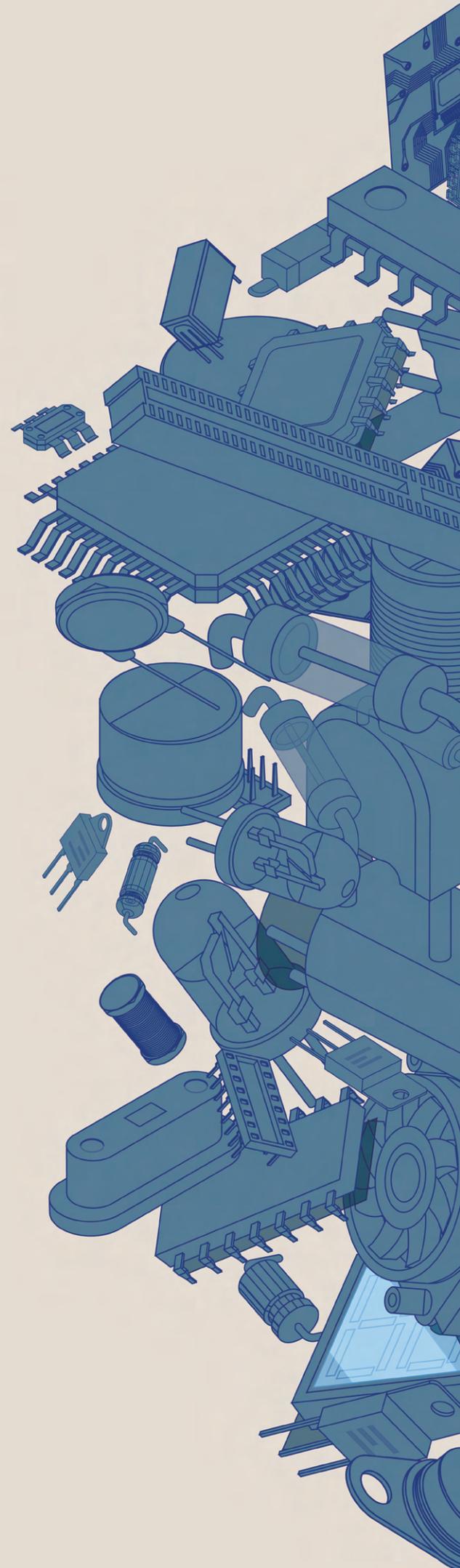


Coleção Série 18

Eletrônica Analógica

Arquimedes Paschoal
Meuse Nogueira de O. Júnior

Vol. 1



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Paschoal, Arquimedes José de Araújo
Eletrônica analógica [livro eletrônico] /
Arquimedes José de Araújo Paschoal, Meuse Nogueira de
Oliveira Júnior. -- Recife, PE : Instituto
Internacional Despertando Vocações, 2023.
-- (Coleção série 18 ; v. 1)
PDF

ISBN 978-65-88970-37-9

DOI <https://doi.org/10.31692/978-65-88970-37-9>

1. Circuitos elétricos 2. Eletrônica - Estudo e
ensino I. Oliveira Júnior, Meuse Nogueira de.
II. Título. III. Série.

23-182535

CDD-621.381507

Índices para catálogo sistemático:

1. Eletrônica analógica : Estudo e ensino 621.381507

Eliane de Freitas Leite - Bibliotecária - CRB 8/8415

Eletrônica Analógica

Instituto Federal de Pernambuco - Projeto Série 18

Autoria

Arquimedes José de Araújo Paschoal
Meuse Nogueira de Oliveira Júnior

Revisão

Erick Viana da Silva

Diagramação

João Henrique Costa Lima
Mariana Almeida Ferreira Lima

©2023 Editora Instituto Internacional Despertando Vocações

ISBN

978-65-88970-37-9

DOI

<https://doi.org/10.31692/978-65-88970-37-9>

Direitos reservados aos autores

Editora Internacional Despertando Vocações
Espaço de Inovação IIDV - Av. Professor Luiz Freire 600,
1º andar da ASSIF, CEP 50740-545
Site: editora.institutoidv.org
E-mail: editoraiidv@institutoidv.org

Todos os direitos reservados.
Nenhuma parte desta publicação
poderá ser armazenada ou reproduzida
por qualquer meio sem a autorização
por escrito da Editora.

Esta obra foi publicada com recursos próprios

Súmario

Capítulo 1	7
1.1. Conceitos Básicos	7
1.2. Componentes Utilizados nos Circuitos Eletrônicos	8
1.2.1. Circuitos Integrados – CI	10
1.2.2. Resistores	11
1.2.3. Aparência Real dos Resistores	12
1.2.4. Capacitores	16
1.2.5. Chaves Mecânicas	21
1.2.6. Fusíveis	22
1.2.7. Varistores	22
exercícios de Revisão	25
Capítulo 2	26
2.1. As primeiras observações	26
2.2. As invenções que determinariam o surgimento dos dispositivos semicondutores	27
2.2.1. O Diodo Semicondutor	28
2.2.2. O Transistor de Efeito de Campo	29
2.2.3. O Transistor Bipolar	29
2.2.4. O Circuito Integrado	29
Exercícios de Revisão	32
Capítulo 3	33
3.1. Introdução	33
3.2. Dopagem de Semicondutores	34
3.3. Compostos Semicondutores	36
Capítulo 4	39
4.1. Diodo Semicondutor	39
4.1.1. Polarização Direta	40
4.1.2. Polarização Reversa	41
4.1.3. Resistências do Diodo	42
4.1.4. Modelo para o diodo real	42
4.1.5. Análise DC	42
4.2. Folha de Especificações de Diodos	43
Exercícios de Revisão	45
Capítulo 5	46
5.1. Conceitos Básicos	46
5.2. Fenômenos Capacitivos	46
Exercícios de Revisão	50
Capítulo 6	51
6.1. Introdução	51
6.2. Diodos Emissores de Luz	52
6.3. Diodos Zéner	53
Exercícios de Revisão	59
Capítulo 7	60
7.1. Introdução	60
7.1.1. Teste de Diodos Retificadores	61
7.1.2. Teste de Diodos Zéner	62
7.1.3. Teste de Diodos Emissores de Luz	62
7.1.4. Teste de Diodos Bicolores e RGB	63

7.2 Exercícios de Revisão	64
Capítulo 8	65
8.1 Introdução	65
8.2 Retificador de Meia Onda	65
8.3 Retificador em Onda Completa	67
Exercícios de Revisão	70
Capítulo 9	71
9.1 Introdução	71
9.2 Capacitores X e Y	72
9.3 Exercícios de Revisão	74
Capítulo 10	75
10.1 Reguladores de Tensão de 3 Terminais	75
Exercícios de Revisão	80
Capítulo 11	81
11.1 Introdução	81
Exercícios de Revisão	85
Capítulo 12	86
12.1 Introdução	86
12.2 Ceifador Série	86
12.3 Ceifador Paralelo	88
Exercícios de Revisão	90
Capítulo 13	91
13.1 Introdução	91
13.2 Exercícios de Revisão	93
Capítulo 14	94
14.1 Introdução	94
14.2 Elementos Parasitas	95
14.3 Capacitâncias no Diodo Semicondutor	95
14.4 Modelo para Pequenos Sinais e Alta Frequência	97
14.5 Exercícios de Revisão	98
Capítulo 15	99
15.1 Introdução	99
Exercícios de Revisão	101
Capítulo 16	102
16.1 Introdução	102
Exercícios de Revisão	105
Capítulo 17	106
17.2 Diodo Schottky	106
17.3 Diodo Tunel	106
17.4 Diodo PIN	108
17.5 Diodo GUNN	109
17.6 Diodo Varicap	110
17.7 Exercícios de Revisão	111
Capítulo 18	112
18.1 Introdução	112
18.2 Luz	112
18.3 Fotodiodo	113
18.4 Diodo Laser	114
Exercícios de Revisão	116

Agradecimentos

Muitas pessoas contribuíram para a realização desta obra. Sem dúvida alguma o Prof. Dr. Meuse Nogueira de Oliveira Jr foi a pessoa que tornou a publicação possível, acompanhando de perto cada detalhe, com sugestões valiosas. Agradeço também ao Eng. Luiz Antônio Pereira dos Santos pela revisão e sugestões feitas especialmente no Capítulo 18.

Naturalmente, sou grato à minha esposa Gisélia Maria da Rocha Paschoal e à minha filha Rebeca Maria da Rocha Paschoal que fazem parte de minha vida. Nem sempre concordando, mas sempre ao meu lado.

Agradeço também aos meus pais, Paulo Aristarcho de Melo Paschoal (in memoriam) e Maria Ester Correa de Araújo Paschoal - minha melhor referência de pessoa boa e honesta.

Jamais poderia deixar de citar meus alunos do Instituto Federal de Pernambuco/Campus Recife e Campus Caruaru que tiveram acesso a obra em suas versões iniciais e contribuíram com sugestões de tópicos e problemas. Gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Érick Viana da Silva, presidente em exercício do Instituto Internacional Despertando Vocações que publicou esta obra através da Editora IIDV. Não poderia deixar de citar aqui meu grande amigo Prof. Dr. Alexander Chaves de Senna, do Campus Caruaru - imensa admiração por este irmão!

Dedico também este livro aos meus alunos de hoje, de ontem e de amanhã. Dedico aos que suportaram as dores existenciais e aqueles que infelizmente desistiram da vida. Cada vez mais compreendo a importância do diálogo. Às vezes pego-me perguntando: "Parecia tão bem... Deveria ter conversado mais com ele! Talvez identificasse melhor seus conflitos e pudesse falar não da dor da vida, mas da alegria ao término de cada etapa vencida!". Sem citar o nome, apenas digo: "Até breve meu amigo, até breve!"

Finalmente, gostaria de agradecer a Patrícia (não sei nem quem é este anjo) que me deu o melhor conselho que já recebi: Arquimedes: Ame, Perdoe e Tolere.

O segundo autor gostaria de agradecer ao Prof Arquimedes Paschoal pela participação valorosa na construção da Coleção Série 18, bem como pelo convite de parceria na concepção desta obra. O segundo autor agradece também a sua esposa Yale, companheira e fonte de inspiração em tudo que ele faz.

Sobre o autor

Prof. Arquimedes José de Araújo Paschoal, possui graduação, mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco. É autor de diversos artigos na área de **Processamento Digital de Sinais** e co-autor de dois Capítulos do livro **Educação Matemática e suas Tecnologias (Editora Atena)**. O Professor Arquimedes Paschoal é autor dos livros: **Série 18 - Eletrônica Analógica** (em três volumes), **Dispositivos Programáveis, Análise DC de Circuitos Elétricos, Manutenção Eletroeletrônica e Instrumentação Industrial**.

É professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE). Durante 10 anos foi lotado no campus Caruaru, onde lecionou as disciplinas: Linguagens de Programação, Eletrônica Analógica 1, Eletrônica Analógica 2, Eletrônica de Potência, Sistemas Embarcados, Instrumentação Eletrônica, Análise de Circuitos 1, Robótica, Manutenção Eletrônica e Eletrônica Industrial. Atualmente está lotado no campus Recife, onde lecionou as disciplinas: Eletrônica Básica 1, 2 e 3, Microprocessadores, Microcontroladores, Prototipagem de Sistemas Eletro-Eletrônicos e Dispositivos Programáveis. Possui larga experiência no desenvolvimento de Sistemas Embarcados, tendo trabalhado na equipe de desenvolvimento da Fluxx Metrologia onde desenvolveu soluções para metrologia envolvendo **Segurança Intrínseca**. Foi Engenheiro de Processos da Philips Components e sócio-proprietário da Ideia Engenharia, empresa voltada para a manutenção de sistemas computacionais. Participou do “Third Course on VLSI Design Techniques” no International Centre for Theoretical Physics, em Trieste-Itália. No IFPE/Caruaru participou dos projetos: Aerador Solar, Casa Inteligente, Fórmula SAE.

É associado do **Instituto Internacional Despertando Vocações Tecnológicas**, onde coordena o Projeto Zéphyrus que visa o desenvolvimento de Drones por estudantes de Engenharia e de cursos técnicos em Eletrônica. Participou do Programa de Extensão Tecnológica (PET) da FACEPE com os projetos: Operação SMD (2021.2) e Manutenção Preditiva para Indústria 4.0 - Fontes Chaveadas (2022.1), tendo recebido **Certificado de Destaque** em ambos os trabalhos. Atualmente, participa do Laboratório de Sistemas Embutidos (Dexter) juntamente com o Professor Meuse Nogueira Júnior, mentor do **Projeto Série 18**.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO À ELETRÔNICA

“Comece pelo começo, disse o rei com muita gravidade, e prossiga até o final. Então, páre.”

Lewis Carol (Alice no país das maravilhas)

1.1 Conceitos básicos

1.2 Componentes utilizados nos circuitos eletrônicos

1.2.1 Circuitos integrados

1.2.2 Resistores

1.2.3 Capacitores

1.2.4 Indutores

1.2.5 Chaves Mecânicas

1.2.6 Fusíveis

1.2.7 Varistores

1.3 Exercícios de revisão

Ao final deste capítulo, o leitor deverá ter boas noções sobre:

- 1. Sinais analógicos e sinais digitais**
- 2. Divisão da Eletrônica conforme suas aplicações**
- 3. Componentes comuns nos Circuitos Eletrônicos**

1.1. CONCEITOS BÁSICOS

Sem dúvida alguma vivemos hoje em um mundo digital, todavia a eletrônica que iniciou esta revolução foi a eletrônica dos sinais analógicos. Mas, afinal o que é um sinal analógico? Onde o encontramos?

Dizemos que um sinal é analógico quando o mesmo pode assumir infinitos valores, mesmo dentro de uma faixa limitada, tal como o intervalo contínuo de zero a quinze volts. Se observarmos direito, veremos que a própria Natureza nos oferece sinais puramente analógicos. Por exemplo, a temperatura em um corpo não dá saltos, mas varia de forma contínua dentro de uma faixa.

Em geral, dizemos que a Natureza possui um comportamento analógico uma vez que qualquer que seja a grandeza que estejamos interessados em medir, as suas variações levam um tempo finito para ocorrerem. Neste sentido, os sinais digitais, conforme veremos mais adiante, são abstrações (aproximações) matemáticas. Mesmo com esta aproximação, os sinais digitais estudados em Eletrônica digital não perdem sua importância. De forma alguma!

É graças aos desenvolvimentos da Eletrônica Digital que hoje temos o computador digital e todo um conjunto enorme de outros equipamentos intrinsecamente digitais.

Na Fig. (1.1) a seguir ilustramos um sinal tipicamente analógico. Nesta figura a grandeza considerada é a temperatura registrada por um sensor ao longo do tempo, mas poderia ser a vazão de um fluido em um duto, a pressão, a luminosidade ou até mesmo representar um sinal biológico.

Por outro lado, o sinal digital, assume um número finito de valores. Por exemplo, se o sinal é binário, então, ele assume apenas dois valores possíveis. Costumamos dizer que a Eletrônica Digital é a eletrônica dos dispositivos chaveados de baixa potência, ou seja, ou o dispositivo está conduzindo o sinal (chave fechada) ou o dispositivo está cortado (chave aberta). Na Eletrônica Digital chamamos estes possíveis valores de níveis lógicos "0" e "1". Na verdade, o nível lógico "0", por exemplo, não significa que o sinal está com um nível de tensão de zero volt, mas que este sinal é tão baixo que com ele não é possível colocar a chave no estado fechado. Uma faixa possível de valores para o nível lógico zero é de 0V a 0,8V¹. Aqui, não importa se o nível é 0,25V ou 0,42V, por exemplo. Estes valores representam o nível lógico "0". Em verdade, sinais digitais são abstrações matemáticas. Não é possível um sinal saltar de um determinado nível de tensão para um outro em um tempo nulo. Todavia, este modelo tem nos permitido desenvolver equipamentos modernos que são empregados em todas as áreas do conhecimento. Considerando-se que o tempo para se sair de um nível lógico para outro está na casa do nanossegundos (ns - bilionésimos de segundos ou 10⁻⁹s), esta aproximação de tempo nulo não é tão ruim assim.

Normalmente, a eletrônica é dividida em Eletrônica Analógica e Eletrônica Digital. Todavia, podemos incluir um subtipo da eletrônica analógica quando as correntes e tensões possuem valores expressivos: É a Eletrônica de Potência ou Eletrônica Industrial. Em verdade, a própria Eletrônica Analógica deveria ser subdividida em Eletrônica de Baixa Frequência e Eletrônica de Alta Frequência, uma vez que o processamento analógico de sinais de alta frequência requer modelos matemáticos bem mais sofisticados do que aqueles usados na eletrônica de baixa frequência.

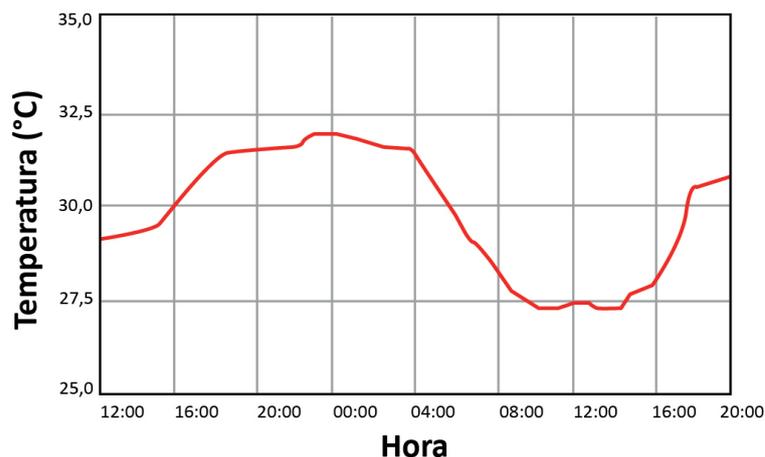


Figura 1.1- Sinal Analógico (clique para ver a animação)

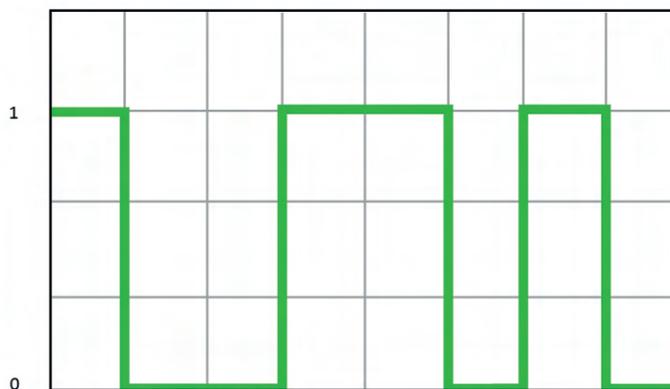
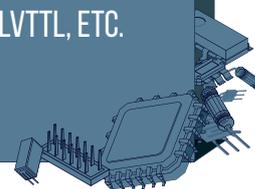


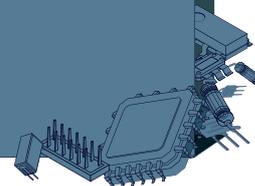
Figura 1.2- Sinal Digital (clique para ver a animação)

¹ ESTES VALORES DEPENDEM DA FAMÍLIA LÓGICA CONSIDERADA; POR EXEMPLO, CMOS-5V, TTL-5V, 3V3 LVTTTL, ETC.



A Eletrônica Digital nos legou o chamado computador digital que modificou a sociedade profundamente em todas as áreas do conhecimento humano. O desenvolvimento da Eletrônica Digital, de certo modo, contribuiu definitivamente para o surgimento da Ciência da Computação. Todavia, por uma questão de justiça, devemos lembrar aqui que Ciência da Computação não se limita a mera aplicação de Eletrônica Digital. Erradamente algumas pessoas se referem a Ciência da Computação como sendo uma área de aplicações da Engenharia Elétrica. Não é bem assim! A inteligência artificial, por exemplo, tem suas próprias bases.

MAIS INFORMAÇÕES PODEM
SER ENCONTRADAS NO
NOSSO LIVRO "ELETRÔNICA
DIGITAL" DA SÉRIE 18



Na Eletrônica de Potência os dispositivos usados são dispositivos que devem ser capazes de suportar altas correntes (kA, ou seja, milhares de Ampères) diretas e altas tensões (kV) reversas. Certamente, esta é a eletrônica mais importante para o curso de eletrônica industrial. É claro que tais dispositivos precisam de uma construção especial. Um diodo de potência, por exemplo, jamais poderia ser um dispositivo de apenas duas camadas (como ocorre com o diodo comum). Em verdade, trata-se de uma área do conhecimento humano multidisciplinar, uma vez que envolve as áreas de Potência, Eletrônica e Controle (ASHFAQ2008).

Infelizmente, alguns cursos de Eletrônica dão pouca ênfase, quando dão, à Eletrônica de Potência. Normalmente, o pessoal que opta por se especializar em Sistemas de Potência é quem estuda mais detalhadamente os tópicos vistos nesta disciplina. Como resultado, muitos profissionais recém-formados se atrapalham para resolver problemas simples que ocorrem com equipamentos industriais por desconhecerem os princípios de funcionamento dos mesmos.

Particularmente, acredito que todo aprendizado começa por um processo de repetição de algo que já foi feito antes; neste sentido, não se sintam mal ao implementar um circuito que outra pessoa criou; copie sem tomar para si a autoria, cite o autor, não esconda o conhecimento, dissemine-o. Depois, observe o comportamento do circuito à medida que você faz uso do mesmo. Durante o uso, observe os detalhes: veja se o circuito cumpre o que foi proposto, observe as limitações do mesmo, entenda seu funcionamento e, só depois quando estiver no sangue, naturalmente, você irá fazer seus próprios projetos. Um projeto bem feito, certamente, é o resultado de um conhecimento absorvido plenamente, fruto de muitas horas de estudo e de persistência.

1.2. COMPONENTES UTILIZADOS NOS CIRCUITOS ELETRÔNICOS

Um circuito eletrônico é composto por diversos componentes, tais como: circuitos integrados, diodos (led, retificador, zéner, etc.), transistores bipolares, transistores de efeito de campo, transistores de unijunção, tiristores, resistores, capacitores, indutores, dispositivos de proteção (Varistores, TVS - Supressores de Transientes, etc.), dentre outros. Além destes componentes, a imensa maioria dos circuitos eletrônicos inclui cabos de interconexão entre módulos que compõem o sistema (diversos tipos), conectores (existem milhares de tipos diferentes de conectores), caixas para conter o sistema desenvolvido, displays (LCD, TFT, 7 segmentos, OLED, etc.), teclados, etc.

É claro que para se analisar um circuito eletrônico corretamente será necessário ter feito antes um curso de **Análise de Circuitos**. Neste sentido, indico o meu livro, escrito em parceria com o Prof. Dr. Márcio Mello do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco - Campus Caruaru: "Análise DC de Circuitos Elétricos", publicado pela Editora IIDV e o livro da Série 18 - "Eletricidade Básica" escrito pela Profa Dra. Daphne de La Torre Barros e pelo Prof. Dr. Meuse Nogueira de Oliveira Filho. Apesar de admitirmos aqui que

o estudante já possui este conhecimento, faremos uma breve revisão dos tópicos de maior impacto na análise dos circuitos que pretendemos estudar. Antes desta revisão, permita-nos um breve passeio pelo universo dos componentes usados na Eletrônica. Recomendamos fortemente o conhecimento das obras de **Paul Horowitz, Boylestad, Malvino, David Hart, Antônio Pertence, Capuano, Ivo Barbi**, dentre outros tantos.

1.2.1. CIRCUITOS INTEGRADOS - CI

Certamente, os circuitos integrados são os componentes mais comuns em qualquer circuito eletrônico. Muito dificilmente, teremos algum circuito eletrônico que não possua pelo menos 1 circuito integrado. Estão presentes na forma de conversores de sinais Analógicos para Digitais, Conversores Digitais para Analógicos, Conversores DC-DC, Filtros, Reguladores de Tensão, Controladores PWM, Temporizadores, Amplificadores Operacionais, Drivers, Processadores de Sinais Digitais, Microprocessadores, Microcontroladores, PLLs, etc.

Muitos autores atribuem a criação do primeiro circuito integrado a **Jack St. Claire Kilby** (entrada de patente em 06 de fevereiro de 1959). Todavia, o engenheiro **Robert Noyce**, trabalhando de forma independente, também desenvolveu sua versão para o primeiro circuito integrado (entrada de patente em 30 de julho de 1959). O circuito integrado de Kilby apresentava uma série de problemas que não existiam no circuito integrado de Noyce. Ademais, apesar de ter dado entrada na sua patente 5 meses depois de Kilby, sua patente foi publicada em 25 de abril de 1961, enquanto que a patente de Kilby só saiu em 23 de junho de 1964. Além de Jack Kilby e Robert Noyce, existe uma terceira pessoa que teria criado o primeiro circuito integrado em 1959: Edward Keonjian (Engenheiro Armênio - Rússia). Deixo esta história e outras para serem discutidas em maior detalhe no próximo capítulo deste livro.

Os circuitos integrados correspondem a implementação de circuitos inteiros dentro de uma única pastilha de Silício. Atualmente, tais circuitos integrados podem conter até bilhões de transistores. No próximo capítulo veremos como a tecnologia dos circuitos integrados evoluiu ao longo dos anos.

Normalmente, classificamos os circuitos integrados de acordo com a densidade de integração; a saber:

- a) Small Scale Integration) - 1961/1964
- b) MSI (Medium Scale Integration) - 1967/1971
- c) LSI (Large Scale Integration) - 1972/1980
- d) VLSI (Very Large Scale Integration) - 1981/1990
- e) ULSI (Ultra Large Scale Integration) - 1990/2000
- f) GSI (Giga Scale Integration) - 2000 até os dias atuais

Os circuitos integrados são encapsulados de acordo com padrões internacionais. Existem centenas de padrões usados pela indústria, cada um identificado de forma única e com dimensões determinadas por normas. As imagens a seguir (fora de escala) ilustram alguns circuitos integrados com diferentes padrões de encapsulamento.



Algumas vantagens do circuito integrados incluem:

- g) Maior imunidade a ruídos
- h) Maior confiabilidade
- i) Dimensões físicas menores (menor peso, menor tamanho)
- j) Menor custo
- k) Maior velocidade

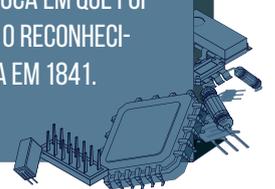


Figura 1.3 Alguns encapsulamentos usados em circuitos integrados (clique para ver as animações)

1.2.2. RESISTORES

Georg Simon Ohm (1789,1854) observou que determinados materiais apresentavam um comportamento interessante: A relação entre a tensão aplicada ao mesmo e a corrente elétrica que o atravessava permanecia constante. Ohm publicou os resultados de sua pesquisa em 1827². Ele notou especialmente que aqueles materiais que não eram bons condutores tinha uma relação bem maior do que aqueles outros materiais que sabidamente eram bons condutores de eletricidade. Assim, ele definiu esta relação como sendo uma medida da **resistência elétrica** do material. Ou seja,

² MEDIDAS MATEMÁTICAS DE CORRENTES ELÉTRICAS. INFELIZMENTE, O TRABALHO DE OHM NÃO OBTVEU O DEVIDO RECONHECIMENTO NA ÉPOCA EM QUE FOI APRESENTADO. O RECONHECIMENTO SÓ VIRIA EM 1841.



$$R = \frac{V}{I}$$

Em homenagem ao seu descobridor, a unidade de resistência elétrica foi denominada “Ohm” e representada pela letra grega Ômega (Ω). Note que a Lei de Ohm implica em uma relação linear entre tensão e corrente elétrica.

Posteriormente, percebeu-se que nem todos os materiais satisfazem a esta lei (batizada de Lei de Ohm). Assim, os materiais que satisfazem à Lei de Ohm chamamos de materiais ôhmicos, enquanto que os materiais que não satisfazem a esta lei, chamamos simplesmente de materiais não-ôhmicos.

1.2.3. APARÊNCIA REAL DOS RESISTORES

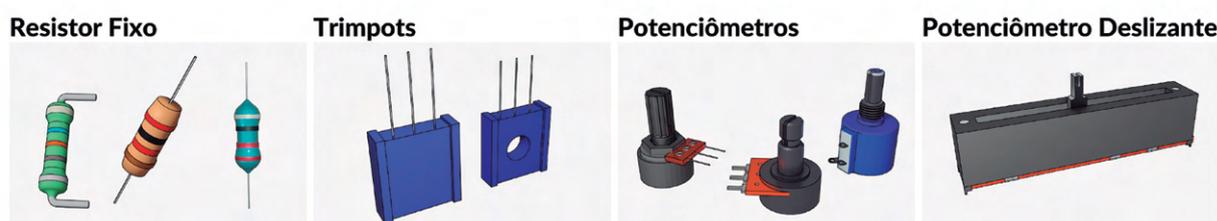


Figura 1.4 Resistor fixo, Trimpots, Potenciômetros e Potenciômetro com controle deslizante (clique para ver as animações)

Note, no resistor fixo ilustrado acima a presença de 4 faixas coloridas pintadas no corpo do resistor. Existem resistores com 3, 4, 5 e 6 faixas! O valor da resistência de um resistor, assim como sua tolerância, são codificados por meio destas faixas coloridas de acordo com uma série (E3, E6, E12, E24, E48, E96 e E192), conforme veremos mais adiante. No caso do resistor de 3 faixas (séries E3 e E6), a tolerância é >20% se ele for da série E3 e 20% se ele pertencer à série E6. A série E3 não é mais fabricada, apesar de ainda encontrarmos resistores desta série à venda. No caso do resistor de 6 faixas, a última faixa expressa a variação da resistência em PPM (abreviatura de **P**arte **P**or **M**ilhão) por grau Celsius.

O nome da Série Resistiva compreende o número de valores da mesma, por exemplo, a Série E3 possui 3 valores possíveis, a Série E6 possui 6 valores possíveis, a Série E12 possui 12 valores possíveis e assim por diante. A tolerância da Série E6 é de 20%, a Série E12 possui uma tolerância de 10%, a Série E24 possui uma tolerância de 5%, a Série E48 possui uma tolerância de 2%, a Série E96 possui uma tolerância de 1% e a Série E192 possui uma tolerância de 0.5%, 0.25%, 0.1% para a resistência de um resistor.

E3	E6	E12	E24	E3	E6	E12	E24	E3	E6	E12	E24
1,0	1,0	1,0	1,0	2,2	2,2	2,2	2,2	4,7	4,7	4,7	4,7
			1,1				2,4				5,1
		1,2	1,2			2,7	2,7			5,6	5,6
			1,3				3,0				6,2
	1,5	1,5	1,5		3,3	3,3	3,3		6,8	6,8	6,8
			1,6				3,6				7,5
		1,8	1,8			3,9	3,9			8,2	8,2

Figura 1.5: Séries Resistivas E3 a E24

E48	E96	E192															
1,00	1,00	1,00	1,47	1,47	1,47	2,15	2,15	2,15	3,16	3,16	3,16	4,64	4,64	4,64	6,81	6,81	6,81
		1,01			1,49			2,18			3,20			4,70			6,90
	1,02	1,02		1,50	1,50		2,21	2,21		3,24	3,24		4,75	4,75		6,98	6,98
		1,04			1,52			2,23			3,28		4,81	4,81		7,06	7,06
1,05	1,05	1,05	1,54	1,54	1,54	2,6	2,26	2,26	3,32	3,32	3,32	4,97	4,87	4,87	7,15	7,15	7,15
		1,06			1,56			2,29			3,36			4,93			7,23
	1,07	1,07		1,58	1,58		2,32	2,32		3,40	3,40		4,99	4,99		7,32	7,32
		1,09			1,60			2,34			3,44			5,05			7,41
1,10	1,10	1,10	1,62	1,62	1,62	2,37	2,37	2,37	3,48	3,48	3,48	5,11	5,11	5,11	7,50	7,50	7,50
		1,11			1,64			40			3,52			5,17			7,59
	1,13	1,13		1,65	1,65		2,43	2,43		3,57	3,57		5,23	5,23		7,68	7,68
		1,14			1,67			2,46			3,61			5,30			7,77
1,15	1,15	1,15	1,69	1,69	1,69	2,49	2,49	2,49	6,65	3,65	3,65	5,36	5,36	5,36	7,87	7,87	7,87
		1,17			1,72			2,52			3,70			5,42			7,96
	1,18	1,18		1,74	1,74		2,55	2,55		3,74	3,74		5,49	5,49		8,06	8,06
		1,20			1,76			2,58			3,79			5,56			8,16
1,21	1,21	1,21	1,78	1,78	1,78	2,61	2,61	2,61	3,83	3,83	3,83	5,62	5,62	5,62	8,25	8,25	8,25
		1,23			1,80			2,64			3,88			5,69			8,35
	1,24	1,24		1,82	1,82		2,67	2,67		3,92	3,92		5,76	5,76		8,45	8,45
		1,26			1,84			2,71			3,97			5,83			8,56
1,27	1,27	1,27	1,87	1,87	1,87	2,74	2,74	2,74	4,02	4,02	4,02	5,90	5,90	5,90	8,66	8,66	8,66
		1,29			1,89			2,77			4,07			5,97			8,76
	1,30	1,30		1,91	1,91		2,80	2,80		4,12	4,12		6,04	6,04		8,87	8,87
		1,32			1,93			2,84			4,17			6,12			8,98
1,33	1,33	1,33	1,96	1,96	1,96	2,87	2,87	2,87	4,22	4,22	4,22	619	6,19	6,19	9,09	9,09	9,09
		1,35			1,98			2,91			4,27			6,26			9,20
	1,37	1,37		2,00	2,00		2,94	2,94		4,32	4,32		6,34	6,34		9,31	9,31
		1,38			2,03			2,98			4,37			6,42			9,42
1,40	1,40	1,40	2,05	2,05	2,05	3,01	3,01	3,01	4,42	4,42	4,42	6,49	6,49	6,49	9,53	9,53	9,53
		1,42			2,08			3,05			4,48			6,57			9,65
	1,43	1,43		2,10	2,10		3,09	3,09		4,53	4,53		6,65	6,65		9,76	9,76
		1,45			2,13			3,12			4,59			6,73			9,88

Figura 1.6: Séries Resistivas E48 a E192

Existe uma regra de formação das séries resistivas, mas esta regra em alguns casos é violada e precisa de algum tipo de ajuste. Sendo assim, consideramos mais útil ter uma cópia (impressa ou no formato digital) das séries resistivas e consultá-la sempre que necessário. As séries resistivas com tolerâncias baixas são normalmente escolhidas nos projetos de circuitos eletrônicos na área de instrumentação de precisão. A imensa maioria dos projetos de circuitos eletrônicos usa a Série E24 (5%) ou E48 (2%). Atualmente, na maioria dos casos usamos resistores de montagem de superfície (SMD). Para estes resistores existem duas normas; a primeira escreve o valor como sendo formado por 3 dígitos e a segunda norma usa dois dígitos seguidos de uma letra para representar o fator multiplicativo. Deixamos os detalhes para outro momento. Recomendamos a leitura da página de internet <https://www.hobby-hour.com/electronics/smdcalc.php>.

A potência do resistor é um dado muito importante e que, infelizmente, não faz parte da codificação. Normalmente, a potência é conhecida com a prática profissional. Mas, uma dica é o volume dos resistores. Quanto maior for a potência, mais volumoso será o resistor. Esta é uma informação que deve fazer parte das especificações de um resistor. Em resumo, um

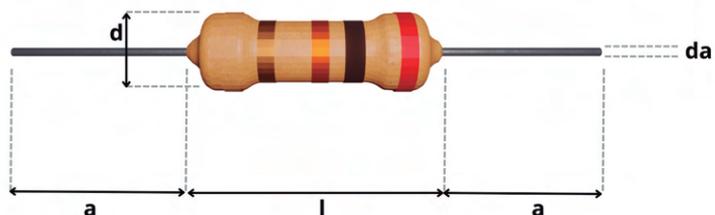


Figura 1.7 Resistor axial fixo (clique para ver a animação)

resistor possui três especificações: **Valor da resistência, Tolerância e Potência do resistor.**

Dica: Se você não sabe a potência de um resistor fixo axial, por exemplo, que você possui em suas mãos, você pode usar a tabela a seguir para estimar sua potência.

Potência	Corpo(L)	Diâmetro	Terminal (a)	Diâmetro do Terminal (da)
Watt	mm	mm	mm	mm
1/8(0.125)	3,0 ± 0,3	1,8 ± 0,3	28 ± 3	0,45 ± 0,05
1/4(0.25)	6,5 ± 0,5	2,5 ± 0,3	28 ± 3	0,6 ± 0,05
1/2(0.5)	8,5 ± 0,5	3,2 ± 0,3	28 ± 3	0,6 ± 0,05
1	11 ± 1	5 ± 0,5	28 ± 3	0,8 ± 0,05

Figura 1.8 Potência de um resistor axial fixo

As figuras a seguir ilustram resistores de 3, 4, 5 e 6 faixas:

CORES	1º Faixa	2º Faixa	Nº de zeros/ Multiplicador	Tolerância
Preto	0	0	0	±20%
Marrom	1	1	1	
Vermelho	2	2	2	
Laranja	3	3	3	
Amarelo	4	4	4	
Verde	5	5	5	•
Azul	6	6	6	•
Violeta	7	7	7	•
Cinza	8	8	8	•
Branco	9	9	9	•
Dourado	•	•	x0,1	
Prata	•	•	x0,01	
Nenhum	•	•	•	± 20%



Figura 1.9 Resistor de 3 faixas

CORES	1º Faixa	2º Faixa	Nº de zeros/ Multiplicador	Tolerância
Preto	0	0	0	±20%
Marrom	1	1	1	± 1%
Vermelho	2	2	2	± 2%
Laranja	3	3	3	
Amarelo	4	4	4	
Verde	5	5	5	± 0,5%
Azul	6	6	6	±0,025%
Violeta	7	7	7	± 0,1%
Cinza	8	8	8	± 0,05%
Branco	9	9	9	•
Dourado	•	•	x0,1	± 5%
Prata	•	•	x0,01	± 10%
Nenhum	•	•	•	



Figura 1.10 Resistor de 4 faixas

Note que aqui o Dourado não corresponde a uma tolerância de 5%, nem o prateado a uma tolerância de 10%. O valor da resistência dependerá da Série Resistiva a que pertença.

Diferentemente do caso ao lado, aqui existe a faixa de tolerância, conforme ilustrado na figura

CORES	1º Faixa	2º Faixa	3º faixa	Nº de zeros/ Multiplicador	Tolerância	Coef. temperatura
Preto	0	0	0	0	±20%	
Marrom	1	1	1	1	± 1%	100 PPM/C
Vermelho	2	2	2	2	± 2%	50 PPM/C
Laranja	3	3	3	3		15 PPM/C
Amarelo	4	4	4	4		25 PPM/C
Verde	5	5	5	5	± 0,5%	
Azul	6	6	6	6	±0,025%	10 PPM/C
Violeta	7	7	7	7	± 0,1%	5 PPM
Cinza	8	8	8	8	± 0,05%	
Branco	9	9	9	9	•	•
Dourado	•	•	•	x0,1	± 5%	
Prata	•	•	•	x0,01	± 10%	



Figura 1.12 Resistor de 6 faixas

CORES	1º Faixa	2º Faixa	3º faixa	Nº de zeros/ Multiplicador	Tolerância
Preto	0	0	0	0	±20%
Marrom	1	1	1	1	± 1%
Vermelho	2	2	2	2	± 2%
Laranja	3	3	3	3	
Amarelo	4	4	4	4	
Verde	5	5	5	5	± 0,5%
Azul	6	6	6	6	±0,025%
Violeta	7	7	7	7	± 0,1%
Cinza	8	8	8	8	± 0,05%
Branco	9	9	9	9	•
Dourado	•	•	•	x0,1	± 5%
Prata	•	•	•	x0,01	± 10%



Figura 1.11 Resistor de 5 faixas

1.2.4. CAPACITORES

Os capacitores são muito empregados em diversos circuitos eletro-eletrônicos. As principais funções dos capacitores nestes circuitos são:

- Acoplamento: Quando queremos passar um sinal AC e rejeitar um sinal DC
- Desacoplamento: Quando queremos atenuar um sinal de determinada frequência
- Oscilador: Como parte do circuito que determina o período
- Filtragem: Usado em montagens específicas
- Temporização: Quando determina a largura de um pulso de temporização

São encontrados em Fontes de Alimentação (lineares e chaveadas), em Circuitos Digitais (Desacoplando e definindo o período de um sinal alternado), em Filtros, etc. Existem dois parâmetros básicos associados a um capacitor: sua Capacitância e a Tensão Máxima suportada pelo mesmo. Por exemplo, não se deve especificar um capacitor usado em uma fonte de alimentação dizendo-se que é um capacitor de 470 μF . O correto é dizer que se trata de um capacitor de 470 μF por 35V, por exemplo. Outras especificações podem incluir o tipo de material usado na fabricação do mesmo e a estabilidade térmica do capacitor.

Existe uma crença de que na falta de um capacitor de determinada capacitância, podemos usar outro de maior capacitância de mesma tensão ou de tensão maior. Não é bem assim... Um parâmetro importante de um capacitor é sua resistência série equivalente (ESR). O ideal é que esta resistência seja a menor possível. Mas, ter uma ESR baixa não significa dizer que o Capacitor está bom. Uma medida de sua capacitância é fundamental.

Muito provavelmente, o capacitor é o componente eletrônico com o maior número de variantes. Podemos ter capacitores eletrolíticos (de vários tipos), de mica, cerâmicos, de tântalo, de Poliéster, de Polipropileno, de Poliestireno, de Níquel, etc. Para os capacitores cerâmicos, existem 4 classes que englobam os seguintes subtipos (ver <https://abre.ai/eHab>): C0G, NP0, X5R, X7R, Y5V, Z5U, dentre outros. Sugerimos uma visita ao site <https://abre.ai/eG9H>. Existe um livro intitulado "The Capacitor Handbook" cuja leitura (ou consulta) sugerimos.

Os capacitores podem ter polaridade ou não. A principal característica de um capacitor é a capacidade de armazenar cargas elétricas. Toda vez que um capacitor é ligado em um **circuito DC** ele se carrega com uma tensão igual à tensão da fonte. Esta carga não acontece instantaneamente, é preciso um certo tempo para que o capacitor se carregue. Uma vez carregado, não há mais a passagem de corrente elétrica pelo mesmo. A capacidade de armazenamento de cargas de um capacitor é medida através de sua **Capacitância**, cuja unidade de medida é o **Farad**³. A especificação de um capacitor é feita por meio de sua capacitância, da máxima tensão de operação do mesmo e do tipo de material usado na construção do capacitor, conforme veremos mais adiante. A capacitância de 1F é relativamente grande, de modo que normalmente veremos os valores de capacitância especificados em μF , nF ou pF (leia-se, respectivamente: micro Farad, nano Farad e pico Farad). Algumas vezes podem aparecer o valor em mF (mili Farad).

A capacitância (C) de um capacitor pode ser expressa matematicamente pela relação:

$$C = \frac{Q}{V}$$

(1.2)



O capacitor mais simples é o capacitor de placas paralelas, ilustrado a seguir.

Para este capacitor, sua capacitância é dada por:

$$C = k\epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (1.3)$$

Em que A é a área da placa paralela, d é a distância de separação das placas, k é a constante dielétrica do material isolante (ou dielétrico) usado, ϵ_0 é a permissividade do vácuo e $\epsilon = k\epsilon_0$ é a permissividade do dielétrico utilizado. Uma das placas se carrega positivamente, enquanto que a outra se carrega negativamente (**com a mesma carga**). Os capacitores podem possuir (ou não) polaridade. Usam-se as seguintes simbologias para se representar capacitores.

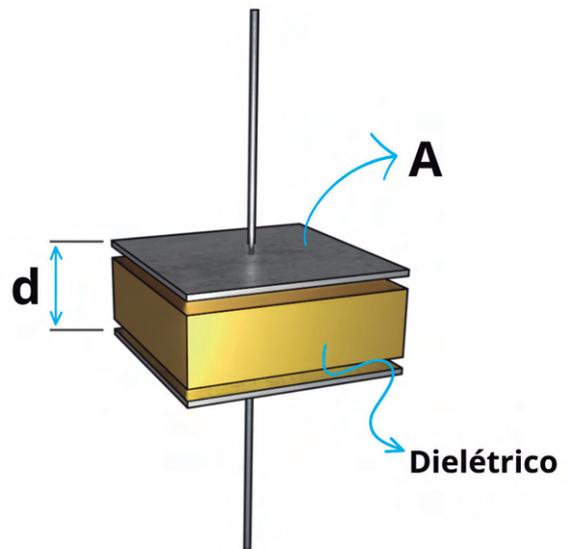
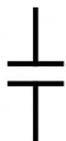


Figura 1.13 Capacitor de placas paralelas
(Clique para ver a animação)



Sem Polaridade



Polarizado



Ajustável

A escolha por um tipo específico de capacitor está, de certa forma, ligada a capacitância desejada. Outros fatores que influenciam na escolha incluem estabilidade em relação à temperatura e tolerância. Por exemplo, determinadas aplicações podem exigir um capacitor que varie pouco com a temperatura, ao passo que em outra aplicação este pode não ser um fator importante. Os capacitores cerâmicos podem apresentar-se em três padrões industriais: **NPO** ou **COG** (estáveis), **X7R** (semi-estáveis) e **Z5U** (uso geral). Para informações mais detalhadas recomendamos fortemente a referência (Kaiser1993).

A energia armazenada em um Capacitor é dada por:

$$E(t) = \frac{Cv^2(t)}{2} \quad (1.4)$$

Esta expressão pode ser facilmente obtida caso o aluno tenha familiaridade com o Cálculo integral e diferencial. A prova parte do conceito de **potência como sendo a taxa de variação da energia no tempo**. Assim, matematicamente, podemos escrever:

$$P(t) = \frac{dE(t)}{dt} \quad (1.5)$$

Mas, $P(t)=v(t)i(t)=v(t) \frac{dQ}{dt}$, uma vez que a corrente elétrica é a taxa de variação da carga ao longo do tempo. Para um capacitor de capacitância constante C, tem-se que $Q(t) = Cv(t)$. E, portanto, $v(t)=(Q(t))/C$. Logo, podemos escrever:

$$\begin{aligned}
 dE &= P(t)dt = v(t) \frac{dQ(t)}{dt} dt \\
 &= \frac{Q(t)}{C} dQ(t) \\
 E &= \frac{1}{C} \int Q(t) dQ(t) = \frac{1}{2C} Q^2(t) = \frac{1}{2} C v^2(t)
 \end{aligned}$$

TIPOS COMERCIAIS

Comercialmente, os capacitores podem ser construídos usando-se muitos materiais diferentes. Assim, temos capacitores eletrolíticos, capacitores de mica, capacitores cerâmicos, capacitores de poliéster, capacitores de papel, capacitores de policarbonatos e capacitores de polipropileno. Estes diferentes tipos de capacitores apresentam faixas de valores para a capacitância bem determinadas. Por exemplo, se precisamos de um capacitor de alta capacitância, certamente o capacitor escolhido deverá ser eletrolítico. Apesar de existirem capacitores eletrolíticos não polares, em geral, são capacitores polarizados. Os capacitores eletrolíticos não polares são chamados capacitores eletrolíticos bipolares e podem ser conectados sem a necessidade de se observar uma polaridade específica. Em termos de simbologia, os capacitores polares são representados com um sinal + no pólo positivo do mesmo. Outras simbologias representam o pólo negativo por uma curva ou por uma linha mais grossa.

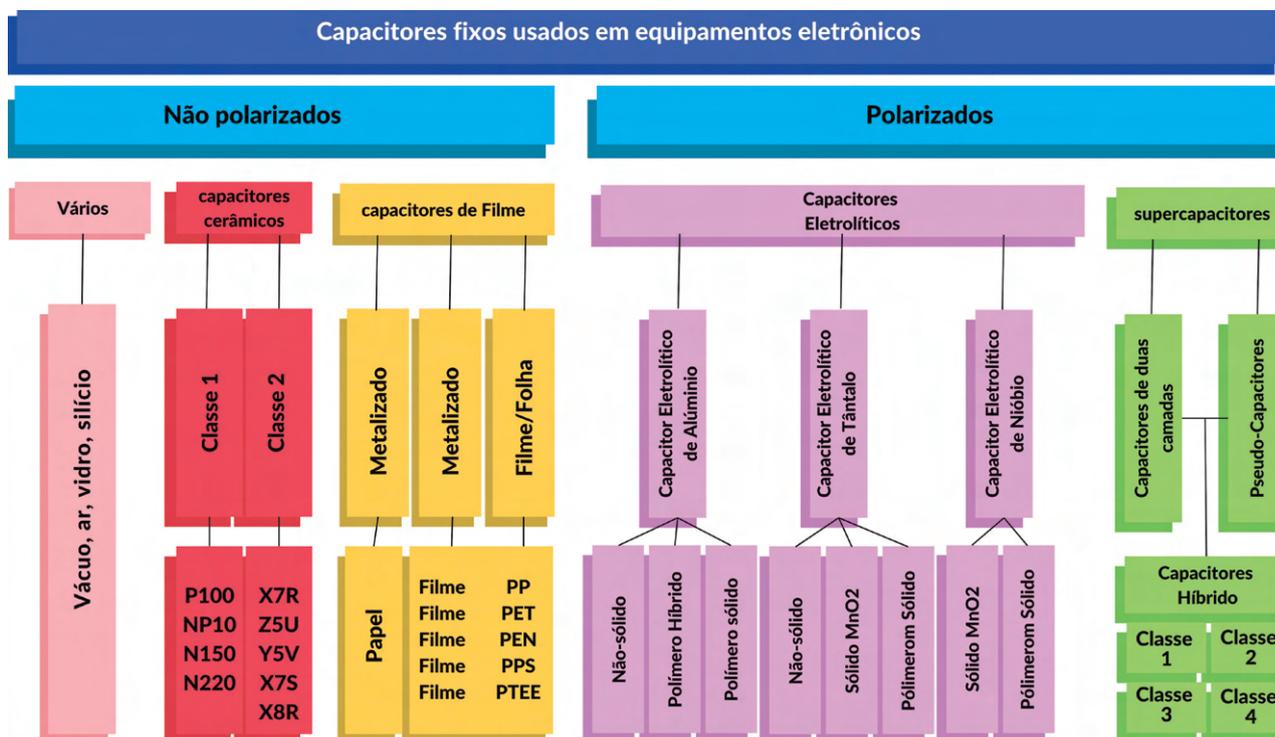


Figura 1.14 Tipos de Capacitores usados em equipamentos eletrônicos

Na Figura, os termos PP, PET, PEN, PPS e PTFE significam respectivamente Polipropileno, Poliéster, Naftalato de Polietileno, Sulfeto de Polifenileno e Politetrafluoretileno. Além destes tipos, existem os capacitores de filme do tipo Poliestireno (PS), também conhecido como Styroflex, e Policarbonato (PC) que não foram mostrados nesta figura porque foram

substituídos, respectivamente, pelos capacitores de Poliéster e Polipropileno. Em verdade, os capacitores cerâmicos são classificados em 4 classes e não em apenas duas como mostra do nesta figura. Mas, este detalhe deixamos como uma provocação para o leitor.

SÉRIES PADRONIZADAS

Os possíveis valores para a capacitância de um capacitor são provenientes de tabelas que se chamam "séries", assim como vimos no estudo dos resistores. No caso dos capacitores estas tabelas também fornecem as tensões possíveis. As tabelas a seguir ilustram respectivamente alguns tipos de capacitores disponíveis comercialmente e os possíveis valores de capacitores eletrolíticos

Tipo	Dielétrico	Armadura	Fixa de Valor	Faixa de Tensão
Papel	Papel Parafinado	Folhas de Alumínio	1η F – 10μ F	150 – 1000V
Mica	Folhas de Mica	Folhas de Alumínio	1ρF – 22η F	200 – 5000V
Styroflex	Tiras de Poliestireno	Folhas de Alumínio	4.7ρF – 22η F	25 – 630V
Folha de Poliéster	Folhas de Poliéster	Folhas de Alumínio	1η F – 1μ F	100 – 1000V
Poliéster Metalizado	Folhas de Poliéster	Alumínio Depositado	10η F – 2.2μ F	63 – 1000V
Polycarbonato Metalizado	Folhas de Polycarbonato	Alumínio Depositado	10η F – 2.2μ F	63 – 1000V
Cerâmico Tipo I	Disco Cerâmico	Prata Depositada	0.5ρF – 330ρF	63 – 500V
Cerâmico Tipo II	Disco de Titanato de Bário	Prata Depositada	100ρF – 470ρF	15 – 1000V
Eletrolíticos de Alumínio	Óxido de Alumínio	Folhas de Alumínio	0.47ρF – 220000μ F	4 – 500V
Eletrolíticos de Tântalo	Óxido de Tântalo	Tântalo Metalizado	2.2μ F – 220μ F	3 – 100V

Figura 1.15: Capacitores disponíveis comercialmente

0,1 μF	10 μF	53 μF	200 μF	510 μF	1300 μF	3700 μF	7600 μF	25.000 μF	60.000 μF
0,15 μF	12 μF	56 μF	210 μF	520 μF	1400 μF	3900 μF	7800 μF	26.000 μF	62.000 μF
0,22 μF	15 μF	60 μF	216 μF	540 μF	1500 μF	4000 μF	8200 μF	27.000 μF	66.000 μF
0,33 μF	16 μF	68 μF	220 μF	550 μF	1600 μF	4100 μF	8300 μF	28.000 μF	68.000 μF
0,47 μF	18 μF	72 μF	230 μF	560 μF	1700 μF	4200 μF	8400 μF	30.000 μF	0,12 F
0,68 μF	20 μF	75 μF	233 μF	590 μF	1800 μF	4300 μF	8700 μF	31.000 μF	0,15 F
1 μF	21 μF	82 μF	240 μF	620 μF	2000 μF	4600 μF	9000 μF	32.000 μF	0,22 F
1,5 μF	22 μF	88 μF	243 μF	645 μF	2100 μF	4700 μF	9600 μF	33.000 μF	0,33 F
2 μF	24 μF	100 μF	250 μF	650 μF	2200 μF	4800 μF	10.000 μF	34.000 μF	0,47 F
2,2 μF	25 μF	108 μF	270 μF	680 μF	2500 μF	5000 μF	11.000 μF	36.000 μF	0,666 F
3 μF	27 μF	120 μF	300 μF	700 μF	2600 μF	5100 μF	12.000 μF	37.000 μF	
3,3 μF	30 μF	124 μF	320 μF	708 μF	2700 μF	5400 μF	13.000 μF	38.000 μF	
4 μF	33 μF	130 μF	324 μF	730 μF	2800 μF	5500 μF	15.000 μF	39.000 μF	
4,7 μF	35 μF	140 μF	330 μF	800 μF	2900 μF	5600 μF	16.000 μF	40.000 μF	
5 μF	36 μF	145 μF	340 μF	820 μF	3000 μF	5800 μF	17.000 μF	41.000 μF	
5,6 μF	39 μF	150 μF	350 μF	850 μF	3100 μF	6000 μF	18.000 μF	47.000 μF	
6,8 μF	40 μF	161 μF	370 μF	860 μF	3300 μF	6500 μF	20.000 μF	48.000 μF	
7 μF	43 μF	170 μF	378 μF	1000 μF	3400 μF	6800 μF	22.000 μF	50.000 μF	
8 μF	47 μF	180 μF	480 μF	1100 μF	3500 μF	7200 μF	23.000 μF	55.000 μF	
8,2 μF	50 μF	189 μF	500 μF	1200 μF	3600 μF	7400 μF	24.000 μF	56.000 μF	

Figura 1.16: Capacitores Eletrolíticos disponíveis comercialmente

INDUTORES

Os indutores, assim como os capacitores, são elementos de circuito que armazenam energia. Os indutores comerciais de baixo valor (μH) são muito parecidos com os resistores e empregam o mesmo código de cores para especificar sua indutância. Assim, um indutor de $470 \mu\text{H}$ possui uma faixa amarela, uma violeta, uma faixa marrom e uma faixa que indica sua tolerância. Se for militar, haverá uma faixa extra para indicar este fato. Se a tolerância for de 20% não haverá faixa ou ela será preta.

Em verdade, nem todo indutor vem com sua indutância especificada por meio de um código de cores. Outro ponto delicado é a potência de um dado indutor presente em um equipamento em que se está dando manutenção. Existem tabelas que nos dão uma idéia da potência do indutor como função de seu comprimento; assim como se faz com os resistores. A melhor maneira de verificar a potência de um dado indutor é através do catálogo do fornecedor. Todavia, muito frequentemente, não se tem a menor idéia de quem forneceu um dado indutor. Portanto, fica como regra básica uma estimativa da potência levando-se em conta a tensão e a corrente a que o mesmo será submetido. A figura a seguir ilustra um indutor que emprega o código de cores (lado esquerdo da figura) ao lado de alguns indutores que não empregam nenhum código de cores. O teste de um indutor, na maioria das vezes, consiste em medir sua resistência. Indutores normalmente tornam-se circuitos abertos quando suas especificações são excedidas.

A sua resistência elétrica, em verdade, depende da frequência do sinal que a atravessa. Sua resistência elétrica é denominada de reatância indutiva. Matematicamente escrevemos:

$$X_L(j\Omega) = j\omega L = j2\pi fL. \quad (1.7)$$

Indutores são encontrados em transformadores, motores elétricos, em relés, em circuitos de sintonia, em filtros analógicos. A relação entre a corrente e a tensão é dada

GUIA DE CORES DOS INDUTORES



Figura 1.17: Código de Cores para Indutores



Figura 1.18: Indutores - Outros modelos
(Clique para ver as animações)

pela equação a seguir.

$$v_L(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (1.8)$$

Pela equação anterior, note que a indutância de um indutor limita a variação da corrente que o atravessa. Ou seja, quanto maior for a indutância menor serão as variações na corrente. Perceba também que quando um indutor é atravessado por uma corrente constante não é gerada uma tensão entre seus terminais. Em relação à corrente elétrica que atravessa um indutor, segue-se que:

$$i_L(t) = i_L(0) + \frac{1}{L} \int_0^t v_L(t) dt \quad (1.9)$$

Pela equação anterior, percebe-se que quando é aplicada uma tensão constante entre os terminais de um indutor, a corrente que o atravessa cresce linearmente. Usando-se as duas equações anteriores aliadas ao conhecimento de cálculo diferencial e integral, pode-se mostrar que a energia armazenada por um indutor vale:

$$E(t) = \frac{1}{2} Li^2(t) \quad (1.10)$$

A figura a seguir ilustra vários indutores comerciais:

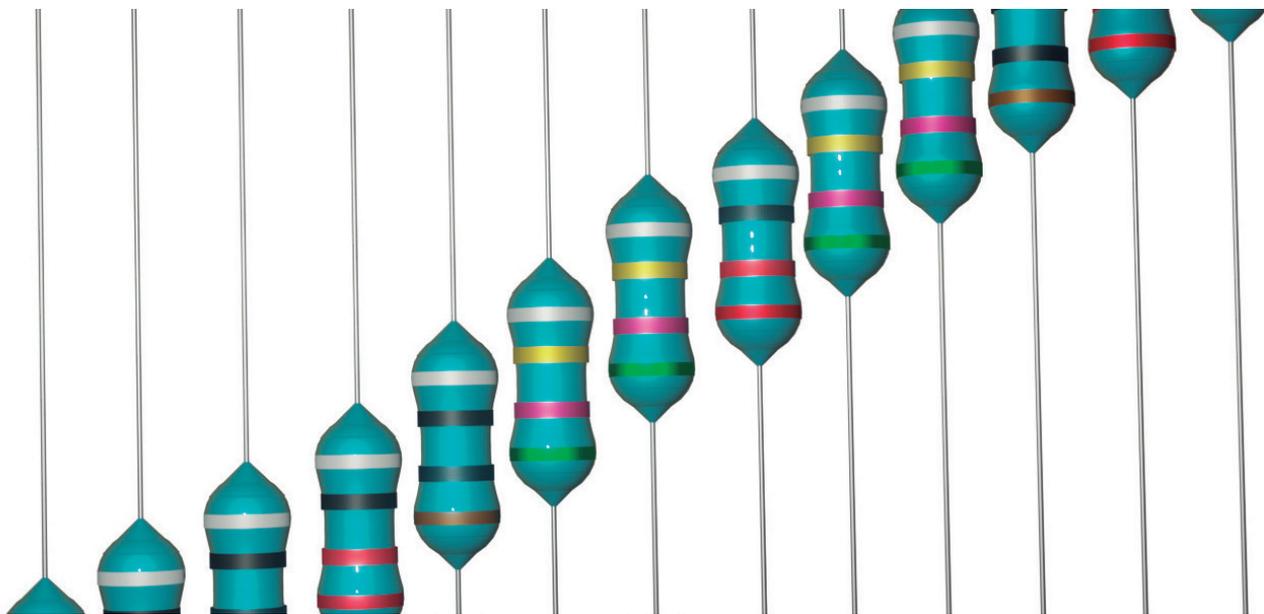


Figura 1.19: Indutores Comerciais (clique para ver a animação)

Recomendamos fortemente uma visita ao site <https://abre.ai/el1w> para ampliar o conteúdo tratado neste tópico.

1.2.5. CHAVES MECÂNICAS

As chaves mecânicas são componentes que interrompem a circulação de corrente e podem ser de muitos tipos. As mais comuns são a chave de contacto momentâneo, mais co-

nhecida como Push-Button e a chave SPST (chave liga/desliga simples).

Muitos alunos displicentemente pensam que a tensão entre os terminais de uma chave desligada é 0V. É exatamente o contrário! A tensão entre os terminais de uma chave desligada é máxima, enquanto que a tensão entre os terminais de uma chave ligada é idealmente nula.

Tecnicamente as chaves são denominadas em função do número de pólos e do número de acionamentos que elas controlam. Assim, temos, por exemplo:

- a) SPST: Um pólo, um acionamento
- b) SPDT: Um pólo, dois acionamentos
- c) DPDT: Dois pólos e dois acionamentos
- d) 3PDT: Três pólos e dois acionamentos

Existem também as chamadas Chaves Semicondutoras que são componentes semicondutores utilizados para operar entre dois estados: ligado ou desligado. Chaves semicondutoras são muito importantes na eletrônica de potência. Na medida em que a eletrônica se desenvolve criam-se chaves semicondutoras cada vez mais velozes, capazes de controlar grandes correntes diretas e suportando tensões reversas de milhares de Volts!

1.2.6. FUSÍVEIS

Muitas pessoas tratam os fusíveis de forma muito elementar. Em verdade, existem fusíveis de muitos tipos e jamais devem ser substituídos por um “fiozinho”, um “jumper”. Existem fusíveis rápidos e lentos. Existem os chamados fusíveis ressetáveis que nunca queimam. Quando há uma sobrecorrente, eles abrem o circuito e voltam ao “normal” quando a causa da sobrecorrente for removida. Existem ainda os fusíveis industriais de alta capacidade de corrente.

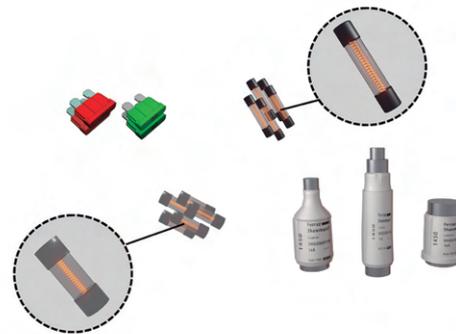
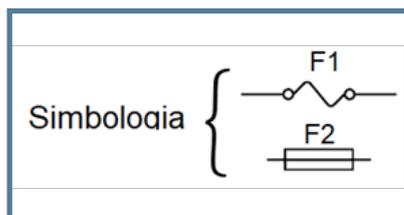


Figura 1.20: Fusíveis
(clique para ver as animações)



Qualquer que seja o tipo, o fusível é um elemento de proteção! Nos circuitos eletrônicos representamos um fusível como mostrado mais adiante. Ao lado do símbolo do fusível, normalmente, coloca-se um rótulo; como F1, por exemplo.



Figura 1.21: Fusível ressetável
(Clique para ver as animações)

1.2.7. VARISTORES

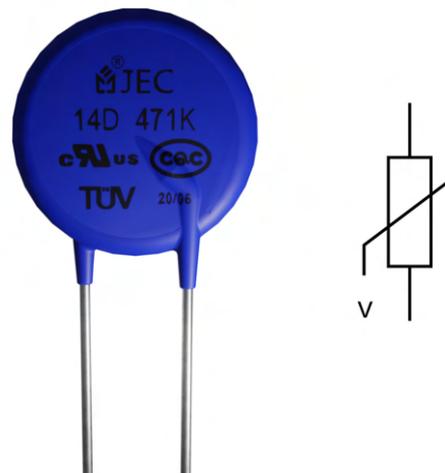
Os Varistores, ou VDR (do inglês, Voltage Dependent Resistor), são muito utilizados em circuitos de fonte de alimentação (linear ou chaveada). Criado em 1957, é um dispositivo que reduz sua resistência quando a tensão entre seus terminais é maior que um determinado valor. Desta maneira, o varistor protege o circuito contra sobretensões. Os primeiros Varistores foram feitos com algum óxido de Silício ou Germânio, como o carbeto de Silício. Por esta razão são chamados de MOV, do inglês Metal Oxide Varistor. A partir dos anos 1970, surgiram os varistores de Óxido de Zinco (ZnO). Atualmente, os varistores são fabricados com Óxido de Zinco (ZnO), dióxido de Estanho

(SnO₂) e dióxido de Titânio (TiO₂). Podem ser utilizados tanto em circuitos AC como em circuitos DC. A figura a seguir ilustra um varistor e sua simbologia.

PARÂMETROS DO VARISTOR

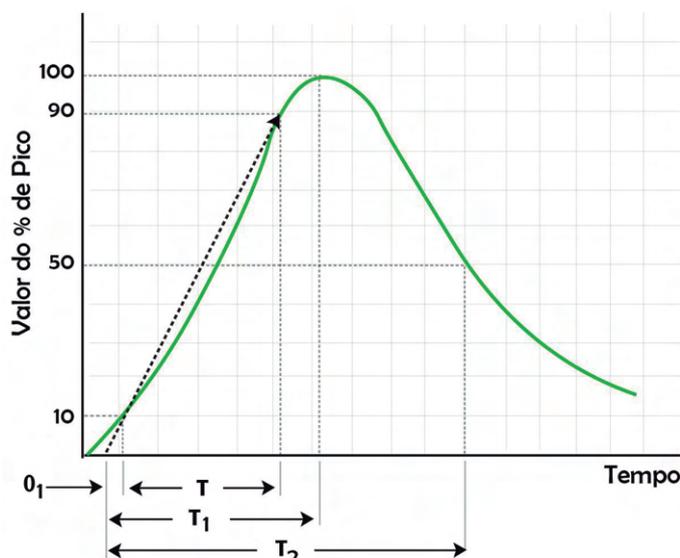
Os principais parâmetros de um varistor, presentes em suas folhas de especificações (datasheet), são:

- a) V_{1mA}: Tensão DC aplicada entre os terminais do Varistor que produz uma corrente de 1mA. Por exemplo, para o varistor 10D471K, fabricado pela Huaan, V_{1mA} = 385V.



IR: CORRENTE DC DE FUGA OBTIDA AO ATRAVESSAR O VARISTOR MEDIANTE A APLICAÇÃO DE UMA TENSÃO DC EQUIVALENTE A 83% DA TENSÃO \$V_{1MA}. GERALMENTE, SITUA-SE ABAIXO DE 20µA.

- b) V_{AC}: Tensão AC entre os terminais do Varistor que pode ser aplicada continuamente na temperatura especificada.
- c) V_{DC}: Tensão DC entre os terminais do Varistor que pode ser aplicada continuamente na temperatura especificada.
- d) IP: Valor de pico da corrente impulsiva para uma dada forma de onda.
- e) VC: Tensão de grampeamento, ou seja, tensão entre os terminais do varistor quando percorrido pela corrente IP.
- f) ITM (Corrente de Surto Máxima não-repetitiva): Representa o valor da corrente de pico; ITM é um teste destrutivo e o varistor que tenha passado por este teste não se recomenda usá-lo nos circuitos.



0_1 = Origem virtual da forma de onda
 T = Tempo para ir de 10% a 90% do pico
 T_1 = Tempo de Subida = $1.25 \times T$
 T_2 = Tempo de Decaimento

Exemplo - Onda de corrente 8/20 µs
 $8\mu s = T_1$ = Tempo de Subida
 $20\mu s = T_2$ = Tempo de Decaimento

Figura 1.23: Forma de Onda de Corrente para Cálculo de ITM

A figura a seguir ilustra um Varistor específico com suas informações:

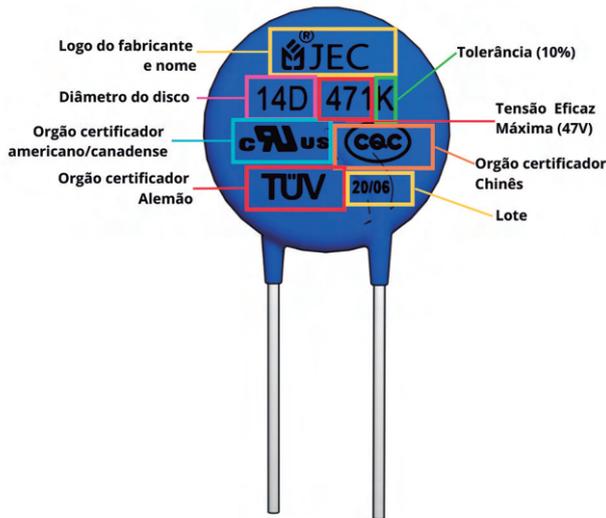


Figura 1.24: : Informações presentes no Varistor

A próxima figura ilustra uma comparação entre dois tipos de Varistores.

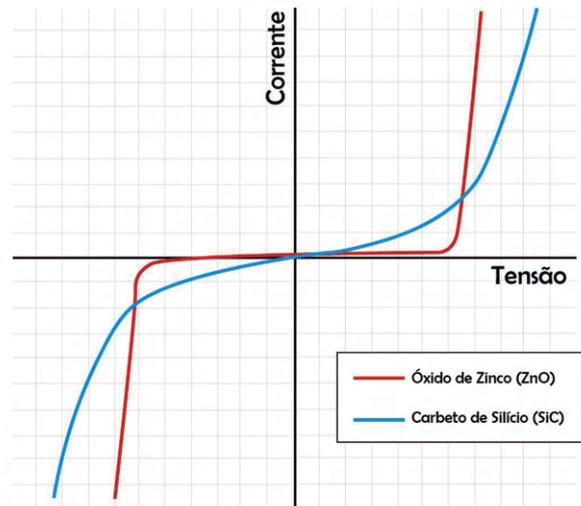


Figura 1.25: Comparação de Varistores

Para a maioria dos fabricantes, o valor de \$ITM é calculado usando-se uma forma de onda 8/20 μ s (8 μ s: tempo de subida e 20 μ s: tempo para cair do valor de pico até 50% deste valor). Alguns fabricantes usam forma de onda 10/1000 μ s.

É muito interessante observar aqui que não há uma receita de bolo idêntica para todas as fábricas de Varistores (MOV). Para se fabricar os Varistores são usados cristais de carbeto de silício ou óxidos metálicos que são pressionados em um material cerâmico. Em seguida, ocorre a sinterização do material em temperaturas elevadas após a secagem. As características elétricas do dispositivo dependem da qualidade da matéria-prima, da temperatura fornecida e das condições atmosféricas. Para ter bons contatos elétricos, os contatos do material são metalizados com prata ou cobre. Em seguida, os eletrodos são soldados aos contatos e os varistores revestidos por uma resina e codificados. A figura a seguir ilustra este processo.



Figura 1.26 Fabricação de Varistores
(clique para ver a animação)

EXERCÍCIOS DE REVISÃO

- 01) Dentro do campo da Eletrônica, o que é um sinal? Quais os tipos de sinais que são abordados pela Eletrônica? Caracterize estes sinais.
- 02) Qual o campo de trabalho da chamada \textbf{\textit{Eletrônica de Potência}}?
- 03) Quais os componentes utilizados mais frequentemente nos circuitos eletrônicos?
- 04) O que é um Circuito Integrado? Qual a diferença entre as propostas de Jack Kilby e Robert Noyce?
- 05) De que forma os circuitos integrados foram inicialmente classificados? Qual o parâmetro utilizado para se avaliar sua densidade de integração?
- 06) Complete os espaços vazios: “Os circuitos integrados _____ são os circuitos mais usados nos dias atuais, enquanto que os circuitos _____ estão sendo deixados para trás devido ao seu tamanho.”
- 07) Os valores dos resistores são organizados de que forma? O que significam as faixas pintadas no corpo dos mesmos?
- 08) Quais são os 3 parâmetros que precisam ser definidos em um resistor?
- 09) Como a resistência de um resistor de montagem de superfície é indicada? Quantos padrões existem para definir este valor?
- 10) As especificações de tamanho de um resistor de montagem de superfície podem ser especificadas de quantas formas distintas?
- 11) Cite as principais funções de um capacitor em um circuito eletrônico.
- 12) Quais os padrões industriais para o capacitor cerâmico?
- 13) Quais os tipos comerciais de capacitores?
- 14) Como classificamos as chaves quanto aos pólos e acionamentos que elas controlam?
- 15) O que é um Varistor e onde ele é empregado?

Capítulo 2

HISTÓRIA DA ELETRÔNICA

"Aprenda com o passado, viva para o presente, acredite no futuro."

Albert Einstein

2.1 As primeiras observações

2.2 As invenções que determinariam o surgimento dos dispositivos semicondutores

2.2.1 O Diodo Semicondutor

2.2.2 O Transistor de Efeito de Campo

2.2.3 O Transistor Bipolar

2.2.4 O Circuito Integrado

Ao final deste capítulo, o leitor deverá ter boas noções sobre:

- 1. As primeiras observações relacionadas ao futuro desenvolvimento da Eletrônica**
 - 2. Invenções determinantes para o desenvolvimento da Eletrônica**
-

Neste capítulo iremos fazer uma viagem no tempo. Veremos os primeiros componentes eletrônicos, anteriores a era dos dispositivos semicondutores, os métodos de purificação dos semicondutores (O primeiro método teria sido baseado nos trabalhos do Químico polonês Jan Czochralski¹) que permitiram o desenvolvimento dos chamados dispositivos de estado sólido, dentre outras informações.

2.1. AS PRIMEIRAS OBSERVAÇÕES

Em 1897 os efeitos da corrente elétrica eram relativamente conhecidos (ver o livro sobre eletricidade da Série 18 dos Professores Dra. Daphne Barros e Dr. Meuse Nogueira de Oliveira Filho). Foi exatamente neste ano que J. J. Thomson (1856-1940) descobriu o elétron. A eletrônica moderna estava a caminho...

Em verdade, antes mesmo da descoberta de J. J. Thomson citada anteriormente, em 1874 o físico alemão Ferdinand Braun (1850- 1918) descobriu que um material conhecido pelo nome de Galena (Sulfeto de Chumbo, PbS) quando em contacto com uma ponta metálica só permitia a passagem da corrente elétrica

¹ PRONUNCIA-SE "IAN
CHOCRALSQUI".



em um sentido (efeito retificador). Foi somente em 1904 que John Ambrose Fleming (1849-1945), um antigo funcionário de Thomas Alva Edison, patenteou o diodo termiônico. Era um dispositivo que só permitia a passagem de corrente elétrica em um sentido, assim como fazem os atuais diodos semicondutores.

O efeito termiônico já havia sido observado primeiramente por Edmond Becquerel (1820-1891) em 1853, também por Frederick Guthrie (1833-1886) na Inglaterra em 1873. Outros cientistas trabalhando de forma independente também fizeram a mesma observação. Thomas Alva Edison (1847-1931), em 13 de fevereiro de 1880, quando pesquisava o motivo do rompimento dos filamentos de suas lâmpadas incandescentes, redescobriu este mesmo fenômeno.

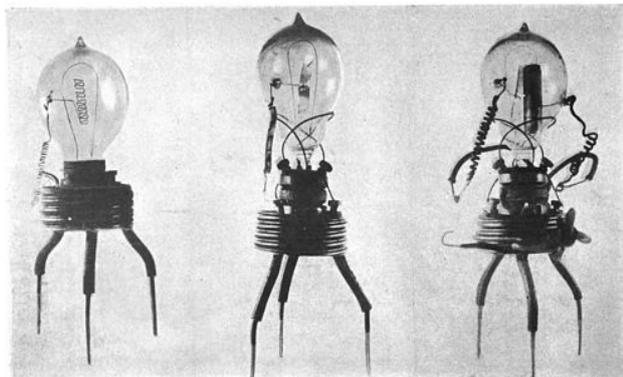


Figura 2.1: Protótipo da Válvula de Fleming - 1904
(clique para ver a animação)

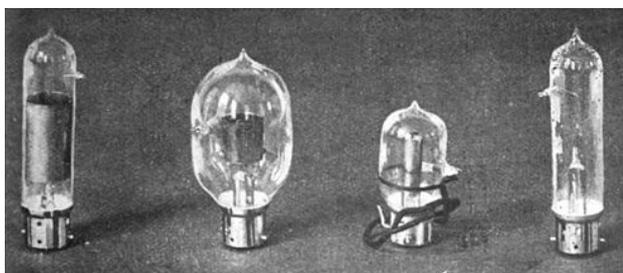


Figura 2.2: Válvulas de Fleming Comerciais - 1919 (clique para ver as animações)

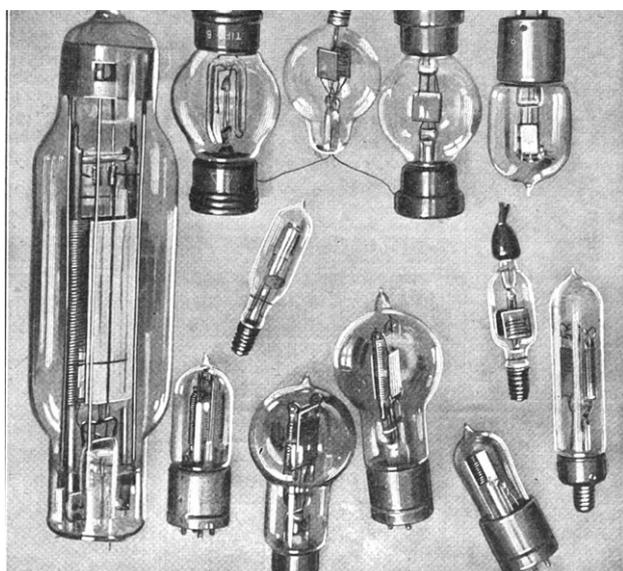


Figura 2.3: Válvulas Triodo desenvolvidas por Lee De Forest

Foi em 1906 que Lee De Forest (1873-1961) inventou uma válvula chamada Triodo usada como elemento de amplificação.

Após a criação do Triodo surgiram o Tetrodo (desenvolvido na Alemanha por Walter H. Schottky (1886-1976) em 1919) e o Pentodo (desenvolvido nos laboratórios da Philips em 1926 por Gilles Holst (1886-1968) e Bernard Dominicus Hubertus Tellegen (1900-1990)). A válvula Pentodo foi usada até 1960 (Portanto, depois da invenção do transistor semicondutor em 1947). Naturalmente, estas válvulas procuravam resolver deficiências de suas versões antecessoras e apresentar características melhores. Existem outras válvulas que não serão citadas aqui. Recomendamos ao leitor amigo interessado na história das válvulas que faça uma pesquisa na internet (<http://www.fazano.pro.br/indice.html>). Certamente encontrará muito material de boa qualidade.

2.2. AS INVENÇÕES QUE DETERMINARIAM O SURGIMENTO DOS DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES

Até agora (neste texto), nenhum dispositivo eletrônico baseado no emprego de semicondutores havia sido desenvolvido. Isso não quer dizer que nada se conhecia sobre estes materiais. Em 1821 o alemão Thomas Johann Seebeck (1770-1831) descobrira as propriedades do Sulfeto de Chumbo (Galena, PbS), um material semicondutor. Mais tarde, em 1833 Michael Faraday (1791-1867) percebeu haver uma relação entre a condutivi-

dade de materiais semicondutores com a temperatura. Foi em 1875 que o alemão Werner Von Siemens (1816-1892) inventou um medidor de luz empregando o Selênio (Se) - outro material semiconductor. Na América Alexander Graham Bell (1847-1922) usou o dispositivo de Werner Von Siemens para estabelecer a comunicação óptica sem fio.

Em 1907 Henry Joseph Round (1881-1966), um engenheiro inglês, observou que quando o Carbetto de Silício (SiC) é atravessado por uma corrente elétrica (AC ou DC) havia um efeito luminoso. Assim, H. J. Round observava o efeito que muitas décadas depois seria explorado no desenvolvimento dos chamados diodos emissores de luz (LED-Light Emitting Diode, em inglês). Apenas em 1940 Russel Ohl (1898-1987) criou o diodo de junção PN, conforme veremos a seguir.

O LED, tal qual o conhecemos, foi uma invenção a muitas mãos. Já vimos que Round observou o efeito eletroluminescente em 1907. Em 1928, um russo chamado Oleg Vladimirovich Losev (1903-1942) fabricou um diodo cristalino com óxido de Zinco e Carbetto de Silício que emitia luz ao ser atravessado por uma corrente elétrica. Losev patenteou o “relé de luz” empregando-o em Telecomunicações. Infelizmente, Losev morreu aos 39 anos de idade sem poder desenvolver seu invento. Apenas em abril de 2007 que Losev foi reconhecido como o inventor do LED 34 anos antes da invenção do americano Nick Holonyak (1928,2022) em 1962. O Professor Nikolay Zheludev (1955) publicou na revista Nature Photonics (2007) um artigo com os créditos a Losev pela sua invenção que ele chamou “Relé de Luz”.

Coube a Nick Holonyak, um inventor norte-americano, a honra de criar o primeiro diodo emissor de luz em 1962, tal como o conhecemos.

Outro nome ligado a invenção do LED é Shuji Nakamura (1954), um engenheiro japonês naturalizado americano. Nakamura, juntamente com os Engenheiros japoneses Isamu Akasaki (1929,2021) e Hiroshi Amano (1960), inventou os LEDs de GaN (Nitreto de Gálio) de alto brilho e os LEDs azuis que permitiram a criação dos LEDs brancos usados na iluminação. Também desenvolveu os LEDs ultravioleta (usados para esterilizar água) e o laser azul que possibilitou a criação da tecnologia blu-ray que aumentou a capacidade de armazenamento dos DVD em cinco vezes. Em 2014, o Professor Nakamura e seus co-inventores foram agraciados com o prêmio Nobel de Física “pela invenção dos diodos emissores de luz azul que permitiram fontes de luz brilhantes e economizadoras de energia.” Com a invenção do LED azul, tornava-se possível à obtenção da luz branca, uma vez que os LEDs Verde e Vermelho já existiam.

Para maiores informações sobre as fotos na figura a seguir sugerimos uma visita ao site https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Early_triode_vacuum_tube_collection.jpg

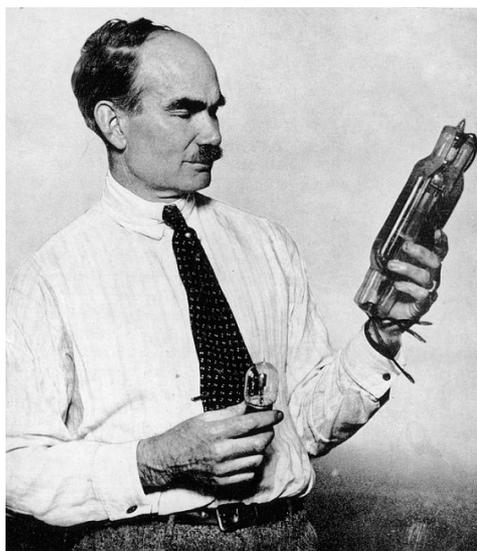


Figura 2.4: Válvulas Triodo desenvolvidas por Lee De Forest - foto entre 1914-1922

Ao lado temos uma foto de Lee De Forest segurando duas válvulas Triodo. A menor de 1W e a maior de 250W.

2.2.1 O DIODO SEMICONDUTOR

Antes de se pensar em dispositivos semicondutores, não podemos deixar de citar o desenvolvimento da técnica de purificação de semicondutores desenvolvida pelo Químico Polonês Jan Czochralski (1885-1953). A técnica de Czochralski produz monocristais e é usada até hoje. Sua descoberta ocorreu em 1916 quando de forma acidental mergulhou sua caneta em um cadinho de Estanho derretido. Ao puxar a caneta do cadinho observou a formação de um fino fio metálico solidificado na ponta da caneta. Perceba que Czochral-

ski não tinha em mente nada sobre purificar semicondutores. Ele desenvolveu um método de cultivo de monocristais que seria empregado na indústria eletrônica muitos anos mais tarde. Existe uma controvérsia se Czochralski teria apoiado os alemães durante a Segunda Grande Guerra ou se era da resistência polonesa. O fato é que ele teria tido um ataque cardíaco durante uma visita da polícia polonesa em sua casa em 1953. O fato é que ele foi inocentado por um tribunal polonês, anos mais tarde. Em se tratando de métodos de purificação de semicondutores, na verdade, existem outros métodos que também são empregados atualmente na indústria de semicondutores.

O diodo não-semicondutor foi inventado em 1874 pelo físico alemão Ferdinand Braun (ver item 2.1) que, na época, não encontrou nenhuma finalidade prática. Foi somente na década de 1930 que surgiram os primeiros retificadores (conversores AC/DC). Todavia, merece citação o trabalho do físico indiano Jagadish Chandra Bose (1858-1937) que, em 1901, usou um diodo na detecção de sinais de rádio. Muitos pesquisadores podem ser considerados como “Pai” do diodo. Todavia, **o diodo semicondutor de junção PN** foi inventado por Russel Ohl em 1940, um pesquisador da Bell Telephone Labs.

2.2.2. O TRANSISTOR DE EFEITO DE CAMPO

O transistor de efeito de campo (FET - Field Effect Transistor) possui dois pais: Julius Edgar Lilienfeld (1882-1963) em 1926 e Oskar Heil (1908-1994) em 1934. Apenas em 1960 John Atalla, (1924-2009) baseando-se nas teorias de William Bradford Shockley Jr (1910-1989) sobre o efeito de campo, teria desenvolvido o transistor MOSFET.

Basicamente, os transistores de efeito de campo podem ser de dois tipos:

- a) FET de Junção - JFET
- b) MOSFET: Que pode ser de dois tipos, intensificação ou depleção.

Trata-se de um transistor que só possui um tipo de portador, elétron ou lacuna, e apresenta uma impedância de entrada altíssima. Teoricamente, a corrente no terminal de entrada (Gate) é nula. Estudaremos este componente em maior detalhe no Volume 2 desta série.

2.2.3. O TRANSISTOR BIPOLAR

O transistor bipolar foi criado em 1947 pelos engenheiros William Shockley, John Bardeen (1908-1991) e Walter Brattain (1902-1987). Na verdade, ainda não se tratava de um transistor de junção. Era um transistor de contacto de ponto. O chamado transistor bipolar de junção só seria inventado em 1948 por William Shockley.

Em verdade, um ano depois da invenção da equipe de Shocley na Bell Labs terem criado o primeiro transistor de contacto de ponto, dois físicos alemães (Herbert Mataré (1912-2011) e Heinrich Welker(1912-1981)), de forma independente, inventaram um outro transistor de contacto de ponto. Ao perceberem que o seu transistor era semelhante ao criado pelos engenheiros da Bell, eles colocaram seu dispositivo em produção e o batizaram de transistron, sendo usado na rede de telefonia da França.

2.2.4. O CIRCUITO INTEGRADO

Nos anos 1960, a indústria da eletrônica já havia experimentado um forte impacto com a invenção dos dispositivos eletrônicos semicondutores, também chamados de dispositivos de estado sólido. A possibilidade de se integrar verdadeiros circuitos dentro de uma única pastilha havia sido introduzida fazia pouco tempo. Esta é uma história que normalmente envolve

os nomes de **Jack Kilby** (08/11/1923-20/06/2005) (Texas Instruments) e **Robert Noyce** (12/12/1927-03/06/1990) (Fairchild²), mas que, em verdade, já haviam sido considerados antes deles por **Geoffrey William Arnold Dummer** (25/02/1909-09/09/2002) em 1952. Uma outra pessoa a quem também se credita a invenção do circuito integrado é o Russo (naturalizado americano) **Edward Keonjian** (14/08/1909-06/09/1999) que teria desenvolvido um protótipo em 1959. Infelizmente, pouco se sabe sobre este protótipo (Aparentemente teria sido um circuito integrado somador, tendo sido implementado pela Texas Instruments - empresa onde trabalhava Jack St. Clair Kilby). Quanto a Geoffrey W. A. Dummer, desde 1952 ele falava publicamente na possibilidade de se integrar componentes em uma pastilha de Silício, chegando a apresentar (2 anos antes de Jack Kilby) uma proposta de um Flip-Flop integrado durante o International Components Symposium em 1957. Dummer é conhecido como o **Profeta do Circuito Integrado** e jamais reclamou para si a invenção do mesmo.

De fato, Jack Kilby solicitou sua patente antes de Robert Noyce. Todavia, a patente de Robert Noyce saiu antes (Patente 2.981.877 de 25 de abril de 1961) da patente de Jack Kilby (Patente 3.138.743 de 23 de junho de 1964). O circuito integrado de Jack Kilby empregava Germânio e era, na verdade, um circuito híbrido com componentes eletrônicos interconectados e apresentava alguns problemas, enquanto que o desenvolvido por Robert Noyce empregava Silício e era um circuito monolítico em que os componentes são desenvolvidos no mesmo substrato semiconductor, além de não apresentar os problemas do circuito integrado de Kilby. Apesar de terem desenvolvido o circuito integrado de forma independente e usando técnicas diferentes, após uma longa briga judicial (cerca de 10 anos³), acabaram aceitando compartilhar o invento.

Em relação ao circuito integrado desenvolvido por Robert Noyce, foi empregada uma técnica conhecida como **Processo Planar** que teria sido desenvolvida em 1959 por Jean Hoerni (14/08/1924-06/09/1997) da Fairchild. Este processo, por sua vez, só foi possível graças ao desenvolvimento dos métodos de passivação de superfícies e oxidação térmica desenvolvido por Mohamed Atalla da Bell (também conhecido como John Atalla) em 1957.

Prezado leitor, perceba que muito raramente algum pesquisador pode atribuir exclusivamente aos seus esforços a criação de uma nova tecnologia. Costumamos dizer “esta pessoa criou tal invenção!” quando na verdade, o inventor é o cara no final da linha que aproveita tudo o que os outros desenvolveram antes deles; em alguns casos, séculos de trabalho.

De todos os dispositivos já criados pelo homem, sem dúvida nenhuma o circuito integrado (CI) foi o componente mais importante de todos os tempos. Sem o circuito integrado, os circuitos eletrônicos seriam enormes, pouco confiáveis, não teriam a velocidade que possuem e dissipariam uma quantidade enorme de calor.

De todos os circuitos integrados, o CI mais importante foi o microprocessador e, posteriormente, o microcontrolador (microprocessador + periféricos). Estas invenções marcam, sem dúvida alguma, o início de uma nova era. Ao invés de dispositivos criados para cumprir uma mesma tarefa sempre do mesmo jeito, foi possível criar ferramentas cujas funcionalidades poderiam ser alteradas, além da possibilidade de inclusão de novos recursos. De fato, a introdução destes dispositivos teve um impacto imenso não apenas no mundo tecnológico, mas toda a sociedade mudaria profundamente. O desenvolvimento de Dispositivos Progra-

² MAIS TARDE
(JULHO/1968) ROBERT
NOYCE SE JUNTARIA A
GORDON MOORE (B 1929) E
FUNDARIAM A INTEL -
INTEGRATED

³ VER INTELLECTUAL
PROPERTY LAW FOR
ENGINEERS, SCIENTISTS,
AND ENTREPRENEURS,
PP.559 - HOWARD B.
ROCKMAN

máveis foi responsável pelo surgimento do computador pessoal, pela automação industrial moderna, pela introdução de sensores inteligentes, pela criação das chamadas cidades inteligentes, pelo desenvolvimento do telefone celular, das câmeras digitais, dos caixas de atendimento eletrônico no serviço bancário, pelo desenvolvimento de modernas ferramentas usadas na Medicina, especialmente as usadas em tratamento de imagens em tempo real, e milhares de outras aplicações. Chega a ser difícil encontrar exemplos de equipamentos que não possuam dispositivos programáveis na sua constituição.

PESQUISA

Prezado leitor, faça uma pesquisa sobre o desenvolvimento dos chamados circuitos digitais. Crie uma linha do tempo destacando o surgimento das diversas famílias de circuitos digitais (dê exemplos). Discorra sobre as características destas famílias, tais como nível de integração, velocidade máxima, potência dissipada, tensão de operação, etc. Não esqueça de situar o surgimento das PAL, dos FPGA, dos chamados DSPs. Verifique também o que são os circuitos integrados híbridos. Dê exemplos. Emita seu parecer quanto ao futuro dos circuitos integrados. Qual o limite de integração? Estamos caminhando para circuitos integrados em nível atômico? Será possível usar o spin de um elétron para codificar os estados lógicos 1 e 0 de um circuito integrado? Se assim for, que velocidade se espera alcançar em tais circuitos eletrônicos?

EXERCÍCIOS DE REVISÃO

- 01) O que significa purificar um semicondutor?
- 02) Explique o Efeito Termiônico
- 03) Enumere algumas propriedades da Galena (Sulfeto de Chumbo)
- 04) Atualmente, onde o Selênio é usado?
- 05) Por que o Selênio foi substituído por outro semicondutor?
- 06) Como é possível se obter luz em semicondutores?
- 07) Por que a invenção do Led azul foi tão importante a ponto de seus inventores ganharem o prêmio Nobel em 2014?
- 08) O que é um transistor de contacto de ponto?
- 09) Em sua opinião, quem foi o inventor do Circuito Integrado?
- 10) O que é passivação de superfície?

Capítulo 3

INTRODUÇÃO AOS SEMICONDUTORES

“Dai-me um ponto de apoio e uma alavanca que erguerei o mundo.”
Arquimedes de Siracusa

- 3.1 Introdução
- 3.2 Dopagem de Semicondutores
- 3.3 Compostos Semicondutores
- 3.4 Exercícios de Revisão

Ao final deste capítulo, o leitor deverá ter boas noções sobre:

1. Introdução à Física dos Semicondutores
2. Processo de Dopagem de Semicondutores
3. Compostos Semicondutores

3.1. INTRODUÇÃO

Quando consideramos os materiais ao nosso redor, percebemos que podemos classificá-los de diversas formas. Uma delas é quanto à sua capacidade de conduzir corrente elétrica. De:

1. Isolantes ou Dielétricos
2. Condutores
3. Semicondutores

O que faz com que certos materiais sejam condutores, enquanto outros são isolantes?

A resposta a esta pergunta está na estrutura atômica deste material. Uma forma de explicar isto é por meio do diagrama de bandas destes materiais, conforme ilustrado na Figura 3.1.

A chamada **Banda de Valência** corresponde às possíveis energias dos elétrons da última camada do átomo, conhecida como **camada de valência**. A Banda de Condução

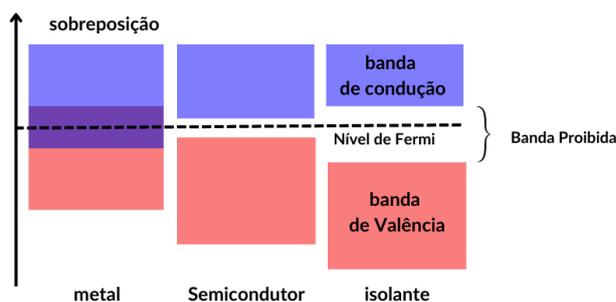


Figura 3.1: Diagrama de bandas dos materiais

corresponde as energias associadas ao elétron livre de seu núcleo original. Entre a Banda de Valência e a **Banda de Condução** pode existir uma separação, chamada de **Banda Proibida**. O nome decorre do fato de não existirem elétrons nesta faixa de energias.

Observe que no condutor a banda de valência e a banda de condução se sobrepõem, significando que à temperatura ambiente existem elétrons livres, enquanto que no isolante a separação entre estas bandas é grande o suficiente para garantir que para se obter elétrons livres será necessário a aplicação de um potencial elevado. No caso do semicondutor a chamada banda proibida não é tão grande que não possa ser ultrapassada com a aplicação de um potencial externo. Apesar de estar falando aqui na aplicação de um potencial, entenda-se que este potencial pode ser originário de uma fonte de calor, luz ou outra fonte de energia qualquer.

Os átomos semicondutores são materiais tetravalentes, ou seja, possuem quatro elétrons em sua última camada (camada de valência). Sendo assim, eles fazem quatro ligações entre si. Estas ligações (**covalentes**) são muito fortes porque cada átomo do material semicondutor passa a contabilizar oito elétrons em sua última camada. E esta é uma condição para a estabilidade, ou seja, oito elétrons em sua última camada (**Regra do octeto**). Assim, os semicondutores à temperatura ambiente são isolantes.

Os primeiros materiais semicondutores utilizados no desenvolvimento de dispositivos eletrônicos foram o Germânio (Ge) e o Silício (Si). Ambos os materiais formam estruturas cristalinas. Apesar de ainda ser usado atualmente, o uso do Germânio caiu muito, uma vez que o Silício é muito abundante em nosso planeta.

A palavra Silício vem do latim Silex ou Silicis que significa **Pedra dura**. Na natureza ele só é encontrado combinado com algum outro material. Em verdade, é o sétimo material mais abundante do universo, perdendo apenas para o hidrogênio, o hélio, o neônio, o oxigênio, o nitrogênio e o carbono. Aqui na Terra ele só é menos abundante do que o Oxigênio.

Em 1824, o químico sueco **Jöns Jacob Berzelius**¹ aqueceu o tetrafluoreto de silício com potássio, resultando desta reação o Silício isolado. Até então, um elemento químico desconhecido. O silício é um sólido duro, de cor cinza-escuro, apresentando um certo brilho metálico. Sua estrutura cristalina é semelhante à do diamante e suas reações químicas são semelhantes às do carbono.

A abundância do Germânio na Terra é bem menor se comparada ao Silício. Por esta razão a indústria dos semicondutores que optou inicialmente pelo uso do Germânio, passou a utilizar o Silício - que poderia ser obtido das rochas, da areia e do barro. Ademais, alguns compostos contendo Germânio são tóxicos para o ser humano.

Atualmente, muitos dos dispositivos eletrônicos estão sendo fabricados usando-se compostos semicondutores, tais como Arsenieto de Gálio, Arsenieto de Índio, dentre outros.

Algumas propriedades exploradas nos semicondutores são: luminescência (capacidade de produzir luz visível), sensibilidade térmica, possibilidade de purificação em níveis altíssimos (99,99999%), podem ter sua condutividade modificada radicalmente mediante a inserção de dopantes (impurezas), etc.

3.2. DOPAGEM DE SEMICONDUTORES

Para ser usado, o semicondutor bruto precisa primeiro passar por um processo de purificação. Isto foi possível graças ao processo de purificação desenvolvido por **Jan Czochralski** (pronuncia-se "ian chocralsqui") em 1916 quando estudava a cristalização de metais (muito antes da introdução dos semicondutores na eletrônica). O processo de Czochralski produz

¹ BERZELIUS
(B20/08/1779-+07/08/18
48) DESCOBRIU OS
ELEMENTOS QUÍMICOS
SELÊNIO, SILÍCIO, TÓRIO,
CÉRIO.



um monocristal. Na década de 1950 foi desenvolvida a técnica conhecida como **Fusão Zonal - Floating Zone**, em inglês. Para ser mais exato, a técnica da Fusão Zonal proposta por Henry Theuerer em 1955 é uma modificação de um método desenvolvido por William G. Pfann em 1952 para a purificação do Germânio. Nesta mesma década, William Shockley² definiu um método de purificação que realizava o bombardeamento de Silício visando sua purificação. A indústria começou a usar a técnica da Fusão Zonal nos anos 1970 e atualmente, a melhor técnica é a implantação iônica. Segundo alguns pesquisadores ela continuará sendo a melhor técnica ainda por um bom tempo.

Existem muitos métodos diferentes de purificação de semicondutores, cada um com suas vantagens e desvantagens. É interessante observar que nos anos 1950 surgiram diversos métodos distintos. Isso mostra como as empresas estavam investindo pesado no desenvolvimento destas técnicas, pois sabiam da importância de se ter material semicondutor o mais puro possível.

A Figura 3.3 ilustra um monocristal de Silício obtido através do Processo de Czochralski. O semicondutor purificado é conhecido como **Semicondutor Intrínseco**. É claro que não existe processo perfeito que resulte em 100% de pureza. O processo de Czochralski possui 99,99999% de pureza.

O semicondutor intrínseco é um excelente isolante, especialmente a baixas temperaturas. Para controlar a condutividade do semicondutor (ou seja, controlar se desejamos que ele se comporte como um isolante ou como um condutor), faz-se uma inserção inteligente (controlada) de impurezas adequadas na estrutura cristalina do monocristal semicondutor. Este processo de inserção de impurezas é conhecido como **Dopagem**. Os semicondutores dopados são conhecidos como **Semicondutores Extrínsecos**.

Basicamente, existem dois tipos de impurezas que podem ser usadas adequadamente no processo de dopagem; são elas: impurezas trivalentes (Boro-B, Índio-In) e impurezas pentavalentes (Fósforo-P, Antimônio-Sb).

Como vimos anteriormente, os semicondutores são ma-

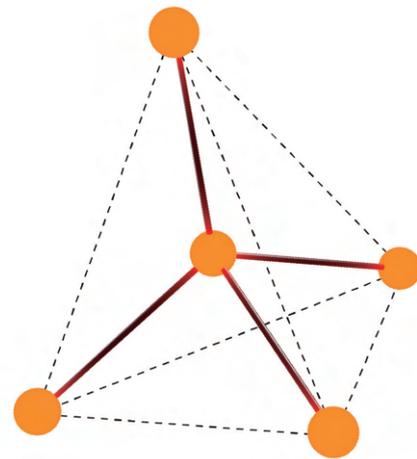


Figura 3.2: Estrutura atômica do Si/Ge.
(Clique para ver a animação)

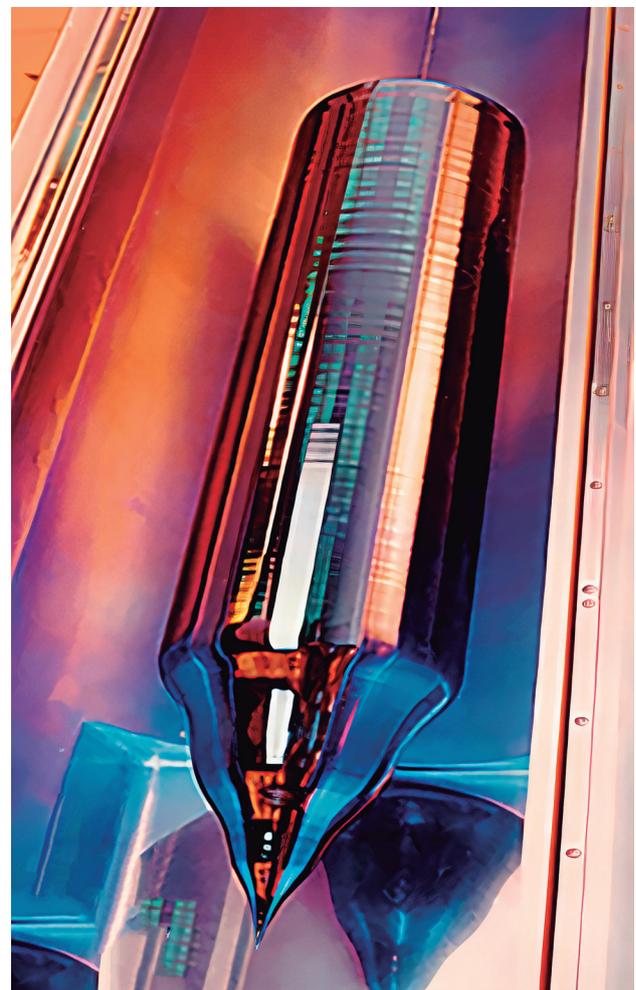
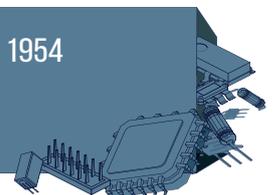


Figura 3.3: Monocristal de Si.
(Clique para ver a animação)

²PATENTE DE 1954



teriais tetravalentes, ou seja, necessitam de 4 ligações na camada de valência para se tornarem estáveis. Ora, a adição de uma impureza trivalente (3 elétrons na camada de valência) não irá completar as 4 ligações necessárias. Ficar faltando um elétron. O material semicondutor obtido por este processo de dopagem terá, portanto, falta de elétrons. Ou seja, será mais positivo. Assim, este material será denominado **Material Semicondutor Tipo P**.

A adição de uma impureza pentavalente terá o efeito contrário, pois um dos elétrons do átomo pentavalente ficará fracamente ligado ao seu núcleo. Então, o material semicondutor obtido por meio da dopagem usando-se átomos de impurezas pentavalentes será chamado de **Material Semicondutor Tipo N**.

É interessante notar aqui que no caso do material semicondutor tipo P, os portadores são chamados de lacunas ou buracos (cargas positivas). Estes portadores no material tipo P são chamados de **Portadores Majoritários**. A Física demonstra que as lacunas se comportam como cargas positivas verdadeiras, possuindo inclusive uma mobilidade diferente da mobilidade dos elétrons. Todavia em um material tipo P também existem elétrons, só que em menor quantidade (**portadores minoritários**).

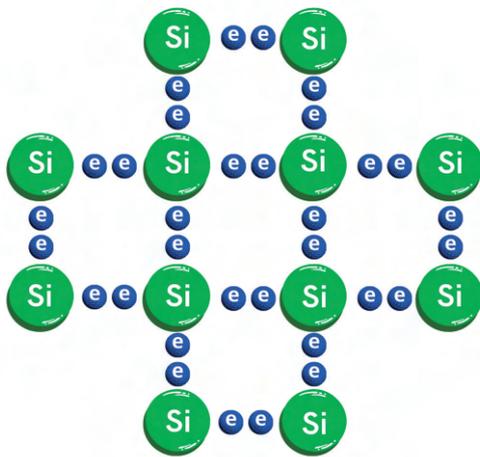


Figura 3.4: Átomos de Si

Da mesma forma, em um material tipo N os elétrons são os **Portadores Majoritários**; mas, existem lacunas em menor quantidade (**Portadores Minoritários**). O nível de dopagem de um semicondutor pode variar bastante, dependendo da aplicação, indo desde uma dopagem fraca, aqui representada pelo sinal negativo, até uma dopagem forte, aqui representada pelo sinal positivo. Assim, um material n- é um material tipo N fracamente dopado, ao passo que um material n+ representa um material tipo N fortemente dopado. O mesmo acontece com o material tipo P.

Na próxima figura ilustramos átomos de Silício e os materiais Tipo N e Tipo P obtidos pelo processo de dopagem.

3.3. COMPOSTOS SEMICONDUTORES

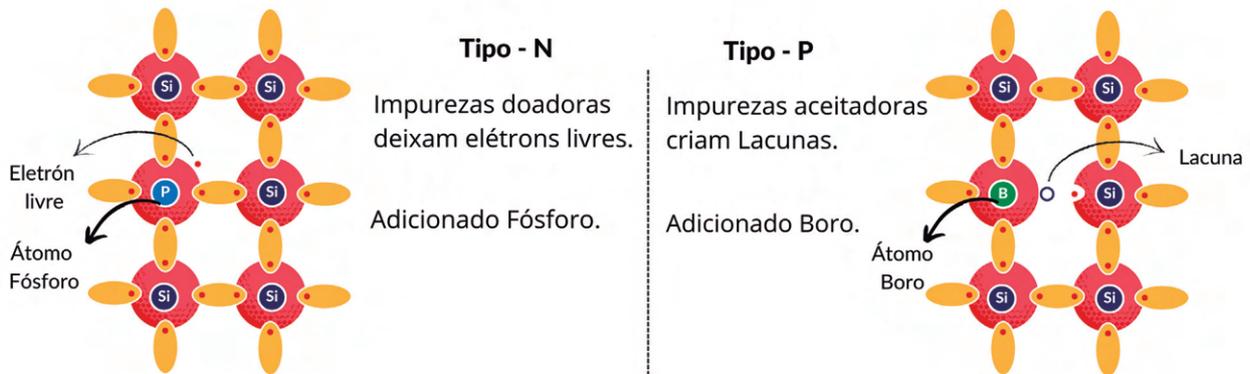


Figura 3.5: Materiais tipo N e tipo P

Ao invés de utilizar átomos de elementos químicos simples, tal como Silício e Germânio, pode-se usar compostos semicondutores tais como o Arsenieto de Gálio, Fosfeto de Índio, dentre outros. Normalmente, tais composto são formados por até 4 elementos químicos. A produção destes compostos semicondutores inicialmente era bem mais cara do que a produção usando-se Silício ou Germânio. Atualmente, apesar de ainda ser mais caro, esta diferença

caiu bastante. Por outro lado, estes compostos apresentam propriedades que não existem nos semicondutores simples.

- a) Custo mais elevado
- b) Maior quantidade de defeitos na rede cristalina
- c) Maior fragilidade
- d) Maior dificuldade no crescimento dos cristais

Por outro lado, os semicondutores compostos são ideais na produção de sensores e dispositivos optoeletrônicos, tais como leds, lasers, fotodiodos, etc.

Tomemos, por exemplo, o Arsenieto de Gálio. Se houver mais Ga do que Arsênio, o material semiconductor obtido é tipo P. Por outro lado, se houver mais Arsênio do que Gálio, temos um material semiconductor tipo N. O Arsenieto de Gálio pode substituir o Silício na fabricação de circuitos integrados lineares (osciladores, amplificadores) e digitais.

EXERCÍCIOS DE REVISÃO

- 01) Por que na temperatura ambiente os semicondutores se comportam como isolantes?
- 02) Por que a indústria dos semicondutores passou a usar preferencialmente o Silício ao invés do Germânio?
- 03) Quais as principais aplicações em que são usados compostos semicondutores? E quais são estes materiais semicondutores compostos?
- 04) Qual é o objetivo da purificação dos semicondutores? E por que depois de purificados inserimos impurezas?
- 05) O que são materiais intrínsecos e extrínsecos?
- 06) O que é um material semicondutor tipo N? E tipo P?
- 07) O que são portadores majoritários e minoritários? Exemplifique para os materiais P e N.
- 08) Faça uma pesquisa sobre os métodos de purificação: Czochralski, Zona Flutuante e Implantação Iônica.

Capítulo 4

DIODOS DE JUNÇÃO

“Daria tudo que sei pela metade do que ignoro.”
René Descartes

4.1 Diodo Semicondutor

4.1.1 Polarização Direta

4.1.2 Polarização Reversa

4.1.3 Resistências do Diodo

4.1.4 Modelo para o diodo real

4.1.5 Análise DC

4.2 Folha de Especificações de Diodos

4.3 Exercícios de Revisão

Ao final deste capítulo, o leitor deverá ter boas noções sobre:

1. O Diodo
2. Polarização do Diodo
3. Resistência do Diodo
4. Modelo para o Diodo
5. Análise DC de circuitos com Diodo
6. As folhas de especificações do Diodo

4.1. DIODO SEMICONDUCTOR

O dispositivo eletrônico semicondutor mais simples é o diodo de junção. Tal diodo é obtido pela junção de um material tipo P com um material tipo N, tal como ilustrado na Figura 4.1. Seus terminais são chamados **Anodo (A)** e **Catodo (K)**. Alguns autores chamam estes terminais de **Ânodo** e **Cátodo**.

Quando estes dois materiais são unidos, ocorre inicialmente uma difusão de lacunas do lado P para o lado N e de elétrons do lado N para o lado P. Neste processo, na região central (junção) forma-se uma região de

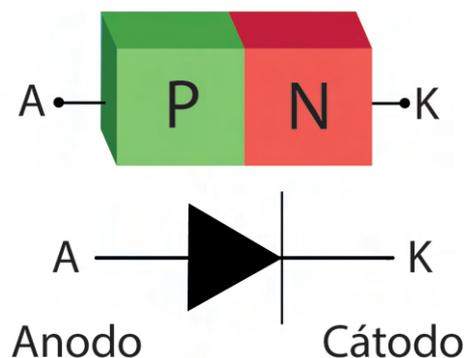


Figura 4.1: Diodo de Junção PN e sua simbologia.

cargas elétricas descobertas (íons). Esta região é chamada de **Zona de Depleção** ou **Barreira de Potencial**.

Note que no lado P da junção os íons serão negativos, pois os átomos de impureza trivalente receberam um elétron extra proveniente do lado N. Da mesma forma, os íons no lado N da junção são íons positivos, pois os átomos de impureza pentavalente receberam uma lacuna perdendo seu elétron extra (que não fazia ligações com os átomos de Silício).

Note, pela Figura 4.2, que o potencial V_0 atua no sentido contrário de movimento dos portadores majoritários. Assim, após o equilíbrio, a corrente, chamada corrente de difusão, irá cessar e nenhum portador majoritário passará de um lado para o outro da junção. Apenas portadores minoritários é que poderão formar alguma corrente. Esta corrente é muito pequena e é chamada de corrente de fuga. Em boa parte das aplicações, podemos simplesmente desprezá-la.

Dizemos que na região da junção ocorre uma recombinação, ou seja, um elétron se aniquila ao encontrar um buraco (ou lacuna). Note que a medida em que mais e mais elétrons e lacunas se recombinam, vai se formando um campo elétrico na região da junção cuja orientação impede que as cargas positivas (lacunas) e as cargas negativas (elétrons) continuem se deslocando da forma explicada anteriormente. Em outras palavras, novas lacunas não vão poder ultrapassar a junção devido aos íons positivos no lado N. Da mesma forma, os elétrons não vão poder ultrapassar a junção devido aos íons negativos no lado P do semiconductor.

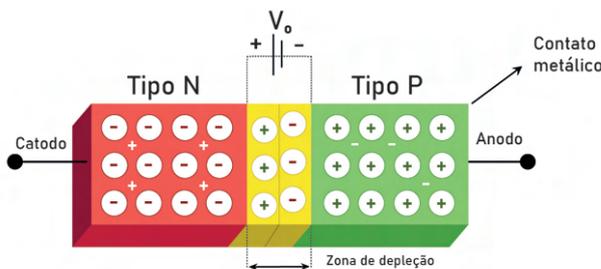


Figura 4.2: Diodo de Junção PN e sua simbologia.

Portanto, somente com a aplicação de algum potencial externo é que poderemos "auxiliar" os portadores a ultrapassarem tal barreira. Vamos, então, analisar o que acontece com a zona de depleção quando o diodo é polarizado diretamente (tensão do anodo maior do que a tensão do catodo) e reversamente (caso contrário).

4.1.1. POLARIZAÇÃO DIRETA

Dizemos que um diodo está polarizado diretamente quando o potencial do anodo é maior do que o potencial do catodo. Em verdade, o diodo necessita de uma tensão de polarização direta acima de um certo valor característico de cada material semiconductor. Assim, os diodos de Silício necessitam de cerca de 0,7V para iniciar a condução, enquanto que os diodos de Germânio necessitam de apenas 0,3V. As folhas de especificações dos fabricantes (Datasheets) detalham para cada diodo os valores típicos de condução. É comum representarmos esta tensão por V_y (**Tensão de joelho**). Note que o campo elétrico que se forma agora é oposto ao campo elétrico existente na junção do diodo. Uma vez que o campo elétrico externo ultrapasse o campo elétrico da junção, tem-se um campo resultante cujo sentido é do material P para o material N. Assim, a corrente resultante devido a uma polarização direta é uma corrente de portadores majoritários e, portanto, pode vir a ser de elevado valor. A corrente que circula em um diodo é dada pela **Equação de Schokley**:

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{v_D}{\eta V_T}} - 1 \right)$$

(4.1)

Em que:

I_s é a chamada corrente de saturação reversa (é uma corrente de fuga formada por portadores minoritários).

η é uma constante que, normalmente, varia entre 1 e 2 e depende da corrente que circula no diodo (baixa, média ou alta) e do tipo de semiconductor. Costuma ser chamada de “constante de idealidade”.

V_T é denominada de Tensão Térmica, sendo dada por

$$V_T = \frac{kT_K}{q} \quad (4.2)$$

em que k é a constante de Boltzmann ($k \approx 1,380649 \times 10^{-23}$ J/K), q é o módulo da carga do elétron ($q \approx 1,6 \times 10^{-19}$ C) e T_K é a temperatura ambiente em Kelvin.

Aproveito o momento para chamar a atenção do estudante de que não se deve dizer “graus Kelvin”. Kelvin é uma medida absoluta e, portanto, não recebe a denominação de grau Kelvin.

A equação para a corrente no diodo de Silício, com corrente média ou alta e a 25°C pode ser dada pela expressão

$$I_D = I_s \left(e^{\frac{v_D}{25mV}} - 1 \right) \quad (4.3)$$

A curva característica de operação de um diodo de junção PN comum está ilustrada a seguir.

Olhando para o eixo das correntes, note a diferença de escala da parte superior em relação à parte inferior. Isto foi feito para facilitar a visualização da curva característica. A mesma observação deve ser feita com relação ao eixo das tensões.

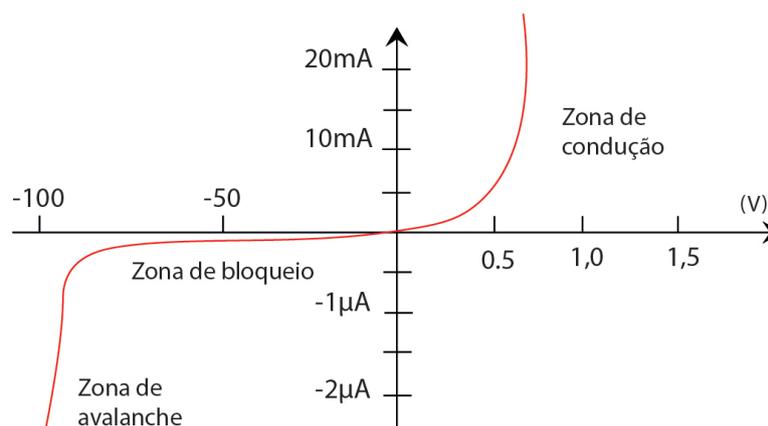


Figura 4.3: Curva característica de operação do diodo

4.1.2. POLARIZAÇÃO REVERSA

Dizemos que um diodo está polarizado reversamente quando o potencial do anodo é menor que o potencial do catodo. Como a tensão no diodo é, por convenção, a tensão $V_{anodo} - V_{catodo}$, então, $v_d < 0$ neste caso. Esta é a situação ilustrada na parte esquerda da curva característica do diodo. Note que o campo elétrico externo reforça o campo elétrico na junção do diodo. Por esta razão, a oposição de portadores majoritários é maior ainda, ou seja,

a barreira de potencial aumenta. A corrente que atravessa o diodo, nesta condição, é uma corrente muito pequena (formada por portadores minoritários) chamada corrente de saturação reversa. Caso a tensão reversa seja aumentada além de um certo limite, o diodo poderá queimar devido a um fenômeno conhecido como **Ruptura por Avalanche**.

Percebe-se, então, que na polarização direta a largura da zona de depleção é reduzida, enquanto que na polarização reversa ela é aumentada.

4.1.3. RESISTÊNCIAS DO DIODO

Existem várias definições em se tratando da resistência de um diodo.

Resistência Estática: Definida para sinais DC, corresponde ao quociente entre a tensão DC entre os terminais do diodo e a corrente DC que o atravessa. Apresenta baixos valores para o diodo polarizado diretamente e altos valores para o diodo polarizado reversamente.

Resistência Dinâmica: Definida para sinais AC, corresponde a taxa de variação instantânea da tensão em relação à corrente.

$$r_d = \frac{dV_d}{dI_d} = \frac{25mV}{I_d} \quad (4.4)$$

Resistência AC Média: Definida para sinais AC, corresponde a um valor médio de resistência. É calculada pela expressão a seguir:

$$r_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} \quad (4.5)$$

Exercício (Alunos de Engenharia): Demonstre a Equação 4.4 para a resistência dinâmica do diodo vista anteriormente.

4.1.4. MODELO PARA O DIODO REAL

O diodo real pode ser modelado por meio da associação em série de um diodo ideal, uma bateria de tensão igual a V_y e uma resistência. Abaixo ilustramos este modelo e a curva característica idealizada.

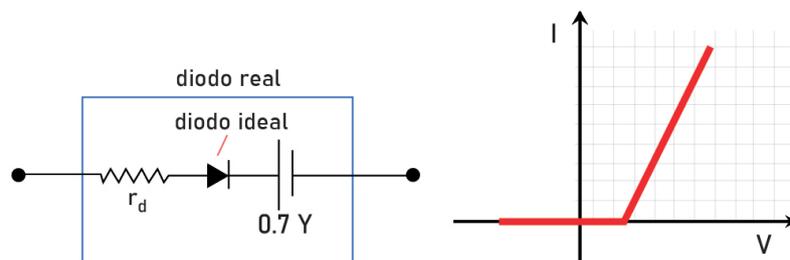


Figura 4.4: Modelo idealizado para o diodo

4.1.5. ANÁLISE DC

Analisaremos um circuito simples usando apenas uma fonte DC ajustável, um diodo e um resistor, conforme figura a seguir.

Observe que podemos escrever as seguintes equa-

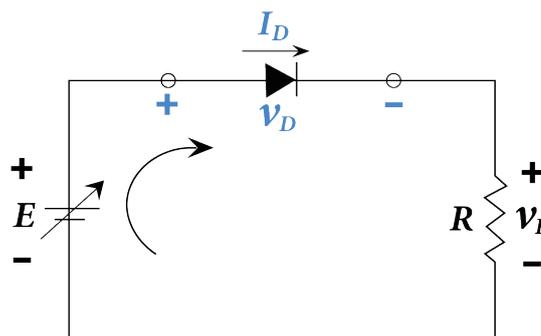


Figura 4.5: Diodo em circuito DC

ções (onde a primeira é a equação de Shockley):

(4.6)

$$\begin{cases} i_d = f(v_d) \\ i_d = -\frac{v_d}{R} + \frac{E}{R} \end{cases}$$

Note que a segunda equação é a equação de uma reta. Aqui chamada de **Reta de Carga**. A primeira equação descreve o comportamento do diodo e a segunda é a equação imposta pelo circuito externo. Como sabemos, a solução de um sistema de equações deve satisfazer a todas as equações do sistema. Assim, a solução deste sistema corresponde ao ponto (v_d, i_d) que atende às duas equações. Este ponto é chamado de **Ponto Quiescente de Operação**, ou Ponto Q.

O sistema a duas equações anteriores pode ser resolvido graficamente, traçando-se a equação da reta em cima do gráfico da curva característica do diodo em questão.

O ponto de intersecção entre a reta de carga e a curva do diodo é o ponto que satisfaz as duas equações anteriores. Este ponto de operação do diodo, sob polarização DC, é justamente o ponto Quiescente citado anteriormente. A palavra quiescente expressa exatamente a ideia de estático, ou seja, aquilo que não se move.

Note que, como a fonte DC é ajustável, podemos ir variando sua tensão e anotando a tensão e a corrente no diodo (exibida na fonte). Caso seja usada uma fonte de alimentação sem indicação da corrente que a carga solicita, deve-se inserir, em série com o diodo, um multímetro configurado como amperímetro para se medir a corrente no mesmo. Se o diodo fosse uma chave perfeita, ele passaria totalmente a tensão da fonte para a carga. Então, se o sinal da fonte, ao invés de ser um valor DC constante, for, por exemplo, um sinal senoidal, o ponto Q ficará percorrendo a reta de carga de um lado para o outro.

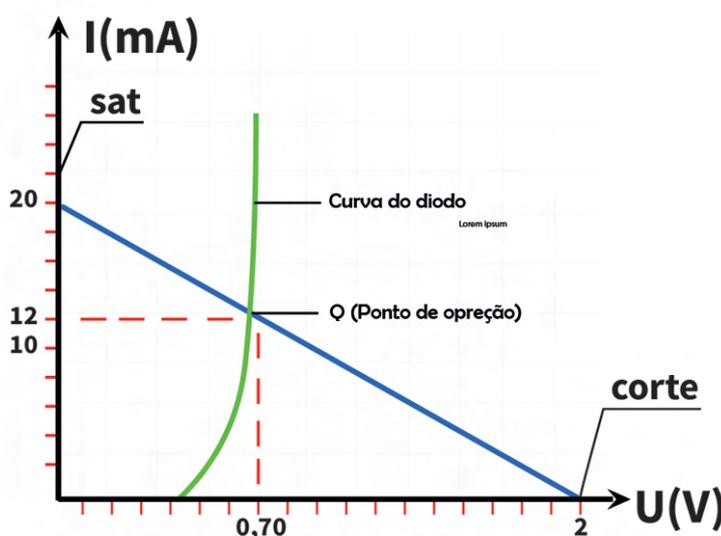


Figura 4.6: Ponto de operação quiescente do diodo

4.2. FOLHA DE ESPECIFICAÇÕES DE DIODOS

A seguir ilustramos algumas informações contidas nas folhas de especificações de um fabricante de diodo. Usaremos, como ilustração, o diodo 1N4007.

Outras características importantes de um diodo são o tempo de recuperação reversa (tipicamente $5 \mu\text{s}$) e a capacitância da junção (tipicamente 15pF). Vimos anteriormente que quando o diodo é polarizado diretamente há uma injeção de um grande número de portadores majoritários de um lado do diodo para o outro. Quando o diodo é cortado, ele leva um tempo até que se comporte como uma chave aberta. Isso ocorre devido ao retorno destes

portadores majoritários para o lado de onde vieram. Note que este retorno ocorre devido à direção do campo elétrico resultante. É este tempo que chamamos de **Tempo de Recuperação Reversa**.

Rating	Symbol	1N4007	Unit
Peak Repetitive Rev. Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage	VRRM VRWM VR	1000	V
Non-Repetitive Peak Rev. Voltage (halfwave, single phase, 60 Hz)	VRSM	1200	V
Average Rectified Forward Current (single phase, resistive load, 60Hz, T _A = 75 °C)	IO	1.0	A
Non-Repetitive Peak Surge Current (surge applied at rated load cond.)	IF SM	30.0 (for 1 cycle)	A

Figura 4.7: Especificações máximas para o diodo 1N4007

Rating	Symbol	Typ	Max	Unit
Maximum Instantaneous Forward Voltage Drop (i _F = 1.0A, T _J = 25 °C)	VF	0.93	1.1	V
Maximum Full-Cycle Average Forward Voltage Drop (IO = 1.0A, T _L = 75 °C, 1 inch leads)	VF(AV)		0.8	V
Maximum Reverse Current (rated DC voltage) (T _J = 25 °C) (T _J = 100 °C)	IR	0.05 1.0	10 50	μA
Maximum Full-Cycle Average Reverse Current (IO = 1.0A, T _L = 75 °C, 1 inch leads)	IR(AV)		30	μA

Figura 4.8: Características elétricas

EXERCÍCIOS DE REVISÃO

- 01) O que é um diodo de junção?
- 02) Mostre a curva característica de operação de um diodo retificador.
- 03) Por que se forma a zona de depleção?
- 04) Por que o diodo só conduz em um sentido?
- 05) É possível que um diodo retificador conduza se a tensão no anodo for negativa?
E se a tensão no catodo for positiva?
- 06) O que é tensão de joelho?
- 07) O que é o fenômeno de ruptura por avalanche?
- 08) Por que é formada uma barreira positiva no lado N e uma barreira negativa no lado P?
- 09) Qual a interpretação física da resistência dinâmica do diodo?
- 10) O que é a reta de carga em um circuito retificador como mostrado na Figura 4.5?
- 11) O que é o ponto quiescente de operação ou Ponto Q?
- 12) Por que o ponto de operação de um diodo é dado pela interseção da curva do diodo com a reta de carga do circuito?
- 13) Por que um diodo que estava polarizado diretamente, ao ser polarizado reversamente não corta imediatamente?
- 14) Em que situações o Tempo de Recuperação Reversa não é importante? E em quais aplicações ele é fundamental?
- 15) Deduza, usando as Leis de Kirchhoff, a equação da reta de carga do circuito na Figura 4.5.

Capítulo 5

CAPACITÂNCIAS DA JUNÇÃO PN

“O acaso tem um papel fundamental no universo.”
Werner Heisenberg

5.1 Introdução

5.2 Fenômenos Capacitivos

Ao final deste capítulo, o leitor deverá ter boas noções sobre:

1. Fenômenos de Transporte
2. Curvas Características

5.1. CONCEITOS BÁSICOS

Vimos anteriormente que a largura da chamada Zona de Depleção varia com a condição de polarização da junção PN. Ora, esta região de depleção é uma região que se comporta como um dielétrico, tendo potenciais opostos em cada um de seus lados. Portanto, o que temos é um capacitor.

$$Q = C \times V$$

(5.1)

Sabemos que a capacitância de um capacitor de placas paralelas depende da permissividade elétrica (ϵ) do meio dielétrico do capacitor, depende diretamente da área das placas (A) e varia inversamente com a distância entre estas placas (d), conforme vimos no Capítulo

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

(5.2)

Existem dois fatos que precisam ser levados em conta:

- a) Taxa de variação da carga entre os terminais do diodo em função da tensão aplicada (dQ/dV) – Fenômeno mais conhecido como Transição de Portadores.
- b) Quantidade de portadores que difundem de uma região para outra.

Estes dois fatos irão ser responsáveis por dois tipos de capacitância, conforme veremos a seguir.

5.2. FENÔMENOS CAPACITIVOS

Quando o diodo é polarizado diretamente, a largura da zona de depleção (d) diminui e a capacitância aumenta (Ver Equação 5.2). Na condição de polarização direta, a corrente é formada basicamente por portadores majoritários, sendo, portanto, uma corrente de difusão,

uma vez que os portadores majoritários movimentam-se para as regiões onde sua densidade é menor. Assim, esta capacitância é chamada de Capacitância de Difusão.

Quando a polarização do diodo é reversa, a largura da zona de depleção (d) aumenta e, portanto, a capacitância entre os terminais do diodo diminui, uma vez que a distância entre as placas aumenta. Note que é natural que a capacitância diminua porque passamos a ter menos portadores (menos carga) armazenados nas regiões P e N fora da Zona de Depleção. Nesta condição, praticamente não existe mais difusão, uma vez que a corrente é formada por portadores minoritários. Por outro lado, a taxa de variação de carga armazenada neste capacitor em função da tensão aplicada é

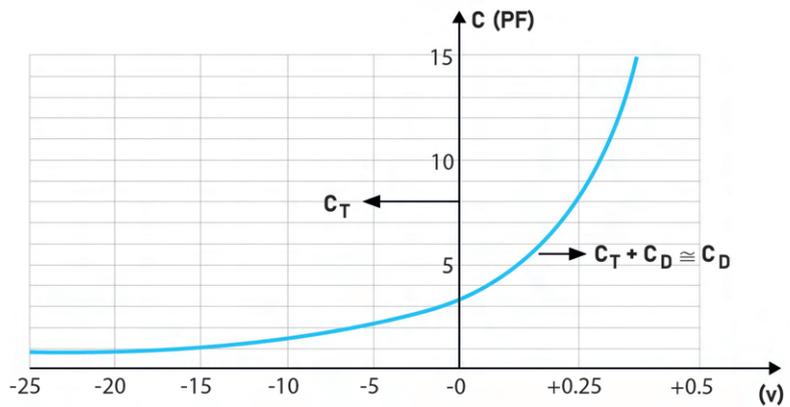


Figura 5.1: Capacitância em um diodo

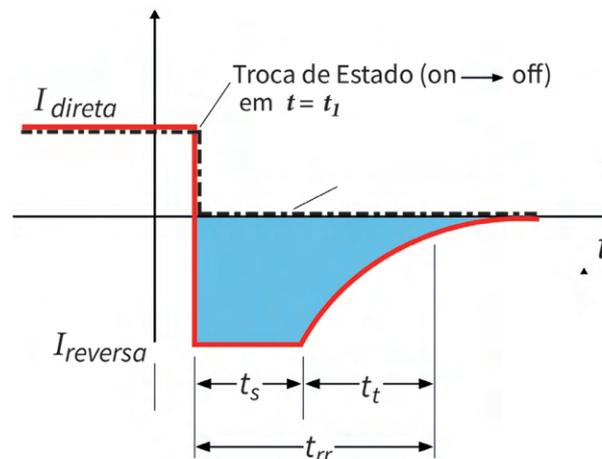


Figura 5.2: Tempo de Recuperação Reversa do diodo

pequena. Aqui o que se observa é o fenômeno de **transição**. Chamamos esta capacitância de **Capacitância de Transição**. A Figura a seguir ilustra a capacitância de um diodo semiconductor em função da tensão entre seus terminais.

Quando desejamos respostas rápidas não podemos ter valores elevados de capacitância. Observe que os portadores majoritários que foram injetados por difusão durante a polarização direta, causaram um aumento na carga armazenada. Assim, quando um diodo é polarizado reversamente, ele precisa de um tempo para remover esta carga armazenada. Em outras palavras, ele não corta instantaneamente. Este tempo chama-se **Tempo de Recuperação Reversa**, denotado por t_{rr} .

Para se ter uma ideia o tempo de recuperação reversa do diodo retificador 1N4007 é de $2\mu s$, ao passo que para um diodo de chaveamento como o 1N4148 o tempo de recuperação reversa é de apenas $4ns$. Isto significa 500 vezes mais rápido!

O tempo de recuperação reversa é composto pela soma de dois tempos: O intervalo de armazenamento e o intervalo de transição.

Sua especificação é muito importante em sistemas de chaveamento em alta velocidade.

Intervalo de Armazenamento (t_s): é o tempo necessário para se retirar os portadores que foram injetados durante a polarização reversa.

Intervalo de Transição (t_t): é o tempo necessário para que a corrente reversa reduza até os níveis de corrente de saturação reversa.

Note que a área abaixo do eixo dos tempos representa a quantidade de carga (Coulomb) que foi armazenada no outro lado da junção durante a condução direta do diodo.

Existem diodos que são construídos para ter um tempo de recuperação reversa extremamente reduzido. Para estes diodos define-se um fator de suavização (S). Existem diodos

conhecidos como diodos de recuperação suave e diodos de recuperação abrupta (usados em altas frequências). Este é um assunto que não será visto nesta série sobre Eletrônica Analógica; reservamos o mesmo para o livro da Série 18 "Série 18 - Eletrônica de Potência". Abaixo ilustramos as curvas de recuperação suave e abrupta.

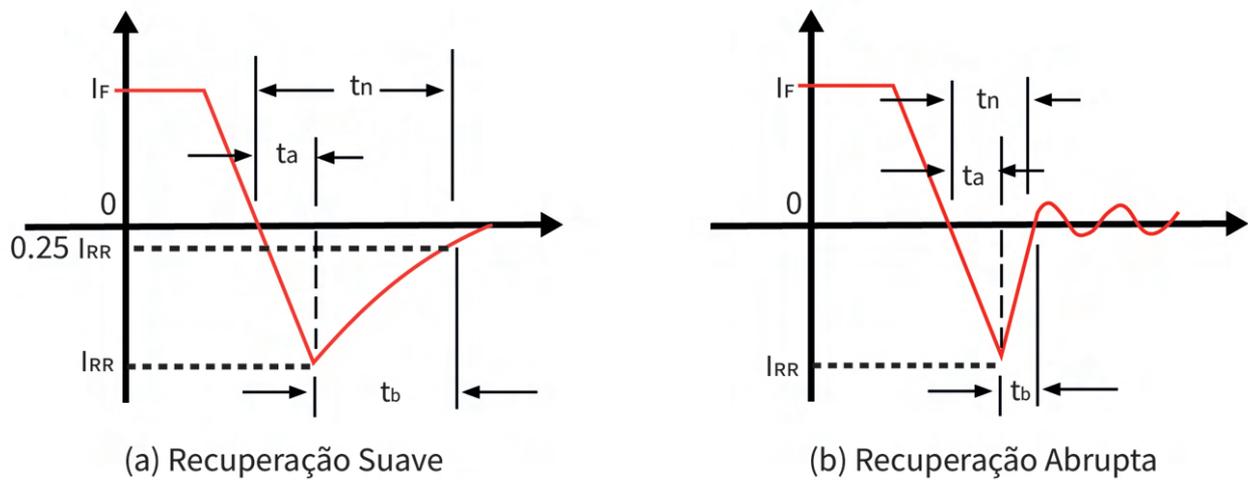


Figura 5.3: Recuperação Reversa Suave e Abrupta

Vamos considerar que $t_b \ll t_a$, de modo que $t_{rr} \approx t_a$ e chamar a carga acumulada na junção de Q_{RR} . Assim, podemos escrever que

$$Q_{RR} = \frac{t_{rr} \times I_{RR}}{2} \tag{5.3}$$

Mas, note que

$$\frac{di}{dt} = \frac{I_{RR}}{t_a} \approx \frac{I_{RR}}{t_{rr}} \tag{5.4}$$

Logo,

$$t_{rr} = \frac{I_{RR}}{\left(\frac{di}{dt}\right)} = \frac{\left(\frac{2Q_{RR}}{t_{rr}}\right)}{\left(\frac{di}{dt}\right)} \tag{5.5}$$

Finalmente, podemos escrever:

$$t_{rr}^2 = \frac{2Q_{RR}}{\left(\frac{di}{dt}\right)} \Rightarrow t_{rr} = \sqrt{\frac{2Q_{RR}}{\left(\frac{di}{dt}\right)}} \tag{5.6}$$

Da Eq. (5.4), obtemos:

$$I_{RR} = t_{rr} \times \left(\frac{di}{dt} \right) = \sqrt{2 \frac{di}{dt} Q_{RR}}$$

(5.7)

EXERCÍCIO 5.1:

Para um determinado diodo a taxa de queda da corrente no tempo é de $30\text{A}/\mu\text{s}$ e o tempo de recuperação reversa é de $t_{rr}=2\mu\text{s}$. Qual o valor de pico da corrente reversa para este diodo?

EXERCÍCIO 5.2:

Para o exercício anterior, qual é o valor da Carga acumulada na junção?

EXERCÍCIOS DE REVISÃO

- 01) Por que quando o diodo está polarizado diretamente existe ainda uma capacidade de transição?
- 02) O que é o tempo de recuperação reversa?
- 03) O que é tempo de armazenamento?
- 04) Ilustre a Recuperação Reversa Suave e a Recuperação Reversa Abrupta.
- 05) Explique a equação 5.3.

Capítulo 6

DIODOS ESPECIAIS - PARTE 1

“Antes de mais nada, a preparação é a chave para o sucesso.”

Alexander Graham Bell

6.1 Introdução

6.2 Diodos Emissores de Luz

6.3 Diodos Zéner

Ao final deste capítulo, o leitor deverá ter boas noções sobre:

1. **Conceitos básicos sobre Efeito Zéner, Efeito Avalanche**
 2. **O Diodo Emissor de Luz**
 3. **O Diodo Zéner**
 4. **Reguladores de Tensão**
-

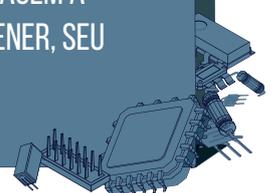
6.1. INTRODUÇÃO

Nem todo diodo tem a finalidade de retificar um sinal. Existem diodos com outras finalidades completamente diferentes, tais como: Servir de tensão de referência, sinalizar visualmente, uso como sensor em aplicações ópticas, servir como um capacitor, dentre outras possíveis aplicações.

Algumas pessoas pensam que todo dispositivo semicondutor é necessariamente feito de Silício ou Germânio. Este é um erro muito comum entre pessoas que estão iniciando seus estudos na Eletrônica. Por exemplo, Silício ou Germânio não são utilizados em Diodos Emissores de Luz (LEDs, do inglês Light Emitting Diode). Para se produzir luz é preciso que exista uma emissão intensa de fótons que vão para um estado excitado e decaem logo em seguida para seu estado normal de menor energia. Ao decair, eles precisam devolver esta diferença de energia na forma de ondas. O comprimento desta onda define a cor do LED. Um ponto interessante é que a tensão necessária para se polarizar diretamente um LED não é 0,7V como ocorre no diodo retificador. Esta tensão depende da cor do LED, conforme veremos mais adiante.

Um outro dispositivo eletrônico que estudaremos nesta aqui é o chamado Diodo Zéner¹. O diodo Zéner é o resultado de uma dopagem mais rica do semicondutor. Isto leva o diodo a uma tensão de ruptura reversa bem inferior às tensões obtidas com o diodo retificador. Desta forma, o diodo reversamen-

¹UMA HOMENAGEM A
CLARENCE ZENER, SEU
INVENTOR



te polarizado apresenta uma tensão aproximadamente constante entre seus terminais, sem risco de queima devido à baixa potência. Em verdade, existem dois tipos de diodos Zéner: por **Efeito Avalanche** e por **Efeito Zener**. O Efeito Zéner ocorre quando um campo elétrico produzido pela aplicação de um potencial reverso é forte o suficiente para quebrar ligações covalentes aumentando o número de portadores que formam uma corrente reversa. Neste caso, a região de ruptura é chamada de **Região Zéner**. No Efeito avalanche não é um campo elétrico que vai multiplicar os portadores por quebra de ligações covalente. O que acontece é que um elevado potencial acelera elétrons que arrancam outros elétrons por colisão produzindo uma corrente. Os diodos Zéner por Efeito Zéner possuem tensões baixas (no máximo 5,5V), enquanto que os diodos Zéner por efeito avalanche possuem tensões maiores (máximo de 200V). Naturalmente, existe uma corrente máxima e uma corrente mínima que precisam ser observadas a fim de garantir o perfeito funcionamento deste diodo como fonte de tensão de referência. Um detalhe interessante é que enquanto um diodo de sinal (retificador) caso entre na região de ruptura irá queimar, a ruptura por Efeito Zener não destrói o mesmo, desde que a corrente seja limitada. No primeiro caso não conseguimos limitar...é como jogar uma pedrinha em uma montanha gelada. Se a avalanche iniciar não tem como parar!

6.2. DIODOS EMISSORES DE LUZ

Os chamados LEDs são diodos que, quando polarizados diretamente, emitem uma luz que pode ser branca, verde, laranja, azul, vermelha, amarela, etc. Também existem LEDs que emitem luz em uma frequência fora da faixa de luz visível ao olho nu, tal como Infravermelho e ultravioleta.

De uma maneira geral, os leds são construídos de modo a existir uma grande recombinação elétron-lacuna. Devido a esta recombinação, é liberada energia na forma de fótons em uma dada frequência que pode estar na faixa da luz visível ou não. A cor de um LED é determinada pelo material semicondutor usado e pela impureza. Assim, Arsenieto de Gálio (GaAs) dopado com Fósforo pode emitir luz vermelha ou amarela, a depender da concentração. O Silício não serve para a produção de LEDs uma vez que o mesmo não consegue uma boa emissão de luz. Os materiais comumente usados na fabricação de LEDs são Arsenieto de Gálio e Alumínio, Fosfato de Alumínio, Índio e Gálio, Fosfato de Gálio, Nitreto de Gálio.

Como sabemos, a cor de um objeto representa a frequência (ou comprimento de onda) da componente de luz que é refletida difusamente. Diferentemente dos diodos retificadores, os LEDs possuem tensões bem maiores e que dependem da cor do LED.

Na verdade, a luz que é emitida pelo

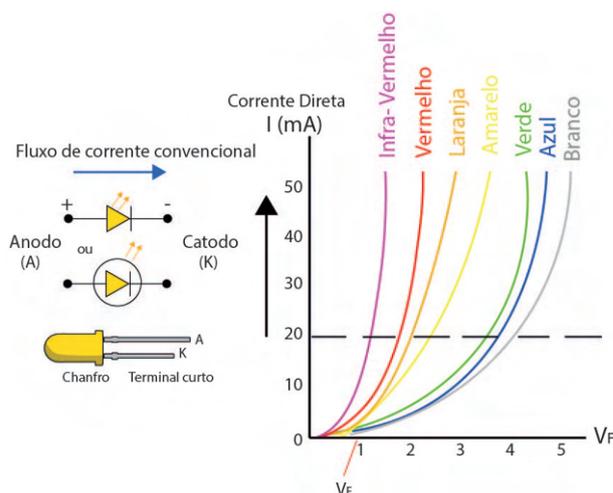


Figura 6.1: Tensão e corrente para LEDs de várias cores

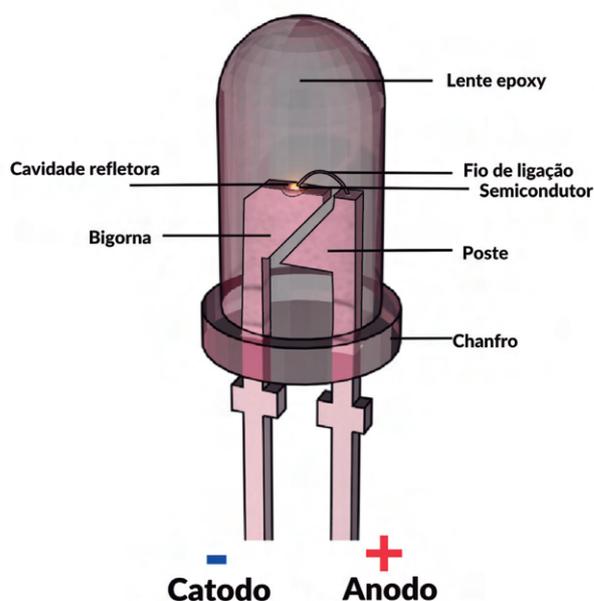
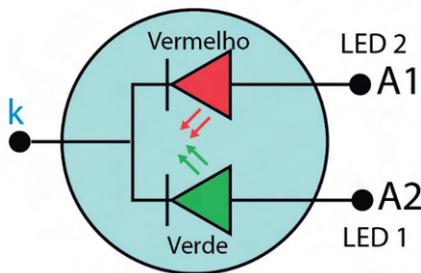


Figura 6.2: Estrutura interna de um LED de várias cores (clique para ver a animação)

LED devido ao processo de recombinação é pouca. Assim, o LED é construído de tal forma a direcionar o feixe luminoso através de uma espécie de lente.

Recentemente foi criado o LED branco (o de maior brilho). Exis-te também o chamado LED RGB e os multicoloridos. O LED RGB é formado pela união de três LEDs, podendo ser catodo comum ou anodo comum. Os LEDs multicoloridos podem ser formados por apenas dois LEDs.

A seguir ilustramos um LED multicolorido\index{LED!LED multicolorido}. Observe a variação das cores em função da corrente de polarização direta.



Cor de Saída	Vermelho	Laranja	Amarelo	Verde
Corrente Led 1	0	5mA	9.5mA	15mA
Corrente Led 2	10mA	6.5mA	3.5mA	0

Figura 6.3: LED multicolorido

O LED RGB pode gerar inúmeras cores a partir da combinação das cores vermelha, verde e azul.



Figura 6.4: LED multicolorido (Clique para ver a animação)

Tensão dos LEDs em função da cor:

CORES	Tensão		Corrente
	MIN.	MAX.	
Vermelho	1,8V	2,0V	20mA
Amarelo	1,8V	2,0V	20mA
Laranja	1,8V	2,0V	20mA
Verde	2,0V	2,5V	20mA
Azul	2,5V	2,5V	20mA
Branco	2,5V	3,0V	20mA

Figura 6.5: Tensão do LED

6.3. DIODOS ZÉNER

Existe um tipo de diodo que é fabricado para operar na região de polarização reversa. Em um diodo comum, reversamente polarizado, a corrente que flui pelo mesmo é muito baixa. Caso a tensão reversa aumente a ponto de atingir a tensão de ruptura, ocorre a quebra das ligações covalentes por efeito avalanche e o diodo queima. Isto ocorre em alguma centenas de volts.

No caso de um diodo zéner, o nível de dopagem é bem maior. Isto reduz a tensão de ruptura e um outro efeito passa a ser observado: Efeito Zéner. Este efeito foi primeiramente estudado por Clarence Zener, um físico americano formado em Harvard.

Assim, observa-se que os diodos zéners com tensão de ruptura abaixo de 5 Volts baseiam seu funcionamento no efeito zéner; enquanto que acima de 5 Volts predomina o efeito

avalanche. Com a tensão de ruptura reduzida é possível operar de modo seguro dentro de uma certa faixa de operação determinada pelo circuito externo. É claro que se a corrente ultrapassar um certo valor (I_{Zmax}), a potência dissipada irá destruir o dispositivo. Veja a seguir a curva de operação.

A figura a seguir ilustra a curva de operação de um diodo zéner. Note que na região de polarização direta, o diodo zéner se comporta como um diodo comum. Na região de polarização reversa, existe a necessidade de uma corrente mínima para que o zéner consiga manter a tensão constante entre seus terminais. Uma corrente acima da corrente máxima leva o dispositivo à destruição.

A corrente máxima que pode atravessar o zéner é encontrada pela Eq.(\ref{Izmax}). Uma vez obtida a corrente máxima, pode-se encontrar a menor corrente que garante que o Zéner ainda encontra-se na Região Zéner.

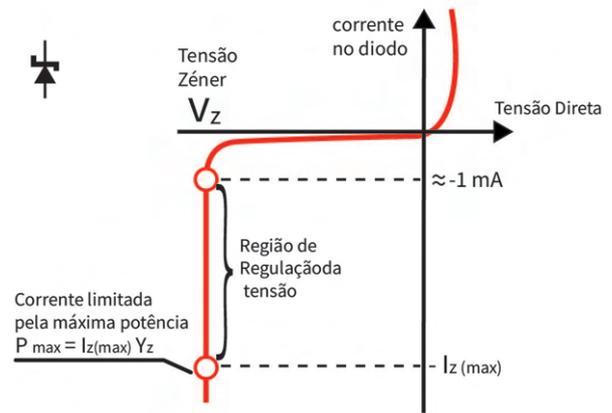


Figura 6.6: Curva característica de operação do diodo Zéner e simbologia

$$I_{Z(max)} = \frac{P_Z}{V_{Z(nom)}}$$

$$I_{Z(min)} = \frac{I_{Z(max)}}{10}$$

(6.1)

Neste texto, o valor da corrente mínima é adotada como 10% do valor da corrente máxima. Existem outros autores que usam valores diferentes destes, tais como 15% e 20%. É claro que não é uma boa prática trabalhar perto do valor mínimo. Caso a corrente caia abaixo deste valor mínimo, o zéner não conseguirá manter o valor da tensão zéner constante e, para fins práticos, a corrente do mesmo deve ser considerada nula.

MODELO PARA O DIODO ZÉNER

A seguir ilustramos o modelo matemático para o diodo zéner.

Em função deste modelo, deduzimos a seguinte equação para o mesmo

$$V_Z = V_{Z0} + r_z \times I_Z \quad (6.2)$$

REGULADOR DE TENSÃO COM DIODO ZÉNER

Vamos iniciar o estudo da utilização dos diodos zéners em circuitos destinados a

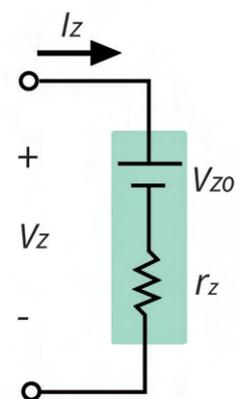


Figura 6.7: Modelo do diodo Zéner

regulação da tensão. Basicamente, existe dois tipos de reguladores:

- a) Série
- b) Paralelo

Aqui estudaremos o uso do zéner como regulador paralelo. No Volume 2 desta coleção trataremos da utilização do mesmo como regulador série. Ao lado ilustramos o regulador paralelo com zéner.

Aqui iremos considerar as seguintes situações:

- a) A tensão de entrada varia e a tensão de saída deve ser constante.
- b) A tensão de entrada é constante, mas a carga varia (como em um sensor) e, portanto, a tensão de saída varia.

Qualquer que seja a situação, o raciocínio é sempre o mesmo. Basicamente, vamos usar as Leis de Kirchhoff para obter as equações necessárias a solução de nosso problema.

- a) Tensão de entrada variando

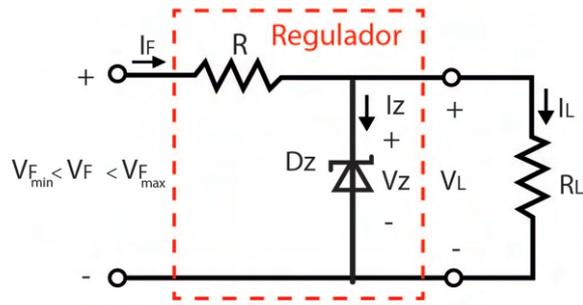


Figura 6.8: Regulador paralelo

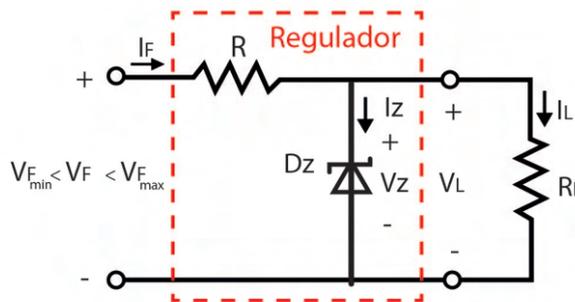


Figura 6.9: Regulador paralelo com entrada variável

Observe que podemos escrever:

$$I_F = I_Z + I_L \tag{6.3}$$

Note que I_L é constante, mas I_F e I_Z variam. Logo, as variações da corrente de entrada são refletidas em variações de corrente no diodo zéner. De modo que podemos escrever:

$$\begin{aligned} I_{F(\max)} &= I_{Z(\max)} + I_L \\ I_{F(\min)} &= I_{Z(\min)} + I_L \end{aligned} \tag{6.4}$$

Considerando $I_{Z(\min)} = \frac{I_{Z(\max)}}{10}$, resulta

$$\begin{aligned} I_{F(\max)} &= I_{Z(\max)} + I_L \\ I_{F(\min)} &= \frac{I_{Z(\max)}}{10} + I_L \end{aligned} \tag{6.5}$$

Portanto,

$$I_{F(max)} - I_{F(min)} = \frac{9}{10} \times I_{Z(max)}$$

(6.7)

Mas,

$$I_{F(max)} = \frac{V_{F(max)} - V_{Z(nom)}}{R_S}$$
$$I_{F(min)} = \frac{V_{F(min)} - V_{Z(nom)}}{R_S}$$

(6.8)

De modo que

$$\frac{V_{F(max)} - V_{Z(nom)}}{R_S} = \frac{9}{10} \times I_{Z(max)}$$

(6.9)

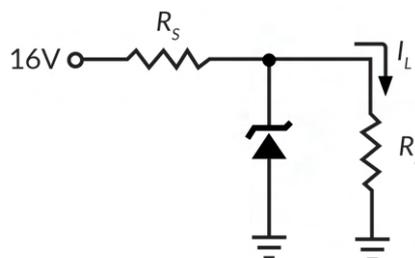
Como os valores de $V_{F(max)}$ e $V_{F(min)}$, normalmente, são conhecidos, a equação anterior nos dá uma relação entre $I_{Z(max)}$ e R_S que pode ser usada, por exemplo, na equação para $I_{F(max)}$ para se achar $I_{Z(max)}$ ou R_S . Encontrado um valor, acha-se o outro imediatamente.

EXERCÍCIO 6.1

Projete um regulador de tensão que mantenha uma tensão de saída de 20V através de uma carga de 1KΩ, com uma entrada que varie de 30V a 50V. Ou seja, determine o valor apropriado de R_S e a corrente máxima $I_{Z(max)}$.

b) Tensão de entrada constante, carga variável

Considere o circuito a seguir



Neste caso, a carga R_L é variável, de modo que a corrente I_L varia. A tensão na carga deve ficar constante. Note que a corrente de entrada I_F é constante. De modo que, quando I_L é máxima, I_Z deve ser mínima e vice-versa.

Por exemplo, considere que a corrente na carga varia de 0 até 200mA. Nestas condi-

ções, qual seria o valor adequado para a resistência R_s com a condição de que a tensão na saída fique em 12V?

Vamos considerar os dados do exemplo, sem perda de generalidade. A aplicação da LCK nos dá

$$I_F = I_Z + I_L$$

(6.9)

Note que a corrente de entrada será fixa, enquanto que a corrente no diodo zéner é que vai variar. Assim, podemos escrever

$$\begin{aligned} I_F &= I_{Z(min)} + I_{L(max)} \\ &= I_{Z(max)} + I_{L(min)} \end{aligned}$$

(6.10)

Mas, lembrando que a corrente mínima do Zéner é 10% de sua corrente máxima, resulta

$$\frac{9}{10} \times I_{Z(max)} = 200mA$$

(6.11)

Logo,

$$I_{Z(max)} = 222mA = \frac{4}{R_S}$$

(6.12)

Então,

$$R_S = 0,018k\Omega = 18\Omega$$

(6.13)

Note também que quando R_L for mínimo, I_L será máximo. Assim, podemos escrever

$$R_L \geq \frac{12}{200mA} = 60\Omega$$

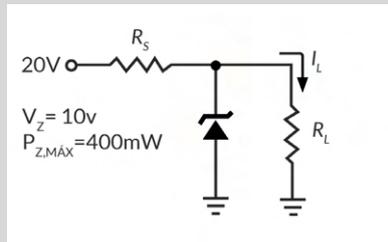
(6.14)

No que segue estudaremos os reguladores de tensão monolíticos, ou seja, encapsulados em um circuito integrado. Basicamente, podemos dividir os reguladores monolíticos em duas categorias:

- a) Reguladores Fixos
- b) Reguladores Ajustáveis

EXERCÍCIO 6.2

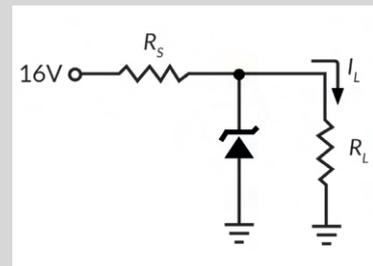
Para o circuito a seguir:



- 01) Determine V_L , I_L , I_Z e I_R , quando $R_L = 180 \Omega$
- 02) Repita o item anterior se $R_L = 470 \Omega$
- 03) Determine o valor de R_L que estabelece as condições de máxima potência para o diodo zéner
- 04) Determine o valor mínimo de R_L para garantir que o diodo zéner está no estado ligado.

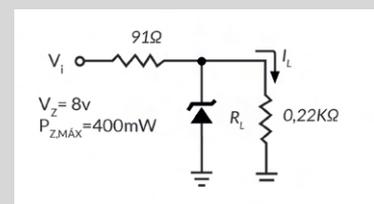
EXERCÍCIO 6.3

Projete o circuito da figura a seguir para manter V_L em 12V para uma variação na corrente da carga (I_L) de 0 até 200mA. Ou seja, determine R_S , V_Z e $P_{Z(max)}$. Veja a carga, por exemplo, como um sensor cuja resposta é em corrente.



EXERCÍCIO 6.4

Para o circuito da figura a seguir, determine a faixa da tensão de entrada (v_i) que irá manter a tensão na carga em 8V, sem exceder a máxima potência do diodo zéner.



EXERCÍCIOS DE REVISÃO

- 01) O que é um LED?
- 02) O que determina a cor de um LED?
- 03) Qual a tensão entre os terminais de um diodo LED?
- 04) Como se determina o resistor de limitação de corrente usado em conjunto com um LED?
- 05) Que materiais são empregados na construção de um LED?
- 06) O que é um LED RGB? Mostre sua simbologia identificando seus terminais.
- 07) O que é um diodo Zéner? Como os diodos Zéner são construídos?
- 08) Em que região o diodo Zéner normalmente é polarizado? Por quê?

Capítulo 7

TESTES DE DIODOS

“Nossa maior fraqueza está em desistir. A maneira mais certa para ter sucesso é sempre tentar apenas uma vez mais.”
Thomas Alva Edison

7.1 Introdução

7.1.1 Teste de Diodos Retificadores

7.1.2 Teste de Diodos Zéner

7.1.3 Teste de Diodos Emissores de Luz

7.1.4 Teste de Diodos Bicolores e RGB

7.2 Exercícios de Revisão

Ao final deste capítulo, o leitor deverá ter boas noções sobre:

1. **Testes estáticos e Dinâmicos do Diodo Retificador**
2. **Identificando a tensão de um diodo Zéner**
3. **Testes com diodos emissores de luz (LED)**
4. **Diodos Bicolores e RGB**

7.1. INTRODUÇÃO

Existem muitos testes que podem ser feitos em um diodo. Primeiramente é preciso saber qual o tipo de diodo que temos em mãos: retificador (sinal), diodo de chaveamento, diodo Schottky, Diodo Emissor de Luz (LED), Diodo túnel, Varicap, PIN, GUN, diodo Laser, etc. Não é simplesmente verificar se existe condução em um sentido e bloqueio no sentido oposto. Este é um teste muito básico e nem todo diodo apresenta uma tensão de condução direta de 0,7V. Por exemplo, os diodos Emissores de Luz (LED) apresentam tensões diretas bem mais elevadas e que dependem da cor. Além disso, os diodos possuem também características dinâmicas tais como:

- a) Tempo de Recuperação Reversa
- b) Máxima corrente Direta
- c) Máxima Tensão Reversa
- d) Capacitância da Junção

Sem dúvida alguma, em se tratando de manutenção de placas eletrônicas, o simples teste de condução e bloqueio do diodo pode ser suficiente. Todavia, quando se está proje-

tando um determinado circuito pode fazer muita diferença entre escolher um determinado diodo em detrimento de outro com especificações “inferiores” ao escolhido. A recomendação é nunca se usar um diodo “inferior” ao que está sendo trocado, especialmente quando se tratar de um diodo de chaveamento.

Neste sentido, sugerimos ao estudante de Eletrônica que sempre verifique a folha de especificações do diodo (datasheet) encontrado em alguma placa lógica de um equipamento - lembre-se de que um mesmo diodo pode ser fabricado por diversas empresas e que podem apresentar pequenas diferenças em parâmetros importantes. Substituir um diodo comum por um diodo ultraveloz (Ultrafast) ou com uma capacidade de corrente maior do que a capacidade do diodo original, sem observar as folhas de especificações cuidadosamente, pode não ser a decisão correta. Às vezes ouvimos dos técnicos em reparo de placas lógicas: \textit{Mas é apenas um diodo...}

7.1.1. TESTE DE DIODOS RETIFICADORES

O teste mais simples que pode ser feito em um diodo é a verificação de sua condução e de seu bloqueio na polarização reversa. Para este fim podemos usar um multímetro digital ou analógico. No caso de usarmos um multímetro analógico devemos lembrar de que na maioria destes multímetros, a polaridade da tensão nesta escala é invertida; ou seja, a ponteira preta é o sinal positivo da fonte interna enquanto que a ponteira vermelha é o sinal negativo da mesma. Alguns multímetros analógicos podem não apresentar esta inversão. Neste caso, deve-se testar primeiro em um diodo que se sabe estar bom. A figura a seguir ilustra o teste de um diodo de sinal usando-se um multímetro digital na escala de teste de diodo.

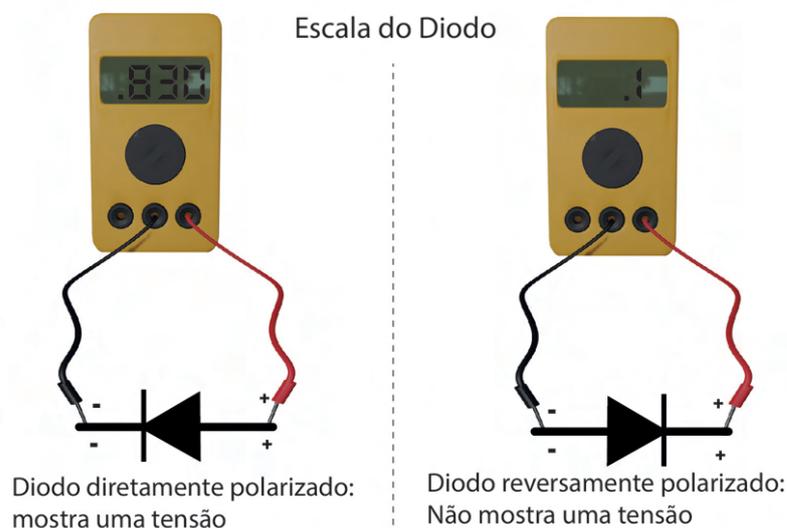


Figura 7.1: Teste de Diodo de Sinal com Multímetro Digital (clique para ver a animação)

Existe a possibilidade do diodo está com fuga. Neste caso, quando polarizado reversamente haverá alguma indicação. Para se avaliar a fuga recomenda-se que o diodo seja removido do circuito uma vez que alguma carga em paralelo pode produzir o falso resultado de que o mesmo esteja com fuga.

Os testes dinâmicos dificilmente podem ser feitos em oficinas de manutenção porque exigem equipamentos relativamente caros e que muito seriam raramente usados. Apenas a título de exemplificação, citamos aqui o caso de uma impressora a Laser que foi ligada na tensão errada em que um diodo de chaveamento foi danificado na placa principal. Foi usado um diodo rápido, mas inferior ao usado na placa da impressora. Ao ligar a impressora o comportamento da mesma foi errático e não era possível colocá-la em uso. Decidiu-se então remover da placa um diodo igual ao que foi danificado e um teste de chaveamento revelou uma diferença absurda entre o diodo colocado e um diodo igual ao que foi danificado.

Algumas vezes, em fontes de alimentação, ao invés de se usar quatro diodos em ponte usa-se uma ponte integrada, conforme ilustração a seguir.

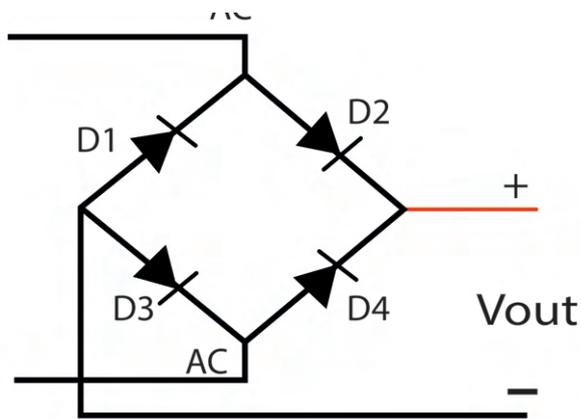


Figura 7.2: Ponte de Diodo

Na maioria das vezes, o lado chanfrado representa o positivo da ponte de diodos, mas existem casos em que a situação inverte, ou seja, o lado negativo da ponte fica no lado chanfrado, como está ilustrado na figura acima. Algumas pontes podem ser encapsuladas em um formato DIL (Dual In Line) ou redondo. Normalmente, são pontes para baixa corrente.

O procedimento de teste pode ser feito da seguinte forma:

1. Coloque a ponteira NEGATIVA no terminal da ponte marcado com “+”.
2. Coloque a ponteira POSITIVA em cada um dos terminais AC. Em ambos deve haver condução, mas não curto!
3. Coloque a ponteira POSITIVA no terminal da ponte marcado com “-”.
4. Coloque a ponteira NEGATIVA em cada um dos terminais AC. Em ambos deve haver condução, mas não curto!

Alguns diodos possuem um sufixo que indicam tratar-se de um diodo rápido. Por exemplo: 1N4007 e 1N4007F. O tempo de recuperação reversa do 1N4007 é tipicamente $30\mu\text{s}$, enquanto que o 1N4007F possui um tempo de recuperação reversa típico de $1,5\mu\text{s}$.

7.1.2. TESTE DE DIODOS ZÉNER

Como podemos identificar se um dado diodo (fora do circuito) é um diodo Zéner? E se não conseguimos ler a tensão Zéner no corpo do diodo?

Uma forma de se identificar se um diodo é Zéner é montando um pequeno circuito formado por uma fonte ajustável, o diodo Zéner em questão e um resistor.

Enquanto a tensão da fonte for menor que a tensão Zéner, a tensão de saída será igual à tensão da fonte. Quando a fonte atingir a tensão Zéner, a saída ficará constante e igual à tensão nominal do diodo Zéner.

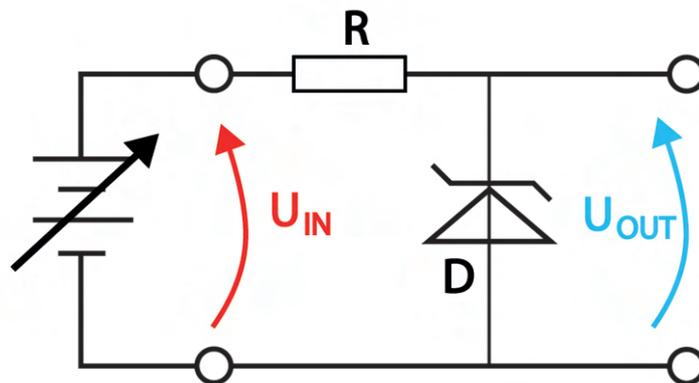


Figura 7.3: Teste de Diodo Zéner

7.1.3. TESTE DE DIODOS EMISSORES DE LUZ

O teste de um diodo emissor de luz é muito simples. Apesar do mesmo possuir uma tensão direta bem maior do que os $0,7\text{V}$ do diodo retificador comum, não devemos ligá-lo a uma fonte de alimentação sem o uso de um resistor de limitação de corrente apropriado. Também devemos evitar o uso de um potenciômetro, uma vez que existe a possibilidade de zerarmos

o potenciômetro por descuido aplicando toda a tensão nos terminais do diodo emissor de luz e fatalmente queimando-o.

Quando se dispõe de uma fonte de alimentação profissional podemos limitar a corrente fornecida pela mesma, por exemplo, em 20mA. Desta forma podemos usar sem o resistor de limitação de corrente, aumentando a tensão gradualmente. Todavia, nem sempre temos uma fonte profissional ao nosso dispor e como diz o ditado “Costume de casa vai à rua”. Então, é melhor evitar e colocar sempre o resistor de limitação de corrente. Normalmente, o resistor de limitação de corrente é projetado de tal forma a manter a corrente no LED entre 10mA e 20mA.

7.1.4. TESTE DE DIODOS BICOLORS E RGB

Leds bicolores são dispositivos de 2, 3 ou mais terminais construídos usando-se dois LEDs em antiparalelo (ou independentes) ou dois leds com um terminal em comum (catodo ou anodo), de modo que quando um dos LEDs está polarizado diretamente, necessariamente o outro estará polarizado reversamente. A figura a seguir ilustra um diodo bicolor anodo comum.

Os diodos RGB são formados por 3 diodos independentes: um vermelho (R), um verde (G) e um azul (B). A cor do led é função da soma das cores emitidas por cada um destes leds individualmente. Portanto, é preciso controlar o brilho de cada cor usando-se um sinal PWM. Recomendamos uma leitura do “Guia de como funcionam os leds RGB” da CapSistema (www.capsistema.com.br).

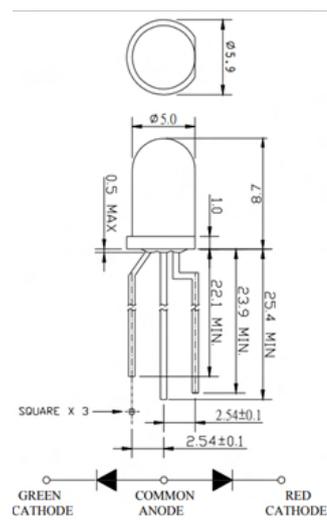


Figura 7.4: Led Bicolor Anodo Comum

7.2 EXERCÍCIOS DE REVISÃO

- 01) Pesquise na internet por leds comerciais bicolores. Monte uma tabela e liste os códigos de leds bicolores anodo comum e catodo comum. Liste as principais características técnicas destes componentes de acordo com suas folhas de especificações uma coluna para as especificações.
- 02) O que significa o tempo de recuperação reversa de um diodo de sinal?
- 03) Quais são as capacitâncias presentes nas folhas de especificações dos diodos?
- 04) Que tipo de diodo você usaria para retificar o sinal alternado de entrada?
- 05) Os diodos 1N4001, 1N4002, 1N4003, 1N4004, 1N4005, 1N4006 e 1N4007 são todos diodos de 1 Ampère de corrente. No que estes diodos diferem entre si?
- 06) Em que situações precisamos de um diodo Ultrafast?
- 07) Como testamos um diodo com um multímetro?
- 08) Como se calcula a resistência série de um Led?
- 09) O que é um diodo RGB?

Capítulo 8

INTRODUÇÃO À ELETRÔNICA

*“Comece pelo começo, disse o rei com muita gravidade,
e prossiga até o final. Então, páre.”*

Lewis Carol (Alice no país das maravilhas)

8.1 Introdução

8.2 Retificador de Meia Onda

8.3 Retificador em Onda Completa

Ao final deste capítulo, o leitor deverá ter boas noções sobre:

1. *Análise de Retificadores de Meia Onda e Onda Completa*
-

8.1 INTRODUÇÃO

Os retificadores são conversores de sinais alternados (AC) em sinais contínuos (DC). Existem retificadores em meia onda e em onda completa (bifásico e em ponte). Não iremos tratar, neste primeiro volume, dos retificadores controlados nem iremos analisar o comportamento dos retificadores quando a carga é indutiva-resistiva. Isto será visto mais adiante no Volume 3 desta Série. O estudante também pode consultar nossa obra *Eletrônica Analógica* publicada pelo Instituto Internacional Despertando Vocações. Recomendamos fortemente a resolução da maior quantidade possível de exercícios e a simulação de circuitos - pode usar, por exemplo, o <http://www.falstad.com/circuit/> que é online e gratuito ou algum outro de sua preferência.

8.2 RETIFICADOR DE MEIA ONDA

Considere agora o circuito a seguir.

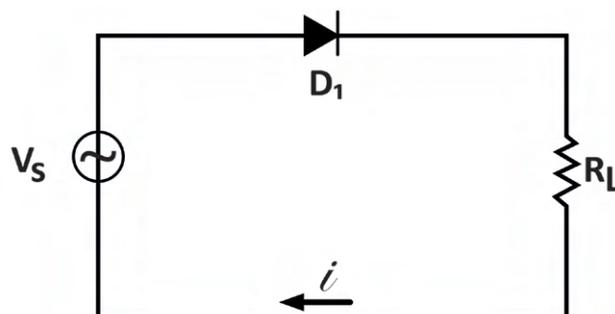


Figura 8.1: Retificador em meia onda

Considere que a tensão de entrada é uma senoide, conforme ilustrado ao lado.

É fácil perceber que durante o semiciclo positivo do sinal de entrada, o diodo será polarizado diretamente e, portanto, se comportará como uma chave fechada (baixa resistência). Durante o semiciclo negativo, o diodo será polarizado reversamente e se comportará como uma chave aberta. A tensão na carga R_L possui o formato a seguir.

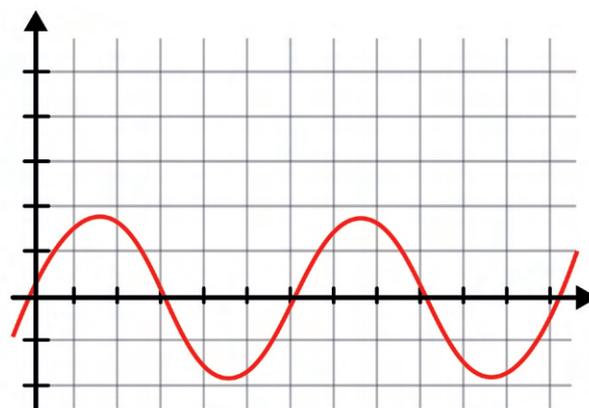


Figura 8.2: Sinal de entrada

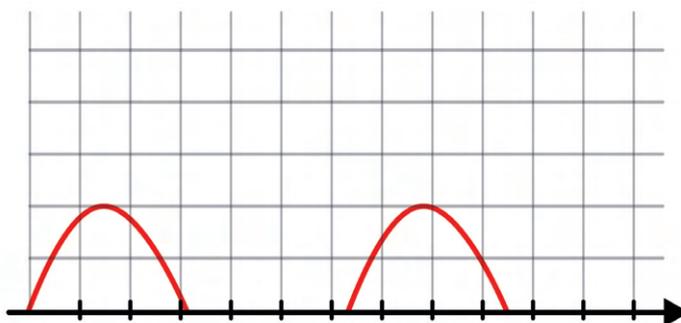


Figura 8.3: Sinal retificado

A ilustração a seguir mostra uma forma de montar este retificador em uma matriz de contatos. O fio azul deve ser conectado ao secundário do transformador, o fio preto corresponde ao Terra e o fio amarelo corresponde a saída do retificador.

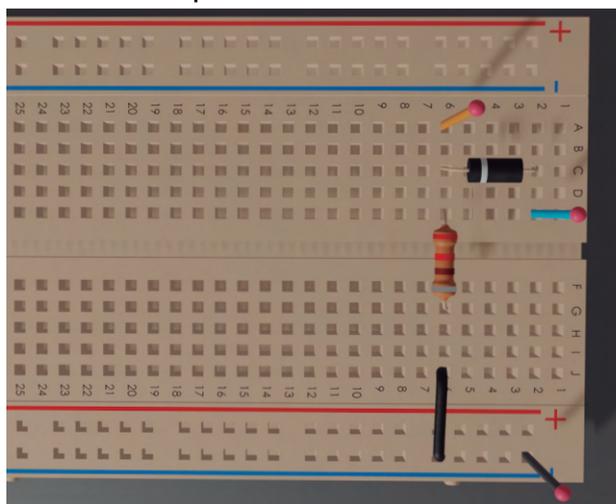
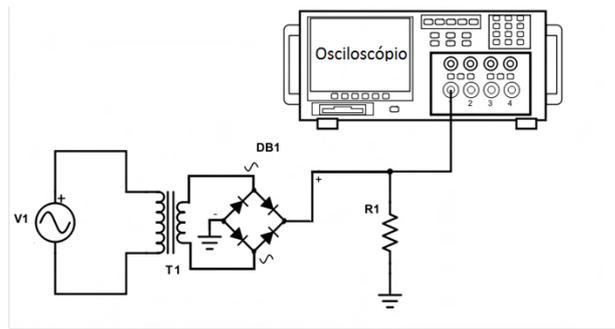


Figura 8.4: Montagem do retificador em meia onda (clique para ver a animação)

O retificador estudado aqui é conhecido como retificador de meia onda, pois somente metade do sinal é retificado (cortado). O retificador de meia onda pode ser positivo ou negativo. Isto vai depender da forma como o diodo é colocado no circuito. Existem outras montagens que permitem a retificação em onda completa, conforme veremos na próxima seção. Perceba que este retificador não tem uma boa eficiência, uma vez que metade do ciclo de tensão de entrada não foi aproveitada (convertida) de alguma forma. Durante o bloqueio do diodo se comporta como uma chave aberta e a energia entregue ao mesmo é convertida em calor.

8.3 RETIFICADOR EM ONDA COMPLETA



A ilustração a seguir mostra uma forma de montar este retificador em uma matriz de contatos. Os dois fios brancos da figura são para a conexão do secundário do transformador e o fio preto corresponde ao Terra. A saída do retificador (fio amarelo) é tomada na carga (resistor).

Uma outra forma de se obter uma retificação em onda completa está ilustrada a seguir. Esta forma chama-se retificação bifásica ou em onda completa com derivação central (center tap - em inglês).

A ilustração a seguir mostra uma forma de montar este retificador em uma matriz de contatos. O fio azul e o amarelo são para a conexão dos extremos do secundário do transformador e o fio preto, que corresponde ao Terra, deve ser ligado ao terminal central do secundário do transformador. A saída do retificador (vermelho) é tomada na carga (resistor).

Note que apesar de se usar apenas dois diodos, a tensão reversa que o diodo deve suportar é o dobro da tensão reversa no caso da retificação em ponte.

É possível mostrar que a tensão média no retificador de meia onda é dada por:

$$V_{DC} = \frac{V_{pico}}{\pi} = 0,318 \times V_{pico} \quad (8.1)$$

Ao passo que no retificador de onda completa, o valor é o dobro, ou seja:

$$V_{DC} = 2 \times \frac{V_{pico}}{\pi} = 0,636 \times V_{pico} \quad (8.2)$$

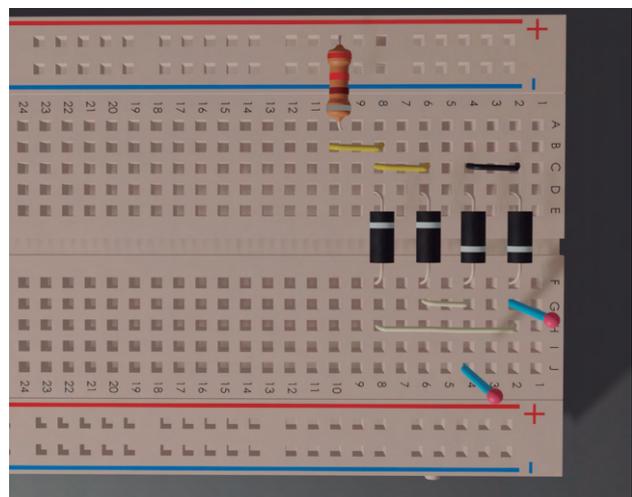


Figura 8.6: Montagem do retificador em onda completa em ponte (clique para ver a animação)

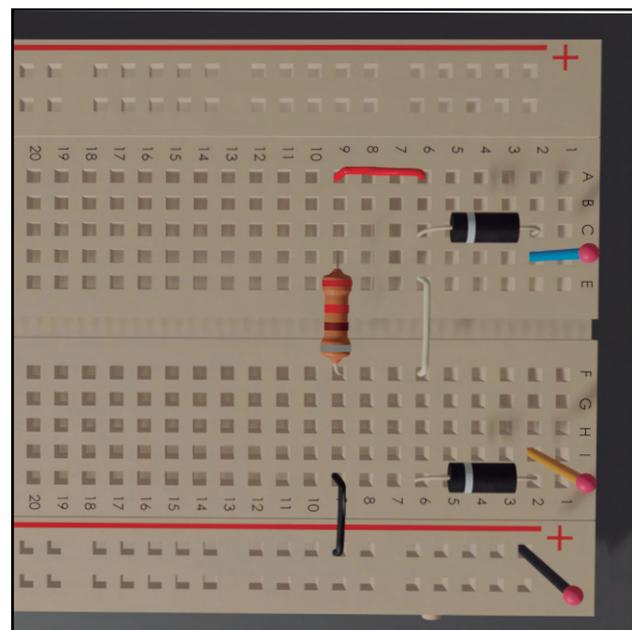


Figura 8.8: Montagem do retificador em onda completa com derivação central

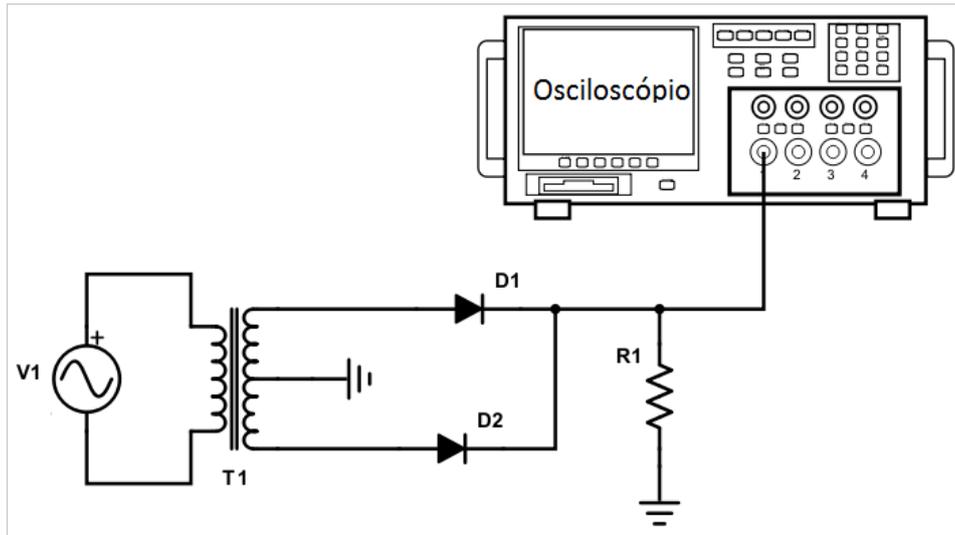


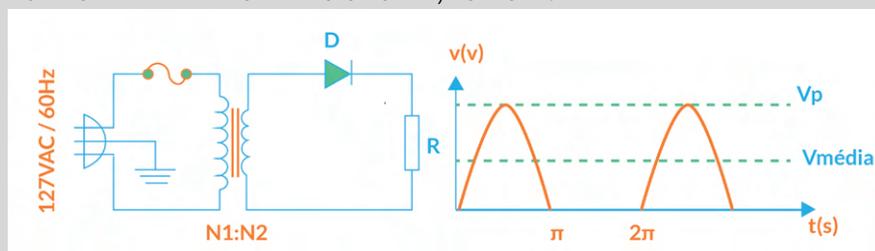
Figura 8.7: Retificador em onda completa com derivação central

EXERCÍCIO 8.1

Projete uma fonte de alimentação usando um retificador em onda completa do tipo center-tap. Calcule o valor do ripple de acordo com o capacitor que você escolher e, depois, verifique no osciloscópio se o ripple está de acordo com o previsto matematicamente.

EXERCÍCIO 8.2

Para o retificador de meia-onda abaixo, calcule:



- Tensão de pico no secundário do transformador
- Tensão de pico na carga
- Tensão média na carga
- Corrente média na carga
- Máxima tensão de pico reverso a que estará sujeito o diodo

Dados:

$$N_1:N_2=10$$

$$R = 20 \Omega$$

EXERCÍCIO 8.3

Para o retificador em onda completa abaixo, calcule:

Tensão de pico no secundário do transformador

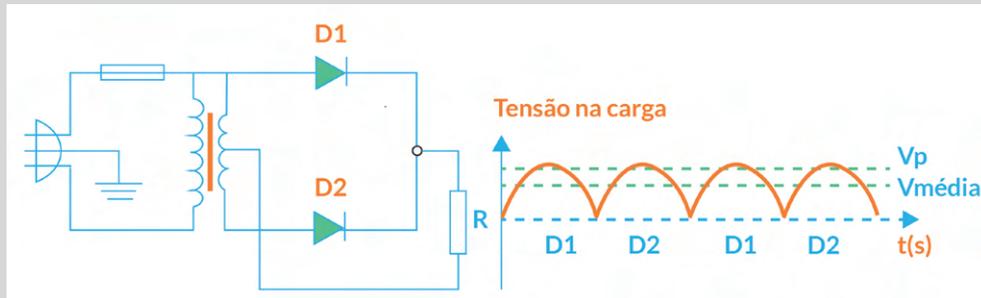
Tensão de pico tensão média, corrente média na carga.

Máxima tensão de pico reverso a que estará sujeito o diodo

Dados:

$$N_1:N_2 = 10; V_1 = 120V(RMS)$$

$$R = 10 \Omega$$



EXERC\u00cdCIO 8.4

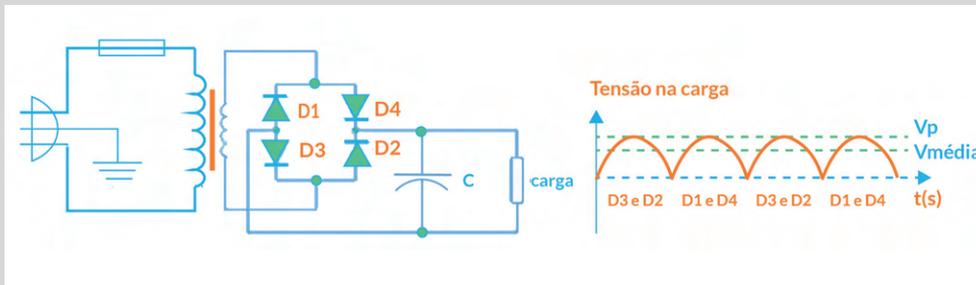
Para o retificador de meia-onda abaixo, calcule a Tens\u00e3o de pico no secund\u00e1rio do transformador, a Tens\u00e3o de pico, tens\u00e3o m\u00e9dia e corrente m\u00e9dia na carga e a M\u00e1xima tens\u00e3o de pico reverso a que estar\u00e1 sujeito o diodo.

Dados:

$$V_1 = 120V(RMS)$$

Trafo: 12V+12V

$$R = 10 \Omega$$



EXERCÍCIOS DE REVISÃO

- 01) O que é um circuito retificador?
- 02) Existe aplicação de diodo retificador em circuitos puramente DC? Exemplifique.
- 03) O que é um retificador de meia onda? Este circuito sempre produz um sinal DC positivo?
- 04) Em termos de rendimento, você acha que um retificador de meia onda possui um bom rendimento?
- 05) Quais os tipos de retificadores em onda completa vistos neste capítulo?
- 06) Os retificadores só funcionam com ondas senoidais?
- 07) O que acontece com o sinal retificado em onda completa em termos de frequência e período se comparados aos valores do sinal original (não-retificado)
- 08) Qual a finalidade do transformador usado nos circuitos retificadores analisados anteriormente?
- 09) Escreva as relações matemáticas que exprimem as relações entre tensão e corrente no primário e no secundário de um transformador.

Capítulo 9

RETIFICADORES COM FILTRO

“Não tenho nenhum talento especial. Apenas sou apaixonadamente curioso.”

Albert Einstein

9.1 Introdução

9.2 Capacitores X e Y

9.3 Exercícios de Revisão

Ao final deste capítulo, o leitor deverá ter boas noções sobre:

1. Filtragem

9.1 INTRODUÇÃO

Na prática, após a retificação colocamos um capacitor de elevada capacitância para obter um valor DC, conforme ilustra a figura a seguir:

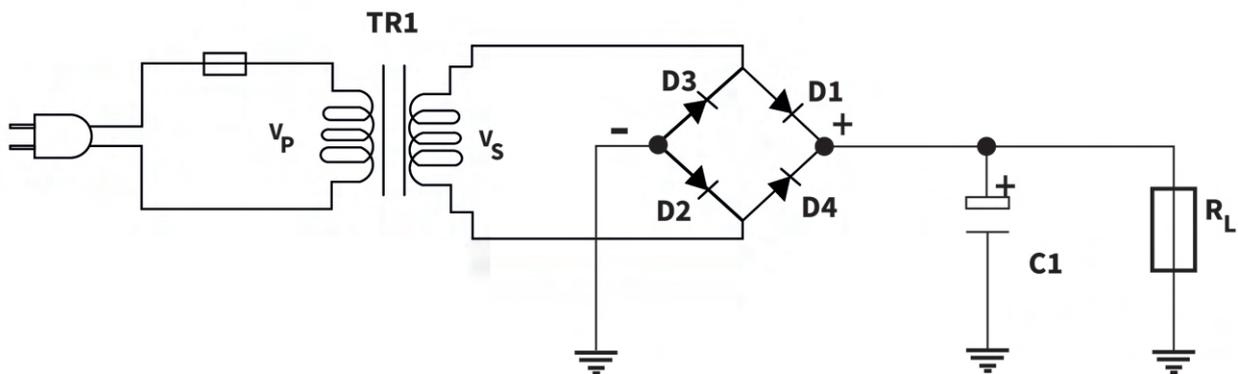


Figura 9.1: Fonte de alimentação simples

A tensão na carga, no circuito acima, apresenta uma certa ondulação conhecida pelo nome de **Ripple** (Ondulação em Português). Quanto maior for o valor do capacitor de filtro, menor será a ondulação. O ripple é calculado pela expressão a seguir:

$$v_R = \frac{I_{DC}}{f \times C}$$

(9.1)

Onde, I_{DC} é a corrente, f é a frequência do sinal retificado (60 Hz para meia onda e 120 Hz para onda completa) e C é o valor do capacitor de filtro. Note que o valor da tensão DC na carga em um retificador com capacitor de filtro pode ser encontrada como

$$V_{DC} = V_p - \frac{v_R}{2} \tag{9.2}$$

Na prática, podemos observar o ripple usando um osciloscópio para observar a tensão DC de saída com acoplamento configurado como AC. Descobrimos, então, que o nosso sinal DC na verdade não é tão bonito como pensávamos. Então, eis o nosso compromisso: "Se colocarmos um capacitor com uma capacitância maior, teremos um ripple menor; por outro lado, tais capacitores são maiores fisicamente e isto pode ser um empecilho em nosso projeto. Logo, devemos encontrar o valor de nosso capacitor para um dado ripple aceitável."

Na prática, após esta filtragem, normalmente, colocamos um regulador de tensão para reduzir sobremaneira a ondulação sem a necessidade de termos de colocar capacitores eletrolíticos enormes e caros! Este assunto será tratado no volume 3 desta série.

No caso das fontes chaveadas, o problema é mais sério devido ao chaveamento em alta frequência presente neste tipo de fonte de alimentação. Assim, outras filtrações se fazem necessárias.



Figura 9.2: Ripple observado na cargas

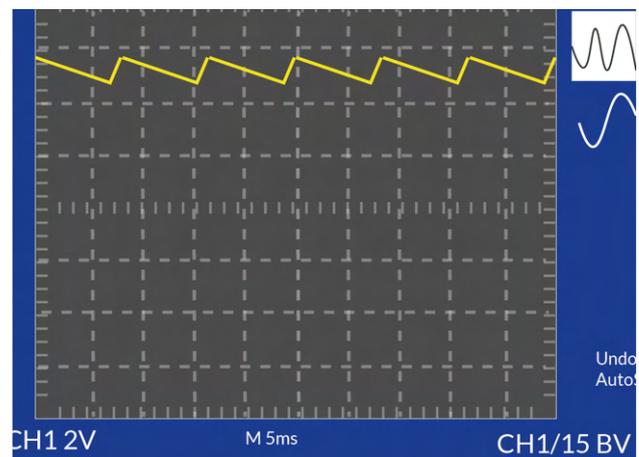


Figura 9.3: Ripple observado na carga por osciloscópio

9.2 CAPACITORES X E Y

Os capacitores X e Y são capacitores utilizados na remoção de sinais de modo comum e sinais diferenciais. Assim, entre Fase e Neutro colocamos um capacitor X para remoção de sinais diferenciais e entre a Fase e o Terra, bem como entre o Neutro e o Terra colocamos capacitores Y para remoção de sinais de modo comum. No caso das fontes de alimentação, estes capacitores são introduzidos na entrada da fonte. Naturalmente, sua função é completamente diferente da função do capacitor de filtro colocado após o retificador que "memoriza" o valor de pico desta tensão retificada. Abaixo ilustramos o uso destes capacitores.

Existem quatro classes de capacitores Y (Y1 até 8000V e Y2 até 5000V) e três classes de capacitores X (X1 para pulsos de alta frequência, X2 e X3 para fins genéricos com tensões de pico diferentes). Estas classes são

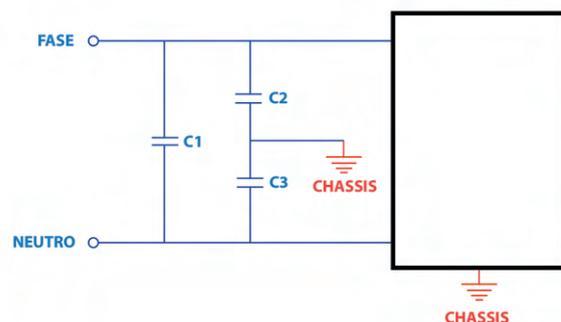


Figura 9.4: Capacitores de Filtragem

signalizadas no corpo dos capacitores e estão ligadas a tensão máxima de operação.

Existem Capacitores classificados como XY por pertencerem a ambas as categorias. A Figura a seguir ilustra um capacitor XY.

Subclass (IEC 60384-14)	Peak Voltag Pulse (while in service)	Peak Impulse before endurece test
X1	>2.5 kV ≤4.0kV	4kV per C ≤ 1 μF 4 √C kV per C > 1μF
X2	≤2.5kV	2.5kV per C ≤ 1 μF 42.5√C kV per C > 1μF
X3	≤1.2kV	nenhum

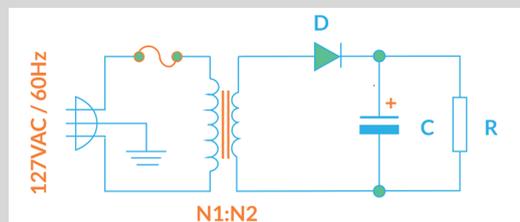
Figura 9.5: Tabela Capacitor X

Subclass (IEC 60384-14)	Rated Voltage	Peak Impulse before endurece test
Y1	≤500VAC	8kV
Y2	150VAC ≤ V < 300VAC	5 kV
Y3	150VAC ≤ V < 250VAC	nenhum
Y4	<150VAC	2.5kV

9.6: Tabela Capacitor Y

EXERCÍCIO 9.1

Dimensione o capacitor do circuito a seguir



Dados:

$$N_1:N_2 = 10$$

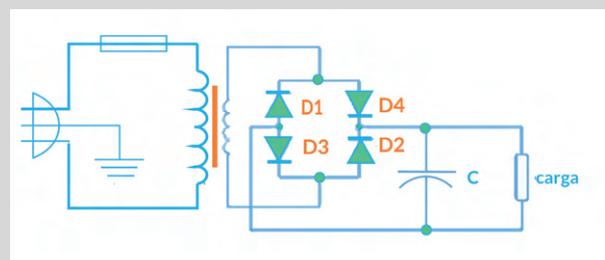
Tensão direta no diodo: 0,7V

Corrente desejada na carga: 200mA

Ondulação máxima permitida: 10% do valor de pico

EXERCÍCIO 9.2

Para o circuito a seguir, calcule a tensão DC na carga para C = 470μF, 1000μF, 2200μF e 4700μF.



9.3 EXERCÍCIOS DE REVISÃO

- 01) Encontre uma expressão matemática para se calcular o valor DC da tensão retificada em onda completa e filtrada por um capacitor C tal que o ripple máximo seja de $r\%$ do valor de pico.
- 02) O que é tensão de ondulação (ou ripple)?
- 03) Como calculamos a tensão de ondulação de um retificador?
- 04) Qual a desvantagem em se utilizar capacitores de filtro de elevada capacitância?
- 05) Se a frequência da rede fosse da ordem de kHz ao invés dos 60 Hz, o que aconteceria com a tensão de ripple? Aumentaria ou diminuiria?
- 06) Comparando um retificador em meia onda com um retificador em onda completa com o mesmo capacitor de filtro e com a mesma corrente solicitada pela carga, qual dos dois possui a menor tensão de ondulação? Por quê?
- 07) Em um circuito retificador onde colocamos o Varistor? Qual é sua finalidade neste circuito?
- 08) Além do Varistor, que outro dispositivo normalmente empregamos?
- 09) O que são Capacitores X e Y? Onde encontramos os mesmos?
- 10) Como são feitos os capacitores X e Y?

Capítulo 10

REGULADORES DE 3 TERMINAIS

“Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma.”
Antoine Lavoiser

10.1 Reguladores de Tensão de 3 Terminais

10.2 Exercícios de Revisão

Ao final deste capítulo, o leitor deverá ter boas noções sobre:

1. Reguladores fixos de 3 terminais
2. Reguladores Ajustáveis de 3 terminais

10.1 REGULADORES DE TENSÃO DE 3 TERMINAIS

Vimos anteriormente a utilização do diodo zéner como regulador de tensão paralelo, uma vez que o diodo zéner era colocado em paralelo com a carga. Aqui vamos estudar os chamados reguladores em série, uma vez que a corrente de saída do regulador é a mesma corrente que vai para a carga. Por terem três terminais são denominados genericamente de **Reguladores de Três Terminais**. Existem reguladores de tensão de 3 terminais positivos e negativos, fixos e ajustáveis. Os reguladores fixos positivos mais conhecidos são os da série 78xx, enquanto que os reguladores fixos negativos mais conhecidos são os da série 79xx. Os reguladores ajustáveis mais conhecidos são o LM317T (positivo) e o LM337T (negativo).

A) REGULADORES FIXOS POSITIVOS E NEGATIVOS DAS SÉRIES 78XX E 79XX, RESPECTIVAMENTE

Os reguladores da série 78xx são muito utilizados nos equipamentos eletrônicos. Exemplos destes reguladores são: 7805, 7809, 7812, 7815, 7824. Abaixo segue um exemplo de utilização dos mesmos.

A tensão de saída pode ser alterada, uma vez que pelo pino central passa uma corrente (chamada corrente quiescente) cujo valor pode ser verificado no datasheet

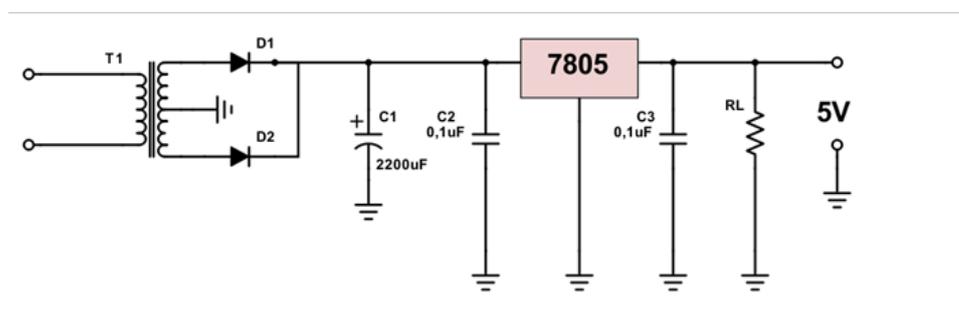


Figura 10.1: Regulador positivo de +5V

do componente específico. Assim, podemos obter uma fonte de +9V usando-se um 7805.

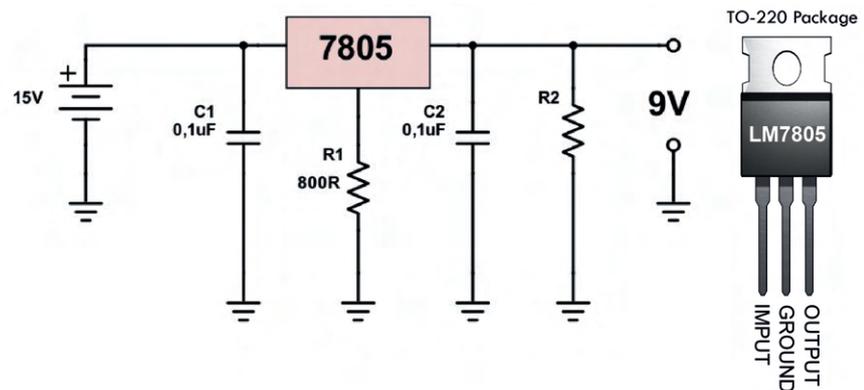
Os reguladores da série 79xx também são muito utilizados nos equipamentos eletrônicos. Exemplos destes reguladores são: 7905, 7909, 7912, 7915 e 7924. A seguir temos um exemplo de utilização deste regulador em uma fonte de tensão com saída negativa.

Da mesma forma que fizemos com os reguladores positivos, podemos colocar um resistor no pino GND (ou comum) do regulador para produzir uma tensão maior na saída. No caso do 79xx existe uma corrente neste pino de cerca de 3mA.

Recomenda-se que caso se deseje tal operação, seja feita uma montagem de teste para verificar o valor desta corrente - que pode variar de fabricante para fabricante.

Também é possível construir fontes simétricas tal como a ilustrada a seguir.

A tabela a seguir ilustra para os reguladores das sé-



10.2: Regulador de +9V a partir de +5V (clique para ver a animação)

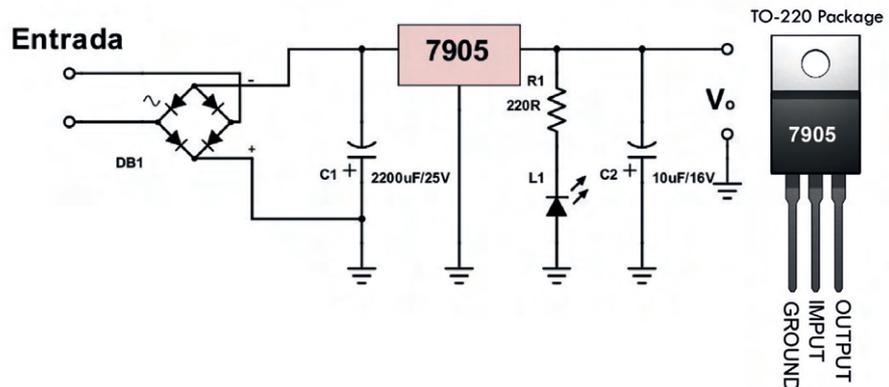


Figura 10.3: Regulador negativo (clique para ver a animação)

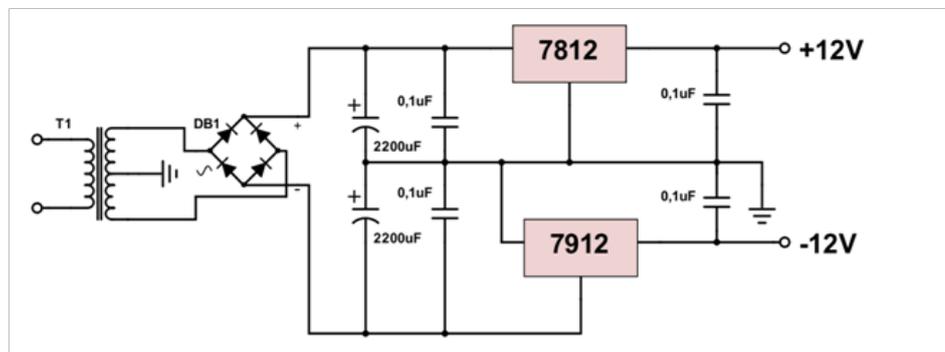


Figura 10.4: Fonte simétrica +12V/-12V

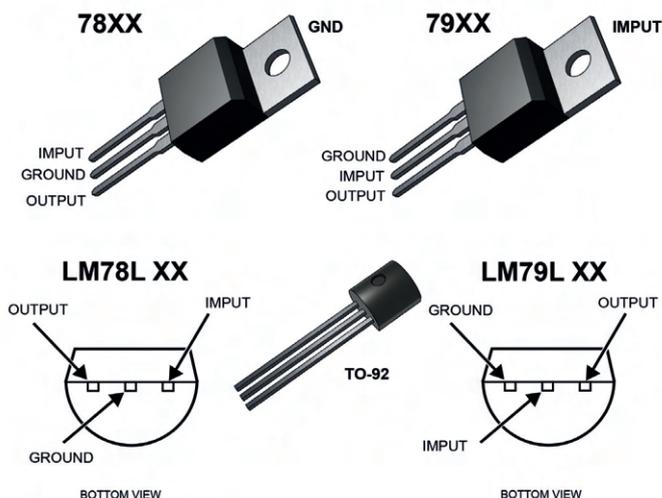


Figura 10.5: Encapsulamento de reguladores de tensão (Clique para ver as animações)

ries 78xx e 79xx o valor da tensão máxima de entrada, o valor da tensão nominal de saída e a corrente máxima que o regulador pode fornecer a uma carga. Note que pode acontecer de existirem fabricantes com especificações um pouco diferentes.

Reguladores de tensão - 78XX - 79XX			
Código Positivo/Negativo	Tensão máxima de entrada	Tensão de saída (regulada)	Corrente máxima de saída
7805/7909	35 Volt	5 Volt	1 A
7806/7906	35 Volt	6 Volt	1 A
7810/7910	35 Volt	10 Volt	1 A
7812/7912	35 Volt	12 Volt	1 A
7815/7915	35 Volt	15 Volt	1 A
7818/7918	35 Volt	18 Volt	1 A
7824/7924	40 Volt	24 Volt	1 A

Figura 10.6: Reguladores das séries 78xx e 79xx

Recomenda-se que seja feita uma consulta ao datasheet do fabricante no sentido de conhecer as possibilidades deste dispositivo. Por exemplo, existem montagens que podem fornecer correntes elevadas, como por exemplo, 5A.

Todavia esta corrente certamente não é fornecida pelo regulador em si. Faz-se uso de transistores em montagens apropriadas para se obter tais correntes de saída.

B) REGULADORES AJUSTÁVEIS POSITIVOS E NEGATIVOS

O regulador ajustável positivo mais conhecido é o LM317.

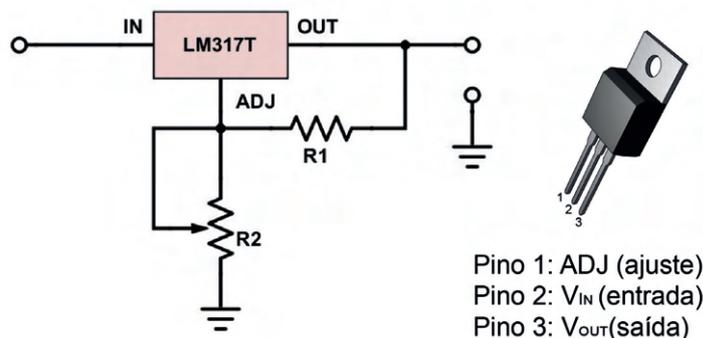


Figura 10.7: Regulador ajustável LM317T e pinagem

O resistor R_1 é um resistor com resistência calculada em função da corrente conhecida como corrente mínima de regulação que deve estar entre 3,5mA e 10mA. Na maior parte dos projetos, usa-se um resistor de 240Ω - o que significa uma corrente de cerca de 5mA.

O resistor R_2 normalmente é um potenciômetro que ajusta a tensão de saída conforme a expressão

$$V_o = 1,25 \times \left(1 + \frac{10k\Omega}{R_1} \right) + I_{adj} \times R_2 \quad (10.1)$$

Note que este regulador não zera a saída. Isto se deve ao zéner de 1,25V interno ao mesmo. Para zerar a saída, é comum se colocar diodos retificadores na saída do mesmo. Uma outra forma de eliminar a tensão de 1,25V na saída é usar o seguinte esquema (quando se tem uma fonte de -12V disponível).

Por enquanto, como ainda não vimos o funcionamento dos transistores, vamos usar este circuito deixando o entendimento do mesmo para mais adiante neste texto. Note que colocamos um diodo emissor de luz, conhecido como LED, no circuito proposto para sinalizar que existe alimentação e definir uma tensão na base do transistor e, com isso, definir a tensão no emissor do mesmo – estabelecendo, assim, uma corrente de emissor.

Para evitar erros maiores e dificuldades nos projetos de fontes ajustáveis, não devemos desprezar o valor da corrente de ajuste. O valor típico desta corrente é de cerca de $50\mu A$. Assim, podemos, por exemplo, definir o valor de R_2 (Potenciômetro) e encontrar o valor de R_1 .

Exemplo: Projete uma fonte ajustável usando o LM317T que forneça uma tensão máxima de 12V. Use um potenciômetro de $10k\Omega$ e calcule o valor do resistor R_1 .

Solução:

$$\begin{aligned}
 12V &= 1,25 \times \left(1 + \frac{10k\Omega}{R_1}\right) + 50\mu A \times 10k\Omega \\
 12V &= 1,25 \times \left(1 + \frac{10k\Omega}{R_1}\right) + 0,5V \\
 11,5V &= 1,25 \times \left(1 + \frac{10k\Omega}{R_1}\right) \\
 \frac{11,5}{1,25} &= \left(1 + \frac{10k\Omega}{R_1}\right) \\
 9,2 &= \left(1 + \frac{10k\Omega}{R_1}\right) \\
 8,2 &= \frac{10k\Omega}{R_1} \Rightarrow R_1 = 1,2k\Omega
 \end{aligned}
 \tag{10.2}$$

O regulador negativo ajustável mais conhecido é o LM337. É um circuito integrado com encapsulamento TO-220 similar ao LM317 só que com uma saída diferente (e com pinagem diferente), conforme figura a seguir.

Cuja saída é dada por

$$V_o = -1,25 \times \left(1 + \frac{10k\Omega}{R_1}\right) - I_{adj} \times R_2
 \tag{10.3}$$

Nestes dois reguladores de tensão, a

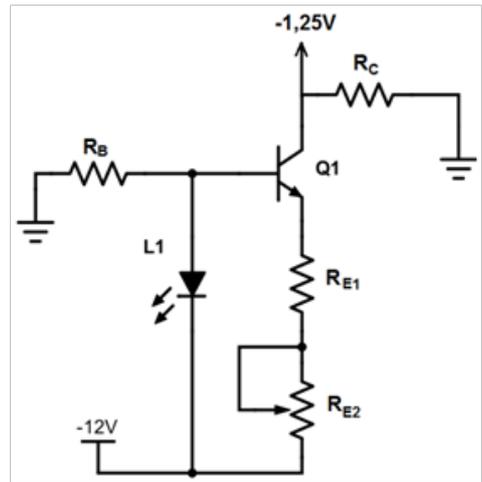


Figura 10.8: Circuito para permitir zerar a saída do LM317T

Pino 1: ADJ (ajuste)
Pino 2: VIN (entrada)
Pino 3: VOUT(saída)

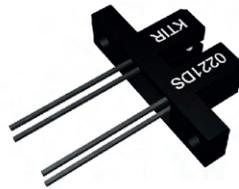


Figura 10.9: Pinagem do LM337 (clique para ver a animação)

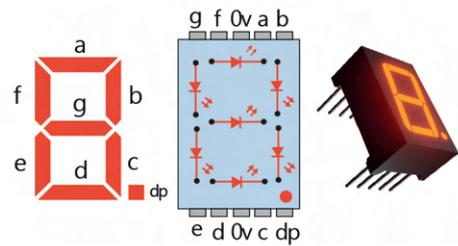
corrente no pino de ajuste é aproximadamente 50 μ A. Nos datasheets, os fabricantes apresentam circuitos usando estes reguladores com capacidade de corrente que excede o valor nominal da corrente máxima para o regulador.

As principais aplicações dos diodos são:

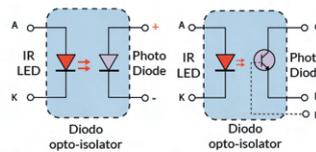
1. Retificadores
2. Sinalização (LEDs)
3. Regulação de Tensão (Zéners)
4. Proteção contra inversão de polaridade
5. Multiplicadores de tensão
6. Circuitos grampeadores
7. Outros usos: Display de 7 segmentos, isoladores galvânicos (optoacopladores), chaves óticas, etc.



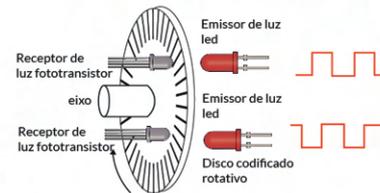
Chave Ótica



Display de 7 segmentos



Fotoacoplador



Encoder

A Figura 10.10 a seguir ilustra a utilização de diodos LED em várias aplicações.

Figura 10.10: Aplicações do diodo
(Clique para ver as animações)

EXERCÍCIOS DE REVISÃO

- 01) Descreva um procedimento prático para se identificar a tensão Zéner de um diodo Zéner cujas inscrições encontram-se completamente apagadas.
- 02) Nos datasheet dos diodos Zéner existe uma especificação chamada I_{ZT} . Qual a interpretação desta corrente?
- 03) O que é o Efeito Zéner?
- 04) Complete os espaços vazios: “_____ é dominante em diodos Zéner de até 5,6V. A partir deste valor o Efeito _____ é o dominante.”
- 05) Qual a diferença básica entre um regulador de 3 terminais 78L05 (Encapsulamento TO-92) e o regulador de 3 terminais 7805 (Encapsulamento TO-220)?
- 06) Projete um regulador de tensão que produza 9V em sua saída usando apenas um 7805.
- 07) Anote os principais parâmetros de um diodo Zéner comercial. Dica: Escolha um na internet, baixe sua folha de dados.
- 08) Verifique em que condições os capacitores de filtro na entrada e na saída do regulador de 3 terminais podem ser eliminados.

Desafio: No caso dos reguladores ajustáveis, a menor saída normalmente é de 1,25V. De que forma simples você poderia zerar a saída?

Desafio: Quais as implicações negativas (se houver) na sua solução apresentada na questão anterior?

Capítulo 11

RETIFICADORES COM FILTRO

“Não deixe que o barulho da opinião dos outros cale a sua própria voz interior.”
Steve Jobs

11.1 Introdução

11.2 Exercícios de Revisão

Ao final deste capítulo, o leitor deverá ter boas noções sobre:

1. Filtragem
2. Bloco de Entrada
3. Bloco Retificador
4. Bloco de Filtragem
5. Bloco Regulador de Tensão

11.1 INTRODUÇÃO

A aplicação mais importante dos assuntos abordados até o momento neste livro é justamente o desenvolvimento de uma fonte de alimentação linear simples. Basicamente, uma fonte de alimentação linear consiste em um bloco de entrada formado por um fusível para proteger contra sobrecorrentes, um varistor para proteger contra sobretensões e um transformador abaixador para transformar a tensão AC de entrada em uma tensão AC de valores menores. Após este bloco de entrada colocamos um retificador (normalmente em onda completa) seguido por um filtro capacitivo que suaviza as variações na tensão retificada. No final da fonte de alimentação colocamos um circuito regulador de tensão que pode ser baseado na utilização de um único transistor ou um circuito um pouco mais complexo. Também podemos colocar um regulador de 3 terminais. É possível inserir nesta fonte um LED sinalizador de que a fonte está ligada (normalmente junto da chave LIGA/DESLIGA), outro LED sinalizador de que a tensão de saída está presente, um circuito de proteção contra curto na saída da fonte.

A figura a seguir ilustra o diagrama em blocos de uma fonte linear bem simples.

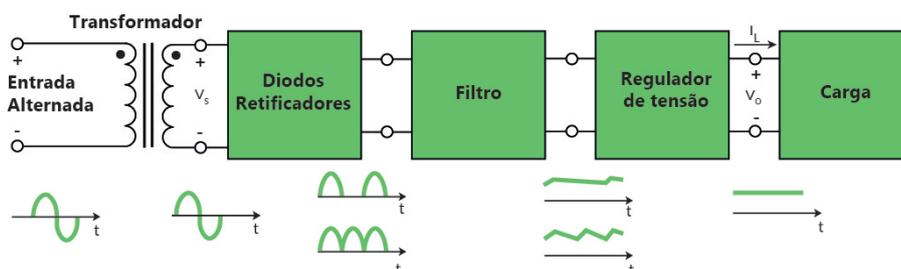


Figura 11.1: Diagrama em Bloco de Fonte de Alimentação Linear

Vamos melhorar um pouco nossa abordagem acrescentando os detalhes de cada uma das partes componentes.

BLOCO DE ENTRADA

Os seguintes elementos de circuito serão acrescentados:

1. Fusível
2. Varistor
3. LED de sinalização

O cálculo do fusível de entrada será obtido a partir da expressão

$$\begin{aligned} \frac{V_p}{V_s} &= \frac{I_s}{I_p} \\ I_p &= I_s \times \frac{V_s}{V_p} \end{aligned} \quad (11.1)$$

Como na partida existe um pico de corrente, é preciso que o valor do fusível considere este valor, senão o mesmo queimará frequentemente. É comum usar um fusível de duas a cinco vezes maior do que o valor calculado. Assim, se a corrente nominal no primário solicitada pela carga for de 1A, pode-se usar um fusível de até 5A.

Exemplo:

Considere uma fonte de alimentação cuja tensão eficaz de entrada seja de 220V e cuja tensão eficaz de saída no secundário do transformador seja de 12V. Considere que a corrente máxima solicitada pela carga seja de 1A. Encontre o valor do fusível adequado.

Solução:

$$I_p = I_s \times \frac{V_s}{V_p} = \frac{12}{220} = 54,5mA \quad (11.2)$$

Considerando um fator de 5, segue-se que o fusível a ser usado será de $0,25A = 250mA$.

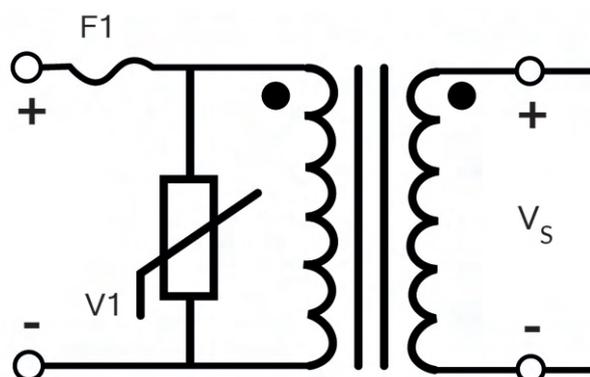


Figura 11.2: Bloco de Entrada

Podemos melhorar nosso circuito proposto incluindo um subcircuito que sinalizaria caso o fusível da fonte de alimentação abra. Perceba que a maior parte da tensão ficará no Capacitor!

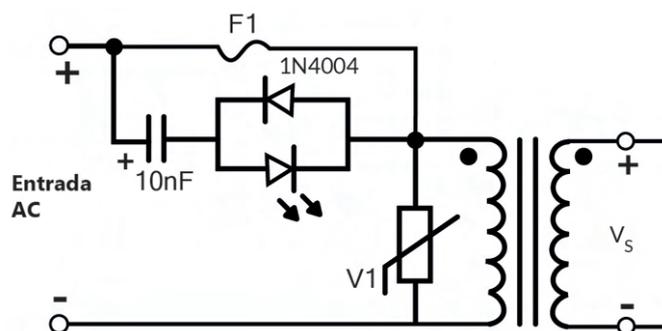


Figura 11.2: Bloco de Entrada

BLOCO DE RETIFICAÇÃO:

Aqui temos as seguintes opções:

- Retificação usando diodos (Meia onda ou Onda completa)
- Retificação usando ponte de diodos integrada

A ponte integrada simplifica a placa de circuitos impressos (PCI). Todavia, aumenta o custo do projeto em si. Para uma solução individual, dá para implementar. Para uma solução em que se pretende fabricar milhares de unidades, não se justifica empregar a ponte integrada a menos que o preço da fonte seja caro o bastante para compensar. A imensa maioria das fontes de alimentação de baixo custo certamente usará diodos na montagem em ponte.

Estes diodos devem ser calculados levando-se em consideração os seguintes fatores:

- Corrente direta máxima que o diodo precisa suportar.
- Tensão reversa máxima a que será submetido.

Por se tratar de uma fonte linear que emprega a tensão de rede de baixa frequência (60 Hz), não se faz necessário usar versões UF dos diodos (UltraFast).

BLOCO DE FILTRAGEM

Como a fonte não é chaveada não há a menor necessidade de se preocupar em bloquear harmônicos que possam sujar a rede de entrada. Se não tem chaveamento, não temos harmônicos. Logo, este bloco se resume no uso de um capacitor que será responsável pela quantidade de ondulação (Ripple) que iremos permitir. Normalmente, usamos capacitores de elevada capacitância, tipo: 2200 μ F, 3300 μ F ou maior.

Naturalmente, este valor de capacitância exige o uso de capacitores eletrolíticos e, portanto, polarizados. Assim, todo cuidado é pouco na hora da montagem para que não ocorra a inversão de polaridade - que pode provocar a explosão do componente.

O projeto poderia terminar aí. Todavia, se permitirmos um valor mais elevado para o Ripple, poderemos usar um capacitor de filtro menor (mais barato) e reduzimos consideravelmente o Ripple no bloco do regulador de tensão - que pode ser um regulador de três terminais (visto neste volume) ou um regulador transistorizado como os estudados no Volume 3 desta série.

BLOCO REGULADOR DE TENSÃO

Este é o nosso último bloco! Aqui podemos considerar três situações:

- Usar um transistor simples como regulador
- Usar um regulador fixo
- Usar um regulador ajustável

A primeira opção será vista no volume 3 desta série. As outras opções foram vistas an-

teriormente. Usar um regulador fixo é muito tranquilo. O ponto que normalmente incomoda o projetista é quando ele quer uma tensão ajustável e percebe que o regulador de tensão não varia de zero volt até o valor máximo projetado. Normalmente, varia de 1,25V até o valor projetado. Para resolver este problema, existe uma solução elegante que mostramos no volume 2 desta série (que emprega um transistor bipolar) e uma solução simples que consiste em colocar vários diodos retificadores em série na saída da fonte. Assim, nossa fonte completa pode ser vista nas figuras a seguir.

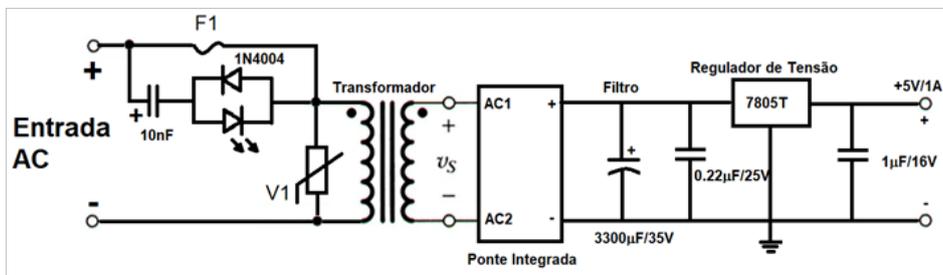


Figura 11.4: Fonte Linear Fixa de 5V/1A

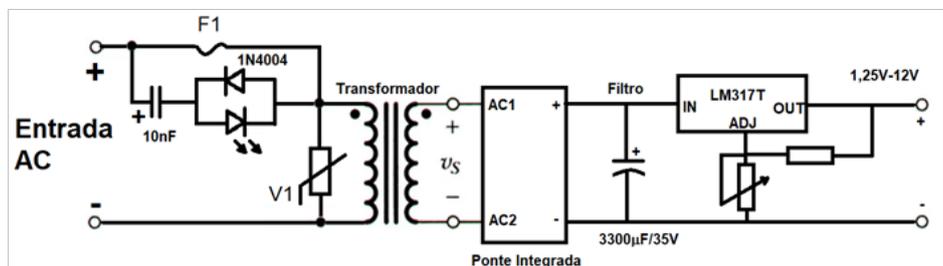


Figura 11.5: Fonte Linear Ajustável de 1,25V a 12V por 1A

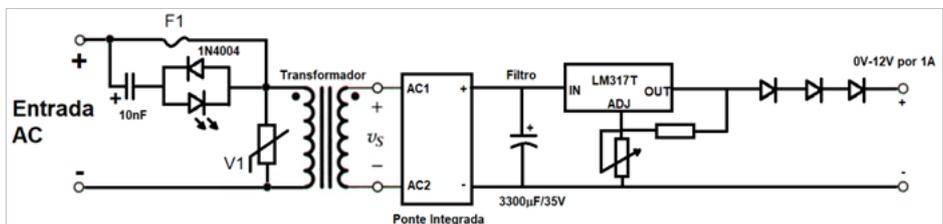


Figura 11.6: Fonte Linear Ajustável de 0V a 12V por 1A

EXERCÍCIOS DE REVISÃO

- 01) O que é uma fonte de alimentação linear?
- 02) Quais são as partes constituintes de uma fonte de alimentação linear?
- 03) Qual a finalidade de se empregar um Varistor na entrada do transformador de uma fonte linear? Como determinamos o Varistor que deve ser usado?
- 04) O que significam os “pontinhos” que são desenhados nos desenhos esquemáticos dos transformadores?
- 05) Pesquise a utilização de PTC em fontes de alimentação linear.
- 06) Em relação a fonte ajustável usando 3 diodos retificadores em série para se eliminar os 1,25V de tensão, que críticas você faria a esta abordagem? Haveria uma forma de eliminar estes diodos?
- 07) Projete uma fonte que forneça +12V/1A, -12V/1A e uma tensão ajustável de 1,25V até 15V.

Capítulo 12

CIRCUITOS CEIFADORES

*“Aquilo que eu escuto, eu esqueço.
Aquilo que eu vejo, eu lembro.
Aquilo que eu faço, eu aprendo.”*
confúcio

12.1 Introdução

12.2 Ceifador Série

12.3 Ceifador Paralelo

12.4 Exercícios de Revisão

Ao final deste capítulo, o leitor deverá ter boas noções sobre:

1. Ceifadores Série
2. Ceifadores Paralelo

12.1 INTRODUÇÃO

Ceifadores, como o próprio nome diz, são circuitos cuja finalidade é cortar (ceifar) uma parte de um sinal. Os retificadores de meia onda que estudamos anteriormente são ceifadores, pois cortam o sinal sem alterar o formato geral. Já os retificadores em onda completa não podem ser chamados de ceifadores porque o formato do sinal final não corresponde ao formato do sinal original ceifando-se uma parcela do mesmo. Classificamos os circuitos ceifadores em dois tipos: **Ceifadores Série** e **Ceifadores Paralelo**. Basicamente, os ceifadores empregam diodos, resistores e fontes de alimentação.

É importante ressaltar aqui que os sinais de entrada não precisam ter uma forma específica. Assim, podemos ter ondas quadradas, senoidais, triangulares, rampas, etc. As aplicações que envolvem circuitos ceifadores têm por objetivo limitar a tensão de modo a evitar um dano por sobretensão. Conforme veremos os ceifadores podem ser positivos, negativos ou duplos (positivo+negativo).

12.2 CEIFADOR SÉRIE

Nos ceifadores série, o diodo é colocado em série com a carga. Considere o seguinte circuito.

A análise do funcionamento deste circuito segue os seguintes passos:

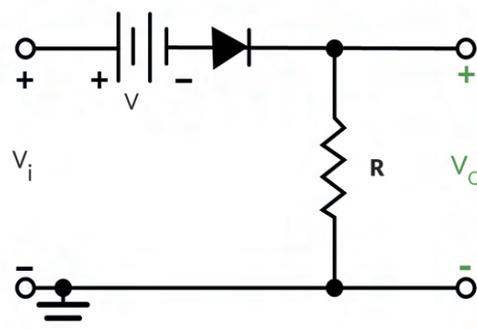


Figura 12.1: Ceifador Série

Passo 1: Determinação do nível de tensão mínima que faz com que o diodo entre em condução. Pense na conexão do diodo com a bateria da forma como está ligada acima, como sendo um diodo cuja tensão de joelho seja de $0,7V + V$.

Passo 2: Vamos supor que a tensão na bateria seja de $1,3V$ e que a tensão de joelho do diodo neste circuito seja de $0,7V$. Suponha que a tensão de entrada seja uma tensão senoidal de $12V$ de pico, conforme ilustrado ao lado.

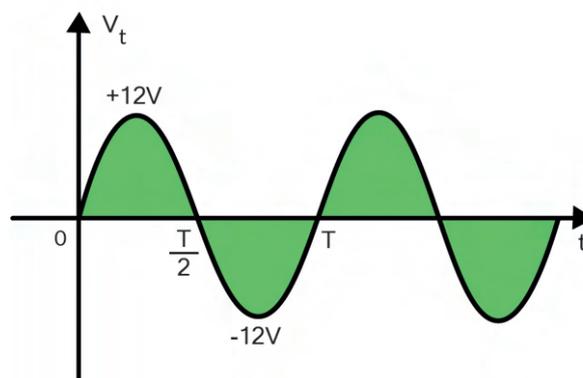


Figura 12.2.: Sinal de Entrada

Desenhe sobre o sinal de entrada, a linha horizontal que determina a tensão mínima que faz o diodo entrar em condução.

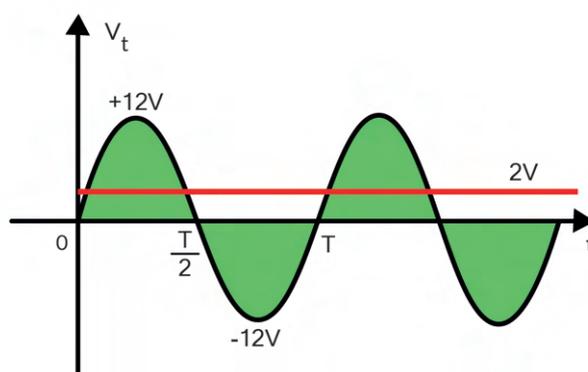


Figura 12.3.: Linha de corte do sinal de entrada

Passo 3: Desenhe o sinal de saída pegando apenas a parte superior do desenho da entrada com a linha de corte. Ou seja, a linha de corte será o zero volt da saída.

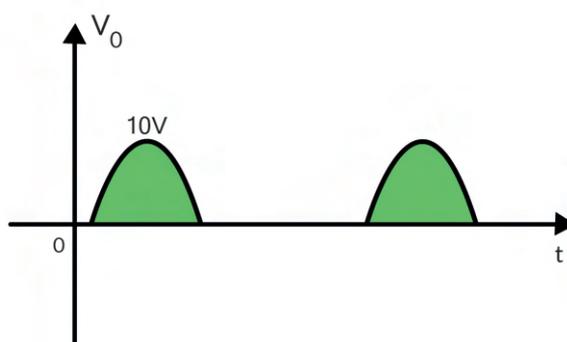


Figura 12.4: Sinal de Saída

Considere agora o mesmo circuito apenas invertendo a polaridade da bateria. Naturalmente, o sinal será deslocado no sentido positivo do eixo das ordenadas, aumentando-se o valor de pico do sinal de saída para $V_p + V_{bat.}$

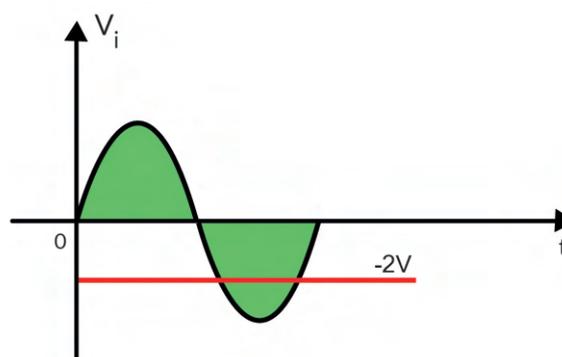


Figura 12.5: Linha de corte do sinal de entrada

De modo que a saída tem o seguinte aspecto:

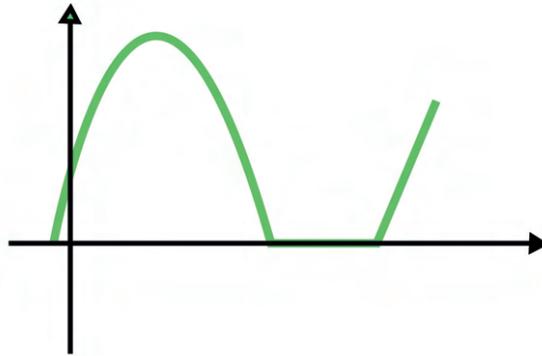


Figura 12.6: Sinal de Saída

12.3 CEIFADOR PARALELO

No ceifador paralelo, o diodo é colocado em paralelo com a carga, podendo ou não incluir uma fonte DC em série com o mesmo. Considere o seguinte circuito

Quando o sinal de entrada for positivo (na verdade, precisa superar 0,7V), o diodo ficará diretamente polarizado e a tensão na saída será igual a 0,7V. Assim, este circuito ceifa os semiciclos positivos. Para os semiciclos negativos a tensão na saída acompanhará a tensão de entrada, uma vez que a corrente no resistor será nula, pois não existe um caminho fechado para que a corrente circule. A inversão do diodo na saída produz o Ceifador Negativo.

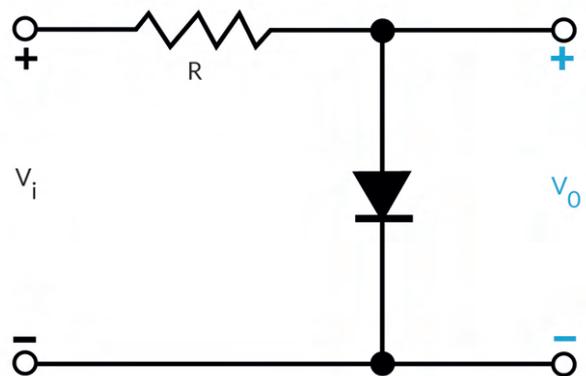


Figura 12.7: Ceifador Paralelo Positivo

Note que poderíamos colocar uma fonte DC em série com o diodo nas duas condições de polaridade trabalhadas anteriormente para os ceifadores em série. Considerando um ceifador paralelo positivo com o mesmo sinal de entrada senoidal visto anteriormente e com uma fonte DC de 1,3V, temos as seguintes possibilidades:

a) Sem fonte DC

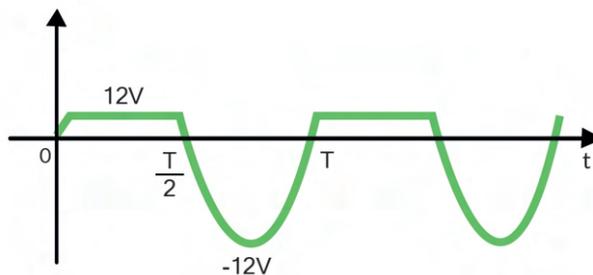


Figura 12.9: Saída do Ceifador Paralelo

b) Com fonte DC e polaridade igual a do diodo: Neste caso a saída é ceifada em $V_{bat} + 0,7V$, ou seja, 2V.

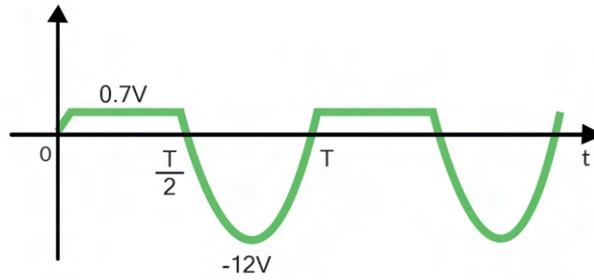


Figura 12.8: Saída do Ceifador Paralelo

- c) Com fonte DC de polaridade oposta ao diodo: Neste caso o ceifamento ocorre em $0,7 - V_{bat}$, ou seja, $-0,6V$.

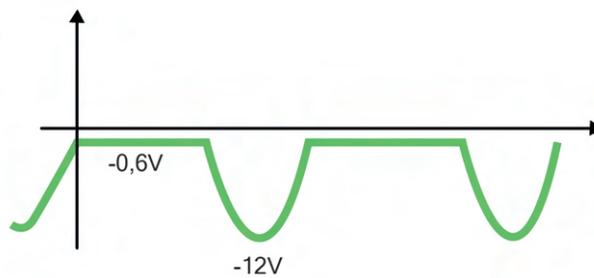


Figura 12.10: Saída do Ceifador Paralelo

Estas mesmas situações podem ocorrer para o ceifador negativo. Deixamos como exercício para o leitor esboçar as curvas de saída destes ceifadores.

EXERCÍCIOS DE REVISÃO

- 01) Considerando um sinal de entrada senoidal com tensão de pico de 12V e diodo com tensão de joelho de 0,7V, ilustre as curvas de saída para um ceifador paralelo negativo nas três situações possíveis:
 - a) Sem empregar fonte DC;
 - b) Usando uma fonte DC com a mesma polaridade do diodo;
 - c) Usando um fonte DC com polaridade oposta ao diodo.
- 02) O que são circuitos ceifadores?
- 03) Quais os tipos de ceifadores abordados neste Capítulo?
- 04) Onde empregamos ceifadores? Pesquise na internet.
- 05) Por que os retificadores em Onda Completa não são ceifadores, mas os de meia onda são?

Capítulo 13

CIRCUITOS GRAMPEADORES

“Se eu vi mais longe, foi por estar de pé sobre ombros de gigantes.”

Isaac Newton

13.1 Introdução

13.2 Exercícios de Revisão

Ao final deste capítulo, o leitor deverá ter boas noções sobre:

1. Circuitos grampeadores

13.1 INTRODUÇÃO

Um circuito grampeador é um circuito que desloca o nível DC de um sinal sem alterar sua forma de onda. Os circuitos grampeadores incluem um resistor, um capacitor e um diodo. Algumas vezes, podemos incluir uma fonte DC.

O capacitor sempre liga a entrada com a saída. É possível deslocar o nível DC para cima ou para baixo. Considere o circuito a seguir.

Sendo um circuito RC, precisamos levar em conta o tempo requerido pelo capacitor para se carregar e descarregar ($\tau = 5RC$). Observe que esta constante de tempo é aproximadamente zero quando o diodo está conduzindo porque sua baixa resistência vai produzir um valor pequeno para a resistência equivalente. Logo o capacitor se carregará rapidamente. Por outro lado, quando o diodo não está conduzindo, a resistência equivalente será o valor do próprio resistor R. E nesse caso o capacitor se descarregará através de R com constante de tempo $5RC$. O diodo ficará neste estado por $T/2$ segundos; em que T é o período do sinal de entrada em segundos. Neste intervalo, o capacitor não poderá ser descarregado. Assim, $T/2 \ll \tau$ para que o capacitor não se descarregue durante o intervalo de tempo em que o diodo está cortado.

Para o circuito anterior, observe que o sinal é deslocado para baixo.

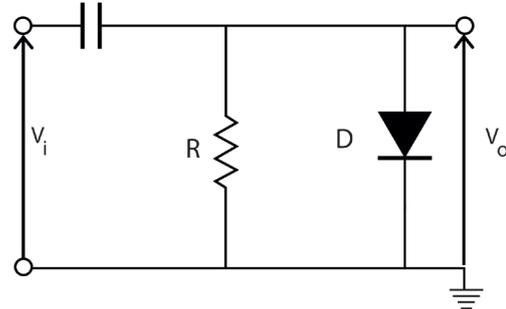


Figura 13.1: Circuito Grampeador Negativo

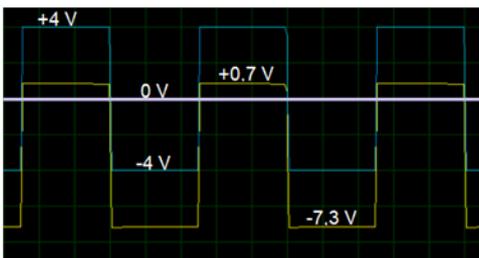


Figura 13.2: Visualização em Osciloscópio

O sinal de entrada é uma onda quadrada com 4V de pico positivo e -4V de pico negativo. Observe que a saída deslocada poderia ser mais afastada ainda se fosse colocada uma fonte DC série com o diodo.

Se o diodo for invertido, no circuito da Fig. (13.1), teremos um deslocamento para cima do sinal de entrada. Observe que a polaridade da bateria também pode ser invertida. De modo que existem 6 possibilidades:

- Grampeamento positivo sem bateria
- Grampeamento negativo sem bateria
- Grampeamento positivo com bateria em um sentido
- Grampeamento positivo com inversão na bateria
- Grampeamento negativo com bateria em um sentido
- Grampeamento negativo com inversão na bateria

É importante ressaltar aqui que o sinal de entrada pode ser de outra forma (senoidal, triangular, rampa) além da onda quadrada usada nesta discussão.

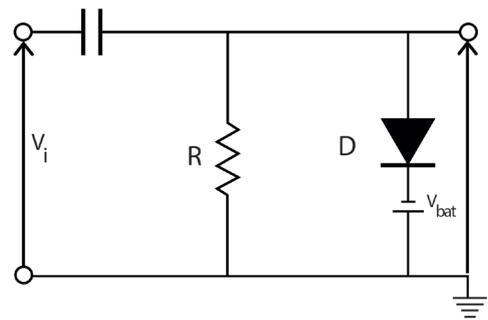
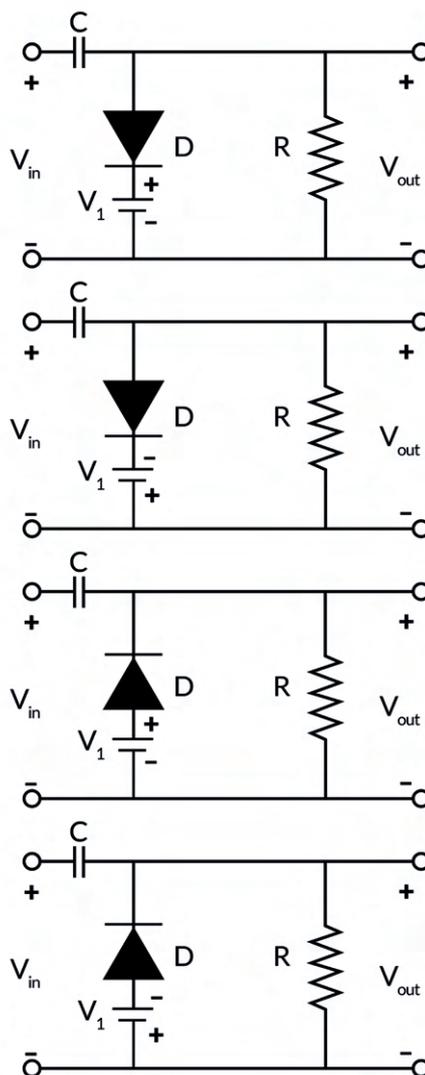
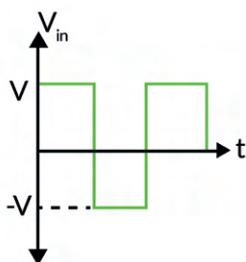


Figura 13.3: Uso de Bateria para aumentar o deslocamento

13.2 EXERCÍCIOS DE REVISÃO

- 01) O que é um circuito grampeador? Quais são os componentes de um circuito grampeador?
- 02) Que relação deve ser observada entre o período do sinal que se deseja grampear e a constante de tempo do circuito RC?
- 03) Mostre o circuito de um grampeador positivo sem bateria.
- 04) No circuito anterior, dimensione o Resistor e o Capacitor, sabendo-se que o sinal de entrada é um sinal de 1kHz. Faça a simulação e verifique se os resultados obtidos estão de acordo com o que foi planejado.
- 05) Prove que a condição para o funcionamento do circuito grampeador é que
- 06) Por que o circuito grampeador sempre tem um capacitor em sua entrada? $f \gg \frac{\tau}{2}$
- 07) Qual a finalidade da bateria em série com o diodo?
- 08) O que acontece se o período do sinal for da mesma ordem de grandeza da constante de tempo do circuito RC do grampeador?
- 09) Para cada um dos circuitos a seguir, obtenha a forma de onda da saída.



Capítulo 14

SISTEMAS EM ALTA FREQUÊNCIA

“Não poderás ajudar os homens de maneira permanente se fizeres por eles aquilo que eles podem e devem fazer por si próprios.”
Abraham Lincoln

14.1 Introdução

14.2 Elementos Parasitas

14.3 Capacitâncias no Diodo Semicondutor

14.4 Modelo para Pequenos Sinais e Alta Frequência

14.5 Exercícios de Revisão

Ao final deste capítulo, o leitor deverá ter boas noções sobre:

1. **Elementos parasitas**
-

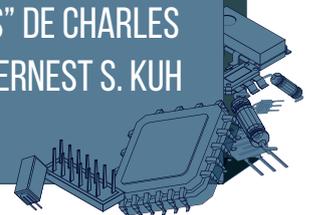
14.1 INTRODUÇÃO

Sistemas operando em altas frequências não são nada simples de se analisar. Quanto maior a frequência, menor o comprimento de onda. Quando o comprimento de onda encontra-se na mesma faixa de grandeza dos circuitos eletrônicos, algumas leis básicas, como as Leis de Kirchhoff, deixam de funcionar porque o circuito não é mais um Circuito Concentrado; dizemos que nesta situação o circuito é distribuído¹.

O projeto da placa de circuito impresso usada em um circuito eletrônico precisa considerar a existência ou não de sinais de frequências elevadas. Uma trilha que transporte um sinal de alta frequência pode se comportar como uma antena irradiando potência e causando interferência no próprio circuito ou em circuitos próximos (por acoplamento). Trilhas vizinhas podem, inclusive, interferirem uma na outra. Neste caso, planos de aterramento se fazem **obrigatórios**. Lembre-se de que a reatância capacitiva (X_C) é inversamente proporcional a frequência e que as capacitâncias das junções semicondutoras, muito elevadas nas baixas frequências (sendo, portanto, circuitos abertos), caem para valores baixos acoplando sinais indesejados ao circuito.

Para se analisar sistemas em alta frequência, precisamos primeiro conhecer o modelo de alta frequência para os dispositivos que vamos adotar. Precisamos definir exatamente qual é a faixa desta chamada “alta frequência”: kHz, MHz, GHz, THz?

¹ UMA BOA REFERÊNCIA SOBRE ESTE PONTO, O ALUNO PODERÁ ENCONTRAR NO LIVRO “TEORIA BÁSICA DE CIRCUITOS” DE CHARLES A. DESOER E ERNEST S. KUH



Aqui não iremos tratar de sistemas de transmissão de sinais de rádio, TV ou Micro-ondas. Nosso objetivo, neste capítulo, é entender o que ocorre quando temos altas frequências envolvidas em um dado circuito eletrônico e como blindar nosso circuito evitando a propagação (o espalhamento) deste sinal. Como escolher os componentes adequados para estes sistemas?

14.2 ELEMENTOS PARASITAS

Elementos parasitas são componentes que não existem fisicamente, mas que surgem quando as frequências tornam-se elevadas. Por exemplo, entre duas trilhas de uma placa de circuito impresso pode surgir um capacitor que faz um acoplamento entre as mesmas. Este capacitor não existe fisicamente. Basta reduzir a frequência para que o seu efeito deixe de existir. É como se fossem fantasmas. A gente não vê, mas seus efeitos se fazem sentir.

- a) Há muitas formas de se evitar este acoplamento entre trilhas. Por exemplo:
- b) Aumentando-se a distância entre as trilhas.
- c) Colocando-se as trilhas em camadas distintas da placa de circuito impresso.
- d) Fazendo-se uso de um plano de aterramento com componentes de desacoplamento inseridos; tais como os capacitores C_x e C_y usados em fontes chaveadas (que possuem altas frequências).
- e) Usando-se filtros para se atenuar determinadas frequências.

Um componente eletrônico que tenha sido danificado deve, em princípio, ser substituído por outro com as mesmas especificações. Usar componentes sem verificar antecipadamente suas características técnicas pode produzir um mal maior. É sempre bom consultar o fabricante, especialmente, quando o componente danificado saiu de linha ou não é encontrado facilmente. O uso de um outro componente “equivalente” pode produzir no futuro um desvio ainda maior no desempenho do equipamento. Reflita comigo de forma bem simples: suponha que um fusível desconhecido de 1A seja danificado. Por não se conseguir um idêntico, coloca-se um outro de 2A. Alguns anos mais tarde, o mesmo componente é danificado. O técnico não o reconhece, mas percebe que ele deve ser para uma corrente maior do que 1A devido às suas dimensões físicas. Então, ele coloca um de 6A. Veja que na maioria dos casos a história das substituições deste componente não fica registrada e cada vez mais nos afastamos das especificações técnicas. O mesmo ocorre com a substituição de capacitores. Leva-se em conta sua capacitância, mas esquece-se de que todo capacitor tem uma resistência série equivalente (ESR).

No caso de sistemas em alta frequência as características que devem ser observadas são:

No caso de diodos: Tempo de Recuperação Reversa, Fator de Suavização (Fator S), Capacitância do diodo, etc.

No caso de Transistores: Frequência de Transição, Capacitância de realimentação, Capacitância de Saída, etc.

14.3 CAPACITÂNCIAS NO DIODO SEMICONDUTOR

Vimos anteriormente que os diodos podem ser polarizados diretamente ou reversamente. No primeiro caso, temos uma redução na largura da zona de depleção - que é uma região “desprovida de cargas” (ou seja, é um dielétrico). Note que do lado P temos uma barreira de potencial negativa devido aos ânions que se formam quando as impurezas trivalentes recebem um elétron extra. No lado N temos uma barreira de potencial positiva devido aos cátions que se formam quando as impurezas pentavalentes perdem seu quinto elétron durante

o processo de difusão. Então, é fácil ver que uma junção de um diodo se comporta como um Capacitor de placas paralelas.

Note que a capacitância da junção do diodo depende da polarização: **Reversamente polarizado**, a largura da zona de depleção aumenta (ou seja, aumenta-se a separação entre as placas paralelas), portanto, reduz-se a capacitância da mesma. Esta capacitância é chamada de **Capacitância da junção ou de Transição**. A Capacitância de Transição é dada por:

$$C_T = \frac{dQ}{dV} \tag{14.1}$$

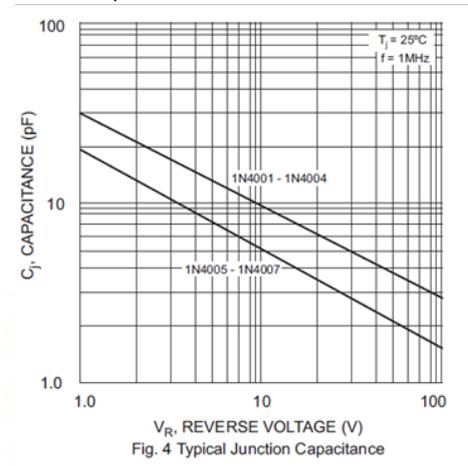
Por outro lado, quando **diretamente polarizado**, a largura da zona de depleção diminui e, portanto, aumenta-se a capacitância da junção que forma o diodo. Neste caso, a capacitância é chamada de **Capacitância de Difusão** e está relacionada à altas correntes diretas. A Capacitância de Difusão é dada por:

$$C_D = \epsilon \frac{W}{A} = \frac{\tau I_D}{\eta V_T} \tag{14.2}$$

em que ϵ é a constante dielétrica (depende do tipo de material), W é a largura da junção e A é a área da seção transversal, τ é o tempo de vida médio dos portadores, I_D é a corrente direta que atravessa o diodo, η é a constante de recombinação e V_T é a tensão na junção.

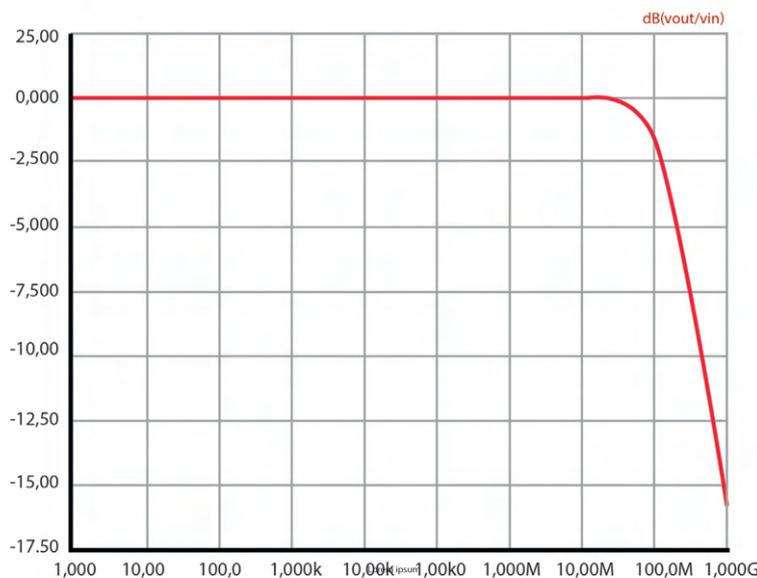
A figura ao lado ilustra a variação da capacitância para diodos retificadores da série 4000.

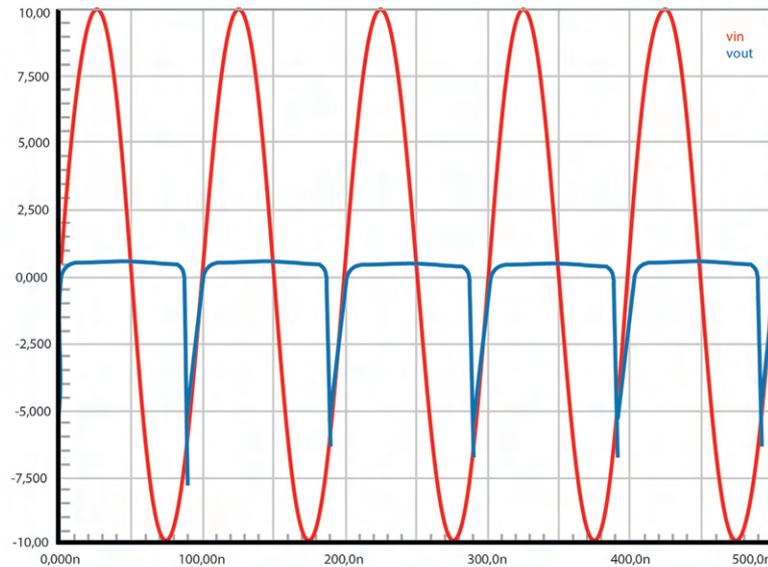
A próxima figura ilustra o ganho, expresso em dB, em função da frequência para um diodo retificador ultra-rápido. Para se ter uma ideia, um diodo da série 4000 possui frequência de transição de 2,5MHz.



A próxima figura ilustra a resposta de um retificador de meia onda para um sinal de 10MHz.

Nesta figura perceba o grau de distorção sofrido pelo sinal, além do deslocamento da fase do sinal original. Para altas frequências usamos diodo especiais (diodos Schottky).





14.4 MODELO PARA PEQUENOS SINAIS E ALTA FREQUÊNCIA

Para pequenos sinais e em alta frequência, o diodo pode ser modelado como sendo um resistor em paralelo com um capacitor. O resistor representa a resistência ôhmica entre os terminais do mesmo e o capacitor representa a capacitância equivalente entre os terminais do mesmo. Se diretamente polarizado, esta é a capacitância de difusão; caso contrário é a capacitância da junção. Ambas são em pF.

14.5 EXERCÍCIOS DE REVISÃO

- 01) Por que devemos ter tanto cuidado em sistemas que operem em altas frequências?
- 02) Quando temos um capacitor em um circuito eletrônico, por que o mesmo produz uma defasagem?
- 03) Em um circuito RC série como podemos calcular a defasagem produzida pelo capacitor? Dica: Use seus conhecimentos de análise de circuitos AC.
- 04) Um diodo possui duas capacitâncias associadas ao mesmo. Quais são estas capacitâncias?
- 05) O que é um capacitor parasita? Quando é que ele surge?

Capítulo 15

DIODOS EM ALTA FREQUÊNCIA

“Nunca ande por trilhas, pois assim só irá até onde outros já foram.”
Alexander Graham Bell

15.1 Introdução

15.2 Exercícios de Revisão

Ao final deste capítulo, o leitor deverá ter boas noções sobre:

- 1. Influências das Capacitâncias na resposta do diodo**

15.1 INTRODUÇÃO

A análise de sistemas para baixas frequências é bem conhecida pelos estudantes. Todavia, algumas vezes os sinais envolvidos são sinais de alta frequência. Falar em alta frequência é falar de sinais que variam muito rapidamente. Neste sentido, por exemplo, dois fios condutores separados fisicamente entre si, mas relativamente próximos constituem um capacitor parasita, em que um dos fios representa a placa superior do capacitor, o outro fio representa a placa inferior e a separação entre os fios representa o dielétrico do capacitor. Para frequências elevadas, a reatância capacitiva é baixa, uma vez que

$$X_C(\Omega) = \frac{1}{2\pi f C}$$

(15.1)

Isto significa que há uma interferência do sinal em um fio no sinal presente no outro fio. Note que para baixas frequências, o valor da reatância capacitiva é elevado! Ou seja, há um isolamento entre os dois condutores.

Perceba que se o sistema não tiver capacidade de responder rapidamente (alta frequência) aos estímulos, a resposta ficará distorcida. Ademais, para sinais de alta frequência até mesmo uma trilha pode se transformar em uma antena, irradiando livremente. O modelo do diodo em altas frequências precisa incluir estes efeitos.

Lembrando que um número imaginário pode ser representado por um módulo e um ângulo de fase, percebemos que a melhor forma de representar a impedância capacitiva é por meio de um número imaginário, uma vez que o capacitor atrasa a tensão em relação à corrente por um ângulo de 90°. Assim, definimos a impedância de um capacitor por

$$Z_C(\Omega) = -jX_C$$

(15.2)

em que $j=\sqrt{-1}$ é a unidade imaginária. Então, se a tensão tem ângulo 0° , pela lei de Ohm a corrente terá ângulo de 90° , conforme figura abaixo.

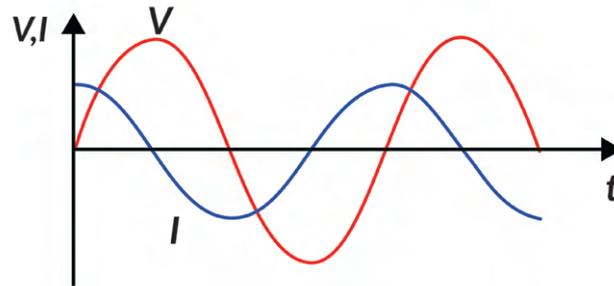


Figura 15.1: Relação de Fase entre Tensão e Corrente em um Capacitor

O modelo mais simples para um diodo em alta frequência está ilustrado a seguir.

Em que r_d é a resistência dinâmica do diodo diretamente polarizado, r_r é a resistência dinâmica do diodo reversamente polarizado, R_s é a resistência ôhmica de contacto, $C_j=C_T$ é a capacitância de transição e C_d é a capacitância de difusão.

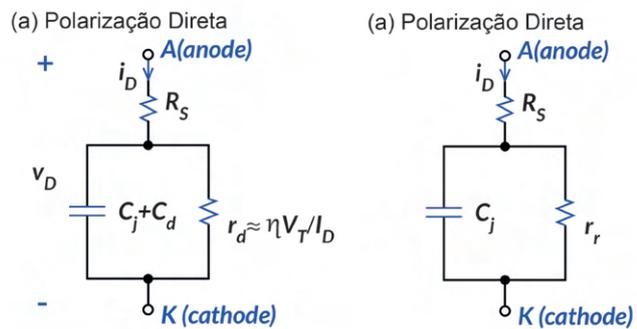


Figura 15.2: modelo mais simples para um diodo em alta frequência

EXERCÍCIOS DE REVISÃO

- 01) O que é o tempo de recuperação reversa de um diodo?
- 02) Como o tempo de recuperação reversa é definido?
- 03) Um diodo possui um tempo de recuperação reversa de 4ns e uma corrente direta de 10mA. Se este diodo for polarizado reversamente, qual o valor da corrente após o tempo de recuperação reversa?
- 04) Mostre a tensão de saída de um retificador de meia onda quando a frequência for alta e o diodo tiver um tempo de recuperação reverso relativamente grande.
- 05) Pesquise na internet o conceito Tempo de Armazenamento.

Capítulo 16

RESPOSTA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

“Um livro é a prova de que a humanidade é capaz de fazer magia.”
Carl Sagan

16.1 Introdução

16.2 Exercícios de Revisão

Ao final deste capítulo, o leitor deverá ter boas noções sobre:

1. *Análise de Sinais no Domínio da Frequência*

16.1 INTRODUÇÃO

Quando analisamos um sistema é importante conhecer a resposta do mesmo no domínio da frequência. Por exemplo, um amplificador pode funcionar muito bem para um determinado sinal e deixar de responder ou atenuar a resposta do sistema a este mesmo sinal, apenas se a frequência do mesmo for alterada.

Em verdade, todos os sistemas podem ser, de certa forma, caracterizados através de sua resposta no domínio da frequência. Considere o seguinte circuito (quadripolo):

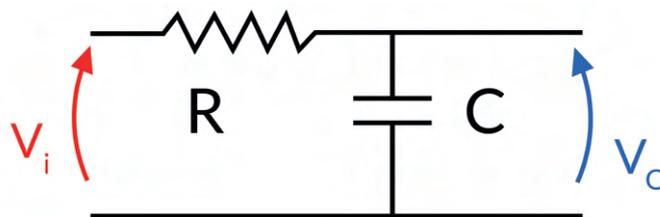


Figura 16.1: Circuito RC

Usando a Regra do Divisor de tensão, podemos escrever:

$$V_o = \frac{Z_C}{R + Z_C} \times V_i$$

(16.1)

em que

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C}$$

(16.2)

Portanto, resulta:

$$V_o = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} \times V_i = \frac{1}{1 + j\omega C} \times V_i$$

(16.3)

Definindo-se

$$\omega_o = \frac{1}{RC'}$$

(16.4)

resulta:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_o}}$$

(16.5)

Observe que

$$\left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right)^2}}$$

(16.6)

Note que se $\omega \ll \omega_o$ resulta que a saída e a entrada são aproximadamente iguais em módulo. Por outro lado, se $\omega \gg \omega_o$ resulta que a saída irá convergir para zero! Portanto, trata-se de um filtro PASSA-BAIXAS!

Observe que se $\omega = \omega_o$, então, pela Eq. (16.6) resulta:

$$\left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{2}} = 2^{-1/2}$$

(16.7)

Então, se quisermos o valor em dB devemos efetuar a seguinte conta:

$$10 \times \log_{10} \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = -\frac{20}{2} \times \log_{10} 2 = -3dB$$

(16.8)

A frequência ω_o , portanto, é conhecida como frequência de corte a -3dB.

Outro parâmetro importante que não pode deixar de ser analisado é a fase! Da teoria dos números complexos sabemos que a fase da Equação (16.5) é dada por

$$\phi = -\arctg\left(\frac{\omega}{\omega_o}\right) = -\arctg\left(\frac{f}{f_o}\right) \quad (16.9)$$

Logo, percebemos que quando $\omega \gg \omega_o$, a defasagem tende para 90°. Caso contrário, a defasagem tende a 0°; ou seja, sinais em fase. Na frequência de corte a -3dB, a defasagem é de 45°.

A relação entre V_o e V_i definida na Eq. (16.6), normalmente chamamos de **Função de Transferência do Sistema** e representamos pela letra H. Assim, escrevemos:

$$H = \left| \frac{V_o}{V_i} \right| \quad (16.10)$$

Se o Resistor e o Capacitor trocarmos de lugar na Fig. (16.1), teremos um Filtro Passa-Altas. A demonstração fica a cargo do leitor!

Observe ainda que podemos colocar um filtro Passa-Baixas em série com um filtro Passa-Altas de modo que a frequência de corte do Passa-Altas seja menor do que a frequência de corte do Passa-Baixas. Neste caso, apenas as frequências entre as duas frequências de corte é que passarão pelo filtro resultante. Ou seja, temos um filtro Passa-Faixas.

EXERCÍCIOS DE REVISÃO

- 01) O que significa analisar um circuito no domínio da frequência?
- 02) O que é frequência de ressonância?
- 03) Na frequência de ressonância o que podemos dizer sobre a impedância capacitiva?

Capítulo 17

DIODOS ESPECIAIS - PARTE 2

“O maior inimigo do conhecimento não é a ignorância, é a ilusão do conhecimento.”

Stephen Hawking

17.1 Introdução

17.2 Diodo Schottky

17.3 Diodo Tunel

17.4 Diodo PIN

17.5 Diodo GUNN

17.6 Diodo Varicap

17.7 Exercícios de Revisão

Ao final deste capítulo, o leitor deverá ter boas noções sobre:

1. **Diodo Schottky**
 2. **Diodo Tunel**
 3. **Diodo PIN**
 4. **Diodo GUN**
 5. **Varicap**
-

17.1 INTRODUÇÃO

Nesta seção iremos apresentar alguns diodos que devido à sua estrutura apresentam propriedades especiais tais como operação em altas frequências, capacidade de suportar elevadas tensões reversas, utilização como capacitores ajustáveis em circuitos de sintonia, possibilidade de uso em aplicações ópticas, presença de uma região de resistência negativa em sua curva de operação (muito explorada em osciladores), etc. Alguns, apesar de pouco conhecidos, são usados em aplicações bem específicas, tal como na área de telecomunicações.

17.2 DIODO SCHOTTKY

É interessante que muitas pessoas pensem que o diodo Schottky tenha sido inventado por Walter Schottky. Na verdade, ele não criou este dispositivo, mas sem as suas pesquisas (1938) sobre o efeito retificador de uma junção metal-semicondutor este dispositivo não existiria. A curva característica de operação do diodo Schottky e sua simbologia estão ilustrados a seguir.

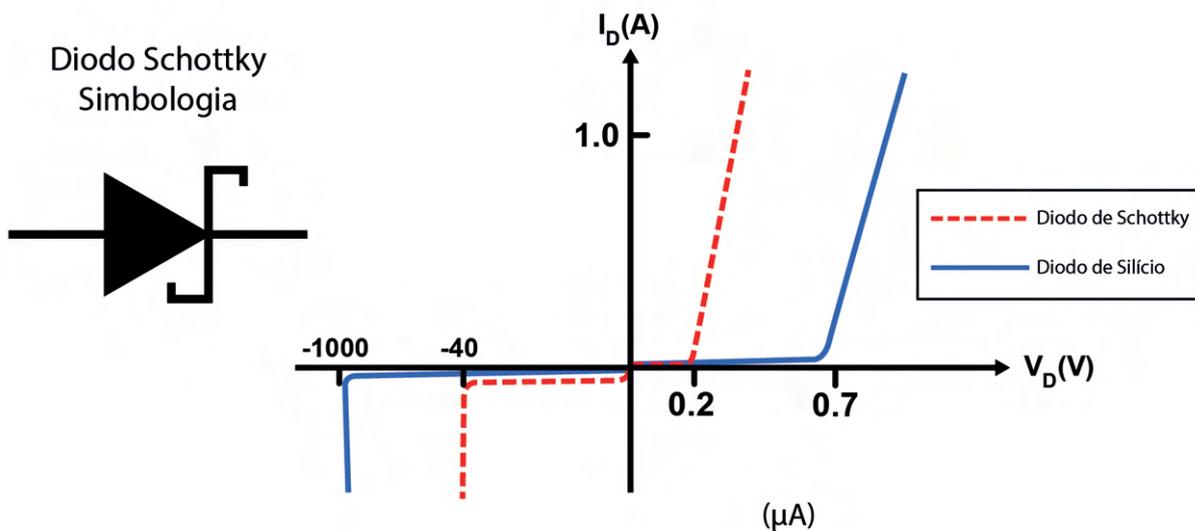


Figura 17.1: Simbologia e Curva de Operação do Diodo Schottky

Algumas características do diodo Schottky são:

- Dispositivo unipolar
- Alta velocidade
- Menor tensão de joelho (0,1V)
- Tensões reversas, em geral, menores do que 100V

Encontramos os diodos Schottky nas seguintes aplicações:

- Aplicações de alta potência com bom rendimento
- No chaveamento de sinais (tempo de recuperação reversa menor)
- Em fontes de alimentação chaveadas
- Em circuitos de alta frequência (RF Mixer)

A figura a seguir mostra a saída de um retificador usando um diodo comum em alta frequência.

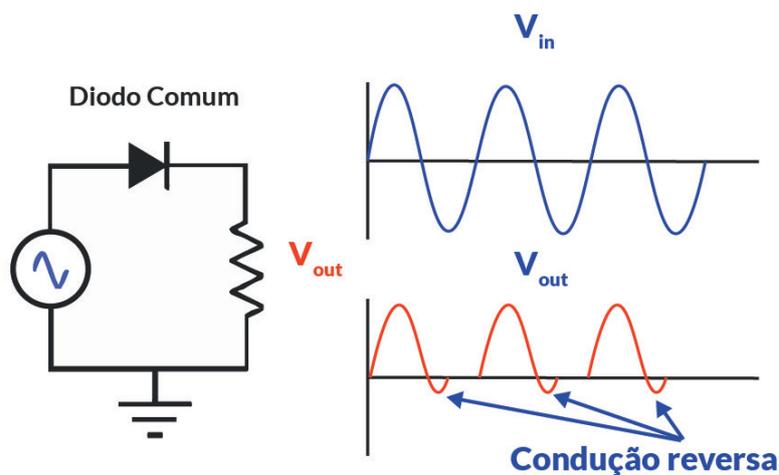


Figura 17.2: Diodo Comum em Alta Frequência

A figura a seguir ilustra um diodo Schottky atuando como retificador em alta frequência.

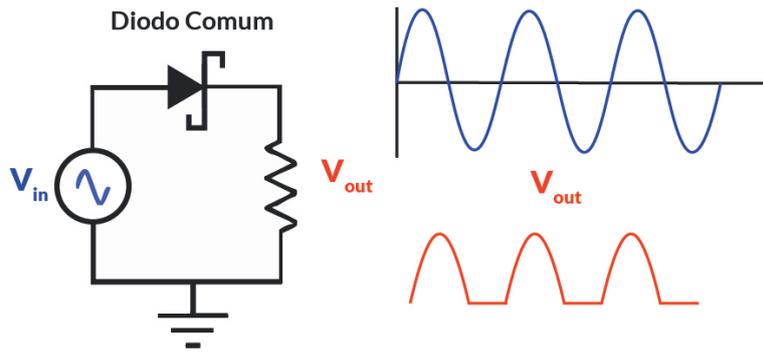


Figura 17.3: Diodo Schottky em Alta Frequência

17.3 DIODO TUNEL

É um diodo capaz de responder a altas frequências, com aplicações na área de micro-ondas. O diodo túnel é fortemente dopado e possui uma região de depleção muito estreita (100nm). Um fato importante para este diodo é que o mesmo apresenta uma região de resistência negativa, conforme ilustra a figura a seguir.

A curva característica de operação, sua simbologia e um diodo real estão ilustrados a seguir.

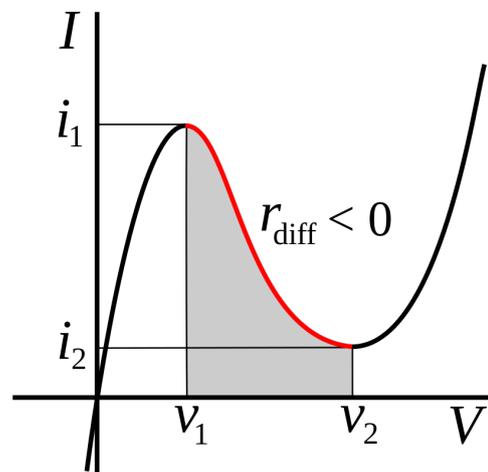


Figura 17.4: Diodo tunel

17.4 DIODO PIN

O diodo PIN é construído tendo uma região de material semicondutor intrínseco entre as camadas P e N, com as camadas P e N fortemente dopadas. Este diodo encontra aplicações como atenuadores, chaves rápidas, fotodetectores e também aplicações em eletrônica de potência (altas tensões).

A figura a seguir ilustra a simbologia do diodo PIN.

Para o diodo PIN, o aumento na corrente que o atravessa provoca uma redução em sua resistência, conforme ilustrado a seguir.

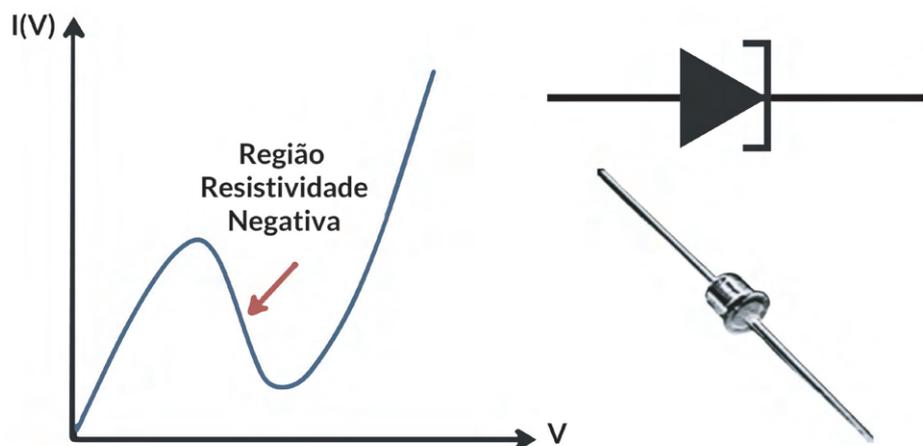


Figura 17.5: Curva de Operação, Simbologia e exemplo real

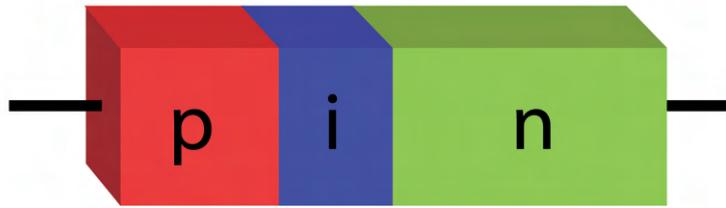


Figura 17.6: Diodo PIN

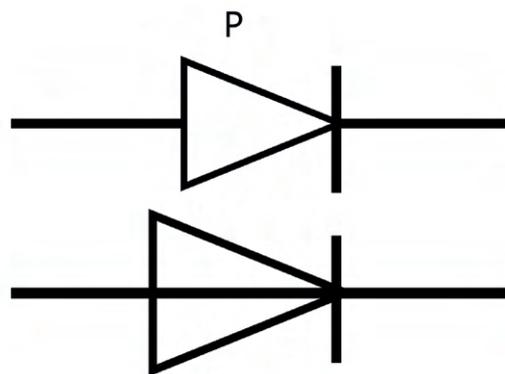


Figura 17.7: Simbologias do Diodo PIN

17.5 DIODO GUNN



17.8: Característica Resistência x Corrente

Assim como o diodo túnel, o diodo Gunn é fortemente dopado e também apresenta uma resistência negativa. Diferentemente dos outros diodos, o diodo Gunn é construído com apenas uma região N. Em verdade, o diodo Gunn possui três regiões – sendo duas regiões fortemente dopadas separadas por uma região fracamente dopada. Também encontra aplicações em dispositivos de micro-ondas.

17.6 DIODO VARICAP

O diodo **Varicap** funciona como um capacitor controlado por uma tensão. A região de depleção seria exatamente o dielétrico do capacitor. A polarização reversa altera a largura da zona de depleção e, portanto, a capacitância. São diodos usados em circuitos de sintonia, ao invés de capacitores ajustáveis. Sua capacitância é da ordem de pF (pico Farads). A seguir ilustramos sua simbologia eletrônica.

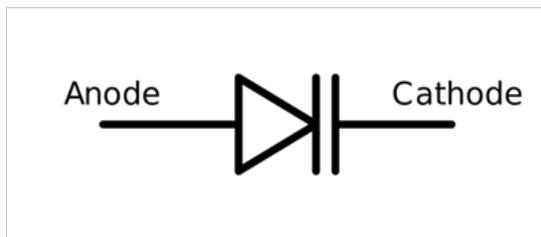
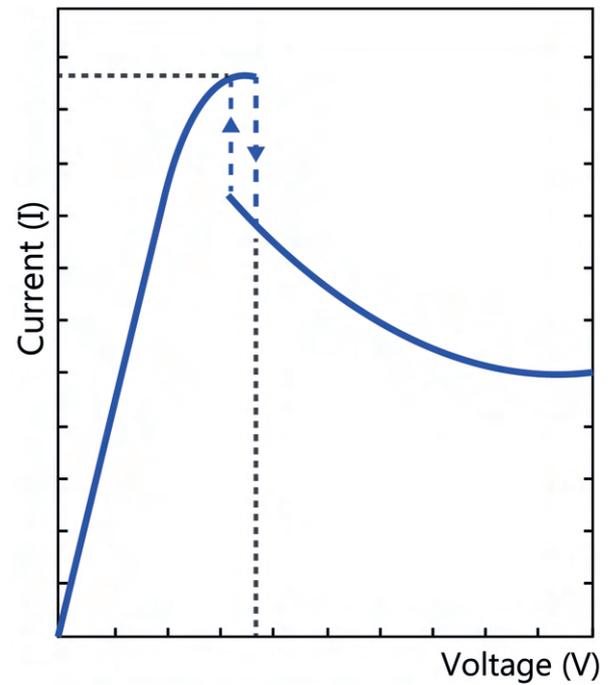


Figura 17.10: Simbologia do Diodo Varicap



17.9: Diodo Gunn

17.7 EXERCÍCIOS DE REVISÃO

- 01) O que é um diodo Schottky? Cite algumas de suas características.
- 02) Enumere algumas áreas de aplicação do diodo Schottky?
- 03) Por que usamos diodo Schottky em fontes chaveadas?
- 04) O que é um diodo Tunel?
- 05) Qual a principal característica do diodo tunel?
- 06) Qual a principal aplicação do diodo tunel?
- 07) O que é um diodo PIN? Mostre sua simbologia.
- 08) O que podemos dizer sobre a dopagem das regiões P e N de um diodo PIN?
- 09) Onde aplicamos os diodos PIN?
- 10) O que é um diodo GUN? Onde aplicamos o diodo GUN?
- 11) O que é um diodo Varicap? Mostre sua simbologia?
- 12) Onde usamos o diodo Varicap?

Capítulo 18

DIODOS ESPECIAIS - PARTE 3

*"Todas as verdades são fáceis de perceber depois de terem sido descobertas, o problema é descobri-las."
Galileu Galilei*

18.1 Introdução

18.2 Luz

18.3 Fotodiodo

18.4 Diodo Laser

18.5 Exercícios de Revisão

Ao final deste capítulo, o leitor deverá ter boas noções sobre:

1. **Fotodiodo**
 2. **Diodo Laser**
-

18.1 INTRODUÇÃO

O fotodiodo e o diodo laser fecham nosso estudo, neste volume, dos dispositivos que envolvem efeitos luminosos, tratados inicialmente no Capítulo 6 desta obra - quando apresentamos o diodo emissor de luz (LED). No volume 2 desta série focaremos nas aplicações destes dispositivos. Aqui nos limitaremos a apresentar estes dispositivos, citando suas características funcionais, suas curvas de operação e suas áreas de aplicação. Alguns datasheets serão utilizados como apoio ao entendimento dos parâmetros básicos destes dispositivos.

Para um melhor entendimento faremos uma breve discussão sobre a luz, identificando a faixa visível e outras propriedades da mesma e sobre os efeitos da excitação térmica sobre a geração de portadores.

18.2 LUZ

A luz é, na verdade, uma onda eletromagnética que se propaga no espaço na velocidade da luz. Sendo uma onda eletromagnética, ela possui dois parâmetros básicos: seu comprimento de onda (λ) e sua frequência (f). Em verdade, poderíamos dizer que só existe um único parâmetro, uma vez que comprimento de onda e frequência são como os dois lados de uma mesma moeda - dado um, sabemos o outro. A relação entre estes parâmetros é dada pela equação a seguir.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

(18.1)

em que c é a velocidade da luz no vácuo, f a frequência da onda e λ é o comprimento de onda.

A cor que observamos corresponde ao comprimento de onda. Assim, se a cor é azul, o comprimento de onda encontra-se entre 440nm e 485nm. Note aqui que o olho humano possui uma limitação, em termos de comprimentos de onda que podem ser percebidos. A faixa visível vai do vermelho ao violeta. Abaixo do vermelho temos o infravermelho e além do violeta temos o ultravioleta. A figura a seguir ilustra estas faixas.

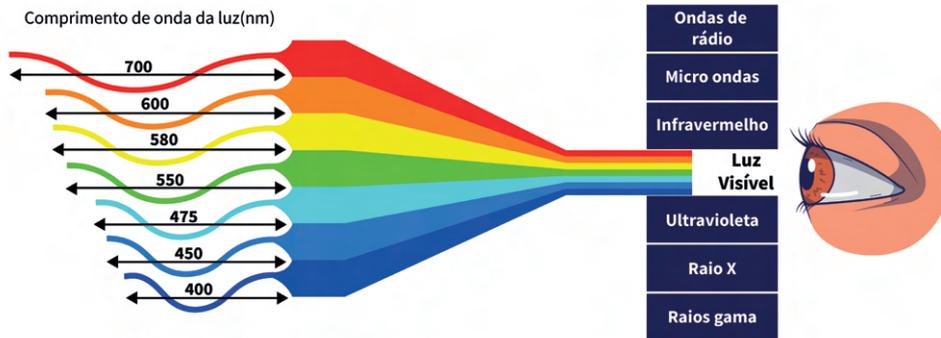


Figura 18.1: Espectro visível

Luz é energia pura! Basta lembrar a equação de Planck,

$$E = hf \tag{18.2}$$

Sendo energia, ele pode ser transferida. E é exatamente isso que acontece quando a luz incide em um objeto, ela o aquece, ou seja, excita-o aumentando o nível de vibração das partículas que compõem o material. Neste estado excitado, elétrons transitam para órbitas mais energéticas. Ao retornarem para sua órbita original devolvem esta energia absorvida na forma de fótons! Se estes fótons estiverem na faixa visível serão percebidos como luz!

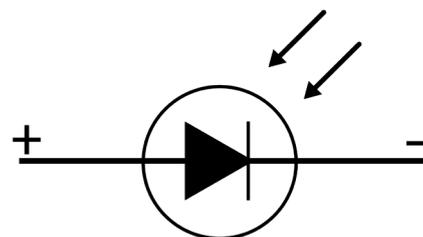
Dependendo do tipo de material, podemos ter mais ou menos luz. A emissão de fótons é, na verdade, o resultado da recombinação entre elétrons e lacunas. Existem materiais que passam para o estado excitado mais facilmente e um número maior de fótons é expelido. Cuidado! Não pense nos fótons como partículas, mas como pacotes de energia!

Não iremos aqui tecer comentários mais aprofundados que, em verdade, fogem ao objetivo desta obra. Existem livros de Física dos Semicondutores que tratam devidamente deste assunto (ver SAH1994)

18.3 FOTODIODO

O fotodiodo é um diodo que produz um sinal proporcional a quantidade de luz que incide no mesmo. Ele faz o papel reverso do diodo emissor de luz (LED). A figura a seguir ilustra a simbologia do fotodiodo.

As células solares são exemplos de fotodiodos. Normalmente, os fotodiodos possuem uma janela para permitir a entrada da



Símbolo de Fotodiodo

Figura 18.2: Simbologia do Fotodiodo

luz. Todavia, pode-se ter um fotodiodo sem janela para detecção de ultravioleta e raios-X. É possível obter respostas na faixa de centenas de MHz.

Os terminais do fotodiodo diferem no comprimento de modo a facilitar sua identificação. O terminal mais longo é o Anodo. Internamente, o fotodiodo possui filtros ópticos e lentes.

Basicamente, um fotodiodo possui três modos de operação:

- a) Modo Fotovoltaico
- b) Modo Fotocondutor
- c) Modo Diodo de Avalanche

O modo fotovoltaico é aquele em que o fotodiodo não recebe nenhuma alimentação entre seus terminais; a luz que incide no mesmo gera uma corrente que, por sua vez, gera uma tensão entre seus terminais. Por exemplo, os painéis fotovoltaicos são formados por fotodiodos operando no modo fotovoltaico.

O modo fotocondutor é aquele em que o fotodiodo é polarizado reversamente. Portanto, a largura da zona de depleção aumenta, diminuindo a capacitância da junção semicondutora e, portanto, melhorando sua resposta (mais rápido). O aumento da zona de depleção aumenta a coleta de luz, aumentando a chamada “corrente escura”.

O modo diodo de avalanche corresponde ao modo fotocondutor em que a polarização reversa foi aumentada até produzir o efeito de ruptura por avalanche. Neste caso, o fotodiodo se comporta como um fotomultiplicador.

18.4 DIODO LASER

Os diodos laser são muito importantes dentro das aplicações da Eletrônica. A figura abaixo ilustra uma forma de representação simbólica deste diodo.

A palavra Laser é um acrônimo de Light Amplification by Stimulated Emission Radiation (Ou seja, Amplificação de Luz por Emissão Estimulada de Radiação). Uma boa explicação sobre o funcionamento dos Lasers pode ser encontrada no <https://www.newtonbraga.com.br> {Site de Newton Braga}.

Após a leitura do conteúdo deste site, você entenderá como a luz monocromática que compõe o laser é produzida e por que é dito que esta luz é obtida de forma estimulada. É preciso entender aqui que os comprimentos de onda variam com o Laser e que o laser pode se encontrar, ou não, na faixa de luz visível.

Com um alcance médio de 300 metros a 1 km, os lasers podem ser obtidos de diversas formas:

- Gás: CO₂, Neônio
- Estado Sólido: Ruby, Érbio, etc
- Líquido (laser de corante)
- Fibra
- Semicondutor: diodo laser

Ainda podemos classificar os lasers como contínuos ou pulsados. Lasers são encontrados em equipamentos eletrônicos (leitores de DVD e Blue-Ray, por exemplo), equipamentos médicos (remoção de manchas de pele, por exemplo), equipamentos industriais (lasers de

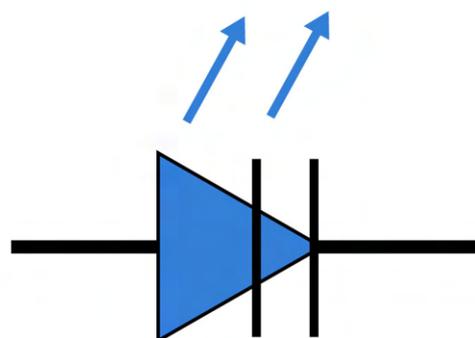


Figura 18.3: Simbologia do Diodo Laser

marcação, por exemplo), etc.

Em se tratando dos diodos lasers, algumas instruções incluem:

- a) O laser pode causar danos aos olhos humanos, quando o tubo do laser estiver funcionando, não olhe diretamente para ele.
- b) O tubo do laser requer uma fonte de alimentação adequada, a corrente reversa transitória não pode exceder $25\mu\text{A}$, a tensão reversa não pode exceder 2V, caso contrário, danificará o tubo do laser. Conectado antes de ligar, a tensão de saída inicial deve ser 0V, a regulação da corrente deve ser aumentada ou diminuída lentamente para evitar danos por impacto no tubo do laser. Teste o tubo do laser: insira ou retire o tubo do laser após desligar. Não conecte ou desconecte o tubo do laser quando estiver ligado, caso contrário, o tubo do laser será danificado.
- c) O tubo do laser deve ser mantido (operando ou não) em um ambiente seco para evitar a condensação que pode danificar o tubo do laser.
- d) Em altas temperaturas, aumentará a corrente limite, diminuirá a eficiência e acelerará o envelhecimento do tubo do laser.
- e) Quando a potência de saída for superior aos parâmetros especificados, acelerará o envelhecimento do tubo do laser.
- f) O tubo de laser precisa ser resfriado
- g) Como os diodos laser são dispositivos sensíveis a ESD, então, medidas antiestáticas devem ser preparadas. Antes de pegar a caixa, certifique-se de obter uma boa condição de aterramento, caso contrário, o tubo do laser será facilmente danificado pela eletricidade estática, resultando na falha do tubo do laser. Use uma pulseira antiestática ao trabalhar com o laser.

Exercícios de Revisão

- 01) Explique o funcionamento de um Fotodiodo.
- 02) Qual são os materiais usados na fabricação dos fotodiodos? O que podemos dizer quanto ao nível de dopagem destes componentes?
- 03) Os fotodiodos são usados também nos chamados Optoacopladores. Como isso ocorre? Podemos dizer que os Optoacopladores podem ser chamados de “Relés Ópticos”?
- 04) Dê exemplos de dispositivos comerciais que empregam fotodiodos para acionar chaves semicondutoras (BJT, SCR, etc).
- 05) Explique o funcionamento de cada um dos 3 modos de operação de um fotodiodo.
- 06) O que é um diodo laser? Explique seu funcionamento e dê exemplos de aplicações em que se usam este tipo de diodo.
- 07) O comprimento de onda (ou a frequência) de um diodo laser é invariável?
- 08) Qual a dependência do comprimento de onda de um laser com a temperatura?

Bibliografia

Ashfaq Ahmed. Eletrônica de potência. Pearson Education do Brasil, 2008.

Devair Aparecido Arrabaça e Salvador Pinillos Gimenez. Conversores de energia elétrica. CC/CC para aplicações em eletrônica de potência: conceitos, metodologia de análise e simulação. São Paulo: Érica, 2013.

Ivo Barbi. Eletrônica de potência. Ed. do Autor, 2008.

Robert L Boylestad e Louis Nashelsky. Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos. Vol. 6. Prentice-Hall do Brasil, 1984.

Jose Luiz Antunes De Almeida. Dispositivos Semicondutores Tiristores-Controle de Potência em CC e CA. Editora Saraiva, 2018.

Daniel W Hart. Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos. McGraw Hill Brasil, 2016.

CLETUS J. KAISER. The Capacitor Handbook. VAN NOSTRAND REINHOLD, 1993.

Albert Paul Malvino e David J Bates. Eletrônica. AMGH, 2011.

Antonio Pertence Jr. Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos-8. Bookman Editora, 2015.

Chih-Tang Sah. Fundamentals of Solid-State Electronics. World Scientific Publishing Co., 1994.

Adel S Sedra e Kenneth C Smith. Microeletrônica. Quinta Edição. Pearson Makron Books, 2011.

Ronald J Tocci, Neal S Widmer e Gregory L Moss. Sistemas Digitais: Princípios e Aplicações, 10a edição. Editora Pearson Prentice Hall, 2007.

Conselho editorial

Presidência

Dr. Erick Viana da Silva
Instituto Federal de Pernambuco (IFPE) e
Instituto Internacional Despertando Vocações (IIDV)

Conselheiros

Dr. Airton José Vinholi Júnior
Instituto Federal de Mato Grosso do Sul (IFMS)

Dr. Alexander Patrick Chaves de Sena
Instituto Federal de Pernambuco (IFPE)

Dr.^a Ana Patrícia Siqueira Tavares Falcão
Instituto Federal de Pernambuco (IFPE)

Dr. Arquimedes José de Araújo Paschoal
Instituto Federal de Pernambuco (IFPE)

Dr. Dewson Rocha Pereira
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Dr. Edísio Raimundo Silva
Instituto Federal de Pernambuco (IFPE)

Dr.^a Francisca da Rocha Barros Batista
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Dr.^a Iraneide Pereira da Silva
Instituto Federal de Pernambuco (IFPE)

Dr. Jaime Patrício Leiva Nuñez
Universidad de Playa Ancha (UPLA)

Dr. Jeymesson Raphael Cardoso Vieira
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Dr. José Ângelo Peixoto da Costa
Instituto Federal de Pernambuco (IFPE)

Dr. José Ayrton Lira dos Anjos
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Dr. Jose Cuauhtemoc Ibarra Gamez
Instituto Tecnológico de Sonora, Ciudad Obregón (ITSON)

Dr.^a Lastenia Ugalde Meza
Universidad de Playa Ancha (UPLA)

Dr.^a Renata Cristine de Sá Pedrosa Dantas
Instituto Federal de Pernambuco (IFPE)

Dr. Roberto Gómez Fernández
Ministério da Educação de Luxemburgo

Dr.^a Suzana Pedroza da Silva
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)

Dr.^a Maria Trinidad Pacherez Velasco
Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN)

Dr. Thales Ramon de Queiroz Bezerra
Instituto Federal de Pernambuco (IFPE)

Dr.^a Viviane da Silva Medeiros
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

Coordenação Executiva

Dr.^a Kilma da Silva Lima Viana
Instituto Federal de Pernambuco (IFPE) e
Instituto Internacional Despertando Vocações (IIDV)

Mariana Almeida Ferreira Lima
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e
Instituto Internacional Despertando Vocações (IIDV)

Carolayne Silva de Souza
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) e
Instituto Internacional Despertando Vocações (IIDV)

Coordenação Administrativa

MSc. Ayrton Matheus da Silva Nascimento
Instituto Internacional Despertando Vocações (IIDV)

Alexandre Antônio de Lima Júnior
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e
Instituto Internacional Despertando Vocações (IIDV)



ID: 5341919081490039

Arquimedes José de Araújo Paschoal

<http://lattes.cnpq.br/5341919081490039>

Possui graduação em Engenharia Eletrônica pela Universidade Federal de Pernambuco (1989), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (1992) na área de Processamento Digital de Sinais e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (2018) na área de Processamento Digital de Sinais. Foi bolsista da Comissão Nacional de Energia Nuclear. Tem experiência na área de Engenharia Nuclear, com ênfase em Instrumentação para Medida e Controle de Radiação, atuando principalmente nos seguintes temas: Transformada Numérica de Pascal, Algoritmos Rápidos, Transformada Aritmética de Fourier (AFT), Instrumentação Eletrônica/Nuclear, Projetos de Equipamentos microprocessados e/ou microcontrolados. Atualmente é professor do Campus Recife onde faz parte do Grupo de Pesquisa em Sistemas Embarcados e Redes de Sensores (GPSERS). Foi professor (até Junho/2020) dos cursos de Engenharia Mecânica e Mecatrônica do Instituto Federal de Educação/Campus Caruaru onde lecionava as disciplinas de Eletrônica Analógica, Eletrônica de Potência, Eletrônica Industrial, Manutenção Eletro-Eletrônica, Sistemas Microcontrolados e Instrumentação e Controle de Processos. É autor do livro "Eletrônica Analógica" publicado pela Editora IIDV (Instituto Internacional Despertando Vocações) em 2019. Atualmente ensina Eletrônica Básica, Prototipagem, Microcontroladores e Dispositivos Programáveis no campus Recife. Faz parte do Instituto Internacional Despertando Vocações onde lidera projetos de desenvolvimento de Drones.

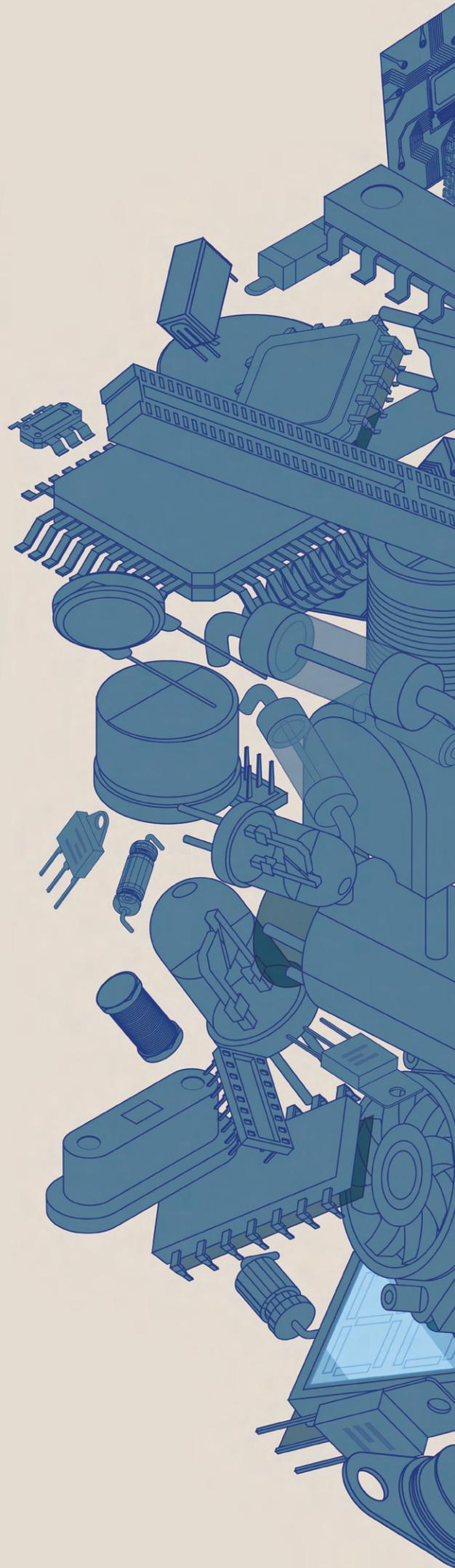


ID: 8250068675147894

Meuse Nogueira de Oliveira Júnior

<http://lattes.cnpq.br/8250068675147894>

Possui especialização em Fotônica pela Universidade Federal de Pernambuco (2000), mestrado em Biofísica pela Universidade Federal de Pernambuco (1998) e doutorado em Ciências da Computação pela Universidade Federal de Pernambuco (2006). Atualmente é professor do ensino técnico e tecnológico do Instituto Federal de Pernambuco, sendo líder do Grupo de Pesquisa em Sistemas Embutidos e Redes de Sensores (GPSERS) e coordenador das ações do Lócus Inovatel de Electroeletrônica de Pernambuco no IFPE. Tem experiência na área de Sistemas Embutidos, com ênfase em Engenharia Biomédica. Realiza pesquisas acadêmicas e aplicadas, atuando principalmente nos seguintes temas: sistemas embutidos em tempo real, IoT e Design System.



**Editora
IIDV**