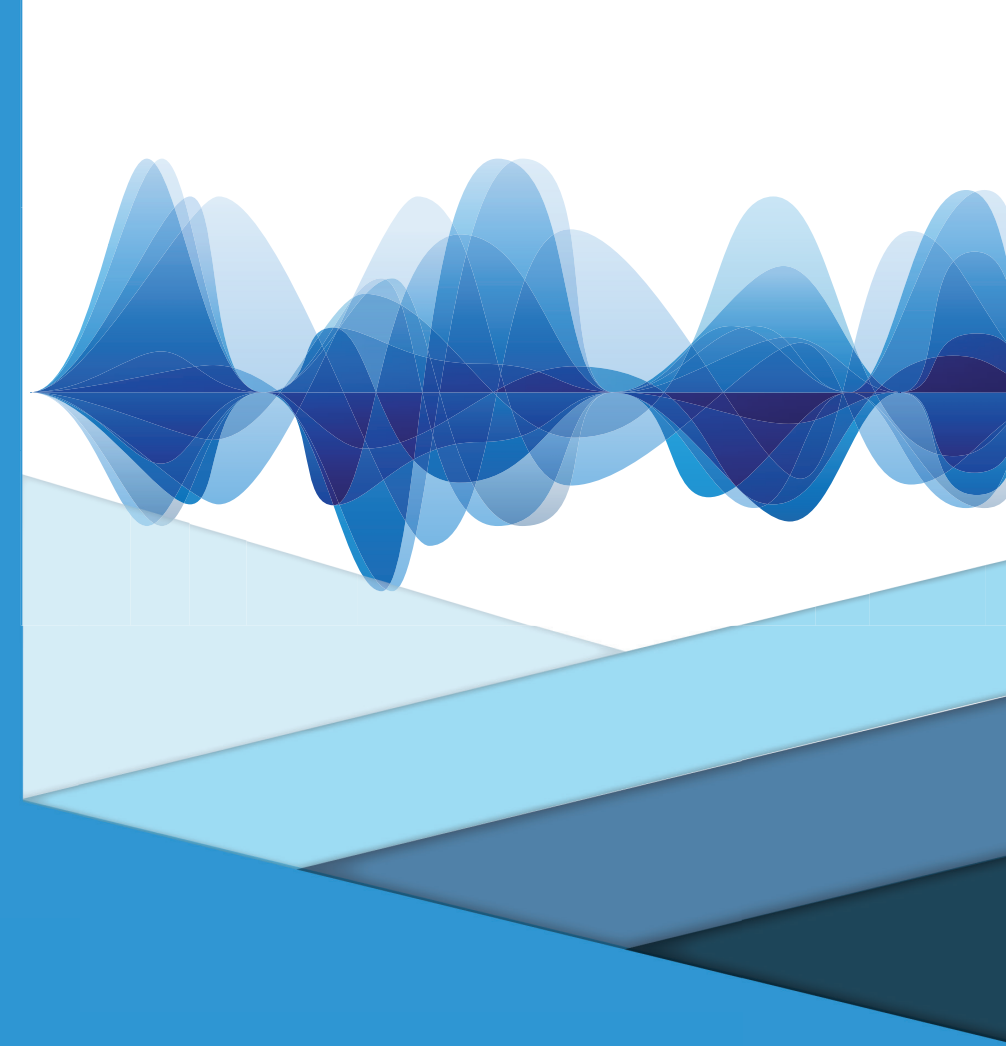




Circuitos Analógicos

Circuitos Analógicos

Andrea Acunha Martin

© 2018 por Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida ou transmitida de qualquer modo ou por qualquer outro meio, eletrônico ou mecânico, incluindo fotocópia, gravação ou qualquer outro tipo de sistema de armazenamento e transmissão de informação, sem prévia autorização, por escrito, da Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Presidente

Rodrigo Galindo

Vice-Presidente Acadêmico de Graduação e de Educação Básica

Mário Ghio Júnior

Conselho Acadêmico

Ana Lucia Jankovic Barduchi

Camila Cardoso Rotella

Danielly Nunes Andrade Noé

Grasiele Aparecida Lourenço

Isabel Cristina Chagas Barbin

Lidiane Cristina Vivaldini Olo

Thatiane Cristina dos Santos de Carvalho Ribeiro

Revisão Técnica

Reinaldo Angotti Azevedo

Ruy Flávio de Oliveira

Editorial

Camila Cardoso Rotella (Diretora)

Lidiane Cristina Vivaldini Olo (Gerente)

Elmir Carvalho da Silva (Coordenador)

Letícia Bento Pieroni (Coordenadora)

Renata Jéssica Galdino (Coordenadora)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Martin, Andrea Acunha

M379c Circuitos analógicos / Andrea Acunha Martin. – Londrina :
Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2018.
208 p.

ISBN 978-85-522-0714-6

1. Engenharia. 2. Eletrônica. I. Martin, Andrea Acunha.
II. Título.

CDD 620

Thamiris Mantovani CRB-8/9491

2018

Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Avenida Paris, 675 – Parque Residencial João Piza

CEP: 86041-100 – Londrina – PR

e-mail: editora.educacional@kroton.com.br

Homepage: <http://www.kroton.com.br/>

Sumário

Unidade 1 Diodo	7
Seção 1.1 - Características dos diodos	9
Seção 1.2 - Tipos de diodos e análise de circuitos com diodo	22
Seção 1.3 - Circuitos com diodo	38
 Unidade 2 Transistor Bipolar de Junção	 57
Seção 2.1 - Características do transistor (TBJ e FET)	60
Seção 2.2 - Análise de circuitos com transistor (BJT e FET)	79
Seção 2.3 - Aplicações dos transistores TBJ e FET	97
 Unidade 3 Amplificadores operacionais	 115
Seção 3.1 - Características dos amplificadores operacionais	117
Seção 3.2 - Análise de circuitos com amplificadores operacionais	131
Seção 3.3 - Aplicação de amplificadores operacionais	146
 Unidade 4 Osciladores e multivibradores	 161
Seção 4.1 - Osciladores I	164
Seção 4.2 - Osciladores II	177
Seção 4.3 - Multivibradores	191

Palavras do autor

Olá!

Você percebeu como a engenharia da computação evoluiu nas últimas décadas? Olhe à sua volta: praticamente tudo o que você observa está relacionado a algum componente eletrônico, como os diodos e os transistores. Por exemplo, os nobreaks e até os computadores são formados por componentes eletrônicos, ou seja, os circuitos analógicos. Assim, este livro se concentra no estudo dos circuitos analógicos e nas suas aplicações.

A apresentação dos conteúdos será sistematizada da seguinte forma:

Na Unidade 1, veremos como os diodos funcionam, para isso, aprenderemos o que são os materiais semicondutores. Após esse entendimento, você será de identificar as partes do diodo e fazer as devidas aproximações para que se possa ter soluções práticas e rápidas. Também, conheceremos alguns diodos que possuem funções especiais e, por fim, os circuitos com diodos, por exemplo, os retificadores que convertem corrente alternada em contínua. A obtenção de corrente contínua (C.C.) a partir da corrente alternada (C.A.) é indispensável nos equipamentos eletrônicos, como aparelhos de televisão, DVDs e outros. Esses aparelhos possuem um ou mais circuitos, chamados fontes de alimentação ou fontes de tensão. Os circuitos que transformam corrente alternada em contínua recebem o nome de Conversores C.A. - C.C. Para obtenção de corrente contínua, a conversão se faz por meio dos circuitos retificadores. Após essa unidade, você estará apto a criar e analisar circuitos com diodos.

Na Unidade 2, obteremos conhecimentos sobre os transistores bipolares de junção (TBJs) e os transistores de efeito de campo (FET). Primeiramente, teremos uma introdução sobre os transistores, a respeito de suas estruturas, operações físicas e características corrente – tensão. Em seguida, veremos que os transistores podem funcionar como amplificadores e chaves e também sobre como polarizá-los, por exemplo, a polarização do emissor é comum nos TBJs utilizados como amplificadores; já o FET é o dispositivo preferido para aplicações de chaveamento. Por fim, veremos o modelo de TBJ e FET para altas frequências. Após essa unidade, você estará apto a criar e analisar circuitos com TBJs e FETs.

Na Unidade 3, entenderemos os amplificadores operacionais. Na primeira seção, conheceremos as principais características dos amplificadores operacionais; na sequência, a análise de circuitos; e, por fim, na terceira seção, as aplicações desse dispositivo.

Na quarta, última unidade, falaremos sobre osciladores e multivibradores. Primeiramente, aprenderemos a teoria geral dos osciladores e, logo em seguida, alguns tipos, como: deslocamento de fase, em ponte de Wien, Circuito Oscilador sintonizado, oscilador a cristal e com transistor unijunção, osciladores de relaxação e tensão e o CI 555. Em relação aos multivibradores, veremos os monoestáveis, biestáveis e astáveis, e o disparador Schmitt.

Quanta informação iremos aprender, não é verdade?

Espero que você goste da leitura e que este livro possa lhe proporcionar experiências incríveis, além de deixá-lo com vontade para buscar cada vez mais conhecimentos sobre o fabuloso campo dos circuitos analógicos.

Tenha, a partir de agora, um bom trabalho e bons estudos!

Diodo

Convite ao estudo

O estudo de circuitos analógicos envolve o conhecimento de algumas disciplinas vistas ao longo dos primeiros anos do curso de Engenharia, dentre as quais podemos destacar circuitos de corrente contínua e circuitos de corrente alternada.

A miniaturização crescente dos componentes eletrônicos faz com que comecemos a pensar sobre seus limites. Se compararmos os sistemas atuais com os de antigamente, na época das válvulas, as vantagens são muitas: menores, mais leves, mais eficientes, construções mais robustas e outras características. Esses fatores permitem a miniaturização dos componentes eletrônicos e, como consequência, computadores mais rápidos e cada vez menores. A qualidade dos materiais semicondutores, a técnica de projeto de circuito e os limites dos equipamentos de processamento e fabricação são fundamentais para essa melhoria.

O objetivo desta primeira unidade é estudar o dispositivo semicondutor mais simples de todos, que é o diodo. Simples, porém, muito importante. Considere, então, a seguinte Situação Geradora de Aprendizagem (SGA):

Durante o estágio em uma empresa de informática, você passará por diversos departamentos, para obter uma maior compreensão do funcionamento da empresa. O primeiro departamento que você vai estagiar é onde está localizada a central de processamento, e o engenheiro responsável pelo local está lhe mostrando como funciona o local. O engenheiro lhe explicou que são exigidos diversos equipamentos de manutenção de carga elétrica e estabilidade de funcionamento para manter os sistemas operando em perfeita ordem. Equipamentos, como nobreaks e baterias, são extremamente necessários e seu funcionamento envolve o conhecimento

de circuitos analógicos. Esses equipamentos são monitorados para o consumo e as falhas por um sistema de rede. Neles também podemos notar a presença do diodo.

Você saberia dizer onde mais encontramos exemplos de diodos?

Ao final desta unidade, você será capaz de compreender as características importantes dos diodos, identificar os tipos de diodos e o comportamento deles junto a outros dispositivos. Também, conseguirá analisar, entender e projetar um circuito utilizando esse dispositivo eletrônico.

Seção 1.1

Características dos diodos

Diálogo aberto

Ao longo do seu curso de Engenharia, você deve ter estudado álgebra, circuitos de corrente contínua e circuitos de corrente alternada. Na disciplina de Circuitos Analógicos, todos esses assuntos estarão presentes e nos ajudarão a entender os circuitos com dispositivos semicondutores.

Nesta seção, o primeiro tópico que será estudado é uma breve introdução sobre os diodos; em seguida, falaremos a respeito da junção pn, a qual forma o diodo; no terceiro tópico, identificaremos os terminais dos diodos; e, por último, a curva característica, ou seja, como a corrente se comporta no dispositivo quando aplicamos uma tensão.

Durante esta seção, teremos alguns vídeos ilustrativos com animações que são bem importantes para fundamentar o conteúdo, portanto, não deixe de assistir. Os exercícios, ao final, são fundamentais para que você possa avaliar a sua compreensão sobre o tema, por isso faça-os e dedique-se!

Por falar em dedicação, você se lembra do estágio na empresa de informática apresentado no início desta unidade? Então, logo no seu primeiro dia, o engenheiro lhe passou uma tarefa:

Como parte de um projeto prévio de um sistema de monitoramento, você foi convocado para ajudar a desenvolver um programa para simulação de elementos semicondutores. O diodo é considerado o elemento não linear fundamental de circuitos e também o mais simples. Explique e mostre, através de desenhos, por que existe uma corrente em um diodo polarizado diretamente e mais de uma corrente com um valor muito baixo em um diodo polarizado reversamente.

Não pode faltar

Introdução aos diodos

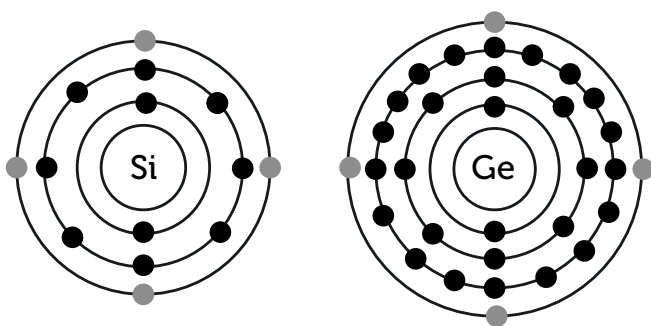
Um resistor comum é um dispositivo linear porque, ao analisarmos o gráfico da sua corrente versus a sua tensão, obtemos uma reta.

Um diodo já é diferente, pois o gráfico de sua corrente versus a sua tensão não é uma reta, portanto, não é linear. O elemento não linear fundamental de circuito e também o mais simples é o diodo, por essa razão ele será o primeiro a ser estudado. O diodo é um elemento semicondutor, fabricado pela junção de um material tipo p com um material tipo n, e é muito importante para os sistemas eletrônicos, pois suas características assemelham-se a uma chave (MALVINO; BATES, 2011).

Junção PN

Como vimos, o diodo é um dispositivo semicondutor. O semicondutor é um elemento que possui um nível de condutividade que se situa entre o condutor e o isolante, ou seja, ele é quase um condutor de eletricidade. Os materiais semicondutores mais utilizados na indústria eletrônica são o germânio e, predominantemente, o silício. A Figura 1.1 representa um átomo de silício que possui 14 elétrons em órbita e um átomo de germânio que possui 32 elétrons em órbita. Nota-se que, em ambos os elementos químicos, na sua camada mais externa, existem quatro elétrons (destacados em vermelho). Essa camada é chamada de camada de valência.

Figura 1.1 | Estrutura atômica do silício e do germânio

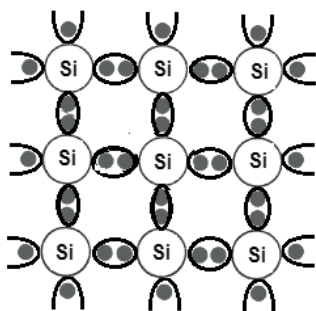


Fonte: elaborada pela autora.

No estado sólido, esses elementos se unem a outros quatro elementos vizinhos, formando ligações covalentes. Cada um dos quatro elétrons de valência é compartilhado com outro elétron do átomo vizinho. A Figura 1.2 representa as ligações covalentes entre os átomos de silício. Nota-se que não sobram elétrons livres, portanto, o

material se comporta como um isolante, sendo impossível a passagem de corrente pela rede cristalina. Essa estrutura é mantida a $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ (MALVINO; BATES, 2011).

Figura 1.2 | Representação plana da estrutura cristalina do silício



Fonte: elaborada pela autora.

Quando essa estrutura do silício é submetida a um aumento da temperatura, por exemplo, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (temperatura ambiente), ela é modificada e alguns elétrons conseguem se soltar das ligações covalentes. Quanto maior a quantidade de elétrons livres, menor é a resistividade do material.

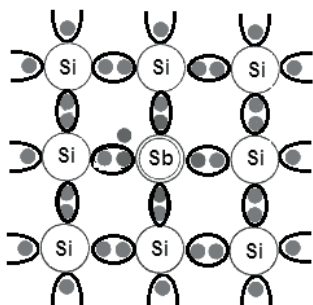
O fluxo de carga ou corrente é inverso à condutividade do material. De uma forma mais simples, materiais isolantes possuem resistividade alta e pouca ou nenhuma condutividade; já o material condutor possui baixa resistividade e alta condutividade (MALVINO; BATES; 2011).

Quando um material semiconductor sofre um processo de dopagem, ou seja, são adicionados a ele átomos de impurezas, dizemos que o material é chamado de extrínseco. Há dois tipos de impurezas que podem ser utilizados na dopagem de um cristal semiconductor: doadoras ou aceitadoras.

O material semiconductor em que as impurezas que nele existem são apenas as que não puderam ser eliminadas durante o processo de purificação do cristal chamamos de intrínseco. Isso significa que as características elétricas do cristal são devidas somente ao próprio material semiconductor, e não às suas impurezas.

A Figura 1.3 representa a ligação covalente entre os átomos de silício e um átomo de antimônio (sb). O átomo de antimônio representa uma impureza, as junções dos dois elementos formam um material tipo n. Nota-se que o átomo de antimônio possui cinco elétrons de valência.

Figura 1.3 | Cristal semiconductor de silício dopado por um átomo de antimônio

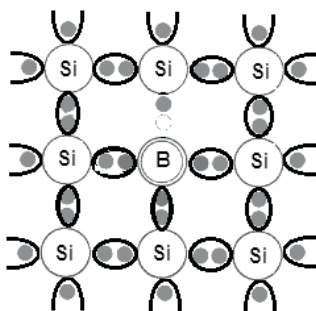


Fonte: elaborada pela autora.

Observa-se, na Figura 1.3, que o átomo da impureza inserido no silício deixou um elétron livre na estrutura.

O arsênio e o fósforo também podem ser introduzidos à rede cristalina do semiconductor silício, pois ambos possuem cinco elétrons de valência. Agora, em vez do antimônio, vamos dopar o silício com o elemento químico boro.

Figura 1.4 | Cristal semiconductor de silício dopado por um átomo de boro



Fonte: elaborada pela autora.

A Figura 1.4 representa as ligações covalentes entre um átomo de silício e um átomo de boro. Observa-se que está faltando uma ligação no átomo de silício. Isso acontece porque o boro possui apenas três elétrons de valência. A falta desse elétron criou uma lacuna ou buraco, que é representado por um círculo ou um sinal positivo. No nosso exemplo, a lacuna está representada por um círculo.

A lacuna se comporta como uma carga positiva que será preenchida por um elétron da ligação covalente. No lugar desse elétron aparece

uma nova lacuna, a qual será novamente preenchida por um elétron, e assim repetidamente. Assim, podemos concluir que a lacuna provocada pelo átomo de boro ficará livre para se mover no interior do cristal. Dessa forma, o boro, nessa estrutura, é considerado uma impureza aceitadora, pois recebe elétrons do cristal (MALVINO; BATES, 2011).



Assimile

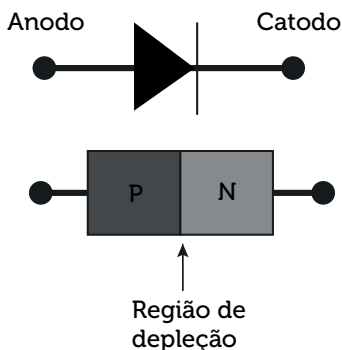
Em um material tipo n, os elétrons são chamados de portadores majoritários, e as lacunas (buracos), de portadores minoritários. Já no material tipo p é o inverso, os elétrons são os portadores minoritários, e as lacunas (buracos) são os portadores majoritários.

Os materiais tipo p e tipo n não são considerados muito atraentes para a indústria quando estão isolados, porém juntos produzem efeitos e componentes importantes para a eletrônica como os diodos, transistores e os circuitos integrados (MALVINO; BATES, 2011).

Identificação dos terminais do diodo

O diodo é um dispositivo semicondutor formado pela junção de um material tipo p com um material tipo n. O nome diodo vem da junção de dois (di) eletrodos (odos). A característica básica de um diodo é permitir a condução da corrente elétrica em um único sentido. A Figura 1.5 representa o símbolo do diodo. Note que o terminal do diodo que está ligado no material p é chamado de ânodo, e o terminal que está ligado no material n, de catodo.

Figura 1.5 | Símbolo do diodo



Fonte: elaborada pela autora.



Pesquise mais

O vídeo mostra uma explicação básica sobre os diodos e também alguns modelos de diodos na prática. Para acessá-lo, basta clicar no link a seguir. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Ywldoty4GRM>>. Acesso em: 8 out. 2017.

No momento em que os materiais tipo p e tipo n são unidos, ocorre uma diferença de concentração de cargas. Como na natureza tudo tende a um estado de equilíbrio estável, os elétrons livres (majoritários) que estão no lado n, por difusão, vão para o lado p. As lacunas ou buracos (majoritários) que estão no lado p, também por difusão, vão para o lado n. Durante a difusão dos portadores, próxima à região de junção, as cargas irão se recombinar fortemente, resultando em uma ausência de portadores próximo à região de junção. A essa região chamamos de região de depleção. Na região de depleção, com o esvaziamento das cargas livres, passam a prevalecer as impurezas fixas da rede cristalina: lado p carga negativa e lado n carga positiva. Essas cargas de polaridade opostas que estão próximas à junção se assemelham as de um capacitor de placas paralelas. Cada par de íons positivos e negativos que se encontra na região de depleção é chamado de dipolo. Cada dipolo tem um campo elétrico entre os íons positivos e negativos. Esse campo elétrico começa a se opor à difusão dos elétrons e das lacunas majoritários, portanto, se um elétron livre adicional entrar na camada de depleção, o campo elétrico tenta “empurrar” esse elétron de volta para a região n. A intensidade do campo elétrico cresce até impedir o fluxo de portadores majoritários (condição de equilíbrio).

O campo elétrico entre os íons é equivalente a uma diferença de potencial, na condição de equilíbrio, tem-se a barreira de potencial de junção. Os portadores minoritários são os únicos que conseguem vencer a barreira de potencial espontaneamente (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).



Assimile

Na temperatura de 25 °C, a barreira de potencial é 0,7 V para os diodos de silício e 0,3 V para os diodos de germânio.



Agora que você já sabe o que é a camada de depleção, reflita sobre o que causa a camada de depleção. Será a dopagem? Ou as recombinações? Os íons? A barreira de potencial? Pense um pouco sobre o assunto.

Curvas características dos diodos

Para se obter uma melhor compreensão do uso do diodo na eletrônica, devemos levantar a sua característica tensão X corrente. Ao aplicarmos uma tensão de polarização entre os terminais do diodo, temos três possibilidades: polarização nula, polarização direta e polarização reversa.

OBS.: para elementos ativos, damos o nome de polarização à tensão DC (*Direct Current* – DC).

a) Tensão de polarização nula

Se a tensão de polarização for nula, nada acontece com o diodo, portanto, a corrente que passa por ele é nula.

b) Polarização direta

Na polarização direta, a polaridade positiva da fonte de tensão está conectada à região p, e a polaridade negativa, à região n. O polo negativo da fonte repele as lacunas do material p em direção ao polo negativo, enquanto os elétrons livres do lado n são repelidos do polo negativo em direção ao polo positivo.

As lacunas e os elétrons livres são empurrados em direção à camada de depleção. Se a tensão na fonte for superior à tensão na barreira de potencial 0,7 V ou 0,3 V (depende do material), os elétrons livres têm energia suficiente para passar pela camada de depleção e recombinar com as lacunas, diminuindo a região de depleção. Se a tensão direta continuar aumentando, a região de depleção vai diminuindo, ainda mais a ponto de permitir que um fluxo maior de portadores majoritários pela junção. Nessas condições, dizemos que o diodo está conduzindo. Quando o diodo está conduzindo, a temperatura de junção é mais alta que a temperatura ambiente. Um aumento na temperatura de junção gera mais lacunas e elétrons livres nas regiões dopadas. Essas cargas se recombinam e diminuem a barreira de potencial.



Para mais detalhes, inclusive com animação, de como um diodo é polarizado diretamente, assista ao vídeo. Para acessá-lo, basta clicar no link a seguir: Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=ziU9NNgyAmA>>. Acesso em: 8 out. 2017.

c) Polarização reversa

Na polarização reversa, o terminal positivo da fonte de tensão é ligado no material n, e o terminal negativo, no material p.

Nessa condição, o terminal positivo da fonte atrai os elétrons livres do material tipo n, e o terminal negativo atrai as lacunas do material tipo p. Assim, as lacunas e os elétrons afastam-se da junção, fazendo com que a camada de depleção fique mais larga. A camada de depleção para de alargar quando sua diferença de potencial torna-se igual ao valor da fonte de tensão. Quando isso ocorre, elétrons e lacunas param de se movimentar, afastando-se da junção. Em polarização reversa, o fluxo através da junção torna-se mais difícil, porém não é nulo. A corrente nessa situação é chamada de corrente de saturação reversa (I_S), que nada mais é do que a corrente de portadores minoritários. A ordem de grandeza de I_S para o material silício é de nanoampères, e para o germânio, microampères.

Além da corrente de saturação, também há a corrente de fuga de superfície. Essa corrente é causada pelas impurezas da superfície e imperfeições na estrutura. A corrente de fuga (I_{SL}) da superfície é diretamente proporcional à tensão inversa. Podemos definir a resistência de fuga (R_{SL}) de acordo com a equação 1.1 (MALVINO; BATES, 2011):

(1.1)

$$R_{SL} = \frac{V_R}{I_{SL}}$$

Onde V_R é a tensão inversa.



Exemplificando

Se a resistência de fuga da superfície for de $10\text{G}\Omega$ e a tensão inversa de 25 V, qual é o valor da corrente de fuga da superfície?

$$I_{SL} = \frac{V_R}{R_{SL}} = \frac{25}{10 \cdot 10^9} = 2,5\text{nA}$$

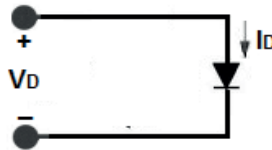


Pesquise mais

Para mais detalhes, inclusive com animação, de como um diodo é polarizado reversamente, assista ao vídeo. Para acessá-lo, basta clicar no link a seguir. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=jnHWzDA1g8A>>. Acesso em: 8 out. 2017.

Através da física do estado e do estudo dos fenômenos de transporte, chega-se a uma expressão que representa o comportamento do diodo sob polarização direta e reversa. Assume-se a polaridade da fonte e a direção da corrente, conforme a Figura 1.6.

Figura 1.6 | Circuito base



Fonte: elaborada pela autora.

A equação 1.2 representa a corrente direta no diodo (I_D):

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{kV_D}{T_K}} - 1 \right) \quad (1.2)$$

Onde $k = \frac{11.600}{\eta}$ com $\eta=1$ para o silício em altas correntes, $\eta=2$ para

o silício em baixas correntes e com $\eta=1$ para o germânio em altas e baixas.

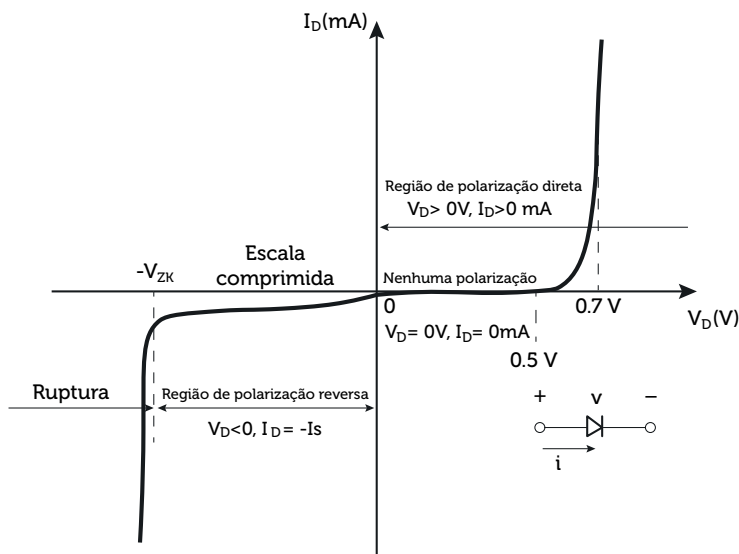
Observação: T_K é a temperatura absoluta e é dada por: $T_K = T_C + 273^\circ$, e T_C é a temperatura em graus Celsius (BOYLESTAD; NASHIELSKY, 2013).

Observa-se, na Figura 1.7, as regiões de não polarização, polarização reversa e polarização direta. Nota-se, no gráfico, uma tensão de polarização reversa (V_{zk}). Esse ponto é chamado de tensão de ruptura,

ou seja, o limite de tensão reversa. A partir desse ponto, o diodo receberá uma forte descarga e, em questão de microssegundos, ele queimará. Esse processo chama-se Avalanche.

Se aumentarmos a tensão de polarização reversa, entramos em uma área chamada região Zener, que será estudada na próxima seção.

Figura 1.7 | Curva característica do diodo semicondutor de silício



Fonte: adaptada de Boylestad e Nashelsky (2013).

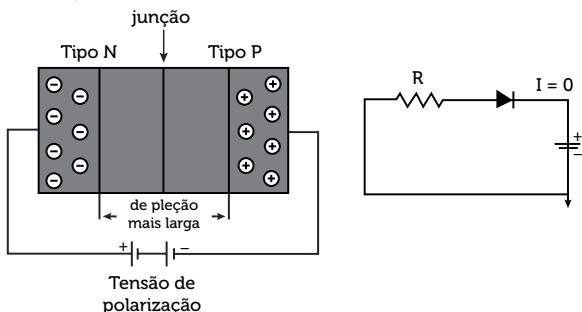
Sem medo de errar

Retornamos, agora, ao projeto prévio do sistema de monitoramento, para o qual você foi convocado com o intuito de ajudar no desenvolvimento de um programa para simulação de elementos semicondutores. A sua primeira tarefa era explicar e mostrar, através de desenhos, porquê existe uma corrente em um diodo polarizado diretamente e porquê existe mais de uma corrente com um valor muito baixo em um diodo polarizado reversamente.

A Figura 1.8 mostra um diodo polarizado reversamente. Notamos que os elétrons são atraídos pelo polo positivo da fonte, e as lacunas são atraídas pelo polo negativo da fonte. Com essa configuração, a camada de depleção se alarga, dificultando a circulação de portadores livres na junção. O fluxo através da junção torna-se mais difícil, porém não é nulo, portanto, há uma corrente chamada de corrente

de saturação reversa. A ordem de grandeza dessa corrente é muito baixa: para o material silício, é de nanoampères, e para o germânio, microampères. Além da corrente de saturação, também há a corrente de fuga de superfície. Essa corrente é causada pelas impurezas da superfície e imperfeições na estrutura.

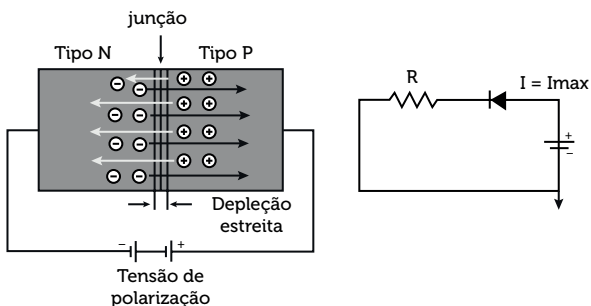
Figura 1.8 | Polarização reversa do diodo



Fonte: <http://objetoseducacionais2.mec.gov.br/bitstream/handle/mec/19074/05_teorias_frame.htm>. Acesso em: 15 ago. 2017.

A Figura 1.9 representa a polarização direta do diodo. Nessa situação, o diodo comporta-se como condutor, já que, devido à polarização da fonte, as lacunas e os elétrons livres são empurrados em direção à camada de depleção. Se a tensão na fonte for superior à tensão na barreira de potencial 0,7 V (silício) ou 0,3 V (germânio), os elétrons livres têm energia suficiente para passar pela camada de depleção e recombinar com as lacunas, diminuindo a região de depleção. Se a tensão direta continuar aumentando, a região de depleção vai diminuindo ainda mais a ponto de permitir um fluxo maior de portadores majoritários pela junção, por isso há a passagem de corrente.

Figura 1.9 | Polarização direta do diodo



Fonte: <http://objetoseducacionais2.mec.gov.br/bitstream/handle/mec/19074/05_teorias_frame.htm>. Acesso em: 15 ago. 2017.

Entender como funciona o diodo polarizado diretamente e reversamente é o primeiro passo para projetar um circuito com esse dispositivo.

Avançando na prática

Testando um diodo: curto ou aberto?

Descrição da situação-problema

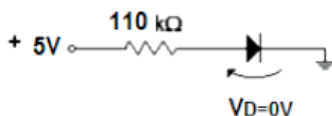
O engenheiro responsável pelo setor onde você está estagiando lhe entregou um documento que contém parte de um circuito com diodo e uma medida: $V_D = 0$. Essa queda de tensão no diodo foi medida através de um multímetro, diretamente na placa. Obviamente, a intenção do engenheiro é testar seus conhecimentos. Diga o que está de errado no circuito, argumentando cada afirmação que o engenheiro colocou.

Primeira argumentação: o diodo está polarizado reversamente.

Segunda argumentação: o diodo está aberto.

Terceira argumentação: não tem tensão suficiente para o diodo conduzir.

Quarta argumentação: o diodo está em curto.



Resolução da situação-problema

Olhando a polarização da fonte, podemos notar que o diodo está polarizado diretamente, ou seja, a polaridade positiva da fonte de tensão está conectada à região p (anodo), e a polaridade negativa, à região n (catodo).

O diodo não está aberto, pois com o diodo em aberto o multímetro mede uma tensão maior que a tensão de barreira, tanto no sentido direto quanto no reverso.

Para conduzir o diodo, precisa estar polarizado com uma tensão maior que 0,7 V, que é o caso. Olhando $V_D = 0$, rapidamente, você percebe que o diodo está em curto. Quando o diodo está em curto, o multímetro mede 0 V, tanto no sentido direto quanto no reverso.

Faça valer a pena

1. O diodo é o dispositivo semicondutor mais simples que existe, porém muito importante. Uma de suas características é deixar passar corrente somente em uma direção, funcionando, assim, como uma chave. Sabe-se que se pode polarizar o diodo; para funcionar, ele tem que ser polarizado e as polarizações possíveis são: direta e reversa.

Inicialmente, o diodo foi polarizado com uma tensão inversa de 12 V. Logo após essa tensão, foi diminuindo para 5 V. O que acontece com a camada de depleção?

- a) Torna-se menor.
- b) Torna-se maior.
- c) Não será afetada.
- d) Impossível de saber.
- e) Será igual a zero

2. Em polarização reversa, o fluxo através da junção torna-se mais difícil, porém não é nulo. A corrente, nessa situação, é chamada de corrente de saturação reversa (I_s), que nada mais é do que a corrente de portadores minoritários. Além da corrente de saturação, também há a corrente de fuga de superfície (I_{sl}). Essa corrente é causada pelas impurezas da superfície e imperfeições na estrutura.

Se a corrente de fuga da superfície for de 2nA para uma tensão inversa de 25 V, o que acontecerá com essa mesma corrente se a tensão inversa dobrar?

- a) 12,5nA.
- b) Permanecerá com o mesmo valor de 2nA.
- c) Cairá pela metade.
- d) 4GA.
- e) Vai dobrar.

3. Na polarização reversa, o terminal positivo da fonte de tensão é ligado no material n, e o terminal negativo, no material p. A corrente, nessa situação, é chamada de corrente de saturação reversa (I_s), que nada mais é do que a corrente de portadores minoritários e é diferente para cada material semicondutor.

Um diodo de silício polarizado inversamente, quando comparado a um diodo de germânio, tem a sua corrente de saturação:

- a) Menor.
- b) Igual para altas temperaturas.
- c) Menor para baixas temperaturas e maior para altas temperaturas.
- d) Maior para baixas temperaturas e menor para altas temperaturas.
- e) Maior.

Não pode faltar

Tipos de diodos

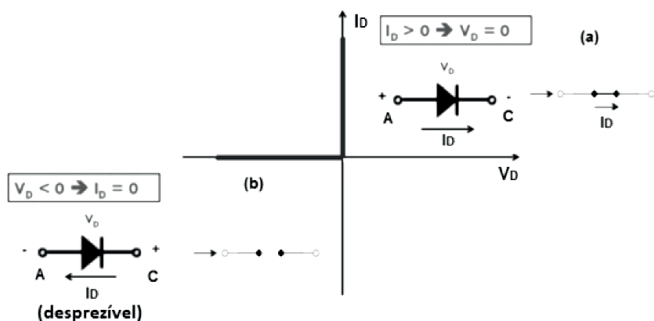
O diodo é um dispositivo semicondutor, que conduz bem no sentido direto e mal no sentido inverso. Ao polarizar o circuito diretamente com um valor de tensão maior que 0,7 V, para os diodos de silício, e maior que 0,3 V, para diodos de germânio, podemos considerar o diodo como um elemento ideal, ou seja, desprezamos a sua resistência no ponto de operação, ou caso precisarmos de uma precisão maior nos cálculos, uma solução exata, poderemos usar um circuito equivalente, no qual não desprezaremos a resistência interna do diodo (MALVINO; BATES, 2011).

Diodo ideal

Idealmente, o diodo funciona como um perfeito condutor, ou seja, com resistência interna igual a zero, quando polarizado diretamente, e resistência interna infinita, quando polarizado reversamente. Um dispositivo real que funciona dessa maneira são as chaves comuns, as quais têm resistência igual a zero, quando fechadas, e resistência infinita, quando abertas, por isso dizemos que o diodo ideal funciona como uma chave. A Figura 1.10 representa o símbolo e a curva característica do diodo ideal. No lado (a), o diodo está polarizado diretamente, funcionando como uma chave fechada; já no lado (b), o diodo está polarizado reversamente, funcionando como uma chave aberta.

OBS.: I_D é a corrente no diodo e V_D é a tensão no diodo (MALVINO; BATES, 2011).

Figura 1.11 | Curva característica do diodo



Fonte: elaborada pela autora.

Um dos parâmetros importantes para o diodo é a resistência no ponto de operação. Observa-se, a seguir, como se comporta essa resistência no caso do diodo ideal. Aplicaremos a Lei de Ohm, de acordo com a Figura 1.11, para o caso (a) e para o caso b.

Caso (a):

$$R_F = \frac{V_F}{I_F} = \frac{0V}{2,3,4...,mA} = 0\Omega,$$

Onde V_F e I_F são a tensão e a corrente direta através do diodo, e R_F é a resistência direta. Nota-se que a resistência é igual a zero, portanto o diodo funciona como uma chave fechada, ou seja, um curto circuito.

Caso (b):

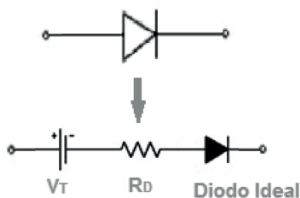
$$R_R = \frac{V_R}{I_R} = \frac{-4,-10,...}{0mA} = \infty\Omega,$$

Onde V_R e I_R são a tensão e a corrente reversa através do diodo, e R_R é a resistência inversa. Constata-se que a resistência é infinita, portanto, o diodo funciona como uma chave aberta, ou seja, um circuito aberto (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Diodo real

Quando classificamos o diodo como real, significa que não estamos desprezando a sua resistência, nesse caso, teremos uma fonte em série com a resistência e, assim, a modelagem do diodo é feita mais fielmente. No modelo, o diodo não conduz sob polarização reversa, portanto, consideramos o conceito de diodo ideal para completar o modelo. A Figura 1.12, a seguir, mostra esse modelo.

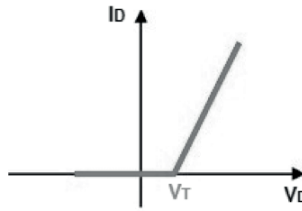
Figura 1.12 | Modelagem do diodo



Fonte: elaborada pela autora.

A curva característica para essa aproximação, mostrada na Figura 1.12, é vista na Figura 1.13. Observa-se que, a partir de V_T , tem-se uma reta inclinada, portanto o diodo comporta-se linearmente.

Figura 1.13 | Curva característica do diodo



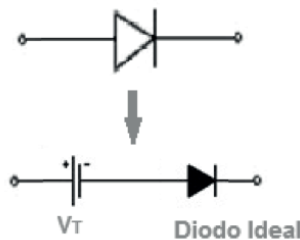
Fonte: elaborada pela autora.

A aproximação pode ser dada pela equação: $V_D = V_T + R_B \times I_D$, onde V_T é a tensão limiar de condução do diodo e R_B é a resistência de corpo do diodo.

Para o cálculo de R_B , usa-se a equação: $R_B = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1}$, onde V_1 e I_1 são a tensão e a corrente em algum ponto no joelho, ou um pouco acima do joelho, e V_2 e I_2 são a tensão e a corrente em um ponto bem acima do joelho.

Também é possível ter outra modelagem real um pouco mais simples do que a mostrada anteriormente. Sabe-se que o diodo só opera quando a sua tensão de polarização for maior que a tensão limiar, ou seja, $V_D > V_T$. Na maioria das aplicações, as resistências são muito maiores que R_D , por isso podemos simplificar o modelo anterior. A Figura 1.14 mostra esse modelo.

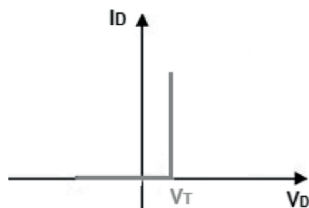
Figura 1.14 | Modelagem do diodo



Fonte: elaborada pela autora.

A curva característica para essa aproximação, mostrada na Figura 1.14, é vista na Figura 1.15.

Figura 1.15 | Curva característica do diodo



Fonte: elaborada pela autora.

Para finalizar, se resistências dos circuitos forem muito maiores que R_D e os valores de tensão forem muito maiores que V_T , o modelo do diodo se torna igual ao modelo do diodo ideal (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).



Reflita

Agora que você já conhece as aproximações para cálculos de circuitos com o diodo, pense: quando devemos usar cada uma? Devemos ser rigorosos? Ou poderemos usar o diodo como ideal?

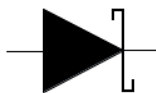
Tipos especiais de diodos

Diodo de barreira Schottky (SBD)

O diodo de barreira Schottky também é denominado HCD (*Hot Carrier Diode*), porque os elétrons são os únicos portadores de carga. O SBD é formado colocando-se um metal no lugar do semiconductor tipo p, por isso não haverá lacunas que possam recombinar com os elétrons na junção. No sentido direto de polarização, elétrons cruzam a junção do silício do tipo *n* para o metal, onde são abundantes. Neste sentido, esse é um dispositivo de portadores majoritários, enquanto os portadores minoritários explicam as características do diodo *p-n*. Diodos Schottky apresentam um tempo de armazenamento pequeno, pois a corrente é devido, predominantemente, aos portadores majoritários e à ausência de portadores minoritários. Eles são usados, principalmente, em circuitos de alta frequência, podendo chegar na ordem de 70 GHz de alta velocidade de comutação, isso acontece por causa do metal, especialmente, se for um metal nobre. A tensão no diodo Schottky também é muito menor do que a no diodo *p-n*, para a mesma corrente direta. A tensão limiar vai depender do tipo de

material escolhido, que pode variar de 0,25 V a 0,75 V. Os elementos químicos utilizados na composição do diodo Schottky são, no cátodo, o silício ou o arseniato de gálio, com dopagem forte, e no ânodo, os componentes químicos ouro, prata ou alumínio. O símbolo do diodo Schottky está representado na Figura 1.16.

Figura 1.16 | Diodo Schottky



Fonte: elaborada pela autora.

Fotodiodo

Se iluminarmos uma junção $p-n$ reversamente polarizada, a corrente varia quase linearmente com o fluxo luminoso. Esse efeito é aproveitado no fotodiodo semiconductor. Esse dispositivo é formado de uma junção $p-n$ recoberta por um plástico transparente. Com exceção de uma janela sobre a junção, as demais partes são pintadas de preto ou encapsuladas em um invólucro metálico. O dispositivo completo é extremamente pequeno e suas dimensões são milimétricas. Se aplicarmos tensões reversas, além de poucos décimos de volt, obteremos uma corrente quase constante. A corrente que obtemos colocando o dispositivo no escuro corresponde à corrente de saturação reversa devido à geração térmica dos portadores minoritários. Se um feixe de luz incide sobre a superfície, novos pares elétron-lacuna serão gerados. O fotodiodo $p-n$ é, particularmente, a versão melhorada $n-p-n$, e encontra muitas aplicações na leitura de altas velocidades das perfuradoras de cartões e fitas de computadores, sistema de detecção de luz, leitura da trilha sonora de um filme, chaves operadas por luz, linhas de produção contendo objetos que interrompam um fluxo luminoso etc. A Figura 1.17 representa o símbolo do fotodiodo.

Figura 1.17 | Fotodiodo



Fonte: elaborada pela autora.

Diodos Emissores de Luz (*Light Emitter Diode* – LED)

O LED converte corrente direta em luz. Em um LED polarizado diretamente, os elétrons cruzam a junção e caem nas lacunas. Os elétrons passam de um nível de energia mais alto para um nível de energia mais baixo, por isso irradiam energia. Nos diodos comuns, essa energia é dissipada na forma de calor; e nos LEDs, é irradiada em forma de luz. A intensidade da luz aumenta com a corrente injetada e com a diminuição da temperatura. A luz está concentrada perto da junção devido ao fato de que a maior parte dos portadores se recombinam nas vizinhanças dela. Alguns elementos químicos são utilizados para produzir LEDs de diversas cores, como: gálio, arsênio e fósforo, para a dopagem. As cores irradiadas podem ser: vermelha, verde, amarela, azul, laranja ou até mesmo o infravermelho (luz invisível). O LED é utilizado no lugar das lâmpadas comuns, com algumas vantagens, como: utilização de baixa tensão, maior vida útil e chaveamento mais rápido. A Figura 1.18 representa o símbolo do LED. Observa-se que as setas indicando para fora simbolizam a luz irradiada.

Figura 1.18 | LED



Fonte: elaborada pela autora.

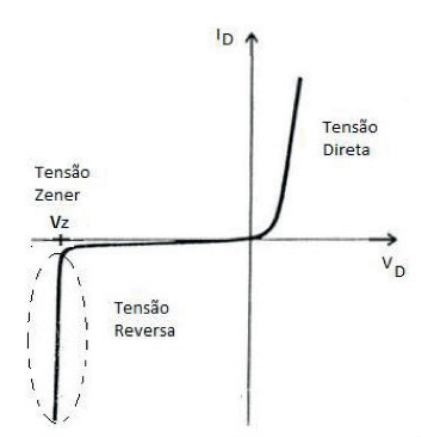
Os LEDs podem ser encontrados nos displays de sete segmentos utilizados em calculadora, e os LEDs infravermelhos encontram aplicações em alarmes, controles remotos etc. (MALVINO; BATES, 2011).

Diodo Zener

O diodo Zener também é chamado de diodo regulador de tensão, diodo de tensão constante ou diodo de ruptura. Sob intensa polarização reversa, o diodo atinge uma região de operação chamada de região Zener. A Figura 1.19 representa a curva característica do diodo. A região Zener está representada pela linha tracejada. Observa-se, na figura, que a partir de V_z (tensão Zener especificada pelo fabricante) o diodo começa a conduzir corrente na região reversa, e o valor dessa corrente é maior que a de saturação inversa, mantendo constante a tensão entre os seus terminais. Nota-se que a queda no valor de corrente é

praticamente vertical, ou seja, pequenas variações de tensão em torno de V_Z provocam grandes variações de corrente reversa. Devido a essas características, sua principal aplicação é como regulador de tensão, por exemplo, ao ligarmos uma carga em paralelo com o diodo Zener na polarização reversa, a tensão se mantém constante no valor da tensão Zener do diodo, desde que a tensão aplicada no diodo seja maior que a tensão Zener. Caso o Zener seja polarizado diretamente, ele se comportará como um diodo retificador comum.

Figura 1.19 | Curva característica do diodo Zener



Fonte: elaborada pela autora.

A Figura 1.20 representa o símbolo do diodo Zener.

Figura 1.20 | Diodo Zener

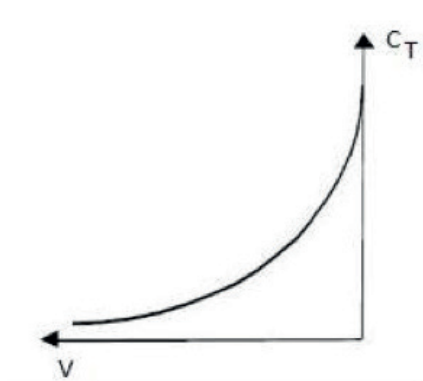


Fonte: elaborada pela autora.

Varactor (varicap; epicape; diodo de sintonia)

São diodos especiais, otimizados para trabalharem em polarização reversa, funcionando como se fossem um “capacitor controlado por tensão”. Nota-se, na Figura 1.21, que a capacitância (C_T) diminui quando a tensão reversa aumenta (V).

Figura 1.21 | Curva característica da capacitância de um diodo varicap



Fonte: elaborada pela autora.

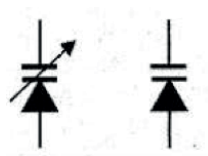


Assimile

Em um varactor, a tensão reversa controla a capacitância. Quando um diodo é polarizado reversamente, a largura da camada de depleção aumenta com a tensão reversa, assim a capacitância diminui.

São muito utilizados nos receptores de FM, televisão e outros equipamentos de comunicação. Para baixas frequências, são fabricados com silício, sendo utilizado o arseniato de gálio para frequências mais elevadas. A Figura 1.22 representa algumas simbologias do varactor (MALVINO; BATES, 2011).

Figura 1.22 | Simbologia do varactor



Fonte: elaborada pela autora.

Diodo Túnel

Também é conhecido como Esaki, em homenagem ao seu inventor Leo Esaki. É fabricado dopando-se intensamente – cerca de 100 até 1000 vezes, comparando-se a um diodo típico – os materiais semicondutores que formam o diodo. A elevada dopagem faz com que a maior parte dos portadores seja buracos e elétrons, os quais têm ação bastante rápida, podendo operar em altas frequências. Nessa situação,

a região de depleção é muito estreita, e essa característica permite o efeito túnel, em que muitos portadores podem passar. O resultado é o comportamento de resistência negativa, isto é, o aumento da tensão nos terminais do dispositivo reduz o valor da corrente em uma parte da curva de polarização direta. A característica de resistência negativa (Figura 1.23) permite a construção de osciladores.

Figura 1.23 | Curva característica de um diodo túnel



Fonte: adaptada de <<https://www.emaze.com/@ATLCWICI/TIPOS-DE-DIODOS-copy1>>. Acesso em: 12 out. 2017.

O diodo túnel também pode ser utilizado em aplicações de alta velocidade, como nos computadores, nos quais é necessária alta velocidade (tempo de chaveamento na ordem de nano ou pico segundos). As principais desvantagens são a baixa potência e o custo (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Figura 1.24 | Simbologia de um diodo túnel



Fonte: elaborada pela autora.



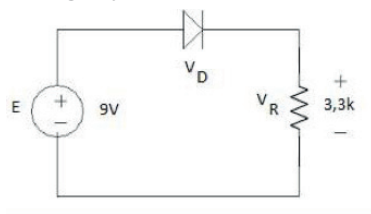
Pesquise mais

Saiba um pouco mais sobre os tipos de diodos. Para acessar, basta clicar no link a seguir. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=RwNGz465D3U>>. Acesso em: 12 out. 2017.

Circuitos com diodos

O modelo aproximado visto anteriormente será usado nesta seção para exemplificar alguns circuitos com diodos, ou seja, usaremos, para o diodo de silício, 0,7, e 0,3 para o de germânio.

Figura 1.25 | Exemplo de configuração série com diodo



Fonte: elaborada pela autora.

Para o exemplo da Figura 1.25, calcular V_D , V_R e o valor da corrente que passa pelo circuito.

Resolução:

Chamaremos de I_D a corrente que passa pelo circuito.

Olhando a seta do diodo, notamos que ele está polarizado diretamente, portanto está ligado, e sua queda de tensão vale 0,7 V. Da teoria de circuitos elétricos, utilizaremos a lei das tensões de Kirchhoff para resolver o circuito: $-E + V_D + V_R = 0 \longrightarrow V_R = E - V_D \longrightarrow V_R = 9 - 0,7 = 8,3V$.

Utilizando Lei de Ohm:
$$I_D = I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{8,3}{3,3 \cdot 10^3} = 2,51mA$$

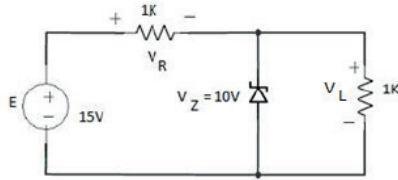
Agora, utilizaremos o mesmo exemplo acima, porém com o diodo invertido. Nessa situação, notamos que o sentido da corrente é oposta à seta do símbolo do diodo. Assim, dizemos que o equivalente do diodo é um circuito aberto, portanto, o valor de I_D é igual a zero. Como o valor da corrente é zero, V_R também é zero (Lei de Ohm). Aplicando a lei das tensões de Kirchhoff: $-E + V_D + V_R = 0 \longrightarrow V_D = E - V_R \longrightarrow V_D = 9 - 0 = 9V$ (MALVINO; BATES, 2011).

Circuitos com diodos Zener

Como visto anteriormente, o diodo Zener, para funcionar como regulador de tensão, deve ser polarizado reversamente, sendo que a tensão aplicada em seus terminais deve ser maior que a tensão Zener. Nos circuitos que possuem o diodo, é sempre utilizada uma resistência em série com o diodo para limitar a corrente.

O primeiro passo para resolver exercícios com o Zener é determinar o estado dele: ligado ou desligado. Para isso, remova-o do circuito e calcule a tensão através do circuito aberto. Se a tensão for maior que $V_{Z'}$, o diodo está ligado; caso contrário, está em aberto (desligado) (MALVINO; BATES, 2011).

Figura 1.26 | Exemplo de configuração com diodo Zener



Fonte: elaborada pela autora.

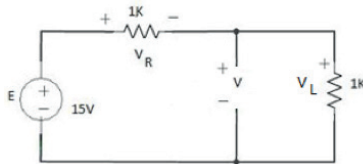


Exemplificando

Para o exemplo da Figura 1.26, calcular V_L , V_R , I_Z (corrente que passa pelo diodo Zener) e P_Z (potência no Zener).

Primeiro passo: retirar o Zener e calcular V .

Figura 1.27 | Exemplo para determinar se o diodo Zener está ligado ou desligado



Fonte: elaborada pela autora.

$$V = V_L = E \frac{R_L}{R + R_L} = 15 \frac{1 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^3} = 7,5V$$

Como $V (7,5V) < V_Z (10V)$, o Zener está desligado. Então, temos:

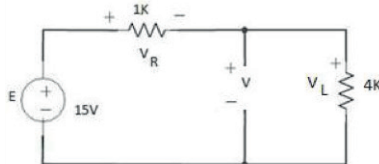
$V_L = V = 7,5V$. Pela lei das tensões de Kirchhoff:

$$-E + V_R + V_L = 0 \longrightarrow V_R = E - V_L \longrightarrow V_R = 15 - 7,5 = 7,5V$$

I_Z é igual a zero, portanto P_Z também é igual a zero.

Agora, repetiremos o exemplo do Exemplificando para um valor de R_L de 4,5K. Primeiro passo, retirar o diodo e calcular V .

Figura 1.28 | Exemplo para determinar se o diodo Zener está ligado ou desligado



Fonte: elaborada pela autora.

$$V = V_L = E \frac{R_L}{R + R_L} = 15 \frac{4,0 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3 + 4,0 \cdot 10^3} = 12V$$

Como $V (12V) > V_Z (10V)$, o Zener está ligado. Então, temos:

$$V_L = V = 12,27V$$

$$-E + V_R + V_L = 0 \longrightarrow V_R = E - V_L \longrightarrow V_R = 15 - 12,27 = 2,73V$$

Calculando a corrente no resistor: $I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{2,73}{1 \cdot 10^3} = 2,73mA$, portanto

$$\text{e } P_Z: P_Z = V_Z \cdot I_Z = 10 \cdot 0,01 \cdot 10^{-3} = 0,1 \text{ mW}.$$

Retornando, agora, às tarefas do seu estágio. O engenheiro responsável pelo seu setor lhe entregou um circuito de um modelo simples de nobreak e lhe pediu para que você o analisasse, colocando em uma tabela e explicando as principais características de todos os diodos que o dispositivo possui.

[illegible]

Quadro 1.1 | Componentes da Figura 34

Tipos de Diodos	Características
4 diodos comuns: D1,D2,D3 e D4	O diodo é um dispositivo semicondutor, formado pela junção de um material tipo p com um material tipo n, que conduz bem no sentido direto e mal no sentido inverso. Polariza-se o circuito diretamente com um valor de tensão maior que 0,7 V, para os diodos de silício, e maior que 0,3 V, para diodos de germânio.
3 LEDs: led1,led2 e led3	LED é um tipo especial de diodo que funciona como um diodo comum, porém emite luz quando é polarizado diretamente. Há LEDs de várias cores, que vão depender do material: vermelho, verde, amarelo, branco, infravermelho etc.

Tipos de Diodos	Características
2 diodos Zener: ZD1 e ZD2	O diodo Zener também é chamado de regulador de tensão. Para funcionar como regulador de tensão, ele deve ser polarizado reversamente com uma tensão aplicada em seus terminais maior que a tensão Zener.

Fonte: elaborada pela autora.

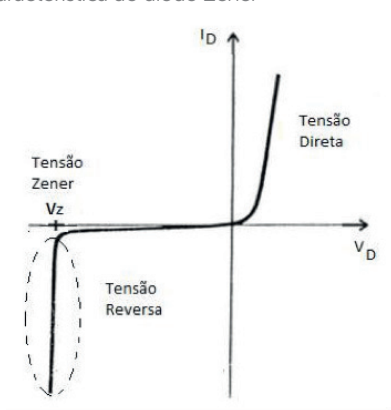
Avançando na prática

Diodo Zener

Descrição da situação-problema

O engenheiro responsável pelo setor onde você está estagiando lhe entregou um circuito que possui vários tipos de diodos: Zener, retificador, Led, entre outros, e disse que os polarizará reversamente com até 800 V e nada acontecerá com eles. Segundo o engenheiro, um diodo polarizado reversamente nunca queimará, independentemente da tensão que nele aplicarmos. Essa afirmação está correta? Ou há um limite? Responda a ele com base no gráfico da curva característica do diodo, que se encontra a seguir:

Figura 1.30 | Curva característica do diodo Zener



Fonte: elaborada pela autora.

Resolução da situação-problema

Na polarização reversa, a tensão através do diodo é o parâmetro influenciado pelo circuito de alimentação. De acordo com a curva característica do diodo representada anteriormente, notamos que

no diodo, no caso de uma polarização reversa e considerando a aproximação para um diodo real, sua corrente só cairá quando se aproximar de V_z (tensão de ruptura ou tensão Zener). Quando chegar nesse ponto, o diodo receberá uma forte descarga e em questão de microssegundos (esse processo chama-se Avalanche) poderá queimar. Agora, caso usássemos o diodo ideal, por ser considerado perfeito, alcançaria infinita tensão, ou seja, não queimaria nunca. A aplicação de um valor de tensão reversa superior ao especificado pelo fabricante provoca um aumento da corrente de fuga, que queimará o componente. O importante dessa questão é saber que cada diodo tem uma tensão de polarização reversa máxima encontrada no *data sheet* como V_{RRM} . Alguns exemplos: o diodo retificador SKE1/12 tem uma V_{RRM} de 1200V (Disponível em: <<http://www.datasheets360.com/part/detail/ske1-12/6710539289358761405/>>. Acesso em: 12 out. 2017); no 1N4001, a V_{RRM} é de 50 V; e no 1N4005, a V_{RRM} é de 600 V (Disponível em: <<https://www.diodes.com/assets/Datasheets/ds28002.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2017). Em alguns *data sheet*, não há o valor de V_{RRM} ; nesses casos, devemos olhar o valor máximo da potência.

OBS.: Nos *data sheets*, a V_{RRM} é descrita com o termo em inglês: *Peak Repetitive Reverse Voltage*.

Faça valer a pena

1. O diodo Zener é um dispositivo semicondutor que, ao contrário dos diodos tradicionais, quando é polarizado reversamente, a condução não é interrompida, portanto, o componente não é danificado. Esse diodo é muito conhecido por causa de uma aplicação específica.

A partir do texto base, o que se pode dizer a respeito do diodo Zener?

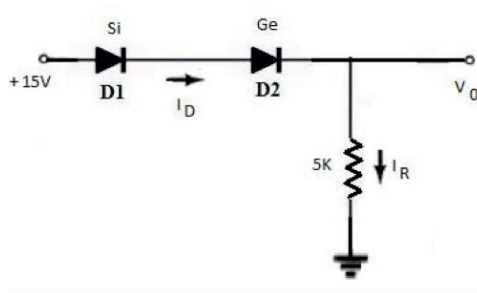
- a) É muito utilizado como regulador de tensão se for polarizado reversamente.
- b) É muito utilizado como regulador de tensão se for polarizado diretamente.
- c) Tem pouca utilização como regulador de tensão. Sua principal utilização é como dissipador de calor.
- d) Não trabalha sobre polarização reversa.
- e) Não faz parte da família dos semicondutores.

2. Varactores são diodos especiais que funcionam como se fossem um “capacitor controlado por tensão”. Pelo fato de a capacitância ser controlada por tensão, os varactores podem substituir os capacitores mecanicamente sintonizados, por exemplo, em circuitos osciladores que compõem os módulos de sintonia automática de rádios e televisões.

A respeito do modo de operação de um diodo varactor, podemos afirmar que:

- a) Geralmente é reversamente polarizado.
- b) Geralmente é não polarizado.
- c) Geralmente é polarizado diretamente.
- d) Opera na região de ruptura.
- e) Nenhuma das alternativas.

3. O circuito a seguir representa dois diodos ligados em série, sendo que o primeiro é de silício e o segundo, de germânio. Para analisar circuitos com diodo, o primeiro passo é determinar se o diodo está ou não conduzindo. Em geral, um diodo está conduzindo se a seta dele está na mesma direção que a corrente estabelecida pela fonte e se a queda de tensão no diodo for maior que 0,7 ou 0,3, dependendo do material.



Fonte: elaborada pela autora.

Com base no circuito acima, qual o valor de V_D e I_D , respectivamente?

- a) 13,6 V e 2,72 mA.
- b) 14,4 V e 2,88 mA.
- c) 13,6 V e 2,72 A.
- d) 14 V e 2,8 A.
- e) 14 V e 2,8m A.

Seção 1.3

Circuitos com diodo

Diálogo aberto

Olá!

Percebeu que estamos em nossa última seção de estudo, na qual falaremos sobre os diodos? Pois é, você já aprendeu vários conceitos importantes. Na primeira seção, vimos o que é um diodo e de qual material ele é construído. Verificamos também que a curva característica do diodo é não linear, portanto, a inclusão do diodo em um circuito qualquer causaria uma considerável complicação na análise, uma vez que a sua relação tensão X corrente envolve uma exponencial. Já na segunda seção, vimos os diodos chamados de especiais, como: LED, Zener, diodo de barreira Schottky, fotodiodo, entre outros, assim como os circuitos simples que envolvem esse dispositivo. Agora, nesta última seção, vamos ver circuitos mais complexos, como os retificadores, grameadores e limitadores.

Durante o seu estágio, a primeira tarefa foi explicar e demonstrar, através de desenhos, por que existe uma corrente em um diodo polarizado diretamente e por que existe mais de uma corrente com um valor muito baixo em um diodo polarizado reversamente. Após essa tarefa, o engenheiro responsável pelo seu setor lhe entregou um circuito de um modelo simples de nobreak e pediu para que você o analisasse, colocando em uma tabela e explicando as principais características de todos os diodos que o circuito possui. Agora, após você ter feito a análise dos tipos de diodos que um modelo simples de nobreak possui, o seu gerente comentou que estava preocupado, porque um dos nobreaks não estava funcionando corretamente e ele achava que o problema era no circuito retificador. Aproveite e ajude o seu supervisor em outra tarefa, gerando um guia explicativo de como funciona o circuito retificador de meia onda, explicando também a relação entre a tensão de pico, a tensão DC e a frequência de saída. Com os conhecimentos adquiridos nesta unidade, você estará apto para projetar um circuito utilizando todos os tipos de diodos.

Após ter ajudado o engenheiro, tente se recordar de algum equipamento que possui um retificador em sua casa ou na sua escola.

Quais são os equipamentos de que você consegue se lembrar?

É um desafio e tanto, mas temos certeza de que você vai se sair muito bem. Pronto para começar?

Bons estudos!

Não pode faltar

Tipos de circuitos analógicos

Os circuitos analógicos trabalham com sinais analógicos, os quais, ao contrário dos sinais digitais, que só assumem valores 0 ou 1, podem assumir infinitos valores dentro de determinados intervalos. Podemos dizer que vivemos em um mundo analógico, daí a importância desses circuitos.

Eles podem ser usados desde aplicações em transdutores até em aparelhos, como os osciloscópios (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Circuitos retificadores

A energia elétrica distribuída para as nossas casas, empresas ou fábricas apresenta-se sob a forma de corrente alternada (CA), pois é a melhor maneira de levar a eletricidade a distâncias longas. Porém, a maioria dos aparelhos eletrônicos e baterias exige o uso de corrente contínua (CC). Para converter a corrente alternada em corrente contínua, utilizam-se os circuitos retificadores, os quais têm como finalidade obter uma tensão contínua a partir de uma tensão senoidal. Sabemos que os computadores, por exemplo, para trabalharem, necessitam de um fornecimento contínuo de eletricidade, para isso necessitam de um aparelho que fará a conversão do modo de corrente alternada para o modo contínuo. Esse aparelho chama-se fonte de alimentação, e uma das partes dela é o circuito retificador. O circuito retificador mais simples consiste em um diodo em série com um resistor. Os retificadores podem ser de meia onda ou de onda completa.

Retificador de meia onda

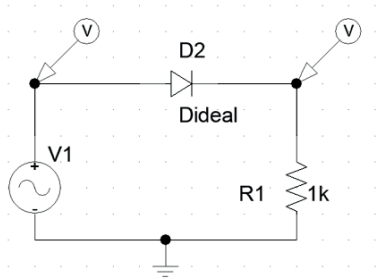
O retificador de meia onda utiliza metade dos semiciclos da senoide de entrada, podendo ser positivo ou negativo, dependendo

da polarização do diodo. A Figura 1.31 apresenta um retificador de meia onda, considerando uma fonte de entrada senoidal de frequência 1kHz e um diodo ideal (D2) em série com um resistor (R1) de 1KΩ. No retificador de meia onda, a frequência na entrada é igual à frequência na saída. O valor de tensão DC (V_{dc}) na saída é um valor médio de tensão (V_m) de uso particular no processo de conversão ac-dc. Considerando o diodo ideal, temos que a tensão de pico na saída ($V_{p(out)}$) é igual à tensão de pico da entrada ($V_{p(in)}$) e

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} = \frac{V_m}{3,14} = 0,318V_m \text{ ou } V_{dc} = \frac{V_{p(out)}}{\pi} = \frac{V_{p(out)}}{3,14} = 0,318V_{p(out)}$$

(BOYLESTAD; NASHESKY, 2013).

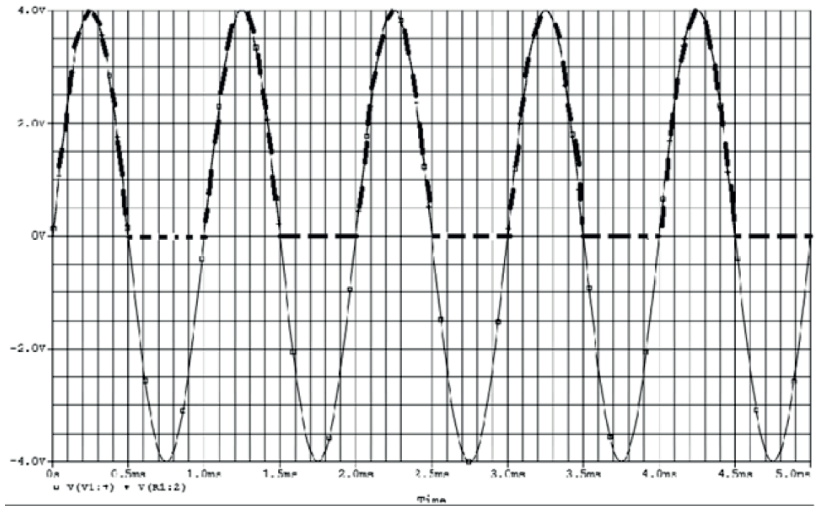
Figura 1.31 | Retificador de meia onda



Fonte: elaborada pela autora.

Observa-se, na Figura 1.31, que a onda senoidal em cinza (contínua) representa a entrada do circuito ($V_{p(in)}$), e a onda em vermelho (tracejada) apresenta a saída do circuito ($V_{p(out)}$). Durante os semiciclos positivos da entrada senoidal V1, a tensão positiva faz com que a corrente circule pelo diodo no sentido direto. Como o diodo é ideal, a tensão VD é zero, resultando que a tensão na saída fique igual à tensão na entrada. Durante os semiciclos negativos de V1, o diodo não conduzirá, produzindo um circuito que retifica o sinal.

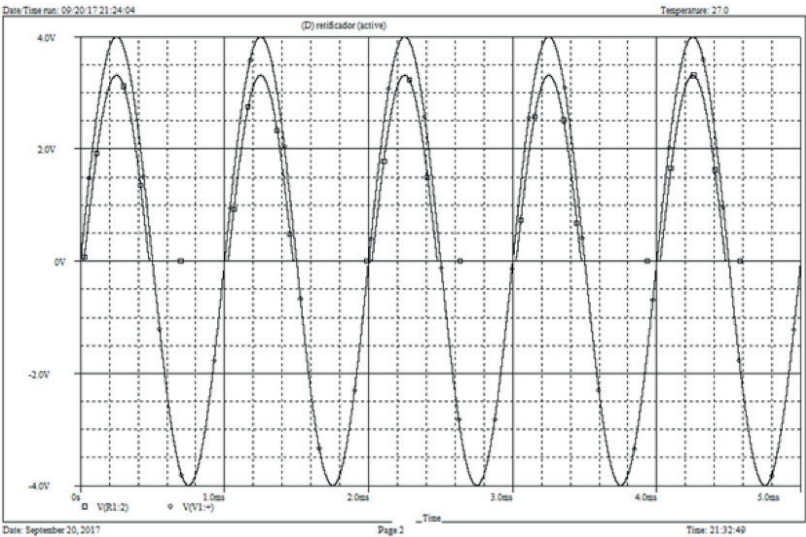
Figura 1.32 | Simulação considerando um diodo ideal



Fonte: elaborada pela autora.

Considerando a segunda aproximação, a tensão de pico na saída ($V_{p(out)}$) pode ser escrita como: $V_{p(out)} = V_{p(in)} - V_T$, onde $V_{p(in)}$ é a tensão de pico na entrada e V_T é 0,7 (diodo de silício) ou 0,3 (diodo de germânio), dependendo do material. A tensão V_{dc} é escrita como: $V_{dc} = 0,318(V_m - V_T)$ (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013). A Figura 1.33 representa a simulação do mesmo circuito apresentado na Figura 1.32, com somente uma alteração: o diodo deixa de ser ideal e passa a ter a queda de 0,7V (segunda aproximação). Nota-se essa queda de tensão observando-se que, agora, durante os semiciclos positivos da entrada senoidal V1, a tensão positiva faz com que a corrente circule pelo diodo no sentido direto. Como o diodo não é ideal, a tensão VD é menor que V1.

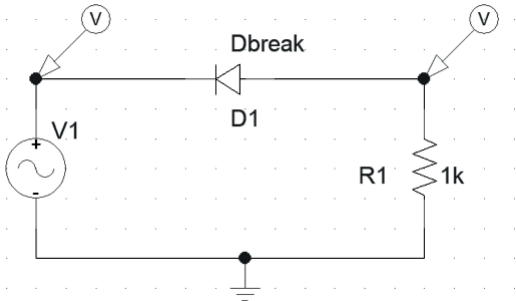
Figura 1.33 | Simulação considerando um diodo na segunda aproximação



Fonte: elaborada pela autora.

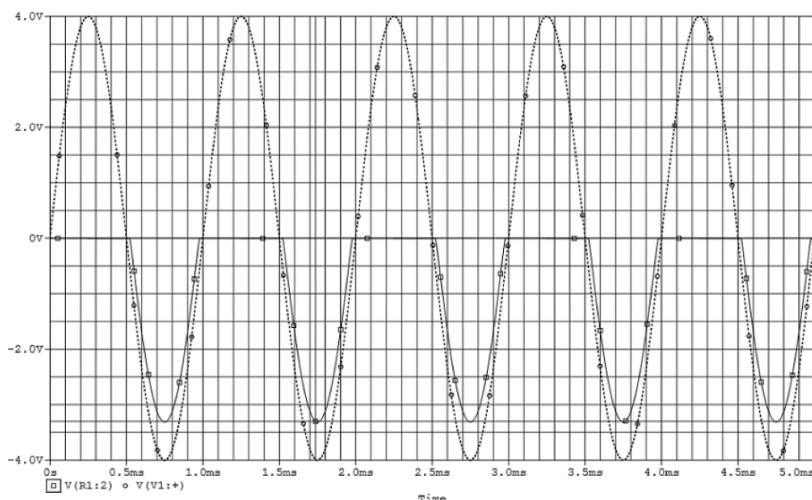
A Figura 1.33 representa um circuito retificador de meia onda. Nota-se, agora, na Figura 1.34, que o diodo só conduzirá durante a parte negativa da senoide.

Figura 1.34 | Circuito retificador de meia onda



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 1.35 | Simulação de um circuito retificador de meia onda

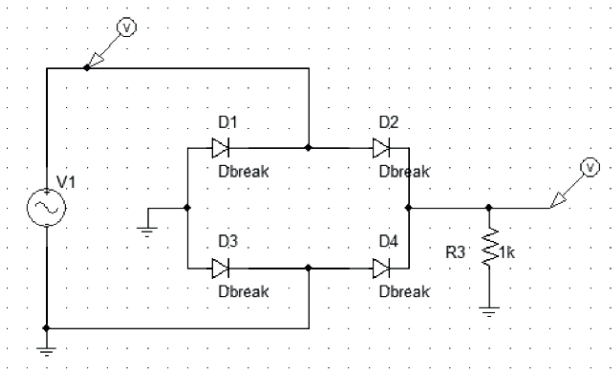


Fonte: elaborada pela autora.

Retificador de onda completa

O retificador de onda completa em ponte, ou circuito retificador em ponte (devido à semelhança com a Ponte de Wheatstone), possui um circuito com quatro diodos e utiliza ambos os semiciclos da senoide da entrada. A Figura 1.36 representa esse circuito. No retificador de onda completa, a frequência na saída é igual ao dobro da frequência de entrada. O funcionamento é semelhante ao circuito retificador de meia onda, para a região positiva do sinal de entrada os diodos D2 e D3 estão conduzindo, enquanto D1 e D4 estão no estado “desligado”. Já para o semiciclo negativo do sinal de entrada, D1 e D4 estão conduzindo enquanto D2 e D3 estão no estado “desligado”. O resultado importante dessa configuração é que ele é um segundo pulso positivo (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

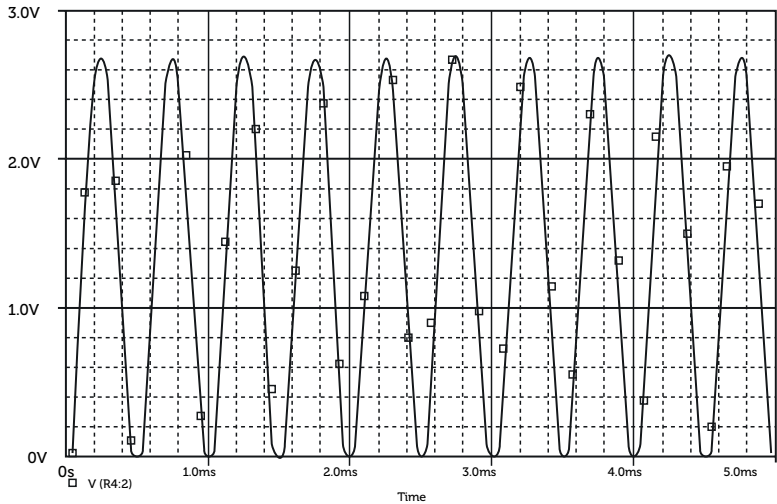
Figura 1.36 | Circuito retificador de onda completa



Fonte: elaborada pela autora.

Para simulação do retificador de onda completa usamos uma entrada senoidal de 4V de amplitude. O resultado dessa simulação, ou seja, a onda retificada pode ser vista na Figura 1.37. Observe somente os valores positivos e o sinal ocupando a área acima do eixo. Nota-se também que, para uma entrada de 4V, a saída apresenta, aproximadamente, 2,6V. Comparando com o retificador de meia onda, temos que a área obtida pelo retificador de onda completa é o dobro, portanto o nível dc também dobra e $V_{dc} \cong 0,636(V_m - 2V_T)$, para diodos na segunda aproximação. Chamamos de $V_{o(max)}$ o termo: $V_{o(max)} = V_m - 2V_T$. Para diodo ideal, temos: $V_{dc} = 0,636 \cdot V_m$ ou $V_{dc} = 0,636 \cdot V_{p(out)}$.

Figura 1.37 | Simulação de um retificador de onda completa



Fonte: elaborada pela autora.



Veja mais detalhes sobre como funciona um retificador de meia onda e um de onda completa. Para acessar, basta clicar no link a seguir.

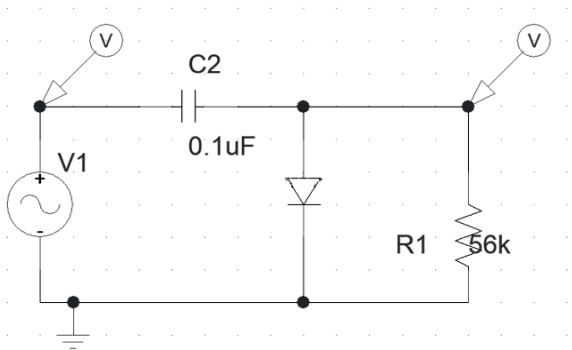
Disponível em: <<https://www.mundodaeletrica.com.br/diodo-retificador-o-que-e-pra-que-serve/>>. Acesso em: 26 out. 2017.

OBS.: onde está escrito diodo "D2" em preto, na figura, leia-se "D3".

Circuitos grampeadores

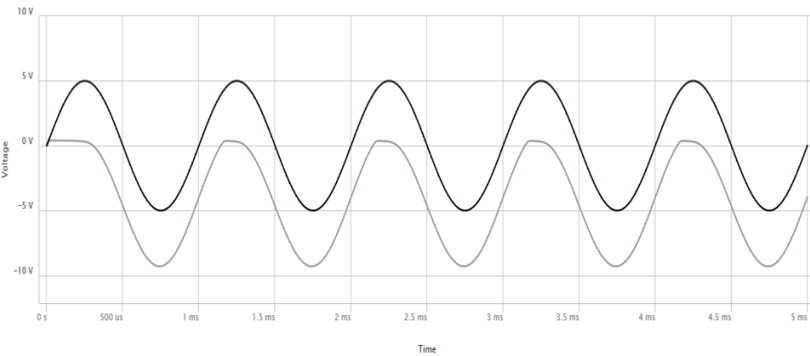
O circuito grampeador – Figura 1.38 – também é chamado de circuito restaurador de cc, ou seja, adiciona uma tensão cc ao sinal. O circuito grampeador é formado, basicamente, de um capacitor, um diodo e um elemento resistivo, e pode ser de dois tipos, positivo ou negativo, dependendo da polarização. Esse tipo de circuito pode ter vários rearranjos, os quais também podem ser polarizados com uma fonte DC. Dizemos que esse tipo de circuito "grampeia" o sinal em um nível diferente (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013). A saída V_0 é duas vezes o valor de entrada V_{in} , ou seja, $V_0 = -2 \cdot V_{in}$, para a configuração mais simples, mostrada na Figura 1.38. Para o diodo na segunda aproximação, considerar a queda de 0,7V. Para a simulação do circuito grampeador, usamos uma entrada senoidal, V1 de 5V de amplitude. A Figura 1.39 representa o resultado dessa simulação. Observe que o circuito foi grampeado com uma amplitude de, aproximadamente, 9V, para segunda aproximação: $V_0 = -2 \cdot V_{in} = (-2 \cdot 5) + 0,7 = -9,3V$. Nota-se na simulação que a forma de onda na saída está um pouco abaixo de 0V. No semiciclo positivo, o diodo está no estado ligado, ou seja, em condução, e carrega o capacitor, "retirando" o efeito do resistor. Como o diodo está em condução, a queda de tensão na carga é referente somente à barreira de potencial do diodo, pois a constante de tempo RC, nesse caso, é muito pequena. Já no semiciclo negativo, o diodo está polarizado reversamente e entra em bloqueio. Nesse caso, o capacitor devolve a energia acumulada e R está de "volta" ao circuito e a constante de tempo RC fica grande o suficiente para manter o nível de potencial.

Figura 1.38 | Circuito grampeador negativo



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 1.39 | Simulação de um circuito grampeador

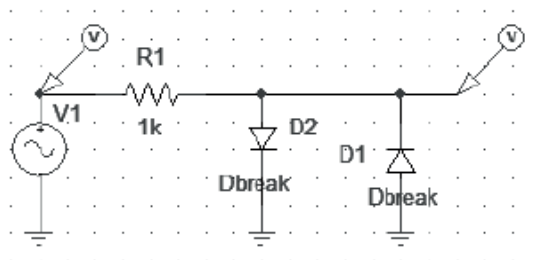


Fonte: elaborada pela autora.

Circuitos limitadores

Os circuitos limitadores são usados para limitar a tensão de saída de um circuito em um valor predeterminado, podendo ser negativo, positivo ou ambos. A Figura 1.40 representa um limitador duplo (positivo-negativo), ou seja, esse tipo de circuito é constituído por um limitador positivo (D2) e um limitador negativo (D1). Analisando esse circuito, nota-se que os diodos não conduzem, e a vantagem é limitar a tensão. Sempre que a tensão de entrada for acima de 0,7V, a saída ficará limitada a 0,7V (MALVINO; BATES, 2011).

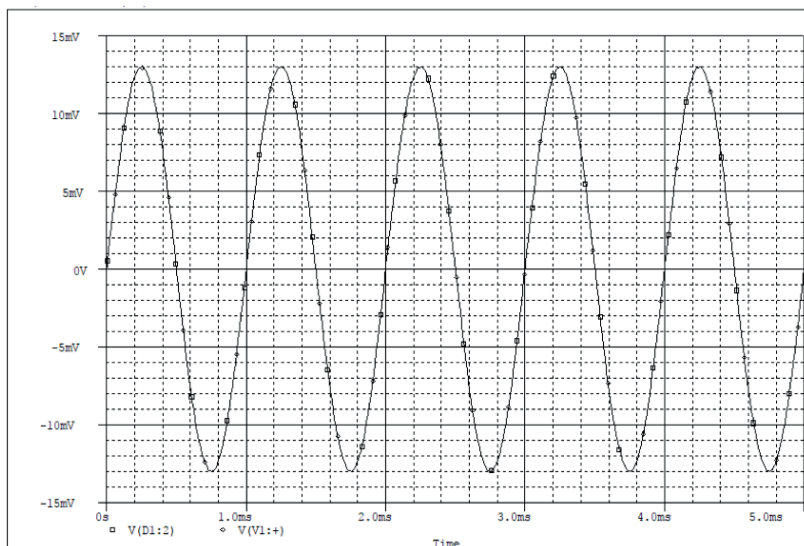
Figura 1.40 | Circuito limitador



Fonte: elaborada pela autora.

V1, na Figura 1.40, representa a entrada de 13mV do circuito. O resultado da saída desse circuito é visto na Figura 1.36. Nota-se que a saída do circuito continua em 13mV, há uma sobreposição das curvas de entrada e saída.

Figura 1.41 | Simulação de um circuito limitador



Fonte: elaborada pela autora.

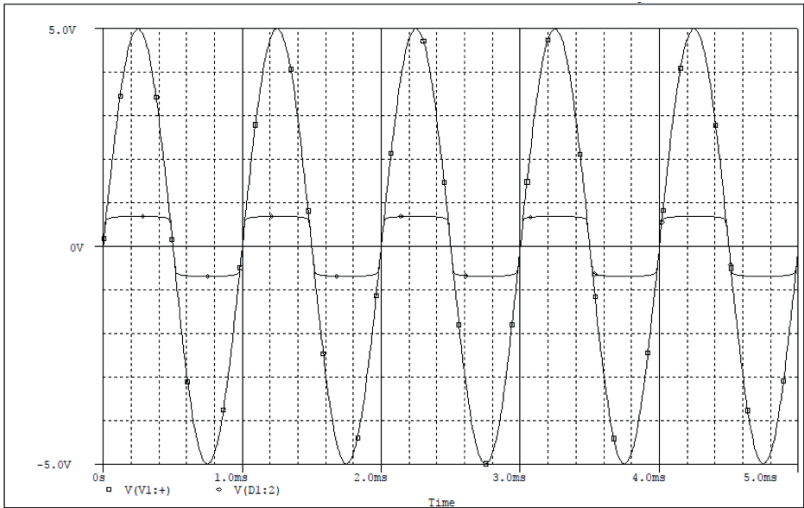


Refleta

Em geral, os circuitos limitadores são empregados como blocos ou módulos de proteção para outros circuitos. Refleta sobre onde os circuitos limitadores são usados na prática.

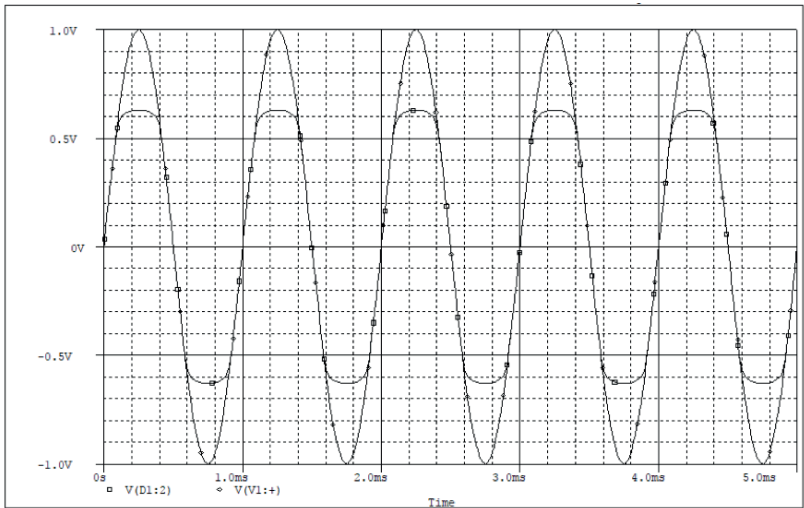
Analisando as outras duas figuras – 1.42 e 1.43 –, com as respectivas entradas de 5V e 1V, nota-se que o circuito limitou a tensão de saída em 0,7V.

Figura 1.42 | Simulação de um circuito limitador



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 1.43 | Simulação de um circuito limitador

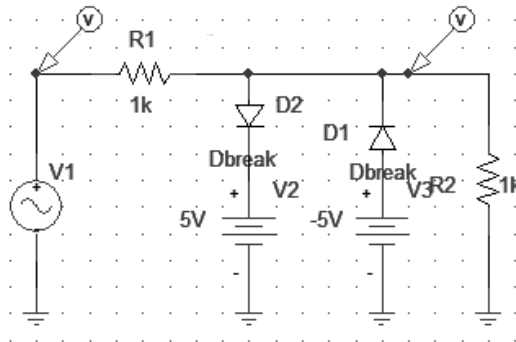


Fonte: elaborada pela autora.



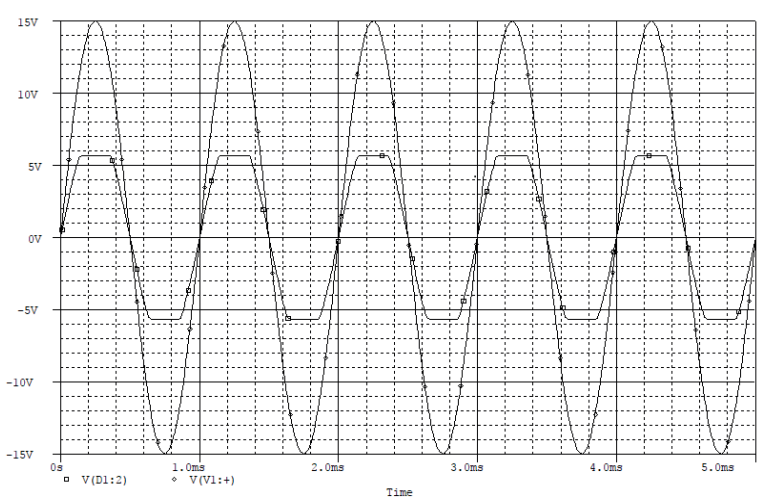
Se você adicionar baterias no ramo do diodo, podem-se alterar os níveis do circuito limitador de tensão. A Figura 1.39 ilustra essa situação, e a Figura 1.40 é o resultado da simulação do circuito representado na Figura 1.39.

Figura 1.44 | Circuito limitador



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 1.45 | Simulação do circuito limitador apresentado na Figura 1.44



Fonte: elaborada pela autora.



Limitadores e grampeadores são circuitos formados por diodos para obtenção de formas de ondas “especiais” na saída, que desempenham diferentes funções. Um grampeador tem por finalidade levar um sinal da entrada para a saída, acima ou abaixo de um determinado nível, dependendo ou não se o circuito for polarizado; já o limitador ou ceifador é assim denominado por cortar o semiciclo negativo ou positivo ou ambos de uma senoide, caso a entrada for uma tensão alternada.

Sem medo de errar

Vamos retornar, agora, ao guia explicativo que você irá gerar para ajudar o seu supervisor na tarefa de explicar como funciona o circuito retificador de meia onda e também a relação entre a tensão de pico ou V_m , a tensão DC, o valor médio de tensão e a frequência de saída.

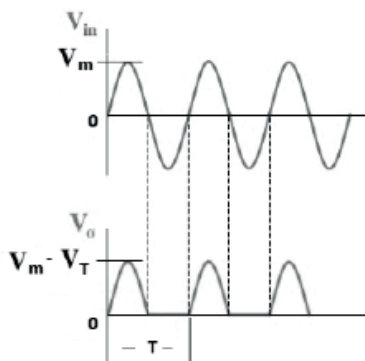
O processo de se remover metade do sinal de entrada para conseguir um nível DC é chamado de retificação de meia onda. O circuito retificador mais simples possui um diodo em série com uma carga. O retificador só começará a funcionar quando a tensão de entrada ultrapassar a tensão do diodo (silício 0,7 e germânio 0,3). Até esse instante, o diodo funcionará como uma chave aberta, ou seja, não conduzirá corrente, e a tensão de saída (V_o) é igual a zero. Para que o diodo utilizado no circuito opere corretamente, deve-se considerar a corrente máxima que o componente pode conduzir e a tensão de pico reversa (PIV) que ele pode suportar, sem atingir a região de ruptura, sendo esta determinada pelo maior valor de tensão, proveniente do próprio circuito, que possa passar no diodo.

O valor de tensão DC (V_{dc}) na saída é um valor médio de tensão (V_m) de uso particular no processo de conversão ac-dc.

Considerando o diodo ideal: $V_{dc} = 0,318V_m$, temos que a tensão de pico na saída ($V_{p(out)}$) é igual à tensão de pico da entrada.

Considerando a segunda aproximação: a tensão de pico na saída ($V_{p(out)}$) pode ser escrito como: $V_{p(out)} = V_{p(in)} - V_T$, onde $V_{p(in)}$ é a tensão de pico na entrada e V_T é 0,7 ou 0,3, dependendo do material e $V_{dc} = 0,318(V_m - V_T)$. No retificador de meia onda, a frequência na entrada é igual à frequência na saída. A Figura 1.46 ilustra as formas de onda na entrada (V_{in}) e na saída (V_o).

Figura 1.46 | Simulação de um retificador de meia onda



Fonte: adaptada de Boylestad e Nashlsky (2013).

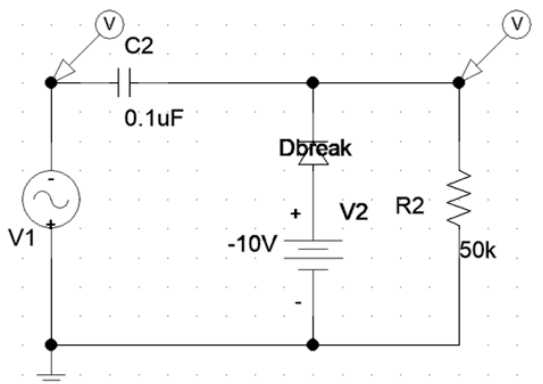
Avançando na prática

Circuito grameador

Descrição da situação-problema

O engenheiro responsável pelo setor onde você está estagiando lhe entregou o circuito grameador (Figura 1.47) e pediu para que você explicasse e desenhasse a forma de onda de saída do circuito, que possui uma entrada senoidal com 20V de amplitude. O engenheiro também questionou se há diferença na forma de onda da saída se o diodo fosse considerado como ideal ou usando segunda aproximação.

Figura 1.47 | Circuito grameador

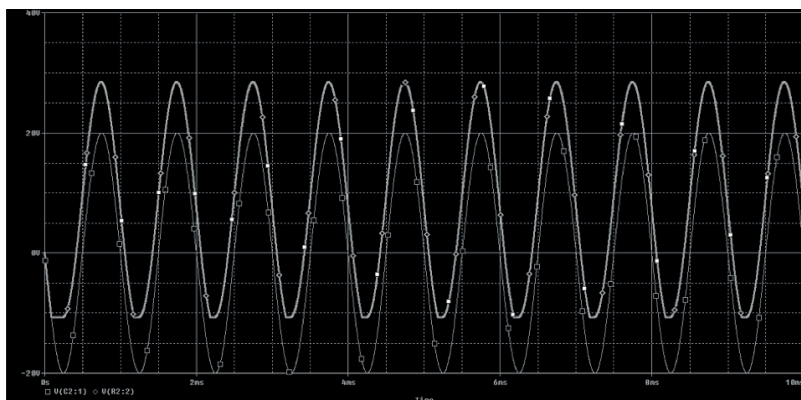


Fonte: elaborado pela autora.

Resolução da situação-problema

O circuito grampeador é aquele que grampeia o sinal em um nível de tensão diferente. Considerando, primeiramente, a segunda aproximação, ou seja, a queda de tensão no diodo igual a 0,7V, tem-se a curva abaixo. Nota-se que o valor pico a pico é, aproximadamente, o dobro do valor da amplitude inicial. A amplitude da onda senoidal no semiciclo negativo deveria estar em -10V devido à fonte de tensão que está em série com o diodo, porém esse valor é um pouco maior que -10V devido à segunda aproximação.

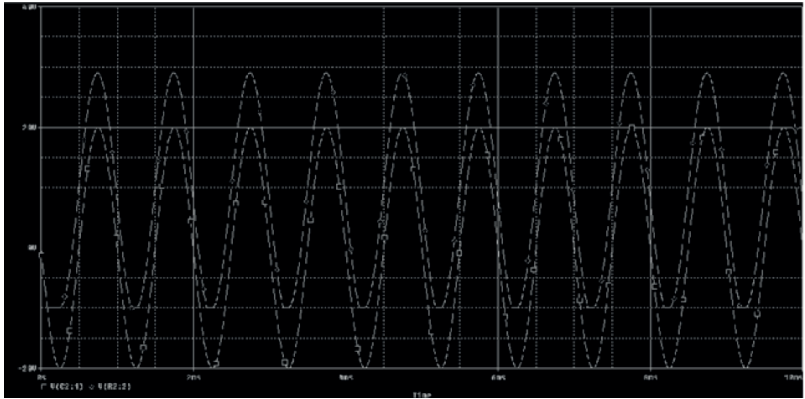
Figura 1.48 | Resultado da simulação do circuito grampeador para um diodo real



Fonte: elaborado pela autora.

Para um diodo ideal: o valor da amplitude pico a pico é mais próxima do dobro do valor da amplitude inicial. A amplitude da onda senoidal no semiciclo negativo agora está em -10V devido à fonte de tensão que está em série com o diodo. Esse valor é exatamente -10V devido ao diodo ser ideal. Portanto, a diferença entre considerar o diodo ideal e a segunda aproximação.

Figura 1.49 | Resultado da simulação do circuito grampeador para um diodo ideal



Fonte: elaborado pela autora.

Faça valer a pena

1. Este tipo de circuito também é chamado por circuito restaurador cc devido ao seu modo de operação. Os componentes principais desse circuito são: diodos e capacitores. Esse circuito também pode receber polarização. Qual é o nome do circuito que adiciona uma tensão cc positiva ou negativa a uma onda senoidal de entrada?

- a) Ceifador.
- b) Limitador.
- c) Retificador em ponte.
- d) Retificador de meia onda.
- e) Grampeador.

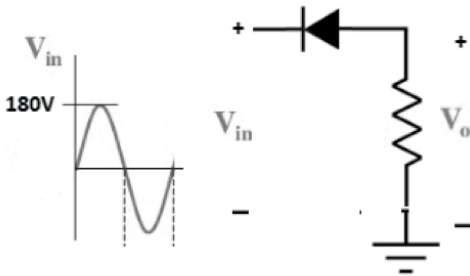
2. Os circuitos retificadores são circuitos que têm como finalidade obter uma tensão contínua a partir de uma tensão senoidal, por exemplo da rede elétrica. O circuito retificador mais simples consiste em diodo em série com um resistor. Os retificadores podem ser de meia onda ou de onda completa. Em relação à frequência, o retificador de meia onda difere do retificador de onda completa.

Se a frequência da rede de energia elétrica for de 60Hz, qual é a frequência de saída do circuito se você estiver utilizando um retificador de meia onda?

- a) 60Hz.
- b) 30Hz.
- c) 120Hz.
- d) 90Hz.
- e) 10Hz.

3. A maioria dos aparelhos eletrônicos, como as televisões e os computadores, precisa de uma fonte de alimentação DC para funcionar. O problema é que a energia elétrica que chega para nós é em tensão alternada. O circuito que transforma em tensão contínua a partir de uma

tensão senoidal é chamado de circuito retificador. O retificador mais simples possui um diodo em série com uma carga, conforme figura a seguir.



Fonte: elaborada pela autora.

Para o circuito acima, determine o nível DC , respectivamente, para um diodo ideal e para um diodo usando a segunda aproximação.

- a) $V_{dc} = -57,24V$ e $V_{dc} = -57,02V$.
- b) $V_{dc} = +57,24V$ e $V_{dc} = +57,02V$.
- c) $V_{dc} = -57,24V$ e $V_{dc} = +57,02V$.
- d) $V_{dc} = +57,02V$ e $V_{dc} = +57,24V$.
- e) $V_{dc} = -57,02V$ e $V_{dc} = -57,24V$.

Referências

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 11. ed. São Paulo: Pearson Education, 2013.

MALVINO, Albert; BATES, David J. **Eletrônica**. 7. ed. Porto Alegre: Amgh Editora Ltda., 2011.

Transistor Bipolar de Junção

Convite ao estudo

Olá, aluno! Bem-vindo à Unidade 2 da disciplina Circuitos Analógicos. Você está pronto para continuar avançando nos estudos?

Na Unidade 1, vimos o primeiro dispositivo semicondutor, o diodo. Aprendemos que, além do diodo comum, há diodos especiais, como Zener, LED, entre outros. Também estudamos alguns tipos de circuitos que envolvem esses dispositivos, como os retificadores e os limitadores. Quando aprendemos sobre as características de construção dos diodos, vimos que eles possuem apenas uma junção "pn", mas será que existem dispositivos com mais de uma junção? A resposta é sim.

Na Unidade 2, estudaremos o primeiro dispositivo que possui mais de uma junção, que são os transistores, mais especificamente o transistor bipolar de junção (TBJs) e o transistor de efeito de campo (FETs). Você aprenderá como os transistores funcionam, e para isso compreenderemos o aspecto construtivo dos dispositivos. Após esse entendimento, você será capaz de identificar as partes dos transistores e fazer as devidas aproximações, para que se possa ter soluções práticas e rápidas através da operação física e da sua característica corrente-tensão.

Você também verá que os transistores podem funcionar como amplificadores e chaves, dependendo da forma que ele foi polarizado. Para isso, veremos alguns tipos de polarização.

Até agora analisamos os transistores através do seu fluxo de corrente em termos de elétrons e lacunas, o que dá um bom entendimento do funcionamento do dispositivo como elemento de um circuito. Após essa análise, mudaremos o estudo para as características elétricas do transistor através de modelos de primeira ordem.

Durante a Unidade 1, você estava começando o seu estágio em uma empresa de informática. Agora, mais seguro com as suas funções, você quer buscar mais desafios e pediu para estagiar na área de manutenção. O seu supervisor gostou da sua ousadia e vontade de conhecer cada vez mais e o encaminhou para a equipe de manutenção. Chegando lá, o seu novo supervisor apresentou-lhe à equipe e entregou um artigo para que você pudesse ler a respeito dos transistores e da área de engenharia da computação. Segue o texto:

A engenharia da computação se destaca no desenvolvimento e na implementação de equipamentos e dispositivos computacionais, assim como nos projetos de CIs, tanto analógicos quanto digitais. Devido a essa característica da área, você foi contratado por uma empresa de manutenção para dar suporte e treinamento para novos funcionários. O seu primeiro ato na empresa foi comentar sobre um artigo que leu em outubro de 2016, o qual dizia que pesquisadores norte-americanos desenvolveram o menor transistor do mundo, com apenas 1 nm de comprimento de porta. Esse transistor é tão pequeno que pode ser comparado a um fio de cabelo; além disso, o material de fabricação também é diferente do transistor convencional. Ele é formado por nano tubos de carbono e dissulfeto de molibdênio. Infelizmente, ainda não podemos usar esse transistor em nossos computadores, pois ele ainda não está sendo comercializado. Enquanto esse novo dispositivo não é comercializado, seus esforços serão para ajudar outros pesquisadores e engenheiros em relação a estruturas e aplicações dos transistores comuns de germânio e de silício. Durante sua visita a uma fábrica de circuitos integrados, o engenheiro contou-lhe algumas particularidades em relação à fabricação e ao uso desses componentes. Por exemplo, para a fabricação deles, não se pode permitir nenhuma partícula de poeira. Para que isso aconteça, é necessário ter um ambiente com higienização perfeita, o qual é conhecido como “sala limpa”. Esse tipo de sala é até 10 mil vezes mais limpa do que uma sala de cirurgia.

Ao final desta unidade, você será capaz de compreender as características importantes dos transistores, identificar os tipos de

transistores e o comportamento deles junto a outros dispositivos. Também conseguirá analisar, entender e projetar um circuito utilizando esse dispositivo eletrônico.

Então, está pronto para começar?

Bons estudos!

Seção 2.1

Características do transistor (TBJ e FET)

Diálogo aberto

Olá! Pronto para aprender um novo assunto?

Vamos iniciar nossos estudos dando continuidade aos dispositivos não lineares. Na unidade anterior, aprendemos sobre os materiais semicondutores e vimos o primeiro dispositivo, que foi o diodo. Agora, vamos aprender sobre os transistores, os quais podem ser divididos em transistores de junção bipolar (TBJs) e transistores de efeito de campo (FETs). Veremos as principais características e a estrutura deles, as semelhanças e diferenças entre eles, a operação física e as características corrente-tensão.

Os dispositivos de três terminais, como os transistores, são mais utilizados do que os de dois, como os diodos, porque eles podem ser utilizados em diversas aplicações, que vão desde a amplificação de sinais até o projeto de circuitos lógicos digitais e de memória.

Os transistores, principalmente os FETs, têm uma importância muito grande nos dias de hoje, pois os computadores modernos só se tornaram possíveis graças aos CIs, portanto, aos transistores.

Agora que você já sabe a importância do estudo dos transistores, voltaremos ao seu estágio. O seu supervisor no estágio acatou a sua decisão de mudar de departamento, então, neste momento, você começou um novo estágio no departamento de manutenção da empresa de computadores. Um dos técnicos do setor ficou sabendo do seu conhecimento sobre transistores e está com uma dúvida em relação a esse componente. Realizando testes em uma placa de computador, o técnico de manutenção descobriu que o defeito está em um dos transistores, porém ele não sabe a diferença entre um npn e um pnp para poder substituí-lo. Ajude-o desenhando os dois tipos de transistores, mostrando as regiões npn e pnp; depois, mostre alguns tipos de polarização e onde podem ser aplicados.

Após ter ajudado o técnico, pense em quais equipamentos podemos encontrar os transistores. Será que existem muitos na sua casa?

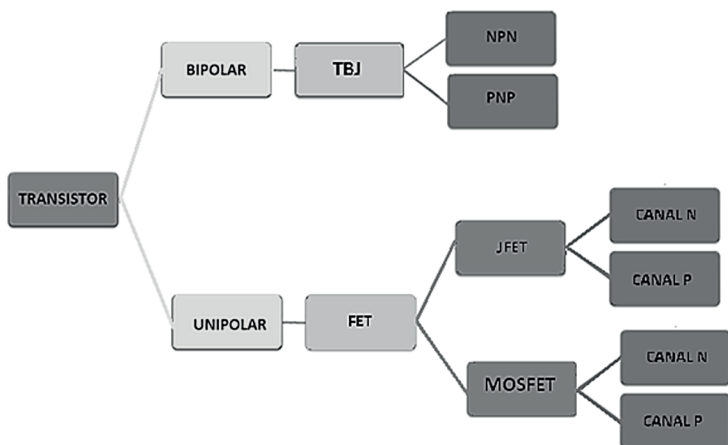
As dificuldades e os desafios estão aumentando, mas tenho certeza que você se sairá muito bem! Vamos começar? Bons estudos!

Não pode faltar

Introdução ao transistor (BJT e FET)

Os transistores podem ser divididos conforme mostra a Figura 2.1.

Figura 2.1 | Divisão dos transistores

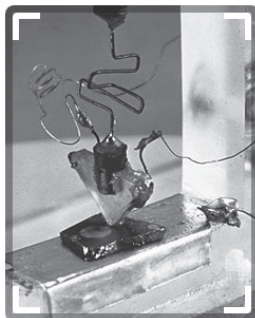


Fonte: elaborada pela autora.

Transistor Bipolar de Junção (TBJ, ou BJT – *Bipolar Junction Transistor*)

O primeiro transistor que se tem registro foi demonstrado nos laboratórios da Bell Telephone Laboratories, em 1947, pelos cientistas Walter H. Brattain e John Bardeen. Eles demonstraram a função de amplificação do primeiro transistor (SACCO, 2014), o qual foi chamado de Transistor de Contato de Ponta, e sua imagem pode ser observada na Figura 2.2.

Figura 2.2 | Primeiro transistor de contato de ponta



Fonte: <<https://br.pinterest.com/pin/118993615124704588/visual-search/?x=7&y=7&w=226&h=285>>. Acesso em: 1º out. 2017.

O transistor de junção foi criado em 1951, por William Shockley. Esse transistor, além da sua função inicial, que é a amplificação de um sinal eletrônico, deu origem a muitas outras aplicações, como os circuitos integrados (CIs). Os computadores modernos só se tornaram possíveis graças ao CIs, portanto, aos transistores (MALVINO; BATES, 2011). Os três cientistas, Walter Brattain, John Bardeen e William Shockley, foram premiados com o Nobel da Física em 1956, pela pesquisa com semicondutores e a descoberta do efeito transistor (SACCO, 2014). O transistor é o dispositivo preferido para a maioria das aplicações lineares.

Transistor de Efeito de Campo (FET – *Field Effect Transistor*)

Dois tipos de FETs serão aprendidos nesta unidade: o transistor de junção por efeito de campo (JFET) e o transistor de efeito de campo metal-óxido semicondutor (MOSFET). O primeiro trabalho, que descreve o princípio do FET, foi realizado no Canadá, em 1925, pelo físico austro-húngaro Julius Edgar Lilienfeld, porém ele não publicou suas pesquisas, o que acabou isolando seu trabalho da indústria. Em 1934, um físico alemão, chamado Oskar Heil, patenteou outro transistor de efeito de campo, só que nunca houve evidências de que esse transistor tenha sido construído (SACCO, 2014). Em 1955, Ian Munro Ross e G. C. Dacey desenvolveram juntos, experimentalmente, para determinar as características de um FET (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013). No final de 1970, os MOSFETs tornaram-se bastante populares, devido ao fato de que, se comparados a um TBJ, os MOS podem ser construídos com dimensões bem menores e o processo de fabricação é relativamente simples. Além disso, memórias e funções lógicas digitais podem ser feitas exclusivamente com MOSFETs sem a necessidade de diodos ou resistores (SEDRA; SMITH, 2000). O FET é o dispositivo preferido para aplicações de chaveamento. O motivo é porque não existem portadores minoritários no dispositivo, por isso ele entra em corte mais rápido, já que não há carga armazenada para ser retirada da junção (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).



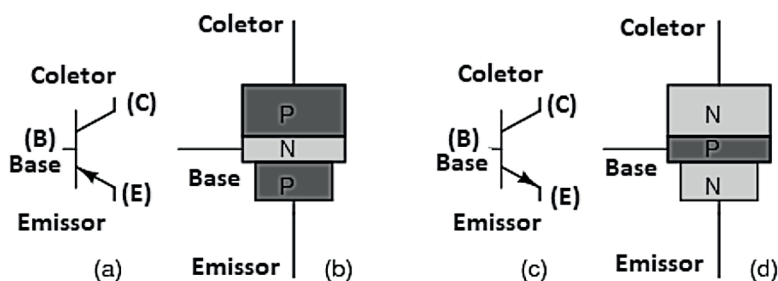
Saiba um pouco mais sobre a história do primeiro transistor. Para acessá-la, basta clicar no link a seguir. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/a-historia-do-primeiro-transistor/>>. Acesso em: 15 nov. 2017.

Estrutura do transistor (TBJ e FET)

TBJ

O TBJ é um dispositivo semiconductor de dois tipos, que possui três regiões dopadas: uma camada tipo n entre duas camadas tipo p, chamada pnp, e uma camada tipo p entre duas camadas tipo n, chamada npn, portanto possui duas junções pn. O nome TBJ deve-se ao fato de conter junções PN ou NP igual ao diodo e também porque tanto os elétrons quanto as lacunas formam a corrente no dispositivo. O termo bipolar é justamente pelo fato de esse dispositivo possuir dois tipos de cargas: lacunas e elétrons livres. O transistor possui três terminais, chamados de emissor, base e coletor. No transistor real, a região da base é mais estreita do que as regiões do emissor e coletor, e a região do coletor é a mais larga das três. A Figura 2.3 representa os símbolos e o layout físico dos transistores pnp e npn.

Figura 2.3 | Transistor TBJ: (a) pnp símbolo; (b) layout físico; (c) npn símbolo; (d) layout físico



Fonte: adaptado de <<https://www.allaboutcircuits.com/textbook/semiconductors/chpt-4/bipolar-junction-transistors-bjt/>>. Acesso em: 1 out. 2017.

No transistor, o terminal central, que é chamado de base, controla a corrente que circula pelo emissor e pelo coletor. O TBJ em relação ao FET tem uma melhor resposta em frequência, é linear e mais robusto. É um dispositivo controlado por corrente. As funções principais dos TBJs vão depender das regiões de operação (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

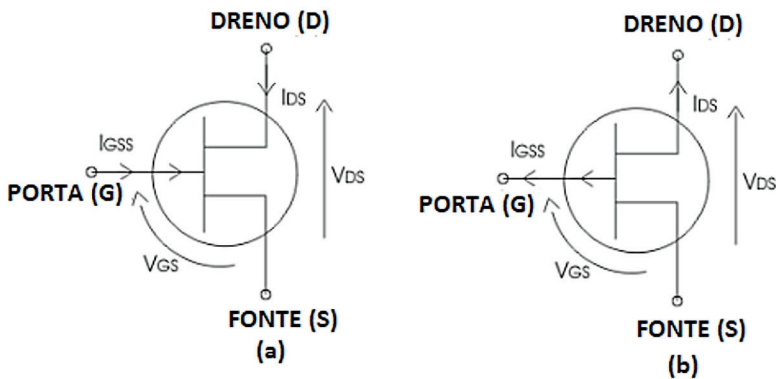
FET

Os FETs podem ser subdivididos em dois grupos: JFET e MOSFET. O MOSFET é subdividido em MOSFET de Depleção e MOSFET de Enriquecimento. Os FETs são dispositivos unipolares, porque seu funcionamento só depende de um tipo de carga: lacunas ou elétrons livres, e são controlados por tensão, possuem alta impedância de entrada, são mais estáveis em relação à variação de temperatura e possuem ruído menor (SEDRA; SMITH, 2000).

JFET

A Figura 2.4(a) representa o JFET canal n, e a Figura 2.4(b), o JFET canal p. Nota-se que o dispositivo possui três terminais, denominados PORTA (G – GATE), DRENO (D – DRAIN) e FONTE (S – SOURCE); as correntes também estão marcadas na figura (SEDRA; SMITH, 2000).

Figura 2.4 | JFET: (a) canal n e (b) canal p

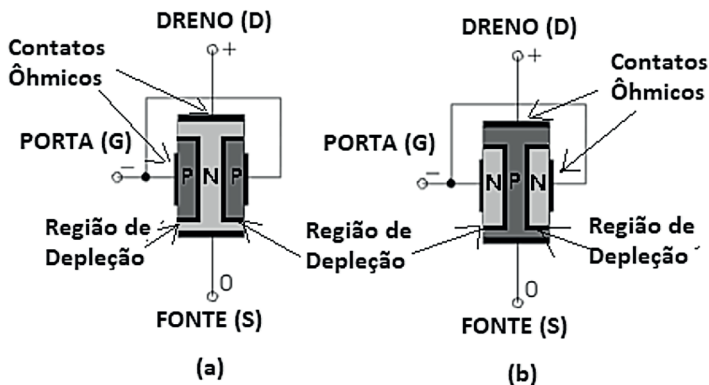


Fonte: adaptado de <<https://www.electrical4u.com/jfet-or-junction-field-effect-transistor/>>. Acesso em: 8 out. 2017.

A Figura 2.5(a) representa a estrutura de um JFET canal n, e a (b) representa a estrutura de um JFET canal p. Analisando o JFET canal n, observamos que o material tipo N forma a maior parte do dispositivo. Duas camadas do material tipo P são imersas no JFET, formando o canal n. Dois contatos ôhmicos aparecem nas extremidades opostas da região n, formando os terminais de dreno e fonte, e mais dois contatos ôhmicos interligados aparecem nas extremidades da região p, formando o terminal da porta. A região de depleção é formada quando os materiais n e p são colocados em contato. Essa região de depleção faz com que a área da região do canal fique mais estreita. O funcionamento do JFET está ligado ao estreitamento do canal.

A mesma análise é feita para o canal p, invertendo o material p por n e o n por p, conforme a Figura 2.5(b).

Figura 2.5 | (a) Canal n e (b) Canal p



Fonte: adaptado de <<https://www.electrical4u.com/jfet-or-junction-field-effect-transistor/>>. Acesso em: 8 out. 2017.

MOSFET

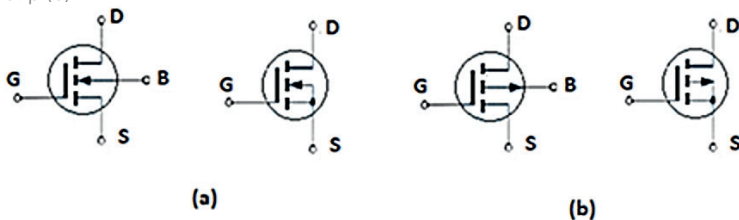
O MOSFET também é conhecido como FET de porta isolada ou IGFET.

MOSFET Enriquecimento

A Figura 2.6(a) representa o símbolo de um MOSFET enriquecimento tipo canal n, e a Figura 2.6(b) representa um MOSFET enriquecimento tipo canal p. O MOSFET enriquecimento também é conhecido como MOSFET intensificação. Nota-se que ele possui quatro terminais, denominados de PORTA (G – GATE), DRENO (D – DRAIN), FONTE (S – SOURCE) e CORPO ou SUBSTRATO (B – BODY ou SS – SUBSTRATE).

OBS.: O CORPO pode ser observado na Figura 2.7, como também uma linha tracejada na vertical do símbolo representa o canal e indica que o dispositivo é do tipo enriquecimento.

Figura 2.6 | Símbolos do MOSFET: enriquecimento canal n (a) e enriquecimento canal p (b)



Fonte: elaborada pela autora.

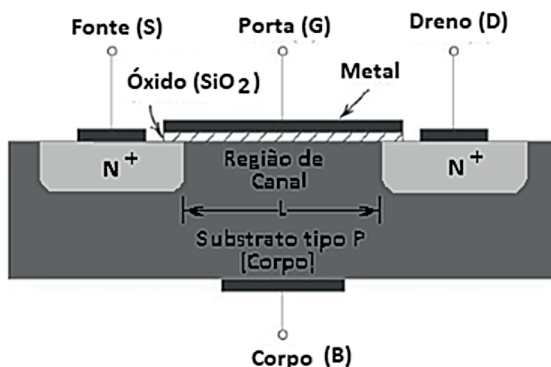
O MOSFET tipo enriquecimento é o transistor de efeito de campo mais usado.

A Figura 2.7 representa a estrutura de um MOSFET enriquecimento tipo canal n. Nota-se que não existe a região de canal entre a fonte e o dreno, o substrato envolve completamente as regiões de dopagem diferente do dreno e da fonte. O silício é fortemente dopado com o material tipo n em duas regiões: fonte e dreno. O N^+ na figura representa o fortemente dopado. Uma camada fina de dióxido de silício (SiO_2) de, aproximadamente, 0,02 a 0,1 μm é acrescentada sobre o substrato, cobrindo a área entre a fonte e o dreno. Em operação normal, essas junções pn são mantidas reversamente polarizadas. O dreno terá uma tensão positiva em relação à fonte e as junções pn podem estar em corte, conectando o terminal do substrato ao terminal da fonte. Nesse caso, o substrato não terá efeito sobre a operação do dispositivo e o MOSFET terá apenas três terminais: DRENO, PORTA e FONTE. A parte inferior da Figura 2.5 representa essa situação. O SiO_2 é um excelente material isolante. Por cima dessa camada de óxido é depositado um metal que forma o eletrodo de porta do dispositivo. Contatos de metal são feitos na região da fonte, do dreno e do corpo ou substrato (SEDRA; SMITH, 2000).

O MOSFET é considerado um dispositivo simétrico, portanto podem ser trocados os terminais da fonte e do dreno e não haverá alteração nas características.

Para o canal p, basta inverter a dopagem dos semicondutores, o material n troca-se por p e o material p troca-se por n.

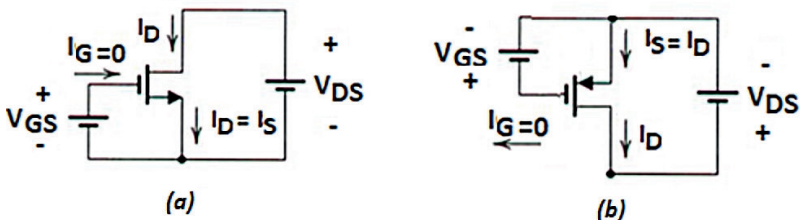
Figura 2.7 | MOSFET Enriquecimento



Fonte: elaborada pela autora.

As Figuras 2.8(a) e 2.8(b) mostram as tensões e correntes de um MOSFET tipo enriquecimento canal n e canal p, respectivamente. Observa-se que a corrente no gate (I_G) é igual a zero. A tensão entre o gate e a fonte é dada por V_{GS} , e a tensão entre o dreno e a fonte, por V_{DS} . A corrente no dreno é dada por I_D , e na fonte, por I_S .

Figura 2.8 | (a) Tensões e correntes em um MOSFET enriquecimento canal n e (b) Tensões e correntes em um MOSFET enriquecimento canal p

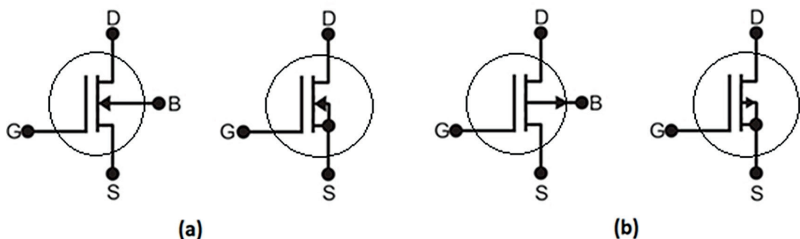


Fonte: elaborada pela autora.

Mosfet Depleção

A Figura 2.9(a) representa o símbolo de um MOSFET depleção tipo canal n, e a Figura 2.9(b) representa um MOSFET depleção tipo canal p. Nota-se que ele possui quatro terminais, denominados de PORTA (G – GATE), DRENO (D – DRAIN), FONTE (S – SOURCE) e CORPO ou SUBSTRATO (B – BODY ou SS – SUBSTRATE). Na maioria das aplicações, o substrato encontra-se conectado no terminal da fonte (SEDRA; SMITH, 2000).

Figura 2.9 | Símbolos do MOSFET: depleção canal n (a) e depleção canal p (b)

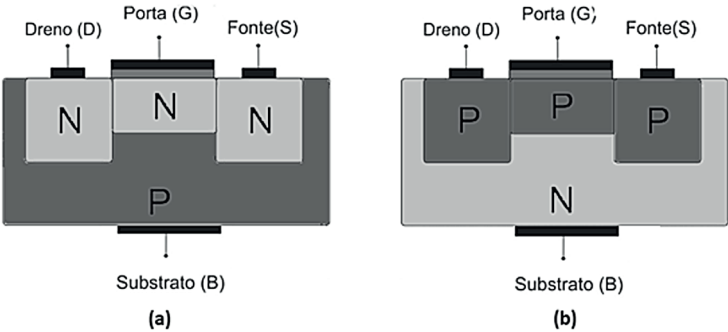


Fonte: elaborada pela autora.

A estrutura de um MOSFET depleção é similar à de um MOSFET enriquecimento, exceto por uma característica bem importante: o MOSFET depleção possui um canal implantado fisicamente. A Figura 2.10(a) mostra a estrutura de um MOSFET depleção canal n, e a Figura 2.10(b), canal p. Analisando o MOSFET depleção canal n, nota-se que

a maior parte do material é formada pela camada tipo p, na qual o terminal do substrato está conectado. Os terminais do dreno e da fonte estão conectados a duas regiões do material tipo n através de contatos metálicos. O dreno e a fonte são interligados por um canal formado pelo material tipo n, imerso no mesmo lado do substrato do dispositivo. O terminal da porta é isolado eletricamente do canal tipo n e do restante do dispositivo através de uma fina camada de SiO_2 , a qual, como vimos, é um isolante. Isso garante uma alta impedância de entrada para o dispositivo e, idealmente, não passaria corrente pela porta. Quando os materiais tipo n e tipo p são colocados em contato, forma-se a região de depleção.

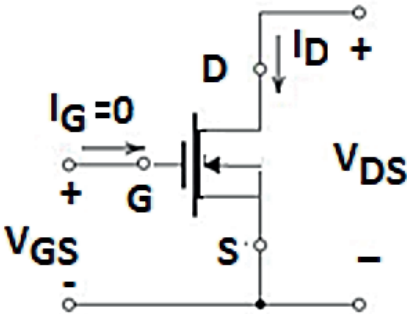
Figura 2.10 | MOSFET Depleção



Fonte: elaborada pela autora.

A Figura 2.11 representa as tensões e correntes em um MOSFET depleção canal n.

Figura 2.11 | Tensões e correntes em um MOSFET depleção canal n



Fonte: elaborada pela autora.

O MOSFET tipo depleção pode ser operado no modo enriquecimento, aplicando-se um valor positivo de V_{GS} , e no modo depleção, pela aplicação de um valor negativo de V_{GS} .

Operação física e característica corrente-tensão do transistor (TBJ e FET)

TBJ

Anteriormente, vimos que o transistor possui duas junções pn, a junção emissor-base (JEB) e a junção coletor-base (JCB). Dependendo do modo que essas junções forem polarizadas, são obtidos diferentes modos de operação do TBJ, os quais são denominados de ativo, corte e saturação.

No modo ativo, o transistor é usado para operar como amplificador; nos modos de corte e saturação, o transistor é usado em aplicações de chaveamento, por exemplo, em circuitos lógicos (SEDRA; SMITH, 2000).

A Tabela 2.1 mostra os modos de operação do TBJ.

Tabela 2.1 | Modo de Operação do TBJ

Modo	JEB	JCB
Corte	Reversa	Reversa
Ativo	Direta	Reversa
Saturação	Direta	Direta

Fonte: adaptada de Sedra e Smith (2000).

Podemos dizer que a região de corte é “não linear”, ou seja, a região possui distorções. O limite para a região de corte é definido quando I_B for igual a zero.

A região ativa é a que apresenta maior linearidade, ou seja, há uma amplificação linear. A corrente de coletor (I_C) aumenta linearmente com VCE (tensão coletor-emissor) para cada valor da corrente de base (I_B). A região de saturação é “não linear”, ou seja, há uma distorção relativa à tensão reversa. Um parâmetro importante nos transistores TBJ é o β . O β representa o ganho de corrente e é definido como:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (1)$$

Outro parâmetro é o α , que é definido como:

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \quad (2)$$



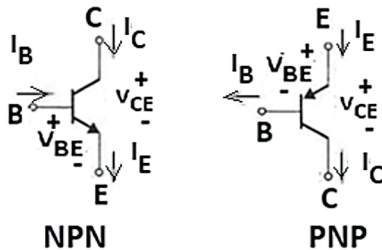
Exemplificando

Um transistor tem uma corrente de coletor de 2,5 mA. Se o ganho de corrente for de 140, qual é o valor da corrente de base?

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \rightarrow I_B = \frac{I_C}{\beta} \rightarrow I_B = \frac{2,5mA}{140} = 17,85\mu A$$

A Figura 2.12 representa o símbolo dos transistores tipo NPN e PNP com as respectivas direções das correntes e tensões.

Figura 2.12 | Correntes e tensões nos TBJs NPN e PNP



Fonte: elaborada pela autora.

Para o dispositivo TBJ, a corrente no emissor é a soma das correntes de base e coletor, e a tensão base-emissor (V_{BE}) é igual a 0,7V.

A Tabela 2.2 representa a relação das tensões para os modos de operação do transistor TBJ.

Tabela 2.2 | Relação das tensões para os modos de operação do transistor TBJ

Modo	JEB	JCB
Corte	$V_E > V_B$	$V_C > V_B$
Ativo	$V_B > V_E$	$V_C > V_B$
Saturação	$V_B > V_E$	$V_B > V_C$

Fonte: elaborada pela autora.

Existem vários tipos de polarização, porém as descritas a seguir são as mais utilizadas em projetos. O problema da polarização é estabelecer uma corrente contínua constante no emissor. Essa corrente deve ser previsível e insensível às variações de temperatura e às grandes variações de β . Os principais modos de polarização são:

- Polarização na base: a polarização na base tem poucos componentes, é dependente de β e a corrente na base é fixa. Esse tipo de polarização é mais usado em chaveamento e circuitos digitais.
- Polarização do emissor: há uma independência em relação a β , e a corrente no emissor é fixa. Pode ser usado em amplificador.
- Polarização por divisor de tensão: há a necessidade de mais componentes (resistores), é independente de β e é utilizada apenas uma fonte. Essa polarização pode ser utilizada em amplificadores.
- Polarização do emissor com fonte dupla: há a necessidade de duas fontes e as equações são independentes de β . Utilizado também como amplificador.
- Polarização por realimentação no coletor ou autopolarização: é mais estável do que a polarização por emissor, porém ainda é sensível em relação a variações no ganho de corrente. Devido à sua simplicidade, é utilizado na prática (MALVINO; BATES, 2011).



Assimile

Quando os TBJs são polarizados por divisor de tensão das configurações da tensão do emissor, eles são classificados como circuitos independentes de β , pois os valores de I_C e V_{CE} não são afetados pela variação desse parâmetro.

JFET

A relação entre I_D (corrente no dreno) e V_{GS} (tensão entre porta e fonte) é dada por:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p} \right)^2 \quad (3)$$

Onde I_{DSS} (corrente de saturação) e V_p são constantes. O termo quadrático da equação apresenta uma relação não linear entre I_D e V_{GS} . O resultado é uma curva que cresce exponencialmente com os valores crescentes de V_{GS} . A tensão V_{GS} é conhecida como variável de controle. Podemos dizer que a corrente no dreno é igual à corrente na fonte, e a corrente na porta é, aproximadamente, igual a zero.

JFET de canal n

O JFET estará em corte quando $V_{GS} \leq V_p$. Para o transistor conduzir, é necessário aplicar uma tensão V_{GS} , tal que $V_p < V_{GS} \leq 0$ e $V_{DS} > 0$. Nessa região, $I_D = 0$.

O JFET funciona na região ôhmica ou de triodo para $V_p < V_{GS} \leq 0$ e $V_{DS} \leq V_{GS} - V_p$. A corrente no dreno é dada por:

$$I_D = I_{DSS} \left[2 \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p} \right) \left(\frac{V_{DS}}{-V_p} \right) - \left(\frac{V_{DS}}{V_p} \right)^2 \right] \quad (4)$$

O JFET funciona em saturação (estrangulamento) para $V_{DS} \geq V_{GS} - V_p$ e $V_p \leq V_{GS} \leq 0$. Para o JFET funcionar em saturação, a tensão de dreno deve ser maior do que a tensão da porta de pelo menos V_p . Em saturação, a corrente de dreno é dada por:

$$I_D = I_{DSS} \left[\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p} \right)^2 (1 + \lambda V_{DS}) \right] \quad (5)$$

Onde λ é o inverso da tensão Early e é dada por:

$$\lambda = \frac{1}{V_A} \quad (6)$$

O JFET de canal p

As características tensão-corrente de um JFET de canal p são descritas pelas mesmas equações que as de um JFET de canal n.

Entretanto, para um JFET canal p, V_p é positiva, V_{DS} é negativa, λ é negativo, V_A é negativo e $0 \leq V_{GS} \leq V_p$. No JFET canal P, a corrente I_D sai pelo terminal do dreno.

Para o JFET de canal p funcionar na região de saturação: $V_{DS} \leq V_{GS} - V_p$, ou seja, a tensão do dreno deve ser menor do que a tensão da porta de pelo menos V_p .

Para o JFET canal p funcionar na região de triodo: $V_{DS} \geq V_{GS} - V_p$ (SEDRÁ; SMITH, 2000).



Refleta

Por causa da impedância muito alta de entrada do JFET, a corrente de entrada, geralmente, é considerada de μA , e o ganho de corrente é considerado uma grandeza indefinida.

MOSFET

Dependendo das tensões aplicadas sobre os terminais de um MOSFET, ele pode funcionar em três regiões diferentes. Para um MOSFET ENRIQUECIMENTO ou INTENSIFICAÇÃO canal n ou NMOS, temos as seguintes regiões de operação:

- Região de Corte: $V_{GS} < V_T$. (tensão limiar para formação do canal). Nessa região, o transistor permanece desligado, e não há condução entre o dreno e a fonte, ou seja, a corrente entre o dreno e fonte deve idealmente ser zero devido à chave estar desligada. Há uma fraca corrente invertida. O valor de V_T é fixado durante a fabricação do dispositivo e tem valores típicos na ordem de 1 a 3V.
- Região linear ou de triodo: $V_{GS} > V_T$ e $V_{DS} < V_{GS} - V_T$. Para operar nessa região, primeiro, é necessário induzir o canal, ou seja, $V_{GS} \geq V_T$. O transistor é ligado e o canal que é criado permite o fluxo de corrente entre o dreno e a fonte. Esse canal criado tem que permanecer contínuo; para isso, deve-se manter V_{DS} pequeno, isso é garantido fazendo $V_{GD} > V_T$. O MOSFET opera como um resistor, controlado pela tensão na porta. A corrente no dreno é caracterizada por:

$$I_D = K[(2V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2], \text{ onde } K = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \quad (7)$$

Onde K é uma constante que depende da construção do dispositivo, L é o comprimento, W é a largura, μ_n é a mobilidade dos elétrons e C_{ox} é a capacitância do óxido.

No MOSFET L, está tipicamente entre os valores de 1 a 10 μm e W entre 2 a 500 μm .

- **Região de Saturação:** quando $V_{GS} > V_T$ e $V_{DS} > V_{GS} - V_T$. Para operar nessa região, primeiro, é necessário induzir o canal, ou seja, $V_{GS} \geq V_T$, e também estrangular (estreitamento do canal ou até desaparecimento) no final do dreno pelo aumento de V_{DS} ($V_{DS} > V_{GS} - V_T$). Essa situação é conhecida como estrangulamento ou *pinch off* do canal, ou como se diz, o canal ficou saturado. Na região de saturação, o transistor está fornecendo o máximo de corrente possível, sendo que esse valor permanece constante, independentemente do potencial aplicado no dreno (V_{DS}). A corrente de dreno é, agora, relativamente independente da tensão de dreno e é controlada somente pela tensão da porta. A expressão que representa o comportamento da corrente de dreno (I_D) ou corrente de saturação em relação à tensão entre os terminais da porta e fonte V_{GS} é dada por:

$$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2 \quad (8)$$

A tensão V_{DS} , nesse caso, é chamada de V_{DSat} , ou seja, a tensão V_{DS} , em cujo valor ocorre a saturação. O limite entre a região de triodo e a região de saturação é dada por:

$$V_{DS} = V_{GS} - V_T \quad (9)$$

OBS.: Para o MOSFET enriquecimento canal P, as equações são semelhantes, modificando apenas V_T , que é negativo, e as inequações são inversas.

Em circuitos digitais, na operação como chave, os MOSFETs são usados nos modos de corte e de triodo. O modo de saturação é usado se o FET for operar como amplificador (FERREIRA, 2017).

Para o MOSFET DEPLEÇÃO canal N ou NPMOS

As características da corrente tensão do MOSFET depleção são as mesmas descritas no MOSFET ENRIQUECIMENTO, exceto que, para o canal N, o valor de V_T é negativo.

Um parâmetro importante para o MOSFET depleção é a corrente de dreno obtida na saturação para $V_{GS}=0$. Ela, nesse caso, é dada por I_{DSS} e por:

$$I_{DSS} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} V_t^2 \quad (10)$$

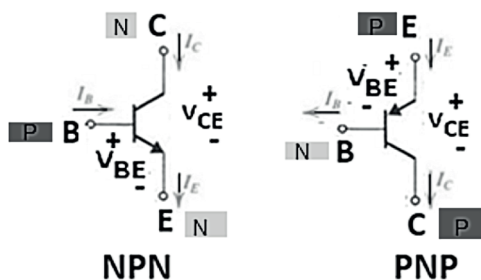
O MOSFET tipo depleção canal P (PMOS) opera de forma parecida à do canal n, exceto que todas as polaridades, inclusive V_T , são invertidas (SEDRA; SMITH, 2000).

Sem medo de errar

Retornando ao departamento de manutenção onde você está estagiando, um dos técnicos da empresa de manutenção de computadores ficou sabendo do seu conhecimento sobre transistores e está com uma dúvida em relação a esse componente. Realizando testes em uma placa de computador, o técnico de manutenção descobriu que o defeito está em um dos transistores, porém ele não sabe a diferença entre um npn e um pnp para poder substituí-lo. Ajude-o, desenhando os dois tipos de transistores e mostrando as regiões npn e pnp; depois, mostre alguns tipos de polarização e onde podem ser aplicados.

A Figura 2.13 mostra os transistores bipolares de junção tipo NPN e PNP. Na figura, estão marcados as direções das correntes, as tensões em cada região e o tipo de material de que é formado cada terminal do transistor.

Figura 2.13 | Transistores NPN e PNP com os respectivos materiais e direções de corrente e tensão



Fonte: elaborada pela autora.

Em relação à polarização, os principais modos são:

- Polarização na base: tem poucos componentes, é dependente de β e a corrente na base é fixa. Esse tipo de polarização é mais usado em chaveamento e circuitos digitais.
- Polarização do emissor: há uma independência em relação a β , e a corrente no emissor é fixa. Pode ser usado em amplificador.
- Polarização por divisor de tensão: há a necessidade de mais componentes (resistores), é independente de β e é utilizada apenas uma fonte. Essa polarização pode ser utilizada em amplificadores.
- Polarização do emissor com fonte dupla: há a necessidade de duas fontes e as equações são independentes de β . Utilizado também como amplificador.

Avançando na prática

TBJ X FET

Descrição da situação-problema

Após a sua visita à fábrica, sua professora pediu para que você fizesse um projeto para a fabricação de um circuito integrado. O primeiro passo será decidir qual tecnologia escolherá, FET ou TBJ, para isso, faça uma tabela comparando os dois. Nessa comparação, explique as diferenças de estrutura, as características elétricas e as desvantagens e vantagens de cada um deles.

Resolução da situação-problema

As diferenças, as características elétricas e as desvantagens e vantagens do FET e TBJ seguem no quadro:

Quadro 2.1 | Diferenças entre TBJ e FET

FET	TBJ
Dispositivo unipolar: elétron ou lacuna é responsável pela corrente de saída	Dispositivo bipolar: corrente de saída é formada por elétron e lacuna
Ganho de tensão baixo e impedância de entrada alta	Ganho de tensão alto e impedância de entrada moderada
Mais estável em relação a variação de temperatura	Sensibilidade em relação à variação de temperatura
Ruído pequeno	Ruidoso

Fabricação fácil	Região de base impõe dificuldades durante a fabricação, devido à espessura de dopagem.
É usado como amplificador, chave lógica e circuitos integrados	Amplificador e chave lógica
A alta impedância de entrada prejudica sua resposta em frequência	Boa resposta em frequência
Controlado por tensão	Controlado por corrente

Fonte: elaborada pela autora.

Faça valer a pena

1. Os transistores de efeito de campo (FETs) podem ser divididos em dois grupos: JFET e MOSFET. O MOSFET é subdividido em MOSFET de Depleção e MOSFET de Enriquecimento. Os FETs são dispositivos unipolares, porque seu funcionamento só depende de um tipo de carga: lacunas ou elétrons livres. Assinale a alternativa correta em relação a um FET.

- a) É um dispositivo controlado por tensão.
- b) É um dispositivo controlado por corrente.
- c) Tem uma impedância de entrada muito baixa.
- d) Tem um ganho de tensão muito alta.
- e) É um dispositivo bipolar, ou seja, possui dois tipos de cargas: lacunas e elétrons livres.

2. O transistor bipolar de junção é um dispositivo semicondutor de dois tipos, que possui três regiões dopadas: uma camada tipo n entre duas camadas tipo p, chamada *pnp*, e uma camada tipo p entre duas camadas tipo n, chamada *npn*, portanto possui duas junções *pn*. O nome TBJ deve-se ao fato de conter junções PN ou NP. Dependendo do modo de operação, o transistor é usado em funções e aplicações diferentes.

Em relação ao dispositivo transistor TBJ, qual é a sua função mais importante?

- a) Amplificar os sinais fracos.
- b) Diminuir a tensão.
- c) Retificar um sinal.
- d) Ser controlado por tensão.
- e) Limitar uma corrente.

3. Os transistores de efeito de campo podem ser divididos em dois grupos: JFET e MOSFET. O MOSFET é subdividido em MOSFET de Depleção e MOSFET de Enriquecimento. A operação de um MOSFET pode ser dividida em três diferentes regiões, dependendo das tensões aplicadas sobre seus terminais.

Quando um MOSFET enriquecimento canal N tem $V_{GS} > V_T$ e $V_{DS} > V_{GS} - V_T$, ele:

- a) Opera no modo de saturação.
- b) Opera no modo de corte.
- c) Opera no modo de triodo.
- d) É danificado.
- e) Opera em todos os modos.

Seção 2.2

Análise de circuitos com transistor (BJT e FET)

Diálogo aberto

Olá! Vamos continuar aprendendo sobre os transistores?

Nós já vimos as principais características e a estrutura dos TBJs e dos FETs, as semelhanças e diferenças entre eles, a operação física e as características corrente-tensão. Agora, vamos aprender mais sobre os tipos de polarização e que, dependendo dessa polarização, os transistores operam em regiões diferentes e, por consequência, desempenham funções diferentes. Veremos também alguns circuitos nos quais podem ser aplicadas essas polarizações. Estudar os tipos de polarização é muito importante, pois através delas definimos qual é a função do transistor. Por exemplo, um circuito pode ser projetado especificamente para fazer um transistor atuar como uma chave. Nesse caso, o transistor estará nos estados de **corte** e **saturação**, que serão determinados na etapa de polarização.

A última tarefa do seu estágio no departamento de manutenção foi ajudar o técnico mostrando os tipos de transistores, as polarizações que existem e onde elas podem ser aplicadas.

Continuando o seu estágio na empresa de manutenção, o estagiário técnico aprendeu que existem dois tipos básicos de circuitos com transistores: chaveamento e amplificador. Sabendo do seu conhecimento sobre transistores, ele está com uma dúvida em como descobrir qual a região que os transistores operam, se é na região ativa ou na região de saturação. Explique para ele, através do desenho de um circuito com polarização de base, como poderá determinar se um TBJ pode estar operando na região ativa ou na região de saturação.

Na sua casa há algum equipamento que possui um transistor que opera como chave ou como amplificador?

As dificuldades aumentaram mais um pouco, mas com esforço e dedicação você se sairá muito bem.

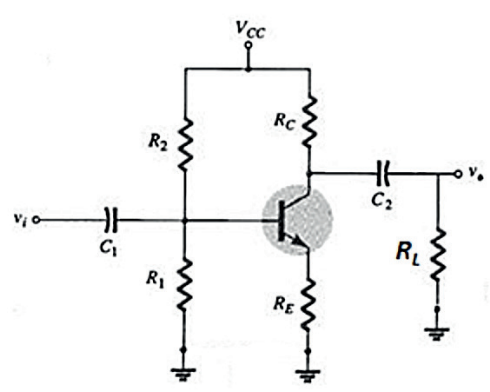
Pronto para continuar em mais esse desafio?

Bons estudos!

O transistor TBJ como amplificador

A polarização de um transistor é necessária para que ele possa operar em uma das regiões: ativa, corte ou saturação. Quando polarizamos o transistor, na verdade, estamos escolhendo as tensões e correntes cc que serão empregadas nos circuitos com transistores. Em geral, a topologia do circuito de polarização modifica a operação do transistor como amplificador. Para o transistor operar como amplificador, ele deve operar na região ativa. A junção emissor-base é polarizada diretamente, e a junção coletor-base, reversamente. Para o TBJ, na configuração emissor comum, podemos ter (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013): polarização fixa, polarização estabilizada por emissor, polarização por realimentação de tensão e polarização por divisor de tensão. A polarização por divisor de tensão é a topologia que apresenta maior estabilidade e grau de liberdade de projeto, por isso pode ser considerada como a mais importante. A estabilidade na saída é devida ao resistor no emissor. Além disso, contém as topologias com polarização fixa e polarização estabilizada por emissor. A Figura 2.14 representa o TBJ em emissor comum com polarização por divisor de tensão.

Figura 2.14 | TBJ com polarização por divisor de tensão

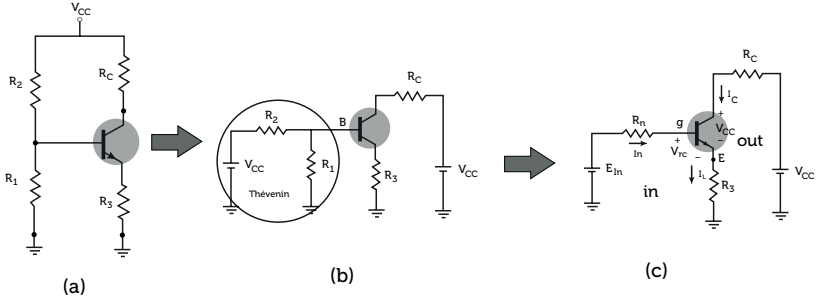


Fonte: elaborada pela autora.

A partir da Figura 2.14, vamos fazer a análise DC. Os passos são: identificar o tipo de transistor e a configuração; considerar os capacitores como equivalentes abertos para análise DC, ou seja, $C \rightarrow \infty$; reescrever o circuito simplificado para uma melhor visualização; definir

os sentidos das correntes; analisar o circuito. A Figura 2.15(a) mostra o circuito apresentado na Figura 2.14 após considerar os capacitores como equivalentes abertos. Rearranjando a Figura 2.15(a), notamos que há um divisor de tensão, representado por um círculo. Nesse divisor de tensão, aplicaremos Thevenin – Figura 2.15(b). A Figura 2.15(c) é o resultado da aplicação de Thevenin da Figura 2.15(b).

Figura 2.15 | Rearranjo do circuito apresentado na Figura 2.14



Fonte: elaborada pela autora.

A partir da Figura 2.15(c), começamos o equacionamento. De Thevenin, temos (1):

$$E_{th} = V_{cc} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad e \quad R_{th} = R_1 // R_2 \quad (1)$$

Onde E_{th} é a tensão de Thevenin e R_{th} é a resistência de Thevenin. Analisando a malha *in*, temos a seguinte equação (2):

$$-E_{th} + R_{th} \cdot I_B + V_{BE} + R_E \cdot I_E = 0 \quad (2)$$

Onde, I_B é a corrente de base, I_E é a corrente de emissor e V_{BE} é a tensão entre base e emissor.

Observando o circuito, notamos que (3):

$$I_E = I_B + I_C \quad (3)$$

Onde I_C é a corrente de coletor. Substituindo I_C por βI_B e colocando em evidência β , temos (4):

$$I_E = I_B + \beta \cdot I_B \rightarrow I_E = I_B(1 + \beta) \quad (4)$$

Substituindo a equação (4) em (2), temos (5):

$$\begin{aligned} -E_{th} + R_{th} \cdot I_B + V_{BE} + R_E \cdot I_B (\beta + 1) &= 0 \\ -E_{th} + I_B (R_{th} + R_E \cdot (\beta + 1)) + V_{BE} &= 0 \\ I_B &= \frac{E_{th} - V_{BE}}{R_{th} + R_E \cdot (\beta + 1)} \end{aligned} \quad (5)$$

Analisando a malha out (6):

$$-R_E \cdot I_E - V_{CE} - R_C \cdot I_C + V_{CC} = 0 \quad (6)$$

Onde V_{CE} é a tensão entre coletor e emissor. Como a corrente no coletor é, aproximadamente, igual à corrente no emissor, temos (7):

$$\begin{aligned} -R_E \cdot I_C - V_{CE} - R_C \cdot I_C + V_{CC} &= 0 \\ I_C (-R_E - R_C) + V_{CC} - V_{CE} &= 0 \\ I_C &= \frac{V_{CE} - V_{CC}}{-R_E - R_C} \text{ ou } I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_E + R_C} \end{aligned} \quad (7)$$

Se o circuito for projetado de tal forma que R_{th} seja muito menor que $(\beta + 1)R_E$, temos que a corrente no coletor torna-se independente de β (8):

$$\begin{aligned} I_C &= \beta I_B \rightarrow I_C = \beta \frac{E_{th} - V_{BE}}{R_{th} + R_E \cdot (\beta + 1)} \\ I_C &= \beta \frac{E_{th} - V_{BE}}{R_E \cdot (\beta + 1)} \rightarrow I_C = \frac{\beta}{\beta + 1} \cdot \frac{E_{th} - V_{BE}}{R_E} \\ I_C &\cong \frac{E_{th} - V_{BE}}{R_E} \end{aligned} \quad (8)$$



Exemplificando

Considerando o circuito da Figura 2.14, calcule I_C e I_B para: $R_1 = 4,2K\Omega$, $R_2 = 42K\Omega$, $R_C = 10K\Omega$, $R_E = 2K\Omega$, $V_{CC} = 24V$ e $\beta = 140$.

$$E_{th} = V_{CC} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 24 \cdot \frac{4,2k}{4,2k + 42k} = 2,18V$$

$$R_{th} = R_1 // R_2 = \frac{4,2K \cdot 42k}{4,2K + 42k} = 3,82k\Omega$$

$$I_B = \frac{E_{th} - V_{BE}}{R_{th} + R_E \cdot (\beta + 1)} = \frac{2,18 - 0,7}{3,82k + 2K \cdot (140 + 1)} = 5,18\mu A$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 140 \cdot 5,18\mu = 0,72mA \text{ ou } I_C \cong \frac{E_{th} - V_{BE}}{R_E} = \frac{2,18 - 0,7}{2K} \cong 0,74mA$$

O transistor FET como amplificador

Como nos TBJs, os FETs também possuem várias aplicações. Uma das mais interessantes é como amplificador, porém é mais utilizado para operação com sinais de pequena amplitude. Devido ao fato de a transcondutância (g_m) ser relativamente baixa, o amplificador fonte comum tem como consequência um ganho de tensão relativamente baixo. Desta forma, os amplificadores com FET não são tão bons quanto os TBJs, se o ganho de tensão for tão importante. A transcondutância é definida como a corrente ca no dreno dividida pela tensão ca porta-fonte. A transcondutância informa-nos sobre a eficácia da tensão porta-fonte no controle da corrente no dreno (MALVINO; BATES, 2011). Do mesmo modo que o TBJ, a adoção de um dos terminais do FET como referência muda as características de amplificação. O funcionamento apropriado do FET depende de sua polarização. Para o FET funcionar como amplificador, ele deve operar na região de saturação. A configuração fonte comum é a mais utilizada. A principal dificuldade na análise do FET é o fato de as equações não serem lineares. Antes de começarmos a análise, vamos relembrar algumas equações importantes. Para o MOSFET Depleção e o JFET, a corrente no dreno é dada pela mesma fórmula (9):

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)^2 \quad (9)$$

Onde V_{GS} é a tensão entre porta e fonte, I_{DSS} é a corrente de dreno na saturação e V_p tensão de estrangulamento. Podemos chamar a equação 8 de equação do dispositivo.

Para o MOSFET Enriquecimento ou Intensificação, temos (10):

$$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2 \quad (10)$$

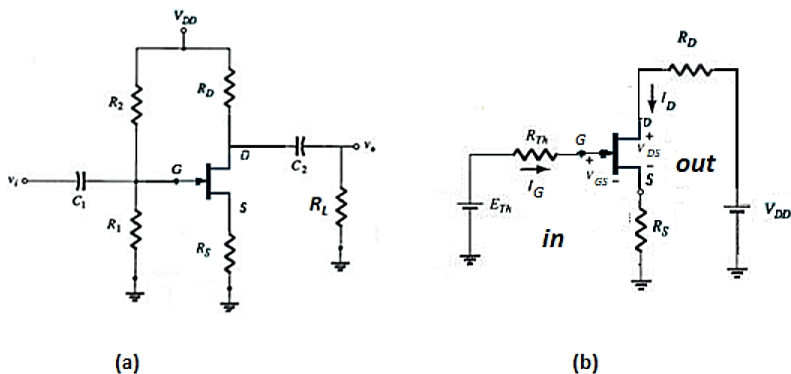
Onde K é uma constante que depende da construção do dispositivo e V_T é a tensão de limiar.

A equação (11) representa alguns resultados importantes:

$$I_G = 0 \text{ e } I_D = I_S \quad (11)$$

Da mesma maneira que o TBJ, o FET também pode ser polarizado de diversos modos. Estudaremos a polarização por divisor de tensão, que é uma das mais completas. A Figura 2.16(a) representa o FET com polarização por divisor de tensão.

Figura 2.16 | (a) FET com polarização por divisor de tensão e (b) rearranjo do circuito apresentado em (a)



Fonte: elaborada pela autora.

A Figura 2.16(b) apresenta o FET após a reconfiguração da Figura 2.16(a). A análise foi a mesma realizada no TBJ. Observando 2.16(b), temos: como I_G é igual a zero, não há corrente passando por R_{th} , portanto pode ser substituído por um curto equivalente. Analisando a malha in, temos as seguintes equações (12):

$$-E_{th} + V_{GS} + R_S \cdot I_D = 0 \quad \therefore \quad I_D = \frac{E_{th}}{R_S} - \frac{1}{R_S} V_{GS} \quad (12)$$

Podemos chamar a equação 11 de equação do circuito.

Para prosseguir a análise, precisaremos resolver o sistema de equações formado pelas equações 11 e 8. Para resolver o sistema, podemos resolver matematicamente ou graficamente.

A solução matemática é obtida substituindo-se V_{GS} ou I_D em uma das duas equações. Neste caso, teremos duas soluções possíveis, pois o resultado é uma equação de segundo grau. A escolha da solução correta pode não ser trivial.

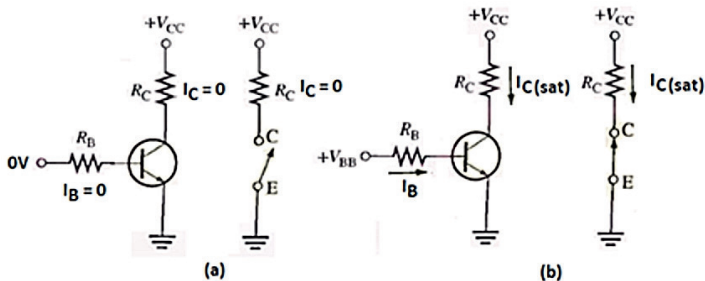
Para o JFET, I_D deve ser bem menor que I_{DSS} para funcionar. Normalmente, a solução produz um valor de I_D bem menor que I_{DSS} e outro maior que I_{DSS} , portanto é só excluir o segundo.

Caso o transistor não seja um JFET, deve-se utilizar a solução gráfica, somente com a matemática não é possível chegar a uma conclusão. Para a solução gráfica, primeiramente, traça-se o gráfico $I_D \times V_{GS}$ utilizando-se das equações do circuito e do dispositivo. O ponto de intersecção é a solução procurada. Quanto mais pontos, melhor a precisão.

O transistor TBJ como chave

A polarização na base é muito útil em circuitos digitais, com o TBJ funcionando como chave, ou seja, interruptor aberto ou fechado. Neste caso, o transistor operará no modo de saturação (V_{CE} pequeno) e no modo de corte (I_C aproximadamente igual a zero), por isso ele tem uma tensão de saída baixa ou uma tensão de saída alta. Para o transistor operar como chave, normalmente, utiliza-se a topologia emissor comum. Caso a comutação entre os modos de corte e saturação ocorra a uma frequência elevada (acima de dezenas de kHz), poderá haver perda no processo, devido à dificuldade de se mudar rapidamente entre as regiões extremas do corte e da saturação. No corte, o transistor equivale a um interruptor aberto, portanto a corrente no coletor será igual a zero. Assim, $V_{CE} = V_{CC}$ e $I_B \cong 0$. Na saturação, o transistor equivale a um interruptor fechado. Dessa forma, V_{CE} é praticamente igual a zero e a corrente no coletor atinge seu valor máximo limitada apenas pela resistência: $I_C = \frac{V_{CC}}{R_C}$. A Figura 2.17(a) representa o TBJ operando na região de corte, e a figura 2.17(b), operando na região de saturação.

Figura 2.17 | Transistor operando como chave



Fonte: elaborada pela autora.

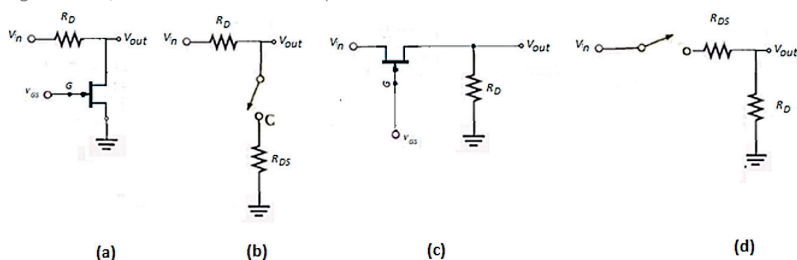
O transistor FET como chave

JFET

O JFET também pode ser utilizado para fazer chaveamento analógico, ou seja, ele funciona como uma chave que transmite ou bloqueia um pequeno sinal ca. Para funcionar como chave, o JFET deve operar na região ôhmica e na região de corte. O funcionamento é semelhante ao TBJ. No JFET, a tensão V_{GS} assume apenas dois valores: zero ou um valor maior que o $V_{GS(corte)}$. Quando o V_{GS} está alto (0V), opera na região ôhmica e, quando está baixo, opera na região de corte.

O JFET pode operar como chave em paralelo ou chave em série. A Figura 2.18(a) representa o JFET trabalhando em paralelo, e a Figura 2.18(b), o circuito equivalente. Já a Figura 2.18(c) representa o JFET trabalhando em série, e a Figura 2.18(d), o circuito equivalente.

Figura 2.18 | JFET como chave em paralelo (a) e (b) e (c) e (d) JFET como chave em série



Fonte: adaptado de Malvino e Bates (2011).

A relação liga-desliga de uma chave é definida como a tensão máxima na saída dividida pela tensão mínima na saída.



Assimile

A resistência ôhmica de um JFET pode ser determinada para qualquer valor de V_{GS} através de: $R_{DS} = \frac{R_{DS(lig)}}{1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(corte)}}}$, onde $R_{DS(lig)}$ é o valor da resistência quando V_{GS} for baixo e V_{GS} for igual a zero.

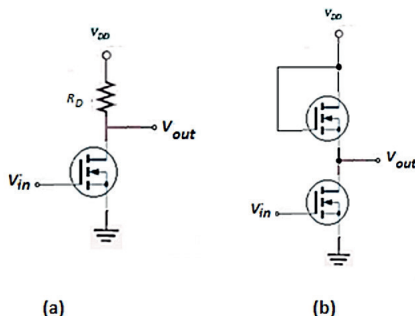
MOSFET

O MOSFET-E revolucionou a indústria do computador em razão da tensão limiar, que é ideal para o uso em aplicações que necessitam de chaveamento, ou seja, a ação de ligar e desligar. Quando a tensão na porta for bem maior que a tensão de limiar, o MOSFET chaveia da região do corte para a região de saturação. O MOSFET-E, no início, trabalhava com carga passiva, e conforme foi se estudando e aprimorando o dispositivo, começou até o chaveamento com carga ativa. O principal problema do MOSFET-E com carga passiva com resistência é o tamanho, que é muito maior que o MOSFET. A Figura 2.19(a) mostra o circuito com carga passiva. A palavra passiva faz referência aos resistores comuns, como o R_D representado na figura.

Neste circuito, V_{in} pode ser alta ou baixa: se for alta, o MOSFET-E satura e V_{out} cai para um valor baixo; se V_{in} for baixa, o MOSFET-E está em corte e V_{out} é igual à tensão da fonte V_{DD} . Para o circuito funcionar

corretamente, $I_{D(sat)}$ tem que ser menor que $I_{D(lig)}$ quando a tensão na saída for igual ou maior que $V_{GS(lig)}$.

Figura 2.19 | (a) Circuito inversor com carga passiva e (b) Circuito com carga ativa



Fonte: elaborada pela autora.

Os circuitos integrados possuem centenas de transistores microscopicamente pequenos, que podem ser bipolares ou MOS. Com a invenção do circuito com carga ativa, o tamanho dos circuitos integrados diminui e, por consequência, o tamanho dos computadores pessoais. Observando a Figura 2.19(b), nota-se que há dois MOSFETs, assim como que o MOSFET-E superior tem sua porta conectada ao seu dreno. Essa ligação faz com que o dispositivo fique com apenas dois terminais com uma resistência ativa. Por essa razão, o MOSFET superior age como uma resistência de valor alto, e o MOSFET inferior age como uma chave.

O cálculo da resistência ativa é dado por (13):

$$R_D = \frac{V_{DS(ativa)}}{I_{D(ativa)}} \quad (13)$$

Onde, $V_{DS(ativa)}$ e $I_{D(ativa)}$ são as tensões e correntes na região ativa. Os valores de V_{DS} e I_D são retirados do gráfico (MALVINO; BATES, 2011).



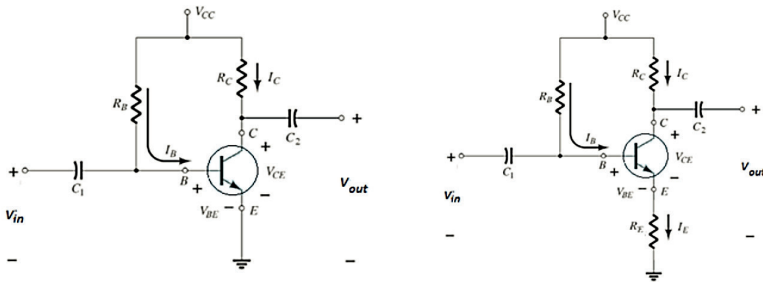
Refleta

Muitas das grandezas físicas são analógicas e podem ser usadas como entrada e saída para serem controladas e monitoradas por um sistema. A temperatura e a pressão são exemplos de grandezas analógicas. Para poder usar as técnicas digitais, essas grandezas físicas analógicas devem ser convertidas em um formato digital, através de um conversor analógico para digital (A/D) (MALVINO; BATES, 2011).

Polarização de circuitos amplificadores com transistor

Tanto o TBJ quanto o FET, para funcionar como amplificador, são polarizados de diversas formas. Para o TBJ, temos (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013): polarização fixa, polarização estabilizada por emissor, polarização por realimentação de tensão e polarização por divisor de tensão. A polarização por divisor de tensão foi vista no início deste capítulo. Os passos para a realização da análise foram os mesmos usados anteriormente na polarização por divisor de tensão. O circuito de polarização fixa é o circuito mais simples de polarização. A Figura 2.20(a) representa esse circuito.

Figura 2.20 | (a) Circuito de polarização fixa e (b) polarizada estabilizada por emissor



Fonte: elaborada pela autora.

Para encontrar as equações de um TBJ com polarização fixa, vamos usar as malhas base-emissor e coletor-emissor – Figura 2.22(a). As equações para malha base-emissor são dadas por (14):

$$-V_{CC} + R_B \cdot I_B + V_{BE} = 0 \text{ e } I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \quad (14)$$

E para malha coletor-emissor (15):

$$-V_{CC} + R_C \cdot I_C + V_{CE} = 0, I_C = \beta I_B \text{ e } V_{CE} = V_{CC} - \beta R_C I_B \quad (15)$$

Outra forma de se polarizar um transistor é usar a polarização estável do emissor. A diferença em relação à polarização fixa é que há um resistor no emissor. Esse resistor é responsável por melhorar o nível de estabilidade. A Figura 2.20(b) representa o circuito de polarização de um TBJ com resistor no emissor.

Para encontrar as equações de um TBJ com polarização estabilizada por emissor, vamos usar as malhas base-emissor e coletor-emissor – Figura 2.20(b). As equações para malha base-emissor são dadas por (16):

$$-V_{CC} + R_B \cdot I_B + V_{BE} + R_E I_E = 0 \text{ e } I_E = (\beta + 1)I_B \quad (16)$$

Substituindo I_E da fórmula (16) na primeira equação da fórmula (16), temos em (17):

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E} \quad (17)$$

E para malha coletor-emissor (18):

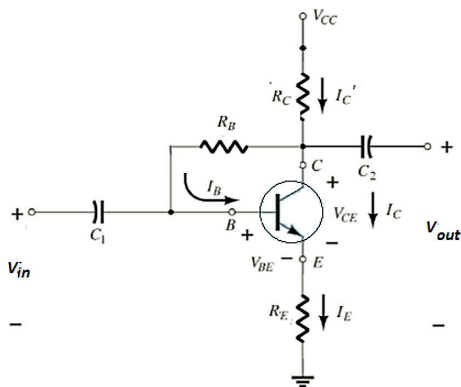
$$-V_{CC} + R_C \cdot I_C + V_{CE} + R_E \cdot I_E = 0, I_C \cong I_E \text{ e } V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E) \quad (18)$$

Outras equações importantes são relacionadas em (19):

$$\begin{aligned} V_E &= R_E \cdot I_E \\ V_C &= V_{CE} + V_E \\ V_C &= V_{CC} - R_C \cdot I_C \\ V_B &= V_{CC} - R_B \cdot I_B \\ V_B &= V_{BE} + V_E \end{aligned} \quad (19)$$

Para obter uma melhoria na estabilidade do circuito, introduzimos uma realimentação de coletor para a base. A Figura 2.21 representa esse circuito. Esse tipo de polarização é mais estável que os demais, pois são menos susceptíveis às variações de beta ou da temperatura. As análises serão refeitas usando as malhas base-emissor e coletor-emissor.

Figura 2.21| Circuito de polarização com realimentação de tensão



Fonte: elaborada pela autora.

As equações para malha base -emissor são vistas em (20):

$$-V_{CC} + R_C \cdot I'_C + R_B \cdot I_B + V_{BE} + R_E I_E = 0 \quad (20)$$

A corrente: $I'_C = I_C + I_B$, porém o valor de I_C e I'_C é muito maior que I_B , por isso podemos dizer que (21):

$$I'_C \cong I_C = \beta I_B \text{ e } I_E \cong I_C \quad (21)$$

E substituindo (21) em (20), resulta-se em (22):

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + \beta(R_C + R_E)} \quad (22)$$

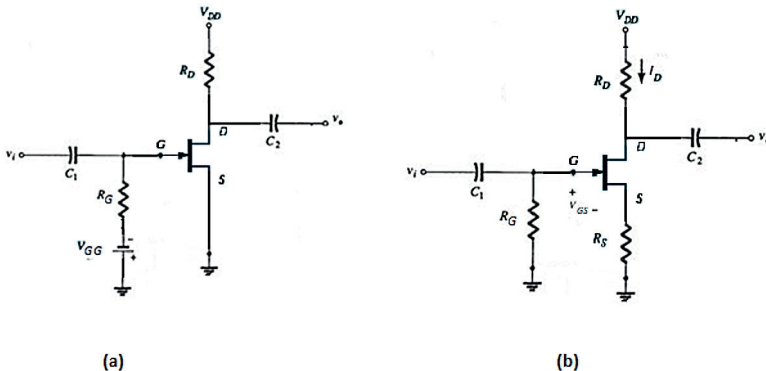
E para malha coletor-emissor (23):

$$-V_{CC} + R_C \cdot I'_C + V_{CE} + R_E \cdot I_E = 0, I'_C \cong I_C \text{ e } I_E \cong I_C \text{ e } V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E) \quad (23)$$

OBS.: As análises são as mesmas para o TBJ PNP, porém com as correntes inversas.

Para o FET, mais especificamente o JFET, temos a configuração fonte comum como a mais utilizada. E os modos de polarização são: polarização fixa, autopolarização e polarização por divisor de tensão. A Figura 2.22 representa o FET polarizado por polarização fixa. Nesse tipo de polarização, R_G é utilizado apenas para definir a impedância de entrada do circuito ac. A resistência R_G não influencia na polarização. A fonte V_{GG} polariza inversamente V_{GS} , portanto não passa corrente por R_G , logo a corrente na porta é nula e a tensão em R_G também. Por essa razão, R_G pode ser substituído por um curto.

Figura 2.22 | (a) FET polarizado por polarização fixa e (b) FET polarizado por autopolarização



Fonte: elaborada pela autora.

Do circuito 2.22(a) podemos obter as equações (25):

$$\begin{aligned} V_{GG} + V_{GS} &= 0 \rightarrow V_{GG} = -V_{GS} \\ -V_{DD} + R_D \cdot I_D + V_{DS} &= 0 \rightarrow I_D = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{R_D} \end{aligned} \quad (25)$$

A Figura 2.22(b) representa o JFET por autopolarização. A resistência R_S em série com a fonte gera uma tensão inversa na junção V_{GS} , através da realimentação negativa. A corrente na porta é nula, portanto V_{RG} também é nula.

Do circuito 2.22(b) podemos ter as seguintes equações (26):

$$V_{GS} + V_{RS} = 0 \rightarrow V_{GS} = -V_{RS} \quad (26)$$

$$V_{RS} = I_D \cdot R_S \quad (27)$$

Substituindo (27) em (26), temos:

$$V_{GS} = -V_{RS} \rightarrow V_{GS} = -R_S \cdot I_D \quad (28)$$

As resistências R e R_D podem ser encontradas graficamente através de (8) e de (28) e da equação da malha de saída, que contém V_{DD} (29).

$$\begin{aligned} -V_{DD} + R_D I_D + V_{DS} + R_S I_D &= 0 \\ R_D &= \frac{V_{DD} - R_S I_D - V_{DS}}{I_D} \end{aligned} \quad (29)$$



Pesquise mais

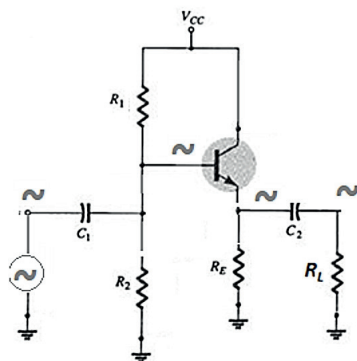
Saiba um pouco mais sobre polarização do MOSFET. Para acessar, basta clicar no link a seguir. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=VpD-CkYg468>>. Acesso em: 6 dez. 2017.

Circuito com transistor em CC

O seguidor de emissor também é conhecido como amplificador coletor-comum (CC), ou seja, o sinal de entrada é acoplado na base, e o sinal de saída é retirado pelo emissor. Tem como característica alta impedância de entrada, uma baixa impedância de saída, alto ganho de corrente e ganho de tensão menor ou igual a um. A Figura 2.23

representa um seguidor de emissor. O nome seguidor de emissor é porque a tensão na saída segue a tensão na entrada (MALVINO; BATES, 2011).

Figura 2.23 | Seguidor de emissor



Fonte: elaborada pela autora.

Sem medo de errar

Ainda na empresa de manutenção, um estagiário técnico aprendeu que existem dois tipos básicos de circuitos com transistores: chaveamento e amplificador. Sabendo do seu conhecimento sobre transistores, ele está com uma dúvida sobre como descobrir qual é a região que os transistores operam: se é na região ativa ou na região de saturação. Explique para ele, através do desenho de um circuito com polarização de base, como poderá determinar se um TBJ pode estar operando na região ativa ou na região de saturação.

A primeira coisa que você vai falar para o estagiário técnico é que o TBJ, para funcionar como chave, deve operar no modo saturação e de corte, e não na região ativa. A polarização na base é muito útil em circuitos digitais, justamente para o TBJ funcionar como chave, ou seja, interruptor aberto ou fechado. O Tabela 2.3 mostra o tipo de polarização que o TBJ deve ter para operar nas regiões ativa e de corte para funcionar.

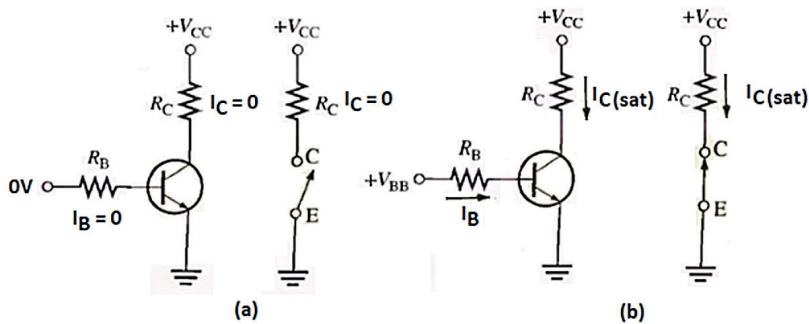
Tabela 2.3 | Modo de operação

Modo	JEB	JCB
Saturação	Direta ($V_B > V_E$)	Reversa ($V_B > V_C$)
Corte	Reversa ($V_E > V_B$)	Reversa ($V_C > V_B$)

Fonte: elaborada pela autora.

Neste caso, o transistor operará no modo de saturação (V_{CE} pequeno) e no modo de corte (I_C aproximadamente igual a zero), por isso ele tem uma tensão de saída baixa ou uma tensão de saída alta. Para o transistor operar como chave, normalmente, utiliza-se a topologia emissor-comum. Caso a comutação entre os modos de corte e saturação ocorra a uma frequência elevada (acima de dezenas de kHz), poderá haver perda no processo, devido à dificuldade de se mudar rapidamente entre as regiões extremas do corte e da saturação. No corte, o transistor equivale a um interruptor aberto, portanto a corrente no coletor será igual a zero. Assim, $V_{CE} = V_{CC}$ e $I_B \cong 0$. Na saturação, o transistor equivale a um interruptor fechado. Dessa forma, V_{CE} é praticamente igual a zero, e a corrente no coletor atinge seu valor máximo limitada apenas pela resistência: $I_C = \frac{V_{CC}}{R_C}$. A Figura 2.24(a) representa o TBJ operando na região de corte, e a figura 2.24(b), operando na região de saturação.

Figura 2.24 | Transistor operando como chave



Fonte: elaborada pela autora.

Avançando na prática

MOS no modo de chaveamento: em paralelo ou em série?

Descrição da situação-problema

Após pesquisar as diferenças entre TBJ e MOS, você optou por fazer um projeto de circuitos integrados usando MOS no modo de chaveamento, ou seja, como chave analógica. Desenhe dois circuitos, um de chave em paralelo com FET e outro de chave em série. Explique o seu funcionamento e diga qual é o melhor.

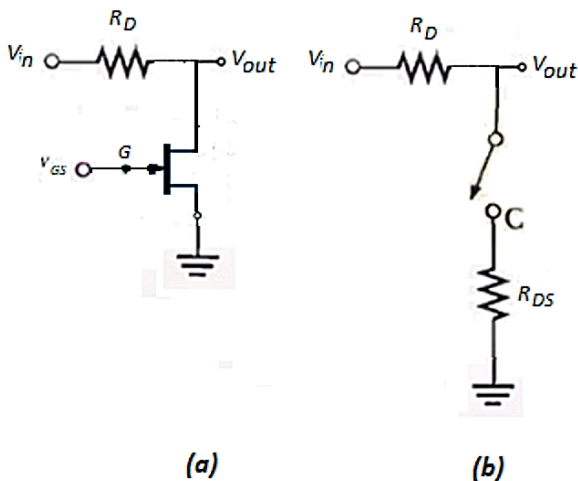
Resolução da situação-problema

Para funcionar como chave, o JFET deve operar na região ôhmica e na região de corte. No JFET, a tensão V_{GS} assume apenas dois valores: zero ou um valor maior que o V_{GS} (corte). Quando o V_{GS} está alto (0V), opera na região ôhmica, e quando está baixo, opera na região de corte.

O JFET pode operar como chave em paralelo ou chave em série.

A Figura 2.25(a) representa o JFET trabalhando em paralelo, e a Figura 2.25(b), o circuito equivalente.

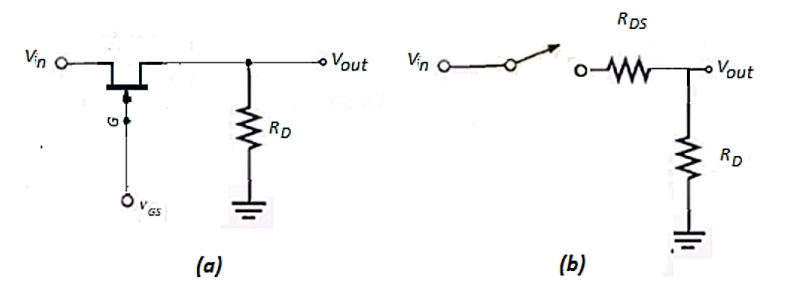
Figura 2.25 | JFET como chave em paralelo



Fonte: adaptada de Malvino e Bates (2011).

A Figura 2.26(a) representa o JFET trabalhando em paralelo, e a Figura 2.26(b), o circuito equivalente.

Figura 2.26 | JFET como chave em paralelo



Fonte: adaptada de Malvino e Bates (2011).

Se a relação liga-desliga for importante no projeto, o JFET em série é melhor porque sua relação liga-desliga é maior.

Faça valer a pena

1. Uma das aplicações importantes do JFET é o seu uso como chave analógica, ou seja, liga e desliga. O JFET funciona como uma chave que transmite ou bloqueia um pequeno sinal ca. Para ter esse funcionamento VGS, pode-se ter apenas dois valores: zero ou um valor maior que $V_{GS(corte)}$.

Se $V_{in}=10\text{mV pp}$, qual é a relação liga-desliga de um JFET usado como chave em paralelo? Dados: $R_D=10\text{K}\Omega$, $I_{DSS}=10\text{mA}$ e $V_{GS(corte)}=-2,5\text{V}$.

- 41.
- 0,024.
- 40.
- 24.
- 45.

2. A polarização por divisor de tensão é a topologia que apresenta maior estabilidade e grau de liberdade de projeto, por isso pode ser considerada como a mais importante. A polarização por divisor de tensão contém as topologias com polarização fixa e polarização estabilizada por emissor.

Em uma polarização por divisor de tensão com um transistor pnp, você deve usar:

- Uma fonte de alimentação negativa.
- Duas fontes de alimentação positiva.
- Uma fonte de alimentação positiva.
- Terra.
- Resistores.

3. O MOSFET enriquecimento ou intensificação é um dispositivo que possui quatro terminais, o qual é o transistor de efeito de campo mais usado e foi um componente que revolucionou a indústria do computador, pois é muito utilizado nos circuitos integrados (Cis). que possuem centenas de transistores microscopicamente pequenos.

Um MOSFET-E que possui a sua porta conectada ao dreno é um exemplo de:

- a) Dispositivo de três terminais.
- b) Carga passiva.
- c) Carga ativa.
- d) Dispositivo de chaveamento.
- e) Dispositivo de amplificador.

Seção 2.3

Aplicações dos transistores TBJ e FET

Diálogo aberto

Olá!

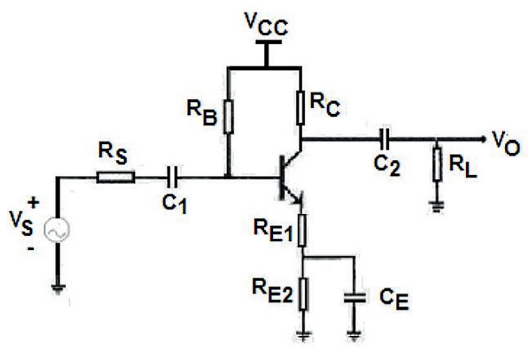
Já estamos em nossa última seção, na qual falaremos sobre os transistores. Passou rápido, não acha? Pois é, você já aprendeu vários conceitos importantes até aqui. Na primeira seção, vimos do que é constituído o transistor e quais os seus tipos. Já na segunda seção, verificamos que há várias maneiras de se polarizar os transistores e que eles possuem funções diferentes. Agora, nesta última seção, veremos como os transistores funcionam em pequenos sinais e altas frequências; também, que há alguns capacitores nos circuitos com transistores e algumas capacitâncias internas. Quando devemos desprezá-los? Isso estudaremos ainda nesta seção.

O transistor é o principal responsável pelo controle do fluxo de eletricidade e, por consequência, também do fluxo de dados que transita pelos diversos circuitos de vários tipos de equipamentos eletrônicos. Os processadores são os maiores usuários do transistor.

A criação dos dispositivos de amplificação, como os transistores, foi um ponto decisivo para a evolução da eletrônica, pois sem a amplificação não existiria televisão, rádio e muito menos os computadores. Por exemplo, o Playstation 3 possui, aproximadamente, 234 milhões de transistores. Por todos esses motivos, é importante entendermos o funcionamento dos transistores em pequenos sinais e altas frequências.

Agora sobre o seu estágio, um dos funcionários da empresa em que você foi contratado está montando um projeto no qual ele vai utilizar os componentes TBJs. O motivo principal da escolha do TBJ é a capacidade de produzir amplificação ou ganho em um circuito. A figura a seguir mostra um circuito amplificador que vai ser utilizado nesse projeto. Faça uma planilha escrevendo os nomes e a função de cada componente do circuito e explique o seu funcionamento.

Figura 2.27 | TBJ em emissor comum



Fonte: elaborada pela autora.

Muito difícil o que o funcionário da empresa pediu para você fazer? É um desafio, mas sei que você vai continuar se saindo muito bem.

Pronto para continuar os seus estudos? Tenha um bom aproveitamento!

Não pode faltar

A polarização DC nos transistores é importante porque fornece a energia necessária para a amplificação do sinal. No entanto, o comportamento dos transistores não é linear, por essa razão foram criados modelos a partir de suas características de operação para linearizar seu comportamento, especialmente em regime AC de amplificação.

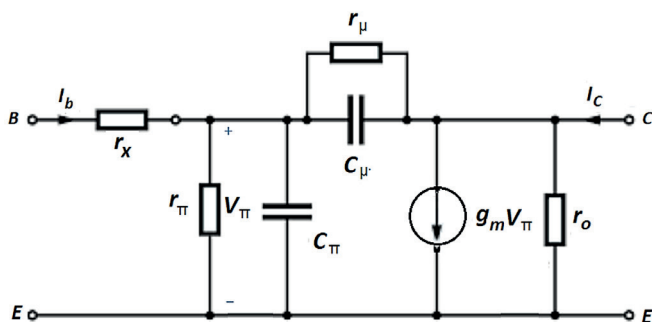
Se os transistores estão polarizados, a aplicação de um sinal AC em uma determinada frequência provocará oscilações de suas variáveis de entrada em torno do ponto de operação DC. No TBJ, a variável de entrada é I_B , e no FET, V_{GS} . A consequência dessas oscilações na entrada provocará oscilações também na saída: no TBJ, é I_C , e no FET é I_D . Dessa forma, para a análise AC, os modelos devem ser construídos baseados nas características de operação em torno do ponto de polarização DC, observando suas curvas características. Para evitar a não linearidade, assume-se que a amplitude do sinal AC é pequena o suficiente para o transistor operar de forma linear. A partir das curvas características, o transistor passa a ser representado por elementos passivos lineares, como resistores e fontes.

O modelo de pequenos sinais para o transistor pode ser matemático, a partir da teoria de quadripolos, e físico, através do modelo T, modelo π -híbrido, entre outros. O modelo que nós estudaremos é o modelo físico π -híbrido.

Modelo π -híbrido

O modelo π -híbrido foi obtido a partir da observação das propriedades e do comportamento físico do dispositivo. A Figura 2.28 representa o modelo π -híbrido baseado nas equações do TBJ em emissor comum. O modelo é válido para todas as configurações do TBJ (SEDRA; SMITH, 2000).

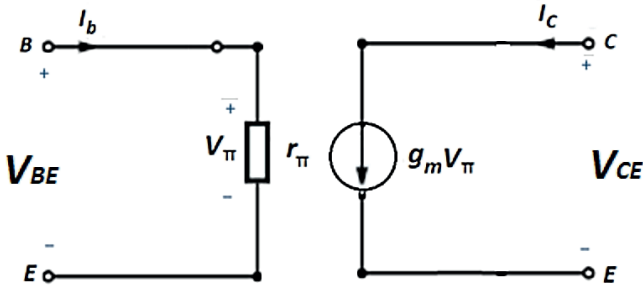
Figura 2.28 | Modelo π -híbrido



Fonte: elaborada pela autora.

Nesse modelo, r_x é a resistência do material da base, r_π é a resistência dinâmica da junção base-emissor, C_π é a capacitância da junção base-emissor, r_μ é a resistência dinâmica da junção coletor-base, C_μ é a capacitância da junção coletor-base, g_m é a condutância devido à dependência da corrente de saída com os sinais na entrada e r_o é o resistor que representa a variação de I_C com V_{CE} . Para baixas e médias frequências, as influências de C_π e C_μ serão descartadas. Além disso, a resistência r_x tem valor muito pequeno, a resistência r_μ tem valor muito elevado e r_o também tem um valor alto, podendo ser desprezados. Portanto, o modelo simplificado para baixas frequências é representado na Figura 2.29.

Figura 2.29 | Modelo π -híbrido para baixas frequências



Fonte: elaborada pela autora.

Para realizar a análise AC de um transistor, devemos seguir 6 passos.

Passo 1: determinar o ponto de operação Q a partir da análise DC. Após determinar o ponto Q, calcularemos a corrente no coletor I_c (**passo 2**). O **passo 3** será calcular os parâmetros de pequenos sinais através das equações (1) e (2):

$$g_m = \frac{I_c}{V_T} \quad (1)$$

Onde V_T é a tensão térmica que tem o valor de, aproximadamente, 26mV em temperatura ambiente.

$$r_\pi = \frac{\beta \cdot V_T}{I_c} = \frac{\beta}{g_m} \quad (2)$$

No **passo 4** reescreveremos o circuito para pequenos sinais. Nesse caso para ca os capacitores serão considerados em curto e para cc são considerados em aberto. As fontes de corrente ficam abertas e as fontes de tensão serão zeradas e substituídas por um curto ao terra. O **passo 5** é substituir o transistor por seu modelo de pequenos sinais.

A última etapa, ou seja, o **passo 6**, será analisar o circuito de pequenos sinais e obter as grandezas de interesse, tais como: ganho de tensão (A_v), ganho de corrente (A_i) e impedância de entrada (Z_i).

O ganho A_v é calculado por (3), e o ganho A_i , por (4):

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} \quad (3)$$

Onde V_o é a tensão de saída e V_i é a tensão de entrada.

$$A_i = \frac{Z_i}{R_L} A_v \quad (4)$$

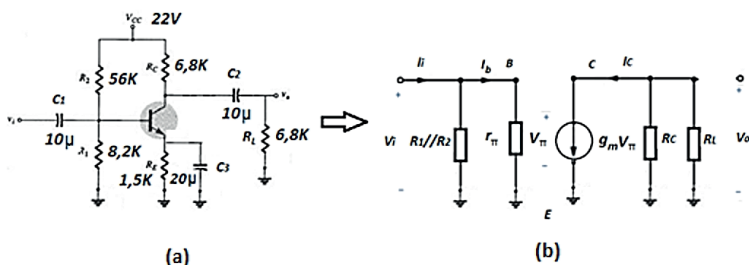
Onde R_L é a resistência na carga. O parâmetro Z_i vai depender de cada circuito.



Exemplificando

Encontre A_v , Z_i , e A_i para o circuito da Figura 2.30. Considere $\beta=90$.

Figura 2.30 | Modelo π -híbrido para baixas frequências



Fonte: elaborada pela autora.

Análise DC

$$E_{th} = V_{cc} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 22 \cdot \frac{8,2K}{8,2K + 56K} = 2,81V \text{ e}$$

$$R_{th} = R_1 // R_2 = \frac{8,2k \cdot 56k}{8,2k + 56k} = 7,15k\Omega$$

$$I_B = \frac{E_{th} - V_{BE}}{R_{th} + R_E \cdot (\beta + 1)} = \frac{2,81 - 0,7}{7,15K + 1,5K(90 + 1)} = 14,7\mu A$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 90 \cdot 14,7\mu = 1,32mA$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{1,32mA}{26mV} = 50,8mS \text{ e } r_\pi = \frac{\beta}{g_m} = \frac{90}{50,8m} = 1771,65\Omega$$

Observação: a unidade Siemens (S) é: $1/\Omega$.

Do circuito, temos:

$$-V_o + (R_C // R_L) I_C = 0 \rightarrow V_o = -(R_C // R_L) I_C = 0; I_C = g_m V_\pi$$

$$\text{Substituindo } I_C \text{ na equação de } V_o \rightarrow V_o = -(R_C // R_L) g_m V_\pi$$

$$V_i = V_\pi$$

Portanto, A_v é dado por:

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-(R_C // R_L) g_m V_\pi}{V_\pi} = -g_m (R_C // R_L)$$

$$A_v = -50,8 m(6,8 K // 6,8 K) = -172,72$$

Do circuito, temos:

$$-V_i + (r_\pi // R_1 // R_2) \cdot I_i = 0 \rightarrow \frac{V_i}{I_i} = r_\pi // R_1 // R_2 = Z_i$$

Portanto:

$$R_{equivalente} = r_\pi // R_1 // R_2 = \frac{1}{\frac{1}{R_{equivalente}}} = \frac{1}{\frac{1}{1771,65} + \frac{1}{8,2 K} + \frac{1}{56 K}} = 0,0007042$$

$$\frac{1}{R_{equivalente}} = 0,0007042 \rightarrow R_{equivalente} = \frac{1}{0,0007042} = 1,42 K \Omega$$

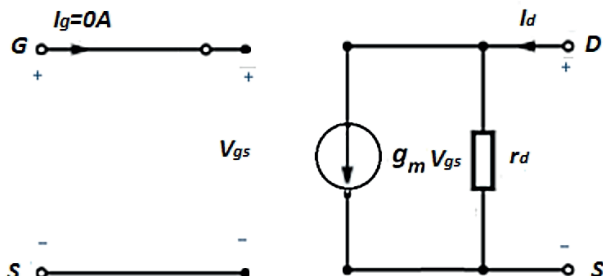
$$Z_i = R_{equivalente} = 1,42 K \Omega$$

O cálculo de A_i é dado por:

$$A_i = \frac{Z_i}{R_L} A_v = \frac{1,42 K}{6,8 K} \cdot -172,72 = -36,1$$

Para o TBJ PNP, o modelo π -híbrido é o mesmo, já para o FET temos equivalência. O FET fonte comum é o equivalente ao TBJ emissor comum. O dreno-comum é equivalente ao coletor comum, e o porta-comum ao TBJ base-comum. A Figura 2.31 representa o modelo para o FET. Nota-se que entre a porta e a fonte a corrente na porta é igual a zero (circuito aberto).

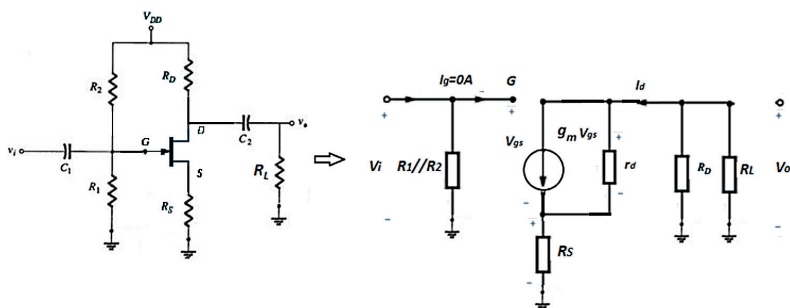
Figura 2.31 | Modelo do FET: parâmetros Y



Fonte: elaborada pela autora.

A Figura 2.32 representa um FET em fonte comum e o seu equivalente. As equações para esse modelo estão descritas em 4:

Figura 2.32 | FET em fonte comum e o seu equivalente



Fonte: elaborada pela autora.

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-g_m (R_D // R_L)}{1 + g_m R_S + \frac{R_S + (R_D // R_L)}{r_d}} ; Z_i = R_1 // R_2$$

$$A_i = -\frac{Z_i}{R_L} \cdot A_v = \frac{g_m (R_1 // R_2)}{1 + g_m R_S + \frac{R_S + (R_D // R_L)}{r_d}} \cdot \frac{R_D}{R_D + R_L} \quad (4)$$

$$Z_o = \frac{(1 + g_m R_S + \frac{R_S}{r_d})}{1 + g_m R_S + \frac{(R_S + R_D)}{r_d}} \cdot R_D$$



Pesquise mais

Existem outros modelos mais precisos para o transistor, porém, para isso, usam-se a resistência de espalhamento de base r'_b e a resistência interna r'_c da fonte de corrente do coletor. Este modelo é usado para respostas exatas, quando é necessária uma maior precisão.

Saiba mais em: <http://www.ccs.unicamp.br/cursos/ee617/exp3_4.pdf>. Acesso em: 7 dez. 2017. (Página 11).

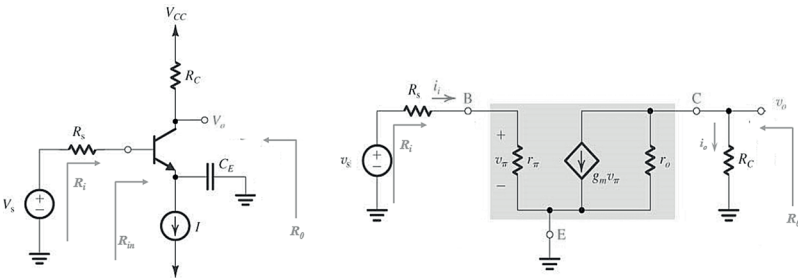
Amplificadores de estágio simples

TBJ

O amplificador de estágio simples caracteriza-se por possuir apenas um transistor. As três configurações básicas de amplificadores em TBJ são: emissor comum (EC), base comum (BC) e coletor comum ou seguidor de emissor (CC).

A Figura 2.33 mostra o circuito amplificador em emissor comum e o seu equivalente no modelo π -híbrido. Nota-se que o capacitor C_E conecta o emissor ao terra. Na análise, pode ser desprezado, pois sua capacitância é alta. O sinal da fonte é aplicado entre a base e terra (Emissor) e é retirado entre coletor e terra. O capacitor C_E é conhecido como capacitor de desvio ou passagem. O capacitor de desvio se parece com um de acoplamento, ou seja, parece uma chave aberta para cc e fechada para ca, porém ele é utilizado para criar um terra ca. As impedâncias de entrada e de saída são indicadas por R_i e R_o (SEDRA; SMITH, 2000).

Figura 2.33 | TBJ com polarização por fonte de corrente constante em emissor comum e o seu modelo equivalente π -híbrido



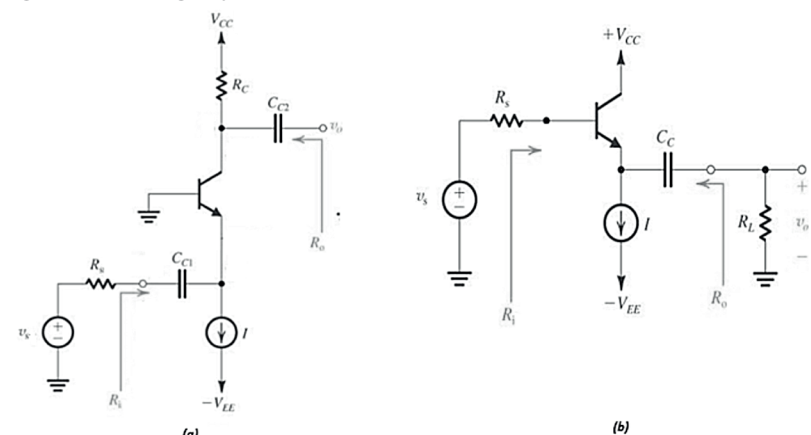
Fonte: Sedra e Smith (2000).

Para o exemplo da Figura 2.33, temos (5):

$$A_v = -g_m \cdot R_C; Z_i = R_\pi; A_i = -\beta; Z_o = R_C / r_o \quad (5)$$

A Figura 2.34 mostra as demais configurações do TBJ. Na Figura 2.34(a), temos base-comum, e na Figura 2.34(b), coletor comum. A análise é semelhante para o TBJ PNP.

Figura 2.34 | Configurações do TBJ em (a) base-comum e (b) coletor comum



Fonte: Sedra e Smith (2000).

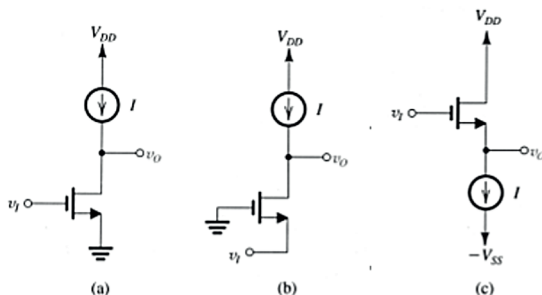


Assimile

Em alguns circuitos seguidores de emissor, uma resistência de baixo valor é inserida no coletor para limitar a corrente cc no coletor do transistor, caso aconteça um curto entre o emissor e o terra. Usando essa resistência, o coletor terá um capacitor de desvio para o terra.

As três configurações básicas de amplificadores MOSFETs são fonte comum (FC), dreno comum (DC) e porta comum (PV). As fontes de corrente são utilizadas no lugar dos resistores de carga, por isso os amplificadores resultantes são chamados de amplificadores de carga ativa. A Figura 2.35(a) mostra o MOS em fonte comum, a (b) em porta comum e a (c) em dreno comum, ou como também é chamado, seguidor de fonte (SEDRA; SMITH, 2000).

Figura 2.35 | Configuração do MOS em (a) fonte comum, (b) porta comum e (c) dreno comum



Fonte: Sedra e Smith (2000).

As capacitâncias internas de um transistor

Capacitância de Difusão ou de Carregamento de Base (C_{de})

Quando o transistor opera no modo ativo ou no modo de saturação, na região de base são armazenadas cargas devido aos portadores minoritários. Essas cargas são denominadas Q_n (para grandes sinais) e podem ser calculadas através de (6):

$$Q_n = \frac{W^2}{2D_n} I_C = \tau_F I_C \quad (6)$$

Onde W é a largura efetiva da base, D_n é a constante de difusão dos elétrons e τ_F é uma constante do dispositivo, conhecida por tempo de trânsito de base direto e é expressa por (7):

$$\tau_F = \frac{W^2}{2D_n} \quad (7)$$

Essa constante representa o tempo médio que um elétron leva para atravessar a base. A faixa de valores típica de τ_F é de 10 a 100ps. Para operação no modo ativo reverso, τ_R é usada e, na maioria das vezes, maior que τ_F .

Para pequenos sinais definimos a capacitância de difusão por (8):

$$C_{de} = \tau_F g_m = \tau_F \frac{I_C}{V_T} \quad (8)$$

Capacitância de Junção Base-Emissor (C_{je}) ou da Camada de Depleção

A capacitância de junção base-emissor pode ser definida por (9):

$$C_{je} = \frac{C_{je0}}{\left(1 - \frac{V_{BE}}{V_{0e}}\right)^m} \quad (9)$$

Onde C_{je0} é o valor de C_{je} para tensão 0, V_{0e} é a tensão interna da junção emissor-base, esse valor é tipicamente de 0,9V, e m é o coeficiente de graduação da junção emissor-base, valor típico de 0,5. Como a junção emissor-base está diretamente polarizada, verificou-se na prática que a fórmula x não apresenta um valor preciso para C_{je} , então utiliza-se um valor aproximado de (10):

$$C_{je} \cong 2 \cdot C_{je0} \quad (10)$$

Capacitância de Junção Coletor-Base ou Capacitância de Junção (C_μ)

No modo ativo de operação, a junção coletor-base está reversamente polarizada, e C_μ pode ser calculada por (11):

$$C_\mu = \frac{C_{\mu 0}}{\left(1 + \frac{V_{CB}}{V_{0c}}\right)^m} \quad (11)$$

Onde $C_{\mu 0}$ é o valor de C_μ para tensão 0, V_{0c} é a tensão interna da junção coletor-base, esse valor é tipicamente de 0,75V, e m é o coeficiente de graduação da junção, que tem a faixa de valores típicos entre 0,2 e 0,5.

Capacitâncias de um MOSFET

Efeito Capacitivo da Porta

Existem, basicamente, dois tipos de capacitâncias internas em um MOSFET: a capacitância de porta, ou capacitância de óxido (C_{ox}), formada pelo eletrodo de porta e pelo canal, tendo a camada de óxido como o dielétrico, e as capacitâncias de depleção fonte-corpo e dreno-corpo. Essas capacitâncias estão associadas às junções pn reversamente polarizadas.

O efeito capacitivo da porta é modelado por três capacitores: C_{gs} , C_{gd} , C_{gb} .

Na região do triodo para V_{DS} pequeno, o canal é uniforme, então temos (12):

$$C_{gs} = C_{gd} = \frac{1}{2} WLC_{ox} \quad (12)$$

Onde WLC_{ox} é a capacitância porta canal.

Quando o MOSFET opera na saturação, o canal tem formato triangular e o estrangulamento do canal ocorre junto ao dreno, portanto temos (13):

$$C_{gs} = \frac{2}{3} WLC_{ox} \text{ e } C_{gd} = 0 \quad (13)$$

Quando o MOSFET opera no corte, o canal desaparece, logo temos (14):

$$C_{gs} = C_{gd} = 0 \text{ e } C_{gb} = WLC_{ox} \quad (14)$$

Capacitâncias de Junção

É importante observar que cada uma das capacitâncias de junção inclui uma componente associada às paredes laterais da difusão e uma componente associada à extremidade interna da junção. A capacitância de depleção da junção fonte-corpo pode ser obtida por (15):

$$C_{sb} = \frac{C_{sb0}}{\sqrt{1 + \frac{V_{SB}}{V_0}}} \quad (15)$$

Onde C_{sb0} é o valor de C_{sb} para polarização fonte-corpo igual a zero, V_{SB} é a tensão de polarização reversa e V_0 é a tensão interna de junção, esse valor é tipicamente na faixa de 0,6V a 0,8V.

A capacitância de depleção da junção dreno-corpo é dada por (16):

$$C_{db} = \frac{C_{db0}}{\sqrt{1 + \frac{V_{DB}}{V_0}}} \quad (16)$$

Onde C_{db0} é o valor de C_{db} para tensão de polarização reversa igual a zero e V_{DB} é a tensão de polarização reversa (SEDRA; SMITH, 2000).

Modelo para altas frequências

TBJ

Durante a análise dos circuitos com amplificadores, assumiu-se que as frequências do sinal de entrada V_i eram tal que as influências das reatâncias do circuito podiam ser desprezadas. As seguintes reatâncias foram desprezadas:

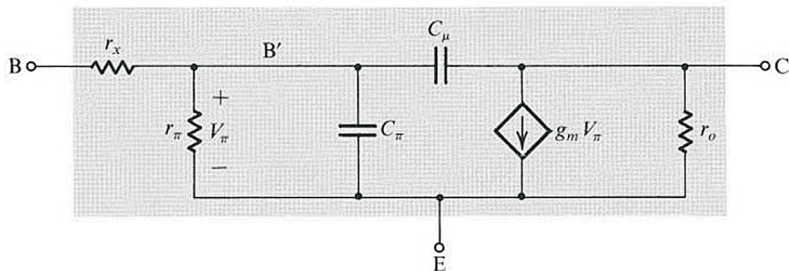
- Capacitor de acoplamento e capacitor de desvio, normalmente, possuem altos valores de capacitâncias e afetam a resposta do amplificador para baixas frequências de V_i .
- Capacitâncias internas dos transistores possuem valores baixos e são responsáveis pelo comportamento do amplificador para altas frequências.

A Figura 2.36 representa o modelo π -híbrido de um TBJ para altas frequências. Nota-se que os capacitores estão incluídos no modelo, assim como que a presença da capacitância de emissor-base C_π (ordem de picofarads até algumas dezenas de picofarads) e a capacitância do coletor-base C_μ (ordem de uma fração de picofarads até alguns poucos picofarads). O valor de C_π pode ser dado por (17):

$$C_\pi = C_{de} + C_{je} \quad (17)$$

Em altas frequências, a resistência r_x (dezenas de ohm) é importante e não pode ser desprezada, como foi feito em baixas frequências. Em baixas frequências, r_x foi desprezada por ser muito menor que r_π (SEDRA; SMITH, 2000). A Figura 2.36 representa o modelo π -híbrido para altas frequências.

Figura 2.36 | Modelo π -híbrido para altas frequências do TBJ

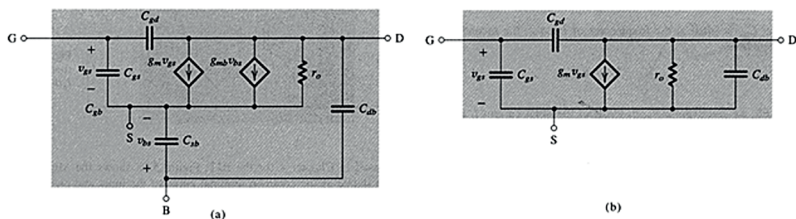


Fonte: Sedra e Smith (2000).

MOSFET

A Figura 2.37(a) representa o modelo equivalente para altas frequências de um MOSFET, em que as quatro capacitâncias estão incluídas, e a Figura 2.37(b) é o modelo equivalente para o caso em que a fonte está conectada ao substrato (corpo). Para simplificar, o modelo C_{db} pode ser desprezado. O modelo representado em (a) é limitado ao uso de simuladores devido à sua complexidade (SEDRA; SMITH, 2000).

Figura 2.37 | Modelo π -híbrido para altas frequências do MOSFET



Fonte: Sedra e Smith (2000).

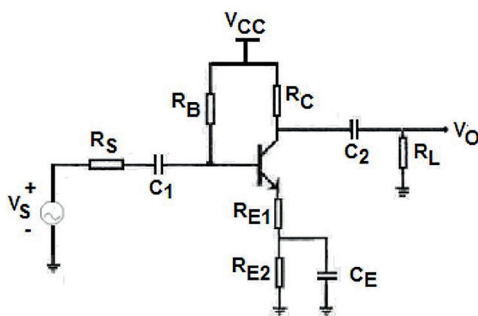


Se uma parte da resistência do emissor ficar sem o capacitor de desvio, obteremos uma realimentação negativa. Com isso, o ganho de tensão é estabilizado. O que acontece com a impedância de entrada? Aumenta ou diminui? E a distorção em grandes sinais?

Sem medo de errar

Retornando ao departamento de manutenção no qual você está estagiando, um dos funcionários da empresa em que você foi contratado está montando um projeto, no qual ele vai utilizar os componentes TBJs. O motivo principal da escolha do TBJ é a capacidade de produzir amplificação ou ganho em um circuito. A Figura 2.27, a qual consta já no início desta seção e a seguir, mostra um circuito amplificador, que vai ser utilizado nesse projeto. Faça uma planilha escrevendo os nomes e a função de cada componente do circuito e explique o seu funcionamento.

Figura 2.38 | TBJ em emissor comum



Fonte: elaborada pela autora.

A Figura 2.38 representa um circuito amplificador, em que uma fonte de sinal V_s e resistência R_s aplica um sinal AC ao amplificador, que o amplifica antes de entregar a carga R_L . Os capacitores C_1 e C_2 bloqueiam o sinal DC, evitando que ele atinja a fonte e a carga.

- Os capacitores C_1 e C_2 são de acoplamento.
- O capacitor C_E é o capacitor de desvio.
- R_B é o resistor de polarização da base.
- R_C é o resistor de polarização do coletor.
- R_{E1} e R_{E2} são resistores de polarização do emissor.

Avançando na prática

Configuração MOSFET: qual usar?

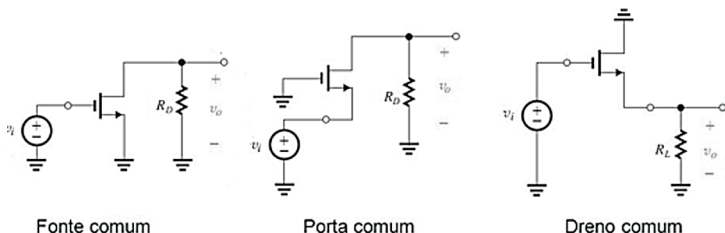
Descrição da situação-problema

Devido aos seus estudos, você sabe, previamente, que há três configurações básicas de amplificadores MOS em circuitos integrados, que são: amplificador com fonte comum, amplificador com porta comum e amplificador com dreno comum. No seu projeto, você precisa escolher uma dessas configurações que tenha um alto ganho de tensão. Desenhe cada uma das configurações, mostre como identificá-las e qual delas você deve escolher.

Resolução da situação-problema

Os desenhos das três configurações são:

Figura 2.39 | Configurações básicas de amplificadores MOS



Fonte: Sedra e Smith (2000).

Na prática, podemos identificar cada uma olhando onde está a entrada e onde está a saída, o terminal que sobrar é o que está em comum com a saída e a entrada. Por exemplo, na configuração fonte comum, V_i está ligado à porta e V_o está ligado ao dreno, o terminal que sobrou é a fonte, que no caso é o comum.

Devemos usar o MOSFET – E na configuração fonte comum, pois ela é capaz de ajustar uma baixa impedância de entrada e com um alto ganho de tensão em sua saída. É a configuração mais usada nos projetos.

Faça valer a pena

1. O modelo π -híbrido foi obtido a partir da observação das propriedades e do comportamento físico do dispositivo. Esse modelo é utilizado para o estudo dos amplificadores em altas frequências e possui algumas regras para iniciar o modelo.

Para se realizar uma análise cc e ca, o capacitor está:

- a) Em curto para cc.
- b) Aberto para ca.
- c) Aberto para cc e em curto para ca.
- d) Em curto para cc e aberto para ca.
- e) Em curto para cc e ca.

2. O amplificador de estágio simples caracteriza-se por possuir apenas um transistor. As três configurações básicas de amplificadores em TBJ são: emissor comum (EC), base comum (BC) e coletor comum, ou seguidor de emissor (CC).

O emissor de um amplificador EC não tem tensão ca por causa do:

- a) Valor de sua tensão cc.
- b) Capacitor de desvio.
- c) Capacitor de acoplamento.
- d) Resistor de carga.
- e) Resistor de emissor.

3. As três configurações básicas de amplificadores MOSFETs são fonte comum (FC), dreno comum (DC) e porta comum (PV). No uso do MOSFET em circuitos integrados, as fontes de corrente são utilizadas no lugar dos resistores de carga.

Os amplificadores que têm fonte de corrente no lugar dos resistores são chamados de:

- a) Amplificadores de carga ativa.
- b) Amplificadores de CI.
- c) Amplificadores de carga passiva.
- d) Amplificadores MOS.
- e) Amplificadores ativo/passivo.

Referências

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 11. ed. São Paulo: Pearson Education 2013.

FERREIRA, Elnatan F. Disponível em: <<http://www.demic.fee.unicamp.br/~elnatan/ee640/aula%20mosfet.pdf>>. Acesso em: 11 out. 2017.

MALVINO, Albert; BATES, David J. **Eletrônica**. 7. ed. Porto Alegre: Amgh Editora Ltda., 2011.

SACCO, Francesco. **A história do primeiro transistor**. 2014. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/a-historia-do-primeiro-transistor/>>. Acesso em: 1 out. 2017.

SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth, C. **Microeletrônica**. 4. ed. São Paulo: Makron Books, 2000.

Amplificadores operacionais

Convite ao estudo

Olá! Seja muito bem-vindo ao estudo da Unidade 3 da disciplina Circuitos Analógicos. Vamos continuar avançando nos estudos?

Na Unidade 1 vimos o primeiro dispositivo semicondutor, o diodo. Aprendemos que, além do diodo comum, há diodos especiais como o Zener, o LED e outros. Também estudamos alguns tipos de circuitos que envolvem esses dispositivos, como os retificadores e os limitadores.

Na Unidade 2 estudamos o primeiro dispositivo que possui mais de uma junção, que são os transistores, mais especificamente o transistor bipolar de junção, os TBJs, e o transistor de efeito de campo, os FETs. Também aprendemos o funcionamento e o aspecto construtivo dos transistores e que eles podem funcionar como amplificadores e como chaves, dependendo da forma com que ele foi polarizado. Para isso veremos alguns tipos de polarização.

Agora na Unidade 3 vamos conhecer os amplificadores operacionais – ou, como são mais conhecidos, AMP-OPs. Veremos na primeira seção a definição de AMP-OP, o que seria um AMP-OP ideal, a sua impedância de entrada e saída e algumas características, como ganho e taxa de subida. Na Seção 3.2 veremos os modos de operação, o que é realimentação negativa, a aplicação em filtros ativos e os circuitos não lineares. Por fim, na Seção 3.3 vamos terminar a unidade vendo alguns tipos de amplificadores, como: inversor; não inversor; somador e diferencial.

Durante a Unidade 1 você estava começando o seu estágio em uma empresa de informática. Na Unidade 2, em busca de novos

desafios, você pediu para estagiar na área de manutenção. Agora, devido ao seu esforço e o seu conhecimento maior sobre circuitos analógicos, você começará finalmente a estagiar na área de engenharia. O engenheiro responsável pela área pediu que você pensasse em um projeto com o uso dos AMP-OPs e, para motivá-lo, passou o seguinte texto:

De acordo com Sedra e Smith os amplificadores constituem a classe mais importante de circuitos analógicos e sua maior porção. De maneira mais simples: é um circuito básico de importância universal! Um AMP-OP é utilizado em várias aplicações, tais como: variações na tensão, para filtros, osciladores e em instrumentação. Após todas essas informações você ficou muito interessado em conhecer mais sobre esse dispositivo e já foi pesquisar como utilizá-los em algum projeto prático. As opções são muitas: amplificador de som, detector de umidade, chave de toque, filtro passa-faixa, alarme de luz e outros.

Hoje você saberia dizer quais equipamentos possuem um AMP-OPs? Se não sabe, em breve você vai descobrir.

Ao final desta unidade você será capaz de compreender as características fundamentais dos AMP-OPs, além de identificar e analisar os tipos de circuitos. Também conseguirá analisar, entender e projetar um circuito utilizando esse dispositivo eletrônico.

Pronto para começar a descobrir mais um dispositivo em eletrônica analógica?

Bons estudos!

Seção 3.1

Características dos amplificadores operacionais

Diálogo aberto

Já estamos na Unidade 3 da disciplina Circuitos Analógicos. Nas unidades anteriores aprendemos sobre os dispositivos diodo e os transistores. Agora vamos aprender sobre os amplificadores operacionais – ou, como são mais conhecidos, os AMP-OPs.

Os AMP-OPs foram apresentados na década de 1940, a princípio com o único objetivo de realizar operações matemáticas, que eram necessárias para computação analógica. O custo era elevado, mas, com o passar do tempo e a pressão dos engenheiros eletrônicos, os AMP-OPs sofreram um avanço, destacando-se entre os componentes eletrônicos, caindo assim o seu custo. O grande sucesso do dispositivo se deve à grande diversidade de circuitos, executando as mais variadas funções, com um único circuito integrado e poucos componentes externos (SILVA, 2012).

Nesta primeira seção conheceremos o AMP-OP a fim de saber o que é um AMP-OP ideal, calcular a impedância de entrada e saída e aprender algumas características importantes como o ganho e o *slew rate*.

Mas afinal onde podemos encontrar os AMP-OPs? Em instrumentação? Na caixa de som do computador? Na entrada do microfone? No osciloscópio?

A resposta é sim para todos esses e muito mais. Podemos encontrar os AMP-OPs em todos os aparelhos que necessitam de uma amplificação.

Agora que você já sabe onde tem os AMP-OPs e qual a sua importância, vamos retornar ao seu estágio, que agora é na área de engenharia da empresa. O engenheiro responsável pela área pediu que você pensasse em um projeto com o uso dos AMP-OPs, mas, antes de pensar no projeto, a sua primeira providência foi estudar o básico sobre os AMP-OPs, por exemplo: o que seria um AMP-OP ideal? Qual o seu ganho? Pensando primeiramente em um projeto

básico, logo vem a primeira pergunta: qual o número mínimo de terminais que é necessário para um AMP-OP simples? Agora desenhe um AMP-OP, definindo cada terminal. Por último coloque um degrau de tensão na entrada de um AMP-OP e explique o que é *slew rate* e a sua importância. Se essa entrada for mudada para uma onda senoidal, o que aconteceria com o *slew rate*?

Nesse momento você consegue pensar em algum outro equipamento que possui AMP-OP? Será que há muitos na sua casa? E na sua faculdade?

As dificuldades estão aumentando, mas você continuará se saindo muito bem.

Pronto para começar?

Bons estudos!

Não pode faltar

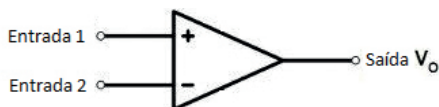
Descrição básica dos amplificadores operacionais

Um amplificador operacional, ou AMP-OP, é um amplificador diferencial que possui um ganho muito alto, uma impedância de entrada muito alta e uma impedância de saída baixa. O AMP-OP é muito utilizado para a construção de osciloscópios, filtros e alguns circuitos de instrumentação (BOYLESTAD & NASHELSKY, 2013). Na verdade, o AMP-OP é muito popular e versátil, sendo possível fazer praticamente tudo com ele (SEDRA & SMITH, 2000).

No início os amplificadores eram fabricados a partir de válvulas e depois transistores e resistores. O seu custo era alto, dezenas de dólares. Na metade dos anos 1960 surgiu o primeiro circuito integrado (CI), o μA 709. Ele era feito com muitos transistores e resistores em uma única pastilha de silício. Para os padrões de hoje as suas características eram pobres e o custo ainda elevado, porém ele foi responsável por uma nova era no projeto dos circuitos eletrônicos. Os engenheiros eletrônicos começaram a usar os AMP-OPs em larga escala e exigiram também uma melhor qualidade. Isso fez com que, em poucos anos, os AMP-OPs passassem a ser vendidos a dezenas de centavo de dólares, com alta qualidade e por um grande número de fornecedores (SEDRA & SMITH, 2000).

O amplificador operacional (AMP-OP) é um dispositivo que possui vários terminais. A Figura 3.1 representa um AMP-OP básico que possui três terminais, duas entradas e uma saída. A entrada 1 é a entrada não inversora, representada por +, e a entrada dois a entrada inversora, representada por -. A saída é representada por V_o .

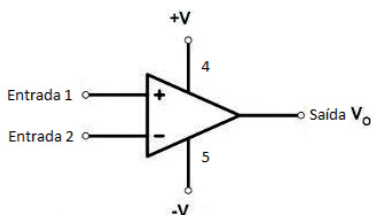
Figura 3.1 | AMP-OP básico



Fonte: elaborada pela autora.

Além dos terminais já citados, o AMP-OP possui terminais de polarização, representados por 4 e 5. Esses terminais saem do AMP-OP e são conectados às tensões V^+ e V^- . A Figura 3.2 mostra o AMP-OP com os terminais de alimentação. O número mínimo de terminais de um AMP-OP simples é 5.

Figura 3.2 | AMP OP simples com os 5 terminais

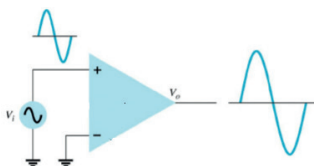


Fonte: elaborada pela autora.

Entrada com terminação única

Chamamos de operação de entrada com terminação única quando o sinal de entrada é conectado a uma entrada do AMP-OP com a outra entrada conectada à terra, ou seja, observando a Figura 3.3 notamos que o sinal de entrada é aplicado à entrada mais (+) com a entrada menos (-) aterrada. O resultado é uma saída com a mesma polaridade do sinal de entrada.

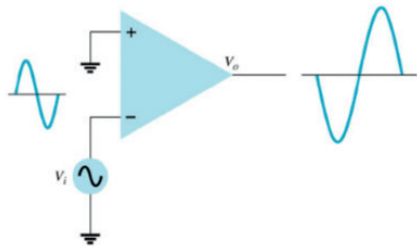
Figura 3.3 | Entrada com terminação única: sinal na entrada mais e entrada menos aterrada



Fonte: Boylestad & Nashelsky (2013, p. 428).

Agora, se aplicarmos o sinal de entrada na entrada menos (-) e a entrada mais for aterrada, observamos na Figura 3.4 que o resultado é uma saída com a fase oposta ao sinal de entrada, ou seja, defasada de 180°.

Figura 3.4 | Entrada com terminação única: sinal na entrada menos e entrada mais aterrada

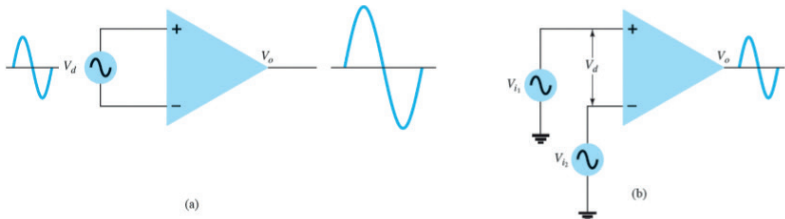


Fonte: Boylestad & Nashelsky (2013, p. 428).

Entrada diferencial com terminação dupla

Chamamos de entrada diferencial com terminação dupla quando aplicamos o mesmo sinal de entrada para ambas as entradas. A Figura 3.5 (a) mostra uma entrada V_d aplicada nos dois terminais de entrada. O resultado é um sinal de saída em fase com o sinal aplicado a ambas as entradas. A Figura 3.5 (b) mostra dois sinais iguais, porém separados, um aplicado a cada entrada. O resultado é o mesmo mostrado na Figura 3.5 (a), e a diferença entre os sinais é: $V_{i1} - V_{i2}$.

Figura 3.5 | Entrada diferencial com terminação dupla

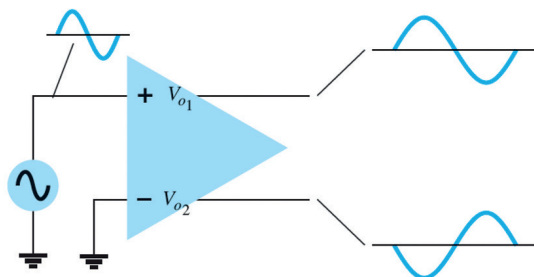


Fonte: Boylestad & Nashelsky (2013, p. 429).

Saída com terminação dupla e entrada com terminação única

O AMP-OP pode também fornecer saídas opostas. Um sinal de entrada aplicado a qualquer uma das entradas resultará em saídas para ambos os terminais de saída, com polaridades opostas e amplificadas. A Figura 3.6 mostra esse caso.

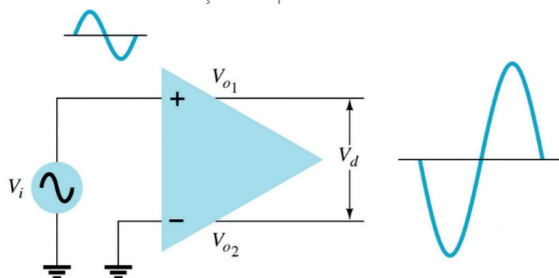
Figura 3.6 | Saída com terminação dupla e entrada com terminação única



Fonte: adaptada de Boylestad & Nashelsky (2013).

A Figura 3.7 mostra a mesma situação, porém com a saída única medida em relação aos terminais de saída, e não em relação à terra. Essa saída diferença ou sinal flutuante (nenhum dos terminais de saída é o terminal terra) é dada por: $V_{o1} - V_{o2}$.

Figura 3.7 | Saída com terminação dupla



Fonte: Boylestad & Nashelsky (2013, p. 429).

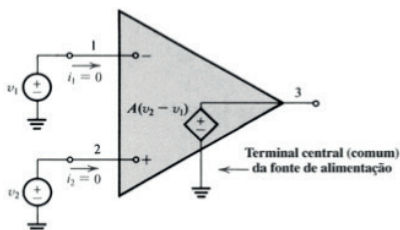
Amplificador operacional ideal

O AMP-OP foi idealizado para atuar como um detector da diferença entre os sinais de tensão aplicados nas entradas inversoras e nas não inversoras. Multiplicando-se o valor dessa diferença por um número A , a que daremos o nome de ganho diferencial, resulta em uma tensão no terminal de saída dada por: $A(v_2 - v_1)$, pois estamos supondo que ele seja uma fonte de tensão ideal e que não passará corrente por esse terminal, portanto a impedância de saída é igual a zero. No AMP-OP ideal suporemos também que a corrente do sinal da entrada inversora e a corrente do sinal na entrada não inversora sejam iguais a zero, portanto a impedância de entrada do AMP-OP ideal é considerada infinita. A Figura 3.8 mostra o modelo equivalente do AMP-OP ideal. Observe que a tensão de saída tem o mesmo

signal de V_2 , portanto dizemos que está em fase. Já quando a tensão de saída tem o sinal oposto de V_1 , dizemos que está defasada. Por essa razão demos o nome anteriormente do terminal 1 de entrada inversora e do terminal 2 de entrada não inversora.

O AMP-OP reage apenas à diferença de sinal $V_2 - V_1$ e, portanto, rejeita qualquer sinal comum a ambas as entradas, isto é, se $V_1 = V_2 = 1V$, então a saída será, teoricamente, zero. Essa característica recebe o nome de rejeição de modo comum, assim podemos concluir que um AMP-OP ideal tem uma rejeição de modo comum infinita.

Figura 3.8 | Circuito equivalente de um AMP-OP ideal



Fonte: Sedra & Smith (2000, p. 59).

Outras características de um AMP-OP ideal são: o ganho A é constante e independe do valor da frequência dos sinais de entrada; não deve introduzir defasagem ou mesmo atraso no circuito; A é um número real e positivo; e o AMP-OP deve apresentar insensibilidade a temperatura.



Assimile

O amplificador inversor usa realimentação negativa para estabilizar o ganho total. É necessário que haja essa estabilização do ganho, porque A é muito grande e instável para ser usado sem realimentação. O circuito 741C tem um ganho A de no mínimo 20 K e no máximo 200 K, ou seja, o ganho de tensão é imprevisível e inútil sem realimentação (MALVINO & BATES, 2011).

Impedância de entrada e saída

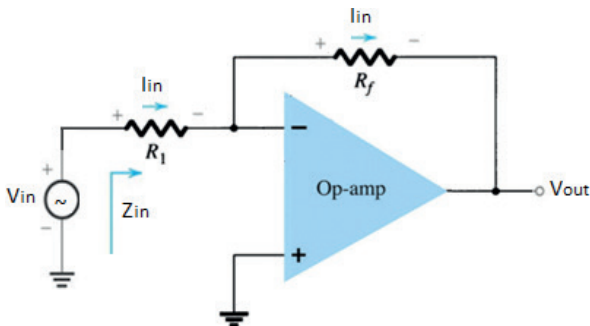
A impedância de entrada para amplificadores operacionais comuns não é infinita, porém é muito alta. Para os AMP-OPs que usam transistores de efeito de campo na entrada, a impedância pode chegar a centenas de $G\Omega$. Nesse caso, podemos considerar que seja praticamente um circuito aberto.

Analisando da mesma maneira, na prática, a impedância de saída também não é zero, porém os valores são considerados pequenos, da ordem de dezenas ou centenas de ohms (Ω).

Em algumas aplicações o projetista pode precisar de uma impedância de entrada específica. O amplificador, chamado de inversor, tem essa vantagem de permitir a impedância de entrada desejada. Observando a Figura 3.9, notamos que o terminal direito de R_1 está virtualmente aterrado, portanto a impedância de entrada (Z_{in}) em malha fechada é dada por (1):

$$Z_{in} = R_1 \quad (1)$$

Figura 3.9 | Amplificador básico ou amplificador inversor



Fonte: adaptada de Boylestad & Nashelsky (2013).

Nos manuais de fabricantes são fornecidos os valores das impedâncias de entrada e saída do AMP-OP.

Ganho de tensão

Para que uma amplificação seja possível, até para sinais de baixa amplitude como sensores, é necessário que o amplificador possua um alto ganho de tensão. Se considerarmos o amplificador ideal, esse ganho é infinito. O valor do ganho de tensão dos AMP-OPs é definido pelos fabricantes e já vem no manual do fabricante. Há AMP-OPs com ganho da ordem de 10^7 ou mais.

O ganho de tensão (A_{vo}) também é conhecido como ganho de malha aberta e pode ser medido em cc ou em baixas frequências. Ele é definido como (2):

$$A_{vo} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (2)$$

Normalmente, A_{VO} é o ganho de tensão diferencial em CC. O ganho de modo comum em condições normais é muito pequeno. Para um AMP-OP ideal, o ganho A é idealmente infinito.

Analisando a Figura 3.10, observamos a presença de um terra virtual (curto-circuito para a tensão e circuito aberto para a corrente). À direita de R_1 há um terra para tensão, assim escrevemos a tensão de entrada V_{in} como (3):

$$V_{in} = R_1 \cdot I_{in} \quad (3)$$

À esquerda de R_f existe um terra para a tensão, assim a tensão de saída, V_{out} , é dada por (4):

$$V_{out} = -R_f \cdot I_{in} \quad (4)$$

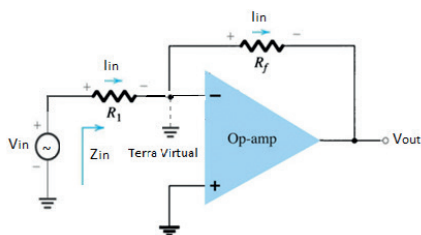
Dividindo V_{out} (4) por V_{in} (3), temos (5):

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-R_f \cdot I_{in}}{R_1 \cdot I_{in}} = -\frac{R_f}{R_1} \quad (5)$$

Portanto o ganho de tensão em malha fechada do circuito básico ou AMP-OPs inversos é dado por (6):

$$A_{VO} = -\frac{R_f}{R_1} \quad (6)$$

Figura 3.10 | Amplificador básico ou amplificador inversor



Fonte: adaptada de Malvino & Bates (2011).



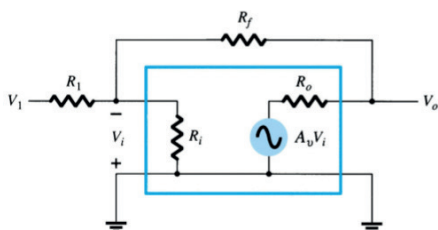
Refleta

Um amplificador inversor pode ter mais de uma entrada, isto é, devido ao ponto do terra virtual. Por causa desse terra virtual, cada entrada está isolada uma da outra. Reflita sobre a impedância na entrada. Cada entrada vê a sua própria impedância?

O ganho de tensão em malha fechada é o ganho de tensão quando existe um percurso de realimentação entre a saída e a entrada (MALVINO & BATES, 2011).

A Figura 3.11 é o circuito CA equivalente do AMP-OP mostrado na Figura 3.10.

Figura 3.11 | Circuito equivalente



Fonte: Boylestad & Nashelsky (2013, p. 433).

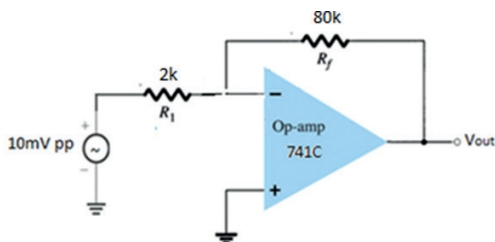
Para o AMP-OP ideal $Z_{in} = R_i = \infty$ e $Z_{out} = R_o = 0$.



Exemplificando

Qual é o valor do ganho em malha fechada do circuito 741C, visto na Figura 3.12?

Figura 3.12 | Circuito 741C



Fonte: adaptada de Malvino & Bates (2011).

$$A_{VO} = -\frac{R_f}{R_i} = -\frac{80K}{2K} = -40$$

Slew rate (S_R - taxa de subida)

Uma das especificações mais importantes de um AMP-OP é chamada de *slew rate*, ou taxa de variação. O *slew rate* tem um valor mínimo e é passado pelo fabricante. Não observar essa taxa pode ocasionar distorções bastante desagradáveis. Se a onda senoidal de saída for muito pequena ou a frequência muito baixa, não terá problema.

O *slew rate* pode ser definido como a variação na tensão de saída dividida pela variação de tempo. Equacionando, temos (7):

$$S_R = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta t} \text{ V} / \mu\text{s} \quad (7)$$

O *slew rate* fornece um parâmetro que especifica a taxa máxima de variação da tensão na saída quando é aplicado um sinal de grande amplitude na forma de degrau. Se for aplicado um sinal de entrada com tensão maior que o *slew rate*, a saída não irá acompanhar, resultando em um sinal distorcido de saída.

A maior frequência ($f_{m\acute{a}x}$) que pode ser amplificada pela *slew rate* é especificada como (8):

$$f_{m\acute{a}x} = \frac{S_R}{2\pi V_p} \quad (8)$$

Onde V_p é o valor de pico (MALVINO & BATES, 2011).



Pesquise mais

Saiba um pouco mais sobre os AMP-OPs através do site Clube da Eletrônica. Para acessar, basta clicar no link:

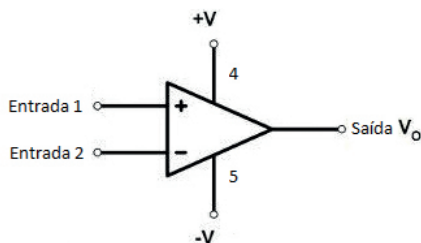
SILVA, C. O amplificador operacional e suas principais configurações. 2012. Disponível em: <<http://www.clubadaeletronica.com.br/Eletronica/PDF/Amp-OP%20I%20-%20conceitos%20basicos.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2018.

Sem medo de errar

Retornando ao seu projeto, a sua primeira providência foi estudar o básico sobre os AMP-OPs, por exemplo: o que seria um AMP-OP ideal? Qual o seu ganho? Pensando primeiramente em um projeto básico, logo vem a primeira pergunta: Qual o número mínimo de terminais que é necessário para um AMP-OP simples? Agora desenhe um AMP-OP definindo cada terminal. Por último coloque um degrau de tensão na entrada de um AMP-OP e explique o que é *slew rate* e a sua importância. Se essa entrada for mudada para uma onda senoidal, o que aconteceria com o *slew rate*?

O número mínimo de terminais de um AMP-OP simples é 5: terminal 1, entrada não inversora, terminal 2, entrada inversora, terminal 3, saída, terminal 4 e 5 polarizações.

Figura 3.13 | AMP-OP simples com os 5 terminais



Fonte: elaborada pela autora.

A *slew rate* fornece um parâmetro que especifica a taxa máxima de variação da tensão na saída quando é aplicado um sinal de grande amplitude na forma de degrau. Se for aplicado um sinal de entrada com variação de tensão maior que a *slew rate*, a saída não irá acompanhar, resultando em um sinal distorcido de saída. Esse parâmetro é de fundamental importância para altas frequências. Caso a entrada seja trocada por uma onda senoidal de maior frequência ou a tensão de entrada seja maior que a *slew rate*, a saída vai distorcer da mesma forma, tanto na subida quanto na descida.

Avançando na prática

Slew rate com entrada senoidal

Descrição da situação-problema

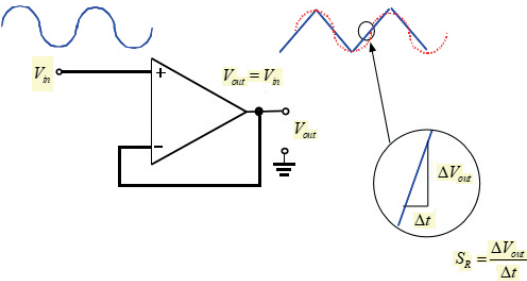
Na área de engenharia da empresa na qual você está estagiando, um técnico de engenharia lhe pediu uma ajuda sobre os AMP-OPs. Ele disse que aplicou uma onda senoidal na entrada do amplificador, e na saída apareceu uma onda triangular. O seu colega de trabalho não sabe por que isso aconteceu. Com os seus conhecimentos sobre AMP-OPs, explique para ele, por meio de um desenho, o que aconteceu e o porquê.

Resolução da situação-problema

O que aconteceu foi um fenômeno na saída chamado *slew rate* (SR). Possivelmente, o técnico aplicou um sinal de entrada que possui uma taxa de variação maior que o SR do AMP-OP. Quando isso acontece, a saída não é capaz de variar suficientemente rápido, resultando em um sinal ceifado ou distorcido. A saída nesse caso

não manterá inalterada a forma de onda do sinal de entrada. A Figura 3.14 mostra um buffer para uma entrada de onda senoidal. Nota-se que a forma de onda na saída é triangular, como o técnico disse.

Figura 3.14 | Slew rate com entrada senoidal



Fonte: adaptada de Ferreira (2012).

Faça valer a pena

1. Os AMP-OPs são componentes eletrônicos indispensáveis para os sistemas analógicos. Por meio deles podemos construir osciladores, filtros ativos, etc. Um dos AMP-OPs mais conhecidos é o 741, que tornou-se padrão na indústria. Um dos parâmetros essenciais do AMP-OP é o ganho de tensão, pois é por esse parâmetro que será possível a amplificação.

Um AMP-OP tem um ganho de tensão de 200k. Se for aplicada uma tensão de saída é de 1 V, qual é o valor na tensão de entrada?

- a) 5 μ V.
- b) 1 MV.
- c) 1 V.
- d) 2 μ V.
- e) 1 mV.

2. O *slew rate* fornece uma medida que especifica a taxa máxima de variação da tensão na saída quando é aplicado um sinal de grande amplitude na forma de degrau. Se for aplicado um sinal de entrada com tensão maior que o *slew rate*, a saída não irá acompanhar, resultando em um sinal distorcido de saída.

O LM 10 C é um amplificador operacional fabricado pela National Semicondutores que descreve na sua folha de dados um *slew rate* de 0,12 V/ μ s. Qual é o valor máximo de frequência, sem distorção, se for aplicada uma tensão de pico de saída de 12 V?

- a) 1592,35 MHz.
- b) 3184,7 MHz.
- c) 3184,7 Hz.
- d) 1592,35 μ Hz.
- e) 1592,35 Hz.

3. O ganho de tensão e a taxa *slew rate* de um amplificador são parâmetros importantíssimos para o bom funcionamento do dispositivo. Se a onda senoidal de saída for muito pequena, ou a frequência muito baixa, não terá problema de *slew rate*; caso contrário, poderá haver distorções.

Um AMP-OP possui uma taxa de subida $SR = 2 \text{ V}/\mu\text{s}$. Qual é o valor máximo do ganho de tensão de malha fechada que pode ser utilizado quando o sinal de entrada tem uma variação de $0,5 \text{ V}$ em $10 \mu\text{s}$?

- a) 40.
- b) 20.
- c) 40μ .
- d) 30.
- e) 400.

Seção 3.2

Análise de circuitos com amplificadores operacionais

Diálogo aberto

Olá! Vamos continuar nosso aprendizado sobre os AMP-OPs?

Já aprendemos a definição de AMP-OP, o que seria um AMP-OP ideal, a sua impedância de entrada e saída e algumas características como ganho e taxa de subida. Agora na Seção 3.2 veremos os modos de operação, o que é realimentação negativa, a aplicação em filtros ativos e os circuitos não lineares.

A realimentação negativa, por exemplo, é muito importante e bastante usada. Algumas aplicações são: amplificador somador, diferenciador, integrador e em filtros ativos. Podemos dizer que basicamente qualquer circuito que não usa realimentação negativa é muito instável para ser útil.

Hoje sabemos dessa importância, porém em 1927 o engenheiro Harold Black submeteu a realimentação negativa a uma patente, foi rejeitado e a ideia, classificada como “loucuras de moto-perpétuo”.

Agora que você já sabe um pouco do que vamos ver nesta seção e está ansioso por aprender, vamos retornar ao seu estágio na área de engenharia da empresa. Você finalmente decidiu sobre o seu projeto e viu que vai precisar de um amplificador para distribuição de áudio, porém percebeu que esse amplificador tem realimentação negativa. Pense sobre o assunto e responda: o que é a realimentação negativa e por que ela é usada? Faça então uma tabela com os quatro tipos de realimentação negativa. A sua tabela deve conter o desenho, o tipo de amplificador, a equação, as impedâncias de entrada e saída e o símbolo (razão).

Será que você consegue pensar em algum equipamento que possa ter um circuito com uma realimentação negativa?

Isto posto, estão prontos para recomençar os estudos?

Vamos em frente!

Não pode faltar

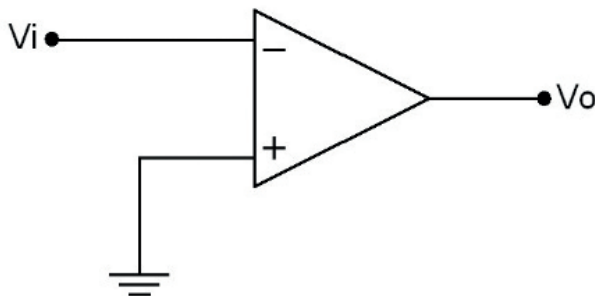
Modos de operação

Como vimos anteriormente, o amplificador operacional – ou, como é mais conhecido, AMP-OP – nada mais é que um amplificador com um ganho muito alto. O AMP-OP pode operar de três modos: sem realimentação, com realimentação positiva e com realimentação negativa.

Sem realimentação

O modo sem realimentação – ou, como também é conhecido, realimentação em malha aberta – tem o ganho estipulado pelo próprio fabricante, ou seja, não temos controle sobre ele. Essa operação é importante quando utilizamos circuitos comparadores, pois sabemos exatamente com qual valor iremos comparar, já que o valor é fixo e conhecido. A Figura 3.15 apresenta um AMP-OP em malha aberta (WENDLING, 2010).

Figura 3.15 | Circuito AMP-OP comparador (malha aberta)

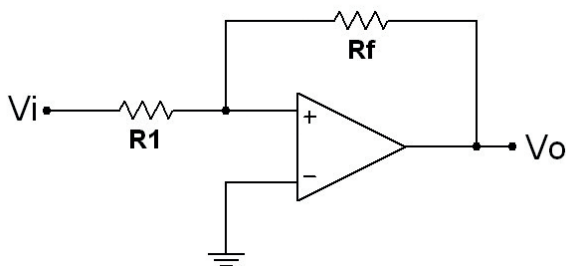


Fonte: elaborada pela autora.

Realimentação positiva

Esse tipo de operação também é conhecido como operação em malha fechada. A realimentação positiva tem como inconveniente o fato de conduzir o circuito à instabilidade. O ganho operacional é obtido pelo projetista. Utilizando a realimentação positiva, não se pode trabalhar como amplificador de sinais, pois sua resposta não é linear. Uma aplicação prática da realimentação positiva está nos circuitos osciladores. A Figura 3.16 mostra um AMP-OP submetido à realimentação positiva (WENDLING, 2010).

Figura 3.16 | AMP-OP com realimentação positiva



Fonte: elaborada pela autora.

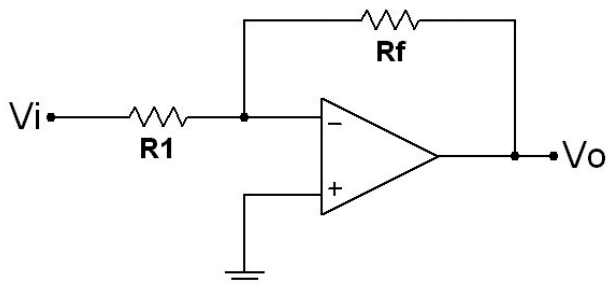
Realimentação negativa

Também trabalha em malha fechada e é considerado o modo de operação mais importante. Esse tipo de realimentação possui resposta linear e ganho controlado. A saída é reaplicada à entrada inversora. Segundo Boylestad e Nashelsky (2013), algumas das aplicações são:

- Amplificador inversor.
- Amplificador não inversor.
- Amplificador somador.
- Amplificador diferencial.
- Diferenciador.
- Integrador.
- Filtros ativos, etc.

A Figura 3.17 apresenta um AMP-OP operando com realimentação negativa.

Figura 3.17 | AMP-OP com realimentação negativa



Fonte: elaborada pela autora.

Realimentação negativa

A realimentação negativa foi inventada por um engenheiro chamado Harold Black. Nas teorias que ele propôs, a realimentação negativa estabiliza o ganho de tensão, aumenta a impedância de entrada e diminui a impedância de saída. Com o advento do transistor e dos AMP-OPs, outros tipos de realimentação negativa foram criados. A entrada de um amplificador com realimentação negativa pode ser tanto corrente quanto tensão (BOYLESTAD & NASHELSKY, 2013).

Fonte de tensão controlada por tensão (*Voltage-Controlled Voltage Source – VCVS*)

É um amplificador de tensão ideal, porque ele tem um ganho de tensão estabilizado, impedância de entrada infinita e impedância de saída nula. A fração de realimentação ou fator de atenuação de realimentação (B) é definida em (9) como:

$$B = \frac{V_2}{V_{out}} = \frac{R_1}{R_1 + R_f} \quad (9)$$

Onde v_2 é a tensão de realimentação e v_{out} é a tensão de saída. O fator B indica quanto da tensão de saída é atenuado antes que o sinal de realimentação chegue à entrada inversora.

O ganho de tensão em malha fechada (ideal – A_v) é definido por (10):

$$A_v \cong \frac{1}{B} \quad (10)$$

Fonte de tensão controlada por corrente (*Current-Controlled Voltage Source – CCVS*)

O CCVS também é chamado de amplificador de transresistência, pois a corrente de entrada controla uma tensão de saída. A palavra resistência é usada porque a razão V_{out}/I_{in} tem unidade de Ω . O prefixo trans é usado porque se refere a uma razão entre uma quantidade de saída por uma de entrada. A tensão de saída de um ICVS é dada por (11):

$$V_{out} = -i_{in} R_f \quad (11)$$

Onde R_f é a transresistência.

Fonte de corrente controlada por tensão (*Voltage-Controlled Current Source – VCCS*)

O VCCS também conhecido como amplificador de transcondutância, pois a tensão de entrada controla uma corrente de saída. A palavra condutância é usada pois a razão I_{out}/V_{in} tem a unidade de mhos (Siemens). A corrente de saída do amplificador VCCS é definida como (12):

$$i_{out} = \frac{V_{in}}{R_1} = g_m V_{in} \quad (12)$$

Fonte de corrente controlada por corrente (*Current-Controlled Current Source – CCCS*)

Um circuito ICIS amplifica uma corrente de entrada, conseguindo uma corrente de saída maior. Ele é considerado um amplificador de corrente ideal, porque tem um ganho de corrente estabilizado, impedância de entrada igual a zero e impedância de saída infinita.

O ganho de corrente em malha fechada é dado por (13), e a fração de realimentação por (14):

$$A_i \cong \frac{R_2}{R_1} + 1 \quad (13)$$

$$B = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (14)$$

O Quadro 3.1 representa um resumo da realimentação negativa:

Quadro 3.1 | Realimentação negativa ideal

Entrada	Saída	Circuito	Z_{in}	Z_{out}	Conversão	Razão	Símbolo	Tipo de Amplificador
V	V	VCVS	∞	0	-	V_{out}/V_{in}	A_v	Amplificador de tensão
I	V	CCVS	0	0	I para V	V_{out}/I_{in}	r_m	Amplificador de transresistência
V	I	VCCS	∞	∞	V para I	I_{out}/V_{in}	g_m	Amplificador de transcondutância
I	I	CCCS	0	∞	-	I_{out}/I_{in}	A_i	Amplificador de corrente

Fonte: adaptado de Malvino & Bates (2011).

Filtros ativos

Filtros são circuitos lineares projetados para deixar passar determinadas frequências e atenuar outras. São baseados em elementos reativos (capacitores e indutores). Podem ser passivos (apenas capacitores e indutores) ou ativos (amplificadores realimentados). Em relação à resposta em frequência, classificam-se como:

- Passa-baixas: são aqueles filtros que só permitem a passagem de frequência abaixo de uma frequência determinada f_c (denominada frequência de corte). As frequências superiores são atenuadas.
- Passa-altas: só permitem a passagem de frequência acima de uma frequência determinada f_c . As frequências acima são atenuadas.
- Passa-faixa: só permitem a passagem das frequências situadas em uma faixa delimitada por uma frequência de corte inferior f_{c1} e outra f_{c2} . As frequências situadas abaixo da frequência de corte inferior ou acima da frequência de corte superior são atenuadas.
- Rejeita-faixa: só permite a passagem das frequências situadas abaixo de uma frequência de corte inferior (f_{c1}) ou acima de uma frequência de corte superior (f_{c2}). A faixa de frequência delimitada por f_{c1} e f_{c2} é atenuada.

Conforme Boylestad e Nashelsky (2013), são considerados dois tipos de filtros:

- Filtros passivos: são aqueles construídos apenas com elementos passivos, tais como: resistores, capacitores e indutores. Tais filtros são inviáveis em baixas frequências, pois exigem indutores muito grandes.
- Filtros ativos: são aqueles construídos com alguns elementos passivos associados a elementos ativos (válvulas, transistores e amplificadores operacionais).

Filtros ativos

Os filtros ativos só produzem resposta passa-baixa ou passa-alta, com apenas um capacitor, e o filtros passa-banda ou rejeita-banda só são implementados com estruturas mínimas de segunda ordem.

A ordem de um filtro pode ser definida pelo número de circuitos RC, no caso de segunda ordem, dois conjuntos RC ou dois AMP-OPs em sequência (BOYLESTAD & NASHELSKY, 2013).

Filtro passa-baixas

Um filtro passa-baixas de primeira ordem possui resistores e um capacitor. O ganho de tensão abaixo da frequência de corte é constante e pode ser representado por (15):

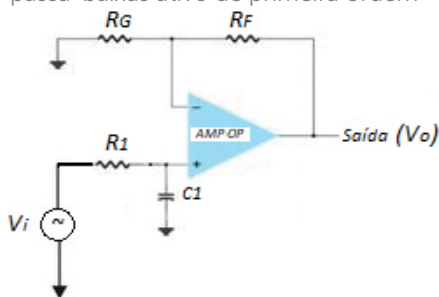
$$A_V = 1 + \frac{R_F}{R_1} \quad (15)$$

A frequência de corte é dada por (16):

$$f_{OH} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \quad (16)$$

A Figura 3.18 representa um filtro passa-baixas ativo de primeira ordem:

Figura 3.18 | Filtro passa-baixas ativo de primeira ordem



Fonte: adaptada de Boylestad & Nashelsky (2013).



Exemplificando

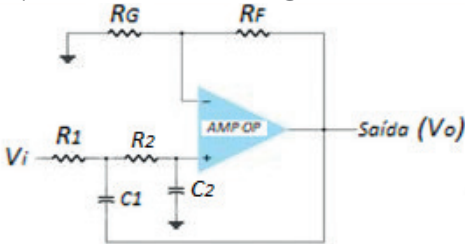
Calcule a frequência de corte de um filtro passa-baixas de primeira ordem para $R_1 = 1,3\text{k}\Omega$ e $C_1 = 0,03\mu\text{F}$.

Resolução:

$$f_{OH} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} = \frac{1}{2\pi (1,3 \cdot 10^3)(0,03 \cdot 10^{-6})} = 4,08\text{kHz}$$

A Figura 3.19 representa um filtro passa-baixas ativo de segunda ordem. O ganho de tensão do circuito e a frequência de corte são iguais ao de primeira ordem. A diferença é que a resposta do filtro de segunda ordem cai a uma taxa mais rápida que o filtro de primeira ordem.

Figura 3.19 | Filtro passa-baixas ativo de segunda ordem



Fonte: Boylestad & Nashelsky (2013, p. 465).

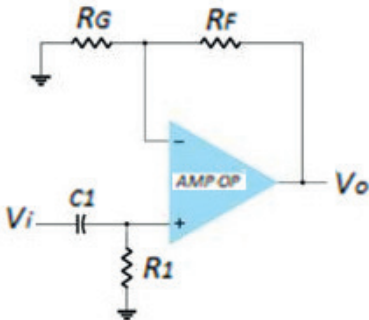
Filtro ativo passa-altas

As Figuras 3.20 e 3.21 representam um filtro passa-altas de primeira e segunda ordem. O ganho do amplificador é calculado utilizando-se a fórmula (17). A frequência de corte é calculada por:

$$f_{OL} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \tag{17}$$

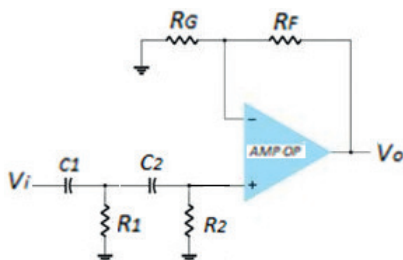
Para um filtro de segunda ordem $R_1=R_2$ e $C_1=C_2$.

Figura 3.20 | Filtro passa-altas ativo de primeira ordem



Fonte: adaptada de Boylestad & Nashelsky (2013).

Figura 3.21 | Filtro passa-altas ativo de segunda ordem

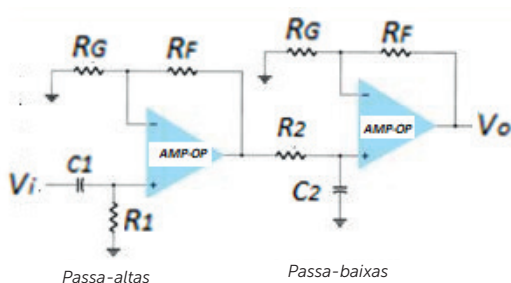


Fonte: adaptada de Boylestad & Nashelsky (2013).

Filtro passa-banda

No filtro passa-banda há duas frequências de corte: uma superior e outra inferior. Elas podem ser calculadas usando as mesmas fórmulas de frequências de corte passa-baixa e passa-alta:

Figura 3.22 | Filtro passa-banda



Fonte: adaptada de Boylestad & Nashelsky (2013).

Filtro rejeita-banda

Esse filtro permite a passagem de todas as frequências desde zero até a frequência de corte inferior e acima da frequência de corte superior e bloqueia as frequências entre as frequências de corte superior e inferior. Também é chamado de filtro match, porque rejeita ou remove todas as frequências na banda de corte (MALVINO & BATES, 2011).



Assimile

Os filtros passa-baixas e passa-altas passivos podem ser combinados para se obter um filtro passa-banda e um filtro rejeita-banda.

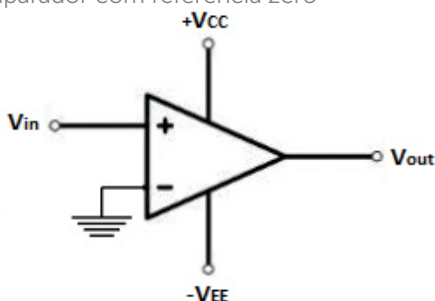
Circuitos não lineares

Circuitos não lineares são os circuitos que podem ser usados como comparadores, modeladores de formas de onda e circuitos com diodos ativos. Geralmente a saída de um AMP-OP não linear tem um formato diferente do sinal de entrada. Isso acontece porque o AMP-OP satura durante uma parte do ciclo de entrada (MALVINO & BATES, 2011).

Comparador com referência zero

O mais simples dos comparadores é construído a partir de um AMP-OP sem resistores de realimentação. A Figura 3.23 representa esse comparador. Como o ganho de tensão em malha aberta é muito alto, uma tensão de entrada negativa produz uma saturação negativa e uma tensão na entrada positiva produz uma saturação positiva.

Figura 3.23 | Comparador com referência zero



Fonte: adaptada de Malvino & Bates (2011).

A tensão de entrada mínima que produz a saturação é dada pela equação (18):

$$V_{in(min)} = \frac{\pm V_{sat}}{A_{VOL}} \quad (18)$$

Onde A_{VOL} é o ganho em malha aberta. Uma tensão de entrada mais positiva que $+V_{in}$ coloca o comparador na saturação positiva, e uma tensão de entrada mais negativa que $-V_{in}$ coloca o comparador na saturação negativa.

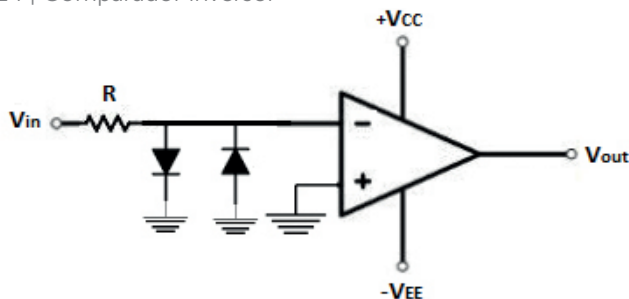


A saída do comparador representado na Figura 3.23 pode ser vista como digital?

Comparador inversor

O sinal de entrada aciona a entrada inversora do comparador. Uma tensão de entrada negativa produz uma saída máxima positiva, e uma tensão de entrada positiva produz uma saída máxima negativa. Os diodos na entrada são limitadores de tensão que servem para proteger o comparador de tensões muito altas.

Figura 3.24 | Comparador inversor



Fonte: adaptada de Malvino & Bates (2011).

Ruído é um sinal indesejado que pode aparecer na entrada de um comparador, mas que não faz parte do sinal. Esse ruído provocará uma saída irregular e, dependendo do nível, ele pode provocar comutações falsas (troca de estado). Para reduzir o efeito do ruído é conveniente usar um comparador com realimentação positiva, que produzirá dois pontos de comutação distintas e assim evitará que o ruído de entrada cause transições falsas. Essas transições são causadas devido ao alto ganho de malha aberta do comparador. Esse alto ganho faz com que qualquer sinal na ordem de centenas de microvolts, até mesmo os ruídos, comute a saída. Essa realimentação positiva causa um efeito chamado histerese e o comparador de Schmitt Trigger. A realimentação positiva também aumenta a velocidade de comutação (MALVINO; BATES, 2011).



Saiba um pouco mais sobre os circuitos não lineares acessando o link que leva ao material referenciado a seguir:

APLICAÇÕES com OpAmp. Disponível em: <<http://www.demic.fee.unicamp.br/~elnatan/ee640/20a%20Aula.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2018.

Sem medo de errar

Retornando ao seu projeto, a sua primeira providência foi estudar o básico sobre os AMP-OP, tal como: o que seria um AMP-OP ideal? Qual é o seu ganho? entre outras características importantes. Agora que você já sabe muita coisa sobre os AMP-OPs, finalmente conseguiu definir seu projeto e vai precisar de um amplificador para distribuição de áudio, porém percebeu que esse amplificador tem realimentação negativa. Pense sobre o assunto e responda: o que é a realimentação negativa e por que ela é usada? Faça então uma tabela com os quatro tipos de realimentação negativa. A sua tabela deve conter o desenho, o tipo de amplificador, a equação, as impedâncias de entrada e saída e o símbolo (razão).

A realimentação negativa trabalha em malha fechada, que é considerado o modo de operação mais importante em AMP-OPs. Um dos motivos para se usar a realimentação negativa é que esse tipo de realimentação possui resposta linear e ganho controlado. A saída é reaplicada à entrada inversora, e a entrada com realimentação negativa pode ser tanto corrente quanto tensão. Os quatro tipos de realimentação negativa são: **fonte de tensão controlada por tensão (VCVS)**; **fonte de tensão controlada por corrente (CCVS)**; **fonte de corrente controlada por tensão (VCCS)**; e **fonte de corrente controlada por corrente (CCCS)**. O Quadro 3.2 mostra os quatro tipos de realimentação negativa ideal e o circuito correspondente:

Quadro 3.2 | Realimentação negativa ideal

Circuito	Equação	Z_{in}	Z_{out}	Razão	Símbolo	Tipo de amplificador	Desenho
VCVS	$\frac{R_f}{R_1} + 1$	∞	0	V_{out}/V_{in}	A_v	Amplificador de tensão	
CCVS	$V_{out} = -i_{in} R_f$	0	0	V_{out}/I_{in}	r_m	Amplificador de transresistência	
VCCS	$i_{out} = \frac{V_{in}}{R_1}$	∞	∞	I_{out}/V_{in}	g_m	Amplificador de transcondutância	
CCCS	$\frac{R_2}{R_1} + 1$	0	∞	I_{out}/I_{in}	A_i	Amplificador de corrente	

Fonte: adaptada de Malvino & Bates (2011).

Avançando na prática

Comparadores com histerese: Schmitt Trigger

Descrição da situação-problema

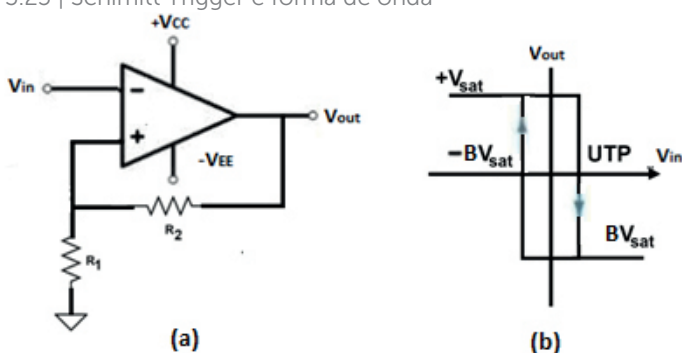
O ruído é qualquer sinal indesejado que não faz parte da entrada, mas que normalmente está presente. O comparador possui um alto ganho de malha aberta, e por essa razão uma pequena entrada de centenas de microvolts é o suficiente para comutar a saída de um estado para o outro. Isso significa que, se a entrada tiver um ruído com picos maiores que centenas de microvolts, provocará

comutações indesejadas na saída. Como podemos evitar que um ruído de entrada comute um comparador? Desenhe um diagrama esquemático para sustentar sua discussão.

Resolução da situação-problema

Para evitar que o ruído de entrada comute um comparador, devemos usar um comparador com realimentação positiva, chamado de comparador por histerese. Esse tipo de comparador reduzirá o efeito do ruído e produzirá dois pontos de comutação distintos, evitando que o ruído de entrada cause transições falsas. A Figura 3.25 (a) representa um Schmitt Trigger e a Figura 3.25 (b), a forma de onda.

Figura 3.25 | Schmitt Trigger e forma de onda



Fonte: elaborada pela autora.

Quando o comparador satura positivamente, uma tensão positiva é realimentada na entrada não inversora. Essa tensão mantém a saída no estado alto. Quando a saída satura negativamente, uma tensão negativa é realimentada na entrada não inversora, e a saída é mantida no estado baixo. A tensão de saída permanece em um dado estado até que a tensão de entrada ultrapasse a tensão de referência (BV_{SAT}) para aquele estado. A diferença entre $BV_{SAT} - (-BV_{SAT})$ é chamada de histerese. A realimentação positiva gera a histerese. Sem realimentação positiva, B seria nulo, não haveria histerese e os dois pontos de comutação seriam iguais a zero.

Faça valer a pena

1. Os filtros ativos são formados por capacitores, resistores e amplificadores operacionais. Esses filtros são úteis para frequências abaixo de 1 MHz, têm ganho de potência e são fáceis de serem sincronizados. Um filtro ativo com estágio de primeira ordem pode produzir uma resposta passa-baixa ou passa-alta.

Um estágio de um filtro ativo de primeira ordem possui:

- a) Um capacitor.
- b) Dois AMP-OPs.
- c) Três resistores.
- d) Três AMP-OPs.
- e) Um Q alto.

2. Há quatro tipos de realimentação negativa: fonte de tensão controlada por tensão, fonte de tensão controlada por corrente, fonte de corrente controlada por tensão e fonte de corrente controlada por corrente. Dois tipos são controlados por uma tensão de entrada e os outros dois tipos, por uma corrente de entrada.

Um amplificador do tipo VCVS se aproxima de um:

- a) Amplificador de tensão ideal.
- b) Conversor corrente-tensão ideal.
- c) Conversor tensão-corrente ideal.
- d) Amplificador de corrente ideal.
- e) Amplificador de tensão e corrente ideais.

3. Um comparador com uma tensão de referência zero é também chamado de detector de cruzamento zero. Geralmente são usados limitadores com diodos para proteger o comparador contra possíveis tensões de entrada muito altas. Os comparadores em geral são usados fazendo interface com entradas de circuitos digitais.

Para detectar quando a entrada é maior que um valor em particular, usa-se um:

- a) Conversor de tensão-corrente.
- b) Conversor corrente-tensão.
- c) Inversor.
- d) Amplificador de corrente.
- e) Comparador.

Seção 3.3

Aplicação de amplificadores operacionais

Diálogo aberto

Olá!

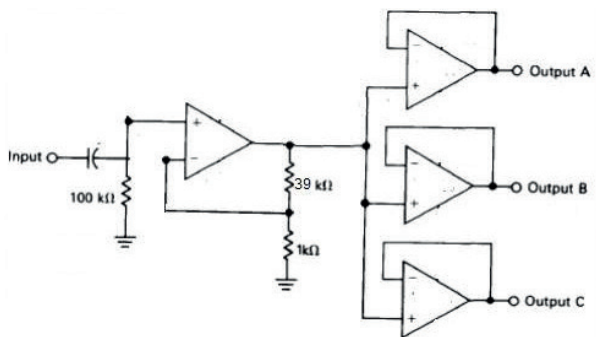
Essa unidade de estudo passou muito rápido. Já estamos na última seção sobre os amplificadores operacionais, porém ainda há muita coisa a ser vista. Então, estão prontos para continuarmos nosso aprendizado sobre os AMP-OPs?

Já aprendemos o que é um AMP-OP, a sua impedância de entrada e saída e algumas características como ganho e taxa de subida. Na Seção 3.2 vimos os modos de operação, o que é realimentação negativa, a aplicação em filtros ativos e os circuitos não lineares.

Agora na Seção 3.3 aprenderemos uma variedade de circuitos amplificadores, tais como: amplificador inversor, amplificador não inversor, amplificador somador e o amplificador diferencial. O amplificador somador, por exemplo, é usado quando precisamos somar dois ou mais sinais em uma única saída. Um misturador (mixer) usado para combinar sinais em um sistema de áudio utiliza um amplificador somador. Já o amplificador diferencial é muito utilizado na prática em instrumentação.

Agora que você já sabe um pouco mais do que vamos ver nesta seção, deve estar com mais vontade de aprender, mas antes vamos retornar ao seu estágio na área de engenharia da empresa. No decorrer do estágio nessa área você já aprendeu sobre os AMP-OPs e já estudou sobre a realimentação positiva e os quatro tipos de realimentação negativa. Agora sua próxima tarefa na empresa é fazer um amplificador para distribuição de áudio. O circuito apresentado na Figura 3.26 é um amplificador distribuidor de áudio. Analise-o e verifique se ele funciona com realimentação positiva ou negativa. Escreva a fórmula do ganho de tensão e largura de banda em malha fechada para o primeiro estágio. Mostre na figura os seguidores de tensão.

Figura 3.26 | Encontrando os seguidores de tensão



Fonte: Malvino & Bates (2011, p.179).

Está ficando fácil identificar quando um amplificador é inversor e quando é não inversor? E os tipos de realimentação? Com certeza você está se saindo muito bem nesta unidade.

Durante o seu aprendizado, conseguiu perceber como os amplificadores são usados para praticamente tudo? Agora, com um conhecimento maior, procure identificar mais equipamentos que possuem AMP-OPs.

Prontos para finalizarmos a última seção sobre os AMP-OPs?

Com os conhecimentos adquiridos até esta unidade, faça um projeto de circuito com amplificador operacional.

Bons estudos!

Não pode faltar

Nesta seção veremos alguns circuitos AMP-OPs lineares como: amplificador inversor, amplificador não inversor, amplificador somador, amplificador diferencial e o amplificador de instrumentação.

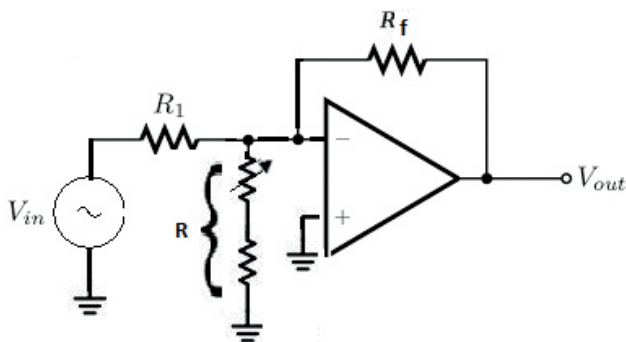
Amplificador inversor

É um dos tipos de circuitos mais básicos. A grande vantagem desse tipo de circuito é o valor do ganho que é dado pela razão entre a resistência de realimentação e a resistência de entrada. Algumas aplicações do AMP-OP inversor são: ponta de prova de alta impedância, que pode ser usada, por exemplo, como multímetro digital, amplificador de acoplamento CA e também para mudar a

largura de banda em malha fechada de um amplificador de tensão inversor sem alterar o valor do ganho de tensão em malha fechada.

Vamos exemplificar o uso do amplificador inversor vendo o circuito com largura de banda ajustável. A Figura 3.27 representa esse circuito.

Figura 3.27 | Circuito de largura de banda ajustável



Fonte: adaptada de Malvino & Bates (2011).

Nota-se que o valor de R é variável, por isso a largura de banda pode ser alterada.

Por se tratar de um circuito inversor, o ganho é dado por (19):

$$A_v = -\frac{R_f}{R_1} \quad (19)$$

A fração de realimentação (B) pode ser calculada por (20):

$$B = -\frac{R_1 \parallel R}{R_1 \parallel R + R_f} \quad (20)$$

Por fim, a largura de banda (f_2) é representada pela equação (21):

$$f_2 = B f_{\text{unitário}} \quad (21)$$

Onde $f_{\text{unitário}}$ é o valor da frequência (MALVINO & BATES, 2011).

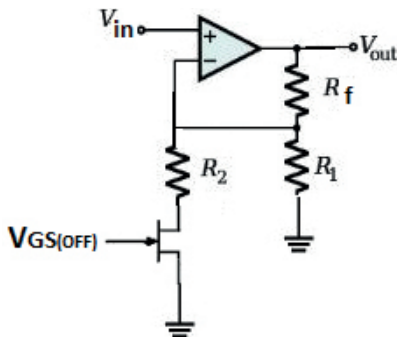
Amplificador não inversor

O amplificador não inversor é também um dos circuitos mais básicos que utiliza AMP-OPs, como o amplificador inversor. Tem como característica o ganho de tensão estável, a impedância de saída baixa e a impedância de entrada alta. Algumas aplicações para o amplificador não inversor são: amplificador com acoplamento CA,

amplificador para distribuição de áudio, ganho de tensão chaveado com JFET e referência de tensão.

Como exemplo, estudaremos o circuito não inversor cujo ganho de tensão é controlado por um JFET que atua como uma chave. A Figura 3.28 mostra esse circuito:

Figura 3.28 | Chave JFET controlando o ganho de tensão



Fonte: adaptada de Malvino & Bates (2011).

A tensão de entrada do JFET é representada por dois estados: 0 ou $V_{GS(OFF)}$. Quando a tensão no JFET for de nível alto, ou seja, igual a 0, a chave JFET é fechada, assim R_2 está em paralelo com R_1 e o ganho de tensão fica igual a (22):

$$A_v = \frac{R_f}{R_1 \parallel R_2} + 1 \quad (22)$$

Já quando a tensão estiver no nível baixo, o JFET estará como um circuito aberto, assim R_2 é desconectado de GND e o valor do ganho é dado por (23) (MALVINO, BATES, 2011):

$$A_v = \frac{R_f}{R_1} + 1 \quad (23)$$



Pesquise mais

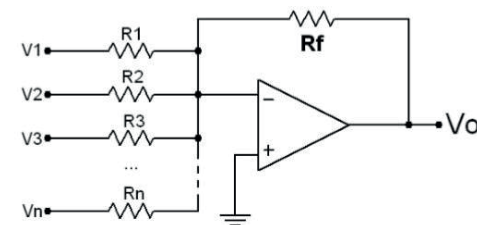
Saiba um pouco mais sobre os amplificadores, acessando o link do material referenciado a seguir:

APLICAÇÕES com OpAmp. Disponível em: <<http://www.demic.fee.unicamp.br/~elnatan/ee640/20a%20Aula.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2018.

Amplificador somador

O circuito representado na Figura 3.29 é um amplificador somador de n entradas. Ele fornece em sua saída uma tensão proporcional ao negativo da soma das n tensões de entrada, ou seja, cada entrada fornece uma tensão a saída, multiplicada pelo ganho.

Figura 3.29 | Amplificador somador



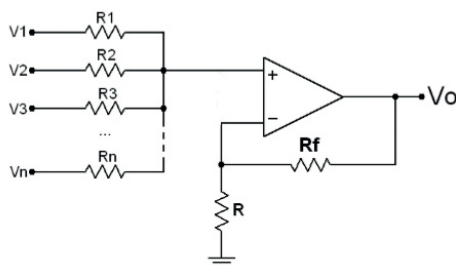
Fonte: adaptada de Malvino & Bates (2011).

A tensão saída V_0 é dada por (24):

$$V_0 = -\sum_{i=1}^n \left(\frac{R_f}{R_i} V_i \right) = -\left(\frac{R_f}{R_1} V_1 + \frac{R_f}{R_2} V_2 + \frac{R_f}{R_3} V_3 + \dots + \frac{R_f}{R_n} V_n \right) \quad (24)$$

O circuito amplificador somador não inversor, representado na Figura 3.30, fornece em sua saída uma tensão proporcional à soma das tensões de entrada. Ele é especial pois a tensão de saída não sofre inversão.

Figura 3.30 | Amplificador somador não inversor



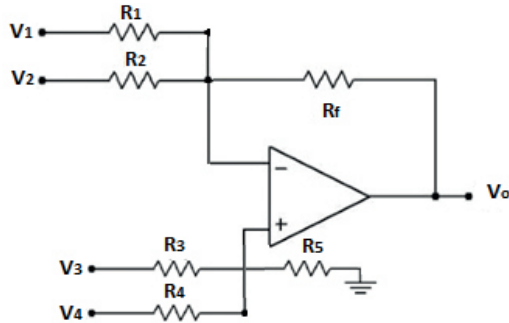
Fonte: adaptada de Malvino & Bates (2011).

A equação que calcula a tensão de saída é dada por (25):

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) \frac{\left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_n}{R_n}\right)}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}\right)} \quad (25)$$

Outro tipo de circuito somador que existe é quando se tem uma soma na entrada inversora e na entrada não inversora. O ganho total desse tipo de circuito é calculado pela soma da superposição dos ganhos das entradas inversora e não inversora. A Figura 3.31 representa esse circuito.

Figura 3.31 | Amplificador somador usando as entradas inversora e não inversora



Fonte: adaptada de Malvino & Bates (2011).

O valor da tensão de saída é calculado por (26):

$$V_{out} = A_{v1}V_1 + A_{v2}V_2 + A_{v3}V_3 + A_{v4}V_4 \quad (26)$$

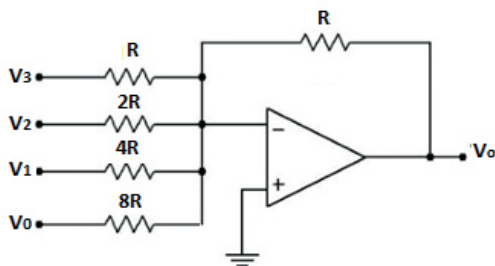
Onde os ganhos são dados por (27):

$$A_{v1} = \frac{-R_f}{R_1}; A_{v2} = \frac{-R_f}{R_2}; A_{v3} = \left(\frac{R_f}{R_1 \parallel R_2} + 1\right) \cdot \left(\frac{R_4 \parallel R_5}{R_3 + R_4 \parallel R_5}\right); \quad (27)$$

$$A_{v4} = \left(\frac{R_f}{R_1 \parallel R_2} + 1\right) \cdot \left(\frac{R_3 \parallel R_5}{R_4 + R_3 \parallel R_5}\right)$$

Outro circuito importante é o conversor D/A (digital-analógico). Esse circuito toma um número binário e converte em um valor de corrente ou tensão. A Figura 3.32 representa um conversor D/A binário ponderado. O nome ponderado é devido ao valor da tensão de saída, que é igual à soma ponderada das entradas.

Figura 3.32 | Conversor D/A binário ponderado



Fonte: adaptada de Malvino & Bates (2011).

A tensão de saída V_o é dada por (28):

$$V_o = -(V_3 + 0,5V_2 + 0,25V_1 + 0,125V_0) \quad (28)$$

As tensões de entrada, por serem digitais, só possuem dois valores 0 ou 1. Como temos quatro entradas, existem 16 possibilidades de entradas: 0000, 0001, 0010, 0011, 0100, 0101, 0110, 0111, 1000, 1001, 1010, 1011, 1100, 1101, 1110 e 1111 (MALVINO & BATES, 2000).



Exemplificando

Se o conversor D/A representado na Figura 3.30 é acionado por um circuito que produz a sequência de números de 0000 a 1111, quais são os valores das tensões de saída?

Os valores são calculados de acordo com a equação (23). Temos:

Para: 0000

$$V_o = -(V_3 + 0,5V_2 + 0,25V_1 + 0,125V_0) = -(0 + 0,5 \cdot 0 + 0,25 \cdot 0 + 0,125 \cdot 0) = 0$$

Para: 0001

$$V_o = -(0 + 0,5 \cdot 0 + 0,25 \cdot 0 + 0,125 \cdot 1) = -0,125.$$

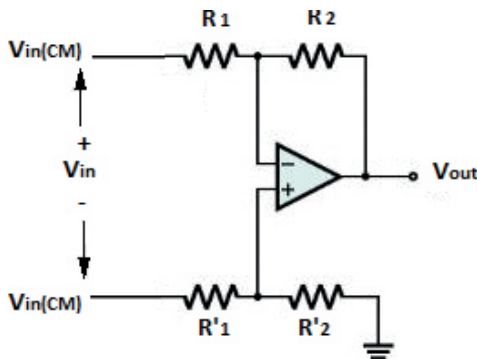
O mesmo raciocínio é utilizado para as demais entradas, e os resultados são: 0, -0,125, -0,25, -0,375, -0,5, -0,625, -0,75, -0,875, -1, -1,125, -1,25, -1,375, -1,5, -1,625, -1,75 e -1,875.

Amplificador diferencial

Uma das características mais importantes de um amplificador diferencial é o seu CMRR (*Common Mode Rejection Ratio* ou *Relação de Rejeição em Modo Comum*), porque o sinal de entrada típico é uma tensão diferencial pequena (mV) e a tensão em modo

comum grande (V). A Figura 3.33 representa um amplificador diferencial básico, que é muito usado nas áreas de biomédica e eletromecânica dentro da eletrônica.

Figura 3.33 | Amplificador diferencial



Fonte: adaptada de Malvino & Bates (2011).

Na Figura 3.33, o valor de R'_1 e R_1 tem o mesmo valor nominal, porém podem diferir no valor em virtude da tolerância. O valor do ganho de tensão diferencial (A_v) é obtido por (29) e o valor do ganho de tensão em modo comum ($A_{v(CM)}$) é dado por (30):

$$A_v = \frac{-R_2}{R_1} \quad (29)$$

$$\pm 2 \frac{\Delta R}{R} < A_{v(CM)} < \pm 4 \frac{\Delta R}{R} \quad (30)$$

Onde $\frac{\Delta R}{R}$ é a tolerância dos resistores convertida para o equivalente decimal.

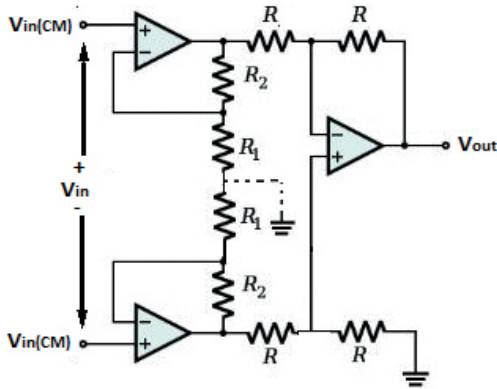


Refleta

Em um circuito linear com AMP-OP, o AMP-OP nunca vai para a saturação?

O amplificador de instrumentação é um amplificador diferencial otimizado em seu desempenho cc. O amplificador diferencial possui um alto valor de ganho de tensão, um CMRR alto, uma impedância de entrada alta e offsets de entrada baixos. A Figura 3.34 demonstra um amplificador de instrumentação.

Figura 3.34 | Amplificador de instrumentação padrão



Fonte: adaptada de Malvino & Bates (2011).

O valor do ganho de tensão diferencial (A_v) e o valor do ganho de tensão em modo comum ($A_{v(CM)}$) do pré-amplificador é dado por (31), e o valor do ganho de tensão diferencial (A_v) e o valor do ganho de tensão em modo comum ($A_{v(CM)}$) do amplificador diferencial é dado por (32) (MALVINO & BATES, 2000):

$$A_v = \frac{R_2}{R_1} + 1 \text{ e } A_{v(CM)} = 1 \tag{31}$$

$$A_v = -1 \text{ e } A_{v(CM)} = \pm 2 \frac{\Delta R}{R} \tag{32}$$



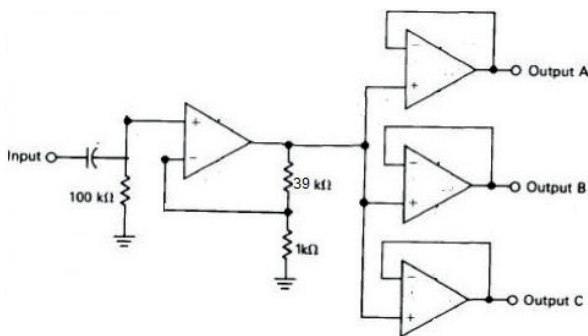
Assimile

No circuito da Figura 3.33, notamos em tracejado um terra virtual. Devido a esse terra virtual, os resistores R_1 no primeiro estágio não têm que ficar separados. Como estão em série, podemos escrever $R_G = 2R_1$ sem alterar a operação no primeiro estágio. Assim o ganho de tensão diferencial pode ser reescrito como: $A_v = \frac{2R_2}{R_G} + 1$.

Sem medo de errar

Retornando ao seu estágio no departamento de engenharia, você já sabe quais são os quatro tipos de realimentação negativa e agora quer fazer um amplificador para distribuição de áudio. O circuito apresentado na Figura 3.35 é um amplificador distribuidor de áudio. Analise-o e verifique se ele funciona com realimentação positiva ou negativa. Escreva a fórmula do ganho de tensão e largura de banda em malha fechada para o primeiro estágio. Mostre na figura os seguidores de tensão.

Figura 3.35 | Amplificador distribuidor de áudio



Fonte: Malvino & Bates (2007, p.179).

Analisando a figura, percebemos que se trata de amplificador não inversor com acoplamento CA acionando três seguidores de tensão. Nota-se que o sinal áudio de entrada está sendo distribuído para as três saídas.

O ganho de tensão em malha fechada e a largura de banda para o primeiro estágio é dado pela equação: $A_v = \frac{R_f}{R_i} + 1$ e $f_2 = \frac{f_{\text{unitário}}}{A_v}$.

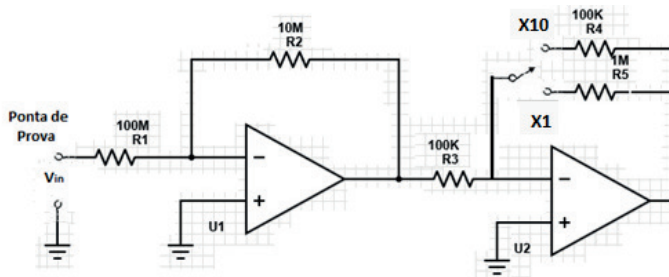
Através dos valores das resistências e da equação, podemos calcular o valor do ganho e da largura de banda supondo uma $f_{\text{unitário}}$ de 1MHz: $A_v = \frac{R_f}{R_i} + 1 = \frac{39k}{1k} + 1 = 40$ e $f_2 = \frac{f_{\text{unitário}}}{A_v} = \frac{1M}{40} = 25KHz$

Ponta de prova de alta impedância

Descrição da situação-problema

Explique como um amplificador inversor é usado em um circuito de uma ponta de prova (X10 e X1) de alta impedância. O circuito está representado na Figura 3.36. Ao explicar, calcule os valores do ganho.

Figura 3.36 | Ponta de prova de alta impedância



Fonte: adaptada de Malvino & Bates (2011).

Resolução da situação-problema

O primeiro estágio é um amplificador inversor que tem um ganho de 0,1, dado por: $A_v = \frac{-R_2}{R_1} = -\frac{10M}{100M} = -0,1$. O segundo estágio

também é um amplificador inversor com os ganhos de tensão iguais a 1 ou 10. Esses ganhos são dados por: $A_v = \frac{-R_4}{R_3} = -\frac{100K}{100K} = -1$ e

$A_v = \frac{-R_5}{R_3} = -\frac{1M}{100K} = -10$. Os valores dependem da posição da chave:

X10 ou X1. Na posição X10 da chave, o sinal de saída é atenuado por um fator de 10. Na posição X1 não há atenuação de saída.

Faça valer a pena

1. O AMP-OP é muito empregado em circuitos de instrumentação, tais como voltímetros dc ou ac. Dentre estes o mais importante certamente é o amplificador de instrumentação. As principais características de um amplificador de instrumentação são: elevada impedância de entrada, alta razão de rejeição de modo comum, tensão de offset reduzida e baixo ruído. Uma das configurações clássicas é o circuito formado por três AMP-OPs.

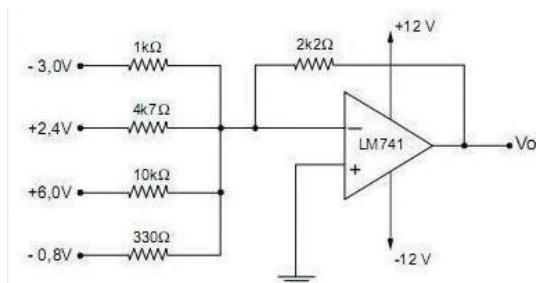
No amplificador de instrumentação de três AMP-OPs, onde o ganho de tensão diferencial é normalmente produzido? (adaptado de MALVINO & BATES, 2011)

- a) Pelo primeiro estágio.
- b) Pelo segundo estágio.
- c) Pelos resistores casados.
- d) Pelo AMP-OP de saída.
- e) Pelos dois estágios.

2. O amplificador somador tem a finalidade somar dois ou mais valores de entradas analógicas ou digitais em tempo real. Uma aplicação para tipo de circuito seria, por exemplo, na mixagem de sinais de áudio. Para construir um somador, podemos utilizar somente a entrada inversora, somente a entrada não inversora ou ambas as entradas.

Qual é o valor aproximado de V_o no amplificador somador?

Figura 3.37 | Amplificador somador



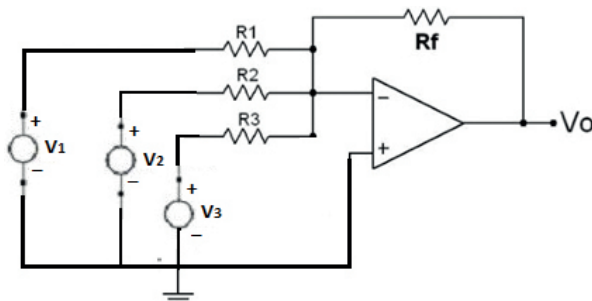
Fonte: elaborada pela autora.

- a) -9,5 V.
- b) 9,5 V.
- c) 6,5 V.
- d) -4,5 V.
- e) 3,5 V.

3. Os amplificadores operacionais podem ser conectados em configurações de malha aberta ou de malha fechada. As topologias básicas lineares com o uso de AMP-OPs são: amplificador não inversor, amplificador inversor, amplificador somador, amplificador seguidor, amplificador diferencial, amplificador diferenciador, amplificador integrador e amplificador de instrumentação.

A figura representa a polarização de um amplificador operacional ideal, com V_1 , V_2 e V_3 como tensões de entrada, V_o como tensão de saída e resistências R_1 , R_2 , R_3 e R_f . A expressão que define o valor da tensão de saída V_o será:

Figura 3.38 | Polarização de um amplificador operacional



Fonte: elaborada pela autora.

- a) $V_o = -R_f \left(1 + \frac{R_1}{V_1} + \frac{R_2}{V_2} + \frac{R_3}{V_3} \right)$.
- b) $V_o = R_f \left(1 + \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right)$.
- c) $V_o = R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right)$.
- d) $V_o = -R_f \left(1 + \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right)$.
- e) $V_o = -R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right)$.

Referências

BOYLESTAD, R. L.; NASHIELSKY, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 11. ed. São Paulo: Pearson Education, 2013.

FERREIRA, E. C. **Razão de rejeição a fonte de potência (PSRR)**. 2012. Disponível em: <<http://www.demic.fee.unicamp.br/~elnatan/ee640/19a%20Aula.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2018.

MALVINO, A.; BATES, D. J. **Eletrônica**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2011. v.1

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microeletrônica**. 4. ed. São Paulo: Makron Books, 2000.

SILVA, C. **O amplificador operacional e suas principais configurações**. 2012. Disponível em: <<http://www.clubadaeletronica.com.br/Eletronica/PDF/Amp-OP%20I%20-%20conceitos%20basicos.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2018.

WENDLING, M. **Amplificadores operacionais**: versão 2.0. Unesp, Guaratinguetá, SP, 2010. Disponível em: <<http://www2.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/3---amplificadores-operacionais-v2.0.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2018.

Osciladores e multivibradores

Convite ao estudo

Olá!

Chegamos na quarta e última unidade sobre os circuitos analógicos. Já aprendemos muitas coisas e já sabemos projetar vários circuitos. Na Unidade 1, aprendemos sobre os materiais semicondutores e vimos o primeiro dispositivo semicondutor, o diodo. Aprendemos que, além do diodo comum, há diodos especiais como o Zener e o LED e estudamos alguns tipos de circuitos que envolvem esses dispositivos como os retificadores e os limitadores. Na Unidade 2, vimos o primeiro dispositivo que possui mais de uma junção que são os transistores: TBJs e FETs. Também aprendemos como os transistores funcionam, o aspecto construtivo deles e que eles podem funcionar como amplificadores e como chaves, dependendo da forma que foram polarizados. Já na Unidade 3, conhecemos os famosos AMP-OPs. Vimos o que é um AMP-OP, as suas impedâncias e características importantes, como o ganho e a taxa de subida. Também aprendemos os modos de operação, o que é realimentação negativa, a aplicação em filtros ativos e os circuitos não-lineares. Por fim, terminamos a unidade vendo alguns tipos de amplificadores como: inversor, não inversor; somador e diferencial.

Agora, nesta última unidade, falaremos sobre os osciladores e os multivibradores. Primeiramente, aprenderemos, na Seção 1, a teoria geral dos osciladores e alguns tipos, como: deslocamento de fase, em ponte de Wien e o circuito oscilador sintonizado. Na Seção 2 veremos o oscilador a cristal e o oscilador com transistor unijunção, bem como os osciladores de relaxação e tensão. Já na Seção 3 aprenderemos sobre o

CI 555, os multivibradores monoestáveis, biestáveis e astáveis, finalizando a unidade com o disparador Schmitt.

Durante a Unidade 1 você estava começando o seu estágio em uma empresa de informática. Na Unidade 2, em busca de novos desafios, você pediu para estagiar na área de manutenção, na Unidade 3 você chegou ao coração da empresa, que é o setor de engenharia. Agora, devido a sua dedicação, seu conhecimento e seu esforço você vai concorrer com outros estagiários a uma vaga efetiva na empresa. O seu supervisor, sabendo do seu interesse sobre dispositivos eletrônicos, leu um texto sobre os circuitos digitais e resolveu compartilhar com você: **os circuitos** digitais trabalham sincronizados e uma das partes mais importantes de muitos desses circuitos é o oscilador de *clock*. Em outras aplicações os osciladores são necessários para gerar sinais específicos de frequências, que podem estar entre fração de hertz até alguns Giga-hertz. Os osciladores conseguem gerar vários tipos de ondas como as senoidais, triangulares e quadradas. Os receptores de rádio modernos, por exemplo, que você usa em sua casa ou no seu automóvel, contêm osciladores. Todo transmissor usa um oscilador para produzir os sinais que transmite. Isso é verdade não só com referência às emissoras comerciais, como também aos transmissores de qualquer navio ou avião, aos computadores ou qualquer equipamento que necessite de uma referência de tempo ou de frequência. Outro modelo de oscilador é chamado de multivibrador, porém, pode gerar uma onda quadrada dependendo do seu estado. O seu estágio na área de engenharia continua muito bem e você está progredindo a olhos vistos, diante desse progresso o seu supervisor lhe apresentou alguns casos de empresas que contrataram a sua para você analisar.

Então, você sabia o quanto eram importantes os osciladores? Viu em quantas aplicações nós usamos? Hoje você saberia dizer em quais outros equipamentos possuem osciladores?

Se não sabe, não se preocupe. No decorrer dessa unidade você vai ser capaz de descobrir.

Ao final desta unidade você será capaz de compreender as características importantes dos AMP-OPs, identificar e analisar os tipos de circuitos. Também conseguirá analisar, entender e projetar um circuito utilizando esse dispositivo eletrônico.

Seção 4.1

Osciladores I

Diálogo aberto

Estamos na primeira seção da última unidade da disciplina de circuitos analógicos. Aprendemos tantos assuntos durante esse período que nem vimos o tempo passar. Vamos relembrar?

Na Unidade 1, aprendemos o primeiro dispositivo, o diodo. Já os transistores vimos na Unidade 2. Na Unidade 3 vimos os famosos AMP-OPs e ficamos impressionados com o número de aplicações que são possíveis ao utilizá-los. Agora, nesta unidade, iremos aprender primeiramente sobre os osciladores e depois sobre os multivibradores.

Em muitos projetos eletrônicos, precisamos ter formas de onda padronizadas, ou seja, uma onda que represente uma forma fixa como: senoidal, triangular, quadrada e outras. Os circuitos que geram essas formas de onda são chamados de osciladores não-linear ou geradores de função.

Você conseguiria pensar em alguma aplicação prática que utiliza esses circuitos? Se não consegue, não tem problema, vou ajudar. O computador, por exemplo, precisa de sinais padronizados. Ele utiliza os pulsos para temporização. O nosso relógio, que usamos no dia a dia, também precisa de um oscilador, e dos mais precisos, já que não pode adiantar, nem atrasar. E agora, ficou mais fácil? Tente pensar em outras aplicações que aplicam esse modelo de circuito.

Nesta primeira seção, aprenderemos a teoria geral dos osciladores e alguns tipos, como: deslocamento de fase, em ponte de Wien e o circuito oscilador sintonizado.

Agora que você já sabe na prática algumas aplicações dos osciladores e o quanto eles são importantes, vamos retornar ao seu estágio na área de engenharia da empresa. Não esqueça que agora você está buscando uma vaga efetiva na empresa, por isso tem que se esforçar mais.

Dando continuidade ao seu estágio na área de engenharia,

o seu supervisor lhe apresentou um novo caso de uma empresa de alta tecnologia que está com problema em um circuito de controle de estoque, que utiliza um sistema de controle de RFID com etiquetas em seus elementos de estoque. Porém, as etiquetas não estão sendo identificadas. As etiquetas, antes de passar para o setor de engenharia, foram testadas pelo setor de qualidade e estão conformes. Acredita-se que se trata de um problema no circuito oscilador para o sinal enviado para identificação. Explique, por meio de um relatório, o que é um circuito oscilador e que características do circuito podem ser investigadas.

Prontos para começar esse novo desafio? Bons estudos!

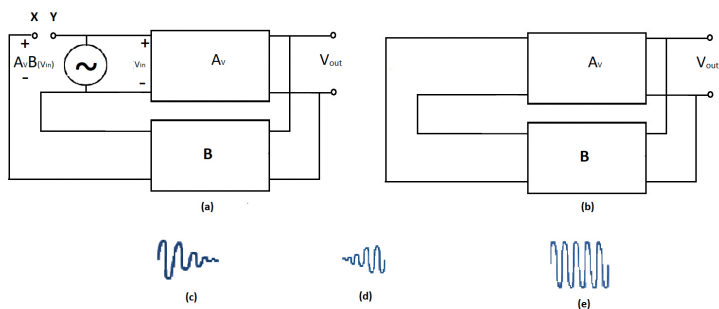
Não pode faltar

Teoria Geral dos Osciladores

Um oscilador é um circuito que gera uma forma de onda periódica. Essa onda é frequentemente uma onda senoidal ou uma onda quadrada. Eles são encontrados na prática em quase todos os circuitos eletrônicos. Ondas senoidais podem ser geradas quase que perfeitas com o uso de osciladores RC em frequências inferiores a 1MHz. Para construirmos um oscilador senoidal vamos utilizar um amplificador com realimentação positiva, ou seja, a realimentação irá ficar no lugar do sinal de entrada. Se a realimentação estiver em fase e for grande suficiente, haverá um sinal na saída.

A Figura 4.1(a) representa uma fonte de tensão CA acionando os terminais de entrada de um amplificador (MALVINO; BATES, 2011).

Figura 4.1 | Tensão de realimentação



Fonte: adaptada de Malvino e Bates (2011).

A tensão de saída é dada pela Equação (1):

$$v_{out} = A_v(v_{in}) \quad (1)$$

Essa tensão de saída geralmente aciona um circuito de realimentação que normalmente é um circuito ressonante. A tensão de realimentação que retorna ao ponto x é dada por (2):

$$v_f = A_v B(v_{in}) \quad (2)$$

Onde B é a fração de realimentação.

Na maior parte dos osciladores, a tensão de realimentação é uma fração da tensão de saída. Nesse caso A_v tem que ser grande o suficiente para exceder as perdas no circuito de realimentação, ou seja, $A_v B = 1$. Se essa condição for respeitada, a forma de onda na saída permanecerá quase a mesma. Essa condição tem o nome de Critério de Barkhausen para oscilação. Quanto mais próximo de um, mais próximo a onda se aproxima de uma onda senoidal.

O deslocamento de fase no amplificador e no circuito de realimentação deve ser igual a 0° para que $A_{v(in)}$ fique em fase com v_{in} .

Se a fonte v_{in} for retirada ao mesmo tempo em que os pontos X e Y, Figura 4.1 (a), forem interconectados, a tensão de realimentação $A_v B(v_{in})$ passará a acionar a entrada do amplificador e na tensão de saída, Figura 4.1 (b), poderá acontecer três casos:

1. $A_v B < 1$ então $A_v B(v_{in}) < v_{in}$, o sinal na tensão de saída desaparecerá (Figura 4.1 (c)).
2. $A_v B > 1$ então $A_v B(v_{in}) > v_{in}$, o sinal na tensão de saída aumentará e o sistema começa a oscilar pela amplificação do sinal de ruído (Figura 4.1 (d)).
3. $A_v B = 1$ então $A_v B(v_{in}) = v_{in}$, o sinal da tensão de saída será uma onda senoidal estável, ou seja, a oscilação se auto sustenta (Figura 4.1 (e)).

Em qualquer oscilador o ganho de malha $A_v B$ é maior que 1 quando o circuito é energizado (MALVINO; BATES, 2011).

Oscilador por deslocamento de fase

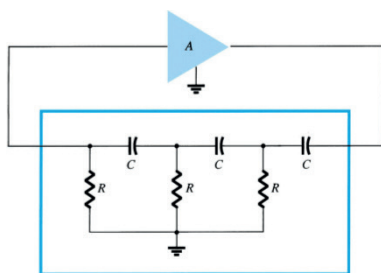
Neste modelo de oscilador notamos um elemento ativo (amplificador) e uma rede de realimentação formada por resistores e capacitores. Esse é um tipo de oscilador que exhibe as características básicas de um circuito com realimentação.



Os requisitos para oscilação são o ganho de malha $A_v B$ maior que 1 e um desvio de fase no circuito de realimentação de 180° , para que aconteça a realimentação positiva.

A Figura 4.2 representa um oscilador de deslocamento de fase ideal. Ideal porque estamos considerando impedância de saída nula e que na sua saída é aplicada uma carga ideal, ou seja, impedância infinita.

Figura 4.2 | Oscilador de deslocamento de fase ideal



Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013, p. 539).

A frequência pode ser encontrada por meio da constante de tempo, denominada RC , do circuito de realimentação e os sinais produzidos são ondas senoidais que variam numa faixa de frequências que vai de hertz até poucos quilohertz. A frequência é definida pela Equação (3):

$$f = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{6}} \quad (3)$$

O deslocamento de fase é 180° e B é dado por (4):

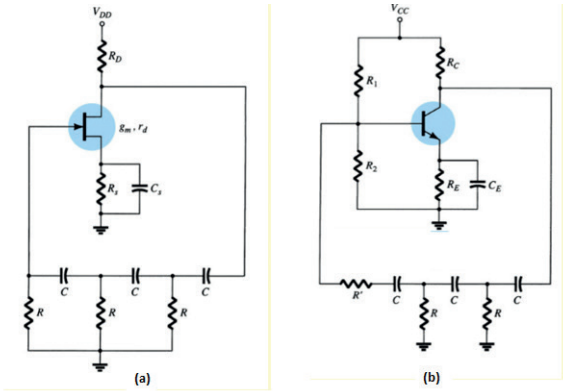
$$B = \frac{1}{29} \quad (4)$$

Para que o ganho de malha $A_v B$ seja maior que 1, o ganho do estágio amplificador deve ser maior que $1/B$, ou seja, $A > 29$.

Podemos encontrar esse modelo de oscilador na produção de sinais de áudio, sirenes e outras aplicações similares.

Podemos ter osciladores por deslocamento de fase real, isto é, que podem ser utilizados na prática. Eles podem ser feitos por FET, por transistores, utilizando CI e outros. A Figura 4.3 (a) representa um oscilador a FET de deslocamento de fase e a Figura 4.3 (b) um oscilador de deslocamento de fase a transistor (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Figura 4.3 | Oscilador de deslocamento de fase usando (a) FET e (b) TBJ



Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013, p. 540).

Analisando a Figura 4.3 (a), nota-se que o estágio amplificador é auto polarizado com um capacitor de desvio sobre o resistor de fonte R_s e um resistor de polarização no dreno, R_D . O valor do ganho do amplificador FET é obtido pela Equação (5):

$$|A| = g_m R_L \tag{5}$$

onde R_L é o paralelo entre R_D e r_d . A frequência é dada por (6):

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{6RC}} \tag{6}$$

Na prática, o ganho do amplificador é projetado para ser um pouco maior do que o necessário para assegurar a operação do oscilador (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).



Considere o circuito da Figura 4.3 (a). Projete um oscilador de deslocamento de fase com FET. Dados $g_m=500\mu S$, $r_d=40k\Omega$ e circuito de realimentação com $R=10k\Omega$. Calcule o valor do capacitor e de R_D para que exista uma oscilação de 1,5KHz quando $A>30$.

O valor do capacitor é dado por:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC} \rightarrow C = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}Rf} \rightarrow \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{6} \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 1,5 \cdot 10^3} = 4,3nF$$

Escolhemos o valor de $A=45$ (maior que o previsto para garantir a oscilação).

$$|A| = g_m R_L \rightarrow R_L = \frac{|A|}{g_m} = \frac{45}{5000 \cdot 10^{-6}} = 0,009 \cdot 10^6 = 9k\Omega$$

Como R_L é o paralelo entre R_D e r_d temos:

$$R_L = \frac{R_D \cdot r_d}{R_D + r_d} \rightarrow R_L \cdot R_D + R_L \cdot r_d = R_D \cdot r_d \rightarrow R_D (R_L - r_d) = -R_L \cdot r_d$$

$$R_D = \frac{-R_L \cdot r_d}{R_L - r_d} = \frac{-9 \cdot 10^3 \cdot 40 \cdot 10^3}{9 \cdot 10^3 - 40 \cdot 10^3} = \frac{-360 \cdot 10^6}{-31 \cdot 10^3} = 11,62k\Omega$$

Analisando a Figura 4.3 (b) o transistor está sendo utilizado como o elemento ativo do estágio amplificador. Nota-se que o sinal realimentado é acoplado por meio do resistor de realimentação R' que está em série com a impedância de entrada R_i do estágio amplificador. A Equação (7) representa a frequência do oscilador.

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \cdot \frac{1}{\sqrt{6 + 4(R_c / R)}} \quad (7)$$

Onde RC é a resistência no coletor. Para que o ganho de malha seja maior que 1, o ganho de corrente do transistor deve ser (8):

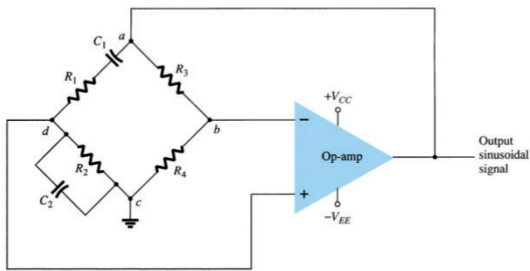
$$h_{fe} > 23 + 29 \cdot \frac{R}{R_c} + 4 \cdot \frac{R_c}{R} \quad (8)$$

Oscilador em ponte de Wien

É um circuito oscilador que opera em baixas e médias frequências, na faixa de 5Hz a 1MHz. Ele é muito utilizado em geradores de áudios comerciais. A Figura 4.4 mostra a forma básica desse circuito. Os osciladores por Ponte de Wien operam corretamente em baixas

frequências, porém, não se adaptam para altas frequências (bem acima de 1MHz). Em alguns tipos de configurações, é possível encontrar instrumentos estabilizadores que têm um perfil não linear de condução, de modo a aprimorar a forma de onda senoidal do sinal gerado, diminuindo as distorções (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Figura 4.4 | Oscilador em Ponte de Wien



Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013, p. 541).

As decorrências do carregamento entre a impedância de entrada do amplificador operacional e a impedância de saída da ponte são desprezados, ficando a equação da ponte como (9):

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} \tag{9}$$

E a frequência do oscilador é dada por (10):

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1C_1R_2C_2}} \tag{10}$$

Em caso de $R_1=R_2$, chamamos os resistores de R e os capacitores $C_1=C_2$ de C. Para essa configuração, em particular, a frequência do oscilador é (11):

$$f_o = \frac{1}{2\pi RC} \tag{11}$$

e

$$\frac{R_3}{R_4} = 2 \tag{12}$$

A Equação (12) nos diz que uma razão maior que 2 proporcionará um ganho de malha suficiente para que o circuito oscile na frequência calculada pela equação (11).

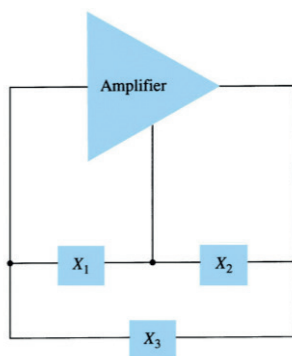


Observando a Figura 4.4, podemos dizer que o oscilador em Ponte de Wien é um oscilador que trabalha com realimentação positiva e negativa?

Circuito oscilador sintonizado

Observando a Figura 4.5, percebemos que, dependendo dos elementos de reatância (x_1 , x_2 e x_3), obteremos vários circuitos osciladores diferentes (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Figura 4.5 | Configuração básica do circuito oscilador



Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013, p. 542).

Alguns tipos de osciladores sintonizados são: osciladores Colpitts, osciladores Hartley e entrada sintonizada e saída sintonizada.

O Quadro 4.1 mostra qual o elemento de reatância para cada tipo de oscilador sintonizado.

Quadro 4.1 | Tipos de Osciladores

Tipo de Oscilador	X1	X2	X3
Oscilador Colpitts	C	C	L
Oscilador Hartley	L	L	C
Entrada sintonizada, saída sintonizada	LC	LC	-----

Fonte: adaptado de Boylestad e Nashelsky (2013).

Oscilador Colpitts

Um oscilador Colpitts LC pode ser utilizado para produzir oscilações em alta frequência. Esse circuito pode ser usado para

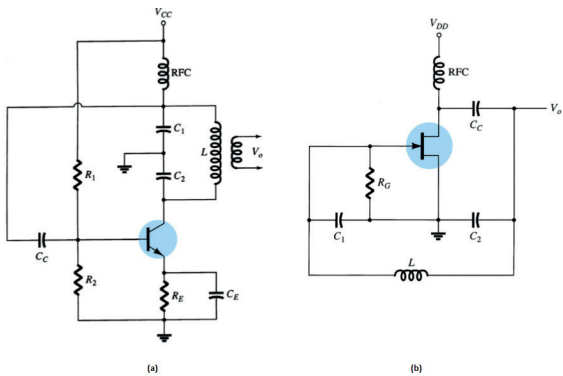
frequências entre 1MHz e 500MHz, esse valor está bem acima da frequência unitária da maioria dos AMP-OPs. O oscilador Colpitts pode ser implementado com TBJ, FET e com CI. A Figura 4.6 (a) representa o oscilador implementado com TBJ e a Figura 4.6 (b) com FET (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013). A frequência de oscilação é dada pela Equação (13):

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{eq}}} \tag{13}$$

Onde C_{eq} é a associação dos capacitores dado por (14):

$$C_{eq} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \tag{14}$$

Figura 4.6 | Oscilador Colpitts em TBJ e FET

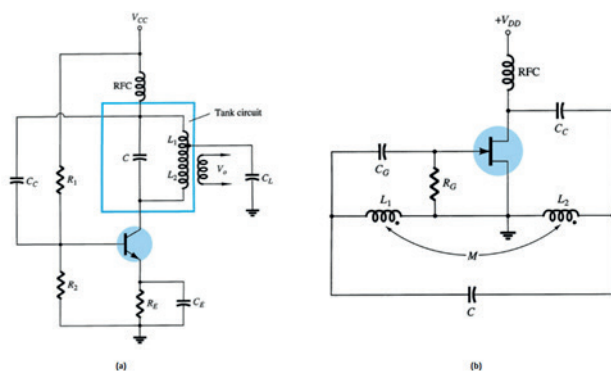


Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013, p. 542 e 543).

Oscilador Hartley

O oscilador Hartley pode ser implementado com TBJ, FET e com CI. A Figura 4.7 (a) representa o oscilador implementado com TBJ e a Figura 4.7 (b) com FET. Observe na Figura 4.7 (b) que os indutores L1 e L2 tem um acoplamento mútuo (M). Esse acoplamento é levado em conta na hora de se calcular a indutância equivalente (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Figura 4.7 | Oscilador Hartley em TBJ e FET



Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013, p. 543 e 544).

A frequência de oscilação é dada pela Equação (15):

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq}C}} \quad (15)$$

Onde L_{eq} é a associação dos indutores dado por (16):

$$L_{eq} = L_1 + L_2 + 2M \quad (16)$$



Pesquise mais

Saiba um pouco mais sobre os osciladores acessando o link: INSTITUTO NCB. **Osciladores:** o que é preciso saber? (ART 499) <<https://goo.gl/XV486J>>. Acesso em: 3 abr. 2018.

Sem medo de errar

O seu estágio na área de engenharia continua muito bem e você está progredindo a olhos vistos, diante desse progresso o seu supervisor lhe apresentou um novo caso de uma empresa de alta tecnologia que está com problema em um circuito de controle de estoque que utiliza um sistema de controle de RFID com etiquetas em seus elementos de estoque. Porém, as etiquetas não estão sendo identificadas. As etiquetas, antes de passar para o setor de engenharia, foram testadas pelo setor de qualidade e estão conformes. Acredita-se que se trata de um problema no circuito

oscilador para o sinal enviado para identificação. Explique por meio de um relatório o que é um circuito oscilador e que características do circuito podem ser investigadas.

Os circuitos osciladores são circuitos que têm a capacidade de produzir um sinal de saída sem um sinal de entrada, usando realimentação positiva.

A realimentação substitui o sinal de entrada. Por exemplo, em frequências menores que 1MHz usamos osciladores RC para gerar ondas senoidais. Para os osciladores de baixa frequência usamos AMP-OPs e circuitos RC para conseguir a frequência de oscilação que desejamos obter. Para os osciladores com frequência acima de 1MHz, utilizamos circuitos LC a fim de obter a frequência de oscilação desejada.

Devemos investigar primeiramente se os componentes do circuito estão funcionando perfeitamente e qual a frequência que o RFID trabalha: alta ou baixa.

Sabendo a frequência, verificamos se o circuito oscilador está gerando a frequência correta. Caso não esteja, faça o cálculo de qual o valor da frequência desejada e substitua os componentes do circuito.

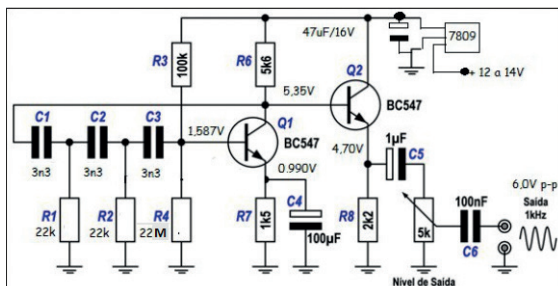
Avançando na prática

Pré-amplificador de áudio

Descrição da situação-problema

O seu chefe pediu para que você olhasse o pré-amplificador de áudio da empresa que fornecesse o valor aproximado de 1KHz. Esse circuito foi projetado por um ex-funcionário, porém, não está funcionando corretamente. Ele lhe entregou o circuito do equipamento e em sua primeira análise, você identificou que o problema está no oscilador. Explique onde está o oscilador da Figura 4.8, porque ele foi utilizado e onde poderia estar o problema.

Figura 4.8 | Circuito oscilador senoidal de 1kHz



Fonte: adaptado de Brites e Paulo (2014).

Resolução da situação-problema

Observando a Figura 4.8, notamos que o oscilador está representado pelo transistor Q1 e os três resistores e três capacitores. Notamos também que o sinal do coletor de Q1 é realimentado positivamente para a base por meio da malha composta pelos três resistores e pelos três capacitores. Chamamos esse oscilador de oscilador de deslocamento de fase.

Observando os valores dos resistores, notamos que o problema pode estar no resistor R4, pois possui um valor bem maior que os demais e deveria ser igual. A possível escolha do oscilador por deslocamento de fase deve-se ao fato de ser relativamente simples, de fornecer frequências por volta de 1kHz e por sua forma de onda ser menos distorcida possível.

O valor da frequência pode ser calculado por meio de:

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \cdot \frac{1}{\sqrt{6 + 4(R_c/R)}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot (22 \cdot 10^3) \cdot (3,3 \cdot 10^{-9})} \cdot \frac{1}{\sqrt{6 + 4(5,6 \cdot 10^3 / 22 \cdot 10^3)}}$$

$$\frac{1}{0,000456} \cdot \frac{1}{\sqrt{7,01}} = 2192,982 \cdot 0,377 = 828,277 \approx 0,83 \text{ KHz}$$

Faça valer a pena

1. Os osciladores são circuitos que produzem formas de onda senoidais, quadradas e triangulares. Podem ser encontrados praticamente em todos os circuitos eletrônicos e formam a base dos relógios e dos arranjos de regulação, assim como dos geradores de sinal e função.

A maioria dos osciladores precisa de um amplificador em:

- a) Realimentação positiva.
- b) Realimentação negativa.
- c) Os dois tipos de realimentação: positiva e negativa.
- d) Um circuito LC.
- e) Um circuito RC.

2. O oscilador em ponte de Wien é um circuito oscilador do tipo RC que opera em baixas e médias frequências, na faixa de 5Hz a 1MHz. Na prática, é mais utilizado em baixas frequências e é muito utilizado em geradores de áudios comerciais. Esse tipo de oscilador gera uma onda senoidal praticamente perfeita.

Determine o valor aproximado de C de um oscilador com ponte de Wien para operação em $f_o = 10\text{KHz}$ e $R = 150\text{K}\Omega$. Obs.: Considere valores iguais de $R_1 = R_2 = R$ e $C_1 = C_2 = C$

- a) 10,61pF.
- b) 10,61nF.
- c) 10,61μF.
- d) 10KF.
- e) 100KF.

3. O nome do oscilador Hartley é uma homenagem ao seu inventor o engenheiro Ralph Hartley. O **oscilador Hartley** tem como principal característica um circuito LC no coletor e a frequência do sinal produzido é determinada por uma bobina e um capacitor.

Como podemos variar a frequência em um oscilador Hartley?

- a) Variando um resistor.
- b) Variando dois resistores.
- c) Variando dois capacitores.
- d) Variando três resistores.
- e) Variando um capacitor.

Seção 4.2

Osciladores II

Diálogo aberto

Olá!

Já chegamos na segunda seção da última unidade da disciplina de Circuitos Analógicos. Estamos na reta final do aprendizado dessa disciplina. Nesta sessão iremos dar continuidade aos tipos de circuitos osciladores dos quais já vimos uma parte na primeira seção. Iremos ver especificamente os osciladores a cristal, os osciladores com transistor unijunção, os osciladores de relaxação e os osciladores de tensão.

Muitos equipamentos eletrônicos precisam de um certo sincronismo para funcionar, por exemplo: o que faz com que o seu computador realize as operações de forma sincronizada e em alta velocidade? E o seu relógio? O que faz com que ele funcione de modo exato independentemente das condições do ambiente? A resposta para todas essas perguntas é o cristal de quartzo, mas como esse cristal pode fazer tudo isso? Nesta sessão iremos responder essa pergunta e muitas outras a respeito dos osciladores.

Além do computador e do relógio, será que há outros equipamentos que precisam de sincronismo? Será que poderemos usar outro tipo de oscilador nos relógios?

Os toca discos e o microfone também possuem osciladores, você sabia?

Durante essa seção também vamos descobrir qual o tipo de oscilador esses equipamentos utilizam.

Agora que você já conhece alguns osciladores e também já viu algumas aplicações práticas, consegue perceber o quanto os osciladores são importantes?

Vamos retornar ao seu estágio na área de engenharia da empresa. Não esqueça que você está buscando uma vaga efetiva na empresa, por isso tem que se esforçar cada vez mais. O seu estágio na área de engenharia está quase terminando e você está preocupado porque

está “lutando” para conseguir uma vaga definitiva na empresa. O seu supervisor está com um problema em um dos computadores mais importantes da empresa e foi relatado que as operações não estão bem sincronizadas, a velocidade de processamento está baixa e seu relógio interno está sem precisão. Diante dessas características mencionadas, explique por meio de um relatório, para o seu supervisor, onde está o possível defeito.

Prontos para começar esse novo desafio?

Bons estudos!

Não pode faltar

Oscilador a Cristal

Quando é necessário que a frequência de oscilação seja precisa e estável, a melhor escolha é usar um oscilador a cristal. Esse oscilador nada mais é que um oscilador sintonizado que utiliza um cristal piezoelétrico. Ao aplicar uma tensão CA em alguns cristais eles apresentam um efeito chamado de **efeito piezoelétrico**. Esse efeito nada mais é do que o cristal que vibra mecanicamente na frequência em que foi aplicada a tensão. O efeito inverso também é válido, se nós fizermos o cristal vibrar ele irá gerar uma tensão CA. Alguns tipos de cristais que apresentam o efeito piezoelétrico são: quartzo, turmalina e os sais de Rochelle.

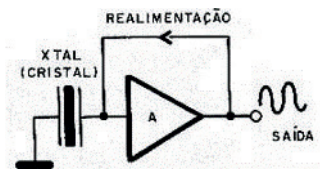
Os sais de Rochelle são os que vibram mais, porém, são os mais frágeis mecanicamente. São utilizados em agulhas de toca discos, alto-falantes e microfones. A turmalina é a mais cara e a mais forte, porém, apresenta o menor efeito piezoelétrico. Pode ser usada para altas frequências.

O quartzo é barato e encontrado facilmente na natureza, em relação ao efeito piezoelétrica fica no meio termo entre os sais de Rochelle e a turmalina, por essa razão é utilizado em osciladores de rádio frequência (RF) e nos filtros.

Para ser utilizado, é retirada uma fatia retangular do cristal de quartzo e essa fatia é montada entre duas placas metálicas (MALVINO; BATES, 2011). A frequência do oscilador vai depender do modo como o cristal foi cortado. Um cristal sozinho não entra em vibração de forma espontânea. Ele precisa que seja excitado de alguma forma. Essa excitação é obtida por meio de um circuito oscilador, que nesse

caso pode ser um amplificador. A Figura 4.9 representa um circuito oscilador com cristal. (MALVINO; BATES, 2011)

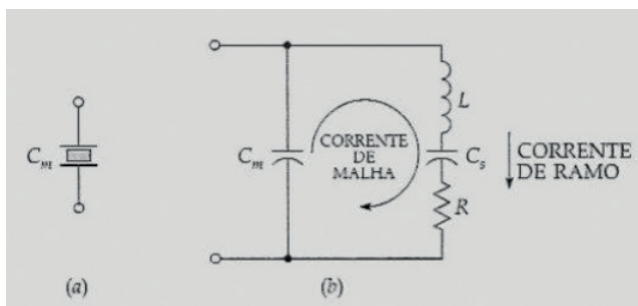
Figura 4.9 | Circuito oscilador com cristal



Fonte: Instituto NCB (2017, [on-line]).

A frequência dos osciladores tende a mudar com o tempo. Essa mudança é menor que uma parte em 10^6 por dia. A Figura 4.10 representa o circuito equivalente do cristal de vibração.

Figura 4.10 | (a) Capacitância de Montagem (C_m); (b) Circuito Equivalente CA do cristal de vibração



Fonte: Malvino e Bates (2011, p. 349).

Podemos calcular as frequências de ressonância em série (f_s) e em paralelo (f_p) de um cristal. A frequência de ressonância em série é a frequência ressonante do ramo RLC e pode ser calculada por meio da Equação (16):

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_s}} \quad (16)$$

Onde C_s é a capacitância em série. Já a frequência em paralelo de um cristal é calculada por meio de (17):

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_p}} \quad (17)$$

Onde C_p é a capacitância em paralelo equivalente, que é dada por (18):

$$C_p = \frac{C_m C_s}{C_m + C_s} \quad (18)$$

Onde C_m é a capacitância de montagem.



Assimile

Em qualquer cristal, C_s é muito menor que C_m e, por essa razão, a frequência de ressonância em paralelo é um pouco maior que a frequência de ressonância em série.

Para excitar um cristal no modo série ele deve ser conectado em série no circuito de realimentação e em relação a frequência ressonante-série do cristal, sua impedância deve ser a menor possível para que haja uma realimentação positiva do sinal.



Exemplificando

Um cristal possui os seguintes valores: $L=35H$, $C_s=0,05pF$, $R=2K\Omega$ e $C_m=10pF$. Calcule as frequências em paralelo e em série para esse cristal?

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_s}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{3 \cdot 0,05 \times 10^{-12}}} = 411KHz$$

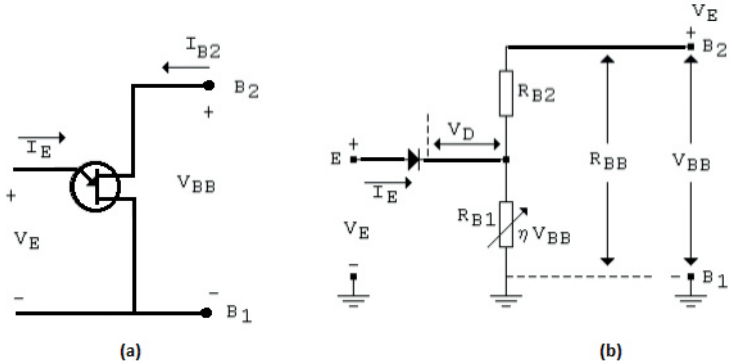
$$C_p = \frac{C_m C_s}{C_m + C_s} = \frac{10 \times 10^{-12} \cdot 0,05 \times 10^{-12}}{10 \times 10^{-12} + 0,05 \times 10^{-12}} = 0,0498 pF$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_p}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{3 \cdot 0,0498 \times 10^{-12}}} = 412KHz$$

Oscilador com Transistor Unijunção (UJT)

É um oscilador muito utilizado em aplicações digitais e pode ser usado junto com os osciladores de relaxação. A Figura 4.11 (a) representa o símbolo do transistor unijunção e (b) o circuito equivalente.

Figura 4.11 | (a) Símbolo do transistor unijunção e (b) circuito equivalente



Fonte: elaborada pela autora.

O valor de R_{B1} vai variar de acordo com a corrente do emissor que é obtida por meio da Equação (19):

$$R_{B1} = \eta \cdot R_{BB} \quad (19)$$

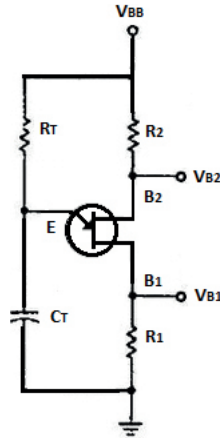
Onde R_{BB} é a soma entre R_{B1} e R_{B2} e η é denominado taxa de separação intrínseca.

A frequência de oscilação (f_o) é calculada por meio de (20):

$$f_o \cong \frac{1}{R_T \cdot C_T \cdot \ln[1/(1-\eta)]} \quad (20)$$

Onde R_T e C_T são o resistor e o capacitor, que determinam o período da oscilação, e η é a razão de compensação intrínseca. Um valor típico de η para o oscilador com transistor unijunção é entre 0,4 e 0,6. A Figura 4.12 representa o circuito oscilador com transistor unijunção.

Figura 4.12 | Circuito oscilador com transistor unijunção



Fonte: elaborada pela autora.

Nota-se, na Figura 4.12, que o capacitor C_T é carregado por V_{BB} por meio do resistor R_T (MALVINO; BATES, 2011). Uma das aplicações comuns de um UJT é como disparo de outros dispositivos. Observando a Figura 4.12, para garantir o disparo, o valor de R_T pode ser escolhido por meio da Equação (21):

$$\frac{V_{BB} - V_V}{I_V} < R_T < \frac{V_{BB} - V_p}{I_p} \quad (21)$$

Onde V_p é a tensão necessária para ligar o UJT (tensão de pico), ou seja, o potencial de disparo do emissor, V_V é a tensão de vale parâmetro específico do UJT, que significa que o ponto onde a tensão de emissor não é mais suficiente para manter a polarização direta da junção, I_V é corrente no vale e I_p é a corrente de pico.

O valor de V_p é calculado por (22):

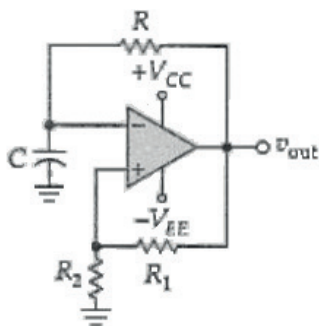
$$V_p = V_D + \frac{R_{B1} + R_1}{R_{BB} + R_1} \cdot V_{BB} \quad (22)$$

onde V_D é igual a 0,7V (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Osciladores de Relaxação

É um circuito que gera um sinal de saída no qual a frequência irá depender da carga do capacitor. A Figura 4.13 representa um oscilador de relaxação.

Figura 4.13 | Oscilador de relaxação



Fonte: Malvino e Bates (2011, p. 309).

Esse oscilador produz uma onda quadrada na qual o período (T) é determinado pela Equação (23):

$$T = 2 \cdot R \cdot C \cdot \ln \left(\frac{1+B}{1-B} \right) \quad (23)$$

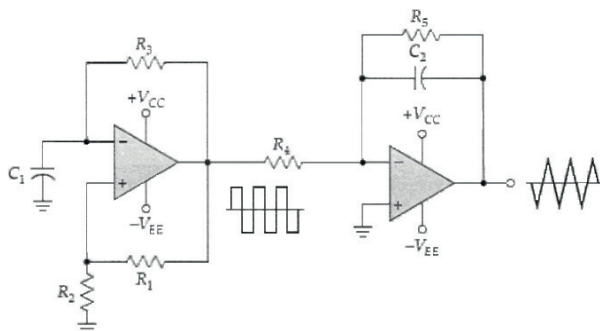
Onde B é a fração de realimentação e é dada por (24):

$$B = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (24)$$

Se aumentarmos a constante de tempo RC , levará mais tempo para que a tensão no capacitor alcance os pontos de comutação, assim, a frequência será menor.

A partir do oscilador de relaxação, podemos gerar uma onda triangular na saída. Para isso basta acrescentar na saída do circuito da Figura 4.13 um circuito integrador, conforme a Figura 4.14.

Figura 4.14 | Gerador de onda triangular



Fonte: Malvino e Bates (2011, p. 309).

Nesse caso, o período é dado por (25):

$$T = 2 \cdot R_3 \cdot C_1 \cdot \ln\left(\frac{1+B}{1-B}\right) \quad (25)$$

A fração de realimentação continua igual a (20). Também podemos calcular a tensão de saída por meio de (26):

$$V_{out(pp)} = \frac{T}{2 \cdot R_4 \cdot C_2} \cdot V_{sat} \quad (26)$$

Onde V_{sat} é a tensão de saída do oscilador de relaxação (MALVINO; BATES, 2011).

A frequência do sinal é dada por (27):

$$f = \frac{1}{T} \quad (27)$$



Reflita

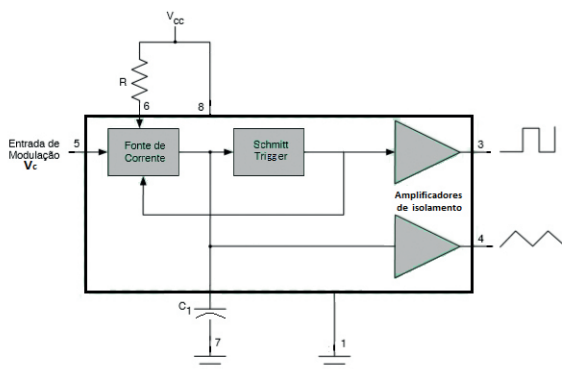
Reflita por que conseguimos gerar uma onda triangular a partir de um oscilador de relaxação, acrescentando somente um circuito integrador.

Osciladores de Tensão

Oscilador controlado por tensão (VCO – *Voltage Controlled Oscillator*) é um circuito que tem na saída um sinal variável que normalmente é uma onda quadrada ou triangular. A frequência é controlada por uma tensão em corrente contínua. Esse circuito também é chamado de conversor tensão-frequência.

Um exemplo do oscilador controlado por tensão é o CI 566. Esse CI possui circuitos internos que geram sinais de ondas triangulares e quadradas. Um resistor e um capacitor colocados externamente ao CI fixam primeiramente a frequência que é variada pela tensão DC aplicada. A Figura 4.15 representa o diagrama de blocos do CI 566.

Figura 4.15 | Gerador de funções com CI 566



Fonte: adaptada de Boylestad e Nashelsky (2013).

Nota-se, na Figura 4.15, a numeração dos pinos do CI 566. O pino 1 representa o terra, os pinos 3 e 4 representam respectivamente a saída da onda quadrada e triangular. O pino 5 é a entrada da modulação V_c e os pinos 6, 7 e 8 são respectivamente o resistor, o capacitor e a tensão de entrada. A velocidade de carga e descarga do capacitor depende da corrente que passa pelo resistor. O valor dessa corrente afetará diretamente a frequência de oscilação. Também podemos aplicar uma tensão externa no CI que também irá alterar a velocidade de carga e descarga do capacitor. O comparador Schmitt Trigger é responsável por chavear a fonte de corrente entre a carga e a descarga do capacitor. A carga e descarga do capacitor é responsável por formar a onda triangular e a saída do comparador irá formar a onda quadrada. Esses sinais são amplificados.

A frequência livre ou frequência central de operação, f_o , é dada pela Equação (28):

$$f_o = \frac{2}{R_1 \cdot C_1} \left(\frac{V^+ - V_c}{V^+} \right) \quad (28)$$

A Equação (24) possui algumas restrições em relação aos valores que são (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013):

- $2K\Omega \leq R_1 \leq 20K\Omega$.
- $\frac{3}{4}V^+ \leq V_c \leq V^+$.
- $f_o \leq 1MHz$.

- $10V \leq V^+ \leq 24V$.



Pesquise mais

Pesquise mais sobre os circuitos osciladores controlados por tensão (VCO) em:

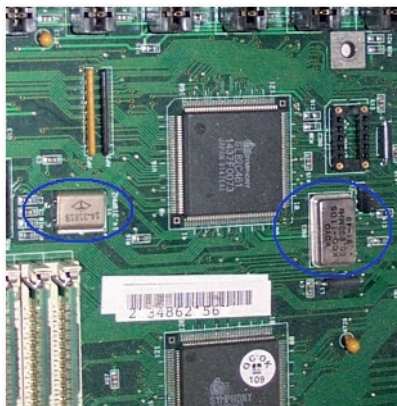
INSTITUTO NCB. **10 circuitos de VCOs (ART1130)**. Disponível em: <https://goo.gl/EtDbJj>. Acesso em: 4 abr. 2018.

Sem medo de errar

O seu estágio na área de engenharia está quase terminando e você está preocupado porque está “lutando” para conseguir uma vaga definitiva na empresa. O seu supervisor está com um problema em um dos computadores mais importantes da empresa e foi relatado que as operações não estão bem sincronizadas, a velocidade de processamento está baixa e seu relógio interno está sem precisão. Diante dessas características mencionadas, explique por meio de um relatório para o seu supervisor onde está o possível defeito.

O computador sempre realiza operações de forma sincronizada, precisa, estável e em alta velocidade. O que permite esse sincronismo são os osciladores. Como o computador apresenta problema no sincronismo, velocidade de processamento baixa e o relógio interno não está preciso, possivelmente o problema está no circuito oscilador. Esse oscilador nada mais é que um oscilador sintonizado que utiliza um cristal piezoelétrico. Entre os cristais possíveis o quartzo é a melhor escolha pois é barato e encontrado facilmente na natureza. Em relação ao efeito piezoelétrico, apresenta um valor intermediário. Possivelmente, quando você analisar esse circuito encontrará algum defeito nos componentes, como capacitores ou resistores, ou até mesmo no cristal. A Figura 4.8 mostra uma parte da placa de um PC, onde as marcações em azul representam dois cristais, um de 14.318 MHz e outro de 25 MHz (frequência está marcada na placa metálica). Os cristais propriamente ditos encontram-se embaixo dessa placa metálica. O de 14318MHz é o responsável por gerar diversos sinais para o gerador de frequência e o de 25MHz define o *clock* dos CIs de Codec de áudio e LAN Ethernet.

Figura 4.16 | Placa de um PC em destaque o cristal



Fonte: Moreira (2010, [on-line]).

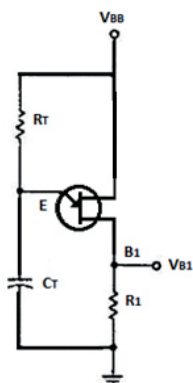
Avançando na prática

Disparo do UJT

Descrição da situação-problema

Seu supervisor lhe entregou um novo caso sobre circuitos osciladores. A Figura 4.17 representa um oscilador de relaxação, porém, o projeto não foi feito de forma correta e o circuito não está disparando o UJT. Verifique onde está o problema e proponha uma solução.

Figura 4.17 | Oscilador



Fonte: elaborada pela autora.

Dados: $R_T = 800\Omega$; $C_T = 0,1\mu F$; $R_1 = 0,1K\Omega$; $V_{BB} = 12V$;
 $R_{BB} = 5K\Omega$; $\eta = 0,6$; $V_V = 1V$; $I_V = 10mA$; $I_p = 10\mu A$

Resolução da situação-problema

Possivelmente o problema está no valor do resistor R_T , pois ele é o responsável por garantir o disparo do UJT. Para ter certeza que a suposição está correta devemos calcular primeiramente a tensão necessária para ligar o UJT, ou seja, V_p , e depois verificarmos se R_T está dentro da faixa de valores permitidos. Para o cálculo de V_p , precisamos encontrar primeiramente o valor de R_{B1} :

$R_{B1} = \eta \cdot R_{BB} = 0,6 \cdot 5 \times 10^3 = 3K\Omega$. Após encontrarmos R_{B1} , calculamos V_p :

$$V_p = V_D + \frac{R_{B1} + R_1}{R_{BB} + R_1} \cdot V_{BB} = 0,7 + \frac{3 \times 10^3 + 0,1 \times 10^3}{5 \times 10^3 + 0,1 \times 10^3} \cdot 12 = 7,99V. \text{ Por último,}$$

calculamos a faixa de valores de R_T que é necessário para garantir o disparo do UJT:

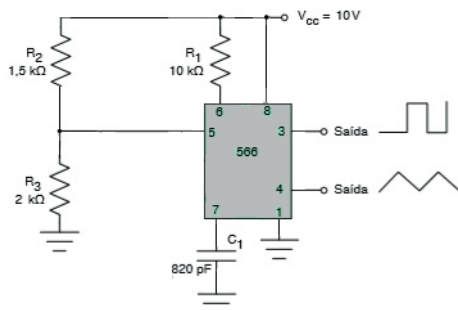
$$\frac{V_{BB} - V_V}{I_V} < R_T < \frac{V_{BB} - V_p}{I_p} \rightarrow \frac{12 - 1}{10 \times 10^{-3}} < R_T < \frac{12 - 7,99}{10 \times 10^{-6}} = 1,1K\Omega < R_T < 401K\Omega.$$

Observamos no circuito que o valor de R_T é de 800Ω , esse valor está fora da faixa calculada, ou seja, a suposição está correta. O problema no circuito está realmente no valor de R_T , que deve ser substituído por um valor dentro da faixa calculada.

Faça valer a pena

1. O gerador de funções 566 é usado para fornecer formas de onda, tanto retangular, quanto triangular em uma frequência fixa, que é determinada por C_1 , R_1 e V_c . Na montagem, uma das configurações utilizadas por esse gerador é a configuração por divisor de tensão.

Calcule o valor aproximado da frequência central de um VCO, utilizando o circuito integrado 566, como mostra a Figura a seguir:

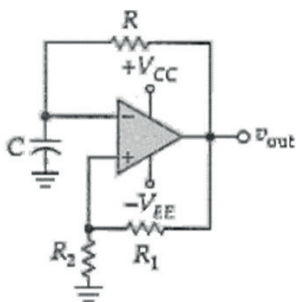


Fonte: adaptada de Boylestad e Nashelsky (2013).

- a) 40,73KHz.
- b) 32,5KHz.
- c) 204,8KHz.
- d) 50KHz.
- e) 38,7KHz.

2. Osciladores de relaxação são osciladores formados por um circuito que gera um sinal de saída do qual a frequência irá depender da carga do capacitor. Esse circuito isoladamente produz um sinal quadrado na saída, porém, se for interligado com um integrador produzirá uma onda triangular.

Qual o valor da frequência e da tensão de saída do circuito oscilador da figura a seguir? Considere os seguintes valores: $R=1,5\text{K}\Omega$, $R_1=3\text{K}\Omega$, $R_2=16\text{K}\Omega$ e $C=0,1\mu\text{F}$. Os valores de V_{CC} e V_{EE} são respectivamente: $+15\text{V}$ e -15V .



- a) 1,32Hz e 25,5V.
- b) 1,32Hz e 15V.
- c) 1,32Hz e 30V.
- d) 7,53KHz e 15V.
- e) 753Hz e 30V.

3. Muitos equipamentos eletrônicos precisam de um certo sincronismo para funcionar, por exemplo: o computador realiza as operações de forma sincronizada e em alta velocidade, o relógio eletrônico funciona de modo exato, independentemente das condições do ambiente. Para esses e muitos outros equipamentos funcionarem são necessários circuitos chamados de osciladores.

Qual é o tipo de oscilador encontrado em um relógio de pulso eletrônico?

- a) Oscilador com transistor unijunção.
- b) VCO.
- c) Relaxação.
- d) Colpitts.
- e) Cristal de quartzo.

Seção 4.3

Multivibradores

Diálogo aberto

Olá!

Já chegamos na última seção da última unidade da disciplina de circuitos analógicos. Durante essas quatro unidades aprendemos sobre os diodos, os transistores bipolares de junção, os transistores de efeito de campo, os AMP-OPs e agora, na última unidade, os osciladores.

Nesta seção iremos ver o circuito integrado 555 (CI), os três tipos de multivibradores: monoestáveis, biestáveis e astáveis e o disparador Schmitt.

Os circuitos digitais operam de forma sincronizada e muitas vezes por meio de um pulso retangular. Os multivibradores são circuitos capazes de gerar esses pulsos, funcionando como um clock. Os multivibradores astáveis, por exemplo, não têm nenhum estado estável e mudam de velocidade de acordo com o valor do resistor e do capacitor usado, por essa razão são capazes de gerar os pulsos retangulares. Eles são utilizados em equipamentos de eletrônica, como os osciloscópios e os geradores de funções.

Você sabia que esses multivibradores também podem ser utilizados como sinalizador na saída de garagens, onde duas lâmpadas ficam piscando alternadamente?

E onde mais podemos encontrar os multivibradores? Pense um pouco que no decorrer da seção falaremos a respeito.

Sobre o CI 555, podemos dizer que é um dos chips de maior sucesso, pois funciona como oscilador e time. Sem exagero, o 555 possui centenas de aplicações, dentre elas: computadores, brinquedos e instrumento musical.

Agora vamos retornar ao seu estágio no departamento de engenharia da empresa. Essa é sua última tarefa como estagiário no setor de engenharia, pois devido a sua dedicação e competências no decorrer do seu estágio você será contratado para trabalhar

definitivamente como engenheiro. A sua última tarefa será fazer uma parte do instrumento musical: Theremin Digital. Para isso você deve pesquisar qual tipo de multivibrador você deve usar: monoestável ou astável? Explique a sua decisão por meio de um relatório.

Estamos finalizando a disciplina de circuitos analógicos, espero que tenham aproveitado e aprendido muito.

Bons estudos!

Não pode faltar

CI 555 (Circuito Integrado 555)

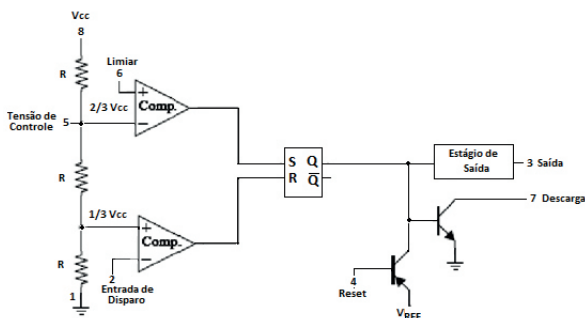
O circuito integrado (CI) 555 foi criado em 1970 pelo engenheiro Hans R. Camenzind e comercializado em 1971. Nessa época poucas empresas do **Vale do Silício** trabalhavam na fabricação de circuitos integrados.

O temporizador 555 é um circuito integrado analógico-digital. Ele é feito por uma combinação de circuitos comparadores e de um *flip-flop*. Esse CI é muito versátil e, por essa razão, é muito utilizado. Ele pode operar de três modos: monoestável, biestável e astável.

No modo astável o CI 555 pode gerar ondas retangulares com um ciclo de trabalho variável, ou seja, não possui estado estável, funciona como oscilador. Pode ser utilizado como pisca-pisca de LED, geradores de pulsos, alarmes, etc. Já no modo monoestável, ele possui um estado estável e pode gerar atrasos de tempo precisos, que vão desde microssegundos até horas, funciona como um disparador. Pode ser utilizado como temporizadores, interruptores de toque, etc. No modo biestável possui dois estados estáveis definidos, pode ser utilizado como interruptores imunes a ruído.

A Figura 4.18 representa em detalhes o CI 555, observa-se que há três resistores ligados em série que determinam o nível de tensão para os dois comparadores em $2 \cdot V_{cc}/3$ e $V_{cc}/3$. A saída dos comparadores irá habilitar ou desabilitar o *flip-flop* RS. A saída do *flip-flop* RS é conectada a um estágio amplificador. O *flip-flop* também opera um transistor dentro do CI, onde o coletor desse transistor tem a função de descarregar o capacitor de temporização (BOYLESTAD; NASHESKY, 2013).

Figura 4.18 | CI 555



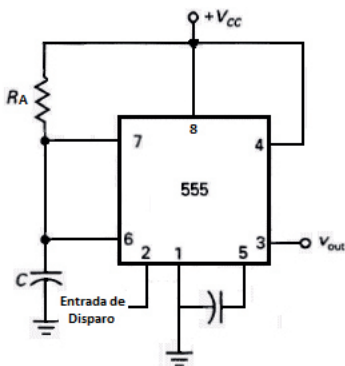
Fonte: adaptada de Boylestad e Nashelsky (2013).

Multivibradores Monoestáveis

Um multivibrador é um circuito que possui dois estados e pode ter de zero a dois estados estáveis. Quando o CI 555 é usado no modo monoestável dizemos que ele é um multivibrador monoestável, pois possui apenas um estado estável. O modo monoestável também é conhecido como multivibrador de único disparo (one-shot).

O multivibrador monoestável é estável no estado baixo, após receber um disparo a saída muda para o estado alto e retorna para o estado baixo. A saída fica no alto de acordo com a duração do pulso, por isso não é estável no estado alto. A duração do pulso é controlada por um capacitor e um resistor externo ao CI. A Figura 4.19 representa o temporizador 555 em operação monoestável. (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Figura 4.19 | Temporizador 555 como monoestável



Fonte: adaptada de Boylestad e Nashelsky (2013).

O pino 2 representa a entrada do sinal do disparo, quando esse sinal ficar negativo a saída representada pelo pino 3 vai para o nível alto e permanece nesse nível durante um certo período de tempo, que podemos calcular por meio da Equação (29):

$$T_{alto} \approx 1,1 \cdot R_A \cdot C \quad (29)$$

Observando novamente a Figura 4.18 percebemos que o comparador 2 irá disparar o *flip-flop* quando o sinal na entrada estiver na borda negativa. Na saída aparecerá uma tensão de nível alto. O capacitor, C, irá carregar por meio do resistor R_A até o valor de V_{cc} . Quando a tensão no capacitor atingir o valor de $2 \cdot V_{cc}/3$ (limiar), o comparador 1 irá disparar o flip-flop, que produzirá uma saída de nível baixo. O transistor de descarga, nessa fase, também estará em nível baixo, assim o capacitor ficará em um nível bem próximo de zero até ser disparado novamente (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).



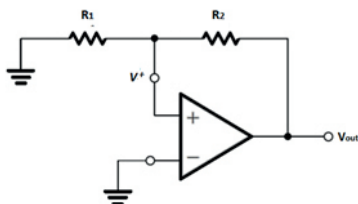
Reflita

A largura de pulso de um multivibrador monoestável pode aumentar ou diminuir de acordo com os componentes que o compõem. Reflita: para que possamos aumentar a largura do pulso do multivibrador monostável devemos aumentar ou diminuir os valores dos componentes?

Multivibradores Biestáveis e Astáveis

O multivibrador biestável é um circuito que possui dois estados estáveis na saída. Por meio de um impulso na entrada, o multivibrador, que está em um dos estados estáveis, passará para o outro estado estável. A biestabilidade pode ser alcançada por meio de um amplificador com realimentação positiva e ganho de malha maior que um. A Figura 4.20 representa um multivibrador biestável.

Figura 4.20 | Multivibrador biestável



Fonte: elaborada pela autora.

Os resistores R_1 e R_2 formam um divisor de tensão, que fornece uma fração da tensão de saída. Essa fração é chamada de fração de realimentação (B) e é dada por (30)

$$B = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (30)$$

O amplificador pode saturar em direção à tensão positiva ou à tensão negativa. Se ele saturar em direção à tensão positiva temos (31):

$$\begin{aligned} V_o &= L^+ \\ V^+ &= L^+ \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \end{aligned} \quad (31)$$

Onde V^+ é o terminal positivo do amplificador e L^+ é o máximo valor de saturação positiva.

Se o amplificador saturar em direção à tensão negativa temos (32):

$$\begin{aligned} V_o &= L^- \\ V^+ &= L^- \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \end{aligned} \quad (32)$$



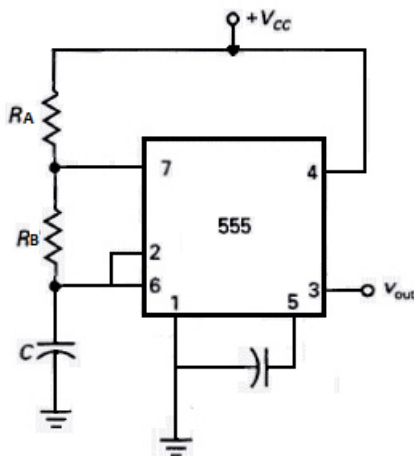
Assimile

O circuito multivibrador biestável tem dois estados ativos. Os dois estados podem se manter indefinidamente, até um disparo ser realizado na entrada, porém, existe outro estado de equilíbrio instável em que $V^+=0$ e $V_{out}=0$. Qualquer distúrbio (desvio de tensão ou ruído) o circuito comuta para um dos outros estados.

Uma das aplicações mais comuns do CI 555 é quando ele é utilizado no modo multivibrador astável ou como também é conhecido circuito de *clock*. Nesse modo dizemos que ele não apresenta estados estáveis, ou seja, ele não pode permanecer de forma indefinida em nenhum dos estados. Ele produz um sinal de saída retangular, portanto, ele oscila quando opera no modo astável. A Figura 4.21 demonstra um circuito astável, utilizando um resistor externo e um capacitor. Por meio dos resistores R_a e R_b , o capacitor carrega até V_{cc} . A tensão do capacitor aumenta até ultrapassar o valor de $2 \cdot V_{cc}/3$ (tensão limiar no pino 6). Após alcançar a tensão de limiar, o comparador 1 altera o estado do flip-flop, gerando no

pino 3 uma saída de nível baixo. Então, o transistor de descarga é ligado, provocando o descarregamento do capacitor (pino 7) por meio de R_B . A tensão do capacitor diminui abaixo de $V_{cc}/3$. Após, o *flip-flop* é disparado, levando a saída para o nível alto novamente. (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Figura 4. 21 | Multivibrador astável



Fonte: adaptada de Boylestad e Nashelsky (2013).

Podemos calcular os intervalos de tempo em que a saída é alta por meio da equação 33:

$$T_{alto} \approx 0,7 \cdot (R_A + R_B) \cdot C \quad (33)$$

Em que é baixa, por meio de 34:

$$T_{baixo} \approx 0,7 \cdot R_B \cdot C \quad (34)$$

O período total é dado por 35:

$$\begin{aligned} T &= T_{alto} + T_{baixo} \approx 0,7 \cdot (R_A + R_B) \cdot C + 0,7 \cdot R_B \cdot C \\ T &\approx 0,7 \cdot R_B \cdot C + 0,7 \cdot R_A \cdot C + 0,7 \cdot R_B \cdot C \\ T &\approx 0,7 \cdot C \cdot (R_A + R_B + R_B) \approx 0,7 \cdot C \cdot (R_A + 2 \cdot R_B) \end{aligned} \quad (35)$$

A frequência do circuito astável é calculada por meio do inverso da equação dada por 36:

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{T} = \frac{1}{0,7 \cdot C \cdot (R_A + 2 \cdot R_B)} = \frac{1}{7 \times 10^{-1} \cdot C \cdot (R_A + 2 \cdot R_B)} \\ f &= \frac{10}{7 \cdot C \cdot (R_A + 2 \cdot R_B)} \approx \frac{1,44}{C \cdot (R_A + 2 \cdot R_B)} \end{aligned} \quad (36)$$



Determine a frequência do circuito astável representado na Figura 4.21.

Considere $R_A = R_B = 8\text{K}\Omega$ e $C = 0,2\mu\text{F}$.

Primeiramente calculamos T_{alto} e T_{baixo} :

$$T_{\text{alto}} \approx 0,7 \cdot (R_A + R_B) \cdot C \rightarrow 0,7 \cdot (8 \times 10^3 + 8 \times 10^3) \cdot 0,2 \times 10^{-6} \approx 2,24\text{ms}$$

$$T_{\text{baixo}} \approx 0,7 \cdot R_B \cdot C \rightarrow 0,7 \cdot 8 \times 10^3 \cdot 0,2 \times 10^{-6} \approx 1,12\text{ms}$$

$$f = \frac{1}{T} \rightarrow \frac{1}{2,24 \times 10^{-3} + 1,12 \times 10^{-3}} \approx \frac{1}{3,36 \times 10^{-3}} \approx 297,62\text{Hz}$$

$$\text{Ou, } \frac{1,44}{C \cdot (R_A + 2 \cdot R_B)} \approx \frac{1,44}{0,2 \times 10^{-6} \cdot (8 \times 10^3 + 2 \cdot 8 \times 10^3)} \approx 300\text{Hz}$$

Disparador Schmitt (*Schmitt Triggers*)

O disparador de Schmitt também é conhecido como limitador Schmitt, ou comparador com histerese. São circuitos que convertem um sinal senoidal, triangular ou outras formas em um sinal retangular, ou seja, um circuito comparador aceita, na entrada, tensões lineares e produz, na saída, uma tensão digital. Trata-se de um circuito biestável que possui a particularidade de trocar de estado, segundo níveis bem definidos de tensão de entrada. A entrada só identifica como nível lógico alto (1) uma tensão acima do valor de referência, e só reconhece como nível lógico baixo (0) uma tensão abaixo do que o valor de referência.

A tensão de referência é dada pela Equação 37:

$$V_{\text{REF}} = B \cdot V_{\text{SAT}} \quad (37)$$

A saída permanecerá num dado estado até que a entrada ultrapasse a tensão de referência. A tensão de referência pode ser conectada à entrada inversora ou não inversora. Veja a Figura 4.22. Se estiver conectada na entrada inversora, a saída chaveará para o nível de saturação positivo, quando a entrada for mais positiva que V_{REF} , e se estiver conectada na entrada não inversora, a saída chaveará para o nível de saturação negativo, quando a entrada for mais negativa que V_{REF} .

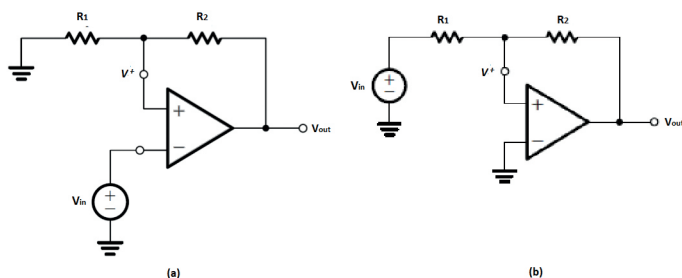
Somente quando usamos realimentação positiva temos um efeito que não é comum em um circuito. Esse tipo de realimentação força a tensão de referência a ter a mesma polaridade que a tensão

de saída, ou seja, quando a saída for alta a tensão de referência é positiva, e quando a saída for baixa a tensão de referência é negativa. Por essa razão temos dois pontos de disparo, um superior e outro inferior. As comutações só ocorrem quando o sinal, após ter atingido um dos níveis de disparo, atingir o outro nível de disparo. Em um disparador Schmitt, a diferença entre o valor de limiar alto, V_{TH} , e o valor de limiar baixo, V_{TL} , é chamada histerese.

Podemos dizer que é recomendável ter um mínimo de histerese no circuito porque esse efeito impossibilita que o ruído gere um disparo falso. O ruído é qualquer sinal indesejado que aparece no circuito. Se tivéssemos um disparador Schmitt sem histerese, qualquer ruído presente na entrada faria o disparador Schmitt saltar aleatoriamente do estado alto para o baixo ou do baixo para o alto. Agora, se o disparador Schmitt tiver histerese e a tensão de pico a pico do ruído for menor que a histerese, o ruído não irá produzir um disparo falso. Um circuito que possua uma quantidade de histerese satisfatória é imune a disparo de ruído.

A Figura 4.22 (a) representa um disparador de Schmitt inversor e a (b) não inversor.

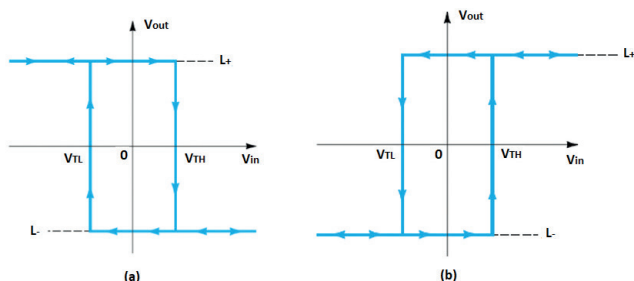
Figura 4.22 | Disparador de Schmitt inversor (a) e não inversor (b)



Fonte: elaborada pela autora.

A Figura 4.23 representa a curva de histerese (a) inversor e (b) não inversor, as tensões de limiar alta e baixa são representadas por: V_{TH} (threshold high) e V_{TL} (threshold low).

Figura 4.23 | Curva de Histerese de um disparador de Schmitt inversor (a) e não inversor (b)



Fonte: adaptada de Sedra e Smith (2000).

A tensão de limiar alta e baixa são dadas respectivamente por (38):

$$V_{TH} = B \cdot L^+ \text{ e } V_{TL} = B \cdot L^- \quad (38)$$



Pesquise mais

Saiba mais sobre a aplicação do **Schmitt Triggers**, por meio do circuito integrado 7414:

SILVA, C. **Schmitt trigger 7414**. Disponível em: <<https://goo.gl/inTrPp>>. Acesso em: 5 abr. 2018.

Sem medo de erro

Essa é sua última tarefa como estagiário no setor de engenharia, pois, devido a sua dedicação e competência no decorrer do seu estágio, você será contratado para trabalhar definitivamente como engenheiro. A sua última tarefa será fazer uma parte do instrumento musical: Theremin Digital. Para isso, você deve pesquisar qual tipo de multivibrador você deve usar: monoestável ou astável? Explique a sua por meio de um relatório.

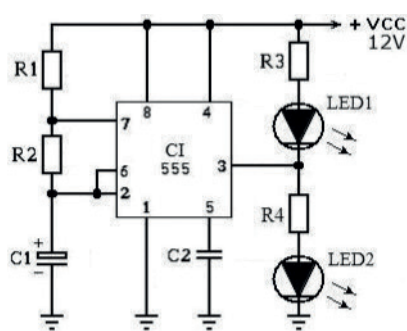
O multivibrador monoestável é estável em um só estado, no caso, é estável no estado baixo. Após receber um disparo, a saída muda para o estado alto e retorna para o estado baixo. A saída fica no alto de acordo com a duração do pulso, por isso não é estável no estado alto. O multivibrador astável (circuito de clock) não apresenta estados estáveis, ou seja, ele não pode permanecer de forma indefinida em nenhum dos estados. Ele produz um sinal de

saída retangular, portanto, ele oscila.

O **teremim** é um instrumento musical criado em 1919 e considerado o **primeiro instrumento musical totalmente eletrônico**. Um teremim é um sintetizador de som que produz tonalidades e timbres diferentes a partir de interferência de sensores externos.

O teremim digital é composto por uma antena para controle de volume e outra para determinar o tom. Cada antena utiliza um sistema realimentado composto por um capacitor, um resistor e uma porta lógica *Schmitt trigger* (com histerese). Esse circuito é denominado de multivibrador, pode-se usar um CI 555 e também um LDR (*Light Dependent Resistor*) como captador.

Figura 4.24 | Circuito pisca-pisca com multivibrador astável



Fonte: <<https://goo.gl/zJbqTw>>. Acesso em: 5 abr. 2018.

Quadro 4.2 | Componentes do circuito apresentados na Figura 4.24

Componente	Quantidade e Valor
Circuito Integrado	1 CI 555
Resistor $R_1=R_3=R_4$	3 de 1K Ω
Resistor R_2	1 de 15K Ω
C_1	X
C_2	100nF
LED	2 LEDs vermelho

Fonte: elaborado pela autora.

Resolução da situação-problema

O capacitor pode ser calculado por meio da manipulação da fórmula da frequência do circuito astável:

$$f \approx \frac{1,44}{C \cdot (R_1 + 2 \cdot R_2)} \rightarrow C \approx \frac{1,44}{f \cdot (R_1 + 2 \cdot R_2)}.$$

estão no Quadro 4.2, temos:

$$C \approx \frac{1,44}{f \cdot (R_1 + 2 \cdot R_2)} \approx \frac{1,44}{1 \cdot (1 \times 10^3 + 2 \cdot 15 \times 10^3)} \approx \frac{1,44}{31 \times 10^3} \approx 46,45 \mu F.$$

Podemos aproximar esse valor para $47 \mu F$.

Faça valer a pena

1. O temporizador 555 é um circuito integrado analógico-digital. Ele é feito por uma combinação de circuitos comparadores e de um *flip-flop* RS. Esse CI é muito versátil e, por essa razão, é muito utilizado. Ele pode operar em dois modos: astável e monoestável.

Um temporizador astável com 555 tem quantos estados estáveis?

- a) Nenhum.
- b) Dois estados.
- c) Um estado.
- d) Três estados.
- e) Quatro estados.

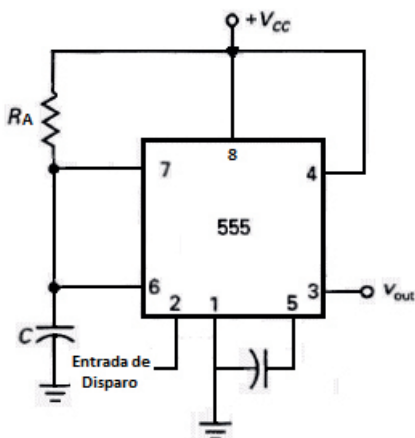
2. O CI 555 pode trabalhar com a função de ser um multivibrador monoestável. Isso significa que o componente, nessa configuração, é um circuito com um modo estável e quando um pulso é disparado ele vai para modo semiestável, do qual retorna após um determinado intervalo de tempo, ao estado estável. Ele permanece nesse estado até que sofra um novo disparo.

A largura de pulso de um multivibrador monoestável aumenta quando:

- a) Aumenta a capacitância de temporização.
- b) Diminui a capacitância de temporização.
- c) O resistor de temporização diminui.
- d) A tensão da fonte aumenta.
- e) A largura do pulso é fixa, não aumenta.

3. O CI 555 é um dos chips de maior sucesso na engenharia, ele foi criado pelo engenheiro Hans R. Camenzind em 1970 e fabricado em 1971. O CI 555 é muito versátil, sendo utilizado em computadores, brinquedos e alarmes. O temporizador 555 é um circuito integrado analógico-digital que é feito por uma combinação de circuitos comparadores e de um *flip-flop*.

Determine o período da forma de onda de saída para o circuito da figura abaixo. O circuito é disparado por um pulso negativo. Considere $R_A = 8k\Omega$ e $C = 0,2\mu F$.



Fonte: adaptada de Boylestad e Nashelsky (2013)

- a) 8ms.
- b) 1,6ms.
- c) 1.76ms.
- d) 3ms.
- e) 2,24ms.

Referências

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 11. ed. São Paulo: Pearson Education, 2013.

BRITES, P. **Construindo um oscilador senoidal de 1kHz**. 2014. Disponível em: <<https://goo.gl/gZ5hwB>>. Acesso em: 4 abr. 2018.

FHOLLWEG. **Capítulo 6: circuito integrado 555**. 2014. Disponível em: <<https://goo.gl/8zgGdQ>>. Acesso em: 25 dez. 2017.

INSTITUTO NCB. **Como funciona o cristal na eletrônica**. Disponível em: <<https://goo.gl/MFswj6>>. Acesso em: 17 dez. 2017.

MALVINO, A.; BATES, D. J. **Eletrônica**. 7. ed. Porto Alegre: Amgh editora ltda, 2011.

MOREIRA, A. **O cristal de quartzo**. 7 abr. 2010. Disponível em: <<https://goo.gl/VYgzfx>>. Acesso em: 19 dez. 2017.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microeletrônica**. 4. ed. São Paulo: Makron Books, 2000.

ISBN 978-85-522-0714-6



9 788552 207146 >