

Eletrônica Básica usando simulador – Parte1



Introdução – A Eletrônica

Em cursos anteriores, Circuitos Elétricos em CC e CA foram estudados os circuitos elétricos. Circuitos elétricos são constituídos de componentes passivos conectados entre si por fios. Em um circuito eletrônico de alguma forma o fluxo de corrente pode ser controlado por outro dispositivo, chamado de ativo. Em circuitos elétricos os dispositivos que controlam o fluxo da corrente são chaves, potenciômetros e outros. Em eletrônica a diferença é que ao invés de usar força mecânica para efetuar isso, são usados dispositivos eletrônicos para esse controle. Isto é, é a eletricidade controlando a eletricidade, essa é a principal diferença entre esses dois mundos.

A eletrônica é fundamentada em dispositivos semicondutores, isto é, dispositivos construídos a partir de um tipo de material chamado semicondutor. Todos os componentes eletrônicos usam na sua construção os semicondutores, neste material são estudados os diodos e suas aplicações, o diodo Zener e suas aplicações, os reguladores integrados de 3 terminais e os transistores e algumas de suas aplicações. O foco do livro, além dos conceitos teóricos tradicionais, é a utilização do simulador de circuito Microcap para simular alguns circuitos usando os componentes acima citados. Ao fazer o download deste material, extraia para uma pasta e nesta mesma pasta coloque os arquivos fornecidos. Esses arquivos foram feitos no MicroCap versão 9 o que está disponível para download no site. Instale-o e em seguida ao ler o texto você encontrará os links para as aplicações, basta clicar (Ctrl+clique).

Boa sorte no estudo da eletrônica.

Professor Romulo Oliveira Albuquerque

Sumario

1. Semicondutores diodo de junção.....	04
1.1. Semicondutores.....	04
1.2. Semicondutor intrínseco.....	04
1.3. Semicondutores extrínsecos.....	08
1.4. A Junção PN.....	11
1.5. Diodo de Junção.....	15
2. Aplicação de diodos.....	38
2.1. Conversor de CA para CC – Fonte de alimentação.....	38
2.2. Retificador de meia onda.....	40
2.3. Retificador de Onda Completa.....	43
2.4. Retificadores com filtro capacitivo.....	48
2.5. Grampeadores.....	53
2.6. Multiplicadores de tensão.....	55
2.7. Limitadores de tensão.....	56
3. Reguladores de tensão.....	59
3.1. Regulador Zener.....	59
3.2. Reguladores integrados de três terminais.....	62
4. Transistores bipolares.....	

1. Semicondutores diodo de junção

Neste capítulo serão apresentados os materiais semicondutores e sua principal aplicação, a junção PN e o diodo de junção.

1.1. Semicondutores

Os materiais usados em eletrônica se classificam em condutores (Ex: cobre, alumínio, ferro, ouro, prata, etc.) e isolantes (Ex: madeira, borracha, ar, vidro etc.), mas existe um outro tipo de material chamado de semicondutor (pois tem resistividade intermediária entre condutor e isolante) que também é largamente usado em eletrônica principalmente depois dos anos 50 após a descoberta do transistor. Estes materiais ao contrário dos condutores tem a sua resistividade alterada quando é fornecida algum tipo de radiação (térmica e luminosa principalmente). Devido às suas características esses materiais são usados construção de diodos, transistores, sensores, circuitos integrados e numa vasta gama de componentes eletrônicos. Os principais semicondutores são o Silício (Si) e o Germânio (Ge), que possuem propriedades semelhantes. A figura 1.1 mostra uma escala de resistividade de alguns materiais. As principais diferenças entre um semicondutor e um metal são:

- Um metal tem um único tipo de portador de carga, elétrons livres; a resistividade **aumenta** com a temperatura;
- Um semicondutor tem dois tipos de portador de carga, elétrons livres e lacunas; a resistividade **diminui** com o aumento de temperatura ou outro tipo de energia como radiação luminosa.

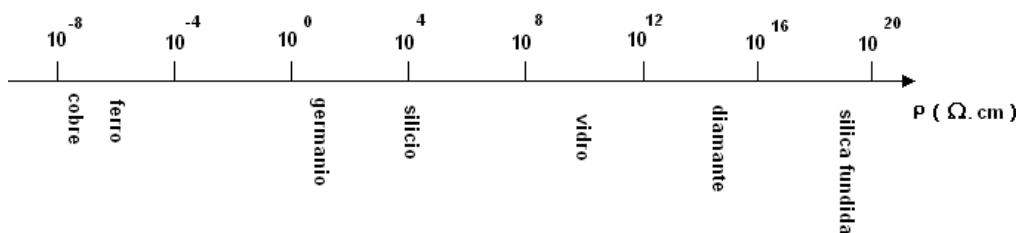


Figura 1.1: Classificação dos materiais quanto ao seu valor da resistividade

1.2. Semicondutor intrínseco

Que materiais são esses? Quais as suas principais características? Os primeiros semicondutores usados foram o Germânio (Ge) e o Silício (Si), mas outros semicondutores

já estão sendo utilizados atualmente, como Arsenieto de Gálio (AsGa) e outros. São enfatizados os dois primeiros devido à maior quantidade de informações sobre os mesmos.

Para entender melhor o comportamento de um semiconductor a análise deve ser feita do ponto de vista atômico (existe outra análise que se costuma fazer através do conceito de banda de energia). A figura 1.2a mostra a estrutura de um átomo de Si, no qual verifica-se que o mesmo tem 4 elétrons na camada de valência (última camada). Como é essa última camada que determinará as propriedades do Si, a partir de agora só é considerado o núcleo, positivo e os quatro elétrons da camada de valência, figura 1.2b.

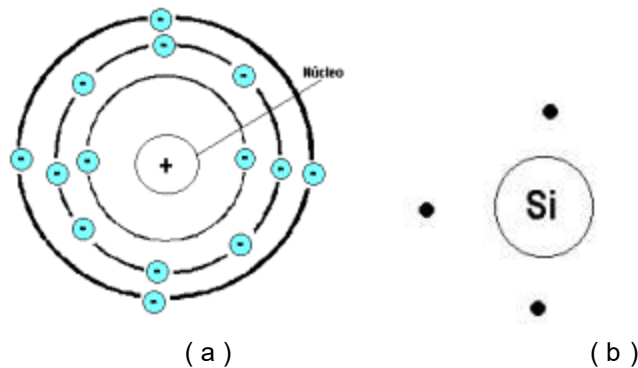


Figura 1.2: Estrutura simplificada do átomo de Si

É importante observar que o átomo é neutro, pois o número de elétrons é igual ao número de prótons. O Si é um cristal, isto é, o arranjo geométrico dos átomos é feito de forma regular e ordenada em todas as direções. No caso esse arranjo é chamada de cúbico, no qual cada átomo se liga com quatro átomos vizinhos através de ligações chamadas de **covalentes**. A figura 1.3 mostra esse arranjo no plano (2D).

Não esquecer que na realidade os átomos estão dispostos no espaço em 3 dimensões.

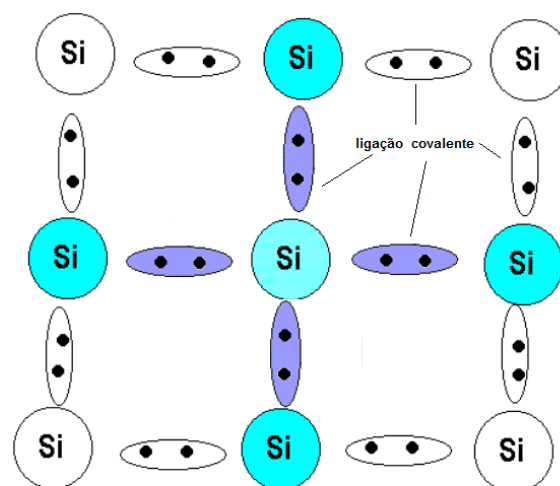


Figura 1.3: Estrutura cristalina do Si a 0°K (-273°C) - O material se comporta como isolante

À temperaturas próximas do zero absoluto (-273°C) o Si se comporta como um isolante porque não existem elétrons livres disponíveis para a condução. À medida que a

temperatura aumenta a energia que é fornecida aos elétrons da última camada (camada de valência) é suficiente para "quebrar" a ligação covalente fazendo com que os mesmos se tornem livres. O extraordinário desse fenômeno é que, além do elétron que foi liberado, a ausência desse elétron na ligação covalente pode se comportar como carga elétrica, e chamada de **lacuna** ou **buraco**. A figura 1.4 mostra a mesma estrutura da figura 1.3 considerando que algumas ligações covalentes foram rompidas. A quantidade de energia necessária para quebrar uma ligação depende do semiconductor, no caso do Ge é 0,72 eV e para o Si 1,1 eV, à temperatura ambiente.

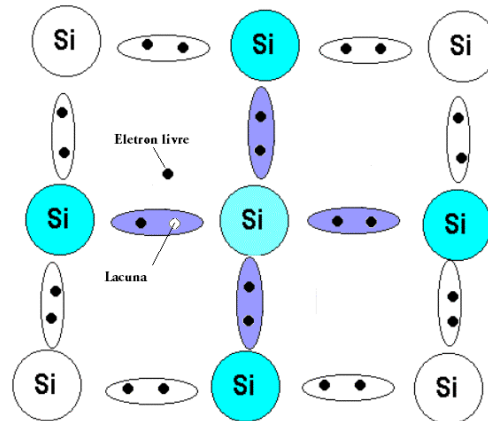


Figura 1.4: Estrutura do Si a uma temperatura acima de 0°K (acima de - 273°C) - Geração de pares elétron-lacuna

Se agora for aplicado um campo elétrico (tensão elétrica) ao cristal uma corrente elétrica aparecerá. O mecanismo de condução devido aos elétrons livres já é conhecido. expliquemos como é o mecanismo de condução devido a uma lacuna. A figura 1.5 mostra o cristal de Si sendo submetido a um campo elétrico. Os elétrons livres se deslocarão contra o campo elétrico, enquanto as lacunas se deslocarão no mesmo sentido do campo. Mas como isso acontece? A sequência de figura a seguir mostra como isso acontece. Na figura 1.5, num instante **t1** temos um elétron livre (circulo preto) e a ausência desse elétron na ligação covalente (circulo branco).

Instante t1

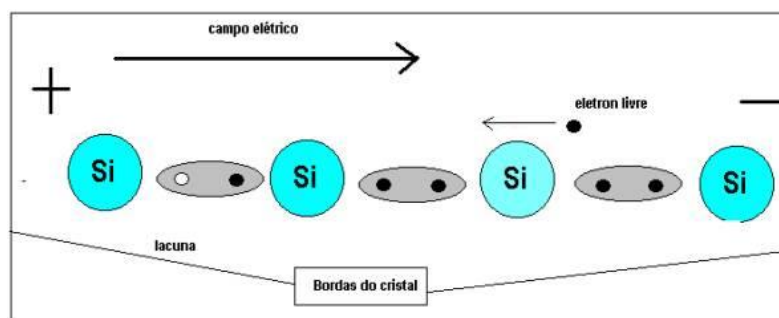


Figura 1.5: Cristal de Si submetido a um campo elétrico (tensão elétrica) num instante t1

Num instante t_2 um elétron de valência, caso tenha energia suficiente (quem está fornecendo essa energia é a fonte externa) poderá ocupar a lacuna, mas ao fazer isso deixa uma lacuna, e assim sucessivamente. A figura 1.6 e figura 1.7 mostram essa seqüência. Então tudo se passa com se uma carga positiva estivesse se deslocando para a direita do cristal, na realidade são **elétrons de valência** que se deslocam no sentido contrário. Observar que esses elétrons de valência se transformam em elétrons livres quando entram no metal (não esqueça o semicondutor está ligado à bateria através de fios de cobre!!!).

Instante t_2

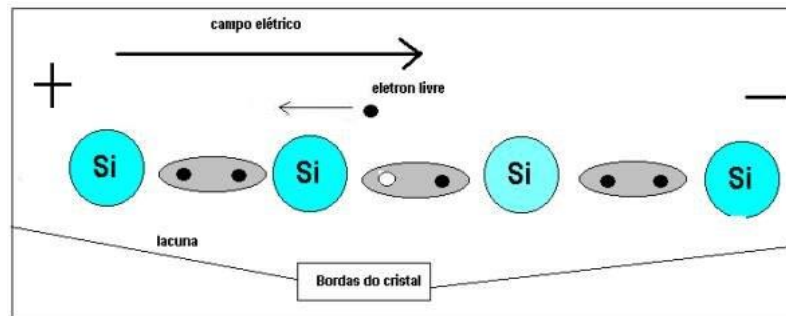


Figura 1.6: Cristal de Si submetido a um campo elétrico (tensão elétrica) num instante t_2

Instante t_3

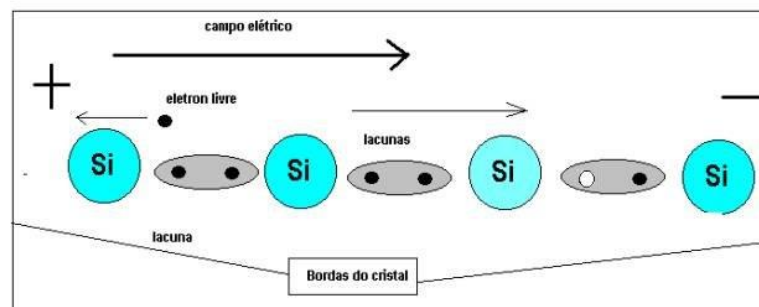


Figura 1.7: Cristal de Si submetido a um campo elétrico (tensão elétrica) num instante t_3

A corrente total no cristal será a soma do fluxo de elétrons com o fluxo de lacunas:

$$I_T = I_e + I_l$$

No caso de um semicondutor intrínseco (puro) o número de elétrons por unidade de volume (n) é igual ao número de lacunas por unidade de volume (p):

$$n=p=n_i, \quad n_i \text{ é a concentração intrínseca do semicondutor.}$$

Elétrons livres e lacunas contribuem igualmente para a corrente elétrica. Observe que essa corrente é altamente dependente da temperatura, pois o número de elétrons livre e lacunas aumenta quando a temperatura aumenta.

1.3. Semicondutores extrínsecos

Os semicondutores intrínsecos têm como principal característica o fato da concentração (número de portadores por cm^3) de elétrons livres ser igual à de lacunas e o seu número ser altamente dependente da temperatura. Um semiconductor extrínseco terá algumas de suas características elétricas (como por exemplo, a condutividade) alterada se forem adicionadas impurezas com níveis de concentração adequados.

1.3.1. Semicondutor Tipo N

O semiconductor tipo N é obtido adicionando-se quantidades controladas de impurezas pentavalente ao material puro (semiconductor intrínseco). Por exemplo, adicionando-se o fósforo (P) o qual é pentavalente (5 elétrons na camada de valência), o mesmo substituirá um átomo de semiconductor (Ge ou Si) na estrutura cristalina. Quatro dos seus elétrons serão compartilhados com quatro átomos vizinhos de Si enquanto o quinto elétron poderá se tornar livre em temperaturas muito baixas sem que seja gerada lacuna.

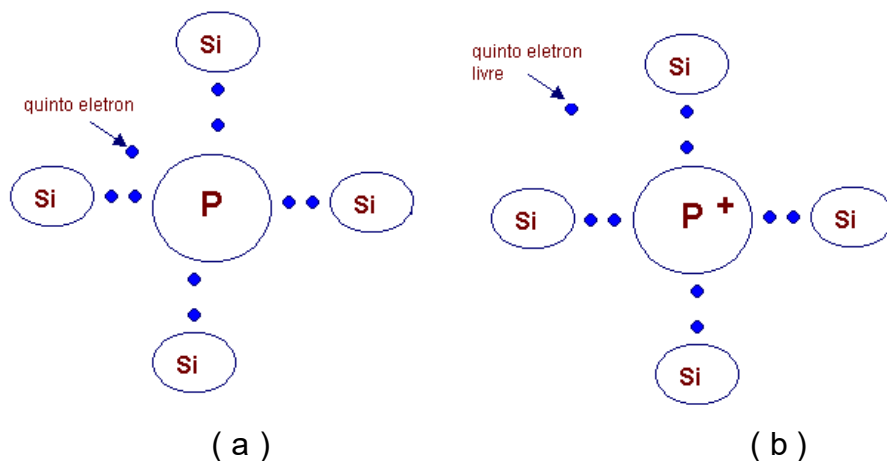


Figura 1.8: (a) Átomo de fósforo ligado a quatro átomos de Si (b) quinto elétron livre, gera um íon positivo preso à estrutura cristalina

Desta forma inicialmente só teremos elétrons livres como portadores de carga, por isso o material é chamado de N e a impureza de doadora. Aumentando-se mais ainda a temperatura será atingida uma temperatura para a qual serão gerados os pares elétron-lacuna. Os elétrons livres são chamados de **portadores majoritários** enquanto as lacunas são chamadas de **portadores minoritários**.

Se N_D é a concentração (número de átomos por cm^3) de átomos da impureza, a concentração de elétrons livres no equilíbrio térmico (taxa de geração de pares elétron-lacuna = taxa de recombinação de pares), n_{n0} , será dada por:

$n_{n0} \cong N_D$ e a concentração de lacunas será calculada aproximadamente por:

$$p_{n0} = \frac{n_i^2}{N_D}$$

Onde n_i é a concentração intrínseca de pares elétron - lacuna, valendo $2,5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ para o Ge e $1,5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ para o Si a temperatura ambiente de 27°C .

Como n_i depende da temperatura, significará que a concentração de lacunas será dependente da temperatura, porém como a concentração de elétrons livres será praticamente igual N_D então não dependerá da temperatura.

A origem dos elétrons são os átomos de fósforo, e a origem das lacunas a quebra de ligações covalente, portanto a temperatura, isto é, os portadores minoritários são gerados termicamente. A corrente em um material N é devida praticamente aos portadores majoritários, isto é, elétrons livres. Essa corrente não depende da temperatura.

$$I = I_{\text{eletrons}} + I_{\text{lacunas}} \cong I_{\text{eletrons}}$$

1.3.2. Semicondutor Tipo P

O semicondutor tipo P é obtido adicionando-se quantidades controladas de impurezas trivalentes ao material puro (semicondutor intrínseco). Um exemplo deste tipo de impureza é o boro (B). Como o boro é trivalente os seus três elétrons de valência serão compartilhados com quatro átomos de Si, porém uma das ligações não será completada. Essa lacuna poderá se comportar como um portador de carga positivo em uma temperatura muito baixa quando um elétron de valência de um átomo vizinho se deslocar para ocupar aquela vaga.

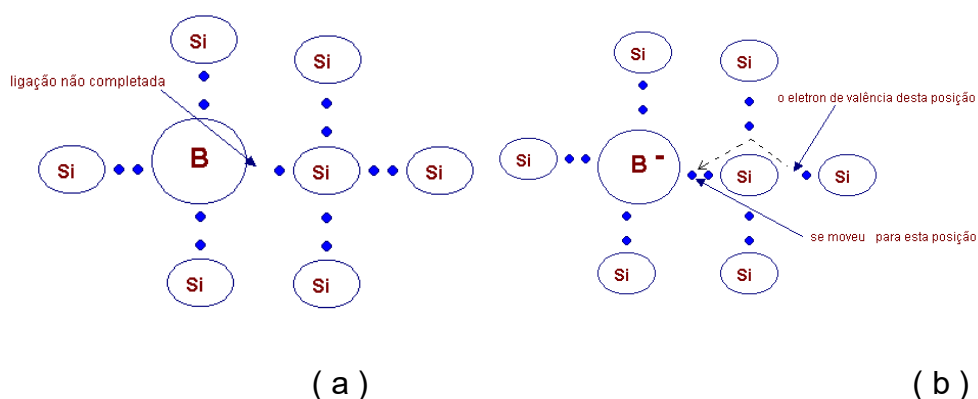


Figura 1.9: (a) Átomo de boro ligado a quatro átomos de Si (b) a vaga (lacuna) é preenchida por um elétron de valência de um átomo próximo, gera um íon negativo preso à estrutura cristalina

Observe que o elétron que se desloca para preencher a vaga (lacuna) não é livre. Do ponto de vista elétrico tudo se passa como se uma carga positiva de mesmo valor que a carga do elétron estivesse se deslocando no sentido contrário ao movimento do elétron.

Desta forma inicialmente só existem lacunas livres como portadores de carga, por isso o material é chamado de P e a impureza de aceitadora. Aumentando-se mais ainda a temperatura será atingida uma temperatura para a qual serão gerados os pares elétron-lacuna. As lacunas livres são chamados de **portadores majoritários** enquanto os elétrons livres são chamados de **portadores minoritários**.

Se N_A é a concentração de átomos da impureza aceitadora, a concentração de lacunas livres no equilíbrio térmico (taxa de geração de pares elétron-lacuna = taxa de recombinação de pares), p_{n0} , será dada por:

$p_{n0} \cong N_A$ e a concentração de elétrons livres será calculada aproximadamente por:

$$n_{n0} = \frac{n_i^2}{N_A}$$

Importante lembrar!! os materiais N e P são eletricamente neutros, as cargas livres são neutralizadas pelos íons presos à estrutura cristalina. A corrente em um material P é praticamente devida às lacunas.

A origem das lacunas são os átomos de boro, e a origem dos elétrons livres a quebra de ligações covalente, portanto a temperatura, isto é, os portadores minoritários são gerados termicamente. A corrente em um material P é devida praticamente aos portadores majoritários, isto é, lacunas. Essa corrente não depende da temperatura.

$$I = I_{\text{eletrons}} + I_{\text{lacunas}} \cong I_{\text{lacunas}}$$

1.4. A Junção PN

É obtida conectando-se, de forma adequada, uma barra de material P a uma de material N. Como existe uma diferença de concentração de portadores de ambos os lados da junção, inicialmente haverá uma difusão de elétrons livres do lado N indo para o lado P e ao mesmo tempo lacunas se difundirão do lado P para o lado N. A consequência disso é que do lado N aparecerão íons positivos não neutralizados e do lado P íons negativos não neutralizados fazendo aparecer uma região que não tem cargas livres, por isso é chamada de **região de depleção** ou **região de carga espacial** (r.c.e).

Essa distribuição de cargas cria uma barreira a qual se oporá à difusão de mais portadores majoritários, lacunas no lado P e elétrons livres no lado N. Essa corrente é representada por $I_{\text{Difusão}}$ na Figura 1.10.

Caso algum portador minoritário (aqueles gerados pela temperatura), elétron livre do lado P ou lacuna do lado N, se aproxime desta região, será acelerado pelo campo aí existente e passará para a outra região. Esse fluxo é representado na figura 1.10 por I_{Deriva} ou corrente reversa de saturação (I_s). No equilíbrio, a soma das correntes através da junção é zero, isto é, $I_{\text{Deriva}} = I_{\text{Difusão}}$. A figura 1.10 mostra a junção PN no equilíbrio quando não tem tensão externa.

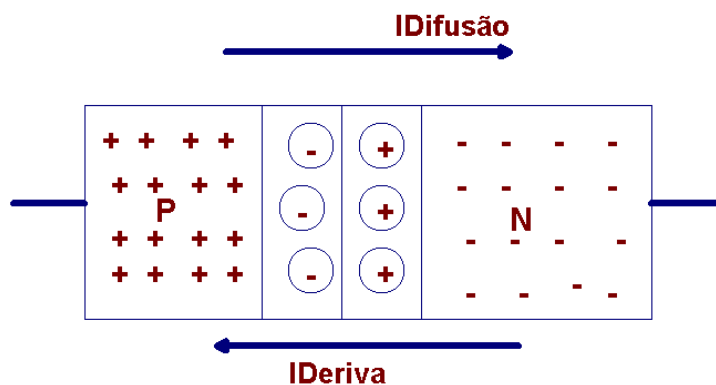


Figura 1.10: Junção PN em aberto mostrando as duas correntes (difusão e de deriva)

1.4.1 Junção PN com polarização reversa

Quando for aplicada uma tensão com a polaridade indicada na Figura 1.11, a largura da região de depleção aumentará, pois os elétrons livres do lado N são atraídos pelo pólo positivo da bateria e as lacunas do lado P são atraídas pelo pólo negativo. A consequência é o aumento da largura da r.c.e e o conseqüente aumento na altura da barreira de potencial dificultando mais ainda a passagem dos portadores majoritários de um lado da junção para o outro. A única corrente existente é a corrente devido aos portadores minoritários cujo numero depende unicamente da temperatura, desta forma esta corrente também chamada de corrente reversa de saturação (I_s) só dependerá da temperatura sendo da ordem de nA (Si) ou μ A (Ge). Observe que essa corrente é ajudada pelo campo elétrico que se estabelece na região de carga espacial.

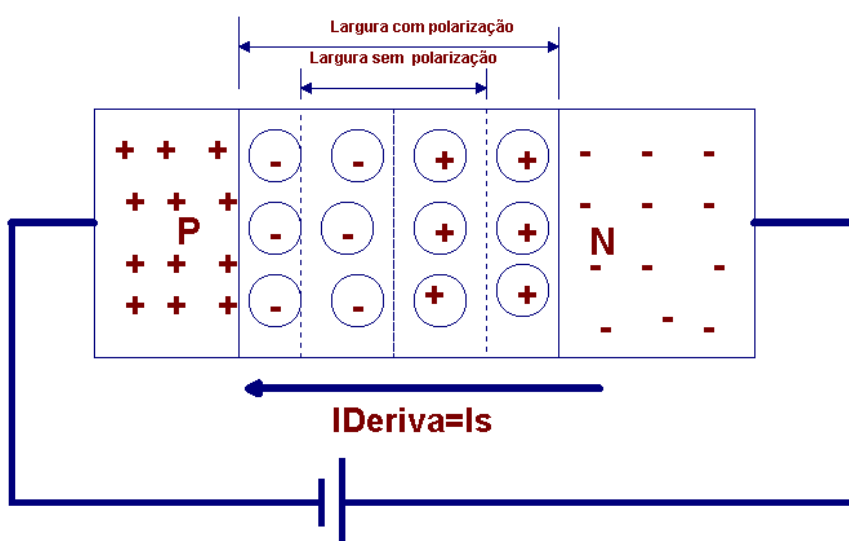


Figura 1.11: Junção PN com polarização reversa

1.4.2 Junção PN com polarização direta

Quando for aplicada uma tensão com a polaridade indicada na figura 1.12, a largura da região de depleção diminuirá, diminuindo a altura da barreira de potencial e facilitando o deslocamento dos portadores majoritários de um lado da junção para o outro. Inicialmente toda a tensão estará aplicada diretamente na região da junção, baixando a barreira de potencial, e a queda de tensão no material N e P é desprezível. A corrente é controlada pela variação da altura da barreira.

A medida que a corrente aumenta, a tensão externa se distribui entre o material e a barreira. A partir desse ponto a corrente passa a ser controlada pela resistência direta do material (a corrente no material passa a ter um comportamento aproximadamente linear com a tensão). Colocando adequadamente terminais de contato em ambas as extremidades teremos um componente chamado de diodo de junção.

Atenção !! Não foi indicado, mas para limitar a corrente no circuito é necessário colocar em serie com o diodo uma resistência ôhmica, caso contrário a corrente pode aumentar em demasia destruindo o componente por efeito Joule.

A corrente só aumentará efetivamente quando a tensão aplicada entre os terminais exceder aproximadamente 0,5 V que é chamada de tensão de corte.

Após a condução plena a tensão será de aproximadamente 0,7 V (para diodo de Si) que é o valor adotado para considerar a junção polarizada diretamente (existem autores que adotam 0,6 V).

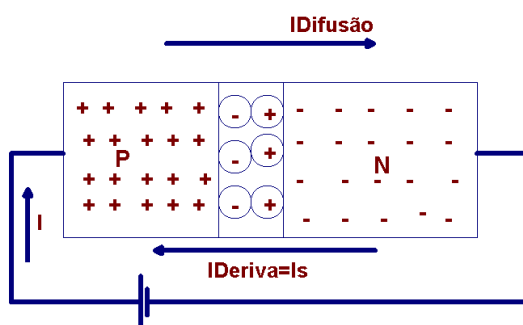


Figura 1.12: Junção PN com polarização direta

Observe que a corrente total através da junção (I) será constituída de duas componentes, a corrente de saturação mais a corrente de difusão, sendo que a de difusão é muito maior que a de saturação. Desta forma:

$$I = I_D - I_S$$

A equação da corrente através da junção é dada por:

$$I = I_S \cdot (e^{\frac{V_D}{\eta \cdot V_T}} - 1) \quad (\text{equação 1})$$

Na equação 1

I_S é a corrente reversa de saturação,

V_D é a tensão aplicada na junção,

V_T é uma constante que depende da temperatura valendo 26 mV na temperatura ambiente ($T=300$ Kelvin).

I será positiva caso o diodo esteja polarizado diretamente ($V_D > 0$) e negativo com o diodo polarizado reversamente ($V_D < 0$).

1.5 Diodo de Junção

Um diodo é um componente que é essencialmente uma junção PN onde foram colocados terminais, tendo todas as suas características, portanto deixará que a corrente passe somente em um único sentido quando adequadamente polarizado (**polarização direta**), bloqueando a corrente quando a polaridade da tensão inverter (**polarização reversa**), funciona como uma válvula.

A Figura 1.13 mostra o diodo com a indicação dos dois terminais, anodo (A) e catodo (K), o símbolo, e o diodo em polarização direta e polarização reversa bem como aspecto físico de diodos comerciais.

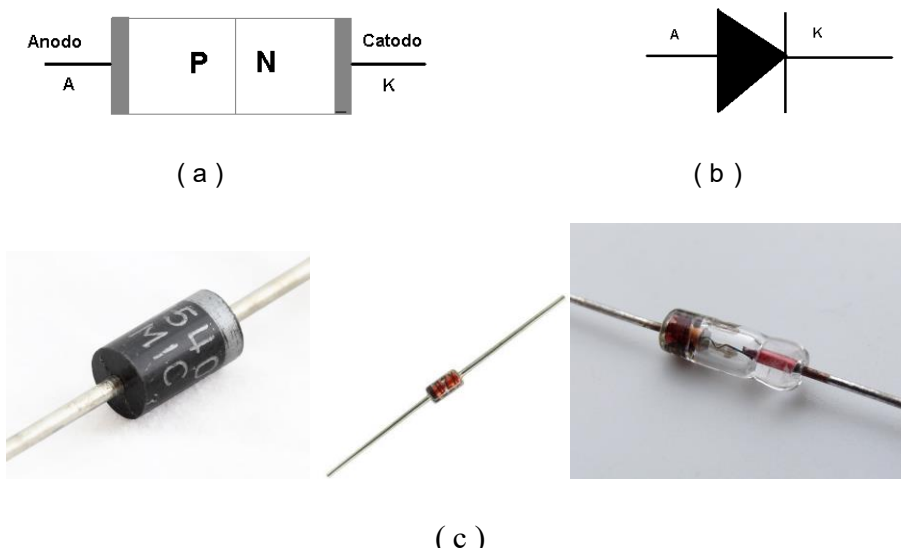


Figura 1.13: (a) Junção com terminais ôhmicos (b) símbolo do diodo de junção (c) imagens de diodos

Existem diferentes tipos de diodos para diversas aplicações:

- Diodo para retificação (de potencia ou não);
- Diodo rápido - Schottky (para uso em circuitos de chaveamento);
- Diodo de proteção – TVS (*Transient Voltage Supression* – Diodo de Supressão de Tensão Transiente);
- Diodo para regulagem ou limitação de tensão (Zener);
- Diodo emissor de luz - LED (*Light Emitting Diode* – Diodo de Emissão de Luz);
- Diodo sensor de luz (fotodiodo) e outros de aplicações mais específicas, mas todos tem uma característica em comum que é a junção PN.

1.5.1 Curva característica do diodo

É o gráfico da corrente no diodo, I_D , em função da tensão no diodo, V_D , a figura 1.14 mostra a curva de um diodo de junção para o caso de diodo de silício (Si). Observar que é essencialmente a curva da junção PN.

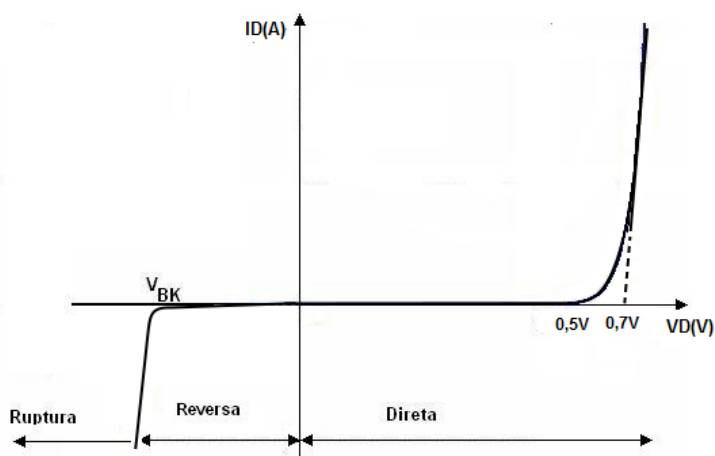


Figura 1.14: Curva característica de um diodo de Si - [ArquivoMCP1](#)

No gráfico da figura 1.14 aparecem 3 regiões bem definidas

1. Região de polarização direta: $v_d > 0$:
2. Região de polarização reversa: $v_d < 0$
3. Região de ruptura: $v_d < -V_{BK}$

Em polarização direta a expressão matemática é:

$$I = I_S \cdot (e^{\frac{V_D}{\eta \cdot V_T}} - 1)$$

Onde I_S é a corrente reversa de saturação, η é uma constante que depende da forma como a junção foi construída, V_T é uma constante que depende da temperatura valendo aproximadamente 26 mV a 20° C e V_D é a tensão aplicada na junção.

Portanto na equação para $V_D > 0$ e $V_D \gg 26$ mV e considerando $\eta = 1$ o termo negativo dentro do parêntese é desprezado e a expressão resulta $I = I_S \cdot (e^{\frac{V_D}{V_T}})$

Para $V_D < 0$ e algumas vezes maior do que 26 mV a expressão de I será aproximadamente igual a $-I_S$

$V_D < V_{BK}$ = tensão de ruptura (*Breakdown*) ocorre a ruptura da junção e o diodo será destruído por efeito joule.

Em alguns casos o diodo é construído especialmente para operar nessa região, é o caso do Diodo Zener.

1.5.2 Diodo polarizado diretamente

Para o diodo conduzir, mesmo em polarização direta, é necessário que a tensão da bateria seja de pelo menos 0,7 V (para vencer a barreira de potencial). Em condução um diodo apresenta uma queda de tensão de aproximadamente 0,7 V (diodo de Si). No circuito da figura 1.15 a corrente no circuito é de aproximadamente 11,3 mA, isto é, por análise de circuito pode-se estimar a corrente no circuito, basta escrever a equação da malha:

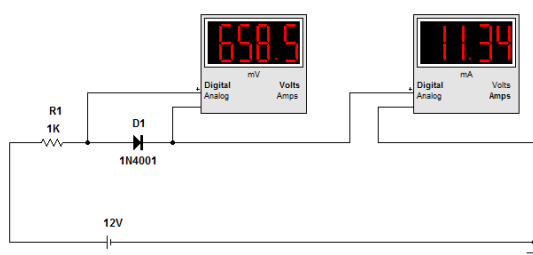


Figura 1.15: Circuito com o diodo polarizado diretamente - [ArquivoMCP2](#)

Equação da malha: $12 = R1 \cdot I + 0,7$ daí obtém-se que

$$I = \frac{12 - 0,7}{1K} = 11,3mA$$

Obs: Para efeito de calculo podemos considerar que a queda de tensão, quando polarizado diretamente, é 0,7V

1.5.3 Diodo polarizado reversamente

Com polarização reversa a corrente no diodo será muito baixa (da ordem de nA para diodos de Si), de forma que do ponto de vista prático será zero. Esta corrente reversa também chamada de corrente de fuga só depende de aspectos construtivos (dopagem), da temperatura (dobro de valor para cada 10 graus de aumento na temperatura) e dimensões do diodo. Observe que quando polarizado reversamente toda a tensão da fonte cairá entre os terminais do diodo, figura 1.16a, que deverá ter capacidade para

suportar essa tensão reversa, caso contrário pode ocorrer um fenômeno chamado de avalanche o que pode levar à destruição do diodo.

A corrente de fuga é a soma da corrente reversa de saturação (I_s) com a corrente superficial.

A corrente de saturação só depende da dopagem do semicondutor e da temperatura e a corrente superficial depende das dimensões físicas do diodo, variando com a tensão aplicada. Como a corrente é muito baixa, o diodo pode ser considerado uma chave aberta, Figura 1.16b.

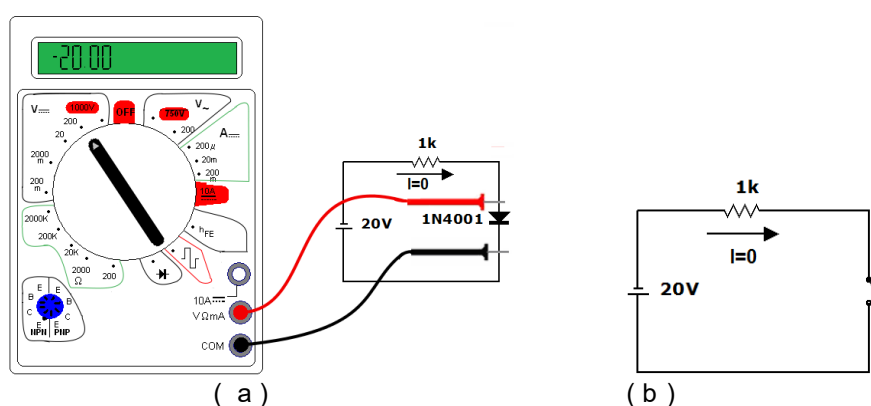


Figura 1.16: Circuito com o diodo polarizado reversamente [ArquivoMCP3](#)

O diodo é o equivalente de uma válvula de retenção, Figura 1.7, que é um dispositivo mecânico que permite o fluxo de um gás ou líquido em um sentido somente quando a pressão é maior que um mínimo, bloqueando o fluxo no sentido contrário.

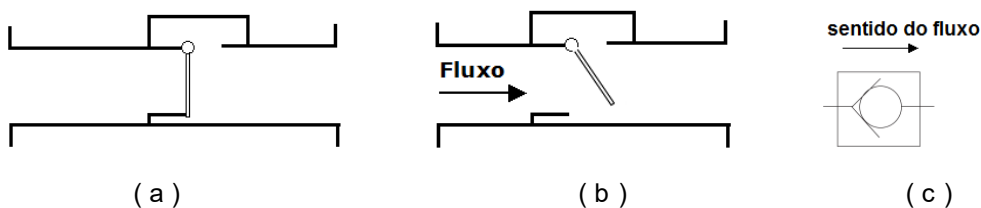


Figura 1.17: Válvula de retenção (a) aspecto físico – fechada (b) aspecto físico – aberta (c) simbologia

1.5.4 Modelos para o diodo

Modelar um dispositivo eletrônico é usar componentes básicos tais como resistências, fontes de tensão, fontes de corrente e capacitâncias para representá-lo, permitindo desta forma que possamos usar as leis de circuito para estudá-lo. O construtor de um simulador modela um componente eletrônico a partir das informações fornecidas pelo fabricante do componente, desta forma ao simular um circuito os resultados serão semelhantes aos obtidos em um circuito real.

Se você estudou o curso de Eletricidade Básica compreenderá melhor esse conceito. A Figura 1.18a mostra uma bateria ligada a uma lâmpada. Não é possível calcular a corrente no circuito assim representado, é necessário substituir pelo circuito equivalente ou modelo, Figura 1.18b. Agora sim é possível usar leis de circuito para o cálculo da corrente.

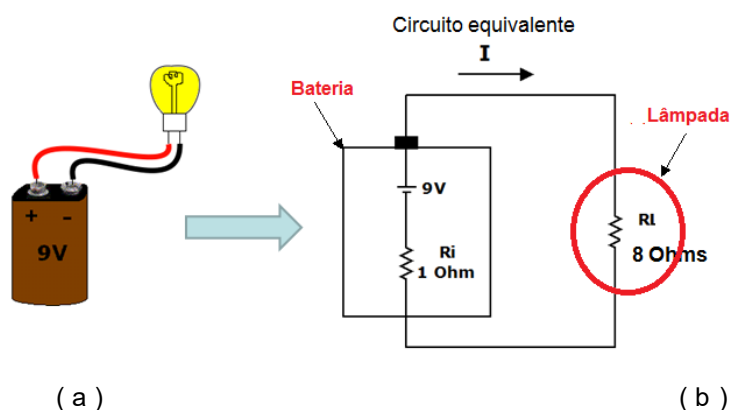


Figura 1.18 - (a) Circuito a ser modelado (b) circuito equivalente da bateria e lâmpada

1.5.4.1 Modelo 1 - Diodo Ideal

O modelo mais simples do diodo considera-o como sendo uma chave que é controlada pela tensão aplicada no diodo. Se a tensão é positiva a chave fecha, se é negativa a chave abre. O diodo se comporta de forma ideal.

A figura 1.19 mostra a curva característica para esse modelo.

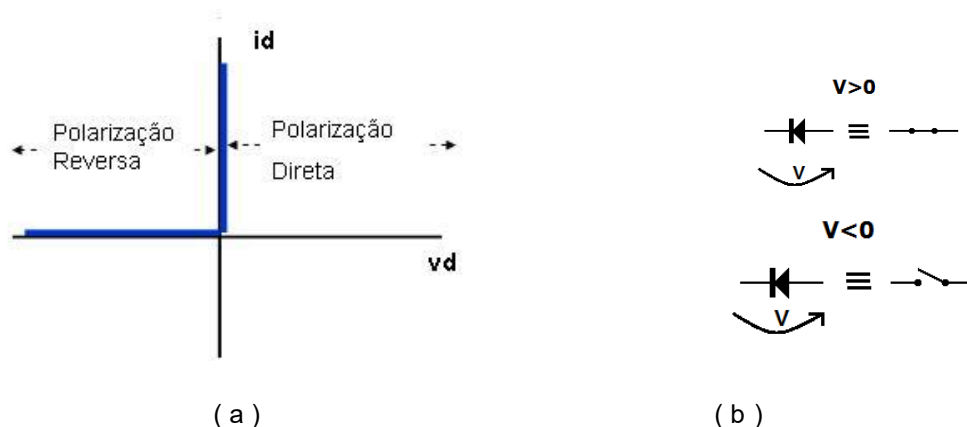


Figura 1.19: (a) Curva característica do diodo ideal (b) equivalência com chave

A Figura 1.20 mostra dois circuitos, com diodo e com a chave fechada representando o diodo. Como pode ser notado, existe uma diferença entre as duas medidas, mas o erro pode ser desprezado. O modelo é adequado.

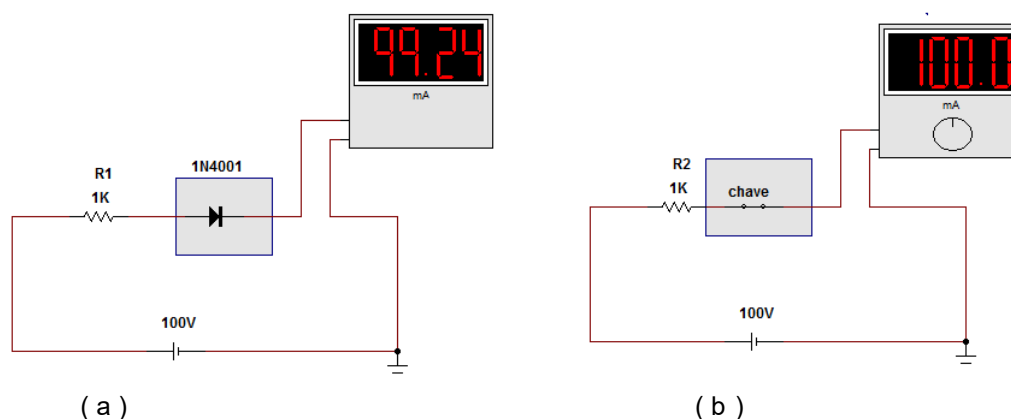


Figura 1.20: (a) Circuito com diodo (b) circuito com o modelo simplificado (chave fechada) – [ArquivoEletronicaMCP4.CIR](#)

A pergunta que fica é: Podemos usar esse modelo sempre? Vamos respondê-la considerando outro exemplo. Considere que a bateria do circuito da figura 1.20 muda de valor, passando a valer 1,5 V. Resulta o circuito da figura 1.21 com as indicações das medidas.

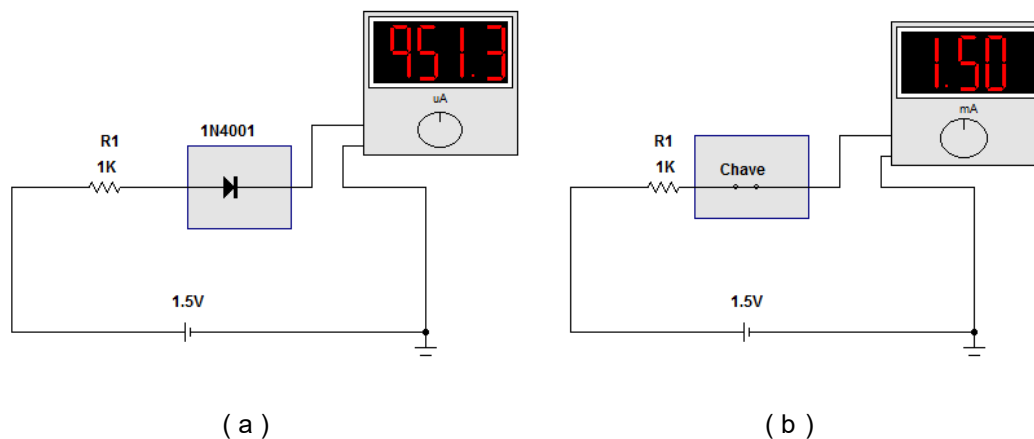


Figura 1.21: (a) Circuito com diodo (b) circuito com o modelo simplificado é inadequado
[ArquivoEletronicaMCP5.CIR](#)

Observe que neste caso o erro entre as duas correntes é alto (66%), neste caso não podemos mais usar o modelo da chave fechada para representar o diodo, devemos melhorar o modelo.

1.5.4.2 Modelo 2 - Bateria

O modelo ideal pode ser melhorado considerando-se que ao conduzir o diodo pode ser substituído por uma bateria de 0,6 V ou 0,7 V (alguns autores adotam 0,6 V e outros 0,7 V).

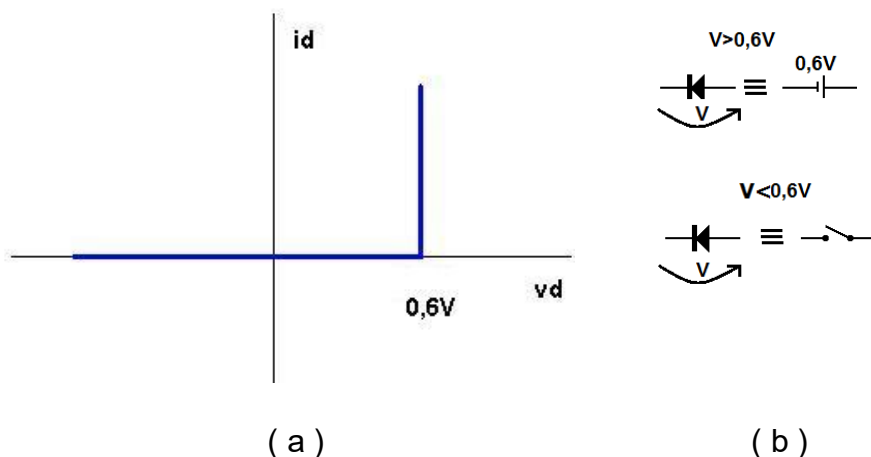


Figura 1.22: Curva para modelo com bateria (b) circuito com o modelo com bateria

Se a tensão aplicada no diodo for maior que 0,6 V o diodo será substituído por uma bateria de 0,6 V. Para uma tensão menor que 0,6 V o diodo será um circuito aberto.

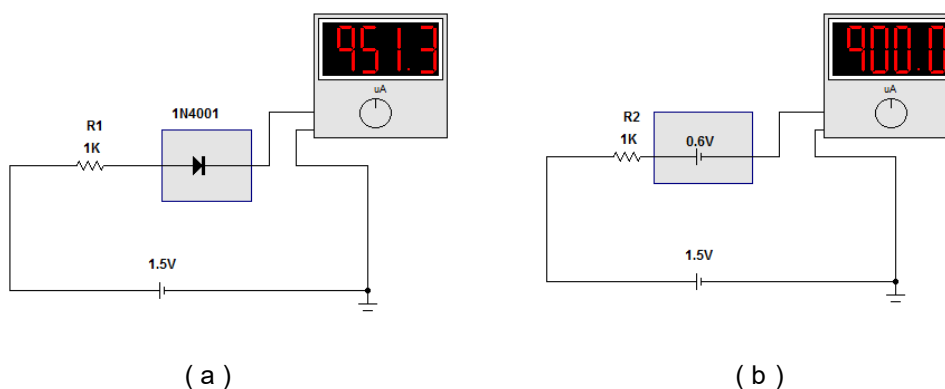


Figura 1.23: (a) Circuito com diodo (b) circuito com o modelo com bateria – [ArquivoEletronicaMCP6](#)

Os valores medidos no circuito com o diodo e no circuito equivalente diferem em menos de 10%.

1.5.4.3 Modelo 3 - Bateria e Resistência

O modelo que considera a resistência (inclinação da curva) é o mais completo dos três aqui apresentados. A figura 1.24 mostra a curva característica linearizada por dois trechos de reta (com mais trechos a precisão será maior, mas o modelo mais complexo). Neste caso o diodo é substituído pela bateria de 0,6 V em série com uma resistência cujo valor depende da inclinação da curva no trecho linearizado. O erro depende do ponto de operação. Observe que existem trechos onde a curva coincide com os trechos de reta, neste caso o erro é nulo. Existem trechos onde o erro é maior, observe o gráfico da figura 1.24, é onde a curva não coincide com a reta, onde a corrente é baixa.

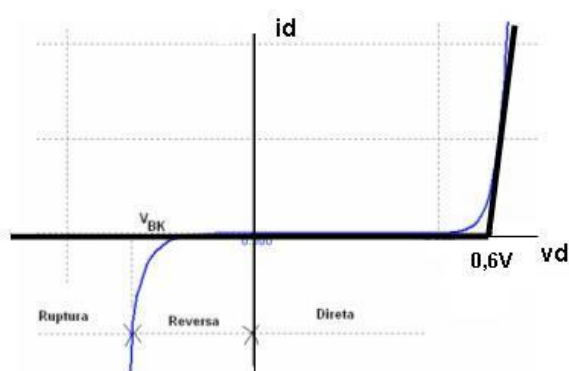


Figura 1.24: Linearização da curva característica

A figura 1.25 mostra o modelo com bateria e resistência na polarização direta. Observe que os valores da corrente no circuito com diodo e no modelo são praticamente os mesmos tanto no caso onde a bateria externa é 1,5 V ou 15 V.

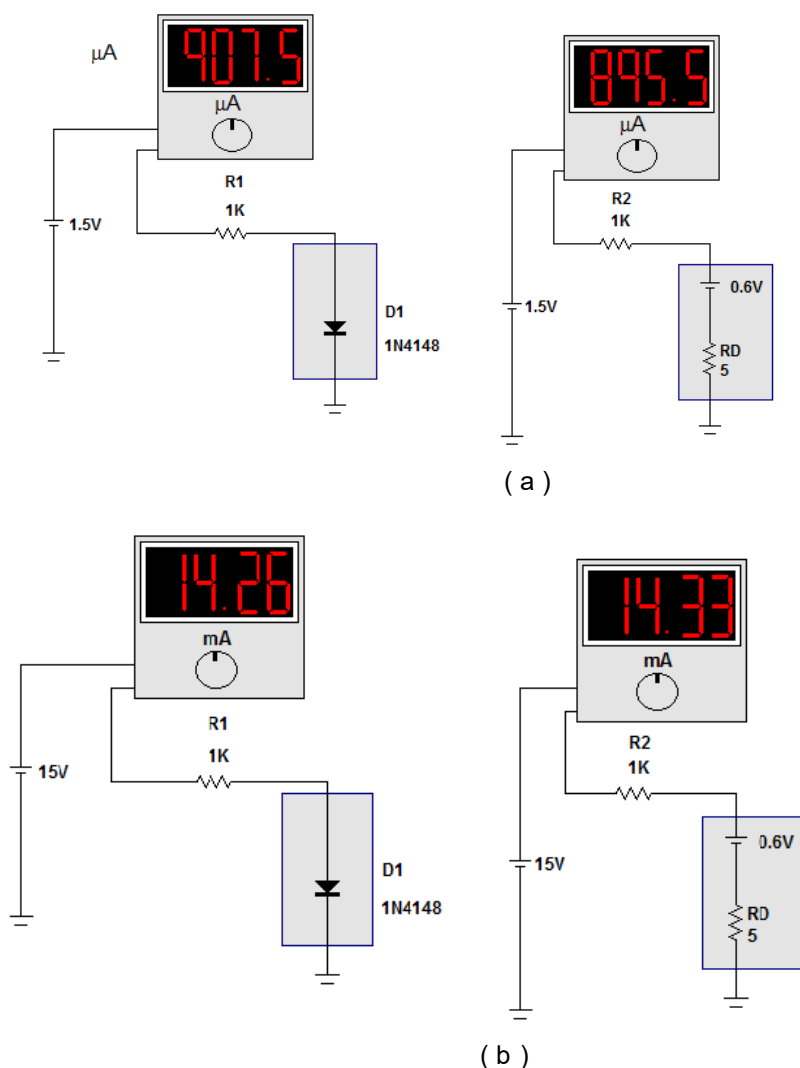


Figura 1.25: Modelo 3 (a) Bateria externa de 1,5 V (b) Bateria externa de 15 V [ArquivoletronicaMCP7](#)

Observar que os resultados são muito próximos, desta forma o modelo a ser adotado depende dos valores da bateria externa e da resistência do circuito. Se a tensão da fonte for muito maior do que 0,6 V pode-se usar o modelo simplificado, caso contrario deve ser usado o penúltimo ou o ultimo modelo.

Observação: Na pratica o ultimo modelo é difícil de ser usado porque não é conhecido com precisão o valor da resistência.

1.5.5 Testando o diodo

O teste de semicondutores é baseado no fato de que sob polarização direta uma junção PN (lado P positivo em relação ao lado N) apresenta baixa resistência (por exemplo, 10 Ohms) e sob polarização reversa terá resistência alta (Maior que 1 Megaohm). O teste

pode ser feito com o diodo no circuito ou não, preferivelmente fora do circuito. Quando no circuito, desligar a alimentação e um dos terminais do diodo.

1.5.5.1 Testando o diodo com multímetro digital

Na chave seletora de funções selecione onde aparece o símbolo do diodo, em seguida ligue o diodo conforme a figura 1.26a. Se o diodo estiver em bom estado, e o terminal positivo (vermelho) do multímetro estiver do lado do anodo o *display* dará uma indicação de uma tensão de 600 mV a 700 mV. Com a inversão das pontas a indicação será de circuito aberto, a indicação é um símbolo como o indicado no *display* na figura 126b.

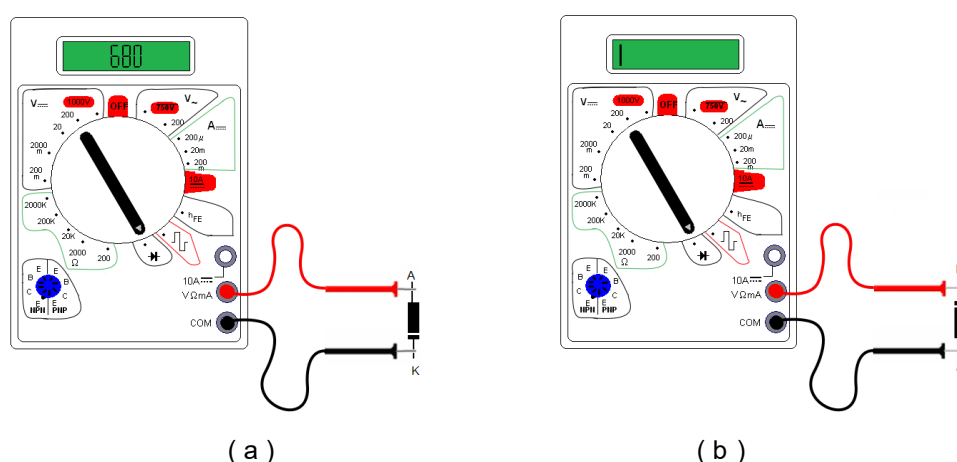


Figura 1.26 - Teste com multímetro digital: (a) diodo polarizado diretamente (b) diodo polarizado reversamente

O que acontece se o diodo estiver em curto? A figura 1.27 mostra o diodo indicando a mesma condição quando em curto circuito.

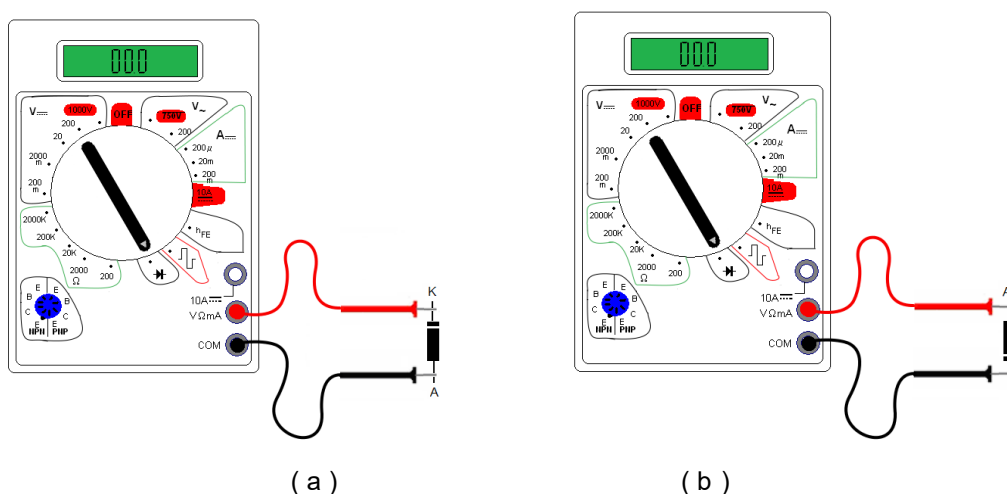


Figura 1.27: Teste com multímetro digital – diodo em curto circuito

Observação: Existem multímetros que dão uma indicação sonora quanto os terminais das pontas de prova estão em curto circuito.

O que acontece se o diodo estiver em aberto? A figura 1.28 mostra o diodo aberto sendo testado pelo multímetro digital.

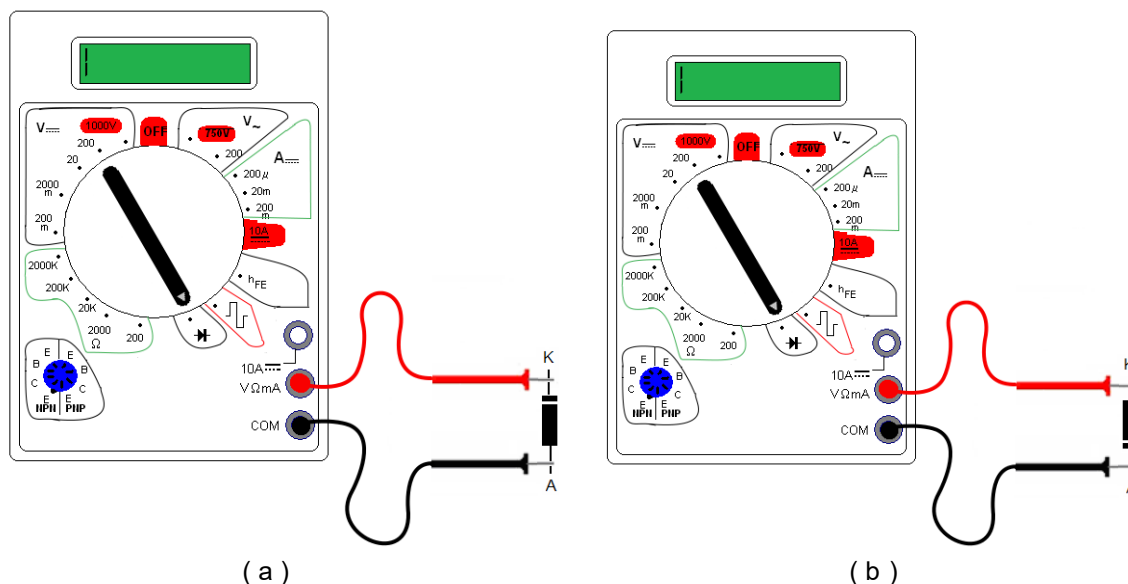


Figura 1.28: Teste com multímetro digital – diodo em aberto

1.5.5.2 Testando o diodo com um multímetro analógico

Os mesmos testes feitos com multímetro digital podem ser feitos com o multímetro analógico. Lembrando que é usado o ohmímetro para efetuar esses testes e que a polaridade da bateria interna é contrária a polaridade nos bornes de saída, figura 1.29.

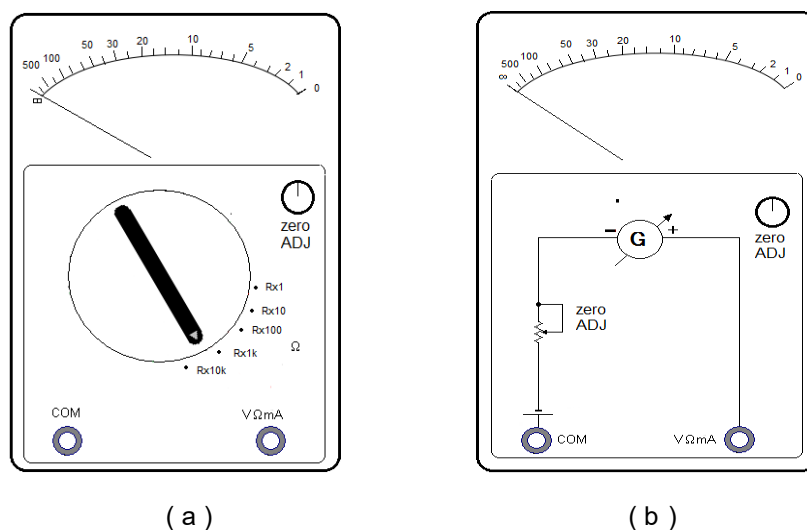


Figura 1.29 - (a) Multímetro analógico (b) circuito equivalente interno ohmímetro

Para medir a resistência direta (polarização direta) ligue o diodo ao multímetro como na figura 1.30a, na escala de Rx1. Para medir a polarização reversa, coloque o multímetro em Rx10k conforme figura 1.30b.

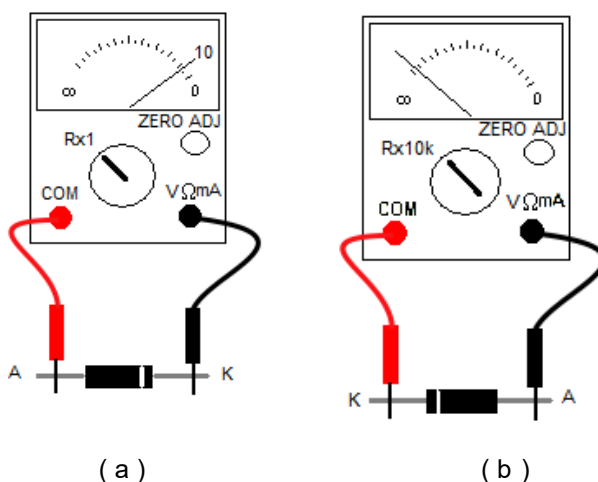


Figura 1.30 - Teste com multímetro analógico (a) diodo polarizado diretamente (b) diodo polarizado reversamente

Se o diodo estiver em curto circuito com Rx1 selecionado, as indicações serão iguais a zero em um sentido ou no outro, figura 1.31.

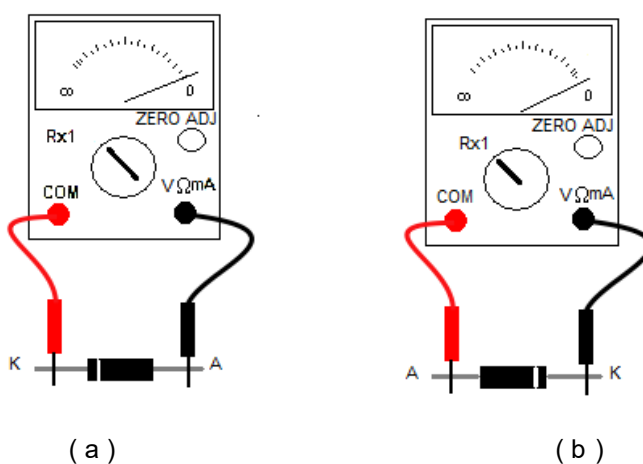


Figura 1.31 - Testando diodo em curto circuito com multímetro analógico

Se o diodo estiver em aberto com Rx10k selecionado, as indicações serão iguais a infinito em um sentido ou no outro, figura 1.32.

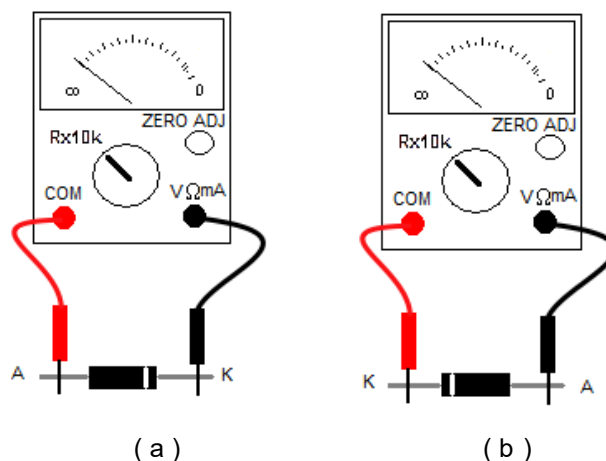


Figura 1.32 - Testando diodo em aberto com multímetro analógico

1.5.6 O Diodo emissor de luz

O diodo emissor de luz ou LED (*Light-Emitting Diode* – Diodo Emissor de Luz) é essencialmente uma junção PN na qual existe uma abertura pela qual é emitida radiação luminosa quando a junção é polarizada diretamente. A radiação pode ser visível (vermelho, amarelo, verde, azul) ou invisível (Infra-vermelho).

Existem LEDs de diversos tamanhos e LEDs usados para iluminação substituindo lâmpadas incandescentes. Originalmente eram usados em *displays*, como indicadores de ligado/desligado. Hoje não mais usados em displays devido ao alto consumo de corrente, mas continuam a ser usados para sinalização e até para substituir lâmpadas incandescentes. A figura 1.33 mostra o símbolo (parecido com o do diodo) e aspecto físico.

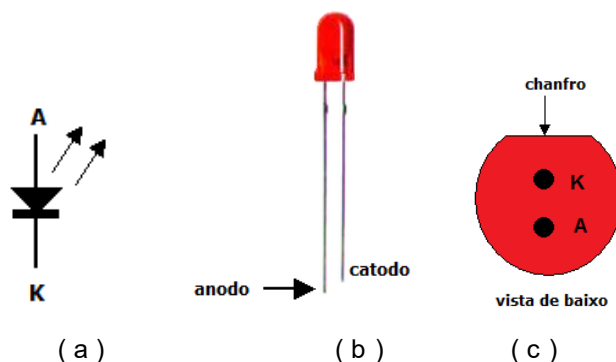


Figura 1.33 - LED (a) símbolo (b) aspecto físico (c) vista de baixo

Para funcionar adequadamente e acender, O LED deve ser polarizado de forma a tornar o anodo positivo em relação ao catodo, exatamente como no diodo comum. O valor da corrente é uma especificação do fabricante, *data sheet*, mas em geral a corrente no LED varia de 10 mA a 30 mA, de acordo com o tamanho do LED.

A figura 1.34 mostra a forma mais simples de polarizar um LED usando uma resistência em série para limitar a corrente. A tensão entre os terminais do LED pode variar de 1 V a 2 V dependendo da cor e do tamanho do LED.

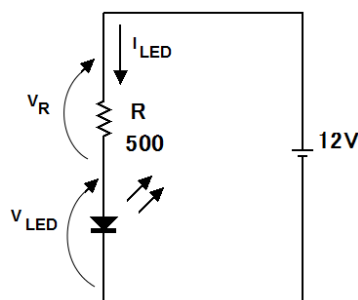


Figura 1.34 - Polarizando o LED diretamente (acendendo) [ArquivoEletronicaMCP8](#)

Exemplo1:

Calcule a corrente no circuito da figura 1.34 supondo que a tensão no LED é 2 V.

Solução: De acordo com a segunda lei de Kirchhoff vale:

$$U_R = 12 - 2 = 10 \text{ V}$$

Portanto a corrente na resistência que é a mesma no LED vale:

$$I = \frac{10\text{V}}{500\Omega} = 0,02\text{A} = 20 \text{ mA}$$

Exemplo2:

Calcular a resistência para polarizar um LED com 15 mA sabendo-se que a tensão no LED é 1,5 V e a alimentação é de 24 V. Desenhe o circuito indicando os valores dados.

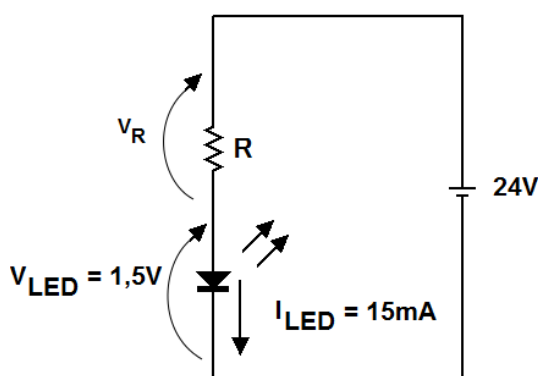


Figura 1.35 - Circuito para calcular resistência de polarização do LED

Por observação é efetuada uma análise do circuito. Por exemplo, a tensão na resistência R vale $V_R = 24 - 1,5 = 22,5 \text{ V}$ e como a corrente na resistência vale 15 mA, pois está em série com o LED, então o valor de R pode ser calculado por:

$$R = \frac{22,5 \text{ V}}{15 \text{ mA}} = 1,5 \text{ k}$$

Devendo poder dissipar

$$P_D = \frac{(22,5)^2}{1,5 \text{ k}} = 337,5 \text{ mW}$$

Devendo-se usar um resistor de 0,5 W

1.5.6.1 Testando o LED

O LED deve ser testado exatamente como um diodo comum, pois é essencialmente uma junção PN também, a diferença é que, quando polarizado diretamente acende. Use a escala de maior corrente (Rx1 ou Rx10) para polarizar diretamente o LED. Se o LED estiver normal o LED acende quando polarizado diretamente e apaga quando polarizado reversamente

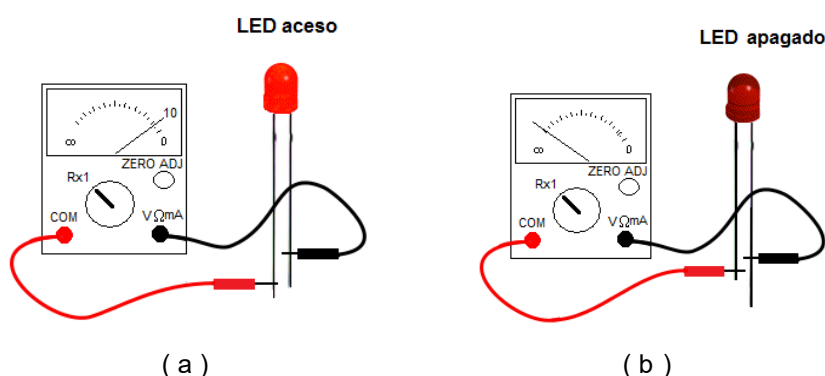


Figura 1.36 - Testando o LED com multímetro analógico (a) polarizado diretamente (b) polarizado reversamente

1.5.7 O Diodo Zener

Diodos Zener ou diodos de referencia são diodos de junção PN com características específicas em relação ao diodo comum. São construídos para operar na região de ruptura. Em polarização direta o Zener se comporta como um diodo comum e em polarização reversa e na região de ruptura opera como regulador de tensão. A figura 1.37 mostra as regiões de operação do Zener, símbolo e aspecto físico.

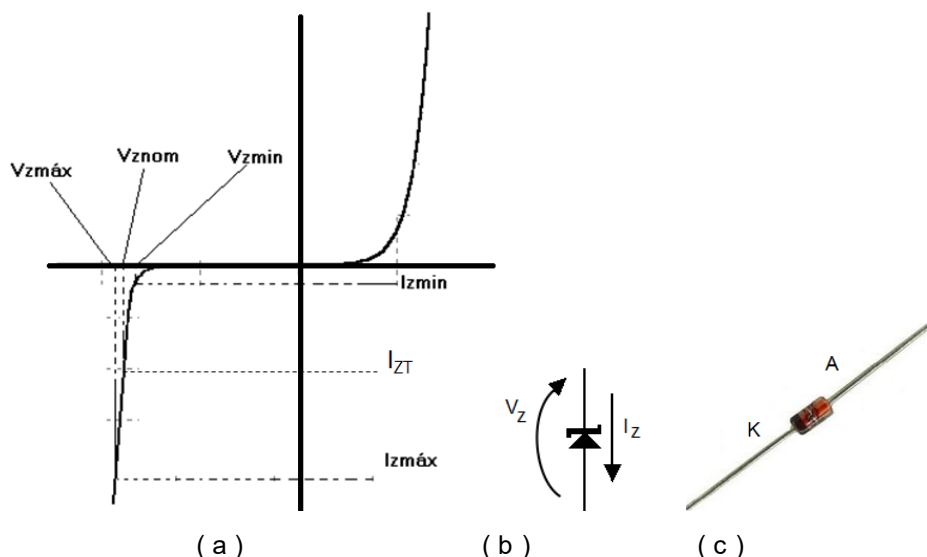


Figura 1.37 - Diodo Zener (a) curva característica (b) símbolo (c) aspecto físico

Os principais valores elétricos de interesse são:

V_{Znom} é tensão Zener nominal especificada pelo fabricante. A corrente correspondente é chamada I_{ZT} (corrente de teste).

V_{Zmin} também chamada de V_{Zk} (tensão de joelho) é a menor tensão de regulação. A corrente correspondente é a mínima corrente que mantém o Zener regulando, I_{Zk} (corrente de joelho).

V_{Zmax} é a máxima tensão, que está associada a máxima corrente (I_{Zmax}) permitida sem que o componente seja destruído.

As principais especificações na hora de comprar um Zener são a potência máxima e tensão nominal. Por exemplo, você pode encontrar um Zener de 5,6V/0,25W ou 5,6V/0,5W e assim por diante.

A potência e a máxima corrente máxima estão relacionados por:

$$P_{m\acute{a}x} = V_{nom} \times I_{Zm\acute{a}x}$$

O valor de I_{Zmin} costuma ser uma fração de $I_{Zm\acute{a}x}$, por exemplo $I_{Zmin} = \frac{I_{Zm\acute{a}x}}{10}$

1.5.7.1 Modelos do Zener

Para analisar os circuitos com Zener podem ser usados ou o modelo ideal ou o modelo que considera a resistência do Zener .

Modelo ideal

Neste caso considera-se que a resistência do Zener é nula e portanto o gráfico desce verticalmente, figura 1.38. O Zener é um receptor ativo (bateria recebendo carga).

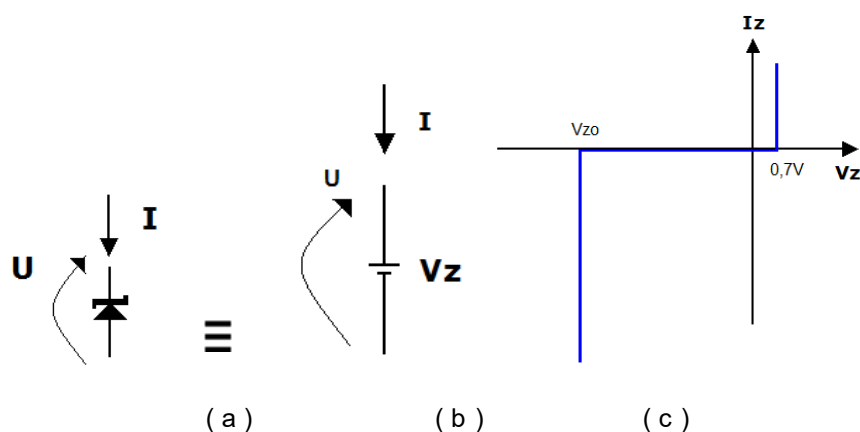


Figura 1.38 - Modelo ideal para o Zener (a) Zener é bateria ideal (b) curva característica

Em polarização reversa o Zener se comporta como uma bateria de valor V_{Z0} , que é o mesmo valor da tensão nominal V_{Znom} , neste caso. Em polarização direta o Zener se comporta como um diodo comum e com uma bateria de 0,7 V com polaridade contrária a da figura 1.38b.

Modelo com resistência

Neste caso é considerada a resistência do Zener, r_z , cujo valor é determinado pela inclinação da curva da figura 1.39c.

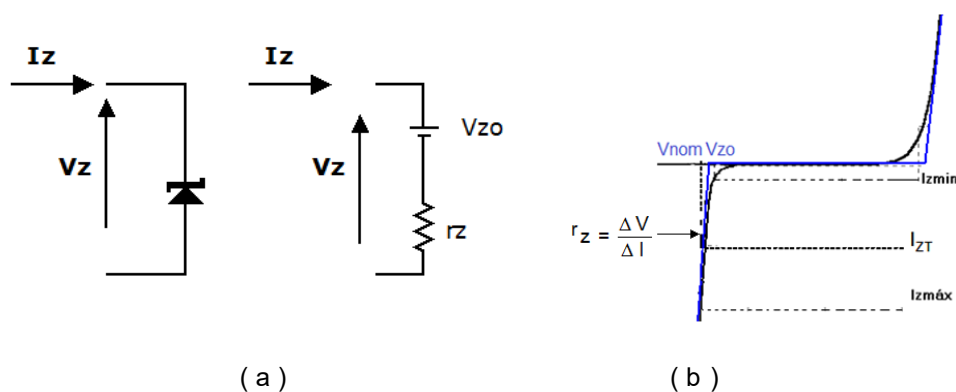


Figura 1.39 – (a) Modelo do Zener com resistência (b) curva característica

Na figura 1.39b a equação da tensão nos terminais do Zener é:

$$V_Z = V_{Z0} + r_z \cdot I_Z$$

V_{Z0} é a tensão em vazio ($I_Z=0$) e r_z a resistência incremental do Zener. Claramente, a tensão nos terminais do Zener aumenta quando a corrente aumenta.

Polarizando o Zener

A figura 1.40 mostra a polarização de um Zener de 5,6 V de tensão nominal, para dois valores de fonte de alimentação, 12 V e 15 V. Se a corrente através do Zener estiver entre um valor mínimo (I_{Zmin}) e um valor máximo (I_{Zmax}) a tensão nos terminais do Zener será aproximadamente constante. No exemplo é um Zener 1N752 de 5,6 V de tensão nominal.

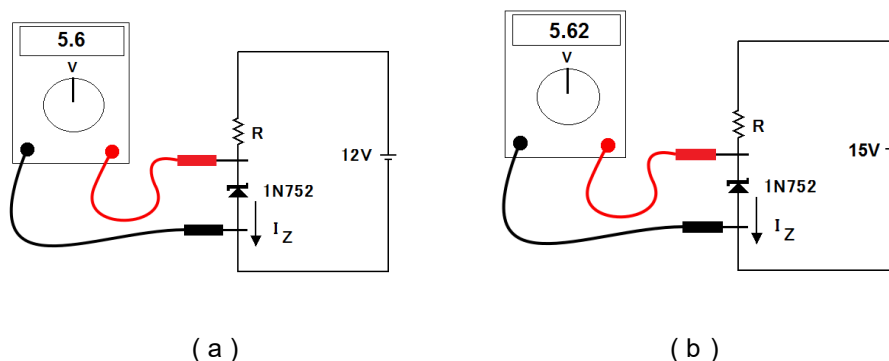


Figura 1.40 - Zener polarizado com diferentes tensões de polarização [ArquivoEletronicaMCP9](#)

Exemplo3:

Dimensionar os limites para R na figura 1.40a se o Zener tem as especificações 5,6V/0,5W. Considerar que a fonte de alimentação é 12 V. Considerar modelo ideal.

Solução: De acordo com $P_{m\acute{a}x} = V_{nom} \times I_{Zm\acute{a}x}$

I_{max} pode ser calculada por:

$$I_{max} = \frac{500mW}{5,6V} = 89,3mA$$

O valor mínimo é um décimo do valor máximo, portanto $I_{min} = 8,9 mA$

O circuito é desenhado com o Zener no limite superior de corrente, $I = 89,3 mA$, figura 1.41a.

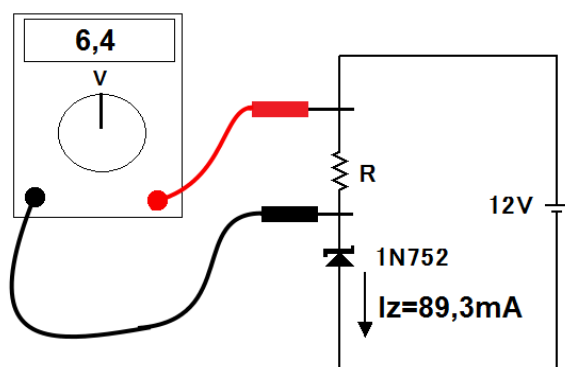


Figura 1.40 – Polarizando o Zener – Dimensionado R para I_{Zmax}

Considerando que o Zener está regulando $V_Z=5,6V$ então $V_R=12 - 5,6= 6,4 V$ e logo:

$$R = \frac{6,4V}{89,3mA} = 71,6\Omega = R_{min}$$

Conclusão: Qualquer valor abaixo de 71,6 Ohms faz a corrente maior que 89,3 mA e queima o Zener.

É desenhado o circuito para calcular o valor máximo permitido de R, isto é, o valor de R não pode ser muito alto senão a corrente no Zener pode cair abaixo de I_{Zmin} e o Zener deixa de regular

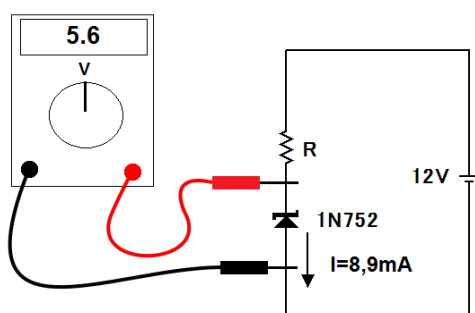


Figura 1.41 - Polarizando o Zener – Dimensionado R para I_{Zmin}

Como o Zener ainda regula $V_Z= 5,6 V$ e portanto $V_R=6,4 V$, logo:

$$R = \frac{6,4V}{8,9mA} = 719\Omega = R_{max}$$

Qualquer valor acima de 719 Ohms faz a corrente menor que 8,8 mA e o Zener deixa de regular.

Conclusão: Os limites de R para que a tensão nos terminais do Zener seja aproximadamente 5,6 V são $R_{max}=719 \text{ Ohms}$ $R_{min}=71,6 \text{ Ohms}$.

Se for adotado o valor de 330 Ohms e o mesmo deve poder dissipar:

$$P = \frac{(6,4)^2}{330} = 0,124W = 124mW$$

Repita o exercício anterior considerando a fonte de alimentação de 15V.

1.5.7.2 Testando o Zener

Existem duas formas de testar um diodo Zener: Usando um ohmímetro ou usando um voltímetro.

Usando um ohmímetro

Como um Zener é basicamente uma junção PN, o teste é semelhante ao usado para testar um diodo comum, isto é, em polarização direta (anodo positivo em relação ao catodo) a resistência medida deve ser baixa enquanto em polarização reversa a resistência deve ser alta.

Usando um voltímetro

Deve ser usado um circuito de forma a polarizar reversamente conforme figura 1.42. Se a corrente através do Zener for suficientemente alta a medida de tensão indicará um valor próximo da tensão Zener. Por exemplo, se o Zener for o 1N752 a indicação deverá ser próxima de 5,6 V.

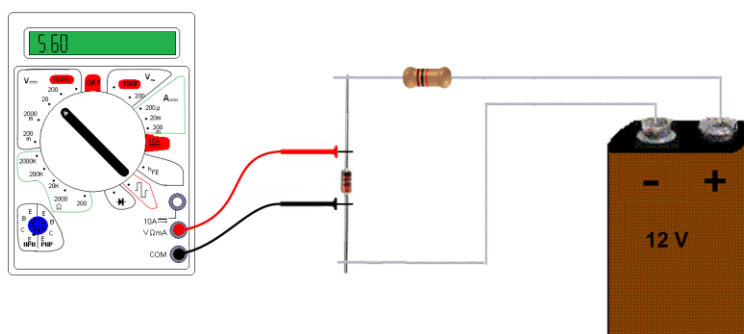


Figura 1.42 - Testando um diodo Zener medindo V_z

1.5.8 Fotodiodo

É um diodo que funciona ao contrario do LED, isto é, ele possui uma janela na junção por onde entra radiação luminosa. Essa energia gera pares elétron - lacuna na região de depleção fazendo aparecer uma corrente cuja intensidade é proporcional à intensidade luminosa. O foto diodo é usado em conjunto com o LED para a transmissão digital de informação através de uma fibra ótica. Em uma ponta o LED acende, o que corresponde a nível alto. Do outro lado um foto diodo detecta essa informação.

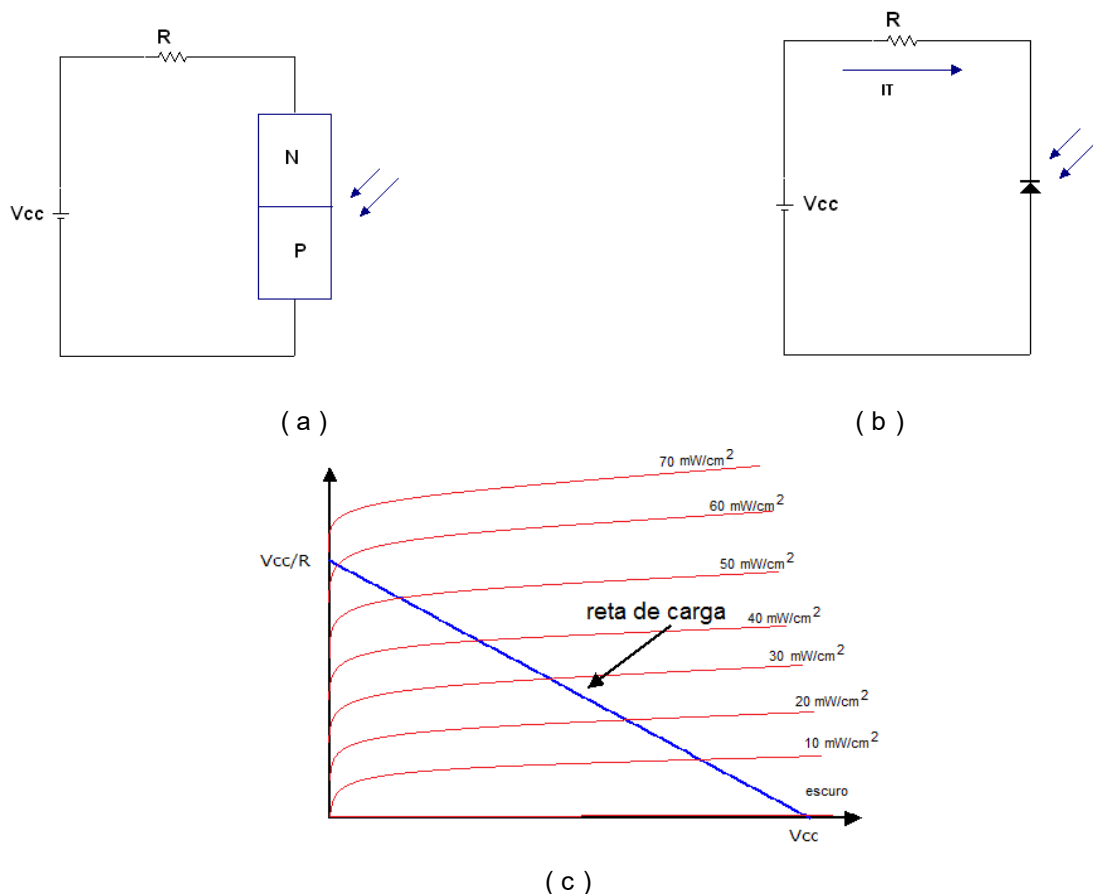


Figura 1.43 - (a) e (b) polarização do fotodiodo (c) Curva característica

Com o dispositivo no escuro, a corrente no diodo será devido aos portadores minoritários gerados termicamente. Com a incidência de luz na junção a corrente aumentará, pois novos portadores de carga serão gerados. A corrente total através da junção será dada por :

$$I_T = I_s + I_{IL} \quad \text{onde}$$

I_s = corrente de fuga devido aos portadores gerados termicamente (corrente no escuro).

I_{IL} = corrente devido à radiação incidente.

O foto diodo tem um pico de resposta para certo comprimento de onda, para o qual se produz o máximo de pares elétron-lacuna. A curva de resposta é máxima ao redor do comprimento de onda de $0,85 \mu\text{m}$ para o fotodiodo de silício.

Um exemplo de fotodiodo é o TIL100, projetado para sistemas de controle remoto por infravermelho (IR), fazendo par com o TIL38 que é um IRED (diodo emissor infravermelho),.

As suas principais características são:

- Corrente no escuro (máx): 50 nA a 10 V
- Corrente no claro (mín.): 10 μ A a 10V
- Potência dissipada: 150 mW

2 Aplicação de diodos

Neste capítulo serão apresentados circuitos com diodos, tais como retificadores, grampeadores, limitadores, multiplicadores e outros.

2.1. Conversor de CA para CC – Fonte de alimentação

A maioria dos circuitos eletrônicos (celulares, videogames, rádios, CLP etc) necessita para o seu bom funcionamento que sejam alimentados com tensão contínua (CC), e como a tensão disponível nas tomadas é alternada (CA), será necessário converter essa tensão CA em tensão CC os circuitos que fazem isso são chamados de conversores de CA para CC, muitas vezes simplesmente fonte de alimentação. A figura 2.1 mostra os blocos constituintes de um conversor CA/CC.

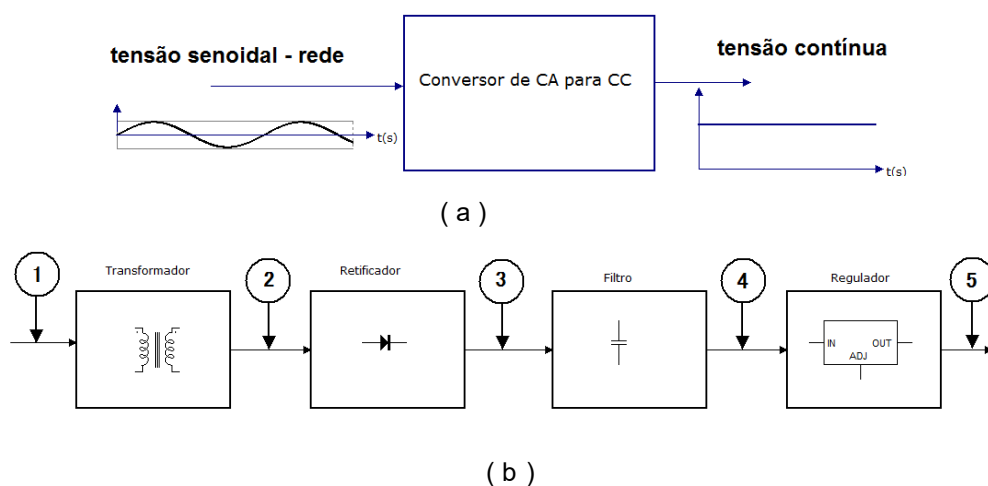


Figura 2.1 – (a) conversor CA/CC (b) conversor CA/CC diagrama de blocos

Na figura 2.1a a saída e entrada dos blocos representam tensões:

Ponto1: Tensão da rede 110 V ou 220V

Ponto 2: Após o transformador, em geral uma tensão menor que a da rede.

Ponto 3: Depois do retificador, é a tensão pulsante retificada.

Ponto 4: Tensão saída do filtro com pequena ondulação (*ripple*).

Ponto 5: Tensão regulada pronta para alimentar circuitos eletrônicos.

Teoricamente a tensão na saída deve ser perfeitamente contínua, mas na prática existe uma ondulação ou *ripple*. Uma medida da eficiência desses circuitos é dada pelo fator de *ripple* (γ) definido como sendo:

$$\gamma\% = \frac{\text{Valor Eficaz da ondulação}}{\text{Valor medio}} \cdot 100$$

Para exemplificar consideremos a forma de onda da figura 2.2 que é uma tensão continua de 8 V na qual foi adicionada uma tensão senoidal de 1V de pico, $v(t) = 8 + 1 \cdot \sin(\omega \cdot t)$.

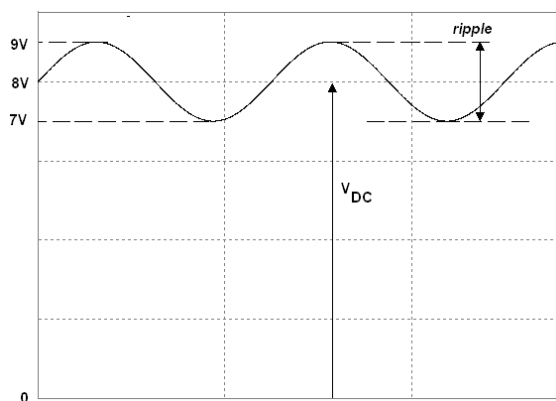


Figura 2.2 – sinal senoidal com adição de offset [ArquivoEletronicaMCP10](#)

Para a forma de onda da figura 2.2 o *ripple* tem 1 V de pico e 0,707 V de valor eficaz e como a tensão media (continua) vale 8 V o fato de *ripple* vale:

$$\gamma\% = \frac{0,707}{8} \cdot 100 = 8,8\%$$

Qual é o limite superior e inferior para o *ripple*? A figura 2.3a mostra uma tensão perfeitamente continua de 8 V. Neste caso o valor médio vale 8 V e o valor eficaz da ondulação vale zero (não existe ondulação!!), portanto o valor do fator de *ripple* vale:

$$\gamma\% = \frac{0}{8} \cdot 100 = 0\%$$

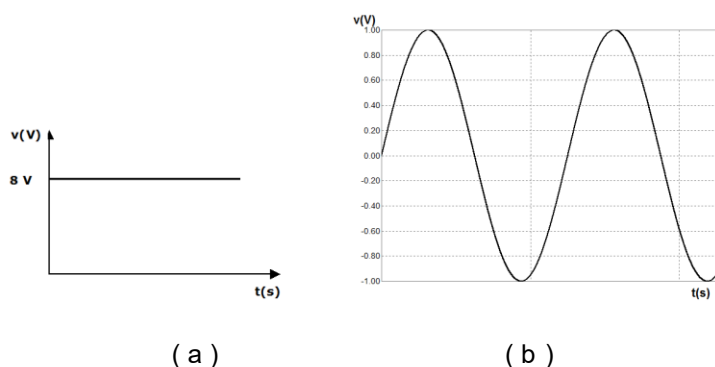


Figura 2.3 – Exemplificado o *ripple* (a) $\gamma\% = 0\%$ (b) $\gamma\% = \text{infinito}$

No outro extremo um sinal puramente senoidal de 1 V de pico, figura 2.3b tem valor médio zero e valor eficaz igual a 0,707 V, portanto o valor do *ripple* é infinito, isto é:

$$\gamma\% = \frac{0,707}{0} \cdot 100 = \text{infinito}$$

Observação: É claro que não é permitido dividir por zero, todos sabemos. O que foi feito foi uma simplificação de calculo, isto é, qualquer numero dividido por um numero muito pequeno resulta em um numero muito grande, se esse numero pequeno tende para zero o resultado tende para infinito.

2.2. Retificador de meia onda

A figura 2.4a mostra o circuito. O secundário de um transformador fornece uma tensão senoidal de valor de pico igual V_{ep} . Considerando o modelo de bateria de 0,7 V, no semi ciclo positivo, o diodo conduz quando $V_e > 0,7V$ e a tensão na carga será igual a $V_e - 0,7 V$. O circuito equivalente é mostrado na figura 2.4b.

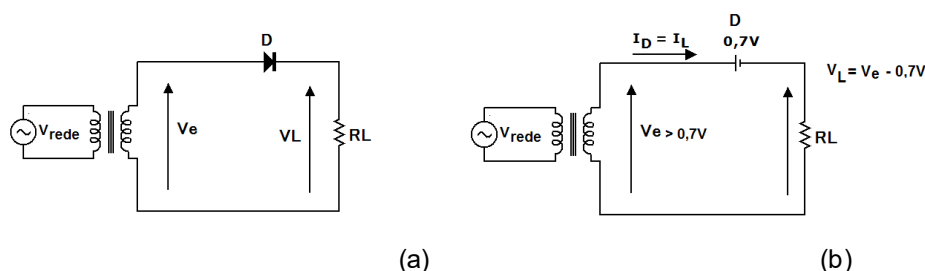


Figura 2.4: retificador de meia onda (a) circuito (b) Circuito equivalente

No semi ciclo negativo o diodo fica polarizado reversamente, figura 2.5, portanto $I_D = I_L = 0$ e $V_L = 0$. A tensão no diodo $V_D = -V_e$. A máxima tensão reversa no diodo é V_{ep} .

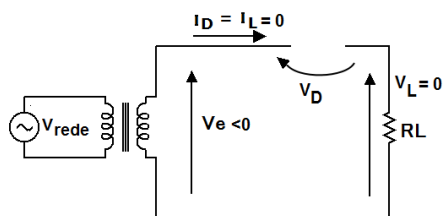


Figura 2.5: retificador de meia onda - diodo polarizado reversamente, $v_e < 0$.

A figura 2.6 mostra as formas de onda das tensões de entrada, diodo e carga. A tensão senoidal de entrada, V_e no exemplo, $20 V_{pico}$ e a tensão na carga, V_L , observando que o valor de pico na carga vale $19,3 V_{pico}$.

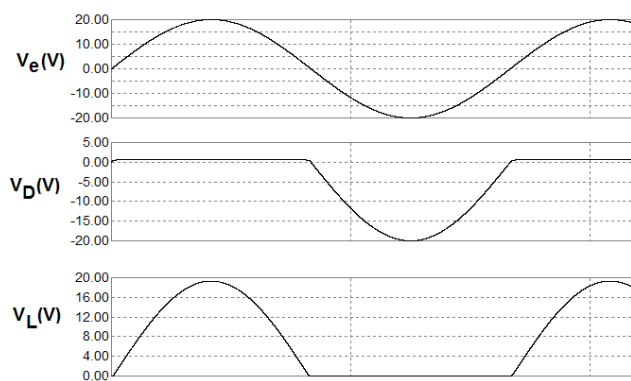


Figura 2.6: Retificador de meia onda – Formas de onda da tensão de entrada (V_e), diodo (V_D) e carga (V_L)

2.2.1. Tensão contínua na carga

Um voltímetro para medir tensão contínua (V_{DC} ou V_{CC}) ligado na carga, figura 2.7a, mede um valor dado por:

$$V_{DC} = \frac{V_{e_{pico}} - 0,7}{\pi}$$

Se a tensão de entrada vale 20 V de pico, o valor da tensão contínua ou tensão média na carga valerá:

$$V_{DC} = \frac{20 - 0,7}{\pi} = 6,14V$$

A figura 2.7 mostra a medida da tensão contínua, V_{CC} , e da corrente contínua, I_{CC} , na carga.

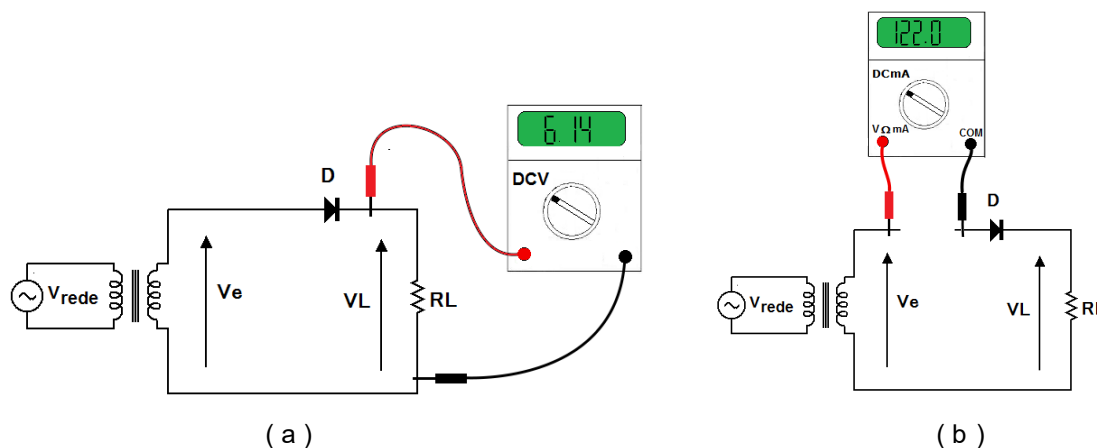


Figura 2.7: Retificador meia onda (a) medida da tensão CC (b) medida da corrente CC na carga e no diodo

[ArquivoEletronicaMCP11](#)

2.2.2. Corrente contínua na carga e no diodo

A corrente contínua na carga, I_{CC} , que é igual a corrente no diodo, é a corrente medida por um amperímetro para CC sendo calculada por:

$$I_{DC} = \frac{V_{DC}}{R_L}$$

Se no circuito da figura 2.7 $R_L=50\ \Omega$ então a corrente média no diodo valerá:

$$I_{DC} = \frac{6,14V}{50\ \Omega} = 0,122A = 122\ \text{mA}$$

Observação: Para esse circuito a corrente no diodo é igual à corrente na carga.

2.2.3. Tensão de pico inversa máxima

É a máxima tensão inversa que o diodo pode ser submetido sem que ocorra destruição do diodo (ruptura da junção). É especificada na folha de dados como V_{RRM} . No retificador de meia onda a máxima tensão reversa que o diodo estará submetido é igual a V_{ep} . Portanto se $V_e=20\ \text{V}$ pico, a máxima tensão a que ele será submetido de forma inversa é $20\ \text{V}$, devendo portanto V_{RRM} ser maior do que $20\ \text{V}$.

A tabela 1 mostra alguns dos dados obtidos de um manual de diodo que podem ser úteis no projeto de uma fonte de alimentação, lembrando que para maiores informações procurar o manual completo.

Tabela 1: Alguns valores limites para um diodo comercial

MAXIMUM RATINGS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Características Elétricas e máximos limites)					
	SYMBOLS	1N4001	1N4002	1N4003	UNITS
Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage (Máxima tensão de pico repetitiva)	V_{RRM}	50	100	200	V
Maximum Average Forward Rectified Current (Máxima corrente média direta)	I_{AV}	1,0			A

Exemplo4:

Qual a indicação dos instrumentos na figura 2.8? Dimensionar o diodo.

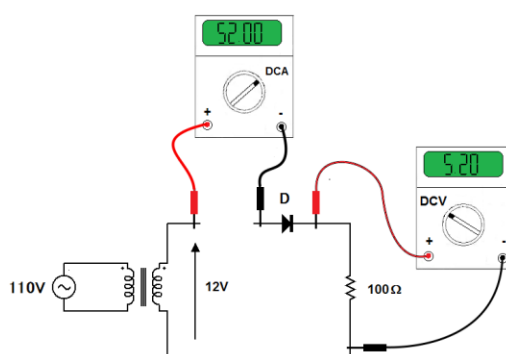


Figura 2.8: Medindo a tensão média (contínua) na carga e a corrente contínua na carga e no diodo

O valor de pico da tensão na entrada é: $V_{ep} = \sqrt{2} \cdot 12V \cong 17V$

Logo o valor médio da tensão indicada pelo voltímetro vale:

$$V_{DC} = \frac{17 - 0,7}{\pi} \cong 5,2V$$

A corrente contínua indicada pelo amperímetro, que é a corrente no diodo e na carga vale:

$$I_{DC} = \frac{5,2V}{100\Omega} \cong 52mA$$

A máxima tensão reversa a que o diodo será submetido será igual a 17 V.

Conclusão: No circuito você deve inserir um diodo que tenha capacidade de corrente contínua maior que 52 mA e tensão reversa maior que 17 V. Qualquer diodo da tabela 1 pode ser usado.

2.3. Retificador de onda completa

Nos circuitos retificadores de onda completa o semi ciclo negativo da tensão de entrada será aproveitado. Existem basicamente dois circuitos de onda completa, o circuito com *Center Tap* e o circuito em ponte.

2.3.1. Retificador de onda completa com tomada central

No circuito com *Center Tap* (tomada central) há necessidade de transformador com tomada central no secundário para providenciar duas tensões, V_{e1} e V_{e2} , defasadas entre si de 180°, figura 2.9.

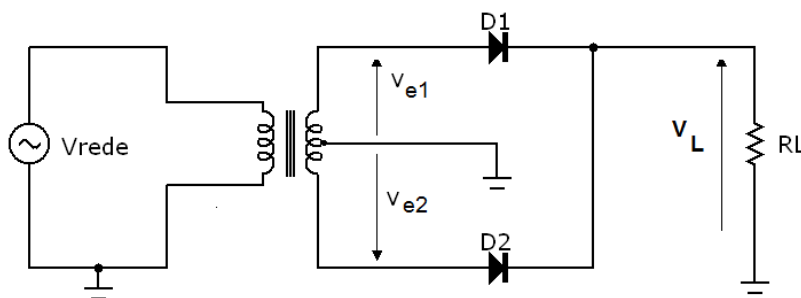


Figura 2.9: Retificador de onda completa com *center tap*

As tensões V_{e1} e V_{e2} têm mesma amplitude, mas defasadas de 180° . No semi ciclo positivo, figura 2.10a, V_{e1} alimenta o circuito e o diodo $D1$ conduz e $D2$ corta. No semi ciclo negativo da tensão de entrada V_{e2} alimenta o circuito fazendo $D2$ conduzir e $D1$ cortar.

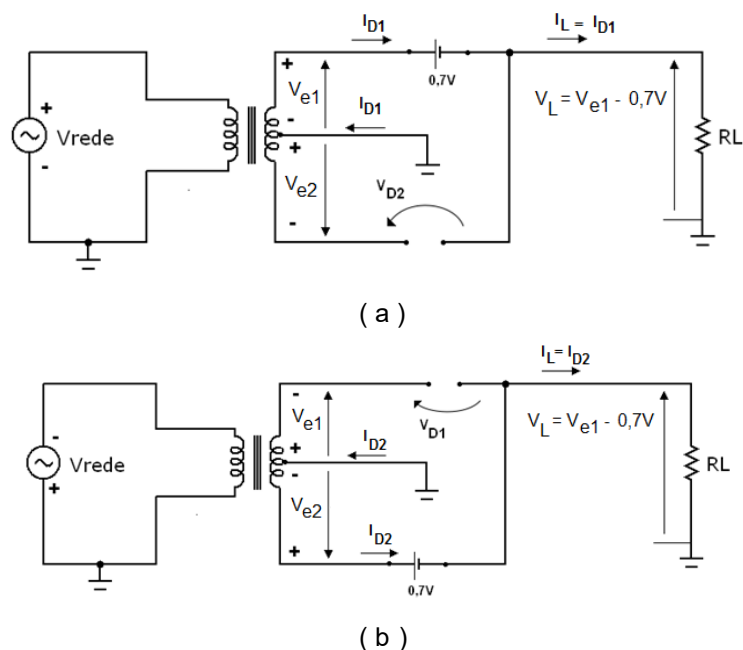


Figura 2.10: Retificador de onda completa com *center tap* (a) semi ciclo positivo (b) semi ciclo negativo

Observar que a corrente na carga é igual a corrente no diodo $D1$ no semi ciclo positivo e no semi ciclo negativo a corrente na carga é mesma que no diodo $D2$. A figura 2.11 mostra as formas de onda das correntes nos diodos e na carga.

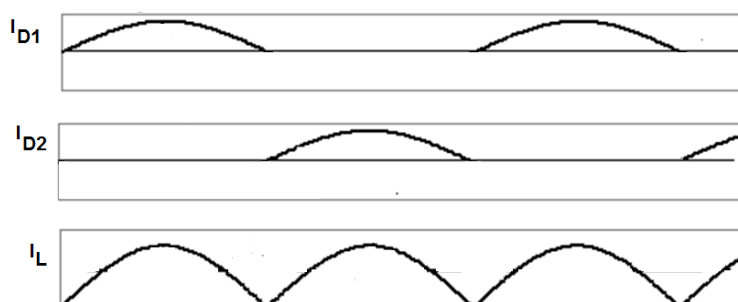


Figura 2.11: Formas de onda das correntes no circuito da figura 2.9

A figura 2.12 mostra as formas de onda das tensões nos secundários (V_{e1} e V_{e2}), tensão nos diodos (V_{D1} e V_{D2}) e tensão na carga (V_L).

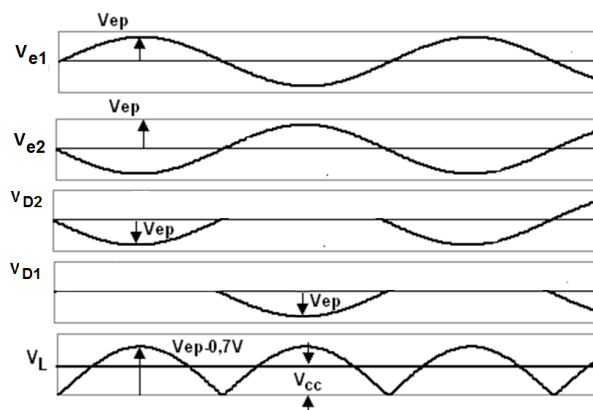


Figura 2.12: Formas de onda das tensões no circuito da figura 2.9

Para medir os valores CC de correntes, na carga e diodo D1, e tensão CC na carga os instrumentos devem ser ligados conforme circuito da figura 2.13. M1 mede a corrente CC (corrente média) por diodo, M2 mede a corrente CC na carga e M3 a tensão CC na carga.

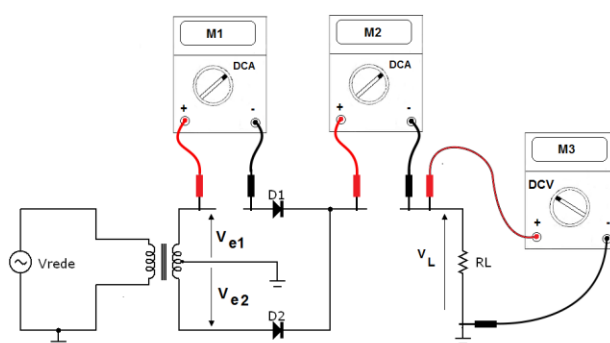


Figura 2.13: Retificador de onda completa com *center tap* – medindo corrente na carga, diodo e tensão na carga

Se V_{ep} é o valor de pico da entrada então a tensão contínua V_{cc} na carga é dada por:

$$V_{DC} = \frac{2.(V_{e \text{ pico}} - 0,7)}{\pi}$$

A corrente contínua na carga vale:

$$I_{DC} = \frac{V_{DC}}{R_L}$$

A corrente contínua por diodo é a metade da corrente na carga:

$$I_{DC} \text{ (diodo)} = \frac{V_{DC}}{2.R_L}$$

A máxima tensão de pico inverso que cada diodo é submetido vale:

$$V_{INV} = 2.V_{ep}$$

Exemplo5:

No circuito da figura 2.13 a tensão secundária é 12V+12V. Se a carga for 50 Ohms qual a indicação dos instrumentos M1, M2 e M3? Dimensionar os diodos.

Solução: $V_{ep}=17\text{ V}$, portanto a máxima tensão inversa a que o diodo será submetido é 34 A tensão media (CC) na carga vale:

$$V_{cc} = \frac{2.(17 - 0,7V)}{\pi} = 10,4V$$

A corrente media (CC) na carga vale:

$$I_{cc} = \frac{10,4V}{50\Omega} = 208mA$$

A corrente por diodo vale a metade da corrente na carga, portanto 104 mA.

M1 indica 104 mA, M2 indica 208 mA e M3 indica 10,4 V.

Qualquer diodo da tabela 1 pode ser usado.

[ArquivoEletronicaMCP12](#)

2.3.2. Retificador de onda completa em ponte

Em um retificador em ponte não é obrigatório o uso de transformador somente se houver necessidade de diminuir a tensão. Na figura 2.14 V_e pode ser obtida de um secundário de um transformador. O nome ponte é derivado da ponte de Wheatstone que é um circuito que tem a mesma forma (quatro braços)

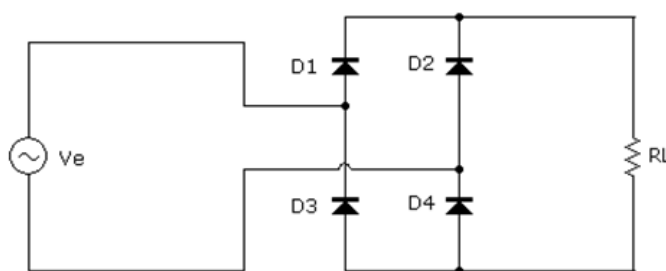


Figura 2.14: Retificador de onda completa em ponte

No semi ciclo positivo da tensão de entrada, figura 2.15a, conduzem D1 e D4, D2 e D3 cortam. No semi ciclo negativo, figura 2.15b, conduzem D2 e D3 e D1 e D4 cortam.

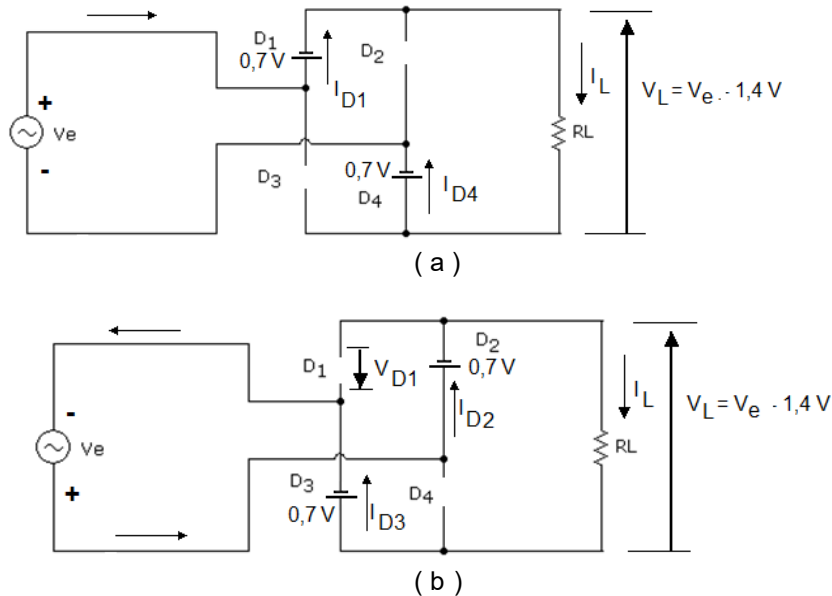


Figura 2.15: Retificador de onda completa em ponte (a) semi ciclo positivo (b) semi ciclo negativo

Considerações:

- São dois diodos no caminho da corrente, portanto a queda de tensão agora é de $1,4\text{ V}$ então a tensão na carga será a de entrada menos $1,4\text{ V}$;
- Assim como no retificador com CT, a corrente por diodo é a metade da corrente na carga;
- A tensão reversa máxima submetida a cada diodo quando está polarizado reversamente é aproximadamente V_{ep} .

Exemplo6:

No circuito da figura 2.14, $V_e = 50\text{ V}$. Se a carga for 50 Ohms qual a indicação dos instrumentos M1, M2 e M3? Dimensionar os diodos.

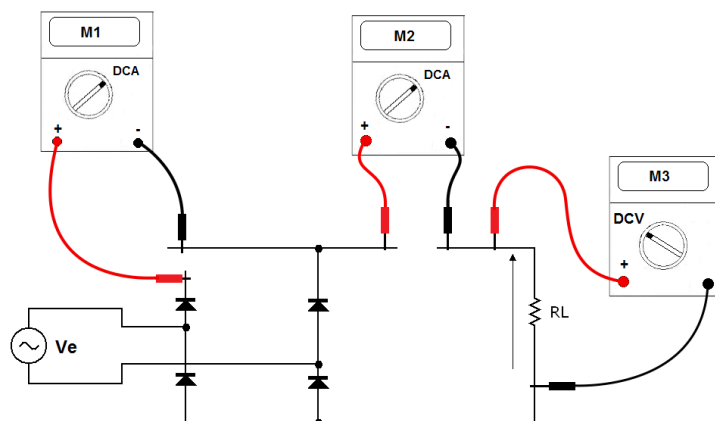


Figura 2.16: Retificador de onda completa em ponte – medindo corrente na carga, diodo e tensão na carga

Solução:

$$V_{ep} = 50 \cdot \sqrt{2} = 70,5\text{ V} \quad \text{e a tensão media na carga vale:}$$

$$V_{cc} = \frac{2 \cdot (70,5 - 1,4V)}{\pi} = 44V = M3$$

E a corrente media na carga:

$$I_{cc} = \frac{V_{cc}}{R_L} = \frac{44V}{50\Omega} = 880mA = M2$$

A corrente media por diodo será igual a:

$$I_{cc}(\text{diodo}) = \frac{V_{cc}}{2 \cdot R_L} = \frac{44V}{2 \cdot 50\Omega} = 440mA = M1$$

A máxima tensão reversa por diodo é 70,5V, portanto da tabela ser usados os só podem usados os diodos 1N4002 e 1N4003.

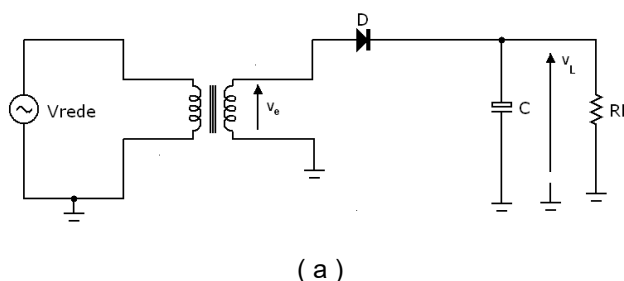
[ArquivoEletronicaMCP13](#)

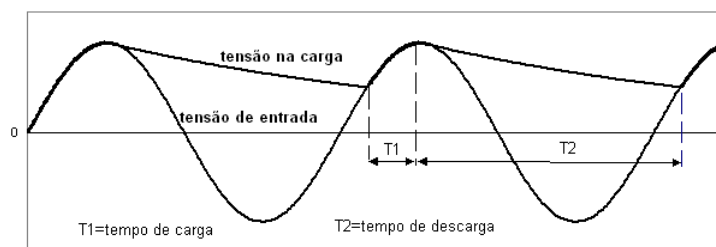
2.4. Retificadores com filtro capacitivo

Os circuitos retificadores estudados fornecem uma tensão com um ripple muito alto. Para diminuir a ondulação são usados filtros que são constituídos basicamente de elementos reativos como capacitores e indutores. No caso mais comum basta colocar em paralelo com a carga (o circuito eletrônico) um capacitor de valor adequado.

2.4.1. Retificador de meia onda com filtro capacitivo

A figura 2.17a mostra o circuito, lembrando que na pratica R_L representa o circuito e a figura 2.17b as formas de onda na carga e entrada.





(b)

Figura 2.17: (a) Retificador meia onda com filtro capacitivo (b) formas de onda

No início o capacitor se carrega até aproximadamente o valor de pico da tensão de entrada. Como a resistência na carga é muito baixa (resistência do diodo + resistência do fio do transformador), a carga coincide com a tensão de entrada. Um instante após a tensão atingir o pico o diodo corta e o capacitor começa a descarregar através da resistência R_L . Ao mesmo tempo a tensão de entrada está variando. Quando V_e for maior que V_c novamente o diodo volta a conduzir carregando o capacitor novamente. O ciclo se repete. A tensão na carga não atinge zero quando sem o capacitor. A tensão na carga oscila entre um valor máximo, que é aproximadamente igual ao valor de pico. O valor mínimo depende da corrente consumida, da frequência da ondulação e do valor de C . A figura 2.18 mostra a tensão na saída e principais valores.

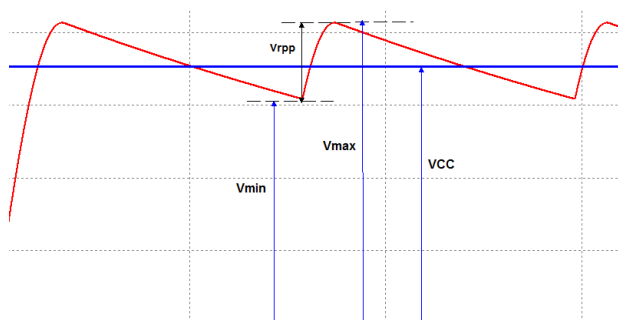


Figura 2.18: Valores da saída do filtro

Na figura 2.18:

V_{max} é a máxima tensão na saída, é aproximadamente V_{ep} .

V_{min} é a mínima tensão na saída.

V_{rpp} é o valor de ripple de pico a pico $= V_{max} - V_{min}$

V_{CC} é a tensão média (contínua) na carga $= (V_{max} + V_{min})/2$

O valor do *ripple* pode ser estimado se o gráfico for aproximadamente linear, e para isso considera-se que o *ripple* não pode exceder 10% do valor de pico. Nessas condições:

$$V_{rpp} = \frac{I_{CC}}{C \cdot f}$$

Onde I_{cc} é o valor da corrente contínua consumida pelo circuito, f a frequência da ondulação (60 Hz para meia onda e 120 Hz para onda completa) e C o valor da capacitância. Observar a consistência da expressão. Se a corrente consumida aumentar, o ripple aumenta. Aumentando C diminui o ripple.

Exemplo7:

Estimar o valor do ripple de pico a pico no circuito da Figura 2.19

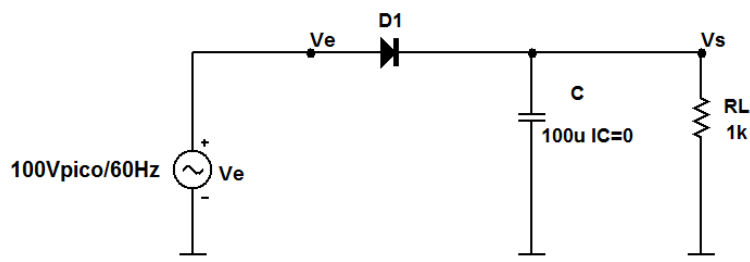


Figura 2.19: Retificador meia onda com filtro capacitivo para exercício

Solução: Considerando que a descarga é exponencial e que o valor da tensão no capacitor no instante inicial é 100 V, isto é, $V_C(0)=100$ V, após aproximadamente 16,66 ms a tensão no capacitor atinge o valor mínimo (ver figura 2.18). Como a constante de tempo vale:

$$\tau = R \cdot C = 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 0,1 \text{ s}$$

A partir da equação da descarga se obtém o valor da tensão mínima.

$$V_C(16,66 \text{ ms}) = 100 \cdot e^{-\frac{16,66 \text{ ms}}{100 \text{ ms}}} = 84,6 \text{ V}$$

Portanto o valor do ripple de pico a pico vale aproximadamente: $100 - 84,6 = 15,4 \text{ V}$

E, portanto o valor médio da tensão média vale aproximadamente:

$$V_{cc} = \frac{(100 + 84,6)}{2} = 92,3 \text{ V}$$

Efetue a simulação e compare os valores simulados com os calculados.

[ArquivoEletronicaMCP14](#)

2.4.2. Retificador de onda completa com filtro capacitivo

O retificador de onda completa permite obter, para os mesmos valores de capacitor e carga do circuito meia onda, uma tensão média maior com um ripple menor. A figura 2.19a mostra o circuito com C.T e a figura 2.18b as formas de onda.

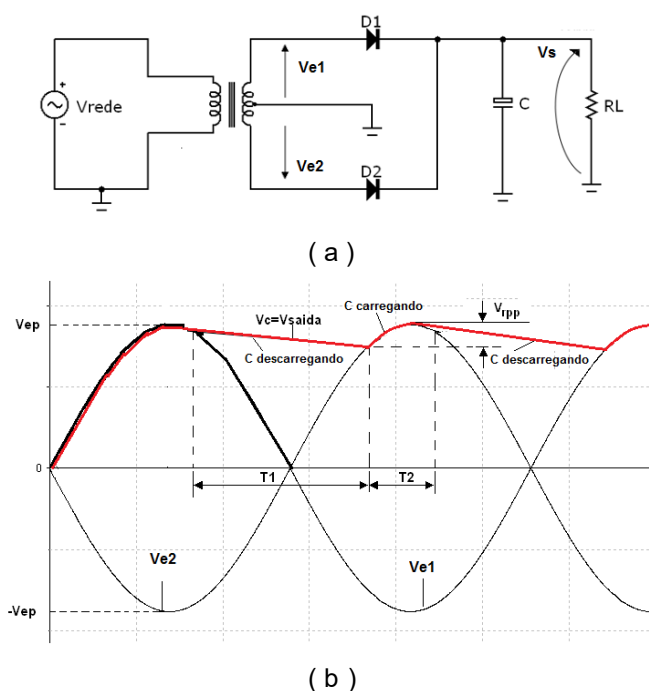


Figura 2.20: Retificador de onda completa com filtro (a) Circuito C.T (b) formas de onda

Exemplo8:

Considere que no circuito da figura 2.18 a tensão nas metades do transformador é 100 Vpico (V_{e1} e V_{e2}), $R_L=1\text{ k}$ e $C=100\text{ }\mu\text{F}$. Estimar o *ripple* e o valor médio da tensão na carga.

Solução: Considerando a descarga exponencial e que o tempo de descarga é muito maior que o tempo de carga, a tensão inicial é 100 V e a tensão mínima valerá:

$$V_C(8,33\text{ms}) = 100 \cdot e^{-\frac{8,33\text{ms}}{100\text{ms}}} = 92\text{ V}$$

Portanto o valor do ripple de pico a pico vale aproximadamente: $100 - 92 = 8\text{ V}$

E, portanto o valor médio da tensão média vale aproximadamente:

$$V_{CC} = \frac{(100 + 92)}{2} = 96\text{ V}$$

Efetue a simulação e compare os valores simulados com os calculados.

[ArquivoEletronicaMCP15](#)

2.4.3. Problema em aumentar C

Em princípio, de acordo com a expressão do *ripple*, basta aumentar muito o valor de C para diminuir o *ripple*, mas aumentar C diminui o tempo de condução do diodo e isso implica em aumentar a corrente de pico repetitiva para repor a carga do capacitor. A figura 2.21 mostra a tensão na carga, V_L , e a corrente no diodo D_1 em um retificador de onda completa com C.T e $C=100\ \mu\text{F}$.

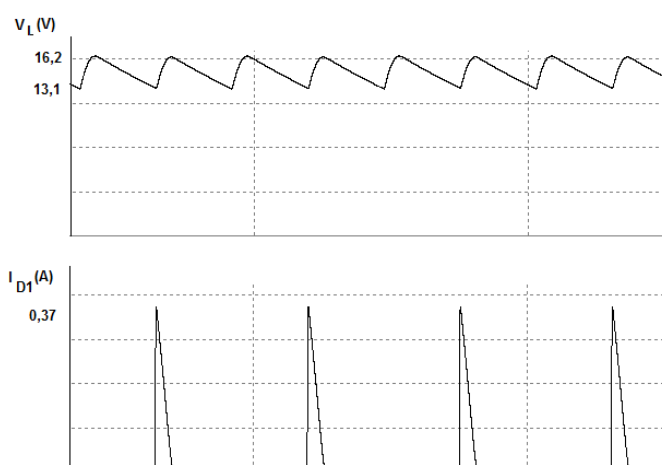


Figura 2.21: Tensão na carga e corrente em um dos diodos no retificador com C.T, $C=100\ \mu\text{F}$

Se o valor de C aumentar, por exemplo, para $200\ \mu\text{F}$, o *ripple* diminui, diminuindo o tempo de carga e aumentando a corrente, figura 2.22.

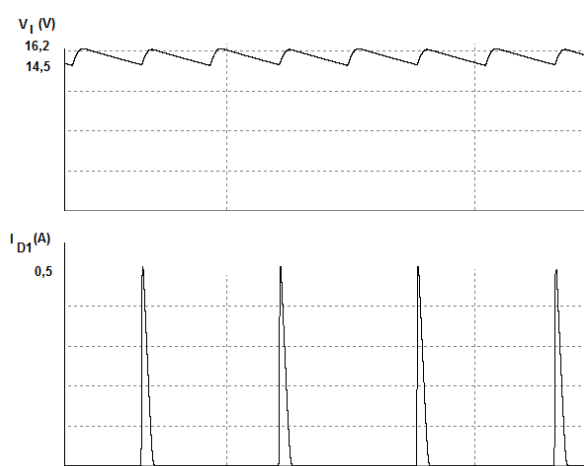


Figura 2.22: Tensão na carga e corrente em um dos diodos no retificador com C.T, $C=200\ \mu\text{F}$

O diodo deve ter capacidade de suportar essa corrente de pico repetitiva. Quando o circuito é ligado a primeira vez o capacitor se comporta como um curto circuito, a corrente nesse instante aumenta muito e novamente o capacitor deve suportar essa corrente de pico não repetitiva. Quanto maior o valor de C maior o valor dessas correntes, atenção portanto.

Exemplo9:

Para o circuito da figura 2.23 determinar o valor médio da tensão e o *ripple* de pico a pico.

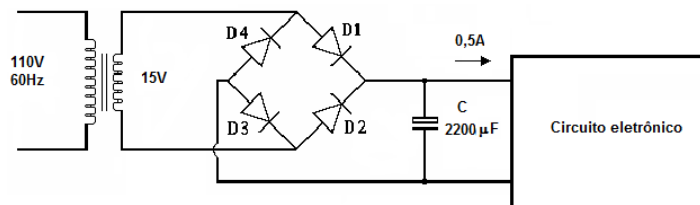


Figura 2.23: Determinando o valor médio e o *ripple*

Solução: São dados os valores de C, f e da corrente consumida, logo o *ripple* pode ser estimado por:

$$V_{rpp} = \frac{I_{cc}}{C \cdot f} = \frac{0,5}{2200 \cdot 10^{-6} \cdot 120} = 1,89V$$

Lembrando que f (120 Hz) é a frequência da ondulação

O valor de pico da tensão de entrada é: $V_{pico} = 15 \cdot \sqrt{2} = 21,15V$

O valor de pico no capacitor: $V_{picocarga} = 21,15 - 1,4 = 19,75V$

O valor médio, V_{cc} vale: $V_{cc} = V_{picocarga} - \frac{V_{rpp}}{2} = 19,75 - \frac{1,89}{2} = 18,8V$

A figura 2.24 resume o calculado:

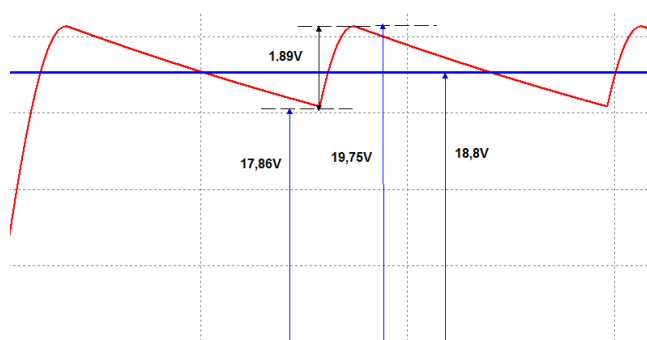


Figura 2.24: Valores do exercício resolvido

2.5. Grampeadores

São circuitos que adicionam um valor médio (*offset*) a uma tensão alternada. São também chamados de circuitos restauradores CC.

2.5.1. Grampeador negativo sem polarização

No circuito da figura 2.25 no semi ciclo positivo da tensão de entrada o diodo conduz carregando o capacitor até $V_p - 0,7 \text{ V}$, com a polaridade indicada, onde V_p é o valor de pico da tensão de entrada. Após o capacitor se carregar o diodo corta, e se não houver carga o capacitor mantém a tensão de $V_p - 0,7 \text{ V}$. Considere que a tensão de entrada é senoidal e de 20 V_p .

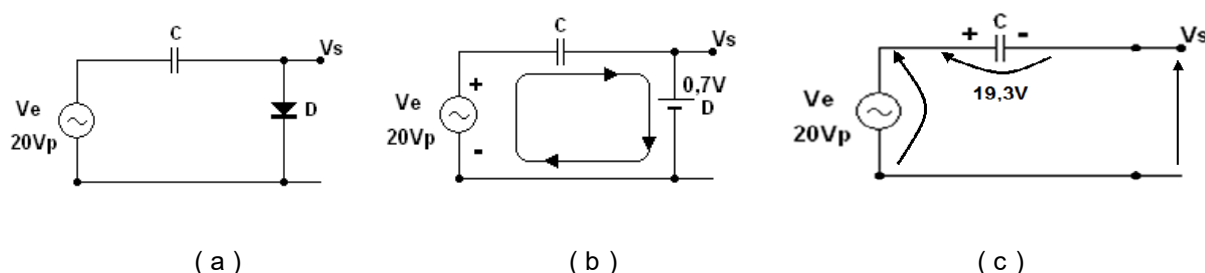


Figura 2.25: Grampeador negativo de polarização (a) circuito (b) diodo conduzindo (c) diodo cortado

Após o diodo cortar a relação entre as três tensões é: $V_s = V_e - V_c = 20 \cdot \sin \omega \cdot t - 19,3 \text{ (V)}$. A representação gráfica é mostrada na figura 2.26.

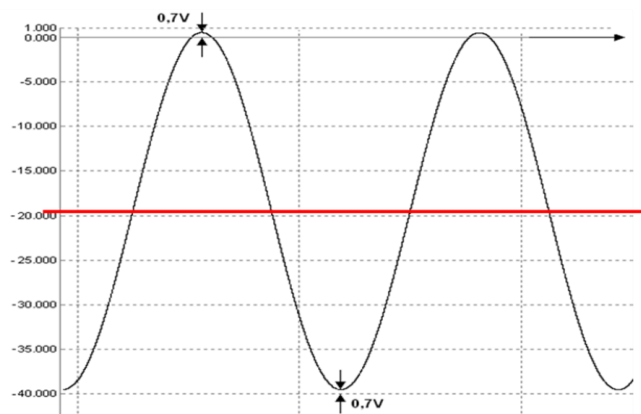


Figura 2.26: Forma de onda na saída do circuito [ArquivoEletronicaMCP17](#)

2.5.2. Grampeador positivo sem polarização

Invertendo o diodo no circuito da figura 2.25 é obtido um grampeador que na saída tem um valor médio positivo, figura 2.27. Para efeitos de cálculos considere que a entrada é senoidal de 20 V_p . O diodo conduz no semi ciclo negativo da entrada

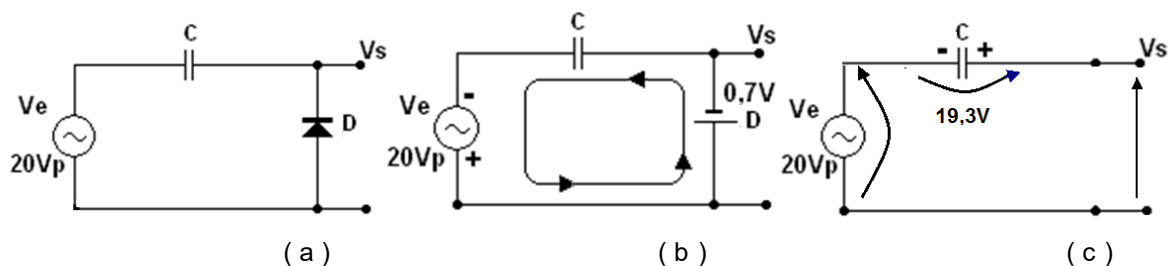


Figura 2.27: Grampeador positivo sem polarização (a) circuito (b) diodo conduzindo (c) diodo cortado

Após o diodo cortar a relação entre as três tensões é: $V_s = V_e + V_c = 20 \cdot \sin \omega t + 19,3 \text{ (V)}$. A representação gráfica é mostrada na figura 2.27.

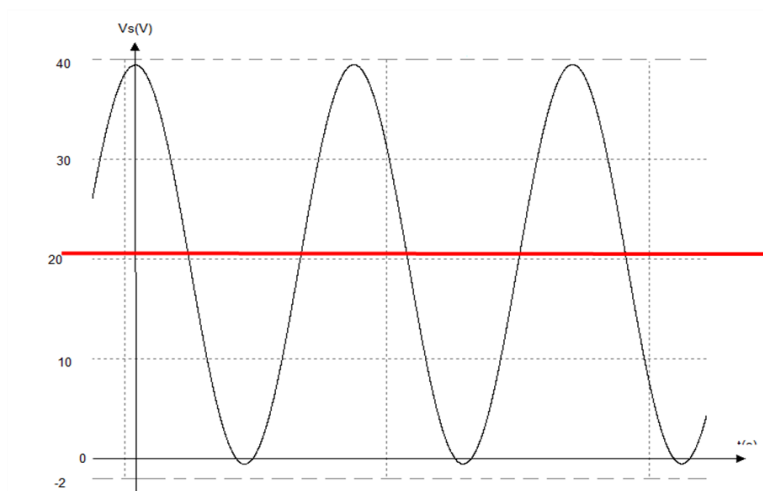
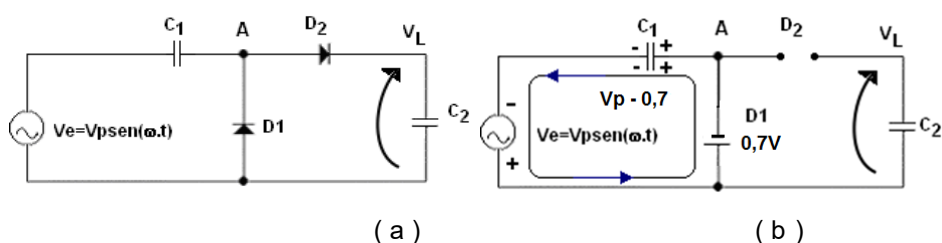


Figura 2.28: Forma de onda na saída do circuito [ArquivoEletronicaMCP18](#)

2.6. Multiplicadores de tensão

São circuitos que fornecem uma tensão CC múltiplo da tensão de pico de entrada, desta forma se o valor de pico é V_P pode-se obter $2 \cdot V_P$, $3 \cdot V_P$ de uma forma geral $n \cdot V_P$. A figura 2.29 mostra o circuito de um dobrador de tensão.



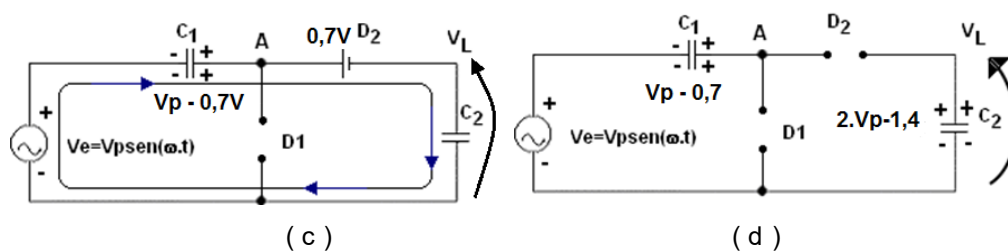
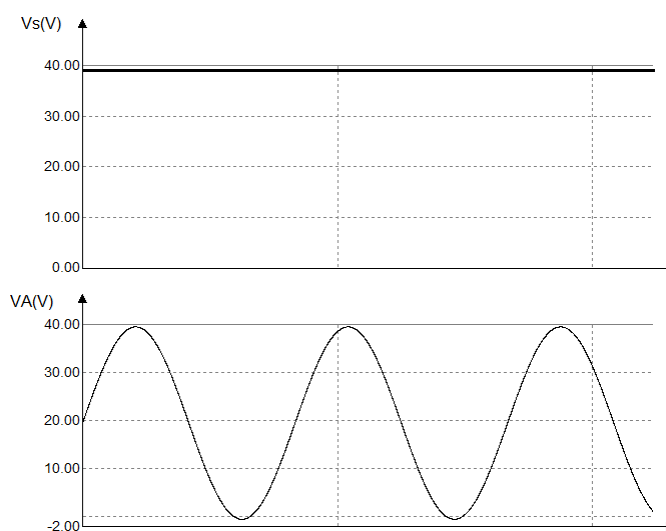


Figura 2.29: Duplicador

A figura 2.30 mostra as formas de onda no circuito considerando que a entrada é senoidal e de 20 Vp. Observe a forma de onda no ponto A é essencialmente a do circuito grameador positivo sem polarização. O ultimo diodo, D2, juntamente com o capacitor é um circuito chamado de detector de pico, pois armazena o valor mais alto da tensão na sua entrada, neste caso aproximadamente $2.V_P$.

Figura 2.30: Formas de onda no circuito duplicador [ArquivoEletronicaMCP19](#)

2.7. Limitadores de tensão

São circuitos usados para proteção, limitando a tensão a um determinado valor (nível).

2.7.1. Limitador positivo sem polarização

No circuito da figura 2.31a se a entrada for positiva e maior que 0,7 V o diodo conduz limitando a 0,7 V a tensão de saída, V_s . Se a entrada for menor que 0,7 V o diodo não conduz e a saída será igual a entrada. A figura 2.31d mostra a curva de transferência que relaciona a saída, V_s com a entrada V_e .

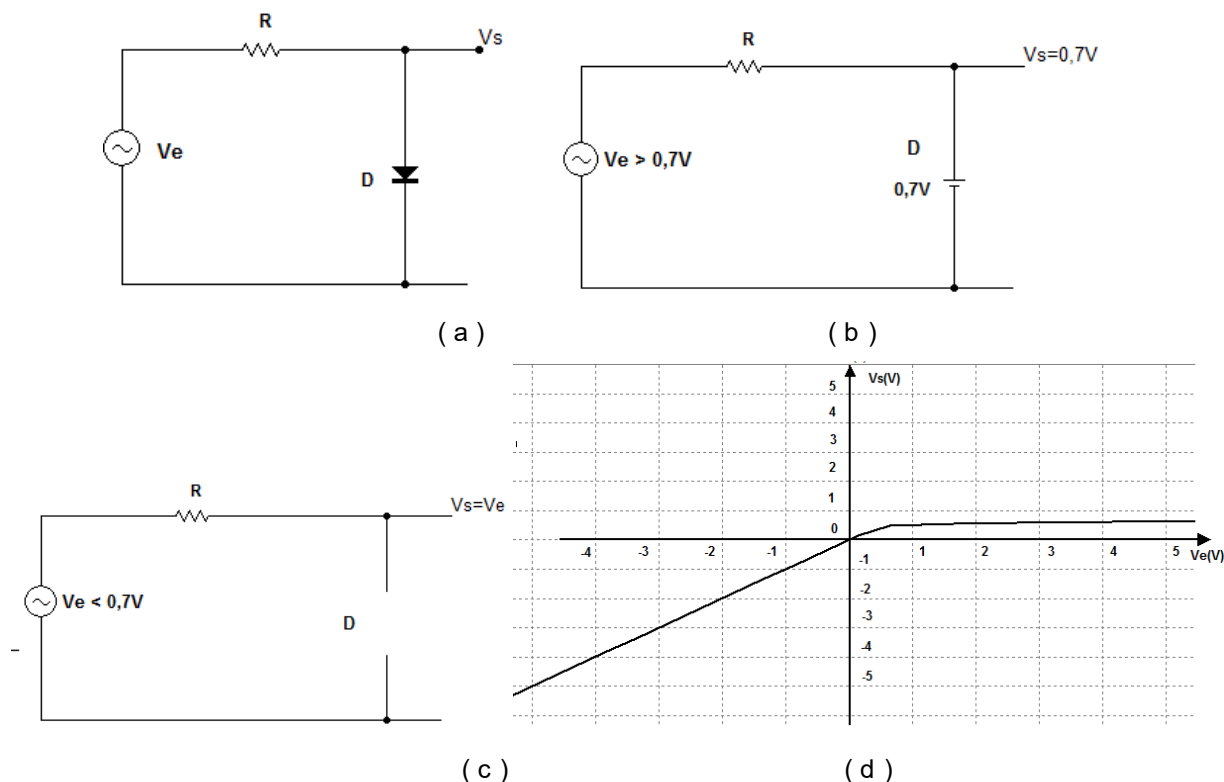


Figura 2.31: Limitador positivo (a) circuito (b) diodo conduzindo (c) diodo cortado (d) curva de transferência [ArquivoEletronicaMCP20](#)

2.7.2. Limitador negativo sem polarização

Se o diodo for invertido, figura 2.32, a proteção passa a ser contra excesso de tensão negativa.

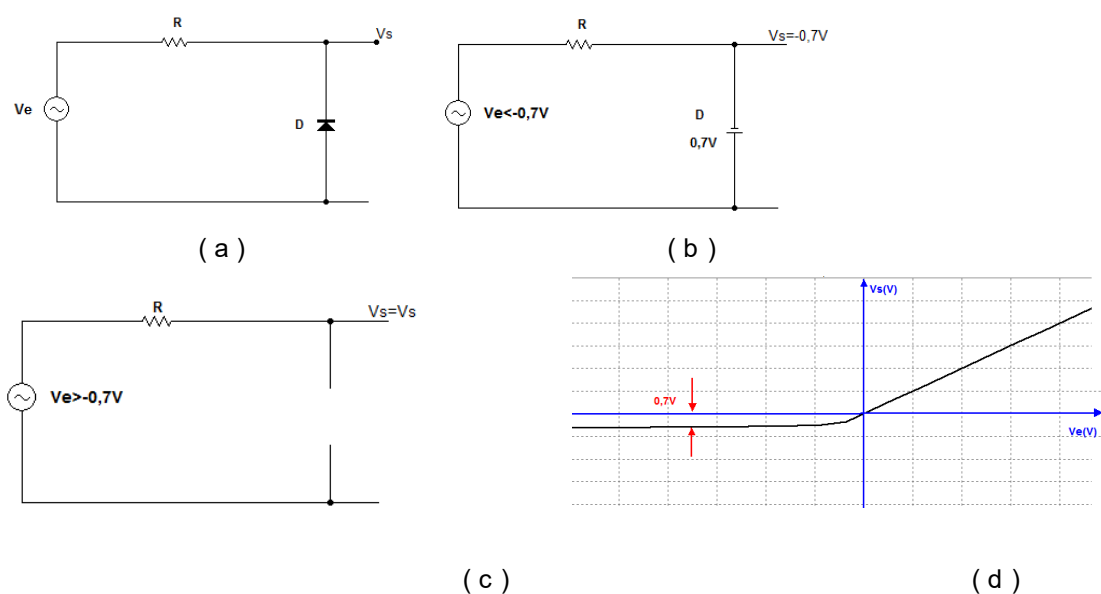


Figura 2.32: Limitador negativo (a) circuito (b) diodo conduzindo (c) diodo cortado (d) curva de transferência [ArquivoEletronicaMCP22](#)

2.7.3. Limitador positivo/negativo

Se dois diodos forem usados, figura 2.33, a limitação será em dois níveis. A saída, será igual à entrada quando os dois diodos estiverem cortados ($-0,7V < V_e < 0,7V$). Se $V_e > 0,7$ V conduz D1 e D2 corta, a saída será $V_s = 0,7$ V. Se $V_e < -0,7$ V neste caso D1 corta e D2 conduz a saída será igual a $-0,7$ V.

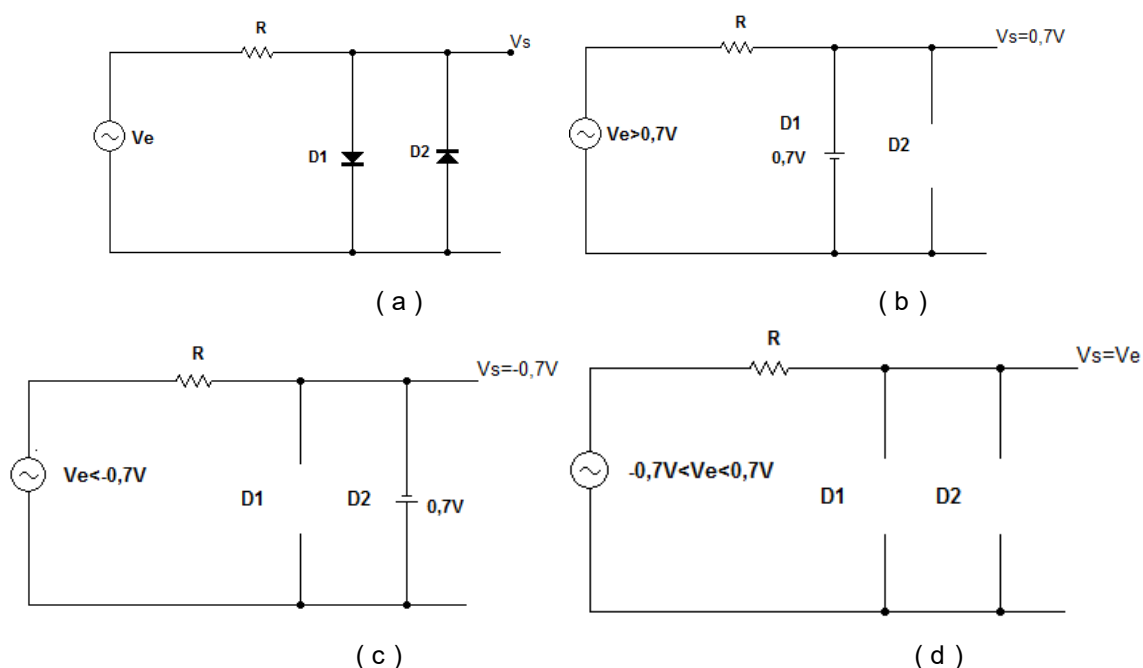


Figura 2.33: (a) Limitador negativo – positivo (b) D1 conduzindo D2 cortado (c) D2 conduzindo D1 cortado (d) D1 e D2 cortados

A figura 2.34 mostra a curva de transferência, $V_s \times V_e$.

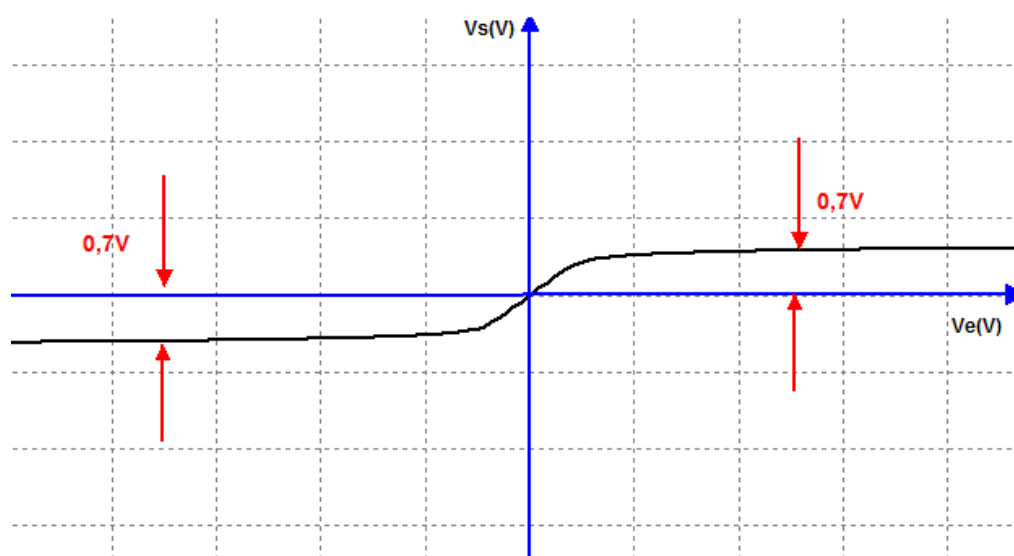


Figura 2.33: Curva característica de transferência do limitador negativo-positivo [ArquivoEletronicaMCP23](#)

3. Reguladores de tensão

Os reguladores são o ultimo bloco de uma fonte de alimentação. Existem vários tipos de reguladores, neste item será mostrado o regulador com Zener e o regulador integrado de três terminais.

3.1. Regulador Zener

A figura 3.1 mostra o circuito do regulador Zener. A tensão de entrada V_e não regulada é proveniente do filtro capacitivo. No circuito R_s tem a finalidade de manter a corrente dentro dos limites na carga e Zener.

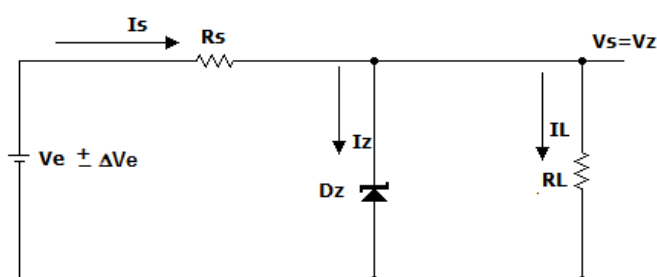


Figura 3.1: Regulador Zener

A resistência R_L representa um circuito que consome uma corrente I_L , a resistência R_s deve ter valor de forma que a corrente no Zener esteja dentro dos limites máximo e mínimo quando a carga continua a ser alimentada, portanto não pode ser nem muito baixa (queimaria o Zener) nem muito alta (O Zener perderia a regulação).

Exemplos:

Exemplo10: Considerar que no circuito da figura 3.1 $V_e = 12\text{ V} \pm 10\%$ e a carga consome 100 mA com 5,1 V. Dimensionar R_s considerando o Zener de 5,6V/1W

Solução: No pior caso a entrada é máxima $V_e = 12 + 1,2 = 13,2\text{ V}$ e impondo corrente máxima no Zener.

$$I_{Z\text{máx}} = \frac{1000\text{W}}{5,6\text{V}} = 196\text{mA} \quad I_{Z\text{min}} = \frac{I_{Z\text{máx}}}{10} = \frac{196\text{mA}}{10} = 19,6\text{mA}$$

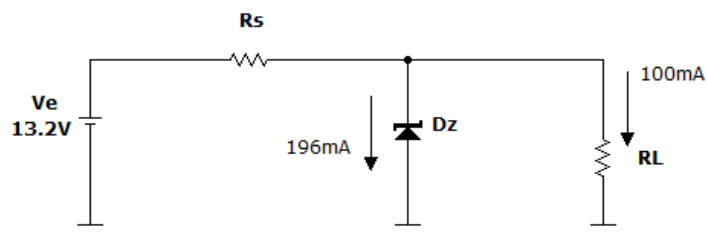


Figura 3.2: Regulador com condições limites superiores

Considerando que o Zener está regulando a tensão na resistência R_s será igual a 8,1 V e como a corrente em R_s vale 296 mA então o valor de R_s nessas condições é:

$$R_S = R_{S\min} = \frac{(13,2 - 5,6)V}{296mA} = 25,7\Omega$$

Se o valor dessa resistência for menor que esse a corrente no Zener será maior que 196 mA destruindo-o.

As condições limites inferiores são quando a entrada for igual a $12V - 1,2V = 10,8V$ e o Zener estiver perdendo a regulação, figura 3.3.

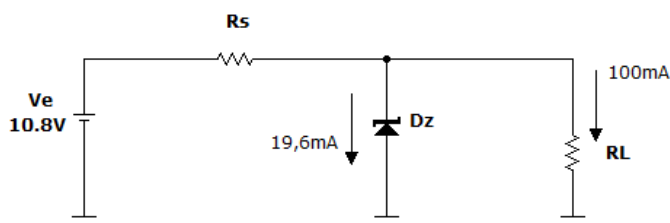


Figura 3.3: Regulador com condições limites inferiores

Considerando que o Zener está ainda regulando, a tensão na resistência R_s será igual a 5,2 V e como a corrente em R_s vale 119,6 mA então o valor de R_s nessas condições é:

$$R_S = R_{S\max} = \frac{(10,8 - 5,6)V}{119,6mA} = 43,5\Omega$$

Se R_s for maior que esse valor a corrente no Zener diminui abaixo do mínimo e o mesmo perde a regulação (a tensão cai muito abaixo de 5,1 V).

Adotando $R_s = 33\text{ Ohms}$

Simulação: [ArquivoEletronicaMCP24](#)

Exercícios propostos:

1) Considerando o Zener 1N4735 de 6,2V/0,5W. No circuito da figura 3.4 calcule os limites que pode ter R_L para que o Zener possa operar dentro da região de regulação.

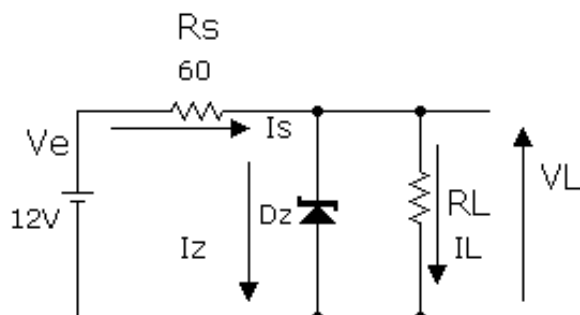


Figura 3.4: Circuito para exercício proposto 1

2) Para o circuito da figura 3.5 determine a faixa de V_e que manterá V_L em 8 V e não exceda potência máxima nominal do diodo Zener e não perca a regulação.

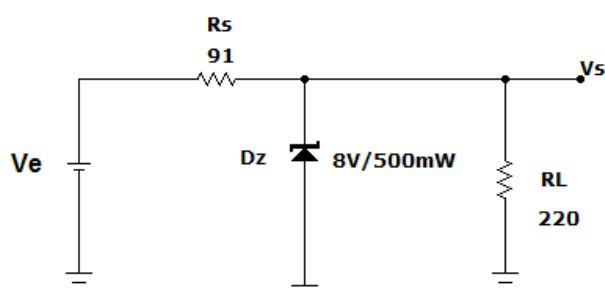


Figura 3.5: Circuito para exercício proposto 2

3.2. Reguladores integrados de três terminais

Os reguladores integrados de três terminais são CI's que geram uma tensão de referência fixa entre dois terminais, saída (*output*) e GND ou entre saída e ADJ.

Existem vários CI's de três terminais usados como reguladores sendo os mais conhecidos os da família 78XX (reguladores de tensão positiva) e família 79XX (reguladores de tensão negativa) e o regulador LM 317 para fonte ajustável.

3.2.1. Reguladores de tensão fixos

São os CI's da família 78XX e o seu dual da família 79XX. As letras XX representam o valor da tensão regulada, assim é que 7805 é um regulador que fornece 5 V de tensão regulada, 7812 o regulador fornece 12 V. Da mesma forma 7905 na saída a tensão será -5 V. A figura 3.6 mostra o circuito típico de um regulador de tensão 7805, figura 3.6a, a entrada não regulada, figura 3.6b, e a saída regulada, figura 3.6c. Observar a simplicidade do circuito.

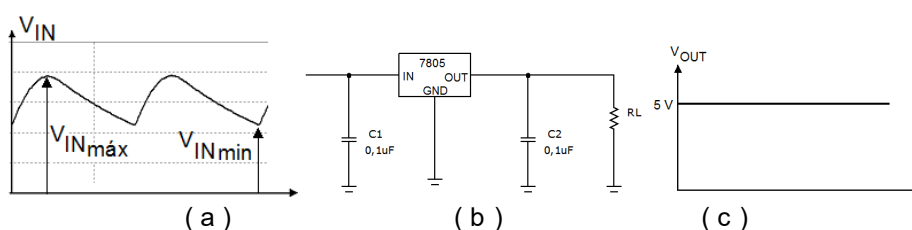


Figura 3.6 : Regulador integrado de 3 terminais (a) tensão de entrada não regulada (b) circuito (c) tensão de saída regulada

Para que um regulador opere de forma adequada a tensão de entrada (V_{IN}) deve ser pelo menos igual a $XX+2,5$ V, no caso do 7805 pelo menos 7,5 V. A potência dissipada no CI é calculada por:

$$P_D = (V_{IN} - V_{OUT}) \cdot I$$

Recomenda-se que o valor mínimo não seja muito maior que o necessário. Se a diferença ($V_{IN} - V_{OUT}$) for muito grande a dissipação de potência pode exceder a máxima permitida, que depende do tipo de encapsulamento. A máxima tensão de entrada é 35 V, mas o fabricante recomenda 25 V para 7805, 30 V para 7812 e 30 V para 7815.

Esses circuitos integrados estão disponíveis em diversos encapsulamentos sendo o mais comum o TO-220 para 1 A. Outros encapsulamentos possibilitam correntes maiores ou menores. A figura 3.7 mostra os tipos de encapsulamento para o CI 78XX. A entrada (IN) é o pino 1, o pino 2 é o terra (GND) e a saída é no pino 3 (OUT). Para a família 7900 (saída negativa) o pino 1 é terra, o pino 2 é entrada e o pino 3 saída, cuidado portanto ao usar os

dois integrados. No caso do encapsulamento metálico TO-3 e TO-220 o dissipador é ligado à carcaça (case) sendo a saída (OUT) na família 78XX. Para a família 79XX o dissipador é conectado à entrada (IN).

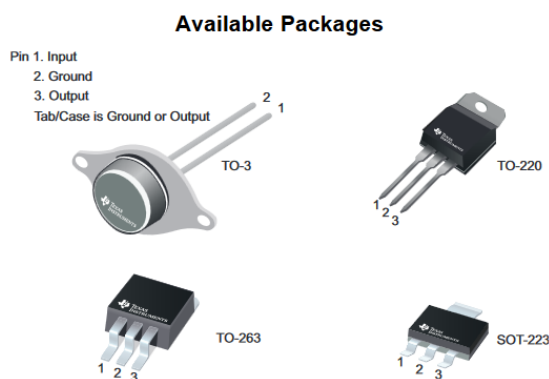


Figura 3.7: Pinagem dos CI's da família 78XX

Fonte: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm7815.pdf>

Observação: Atenção na identificação, pois existem outros componentes que usam o mesmo tipo de encapsulamento TO-220, tais como transistores, SCR e TRIAC.

O 78XX e 79XX são usados quando se deseja construir uma fonte simétrica para alimentar circuitos com amplificadores operacionais ou circuitos que tem transistores NPN e PNP.

A figura 3.8 mostra uma fonte simétrica de +12V/-12V.

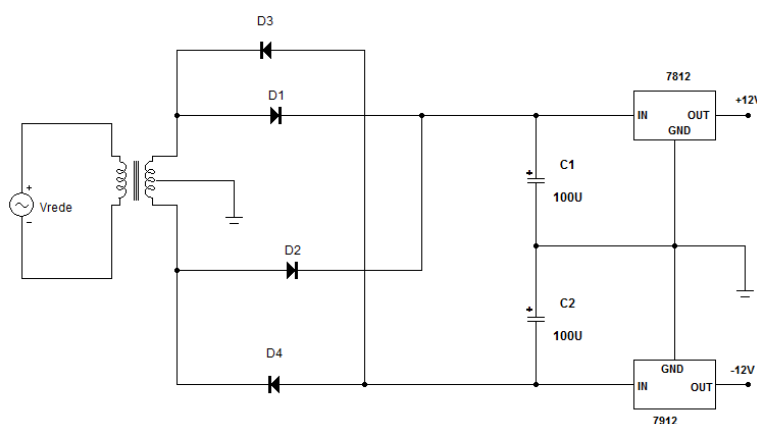


Figura 3.8: Fonte simétrica fixa

Exercício resolvido:

3.2.2. Regulador de tensão ajustável CI LM 317

Estes reguladores fornecem uma tensão de referência de 1,25 V entre os dois terminais OUT e ADJ. Os principais CIs são LM117 e LM317. A figura 3. 8 mostra o circuito básico. Se as condições forem satisfeitas ($V_e > 2,5V + V_s$) entre o terminal OUT e GND aparece uma tensão de 1,25 V.

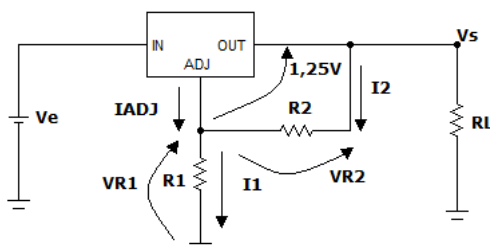


Figura 3.8: Regulador com CI da família 317

A corrente de polarização I_{ADJ} é da ordem de 50 μA , se I_2 for muito maior que esse valor então $I_1 = I_2$.

$$I_2 = \frac{1,25V}{R_2} \quad \text{e} \quad V_{R1} = R_1 \cdot I_1 = R_1 \cdot I_2 = R_1 \cdot \frac{1,25V}{R_2} \quad \text{e como } V_s = 1,25V + V_{R1} \text{ resulta:}$$

$$V_s = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)$$

Se R_1 for ajustável, a tensão na saída variara entre o mínimo de 1,25 V e o máximo determinado pela relação entre R_1 e R_2 .

Exemplo11: No circuito da figura 3.9 considerando que R_1 é uma resistência variável de 1 k e $R_2 = 180 \text{ Ohms}$ pedem-se: a) Limites para a tensão de saída, V_s b) Valor mínimo que deve ter a tensão de entrada para o circuito funcionar com os limites do item a). Considerar $V_e > 2,5V + V_s$

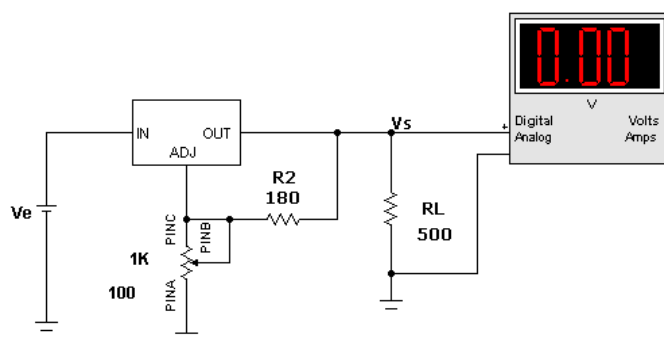


Figura 3.9: Regulador ajustável para exemplo

Solução:

a) A saída mínima é 1,25 V quando $R_1=0$ e será máxima quando $R_1=1\text{ k}$ valendo

$$V_s = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{1000}{180}\right) = 8,2\text{V}$$

b) Para haver regulação $V_e > 2,5\text{V} + V_s = 2,5 + 8,2 = 10,7\text{ V}$