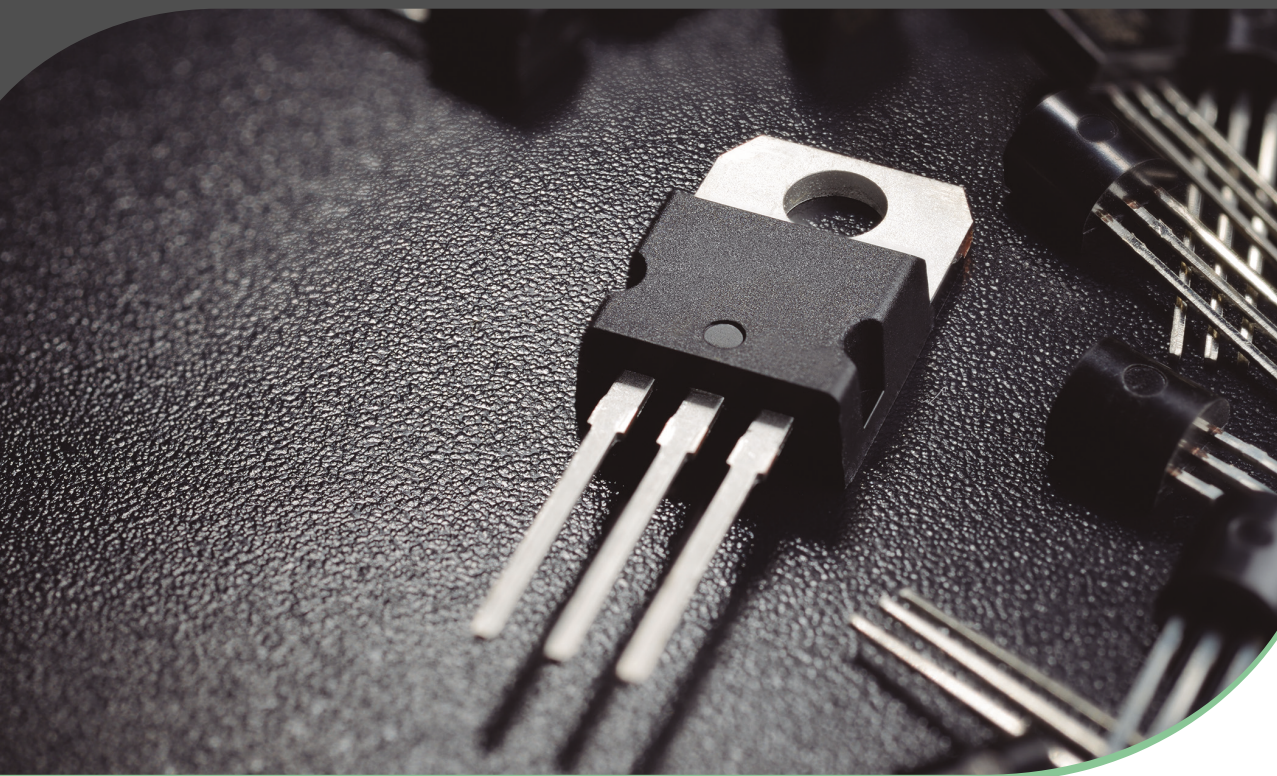


FRANCISCO J. ARNOLD

PRÁTICAS DE ELETRÔNICA ANALÓGICA



Blucher

Francisco J. Arnold

PRÁTICAS DE ELETRÔNICA ANALÓGICA

Práticas de eletrônica analógica

© 2024 Francisco J. Arnold

Editora Edgard Blücher Ltda.

Publisher Edgard Blücher

Editor Eduardo Blücher

Coordenador editorial Rafael Fulanetti

Pré-produção Aline Flenic

Coordenadora de produção Andressa Lira

Produção editorial Mariana Naime

Preparação de texto Sérgio Nascimento

Diagramação Alessandra de Proença

Revisão de texto Maurício Katayama

Capa Laércio Flenic

Imagem da capa iStockphoto

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar
04531-934 – São Paulo – SP – Brasil
Tel.: 55 11 3078-5366
contato@blucher.com.br
www.blucher.com.br

Segundo o Novo Acordo Ortográfico, conforme 6. ed.
do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*,
Academia Brasileira de Letras, julho de 2021.

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer
meios sem autorização escrita da editora.

Todos os direitos reservados pela Editora Edgard Blücher Ltda.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Angélica Ilacqua CRB-8/7057

Arnold, Francisco J.
Práticas de eletrônica analógica / Francisco J. Arnold –
– São Paulo : Blucher, 2024.
328 p.

Bibliografia
ISBN 978-85-212-2442-6

1. Eletrônica I. Título

24-1603 CDD 621.38

Índices para catálogo sistemático:
1. Eletrônica

Conteúdo

Agradecimentos.	11
Prefácio.	13
1. Curva característica do diodo semicondutor	17
Estudo preliminar.	17
1.1 Introdução.	17
1.2 Teoria	19
1.3 Experimentos propostos	20
1.4 Discussão	22
2. Circuitos limitadores	23
Estudo preliminar.	23
2.1 Introdução.	23
2.2 Teoria.	24
2.3 Experimentos propostos	25
2.4 Discussão	26
3. Circuitos grampeadores, detectores de pico e dobradores de tensão	27
Estudo preliminar.	27
3.1 Introdução	27

3.2 Teoria	28
3.3 Experimentos propostos	31
3.4 Discussão	33
4. Fontes de alimentação	35
Estudo preliminar	35
4.1 Introdução	35
4.2 Teoria	36
4.3 Experimentos propostos	40
4.4 Discussão	42
5. Circuitos reguladores com diodos Zener	45
Estudo preliminar	45
5.1 Introdução	45
5.2 Teoria	46
5.3 Experimentos propostos	49
5.4 Discussão	51
6. Curvas características de transistores bipolares	53
Estudo preliminar	53
6.1 Introdução	53
6.2 Teoria	55
6.3 Experimentos propostos	58
6.4 Discussão	60
7. Fonte de corrente com transistor bipolar	63
Estudo preliminar	63
7.1 Introdução	63
7.2 Teoria	65
7.3 Experimentos propostos	66
7.4 Discussão	71
8. Transistores bipolares em corte e saturação	73
Estudo preliminar	73
8.1 Introdução	73
8.2 Teoria	74
8.3 Experimentos propostos	75
8.4 Discussão	80

9. Polarização do transistor bipolar e conceitos de amplificação	81
Estudo preliminar	81
9.1 Introdução	81
9.2 Teoria	83
9.3 Experimentos propostos	87
9.4 Discussão	89
10. Amplificadores de pequenos sinais com transistores bipolares em classe A	91
Estudo preliminar	91
10.1 Introdução	91
10.2 Teoria	94
10.3 Experimentos propostos	109
10.4 Discussão	115
11. Resposta em frequência de amplificadores com transistores bipolares	119
Estudo preliminar	119
11.1 Introdução	119
11.2 Teoria	121
11.3 Experimentos propostos	124
11.4 Discussão	127
12. Amplificadores transistorizados em cascata	129
Estudo preliminar	129
12.1 Introdução	129
12.2 Teoria	131
12.3 Experimentos propostos	135
12.4 Discussão	138
13. Curvas características e circuitos de polarização com transistores de efeito de campo	141
Estudo preliminar	141
13.1 Introdução	141
13.2 Teoria	144
13.3 Experimentos propostos	149
13.4 Discussão	153
14. Aplicações com transistores de efeito de campo de junção	155
Estudo preliminar	155

14.1 Introdução	155
14.2 Teoria	156
14.3 Experimentos propostos	160
14.4 Discussão	165
15. Aplicações com transistores de efeito de campo de metal óxido semicondutor	167
Estudo preliminar	167
15.1 Introdução	167
15.2 Teoria	168
15.3 Experimentos propostos	175
15.4 Discussão	185
16. Amplificadores de potência em classe B	187
Estudo preliminar	187
16.1 Introdução	187
16.2 Teoria	188
16.3 Experimentos propostos	198
16.4 Discussão	202
17. Amplificadores operacionais	205
Estudo preliminar	205
17.1 Introdução	205
17.2 Teoria	206
17.3 Experimentos propostos	211
17.4 Discussão	214
18. Operações matemáticas com amplificadores operacionais	217
Estudo preliminar	217
18.1 Introdução	217
18.2 Teoria	218
18.3 Experimentos propostos	220
18.4 Discussão	226
19. Miscelânea de aplicações com amplificadores operacionais	229
Estudo preliminar	229
19.1 Introdução	229
19.2 Teoria	231

19.3 Experimentos propostos	238
19.4 Discussão	244
20. Filtros ativos	247
Estudo preliminar	247
20.1 Introdução	247
20.2 Teoria	250
20.3 Experimentos propostos	262
20.4 Discussões	270
21. Amplificadores com realimentação negativa	273
Estudo preliminar	273
21.1 Introdução	273
21.2 Teoria	274
21.3 Experimentos propostos	279
21.4 Discussão	281
22. Osciladores de relaxação	283
Estudo preliminar	283
22.1 Introdução	283
22.2 Teoria	284
22.3 Experimentos propostos	289
22.4 Discussão	292
23. Osciladores harmônicos	295
Estudo preliminar	295
23.1 Introdução	295
23.2 Teoria	296
23.3 Experimentos propostos	303
23.4 Discussão	308
24. Retificadores controlados de silício	311
Estudo preliminar	311
24.1 Introdução	311
24.2 Teoria	312
24.3 Experimentos propostos	314
24.4 Discussão	316

Referências bibliográficas. 319

 Bibliografia. 320

 Referências 321

Agradecimentos

Meus sinceros agradecimentos a todos os professores, estudantes e técnicos de laboratório das instituições em que atuei como discente e docente, e que ao longo de vários anos compartilharam informações, experiências e conhecimentos. Certamente, a natureza prática deste livro só seria alcançada com a valiosa interação dessas pessoas, com as quais tive a grata felicidade de compor equipes de trabalho.

Meus agradecimentos também às universidades paulistas (Universidade Estadual de São Paulo [Unesp], Universidade de São Paulo [USP] e Universidade Estadual de Campinas [Unicamp]) que me acolheram e disponibilizaram amplo apoio institucional para que eu pudesse me desenvolver como profissional do ensino e da pesquisa.

Também agradeço às instituições financiadoras Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp), que garantiram apoio financeiro, a mim e a meus orientados, para a realização de pesquisas.

Prefácio

O ensino de circuitos eletrônicos em seus diversos níveis, iniciando pelos cursos técnicos, passando pelos cursos de tecnologia e chegando aos cursos de graduação, vem passando por uma série de transformações ao longo dos anos. Essas transformações são esperadas em vista da evolução de novos componentes eletrônicos, especialmente com os novos projetos e a disponibilização comercial de circuitos integrados implementados com funções cada vez mais específicas. Além disso, constata-se a crescente e valorosa disseminação dos programas de simulação computacional implementados com modelos que geram resultados com cálculos que retratam de forma cada vez mais precisa a operação real de funcionamento dos circuitos.

A vasta quantidade de livros disponibilizados para o ensino da eletrônica, muitos dos quais de elevada qualidade técnica e abrangência, prioritariamente se direciona na descrição de conteúdos teóricos, deixando o imprescindível segmento da experiência prática em segundo plano; ou, mesmo, vários deles nem apresentam situações e problemas direcionados para atividades práticas. É evidente que cada livro possui sua finalidade, mas deve ser reconhecido que não há muitos livros de eletrônica com dedicação exclusiva à prática de laboratório quando comparados aos que abordam aspectos teóricos.

Há poucos livros didáticos que dedicam espaço direcionado para o desenvolvimento de experimentos e de pequenos projetos. Progressivamente, essas atividades práticas estão habitando os planos pedagógicos das disciplinas que tratam de temas da eletrônica analógica nos seus diferentes patamares. As atividades de laboratório,

assim como os desenvolvimentos de pequenos projetos que costumam figurar nos planejamentos dessas disciplinas, constituem, efetivamente, partes motivadoras e estimulantes para o estudante. Ademais, essas atividades contribuem para criar habilidades diferenciadas nos alunos, disciplinando-os para o comportamento técnico e profissional no laboratório, capacitando-os para a utilização correta da instrumentação eletrônica, inculcando-lhes o senso de grandezas físicas e ampliando as capacidades de detectar defeitos e de resolver problemas de diferentes ordens.

O conteúdo deste livro reúne experiências que foram desenvolvidas ao longo de anos pela experiência do autor em ministrar disciplinas relacionadas à eletrônica analógica com abrangência teórica e em laboratório. Parte-se do pressuposto de que as atividades práticas no laboratório são fundamentais para a adequada e consistente formação de um profissional que atuará na área de eletrônica, independentemente de ser esta de nível técnico ou de engenharia.

Ao longo do livro são encontradas poucas citações sobre programas de simulação computacional de circuitos eletrônicos. Isso não significa uma declaração de descarte desse poderoso recurso de investigação e projeto. Muito pelo contrário, a simulação computacional é parte integrante do desenvolvimento dos experimentos apresentados que se encontra consolidada no manejo de projetos e no ensino de eletrônica. Todos os experimentos que apresentamos foram previamente simulados no programa LTspice (<https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>). As simulações produziram resultados com os quais se angariaram muitos aperfeiçoamentos na concepção da versão final do experimento apresentado. Portanto, deve-se enfatizar que este livro está direcionado para a parte finalística do aprendizado na qual o estudante já tenha adquirido a confiança necessária e suficiente para materializar os conceitos que, prévia e extensivamente, foram estudados qualitativamente, modelados e calculados por métodos algébricos simplificados e simulados computacionalmente. A despeito disso, o estudante que não possua recursos de laboratório poderá usar o conteúdo do livro para se limitar a fazer simulações computacionais no programa que lhe for conveniente.

Este livro está direcionado para estudantes e profissionais de eletrônica que desejam desenvolver habilidades práticas em eletrônica analógica. Do ponto de vista de ensino, mas em uma abordagem conservadora, o livro destina-se a professores que pretendam desenvolver roteiros de experimentos e propor circuitos para que seus alunos desenvolvam projetos. Visando à aplicação de metodologias ativas, particularmente o desenvolvimento da dinâmica de resolução de problemas, em que o estudante não fica restrito à reprodução de roteiros, com este livro o estudante poderá guiar-se com autonomia pelos conteúdos de eletrônica analógica ao ser estimu-

lado a propor experimentos e projetos, com os quais se possa conduzir pela exploração dos temas desejados.

Cada um dos capítulos aborda um assunto bem definido dos conteúdos programáticos das disciplinas de eletrônica analógica, podendo ser estudados de maneira independente e dosados em termos de profundidade para serem direcionados para cursos de nível técnico, de tecnologia e de bacharelado. A sequência dos capítulos é apenas uma sugestão de apresentação do conteúdo, e o instrutor pode estabelecer outra sequência alternativa ou pinçar os conteúdos que sejam de maior relevância dentro dos objetivos de suas atividades de laboratório. No início de cada capítulo há uma breve exposição sobre os conteúdos necessários para a exploração do capítulo.

Todos os capítulos estão divididos da mesma forma. Eles incluem um breve relato sobre os conhecimentos prévios necessários ao estudo do seu conteúdo; uma introdução, com a apresentação do tema e de assuntos relacionados; uma seção de teoria, bastante resumida e restrita ao resgate de informações essenciais, que deveriam ser estudadas preliminarmente, a fim de estabelecer um direcionamento para a concepção do experimento e para a interpretação dos resultados, bem como para a orientação na elaboração de pequenos projetos; uma seção de experimentos propostos, em que se apresentam, a depender do tema, experimentos de laboratório e/ou propostas de projetos; e, por fim, uma seção de discussão em que são apresentadas questões decorrentes do procedimento experimental e propostas de implementações adicionais.

Os Capítulos 1 a 5 são direcionados para o estudo dos diodos semicondutores. Neles são apresentadas propostas de caracterização desses componentes e fundamentos para criar circuitos típicos com diodos, inclusive de fontes de alimentação reguladas.

Os Capítulos 6 a 12 focam os transistores bipolares. Além das curvas características desses transistores, são apresentados os circuitos típicos para polarização e amplificação de sinais, para o uso do transistor como fonte de corrente e nos regimes de operação para comutação. Algumas regras práticas para o desenvolvimento de pequenos projetos de amplificadores também são apresentadas. Ainda no mesmo segmento, foram inseridos os conceitos de amplificadores ligados em cascata e de resposta em frequência. No Capítulo 16, os amplificadores com transistores bipolares são retomados para aplicações em potência elevada; no caso, amplificadores de classe B.

A orientação de estudos realizada com os transistores bipolares é replicada com os transistores de efeito de campo nos Capítulos 13 a 15. Neles são apresentados experimentos para determinar curvas de características desses transistores, assim como circuitos e regras de projeto para amplificadores de pequenos sinais com os

transistores de efeito de campo. Particularmente no Capítulo 15 também se destinam partes para o desenvolvimento de amplificadores de potência com MOSFETs.

Os amplificadores operacionais são tratados nos Capítulos 17 a 21. Foram apresentados os circuitos fundamentais desses amplificadores no Capítulo 17, com estudos baseados no componente ideal e em algumas características reais. O Capítulo 18 remete à origem da denominação operacional, incluindo estudos sobre as operações matemáticas e aplicações desses circuitos. O Capítulo 19 apresenta uma miscelânea de circuitos com amplificadores operacionais, caracterizando-se como o capítulo do livro com maior liberdade na exposição dos conteúdos. Os filtros ativos são estudados no Capítulo 20. O Capítulo 21 tem finalidade didática para compreensão dos efeitos da realimentação negativa nas principais propriedades de um amplificador: ganho e impedâncias de entrada e saída.

Nos Capítulos 22 e 23 o assunto é osciladores. Estes capítulos tratam de osciladores harmônicos e de relaxação e encerram os conteúdos sobre amplificadores e realimentação. Os osciladores harmônicos são estudados nas suas configurações mais comuns e, normalmente, são empregados em circuitos de radiofrequência. Os osciladores de relaxação são apresentados tomando como base o conhecido circuito integrado 555, com o qual foram exploradas as configurações mais comuns.

Por fim, no Capítulo 24 é feita uma breve abordagem a tiristores, particularmente com os SCRs (*Silicon Controllor Rectifiers*). Com o SCR é possível controlar a potência em uma carga por meio de seu chaveamento dependente da fase. Os fundamentos do controle de potência por fase com SCRs são apresentados neste capítulo.

O material bibliográfico utilizado neste livro é apresentado em duas partes. A primeira parte são as bibliografias, que incluem livros de diferentes níveis, publicados em períodos diferentes e que trazem conteúdos para o estudo de teoria e de prática de eletrônica. A segunda parte são as referências e estão separadas por capítulos. Nas referências encontram-se livros e artigos que foram utilizados para projetos específicos propostos nos referidos capítulos. A consulta dos artigos dessas referências poderá também expandir o universo de experimentos que poderão ser desenvolvidos.

Enfim, acreditamos que o projeto do presente livro seja voltado para práticas de ensino e que seu conteúdo seja suficiente para compor o programa de disciplinas de laboratório de eletrônica analógica a serem ministradas no período de um ano em um curso regular de engenharia. Espero que aproveitem!

O autor

CAPÍTULO 1

Curva característica do diodo semiconductor

ESTUDO PRELIMINAR

Para fazer as curvas características de componentes eletrônicos basta usar conceitos básicos de eletricidade como as leis de Kirchhoff e ter habilidades mínimas com instrumentos de medição como os multímetros. Especificamente para a curva característica de um diodo semiconductor é necessário conhecer previamente a teoria elementar sobre materiais semicondutores e sua resposta em relação a excitações elétricas.

1.1 INTRODUÇÃO

Os diodos semicondutores são os componentes de estado sólido mais simples. Os diodos mais comuns são baseados em junções semicondutoras formadas por cristais de silício com dopagens distintas. As dopagens desses cristais podem ser do tipo P, quando um cristal semiconductor intrínseco é dopado com elementos químicos que possuem 3 elétrons na camada de valência, e do tipo N, quando um cristal semiconductor intrínseco é dopado com elementos químicos com 5 elétrons na camada de valência.

Nos materiais condutores a condução elétrica se faz pelos elétrons na banda de condução. Nos semicondutores, devido ao efeito da dopagem, tem-se dois tipos de

portadores de carga, os elétrons e as lacunas, os quais podem conduzir pelas bandas de condução e de valência.

Em decorrência das especificidades do processo de dopagem, nos materiais do tipo P, na banda de valência, as lacunas presentes estão em maior concentração que os elétrons, sendo, por essa razão, denominadas portadores majoritários. Na banda de condução desses materiais existem elétrons livres ali promovidos pelo ganho de energia devido à temperatura. Como são poucos elétrons que ganham a banda de condução, estes são denominados portadores minoritários.

Por outro lado, nos materiais do tipo N, a banda de condução possui uma grande concentração de elétrons livres, os quais são denominados portadores majoritários. As lacunas da banda de valência possuem baixa concentração e são denominadas portadores minoritários.

Um diodo semicondutor consiste em uma junção PN, que é formada pela união de um semicondutor do tipo P com outro do tipo N. Entre esses materiais se estabelece uma camada de depleção formada por cátions no lado N e por ânions no lado P. Esse agrupamento de íons estabelece uma barreira de potencial que bloqueia a recombinação natural entre elétrons e lacunas.

O terminal referente ao material do tipo P é chamado de ânodo e representado pela letra A. O terminal referente ao material do tipo N é chamado de cátodo e representado pela letra K. A junção PN é polarizada diretamente quando o potencial elétrico do ânodo é maior que o do cátodo. A inversão dos potenciais resulta na polarização reversa do diodo.

Quando o diodo está polarizado diretamente com uma diferença de potencial superior à da sua barreira de potencial, ele conduz intensamente. Na polarização reversa a camada de depleção se alarga e a condução, devida apenas a portadores minoritários, será desprezível. Essa característica de condução sujeita à orientação da polarização estabelece uma primeira diferença dos diodos semicondutores em relação aos resistores, capacitores e indutores. Além disso, os diodos apresentam comportamento elétrico não linear da corrente em função da tensão elétrica.

A caracterização elétrica de um diodo semicondutor é realizada por um experimento simples no qual se mede a tensão e a corrente neste dispositivo usando-se um circuito formado por uma fonte de alimentação, por um resistor e pelo diodo a ser caracterizado. O objetivo do experimento apresentado neste capítulo é determinar a curva característica de um diodo semicondutor. Em vista da sensibilidade das junções PN em relação à temperatura, também propomos o estudo do efeito sobre o ponto de trabalho do diodo causado por variações de temperatura de operação.

1.2 TEORIA

A junção PN possui uma relação de corrente, i_D , que passa pelo diodo, quando uma tensão elétrica, v_D , é aplicada. Essa relação é manifestada pela equação 1.1:

$$i_D = I_O \left[\exp\left(\frac{qv_D}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (1.1)$$

onde

I_O é a corrente de saturação reversa, da ordem de 10^{-15} A para diodos que operam com pequenos sinais, dependente da temperatura;

q é a carga do elétron, $1,60 \times 10^{-19}$ C;

k é a constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23}$ J/K;

T é a temperatura absoluta em K;

n é uma constante que assume valores entre 0,5 e 2,0, que depende, entre outros fatores, do processo de fabricação, dos níveis de dopagem e da pureza dos materiais.

Quando a corrente no sentido direto for apreciavelmente superior a I_O , a equação 1.1 pode ser aproximada pela equação 1.2:

$$i_D = I_O \exp\left(\frac{qv_D}{nkT}\right) \quad (1.2)$$

Por meio de uma inspeção gráfica dessa função revela-se a principal característica dos diodos semicondutores: ter condução muito pequena (desprezível na maior parte dos casos) sob polarização reversa ($v_D < 0$) e conduzir, apreciavelmente, sob polarização direta ($v_D > 0$) desde que superada a barreira de potencial da junção, a partir $v_D = 0,65$ V para diodos de silício. A equação 1.1 também mostra que a curva característica do diodo é dependente da temperatura.

Modelos elétricos equivalentes são usados frequentemente para analisar circuitos que contêm diodos semicondutores. Esses modelos introduzem simplificações analíticas as quais, na prática, correspondem a resultados bem ajustados e aplicáveis com boa margem de exatidão em circuitos com diodos semicondutores. A Figura 1.1 apresenta o símbolo esquemático do diodo semicondutor e exemplifica três circuitos equivalentes empregados na análise de circuitos com esses dispositivos.

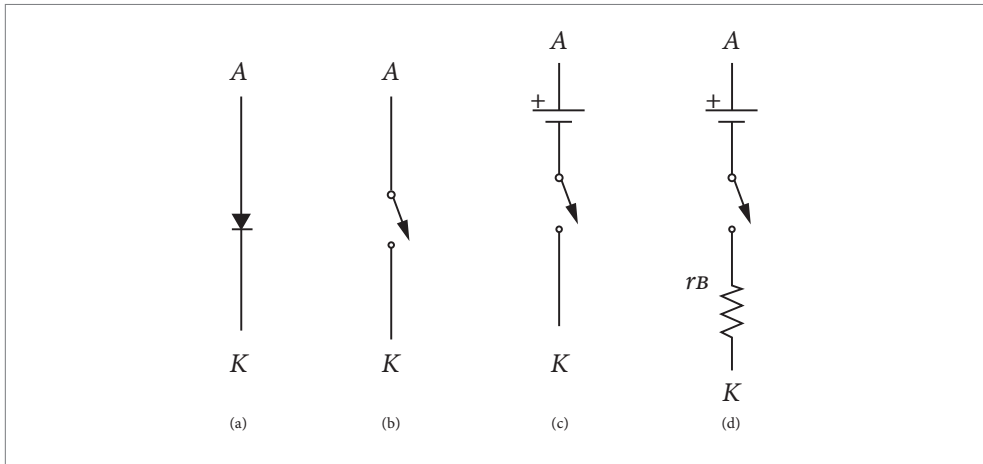


Figura 1.1 (a) Símbolo esquemático do diodo semicondutor; (b) modelo chave; (c) modelo chave-fonte; (d) modelo chave-fonte-resistência.

Quando os modelos elétricos são considerados, a curva característica do diodo representado se simplifica substancialmente, uma vez que a região de não condução (polarização reversa) retrata o comportamento elétrico de uma chave aberta. Por outro lado, na região de condução (polarização direta) o modelo se comporta como uma chave fechada e despreza a barreira de potencial – como no caso (b) – ou considera a queda de tensão da barreira de potencial – como no caso (c) – e, ainda, atribui uma resistência de corpo (r_B) pela junção – como no caso (d).

1.3 EXPERIMENTOS PROPOSTOS

O experimento de caracterização de um diodo semicondutor é realizado em duas etapas. Em ambas se utilizam os mesmos componentes e equipamentos. Nas Figuras 1.2 e 1.3 são apresentados os circuitos utilizados para a caracterização de um diodo semicondutor de uso geral. É fácil perceber que a diferença entre eles é a polarização do diodo.

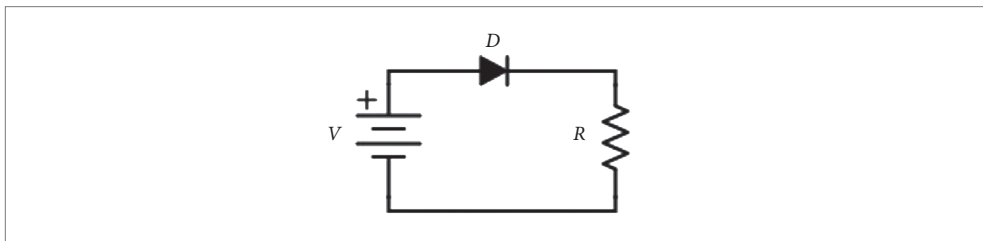


Figura 1.2 Montagem experimental para determinação da curva característica de um diodo semicondutor em polarização direta.

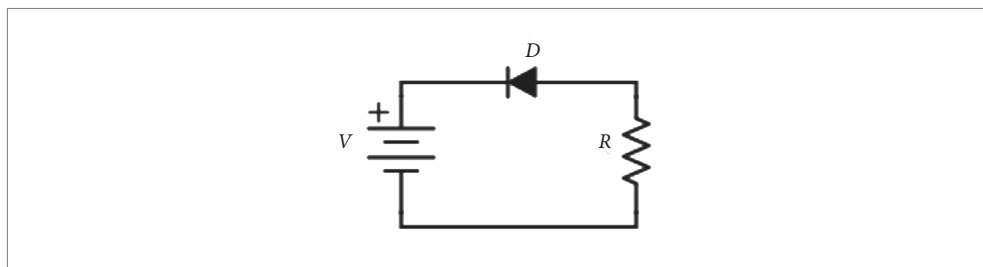


Figura 1.3 Montagem experimental para determinação da curva característica de um diodo semicondutor em polarização reversa.

O experimento consiste em determinar a curva da corrente em função da tensão de um diodo semicondutor 1N4007. Os materiais usados nesse experimento são:

- 1 fonte de alimentação ajustável de 0 a 30 V;
- 2 multímetros;
- 1 diodo semicondutor 1N4007;
- 1 resistor de $100\ \Omega \times 5\ \text{W}$.

O procedimento consiste em montar os circuitos e variar a tensão elétrica fornecida pela fonte de alimentação em ambos os circuitos entre 0 e 30 V. Deve-se utilizar um dos multímetros como voltímetro CC para medir as tensões entre o ânodo e o cátodo do diodo. O segundo multímetro deve ser usado como amperímetro que mede a corrente elétrica no circuito.

O diodo proposto para ser usado no experimento (1N4007) suporta, segundo a folha de dados fornecida pelo fabricante, uma corrente direta máxima de 1,0 A. Vamos limitar a corrente pelo diodo em um valor próximo a 0,3 A, por essa razão a resistência de limitação de corrente, R , é de $100\ \Omega$. Ainda, segundo o fabricante, a tensão reversa máxima do 1N4007 é 1.000 V. Portanto, pelas tensões usadas no experimento, a operação do diodo não estará próxima da ocorrência do efeito de avalanche.

Sugere-se definir um conjunto de valores de tensão que serão fornecidos pela fonte de alimentação e organizar uma tabela com os valores de tensão e corrente no diodo para posterior análise dos resultados. Convém observar que, sob polarização direta, a tensão nos terminais do diodo não irá ultrapassar o valor da barreira de potencial, estimado em 0,7 V. Portanto, durante o experimento o operador deverá estar atento ao maior valor a ser obtido para essa grandeza. Além disso, no entorno da região de passagem dos estados de não condução para de condução, recomenda-se que as variações de tensão nos terminais do diodo sejam pequenas (se possível,

da ordem de centésimos de Volt) para que se possa apreciar adequadamente as variações da resistência de corpo do diodo.

Os valores obtidos permitirão que se faça um ajuste da curva experimental com o modelo da equação 1.1 usando técnicas computacionais disponíveis em aplicativos como Matlab (Mathworks), Mathematica (Wolfram) e Origin (Electronic Arts). Assim, conhecendo-se a temperatura de operação do diodo pode-se determinar os valores de I_0 e n .

O experimento pode ser replicado em outras temperaturas com o intuito de avaliar a sensibilidade da corrente no diodo em função da temperatura. Nesse caso, sugere-se repetir o procedimento do experimento com o referido diodo no interior de um forno com temperatura controlada.

1.4 DISCUSSÃO

Apesar de o experimento ser muito simples, tanto em execução como em interpretação de resultados, alguns cuidados experimentais devem ser tomados. A resistência interna do diodo semicondutor apresenta valores muito elevados sob polarização reversa. Nessa condição, a escolha do voltímetro (multímetro), no tocante a sua resistência interna, deve ser avaliada cuidadosamente. Uma avaliação da resistência interna do instrumento de medida deve ser feita previamente para evitar que ocorra ampliação do erro nas medidas causado pela divisão de corrente quando da conexão dele ao circuito de teste.

Sob condução, a curva da corrente em função da tensão no diodo apresenta uma certa inclinação, com a qual se pode avaliar a resistência interna do diodo. Essa resistência estará em função da tensão aplicada, ou seja, $r_B(v_D)$.

Sugere-se também discutir as aproximações feitas nos modelos equivalentes da Figura 1.1. Nesse caso, é importante que as variações das tensões entre os terminais do diodo, na região de polarização direta, sejam de décimos de Volts.

CAPÍTULO 2

Circuitos limitadores

ESTUDO PRELIMINAR

Para estudar os circuitos limitadores é importante conhecer os modelos elétricos usados para representar aproximadamente o comportamento de um diodo semicondutor.

2.1 INTRODUÇÃO

Os diodos semicondutores atuam idealmente como chaves, desempenhando seus estados ligado e desligado vinculados às polarizações direta e reversa do dispositivo, respectivamente. Essa propriedade viabiliza o uso de diodos semicondutores em circuitos de limitação de tensão, os quais possuem aplicações em proteção elétrica.

O princípio geral de um circuito limitador é sua operação se desenvolver a partir de uma pré-polarização usada como referência. Essa pré-polarização mantém, inicialmente, o diodo na condição de operação como chave aberta. Quando um sinal externo é aplicado ao circuito limitador e alcança um potencial elétrico suficiente para fazer o diodo conduzir, o diodo altera seu estado para chave fechada e evita que a tensão elétrica aumente em um dispositivo de carga.

O objetivo desse experimento é estudar a alteração dos estados de condução (próximo a uma chave liga e desliga) dos diodos para mostrar que a tensão pode ser limitada em um resistor de carga.

2.2 TEORIA

Dos três modelos elétricos para os diodos semicondutores que elencamos no Capítulo 1, vamos tratar aqui da aproximação pelo modelo chave-fonte, mostrado na Figura 2.1. Ressalta-se a conveniência desse modelo pelos níveis de tensão que serão utilizados e pelo resultado a ser alcançado, o qual dispensa o nível de corrente a circular pelos diodos.

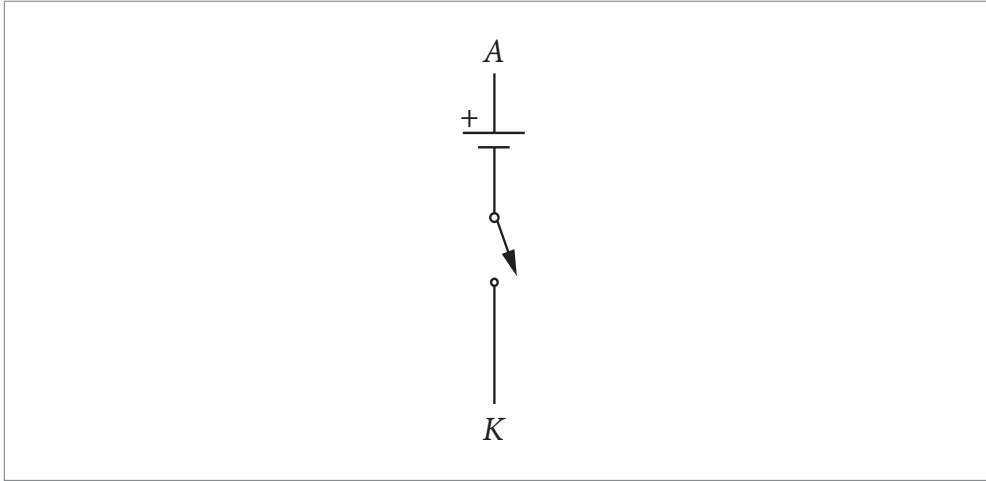


Figura 2.1 Circuito elétrico equivalente chave-fonte do diodo semicondutor.

O circuito da Figura 2.2 mostra o diagrama esquemático de um circuito limitador de tensão. Uma fonte de sinal alternado, com amplitude V , fornece uma tensão elétrica senoidal para a carga R_L . O cátodo de D_1 está com um potencial elétrico V_1 e o ânodo de D_2 com potencial elétrico $-V_2$. Enquanto os diodos D_1 e D_2 estão em polarização reversa, os ramos que contêm esses componentes estão abertos.

Partindo-se de 0 V e aumentando a tensão da fonte V pelo semiciclo positivo, no ânodo de D_1 e no cátodo de D_2 os potenciais elétricos, que são iguais, tornam-se crescentemente positivos. À medida que o potencial fornecido pela fonte V aumenta, D_1 poderá ficar diretamente polarizado e alterar seu estado para chave fechada. Ao mesmo tempo, a situação do ramo que contém D_2 não se altera, mantendo-se aberto. Nesse caso, a diferença de potencial em R_L passa a ser $V_1 + 0,7$ V. Por outro lado, no semiciclo negativo, por razões similares ao já explicado, os papéis se invertem com D_1 conservando-se aberto, D_2 conduzindo e a amplitude da tensão em R_L sendo $-(V_2 + 0,7)$ V.

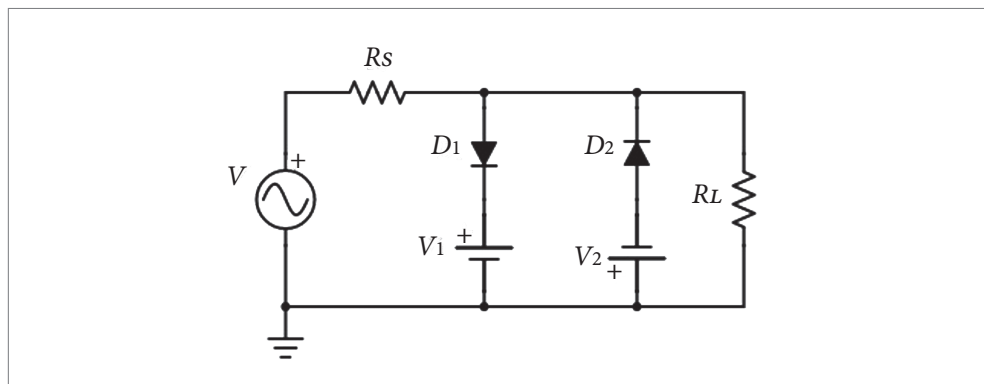


Figura 2.2 Diagrama esquemático do circuito limitador.

2.3 EXPERIMENTOS PROPOSTOS

O experimento consiste em estudar o circuito da Figura 2.2 de modo a verificar as limitações de amplitude da tensão em um resistor de carga (R_L) promovidas pelas alterações na polarização de diodos semicondutores. Nesse circuito, o ramo 1 é constituído por D_1 e V_1 e o ramo 2 por D_2 e V_2 .

Os materiais usados nesse experimento são:

- 1 gerador de funções;
- 1 osciloscópio;
- 2 diodos semicondutores 1N4007;
- 1 resistor de $10\text{ k}\Omega \times \frac{1}{4}\text{ W}$ (R_s);
- 1 resistor de $100\text{ k}\Omega \times \frac{1}{4}\text{ W}$ (R_L);
- 3 pilhas de 1,5 V (duas para V_1 e uma para V_2).

As fontes V_1 e V_2 estabelecem a pré-polarização dos diodos D_1 e D_2 , respectivamente. O potencial de V_1 será obtido pela associação de duas pilhas de 1,5 V, totalizando 3,0 V. A terceira pilha irá prover a pré-polarização de -1,5 V ao ânodo de D_2 .

Construa o circuito mostrado na Figura 2.2, mas deixe interrompidos os ramos 1 e 2. Ajuste o gerador de funções para fornecer uma tensão de saída senoidal com amplitude de 5 V com uma frequência de 1 kHz. Com auxílio do osciloscópio observe a forma de onda da tensão no resistor de carga R_L e anote as tensões de pico positiva e negativa.

Repita o procedimento descrito no parágrafo anterior para os seguintes casos: (a) ramo 1 conectado e ramo 2 interrompido; (b) ramo 1 interrompido e ramo 2 conectado; (c) ramos 1 e 2 conectados.

2.4 DISCUSSÃO

Discuta a viabilidade do uso do modelo de circuito equivalente proposto neste capítulo. Os valores que definem a limitação da tensão na resistência de carga devem ser próximos ao previsto na teoria. Discuta também como a razão R_s/R_L pode influir na tensão de saída do circuito.

Proponha uma discussão para usar circuitos limitadores usando-se diodos Zener (ver Capítulo 5) e considerando o modelo elétrico desse tipo de dispositivo. Discuta possíveis alternativas para a criação de circuitos de limitação em que seja possível descartar o uso de pilhas.

CAPÍTULO 3

Circuitos grampeadores, detectores de pico e dobradores de tensão

ESTUDO PRELIMINAR

Para estudar os circuitos grampeadores, os detectores de pico e os dobradores de tensão são necessários conhecimentos prévios sobre os diodos semicondutores, especificamente os modelos, e a teoria de circuitos de carga e descarga de capacitores.

3.1 INTRODUÇÃO

A associação adequada de malhas elétricas que envolvam diodos semicondutores e capacitores cria possibilidades de se carregar os capacitores, de modo a estabelecer, entre os seus terminais, tensões contínuas. Essa diferença de potenciais é denominada nível de tensão DC. Há dois circuitos que podem ser usados para ilustrar essas aplicações: circuito grampeador e circuito detector de pico.

Nos circuitos grampeadores, inicialmente, uma fonte de tensão alternada carrega um capacitor com a sua tensão máxima, a qual, em sequência, pode sofrer variações de acordo com a excursão da tensão nos terminais da fonte. Assim, estabelece-se uma variação de tensão sobre um nível DC. Por outro lado, nos detectores de pico, um capacitor é carregado por uma fonte de tensão variável, também no seu valor máximo, e conserva entre seus terminais essa diferença de potenciais.

A união de circuitos grampeadores com detectores de pico pode produzir circuitos dobradores de tensão. Há dois tipos de circuitos dobradores de tensão: o de meia-onda e o de onda completa. O circuito de meia-onda consiste na associação de um grampeador com um detector de pico. O circuito de onda completa é formado por dois detectores de pico. Os dobradores de tensão são utilizados em circuitos de conversores CC/CC que elevam as tensões.

O objetivo de estudo desses circuitos é mostrar os efeitos da associação entre diodos semicondutores, capacitores e resistores no que toca às possibilidades de elevar tensões ou de estabelecer níveis de tensões contínuas. Para alcançar esse objetivo iremos apresentar circuitos em que as etapas de grampeamento e detecção de pico se aliam para produzir os multiplicadores de tensão.

3.2 TEORIA

A teoria necessária para estudar os circuitos grampeadores e dobradores de tensão está dividida em duas partes neste capítulo. Na subseção 3.2.1 apresentamos o conceito de grampeamento de tensão e de detecção de pico. Em 3.2.2 usamos os conceitos dos circuitos apresentados preliminarmente para sugerir circuitos multiplicadores de tensão.

3.2.1 Circuitos grampeadores de tensão

Na Figura 3.1 ilustramos o diagrama esquemático de um circuito grampeador alimentado com uma fonte de tensão senoidal alternada com amplitude V . Note que nessa figura há indicações das polarizações dos terminais da fonte obtidas nos semiciclos negativo (Figura 3.1a) e positivo (Figura 3.1b). No semiciclo negativo, o diodo conduz e o capacitor é carregado com a polaridade indicada no desenho e com a tensão máxima fornecida pela fonte senoidal (descontada a queda de tensão no diodo). No semiciclo positivo, que ocorre na sequência, o diodo não conduz e a tensão sobre esse componente é formada pela soma das tensões da fonte V e do carregamento do capacitor. Em suma, o circuito grampeador adiciona um nível de tensão contínua a um sinal alternado.

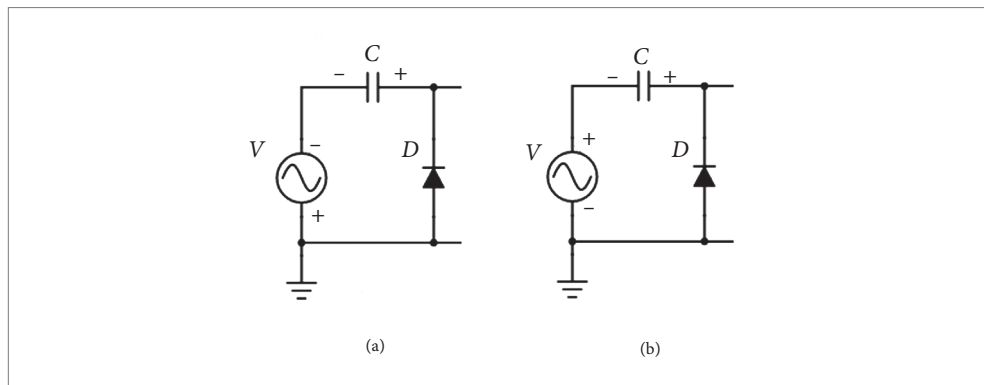


Figura 3.1 Diagrama esquemático do grameador (a) com a indicação das polarizações durante o carregamento do capacitor no semiciclo negativo (diodo em polarização direta); (b) com a indicação das polarizações durante o semiciclo positivo (diodo em polarização reversa).

O diagrama esquemático de um circuito básico de um grameador de tensão é apresentado na Figura 3.2.

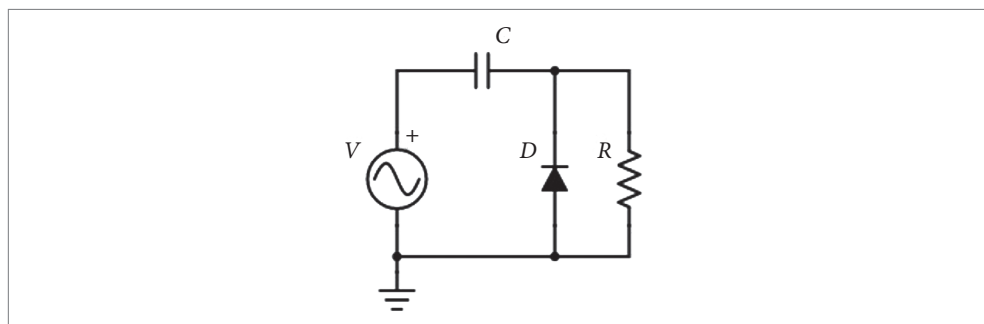


Figura 3.2 Diagrama esquemático de um circuito grameador.

Consideremos que a constante de tempo estabelecida pela capacitância C e pela resistência R dos componentes do circuito seja elevada e a fonte de sinal V forneça uma tensão senoidal. No primeiro semiciclo negativo, o diodo é polarizado diretamente e a corrente flui no sentido anti-horário, carregando o capacitor com seu valor máximo (amplitude de V), como foi explicado na Figura 3.1a. Como consequência da elevada constante de tempo dos componentes, a descarga do capacitor através do resistor pode ser considerada desprezível. No semiciclo positivo a diferença potencial da fonte de alimentação se soma com a tensão devida ao carregamento prévio do capacitor. Com isso, a partir do carregamento do capacitor a tensão no resistor R irá acompanhar a variação senoidal da fonte de tensão alternada V , mas sobre o patamar de um nível contínuo de tensão. Dessa forma, a tensão no resistor pode variar, aproximadamente, entre 0 e $2V$.

O diagrama esquemático do circuito detector de pico é mostrado na Figura 3.3. Também é utilizada uma fonte de tensão senoidal alternada. É fácil verificar que no semiciclo positivo o diodo conduz e carrega o capacitor com o valor de pico da tensão da fonte V (evidentemente, descontando-se a tensão na junção PN). No semiciclo seguinte, com o diodo em polarização reversa, a tensão no capacitor é mantida no nível de carregamento, uma vez que a propriedade resistiva do dielétrico do capacitor apresenta valores muito elevados, o que torna seu descarregamento desprezível. Esse circuito é útil na detecção de tensões de pico, mas também é utilizado como retificador de meia-onda, como será visto no Capítulo 4.

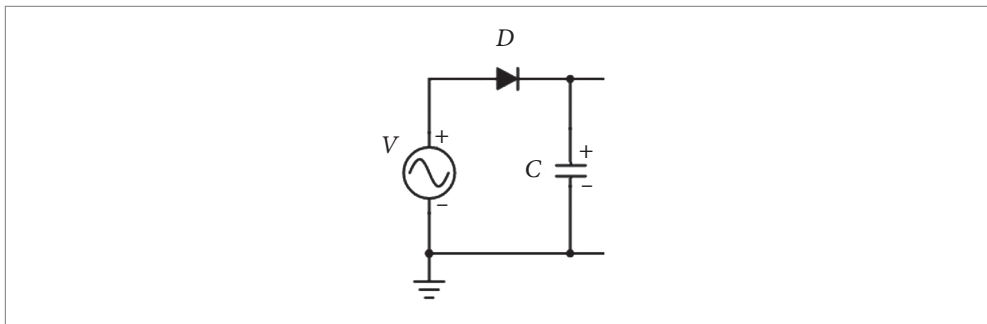


Figura 3.3 Diagrama esquemático do circuito detector de pico com a indicação da polarização no processo de carregamento do capacitor durante o semiciclo positivo.

3.2.2 Dobradores de tensão

Os circuitos dobradores de tensão fornecem tensões contínuas com o dobro da amplitude da tensão de uma fonte alternada. Esses circuitos podem ser divididos em dois grupos: os de meia-onda e os de onda completa. Os diagramas esquemáticos de um dobrador de tensão de meia-onda e de um dobrador de onda completa são mostrados nas Figura 3.4 e 3.5, respectivamente.

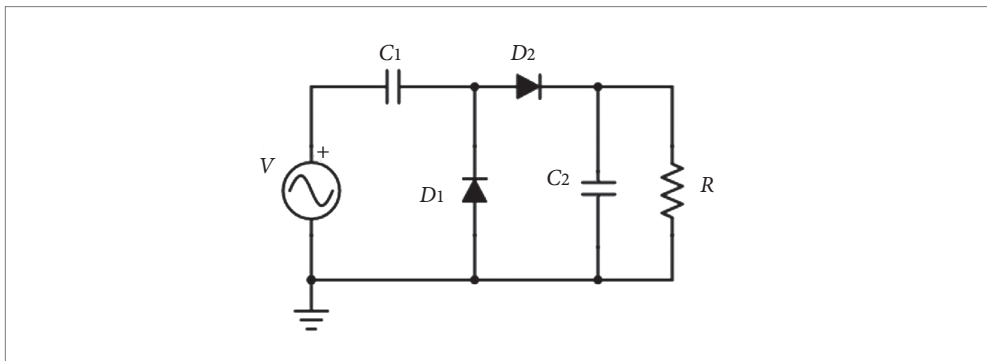


Figura 3.4 Diagrama esquemático de um circuito dobrador de tensão de meia-onda.

No circuito da Figura 3.4, C_1 e D_1 formam um circuito grampeador igual ao descrito na seção 3.2.1. A fonte V fornece uma tensão senoidal com amplitude V . Em condições ideais, após o carregamento de C_1 , o potencial elétrico no cátodo de D_1 irá variar entre 0 e $2V$. O conjunto formado por D_2 e C_2 funciona como um detector de pico. Com isso, o capacitor C_2 se carrega com o valor máximo da tensão em D_1 , ou seja, $2V$. Desse modo, a tensão de saída para o caso de um valor elevado de R é praticamente uma tensão contínua com o dobro da amplitude de V .

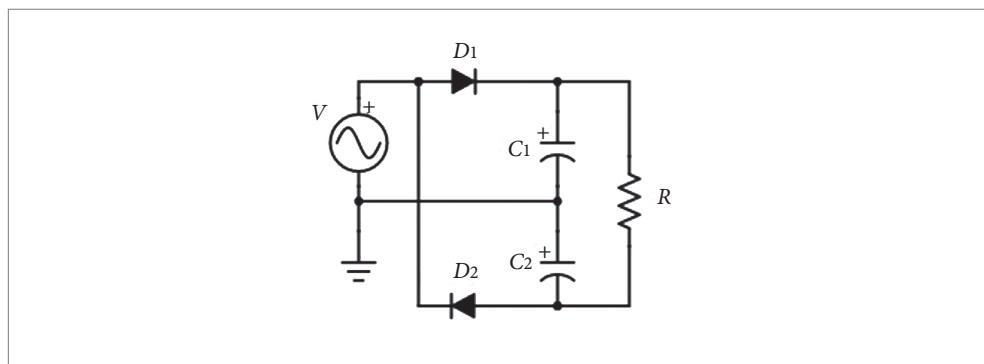


Figura 3.5 Diagrama esquemático de um circuito dobrador de tensão de onda completa.

O circuito dobrador de tensão de onda completa mostrado na Figura 3.5 é, basicamente, formado por dois detectores de pico. A fonte V fornece uma tensão senoidal de amplitude V . No semiciclo positivo, o capacitor C_1 é carregado no valor máximo de V , descontada a queda em D_1 . Note que durante o semiciclo positivo D_1 é polarizado diretamente, enquanto D_2 está em polarização reversa, impedindo que C_2 se carregue. No semiciclo negativo, as polarizações dos diodos se invertem, ou seja, D_1 é cortado e D_2 conduz. Com a condução de D_2 , o capacitor C_2 também se carrega no valor máximo da tensão da fonte. A Figura 3.5 mostra que os sinais das tensões de carregamento dos capacitores apontam para uma configuração de soma das tensões entre os terminais do resistor R . Portanto, a tensão de saída deverá ser próxima do dobro da amplitude da fonte de tensão alternada. Evidentemente, a constante de tempo estabelecida pelos capacitores e pelo resistor deverá ser elevada o suficiente para evitar que haja descarregamento significativo durante os semiciclos.

3.3 EXPERIMENTOS PROPOSTOS

Nesta seção apresentamos os circuitos sugeridos para estudar inicialmente os circuitos grampeadores (subseção 4.3.1) e, em seguida, os circuitos dobradores de tensão (subseção 4.3.2). A abordagem ao circuito detector de pico será explorada no Capítulo 4, ao estudar a filtragem nas fontes de alimentação.

3.3.1 Circuito grampeador

O experimento consiste na construção de um circuito grampeador e na avaliação da tensão de saída influenciada pela carga resistiva a ser conectada. Deve-se montar o circuito da Figura 3.2 usando-se os seguintes instrumentos e componentes:

- 1 gerador de funções;
- 1 osciloscópio;
- 1 diodo semicondutor 1N4007;
- 1 capacitor de 100 nF;
- 1 resistor de $100\text{ k}\Omega \times \frac{1}{4}\text{ W}$;
- 1 resistor de $1\text{ k}\Omega \times \frac{1}{4}\text{ W}$.

Ajuste o gerador de funções para fornecer uma tensão senoidal de 4,0 V de amplitude e frequência de 1 kHz. Inicialmente use $R = 100\text{ k}\Omega$. Observe a forma de onda da saída por meio do osciloscópio, anote as tensões mínima e máxima. Meça também a tensão média de saída usando um voltímetro CC. Substitua o resistor R por outro com resistência de $1\text{ k}\Omega \times \frac{1}{4}\text{ W}$ e repita as medições descritas.

3.3.2 Dobrador de tensão

O experimento com o circuito dobrador de tensão envolve a montagem dos circuitos com as duas configurações apresentadas nas Figuras 3.4 e 3.5. Os materiais usados nesse experimento são:

- 1 gerador de funções;
- 1 osciloscópio;
- 1 multímetro;
- 1 diodo semicondutor 1N4007;
- 1 capacitor de 100 nF;
- 1 resistor de $100\text{ k}\Omega \times \frac{1}{4}\text{ W}$;
- 1 resistor de $1\text{ k}\Omega \times \frac{1}{4}\text{ W}$.

Para o circuito da Figura 3.4, com auxílio do gerador de funções, aplique uma tensão alternada com amplitude de 4,0 V e frequência de 1 kHz. Inicialmente, com o resistor de carga desconectado, meça a tensão de saída do circuito com o osciloscópio e com o multímetro na configuração um voltímetro CC. Em seguida, meça as mesmas tensões com os resistores de carga de $100\text{ k}\Omega$ e de $1\text{ k}\Omega$. Avalie as flutuações da tensão no resistor de carga usando o osciloscópio no modo AC.

Repita o experimento com o circuito da Figura 3.5, exceto os procedimentos que envolvam o osciloscópio em medições diretas no resistor de carga. A tensão de saída deve ser aferida com o voltímetro do amperímetro.

3.4 DISCUSSÃO

No circuito grampeador avalie possíveis variações na forma de onda e do valor médio da tensão de saída quando se modifica o valor da resistência de carga. Outro ponto a observar na forma de onda é sobre a possibilidade de haver troca da polaridade do nível DC do sinal de saída (tensões negativas). Para isso, deve-se inverter a polaridade do diodo. Explique como será o funcionamento do circuito para esse caso.

Pode-se modificar a polarização do diodo com auxílio de uma fonte de tensão ligada em série. Na prática essa fonte pode ser uma pilha comum. Essa inserção faz que o nível DC do sinal de saída seja modificado. Sugira e discuta circuitos que permitam fazer esse ajuste.

A discussão sobre os circuitos dobradores de tensão deve passar preliminarmente pela diferenciação das configurações utilizadas. Compare os resultados a partir das resistências de carga, as quais devem afetar o nível de flutuação e o valor médio das tensões de saída. Discuta possíveis configurações para aumentar o fator multiplicativo da tensão de saída, como no caso de circuitos triplicadores e quadriplicadores de tensão.

Os anos de vivência em ensino e pesquisa me mostraram que o trabalho no laboratório e o desenvolvimento de pequenos projetos em eletrônica agregam muita maturidade e experiência na formação dos engenheiros. O contato com componentes eletrônicos, a operação de instrumentos de laboratório e a própria natureza realizadora dessas atividades, contribuem em muito para a motivação do estudante em seus anos na graduação.

Diante disso, propus a composição de um livro de práticas de eletrônica analógica que contenha experimentos didáticos, mas, sobretudo, que estimule o leitor a desenvolver, autonomamente, outros experimentos e pequenos projetos, sempre direcionados por conceitos teóricos estudados previamente. Em cada capítulo do livro o leitor se deparará com um tema fundamental da eletrônica que o direcionará para situações de aplicação dos circuitos propostos.

O livro inclui os conteúdos usualmente presentes nos programas de eletrônica analógica dos cursos das engenharias. No entanto, ele pode ser facilmente adaptado para outros cursos de graduação correlatos e, até mesmo, para cursos de nível técnico, cabendo ao professor estabelecer o nível de aprofundamento do conteúdo.

Ademais, o livro também pode ser útil ao estudante autodidata ou já formado que queira ampliar e aprimorar suas habilidades de laboratório.



Blucher



Clique aqui e:

VEJA NA LOJA

Práticas de eletrônica analógica

Francisco José Arnold

ISBN: 9788521224426

Páginas: 328

Formato: 17 x 24 cm

Ano de Publicação: 2024
