



APOSTILA PARA A DISCIPLINA ELETRÔNICA GERAL

Curso
Técnico em Automação Industrial

Professor:
MSc. Thiago Ribeiro de Oliveira

Betim, Agosto de 2013

Sumário

1	Física dos Semicondutores	1
1.1	Estrutura Atômica	1
1.1.1	Níveis e Bandas de Energia	4
1.2	Material Intrínseco	7
1.3	Material Extrínseco - Dopagem	8
1.3.1	Material Tipo n	8
1.3.2	Material Tipo P	9
1.3.3	Portadores Majoritários e Minoritários	9
2	Diodos	11
2.1	A Junção PN	11
2.2	Polarização Direta da Junção PN	13
2.2.0.1	Curva Característica do diodo em polarização direta	14
2.3	Polarização Reversa da Junção PN	17
2.3.1	Ruptura	19
2.3.2	Efeito Zener	19
2.4	Modelos aproximados do Diodo	20
2.4.1	O diodo ideal - Primeira aproximação	21
2.4.2	Segunda Aproximação	22
2.4.3	Terceira Aproximação	23
2.4.4	Modelo de um diodo na Região de Zener	25
2.5	Diodo Emissor de Luz - LED	25
3	Aplicações do Diodo em Circuitos Eletrônicos	28
3.1	Análise de circuitos a diodos em c.c.	28
3.1.1	Circuito básico	28
3.1.2	Exemplos de circuitos a diodos simples	30
3.1.3	Funções Lógicas a Diodos	36
3.2	Exercícios propostos	42
4	Aplicações de Diodos em c.a.	46
4.1	Sinais	46
4.1.1	Elementos de um sinal elétrico	47

4.1.1.1	Amplitude de um sinal	47
4.1.1.1.1	Valor Instantâneo	47
4.1.1.1.2	Valor de pico-a-pico	48
4.1.1.1.3	Valor de pico	48
4.1.1.1.4	Valor médio	48
4.1.1.1.5	Valor Eficaz ou RMS - Root Mean Square	48
4.1.1.2	Frequência de um sinal	49
4.1.1.3	Fase de um sinal	49
4.2	Circuitos com entrada c.a.	54
4.2.1	Limitadores de tensão	56
4.2.2	Retificador Básico	58
4.3	Retificadores para fontes de alimentação	59
4.3.1	Retificador de Meia-Onda	59
4.3.2	Retificador de Onda Completa	63
4.3.2.1	Retificador em Ponte	63
4.3.2.2	Retificador com Tap-central	66
4.4	Retificadores com filtro capacitivo	66
4.4.1	Retificador de meia-onda	67
4.4.2	Retificador onda completa em ponte	70
4.5	Reguladores de Tensão	71
4.5.1	O Regulador Zener	74
5	O Transistor Bipolar de Junção - TBJ	81
5.1	Operação de um transistor NPN	82
5.1.1	Transistor sem polarização	82
5.1.2	Transistor em corte.	83
5.1.3	Transistor em saturação	84
5.1.4	Transistor na região ativa	84
5.1.5	Modelo de Ebers-Moll	86
5.2	Configurações Básicas de um transistor	86
5.2.1	Configuração Base-comum	86
5.2.2	Configuração Emissor-comum	88
5.2.3	Configuração Coletor-comum	89
5.3	Limites de Operação	90
6	Aplicação de Transistores em c.c.	92
6.1	Transistor como chave	92
6.1.1	Acionamento de relé	94
6.2	Polarização de circuitos transistorizados	96
6.2.1	Polarização por fonte de corrente	97
6.2.2	Polarização Fixa	97
6.2.3	Polarização Fixa com Resistor de Emissor	100
6.2.4	Polarização por divisor de tensão	104

6.3	Dicas de resolução de circuitos diversos com transistores	107
6.4	Exercícios propostos	107
Referências Bibliográficas		111

Capítulo 1

Física dos Semicondutores

Para realizar o estudo de eletrônica é indispensável compreender o funcionamento de seus dispositivos, como diodos e transistores, quando inseridos em circuitos elétricos. Para isso, no entanto, se faz necessário entender o comportamento dos materiais semicondutores que compõem estes dispositivos.

1.1 Estrutura Atômica

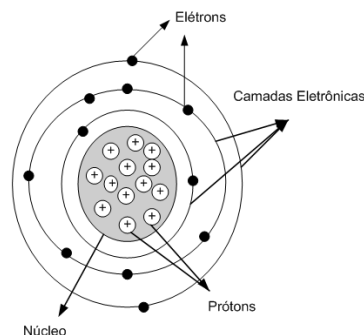


Figura 1.1: **Átomo de Bohr**

Os átomos, elementos constituintes da matéria, são formados por três elementos básicos:

- *Prótons* - Carga elétrica positiva;
- *Neutrons* - Elementos sem carga elétrica;
- *Elétrons* - Carga elétrica negativa.

O modelo atômico de Rutherford-Bohr, ilustrado na Figura 1.1, define que um átomo é formado por um núcleo, no qual se encontram os neutrons e prótons, componentes

estes responsáveis por grande parte do peso atômico, e ao redor do núcleo se encontram os elétrons, estes dispostos em camadas eletrônicas, também conhecidas como níveis de energia. Neste modelo os elétrons orbitam ao redor do núcleo como um sistema solar microscópico. Para se manter eletricamente neutro, um átomo precisa possuir a mesma quantidade de elétrons e prótons. Caso haja diferença entre o número de prótons e elétrons em um átomo, ele apresentará uma carga elétrica líquida, transformando-se em um íon positivo (falta de elétrons) ou um íon negativo (sobra de elétrons).

Assim como em um sistema solar, os elétrons (cargas negativas) são atraídos pelo núcleo (carga positiva) devido à força de atração que cargas de diferentes polaridades possuem entre si. Relembrando a lei de Coulomb, a intensidade da força de atração entre o núcleo e os elétrons decai com o quadrado da distância entre eles, de modo que os elétrons mais próximos ao núcleo sentem uma força de atração muito maior do que os elétrons dispostos nas camadas mais distantes. Essa situação faz com que os elétrons que ocupam camadas mais distantes sejam mais afetados pelo efeito de campos elétricos externos ao átomo.

Em relação à quantidade de camadas eletrônicas, o diagrama de Pauling estipula que os átomos podem possuir até 7 camadas, estas denominadas K, L, M, N, O, P e Q. Cada camada, no entanto, pode ser ocupada por um número máximo de elétrons, como descreve a Tabela 1.1.

Tabela 1.1: Distribuição de Elétrons em Camadas Eletrônicas

Camada Eletrônica	Número Máximo de Elétrons
K	2
L	8
M	18
N	32
O	32
P	18
Q	2

Cada camada ainda pode ser dividida em sub-níveis de energia (s, p, d e f), os quais podem ser ocupados também por um número máximo de elétrons. A Tabela 1.2 explicita o número máximo de elétrons passíveis de serem alocados em cada nível de energia.

Tabela 1.2: Distribuição de Elétrons em Sub-níveis de Energia

Sub-nível de energia	Número Máximo de Elétrons
s	2
p	6
d	10
f	14

À medida que as camadas eletrônicas se afastam do núcleo, maior é a energia potencial associada àquela camada, ou seja, menor é a influência da força de atração do núcleo sobre os elétrons das camadas mais exteriores. A variação da energia contida em cada nível ao longo das camadas é ilustrada na Figura 1.2, onde as setas indicam a variação de um nível de menor energia para um de maior energia.

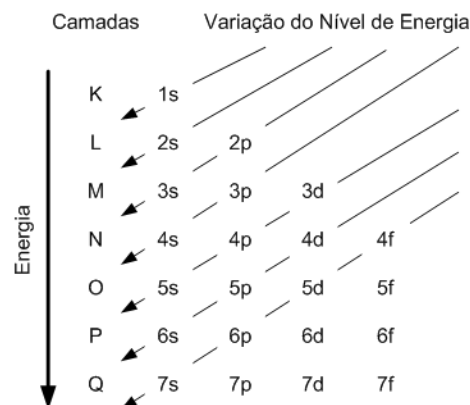


Figura 1.2: Variação da energia nos níveis e camadas

A distribuição dos elétrons de um determinado átomo nas camadas também segue a variação da energia mostrada na Figura 1.2, ou seja, os elétrons se distribuem primeiramente nas camadas mais interiores (com menor energia) e vão subindo para níveis de energia mais altos. Para exemplificar essa situação considere um átomo de Silício¹, cujo número atômico é 14 (14 prótons e 14 elétrons), iremos distribuir esses elétrons nas camadas eletrônicas seguindo a orientação da Figura 1.2:

Camada	s	p	d	f
K	2			
L	2	6		
M	2	2		

Observe que um átomo de Silício possui apenas 3 camadas, sendo a camada M a última camada que contém elétrons. Neste caso, a última camada ocupada por elétrons é denominada **camada de valência**. Notamos que o silício é um átomo tetravalente, isto é, possui quatro elétrons em sua camada de valência. De acordo com a regra do octeto², o átomo de silício será estável apenas se conseguir adquirir mais quatro elétrons. Essa aquisição de elétrons ocorrerá por meio do compartilhamento dos elétrons da camada de

¹O silício é o material semiconductor mais utilizado atualmente para a confecção de dispositivos eletrônicos.

²Um átomo será estável, ou seja, não necessita realizar ligações químicas, se o número de elétrons presentes em sua camada de valência for igual a *oito*.

valência com outros átomos, esse tipo de ligação química é conhecida como **ligação covalente**. As ligações covalentes permitem a criação de longas redes de átomos dando origem a cristais de um determinado material. Quando uma rede é composta apenas por átomos de um mesmo material, aquela rede passa a ser denominada intrínseca, no caso de haver um grande número de impurezas em uma rede (átomos de outros materiais imersos na rede) chamamos a rede de extrínseca. O silício intrínseco será formado idealmente apenas por átomos de silício, os quais fazem ligações covalentes com outros átomos vizinhos, como ilustra a Figura 1.3, nota-se que um elemento do cristal de silício possui um formato tetraédrico.

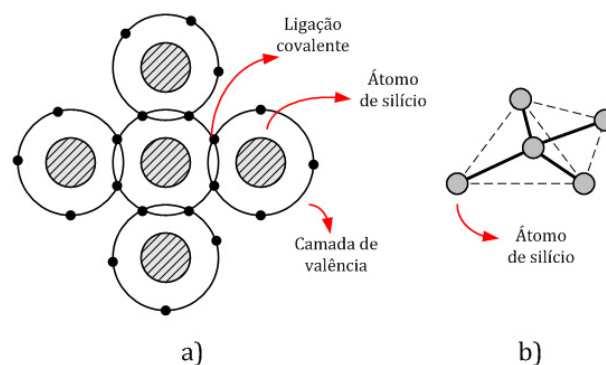


Figura 1.3: Cristal de silício. a) Compartilhamento de elétrons entre átomos de silício. b) Distribuição espacial de um elemento do cristal de silício.

1.1.1 Níveis e Bandas de Energia

Como comentado, os elétrons de um determinado átomo se encontram dispostos em camadas eletrônicas, distribuídos de acordo com a energia potencial associada a cada um deles. A física quântica explica com propriedade que existem níveis discretos de energia associados a cada uma das camadas eletrônicas, o que implica em se dizer que um elétron pertencente a um átomo não pode apresentar qualquer valor de energia potencial, mas sim, níveis bem definidos pela estrutura atômica. Isso faz com que existam, entre as camadas eletrônicas, bandas de energia *proibidas*, ou seja, as quais nunca serão ocupadas por elétrons. Uma banda proibida entre duas camadas eletrônicas é chamada de **Gap de energia**. O gap determina a quantidade de energia potencial necessária para que um elétron de uma determinada camada possa "pular" para uma outra camada. Normalmente a energia associada a um elétron é medida em **eV (elétron.volt)**, onde:

$$1\text{eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{J} \quad (1.1)$$

A Figura 1.4 ilustra os níveis de energia associados a um átomo simples.

A distribuição dos níveis de energia mostrada na Figura 1.4 é referente apenas a um átomo simples isolado. Contudo, como já discutimos, os átomos se dispõem em redes cristalinas formadas pela associação de diversos átomos. A interação de um átomo com

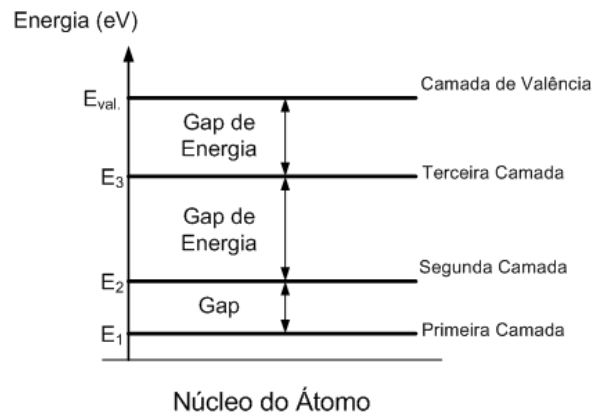


Figura 1.4: Distribuição dos níveis de energia em um átomo simples.

os seus vizinhos na rede cristalina altera a composição dos níveis de energia, uma vez que estes também dependem da posição de cada átomo na rede. Essa alteração age no sentido de se expandir o nível de energia, formando bandas de energia, como ilustra a Figura 1.5.

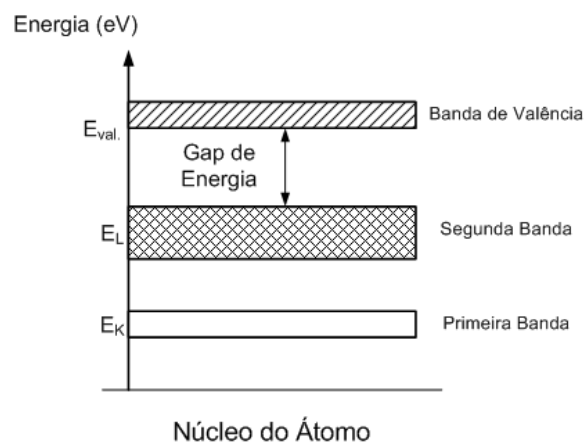


Figura 1.5: Distribuição das bandas de energia em uma rede cristalina.

Os elétrons da banda de valência são aqueles que menos sentem a força de atração exercida pelos seus respectivos núcleos. Caso estes elétrons recebam uma quantidade de energia suficientemente grande para vencer essa força de atração, eles irão se tornar **elétrons livres**, isto é, não estarão mais ligados ao seu átomo de origem, podendo então circular pela rede cristalina livremente. Esse estado de energia no qual um elétron se torna um elétron livre é tratado como uma nova banda de energia, acima da banda de valência, chamada de **banda de condução**. Elétrons na banda de condução estão mais suscetíveis à ação de campos elétricos, podendo portanto participar na condução de corrente elétrica.

OBS: Quando um elétron atinge a banda de condução, tornando-se livre, ele deixa um "buraco" na sua ligação covalente de origem. Esse buraco ou **lacuna** pode ser ocupado eventualmente por um elétron próximo, o que produzirá uma nova lacuna em um outro ponto do material. Para fins de estudo de eletrônica, criou-se um artifício matemático que trata a lacuna como um elemento atômico próprio, tendo carga positiva e ligado à banda de valência, ou seja, essa produção de novas lacunas no material é vista como uma corrente de lacunas na banda de valência.

Para se compreender o artifício que é a lacuna, imagine que a rede cristalina é uma sala completamente cheia, com pessoas sentadas em cadeiras. Se por algum motivo uma pessoa quiser sair, ela deixará uma cadeira vazia. Essa pessoa pode ser enxergada como um elétron livre, pois não está presa a nenhuma posição fixa na rede cristalina. A cadeira vazia seria o equivalente à lacuna deixada pelo elétron. Imagine agora que essa cadeira vazia fosse ocupada por uma outra pessoa, que deixou o seu lugar de origem, notaremos que a cadeira vazia agora estará em um outro ponto da sala. Neste contexto, poderíamos avaliar o movimento das pessoas que se deslocam na sala, assim como poderíamos estudar o movimento das cadeiras vazias, o que fosse mais conveniente.

A quantidade de elétrons livres presentes na banda de condução, para um determinado material, depende principalmente do gap de energia existente entre a banda de condução e a de valência. Cada material possui um perfil de gap diferente, o que influi diretamente na condutividade do material. A Figura 1.6 mostra o perfil do gap de energia para materiais ditos condutores, isolantes e semicondutores.

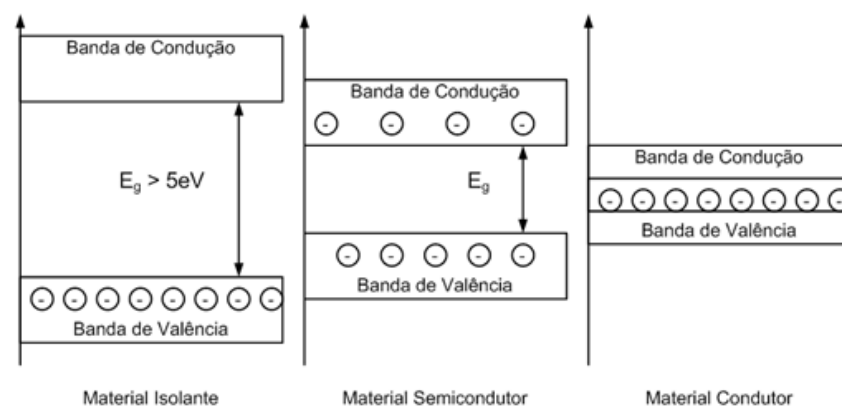


Figura 1.6: Materiais elétricos de acordo com a disposição do gap de energia em temperatura ambiente.

Onde E_g é a energia do gap. Para alguns materiais semicondutores temos:

- Ge - $E_g = 0,67\text{eV}$;
- Si - $E_g = 1,1\text{eV}$;

- GaAs - $E_g = 1,41\text{eV}$.

Nota-se que em temperatura ambiente os materiais isolantes não apresentarão nenhum, ou quase nenhum elétron na banda de condução, constituindo uma baixa condutividade. Os materiais semicondutores apresentarão poucos elétrons na banda de condução, sendo a ocupação dessa banda fortemente dependente da temperatura. Em altas temperaturas um semicondutor possuirá muitos elétrons livres, aproximando-se de um material condutor, a baixas temperaturas essa quantidade diminui, aproximando o material de um isolante. Os materiais condutores, por sua vez, apresentam um entrelaçamento das bandas de condução e valência, implicando em se ter um grande número de elétrons livres, ou seja, uma alta condutividade.

OBS: Em materiais semicondutores, o aumento da temperatura do material confere maior energia aos elétrons da banda de valência, fazendo com que a quantidade de elétrons que atingem a banda de condução aumente. Com isso, pode-se dizer que a condutividade de materiais semicondutores aumenta com a temperatura, ao contrário dos materiais condutores, os quais perdem condutividade com o aumento da temperatura. Dizemos que os materiais semicondutores possuem coeficiente de temperatura negativo, enquanto os condutores possuem coeficiente de temperatura positivo.

1.2 Material Intrínseco

Como comentado anteriormente, um cristal semicondutor composto unicamente por átomos de silício é chamado de semicondutor intrínseco. Em um semicondutor intrínseco a geração de elétrons livres e de lacunas ocorre principalmente devido ao efeito térmico e as concentrações desses dois portadores de carga são iguais, ou seja, para cada elétron livre criado, uma lacuna é automaticamente gerada. Esses portadores podem se movimentar ao longo do cristal de silício, o elétron na banda de condução e a lacuna na banda de valência. Existem no entanto dois fatores que influenciam neste movimento de portadores, sendo eles o movimento por **difusão** e o movimento por **deriva**.

Difusão - A difusão ocorre pela atração que os elétrons livres e as lacunas exercem entre si, uma vez que os elétrons são portadores de carga negativa e as lacunas, de carga positiva. Desta forma uma corrente de difusão atua no sentido de homogeneizar a distribuição de cargas ao longo do material.

Deriva - A deriva ocorre pela aplicação de um campo elétrico externo ao material. Como se sabe, a presença de um campo elétrico irá gerar uma força elétrica sobre os portadores de carga pondo-os em movimento. Neste caso as lacunas se movimentarão no sentido do campo elétrico e os elétrons livres no sentido oposto. A velocidade com que os portadores se movimentarão pelo efeito do campo elétrico dependerá do tipo de material semicondutor utilizado no cristal e seu nível de pureza.

Ocasionalmente, ao se aproximar de uma lacuna, um elétron livre pode ser atraído por ela e então "capturado". Essa união de um elétron livre com uma lacuna é chamada

de **recombinação**. A recombinação então é responsável pela retirada de um elétron da banda de condução e pela sua devolução à banda de valência. O intervalo de tempo entre a geração de um elétron livre e a sua recombinação em um determinado material semiconductor é denominado de **tempo de vida** e este é dependente da pureza e estrutura do semiconductor.

Uma vez que cada material semiconductor possui uma velocidade de deriva e um tempo de vida, pode-se definir para cada material um **comprimento médio livre**, ou seja, a distância média que um elétron livre pode atingir em um material semiconductor antes de se recombinar.

1.3 Material Extrínseco - Dopagem

Como comentado anteriormente, em materiais semicondutores intrínsecos a quantidade de elétrons na banda de condução e a quantidade de lacunas na banda de valência dependem principalmente da largura do gap de energia e da temperatura do material. Na prática, no entanto, impurezas³ presentes nos cristais de materiais semicondutores podem alterar fortemente as características da rede, modificando assim a concentração de elétrons livres e lacunas. As características elétricas de um material intrínseco pode ser completamente alterada pela adição de apenas 1 parte de impurezas por cada 10 milhões de partes de semiconductor.

Para a construção de dispositivos semicondutores, foco do estudo e desenvolvimento da eletrônica moderna, as características elétricas dos materiais semicondutores intrínsecos são propositalmente alteradas pela adição de impurezas, criando os chamados materiais extrínsecos **tipo n** e **tipo p**. O processo de formação dos materiais extrínsecos é denominado **Dopagem**, e será explicada com mais detalhes nas próximas seções.

1.3.1 Material Tipo n

Os materiais extrínsecos do tipo n têm como portador majoritário os elétrons livres, logo, o processo de dopagem deve ocorrer no sentido de aumentar a concentração de elétrons na banda de condução em temperatura ambiente. Como, normalmente, os materiais semicondutores mais comuns como o Germânio (Ge) e o Silício (Si) são tetravalentes, a dopagem do tipo n é efetuada ao se inserir na rede cristalina do semiconductor impurezas doadoras de elétrons, isto é, átomos que ao serem inseridos na estrutura cristalina irão fornecer um elétron para a banda de condução.

Os elementos doadores mais comuns são: o arsênio, o fósforo ou o antimônio. Esses materiais são pentavalentes, ou seja, possuem 5 elétrons na camada de valência. Ao se inserir átomos pentavalentes em uma rede de átomos tetravalentes (Germânio ou Silício), um dos elétrons não irá formar uma ligação covalente. O elétron **desassociado** de qualquer ligação covalente está fracamente conectado ao seu núcleo, o que faz com que ele possa

³Em uma rede cristalina de um determinado material intrínseco podem aparecer pequenas quantidades de outros átomos, os quais são chamados de impurezas

ser arrancado de sua órbita mais facilmente. A Figura 1.7 exemplifica a configuração de um elemento de uma rede com uma impureza doadora.

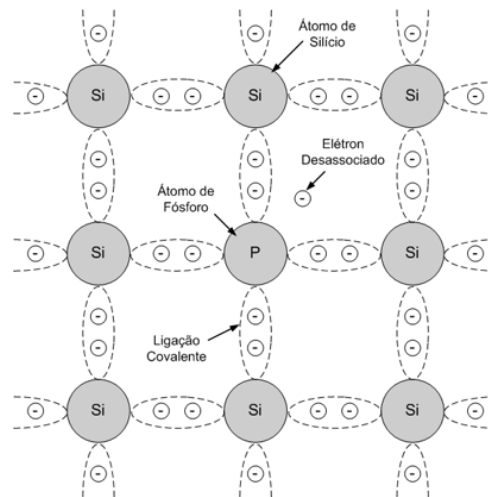


Figura 1.7: Inserção de um átomo doador em uma rede cristalina de Silício.

A dopagem do tipo n faz com que apareça dentro do gap entre a banda de valência e a de condução, um novo nível de energia. Os elétrons desassociados encontram-se todos nesse novo nível, sendo que agora a energia necessária para que os elétrons desassociados alcancem a banda de condução seja significativamente menor do que o gap original do silício intrínseco.

1.3.2 Material Tipo P

Em um material tipo p, os portadores majoritários são as lacunas. O processo de dopagem, portanto, consiste em se aumentar o número de lacunas presentes na banda de valência. Para tal, insere-se na estrutura cristalina átomos trivalentes (possuem 3 átomos na camada de valência), receptores, como o Boro, o Gálio e o Índio. A Figura 1.8 ilustra o resultado da inserção de Boro em um cristal de silício intrínseco.

Observe que agora não existem elétrons suficientes para realizar todas as quatro ligações covalentes necessárias. A falta de um elétron provoca o surgimento de uma lacuna.

1.3.3 Portadores Majoritários e Minoritários

Em um material intrínseco, a banda de condução é ocupada exclusivamente por elétrons que adquiriram energia suficiente para romper as suas ligações covalentes e vencer o gap de energia. Neste caso, cada elétron livre deixa na banda de valência uma lacuna, isto é, a concentração de elétrons livres e lacunas é a mesma. Já em um material dopado, a concentração de elétrons ou lacunas é elevada pela inserção de impurezas doadoras ou receptoras.

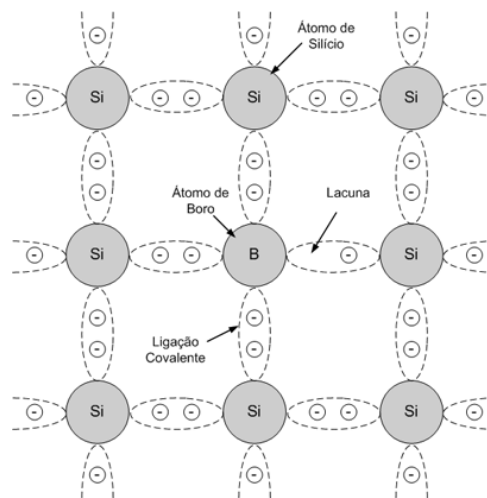


Figura 1.8: Inserção de um átomo receptor em uma rede cristalina de Silício.

Em um material do tipo n, por exemplo, a concentração de elétrons livres na temperatura ambiente é muito superior à observada em um material intrínseco, contudo, a concentração de lacunas não muda muito em relação ao material puro. Isso significa que em um material do tipo n existirá um grande número de elétrons livres e um pequeno número de lacunas. Neste caso, chamamos os elétrons de **portadores majoritários** e as lacunas de **portadores minoritários**. Em um material do tipo p as concentrações se invertem, ou seja, a lacuna representa o portador majoritário e o elétron livre, o portador minoritário.

Como comentado nas seções anteriores, a presença de um átomo doador em meio à rede cristalina provoca o aparecimento de um íon negativo, enquanto que, a presença de um átomo receptor gera um íon positivo. Nesses casos é importante frisar que o aparecimento desses íons não faz com que o material como um todo se torne mais negativo ou positivo. Como o número de elétrons e prótons em ambos os casos é o mesmo, um material do tipo n, ou um material do tipo p são eletricamente neutros.

Capítulo 2

Diodos

No Capítulo 1 discutimos a estrutura física de materiais semicondutores intrínsecos e extrínsecos. Esses materiais são a base da eletrônica moderna, a qual baseia-se em dispositivos semicondutores constituídos por junções de materiais tipo n e tipo p. Neste capítulo iniciaremos os estudos dos dispositivos semicondutores básicos e suas aplicações em circuitos elétricos.

2.1 A Junção PN

O dispositivo de estado sólido (semicondutor) mais simples é o **diodo de junção**, o qual é constituído por uma **junção PN**, isto é, a união entre um cristal do tipo n e outro do tipo p. A união dos dois cristais é ilustrada na Figura 2.1, onde estão explicitados os portadores majoritários de cada cristal.

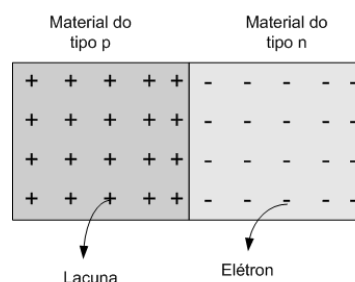


Figura 2.1: União entre um cristal do tipo n e outro do tipo p.

Nota-se pela figura que a concentração de elétrons e lacunas ao longo do corpo do novo material não é uniforme. Devido ao fenômeno da difusão, assim que a junção PN é formada, uma migração de portadores de um cristal para o outro ocorre, ou seja, elétrons do material tipo n irão se deslocar para o material tipo p, e as lacunas farão o caminho contrário. Assim que um elétron penetra no material tipo p, ele irá se recombinar rapidamente com uma lacuna, formando um íon negativo na borda do cristal. As lacunas, ao

penetrarem no material tipo n, também sofrerão recombinação e formarão íons positivos na borda do material. Ao longo do tempo, a concentração de íons em torno do ponto de junção entre os dois cristais irá aumentar. Devido a isso, cria-se um campo elétrico no ponto de junção, o qual age no sentido de impedir a migração de portadores. Em um determinado momento a força desse campo elétrico é forte o suficiente para impedir que qualquer portador atinja a região em torno da junção, gerando, portanto, uma região depleta de portadores: a **região de depleção**, ou **camada de depleção**. A Junção PN e os seus elementos são ilustrados na Figura 2.2.

*OBS: Para que novos portadores possam ultrapassar a região de depleção, estes deverão possuir energia suficiente para vencer a força exercida pelo campo elétrico formado na junção. Isto indica que a formação da camada de depleção gera uma barreira que impede o deslocamento de portadores entre os cristais do tipo n e do tipo p, essa barreira é referenciada comumente como **barreira de potencial**. A largura da camada de depleção e a intensidade da barreira de potencial podem variar devido a fatores construtivos do dispositivo, material semiconductor utilizado e principalmente pela temperatura do material.*

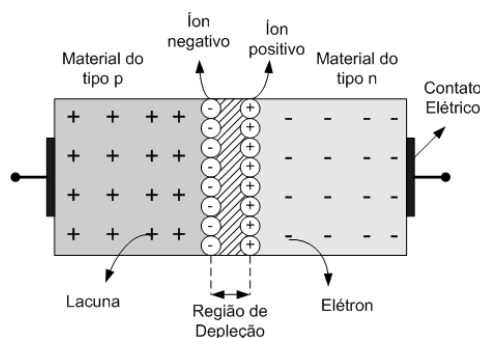


Figura 2.2: Junção PN e a região de depleção.

Para a aplicação em circuitos elétricos, adota-se um símbolo para representar um diodo de junção, o qual é apresentado na Figura 2.3. Ao terminal conectado ao material tipo p dá-se o nome de **Anodo**, ao terminal conectado ao material tipo n, dá-se o nome de **Catodo**.

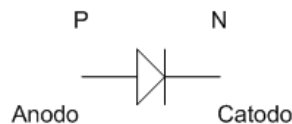


Figura 2.3: Símbolo elétrico de um diodo de junção.

Observa-se que o diodo de junção é um dispositivo de dois terminais, logo, podemos polarizá-lo de duas formas:

- Polarização Reversa - Aplicação de uma tensão negativa entre o anodo e o catodo;
- Polarização Direta - Aplicação de uma tensão positiva entre o anodo e o catodo;

2.2 Polarização Direta da Junção PN

Neste tipo de polarização, aplica-se ao diodo uma tensão externa positiva ($V_R > 0$) entre o anodo e o catodo. Essa diferença de potencial age no sentido de forçar os portadores majoritários de cada cristal contra a barreira de potencial. Para explicar melhor como essa fonte externa afeta o comportamento dos portadores, explicaremos o que ocorre com um elétron pertencente ao material tipo n, a lacuna, por sua vez, se comportará de forma semelhante.

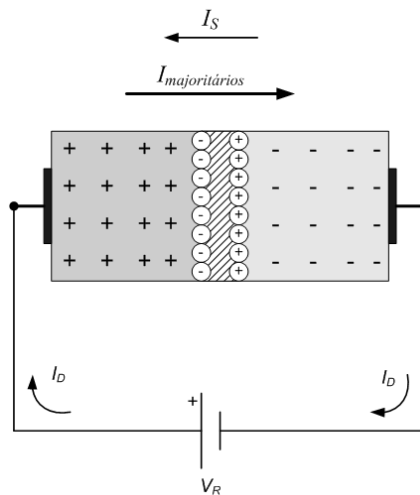


Figura 2.4: Polarização Direta de um Diodo.

A Figura 2.4 ilustra o comportamento do diodo com a polarização direta. Com a aplicação de uma fonte externa ($V_R > 0$), um elétron do material tipo n irá ser acelerado contra a barreira de potencial, ou seja, receberá energia cinética. Os efeitos causados pelo aumento da energia cinética do elétron variam de acordo com a intensidade da tensão aplicada ao diodo:

- Para pequenos valores de V_R - A energia cinética do elétron não é suficiente para vencer a barreira, o que faz com que nenhuma corrente elétrica seja percebida entre os terminais do diodo;
- À medida que a tensão externa aumenta de magnitude, o elétron terá energia suficiente para atravessar a barreira. Uma vez dentro do material tipo p, o elétron começa a ser freado pela atração das lacunas presentes naquele material, caso a sua energia cinética seja baixa ele irá eventualmente se recombinar com uma lacuna, formando um íon negativo e aumentando a barreira de potencial;

- $V_R \geq V_L$ - Existe, contudo, um valor de limiar (V_L), a partir do qual a energia cinética transferida ao elétron é suficiente para que ele vença a barreira de potencial e percorra todo material tipo p sem se recombinar. Desse ponto em diante, observa-se uma corrente I_D nos terminais do diodo. A partir desse ponto, a oposição ao fluxo de elétrons se dará basicamente devido à resistência de contato do diodo e à agitação térmica dos átomos de silício, assim, qualquer incremento em V_R se refletirá em um grande aumento na corrente I_D .

A tensão de limiar depende de diversos fatores como: Tipo de diodo, material do semicondutor, temperatura, etc. Informações específicas sobre cada diodo são fornecidas pelos fabricantes de semicondutores nos *Datasheets* de cada modelo de componente.

Para diodos de aplicação comum, a tensão de limiar, ou tensão de condução, dos diodos a temperatura de 25° são:

- Silício - $V_L \approx 0,7V$;
- Germânico - $V_L \approx 0,3V$.

Essa tensão limiar é afetada principalmente devido à temperatura do diodo, para um diodo de silício, contudo, assume-se que essa variação se dá da seguinte forma:

$$\Delta V_L = -2mV/^{\circ}C \quad (2.1)$$

OBS: A corrente I_S apresentada na Figura 2.4 diz respeito à corrente formada pelos portadores minoritários, os quais são acelerados pela camada de depleção, essa corrente está na faixa de pico a nanoampéres. A corrente entre os terminais do diodo será, logicamente, igual a diferença entre a corrente de portadores majoritários e minoritários:

$$I_D = I_{majoritarios} - I_S \quad (2.2)$$

2.2.0.1 Curva Característica do diodo em polarização direta

Á física quântica permite levantar uma equação que descreve o comportamento do diodo em polarização direta:

$$I_D = I_S (e^{V_R/nV_T} - 1) \quad (2.3)$$

Onde: I_S é a corrente devida aos portadores minoritários (corrente de saturação);

$n = 1$, para o silício;

V_T é a tensão térmica. Para a temperatura ambiente $V_T = 25mV$.

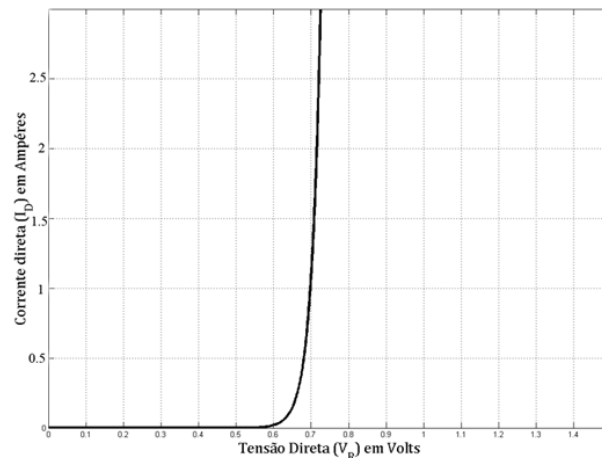


Figura 2.5: Curva característica de um diodo na polarização direta.

A partir da equação (2.3), podemos traçar a curva $I \times V$ para um diodo em polarização direta. A curva característica obtida está explicitada na Figura 2.5.

Observa-se pela curva, que abaixo da tensão de 0,6V a corrente I_D possui valores insignificantes. Para tensões entre 0,6V e 0,7V, a corrente possui um perfil fortemente exponencial, à essa região dá-se o nome de **Joelho**. À partir de $V_R = 0,7V$, nota-se que a tensão sobre o diodo varia muito pouco, mesmo com um grande aumento da corrente. A pequena inclinação percebida se deve à resistência de corpo do silício e as resistências de contato do diodo.

Em circuitos reais, no entanto, os dispositivos semicondutores são fabricados para operarem dentro de determinadas faixas de trabalho, por exemplo, o diodo modelo 1N4007 é fabricado para operar com uma corrente média de 1A. Isto significa que se tentarmos impor uma corrente superior a este valor ao diodo, suponha 2A, ele irá superaquecer e eventualmente irá queimar. Para evitar que isso ocorra é comum associar ao diodo um resistor série, o qual servirá para limitar a máxima corrente que circulará pelo dispositivo. Se pensarmos em função da curva característica do diodo mostrada anteriormente, a associação do resistor série irá definir um ponto de operação, ou **ponto Quiescente**, isto é, irá determinar um ponto sobre a curva do diodo (I_D, V_R) onde o circuito poderá operar. Para entender como que esse ponto quiescente é definido considere o circuito eletrônico mostrado na Figura 2.6.

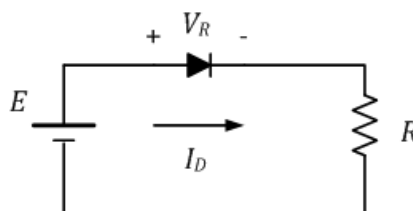


Figura 2.6: Circuito eletrônico com um diodo e resistor série.

Seguindo o caminho da corrente I_D especificado na Figura, podemos levantar a equação do balanço de tensões na malha:

$$E - V_R - R \cdot I_D = 0 \quad (2.4)$$

Podemos isolar a corrente do circuito:

$$I_D = \frac{E - V_R}{R} \quad (2.5)$$

Uma vez especificada uma tensão de entrada (E) e uma resistência (R) para o circuito eletrônico exemplificado, a corrente total observada no circuito será definida apenas pela tensão V_R , ou seja, apenas pela tensão sobre os terminais do diodo. Para definir esse ponto de operação, ou seja, definir I_D e V_R , faz-se o seguinte:

- Traça-se um gráfico do comportamento do circuito para toda região de polarização direta;
- Traça-se sobre o mesmo gráfico a curva característica do diodo;
- Encontra-se o ponto de encontro entre as duas curvas. Este será o ponto quiescente do circuito.

Para exemplificar melhor esse sistema, façamos o seguinte exercício:

Ex. 1 - Para o circuito mostrado na Figura 2.6 e um diodo com a curva característica descrita na Figura 2.5, calcule o ponto quiescente do circuito para uma tensão de entrada $E = 10V$ e resistência série $R = 5\Omega$.

Para este problema, a equação (2.5) se torna:

$$I_D = \frac{10 - V_R}{5} \quad (2.6)$$

A equação acima forma uma reta com inclinação negativa, a qual damos o nome de **Reta de Carga**. Sabemos que a região de polarização direta ocorre para $I_D \geq 0$ e $V_R \geq 0$, desta forma, podemos dizer que a polarização direta ocorrerá apenas no primeiro quadrante do plano trigonométrico. Traçando então a reta no primeiro quadrante, teremos a Figura 2.7.

Note que a reta corta os limites da região de polarização direta (os eixos do gráfico) em dois pontos:

- $I_D = 0A$. Neste ponto, a tensão $V_R = 10V$;
- $V_R = 0V$. Neste ponto, a corrente $I_D = \frac{10}{5} = 2A$.

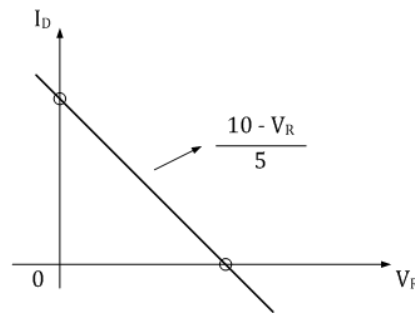


Figura 2.7: Reta de carga do circuito do Ex.1.

Traçando então a reta encontrada juntamente com a curva característica do diodo, encontramos a Figura 2.8.

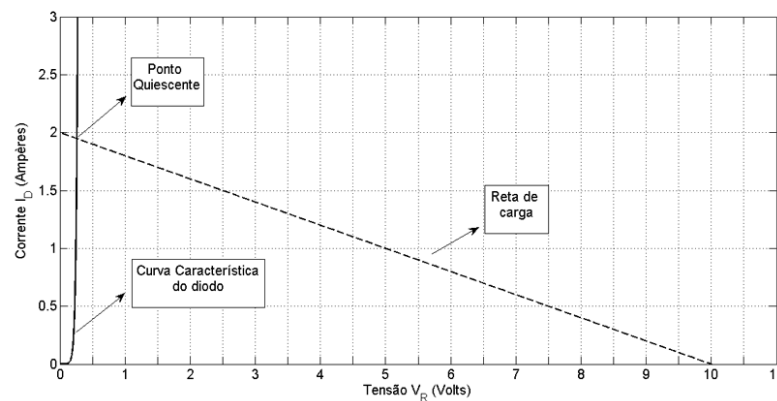


Figura 2.8: Definição de ponto de operação por análise de reta de carga.

O ponto de cruzamento entre a curva característica do diodo e a reta de carga, na figura, ocorreu em $I_D = 1,94A$ e $V_R = 0,65V$. Esse ponto define as variáveis do circuito eletrônico avaliado. Obviamente, se utilizarmos um diodo com características diferentes o ponto quiescente será alterado.

2.3 Polarização Reversa da Junção PN

A polarização reversa de um diodo semicondutor consiste na aplicação de uma tensão negativa ($V_R < 0$) entre os terminais de anodo e catodo do componente. Nesta situação a fonte externa atrai para si as lacunas do material tipo p e os elétrons livres do material tipo n. Assim os portadores se afastam da junção PN alargando a camada de depleção e consequentemente a barreira de potencial. A barreira se alarga até a intensidade do seu campo elétrico se igualar à tensão externa aplicada ao diodo. Quando isso ocorre não haverá mais movimento de portadores majoritários no material. Os portadores minoritários, por sua vez são acelerados pela fonte externa, constituindo uma corrente de

catodo para anodo, denominada de corrente de saturação, a qual já foi mencionada no item anterior. A Figura 2.9 ilustra o comportamento do diodo durante a polarização reversa.

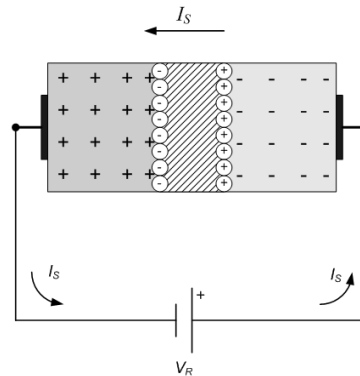


Figura 2.9: **Polarização Reversa do diodo.**

É importante mencionar que a corrente de saturação, por depender apenas dos portadores minoritários, não aumenta com o aumento da tensão externa aplicada ao diodo, isso porque, os portadores que a produzem apenas podem ser gerados pelo efeito térmico. Logo a corrente de saturação varia apenas com a temperatura.

Nesta situação, poderíamos enxergar o diodo como uma chave aberta, uma vez que a corrente que circulará pelo circuito será muito pequena, na ordem dezenas de pico-ampéres a alguns micro-ampéres, dependendo do modelo do diodo empregado. Para entendermos melhor o comportamento do diodo em polarização reversa considere o circuito exemplificado na Figura 2.10.

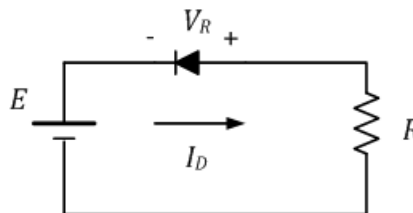


Figura 2.10: **Circuito eletrônico com um diodo em polarização direta.**

Considerando o sentido da corrente indicado no circuito, a equação do balanço de tensões se torna:

$$E + V_R - R \cdot I_D = 0 \quad (2.7)$$

OBS: Note que a polaridade da tensão V_R é inversa à considerada na Figura 2.6.

Neste caso, a corrente total do circuito seria:

$$I_D = \frac{E + V_R}{R} \quad (2.8)$$

Como a corrente reversa no diodo possui um valor muito pequeno, podemos considerá-la zero ($I_D = 0A$). Nesse caso, resolvendo a equação acima, encontramos que a tensão sobre os terminais do diodo será:

$$0 = \frac{E + V_R}{R} \implies V_R = -E \quad (2.9)$$

Ou seja, caso o diodo se encontre em polarização reversa, ele bloqueará a circulação de corrente no circuito e absorverá toda tensão equivalente sobre os seus terminais. Esse comportamento é exatamente o comportamento de uma chave aberta.

No Capítulo 3 serão apresentados exercícios e exemplos, para aprimorar e solidificar o entendimento do comportamento de diodos em circuitos eletrônicos.

2.3.1 Ruptura

No item anterior, mostrou-se que quando um diodo se encontra em polarização reversa ele absorve a tensão equivalente do circuito sobre os seus terminais, de modo que a tensão entre anodo e catodo se torna negativa e a corrente se mantém em patamares muito pequenos. Contudo, se a tensão reversa aplicada aos terminais do diodo possuir uma magnitude muito elevada os portadores minoritários terão energia suficiente para, ao colidirem com átomos do cristal, arrancarem elétrons de sua órbita e aumentar a quantidade de portadores em condução, esses novos portadores irão se colidir com novos átomos gerando mais portadores em um **efeito avalanche**. Neste instante a corrente reversa apresenta um salto repentino e a curva característica se assemelha à da polarização direta, contudo, como a corrente reversa se torna muito elevada, o diodo poderá superaquecer e destruir as ligações covalentes estabelecidas, destruindo o material. Logo a operação próxima da região de ruptura não é recomendada.

Em diodos comerciais, a avalanche ocorre para tensões reversas superiores a 50V, normalmente. O diodo 1N4007, por exemplo, apresenta uma região de ruptura próxima de 1000V. Nas folhas de dados a região de ruptura é denominada comumente como **Break-down**.

2.3.2 Efeito Zener

Quando um diodo é fortemente dopado, a camada de depleção é muito estreita, o que faz com que o campo elétrico na camada de depleção seja muito intenso. Durante a polarização reversa se a intensidade do campo elétrico se tornar superior a 300kV/cm, haverá força suficiente para arrancar elétrons de suas órbitas e gerar um par elétron-lacuna na região de depleção, a geração de portadores por este efeito é denominado de **efeito zener**. Esses novos portadores podem participar da condução de corrente reversa, aumentando a sua magnitude. No entanto, como o efeito zener se dá em tensões muito mais baixas que o efeito avalanche, o aumento da corrente reversa não provoca um aquecimento exagerado do semicondutor, podendo ser mais facilmente revertido e sem provocar a destruição do material.

O efeito zener, assim como a ruptura, podem ser visualizadas na curva $I \times V$ de um diodo, como é mostrado na Figura 2.11, a região onde ocorre o efeito zener é chamada de região de zener.

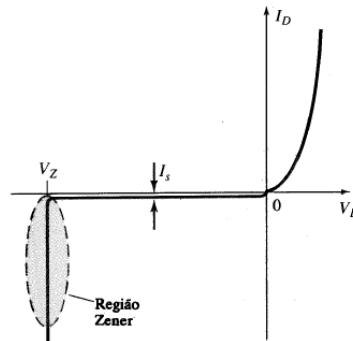


Figura 2.11: Curva característica do Diodo com a Região de Zener.

Ao atingir a região de zener, a tensão terminal do diodo sofre pouca alteração com o incremento da corrente reversa. Esse atributo é muito utilizado em reguladores ou limitadores de tensão (tema de capítulos posteriores). Devido ao alto interesse em se utilizar essa região do diodo, os fabricantes desenvolveram tipos de diodos, cuja tensão de Zener é muito bem definida. A essa classe de diodos especiais dá-se o nome de **diodo Zener**. O símbolo de um diodo zener é um pouco diferente do diodo convencional, sendo mostrado na Figura 2.12.

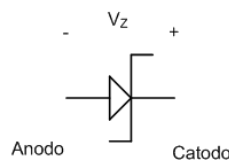


Figura 2.12: Símbolo de um diodo zener.

OBS: Em polarização direta o diodo zener se comporta como um diodo convencional.

2.4 Modelos aproximados do Diodo

Na seção anterior, discutimos o funcionamento microscópico do diodo e descrevemos as curvas características do dispositivo. Verificamos que o comportamento do diodo para diferentes faixas de tensão é extremamente não-linear. Apesar de existirem equações bem precisas que descrevem o comportamento do diodo em toda a sua faixa de operação,

para um estudo rápido e realização de projetos de circuitos eletrônicos é interessante encontrarmos um modelo para o diodo que represente as suas características principais. Os modelos mais complexos são utilizados em softwares de simulação de circuitos, sendo empregados quando se deseja obter uma resposta mais precisa do comportamento do circuito.

Para a análise e projeto de circuitos eletrônicos básicos, 3 modelos aproximados do diodo são utilizados, os quais serão descritos a seguir.

2.4.1 O diodo ideal - Primeira aproximação

Nesta aproximação, o diodo é tratado como uma chave ideal, capaz de conduzir corrente em apenas um sentido, ou seja:

- Polarização Direta - Chave fechada (curto-circuito);
- Polarização Reversa - Chave aberta (circuito aberto);

O comportamento do modelo do diodo em um circuito eletrônico básico é ilustrado na Figura 2.13. Note que a região de joelho da curva em polarização direta é completamente desprezada e considera-se que o diodo não atinge a região de ruptura.

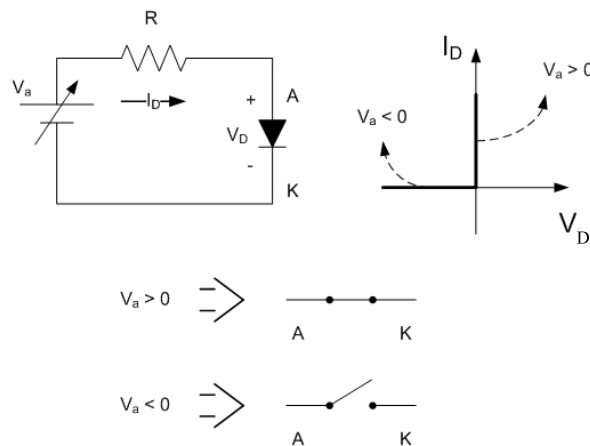


Figura 2.13: Curvas e símbolos de um diodo ideal.

O circuito tomado como exemplo na Figura 2.13 é muito semelhante aos analisados anteriormente. Porém, a tensão de entrada V_a é uma tensão variável, a qual pode assumir qualquer valor positivo ou negativo. Levantando a equação da malha, obteremos:

$$V_a - V_D - I_D R = 0 \quad (2.10)$$

Assim, podemos escrever:

$$\begin{cases} V_D = V_a - I_D R \\ I_D = \frac{V_a - V_D}{R} \end{cases} \quad (2.11)$$

Como na polarização direta, o diodo se comportaria como um curto-circuito, a sua tensão terminal V_D seria nula. Já em polarização reversa, ele se comportaria como uma chave aberta, logo a sua corrente I_D seria nula. A Tabela 2.1 resume as características do diodo ideal em cada condição de operação, para o circuito de exemplo.

Tabela 2.1: Características de um diodo ideal

	V_D	I_D
Pol. Direta	0V	$\frac{V_a}{R}$
Pol. Reversa	$-V_a$	0A

2.4.2 Segunda Aproximação

Nesta aproximação, a tensão de limiar do diodo é representada como uma fonte constante de tensão em série com um diodo ideal. Novamente as características de ruptura são desprezadas. A Figura 2.14 mostra as curvas e os símbolos associados com o modelo.

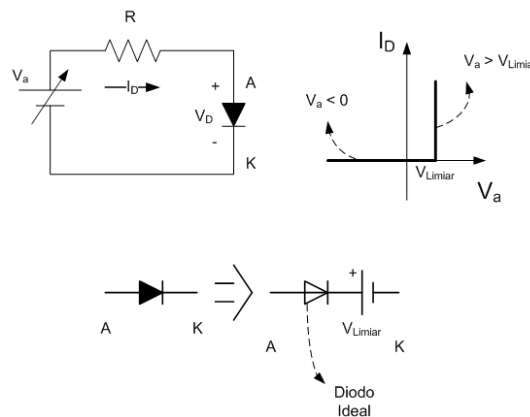


Figura 2.14: Curvas e símbolos de um modelo de primeira aproximação.

As características do modelo em primeira aproximação do diodo, para o circuito descrito na Figura 2.14, são apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Características de um modelo em primeira aproximação

	V_D	I_D
Pol. Direta	V_{Limiar}	$\frac{V_a - V_{Limiar}}{R}$
Pol. Reversa	$-V_a$	0A

O valor da tensão limiar a ser utilizado no modelo depende do tipo de diodo empregado. Normalmente diodos de silício possuem tensão limiar de 0,7V. Diodos de Germânio, por

sua vez, possuem tensão limiar de 0,3V. Caso já se conheça o componente específico a ser utilizado, pode-se utilizar a tensão limiar definida pelo fabricante do dispositivo, a qual está informada em seu datasheet.

2.4.3 Terceira Aproximação

Nesta aproximação, além da tensão de limiar, o efeito da resistência de corpo do diodo também é representada. O modelo consiste em um diodo ideal em série com uma fonte de tensão e um resistor. O valor da resistência pode ser inferido a partir da análise de algumas regiões da curva característica do diodo. A Figura 2.15 mostra as curvas e os símbolos do modelo.

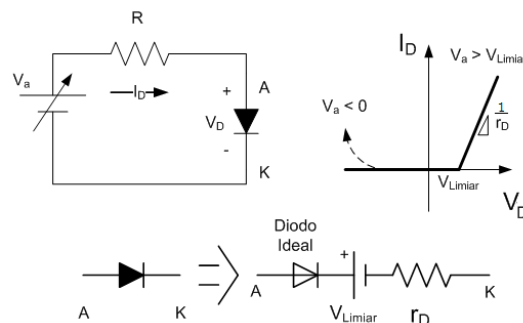


Figura 2.15: Curvas e símbolos de um modelo de segunda aproximação.

As características do modelo em segunda aproximação são apresentadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Características de um diodo em segunda aproximação

	V_D	I_D
Pol. Direta	$V_{Limiar} + r_D I_D$	$\frac{V_a - V_{Limiar}}{R + r_D}$
Pol. Reversa	$-V_a$	$0A$

Ex. 2 - Para a curva apresenta da Figura 2.16 levante o modelo de 3ª aproximação.

Para levantar o modelo de 3ª aproximação é necessário lembrar que este modelo é representado por um diodo ideal em série com uma fonte de tensão e uma resistência. O diodo ideal garante que quando a tensão de polarização for negativa ($V_{AK} < 0$), a corrente no diodo será nula, assim, para levantar o modelo, nos basta determinar a tensão de limiar do componente e a resistência de contato.

Para definir a tensão limiar iremos traçar uma reta tangente à região linear da curva. O ponto onde essa linha intercepta o eixo das abscissas será a tensão de limiar do modelo. A Figura 2.17 apresenta mostra a tensão de limiar da curva do exemplo.

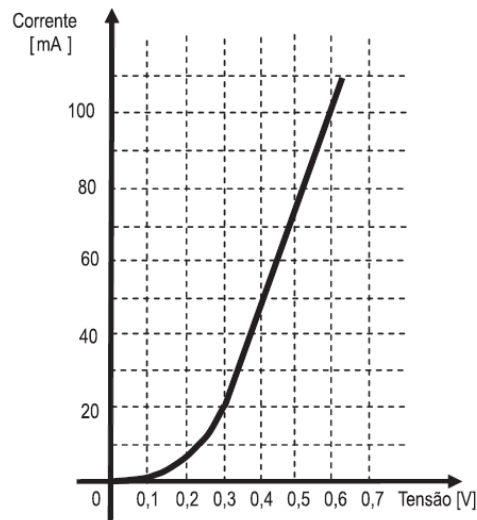


Figura 2.16: Curva característica de um diodo real.

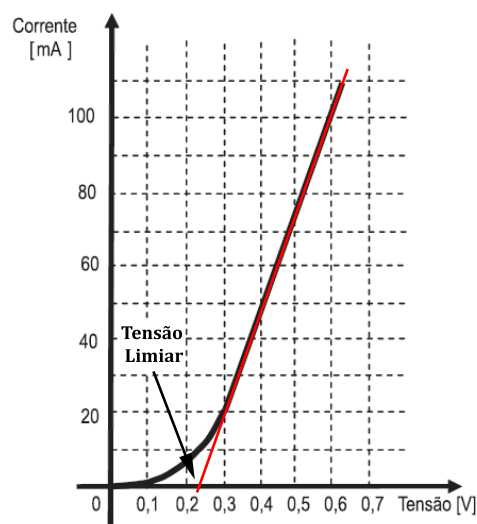


Figura 2.17: Definição da tensão limiar.

Pelo gráfico, nota-se que a tensão limiar é de 0,23V para este diodo. A definição da resistência de contato leva em consideração a inclinação da reta tangente traçada anteriormente ao longo da região linear. A resistência de contato poderá ser definida por dois pontos no gráfico (I_{D1} , V_{D1}) e (I_{D2} , V_{D2}), de modo que:

$$r_D = \frac{V_{D1} - V_{D2}}{I_{D1} - I_{D2}} \quad (2.12)$$

Tomando dois pontos quaisquer na região linear (0,6V - 100mA) e (0,3V - 20mA) determina-se que a resistência de contato é:

$$r_D = \frac{0,6V - 0,3V}{100mA - 20mA} = 3,75\Omega \quad (2.13)$$

2.4.4 Modelo de um diodo na Região de Zener

Os modelos aproximados de diodos apresentados até o momento dizem respeito a componentes desenvolvidos para trabalhar longe da região de zener. No entanto, como comentado anteriormente, existem componentes projetados para trabalhar nessa região. O diodo Zener, contudo, também lança mão de modelos aproximados para representar o seu comportamento. Normalmente consideramos que o diodo zener, na polarização direta assume um dos 3 modelos descritos acima, já na região de zener ele assume um outro modelo, descrito na Figura 2.18.

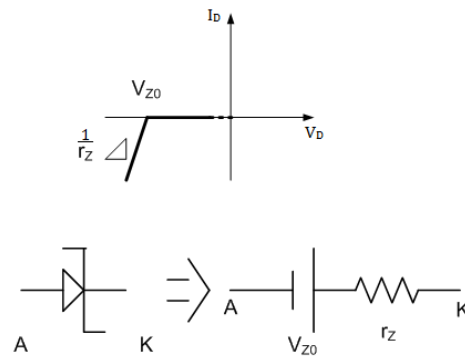


Figura 2.18: Curva e símbolo do modelo de um diodo zener na região de zener.

Como mostra a Figura, o diodo zener na região de zener é representado por uma fonte de tensão em polarização reversa de valor V_{Z0} (tensão de Zener nominal) e um resistor r_Z (resistor de zener) que representa a variação da corrente no zener com a variação da tensão aplicada ao diodo. Ao se utilizar esse modelo na análise de circuitos eletrônicos, muitas vezes, por questões de simplificação, considera-se r_Z muito pequeno, o que leva $V_Z \approx V_{Z0}$.

2.5 Diodo Emissor de Luz - LED

Existem diversos tipos de diodos, desenvolvidos para cada tipo de aplicação. Um diodo muito interessante e muito utilizado na eletrônica é o diodo emissor de luz (LED - *Light Emitting Diode*). O LED funciona da mesma maneira que os diodos comuns, contudo, ao ser polarizado diretamente, ele emite luz em uma banda bem definida. Existem diversos tipos de LEDs (alto brilho, indicador, LED de potência, LED Branco, LED Vermelho, LED Verde, LED Azul, etc...).

No curso de eletrônica geral, consideraremos apenas os LEDs indicadores, os quais possuem Tensão de Limiar (V_γ) na faixa de 1,5V a 2,5V e assume corrente de até 100mA.

A Figura 2.19 ilustra o encapsulamento típico de um LED indicador com os seus elementos principais e o seu símbolo elétrico. Note que para identificar um LED corretamente deve-se localizar no encapsulamento o chanfro que indica a posição do Catodo.

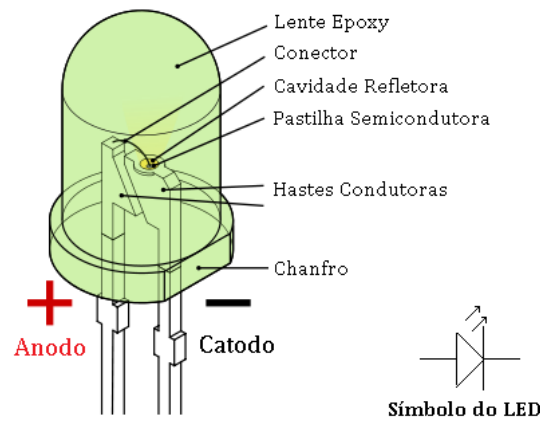


Figura 2.19: Encapsulamento de um LED e seus elementos principais.

Existem muitos encapsulamentos de diodos disponíveis no mercado, contudo, uma grande variedade delas trazem uma marca, cuja função é facilitar a identificação dos terminais do diodo. Normalmente essa marca é uma tarja escura localizada no terminal **Catodo**, como ilustra a Figura 2.20.

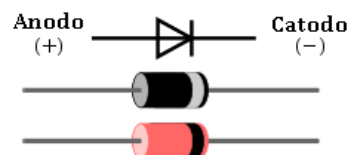


Figura 2.20: Exemplo de tarja de identificação de um diodo (Encapsulamento DO-41).

Questões

1 - Procure na Internet os Datasheets dos seguintes Diodos:

1N4007, 1N5407, 1N4148, 1N4736, BAS116, MUR860.

A partir dos dados do datasheet determine:

1. Tensão de limiar;

2. Corrente máxima Direta;
3. Tensão de Ruptura ou Tensão de Zener;
4. Resistência série;
5. Máxima Potência;
6. Encapsulamento.

Capítulo 3

Aplicações do Diodo em Circuitos Eletrônicos

O estudo do comportamento de dispositivos semicondutores e o levantamento de modelos aproximados que possibilitem uma rápida e consistente avaliação dos estados das grandezas elétricas (corrente e tensão) dos dispositivos nos permitem realizar a análise e o projeto de circuitos eletrônicos. A associação de diodos e outros dispositivos dá origem a uma gama infinita de configurações, as quais apresentam variadas respostas aos sinais de entrada dos circuitos eletrônicos, isto é, a partir da associação de dispositivos semicondutores podemos construir desde uma simples porta lógica a um complexo sistema de processamento de dados (computador, DSP e microcontroladores). Contudo, para que o estudante de eletrônica seja capaz de compreender plenamente o funcionamento de tais sistemas e possa também construí-los é extremamente importante que ele compreenda como os dispositivos semicondutores interagem com outros elementos em um circuito elétrico. Neste sentido é interessante que o estudante esteja familiarizado com algumas configurações básicas, as quais constituem blocos elementares utilizados na construção de diversos sistemas eletrônicos.

A abordagem utilizada neste capítulo será baseada na análise de algumas topologias básicas de circuitos a diodos. A princípio discutiremos circuitos a diodos com entrada em corrente contínua e em seguida discutiremos os circuitos com corrente alternada.

3.1 Análise de circuitos a diodos em c.c.

3.1.1 Circuito básico

Nesta seção analisaremos o circuito a diodos mais elementar possível, mostrado na Figura 3.1, onde possuímos uma fonte de tensão (E) um diodo (D_1) e um resistor (R). A figura também apresenta a curva característica do diodo em polarização direta.

Como comentado em capítulos anteriores, a definição do ponto de operação do circuito pode ser feita por meio da análise da reta de carga, onde cruzamos em um mesmo gráfico a curva característica do diodo e a reta de carga do circuito. Para levantar a reta de carga

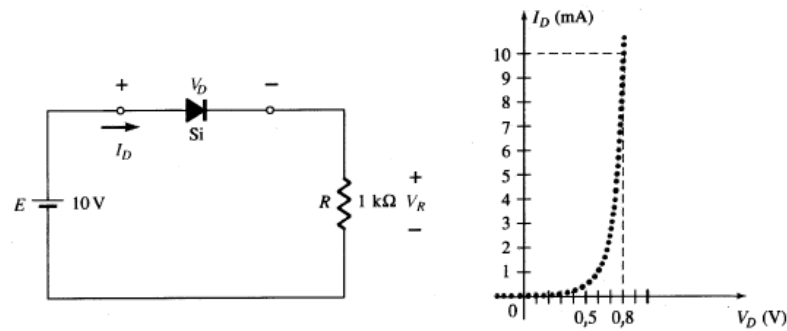


Figura 3.1: Circuito a diodos elementar e curva característica.

para o circuito apresentado na Figura 3.1, levantamos a equação de balanço de tensão do circuito:

$$E = V_D + V_R = V_D + RI_D \quad (3.1)$$

Considerando a tensão $E = 10V$ (c.c.), a equação apresenta apenas duas variáveis (V_D e I_D), as quais são exatamente as mesmas variáveis que compõem os eixos da curva característica do diodo. Assim sendo, podemos avaliar qual seria o comportamento do circuito ao longo do quadrante mostrado na curva característica:

$$I_D = \frac{E - V_D}{R} \quad (3.2)$$

Verifica-se que a relação entre I_D e V_D para o quadrante avaliado é uma reta com inclinação negativa, a qual corta o eixo das ordenadas em $V_D = E$ e o eixo das abscissas em $I_D = \frac{E}{R}$. Assim, podemos traçar essa reta de carga em conjunto com a curva característica do diodo e encontrar o real ponto de operação do sistema. Essa combinação é mostrada na Figura 3.2.

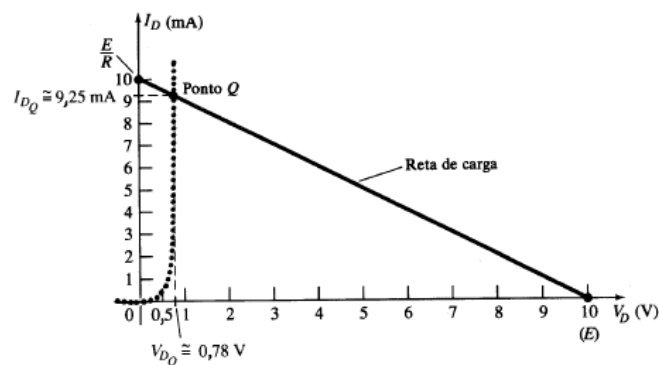


Figura 3.2: Análise por reta de carga do circuito da Figura 3.1.

Observa-se que para o circuito em questão, a tensão $V_D = 0,78V$ e a corrente $I_D =$

$9,22mA$. Outra forma de se analisar o circuito seria utilizar os modelos aproximados discutidos no capítulo anterior. Para a segunda aproximação, por exemplo, teríamos:

$$I_D = \frac{10V - 0,7V}{1k\Omega} = 9,3mA \quad (3.3)$$

Nota-se que o erro obtido pela aproximação foi de aproximadamente 1%, algo irrisório, uma vez que a tolerância de muitos componentes elétricos é muito maior do que isso. Esse erro, no entanto, pode variar de diodo para diodo. Para que a análise simplificada seja mais confiável, é importante verificar o datasheet do componente e buscar o valor de V_D mais condizente com a aplicação. Pode-se concluir, portanto, que a aplicação dos modelos simplificados permite uma avaliação mais rápida do estado de um circuito eletrônico, tendo em contrapartida uma perda de precisão na definição das grandezas elétricas. Assim sendo, para as próximas análises iremos considerar apenas o modelo em primeira aproximação do diodo.

3.1.2 Exemplos de circuitos a diodos simples

Para se realizar a análise de circuitos a diodos é importante determinar primeiramente o sentido da corrente que passa pelo diodo e então empregar o modelo em polarização direta ou reversa. A definição do sentido da corrente, contudo, pode não ser trivial à primeira vista, de modo que muitas vezes o estudante deve fazer uma investigação sobre o estado do dispositivo. Iremos apresentar alguns exemplos de circuitos a diodos simples, de modo a podermos exemplificar formas de análise de circuitos a diodos.

Circuito 3.1.A

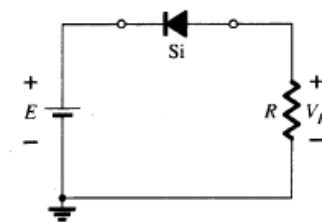


Figura 3.3: Circuito a diodos do Exemplo A

Neste primeiro exemplo consideraremos o circuito mostrado na Figura 3.3. Para se realizar a análise do referido circuito, devemos, primeiramente, determinar qual o sentido da corrente que a fonte de tensão está tentando impor ao circuito e assim determinar qual o tipo de polarização que o diodo se encontra. Para definir este sentido, lançaremos mão de um artifício: Substituiremos inicialmente o diodo por um resistor e observaremos qual o sentido da corrente no circuito, caso a corrente resultante esteja no mesmo sentido da "seta" do diodo, ele estará em polarização direta, caso contrário, ele estará em polarização reversa. A Figura 3.4 exemplifica esse método.

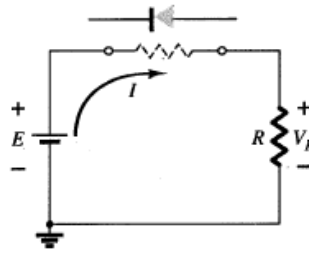


Figura 3.4: Determinando o sentido da corrente através o diodo.

Notamos que, o sentido da corrente imposta pela fonte seria do catodo para o anodo do diodo, ou seja, estaria no sentido reverso à seta do diodo. Assim, podemos concluir que o diodo no circuito acima entraria em corte (polarização reversa). Uma vez conhecido o sentido da corrente, aplicamos o modelo adequado para o diodo, neste caso o diodo seria representado por um circuito aberto, como ilustrado na Figura 3.5.

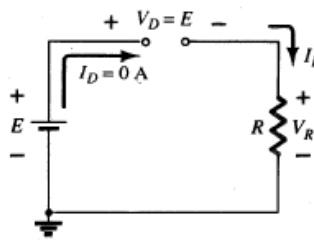


Figura 3.5: Estado final do circuito do exemplo A.

Perceba que a corrente no circuito seria de $I_D = 0A$, uma vez que o diodo em polarização reversa bloqueia a circulação de corrente. Seguindo a lei de Kirchhoff das tensões, teríamos:

$$E - V_D - R \cdot I_D = 0 \quad (3.4)$$

Substituindo o valor da corrente:

$$E - V_D = 0 \Rightarrow V_D = E \quad (3.5)$$

Note que pela polaridade da tensão V_D descrita na figura, a tensão entre anodo e catodo (V_{AK}) seria $V_{AK} = -E$.

Circuito 3.1.B

Realizando sobre o circuito apresentado na Figura 3.6 o mesmo artifício utilizado no exemplo anterior, para se descobrir o sentido da corrente, iremos verificar que o diodo se encontrará diretamente polarizado. Substituindo então o diodo pelo seu modelo em polarização direta (segunda aproximação), obteremos o circuito mostrado na Figura 3.7.

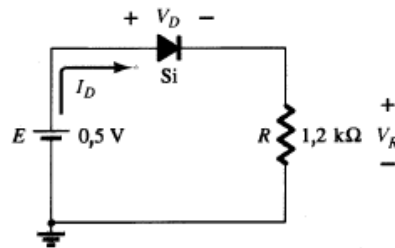


Figura 3.6: Circuito do exemplo B.

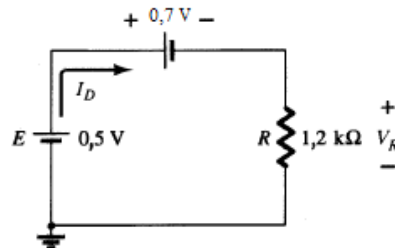


Figura 3.7: Circuito do exemplo B aproximado.

Levantando a lei de Kirchhoff das tensões, obteremos a seguinte expressão:

$$E - V_D - R \cdot I_D = 0 \quad (3.6)$$

A corrente do sistema será;

$$I_D = \frac{E - V_D}{R} \quad (3.7)$$

Substituindo valores, temos:

$$I_D = \frac{0,5V - 0,7V}{1,2k\Omega} = -0,17mA \quad (3.8)$$

Note que a corrente encontrada possui um sinal negativo, isto é, circula no sentido contrário ao definido no circuito. Isto implica em se dizer que o diodo estaria reversamente polarizado, o que estaria em desacordo com a nossa análise. Na realidade o que ocorreu foi o seguinte: O diodo está diretamente polarizado, no entanto, a tensão da fonte é inferior à tensão limiar do diodo, o que indica que os portadores majoritários do diodo não conseguiram ainda vencer a barreira de potencial. Logo, o diodo encontra-se em corte, isto é, apesar de polarizado diretamente a corrente que o atravessa é igual a zero. Assim, $I_D = 0$ e $V_{AK} = V_D = 0,5V$.

Circuito 3.1.C

Neste exemplo, ao invés de um diodo apenas, possuímos uma associação de dois diodos em série: um de Silício ($V_D = 0,7V$) e um de Germânio ($V_D = 0,3V$). Para avaliar o

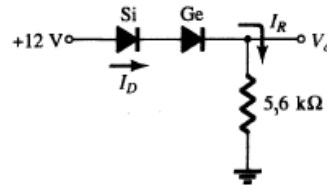


Figura 3.8: Circuito do exemplo C.

sentido da corrente utilizamos o mesmo artifício empregado nos exemplos anteriores. Ao fazer isso, notaremos que ambos os diodos estarão diretamente polarizados. Substituindo então o símbolo dos diodos pelo seu modelo aproximado, obteremos o circuito da Figura 3.9.

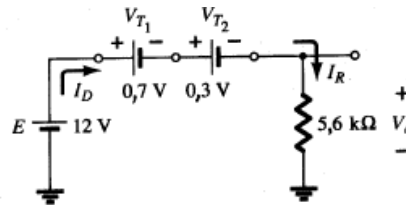


Figura 3.9: Circuito do exemplo C com os modelos aproximados.

Levantando a lei de Kirchhoff das tensões, encontramos:

$$12V - 0,7 - 0,3 - 5,6k\Omega \cdot I_D = 0 \quad (3.9)$$

Desta forma, podemos calcular o valor da corrente I_D :

$$I_D = \frac{12V - 0,7V - 0,3V}{5,6k\Omega} = 1,96mA \quad (3.10)$$

Para se definir a tensão V_o devemos observar que a corrente I_D passará toda pelo resistor de $5,6k\Omega$, gerando uma tensão $V_r = I_D \cdot 5,6k\Omega$. Essa tensão V_r possui a mesma diferença de potencial que a tensão V_o , de modo que $V_r = V_o$, assim;

$$V_o = 1,96mA \cdot 5,6k\Omega = 11V \quad (3.11)$$

Outro caminho seria substituir a equação de V_o descrita anteriormente na equação da lei de Kirchhoff de tensões:

$$12V - 0,7 - 0,3 - V_o = 0 \rightarrow V_o = 12 - 0,7 - 0,3 = 11V \quad (3.12)$$

Nota-se que para se definir as grandezas elétricas do circuito é necessário considerar as quedas de tensão em ambos os diodos.

Circuito 3.1.D

Neste exemplo temos um circuito com duas fontes de tensão, como mostrado na Figura 3.10. Nesse caso, poderíamos utilizar o artifício de substituir o diodo por um elemento resistivo e resolver o circuito como vínhamos fazendo até então, contudo, outro método de análise poderia ser utilizado com a mesma eficácia: Assumiremos inicialmente que o diodo está em condução (sentido da corrente igual ao sentido da seta) e resolveremos o circuito. Se esta consideração estiver equivocada, ou seja, se o diodo na realidade estiver em corte, isso será indicado por incoerências nos valores de tensão e corrente encontrados.

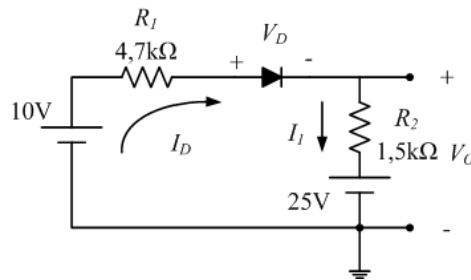


Figura 3.10: Circuito do exemplo D.

Caso o diodo estivesse em condução, o sentido das correntes seria igual ao indicado na figura do exemplo, a equação da malha neste caso seria:

$$10V - R_1 I_D - V_D - R_2 I_1 - 25V = 0 \quad (3.13)$$

Lembrando que, se o diodo conduz: $I_1 = I_D$ e $V_D = 0,7V$. Assim, teríamos:

$$I_D = \frac{10V - 25V - 0,7V}{4,7k\Omega + 1,5k\Omega} = -15,1mA \quad (3.14)$$

Novamente encontramos uma corrente com sentido inverso ao determinado no início da análise. Isso significa que o diodo encontra-se na realidade em corte, ou seja, $I_D = 0A$. Logo, necessitamos refazer os nossos cálculos e modificar o modelo do diodo empregado. Considerando que o diodo está inversamente polarizado, o circuito final ficaria da seguinte forma:

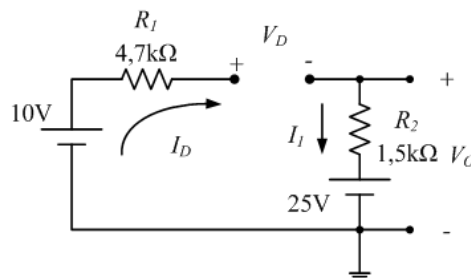


Figura 3.11: Circuito do exemplo D com o diodo em seu estado correto.

Notamos então que a corrente $I_D = I_1 = 0A$. A tensão $V_O = 25V$. e a tensão sobre o diodo será:

$$V_D = (10V - R_1 I_D) - (R_2 I_1 + 25V) = 10V - 25V = -15V \quad (3.15)$$

Circuito 3.1.E

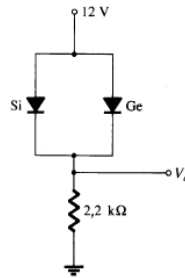


Figura 3.12: Circuito do exemplo E.

Neste exemplo, existem dois diodos em paralelo no caminho da corrente. Neste caso, a tensão entre os terminais dos diodos deve ser a mesma. Isso indica que o diodo que possuir a menor tensão limiar irá impor esta tensão sobre o outro diodo.

Na prática, como não existem dois diodos com as mesmas características, a disposição de dispositivos em paralelo fará como que a corrente vista por cada diodo seja diferente (mesmo que minimamente), gerando o que chamamos de desequilíbrio de corrente. O cálculo exato desse desequilíbrio é muito complicado de ser realizado, uma vez que não sabemos a priori as características exatas de um diodo específico (*OBS: o datasheet de um diodo indica faixas de valores para um mesmo lote de componentes*), por isso consideraremos para análise que todos os diodos de um mesmo tipo possuem características iguais.

No exemplo em questão temos um diodo de Silício e outro de Germânio em paralelo. Utilizando o artifício do elemento resistivo verificamos que ambos os diodos estão diretamente polarizados, contudo, como a tensão limiar do diodo de Germânio é menor do que a do de Silício, o diodo de Germânio estará conduzindo e o de Silício estará em corte. A Figura 3.13 abaixo exemplifica essa situação:

Assim, a corrente $I_{D,Si} = 0$ e a corrente $I_{D,Ge}$ será:

$$I_{D,Ge} = \frac{12V - 0,3V}{2,2k\Omega} = 5,32mA \quad (3.16)$$

A tensão sobre a carga será:

$$V_O = 12V - 0,3V = 11,7V \quad (3.17)$$

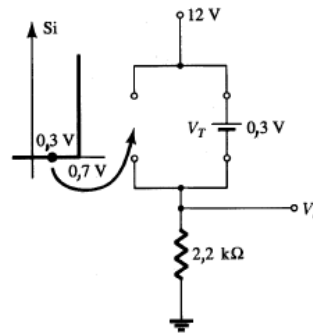


Figura 3.13: Circuito do exemplo E redesenhado.

3.1.3 Funções Lógicas a Diodos

Uma tarefa muito requisitada por sistemas eletrônicos é a realização de operações lógicas e aritméticas com sinais elétricos. As operações aritméticas (soma, subtração, etc) são realizadas no domínio analógico por circuitos especiais chamados de amplificadores operacionais, cujo estudo será feito em outra disciplina. Já as operações lógicas podem ser implementadas por meio de circuitos integrados específicos, conhecidos como portas lógicas (TTL, CMOS, BICMOS, etc), ou por associações simples de diodos (Funções AND e OR) e transistores (Função NOT). Nessa seção apresentaremos as configurações básicas que implementam as funções OR e AND com diodos.

OBS: Apesar de funcionalmente um circuito lógico a diodos e uma porta lógica operarem da mesma maneira, existem diferenças importantes entre as duas implementações de funções lógicas. Para sistemas digitais complexos é importante sempre lançar mão das portas lógicas, por questão de compatibilidade e confiança nas informações manipuladas.

Função OR

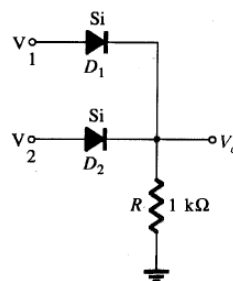


Figura 3.14: Configuração de uma função OR implementada com diodos.

A configuração mostrada na Figura 3.14 ilustra uma função OR implementada com diodos. As entradas da função são as tensões V_1 e V_2 e a saída da mesma é a tensão sobre o resistor de **pull-down**, V_O . Para se realizar a análise do circuito e comprovar que ele é capaz de implementar uma função booleana OR sobre as entradas, temos que verificar a resposta do sistema frente a todas as combinações de entrada possíveis. Faremos isso a seguir:

- A. $V_1 = 0V$ e $V_2 = 0V$ Nesse caso, todas as tensões envolvidas no circuito são nulas, o que indica que não há circulação de corrente. Isto indica que ambos os diodos devem estar em corte. Assim, a tensão sobre o resistor de pull-down será zero;
- B. $V_1 = 10V$ e $V_2 = 0V$ Utilizando o artifício do elemento resistivo, verificamos que o diodo D_1 se encontra em condução e o diodo D_2 se encontra em corte. Assim, a tensão na saída será $V_O = 10V - 0,7V = 9,3V$;
- C. $V_1 = 0V$ e $V_2 = 10V$ Esse caso é semelhante ao anterior, sendo que agora o diodo D_1 está em corte e o diodo D_2 , em condução;
- D. $V_1 = 10V$ e $V_2 = 10V$ Nessa situação ambos diodos se encontram em condução e a tensão sobre a saída será $9,3V$.

Resumimos as considerações feitas acima na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Comportamento do circuito de uma função OR a diodos

V_1	V_2	V_O
0V	0V	0V
0V	10V	9,3V
10V	0V	9,3V
10V	10V	9,3V

Se considerarmos que a tensão 0V representa um nível lógico '0' e uma tensão igual ou superior a 9,3V representa um nível lógico '1', então verificamos que o circuito da Figura 3.14 implementada de fato uma função OR.

Função AND

A Figura 3.15 apresenta a configuração de um circuito que implementa uma função AND. As entradas são novamente V_1 e V_2 , e a saída, a tensão V_O . Observamos que agora temos uma fonte externa de 10V conectada à saída por um resistor de **pull-up**. Para que o circuito funcione adequadamente, o valor do nível lógico '1', nas entradas, deverá ser igual ou superior à tensão externa.

Nesse circuito, caso alguma das entradas possuir uma tensão igual a 0V, o diodo ligado àquela entrada estará em condução. Este diodo forçará a tensão na saída a ser igual à queda de tensão sobre ele, ou seja, quando uma das entradas é 0V, a saída será

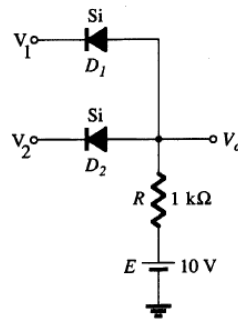


Figura 3.15: Configuração de uma função AND implementada com diodos.

igual a 0,7V. Quando ambas as entradas forem iguais a 10V (tensão da fonte externa), ambos os diodos estarão em corte, o que faz com que a tensão na saída seja igual a 10V. Tente analisar o circuito pelos métodos discutidos anteriormente e comprove as afirmações acima.

A Tabela 3.2 resume o comportamento do sistema.

Tabela 3.2: Comportamento do circuito de uma função AND a diodos

V_1	V_2	V_O
0V	0V	0V
0V	10V	0V
10V	0V	0V
10V	10V	10V

Exercícios resolvidos

1 - Para o circuito abaixo, calcule o valor da corrente I_D e o valor da tensão V_O .

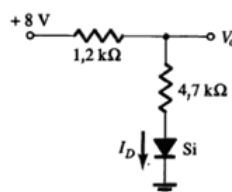
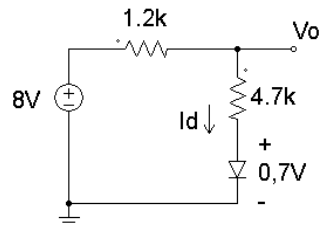


Figura 3.16: Exercício Resolvido 1.

Resolução

Primeiramente deve-se definir se o diodo estará conduzindo ou não. Ao se observar o circuito, a fonte de tensão de 8V impõe ao circuito uma diferença de potencial que forçaria a circulação de uma corrente no sentido de condução do diodo. Assim, pode-se concluir

que o diodo estará em polarização direta. Uma vez sabido isso, pode se redesenhar o circuito:



Pode-se então, levantar a equação da malha formada no circuito:

$$8V = 1,2k\Omega \cdot I_D + 4,7k\Omega \cdot I_D + 0,7V \quad (3.18)$$

Isso nos permite definir o valor da corrente na malha:

$$I_D = \frac{8V - 0,7V}{4,7k\Omega + 1,2k\Omega} = 1,24mA \quad (3.19)$$

A definição da tensão V_O passa pela análise do ramo existente entre o ponto de medição (V_O) e o terminal de referência (terra). Note que entre os dois pontos do circuito existe o resistor de $4,7k\Omega$ e o diodo. Assim, a queda de tensão no ramo será de:

$$V_O = 4,7k\Omega \cdot I_D + 0,7V = 4,7k\Omega \cdot 1,24mA + 0,7V = 6,53V \quad (3.20)$$

2 - Para o circuito abaixo, calcule: a) O valor das corrente I e I_{D2} , b) o valor das tensões V e B , c) defina o estado de condução dos dois diodos.

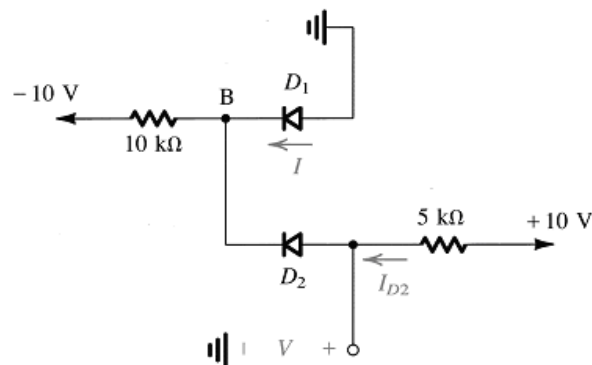


Figura 3.17: Exercício Resolvido 2.

Resolução

Neste circuito, não é trivial definir qual dos diodos está em condução e qual estaria bloqueado. Assim, iremos utilizar outra técnica de resolução: Suporemos que ambos os

diodos estão em condução. Ao fim da resolução, verificaremos se essa consideração estava correta. Caso ela estiver errada, refaremos a análise do circuito.

Para resolver o circuito, iremos utilizar o método de kirchhoff das tensões de nó. Note que o circuito apresenta apenas um nó efetivo, o nó B. Assim sendo, a lei de kirchhoff para este nó pode ser definida como:

$$I_x = I + I_{D2} \quad (3.21)$$

Onde I_x é a corrente que sai do nó B para a fonte de -10V. Podemos desenvolver as correntes I_{D2} e I_x , a corrente I , por circular apenas por um diodo, não possui relação direta com nenhuma tensão. Assim:

$$I_{D2} = \frac{10V - 0,7V - B}{5k\Omega} = \frac{9,3V - B}{5k\Omega} \quad (3.22)$$

$$I_x = \frac{B - (-10V)}{10k\Omega} = \frac{B + 10V}{10k\Omega} \quad (3.23)$$

Retornando na equação do nó, se tem que:

$$\frac{B + 10V}{10k\Omega} = I + \frac{9,3V - B}{5k\Omega} \quad (3.24)$$

De modo que:

$$I = \frac{3B - 8,6V}{10k\Omega} \quad (3.25)$$

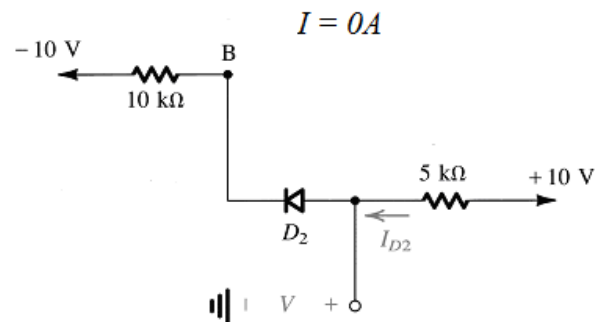
Observe que não se pode definir o valor da corrente I sem se conhecer o valor da tensão no nó B. O valor da tensão, no entanto, foi definido ao se assumir que ambos os diodos estão conduzindo. Como um diodo de silício possui uma queda de tensão de 0,7V entre anodo e catodo, e como o anodo do diodo D_1 está conectado no terra e o seu catodo, no terminal B, pode-se concluir que a tensão de $B = 0 - 0,7V = -0,7V$. Com isso, a corrente I se torna:

$$I = \frac{3(-0,7V) - 8,6V}{10k\Omega} = -1,07mA \quad (3.26)$$

A corrente I_{D2} será:

$$I_{D2} = \frac{9,3V - (-0,7V)}{5k\Omega} = 2mA \quad (3.27)$$

Neste ponto da resolução já se constata uma irregularidade: A corrente no diodo D_1 é negativa, ou seja, é contrária ao sentido definido no problema. Isso faz com que o diodo conduza uma corrente reversa, o que não ocorre na realidade. Com isso se conclui que o diodo D_1 está na realidade em corte. Uma vez conhecido os estados de condução dos diodos, pode-se redesenhar o circuito, para a nova condição:



Observe que a corrente $I = 0A$. O circuito se torna uma única malha, de modo que se pode escrever:

$$10V + 10V = 5k\Omega \cdot I_{D2} + 10k\Omega \cdot I_{D2} + 0,7V \quad (3.28)$$

Assim:

$$I_{D2} = \frac{20V - 0,7V}{5k\Omega + 10k\Omega} = 1,29mA \quad (3.29)$$

Com isso se pode definir os valores das tensões medidas:

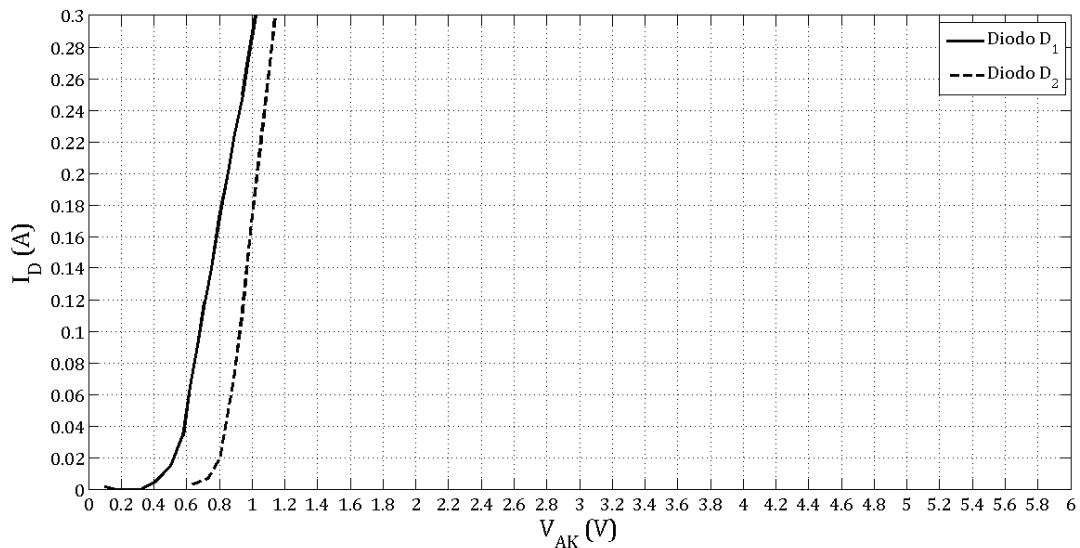
$$V = 10V - 5k\Omega \cdot 1,29mA = 3,55V \quad (3.30)$$

$$B = V - 0,7V = 3,55V - 0,7V = 2,85V \quad (3.31)$$

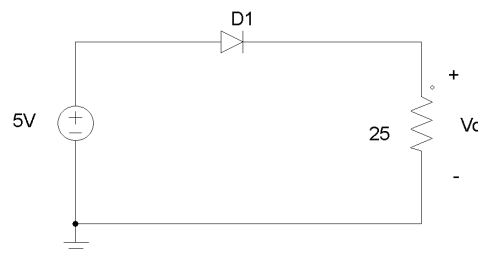
Com isso, podemos responder o problema:

- a) $I = 0A$, $I_{D2} = 1,29mA$;
- b) $V = 3,55V$, $B = 2,85V$;
- c) O diodo D_1 está bloqueado e o diodo D_2 estará conduzindo.

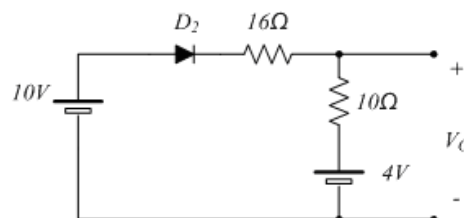
3.2 Exercícios propostos



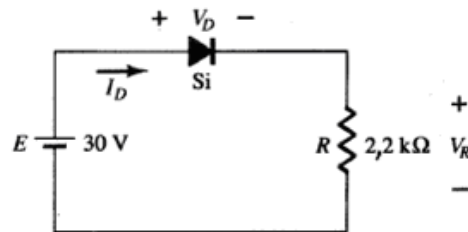
- Considerando as curvas características de diodos mostradas acima, defina para o circuito abaixo: a) a reta de carga, b) O valor da tensão V_O .



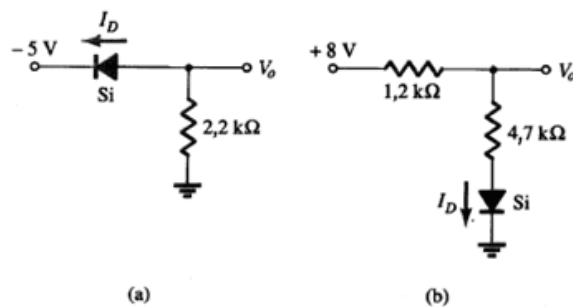
- Refaça a análise do item anterior, considerando agora o modelo do diodo em primeira aproximação. Compare os resultados obtidos.
- Considerando as curvas características de diodos mostradas anteriormente, analise o circuito abaixo e defina: a) a reta de carga, b) o valor da tensão V_O .



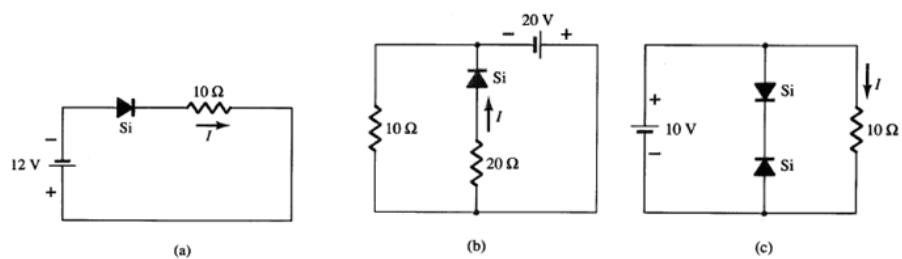
- Para o circuito abaixo calcule a tensão V_R e a corrente I_D , considerando o modelo de primeira aproximação.



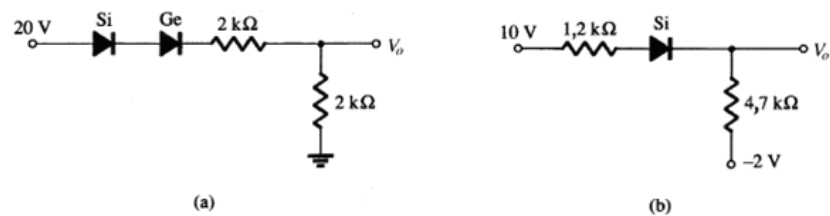
5. Para os circuitos abaixo, calcule o valor da corrente I_D e o valor da tensão V_O .



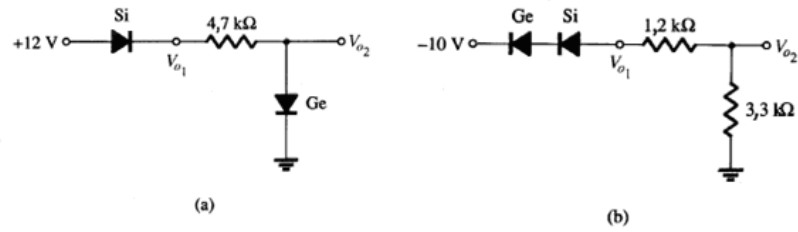
6. Para os circuitos abaixo, calcule o valor da corrente I e o valor da tensão sobre o(s) diodo(s) (V_{AK}).



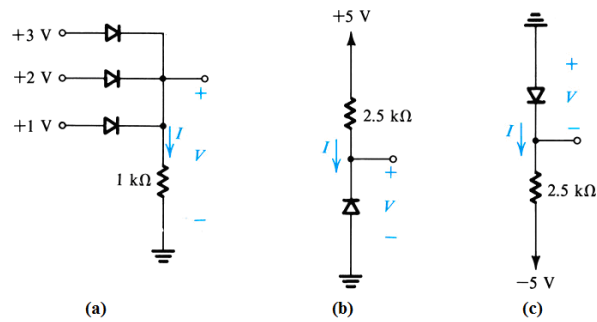
7. Para os circuitos abaixo, determine o valor da tensão V_O .



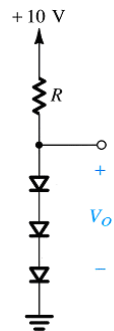
8. Para os circuitos abaixo, determine o valor das tensões V_{o1} e V_{o2} .



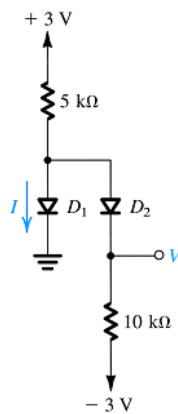
9. Para o circuito abaixo, determine o valor da tensão V e da corrente I .



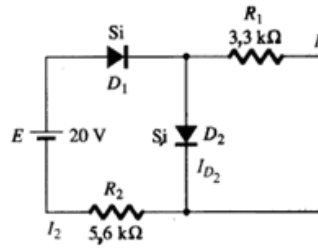
10. Para o circuitos abaixo, determine o valor da tensão V_O .



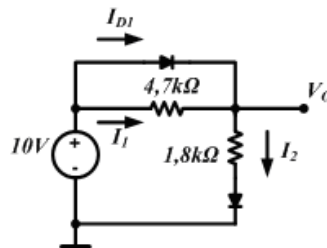
11. Para o circuito abaixo, determine o valor da tensão V e da corrente I .



12. Para o circuito abaixo, calcule o valor das correntes I_1 , I_2 e I_{D2} .



13. Calcule para o circuito abaixo, as correntes I_1 , I_2 , I_{D1} e o valor das tensões V_O .



Capítulo 4

Aplicações de Diodos em c.a.

4.1 Sinais

Um sinal é um meio de representar as informações contidas em fato ou fenômeno físico presentes em nosso mundo. Na área técnica, tratamos como sinal todo fenômeno que carrega informações úteis a um processo ou sistema. Como exemplo, imagine que um sistema de controle tem que controlar a temperatura de um forno industrial, para esse sistema as informações referentes à variação da temperatura da câmara ao longo do tempo é um sinal, assim como as informações de pressão, vazão de combustível, etc. Para um sistema de transmissão de rádio, um tipo de sinal seria a voz do locutor, a qual transporta as notícias a serem anunciadas. Um tipo de processo pode receber informações advindas de vários sinais, alguns úteis, como os exemplificados acima, outros, indesejáveis. Normalmente trata-se os sinais indesejados em um determinado processo como **ruído**.

Os sistemas eletrônicos a serem discutidos nessa apostila tem como intuito principal processar os sinais necessários para o funcionamento de um processo. No entanto, os sistemas eletrônicos apenas interpretam grandezas elétricas, como tensão e corrente. Assim sendo, para que os diversos fenômenos físicos possam ser processados é necessário que estes sejam primeiramente convertidos em sinais análogos de corrente ou tensão. Esse processo de conversão é realizado por equipamentos específicos chamados de **transdutores**, dos quais podemos citar o microfone (transdutor de pressão), o termopar (transdutor térmico), o LDR (transdutor luminoso), entre outros. Os transdutores mais utilizados em processos industriais serão tema das disciplinas de instrumentação e controle, para o dado momento, nos basta saber que os sinais relacionados a eventos físicos podem ser representados no domínio elétrico.

Como os sinais elétricos são gerados a partir de eventos físicos, eles possuem um comportamento variável com o tempo, ou seja, a magnitude do sinal pode mudar de valor ao longo do tempo. Desta forma um sinal elétrico pode ser representado por um gráfico temporal, como o ilustrado na Figura 4.1.

Existem no entanto, diversos termos utilizados para descrever as características de um determinado sinal elétrico. Nas próximas seções esses termos serão melhor discutidos.

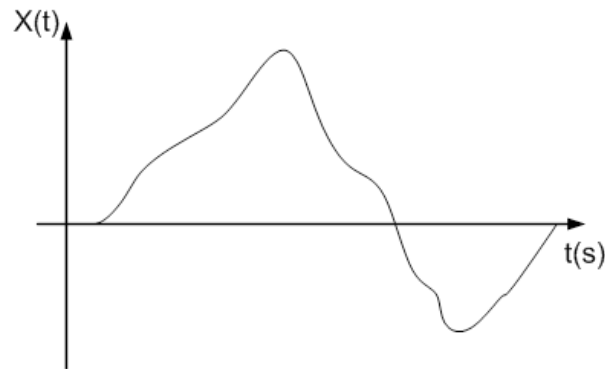


Figura 4.1: Sinal elétrico arbitrário

4.1.1 Elementos de um sinal elétrico

Como comentado, um sinal elétrico pode se apresentar de diversas formas, dependendo do evento que o criou e do processamento sobre ele realizado. Assim sendo, costuma-se definir alguns parâmetros para melhor definir as características de cada sinal. Um sinal convencional possui três componentes básicos:

- Amplitude - Define a magnitude do sinal elétrico (Unidade dependente do tipo de grandeza analisada);
- Frequência - Define o número de ciclos que aquele sinal exibe em um segundo (Medido em Hertz);
- Fase - Define o deslocamento do sinal em relação a um instante de referência (Medido em graus ou radianos);

Um sinal pode, portanto, transportar informações inseridas em pelo menos um desses três componentes. Existem, contudo diversas formas de se interpretar e trabalhar com cada um desses componentes, como será discutido mais a seguir. Para tanto, considere como exemplo inicial a representação de um sinal simples descrito na Figura 4.2.

4.1.1.1 Amplitude de um sinal

A amplitude de um sinal elétrico mede a magnitude daquele sinal, sendo que a unidade referente a tal magnitude está relacionada à grandeza analisada. Por exemplo, um sinal de tensão terá sua magnitude medida em Volts, um sinal de corrente, em Ampéres e um sinal potência, em Watts. A amplitude pode ser definida de várias formas diferentes, determinando valores distintos. Assim sendo, apresentamos aqui algumas definições mais comumente utilizadas.

4.1.1.1.1 Valor Instantâneo O valor instantâneo de um sinal representa a magnitude do sinal em cada instante de tempo.

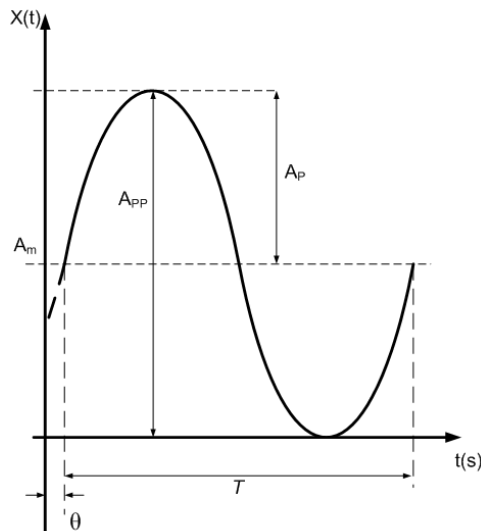


Figura 4.2: Elementos de um sinal elétrico

4.1.1.1.2 Valor de pico-a-pico O Valor de pico-a-pico representa a magnitude existente entre o ponto máximo do sinal em um período e o seu ponto mínimo. Na Figura 4.2 o valor de pico-a-pico é representado por A_{PP} .

4.1.1.1.3 Valor de pico O valor de pico representa a magnitude existente entre o ponto máximo do sinal em um período e o valor médio do sinal. Na Figura, o valor de pico é representado por A_P .

4.1.1.1.4 Valor médio O valor médio é a magnitude da média de um sinal ao longo de um período. Na Figura 4.2, o valor médio é representado por A_m . A definição de valor médio é dada pela equação abaixo:

$$A_m = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (4.1)$$

Ou seja, é igual à soma das áreas sob a curva de um sinal, dividido pelo período.

4.1.1.1.5 Valor Eficaz ou RMS - Root Mean Square O valor RMS, ou seja, o valor médio quadrático, é uma representação de magnitude muito utilizado em sistemas elétricos. Contudo esse valor não pode ser extraído apenas pela análise da forma de onda do sinal, como é feito com os demais. Esse valor surge com a necessidade de se medir a capacidade de gerar potência de um sinal.

O valor eficaz é um valor **contínuo** atribuído a um sinal arbitrário, de modo que a potência dissipada sobre um resistor alimentado por um sinal contínuo de magnitude igual

ao valor RMS de um sinal arbitrário será igual à potência dissipada pelo mesmo resistor quando este é alimentado pelo sinal arbitrário em si.

A equação que define o valor eficaz é:

$$A_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x(t)^2 dt} \quad (4.2)$$

Talvez o valor RMS mais importante de ser lembrado por alunos de eletrônica é o Valor Eficaz de uma senóide pura. Considera-se uma senóide pura um sinal elétrico de forma de onda senoidal com valor médio nulo e frequência fixa, como ilustra a Figura 4.3.

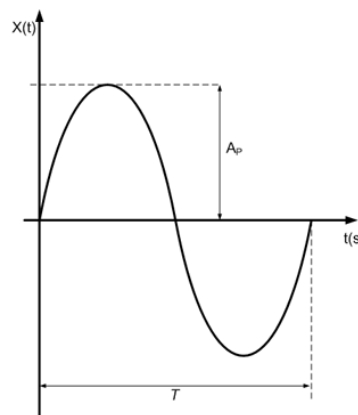


Figura 4.3: Sinal senoidal puro

Neste caso, o Valor Eficaz do sinal senoidal puro seria:

$$A_{RMS, Senoide} = \frac{A_P}{\sqrt{2}} \quad (4.3)$$

4.1.1.2 Frequência de um sinal

A frequência de um sinal elétrico representa quantos ciclos, ou períodos, daquele sinal ocorrem em um intervalo de um segundo. O valor de frequência é representado pela unidade Hertz (Hz), a qual significa ciclos/segundo. O valor inverso da frequência é o período de um sinal, ou seja, o tempo necessário para que este sinal complete um ciclo. Na Figura 4.2, o período do sinal é representado por T . Assim a frequência do sinal seria:

$$f = \frac{1}{T} \quad (4.4)$$

4.1.1.3 Fase de um sinal

Matematicamente, considera-se que um sinal periódico, seja ele elétrico ou não, tem duração eterna, ou seja, começou em um tempo infinitamente distante e continuará para

sempre mantendo os mesmos atributos que o descrevem. Sabemos que essa afirmação não é realista, uma vez que os sinais, como representações de eventos físicos, duram um intervalo mensurável de tempo (mesmo que este seja de alguns milhões de anos!), no entanto, essa é uma maneira de podermos tratá-los como sinais periódicos e lançar mão de ferramentas matemáticas conhecidas e simplificadas para analisá-los. Uma vez dito isso, fica claro que ao se analisar um período, ou trecho, de um sinal, é importante definir um instante de tempo de referência, ou seja, em qual momento queremos verificar os atributos de um determinado sinal. Acontece, todavia, que esse instante de referência não necessariamente estará alinhado com o início de um ciclo do sinal a ser analisado. A distância (em radianos ou graus) entre o instante de referência e o início de um novo ciclo do sinal analisado dá-se o nome de **ângulo de fase**, ou simplesmente **fase**. Para exemplificar essa ideia, observe as duas ondas senoidais apresentadas na Figura 4.4.

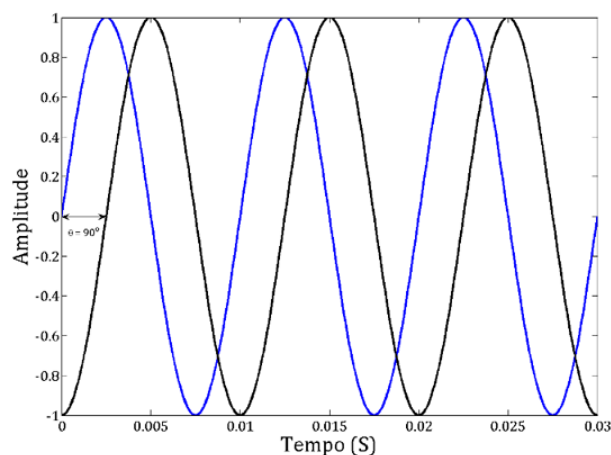


Figura 4.4: Ondas senoidais defasadas entre si.

Note que a onda em Azul se inicia no mesmo instante em que o eixo do tempo tem seu valor nulo, ou seja, $t = t_0 = 0$ (t_0 normalmente é o símbolo utilizado para definir o instante de referência.). Nesse caso, dizemos que a onda senoidal possui fase nula, ou zero, pois está **em fase** com o instante de referência. Já a onda em Preto se inicia em um instante posterior ao da onda azul, sendo que a distância angular entre a onda preta e o instante t_0 é de $\frac{\pi}{2}$, ou 90° . Logo, podemos dizer que esta onda possui um ângulo de fase de 90° .

Comumente podemos empregar o conceito de fase ao comparar duas ondas em um mesmo intervalo de tempo. Mantendo ainda o exemplo da Figura 4.4, podemos dizer que a onda preta está 90° atrasada em relação à onda azul, isso pois a onda azul tem seu início em um instante anterior à onda preta. Logo, existe um **defasamento** entre as duas ondas, o qual pode ser medido em graus (90°), ou radianos ($\frac{\pi}{2}$). No caso do sinal senoidal e seus derivados, a fase pode ser incorporada à equação que define o sinal, como é mostrado a seguir:

$$S(t) = A_p \sin(\omega t + \phi) \quad (4.5)$$

Onde: $S(t)$ é o sinal dependente do tempo;

A_p é o valor de pico do sinal;

$\omega = 2\pi f$ é a frequência angular do sinal, medida em **radianos/s**;

f é a frequência do sinal em **Hertz**;

ϕ é o ângulo de fase em **radianos**;

t é o instante de tempo que define um valor instantâneo do sinal avaliado;

Exercícios Resolvidos

1 - Para o sinal mostrado na figura 4.5 abaixo calcule:

- Valor de pico-a-pico;
- Valor médio;
- Valor de pico;
- Frequência (Hz);
- ângulo de fase.

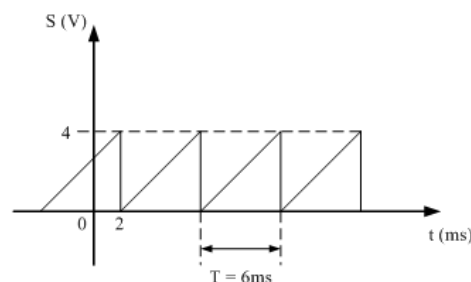


Figura 4.5: **Forma de onda do exercício E1.1.**

Resolução:

O sinal triangular mostrado na figura 4.5 excursiona entre os valores 0 e 4V, logo, o seu valor de pico-a-pico (diferença entre ponto máximo e mínimo) é de 4V.

Para calcular o valor médio, deve-se calcular a área de um ciclo e dividi-la pelo período. Como a forma de onda é triangular, podemos utilizar a área de um triângulo $\left[\frac{Base \times Altura}{2}\right]$ para calcular o que desejamos. Assim:

$$S_{area} = 4 \cdot 6 \times 10^{-3} \div 2 = 12 \times 10^{-3} V s.$$

Como o período mostrado é de 6ms, o valor médio do sinal seria:

$$\bar{S} = \frac{12 \times 10^{-3}}{6 \times 10^{-3}} = 2V.$$

O valor de pico é a diferença entre o ponto de máximo do sinal (4V) e o seu valor médio (2V), assim, o valor de pico para o sinal em questão seria de:

$$S_p = 4V - 2V = 2V.$$

O sinal possui período igual a 6ms, como a frequência de um sinal é $f = \frac{1}{T}$, a frequência do sinal será de:

$$f = \frac{1}{6 \times 10^{-3}} = 166,67Hz.$$

Note que o primeiro ciclo do sinal após a origem do gráfico se inicia no instante $t = 2ms$, este intervalo de tempo corresponde à defasagem do sinal em relação à origem. Contudo, como foi pedido o ângulo de defasagem, devemos realizar uma regra de três para definir a resposta correta. Lembrando que um ciclo completo corresponde a uma volta completa no círculo trigonométrico, ou seja, 360° ou 2π radianos, fazemos:

$$\frac{2ms}{6ms} = \frac{\phi}{360^\circ}$$

$$\phi = \frac{2ms}{6ms} \cdot 360^\circ = \frac{360^\circ}{3} = 120^\circ = \frac{2\pi}{3}rad.$$

Resp. a) 4V; b) 2V; c) 2V; d) 166,67Hz; e) 120° ou $\frac{2\pi}{3}rad$.

2 - Para o sinal quadrado mostrado na Figura 4.6, calcule o valor eficaz.

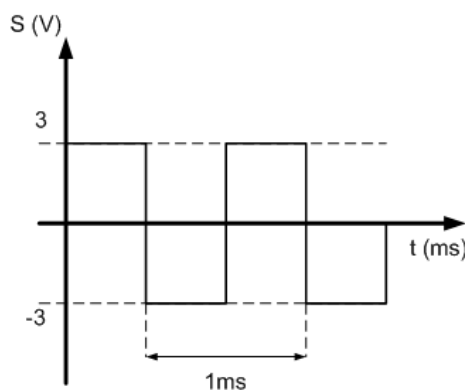


Figura 4.6: Forma de onda do exercício E1.2.

Resolução:

O primeiro passo para resolver esse exercício é entender a equação (4.2). O operador

integral, ao longo de um intervalo de tempo, calcula a área sob a curva naquele intervalo de tempo. Assim, o cálculo do valor eficaz é feito da seguinte forma:

1. Eleva-se o sinal ao quadrado;
2. Calcula a área sob a curva do sinal quadrático ao longo de um intervalo de tempo determinado (no caso, em um período);
3. Divide-se a área resultante pelo intervalo de tempo;
4. Extraí-se a raiz quadrada do resultado.

Seguindo então esses passos, elevamos primeiramente o sinal ao quadrado, encontrando então a forma de onda descrita na Figura 4.7.

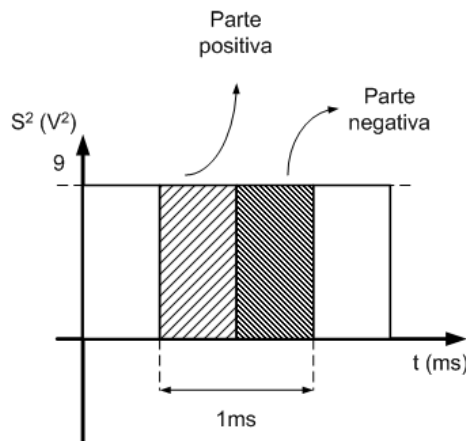


Figura 4.7: Forma de onda do exercício E1.2 elevada ao quadrado.

Uma vez feito isso, podemos calcular a área do sinal em um período.

$$S_{area} = 9 \cdot 1 \times 10^{-3} = 9 \times 10^{-3}.$$

O valor médio desse sinal resultante é calculado ao dividir-se a área do sinal em um período e o intervalo de tempo que constitui esse período:

$$S_m = S_{area} \div T = \frac{9 \times 10^{-3}}{1 \times 10^{-3}} = 9V.$$

Para finalizar o cálculo do valor eficaz, extraímos a raiz quadrada do valor médio encontrado:

$$S_{RMS} = \sqrt{9} = 3V.$$

Resp.: 3V.

4.2 Circuitos com entrada c.a.

Muitas vezes, um circuito a diodos é alimentado por um sinal alternado. Para se realizar a análise do sistema, deve-se verificar o comportamento para diversas possibilidades de funcionamento, ou seja, deve-se procurar por pontos de operação do circuito. Como exemplo, tome o circuito a diodos da Figura 4.9.

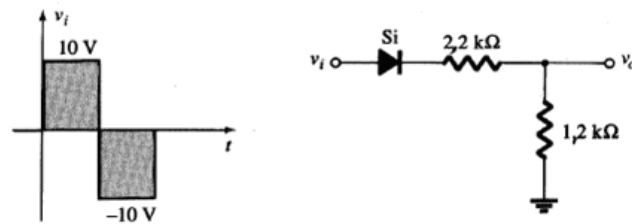


Figura 4.8: Circuito a diodos com entrada alternada.

Neste circuito existem duas condições de operação:

- Quando a tensão de entrada é positiva;
- Quando a tensão de entrada é negativa.

Quando a tensão v_i é positiva, note que o diodo estará diretamente polarizado, de modo que o circuito se torna:

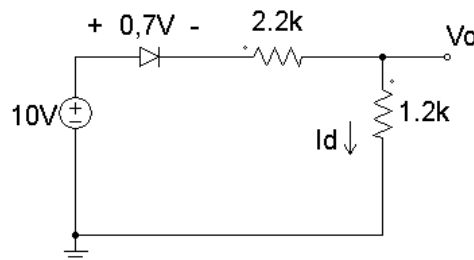


Figura 4.9: Circuito a diodos com tensão de entrada positiva.

Neste caso, pode-se escrever que:

$$10V = 0,7V + (2,2k\Omega + 1,2k\Omega) \cdot I_D \quad (4.6)$$

De modo que a corrente na malha se torne:

$$I_D = \frac{10V - 0,7V}{2,2k\Omega + 1,2k\Omega} = 2,73mA \quad (4.7)$$

A tensão de saída será então:

$$V_o = 1,2k\Omega \cdot I_D = 3,28V \quad (4.8)$$

No segundo caso, quando a tensão se tornar negativa, o diodo estará reversamente polarizado. Isso faz com que ele bloqueie a circulação de corrente, como ilustra a Figura 4.10.

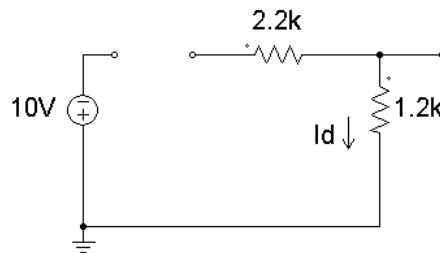


Figura 4.10: Circuito a diodos com tensão de entrada negativa.

Neste caso, como não há circulação de corrente, a tensão $V_o = 0V$. Com essas informações, pode-se esboçar a forma de onda de tensão na saída, levando em consideração as análises feitas. A Figura 4.11 apresenta as formas de onda de tensão na entrada e na saída do circuito.

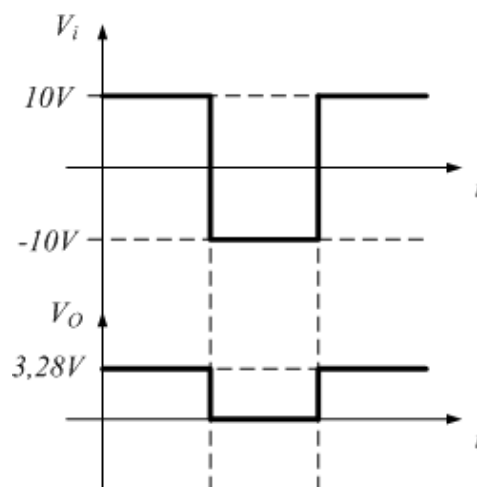


Figura 4.11: Formas de onda de tensão na entrada e na saída do circuito com entrada c.a..

Nota-se que a análise de circuitos com entrada c.a. pode se tornar bastante complexa, dependendo da montagem e da forma de onda do sinal alternado. Para simplificar o estudo dessas montagens, podemos determinar circuitos básicos a diodos, os quais podem ser encontrados em diversas aplicações. Nesta apostila abordaremos dois desses circuitos, os retificadores (como o exemplo dado acima) e os limitadores (ceifadores). Outros circuitos básicos, como os dobradores de tensão e grampeadores, podem ser encontrados nas referências desta apostila.

4.2.1 Limitadores de tensão

Os circuitos limitadores, também denominados ceifadores, são projetados para limitar o nível de tensão em sua saída. A aplicação principal dessa montagem é proteger outros circuitos de sobre-tensões provocadas por falhas nos circuitos, curto-circuito, ou ruídos induzidos, no entanto, existem aplicações onde o ceifamento é feito propositalmente, como no caso de distorcedores de áudio e geradores de forma de onda. A montagem básica de um limitador é apresentada na Figura 4.12.

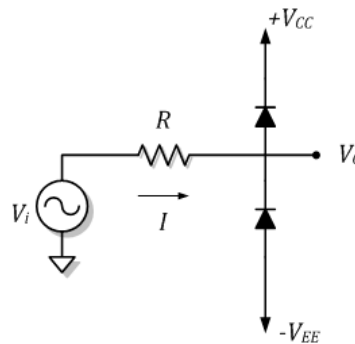


Figura 4.12: Circuito básico de um limitador de tensão.

Observe que os diodos são conectados entre a saída do circuito e duas tensões contínuas, uma positiva ($+V_{CC}$) e outra negativa ($-V_{EE}$). Esses diodos apenas conduzirão em duas condições:

- Tensão de saída igual a $+V_{CC} + 0,7V$;
- Tensão de saída igual a $-V_{EE} - 0,7V$.

Em qualquer outra situação os diodos se encontrarão em corte. Como a tensão de entrada é conectada à saída por meio de um resistor, e este apenas perceberá corrente quando os diodos estiverem em condução, quando os diodos estiverem em corte a tensão de saída será sempre igual à tensão de entrada. Com isso se percebe a finalidade do circuito: Enquanto a tensão de entrada estiver entre os limites comentados acima, ela passará pelo circuito limitador sem alteração. Quando a tensão de entrada extrapolar os limites, ela será limitada pelos diodos.

Como exemplo, tome a seguinte condição: $V_{CC} = 15V$, $V_{EE} = 10V$. Assumiremos uma tensão de entrada triangular (poderia ser qualquer forma) com valor de pico igual a $5V$. A Figura 4.13 apresenta a forma de onda da tensão de entrada e os limites de condução dos diodos.

Note que como a tensão de entrada é inferior aos patamares de saturação (limites de tensão na saída do circuito) os diodos não entrarão em condução e portanto, a tensão de saída será igual à tensão de entrada.

Caso o nível da tensão de entrada seja elevada a $12V$, ter-se-á as formas de onda mostradas na Figura 4.14. Neste segundo caso, a tensão de entrada supera o limite

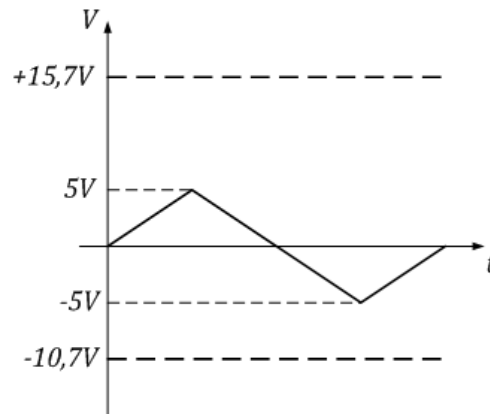


Figura 4.13: Forma de onda de entrada e limites de saturação.

inferior de saturação. Assim, o diodo inferior irá conduzir e limitar a tensão de saída, durante o intervalo em que a tensão é inferior a $-10,7V$, à tensão de saturação. Com isso, nota-se que há uma deformação na forma de onda da tensão de saída, a qual é ceifada em seu pico inferior. Caso a tensão de entrada se eleve ainda mais, ocorrerá o ceifamento no pico superior também.

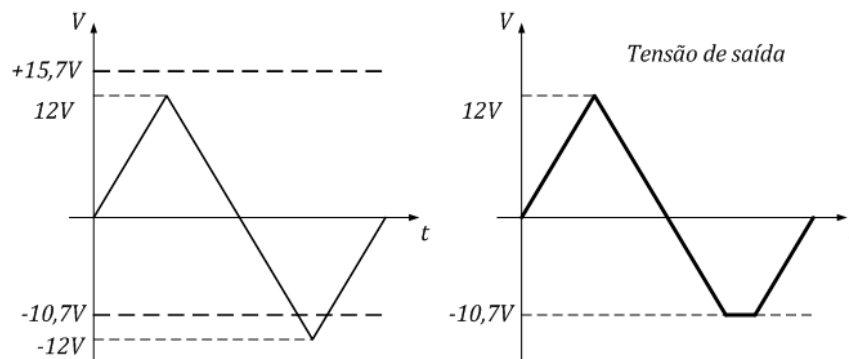


Figura 4.14: Forma de onda de entrada e limites de saturação - segundo caso.

O mesmo efeito pode ser obtido com um circuito a zeners, como o apresentado na Figura 4.15. Os limites de saturação seriam determinados pelas tensões de avalanche dos dispositivos. Neste exemplo, os limites de saturação seriam $\pm(V_Z + 0,7V)$.

OBS: Pode-se variar os valores dos limites de saturação, ou se retirar diodos, de modo a se ter apenas um limite de saturação. No entanto, o efeito de limitação sempre ocorrerá quando houver algum dispositivo que impeça a elevação do nível de tensão acima de um valor pré-determinado.

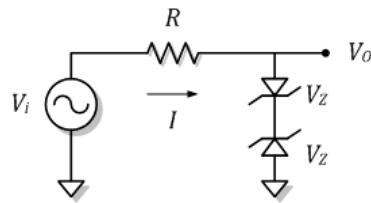


Figura 4.15: Circuito limitador a zeners.

4.2.2 Retificador Básico

Os circuitos retificadores são utilizados em uma larga gama de aplicações: conversores CA/CC, fontes de alimentação, detectores de valor de pico, geradores de forma de onda, etc. Na seção seguinte iremos verificar o funcionamento de retificadores aplicados a fontes de alimentação monofásicas. O objetivo principal de um retificador é eliminar alguma parcela do sinal de entrada, de modo que a saída exiba um nível médio diferente de zero. O circuito básico de um retificador é apresentado na Figura 4.16.

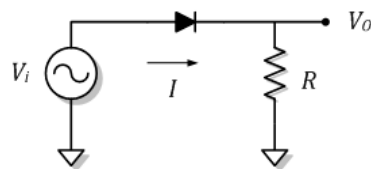


Figura 4.16: Circuito básico de um retificador.

Note que só existirá tensão na saída se o diodo conduzir e essa condição apenas será satisfeita se a tensão de entrada for positiva e superior à tensão de limiar do diodo, ou seja, $V_i \geq 0,7V$. Com essa observação, podemos esboçar a forma de onda de entrada e saída do circuito, consideraremos para tal uma tensão de entrada triangular de valor de pico 10V, como mostra a Figura 4.17.

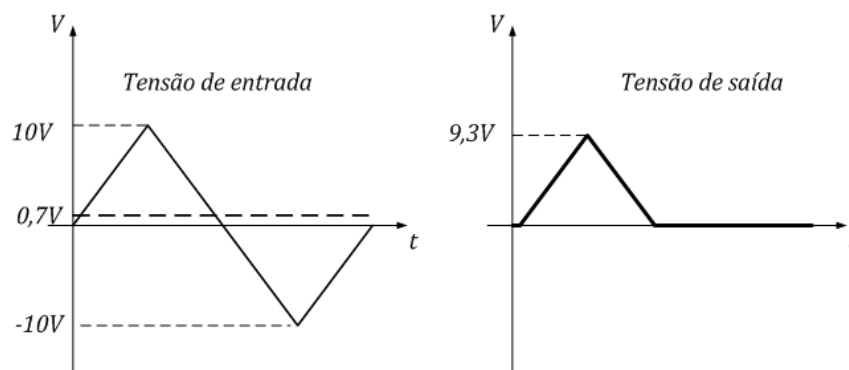


Figura 4.17: Formas de onda de um retificador básico.

Observe que o diodo deixará passar para a saída apenas a parcela de tensão que é

superior à sua tensão de limiar, assim o valor de pico da tensão de saída é de $V_{imax} - 0,7V$, como no nosso exemplo a tensão de pico de entrada é de 10V, a tensão de pico da saída será de 9,3V.

4.3 Retificadores para fontes de alimentação

4.3.1 Retificador de Meia-Onda

O circuito básico de um retificador monofásico de meia-onda é mostrado na Figura 4.18.

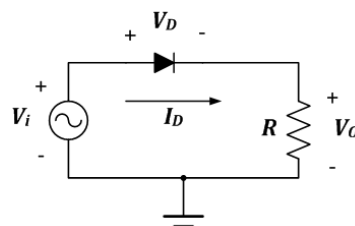


Figura 4.18: Configuração básica de um retificador de meia-onda.

Onde: V_i é a tensão senoidal de entrada. $V_i = V_m \sin(2\pi ft)$;

V_O é a tensão de saída;

V_D é a tensão sobre o diodo do retificador;

I_D é a corrente que circula pelo diodo e a carga;

R é a carga do circuito.

Observa-se que o circuito de um retificador de meia-onda se assemelha ao circuito apresentado na Figura 3.1. Naquele circuito mostramos que o diodo estaria em condução sempre que a tensão da fonte fosse superior à tensão de limiar do diodo (0,7V para o silício). Para o circuito em c.a., essa condição se mantém, no entanto, como a tensão de entrada varia com o tempo, haverá regiões de condução e de bloqueio do diodo. Essas regiões estão sintetizadas na Figura 4.19.

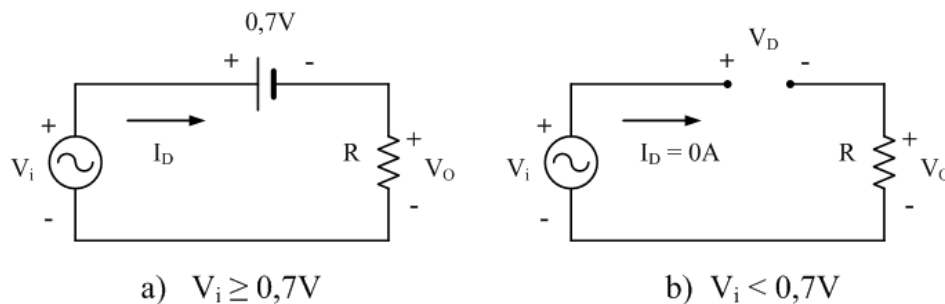


Figura 4.19: Regiões de operação do diodo em um retificador de meia onda.

Pela lei de kirchhoff das tensões, temos que a equação da malha será:

$$V_i - V_D - R \cdot I_D = 0 \quad (4.9)$$

Considerando as regiões de operação mostradas na Figura 4.19, podemos calcular os valores das grandezas elétricas do circuito:

$V_i \geq 0,7V$	$V_D = 0,7V$ $I_D = V_i \div R$ $V_O = V_i - 0,7V$	(4.10)
$V_i < 0,7V$	$V_D = V_i$ $I_D = 0A$ $V_O = 0V$	

A partir das equações acima, podemos traçar as formas de onda das tensões no circuito do retificador de meia-onda. Estas formas de onda são apresentadas na Figura 4.20.

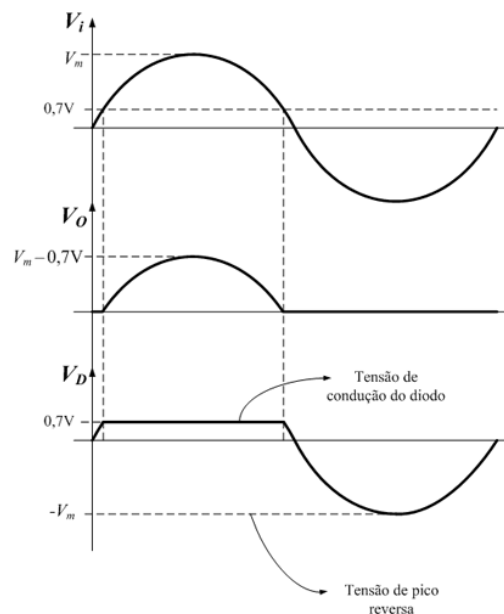


Figura 4.20: Formas de onda de um circuito retificador de meia-onda durante um período do sinal de entrada.

A tensão de pico reversa (ou TPI - Tensão de pico inversa) é o valor máximo negativo atingido pela tensão sobre o diodo do retificador. Ao se escolher um diodo retificador é importante observar se a tensão de ruptura, ou avalanche, desse diodo é superior à TPI do circuito.

Observando as formas de onda apresentadas na figura podemos identificar duas regiões de operação no circuito retificador de meia-onda:

- Semi-ciclo positivo do sinal de entrada - Enquanto a tensão de entrada é inferior à tensão limiar do diodo, não há condução. Quando a tensão de entrada é superior à tensão limiar, o diodo entra em condução, então a tensão na saída se iguala à tensão de entrada subtraindo a queda de tensão no diodo ($V_O = V_i - 0,7V$)
- Semi-ciclo negativo do sinal de entrada - Nesse intervalo a tensão de entrada é inferior a 0V, logo, o diodo se encontrará bloqueado. A tensão na saída é nula e a tensão sobre o diodo é igual à tensão de entrada.

Observando novamente a figura, verificamos que o retificador bloqueou a tensão negativa do sinal de entrada, deixando que a carga recebesse apenas a parcela positiva desse sinal. Desta forma, o retificador faz com que um valor médio seja percebido pela carga. Isto significa que o sinal de saída V_O possui uma parcela alternada e uma parcela contínua, enquanto que o sinal de entrada é puramente alternado (valor médio nulo). Por esse motivo o retificador também é conhecido como conversor CA/CC.

Essa função de conversão CA/CC é muito importante em sistemas eletrônicos, uma vez que a energia elétrica gerada e distribuída no mundo ainda se apresenta no formato alternado e as fontes de alimentação da grande maioria dos equipamentos eletrônicos devem estar na forma contínua. Assim sendo, conhecer o valor do nível c.c. aplicado à carga em sistemas retificadores é muito importante. Esse valor pode ser encontrado ao se calcular o valor médio do sinal de saída. A resolução do valor médio para a forma de onda em questão não está no escopo deste texto, de modo que apenas o resultado será apresentado. Considerando uma tensão senoidal, o valor médio visto pela carga em um retificador de meia-onda será:

$$\bar{V}_O = \frac{V_m - 0,7V}{\pi} = 0,318(V_m - 0,7V) \quad (4.11)$$

A Figura 4.21 ilustra a representação do valor médio em relação ao sinal de saída do retificador.

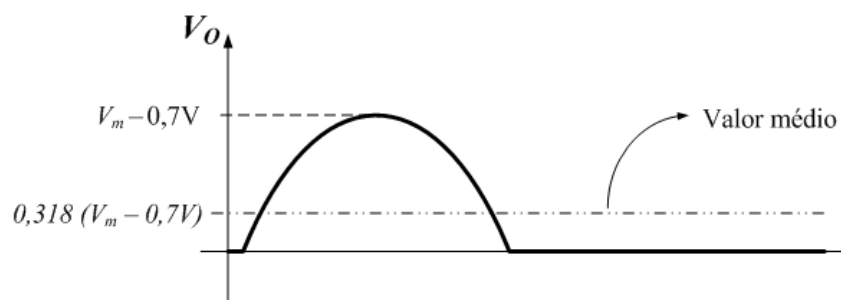


Figura 4.21: Forma de onda do sinal de saída do retificador de meia-onda e representação do valor médio.

Essa tensão contínua irá provocar sobre a carga uma corrente também contínua, o seu valor pode ser encontrado ao dividirmos (4.15) pelo valor da resistência de carga:

$$\bar{I}_D = \frac{0,318(V_m - 0,7V)}{R} \quad (4.12)$$

Considerando que a parcela contínua do sinal de saída é o termo de maior interesse em fontes de alimentação, a parcela alternada se torna algo indesejado. Neste caso tratamos a parcela alternada pelo nome de **ripple**¹. No caso apresentado, o valor de pico-a-pico do ripple é:

$$\Delta V_O = V_m - 0,7V \quad (4.13)$$

Retificador com transformador

Ao tratarmos de fontes de alimentação, a tensão de entrada se torna a tensão elétrica fornecida pelas concessionárias de energia na rede de distribuição. Nas residências brasileiras essa tensão se apresenta nas magnitudes $127V_{rms}/220V_{rms}$ e com frequência de 60Hz. Nota-se portanto que não poderíamos, com o circuito retificador apresentado acima, produzir uma tensão c.c. qualquer, uma vez que esta dependeria do valor de pico do sinal de rede, o qual é fixo. Para resolver esse problema utilizamos um componente eletromagnético chamado de transformador. O transformador é composto por duas bobinas dispostas em um mesmo núcleo ferromagnético², como ilustra a Figura 4.22.

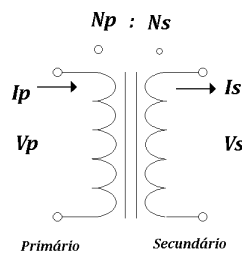


Figura 4.22: Símbolo de um transformador ideal.

Os pontos presentes sobre as bobinas do primário e do secundário indicam a polaridade de cada bobina. Os termos N_P e N_S significam o número de espiras (voltas) do primário e do secundário, respectivamente. A relação entre as tensões e as correntes nas duas bobinas é mostrada a seguir:

$$\frac{N_P}{N_S} = \frac{V_P}{V_S} = \frac{I_S}{I_P} \quad (4.14)$$

Ou seja, dependendo da relação entre as espiras do primário e do secundário, podemos elevar ou abaixar o valor da tensão na saída do transformador e assim alterar o valor

¹Ripple é um termo inglês que significa oscilação. Logo, ao tratarmos a parcela alternada de um sinal como ripple estamos dizendo que ela é uma oscilação que existe entorno de uma parcela contínua.

²Transformadores de baixa frequência utilizam núcleo de aço-silício, já transformadores de alta-frequência utilizam núcleo cerâmicos como o ferrite e o permalloy.

da tensão retificada. Um retificador de meia-onda com transformador é apresentado na Figura 4.23.

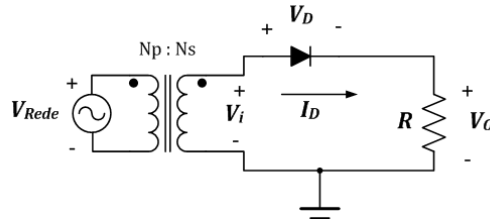


Figura 4.23: Retificador de meia-onda com transformador.

Neste circuito a tensão da rede (V_{Rede}) é aplicada ao primário e a tensão V_i (entrada do retificador) é a tensão do secundário. A análise feita anteriormente é a mesma, a única modificação está relacionada com o valor de pico da tensão de entrada do retificador que agora é:

$$V_i = V_{Rede} \frac{N_S}{N_P} \quad (4.15)$$

Exemplo: Se V_{Rede} é a tensão de rede ($127V_{rms} = 180V_{pico}$) e utilizamos um transformador de 100 espiras no primário e 10 espiras no secundário, de modo que $\frac{N_P}{N_S} = 10$, qual o valor de pico do sinal de entrada do retificador de meia-onda e quais são os seus valores característicos:

Valor de V_i $\rightarrow V_i = 180V \div 10 = 18V_{pico}$;

Valor de \bar{V}_O $\rightarrow \bar{V}_O = 0,318 * (18 - 0,7) = 5,51V$;

Valor de ΔV_O $\rightarrow \Delta V_O = 18 - 0,7 = 17,3V$;

Valor de TPI $\rightarrow TPI = 18V$.

4.3.2 Retificador de Onda Completa

O circuito retificador de meia-onda não utiliza a energia contida no semi-ciclo negativo do sinal de entrada. Para se aproveitar essa parcela de energia utilizamos uma configuração de onda-completa, onde retificamos os dois semi-ciclos. Existem duas topologias de retificador de onda-completa: a topologia em ponte e a topologia com tap-central.

4.3.2.1 Retificador em Ponte

A Figura 4.24 mostra o diagrama básico de um retificador em ponte.

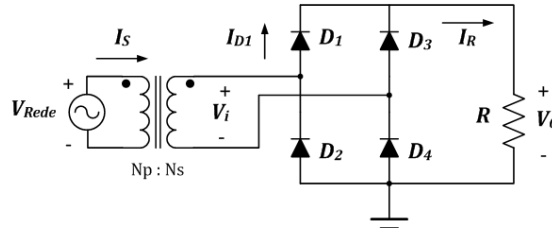


Figura 4.24: Retificador de onda-completa em ponte com transformador.

Este circuito possui duas etapas de funcionamento: uma durante o semi-ciclo positivo do sinal de entrada, e outra durante o semi-ciclo negativo. Em cada situação uma dupla de diodos está em condução. A Figura 4.25 ilustra as duas etapas de funcionamento, explicitando quais diodos encontram-se em condução em cada uma delas e as polaridades das tensões e correntes no circuito.

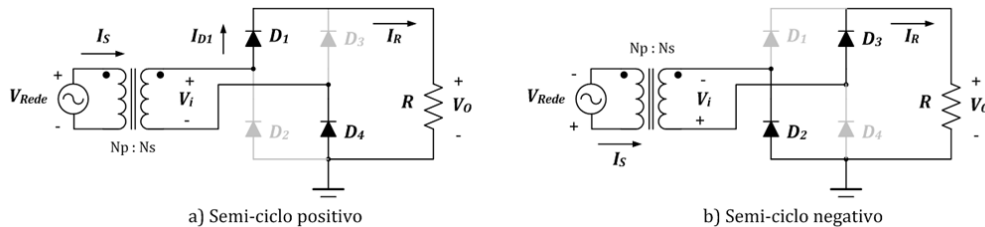


Figura 4.25: Etapas de funcionamento de um retificador de onda completa em ponte.

Observa-se que em ambas as etapas a corrente na carga (I_R) é sempre positiva, logo, existirá também uma tensão positiva sobre a carga. As formas de onda de tensão envolvidas no circuito são mostradas na Figura 4.26.

Nota-se a presença de um segundo lóbulo na tensão de saída do circuito, esse segundo lóbulo praticamente dobra o valor da tensão contínua sobre a carga. Constata-se também que, como existem dois diodos no caminho da corrente, a queda de tensão total que incide sobre a tensão de entrada é de 1,4V, ou seja, $V_O = |V_m - 1,4V|$. A TPI também é levemente menor do que a observada no retificador de meia-onda.

O valor médio resultante é:

$$\bar{V}_O = \frac{2}{\pi}(V_m - 1,4V) = 0,637(V_m - 1,4V) \quad (4.16)$$

A corrente na carga é:

$$\bar{I}_R = 0,637 \frac{V_m - 1,4V}{R} \quad (4.17)$$

A corrente média em cada diodo é:

$$\bar{I}_{D1} = 0,318 \frac{V_m - 1,4V}{R} = \frac{\bar{I}_R}{2} \quad (4.18)$$

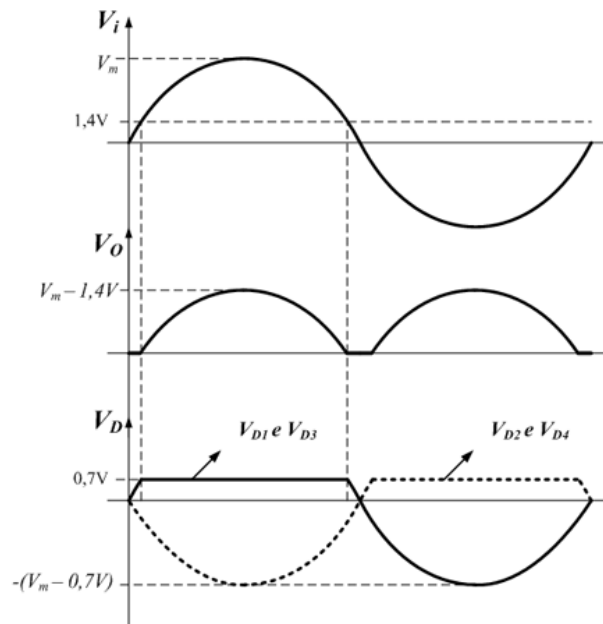


Figura 4.26: Formas de onda de tensão em um retificador de onda completa em ponte

Nota-se que a corrente no diodo é inferior à corrente na carga, isso porque cada diodo conduz apenas meio ciclo da corrente. A Figura 4.27 ilustra as formas de onda das correntes na carga, nos diodos D_1 e D_2 e a corrente fornecida pela rede (I_S). *OBS: em um retificador de meia-onda todas essas correntes são iguais.*

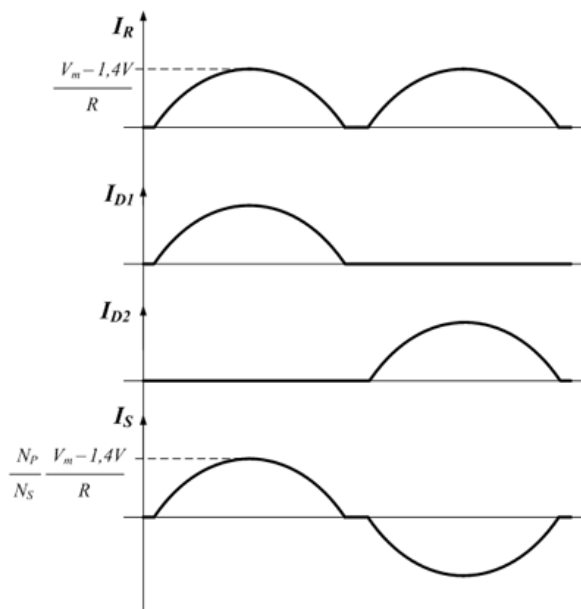


Figura 4.27: Formas de onda de corrente em um retificador de onda completa em ponte

4.3.2.2 Retificador com Tap-central

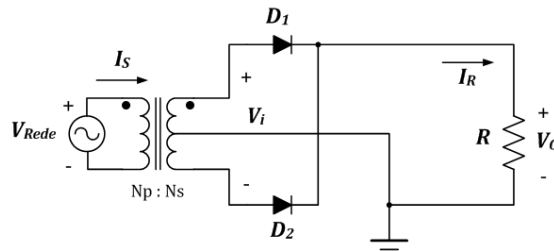


Figura 4.28: Retificador onda-completa com tap-central

A Figura 4.28 mostra o diagrama de um retificador onda completa com tap-central. Esse retificador usa obrigatoriamente um transformador com dois enrolamentos secundários. A tensão em cada enrolamento é a metade da tensão total do secundário. Assim como o retificador em ponte, este circuito também possui duas etapas de operação, ilustradas na Figura 4.29.

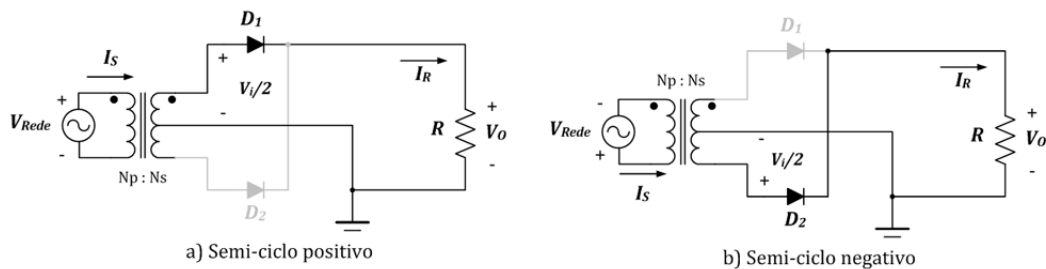


Figura 4.29: Etapas de funcionamento de um retificador onda-completa com tap-central

Nota-se que o retificador de onda completa com tap-central se equivale a dois retificadores de meia-onda operando de forma complementar, ou seja, em cada semi-ciclo um retificador de meia-onda irá atuar. As formas de onda obtidas com esse circuito são muito semelhantes às verificadas no retificador de onda completa em ponte, no entanto, a magnitude das tensões sobre alguma variação.

Note que para uma mesma relação de espiras, o retificador com tap central apresenta uma tensão contínua menor na saída. Logo, para que ambas as topologias apresentem o mesmo valor de tensão na saída, é necessário que a relação de espiras do transformador com tap-central seja o dobro da de um retificador em ponte. Nesta situação a TPI sobre os diodos de um retificador com tap-central será o dobro da TPI de um retificador em ponte!

4.4 Retificadores com filtro capacitivo

Como vimos nas discussões da seção anterior, os retificadores tem como intuito fazer a conversão CA/CC. No entanto, para um retificador monofásico, mesmo com uma topologia

onda-completa, o maior valor médio a ser obtido é 63% do valor de pico de um sinal senoidal. Para melhorar essa conversão costuma-se acrescentar ao circuito retificador um componente armazenador de energia, como um capacitor. A inserção do capacitor modifica o comportamento do circuito, de modo a manter a tensão de saída em um patamar mais elevado. As seções seguintes serão dedicadas ao estudo de retificadores com filtro capacitivo.

4.4.1 Retificador de meia-onda

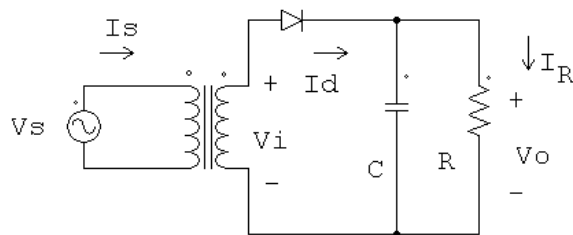


Figura 4.30: Retificador meia-onda com filtro capacitivo

Ao se inserir um capacitor a um circuito retificador, estamos impedindo que a tensão decaia rapidamente, logo a variação da tensão de saída será menor do que em um retificador puro. A forma de onda da tensão de saída de um retificador de meia-onda com filtro capacitivo é mostrada na Figura 4.31.

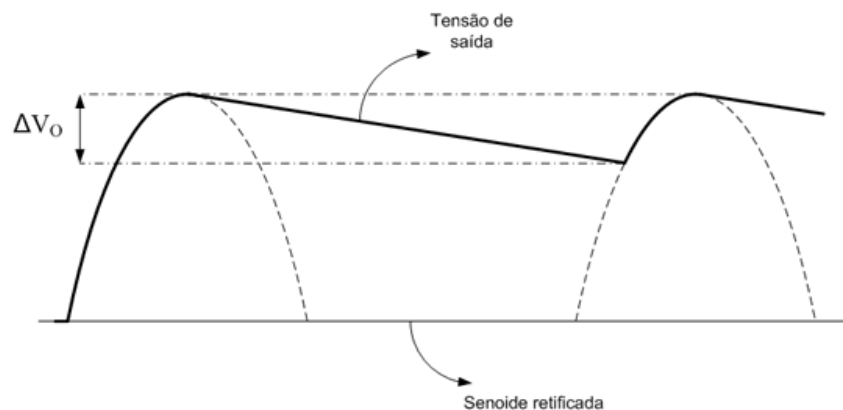


Figura 4.31: Forma de onda da tensão de saída de um retificador de meia-onda com filtro capacitivo

Observa-se que há uma redução do ripple de tensão e uma consequente elevação do valor médio do sinal de saída. Para podermos realizar a análise do sistema, considere o seguinte:

$$V_{Max} = V_m - 0,7V \quad (4.19)$$

$$V_{Min} = V_{Max} - \Delta V_O \quad (4.20)$$

$$\bar{V}_O = \frac{V_{Max} + V_{Min}}{2} = V_m - 0,7V - \frac{\Delta V_O}{2} \quad (4.21)$$

Observe que a tensão contínua na saída do retificador depende agora do valor do ripple.

Para calcular o ripple sobre a tensão de saída iremos avaliar a carga líquida transferida da fonte para o capacitor durante um ciclo da tensão de rede. Sabendo que, para um capacitor;

$$\Delta Q_c = C \Delta V_c \quad (4.22)$$

Podemos, então, considerar que a carga mantida pelo capacitor no ponto de mínima tensão é:

$$Q_{Min} = C V_{Min} \quad (4.23)$$

Já a carga no ponto de máxima tensão será:

$$Q_{Max} = C V_{Max} \quad (4.24)$$

Assim:

$$\Delta Q_c = C(V_{Max} - V_{Min}) = C \Delta V_O \quad (4.25)$$

Dividindo ambos os termos da equação pelo período do sinal de rede encontraremos a equação que define o valor médio da corrente de carga:

$$\frac{\Delta Q_c}{T} = \frac{C \Delta V_O}{T} \quad (4.26)$$

$$\bar{I}_R = C \Delta V_O f_{Rede} \quad (4.27)$$

Assim, podemos explicitar a equação que define o ripple de tensão:

$$\Delta V_O = \frac{\bar{I}_R}{C f_{Rede}} \quad (4.28)$$

Onde: $\bar{I}_R = \frac{\bar{V}_O}{R} \approx \frac{V_m - 0,7V}{R}$.

Nota-se que para se obter um ripple muito baixo, é necessário que a capacitância utilizada seja muito alta.

Exemplo: Calcule o valor do capacitor para se obter um ripple de 5% para um retificador que trabalhe com uma tensão de entrada de $25V_{rms}$ e alimente uma carga de 10Ω .

A tensão de pico da senóide de entrada do retificador será:

$$V_m = 25V\sqrt{2} = 35,35V;$$

Assim, a tensão máxima sobre a carga será:

$$V_{Max} = V_m - 0,7V = 35,35 - 0,7 = 34,65$$

Sabemos que a tensão máxima na carga de um retificador com filtro se relaciona com a tensão média pela seguinte expressão:

$$V_{Max} = \bar{V}_O + \frac{\Delta V_O}{2} = (1 + 0,025)V_O;$$

Logo:

$$\bar{V}_O = \frac{V_{Max}}{1,025} = 33,8V$$

$$\Delta V_O = 0,05 \cdot \bar{V}_O = 1,69V$$

$$\bar{I}_R = \frac{\bar{V}_O}{R} = \frac{33,8V}{10} = 3,38A;$$

$$C = \frac{\bar{I}_R}{\Delta V_O f} = \frac{3,386A}{1,69V \cdot 60Hz} = 33.333,33\mu F.$$

Não existe um capacitor comercial de $33.000 \mu F$, logo seria necessário utilizar um conjunto de vários capacitores em paralelo, chamado de banco capacitivo.

Para avaliarmos as formas de onda de tensão no diodo retificador e a corrente na fonte e no diodo, utilizaremos um ambiente de simulação, uma vez que definição analítica destas formas de onda são muito trabalhosas. Na Figura 4.32 vemos a forma de onda de tensão na carga e no diodo.

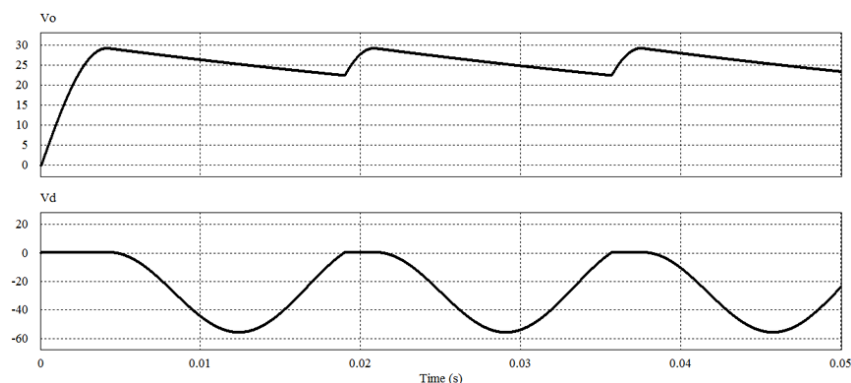


Figura 4.32: Formas de onda de tensão na carga e no diodo retificador

Note que o diodo apenas conduz durante um pequeno intervalo de tempo, na realidade

ele conduz apenas durante o tempo em que o capacitor de filtro está sendo carregado. No restante do tempo, o diodo está bloqueando a tensão da rede. Na simulação, utilizamos uma tensão de entrada de 30V de pico, observe que a TPI no diodo é aproximadamente 60V (se o ripple for muito pequeno ela será exatamente 60V). Assim, para fins de simplificação, diremos que a TPI de um retificador de meia-onda com filtro capacitivo é o dobro de V_m . As formas de onda de corrente na fonte e no diodo são apresentadas na Figura 4.33.

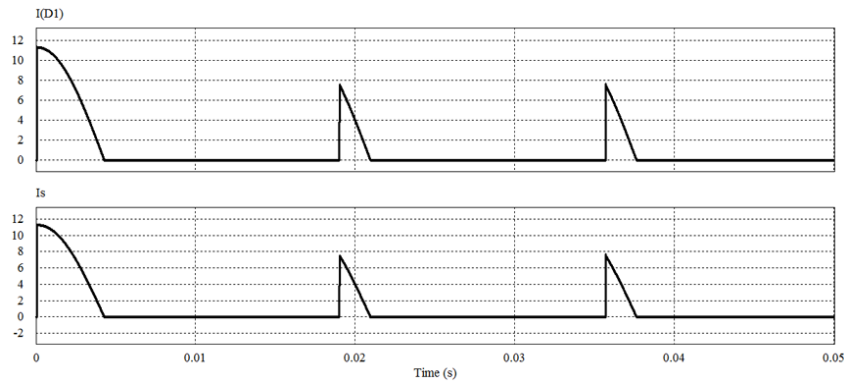


Figura 4.33: Formas de onda de corrente na fonte e no diodo retificador

Para o retificador de meia onda, as formas de onda de corrente no diodo e na fonte são exatamente iguais. Observa-se que a corrente que passa pelo o diodo possui um caráter pulsante. Isso ocorre porque o intervalo de condução do diodo é muito pequeno, o que faz com que a fonte tenha que entregar uma grande quantidade de carga ao capacitor durante um intervalo muito curto de tempo, dando origem a esses pulsos. A análise desses pulsos está fora do escopo desse texto, mas pode ser encontrada nas referências da apostila. Por agora basta saber que:

- O valor médio da corrente no diodo é igual ao valor médio da corrente na carga;
- O valor de pico dos pulsos repetitivos (I_{pr}) é:

$$I_{pr} \approx \frac{2\pi f C \Delta V_O}{\arccos\left(1 - \frac{\Delta V_O}{V_m - 0,7V}\right)} \quad (4.29)$$

4.4.2 Retificador onda completa em ponte

O funcionamento do retificador onda-completa com o filtro capacitivo é semelhante ao descrito na seção anterior. Contudo, como o retificador onda completa possui dois lóbulos durante um período do sinal de rede, o ripple de tensão para este retificador será menor. Para fins de cálculo do valor do ripple, consideramos que um retificador de onda completa "dobra" a frequência do sinal visto pelo capacitor, assim:

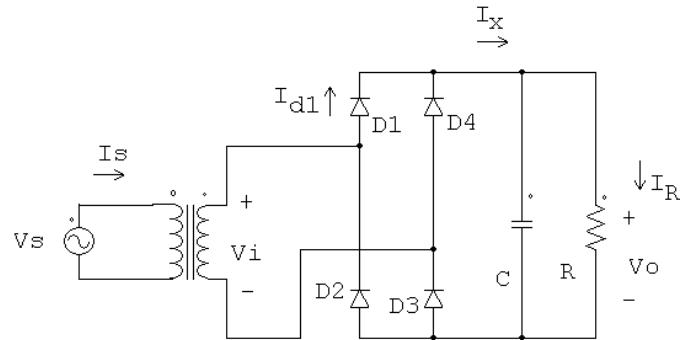


Figura 4.34: Retificador onda completa em ponte com filtro capacitivo.

$$\Delta V_O = \frac{\bar{I}_R}{2f_{Rede}C} \quad (4.30)$$

A nova configuração também afeta as formas de onda do circuito. A Figura 4.35 mostra as formas de onda de tensão no circuito (carga e diodo). Observamos que, para as mesmas condições utilizadas na seção anterior, a TPI é a metade da encontrada para um retificador de meia-onda. As formas de onda de corrente são mostradas na Figura 4.36. Notamos também que o valor de pico dos pulsos de corrente diminuiram, além disso o valor médio da corrente nos diodos será igual à metade da corrente média na carga.

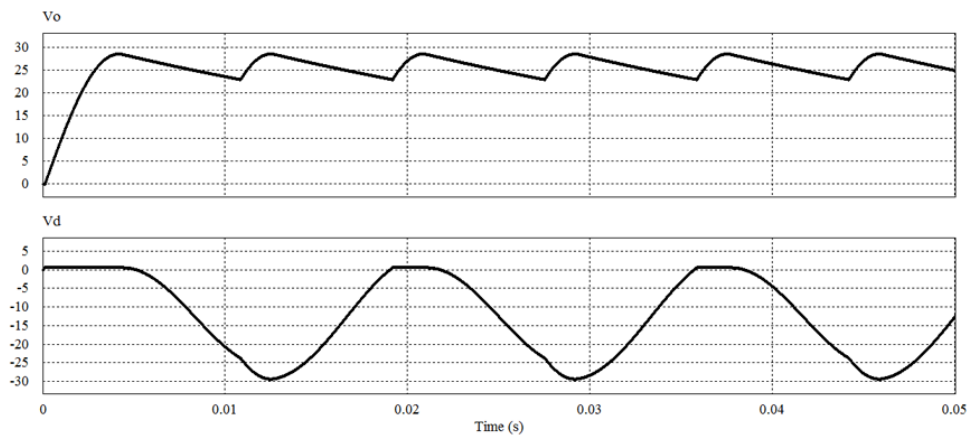


Figura 4.35: Formas de onda de tensão no retificador de onda completa com filtro capacitivo.

4.5 Reguladores de Tensão

As fontes de alimentação c.c., cujo estágio principal é constituído pelos retificadores descritos nas seções anteriores, são projetadas para fornecerem uma tensão c.c. constante

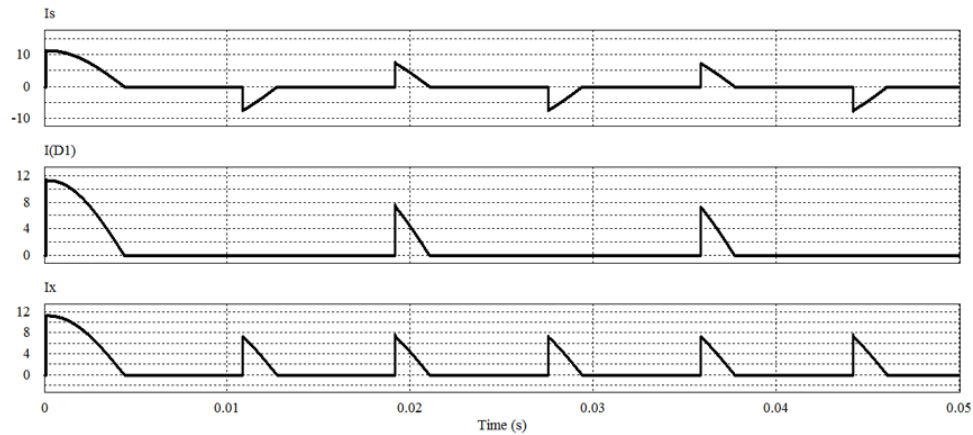


Figura 4.36: Formas de onda de corrente no retificador de onda completa com filtro capacitivo.

em sua saída independentemente das variações de fatores externos, como por exemplo a tensão da linha (rede elétrica) ou a carga. Em circuitos reais, porém, o valor médio da tensão na saída de uma fonte de alimentação irá se alterar perante algumas perturbações. Pode-se comparar a qualidade de uma determinada fonte de alimentação em relação a outra por meio de figuras de mérito, como a regulação de linha e a regulação de carga, as quais medem a sensibilidade de uma fonte à perturbações de linha e de carga respectivamente. A definição dessas figuras de mérito é dada abaixo:

- Regulação de Linha $\rightarrow \frac{\partial V_O}{\partial V_i} = \frac{V_{O1} - V_{O2}}{V_{i1} - V_{i2}}$
- Regulação de Carga $\rightarrow \frac{\partial V_O}{\partial I_O} = \frac{V_{O1} - V_{O2}}{I_{O1} - I_{O2}}$

Como exemplo, considere uma fonte de alimentação constituída apenas por um retificador de onda-completa em ponte com filtro capacitivo na saída. Sabemos que a tensão de saída da fonte é dada por:

$$\bar{V}_O = (V_m - 1,4V) - \frac{\Delta V_O}{2} \quad (4.31)$$

Onde: V_m é a tensão de pico do sinal de entrada do retificador;

ΔV_O é o ripple de tensão sobre a saída da fonte, sendo que: $\Delta V_O = \frac{I_R}{2f_{rede}C}$.

Iremos agora calcular as regulações de linha e carga para esta fonte. Para calcular a regulação de linha, devemos nos lembrar que qualquer variação na tensão de entrada do circuito irá afetar o valor de pico do sinal de entrada (V_m). Assim sendo, consideremos duas situações V_{m1} e V_{m2} :

$$V_{O1} = (V_{m1} - 1,4V) - \frac{\Delta V_O}{2} \quad (4.32)$$

$$V_{O2} = (V_{m2} - 1,4V) - \frac{\Delta V_O}{2} \quad (4.33)$$

Assim, a regulação de linha se torna:

$$\frac{\partial V_O}{\partial V_m} = \frac{V_{O1} - V_{O2}}{V_{m1} - V_{m2}} = \frac{V_{m1} - 1,4 - 0,5\Delta V_O - V_{m2} + 1,4 + 0,5\Delta V_O}{V_{m1} - V_{m2}} \quad (4.34)$$

Logo:

$$\frac{\partial V_O}{\partial V_m} = \frac{V_{m1} - V_{m2}}{V_{m1} - V_{m2}} = 100\% \quad (4.35)$$

Isso significa que qualquer perturbação na linha irá afetar a tensão de saída da fonte, sem no entanto sofrer nenhum tipo de atenuação. Desta forma, podemos dizer que a fonte de alimentação em questão não possui regulação de linha.

Para avaliar a regulação de carga, seguiremos o mesmo método. Considere duas situações: I_{R1} e I_{R2} .

$$V_{O1} = (V_m - 1,4V) - 0,5 \frac{I_{R1}}{2f_{rede}C} \quad (4.36)$$

$$V_{O2} = (V_m - 1,4V) - 0,5 \frac{I_{R2}}{2f_{rede}C} \quad (4.37)$$

Assim a regulação de carga será:

$$\frac{\partial V_O}{\partial I_R} = \frac{V_{O1} - V_{O2}}{I_{R1} - I_{R2}} = \frac{V_m - 1,4 - 0,5 \frac{I_{R1}}{2f_{rede}C} - V_m + 1,4 + 0,5 \frac{I_{R2}}{2f_{rede}C}}{I_{R1} - I_{R2}} \quad (4.38)$$

Desta forma:

$$\frac{\partial V_O}{\partial I_R} = \frac{-\frac{I_{R1} - I_{R2}}{4f_{rede}C}}{I_{R1} - I_{R2}} = \frac{-1}{4f_{rede}C} \quad (4.39)$$

Nota-se que a fonte avaliada possui alguma regulação de carga, no entanto essa regulação depende da frequência da rede elétrica e da capacitância utilizada no circuito. Como exemplo, se considerarmos a frequência de 60Hz e uma capacitância de $15.000\mu F$, encontraríamos uma regulação de carga de -27,8%, o que ainda representa uma regulação muito fraca, mesmo com o emprego de uma capacitância de filtro elevada.

OBS: O sinal negativo verificado na regulação de carga da fonte significa apenas que um aumento da corrente de carga irá provocar uma diminuição na tensão de saída da fonte.

Para se conseguir melhorar a regulação de linha e de carga de uma fonte de alimentação, comumente insere-se após o estágio retificador um circuito regulador de tensão. Os circuitos reguladores podem ser implementados de diversas formas, sendo que, para circuitos lineares, as mais comuns são com reguladores a diodo zener e reguladores com circuitos integrados dedicados (ex: LM7805, LM7812, LM7915, etc.). A seguir discutiremos sobre os reguladores a zener.

4.5.1 O Regulador Zener

O diodo zener é um diodo construído de modo a trabalhar na região de zener, onde a variação da tensão terminal do diodo com a corrente é muito pequena. Esse atributo do diodo zener é utilizado para se construir circuitos reguladores, como aquele mostrado na Figura 4.37.

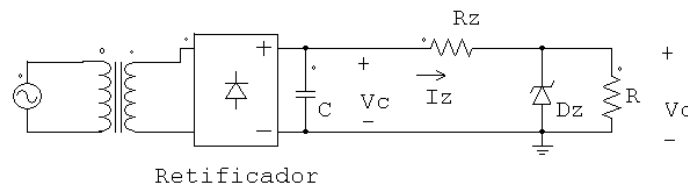


Figura 4.37: Circuito regulador associado à saída de uma fonte de alimentação.

Se polarizarmos o diodo zener corretamente, ele irá amortecer as perturbações verificadas na tensão de saída do retificador, diminuindo o ripple de tensão e também melhorando os fatores de regulação. Para a análise do circuito regulador, consideraremos:

- I_Z - Corrente drenada da saída do retificador com filtro, que passa pelo resistor R_Z ;
- I_{DZ} - Corrente no diodo zener;
- I_R - Corrente na carga (R);
- V_{Zo} - Tensão nominal do diodo zener;
- V_C - Tensão na saída do circuito retificador com filtro.

A análise do circuito regulador se inicia pela substituição do diodo zener pelo seu modelo completo (discutido no Capítulo 2). Deste modo, temos o circuito da Figura 4.38.

Realizando uma análise por meio da lei de kirchhoff, encontramos as seguintes relações:

$$V_O = V_C - R_Z I_Z \quad (4.40)$$

$$V_O = V_{Zo} + r_Z I_{DZ} \quad (4.41)$$

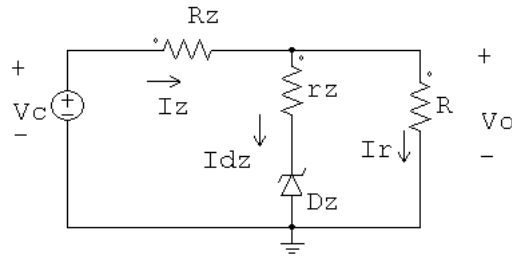


Figura 4.38: **Circuito regulador zener.**

$$I_{DZ} = I_Z - I_R \quad (4.42)$$

Manipulando as equações acima, podemos encontrar uma expressão para a tensão de saída do regulador que seja função de todas as variáveis do circuito:

$$V_O = V_C \frac{r_Z}{R_Z + r_Z} + V_{Z0} \frac{R_Z}{R_Z + r_Z} - I_R \frac{r_Z R_Z}{R_Z + r_Z} \quad (4.43)$$

Por meio dessa equação podemos calcular a regulação de linha e de carga do circuito, seguindo para isso o mesmo método descrito anteriormente:

Regulação de Linha $\frac{\partial V_O}{\partial V_C} = \frac{r_Z}{R_Z + r_Z};$

Regulação de Carga $\frac{\partial V_O}{\partial I_R} = -\frac{R_Z r_Z}{R_Z + r_Z}.$

Observa-se que as figuras de mérito da fonte, em relação à sua regulação, são dependentes basicamente de dois fatores: a resistência série intrínseca do diodo zener e a resistência R_Z , definida pelo projetista. Percebe-se assim que a qualidade da fonte de alimentação é definida por um projeto adequado do circuito regulador e pela escolha dos componentes a serem empregados.

É importante frisar que as figuras de mérito descritas acima apenas serão garantidas se, para todas as condições de funcionamento do circuito, o diodo zener se encontrar polarizado na região de zener, caso contrário, ele se tornará um circuito aberto e a função de regulação deixará de existir.

Projeto de um regulador zener

O projeto de um regulador zener passa pela definição da tensão nominal do diodo e pelo cálculo do resistor R_Z . Esse resistor irá limitar a corrente na carga e garantir um nível de corrente mínimo para fazer o zener operar na região de zener.

Podemos explicitar a equação que define o resistor limitador:

$$R_Z = \frac{V_C - V_{Z0}}{I_{DZ} + I_R} + r_Z \frac{I_{DZ}}{I_{DZ} + I_R} \quad (4.44)$$

Observando os datasheets de diodos zener, verificamos que o fabricante garante a tensão nominal do diodo zener para uma faixa de valores. Normalmente, escolhemos o valor da corrente no diodo zener (I_{DZ}) como o ponto central dessa faixa. Assim, temos que garantir que no instante em que a carga estiver drenando a maior corrente, uma corrente I_{DZ} deve passar pelo diodo zener. Para isso, calculamos o valor do resistor limitador (R_Z), de modo que a corrente que passa por ele seja igual a $I_Z = I_{DZ} + I_{Rmax}$, onde I_{Rmax} é a máxima corrente drenada pela carga. Escolhemos para os cálculos o menor valor da tensão sobre o filtro capacitivo (V_{Min}), isso pois é neste instante que há a maior demanda de carga.

Assim, o cálculo do resistor limitador será:

$$R_Z = \frac{V_{Min} - V_{Z0}}{I_{DZ} + I_{Rmax}} + r_Z \frac{I_{DZ}}{I_{DZ} + I_{Rmax}} \quad (4.45)$$

Outro parâmetro importante no projeto de um regulador zener é a potência dissipada pelo diodo. Os fabricantes de diodos projetam os componentes para que eles operem em uma determinada faixa de potência (devido a questões de dissipação de calor), logo, deve-se estipular qual a potência máxima que o zener irá dissipar ao longo da operação do circuito. A máxima potência dissipada pelo diodo zener ocorrerá quando a corrente que por ele passa é máxima. Isso se dará quando a carga for nula ($R \rightarrow \infty$), e a tensão de entrada for máxima. Neste ponto toda corrente I_Z circulará pelo diodo zener. Utilizando as equações acima, vemos que:

$$V_{O,Pmax} = V_{Max} \frac{r_Z}{R_Z + r_Z} + V_{Z0} \frac{R_Z}{R_Z + r_Z} \quad (4.46)$$

$$I_{DZ,Pmax} = \frac{V_{O,Pmax} - V_{Z0}}{r_Z} \quad (4.47)$$

$$P_{Max} = V_{O,Pmax} I_{DZ,Pmax} \quad (4.48)$$

OBS: Quando não se tem ideia sobre qual diodo zener será utilizado, de modo que a resistência série r_Z não pode ser definida, o projeto deve ser primeiramente simplificado. Essa simplificação é feita considerando $r_Z = 0$, o que faz com que a tensão terminal do zener seja $V_Z = V_{Z0}$.

Exemplo numérico: Para um sistema que possua os seguintes parâmetros:

- $V_{Max} = 35V$;
- $V_{Min} = 27V$;
- $I_{Rmax} = 500mA$;

- $V_{Zo} \approx 15V$;
- $r_z = 100m\Omega$;
- $I_{DZmin} = 100mA$.

Calcule:

- R_Z ;
- Potência dissipada no resistor R_Z ;
- V_O ;
- R ;
- P_{Max} ;
- Regulação de linha;
- Regulação de carga.

Utilizando as equações acima:

$$- R_Z = \frac{V_{Min} - V_{Zo}}{I_{DZ} + I_{Rmax}} + r_z \frac{I_{DZ}}{I_{DZ} + I_{Rmax}}$$

$$R_Z = \frac{27 - 15}{100mA + 500mA} + 100m\Omega \frac{100mA}{100mA + 500mA}$$

$$R_Z \approx 20\Omega.$$

$$- P_{RZ} = R_Z \cdot (I_{DZmin} + I_{Rmax}) = 20 \cdot (600mA)^2 = 7,2W.$$

$$- V_O = V_{Min} \frac{r_z}{R_Z + r_z} + V_{Zo} \frac{R_Z}{R_Z + r_z} - I_R \frac{r_z R_Z}{R_Z + r_z}$$

$$V_O = 27V \frac{0,1\Omega}{20,1\Omega} + 15V \frac{20\Omega}{20,1\Omega} - 500mA \frac{2\Omega}{20,1\Omega}$$

$$V_O = 15,004V \approx 15V;$$

$$- R = \frac{V_O}{I_{Rmax}} = \frac{15V}{500mA} = 30\Omega.$$

$$- V_{O,Pmax} = \left[V_{Max} \frac{r_z}{R_Z + r_z} + V_{Zo} \frac{R_Z}{R_Z + r_z} \right];$$

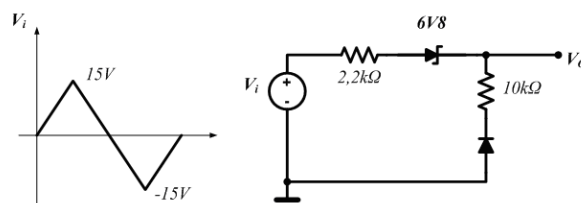
$$V_{O,Pmax} = 35V \frac{0,1\Omega}{20,1\Omega} + 15V \frac{20\Omega}{20,1\Omega} = 15,09V;$$

$$\begin{aligned}
 - I_{DZ, Pmax} &= \frac{V_{O, Pmax} - V_{Z0}}{r_Z} = \frac{15,09V - 15V}{0,1\Omega} = 900mA; \\
 - P_{Max} &= V_{O, Pmax} \cdot I_{DZ, Pmax} = 15,09V \cdot 900mA = 13,58W. \\
 - \text{Regulação de linha} &= \frac{r_Z}{R_Z + r_z} = \frac{0,1\Omega}{20,1\Omega} = 0,00497V/V; \\
 - \text{Regulação de carga} &= -\frac{R_Z r_Z}{R_Z + r_z} = \frac{2\Omega}{20,1\Omega} = -0,0995V/A.
 \end{aligned}$$

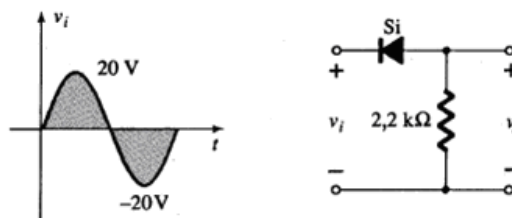
Exercícios propostos

- Para os circuitos abaixo, trace a forma de onda da tensão de saída (V_O) e da corrente indicada. [Caso nenhuma corrente esteja explícita no circuito, trace a corrente no diodo (I_{AK})].

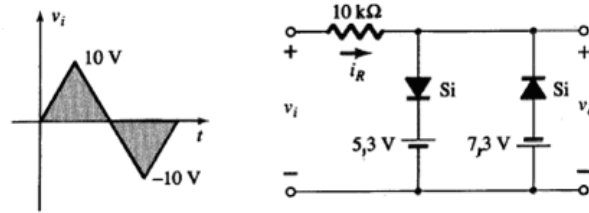
a)



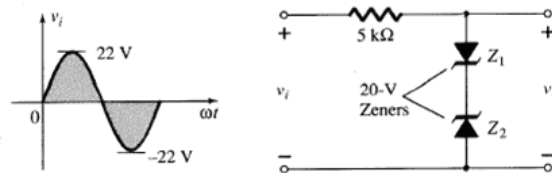
b)



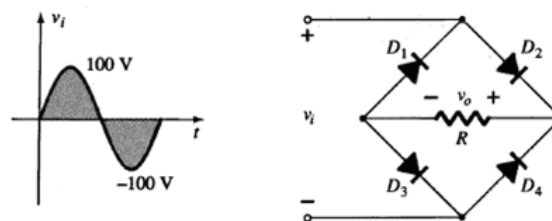
c)



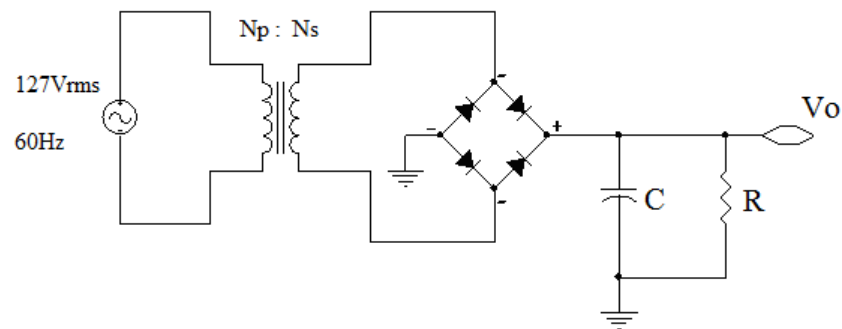
d)



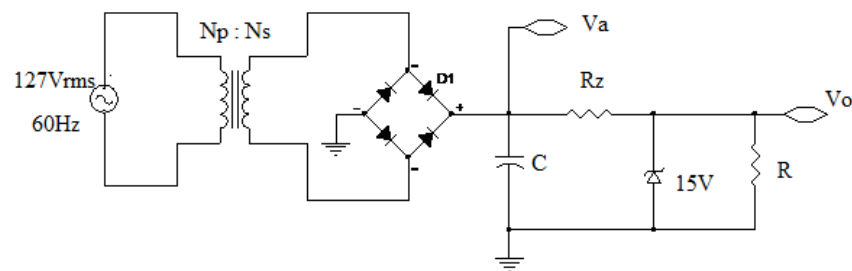
2. Para o circuito retificador abaixo, faça: a) Trace a forma de onda de tensão na saída (V_O); b) Defina a TPI e a corrente média em cada diodo da ponte; c) Calcule o valor da tensão média na carga; d) Calcule o valor da corrente média na carga, para $R = 20\Omega$; e) Calcule a potência consumida pela carga.



3. O circuito abaixo apresenta um retificador com transformador isolador. Supondo que se deseja projetar o retificador de modo que a tensão média de saída (V_O) seja igual a $25V \pm 5\%$ e que a potência máxima consumida pela carga seja de 100W, faça: a) Esboce a forma de onda de tensão na carga; b) Calcule qual a relação de espiras ($N_p:N_s$) necessária para o funcionamento do retificador; c) Calcule o valor da resistência de carga (R) e a corrente de carga; d) Calcule a corrente média em cada diodo da ponte retificadora; e) Defina a TPI em cada diodo da ponte retificadora; f) Calcule o valor da capacitância de saída.



4. O circuito abaixo mostra uma fonte de alimentação com um regulador zener na saída. Considere os seguintes parâmetros: V_a é igual à tensão de saída do exercício anterior; C é o valor de capacitância encontrado no exercício anterior; V_o é a tensão de saída do circuito que deverá ser igual a $15V$; O consumo de potência na saída do circuito pode variar entre $30W$ e $100W$; A corrente $I_{Zmin} = 70mA$ e a resistência série do diodo zener é $r_Z = 45m\Omega$.



Capítulo 5

O Transistor Bipolar de Junção - TBJ

O transistor foi desenvolvido em meados dos anos 50 por pesquisadores do *Bell Labs* nos EUA, como um substituto mais eficiente e econômico às válvulas eletrônicas. Esse componente passou rapidamente a ser empregado nos mais diversos sistemas, de amplificadores de áudio a sistemas de processamento digital, tornando-os mais baratos, compactos e eficientes e obviamente, mais acessíveis ao grande público.

O transistor bipolar de junção (TBJ) é um dispositivo semicondutor constituído de três camadas de semicondutor extrínseco, podendo se apresentar de duas formas:

- Transistor NPN - Uma camada do tipo P entre duas camadas do tipo N;
- Transistor PNP - Uma camada do tipo N entre duas camadas do tipo P.

A Figura 5.1 mostra esses dois tipos de transistores de forma esquemática.

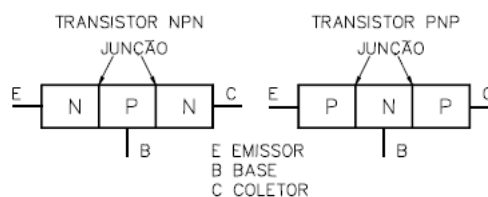


Figura 5.1: Camadas de transistores NPN e PNP.

Cada camada cristalina de um transistor recebe um nome específico, relacionado com a sua função na operação do dispositivo. A camada mais interna é chamada de **Base**, sendo utilizada para controlar o fluxo de elétrons ao longo do dispositivo. As camadas mais externas recebem o nome de **Coletor** e **Emissor**, ambas são constituídas pelo mesmo semicondutor dopado, no entanto, o emissor possui um nível de dopagem maior do que o coletor. A Figura 5.2 mostra os símbolos elétricos de um TBJ npn e outro pnp.

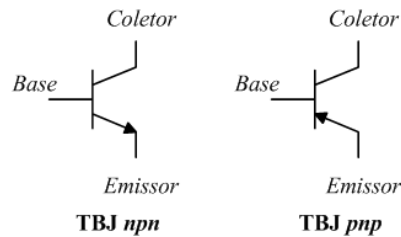


Figura 5.2: Símbolos elétricos de transistores bipolares.

Se observarmos bem a Figura 5.1, notaremos a presença de duas junções PN ao longo do transistor. Logo, poderíamos interpretar o transistor como dois diodos: um entre emissor e base e outro, entre o coletor e a base. Essa abordagem, no entanto, não nos auxilia no estudo do comportamento do transistor, porém nos permite identificar os terminais de um transistor real.

Para identificar os terminais de um transistor devemos, com um multímetro, na função de medição de diodo, tentar localizar as junções PN do transistor. Como o emissor é mais dopado do que o coletor, o diodo emissor-base terá uma tensão limiar um pouco maior do que o diodo coletor-base. A Figura 5.3 exemplifica essa questão, para um transistor npn.

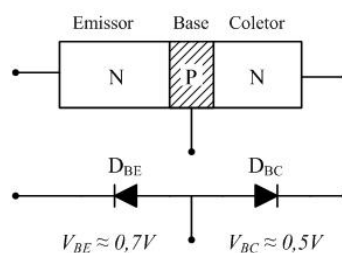


Figura 5.3: Identificação de terminais de um transistor npn.

A seguir será analisado o funcionamento de um transistor npn, o transistor pnp tem um funcionamento semelhante, no entanto os portadores majoritários são lacunas e não elétrons.

5.1 Operação de um transistor NPN

5.1.1 Transistor sem polarização

A partir da união dos três cristais de semicondutor dopado, cria-se duas junções PN. A difusão dos portadores majoritários em cada cristal gera duas camadas de depleção próximas aos pontos de junção, assim como ocorre com o diodo de junção. A Figura

5.4 mostra as camadas de depleção e explicita os portadores majoritários em cada região formada.

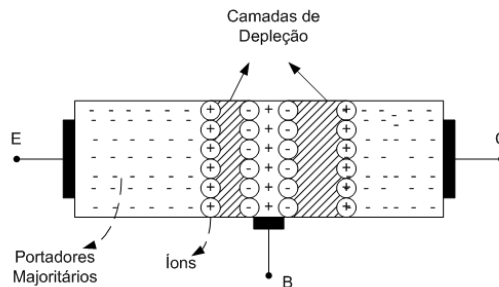


Figura 5.4: Transistor npn não polarizado.

Notamos pelo esquema apresentado na figura acima que a região de base de um transistor bipolar é muito estreita e fracamente dopada. A região coletora possui uma menor dopagem do que a região emissora, logo a largura da camada de depleção na junção BC é maior do que na junção BE. Observe que, assim como ocorre com os diodos, os íons formados nas bordas das junções PN formam um campo elétrico, cujo efeito é impedir que os portadores majoritários de cada região atravessem a camada de depleção, o que implica em se dizer que existem duas barreiras de potencial, uma em cada junção.

5.1.2 Transistor em corte.

Podemos polarizar ambas as junções PN de modo reverso, como indica a Figura 5.5.

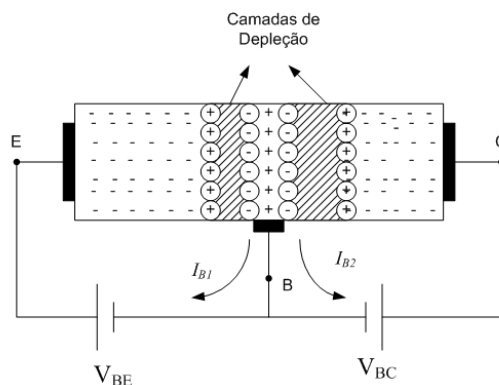


Figura 5.5: Transistor npn com ambas as junções reversamente polarizadas.

Nesta situação, as fontes externas estão injetando portadores minoritários nas três regiões, o que faz com que as camadas de depleção se elevem e impeçam ainda mais o fluxo de portadores majoritários entre os cristais. Com isso, nenhuma corrente pode ser observada entre o coletor e o emissor. Dizemos então que o transistor está em **corte**, funcionando como uma chave aberta.

5.1.3 Transistor em saturação

Nesta situação, polarizamos diretamente as duas junções PN, como mostra a Figura 5.6.

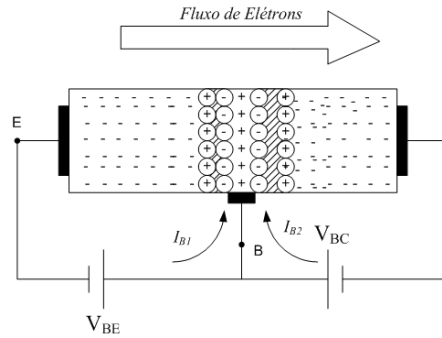


Figura 5.6: Transistor npn com ambas as junções diretamente polarizadas.

Caso as tensões V_{BE} e V_{BC} forem superiores às tensões de limiar dos diodos de cada junção, haverá um estreitamento das regiões de depleção, fazendo com que, praticamente, todo elétron emitido pelo emissor atravesse a base e o coletor. O fluxo de corrente irá depender exclusivamente de componentes externos ao transistor, não podendo ser controlado por um circuito de base, por isso chamamos essa região de operação do transistor como **região de saturação**. Um transistor saturado se comporta como uma chave fechada, existe porém uma tensão mínima de saturação entre os terminais do emissor e do coletor, chamada de tensão de saturação de coletor-emissor, ou V_{CESat} .

$$V_{CESat} \approx 0,2V \quad (5.1)$$

5.1.4 Transistor na região ativa

Além das regiões de corte e saturação, o transistor também pode operar em uma região chamada de região ativa. Esta região é obtida quando polarizamos diretamente a junção base-emissor e reversamente a junção base-coletor, como mostra a Figura 5.7.

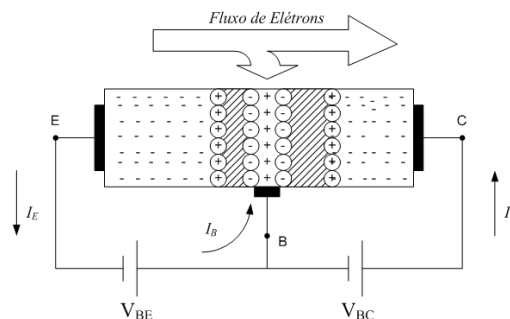


Figura 5.7: Transistor npn polarizado na região ativa.

Nesta condição, se a tensão $V_{BE} \approx 0,7V$, de modo que o diodo de base-emissor esteja diretamente polarizado, elétrons do emissor irão ser acelerados com a junção BE com energia suficiente para vencer a sua barreira de potencial. Esses elétrons irão penetrar na base (uma parcela irá recombinar com as lacunas da base, a concentração de lacunas perdidas é recomposta por uma corrente I_B), e atravessá-la. Quando os elétrons atingem a junção de base-coletor eles são acelerados para o coletor. A fonte V_{BC} então retira o excesso de concentração de elétrons livres do coletor, estabelecendo então uma corrente elétrica entre o emissor e o coletor.

Pela lei de Kirchhoff, podemos deduzir uma relação entre as correntes das três regiões:

$$I_E = I_C + I_B \quad (5.2)$$

O circuito de base desempenha uma função muito importante em um transistor polarizado na região ativa: a injeção de lacunas na base faz com que a barreira de potencial entre base e emissor diminua, de modo que o fluxo de elétrons entre emissor e coletor aumenta. Dessa forma, o circuito de base atua como um controlador da corrente entre emissor e coletor. A física de semicondutores nos mostra que existe uma relação entre a magnitude da corrente injetada na base e a magnitude das correntes de coletor e emissor:

$$I_C = \beta I_B \quad (5.3)$$

O que implica em dizer que:

$$I_E = (\beta + 1)I_B \quad (5.4)$$

$$I_C = \frac{\beta}{(\beta + 1)}I_E = \alpha I_E \quad (5.5)$$

O termo β é denominado *ganho DC* do transistor e é um parâmetro fornecido por fabricantes. Este parâmetro é muito dependente da temperatura! Na região ativa o transistor funciona como uma fonte de corrente controlada por corrente.

A Figura 5.8 mostra dois transistores (nnp e pnp) polarizados na região ativa. As polaridades de cada fonte externa e o sentido da corrente elétrica são explicitados.

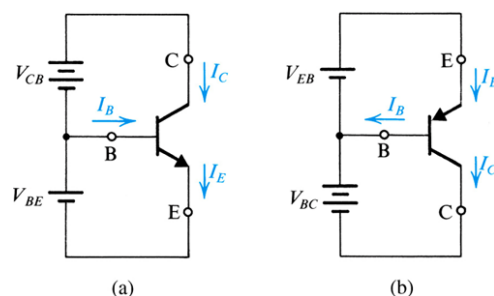


Figura 5.8: Transistores bipolares polarizado na região ativa. a) npn. b) pnp.

5.1.5 Modelo de Ebers-Moll

O modelo de ebers-moll é um circuito equivalente para o transistor polarizado na região ativa. Ele representa o transistor como um diodo entre base e emissor e uma fonte de corrente dependente entre coletor e base. A Figura 5.9 mostra o modelo ebers-moll.

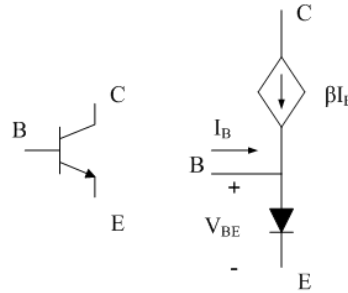


Figura 5.9: Modelo de Ebers-Moll de um TBJ npn.

O modelo descrito acima é capaz de representar as características principais do transistor quando este estiver em corte ou na região ativa. Contudo ele não representa o comportamento do transistor na região de saturação. Para essa região, utilizaremos o modelo descrito na Figura 5.10.

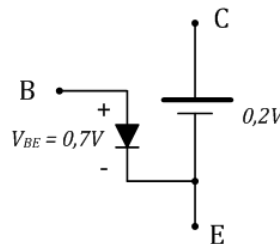


Figura 5.10: Modelo em saturação de um TBJ npn.

5.2 Configurações Básicas de um transistor

5.2.1 Configuração Base-comum

A configuração Base-comum consiste em se ter um ponto comum (de tensão nula) no terminal da base e aplicar as tensões V_{BE} e V_{BC} de modo a polarizar o transistor na região ativa. A Figura 5.11 mostra um diagrama de um transistor npn em configuração Base-comum.

Este tipo de configuração possui dois conjuntos de curvas características: um referente à relação entre as grandezas de entrada (corrente e tensão no circuito entre base-emissor) e outro referente à saída (corrente e tensão no circuito de coletor-base). A Figura 5.12

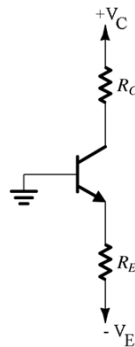


Figura 5.11: Transistor em configuração Base-comum.

mostra as curvas características de entrada, enquanto a Figura 5.13 mostra as curvas de saída.

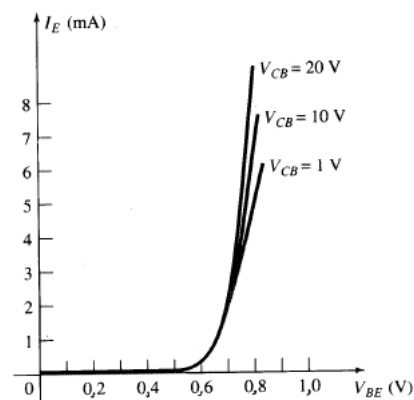


Figura 5.12: Curvas características em base-comum, circuito de entrada.

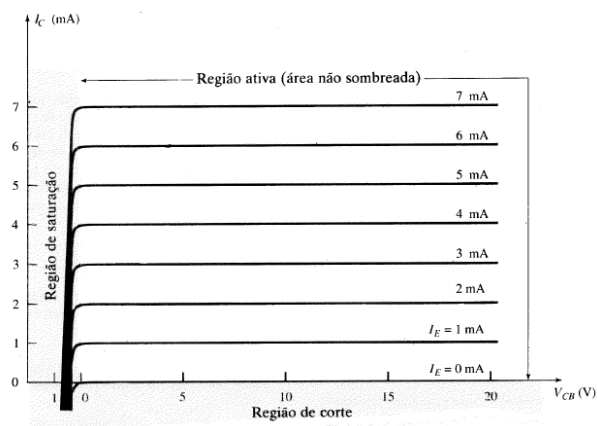


Figura 5.13: Curvas características em base-comum, circuito de saída.

Nota-se pelas curvas de entrada que a característica $I_E \times V_{CE}$ não se altera significativamente com a variação da tensão V_{CB} . Além disso, a relação de entrada se assemelha muito à curva característica de um diodo em polarização direta. Assim sendo, podemos considerar que na região ativa, a tensão V_{BE} será praticamente constante e igual a 0,7V, para qualquer valor de I_E e V_{CB} . As curvas de saída mostram que a corrente de coletor será muito próxima da corrente de emissor, de modo que para fins de simplificação podemos considerar $I_E \approx I_C$. Com essa simplificação podemos determinar facilmente o ponto quiescente de um circuito em base-comum, por meio, por exemplo, da análise por reta de carga.

5.2.2 Configuração Emissor-comum

A configuração emissor-comum é apresentada na Figura 5.14.

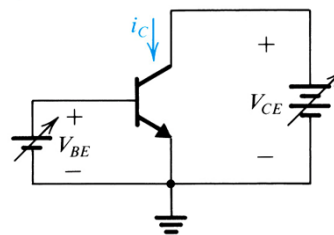


Figura 5.14: Configuração Emissor-Comum.

As curvas de entrada e de saída são apresentadas nas Figuras 5.15 e 5.16, respectivamente.

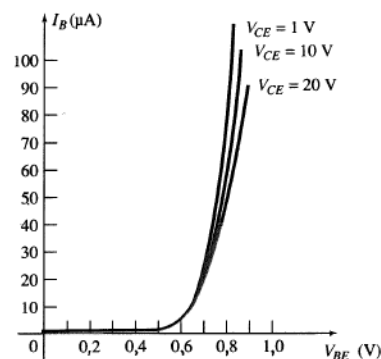


Figura 5.15: Curvas características em emissor-comum, circuito de entrada.

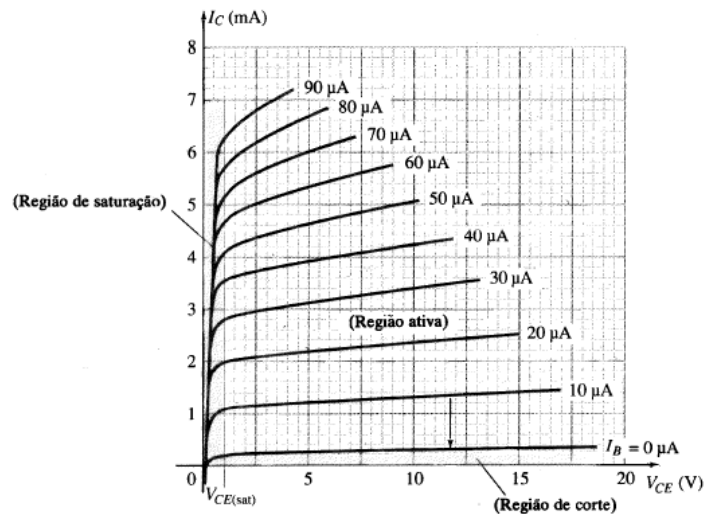


Figura 5.16: Curvas características em emissor-comum, circuito de saída.

Novamente verificamos que a característica de entrada do transistor em emissor-comum se assemelha a um diodo em polarização direta. Já nas curvas de saída verificamos uma leve inclinação da corrente com o aumento de V_{CE} , isso indica a presença de um elemento resistivo em paralelo com os terminais emissor-coletor. Esse termo é chamado de resistor de saída do transistor (r_O) que é um parâmetro do fabricante.

5.2.3 Configuração Coletor-comum

A última configuração básica de um transistor é a configuração coletor-comum, mostrada na Figura 5.17.

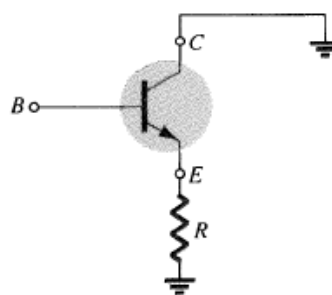


Figura 5.17: Configuração Coletor-Comum.

As curvas características de entrada e saída para o transistor nessa configuração são as mesmas obtidas para a configuração emissor-comum. A diferença entre elas é que a configuração emissor-comum pode ser utilizada para trabalhar o transistor como uma chave eletrônica, um inversor lógico, um amplificador de tensão ou potência, entre outras coisas,

já a configuração coletor-comum é utilizada como um buffer. Isto porque a tensão vista pelo resistor de carga será aproximadamente a tensão aplicada na base (ganho unitário de tensão), mas o transistor amplifica a corrente de base, de forma que o circuito de entrada precisa entregar uma corrente muito pequena para alimentar a carga.

5.3 Limites de Operação

Todo transistor é projetado para funcionar em uma faixa de valores de tensão, corrente e potência. Caso um determinado circuito force o transistor para regiões fora dessa faixa de valores, o fabricante não irá garantir a sua correta operação, e provavelmente o componente sofrerá algum dano. Os limites de operação de um determinado transistor em configuração emissor-comum são mostrados na Figura 5.18.

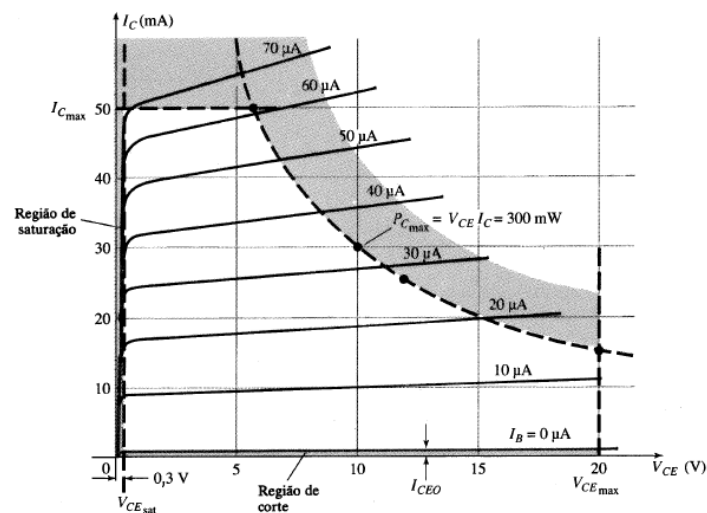


Figura 5.18: Limites de operação de um TBJ em emissor-comum.

Podemos identificar alguns desses limites:

- Corrente constante - Existe um valor de corrente máximo suportado pelo TBJ. Normalmente no datasheet do componente esse valor é determinado como máxima corrente de coletor (I_{Cmax}). No gráfico exemplo, essa corrente máxima é de 50mA;
- Tensão de breakdown - Esse é o máximo valor de tensão aplicado entre os terminais de coletor e emissor suportado pelo TBJ. Acima desse valor ocorre o rompimento das ligações covalentes dos cristais e a destruição do componente. No exemplo, o $V_{CEmax} = 20V$;
- Região de potência constante - O TBJ também suporta dissipar apenas uma certa quantidade de potência. Assim deve-se garantir que a potência máxima dissipada pelo componente não é superior ao valor estipulado pelo fabricante. No gráfico de exemplo, a potência máxima é de 300mW.

Existe porém uma margem de segurança, representada pela parte mais escura do gráfico. Isto significa que os valores definidos pelo fabricante estão abaixo dos reais limites de operação do dispositivo, no entanto, por segurança, é prudente não penetrar na região de segurança!

Capítulo 6

Aplicação de Transistores em c.c.

Como discutido no capítulo anterior, um transistor é um componente muito versátil, podendo operar como uma chave de estado sólido (regiões de corte e saturação) ou como uma fonte de corrente (região ativa). Essa versatilidade faz do transistor o elemento básico de sistemas eletrônicos analógicos e digitais. Neste capítulo veremos como utilizar o transistor em circuitos c.c., a aplicação em sistemas c.a. será feita em disciplinas posteriores.

6.1 Transistor como chave

A aplicação de transistores como chaves de estado sólido é muito importante em eletrônica de potência e sistemas digitais, uma vez que as chaves transistorizadas são os blocos básicos de uma porta lógica. As análises entorno dessa questão serão feitas considerando o circuito da Figura 6.1.

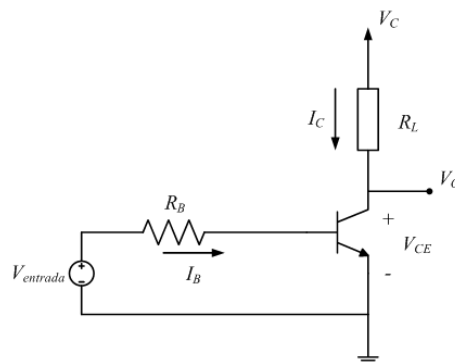


Figura 6.1: Configuração emissor-comum - Transistor como chave.

A corrente I_B no circuito em questão é definida pela tensão de entrada, de modo que:

$$I_B = \frac{V_{entrada} - 0,7V}{R_B} \quad (6.1)$$

A tensão de saída V_O , que no caso é igual a V_{CE} será dada por:

$$V_O = V_C - R_L I_C \quad (6.2)$$

O transistor operará como uma chave comandada pela tensão de entrada se os níveis de corrente impostos na base do transistor fizerem o mesmo funcionar apenas nas regiões de corte e saturação. O corte ocorrerá sempre que a corrente de base for nula, a saturação, por outro lado, depende das características do diodo e do circuito. Para avaliarmos as condições que garantem a operação como chave, observemos a curva característica do transistor em emissor-comum e a reta de carga do circuito, mostrados na Figura 6.2.

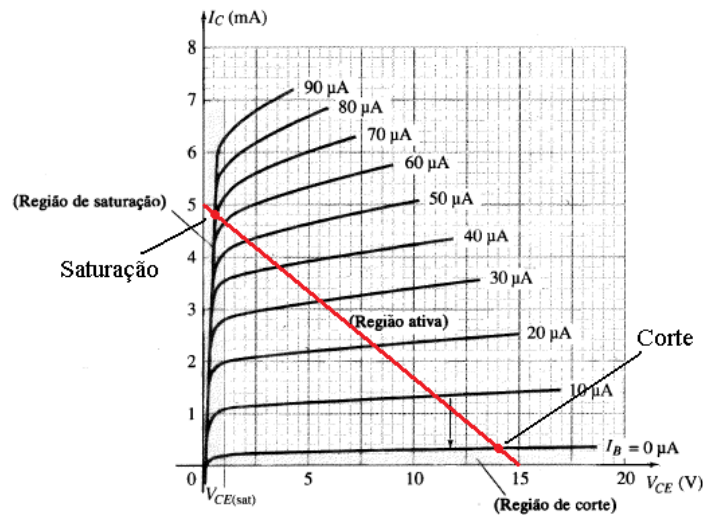


Figura 6.2: Análise de reta de carga de um transistor como chave.

Pela análise de reta de carga, verificamos que para o circuito utilizado como exemplo a saturação ocorrerá para uma corrente de base de $70\mu A$. Se considerarmos que o valor máximo da tensão de entrada é de $5V$, por exemplo, teríamos que utilizar um $R_B \approx 62k\Omega$.

A definição das condições nas quais o transistor opera como chave parece, a primeira vista ser muito simples. No entanto, devemos lembrar que as curvas fornecidas pelo fabricante são referentes a um determinado β , a temperatura ambiente. Como o β de transistor pode variar fortemente com a temperatura, não é aconselhável fazer o projeto simplesmente pelos dados de catálogo. Um erro na magnitude da corrente de base fará com que o transistor entre na região ativa, o que geraria uma maior dissipação de potência no transistor, além de não garantir que a resposta desejada para o circuito ocorra. A Figura 6.3 exemplifica a questão de aumento da energia dissipada pelo transistor quando este não entra na saturação.

Para garantir a saturação em um circuito com TBJ, costumamos então adotar uma regra de projeto: Consideramos que todo transistor possui um β igual a 10 (valor muito inferior aos valores de ganho DC encontrados no mercado). Esse β é chamado de β forte.

$$\beta_{Forte} = 10 \quad (6.3)$$

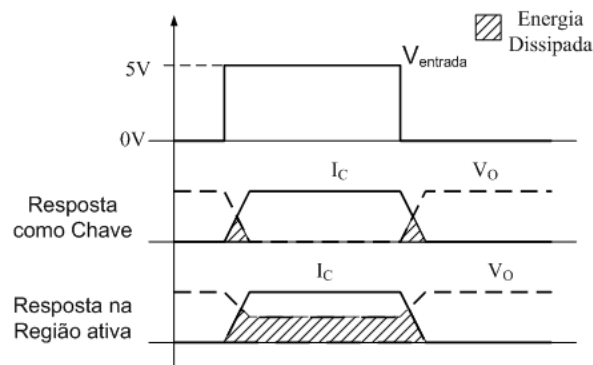


Figura 6.3: Perdas de chaveamento em um transistor.

Assim:

$$I_{BSat} = \frac{I_{Cmax}}{\beta_{Forte}} \quad (6.4)$$

6.1.1 Acionamento de relé

Uma das aplicações de transistores como chave é o acionamento de cargas de potência, como lâmpadas e motores via relé. O relé é um elemento eletromecânico composto por uma bobina e um ou mais contatos mecânicos. Ao se passar um determinado nível de corrente na bobina o contato mecânico é fechado. Esse tipo de operação permite acionar cargas que demandem muita corrente, por meio de um circuito eletrônico simples. O circuito básico de acionamento de um relé é mostrado na Figura 6.4.

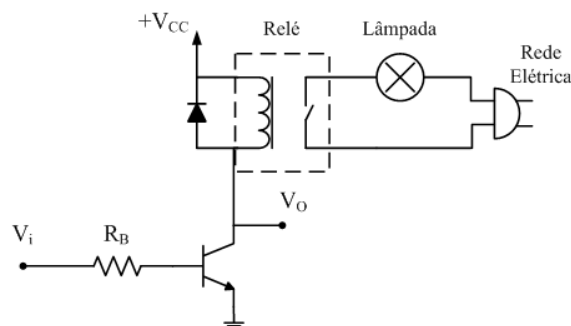


Figura 6.4: Circuito de acionamento de um relé.

O diodo posto em anti-paralelo com a bobina do relé se chama **diodo de roda-livre**. Ele é necessário para descarregar a energia armazenada na bobina e impedir que ela gere uma sobre tensão no transistor. A Figura 6.5 mostra as formas de onda envolvidas no circuito de acionamento.

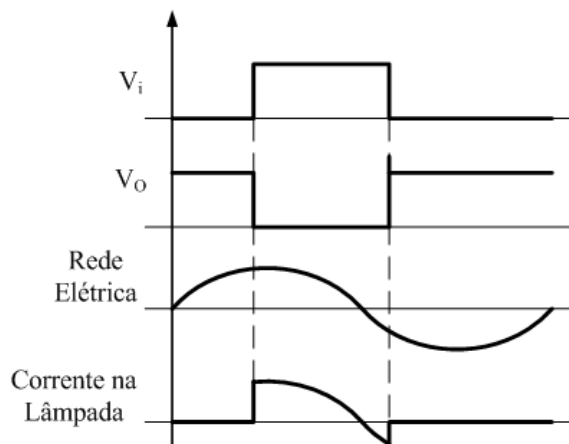
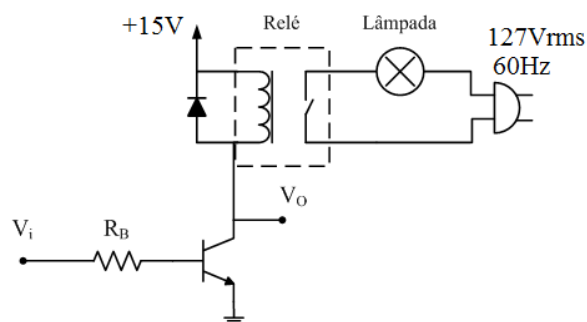


Figura 6.5: Formas de onda de um circuito de acionamento de lâmpada a relé.

OBS: Note na forma de onda apresentado na Figura 6.5 que a a tensão de saída do circuito transistorizado (V_O) é inversa à tensão de entrada do circuito (V_i), ou seja, quando V_i é positiva, V_O é nula e vice-versa. Essa característica pode ser utilizada para construir um circuito inversor lógico.

Exemplo de cálculo

O circuito abaixo deve acionar um relé de 100mA a partir de uma tensão digital de entrada que varia entre 0 e 5V. O relé aciona em seu lado c.a. uma lâmpada de 60W. Com essas informações, defina: a) O valor do resistor de base que garante o funcionamento do sistema, b) A corrente RMS que o lado c.a. do relé deve suportar.



Resolução

a) O resistor de base R_B deve impor uma corrente suficientemente alta para garantir a saturação do transistor quando a tensão de entrada atingir 5V. Para isso, utilizamos a regra do β_{forte} , pois assim a saturação é mantida independentemente de variações nas características do circuito. Com essa regra, a corrente de base a ser imposta deve ser:

$$I_{Bsat} = \frac{I_{Csat}}{10} = \frac{100mA}{10} = 10mA \quad (6.5)$$

$$R_B = \frac{V_i - 0,7V}{I_{Bsat}} = \frac{5 - 0,7V}{10mA} = 430\Omega \quad (6.6)$$

b) A corrente a ser suportada pelo contato c.a. do relé deverá ser:

$$I_{RMS} = \frac{60W}{V_{Rede}} = \frac{60W}{127V_{rms}} = 472,4mA_{rms} \quad (6.7)$$

6.2 Polarização de circuitos transistorizados

Na região ativa, os transistores normalmente operam como amplificadores de sinais. Para isso é necessário que o transistor esteja polarizado na região ativa, de preferência em um ponto quiescente que permita que toda a excursão do sinal de entrada c.a. ocorra também na região ativa. A Figura 6.6 exemplifica uma condição onde um sinal alternado é injetado na base de um circuito em emissor-comum. Esse sinal irá gerar uma onda alternada de corrente, que ao passar pelo circuito de saída será amplificado.

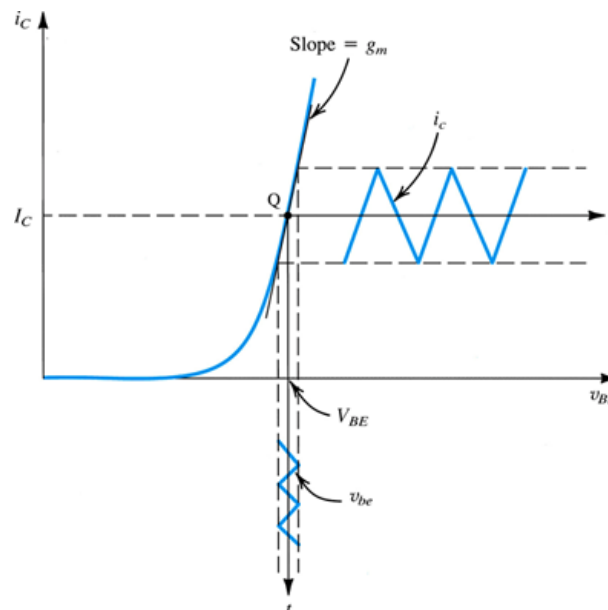


Figura 6.6: Exemplo de amplificação de sinal com um transistor polarizado.

A amplificação de sinais e a análise de amplificadores transistorizados será realizada em uma disciplina posterior. O que nos interessa no momento é estudar como podemos fazer com que um determinado transistor se encontre polarizado em um ponto quiescente desejado. Existem diversos circuitos de polarização de transistores, a seguir apresentaremos alguns dos circuitos mais comuns.

6.2.1 Polarização por fonte de corrente

A forma mais simples de se polarizar um circuito transistorizado é aplicando diretamente pelo transistor uma corrente contínua, por meio de uma fonte externa. Desta forma podemos definir diretamente o ponto de operação do circuito, sem depender de fatores como o ganho DC e a temperatura. Esse tipo de polarização é mostrado na Figura 6.7.

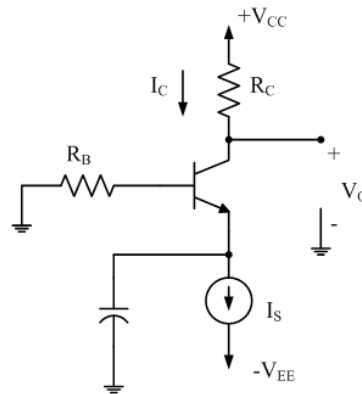


Figura 6.7: Polarização por fonte de corrente.

Neste caso:

$$I_C = \alpha I_S \approx I_S \quad (6.8)$$

A tensão de saída será:

$$V_O = V_{CC} - R_C I_S \quad (6.9)$$

Existem diversos circuitos que podem ser utilizados como fonte de corrente, como os espelhos de corrente. Este tema não será abordado nesta apostila.

6.2.2 Polarização Fixa

A Figura 6.8 mostra o circuito de polarização fixa. Desconsidere os capacitores de bloqueio, eles existem para fazer a conexão de sinais alternados ao circuito, para as análises de c.c. basta considerá-los como circuitos abertos.

Note que existem dois ramos para a circulação de corrente. Um ramo conecta o coletor à fonte de alimentação, e o outro conecta a base à mesma fonte. Podemos então definir duas equações, uma para cada ramo:

$$V_{CC} - R_B I_B - V_{BE} = 0 \quad (6.10)$$

$$V_{CC} - R_C I_C - V_{CE} = 0 \quad (6.11)$$

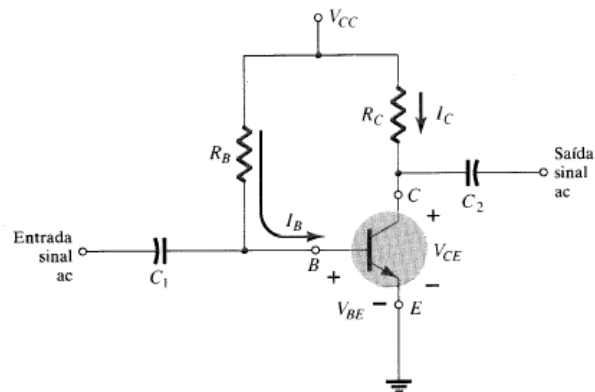


Figura 6.8: **Polarização Fixa.**

A definição do ponto quiescente se dá a partir da definição dos resistores de base e coletor, da seguinte forma:

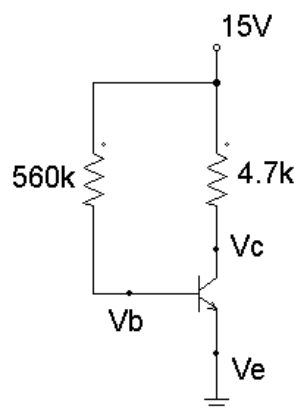
$$I_C = \beta I_B = \beta \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \quad (6.12)$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C \quad (6.13)$$

OBS: Lembre que $V_{BE} = 0,7V$ na região ativa. O grande problema desta topologia é que ela é muito dependente de β , logo, o ponto de polarização pode variar fortemente com a temperatura e outros fatores. O que possivelmente iria gerar resultados indesejáveis.

Exemplo de cálculo

Para o circuito abaixo, calcule as corrente de base, coletor e emissor e as tensões de base, coletor e emissor. Considere $\beta = 100$.



Resolução

Para iniciar a resolução do problema é necessário definir uma região de operação para o transistor. Iremos assumir que o TBJ opera na região ativa. Caso essa consideração esteja errada, poderemos verificar a real condição de operação do transistor pelo valor da tensão entre coletor e emissor.

Pela malha de base-emissor, podemos escrever:

$$15V = 560k\Omega \cdot I_B + 0,7V \quad (6.14)$$

Assim a corrente de base pode ser definida como:

$$I_B = \frac{15V - 0,7V}{560k\Omega} = 25,5\mu A \quad (6.15)$$

A corrente de coletor, na região ativa, pode ser determinada como:

$$I_C = \beta I_B = 100 \cdot 25,5\mu A = 2,55mA \quad (6.16)$$

A corrente de emissor será então:

$$I_E = I_C + I_B = 2,55mA + 25,5\mu A = 2,57mA \quad (6.17)$$

Note que o terminal de emissor está diretamente conectado ao terra do circuito. Assim, a tensão do terminal de emissor será:

$$V_E = 0V \quad (6.18)$$

Como, por definição, a tensão de base-emissor em região ativa é de 0,7V, pode-se definir que a tensão de base é de:

$$V_{BE} = 0,7V \rightarrow V_B - V_E = 0,7V \quad (6.19)$$

$$V_B = 0,7V - V_E = 0,7V \quad (6.20)$$

A tensão de coletor será de:

$$V_C = 15V - R_C \cdot I_C = 15V - 4,7k\Omega \cdot 2,55mA = 3,01V \quad (6.21)$$

Por fim é necessário conferir se a consideração de região ativa está correta. Para isso, tem-se que verificar se a tensão V_{CE} é superior a 0,2V, ou seja, se o transistor não está na saturação. A tensão coletor-emissor é:

$$V_{CE} = V_C - V_E = 3,01V - 0V = 3,01V \quad (6.22)$$

Como $V_{CE} > 0,2V$, o transistor está realmente na região ativa.

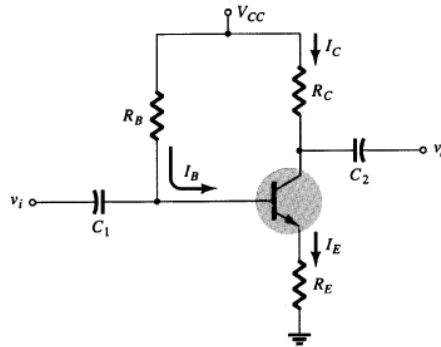


Figura 6.9: Polarização Fixa com resistor de emissor.

6.2.3 Polarização Fixa com Resistor de Emissor

A polarização fixa com resistor de emissor é apresentada na Figura 6.9. Nesta situação os caminhos de corrente pela base e pelo coletor se encontram no resistor de emissor. As equações dos ramos são mostradas a seguir:

$$V_{CC} - R_B I_B - V_{BE} - R_E I_E = 0 \quad (6.23)$$

$$V_{CC} - R_C I_C - V_{CE} - R_E I_E = 0 \quad (6.24)$$

Analisando a malha de base temos que, se $I_E = (\beta + 1)I_B$:

$$V_{CC} - R_B I_B - V_{BE} - R_E (\beta + 1)I_B = 0 \quad (6.25)$$

Logo,

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + R_E(\beta + 1)} \quad (6.26)$$

Então:

$$I_C = \beta \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E} \quad (6.27)$$

Analisando a malha de coletor temos que:

$$V_{CC} - R_C I_C - V_{CE} - R_E (\alpha I_C) = 0 \quad (6.28)$$

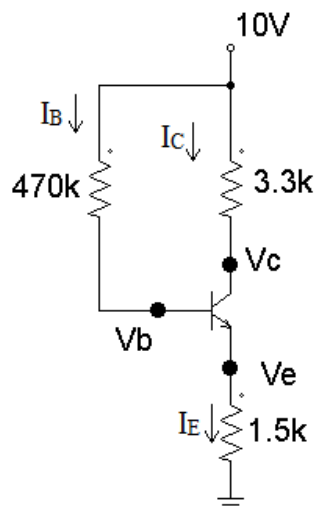
Assim:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + \alpha R_E) \quad (6.29)$$

OBS: O uso do resistor de emissor torna o circuito mais estável, ou seja, menos dependente de β !

Exemplo de cálculo

1 - Para o circuito abaixo, calcule as correntes e tensões de base, coletor e emissor. Considere $\beta = 120$.



Resolução

Novamente, partiremos do princípio que o transistor se encontra na região ativa. Analisando a malha de base-emissor, pode-se escrever:

$$10V = 470k\Omega \cdot I_B + 0,7V + 1,5k\Omega \cdot I_E \quad (6.30)$$

Na região ativa, podemos relacionar a corrente de emissor e base, da seguinte forma:

$$I_E = I_C + I_B = \beta I_B + I_B = (\beta + 1) \cdot I_B \quad (6.31)$$

Desta forma, a equação da malha de base-emissor se torna:

$$10V = 470k\Omega \cdot I_B + 0,7V + 1,5k\Omega \cdot (\beta + 1)I_B \quad (6.32)$$

Assim, a corrente de base pode ser determinada como:

$$I_B = \frac{10V - 0,7V}{470k\Omega + (120 + 1) \cdot 1,5k\Omega} = 14,3\mu A \quad (6.33)$$

Com isso, podemos determinar as demais correntes:

$$I_C = \beta I_B = 120 \cdot 14,3 \mu A = 1,72 mA \quad (6.34)$$

$$I_E = (\beta + 1) I_B = 121 \cdot 14,3 \mu A = 1,73 mA \quad (6.35)$$

Uma vez conhecidas as correntes nos terminais, podemos determinar as tensões do circuito. A tensão de emissor será:

$$V_E = 1,5 k\Omega \cdot I_E = 1,5 k\Omega \cdot 1,73 mA = 2,6 V \quad (6.36)$$

A tensão de base pode ser definida ao se lembrar que na região ativa $V_{BE} = 0,7 V$:

$$V_B = 0,7 V + V_E = 0,7 V + 2,6 V = 3,3 V \quad (6.37)$$

A tensão no coletor será:

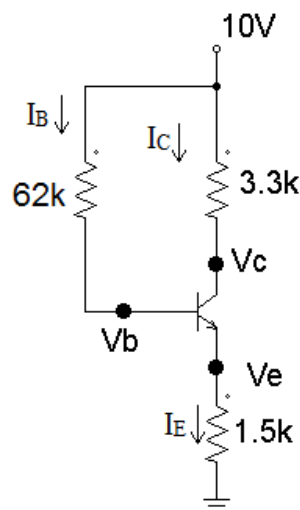
$$V_C = 10 - 3,3 k\Omega \cdot I_C = 10 - 3,3 k\Omega \cdot 1,72 mA = 4,32 V \quad (6.38)$$

Por fim, a tensão de coletor-emissor será:

$$V_{CE} = V_C - V_E = 4,32 V - 2,6 V = 1,72 V \quad (6.39)$$

Como $V_{CE} > 0,2 V$, o transistor está realmente em região ativa, logo, toda a análise até agora realizada está correta.

2 - Para o circuito abaixo, com um $\beta = 50$, calcule as correntes e tensões nos terminais do transistor.



Resolução

Seguindo o mesmo procedimento realizado anteriormente. O circuito de base-emissor pode ser escrito como:

$$10V = 62k\Omega \cdot I_B + 0,7V + 1,5k\Omega \cdot I_E \quad (6.40)$$

$$10V = 62k\Omega \cdot I_B + 0,7V + 1,5k\Omega \cdot (\beta + 1) \cdot I_B \quad (6.41)$$

A corrente de base se torna:

$$I_B = \frac{10V - 0,7V}{62k\Omega + (50 + 1) \cdot 1,5k\Omega} = 67,15\mu A \quad (6.42)$$

As correntes dos demais terminais podem ser definidas como:

$$I_C = \beta \cdot I_B = 50 \cdot 67,15\mu A = 3,35mA \quad (6.43)$$

$$I_E = (\beta + 1) \cdot I_B = 51 \cdot 67,15\mu A = 3,43mA \quad (6.44)$$

Com isso, a tensão de emissor se torna:

$$V_E = 1,5k\Omega \cdot I_E = 1,5k\Omega \cdot 3,43mA = 5,15V \quad (6.45)$$

A tensão de base se torna:

$$V_B = 0,7V + V_E = 0,7V + 5,15V = 5,85V \quad (6.46)$$

A tensão de coletor será então:

$$V_C = 10V - 3,3k\Omega \cdot I_C = 10V - 3,3k\Omega \cdot 3,35mA = -1,06V \quad (6.47)$$

A tensão V_{CE} será:

$$V_{CE} = V_C - V_E = -1,06V - 5,15V = -6,21V \quad (6.48)$$

Observe que a tensão de coletor-emissor é inferior a 0,2V. Isso indica que na realidade o transistor está em **saturação**, ou seja, toda análise realizada até o momento não é válida. Com isso, devemos refazer a análise do circuito, sabendo que agora a tensão $V_{CE} = 0,2V$. Reescrevendo as equações das malhas de base-emissor e coletor-emissor, podemos definir:

$$10V = 62k\Omega \cdot I_B + 0,7V + 1,5k\Omega \cdot I_E \quad (6.49)$$

$$10V = 3,3k\Omega \cdot I_C + V_{CE} + 1,5k\Omega \cdot I_E \quad (6.50)$$

Além dessas duas expressões, não podemos nos esquecer que $I_E = I_C + I_B$. Tomando a expressão da malha de base-emissor, têm-se que:

$$10V - 0,7V = 62k\Omega \cdot I_B + 1,5k\Omega \cdot (I_C + I_B) \quad (6.51)$$

$$10V - 0,7V = 63,5k\Omega \cdot I_B + 1,5k\Omega \cdot I_C \quad (6.52)$$

Podemos isolar a corrente de base:

$$I_B = \frac{9,3V - 1,5k\Omega \cdot I_C}{63,5k\Omega} \quad (6.53)$$

Substituindo isso na expressão da malha de coletor-emissor, pode-se escrever:

$$10V = 3,3k\Omega \cdot I_C + 0,2V + 1,5k\Omega \cdot (I_C + I_B) \quad (6.54)$$

$$10V = 4,8k\Omega \cdot I_C + 0,2V + 1,5k\Omega \cdot \frac{9,3V - 1,5k\Omega \cdot I_C}{63,5k\Omega} \quad (6.55)$$

$$10V = (4,8k\Omega - 35,4\Omega) \cdot I_C + 0,2V + 0,22V \quad (6.56)$$

$$I_C = \frac{10V - 0,42V}{4,76k\Omega} = 2,01mA \quad (6.57)$$

Calculando a corrente de base:

$$I_B = \frac{9,3V - 1,5k\Omega \cdot 2,01mA}{63,5k\Omega} = 98,97\mu A \quad (6.58)$$

A corrente de emissor pode ser definida então como:

$$I_E = I_C + I_B = 2,01mA + 98,97\mu A = 2,11mA \quad (6.59)$$

Sabendo os valores das correntes, podemos encontrar os valores das tensões terminais. A tensão de emissor se torna:

$$V_E = 1,5k\Omega \cdot I_E = 1,5k\Omega \cdot 2,11mA = 3,17V \quad (6.60)$$

A tensão de base será:

$$V_B = 0,7V + V_E = 0,7V + 3,17V = 3,87V \quad (6.61)$$

A tensão de coletor será:

$$V_C = 0,2V + V_E = 0,2V + 3,17V = 3,37V \quad (6.62)$$

6.2.4 Polarização por divisor de tensão

A polarização por divisor de tensão visa estipular o ponto de operação de um transistor de modo que este seja o menos suscetível a variações de β possível. A análise deste circuito pode ser feita de duas formas: uma forma exata, levando em consideração todas as correntes presentes no circuito, e uma forma aproximada, onde fazemos simplificações para agilizar o processo de análise. A seguir descreveremos as duas formas de análise:

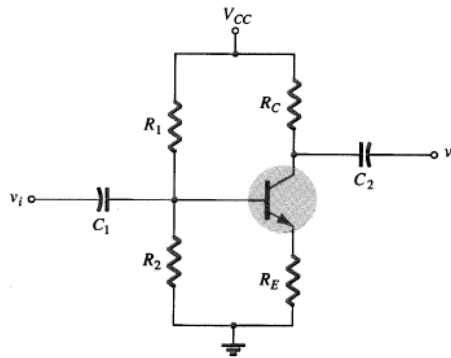


Figura 6.10: Polarização por divisão de tensão.

Análise exata

O circuito da Figura 6.10 pode ser redesenhado, de modo que o circuito de base se apresente da seguinte forma:

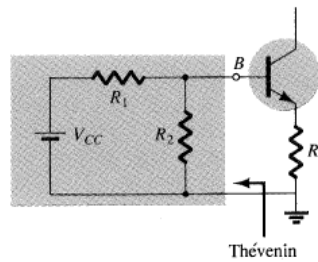


Figura 6.11: Circuito de base.

Podemos desenvolver o circuito equivalente de Thevenin visto pela base do transistor. Utilizando as técnicas de análise aprendidas em circuitos, temos que a resistência de Thevenin para o circuito de base é:

$$R_{Th} = R_1 // R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (6.63)$$

A tensão de Thevenin será igual a divisão de tensão:

$$E_{Th} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (6.64)$$

Assim, podemos redesenhar mais uma vez o circuito de base de modo que:

Agora, podemos escrever a equação que define a corrente de base:

$$E_{Th} - I_B R_{Th} - V_{BE} - R_E I_E = 0 \quad (6.65)$$

Assim:

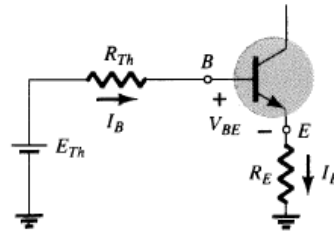


Figura 6.12: Circuito de base redesenhado.

$$I_B = \frac{E_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + (\beta + 1)R_E} \quad (6.66)$$

Uma vez conhecida I_B podemos definir I_C e então V_{CE} :

$$I_C = \beta \frac{E_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + (\beta + 1)R_E} \quad (6.67)$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + \alpha R_E) \quad (6.68)$$

Análise aproximada

Considerando a Figura 6.12, analisando o caminho da corrente no circuito de base, podemos perceber que a corrente que passa pelo resistor R_1 irá se dividir entre a corrente I_B e a corrente no resistor R_2 . Pelas nossas análises anteriores, notamos que a corrente I_B é inversamente proporcional a $(\beta + 1)R_E$, logo, quanto maior esse termo, menor será a corrente de base. Para fins de simplificação, costuma-se considerar que se $(\beta + 1)R_E$ for pelo menos 10 vezes maior do que R_2 , a corrente I_B será desprezível em relação à corrente I_{R2} , de modo que podemos desconsiderá-la da análise. Fazendo isso, podemos estimar que a tensão no terminal de base do transistor será:

$$V_B = V_{R2} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (6.69)$$

Assim, a tensão no terminal do emissor será:

$$V_E = V_B - 0,7V \quad (6.70)$$

Logo:

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{V_B - 0,7V}{R_E} \quad (6.71)$$

Uma vez definida a corrente de emissor, podemos encontrar a corrente de coletor e a tensão V_{CE} :

$$I_C = \alpha \frac{V_B - 0,7V}{R_E} \quad (6.72)$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + \alpha R_E) \quad (6.73)$$

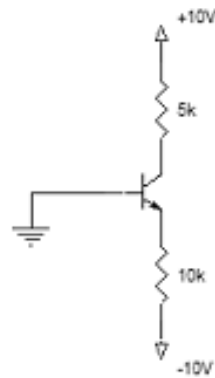
6.3 Dicas de resolução de circuitos diversos com transistores

Como discutido nos exemplos acima, o transistor pode operar como chave eletrônica, operando apenas em corte ou saturação, e como uma fonte de corrente, operando na região ativa. Na operação em região ativa, analisamos apenas as condições de polarização dos transistores, não abordando o seu funcionamento para sinais c.a., o que não é escopo dessa disciplina. Apesar da distinção feita na aplicação dos transistores, podem ocorrer casos onde um transistor pensado para trabalhar na região ativa, por um motivo qualquer entre em corte ou saturação. O aluno deverá ser capaz de identificar essas situações e resolver o circuito. Para isso, passamos algumas dicas:

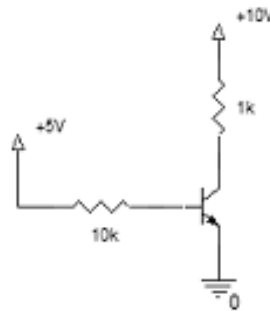
- Quando analisar um caso de polarização de transistores, inicie sua análise considerando região ativa. Verifique a veracidade da sua consideração calculando o valor da tensão V_{CE} para transistores NPN e V_{EC} para transistores PNP. Caso essa tensão for inferior a 0,2V isso indicará a condição de saturação;
- Você pode determinar a corrente de saturação de um circuito definindo o ponto de transição entre região ativa e saturação. Neste ponto, $V_{CE} = 0,2V$ e todas as relações de corrente da região ativa se aplicam. Neste ponto, pode-se fazer $I_C \approx I_E$, uma vez que $I_C \gg I_B$;
- Sempre redesenhe os circuitos utilizando os modelos de Ebers-moll apresentados nesta apostila. Com isso você conseguirá visualizar um circuito elétrico equivalente e resolvê-lo corretamente, independentemente da região de operação.

6.4 Exercícios propostos

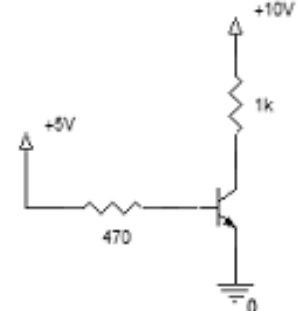
1. Para os circuitos abaixo calcule as correntes I_B , I_C e I_E ; as tensões V_C , V_B e V_E ; a tensão V_{CE} e indique em que região está operando o transistor (Corte, Saturação ou Região Ativa). Considere $\beta = 100$, e $V_{BE} = 0,7V$ (Região Ativa).



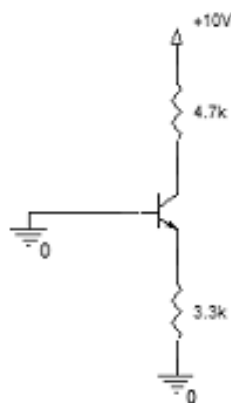
a)



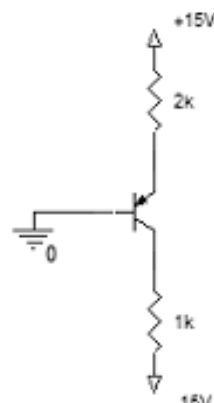
b)



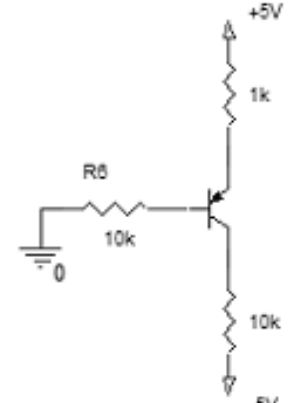
c)



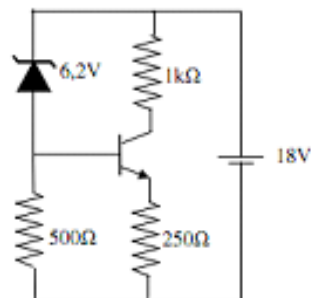
d)



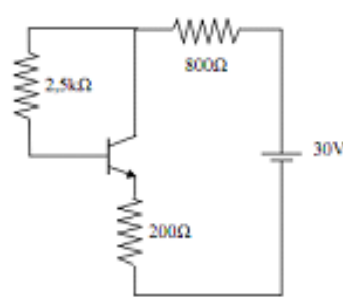
e)



f)



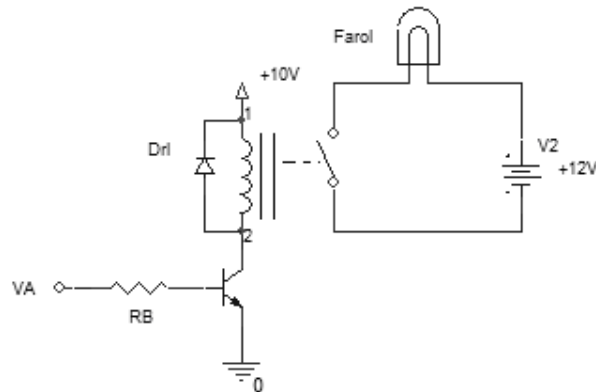
g)



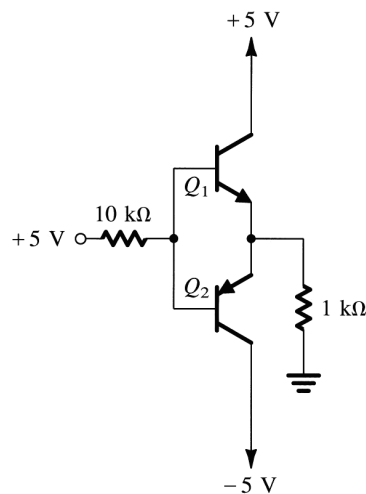
h)

2. Para cada circuito da questão 1 esboce a reta de carga de saída e defina o valor da corrente de saturação e da tensão de corte. Faça as considerações que julgar necessárias.
3. O circuito abaixo mostra um sistema de acionamento do farol de um automóvel. Considere que o relé é acionado com uma corrente de 100mA. Considerando esse circuito, faça o que se pede: a) Deseja-se que o farol seja acionado com uma tensão de controle (V_A) de +5V. Para essa condição, qual o valor de R_B ? b) Qual a função do diodo em anti-paralelo com a bobina do relé? Como ele se chama? c) Se o farol

do automóvel possui 100W, qual a corrente que o contato do relé deve suportar?



4. Abaixo está representado um circuito transistorizado conhecido como push-pull normalmente utilizado como amplificador de corrente para acionamento de cargas. Considerando $\beta = 100$, faça o que se pede: a) Calcule as correntes de base, emissor e coletor e as tensões terminais de ambos os transistores. b) Calcule tensão e a corrente sobre o resistor de carga.



Formulário

Lei de Ohm: $V = R \cdot I$; Potência elétrica: $P = V \cdot I$

Lei de Kirchhoff das correntes: $\sum I_{entram} = \sum I_{saem}$

Lei de Kirchhoff das tensões: $\sum V_{elevacoes} = \sum V_{quedas}$

$I_D = I_S \cdot (e^{nV_D/V_T} - 1)$; $V_T \approx 25mV @ 27^\circ C$

Tensão limiar: 0,7V (silício); 0,3V (germânio); 1,8V (LED comum)

Tensão eficaz senóide: $V_{RMS} = V_{pico}/\sqrt{2}$

Retificador de meia-onda: $V_{O(med)} = V_{pico}/\pi$

Retificador de onda completa: $V_{O(med)} = 2V_{pico}/\pi$

Ripple de tensão: $\Delta V_o = V_{max} - V_{min}$

Filtro capacitivo: $C = \frac{I_o}{f_r \cdot \Delta V_o}$; Tensão média filtrada: $V_{O(med)} = \frac{V_{max} + V_{min}}{2}$

Relação transformação: $\frac{N_P}{N_S} = \frac{V_P}{V_S} = \frac{I_S}{I_P}$

Regulador zener: $V_O = V_C \frac{r_Z}{R_Z + r_Z} + V_{Zo} \frac{R_Z}{R_Z + r_Z} - I_R \frac{r_Z R_Z}{R_Z + r_Z}$

Regulação de linha: $\frac{\partial V_O}{\partial V_C} = \frac{r_Z}{R_Z + r_Z}$

Regulação de carga: $\frac{\partial V_O}{\partial I_R} = -\frac{R_Z r_Z}{R_Z + r_Z}$

Resistor de zener: $R_Z = \frac{V_{Min} - V_{Zo}}{I_{DZ} + I_{Rmax}} + r_Z \frac{I_{DZ}}{I_{DZ} + I_{Rmax}}$

Potência de zener: $P_{Max} = V_{O,Pmax} \cdot I_{DZ,Pmax}$

$V_{O,Pmax} = V_{Max} \frac{r_Z}{R_Z + r_Z} + V_{Zo} \frac{R_Z}{R_Z + r_Z}$; $I_{DZ,Pmax} = \frac{V_{O,Pmax} - V_{Zo}}{r_Z}$

$I_E = I_C + I_B$

$V_{BE(npn)} = V_{EB(pnp)} = 0,7V$

Região ativa: $I_C = \beta \cdot I_B$; Região de saturação: $V_{CE(npn)} = V_{EC(pnp)} = 0,2V$

Beta forte: $\beta_{forte} = 10$

Referências Bibliográficas

- [1] Robert Boylestad e Louis Nashelsky, *Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos*, Editora LTC, Sexta Edição, 1999.
- [2] Albert P. Malvino, *Eletrônica: vol. 1*, Makron Books, Quarta Edição, 1997.
- [3] Adel S. Sedra e Kenneth C. Smith, *Microeletrônica*, Makron Books, Quarta Edição, 2000.