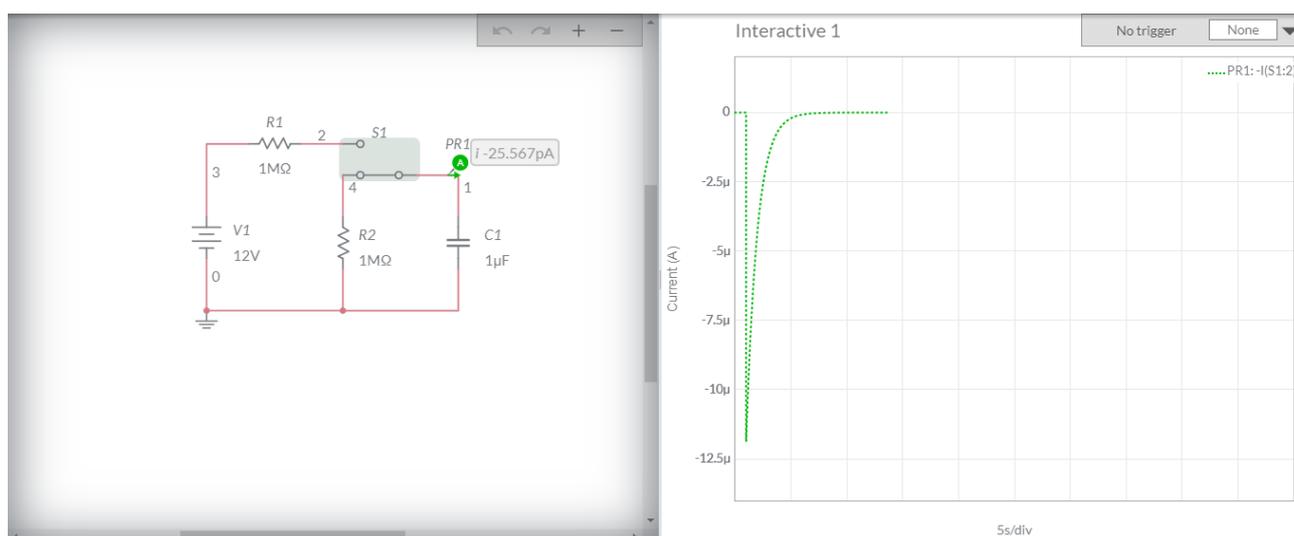


Figura 6.40 Gráfico da corrente produzida pelo capacitor em função do tempo no processo de descarga

Fonte: elaborada pelo autor.

A inversão do sentido da corrente ficará mais evidente após um ciclo completo de carga e descarga (Fig. 6.41).

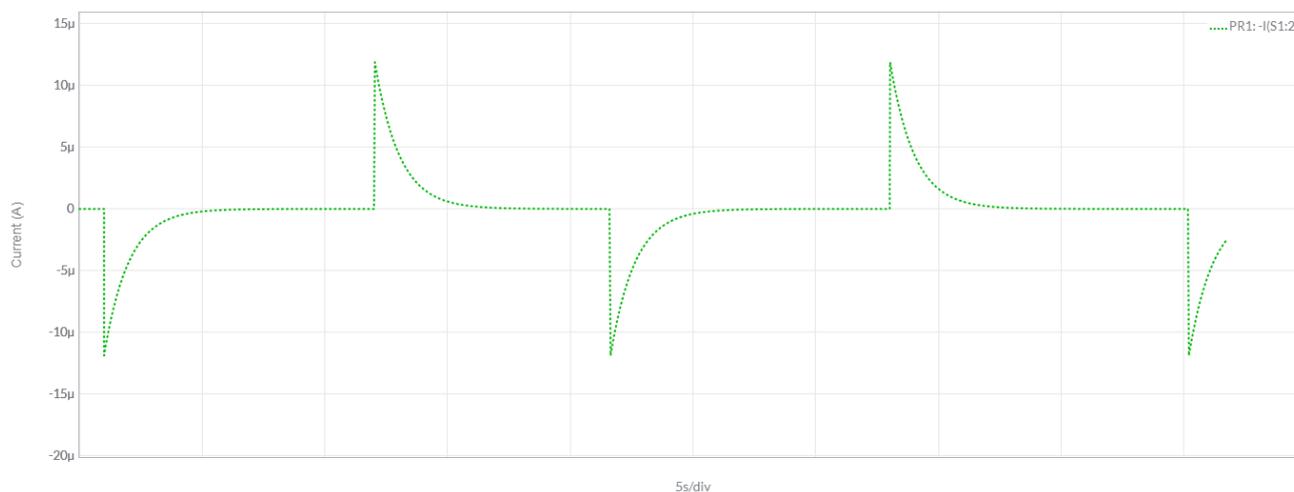


Figura 6.41 Gráfico da corrente produzida pelo capacitor em função do tempo: ciclos de descarga e carga

Fonte: elaborada pelo autor.

Note que a descarga completa do capacitor no circuito RC em série sem carga vai ocorrer, para todos os fins práticos, em cinco constantes de tempo (BOYLESTAD, 2012, p. 350).

7

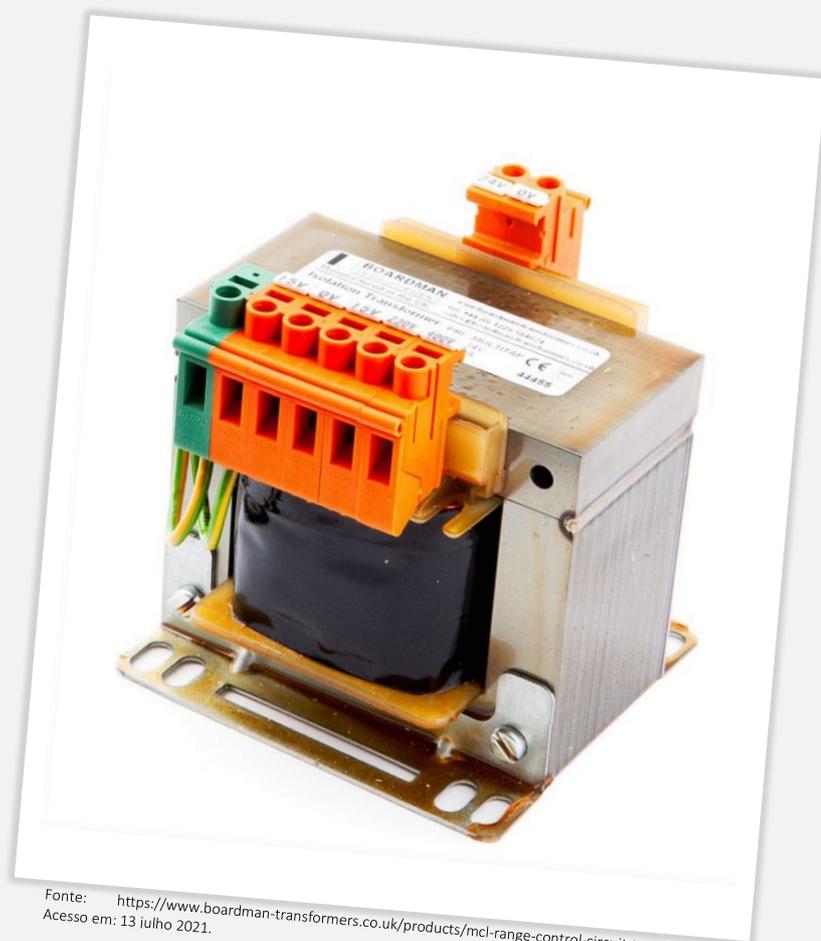
CAPÍTULO 7

Tópicos

7.1 Introdução

7.2 Definição

Transformador



Fonte: <https://www.boardman-transformers.co.uk/products/mcl-range-control-circuit-transformers>.
Acesso em: 13 julho 2021.

Neste capítulo dá-se o estudo dos transformadores. Classificação, representação e características dos transformadores são alguns dos tópicos que serão detalhados aqui.

7.1 Introdução

No Brasil o sistema de distribuição primária (DP) de energia elétrica utiliza tensões elétricas de 34,5 kV ou 13,8 kV. Valores extremamente elevados para que os consumidores residenciais, comerciais e industriais possam utilizar diretamente. Estas unidades consumidoras são alimentadas pela rede de distribuição secundária (DS), que operam com tensões de 380/220 V, 220/127 V em sistema trifásico e 220/110 V em sistema monofásico com tape. Essa adequação de tensão entre o sistema de distribuição primária e o consumidor final ocorre nas subestações abaixadoras que empregam grandes transformadores (Fig. 7.1) para realizar a redução de tensão elétrica (CREDER, 2016, p. 27).



Figura 7.1 Transformador utilizado em subestação transformadora.

Fonte: <https://www.adolphoeletricista.com.br/etd/>. Acesso em: 8 junho 2021.

Computadores, celulares dentre outros dispositivos eletrônicos, não podem ser ligados diretamente às tomadas residências (220V/127V) visto que utilizam tensões que, em geral, não ultrapassam os 20 volts. Por isso esses equipamentos utilizam fontes de alimentação (Fig. 7.2) que apresentam em seu circuito um transformador que reduz a tensão da tomada a níveis aceitáveis.



Figura 7.2 Fonte de alimentação.

Fonte: <https://www.electricalautomationnetwork.com/pt/meanwell/alimentacao-ac-dc-estrutura-aberta-meanwell-pt-4503>. Acesso em: 8 junho 2021.

Transformadores também estão presentes nos circuitos internos de televisores e aparelhos de som, isso porque partes desses circuitos não necessitam de uma tensão tão elevada quanto 220 volts. Por fim, não é comum comprarmos eletroeletrônicos com tensão de 110 volts, mas se esse for o caso, será necessário usá-lo associado a um transformador para que este não venha a queima ao primeiro uso.

7.2 Definição

O transformador é um dispositivo que, através de indução eletromagnética, modifica uma tensão alternada, aumentando-a ou diminuindo-a conforme a necessidade (JUNIOR; FERRARO; SOARES, 2009, p. 404).

O transformador é constituído de duas bobinas independentes, enroladas sobre um mesmo núcleo, o que permite que o fluxo magnético variável produzido por uma delas seja transferido para a outra. Esse acoplamento entre as bobinas resulta em uma tensão induzida em ambas (BOYLESTAD, 2012, p. 802).

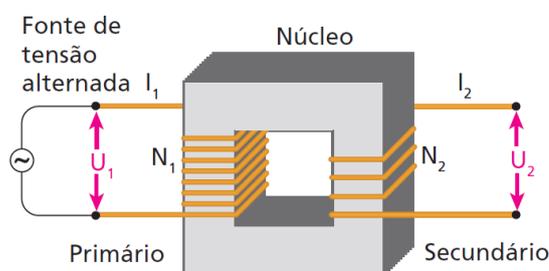


Figura 7.3 Transformador com suas bobinas e núcleo

Fonte: Biscuola, Bôas e Doca (2012, p. 313).

Chama-se primário a bobina na qual a fonte de tensão a ser transformada é ligada, e secundário aquela que recebe a carga.

Existe uma infinidade de transformadores, mas todos podem ser divididos em elevadores e abaixadores. Isso porque o transformador elevador produzirá no secundário uma tensão maior que aquela no primário, e um transformador abaixador produzirá no secundário uma tensão menor que aquela no primário (MALVINO; BATES, 2016, p. 92). Os transformadores podem ainda ser classificados em transformadores para baixa frequência e transformadores para alta frequência. São denominados de baixa frequência aqueles que trabalham, frequentemente, com sinais da rede de energia de 60 Hz ou com frequências utilizadas em amplificadores de som. Esses transformadores possuem núcleo constituído por um bloco de lâminas ferromagnéticas justapostas cuja finalidade é diminuir as correntes de Foucault que são induzidas e que provocam o aquecimento do componente.

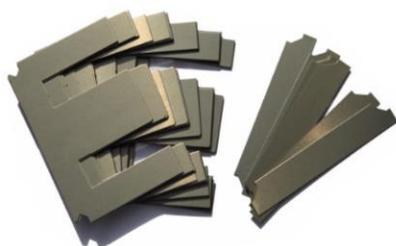


Figura 7.4 Lâminas em aço silício para transformador

Fonte: <https://portuguese.alibaba.com/product-detail/popular-crgo-silicon-steel-ei-lamination-transformer-core-for-sale-60577382440.html>. Acesso em: 8 junho 2021.

Enquanto que os transformadores para altas frequências são utilizados, por exemplo, em circuitos de fontes chaveadas, transmissores e receptores de rádio, podendo operar com frequência da ordem do quilohertz (kHz) ou até mesmo do megahertz (MHz), eles têm núcleos de ferrites ou de ar (BRAGA, 2012, p. 180).

O símbolo que representa um transformador utiliza suas duas bobinas lado a lado (Fig. 7.6).

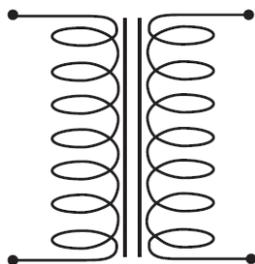


Figura 7.6 Símbolo de um transformado

Fonte: Biscuola, Bôas e Doca (2012, p. 313).

O *Multisim Live* utiliza símbolo semelhante para seus transformadores (Fig. 7.7).



Figura 7.7 Símbolo para transformador (a) comum e (b) com derivação central

Fonte: elaborada pelo autor.

A derivação central permite que se utilize apenas metade da bobina na qual ela (a derivação) está conectada.

Vamos utilizar um transformador do *Multisim Live*, sem derivação central, para produzir no secundário uma tensão de 110 V quando no primário é conectada uma fonte de tensão de 220 V. Esse tipo de transformador é bem comum nos laboratórios escolares. Para acessar os transformadores do *Multisim Live*, na paleta de componentes vamos até *Passive*, em seguida clicamos na pasta (observe o formato) *Transformers...* (Fig. 7.8) e escolhemos o componente *1P1S* (Fig. 7.9).

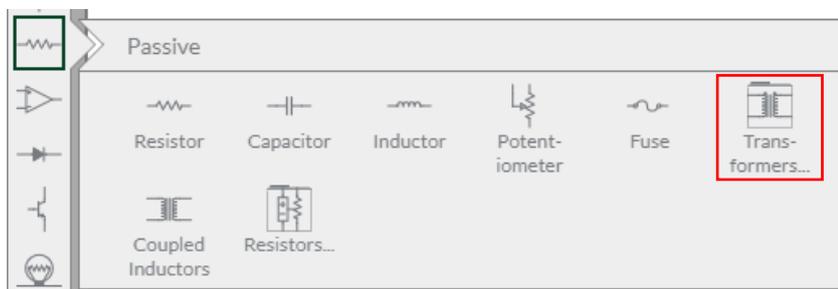


Figura 7.8 Selecionando a pasta *Transformers* na subpaleta *Passive*

Fonte: elaborada pelo autor.

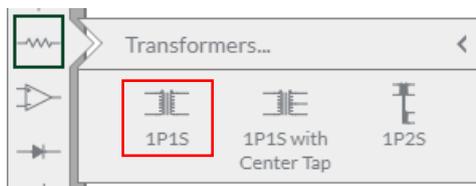


Figura 7.9 Selecionando o transformador sem derivação central (*1P1S*)

Fonte: elaborada pelo autor.

Nota!



Figura 7.5 Núcleo de ferrite para transformador

Fonte: <http://www.magmattec.com.br/nucleo-de-ferrite>. Acesso em: 8 junho 2021.

O próximo componente é uma fonte de tensão alternada. Clicamos em *Sources* e selecionamos *AC Voltage* (Fig. 7.10). A fonte tem tensão de 1 volt e, por ser alternada, frequência de 1kHz. É interessante modificar a tensão para 220 volts e a frequência para 60 Hz, porque essas são as características da rede elétrica que alimenta as tomadas de nossas residências, aqui no Ceará. Também precisaremos de um resistor, aterramento (*Ground*) e duas pontas de prova (*PROBE*) para tensão elétrica (*Voltage*), mas esses componentes você já sabe adicioná-los. Monte o circuito conforme esquemático da Fig. 7.11.

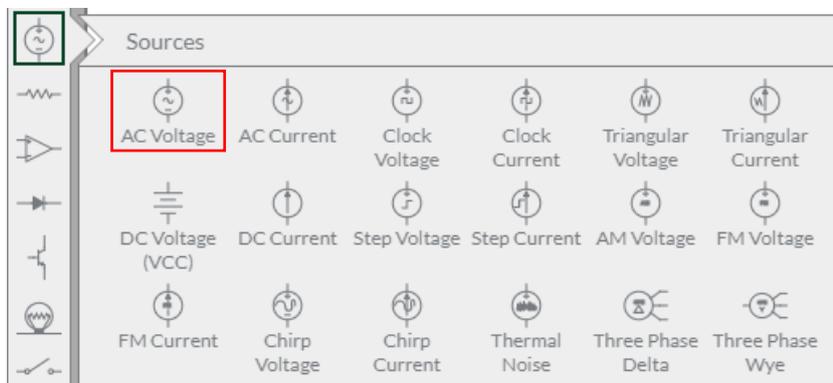


Figura 7.10 Selecionando uma fonte de tensão alternada

Fonte: elaborada pelo autor.

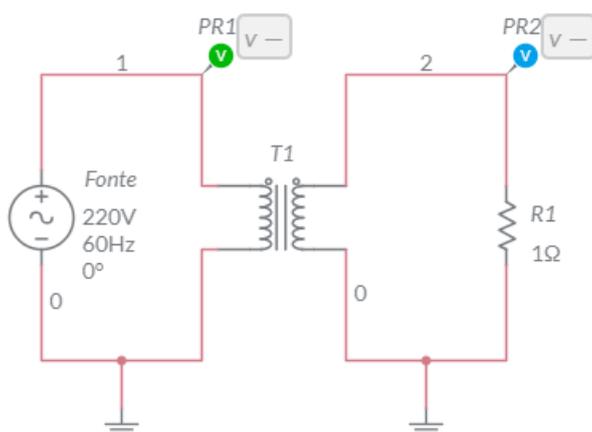


Figura 7.11 Circuito com transformador abaixador (220 V para 110 V)

Fonte: elaborada pelo autor.

Antes de iniciar a simulação, devemos modificar a relação entre as espiras dos enrolamentos primário e secundário, que nesse caso deve ser duas para uma.



Figura 7.12 Botão Open configuration pane

Fonte: elaborada pelo autor.

Selecione o transformador para colocá-lo em modo ativo, na sequência clique sobre o botão da engrenagem (*Open configuration pane*) (Fig. 7.12).

Na janela que abrir, localize a propriedade do transformador denominada *Model* e preencha a caixa de texto *PTurns* com o valor 2. Note que a caixa de texto *STurns* já está com o valor correto, no caso, 1 (Fig. 7.13).

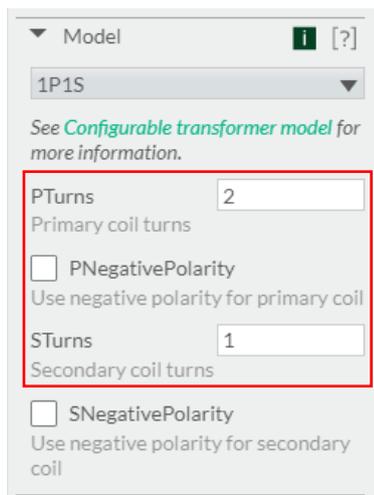


Figura 7.13 Modificando a relação entre os enrolamentos do transformador

Fonte: elaborada pelo autor.

Feche a janela de configurações e dê início a simulação. Perceba que não é possível identificar os valores exibidos nos *PROBES's*, isso ocorre porque a tensão medida é alternada. Para solucionar esse problema devemos alternar o modo de visualização dos dados para *Grapher* que nos permite analisar os gráficos com os sinais fornecidos pelas pontas de prova.

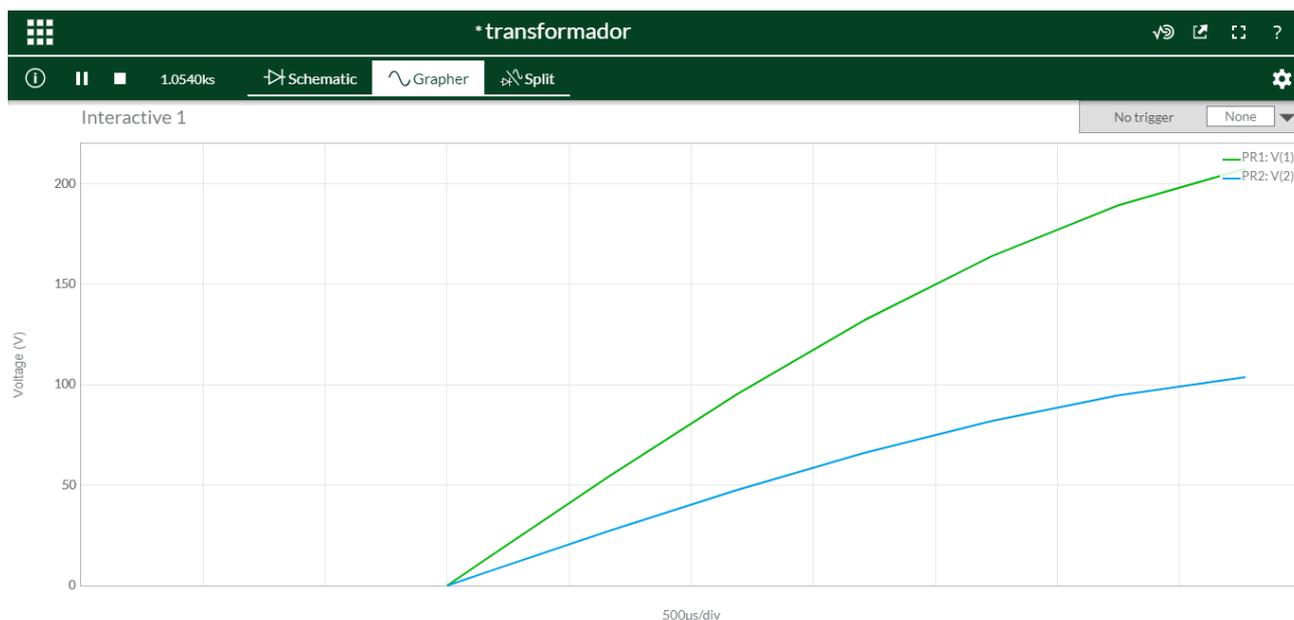


Figura 7.14 Resultado da simulação sem ajustes

Fonte: elaborada pelo autor.

Quase sempre devemos modificar os eixos coordenados para ter uma boa visualização dos sinais. A tensão no primário oscila entre -220 e +220 volts, enquanto que no secundário a tensão oscila entre -110 e +110 volts. Sendo assim, colocar os valores desse eixo para oscilar entre -240 volts e +240 volts deve resolver nosso problema. Clicamos no botão *Open configuration pane*, no final da página que abrir, modificamos os valores da propriedade *Axes*. Agora, em *Time/Div* selecionamos 5 ms/div e em *Voltage (V)* preenchemos a caixa de texto *Minimum* com -240 volts e *Maximum* com +240 volts. Teclamos *Enter* ao final (Fig. 7.15).

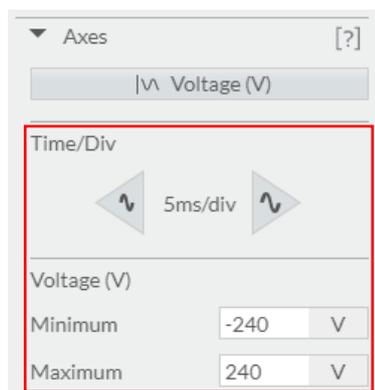


Figura 7.15 Ajuste dos eixos coordenados

Fonte: elaborada pelo autor.

Os sinais já podem ser visualizados corretamente, mas se encontram em modo dinâmico, para colocarmos em modo estático clicamos no triângulo ao lado de *None* e selecionamos *Auto* (Fig. 7.16). E finalmente temos os sinais ajustados e em modo estático (Fig. 7.17).

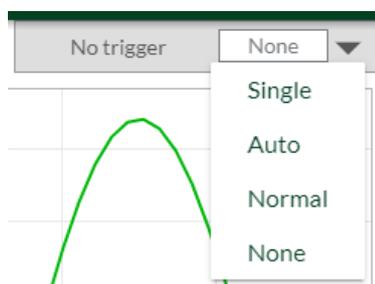


Figura 7.16 Ajuste dos eixos coordenados

Fonte: elaborada pelo autor.

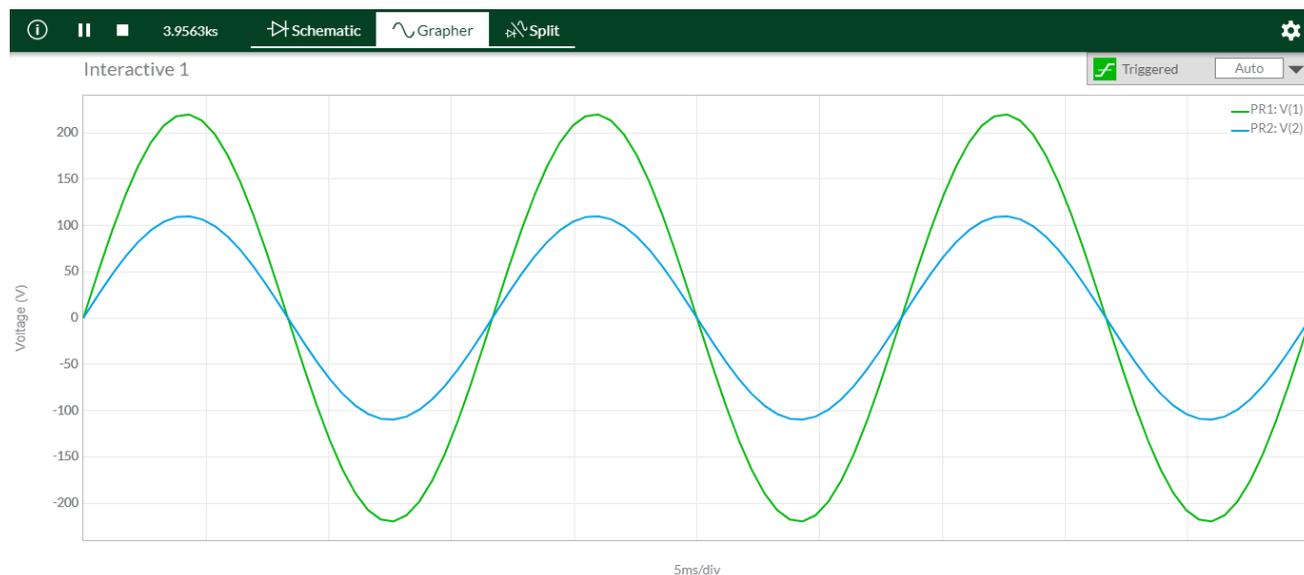


Figura 7.17 Resultado da simulação após ajustes

Fonte: elaborada pelo autor.

O sinal em azul corresponde aquele fornecido pelo *PROBE PR1* localizado no primário (tensão alternada de 220 volts), enquanto que o sinal em verde refere-se ao *PROBE PR2* conectado ao secundário (tensão alternada de 110 volts). Observe os valores de tensão obedecem à mesma

relação de 2 para 1 que as espiras das bobinas do primário e secundário determinam.

Para completar a análise desse circuito, vamos trocar os *PROBES* de tensão por *PROBES* de corrente e verificar o que acontece (Fig. 7.18).

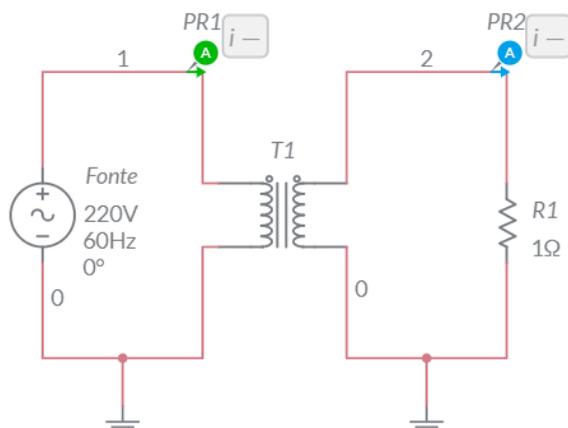


Figura 7.18 Circuito com transformador abaixador com *PROBES* de corrente

Fonte: elaborada pelo autor.

A corrente no secundário é determinada pela lei de Ohm, sendo a tensão de 110 volts e o resistor de 1 ohm teremos uma corrente de 110 ampères. Para que as potências nas bobinas sejam iguais (considerando transformadores ideais) a relação entre as correntes é o inverso da relação entre as tensões, ou seja, de 1 para 2, isso gera uma corrente de 55 ampères nos enrolamentos do primário. Essas informações são confirmadas do gráfico da Fig. 7.19.

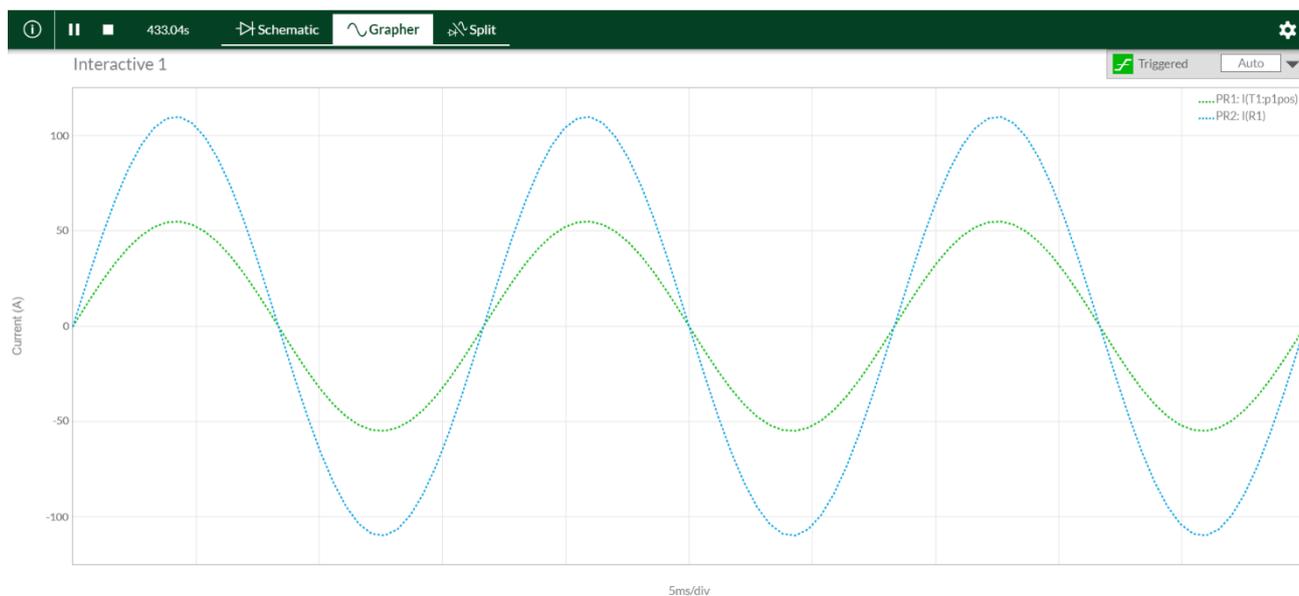


Figura 7.19 Correntes nos enrolamentos do transformador

Fonte: elaborada pelo autor.

Transformadores com derivação central (*Center Tap*) são úteis na construção de fontes de alimentação retificadas. Esses componentes não são comuns em laboratórios escolares, mas seu apelo didático é bem interessante. Para analisarmos seu comportamento, vamos fazer o mesmo

circuito da Fig. 7.11, porém, permutando o transformador comum por um com derivação central. Lembrando que será utilizada a mesma relação de s . 2 para 1 nas espiras das bobinas.

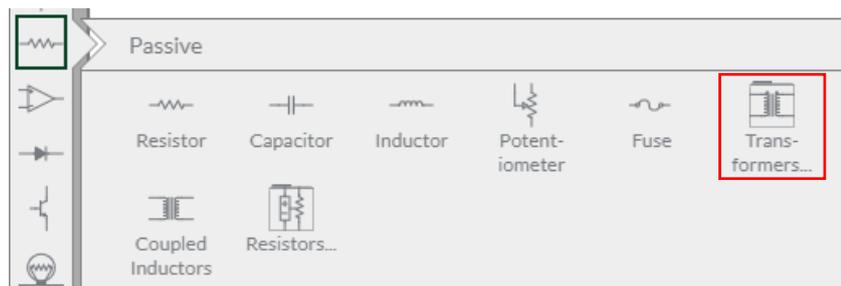


Figura 7.20 Selecionando a pasta *Transformers* na subpaleta

Fonte: elaborada pelo autor.

Na paleta de componentes vamos até *Passive*, em seguida clicamos na pasta (observe o formato) *Transformers...* (Fig. 7.20) e escolhemos o componente *1P1S with Center Tap* (Fig. 7.21).

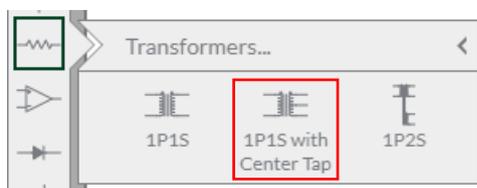


Figura 7.21 Selecionando o transformador com derivação central

Fonte: elaborada pelo autor.

Se a derivação central não é utilizada, esse transformador tem comportamento similar ao transformador comum. Dessa forma limitaremos nossa análise ao comportamento da tensão e da corrente quando a derivação central está em uso. (Fig. 7.22).

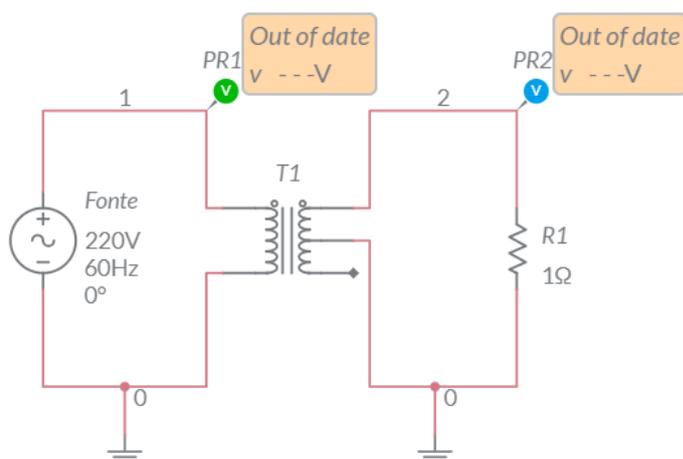


Figura 7.22 Circuito com transformador com derivação central

Fonte: elaborada pelo autor.

Se tivéssemos utilizado os segmentos externos teríamos uma tensão de 110 volts no secundário, com a utilização da derivação central, apenas metade da bobina está envolvida o que gera uma tensão de 55 volts no

PROBE PR2 (Fig. 7.23). Para uma análise da corrente permutamos os **PROBES** de tensão por **PROBES** de corrente. Sendo a tensão no secundário de 55 volts e o resistor de 1 ohm, temos neste uma corrente de 55 ampères. Por outro lado, os transformadores ideais exigem potências iguais nos enrolamentos primário e secundário o que resulta, neste último, uma corrente de 13,75 ampères (Fig. 7.24).

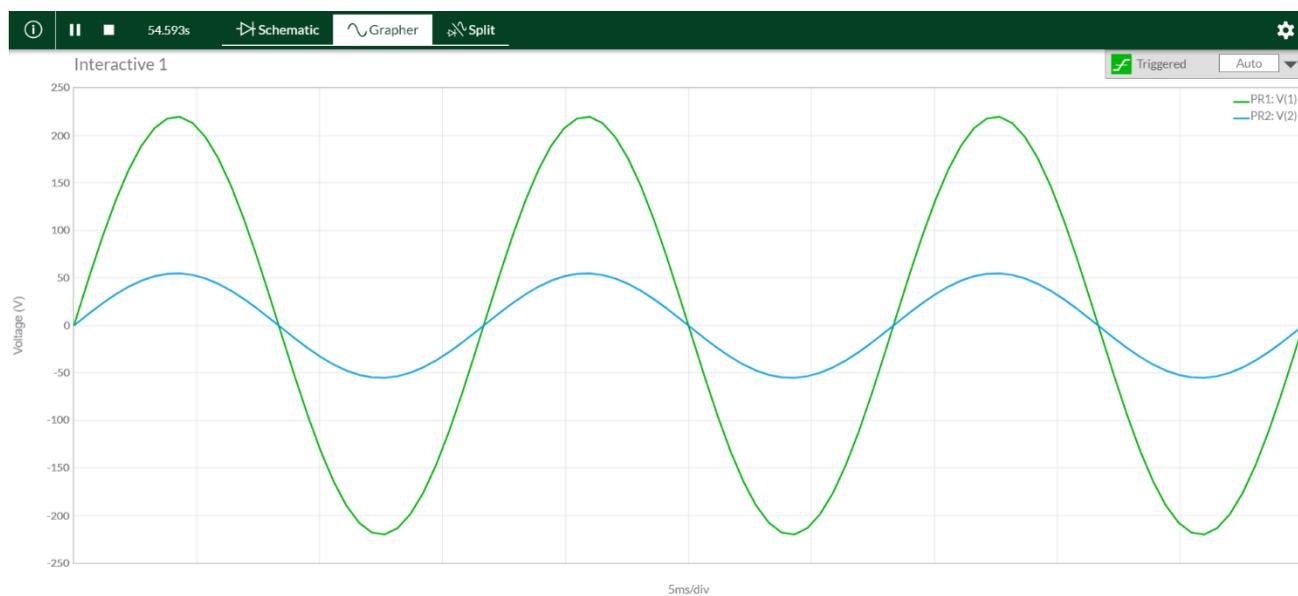


Figura 7.23 Tensões nos enrolamentos do transformador

Fonte: elaborada pelo autor.

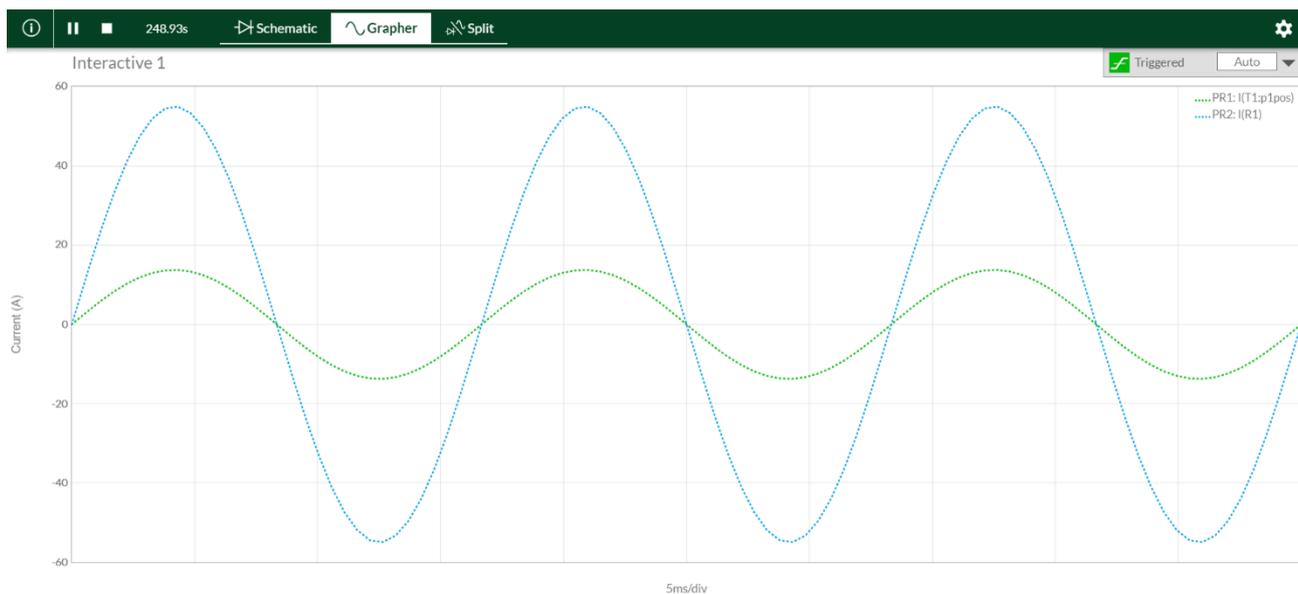


Figura 7.23 Tensões nos enrolamentos do transformador

Fonte: elaborada pelo autor.

Limitamos nossa análise a transformadores abaixadores por acharmos suficiente, mas nada impede que o professor utilize, além desses, os transformadores elevadores.

8

CAPÍTULO 8

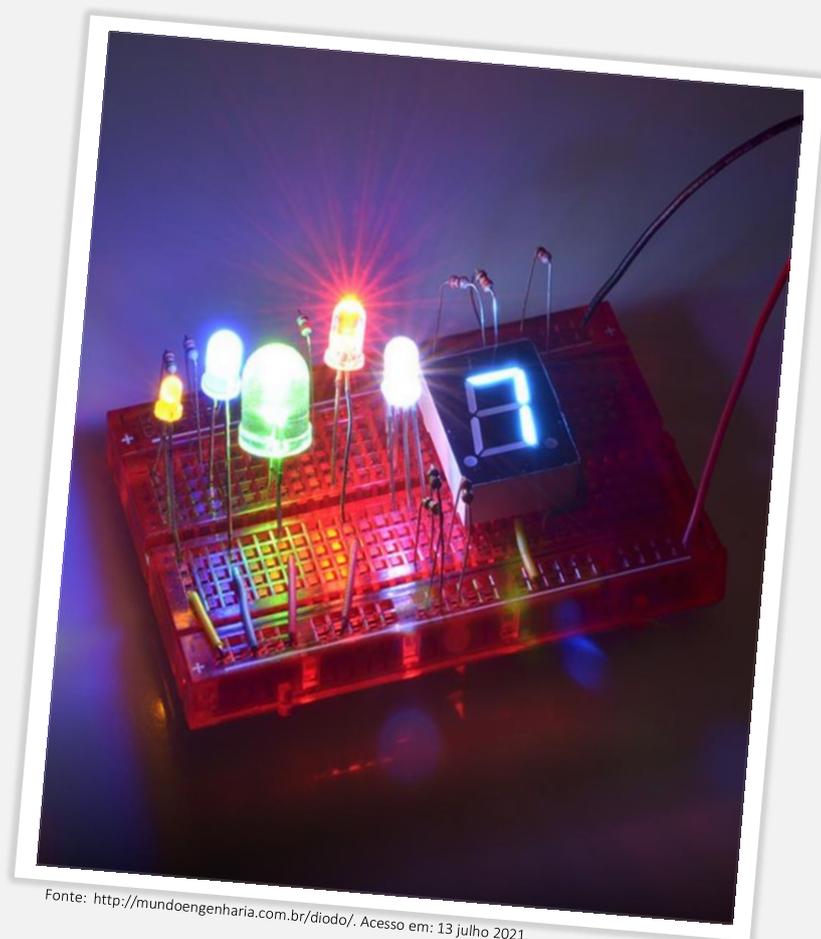
Tópicos

8.1 Introdução

8.2 Definição

8.3 Circuito equivalente simplificado do diodo

Diodo



Fonte: <http://mundoengenharia.com.br/diodo/>. Acesso em: 13 julho 2021.

N

este capítulo dá-se o estudo dos diodos. Representação e características elétricas dos diodos são alguns dos tópicos que serão detalhados aqui.

8.1 Introdução

Utilizados na fabricação de telas de televisores, *notebooks*, *tablets* e *smartphones* (Fig. 8.2) o *LED* (*Light Emitting Diode* ou diodo emissor de luz) (Fig. 8.1) é a tecnologia que oferece resolução *FULL HD* (*ultra high definition* ou ultra alta definição), que gera imagens em cores vívidas, brilho intenso e alto contraste, sonho de qualquer amante de filmes e séries.



Figura 8.1 Diodos emissores de luz.

Fonte: <https://eletronicaparaartistas.com.br/artigos/page/5/>. Acesso em: 20 junho 2021.



Figura 8.2 TV LED 32".

Fonte: <https://www.zoom.com.br/tv-led-32-lg-32lv300c-1-hdmi-usb>. Acesso em: 19 junho 2021.

Também estão presentes em lâmpadas residenciais, aparelhos de projeção de imagem, semáforos, placas de sinalização, balizadores, letreiros em fachadas comerciais, dentre outras utilizações.



Figura 8.3 Semáforo termoplástico a LED

Fonte: <https://www.interativasolucoes.com.br/semaforos-balanca/semaforos-caixa-injetada-de-termoplastico-a-led.html>. Acesso em: 19 junho 2021.



Figura 8.4 Módulo ponte retificadora de onda completa AC/DC.

Fonte: <https://blog.multcomercial.com.br/electronica/page/2/>. Acesso em: 19 junho 2021.

Utilizar diodos para emissão de luz é apenas umas de suas incontáveis aplicações. Em eletrônica são empregados no projeto de portas lógicas, retificadores de meia onda, retificadores de onda completa, ceifadores e

Nota!



Figura 8.5 Porta lógica AND ("E")

Fonte: Widmer, Moss e Tocci (2017, p. 73).

| A | B | $x = A + B$ |
|---|---|-------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 |

Figura 8.6 Tabela verdade que define a operação OR

Fonte: Widmer, Moss e Tocci (2017, p. 73).

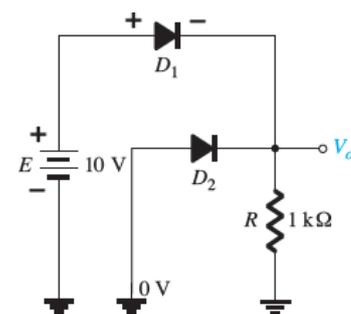


Figura 8.7 Porta OR para lógica positiva.

Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013, p. 62).

grampeadores. Isso apenas para citar alguns dos projetos de circuitos mais comuns. Dentre todos os circuitos supracitados, os retificadores merecem nossa atenção especial. Eles estão presentes em fontes de alimentação, indispensáveis para energizar aparelhos eletroeletrônicos que não podem ser ligados diretamente em tomadas de 110/220 volts, tais como *smartphones*, *tabletes*, *notebooks*, luminárias, impressoras e roteadores.

8.2 Definição

O diodo (Fig. 8.8) é um dispositivo semicondutor de dois terminais cuja fabricação se deve ao desenvolvido da física do estado sólido, um dos ramos da física da matéria condensada.



Figura 8.8 Diodo

Fonte: <https://www.eletopeças.com/Produto/diodo-retificador-semikron-sk-316>. Acesso em: 20 junho 2021.

O diodo apresenta polaridade (Fig. 8.9) e seu comportamento em circuito depende do sentido pelo qual é percorrido por corrente elétrica.

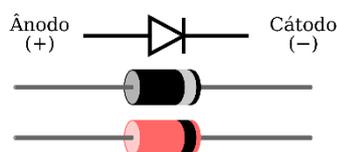


Figura 8.9 Símbolo e polaridade do diodo

Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Diodo_semicondutor. Acesso em: 21 junho 2021.

A seta no símbolo do diodo indica o sentido preferencial da corrente elétrica quando uma tensão positiva é aplicada. O *Multisim Live* utiliza praticamente a mesma simbologia da Fig. 8.9.



Figura 8.10 Representação do diodo no *Multisim Live*

Fonte: elaborada pelo autor.

8.2.1 Características elétricas

A fim de facilitar a compreensão de sua característica elétrica é comum comparar o diodo com uma chave mecânica. Quando conectado em polarização direta (Fig. 8.11(a)) ele atua como uma chave fechada, permitindo um significativo fluxo de corrente elétrica denominada corrente de polarização direta (I_D). Por outro lado, se o diodo está em polarização reversa (Fig. 8.11(b)) o fluxo de corrente cai praticamente a zero, o que corresponde a uma chave aberta (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013, p. 18). O mínimo de corrente que percorre o diodo em polarização reversa é denominada corrente de saturação reversa (I_S).

Se o diodo se comporta como uma chave fechada na região de polarização direta, sua resistência deve ser de 0Ω . Enquanto na região de polarização reversa, sua resistência deve ser de $\infty \Omega$ para concordar com um circuito aberto. Entretanto essas são características ideais e o diodo semicondutor real difere ligeiramente desses valores.

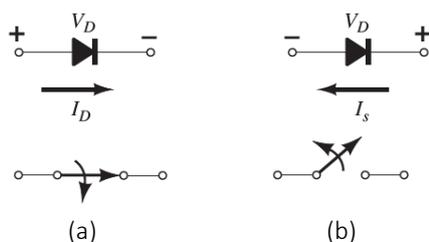


Figura 8.11 Diodo semiconductor ideal: (a) em polarização direta; (b) em polarização reversa.

Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013, p. 19).

A Fig. 8.12 mostra, no mesmo gráfico, a sobreposição das curvas características do diodo ideal e de um diodo comercial de silício. Note que é necessária uma tensão mínima de aproximadamente 0,7 V sobre os terminais do diodo de silício para que ele possa conduzir e se comportar efetivamente como uma chave aberta. A frente no texto, mais detalhes são fornecidos sobre essa condição.

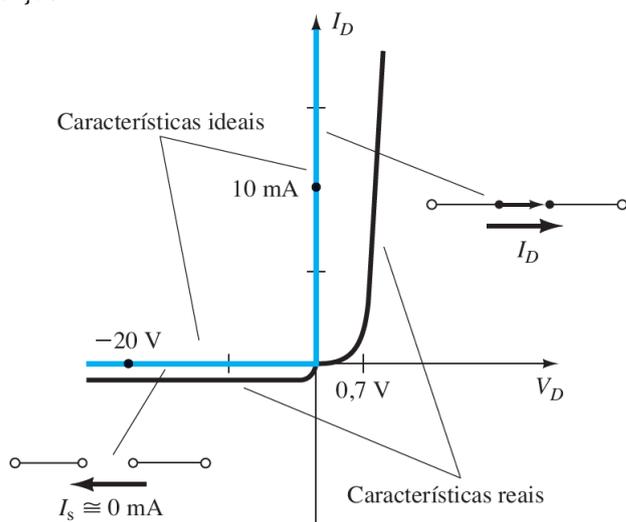


Figura 8.12 Características ideais versus características reais de semicondutores.

Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013, p. 19).

Em geral, a intensidade da corrente de polarização direta (I_D) pode variar de zero até algumas dezenas de miliampères (mA), enquanto a corrente de saturação reversa (I_s) é da ordem de alguns picoampères (μA), o que nos permite avaliar como praticamente zero.

Vamos utilizar o *Multisim Live* para ratificar essas informações iniciais. Na paleta de componentes clique *Diodes* e selecione *Diodo* (Fig. 8.13). Precisaremos também de uma fonte de tensão contínua e um aterramento. Em seguida monte o circuito ligando os terminais do diodo diretamente aos polos da bateria. A simulação consiste em variar o valor da tensão sobre o diodo e verificar o que acontece como o valor da corrente de polarização direta.

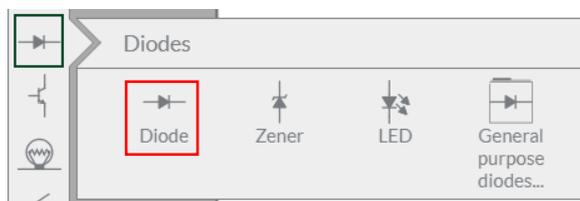


Figura 8.13 Selecionando um diodo no *Multisim Live*

Fonte: elaborada pelo autor.

■ Materiais semicondutores são sólidos que apresentam condutividade intermediária entre a de um bom condutor e a de um isolante. Possuem coeficiente de temperatura negativo o que permite uma considerável redução em sua resistência mediante elevação de sua temperatura.

Os semicondutores mais utilizados pela indústria na fabricação de dispositivos eletrônicos (diodos, transistores e amplificadores) são o silício (Si), germânio (Ge) e o arseneto de gálio (GaAs) (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013, p. 2).

Tensão de 0,3 volts...

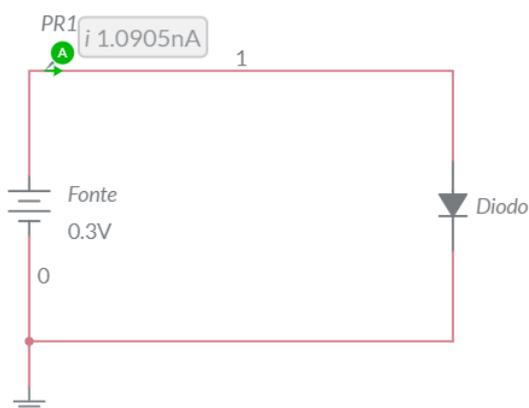


Figura 8.14 Diodo em série com fonte de 0,3 V

Fonte: elaborada pelo autor.

Tensão de 0,5 volts...

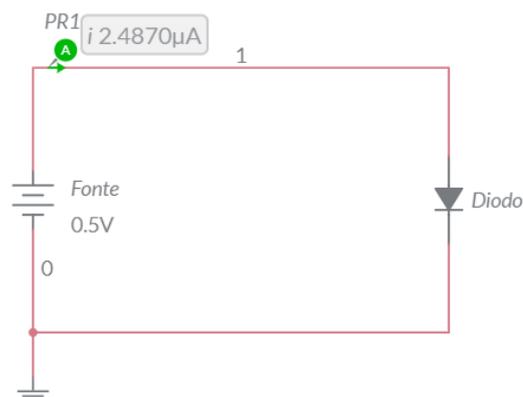


Figura 8.15 Diodo em série com fonte de 0,5 V

Fonte: elaborada pelo autor.

Tensão de 0,7 volts...

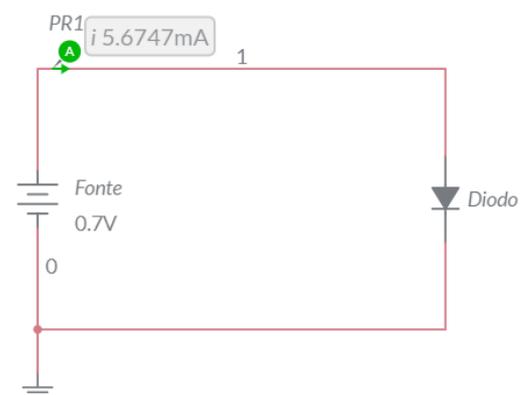


Figura 8.16 Diodo em série com fonte de 0,7 V

Fonte: elaborada pelo autor.

As tensões de 0,3 volts e 0,5 volts originam correntes de alguns nanoampères (nA) e microampères (μA), respectivamente. Esses valores de corrente são insignificantes e podem ser desprezados. Apenas quando a tensão da fonte atinge 0,7 V temos uma corrente significativa através do

e podemos dizer que seu comportamento de compara a uma chave aberta. Vejamos o que acontece quando a fonte possui tensão de 0,85 V.

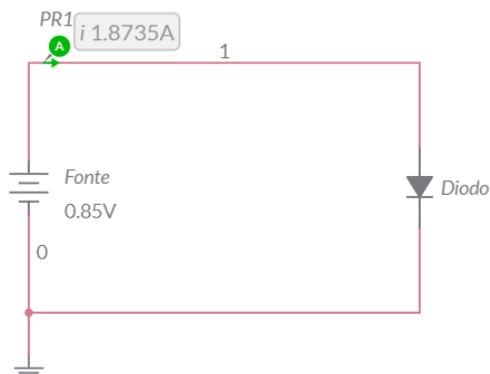


Figura 8.17 Diodo em série com fonte de 0,85 V

Fonte: elaborada pelo autor.

A tensão de 0,85 volts faz a corrente saltar para quase dois ampères! Quando à corrente de polarização reversa sinta-se encorajado a fazer esse teste!

8.2.2 Região de ruptura

À proporção que se eleva a tensão negativa através de um diodo, também aumenta, mesmo que discretamente e ainda podendo ser desprezada, a corrente de saturação reversa I_s . Até que ao atingir uma tensão suficientemente negativa chamada potencial de ruptura (V_{BV}) uma expressiva corrente percorre o diodo. A esse ponto de ruptura dá-se o nome de *região de ruptura* ou *região Zener* (Fig. 8.18) (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013, p. 14).

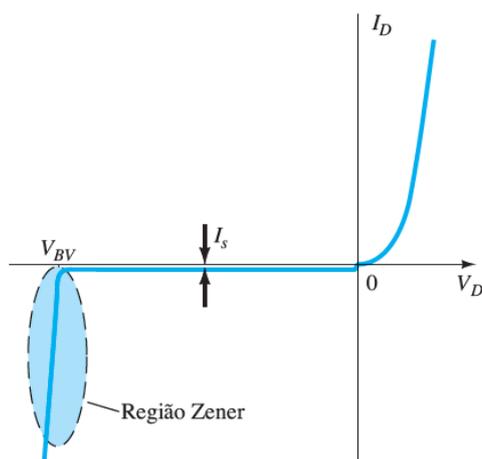


Figura 8.18 Região de ruptura.

Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013, p. 15).

Na Fig. 8.19 tem-se a curva característica de três diodos projetados com os semicondutores mais utilizados na indústria, silício (Si), germânio (Ge) e o arseneto de gálio (GaAs). Note os níveis de tensão e corrente nas regiões de polarização direta, inversa e Zener. Também vale observar a forma vertiginosa com que a corrente sobe após o “joelho” da curva. A tensão (V_K) no centro do joelho corresponde ao valor de tensão para o qual o diodo começa efetivamente a conduzir (chave fechada) e seu valor depende do semicondutor utilizado na fabricação do dispositivo. Germânio, silício e arseneto de gálio possuem valores de V_K , respectivamente, 0,3 V, 0,7 V e arseneto de gálio 1,2 V (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013, p. 14).

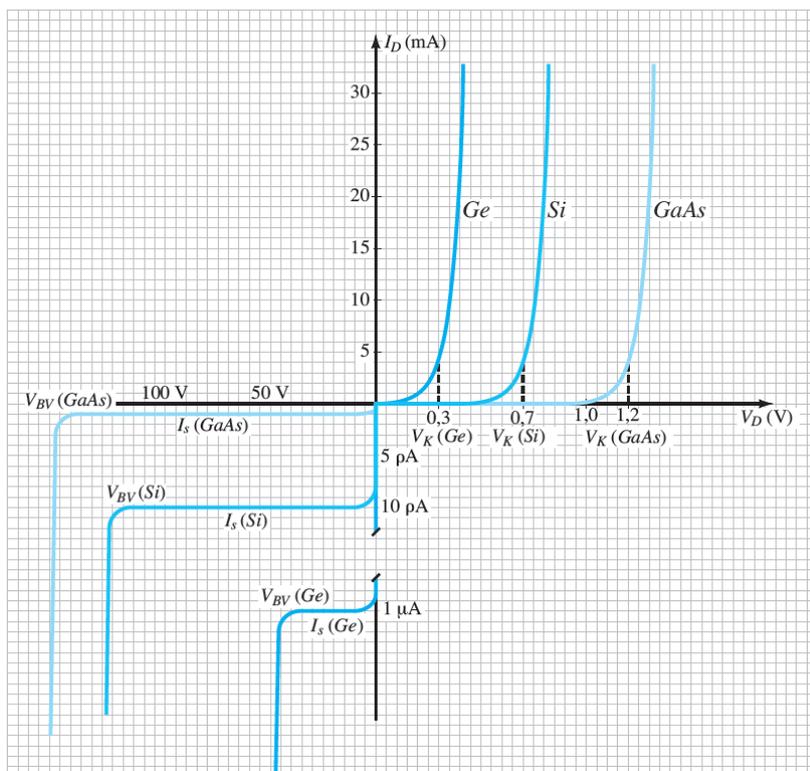


Figura 8.19 Curvas características de diodos comerciais de Ge, Si e GaAs.

Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013, p. 16).

Tabela 8.1 Tensão de joelhos V_K

| Semicondutor | V_K (V) |
|--------------|-----------|
| Ge | 0,3 |
| Si | 0,7 |
| GaAs | 1,2 |

Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013, p. 15).

Se ainda não está convencido que pode desprezar correntes de alguns nanoampères ou microampères, lembre-se que $1\text{nA} = 1\,000\,000\text{ mA}$ e que $1\mu\text{A} = 1\,000\text{ mA}$! Não foi suficiente? Então tente plotar no mesmo gráfico valores em nanoampères, microampères e miliampères!

8.3 Circuito equivalente simplificado do diodo

Existe muitos circuitos equivalentes para modelar o diodo e qual dever ser utilizado depende de vários fatores, tais como tensão da fonte, resistência associadas e frequência de operação. Para nossos propósitos o circuito equivalente simplificado é uma boa aproximação (Fig. 8.20).

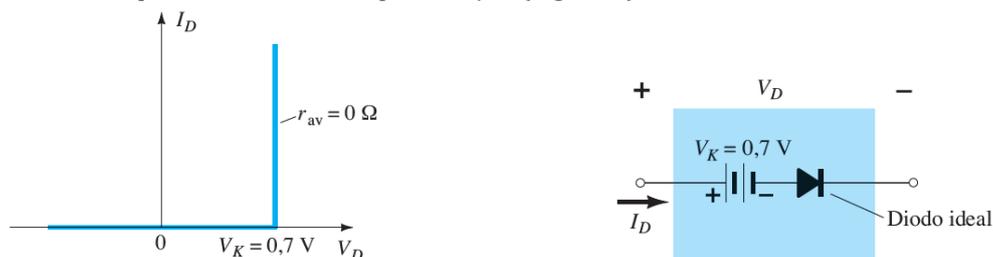


Figura 8.20 Circuito equivalente simplificado para o diodo semicondutor de silício.

Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013, p. 16).

O modelo reduzido sugere que um diodo de silício apresenta uma queda de 0,7 V no estado de condução para qualquer valor de corrente através dele quando conectado com polarização direta em um sistema eletrônico alimentado por tensão contínua (BOYLESTAD; NASHELKY, 2013, p. 25). Note que para o diodo de germânio a queda de tensão é de 0,3 V e para o diodo de arseneto de gálio é de 1,2 V.

Vamos projetar e simular um circuito simples com uma fonte de tensão contínua em série com um diodo e um resistor. Não esqueçamos do aterramento e dos *PROBES* de tensão e corrente (Fig. 8.21).

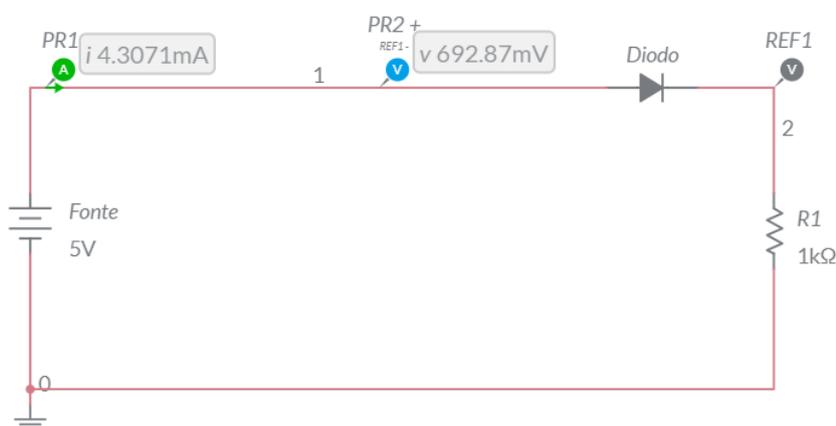


Figura 8.21 Queda de tensão no diodo

Fonte: elaborada pelo autor.

Note que a queda de tensão sobre o diodo é 692,887 milivolt, valor que pode ser aproximado para 0,7 volt. A não concordância precisa entre o valor medido pelo *Multisim Live* e o teórico ocorre porque o simulador utiliza um outro modelo (mais real) para o diodo, a saber, o circuito linear por partes (Fig. 8.22) no qual é considerado a resistência interna do diodo.

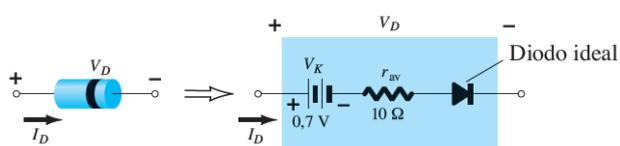


Figura 8.22 Componentes do circuito equivalente linear

Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013, p. 25).

Caso sinta interesse você poderá fazer uma pesquisa mais detalhada sobre o assunto, mas para fins didáticos o modelo de circuito equivalente simplificado é mais que suficiente.

8.4 Circuitos retificadores

O projeto de circuitos retificadores está entre as principais aplicações do diodo, isso porque o retificador é bloco fundamental da estrutura de uma fonte de corrente contínua (CC) necessária para alimentar qualquer equipamento eletrônico (SEDRA; SMITH, 2007, p. 106).

8.4.1 Circuito retificador de meia-onda

O circuito retificador de meia onda (Fig. 8.23) recebe na entrada um

signal (v_i) que consiste, frequentemente, em uma onda senoidal ou quadrada e apresenta na saída um sinal (v_o) com apenas metade dos semiciclos do sinal de entrada (Fig. 8.24).

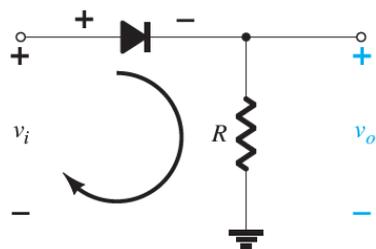


Figura 8.23 Circuito retificador de meia-onda

Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013, p. 64).

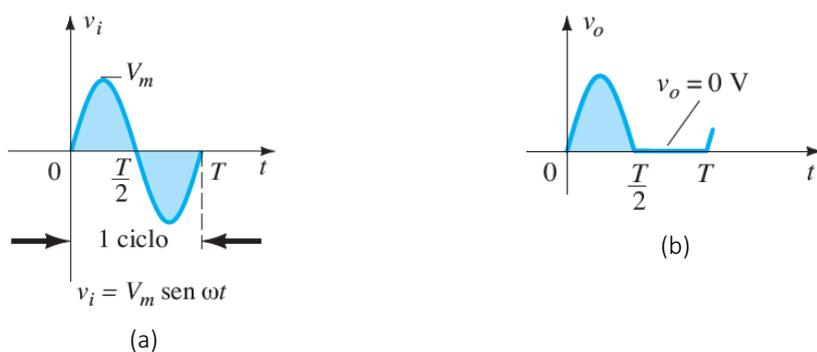


Figura 8.24 Retificador de meia-onda: (a) sinal de entrada e (b) sinal de saída

Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013, p. 64).

Note que durante o intervalo $t = 0$ até $t = T/2$ a tensão de entrada (v_i) é positiva (Fig. 8.24(a)), submetendo o diodo (Fig. 8.23) a uma polarização direta o que permite o fluxo de corrente, visto que o diodo tem o comportamento semelhante a uma chave fechada. Logo, sinal de saída (v_o) é uma réplica do sinal de entrada (Fig. 8.24(b)). Uma síntese desse processo é mostrada abaixo.

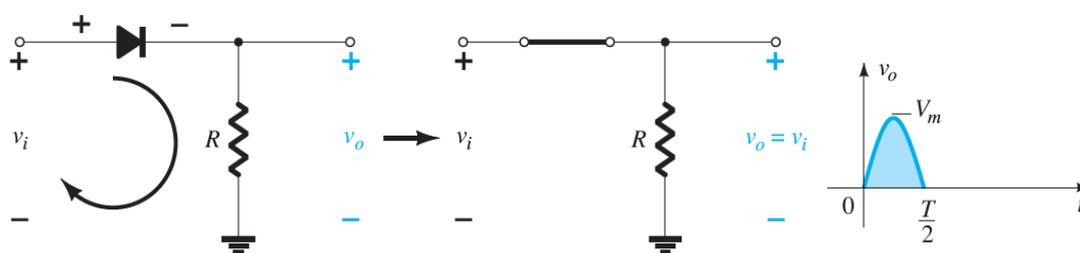


Figura 8.25 Intervalo de condução

Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013, p. 64).

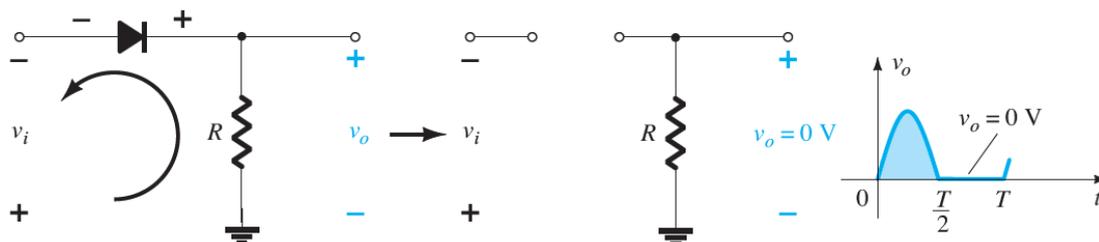


Figura 8.26 Intervalo de não condução

Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013, p. 64).

Entretanto, durante o período $t = T/2$ até $t = T$ a tensão de entrada (v_i) é negativa (Fig. 8.24(a)), submetendo o diodo (Fig. 8.23) a uma polarização reversa o que não permite fluxo de corrente, visto que agora o diodo se comporta como uma chave aberta. Logo, sinal de saída (v_o) = 0 volt (Fig. 8.24(b)). Veja esquemático do circuito para esse intervalo de tempo na Fig. 8.26. Observe que durante um período T o sinal de entrada (v_i) tem valor médio (a soma algébrica das áreas acima e abaixo do eixo) igual a zero. Porém, o sinal de saída (v_o) que agora está retificado tem, no mesmo intervalo de tempo, uma área resultante média acima do eixo e seu valor médio é determinado por

$$V_{CC} = 0,318 V_m \quad \text{meia - onda}$$

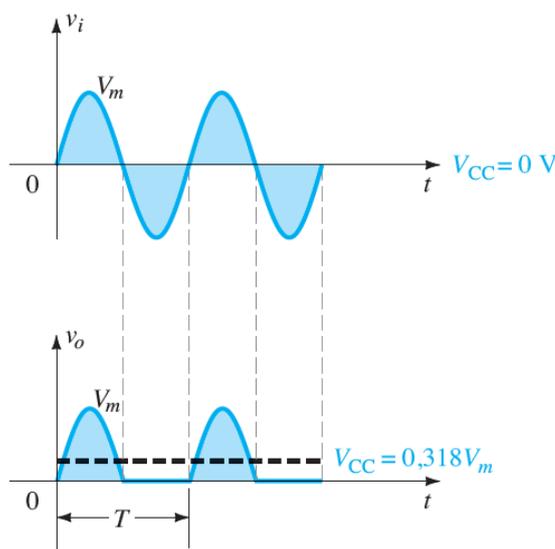


Figura 8.27 Sinal retificado de meia-onda

Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013, p. 65).

Se a tensão de joelho $V_K = 0,7 \text{ V}$ do diodo de silício não for desprezada, então

$$V_{CC} \cong 0,318 (V_m - V_K) \quad \text{meia - onda}$$

Ocorre que se $V_m \gg V_K$, não haverá problema em utilizar a $V_{CC} = 0,318 V_m$ como primeira aproximação para V_{CC} (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013, p. 65).

A simulação desse circuito exige uma fonte de tensão alternada, um resistor, diodo, aterramento e dois *PROBES* para tensão, uma para exibir o sinal e outra para capturar o sinal de saída. Observe as modificações e monte o circuito conforme figura abaixo:

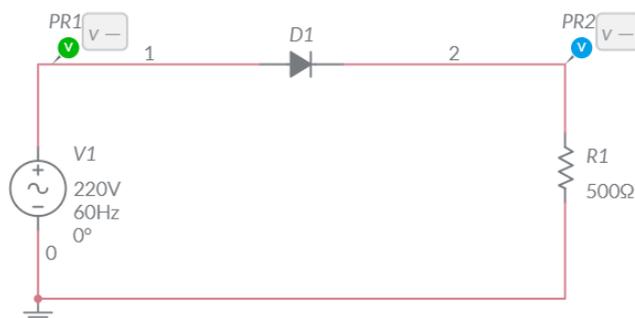


Figura 8.28 Circuito retificado de meia-onda

Fonte: elaborada pelo autor.

Inicie a simulação, não esqueça de configurar os eixos para que os sinais sejam identificados com clareza. A seguir temos uma sugestão.

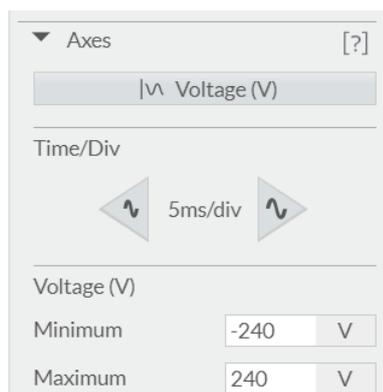


Figura 8.29 Configuração dos eixos

Fonte: elaborada pelo autor.

Selecione *Single* para exibir os sinais em modo estático (Fig. 8.30). Na verdade, escolhendo *Auto* ou *Normal* também teremos o mesmo efeito.

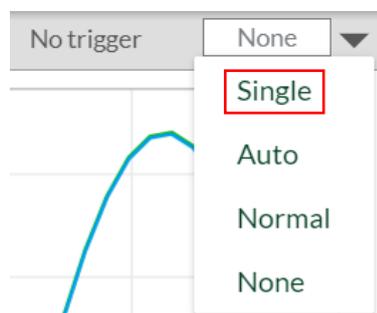


Figura 8.30 Selecionando *Single*

Fonte: elaborada pelo autor.

Você deverá produzir algo como o gráfico abaixo:

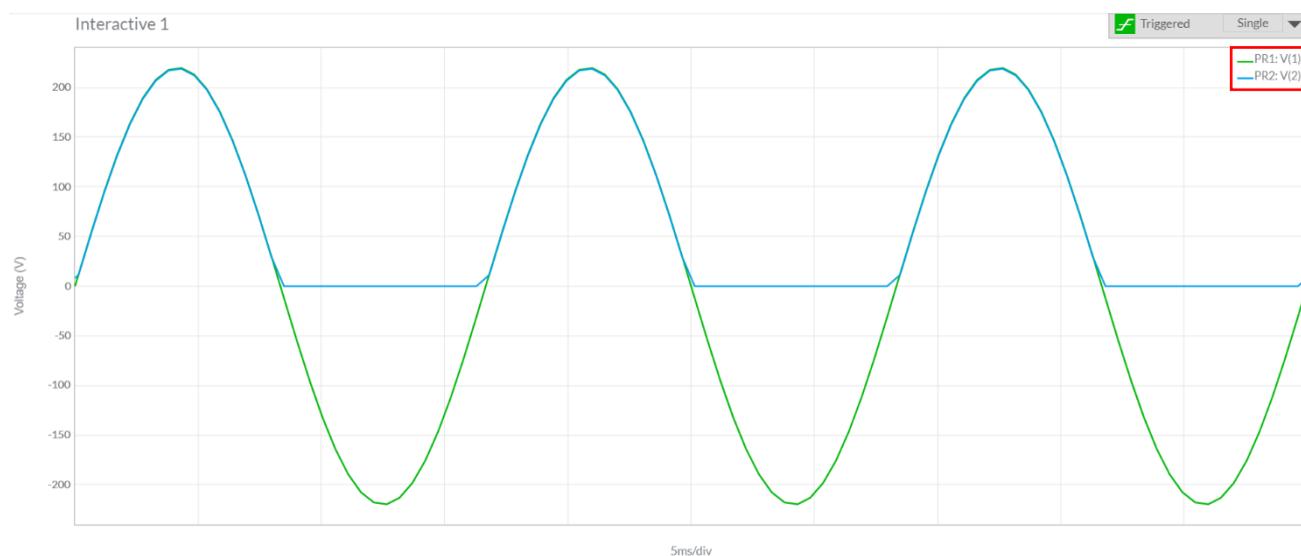


Figura 8.31 Sinais de entrada e saída sobrepostos

Fonte: elaborada pelo autor.

A Fig. 8.31 exibe os sinais sobrepostos, um inconveniente na minha opinião. Se preferir, poderá exibir um sinal por vez, o que facilita a

compreensão do que está acontecendo e deixa claro o sinal de entrada e a aquele na saída. Isso é possível habilitando o sinal de apenas um *PROBE* por vez. Para tanto, clique *Open configuration pane* e deixe selecionado apenas o *PROBE* que desejar exibir o sinal.

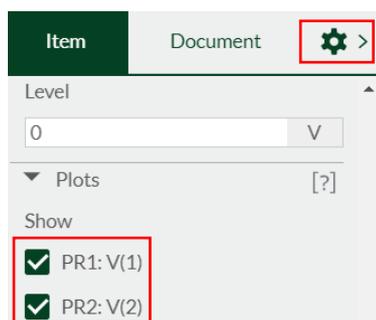


Figura 8.32 Selecionando *PROBE*

Fonte: elaborada pelo autor.

Se apenas o *PROBE PR1* é selecionado o gráfico exibido corresponde ao sinal de entrada, enquanto que o *PROBE PR2* permite a visualização do sinal de saída, após a retificação. O sinal de entrada já é conhecido, trata-se de uma senoide completa. Interessante mesmo é o que tem na saída, o sinal retificado (Fig. 8.33).

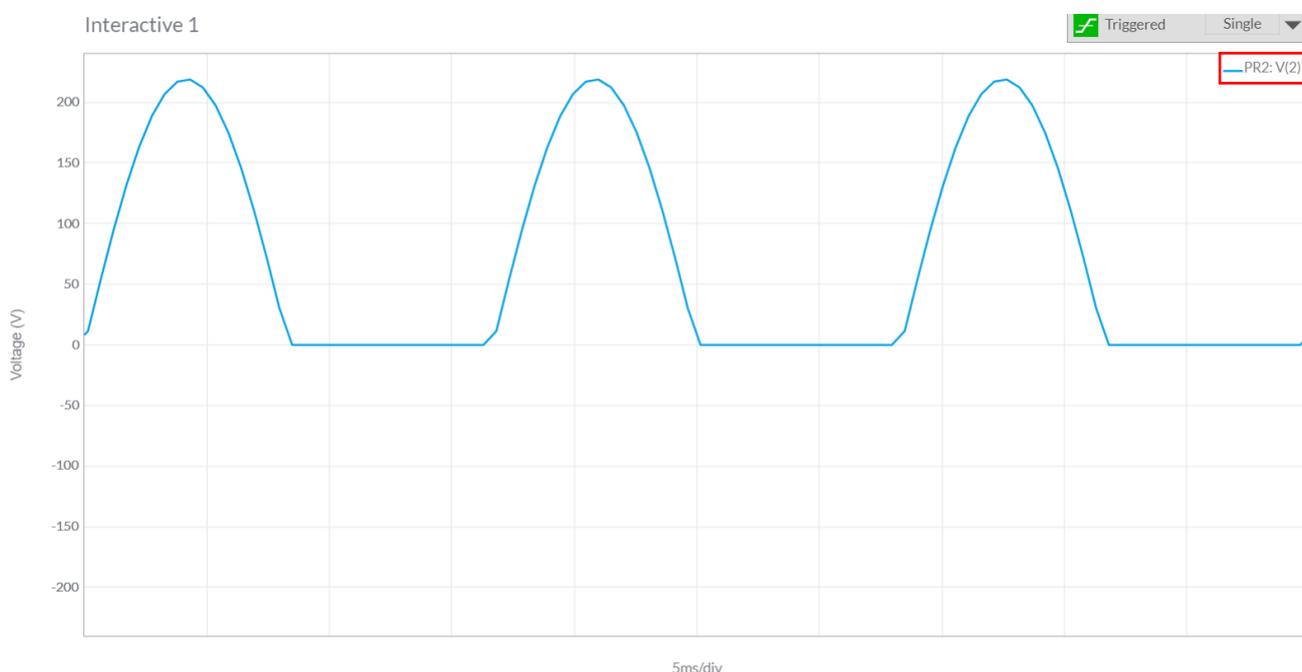


Figura 8.33 Sinal de saída: meia onda retificada

Fonte: elaborada pelo autor.

O retificador de meia onda consiste no circuito mais simples de analisar quando um sinal senoidal é inserido na entrada. Apesar de não apresentar grande utilidade prática é importante para começar a verificar as capacidades do diodo além mensurar as possibilidades que se pode alcançar. Sem contar que permite uma maior compreensão do próximo retificador, a saber, o retificador de onda completa.

8.4.2 Circuito retificador de onda completa

A saída de um retificador de onda completa consiste em um sinal senoidal com ambos os ciclos, contudo o semiciclo negativo é invertido para proporcionar uma saída com tensão monopolar (SEDRA; SMITH, 2007, p.

108). A Fig. 8.34 mostra o resultado de uma retificação completa quando o sinal de entrada se trata de uma onda senoidal. A saída do retificador de onda completa é mais “energética” que aquela oferecida pelo retificador de meia-onda. Por esse motivo em aplicações de retificação é, na grande maioria das vezes, o tipo de retificação escolhido (SEDRA; SMITH, 2007, p. 108).

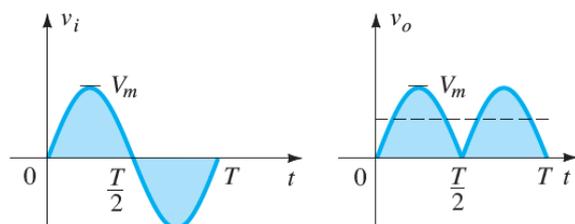


Figura 8.34 Formas de onda das tensões de entrada e saída para um retificador de onda completa.

Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013, p. 66).

Existe mais de uma configuração para um retificador de onda completa. Aqui foi escolhida aquela que acredito ser a mais didática e de simples compreensão: a *configuração em ponte* (Fig. 8.34).

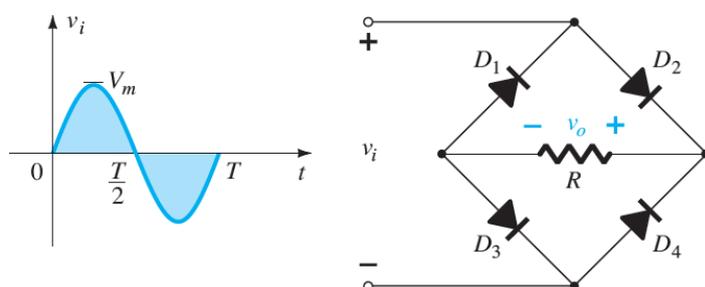


Figura 8.34 Retificador de onda completa em ponte.

Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013, p. 66).

Essa configuração utiliza quatro diodos e um resistor R formando uma espécie de ponte de *Wheatstone*, na qual apenas o ramo central possui um resistor, todos os outros são ocupados por diodo.

Perceba que entre os instantes $t = 0$ e $t = T/2$, os diodos D_2 e D_3 estão diretamente polarizando o que muitas vezes é chamado estado ligado (“on”), enquanto D_1 e D_4 estão em polarização reversa ou estado “desligado” (“off”) (Fig. 8.35).

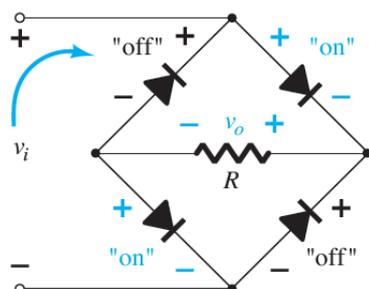


Figura 8.35 Polarização sobre diodos e resistor.

Fonte: Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013, p. 66).

Em consequência, o sentido da corrente percorrendo o resistor R e a polaridade da tensão sobre ele obedecem a configuração mostrada na Fig. 8.36. Uma vez que os diodos são ideais, a tensão na carga é a mesma

tensão de entrada, assim dizendo, $v_o = v_i$ (Fig. 8.36).

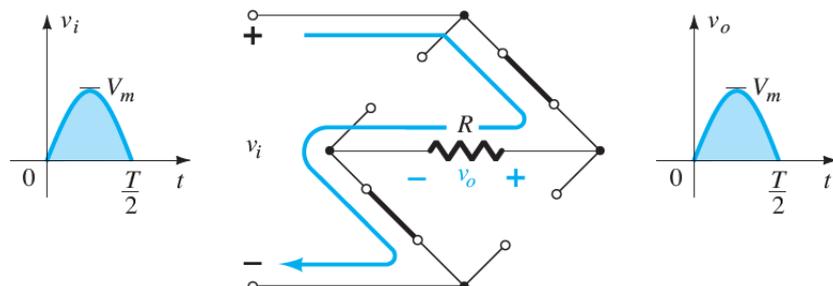


Figura 8.36 Sentido da corrente e polarização do resistor durante semiciclo positivo.

Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013, p. 67).

Atenção à polarização sobre o resistor, ela é crucial para o entendimento do próximo passo e do retificador de onda completa como um todo.

Entretanto, quando a tensão da fonte entra no semiciclo negativo, correspondendo ao intervalo de tempo de $t = T/2$ até $t = T$, os diodos D1 e D4 estão em polarização direta, isto é, passam ao estado ligado (“on”) e iniciam a condução, enquanto que os diodos D2 e D3, por estarem inversamente polarizados, passam ao estado desligado (“off”) e não conduzem (Fig. 8.37). O mais importante de todo esse processo é que a polaridade através do resistor R é a mesma que aparece na Fig. 8.35, proporcionando um segundo pulso positivo (Fig. 8.37). Em resumo, para um ciclo completo, o sinal de saída tem sempre polarização positiva. A Fig. 8.38 ilustra as tensões de entrada e de saída.

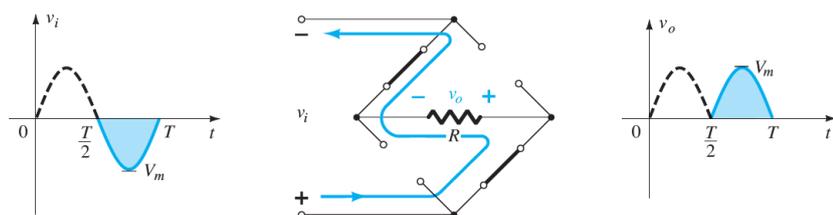


Figura 8.37 Sentido da corrente e polarização do resistor durante semiciclo negativo.

Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013, p. 67).

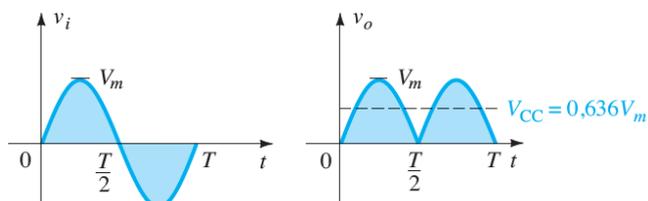


Figura 8.37 Formas de onda das tensões de entrada e saída para um retificador de onda completa.

Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013, p. 67).

O valor CC do sinal na saída do retificador de onda completa é dobrado, visto que a área acima do eixo para todo o ciclo é o dobro da área obtida para um retificador de meia-onda. Isso equivale a dizer que

$$V_{CC} = 0,636 V_m \quad \text{onda completa}$$

Se a tensão de joelho $V_K = 0,7 \text{ V}$ dos diodos de silício não são desprezadas, então

$$V_{CC} \cong 0,636 (V_m - 2V_K) \quad \text{onda completa}$$

Da mesma forma que para o retificador de meia-onda, se $V_m \gg 2V_K$, não haverá problema em utilizar a $V_{CC} = 0,636 V_m$ como primeira aproximação para V_{CC} (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013, p. 67).

A simulação do circuito de onda completa utiliza os mesmos componentes que foram necessários no projeto do retificador de meia-onda, dessa forma você não terá nenhuma dificuldade em localizá-los novamente. Monte o circuito conforme ilustrada a Fig. 8.38.

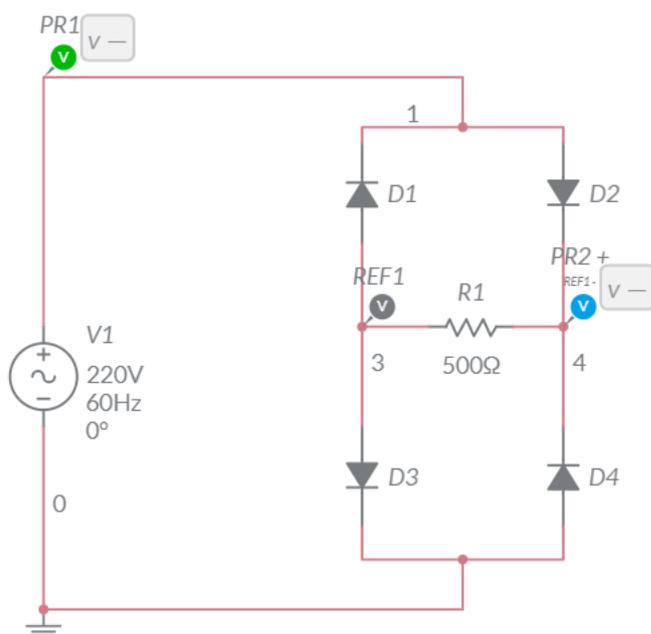


Figura 8.38 Circuito retificador de onda completa no Multisim Live.

Fonte: elaborada pelo autor.

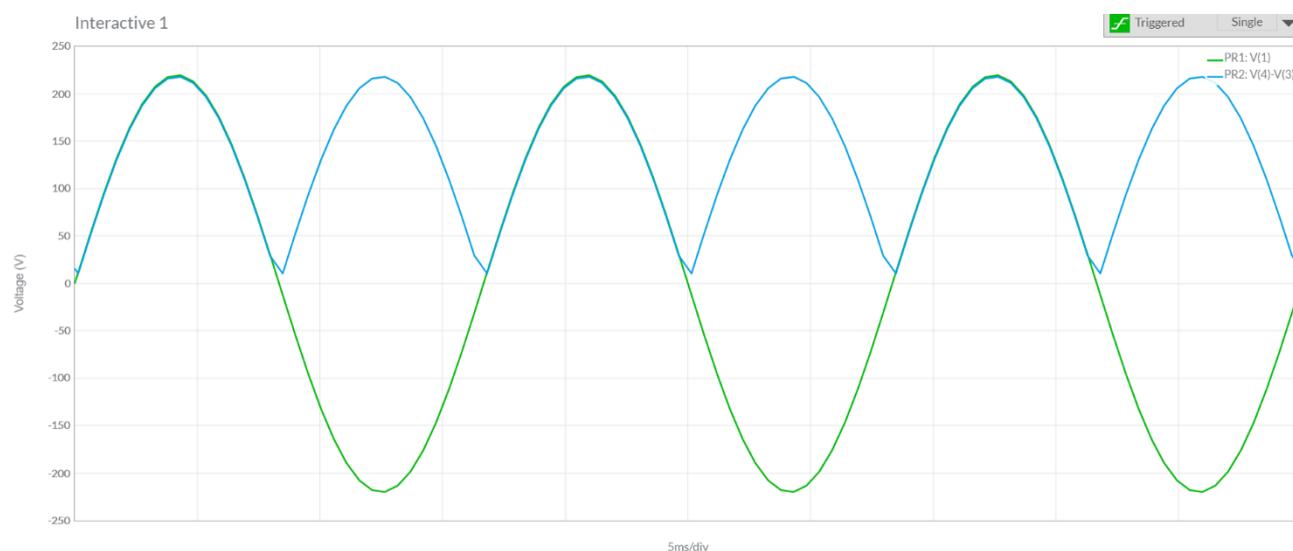
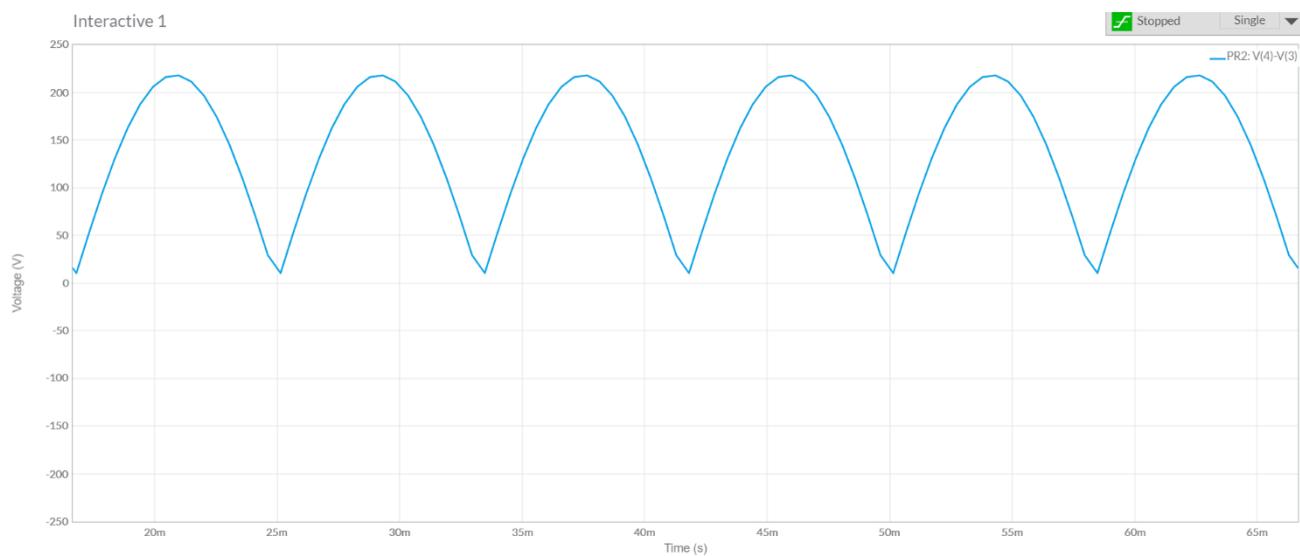


Figura 8.39 Sinais de entrada e saída do retificador de onda completa sobrepostos.

Fonte: elaborada pelo autor.

Não esqueça que o sinal de saída é a tensão sobre o resistor. O resultado

da simulação é ilustrado na Fig. 8.39, na qual os sinais de entrada e saída estão sobrepostos para efeito de comparação. Na Fig. 8.40, porém, tem-se apenas o sinal de saída. Essa é uma excelente oportunidade para trabalhar a leitura de gráficos com os seus alunos.



9

CAPÍTULO 9

Tópicos

- 9.1** Introdução
- 9.2** Definição
- 9.3** Filtro capacitivo
- 9.4** Implementação

Fonte Retificada



Fonte: <http://www.lojaenergiadigital.com.br/fonte-para-monitor-tv-lg-24mn43d-26ma33d-29ln300b-29ln549m-pr-7693-382787.htm>. Acesso em: 12 julho 2021.

Neste capítulo dá-se a implementação da fonte de tensão retificada. Também serão discutidos o filtro capacitivo e os dispositivos comercialmente disponíveis para uma possível implementação física do circuito.

9.1 Introdução

Como mencionado anteriormente, as fontes de alimentação são necessárias quando se utiliza dispositivos que exigem tensões e correntes especiais, as quais não estão disponíveis em tomadas residenciais comuns. Apenas para citar alguns desses aparelhos, tem-se os *smartphones*, *tabletes*, *notebooks*, luminárias, impressoras e roteadores.



Figura 9.1 Fonte de alimentação retificada.

Fonte: <https://mundialcomponentes.com.br/produtos/detalhes/fonte-chaveada-24v-2a-positivo-dentro/>. Acesso em: 5 julho 2021.

Dada sua importância na vida diária de qualquer pessoa, a fonte de alimentação retificada foi escolhida como projeto a ser implementado. Além do que, ela relaciona todos os conhecimentos até então absorvidos.

É preciso ficar claro que a implementação da fonte é apenas uma sugestão, nada impede a escolha e desenvolvimento de um outro projeto, que represente melhor o direcionamento dado durante as aulas de eletromagnetismo e ao nível dos alunos.

9.2 Definição

A fonte de alimentação recebe da rede elétrica tensão *ca* de 60 Hz e 220 V (ou 110 V em outras regiões) e entrega na saída uma tensão *cc*, que frequentemente está na faixa de 5 a 20 V (SEDRA; SMITH, 2007, p. 106).

A Fig. 9.2 ilustra um diagrama de blocos de uma fonte de alimentação.

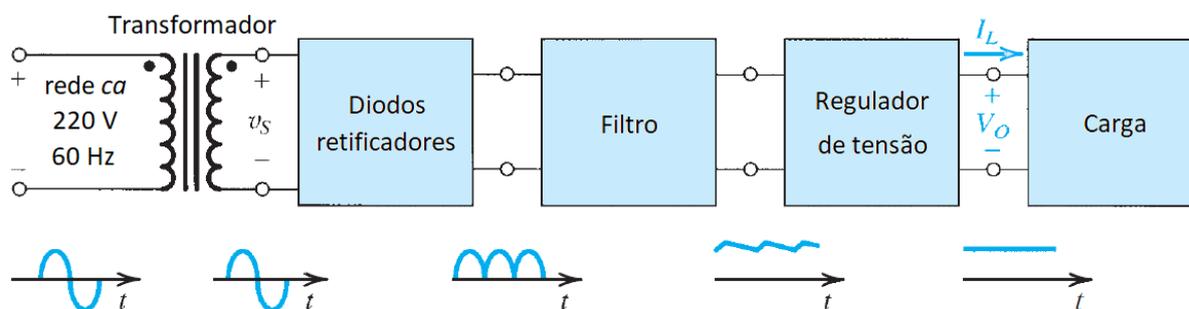


Figura 9.2 Diagrama de blocos de uma fonte de alimentação cc.

Fonte: Sedra e Smith (2007, com adaptações).

O transformador consiste no primeiro bloco. Ele é responsável por modificar a amplitude da senoide de entrada a valores exigidos pela fonte, além de proporcionar um isolamento elétrico entre o equipamento eletrônico e a rede de alimentação. Esse isolamento é importante porque reduz o risco de choque elétrico ao manusear o equipamento eletrônico.

Na sequência tem-se os diodos retificadores que convertem a senoide de entrada em uma saída monopolar pulsante. É verdade que esta forma apresenta uma componente *cc*, contudo as oscilações são inadequadas aos equipamentos eletrônicos, por esse motivo as fontes exigem a presença de um bloco de filtro que reduz significativamente as variações na saída do retificador.

Observe na Fig. 9.2 que mesmo após o bloco de filtro a tensão ainda apresenta ondulações. Para minimizar esse efeito e estabilizar a tensão de saída *cc* da fonte, utiliza-se o regulador de tensão que pode ser facilmente implementado com um regulador *zener* em paralelo com a carga (SEDRA; SMITH, 2007, p. 107).

Antecipa-se que não é conveniente a implementação do bloco regulador, visto o grau de dificuldade que possa conter e o desvio do clássico conteúdo de ensino médio. No entanto, somente o professor tem condições de julgar a necessidade e as possibilidades de se implementar o referido bloco.

9.3 Filtro capacitivo

Dentre os blocos que serão utilizados na implementação da fonte retificada, aquele que contém o filtro é o único ainda não discutido. Este bloco consiste simplesmente de um capacitor em paralelo com a carga, por isso é denominado filtro capacitivo. Seu princípio de operação é de fácil compreensão, sendo necessário apenas uma descrição qualitativa.

Para conferir o funcionamento do circuito retificador com filtro capacitivo, considere o circuito mostrado na Fig. 9.3a, no qual a entrada v_I é senoidal com valor de pico v_P e o diodo considerado ideal.

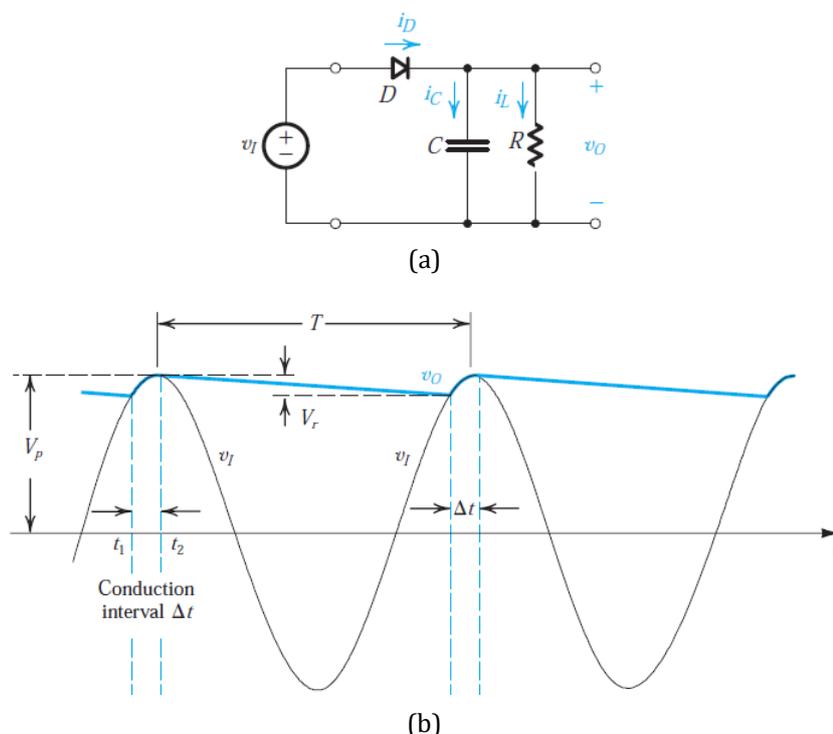


Figura 9.3 Representação de (a) circuito com capacitor de filtro e (b) forma de onda da tensão

Fonte: Sedra e Smith (2007, p. 202).

Durante o semiciclo positivo o diodo está diretamente polarizando o que lhe permite conduzir e carregar o capacitor até o valor de pico V_p . Entretanto, quando a fonte entra no semiciclo negativo o diodo corta e o

capacitor inicia sua descarga através da resistência R . Note que durante a fase de corte a tensão de saída v_o é mantida pelo capacitor. Inicialmente essa tensão é igual a tensão da fonte, mas seu valor cai à medida que o capacitor descarrega. Quando, porém, o sinal da fonte entra novamente no semiciclo positivo o diodo volta a conduzir, carrega o capacitor até o valor de pico v_i e o processo se repete (Fig. 9.3b).

Para que a tensão de saída diminua o mínimo possível é necessário que a constante de tempo RC do capacitor escolhido seja muito maior que o período T da senoide de entrada. O valor V_r é a tensão de pico a pico da ondulação (*ripple*) presente na saída da fonte e corresponde ao parâmetro que devemos reduzir ao máximo (SEDRA; SMITH, 2007, p. 110).

Observe que durante o período de corte do diodo a tensão na saída é dada por

$$v_o = V_p e^{-t/CR}$$

Enquanto que ao final do processo de descarga, temos

$$v_o = V_p - V_r = V_p e^{-T/CR}$$

Considerando a imposição $CR \gg T$, é possível usar a aproximação $e^{-T/CR} \cong 1 - T/CR$ e podemos escrever

$$V_r \cong V_p \frac{T}{RC}$$

Utilizando a relação $f = 1/T$, temos

$$V_r \cong \frac{V_p}{fCR}$$

Pode-se isolar a capacitância C na equação acima para determinar o valor do capacitor que devemos utilizar como filtro (SEDRA; SMITH, 2007, p. 111).

$$C \cong \frac{V_p}{fV_r R}$$

Um valor adequado para a tensão de *ripple* V_r corresponde a 1% do valor de pico V_p da tensão de entrada v_i .

9.4 Implementação

Agora que todos os blocos foram minuciosamente explicados podemos implementar o circuito da fonte de tensão retificada.

A tensão de entrada inicial será aquela presente em qualquer tomada residencial, ou seja, 220 V alternada. Usaremos um transformador para reduzir esse valor a 12 V também alternada, para tanto usaremos uma relação de 18 para 1 entre o número de voltas nas bobinas do primário e do secundário do transformador. Esse valor de tensão foi escolhido por se tratar da tensão necessário para o bom funcionamento das lâmpadas incandescentes disponíveis no *Multisim Live*. Outros valores de interesse podem ser simulados bastando modificar a relação entre o número de espiras. Transformadores que realizam esse abaixamento específico de tensão são comercialmente disponíveis (Fig. 9.5) o que permite, caso seja de interesse, a implementação física do circuito.

Nota!



Figura 9.4 Transformador 12 V 1 A – 110/220 VAC

Fonte:
<https://www.baudaeletronica.com.br/transformador-trafo-12v-1a-110-220vac.html>. Acesso em: 12 julho 2021.



Figura 9.5 Diodo retificador 6 A - 1000 V

Fonte:
<https://www.ryndackcomponentes.com.br/6a10-diodo-retificador-6a-1000v.html>. Acesso em: 12 julho 2021.

| Código | BV (tensão reversa máxima - Volts) | Io (corrente média direta - A) |
|--------|------------------------------------|--------------------------------|
| FR25 | 25V | 1A |
| 1N4001 | 50V | 1A |
| 1N4002 | 100V | 1A |
| 1N4003 | 200V | 1A |
| 1N4004 | 400V | 1A |
| 1N4005 | 600V | 1A |
| 1N4006 | 800V | 1A |
| 1N4007 | 1000V | 1A |

Figura 9.6 Tensão reversa máxima e corrente média direta

Fonte:
<https://pt.scribd.com/document/442412663/Tabela-de-Diodos-Retificadores>. Acesso em: 12 julho 2021

Na sequência uma ponte de diodos retificadores faz a conversão da tensão de alternada para contínua. Para uma possível implementação física, fique atento à tensão reversa e a corrente que o diodo deverá suportar (Fig. 9.6). Tabelas estão disponíveis na internet para auxiliar na escolha correta. Por último, o capacitor é inserido para reduzir as ondulações de tensão.

Monte o circuito da Fig. 9.7 obedecendo aos valores para a fonte de tensão, resistor e capacitor.

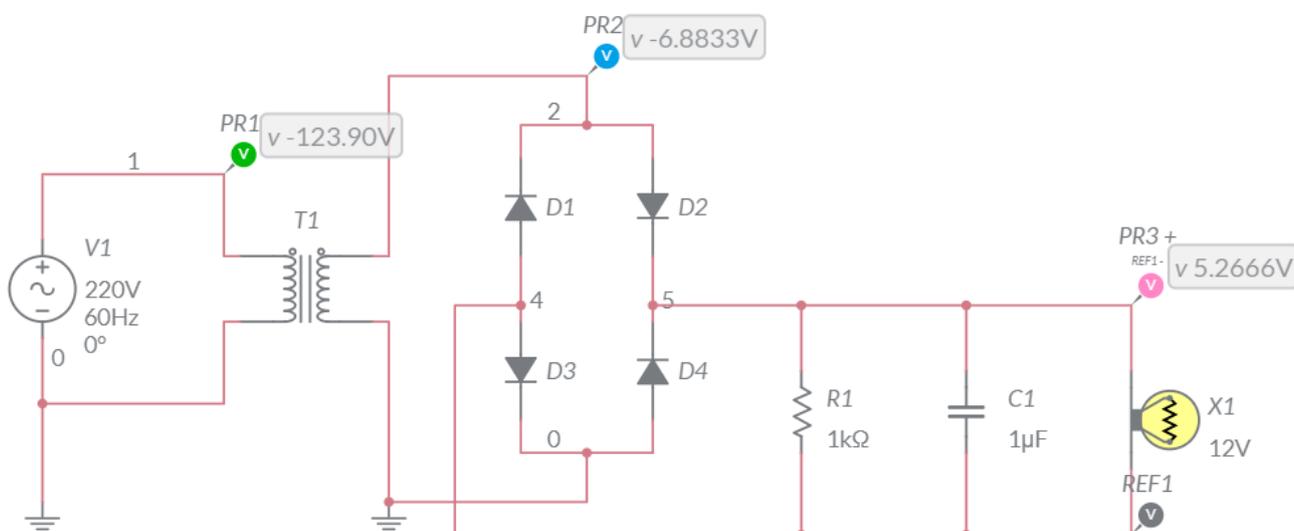


Figura 9.7 Simulação da fonte retificada com capacitor de 1 microfarad.

Fonte: Elaborada pelo autor.

O resistor $1\text{ k}\Omega$ em conjunto com o capacitor de $1\text{ }\mu\text{F}$ resulta em uma constante de tempo RC insuficiente para reduzir as ondulações de tensão que se propagam até a saída da fonte retificada. Em consequência, a lâmpada irá piscar constantemente. Através dos sinais indicados pelos *PROBES* (Fig. 9.8), constatamos que o sinal de tensão (em rosa) que chega na lâmpada não apresenta praticamente nenhuma atenuação, isso é o que causa o piscar da lâmpada. É interessante que o aluno tenha essa primeira experiência para que a função do capacitor e sua importância fique muito evidente. Se possível, inicie a simulação utilizando condensadores de alguns nanômetros, os efeitos serão ainda mais impressionantes.

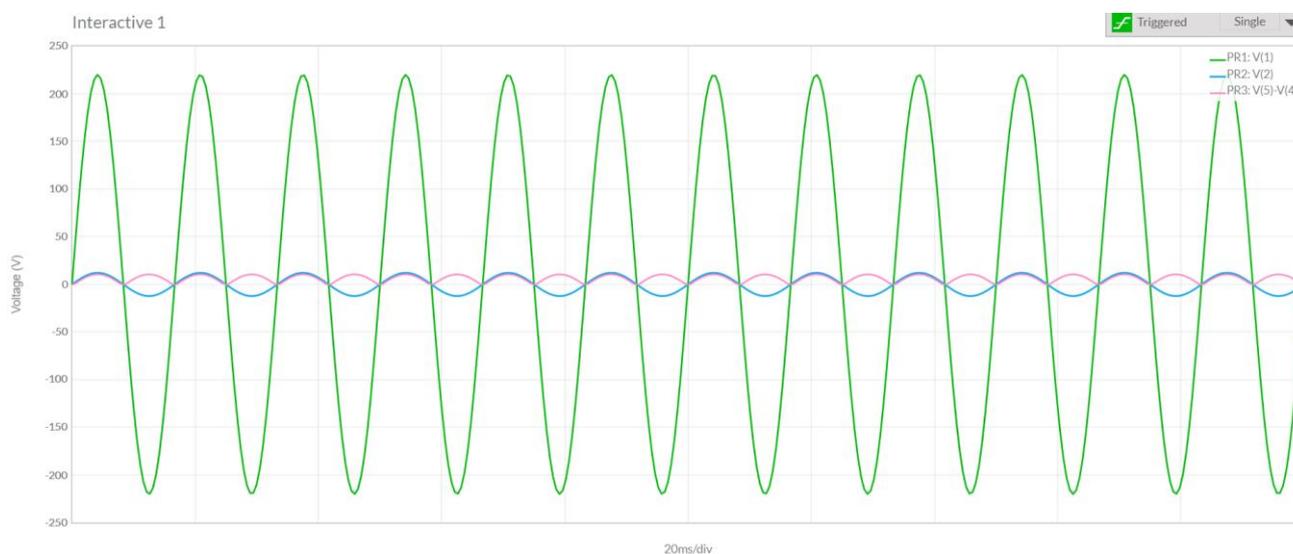


Figura 9.8 Sinais nos PROBES de tensão para um capacitor de 1 microfarad

Fonte: Elaborada pelo autor.

Utilizando um capacitor de 1 mF, elevamos o valor da constante de tempo RC , o que reduz significativamente as oscilações de tensão na saída da fonte e, em consequência, o efeito estroboscópico na lâmpada.

Os sinais dos *PROBES* de tensão, confirmam a quase eliminação das ondulações presentes na saída da fonte retificada.

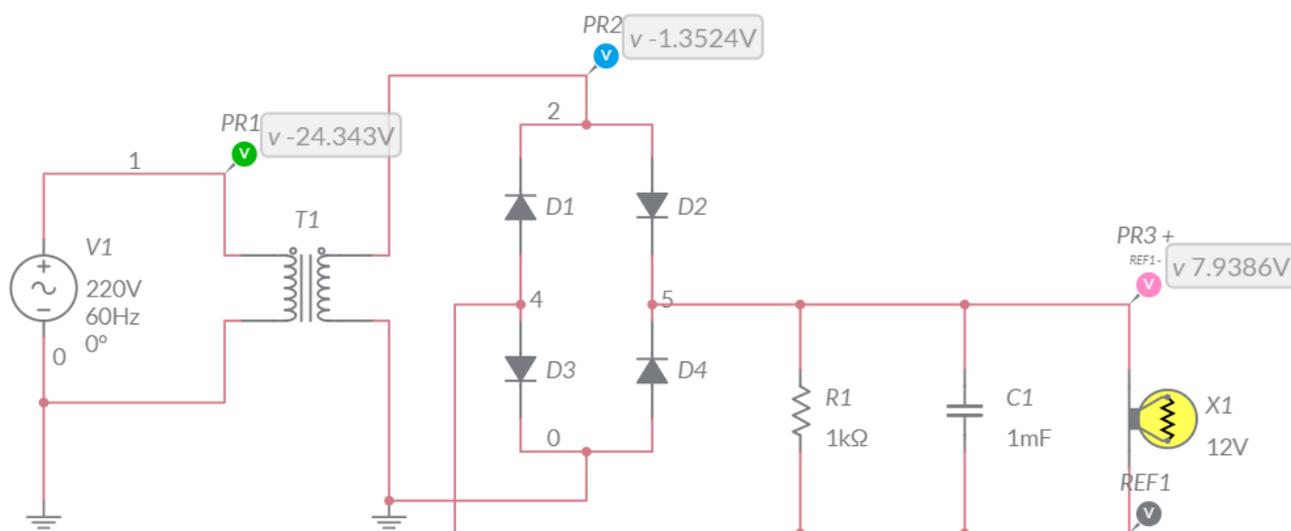


Figura 9.9 Simulação da fonte retificada com capacitor de 1 milifarad.

Fonte: Elaborada pelo autor.

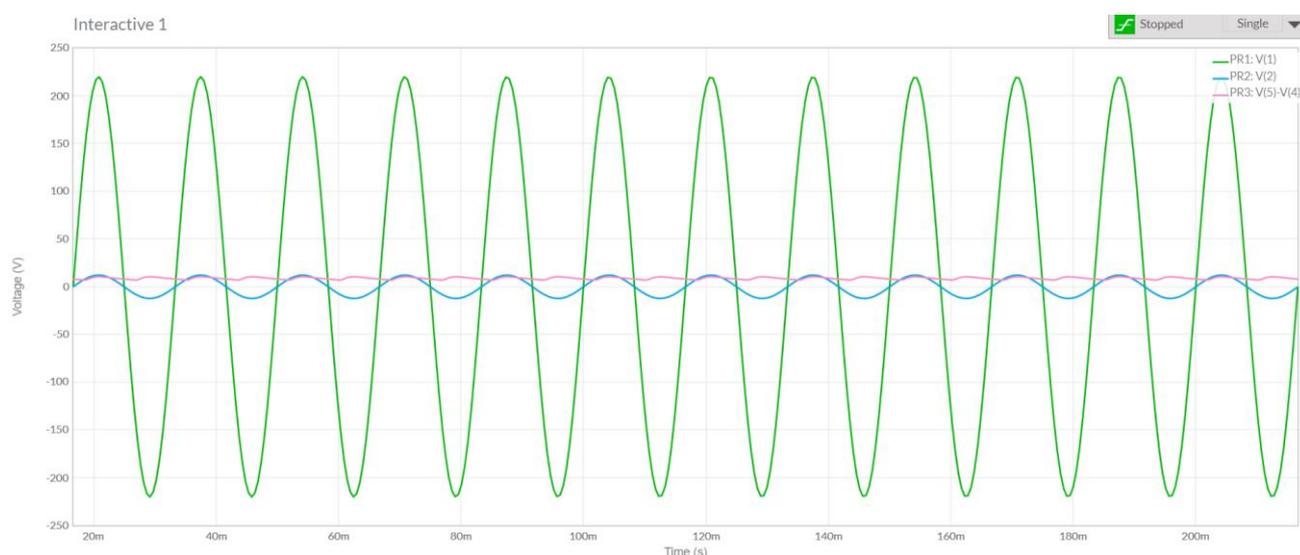


Figura 9.10 Sinais nos *PROBES* de tensão para um capacitor de 1 milifarad

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a implementação física do circuito, algo que certamente será proposto por alunos mais entusiasmados, deve se verificar a tensão desejada na saída da fonte e os valores comerciais para capacitores, a fim de que seja viável a sua produção. Um capacitor bem conhecido comercialmente possui capacitância 2200 μF e tensão 10 V (Fig. 9.11).



Figura 9.11 Capacitor de 2200 μF - 10 V

Fonte: <https://www.amazon.com/Rubycon-2200uF-Radial-Electrolytic-Capacitor/dp/B0088C1Z6A>. Acesso em: 12 julho 2021.

Referências

- ALEXANDER, Charles K.; SADIKU, Matthew N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5. Ed. Porto Alegre. AMGH, 2013.
- BÔAS, Newton Villas; DOCA, Ricardo Helou; BISCUOLA, Gualter José. **Tópicos de Física**. 18. Ed. São Paulo. Saraiva, 2012. 3 v.
- BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos Eletrônicos**. 11. Ed. São Paulo. Pearson Education do Brasil, 2013.
- BOYLESTAD, Robert L. **Introdução à Análise de Circuitos Elétricos**. 12. Ed. São Paulo. Pearson Prentice Hall, 2012.
- BRAGA, Newton C. **Eletrônica Básica**. 1. Ed. São Paulo. Instituto NCB, 2012. 1 v.
- CALÇADA, Caio Sérgio; SAMPAIO, José Luiz. **Física Clássica**. 1. Ed. São Paulo. Atual, 2012. V 3.
- CREDER, Hélio. **Instalações Elétricas**. 16. Ed. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2016.
- KNIGHT, Randall D. **Física: uma abordagem estratégica**. 2. Ed. Porto Alegre. Bookman, 2009. 3 v.
- MALVINO, Albert; BATES, David J. **Eletrônica**. 8. Ed. Porto Alegre. AMGH, 2016. 1 v.
- NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. **Multisim Live**. Fortaleza, 2021. Disponível em: <https://www.ni.com/pt-br/shop/electronic-test-instrumentation/application-software-for-electronic-test-and-instrumentation-category/what-is-multisim.html>. Acesso em: 20 jan. 2021.
- NILSSON, James W.; RIEDEL, Susan A. **Circuitos Elétricos**. 10. Ed. São Paulo. Pearson Education do Brasil, 2015.
- RAMALHO JUNIOR, Francisco; FERRARO, Nicolau Gilberto; TOLEDO, Paulo Antônio. **Os Fundamentos de Física**. 10. Ed. São Paulo. Moderna, 2009. 3 v.
- SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth C. **Microeletrônica**. 5. Ed. São Paulo. Pearson Prentice Hall, 2007.
- SERWAY, Raymond A; JEWETT, John W. **Princípios de Física**. 5. Ed. São Paulo. Cengage Learning, 2014. 3 v.