



GOVERNO DO
ESTADO DO CEARÁ
Secretaria da Educação

ESCOLA ESTADUAL DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL - EEEP

ENSINO MÉDIO INTEGRADO À EDUCAÇÃO PROFISSIONAL

CURSO TÉCNICO EM ELETROTÉCNICA

ELETRÔNICA ANALÓGICA



**GOVERNO DO
ESTADO DO CEARÁ**
Secretaria da Educação

Governador

Cid Ferreira Gomes

Vice Governador

Domingos Gomes de Aguiar Filho

Secretária da Educação

Maria Izolda Cella de Arruda Coelho

Secretário Adjunto

Maurício Holanda Maia

Secretário Executivo

Antônio Idilvan de Lima Alencar

Assessora Institucional do Gabinete da Seduc

Cristiane Carvalho Holanda

Coordenadora da Educação Profissional – SEDUC

Andréa Araújo Rocha

APOSTILA

ELETRÔNICA

ANALÓGICA

SUMÁRIO

Apresentação

1	DIODO SEMICONDUTOR E RETIFICAÇÃO
2	TRANSISTOR BIPOLAR
3	POLARIZAÇÃO DE TRANSISTORES
4	TRANSISTOR COMO CHAVE ELETRÔNICA
5	TRANSISTOR COMO FONTE DE CORRENTE
6	CONFIGURAÇÃO DARLINGTON
7	TRANSISTORES ESPECIAIS
8	FOTO TRANSISTOR E ACOPLADOR ÓPTICO
9	AMPLIFICADORES OPERACIONAIS
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 - DIODO SEMICONDUTOR E RETIFICAÇÃO

1.1 - FÍSICA DOS SEMICONDUTORES

A ESTRUTURA DO ÁTOMO

O **átomo** é constituído basicamente por três tipos de partículas elementares: **Elétrons, prótons e nêutrons**. A carga do elétron é igual a do próton, porém de sinal contrário. Os elétrons giram em torno do núcleo distribuindo-se em diversas camadas, num total de até sete camadas. Em cada átomo, a camada mais externa é chamada de **valência**, e geralmente é ela que participa das reações químicas. Todos os materiais encontrados na natureza são formados por diferentes tipos de átomos, diferenciados entre si pelo seu número de prótons, elétrons e nêutrons. Cada material tem uma infinidade de características, mas uma especial em eletrônica é o comportamento à passagem de corrente. Quanto ao comportamento elétrico, podem ser divididos em três tipos principais:

MATERIAIS CONDUTORES DE ELETRICIDADE

São materiais que não oferecem **resistência** a passagem de **corrente elétrica**. Quanto menor for a oposição a passagem de corrente, melhor **condutor** é o material. O que caracteriza o material bom condutor é o fato de os elétrons de valência estarem fracamente ligados ao átomo, encontrando grande facilidade para abandonar seus átomos e se movimentarem livremente no interior dos materiais. O cobre, por exemplo, com somente um elétron na camada de valência tem facilidade de cedê-lo para ganhar estabilidade. O elétron cedido pode tornar-se um **elétron livre**.

MATERIAIS ISOLANTES

São materiais que possuem uma **resistividade** muito alta, bloqueando a passagem da corrente elétrica. Os elétrons de valência estão rigidamente ligados aos seus átomos, sendo que poucos elétrons conseguem desprender-se de seus átomos para se transformarem em elétrons livres.

Consegue-se isolamento maior (resistividade) com substâncias compostas (borracha, mica, baquelita, etc.).

MATERIAL SEMICONDUTOR

São materiais que apresentam uma resistividade elétrica intermediária. Como exemplo usados em eletrônica, temos o **germânio e silício**.

ESTUDO DOS SEMICONDUTORES

Os átomos de germânio e silício têm uma camada de valência com quatro elétrons. Quando os átomos de germânio (ou silício) agrupam-se entre si, formam uma **estrutura cristalina**, ou seja, são substâncias cujos átomos se posicionam no espaço, formando uma estrutura ordenada. Nessa estrutura, cada átomo une-se a quatro outros átomos vizinhos, por meio de **ligações covalentes**, e cada um dos quatro elétrons de valência de um átomo é compartilhado com um átomo vizinho, de modo que dois átomos adjacentes compartilham os dois elétrons, ver Figura 1.1.

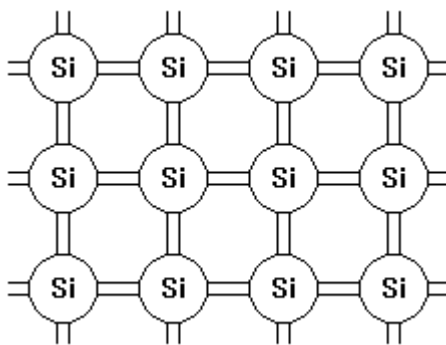
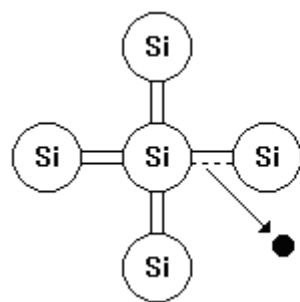


Figura 1.1 Estrutura do cristal de Silício

Se nas estruturas com germânio ou silício não fosse possível romper as ligações covalentes, elas seriam materiais isolantes. No entanto, com o aumento da temperatura, algumas ligações covalentes recebem energia suficiente para se romperem, fazendo com que os elétrons das ligações rompidas passem a se movimentar livremente no interior do cristal, tornando-se elétrons livres.

Com a quebra das ligações covalentes, no local onde havia um elétron de valência, passa a existir uma região com carga positiva, uma vez que o átomo era neutro e um elétron o abandonou. Essa região positiva recebe o nome de **lacuna**, sendo também conhecida como **buraco**. As lacunas não têm existência real, pois são apenas espaços vazios provocados por elétrons que abandonam as ligações covalentes rompidas.

Sempre que uma ligação covalente é rompida, surgem, simultaneamente, um par elétron e lacuna. Entretanto, pode ocorrer o inverso, um elétron preencher o lugar de uma lacuna, completando a ligação covalente (processo de **recombinação**).



Elétron que abandonou a ligação covalente pela ação de uma energia externa (p/ex. calor)

FIGURA 1.2

Como tanto os elétrons como as lacunas sempre aparecem e desaparecem aos pares, pode-se afirmar que o número de lacunas é sempre igual ao de elétrons livres.

Quando o cristal de silício ou germânio é submetido a uma diferença de potencial, os elétrons livres se movem no sentido do maior potencial elétrico e as lacunas por consequência se movem no sentido contrário ao movimento dos elétrons.

IMPUREZAS

Os cristais de silício (ou germânio. Mas não vamos considerá-lo, por simplicidade e também porque o silício é de uso generalizado em eletrônica) são encontrados na natureza misturados com outros elementos. Dado a dificuldade de se controlar as características destes cristais é feito um processo de purificação do cristal e em seguida é injetado através de um processo controlado, a inserção proposital de impurezas na ordem de 1 para cada 10^6 átomos do cristal, com a intenção de se alterar produção de elétrons livres e lacunas. A este processo de inserção dá-se o nome de **dopagem**.

As impurezas utilizadas na dopagem de um cristal semiconductor podem ser de dois tipos: **impurezas doadoras** e **impurezas aceitadoras**.

IMPUREZA DOADORA

São adicionados átomos **pentavalentes** (com cinco elétrons na camada de valência. Ex.: Fósforo e Antimônio). O átomo pentavalente entra no lugar de um átomo de silício dentro do cristal absorvendo as suas quatro ligações covalentes, e fica um elétron fracamente ligado ao núcleo do pentavalente (uma pequena energia é suficiente para se tornar livre).

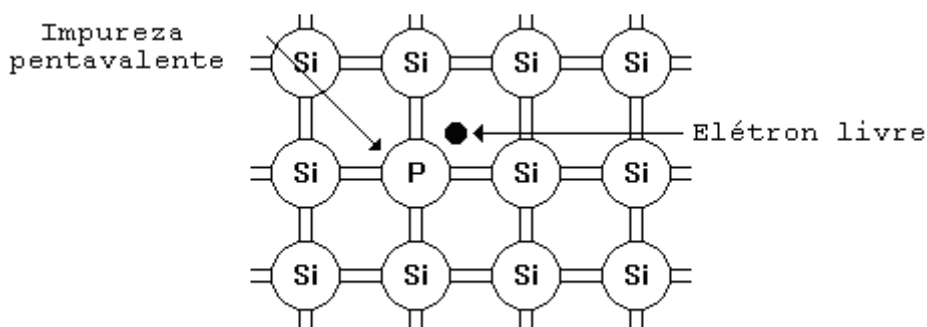


FIGURA 1.3

IMPUREZA ACEITADORA

São adicionados átomos trivalentes (tem três elétrons na camada de valência. Ex.: Boro, alumínio e gálio). O átomo trivalente entra no lugar de um átomo de silício dentro do cristal absorvendo três das suas quatro ligações covalentes. Isto significa que existe uma lacuna na órbita de valência de cada átomo trivalente.

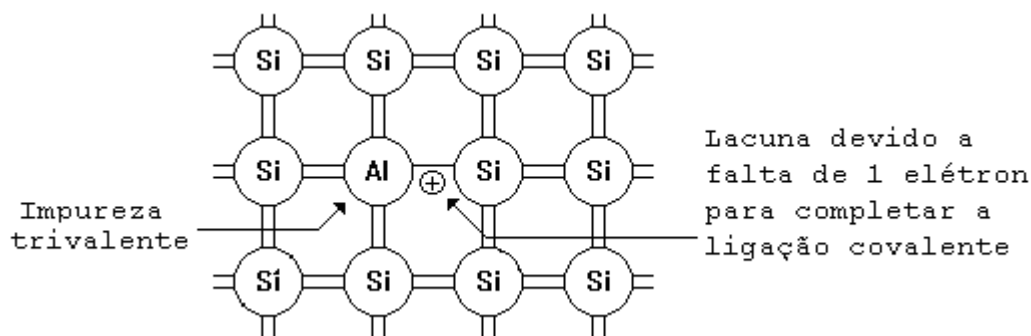


FIGURA 1.4

Um semiconductor pode ser **dopado** para ter um excesso de elétrons livres ou excesso de lacunas. Por isso existem dois tipos de semicondutores:

SEMICONDUTOR TIPO N

O cristal que foi dopado com impureza doadora é chamado **semicondutor tipo n**, onde n está relacionado com negativo. Como os elétrons livres excedem em número as lacunas num semicondutor tipo n, os elétrons são chamados **portadores majoritários** e as lacunas, **portadores minoritários**.

SEMICONDUTOR TIPO P

O cristal que foi dopado com impureza aceitadora é chamado **semicondutor tipo p**, onde p está relacionado com positivo. Como as lacunas excedem em número os elétrons livres num semicondutor tipo p, as lacunas são chamadas portadores majoritários e os elétrons livres, portadores minoritários.

1.2 DIODO

Da união de um **cristal tipo p** e um **cristal tipo n**, obtém-se uma **junção pn**, que é um dispositivo de estado sólido simples: o **diodo semicondutor de junção**.

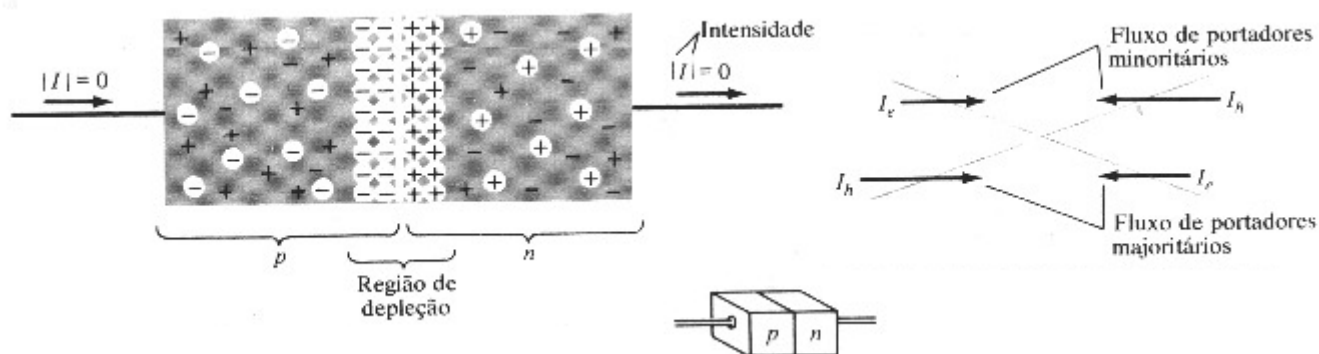


FIGURA 1.5 Estrutura física do diodo de junção PN

Devido à repulsão mútua os elétrons livres do lado n espalham-se em todas as direções, alguns atravessam a junção e se combinam com as lacunas. Quando isto ocorre, a lacuna desaparece e o átomo associado torna-se carregado negativamente. (um íon negativo).

Cada vez que um elétron atravessa a junção ele cria um par de íons. Os íons estão fixos na estrutura do cristal por causa da ligação covalente. À medida que o número de íons aumenta a região próxima à junção fica sem elétrons livres e lacunas. Chamamos esta região de **camada de depleção** ou **região de depleção**.

Além de certo ponto, a camada de depleção age como uma barreira impedindo a continuação da difusão dos elétrons livres. A intensidade da camada de depleção aumenta com cada elétron que atravessa a junção até que se atinja um equilíbrio. A diferença de potencial através da camada de depleção é chamada de **barreira de potencial**. A 25°, esta barreira é de **0,7V** para o silício e **0,3V** para o germânio.

O símbolo mais usual para o diodo é mostrado a seguir:



FIGURA 1.6 Símbolo do diodo

POLARIZAÇÃO DO DIODO

Polarizar um diodo significa aplicar uma diferença de potencial às suas extremidades. Supondo uma bateria sobre os terminais do diodo, há uma **polarização direta** se o pólo positivo da bateria for colocado em contato com o material tipo P e o pólo negativo em contato com o material tipo N.

POLARIZAÇÃO DIRETA

No material tipo n os elétrons são repelidos pelo pólo negativo da bateria e empurrados para a junção. No material tipo p as lacunas também são repelidas pelo pólo positivo e tendem a penetrar na junção, e isto diminui a camada de depleção. Para haver fluxo livre de elétrons a tensão da bateria tem de sobrepor o efeito da camada de depleção.

POLARIZAÇÃO REVERSA

Invertendo-se as conexões entre a bateria e a junção pn, isto é, ligando o pólo positivo no material tipo n e o pólo negativo no material tipo p, a junção fica polarizada inversamente. No material tipo n os elétrons são atraídos para o terminal positivo, afastando-se da junção. Fato análogo ocorre com as lacunas do material do tipo p. Podemos dizer que a bateria aumenta a camada de depleção, tornando praticamente impossível o deslocamento de elétrons através da junção.

CURVA CARACTERÍSTICA DE UM DIODO

A **curva característica** de um diodo é um gráfico que relaciona cada valor da tensão aplicada com a respectiva corrente elétrica que atravessa o diodo.

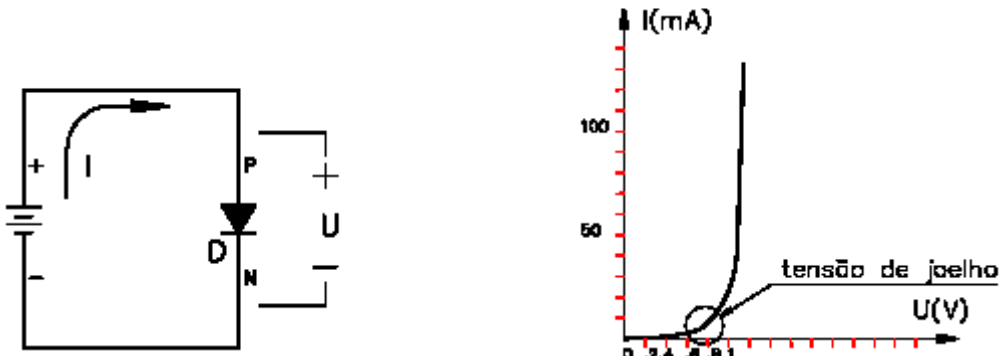
POLARIZAÇÃO DIRETA

FIGURA 1.7 Polarização direta e curva característica

Nota-se, pela curva, que o diodo ao contrário de um resistor, não é um componente linear. A tensão no diodo é uma função do tipo:

$$U = R_f I + \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I}{I_s} + 1\right) \quad \text{Eq. 1- 1}$$

TENSÃO DE JOELHO

Ao se aplicar a polarização direta, o diodo não conduz intensamente até que se ultrapasse a barreira potencial. A medida que a bateria se aproxima do potencial da barreira, os elétrons livres e as lacunas começam a atravessar a junção em grandes quantidades. A tensão para a qual a corrente começa a aumentar rapidamente é chamada de tensão de joelho. (No Si é aprox. 0,7V a 25°C).

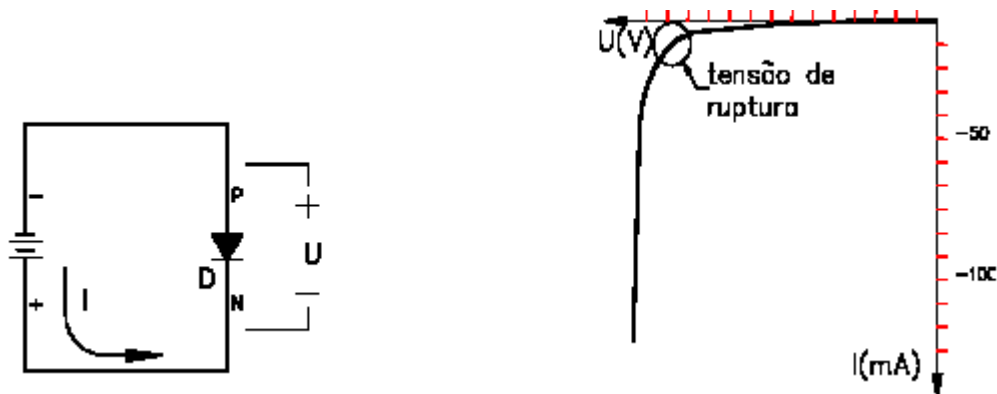
POLARIZAÇÃO REVERSA DO DIODO

FIGURA 1.8 Polarização reversa e curva característica

Através do diodo polarizado reversamente, passa uma corrente elétrica extremamente pequena, (chamada de **corrente de fuga**).

Se for aumentando a tensão reversa aplicada sobre o diodo, chega um momento em que atinge a tensão de ruptura (varia muito de diodo para diodo) a partir da qual a corrente aumenta sensivelmente.

** Salvo o diodo feito para tal, os diodos não podem trabalhar na região de ruptura.*

GRÁFICO COMPLETO.

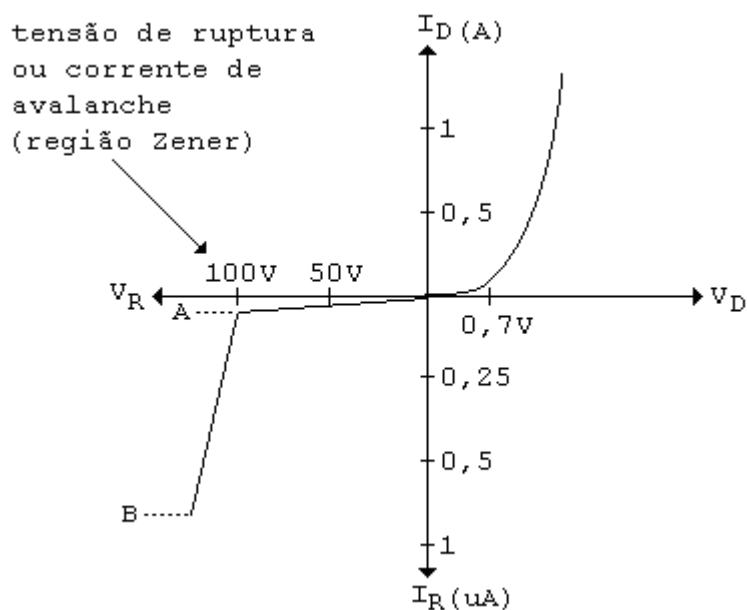


FIGURA 1.9 Gráfico completo com curvas direta e reversa

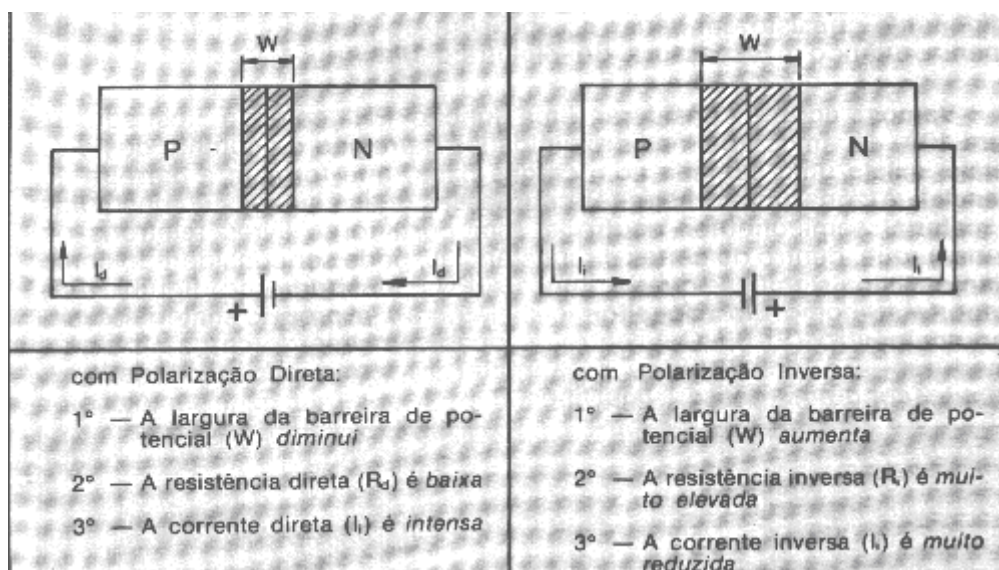


FIGURA 1.10 Resumo do comportamento de uma junção PN

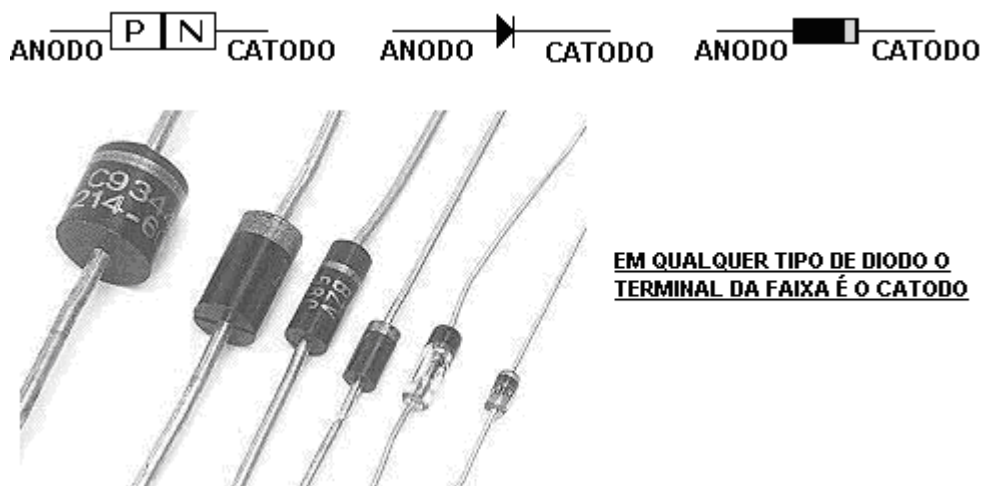


FIGURA 1.11 Aspecto físico e identificação dos terminais de alguns diodos

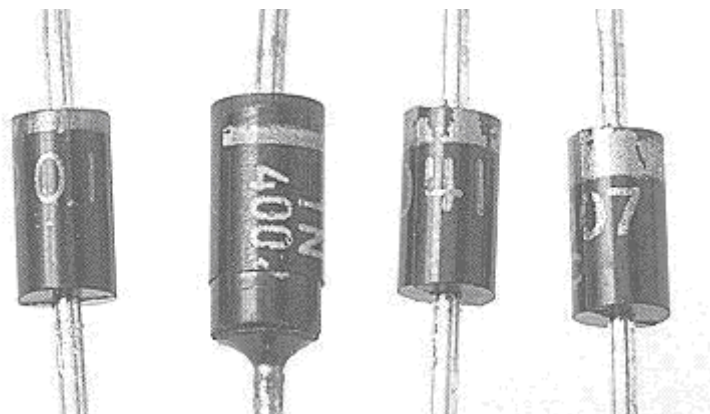


FIGURA 1.12 Aspecto físico de alguns diodos retificadores

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

A temperatura é um dos fatores que mais influenciam no funcionamento de um diodo; com o aumento da temperatura a tensão direta (V_D) diminui e a corrente reversa (I_R) aumenta. Isto pode ser observado na figura abaixo.

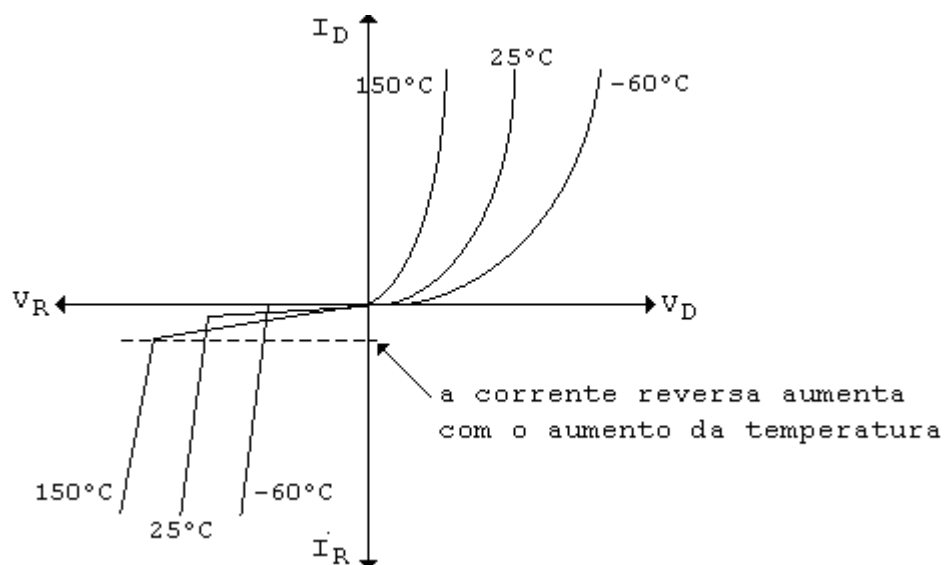


FIGURA 1.13 Variação nas curvas por influência da temperatura

Observe que a corrente inversa de saturação é constituída de portadores minoritários, que são provocados pelo fenômeno da agitação térmica. Por outro lado, sabe-se que o número de portadores minoritários existentes num cristal de germânio é maior que num cristal de silício, a uma mesma temperatura. Portanto, pode-se concluir que a corrente de fuga (ou corrente inversa de saturação) é maior na junção PN de germânio do que na de silício, à mesma temperatura. Como o número de portadores minoritários aumenta com a elevação da temperatura, a corrente de fuga também aumenta com a temperatura.

Para uma junção PN de germânio, a corrente de fuga é de $1\ \mu\text{A}$ a $25\ ^\circ\text{C}$, dobrando de valor a cada aumento de $10\ ^\circ\text{C}$. Assim, a $35\ ^\circ\text{C}$ seu valor será $2\ \mu\text{A}$, a $45\ ^\circ\text{C}$, $4\ \mu\text{A}$, etc.

Para uma junção PN de silício, a corrente de fuga vale $0,001\ \mu\text{A}$ a $25\ ^\circ\text{C}$ e também dobra a cada aumento de $10\ ^\circ\text{C}$. Portanto, a $35\ ^\circ\text{C}$ seu valor será $0,002\ \mu\text{A}$, a $45\ ^\circ\text{C}$, $0,004\ \mu\text{A}$, e assim por diante.

Assim sendo, é possível utilizar a junção PN de silício em temperaturas mais elevadas, de até $200\ ^\circ\text{C}$, enquanto que uma junção PN de germânio só poderá ser usada até uma temperatura máxima aproximada de $110\ ^\circ\text{C}$.

Com o aumento da temperatura, o valor da tensão direta de um diodo apresenta um decréscimo. Num diodo de silício, que é mais usado, para cada $^\circ\text{C}$ de aumento na temperatura da junção, ocorre uma queda na tensão direta de aproximadamente $2,5\ \text{mV}$. O decréscimo de tensão é portanto, de $2,5\ \text{mV}/^\circ\text{C}$ de aumento na temperatura.

Exemplo:

Num diodo de silício, a tensão direta (V_D) é de $0,6\ \text{V}$ e a corrente direta (I_D) é de $10\ \text{mA}$, para uma temperatura de $25\ ^\circ\text{C}$. Se a corrente I_D for mantida constante, qual será a tensão direta (V_{DF}) para uma temperatura de $125\ ^\circ\text{C}$.

Solução:

Variação da temperatura ($\Delta\theta$)

Temperatura inicial (θ_i)

Temperatura final (θ_f)

$$\theta_i = 25\ ^\circ\text{C} \quad \theta_f = 125\ ^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta = \theta_f - \theta_i = 125\ ^\circ\text{C} - 25\ ^\circ\text{C} = 100\ ^\circ\text{C}$$

Como:

$$V_{DF} = V_{DI} - \Delta V_D \text{ e;}$$

$$V_{DI} = 600\ \text{mV para o silício}$$

$$V_{DF} = 600 - (100 \times 2,5) = 600 - 250 = 350\ \text{mV} = 0,35\ \text{V}$$

Para minimizar os efeitos da temperatura utiliza-se dissipadores de calor principalmente em diodos para potências maiores ou iguais a $5\ (\text{cinco})\ \text{W}$.

1.3 APROXIMAÇÕES DO DIODO

Ao analisar ou projetar circuitos com diodos se faz necessário conhecer a curva do diodo, mas dependendo da aplicação podem-se fazer aproximações para facilitar os cálculos.

1ª APROXIMAÇÃO (DIODO IDEAL)

Um **diodo ideal** se comporta como um condutor ideal quando polarizado no sentido direto e como um isolante perfeito no sentido reverso, ou seja, funciona como uma chave aberta.

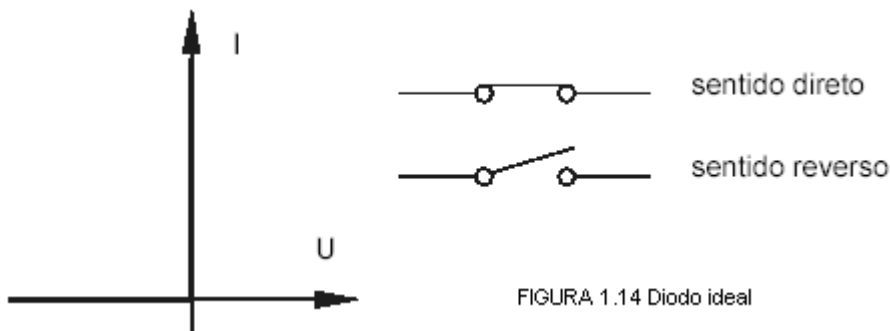


FIGURA 1.14 Diodo ideal

2ª APROXIMAÇÃO (DIODO QUASE IDEAL)

Leva-se em conta o fato de o diodo precisar de $0,7\text{V}$ (potencial de barreira para o Silício) para iniciar a conduzir.

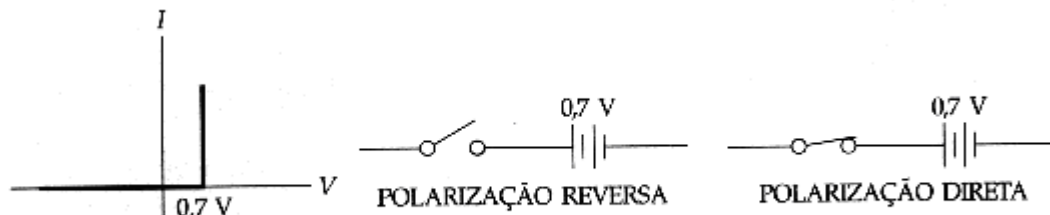


FIGURA 1.15 Curva do diodo e modelo da segunda aproximação

3ª APROXIMAÇÃO (DIODO QUASE REAL)

Na terceira aproximação considera a resistência interna do diodo (resistência de corpo)

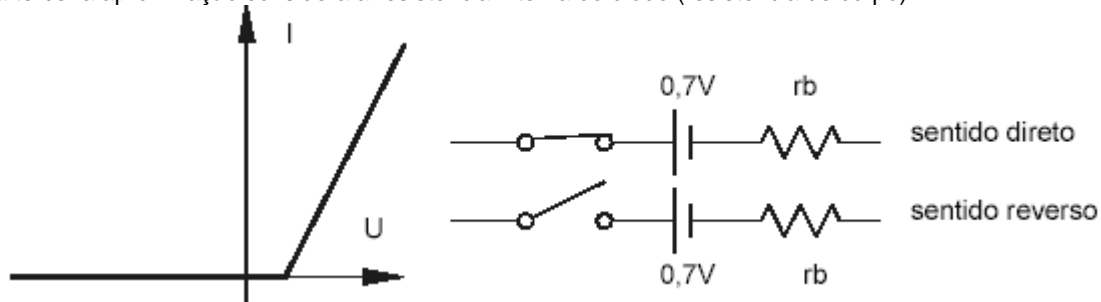


Figura 1.16 Curva e modelo do diodo quase real

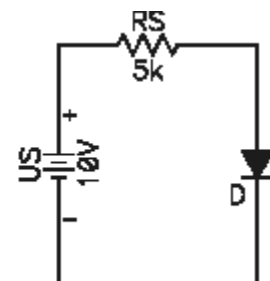
A ESCOLHA DA APROXIMAÇÃO

Que aproximação você deve usar? Se você está fazendo uma verificação de defeito (manutenção) ou uma análise preliminar, os erros são sempre aceitáveis. Por outro lado, se o seu circuito usa resistores de precisão com tolerâncias de um por cento, você deve usar a terceira aproximação. Mas, na maioria das vezes, a segunda aproximação é a melhor escolha. Na maioria das análises teóricas consideramos o diodo ideal.

Exemplo Utilizar a 2ª aproximação para determinar a corrente do diodo no circuito da Figura:

SOL.: O diodo está polarizado diretamente, portanto age como uma chave fechada em série com uma bateria.

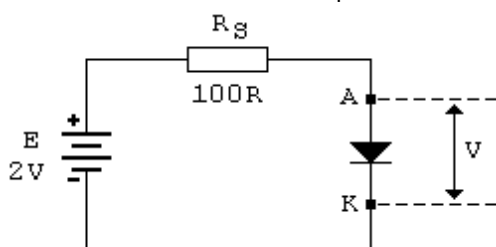
$$I_D = I_{RS} = \frac{U_{RS}}{R_s} = \frac{U_s - U_D}{R_s} = \frac{10 - 0,7}{5k} = 1,86mA$$



1.4 RETA DE CARGA

A reta de carga é um método gráfico através do qual pode-se determinar o ponto de operação de um diodo (tensão e corrente).

Tomemos como exemplo o circuito abaixo:



R_s = resistor limitador de corrente (com R_s maior, menor será a corrente no diodo)

Desta forma, R_s mantém I_D dentro das especificações do diodo.

$$\text{Equação básica: } I = \frac{E - V}{R_s}$$

Figura 1.17

Para traçar a reta de carga de um diodo, devemos levar em conta dois pontos: **saturação** e **corte**.

CONDIÇÃO 1º SATURAÇÃO

$$V = 0$$

$$I = \frac{2 - 0}{100} = 20 \text{ mA}$$

CONDIÇÃO 2º - CORTE

$$V = 2 \text{ V}$$

$$I = \frac{2 - 2}{100} = 0$$

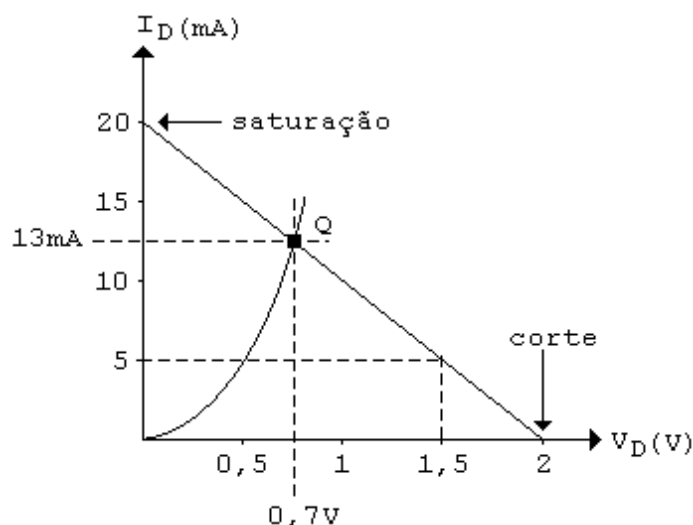


FIGURA 1.18 Retra de carga desenhada sobre as curvas características

Desta forma foram determinados os dois pontos necessários para traçar a reta de carga:

ponto 1: $I = 20\text{mA}$; $V = 0$ (saturação)

Na saturação considera-se o diodo em curto e, portanto, a tensão nos seus extremos será igual a zero.

ponto 2: $I = 0$; $V = 2\text{V}$ (corte)

No corte considera-se o diodo aberto; desta forma não circulará corrente pelo circuito. A tensão entre os pontos A e K será 2 V.

A intersecção entre a reta de carga e a curva do diodo nos fornece o ponto de operação do diodo, também denominado ponto Q (**quiescente**) = quieto.

Analisando o gráfico do nosso exemplo, verificamos que a corrente de operação do diodo é de 13mA e a tensão é 0,7V.

➔ Qual será a tensão no diodo para uma corrente de 5mA?

Analisando o gráfico verificamos que essa tensão é de 1,5V.

Comprovando:

aplicando LKT ➔ $V = E - V_{RS}$, onde $V_{RS} = R_S \cdot I$

logo: $V = 2 - (100 \cdot 0,005) = 2 - 0,5 = 1,5\text{V}$

EXERCÍCIO

Utilizando a 1ª aproximação (diodo ideal), calcule a corrente no resistor de $2\text{k}\Omega$ no circuito da FIGURA 1.19 a seguir.

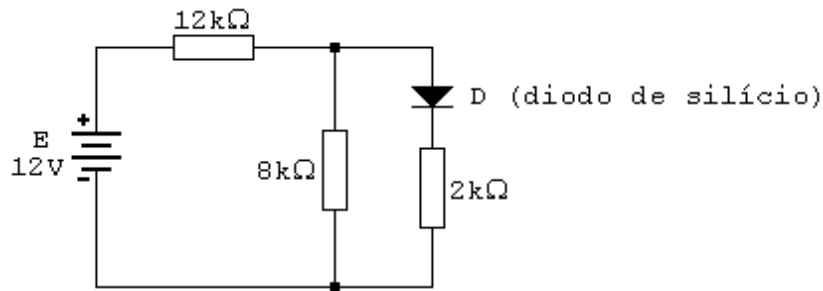


Figura 1.19

RESISTÊNCIA CC DE UM DIODO

É a razão entre a tensão total do diodo e a corrente total do diodo. Podem-se considerar dois casos:

R_D - Resistência CC no sentido direto

R_R - Resistência CC no sentido reverso

RESISTÊNCIA DIRETA

É a resistência quando é aplicada uma tensão no sentido direto sobre o diodo. É variável, pelo fato do diodo ter uma resistência não linear.

Por exemplo, no diodo 1N914 se for aplicada uma tensão de 0,65V entre seus terminais existirá uma corrente $I=10$ mA. Caso a tensão aplicada seja de 0,75V a corrente correspondente será de 30 mA. Por último se a tensão for de 0,85V a corrente será de 50 mA. Com isto pode-se calcular a resistência direta para cada tensão aplicada:

$$R_{D1} = 0,65/10\text{mA} = 65\Omega$$

$$R_{D2} = 0,75/30\text{mA} = 25\Omega$$

$$R_{D3} = 0,85/50\text{mA} = 17\Omega$$

Nota-se que a resistência CC diminui com o aumento da tensão

RESISTÊNCIA REVERSA

Tomando ainda como exemplo o 1N914. Ao aplicar uma tensão de -20V a corrente será de 25nA, enquanto uma tensão de -75V implica numa corrente de 5μA. A resistência reversa será de:

$$R_{R1} = 20/25\text{nA} = 800\text{M}\Omega$$

$$R_{R2} = 75/5\mu\text{A} = 15\text{M}\Omega$$

A resistência reversa diminui à medida que se aproxima da tensão de ruptura.

1.5 CIRCUITOS RETIFICADORES

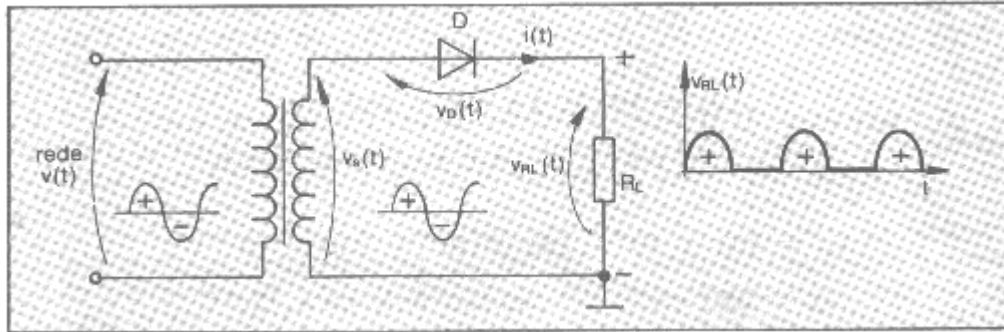
Os circuitos retificadores são usados para converter a corrente e a tensão alternadas em corrente e tensão contínuas, por meio de diodos retificadores de silício ligados nos circuitos das fontes de alimentação dos equipamentos, tais como: receptores de rádio, amplificadores de som, receptores de TV, etc. Para compreender o funcionamento das fontes de tensão é necessário começar pelo estudo dos retificadores de tensão.

RETIFICADOR DE MEIA ONDA

O tipo mais simples de retificador de tensão é o retificador de meia onda.

Na figura, vemos o circuito de um retificador de meia onda, onde está representado também o transformador de força, que tem a função de abaixar (na maioria dos casos) a tensão da rede elétrica a um nível adequado para que se possa construir uma fonte de tensão.

Como se sabe, a tensão da rede ($v(t)$) é alternada, o que resulta numa tensão alternada de menor valor no secundário do transformador ($v_s(t)$). Durante o semiciclo positivo da tensão $v_s(t)$ o diodo D recebe um potencial positivo em seu anodo e conduz, ou seja, o semiciclo positivo da tensão $v_s(t)$ fica aplicado praticamente todo sobre o resistor R_L (carga). A corrente $i(t)$ também possui a mesma forma de onda da tensão $v_s(t)$. Durante o semiciclo negativo da tensão $v_s(t)$ o diodo D recebe um potencial negativo em seu anodo, devido à inversão da tensão alternada. Dessa maneira, o diodo fica bloqueado e a corrente $i(t)$ é igual a zero, sendo igualmente zero a tensão $v_{RL}(t)$. Portanto; todo semiciclo negativo da tensão $v_s(t)$ fica aplicado no diodo D, mantendo a sua polarização reversa, durante este semiciclo.

FIGURA 1.20 Circuito retificador de meia onda com carga resistiva (R_L). Fonte de tensão contínua pulsante

Em suma, durante o semiciclo positivo de $v_s(t)$ o diodo D comporta-se como uma chave fechada e durante o semiciclo negativo como uma chave aberta.

A tensão na carga é contínua pulsante e o valor medido dessa tensão é denominado valor retificado médio (V_{med} ou V_{dc}), que pode ser calculado pela fórmula:

$$V_{med} \text{ ou } V_{dc} = 0,318 (V_p - V_D)$$

onde:

V_p = valor de pico da tensão ou valor máximo da tensão (V_{max})

$V_{med} = V_{dc}$ = valor retificado médio

V_D = queda de tensão direta no diodo (0,55 a 0,7V)

0,318 = constante = $1/\pi$

EXEMPLO: Um retificador de meia onda deve retificar uma tensão de 40Vrms para alimentar uma carga de 500Ω.

Determine:

- valor retificado médio na carga;
- corrente na carga;
- valor máximo da tensão na carga.

Solução:

- devemos calcular o valor máximo da tensão (V_p ou V_{max}):

$$V_p = V_{rms} \cdot 1,41$$

$$V_p = 40 \cdot 1,41 = 56,4V$$

calculando o valor retificado médio na carga:

$$V_m = 0,318 (V_p - V_D)$$

$$V_m = 0,318 (56,4 - 0,7) = 17,71V$$

- a corrente na carga será a corrente média:

$$I_m \text{ ou } I_{dc} = 17,71/500\Omega = 35,42mA$$

- o valor máximo da tensão na carga:

$$V_p - V_D = 56,4 - 0,7 = 55,4V$$

TENSÃO DE TRABALHO DO DIODO:

Na retificação de meia onda a tensão de trabalho do diodo é a própria tensão de pico da tensão a ser retificada, na condição de polarização reversa, conforme ilustra a figura abaixo.

A tensão de trabalho do diodo é normalmente definida como tensão inversa de pico (TIP)

Como o diodo está reversamente polarizado, comporta-se como uma chave aberta e nos seus extremos estará presente o valor de pico da tensão a ser retificada, que no caso é: $40 \cdot 1,41 = 56,4V$.

Como não circula corrente pelo circuito, a tensão nos extremos de R será zero.

FIGURA 1.21

CAPACIDADE DE CORRENTE DIRETA:

Deve ser pelo menos igual a corrente média através do mesmo.

$$I_m \text{ ou } I_{dc} = (V_m \text{ ou } V_{dc}) / R$$

CORRENTE DE PICO ATRAVÉS DO DIODO (I_p):

Deve ser menor do que a corrente de pico especificada pelo fabricante.

$$I_p = (V_p \text{ ou } V_{\max})/R$$

Com o objetivo de filtrar as ondulações da tensão de saída $V_{RL}(t)$, usa-se um capacitor eletrolítico em paralelo com R_L , conforme mostra o circuito da figura 1.22.

A forma de onda da tensão de saída $v_{RL}(t)$ fica agora com menos ondulações, devido à carga do capacitor. Devido à sua capacitância que deve ser elevada, a descarga do capacitor é reduzida, conforme verificamos na figura 16. Portanto, o capacitor eletrolítico é utilizado para filtrar as ondulações da tensão de saída dos circuitos retificadores.

Quanto maior a capacitância de (C), mais o capacitor demora para se descarregar em R_L (carga)

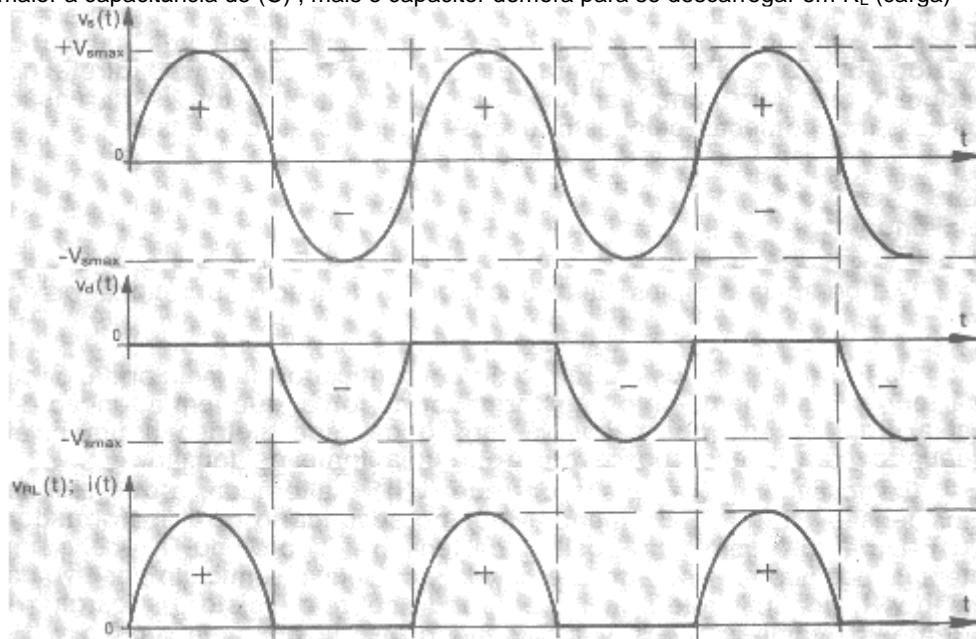


FIGURA 1.21 Formas de onda num circuito retificador de meia onda com carga resistiva

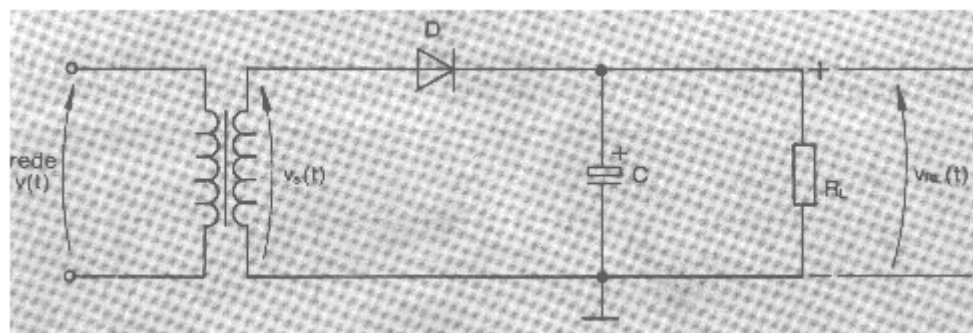


FIGURA 1.22 Retificador de meia onda com capacitor de filtro. Fonte de tensão contínua

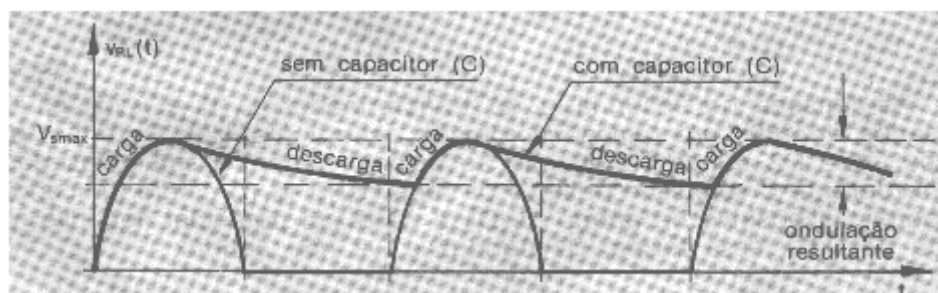


FIGURA 1.23 Forma de onda de V_{RL} com e sem o capacitor

FIGURA 1.24 Aspecto físico do capacitor eletrolítico usado na filtragem

RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA COM CT (CENTER TAP = TOMADA CENTRAL)

O tipo de retificador mais usado é o de onda completa, pois sua eficiência é bem maior que o de meia onda.

Um dos tipos de circuitos retificadores de onda completa é o que usa um transformador cujo secundário possui uma tomada central, que é um ponto neutro do circuito e geralmente aterrado.

Na FIGURA 1.25 temos a representação de um circuito retificador de onda completa com carga resistiva (R_L) e tomada central aterrada.

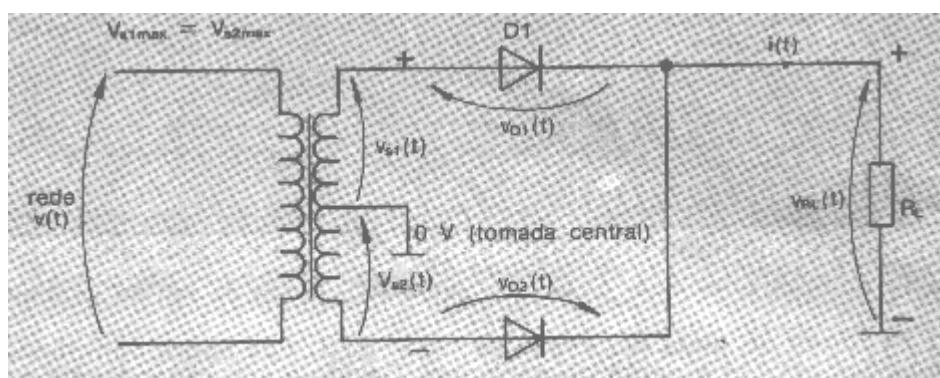


FIGURA 1.25 Retificador de onda completa com trafo. de tomada central e carga resistiva

As tensões no secundário do transformador $v_{s1}(t)$ e $v_{s2}(t)$ estão defasados de 180° em relação à tomada central (neutro). Portanto, os diodos D1 e D2 nunca conduzirão ao mesmo tempo, e sim defasados. Assim, durante o semiciclo positivo da rede ($v(t)$), $v_{s1}(t)$ estará aplicando um potencial positivo no anodo de D1 e $v_{s2}(t)$ um potencial negativo no anodo de D2. Dessa forma, D1 conduz e D2 não conduz.

Durante o semiciclo negativo da rede, teremos $v_{s1}(t)$ aplicando um potencial negativo no anodo de D1, e $v_{s2}(t)$ um potencial positivo no anodo de D2, devido à inversão de polaridade destas duas tensões. Dessa maneira, D1 não conduz e D2 conduz.

Em resumo, durante o semiciclo positivo da tensão da rede, D1 conduz e D2 não conduz, fazendo com que a carga (R_L) receba todo o semiciclo positivo de $v_{s1}(t)$. Durante o semiciclo negativo da tensão da rede, D1 está bloqueado e D2 conduzindo, fazendo com que a carga (R_L) receba todo o semiciclo positivo de $v_{s2}(t)$.

As formas de onda de $v_{s1}(t)$, $v_{s2}(t)$, $v_{D1}(t)$, $v_{D2}(t)$, $v_{RL}(t)$ e $i(t)$ estão representadas na FIGURA 1.27.

Pelos gráficos C e D podemos perceber que durante os períodos em que os diodos D1 e D2 não conduzem, estes recebem duas vezes o valor da tensão máxima do secundário ($2V_{Smax}$). Quando o diodo D1, por exemplo, está cortado, ou seja, quando há uma tensão negativa aplicada ao seu anodo, teremos, ao mesmo tempo, uma tensão positiva aplicada ao catodo, devido ao estado de condução do diodo D2. Por esse motivo, podemos concluir que a diferença de potencial entre o catodo e o anodo é o dobro do valor da tensão máxima do secundário.

Nos circuitos retificadores de onda completa, de maneira geral, a eficiência na retificação é maior porque a carga recebe dois semiciclos positivos de tensão, ao invés de um semiciclo, como no caso de retificadores de meia onda.

A tensão retificada média na carga pode ser calculada pela fórmula:

$$V_m \text{ ou } V_{dc} = 0,637 (V_p - V_D) .$$

onde:

V_p = valor de pico da tensão ou valor máximo da tensão (V_{max})

$V_m = V_{dc}$ = valor retificado médio

V_D = queda de tensão direta no diodo (0,55 a 0,7V)

0,637 = constante = $2/\pi$

EXEMPLO: Dado o circuito abaixo, calcule:

- tensão média na carga;
- corrente média na carga;
- tensão de pico na carga;
- tensão de trabalho nos diodos;
- corrente de pico nos diodos.

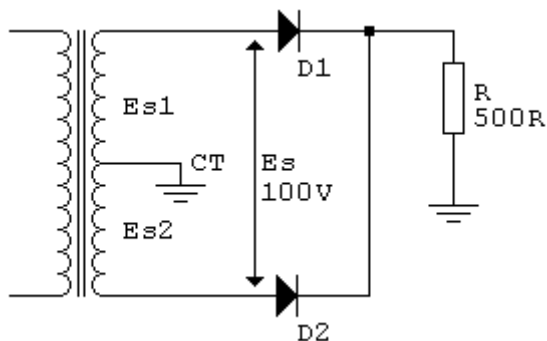


FIGURA 1.26

Solução:

a) tensão média na carga:

como $E_s = 100V$, teremos: $E_{s1} = E_{s2} = 50V$

$$V_m = 0,637 (V_p - V_D) .$$

$$V_p = V_{ef} \cdot 1,41 = 70,5V$$

$$V_m = 0,637 (70,5 - 0,7) .$$

$$V_m = 69,8 \cdot 0,637 = 44,46V$$

b) corrente média na carga:

$$I_m = V_m / R = 44,46 / 500 = 88,92mA$$

c) tensão de pico na carga:

$$TIP = V_p = 69,8$$

d) tensão de trabalho dos diodos:

cada diodo deve suportar no mínimo uma tensão reversa da ordem de 140V

e) corrente de pico nos diodos:

$$I_p = V_p / R = 69,8 / 500 = 139,6mA$$

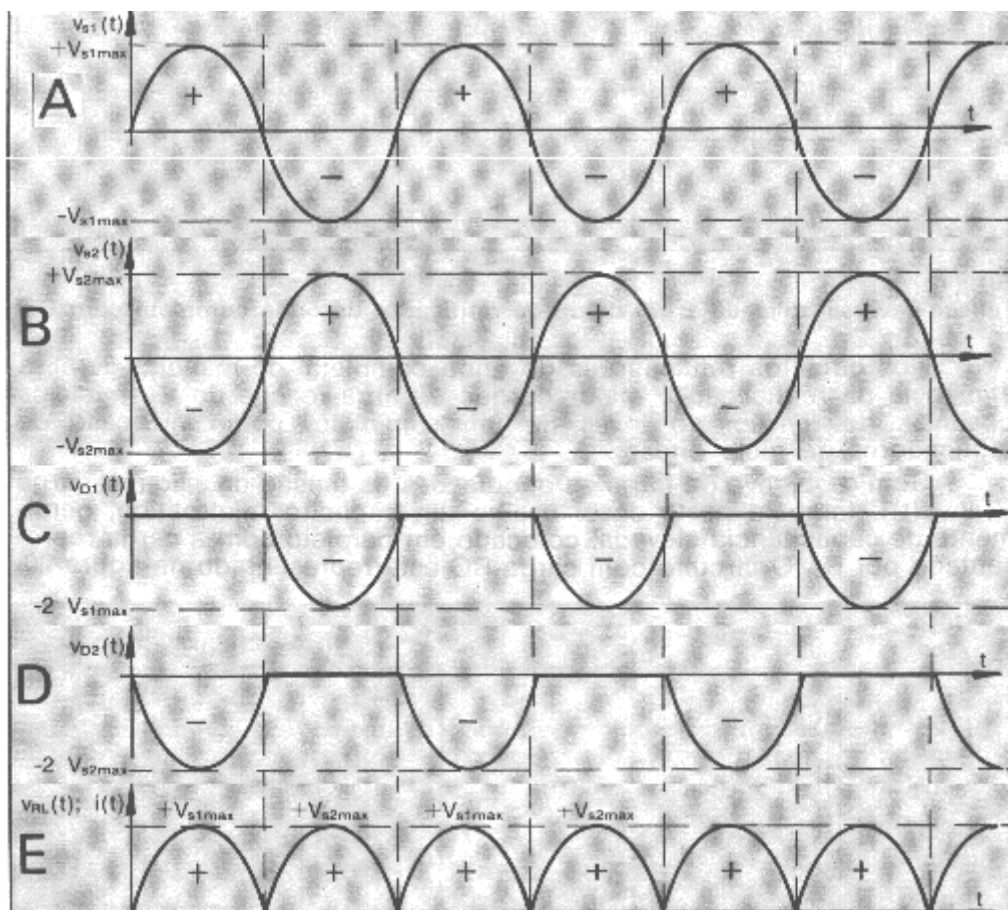


FIGURA 1.27 Formas de onda num circuito retificador de onda completa com tomada central

Com o objetivo de filtrar as ondulações da tensão de saída na carga R_L ($v_{RL}(t)$), também neste caso, usa-se um capacitor eletrolítico, geralmente de capacitância elevada, colocado em paralelo com a carga representada por R_L . O circuito com carga RC está representado na figura 1.28.

A forma de onda da tensão $v_{RL}(t)$ fica agora com menos ondulações, pois como o valor da capacitância (C) é elevado, o capacitor perde somente um pouco de suas cargas elétricas armazenadas, dependendo obviamente do valor de R_L . Assim, podemos concluir que a ondulação da tensão de saída $v_{RL}(t)$ depende da carga R_L e portanto, da corrente elétrica consumida ($i(t)$).

Quando o consumo $i(t)$ é aumentado, a ondulação na tensão de saída também aumenta.

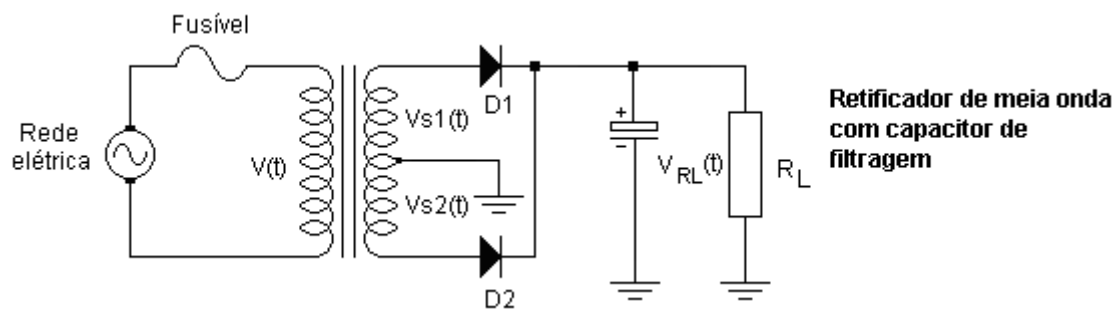


FIGURA 1.28

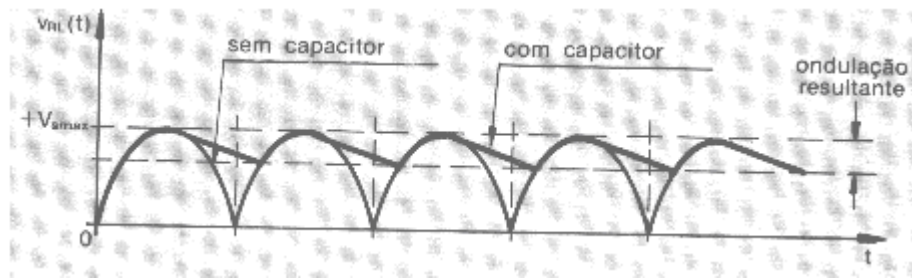


FIGURA 1.29 Forma de onda do retificador de onda completa

RETIFICAÇÃO DE ONDA COMPLETA EM PONTE DE DIODOS:

A grande vantagem da retificação de onda completa em ponte deve-se ao fato de não ser necessário utilizar dois sinais de amplitudes iguais defasados 180° entre si; isto significa que se pode obter uma retificação de onda completa a partir tanto da rede domiciliar quanto de transformador abaixador sem CT.

O circuito básico é mostrado na figura abaixo.

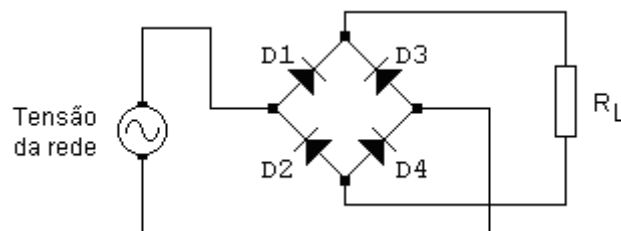


FIGURA 1.30 Retificador de onda completa em ponte

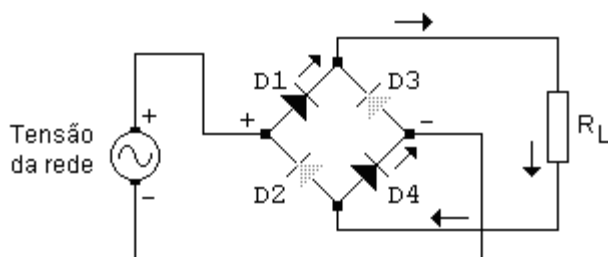
A análise do funcionamento de um retificador de onda completa baseia-se, como nos casos anteriores, no chaveamento eletrônico dos diodos.

Deve ser levado em consideração tanto semiciclo positivo como o negativo da tensão alternada a ser retificada.

Durante o semiciclo positivo os diodos D1 e D4 estarão conduzindo por estarem diretamente polarizados, enquanto que D2 e D3 estarão cortados.

Durante o semiciclo negativo os diodos D2 e D3 estarão conduzindo e D1 e D4 estarão cortados.

Veja nas figuras abaixo as ilustrações do que foi dito acima, para uma melhor compreensão.

SEMICICLO POSITIVO

D1 e D4 conduzindo; D2 e D3 cortados.

Observa-se que os diodos D1 e D4 ficam em série com a carga.

$$\text{Então } V_D = V_{D1} + V_{D4}$$

TIP = V_p (tensão de pico inversa)

FIGURA 1.31

D2 e D3 conduzindo; D1 e D4 cortados.

Neste caso, os diodos D2 e D3 estão em série com a carga.

$$\text{Então } V_D = V_{D2} + V_{D3}$$

TIP = V_p

FIGURA 1.32

A forma da tensão na carga é mostrada na FIGURA 1.33 abaixo.

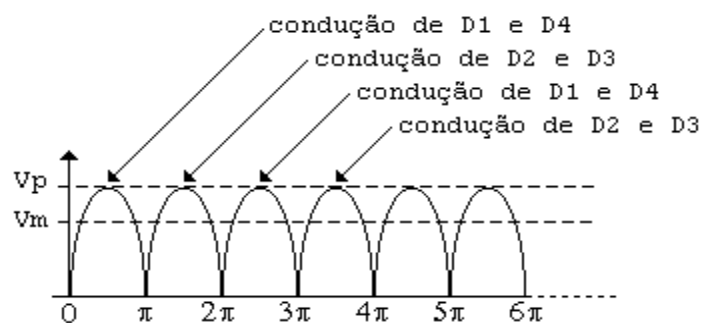


FIGURA 1.33

Na FIGURA 1.34 abaixo, temos o circuito retificador em ponte com o capacitor de filtro adicionado.

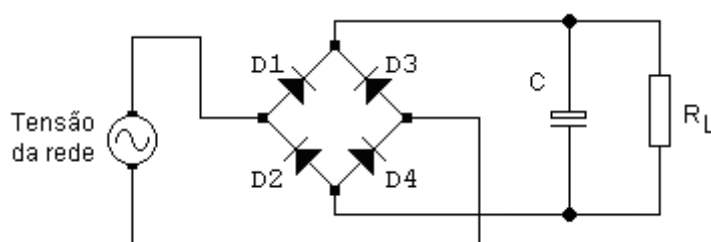


FIGURA 1.34

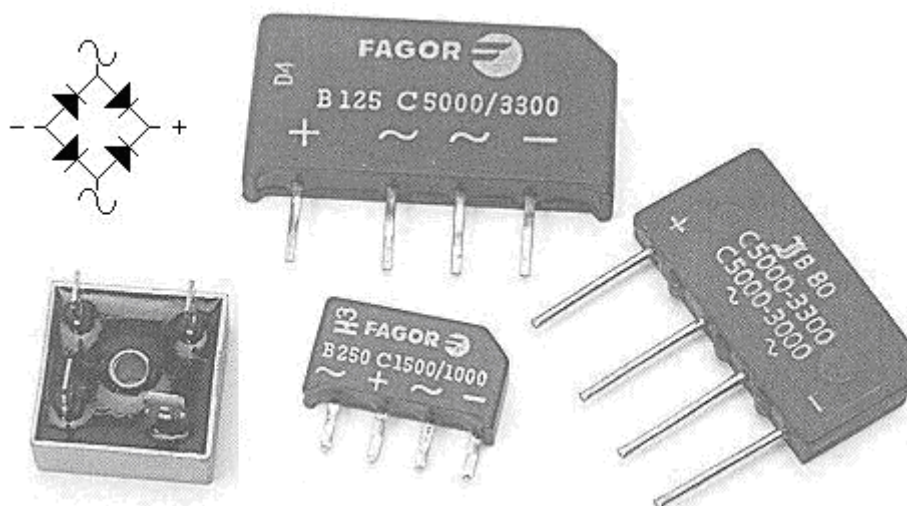


FIGURA 1.35 Aspecto físico de pontes de diodo em um único invólucro

O valor retificado médio na carga pode ser calculado pela fórmula:

$$V_m \text{ ou } V_{dc} = 0,637 (V_p - 2V_D) .$$

EXEMPLO: Calcule a tensão e potência médias em uma carga de 500Ω , em um retificador de onda completa em ponte, cuja tensão de entrada é 50Vrms.

Solução:

valor de pico da tensão a ser retificada: $50 \cdot 1,41 = 70,5V$

$V_m = 0,637 (70,5 - 1,4) = 44,02V$

$P_m (\text{carga}) = (44,02)^2 / 500 = 3,88W$

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

1 - No circuito da FIGURA 1.36 abaixo, calcule:

- tensão retificada média na carga;
- corrente média na carga;

c) potência na carga.

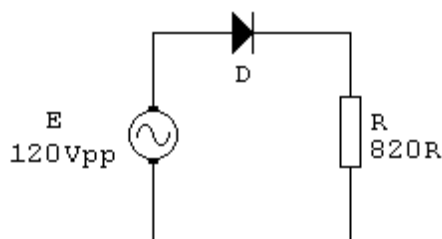


FIGURA 1.36

2 - No circuito a seguir, sabe-se que a tensão $E_s = 116V$. Calcule:

- a tensão retificada média na carga;
- a corrente na carga;
- a potência na carga;
- qual será a tensão média na carga se o diodo D1 abrir?

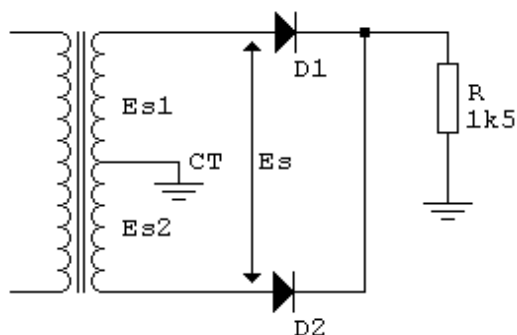


FIGURA 1.37

1.6 - DIODO ZENER

O diodo zener é equivalente a uma fonte de tensão CC, quando operando na região de ruptura, isto é, podemos considerá-lo como uma fonte CC com uma pequena resistência interna.

Sua principal vantagem é manter a tensão nos seus terminais aproximadamente constante. Seu símbolo é mostrado abaixo:



FIGURA 1.38 Símbolo do diodo Zener

A figura 1.39 abaixo mostra a curva característica de um diodo zener (gráfico I/V), onde na região de polarização direta, começa a conduzir por volta de 0,7V, como se fosse um diodo comum.

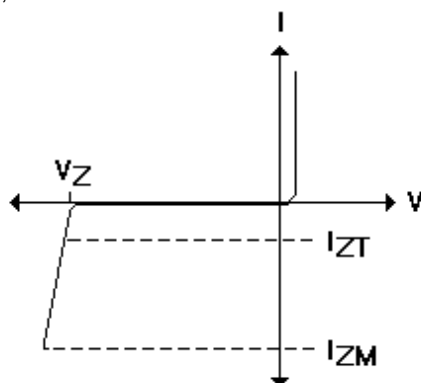


FIGURA 1.39

Na região reversa, observa-se que na ruptura o joelho (V_Z) é bastante pronunciado, seguido de um aumento de corrente praticamente vertical. Podemos observar também que a tensão é praticamente constante (aproximadamente igual a V_Z em quase toda a região de ruptura. O valor de V_Z é geralmente especificado para uma determinada corrente de teste I_{ZT} .

A potência dissipada por um diodo zener é dada pela fórmula:

$$P_Z = V_Z I_Z$$

Por exemplo, se $V_Z = 6,2V$ e $I_Z = 12\text{ mA}$, então: $P_Z = 6,2V \times 12\text{mA} = 74,4\text{mW}$.

Desde que a potência não seja ultrapassada, o diodo zener pode operar dentro da região de ruptura sem ser destruído.

Muitas vezes na especificação do fabricante inclui-se também a corrente máxima que um diodo pode suportar, em função da máxima potência que o mesmo pode suportar. Assim:

$$I_{ZM} = P_{ZM} / V_Z$$

onde:

I_{ZM} = máxima corrente de zener especificada

P_{ZM} = potência especificada

V_Z = tensão de zener

Se quisermos saber a corrente especificada de um diodo zener de 6,2V com uma especificação de potência de 500 mW, então:

$$I_{ZM} = 500\text{ mW} / 6,2\text{ V} = 80,6\text{ mA}$$

Isto significa que, se houver uma resistência limitadora de corrente suficiente para manter a corrente de zener abaixo de 80,6 mA, o diodo zener pode operar dentro da região de ruptura sem se danificar.

Levando-se em conta uma tolerância de 10% (por exemplo), acima ou abaixo do valor de 6,2V, então é aconselhável para maior segurança recorrer ao procedimento abaixo:

$$I_{ZM} = 500\text{ mW} / 6,2V(x\ 1,1) = 73,3\text{ mA}$$

Quando um diodo zener está operando na região de ruptura, um aumento na corrente produz um ligeiro aumento na tensão. Isto significa que o diodo zener tem uma pequena resistência, que também é denominada impedância zener (Z_{ZT}), também referenciada à corrente de teste I_{ZT} para medir V_Z . Assim por exemplo, para um diodo fictício 1NZX45, com as especificações $V_{ZT} = 12\text{ V}$; $I_{ZT} = 20\text{ mA}$ e $Z_{ZT} = 5\ \Omega$, indica que o diodo zener tem uma tensão de 12V e uma resistência de 5 Ω para uma corrente de 20 mA.

REGULAÇÃO DE TENSÃO

Para melhor compreendermos o princípio de funcionamento de um diodo zener, vejamos o seguinte problema prático:

Um rádio transistorizado que funciona com uma tensão de 6 V (CC), necessita ser alimentado por uma bateria de 12 V (CC). Sabe-se, também que o rádio consome uma corrente de 48 mA quando o volume sonoro de seu alto-falante é moderado. É importante observar que o rádio não deve ser ligado diretamente à bateria de 12 V, pois assim ele seria danificado. Assim, ligamos um resistor (R) em série com a bateria, conforme a figura.

O resistor (R) é utilizado para provocar uma queda de tensão igual a 6 V, pois os 12 V da bateria menos os 6 V de queda no resistor (R) resultam numa tensão de 6 V para o rádio. De acordo com a Lei de Ohm, temos que:

$$E = R \times I$$

portanto, o resistor R pode ser assim calculado:

$$R = E / I = 6 / (48 \times 10^{-3}) = 125\ \Omega$$

Colocando o potenciômetro do rádio para o máximo volume, a intensidade de corrente (I) consumida pelo aparelho será maior. Supondo $I = 72\text{ mA}$, teremos no resistor:

$E = R \times I = 125 \times 72 \times 10^{-3} = 9\text{ V}$, sobrando apenas 3 V para o rádio. Certamente o rádio não vai funcionar de maneira satisfatória, podendo apresentar um som bastante distorcido.

Colocando o potenciômetro do rádio para o mínimo volume, a intensidade de corrente (I) consumida agora será, mínima. Supondo $I = 24\text{ mA}$, teremos no resistor uma queda de tensão igual a: $E = R \times I = 125 \times 24 \times 10^{-3} = 3\text{ V}$, sobrando para o rádio uma tensão de 9 V, que por ser muito elevada e poderá danificá-lo também.

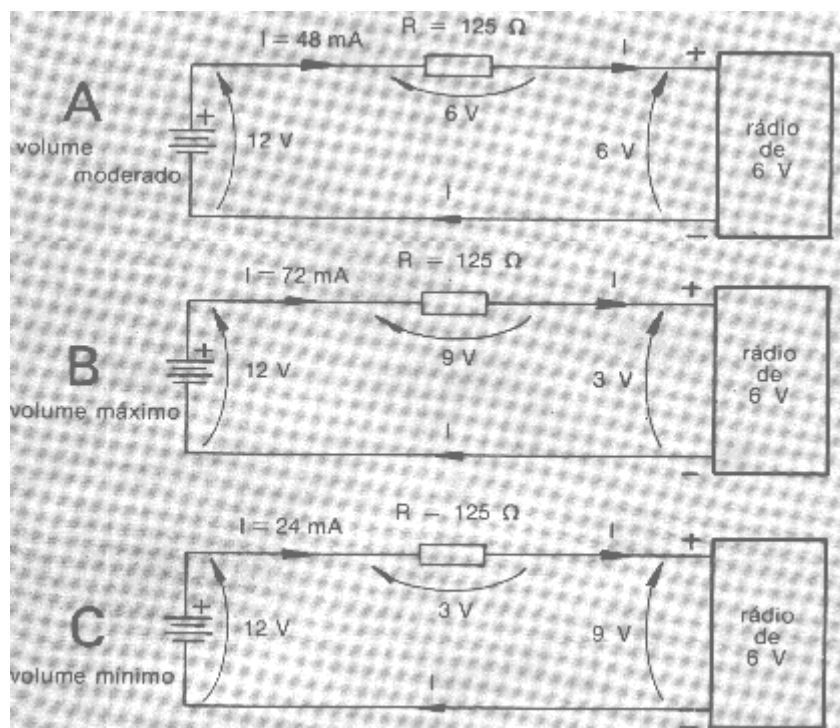


FIGURA 1.40 Alimentação de um rádio para 6 V com uma bateria de 12 V

A conclusão que se chega é que a tensão aplicada ao rádio não é constante e varia conforme o ajuste efetuado no volume do receptor. Para solucionar este problema, empregamos um diodo zener para estabilizar a tensão em 6 V, conforme ilustra os circuitos da figura 1.41.

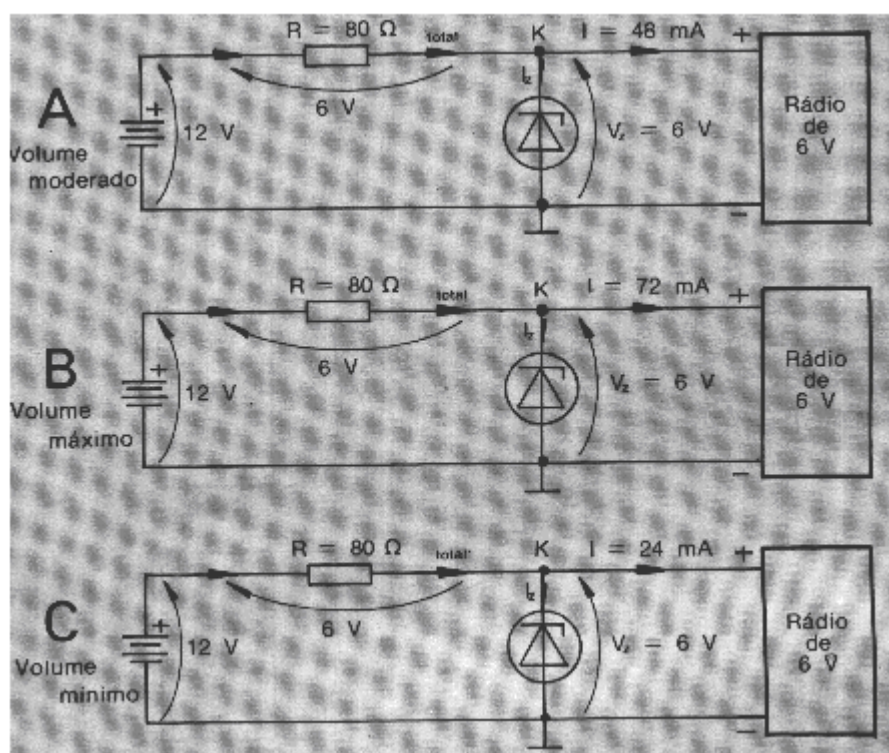


FIGURA 1.41 Exemplo de aplicação do diodo zener como estabilizador de tensão

Como exemplo, vamos supor que o diodo zener mantém para uma corrente (I_z) de 27 mA, 6 V de tensão entre seus terminais, conforme mostra a figura A.

Para a situação de volume moderado, no ponto K do circuito da figura 1.41 A, temos:

$$I_T = I_z + I$$

sendo que:

$$I = 48 \text{ mA}$$

$$I_z = 27 \text{ mA}$$

$$\text{Assim, } I_T = 27 \times 10^{-3} + 48 \times 10^{-3} = 75 \times 10^{-3} \text{ A} = 75 \text{ mA}$$

Portanto, a corrente que circula através do resistor R é igual a 75 mA. Como a queda de tensão em R deve ser de 6 V, temos que:

$$R = 6 / I_T = 6 / (75 \times 10^{-3}) = 80 \Omega$$

Para a situação de volume máximo (máximo consumo), a corrente I é igual a 72 mA, conforme mostra a figura 1.41 B.

A tensão da bateria é constante e vale 12 V. O diodo zener mantém sua tensão constante $V_z = 6 \text{ V}$. Portanto, a tensão sobre o resistor de 80Ω também será constante, sendo igual a 6 V. Dessa maneira, a corrente I_T , que o atravessa, também será constante no valor de 75 mA.

No ponto K, temos:

$$I_T = I + I_z$$

Como $I = 72 \text{ mA}$ e $I_T = 75 \text{ mA}$, obteremos:

$$I_z = I_T - I = 75 \times 10^{-3} - 72 \times 10^{-3} = 3 \times 10^{-3} \text{ A} = 3 \text{ mA}$$

Para a situação de volume mínimo (mínimo consumo de corrente), a corrente I é igual a 24 mA, conforme mostra a figura 1.41 C. Como I_T é constante e vale 75 mA e $I = 24 \text{ mA}$, temos:

$$I_z = 75 \times 10^{-3} - 24 \times 10^{-3} = 51 \times 10^{-3} \text{ A} = 51 \text{ mA}$$

Portanto o diodo zener mantém sua tensão $V_z = 6 \text{ V}$, mesmo que sua corrente I_z varie entre 3 mA (I_z mínimo) e 51 mA (I_z máximo).

Como podemos notar, o diodo zener fez com que a tensão aplicada ao rádio se mantivesse constante ($V_z = 6 \text{ V}$), apesar da variação da corrente elétrica consumida pelo aparelho, situada entre 24 mA (consumo mínimo) e 72 mA (consumo máximo).

Cada tipo de diodo zener possui um determinado valor de tensão zener (V_z): Todavia, na prática, o valor dessa tensão varia ligeiramente com a corrente, pois como pode ser visto na figura 31, a curva característica do diodo zener não é exatamente vertical. No comércio há uma grande variedade de diodo zener para as mais variadas aplicações. Encontramos diodos com tensões zener (V_z) desde 3,1 V até 100 V (por exemplo: 5,1 V; 6,2 V; 7,5 V; 12 V; 27 V; 68 V; 91 V, etc.).

Os diodos zener possuem dois valores limites para sua corrente I_z :

a) **corrente mínima** ($I_{z \min}$) - que corresponde ao "joelho" (ponto A) da curva característica. Caso a intensidade de corrente que o atravessa seja menor que $I_{z \min}$ (3 mA, no exemplo dado), o diodo não mais funcionará como estabilizador de tensão.

b) **corrente máxima** ($I_{z \max}$) - que é limitada pela máxima dissipação de potência que o diodo é capaz de suportar. Se a corrente que atravessa o diodo tiver uma intensidade superior a $I_{z \max}$ (51 mA, no exemplo dado), o diodo será danificado por um aquecimento excessivo.

O limite da potência dissipada é muito importante, pois a passagem da corrente elétrica (I_z) através de um diodo zener produz um aquecimento na junção, devido à transformação da energia elétrica em calor. Desta forma, os diodos zener encontrados no comércio são divididos em "séries", de acordo com a máxima dissipação de potência ($P_{z \max}$), compreendidos entre 400 mW até 75 W.

Um tipo de diodo zener muito usado na prática, é o BZX79-C6V2 de fabricação nacional, da série de 400 mW ($P_{z \max}$), com tensão zener (V_z) de 6,2 V.

Conforme pode-se ver, a principal aplicação dos diodos zener é na estabilização de tensões. No circuito da figura 1.42, por exemplo, o diodo zener (Dz) faz com que a tensão aplicada no resistor de carga R_L permaneça constante, desde que a tensão de entrada (rede elétrica) varie dentro de certos limites. Caso a tensão da rede elétrica aumente, a tensão contínua sobre a carga R_L , tenderá a aumentar, fazendo com que o diodo zener conduza mais corrente, de modo a aumentar a queda de tensão sobre o resistor R_1 e, assim, manter constante a tensão sobre R_L , compensando o aumento inicial.

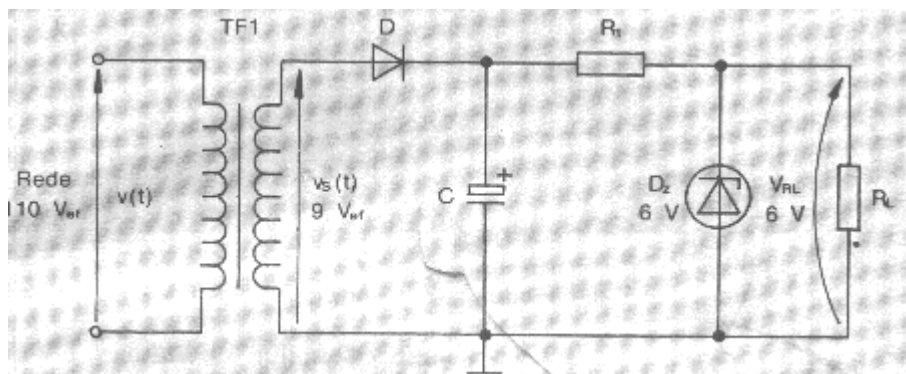


FIGURA 1.42

Por outro lado, caso a tensão da rede elétrica diminua, a tensão sobre R_L tenderá a diminuir, neste caso, o diodo zener irá conduzir menos corrente, de maneira a diminuir a queda de tensão sobre o resistor R_1 e assim, manter constante a tensão sobre R_L , compensando a variação da tensão de entrada.

1.7 - DIODO LED

Este componente eletrônico de estado sólido é um diodo, que polarizado diretamente, emite luz. A sigla LED vem do inglês **Light Emitter Diode** e significa **Diodo Emissor de Luz**.

Na figura 1.43 temos os símbolos mais usados para representar um diodo emissor de luz (LED).

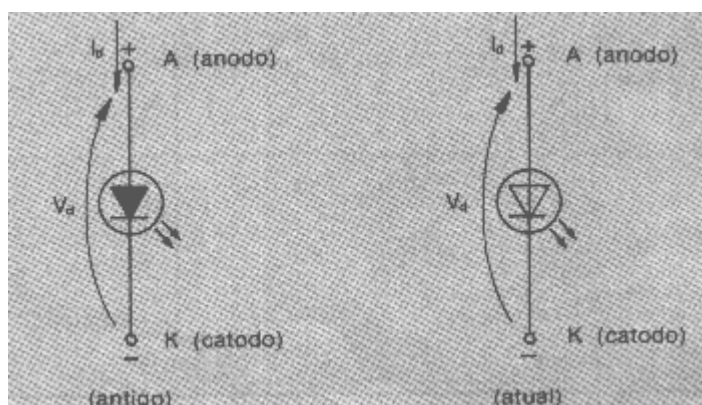


FIGURA 1.43 Símbolos do diodo led

O diodo LED também é constituído por uma junção PN, que no caso é a responsável pela emissão de radiação luminosa. A junção PN possui uma substância química chamada arseneto de gálio (GaAs) que é responsável pelo nível de emissão luminosa desta junção.

A emissão de luz pela junção PN, ocorre devido ao efeito da recombinação entre os elétrons e as lacunas do material semicondutor. As radiações emitidas pelos diodos LED situam-se no espectro visível e a frequência da radiação luminosa depende das substâncias utilizadas na junção PN. Variando-se as substâncias utilizadas teremos diodos LED de cores diferentes, ou seja, vermelhos, verdes, azuis e amarelos. Existem ainda os diodos LED infravermelhos, cuja radiação luminosa não é visível.

O rendimento da emissão luminosa depende basicamente da corrente direta (I_D) que atravessa o diodo LED. Esse rendimento é a relação entre a intensidade luminosa emitida e a corrente elétrica (I_D) que produz a emissão de luz. Na prática, utiliza-se uma corrente direta (I_D) entre 10 mA e 20 mA.

A tensão direta (V_D), que varia de 1,4 a 2,5 V, é a diferença de potencial entre o anodo (A) e o catodo (K) e nesta situação, o diodo LED liga emitindo luz.

O diodo LED não conduz quando polarizado reversamente, também não emite luz.

Nas aplicações práticas dos diodos LED, deve-se utilizar um resistor em série, para limitar a corrente direta (I_D).

Na figura 1.44, temos um exemplo de como ligar um LED, para ele funcione normalmente.

EXEMPLO:

Vamos supor que: $E = 12\text{ V}$, $V_D = 1,4\text{ V}$ e $I_D = 15\text{ mA}$. Neste caso, $I_D = I = 15\text{ mA}$ e podemos determinar o valor de R , assim:

$$\begin{aligned} V_R + V_D &= E \quad \text{e} \quad V_R = R \cdot I_D \\ V_R &= E - V_D \\ R &= V_R / I_D \end{aligned}$$

Substitua os valores e faça os cálculos.

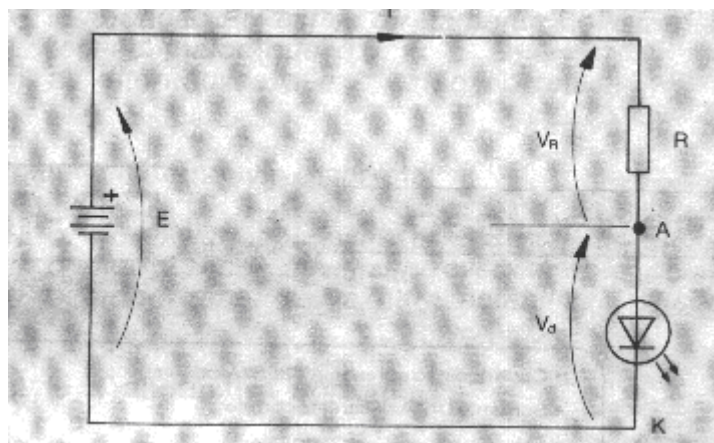


FIGURA 1.44 Modo correto de ligar um led

Os diodos LED também podem funcionar em circuitos de corrente alternada e, neste caso, deve-se ligar em paralelo e em oposição ao LED, um diodo retificador de junção. Isso irá proteger o LED nos semiciclos em que este é polarizado no sentido inverso, uma vez que a sua máxima tensão inversa é bastante reduzida, da ordem de 3 V. Veja a figura 1.45 .

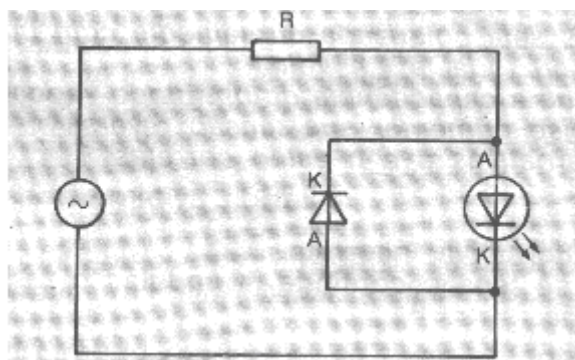
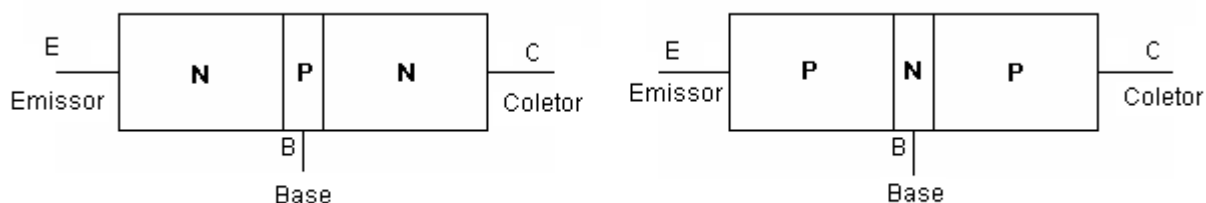


FIGURA 1.45 Led ligado a uma fonte CA

2 - TRANSISTOR BIIPOLAR

Existe uma infinidade de sinais de interesse em eletrônica que são muitos fracos, como por exemplo, as correntes elétricas que circulam no corpo humano, o sinal de saída de uma cabeça de gravação, etc., e para transformá-los em sinais úteis torna-se necessário amplificá-los. Antes da década de 50 do século passado, a válvula era o elemento principal nesta tarefa. Em 1948, foi inventado o transistor. Ele foi desenvolvido a partir da tecnologia utilizada no diodo de junção, como uma alternativa em relação às válvulas, para realizar as funções de amplificação, detecção, oscilação, comutação, etc. A partir daí o desenvolvimento da eletrônica foi extraordinária.

Dentre todos os transistores, o bipolar é muito comum, com semelhanças ao diodo estudado anteriormente, com a diferença de o transistor ser formado por duas junções PN, enquanto o diodo por apenas uma junção.



Estrutura dos transistores NPN e PNP

Figura 2.1 Transistores NPN e PNP

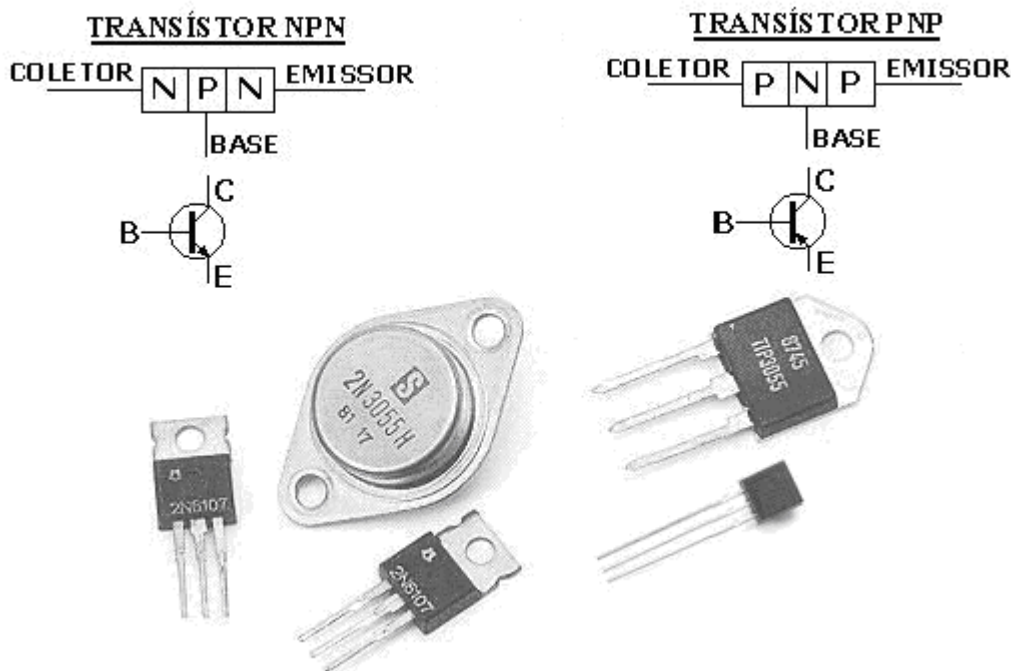


Figura 2.2 Simbologia e aspecto físico de alguns transistores

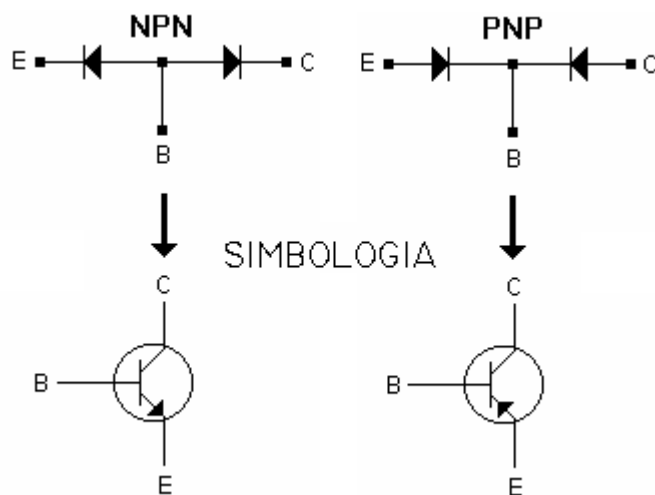


Figura 2.2 Símbolo dos transistores NPN e PNP

2.1- FUNCIONAMENTO DE TRANSISTORES BIPOLARES

O transistor bipolar é constituído por três materiais semicondutor dopado. Dois cristais tipo n e um tipo p ou dois cristais tipo p e um tipo n. O primeiro é chamado de transistor NPN e o segundo de PNP. Na Figura 2.2 são mostrados de maneira esquemática os dois tipos.

Cada um dos três cristais que compõe o transistor bipolar recebe o nome relativo à sua função. O cristal do centro recebe o nome de base, pois é comum aos outros dois cristais, é levemente dopado e muito fino. Um cristal da extremidade recebe o nome de emissor por emitir portadores de carga, é fortemente dopado e finalmente o último cristal tem o nome de coletor por receber os portadores de carga, tem uma dopagem média.

Os cristais coletor e emissor diferem entre si no tamanho e dopagem. O transistor tem duas junções, uma entre o emissor a base, e outra entre a base e o coletor. Por causa disso, um transistor se assemelha a dois diodos. O diodo da esquerda é comumente designado diodo emissor - base (ou só emissor) e o da direita de coletor - base (ou só coletor).

Será analisado o funcionamento do transistor NPN. A análise do transistor PNP é similar ao do NPN, bastando levar em conta que os portadores majoritários do emissor são lacunas em vez dos elétrons livres. Na prática isto significa tensões e correntes invertidas se comparadas com o NPN.

2.2 - TRANSISTOR NÃO POLARIZADO

A difusão dos elétrons livres através da junção produz duas camadas de depleção. Cada camada tem aproximadamente uma barreira potencial de 0,7V (silício) em 25°C.

Com os diferentes níveis de dopagem de cada cristal, as camadas de depleção tem larguras diferentes. Tanto maior a largura quanto menor a dopagem. Ela penetra pouco na região do emissor, bastante na base e médio na região do coletor.

3. POLARIZAÇÃO DO TRANSISTOR NPN

As junções do transistor podem ser polarizadas diretamente ou reversamente.

JUNÇÕES COM POLARIZAÇÃO DIRETA

Na Figura 3.1 a bateria B1 polariza diretamente o diodo emissor, e a bateria B2 polariza diretamente o diodo coletor. Os elétrons livres entram no emissor e no coletor, juntam-se na base e retornam para as baterias. O fluxo de corrente elétrica é alto nas duas junções.

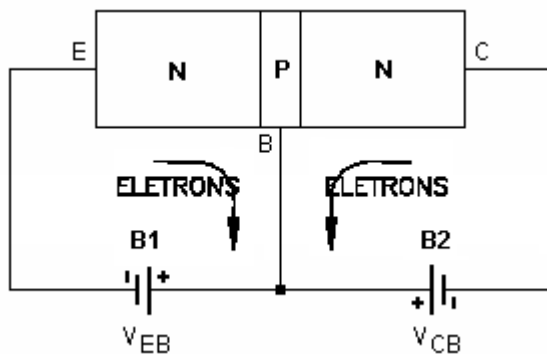


Figura 3.1

JUNÇÕES COM POLARIZAÇÃO REVERSA

Na Figura 3.2 os diodos emissor e coletor ficam reversamente polarizado. A corrente elétrica circulando é pequena (corrente de fuga).

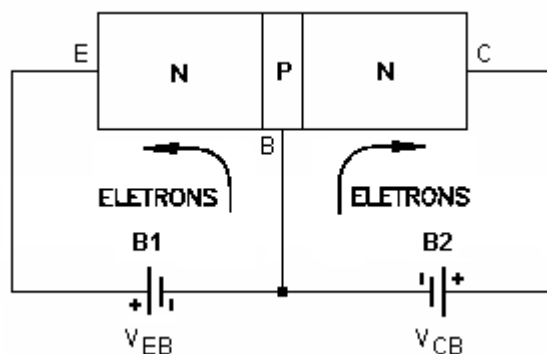


Figura 3.2

JUNÇÕES COM POLARIZAÇÃO DIRETA - REVERSA

Na Figura 3.3 o diodo coletor está reversamente polarizado e diodo emissor diretamente polarizado. A princípio espera-se uma corrente de fuga no diodo coletor e uma alta corrente no diodo emissor. No entanto isto não acontece, nos dois diodos as correntes são altas.

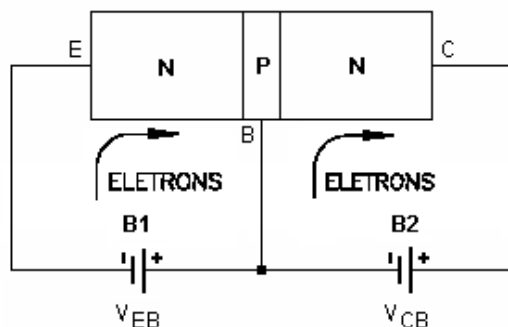


Figura 3.3

No instante em que a polarização direta é aplicada ao diodo emissor, os elétrons do emissor ainda não penetraram na região da base. Se a tensão entre base e emissor (V_{BE}) for maior que 0,7V, muitos elétrons do emissor penetram na região da base. Estes elétrons na base podem retornar ao pólo negativo da bateria B1, ou atravessar a junção do coletor passando a região do coletor. Os elétrons que a partir da base retornam a bateria B1 são chamados de corrente de recombinação. Ela é pequena porque a base é pouco dopada.

Como a base é muito fina, grande parte dos elétrons da base passam a junção base coletor.

Esta junção, polarizada reversamente, dificulta a passagem dos portadores majoritários do cristal de base (lacunas) para o coletor, mas não dos elétrons livres.

Esses atravessam sem dificuldade a camada de depleção penetram na região de coletor. Lá os elétrons livres são atraídos para o pólo positivo da bateria B2.

Em suma, com a polarização direta do diodo emissor, é injetado uma alta corrente em direção a base. Na base uma pequena parcela da corrente, por recombinação, retorna ao pólo negativo da bateria B1 e o restante da corrente flui para o coletor e daí para o pólo positivo da bateria B2. Ver Figura 3.4.

Obs. Considerar a tensão coletor - base (V_{CB}) bem maior que a tensão emissor – base (V_{BE}).

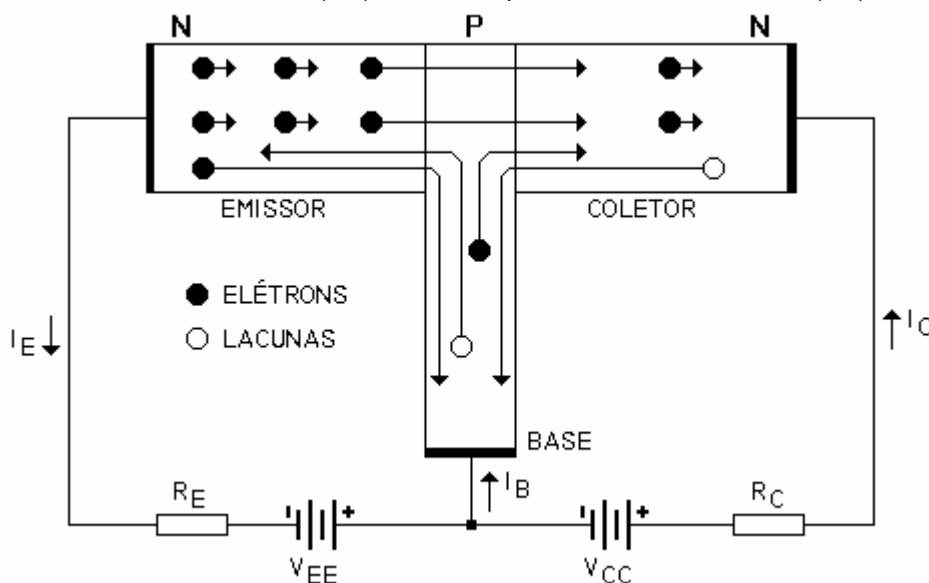


Figura 3.4

TRANSISTOR PNP

No transistor PNP as regiões dopadas são contrárias as do transistor NPN. Isso significa que as lacunas são portadores majoritários no emissor em vez dos elétrons livres.

O funcionamento é como a seguir. O emissor injeta lacunas na base. A maior parte dessas lacunas circula para o coletor. Por essa razão a corrente de coletor é quase igual a do emissor. A corrente de base é muito menor que essas duas correntes.

Qualquer circuito com transistor NPN pode ser convertido para uso de transistor PNP. Basta trocar os transistores, inverter a polaridade da fonte de alimentação, os diodos e capacitores polarizados. E o funcionamento será idêntico ao modelo NPN.

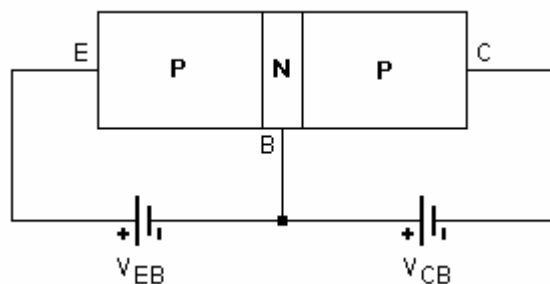


Figura 3.5

Considerando esta similaridade, neste curso os circuitos analisados são sempre os com transistores NPN.

3.1 AS CORRENTES NO TRANSISTOR

Figura 3.6 mostra o símbolo esquemático para um transistor NPN e PNP. A diferenciação no símbolo esquemático é feito através da seta no pino do emissor. A direção da seta mostra o fluxo de corrente convencional. Na figura é mostrado também o sentido das correntes convencionais I_B , I_C e I_E .

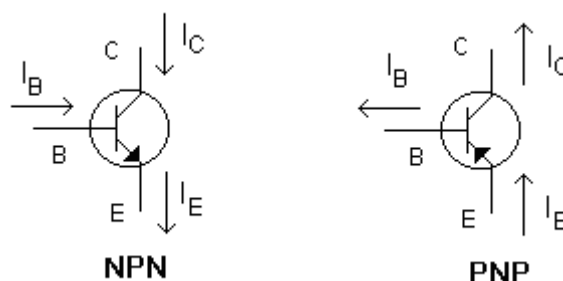


Figura 3.6

A lei de correntes de **Kirchhoff** diz que a soma de todas as correntes que entram num nó é igual a soma das que saem. Então:

$$I_E = I_C + I_B$$

A relação entre a corrente contínua de coletor e a corrente contínua de base é chamada de ganho de corrente ou β_{CC} :

$$\beta_{CC} = I_C / I_B$$

Em geral mais de 95% dos elétrons livres atingem o coletor, ou seja, a corrente de emissor é praticamente igual a corrente de coletor. O parâmetro α_{CC} de um transistor indica a relação entre a corrente de coletor corrente a e de emissor:

$$\alpha_{CC} = I_C / I_E$$

Quanto mais fina e levemente dopada a base, mais alto o α_{CC} .

Pode-se relacionar o α_{CC} com o β_{CC} :

$$\beta_{CC} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad \alpha_{CC} = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

3.2 TESTE DE DIODOS E TRANSISTORES.

Uma maneira simples é mostrada a seguir para se testar diodos e transistores utilizando um ohmímetro.

Teste de funcionamento de um diodo com um ohmímetro.

1. Encosta-se a ponta de prova negativa no cátodo
2. Encosta-se a ponta de prova positiva no ânodo
O ohmímetro deve indicar resistência baixa.
3. Inverte-se as pontas de provas, a resistência deve ser alta.

Teste de funcionamento de um transistor NPN com um ohmímetro

1. Encosta-se a ponta de prova negativa na base do transistor
2. Encosta-se a ponta de prova positiva no coletor do transistor
O ohmímetro deve indicar resistência alta.

3. Muda-se a ponta de prova positiva para o emissor do transistor
O ohmímetro deve indicar resistência alta.
4. Invertem-se as pontas de provas, isto é, encosta-se a positiva na base e repete os itens 2 e 3. As resistências devem ser baixas.

Isto é válido para os multímetros digitais. Em geral, nos multímetros analógicos, a ponta de prova positiva está ligada ao pólo negativo da bateria.

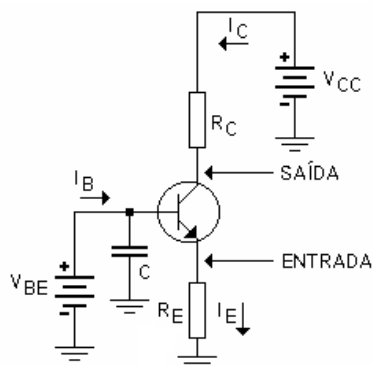
3.3 CONFIGURAÇÕES BÁSICAS:

Os transistores podem ser ligados em três configurações básicas: base comum (BC), emissor comum (EC) e coletor comum (CC). Essas denominações relacionam-se aos pontos onde o sinal é injetado e retirado, ou ainda, qual dos terminais do transistor é referência para a entrada e saída de sinal.

BASE COMUM:

No circuito da figura 3.7, observa-se que o sinal é injetado entre emissor e base e retirado entre coletor e base.

Desta forma, pode-se dizer que a base é o terminal comum para a entrada e saída do sinal. O capacitor "C" ligado da base a terra assegura que a base seja efetivamente aterrada para sinais alternados.



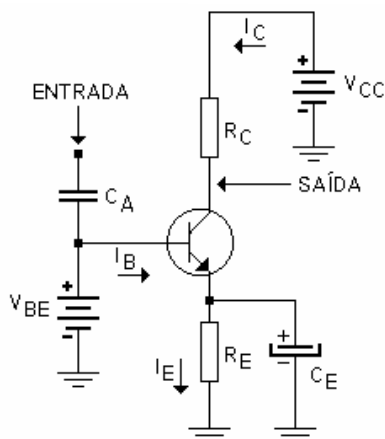
CARACTERÍSTICAS:

Ganho de corrente (G_I): < 1
 Ganho de tensão (G_V): elevado
 Resistência de entrada (R_{IN}): baixa
 Resistência de saída (R_{OUT}): alta

Figura 3.7 configuração base comum

EMISSOR COMUM:

No circuito emissor comum, o sinal é aplicado entre base e emissor e retirado entre coletor e emissor. O capacitor no emissor "C_E" assegura o aterramento do emissor para sinais alternados. C_A é um capacitor de acoplamento de sinal.



CARACTERÍSTICAS:

Ganho de corrente (G_I): elevado
 Ganho de tensão (G_V): elevado
 Resistência de entrada (R_{IN}): média
 Resistência de saída (R_{OUT}): alta

Figura 3.8 configuração emissor comum

COLETOR COMUM:

A figura 3.9 a seguir mostra um circuito na configuração coletor comum.

A configuração coletor comum também é conhecida como seguidor de emissor. Essa denominação é dada devido a tendência de todo o sinal aplicado na entrada estar praticamente presente na saída (circuito de emissor).

O sinal de entrada é aplicado entre base e coletor e retirado do circuito de emissor. O capacitor " C_C " ligado do coletor a terra assegura que o coletor esteja aterrado para sinais alternados. C_A é um capacitor de acoplamento de sinal.

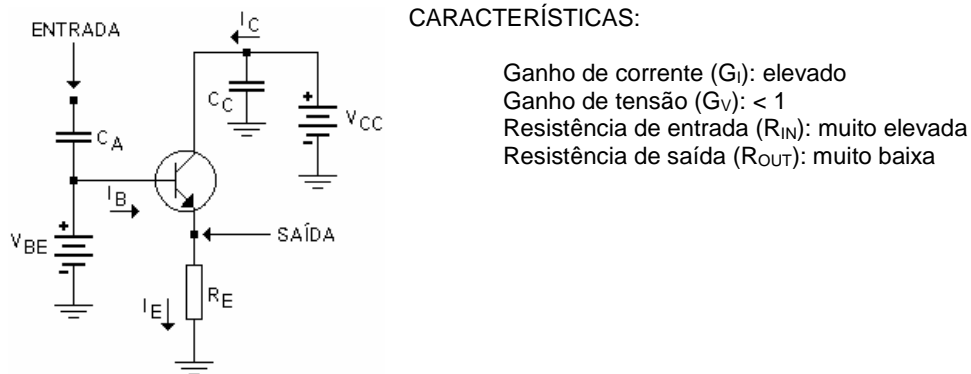


Figura 3.9 configuração coletor comum

As configurações emissor comum, base comum e coletor comum, são também denominadas emissor a terra, base a terra e coletor a terra. Essas configurações também podem ser apresentadas conforme ilustram a figura 3.10.

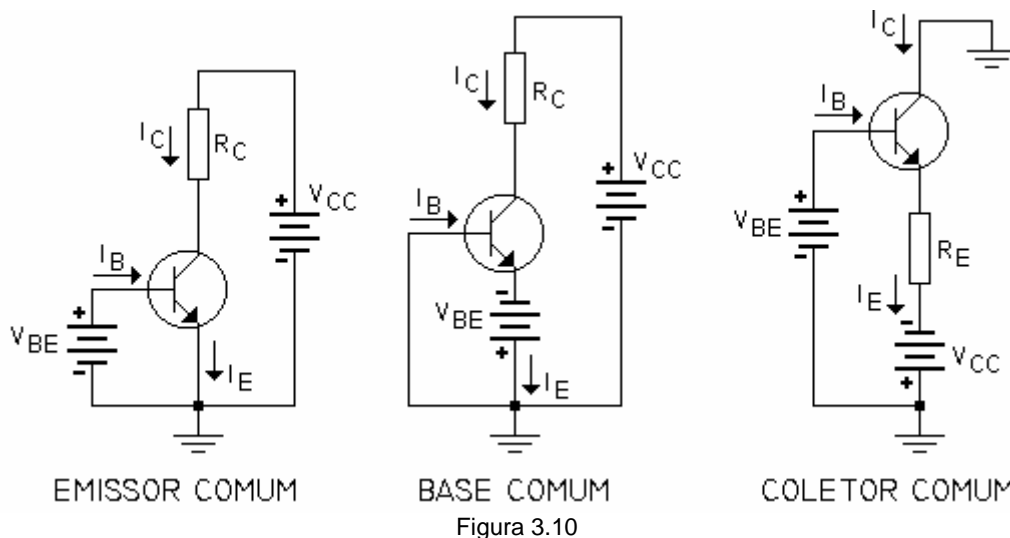


Figura 3.10

POLARIZAÇÃO COM UMA ÚNICA BATERIA:

Temos visto até agora a polarização de transistores utilizando duas baterias, sendo uma para polarização da junção base-emissor e outra para a junção base-coletor.

Na maioria das vezes, uma única bateria pode polarizar um circuito transistorizado, visto que o mesmo comporta-se como um circuito fechado.

As tensões nas junções do transistor e nos componentes externos, como resistores, capacitores, indutores, etc. podem ser calculadas utilizando-se as leis de Kirchhoff para tensão (LKT).

Da mesma forma, as correntes podem ser calculadas aplicando-se LKC.

A figura 3.11 mostra um transistor com polarização por divisor de tensão na base, cuja teoria será vista no capítulo referente aos circuitos de polarização.

Observe atentamente as indicações das tensões e das correntes em função do sentido das setas.

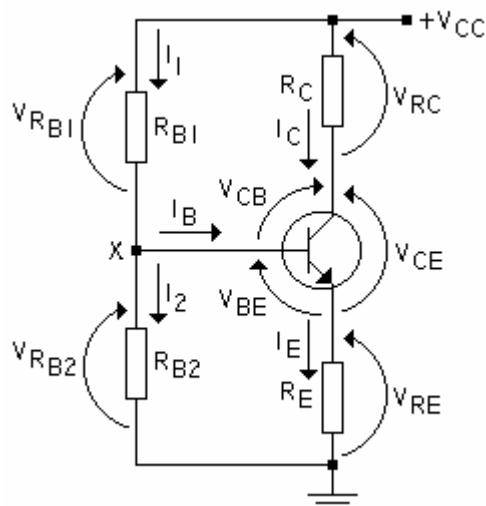


Figura 3.11 Polarização por uma única bateria

3.4 CURVAS CARACTERÍSTICAS:

As curvas características definem a região de operação de um transistor, tais como: região de saturação, região de corte, região ativa e região de ruptura.

De acordo com as necessidades do projeto essas regiões de operação devem ser escolhidas. Quando necessitamos de um transistor como chave eletrônica, normalmente as regiões de corte e saturação são selecionadas; no caso de transistor operando como amplificador, escolhe-se a região ativa.

A região de ruptura indica a máxima tensão que o transistor pode suportar sem riscos de danos.

A seguir são mostradas algumas curvas características, apenas como fim didático, não sendo obedecido a rigor nenhum tipo de escala.

CURVA CARACTERÍSTICA PARA MONTAGEM EM EMISSOR COMUM:

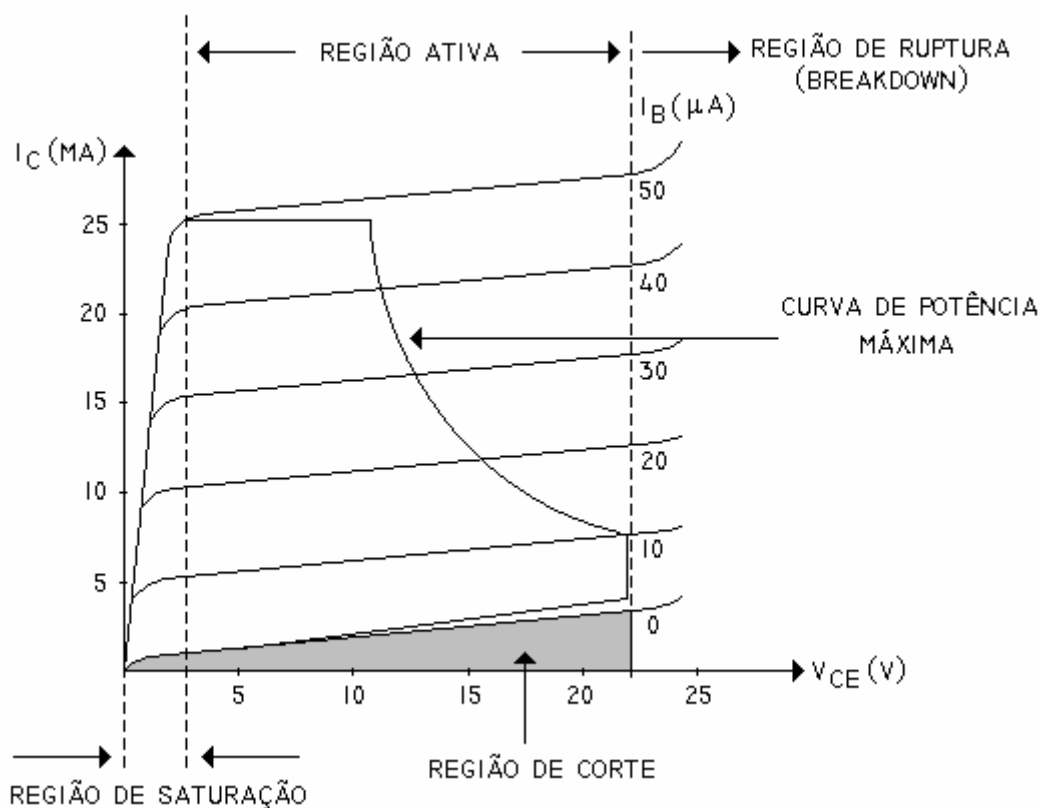


Figura 3.12 Curvas características de saída para configuração emissor comum

A região de corte é mostrada na área sombreada, onde $I_B = 0$.

A curva de potência máxima representa a máxima potência que pode ser dissipada pelo transistor.

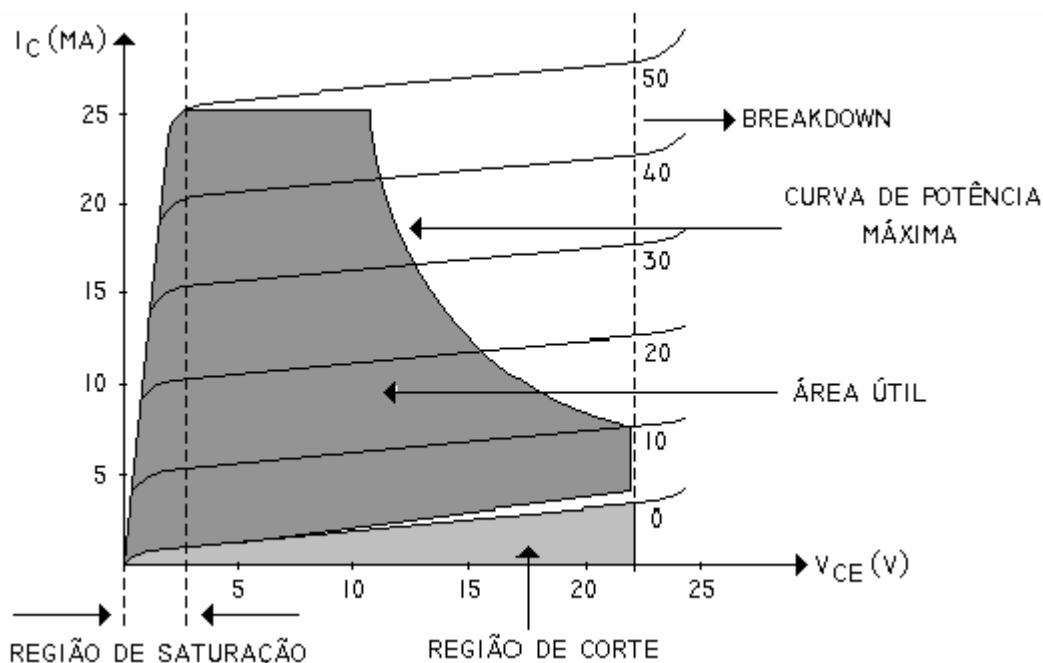


Figura 3.13

A figura 3.13 mostra a curva característica para emissor comum semelhante a vista anteriormente, no entanto, observe a área sombreada, a qual é denominada de área útil, na qual o transistor opera com total segurança.

A região útil é delimitada pela curva de potência máxima e conforme dito anteriormente, o transistor trabalha com segurança, não ultrapassando a máxima potência permitida.

3.5 - CIRCUITOS DE POLARIZAÇÃO:

Apresentaremos a seguir alguns circuitos de polarização muito utilizados e suas principais características:

POLARIZAÇÃO POR CORRENTE DE BASE CONSTANTE

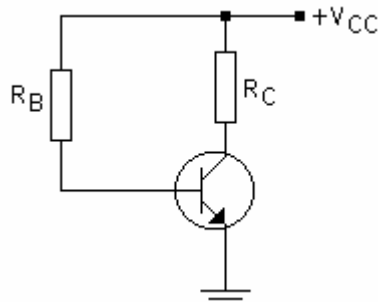


Figura 3.14

Também denominado de polarização fixa, é um circuito muito utilizado quando se deseja que o transistor opere como chaveamento eletrônico, com dois pontos bem definidos: corte e saturação.

Por esse motivo esse tipo de polarização não é utilizado em circuitos lineares, porque é muito instável, uma variação da temperatura provoca uma variação de β .

Para este tipo de polarização: $I_C = \beta \cdot I_B$

Para evitar o disparo térmico, adota-se geralmente: $V_{CE} = 0,5V_{CC}$

POLARIZAÇÃO POR CORRENTE DE EMISSOR CONSTANTE

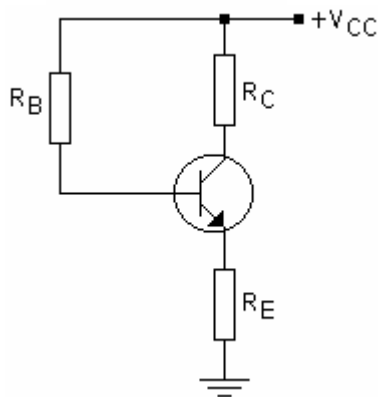


Figura 3.15

Diferente do caso anterior, procura-se compensar as variações de β através do resistor de emissor.

Assim, quando a corrente de base aumentar, a corrente de coletor aumenta e consequentemente a corrente de emissor, aumentando também a tensão no emissor, fazendo com que haja uma diminuição da tensão de polarização V_{BE} , reduzindo a corrente de base. Isto resulta numa corrente de coletor menor compensando parcialmente o aumento original de β .

Aplicando LKT:

$$V_{CC} = V_{RC} + V_{CE} + R_E I_E$$

onde: $V_{RC} = R_C I_C$
logo:

$$V_{CC} = R_C I_C + V_{CE} + R_E I_E$$

$$\begin{array}{c}
 \text{diminui} \\
 \downarrow \\
 V_{CC} = R_C I_C + V_{CE} + R_E I_E \\
 \begin{array}{ccc}
 \uparrow & & \uparrow \\
 \text{aumenta} & & \text{aumenta}
 \end{array}
 \end{array}$$

Adota-se como prática para garantir a estabilidade térmica sem afetar o sinal de saída: $V_{RE} = 0,1V_{CC}$

Equações básicas:

$$I_B = \frac{V_{CC}}{R_B + \beta R_E} \text{ ou ainda: } I_B = \frac{I_C}{\beta}$$

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

POLARIZAÇÃO POR REALIMENTAÇÃO NEGATIVA

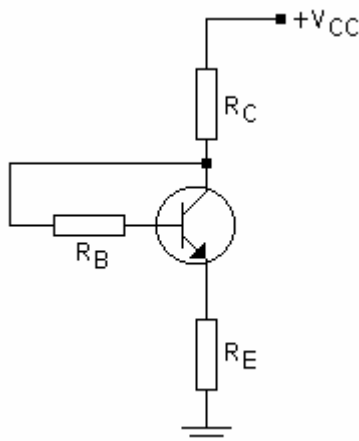


Figura 3.16

Este circuito reduz o ganho, mas em compensação aumenta a estabilidade.

Equações básicas:

$$V_{RE} = 0,1V_{CC}$$

$$V_{RC} = V_{CC} - (V_{CE} + V_{RE})$$

$$I_B = \frac{V_{CC}}{R_B + \beta R_C}$$

SEGUIDOR DE EMISSOR

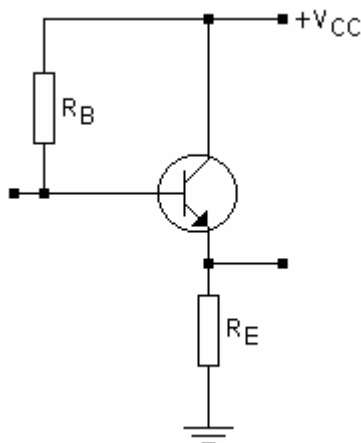


Figura 3.17

O seguidor de emissor tem como característica o ganho de tensão baixo (≤ 1)

Equações básicas:

$$V_{CE} = 0,5V_{CC}$$

$$R_E = \frac{0,5V_{CC}}{I_E}$$

$$I_E = \beta I_B$$

$$I_B = \frac{V_{CC}}{R_B + \beta R_E}$$

POLARIZAÇÃO POR DIVISOR DE TENSÃO NA BASE

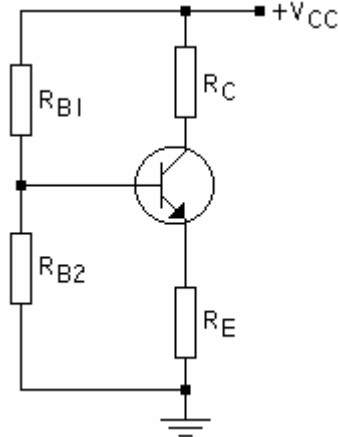


Figura 3.18

A polarização por divisor de tensão na base ou polarização universal é um dos métodos mais usados em circuitos lineares.

A grande vantagem desse tipo de polarização é sua estabilidade térmica (praticamente independente de β). O nome divisor de tensão é proveniente do divisor de tensão formado por R_{B1} e R_{B2} , onde R_{B2} polariza diretamente a junção base-emissor.

Apresentamos a seguir algumas regras práticas para a elaboração de um projeto de polarização por divisor de tensão na base:

$$V_E = 0,1V_{CC}$$

$$V_{CE} = 0,5V_{CC}$$

$$V_{RC} = 0,4V_{CC}$$

$$R_C = 4R_E$$

$$R_{BB} = 0,1\beta R_E$$

$$I = 10 I_B$$

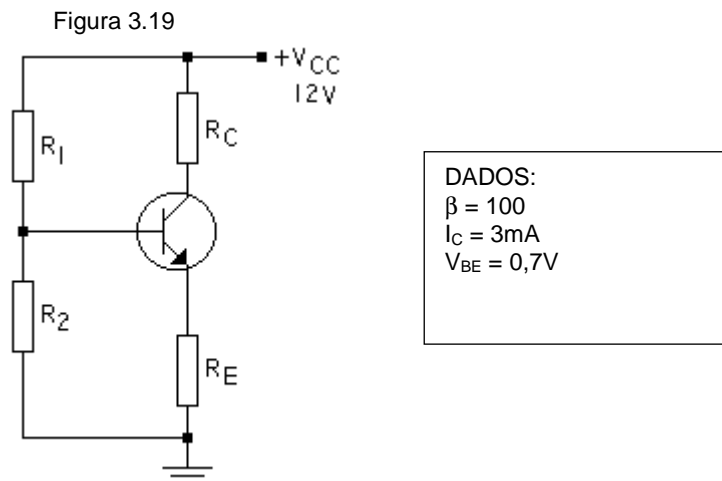
I = corrente através do divisor R_{B1} e R_{B2}

$$R_{B1} = \frac{R_{BB} \cdot V_{CC}}{V_{BB}} \quad \text{ou} \quad R_{B1} = R_{BB} \cdot \frac{V_{CC}}{V_{BB}}$$

$$R_{B2} = \frac{R_{B1} \cdot R_{BB}}{R_{B1} - R_{BB}} \quad \text{ou} \quad R_{B2} = \frac{R_{BB}}{1 - \frac{V_{BB}}{V_{CC}}}$$

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS SOBRE POLARIZAÇÃO:

1 - Dado o circuito abaixo, polarizar o transistor na região ativa, determinando o valor dos resistores e as correntes.



Solução:

Adotando $V_E = 0,1V_{CC}$, $V_{CE} = 0,5V_{CC}$ e $V_{RC} = 0,4V_{CC}$, temos:

$$V_E = V_{RE} = 1,2\text{V}$$

$$V_{CE} = 6\text{V}$$

$$V_{RC} = 4,8\text{V}$$

Cálculo de I_B

Como $\beta = 100$, podemos fazer $I_C = I_E$, logo: $I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{3\text{mA}}{100} = 30\mu\text{A}$

Cálculo de R_E

$$R_E = \frac{V_{RE}}{I_E} = \frac{1,2\text{V}}{3\text{mA}} = 400\Omega$$

Cálculo de I

$$I = 10 I_B = 10 \times 30 \times 10^{-6} = 300 \mu\text{A}$$

Cálculo de R_C

$$R_C = \frac{V_{RC}}{I_C} = \frac{4,8\text{V}}{3\text{mA}} = 1,6\text{k}\Omega \text{ (equivalente a } 4R_E)$$

Cálculo de R_2

$$V_B = V_{RE} + V_{BE} = 0,7 + 1,2 = 1,9\text{V}$$

$$R_2 = V_B / I = 1,9 / 300 \mu\text{A} = 6333,3 \Omega$$

Cálculo de R_1

$$R_1 = (V_{CC} - V_B) / I = (12 - 1,9) / 300 \mu\text{A} = 33666,6 \Omega$$

3.6 - RETA DE CARGA:

Podemos determinar o ponto de operação de um transistor através da reta de carga, definindo em um projeto ou aplicação os parâmetros de tensão e corrente.

Esse método gráfico somente pode ser aplicado se tivermos disponível a curva característica do transistor, fornecida pelo fabricante.

A vantagem da utilização do método gráfico é a rapidez na análise dos pontos de operação de um transistor.

Neste capítulo abordaremos apenas reta de carga para CC; reta de carga para CA será abordada posteriormente.

Entende-se como ponto de operação, um determinado ponto em que o transistor opera na ausência de sinal, podendo esse ponto ser escolhido ao longo da reta de carga, se quisermos que ele opere na região linear, região de corte ou região de saturação.

Este ponto é denominado "*ponto quiescente*" ou simplesmente "Q".

Tomemos como exemplo o circuito a seguir (figura 3.20) na montagem em emissor comum, onde a curva característica do transistor é mostrada ao lado.

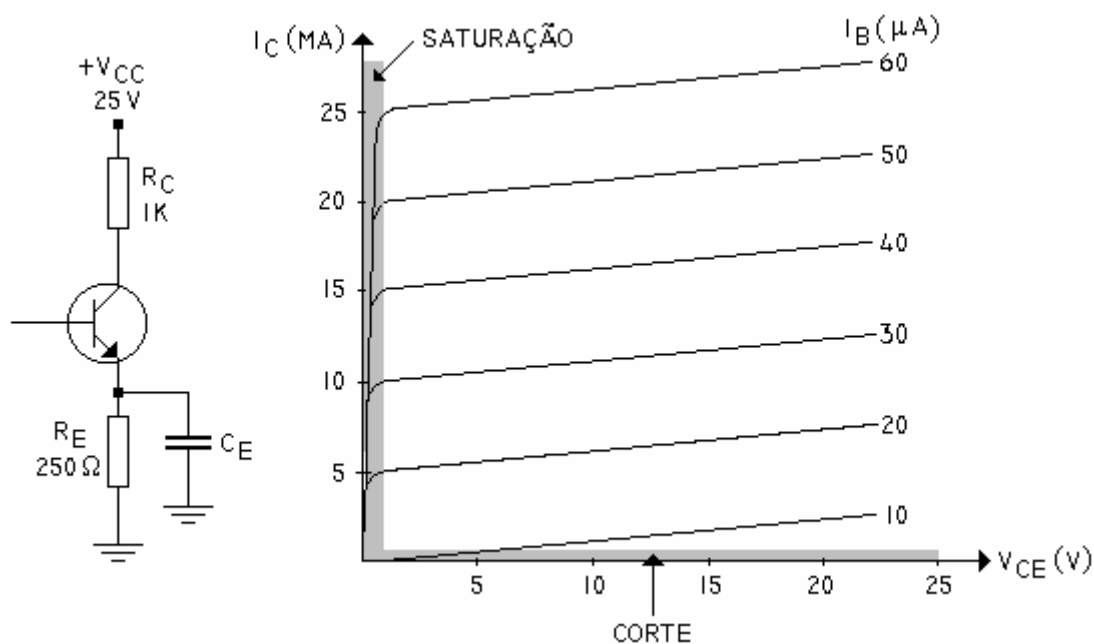


Figura 3.20

Observe as áreas sombreadas, que representam as regiões de corte e de saturação.

Para determinarmos a reta de carga, precisamos de dois pontos. Através da equação $V_{CC} = (R_C + I_E)I_C + V_{CE}$, obtemos:

1º ponto: para $I_C = 0$, temos $V_{CC} = V_{CE} = 25V$

2º ponto: para $V_{CE} = 0$, temos $I_C = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} = \frac{25V}{1,25k\Omega} = 20mA$

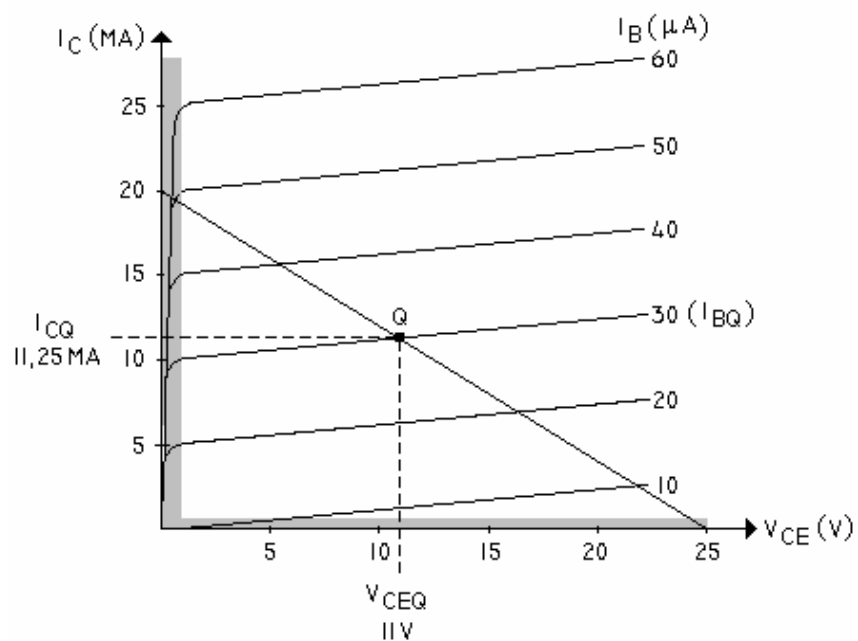


Figura 3.21

Procedimento:

Traça-se então a reta de carga unindo os dois pontos.

Para que o transistor opere na região linear, o ponto Q deverá ser o ponto médio da reta de carga. No nosso exemplo o ponto médio (bem aproximado) coincidiu com a corrente de base equivalente a $30\mu\text{A}$.

A partir daí então podemos determinar a corrente de coletor e a tensão entre coletor e emissor:

$$\begin{aligned} I_{CQ} &= 11,25\text{mA} \\ V_{CEQ} &= 11\text{V} \\ I_{BQ} &= 30\mu\text{A} \end{aligned}$$

Podemos então calcular o β e aplicar LKT para determinar a tensão nos resistores:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{11,25\text{mA}}{30\mu\text{A}} = 375$$

Partindo da equação: $V_{CC} = V_{RC} + V_{CE} + V_{RE}$

$$V_{RC} = (11,25\text{mA}) \cdot 1\text{k}\Omega = 11,25\text{V}$$

$$V_{RE} = (11,25\text{mA}) \cdot 250\Omega = 2,812\text{V}$$

$$\text{Então: } V_{CC} = 11,25 + 11 + 2,812 = 25,062\text{V} \approx 25\text{V}$$

Se na mesma curva selecionarmos um ponto quiescente (Q_1) mais próximo da região de saturação, por exemplo $I_B = 45\mu\text{A}$, teremos um aumento da corrente de coletor e uma diminuição de V_{CE} ; para um ponto quiescente (Q_2) mais próximo da região de corte, por exemplo $I_B = 10\mu\text{A}$, teremos uma diminuição da corrente de coletor e um aumento de V_{CE} , conforme ilustra a figura 3.22 abaixo:

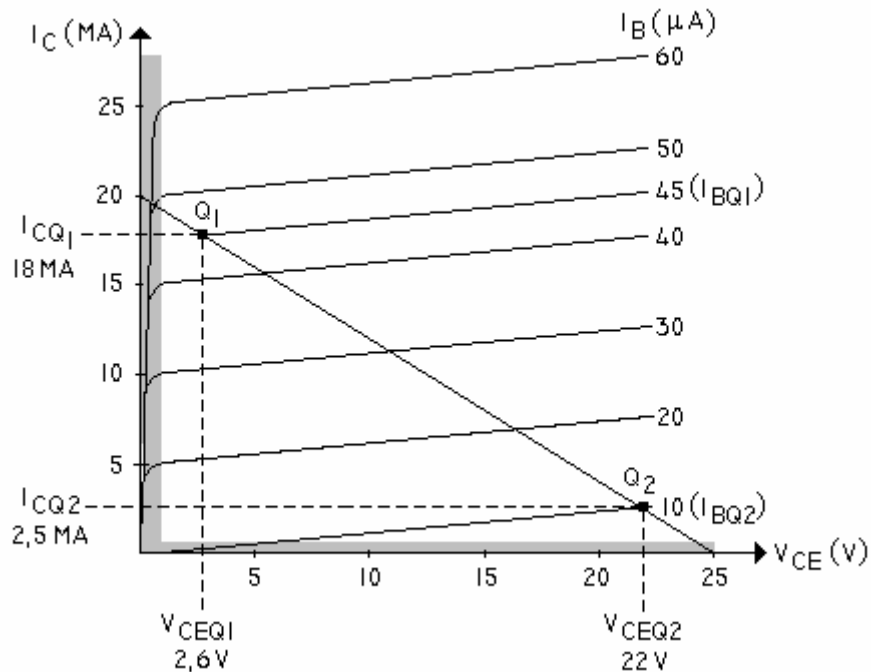


Figura 3.22

1. Quando um transistor opera na região de saturação ou bem próxima dela, a tensão entre coletor e emissor (V_{CE}) tende a zero, pois aumenta consideravelmente a corrente de coletor.

2. Quando um transistor opera na região de corte ou bem próxima dela, a tensão entre coletor e emissor (V_{CE}) tende a se igualar a V_{CC} , pois a corrente de coletor tende a zero.

A tensão de saturação típica para um transistor de silício é da ordem de 150 a 250mV.

Podemos então aplicar LKT referente aos pontos Q_1 e Q_2 , e constatar a variação de β ao longo da reta de carga.

Para Q_1 :

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{18\text{mA}}{45\mu\text{A}} = 400$$

$$V_{CC} = V_{RC} + V_{CE} + V_{RE} = 1\text{k}\Omega \cdot (18\text{mA}) + 2,6 + 250\Omega \cdot (18\text{mA})$$

$$V_{CC} = 18 + 2,6 + 4,5 = 25,1\text{V} \approx 25\text{V}$$

Para Q_2 :

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{2,5\text{mA}}{10\mu\text{A}} = 250$$

$$V_{CC} = V_{RC} + V_{CE} + V_{RE} = 1\text{k}\Omega \cdot (2,5\text{mA}) + 22 + 250\Omega \cdot (2,5\text{mA})$$

$$V_{CC} = 2,5 + 22 + 0,625 = 25,125\text{V} \approx 25\text{V}$$

4 - TRANSISTOR COMO CHAVE ELETRÔNICA:

É a forma mais simples de operação de um transistor, pois ao longo da reta de carga são definidos apenas dois pontos: corte e saturação e, portanto, podemos dizer que quando um transistor está saturado, comporta-se como uma chave eletrônica fechada e quando está em corte, como uma chave eletrônica aberta.

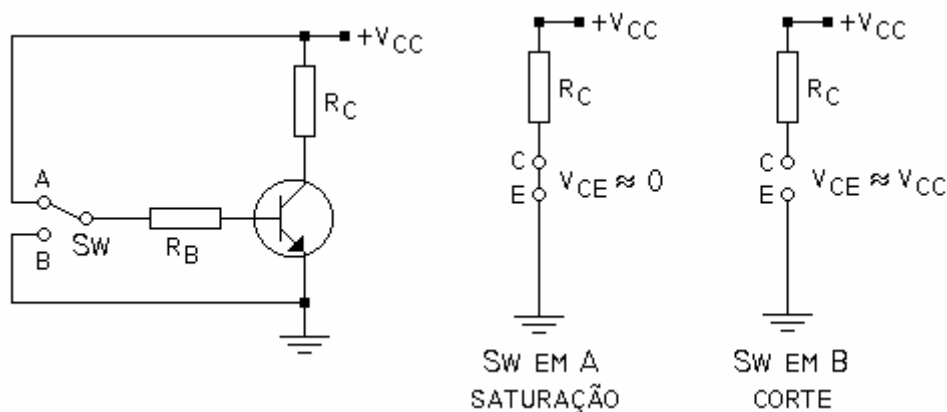


Figura 4.1

Para que efetivamente o transistor opere como uma chave eletrônica, é preciso garantir sua saturação para qualquer tipo de transistor, sob todas as condições de funcionamento; variação da temperatura, correntes, β , etc.

Na prática, ao projetar uma chave eletrônica com transistor, utiliza-se a corrente de base da ordem de 1/10 da corrente de coletor no extremo superior da reta de carga, conforme mostra a figura 4.2 abaixo:

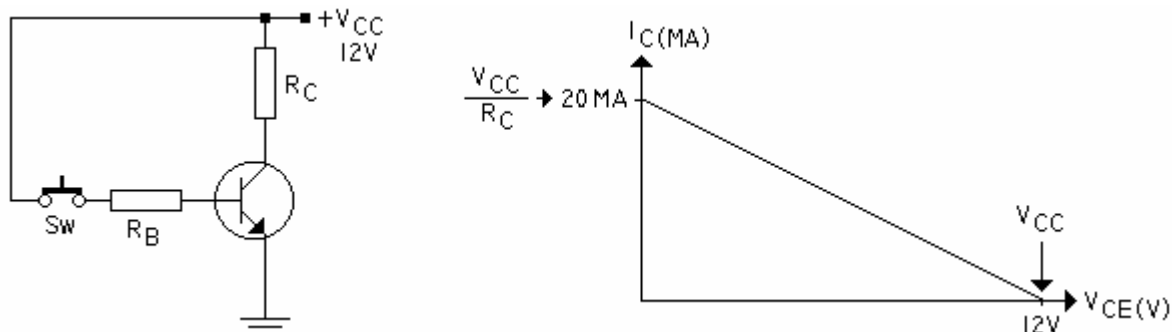


Figura 4.2

O valor de 20 mA foi escolhido na curva característica e portanto, a corrente de base será $1/20\text{ mA} = 2\text{mA}$.

OBS: Na elaboração do projeto, deve-se tomar o cuidado de não ultrapassar os valores máximos especificados pelo fabricante, como corrente de coletor, corrente de base, tensão entre coletor e emissor, potência de dissipação, etc.

Estamos considerando o valor de 20 mA plenamente compatível com nosso exemplo de projeto.

Podemos então definir os valores de R_C e R_B

$$R_B = \frac{V_{RB}}{I_B} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B} = \frac{12 - 0,7}{2\text{mA}} = \frac{11,3\text{V}}{2\text{mA}} = 5,65\text{k}\Omega$$

$$\text{Considerando } V_{CE} \text{ de saturação} = 0, \text{ teremos: } R_C = \frac{V_{CC}}{I_C} = \frac{12\text{V}}{20\text{mA}} = 600\Omega$$

Para levar o transistor ao corte, basta abrir \$Sw\$, pois com isso, $I_B = 0$.

Admitamos que queiramos no mesmo circuito controlar um led.

Deveremos então recalcular o valor de R_C

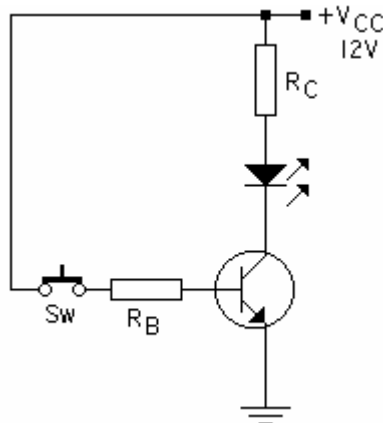


Figura 4.3

Supondo que a tensão no *led* seja de 1,5V (valor típico), então:

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{led}}{I_C} = \frac{12 - 1,5}{20\text{mA}} = \frac{10,5}{20\text{mA}} = 525\Omega$$

OBS: É importante observar se o *led* suporta a corrente do projeto.

outro exemplo de transistor usado como chave é mostrado abaixo

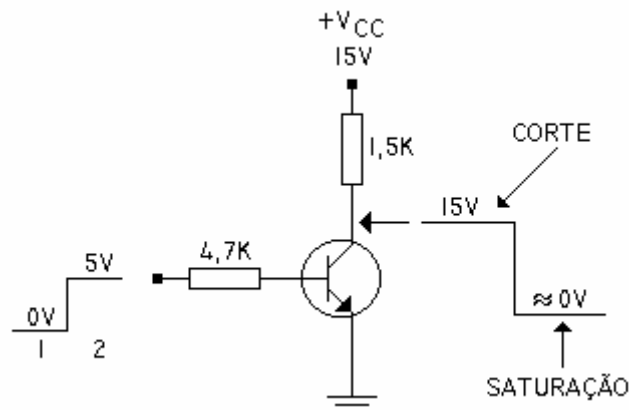


Figura 4.4

Um sinal cuja forma de onda é quadrada e amplitude que varia de 0 a 5V é aplicado na entrada.

No instante 1, com 0V na entrada o transistor entra em corte, operando como uma chave aberta e teremos na saída 15V (VCC); no instante 2, com 5V na entrada o transistor entra em saturação, operando como uma chave fechada e portanto, teremos na saída aproximadamente 0V.

O próximo passo é verificar se os valores adotados para R_C e R_B garantem a saturação do transistor, ou seja, I_B deve ser da ordem de 1/10 de I_C .

$$I_B = \frac{5V - 0,7V}{4,7k\Omega} = 0,915\text{mA}$$

$$I_C = \frac{15V}{1,5k\Omega} = 10\text{mA}$$

Portanto, a relação é válida ($10/0,915 = 10,9$), garantindo a saturação.

5 - TRANSISTOR COMO FONTE DE CORRENTE:

Consiste em tornar a tensão de emissor fixa, resultando assim em uma corrente de emissor fixa.

Pelo fato da tensão V_{BE} ser fixa (da ordem de 0,7V), V_E seguirá as variações da tensão de entrada (V_{BB}), isto é, se a tensão de entrada aumentar de 6V para 10V, a tensão V_E (nos extremos de R_E) variará de 5,3V para 9,3V.

Ao contrário do transistor como chave eletrônica, o ponto de operação situa-se na região ativa ao longo da reta de

carga.

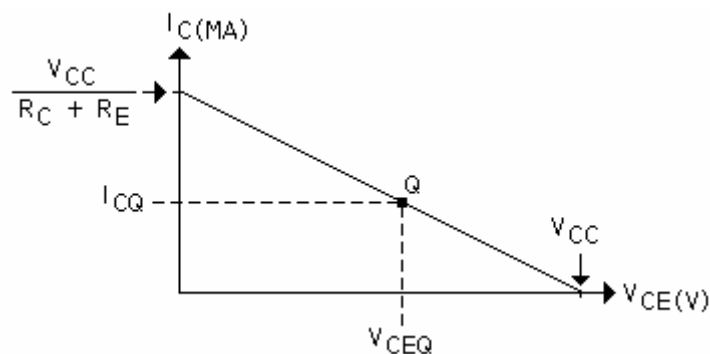


Figura 5.1

A identificação entre um circuito com transistor operando como chave eletrônica e como fonte de corrente é fácil; quando opera como chave eletrônica, o emissor é aterrado e existe um resistor na base, ao passo que, como fonte de corrente o emissor é aterrado através de um resistor, não havendo resistor na base.

Quando desejamos acionar um led, o ideal é fazê-lo através de uma fonte de corrente, principalmente quando o valor de V_{CC} é baixo, levando-se em conta a queda de tensão no led da ordem de 1,5 a 2,5V.

A ilustração abaixo mostra as diferenças entre uma chave eletrônica e uma fonte de corrente.

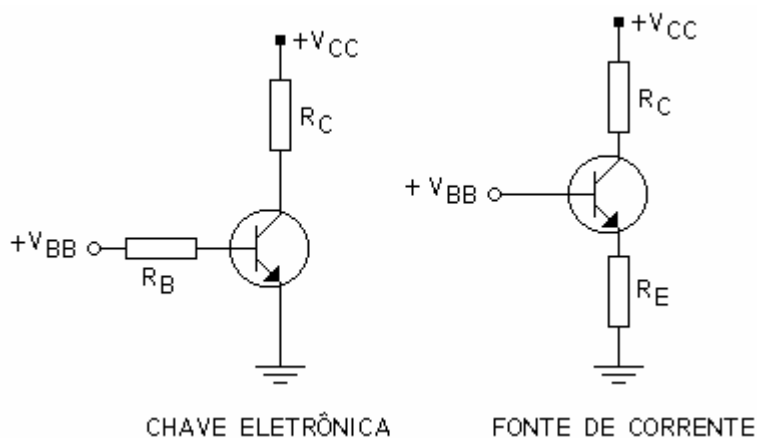


Figura 5.2

Para entender melhor o que foi acima exposto, vamos considerar um transistor operando como fonte de corrente. Devemos então estabelecer um valor ideal de R_E para nosso projeto.

Vamos supor:

V_{BB} (tensão de entrada) = +5V

V_{CC} = +12V

I_C = 5mA (um ponto médio da reta de carga dentro da região ativa)

Determinar:

- As tensões em R_C para os valores de 10Ω e 1000Ω
- O valor de V_{CE} nas duas condições

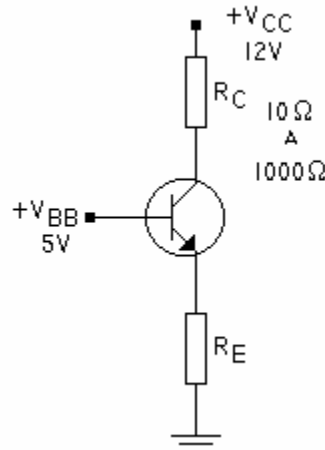


Figura 5.3

Determinando R_E

Considerando $I_C = I_E$, temos:

$$R_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{I_E} = \frac{V_{RE}}{I_E} = \frac{5V - 0,7V}{5mA} = \frac{4,3V}{5mA} = 860\Omega$$

Lembrar que $V_{BB} - V_{BE} = V_{RE} = V_E$

A tensão de 4,3V ficará fixa, fixando também a corrente do emissor, para uma grande gama de valores de R_C , desde que o transistor opere dentro da região ativa.

Calculando V_{RC}

Levando-se em conta que a tensão do emissor está amarrada em 4,3V então, para os dois casos $I_C = 5mA$ (estamos admitindo $I_E = I_C$).

Para $R_C = 10\Omega \rightarrow V_{RC} = 10\Omega \cdot (5mA) = 0,05V$

Para $R_C = 1k\Omega \rightarrow V_{RC} = 1k\Omega \cdot (5mA) = 5V$

Para satisfazer a equação $V_{CC} - V_{RC} - V_{CE} - V_{RE} = 0$, a tensão V_{CE} é que variará, assim sendo temos:

Para $R_C = 10\Omega$

$$V_{CE} = 12 - 0,05 - 4,3 = 7,65V$$

Para $R_C = 1k\Omega$

$$V_{CE} = 12 - 5 - 4,3 = 2,7V$$

CONCLUSÕES: A corrente de coletor manteve-se constante para uma variação muito grande de R_C (100 vezes).

Mesmo com $R_C = 0$ a corrente de emissor se manterá em 5mA. No entanto, se R_C assumir valores mais elevados, suponhamos 4kΩ, teríamos teoricamente $V_{RC} = 20V$, o que invalidaria a equação $V_{CC} - V_{RC} - V_{CE} - V_{RE} = 0$, em outras palavras, para satisfazer a dita equação, I_C teria que assumir valores menores. Deve-se portanto evitar trabalhar com valores de R_C que propiciem uma tensão V_{CE} muito próxima da região de saturação.

O valor da corrente de coletor não depende do valor de β , isto é, ao substituir o transistor por outro de β diferente, a corrente de coletor permanecerá praticamente igual.

Quanto maior for R_E (respeitando-se as características do projeto), mais estável torna-se a corrente de coletor.

Quando o valor de V_{CC} for relativamente baixo (por exemplo 5V) o acionamento de *leds* é mais eficaz com uma fonte de corrente, pois para *leds* de cores, tamanhos e fabricantes diferentes (a tensão pode variar de 1,5V a 2,5V), a corrente será praticamente constante não prejudicando a luminosidade.

Para fixar melhor o conceito referente ao transistor operando como fonte de corrente admitir uma situação conforme ilustra a figura 5.4 abaixo.

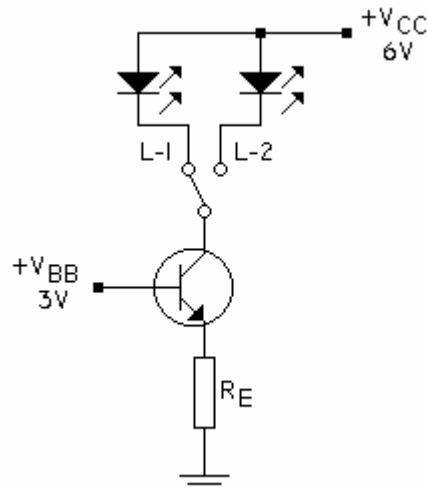


Figura 5.4

Os leds L-1 e L-2 necessitam de uma corrente de 15mA para obter uma luminosidade ideal. No entanto L-1 proporciona uma queda de 1,5V enquanto que L-2 uma queda de 2,5V. Poderá o led 2 ter sua luminosidade diminuída por necessitar de mais tensão?

Solução:

A primeira impressão é de que realmente o led 2 terá sua luminosidade diminuída, pois em comparação ao led 1 necessita de mais tensão em seus terminais.

No entanto como os leds estão sendo acionados por uma fonte de corrente tal não acontecerá, conforme será mostrado nos cálculos a seguir:

Fixando a corrente de emissor:

Se ambos os leds necessitam de 15mA para o brilho ideal então basta fixar a corrente de emissor em 15mA, dimensionando o valor de R_E .

$$R_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{I_E} = \frac{3V - 0,7V}{15mA} = 153,333\Omega \quad (\text{onde } V_{BB} - V_{BE} = V_{RE})$$

Adotaremos então $R_E = 150\Omega$

Para o led 1: $V_{CE} = 6 - V_{led} - V_{RE} = 6 - 1,5 - 2,3 = 2,2V$

Para o led 2: $V_{CE} = 6 - V_{led} - V_{RE} = 6 - 2,5 - 2,3 = 1,2V$

Desta forma, a luminosidade do led 2 não será diminuída.

A figura a seguir mostra que a corrente nos leds permanece constante, embora as tensões sejam diferentes.

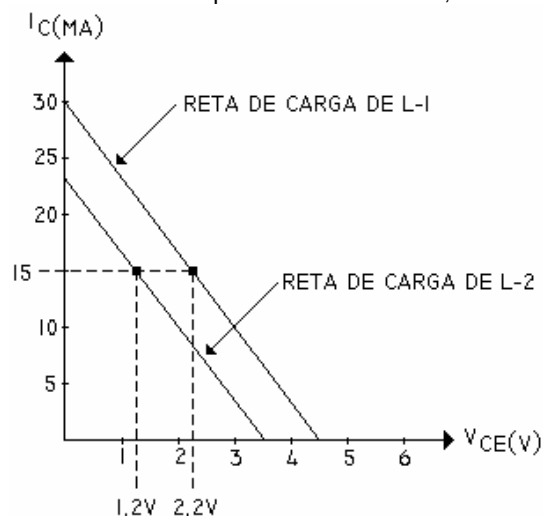


Figura 5.5

Reta de carga de L-11º ponto:

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{led}}{R_E} = \frac{6V - 1,5V}{150\Omega} = 30mA$$

2º ponto:

$$V_{CE} = V_{CC} - V_{led} = 6 - 1,5 = 4,5V$$

Reta de carga de L-21º ponto:

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{led}}{R_E} = \frac{6V - 2,5V}{150\Omega} = 23,3mA$$

2º ponto:

$$V_{CE} = V_{CC} - V_{led} = 6 - 2,5 = 3,5V$$

6 - CONFIGURAÇÃO DARLINGTON:

A configuração *Darlington* consiste na ligação entre dois transistores na configuração seguidor de emissor, ligados em cascata, conforme ilustra a figura 6.1, proporcionando em relação a um único transistor um ganho de corrente bastante elevado.

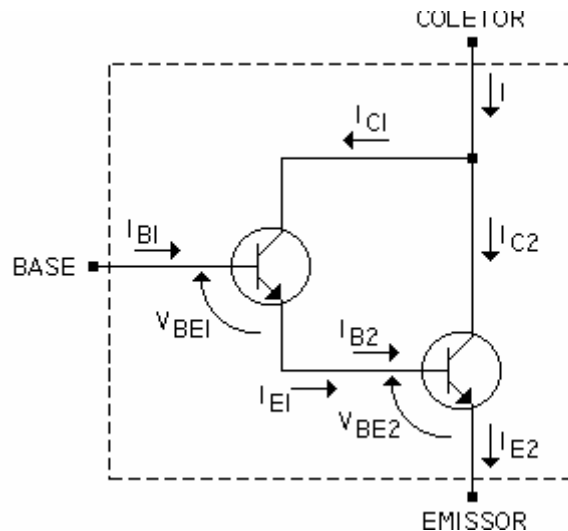


Figura 6.1

O ganho total de tensão é aproximadamente igual a 1.

Se $\beta_1 = \beta_2 = 100$, teremos: $I_{C1} = I_{E1}$ e $I_{C2} = I_{E2}$

O ganho total (β_T) será dado por: $\beta_1 \cdot \beta_2 = 100 \cdot 100 = 10.000$

Assim, $I_{C2} = \beta_T \cdot I_{B1}$

A tensão entre base e emissor é dada por: $V_{BE} = V_{BE1} + V_{BE2}$

Por se tratar da configuração emissor comum, assume valor bastante elevado de impedância de entrada e valor bastante baixo de impedância de saída, em relação a um transistor comum. A configuração *Darlington* normalmente é encontrada em um único invólucro, como exemplo, temos os transistores BD262 e BD263, com polaridades PNP e NPN respectivamente.

7 - TRANSISTORES ESPECIAIS**OBJETIVOS:**

- entender o funcionamento de um transistor unipolar;
- analisar e entender as curvas características de um transistor unipolar;
- analisar o funcionamento de um transistor unipolar, através de circuitos de polarização básicos.

Até agora foi estudado os transistores bipolares, se baseiam em dois tipos de cargas: lacunas e elétrons, e são utilizados amplamente em circuitos lineares. No entanto existem aplicações nos quais os transistores unipolares com a sua alta impedância de entrada são uma alternativa melhor. Este tipo de transistor depende de um só tipo de carga, daí o nome unipolar. Há dois tipos básicos: os transistores de efeito de campo de junção (**JFET - Junction Field Effect transistor**) e os **transistores de efeito de campo de óxido metálico (MOSFET)**.

JFET

Na Figura 7.1, é mostrada a estrutura e símbolo de um transistor de efeito de campo de junção ou simplesmente JFET.

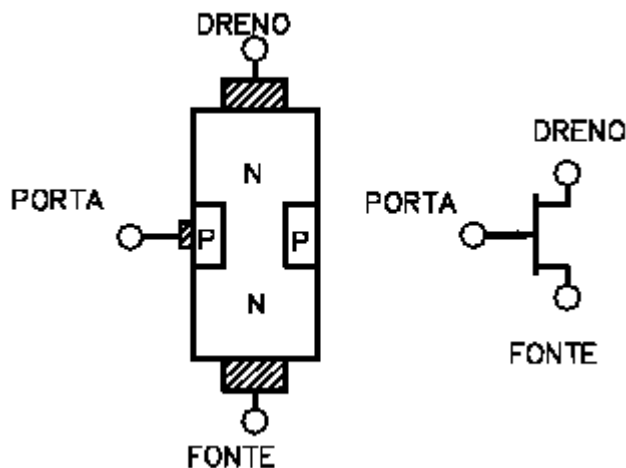


Figura 7.1

A condução se dá pela passagem de portadores de carga da fonte (**S - Source**) para o dreno (**D**), através do canal entre os elementos da porta (**G - Gate**). O transistor pode ser um dispositivo com canal N (condução por elétrons) ou com canal P (condução por lacunas). Tudo que for dito sobre o dispositivo com canal N se aplica ao com canal P com sinais opostos de tensão e corrente.

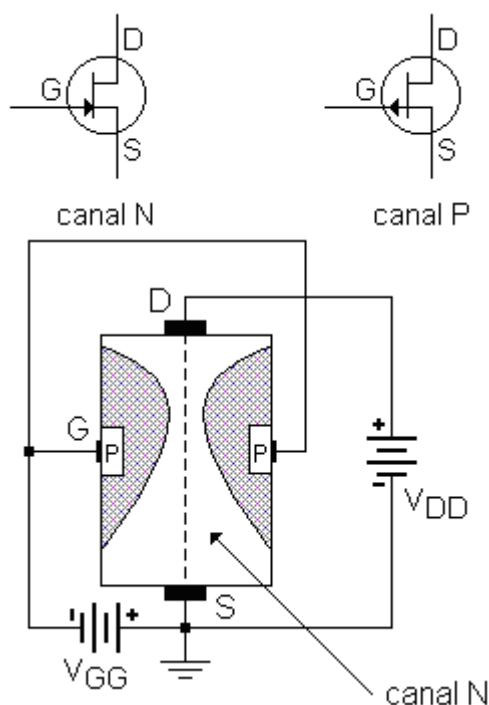


Figura 7.2

7.1 POLARIZAÇÃO DE UM JFET

A Figura 7.2 mostra a polarização convencional de um JFET com canal N. Uma alimentação positiva V_{DD} é ligada entre o dreno e a fonte, estabelecendo um fluxo de corrente através do canal. Esta corrente também depende da largura do canal.

Uma ligação negativa V_{GG} é ligada entre a porta e a fonte. Com isto a porta fica com uma polarização reversa, circulando apenas uma corrente de fuga e, portanto, uma alta impedância entre a porta e a fonte. A polarização reversa cria camadas de depleção em volta das regiões P e isto estreita o canal condutor (D-S). Quanto mais negativa a tensão V_{GG} , mais estreito torna-se o canal.

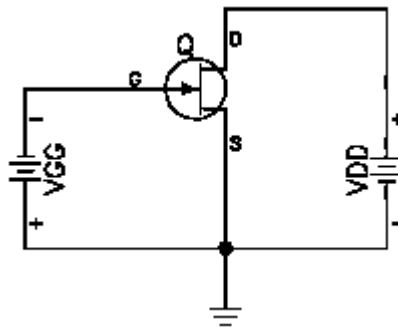


Figura 7.3

Para um dado V_{GG} , as camadas de depleção tocam-se e o canal condutor (D-S) desaparece. Neste caso, a corrente de dreno está cortada. A tensão V_{GG} que produz o corte é simbolizada por $V_{GS(off)}$.

7.2 CONFIGURAÇÕES:

A exemplo dos transistores bipolares, são três as configurações básicas para os transistores unipolares, como mostra a figura 7.4 abaixo:

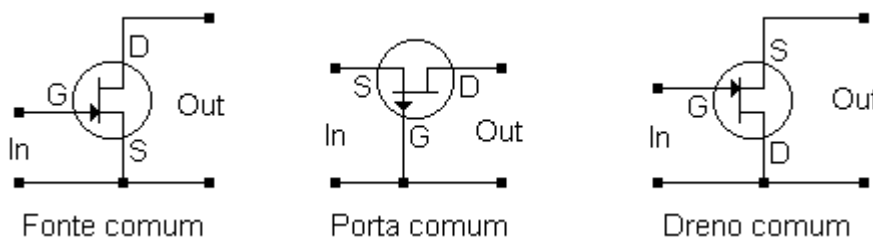


Figura 7.4

As equivalências são as seguintes:

Fonte comum = emissor comum
Porta comum = base comum
Dreno comum = coletor comum

A configuração dreno comum também é denominada seguidor de fonte.

7.3 CURVA CARACTERÍSTICA DE DRENO

Para um valor constante de V_{GS} , o JFET age como um dispositivo resistivo linear (na região ôhmica) até atingir a condição de **pinçamento** ou estrangulamento. Acima da condição de estrangulamento e antes da ruptura por avalanche, a corrente de dreno permanece aproximadamente constante.

Os índices $IDSS$ referem-se a corrente do dreno para a fonte com a porta em curto ($V_{GS}=0V$). $IDSS$ é a corrente de dreno máxima que um JFET pode produzir.

Na Figura 7.5, é mostrado um exemplo de curva para um JFET. Quando o JFET está saturado (na região ôhmica), V_{DS} situa-se entre 0 e 4V, dependendo da reta de carga. A tensão de saturação mais alta (4V) é igual à intensidade da tensão de corte da porta-fonte ($V_{GS(off)} = -4V$). Esta é uma propriedade inerente a todos os JFET's.

Para polarizar um transistor JFET é necessário saber a função do estágio, isto é, se o mesmo irá trabalhar como amplificador ou como resistor controlado por tensão. Como amplificador, a região de trabalho é o trecho da curva, na Figura, após a condição de pinçamento e à esquerda da região de tensão V_{DS} de ruptura. Se for como resistor controlado por tensão a região de trabalho é entre V_{DS} igual a zero e antes de atingir a condição de pinçamento.

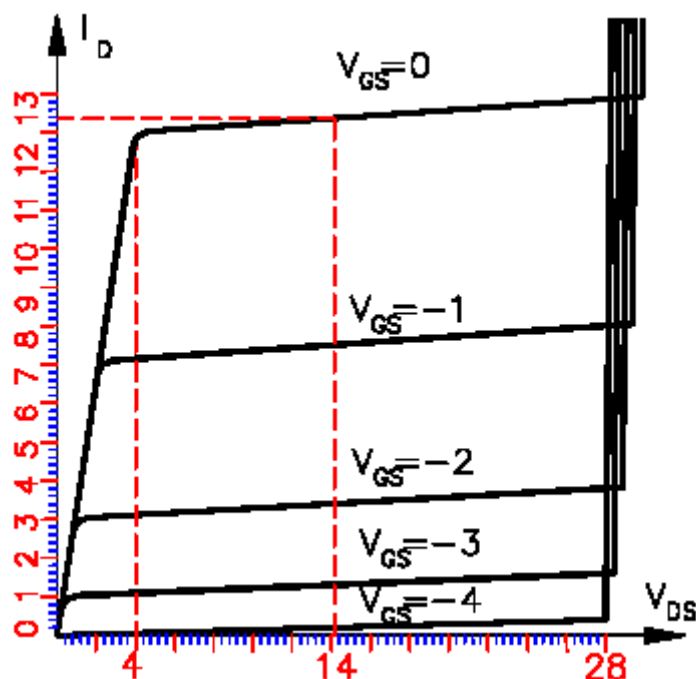


Figura 7.5

7.4 - CURVA DE TRANSCONDUTÂNCIA

A curva de transcondutância de um JFET é um gráfico da corrente de saída versus a tensão de entrada, I_D em função de V_{GS} . A sua equação é :

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

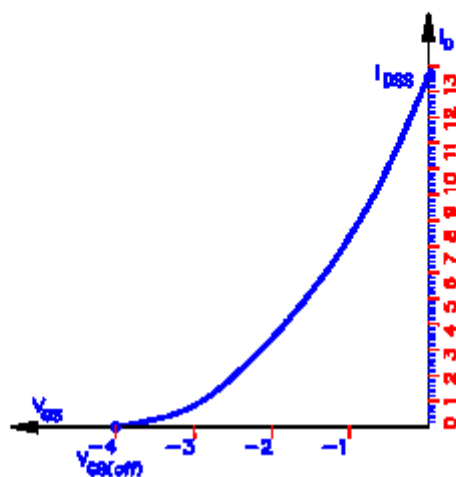


Figura 7.6

7.5 - AUTOPOLARIZAÇÃO

A polarização de um transistor JFET se faz de maneira semelhante à polarização de transistor bipolar comum. Em outras palavras, usa-se o transistor JFET como se fosse um transistor bipolar.

Para um JFET funcionar corretamente devemos lembrar que, primeiramente, o mesmo deve estar reversamente polarizado entre porta e fonte. Na Figura vemos um JFET polarizado, ou seja, com resistores ligados aos terminais para limitar tensões e correntes convenientemente, como visto na polarização de transistores bipolares.

Esse é o tipo de polarização mais comum e se chama autopolarização por derivação de corrente, pois o V_{GS} aparece devido à corrente de dreno sobre R_S , o que resulta em V_{RS} .

Essa tensão, distribui-se entre R_G e a junção reversa, que, como tal, possui uma alta resistência. Assim aparecem V_{RG} e V_{GS} que somadas perfazem V_{RS} .

$$V_{RG} = V_{RS} + V_{GS}$$

O diodo porta-fonte está reversamente polarizado e a corrente I_G é uma pequena corrente de fuga aproximadamente igual a zero.

Como:

$$V_{RG} = I_G R_G \cong 0$$

$$V_{RS} = -V_{GS} = R_S I_S$$

A corrente de fonte é a soma da corrente de dreno e de porta. Naturalmente a corrente de dreno é muito maior que a de porta. Então:

$$I_D \cong I_S$$

Análise da malha do lado direito do circuito:

$$V_{DD} = I_D (R_D + R_S) + V_{DS}$$

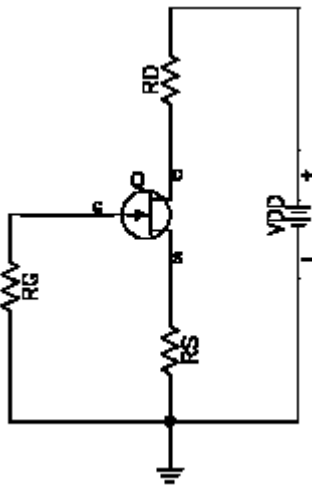


Figura 7.7

RETA DE AUTOPOLARIZAÇÃO

Para a polarização do JFET, uma alternativa é o uso da curva de transcondutância para encontrar o ponto Q de operação. Seja a curva da Figura a base para encontrar o ponto Q. A corrente de dreno máxima é de 13,5 mA, e a tensão de corte da porta-fonte é de -4V. Isso significa que a tensão da porta tem de estar entre 0 e -4V. Para descobrir este valor, pode-se usar o gráfico da Figura e ver onde ela intercepta a curva de transcondutância.

Exemplo: Se o resistor da fonte de um circuito de autopolarização for de 300Ω. Qual o ponto Q. Usar o gráfico da Figura 7.8.

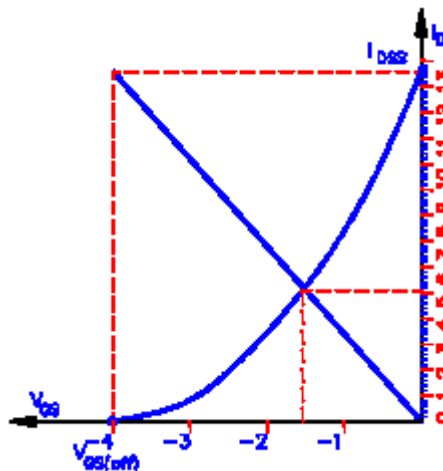


Figura 7.8

Solução: A equação de V_{GS} é $V_{GS} = -I_D \times 300$ e para traçar a reta basta considerar $I_D = 0$ e $I_D = I_{DSS}$. Para I_D nulo, $V_{GS}=0$ e para o outro valor de I_D , $V_{GS} = 13,5 \text{ mA} \cdot 300 \Omega = -4\text{V}$. Aplicando na curva, o ponto Q é : $V_{GS} = -1,5\text{V}$ e $I_D = 5 \text{ mA}$.

SELEÇÃO DO R_S

O ponto Q varia conforme o valor de R_S . O ideal é escolher um R_S em que o ponto Q fique no na região central, como o do Exemplo acima. O método mais simples para escolher um valor para R_S é:

$$R_S = \frac{V_{GS(off)}}{I_{DSS}}$$

Este valor de R_S não produz um ponto Q exatamente no centro da curva, mas é aceitável para a maioria dos circuitos.

7.6 MOSFET

O FET de óxido de semicondutor e metal, MOSFET, tem uma fonte, uma porta e um dreno. A diferença básica para o JFET é porta isolada eletricamente do canal. Por isso, a corrente de porta é extremamente pequena, para qualquer tensão positiva ou negativa.

MOSFET DE MODO DEPLEÇÃO

A Figura 7.9 mostra um MOSFET de modo depleção canal N e o seu símbolo. O substrato em geral é conectado a fonte (pelo fabricante). Em algumas aplicações usa-se o substrato para controlar também a corrente de dreno. Neste caso o encapsulamento tem quatro terminais.

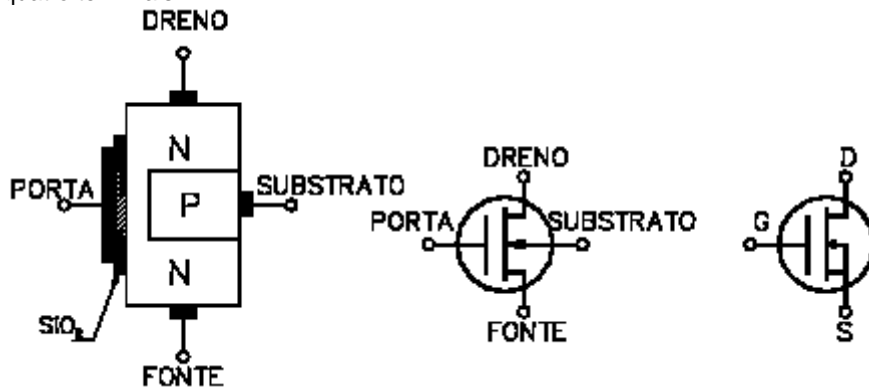


Figura 7.9

Os elétrons livres podem fluir da fonte para o dreno através do material N. A região P é chamada de substrato, e ela cria um estreitamento para a passagem dos elétrons livres da fonte ao dreno.

A fina camada de dióxido de silício (SiO_2 , vidro), que é um isolante, impede a passagem de corrente da porta para o material N.

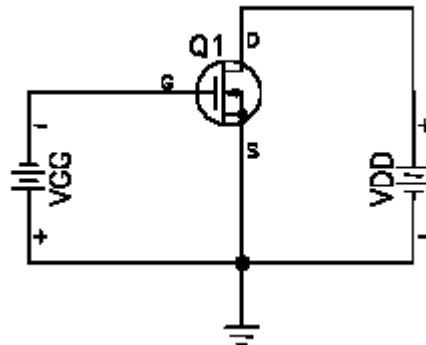


Figura 7.10

A Figura 7.10 acima mostra o MOSFET de modo depleção com uma tensão de porta negativa. A tensão V_{DD} força os elétrons livres a fluir através do material N. Como no JFET a tensão de porta controla a largura do canal. Quanto mais negativa a tensão, menor a corrente de dreno. Até um momento que a camada de depleção fecha o canal e impede fluxo dos elétrons livres. Com V_{GS} negativo o funcionamento é similar ao JFET.

Como a porta está isolada eletricamente do canal, pode-se aplicar uma tensão positiva na porta (inversão de polaridade bateria V_{GG} do circuito da Figura acima). A tensão positiva na porta aumenta o número de elétrons livres que fluem através do canal. Quanto maior a tensão, maior a corrente de dreno. Isto é que a diferença de um JFET.

MOSFET DE MODO CRESCIMENTO OU INTENSIFICAÇÃO

O MOSFET de modo crescimento ou intensificação é uma evolução do MOSFET de modo depleção e de uso generalizado na indústria eletrônica em especial nos circuitos digitais.

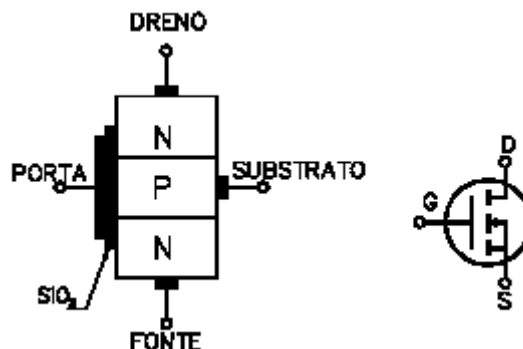


Figura 7.11

A Figura 7.11 mostra um MOSFET de canal N do tipo crescimento e o seu símbolo. O substrato estende-se por todo caminho até o dióxido de silício. Não existe mais um canal N ligando a fonte e o dreno.

Quando a tensão da porta é zero, a alimentação V_{DD} força a ida dos elétrons livres da fonte para o dreno, mas o substrato P tem apenas uns poucos elétrons livres produzidos termicamente. Assim, quando a tensão da porta é zero, o MOSFET fica no estado desligado (Off). Isto é totalmente diferente dos dispositivos JFET e MOSFET de modo depleção.

Quando a porta é positiva, ela atrai elétrons livres na região p. Os elétrons livres recombina-se com as lacunas na região próxima ao dióxido de silício. Quando a tensão é suficientemente positiva, todas as lacunas encostadas a dióxido de silício são preenchidas e elétrons livres começam a fluir da fonte para o dreno. O efeito é o mesmo que a criação de uma fina camada de material tipo N próximo ao dióxido de silício. Essa camada é chamada de camada de inversão tipo N. Quando ela existe o dispositivo, normalmente aberto, de repente conduz e os elétrons livres fluem facilmente da fonte para o dreno.

O V_{GS} mínimo que cria a camada de inversão tipo N é chamado tensão de limiar, simbolizado por $V_{GS(th)}$. Quando V_{GS} é menor que $V_{GS(th)}$, a corrente de dreno é zero. Mas quando V_{GS} é maior $V_{GS(th)}$, uma camada de inversão tipo N conecta a fonte ao dreno e a corrente de dreno é alta. $V_{GS(th)}$ pode variar de menos de 1V até mais de 5V dependendo do MOSFET.

A Figura mostra as curvas $I_D \times V_{DS}$ e $I_D \times V_{GS}$ do MOSFET de modo intensificação e reta de carga típica. No gráfico $I_D \times V_{DS}$, a curva mais baixa é para $V_{GS(th)}$. Quando V_{GS} maior que $V_{GS(th)}$, a corrente de dreno é controlada pela tensão da porta. Neste estágio o MOSFET pode trabalhar tanto quanto um resistor (região ôhmica) quanto uma fonte de corrente. A curva $I_D \times V_{GS}$, é a curva de transcondutância e é uma curva quadrática. O início da parábola está em $V_{GS(th)}$. Ela é

$$I_D = k(V_{GS} - V_{GS(th)})^2$$

onde k é uma constante que depende do MOSFET em particular.

O fabricante fornece os valores de $I_{D(on)}$ e $V_{GS(on)}$. Então reescrevendo a fórmula:

$$I_D = KI_{D(on)}$$

$$K = \left(\frac{V_{GS} - V_{GS(th)}}{V_{GS(on)} - V_{GS(th)}} \right)^2$$

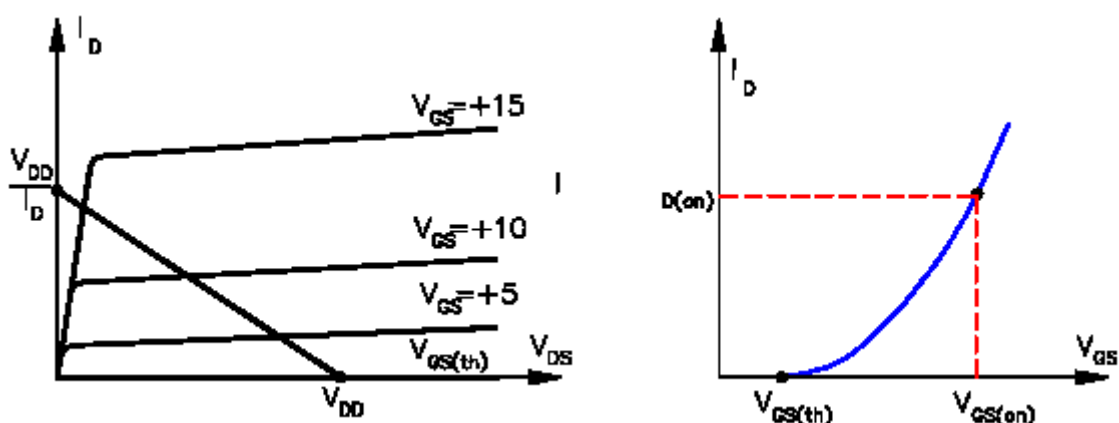


Figura 7.12

TENSÃO PORTA-FONTE MÁXIMA

Os MOSFET têm uma fina camada de dióxido de silício, um isolante que impede a circulação de corrente de porta tanto para tensões positivas como negativas. Essa camada isolante é mantida tão fina quanto possível para dar a porta um melhor controle sobre a corrente de dreno. Como a camada é muito fina, é fácil destruí-la com uma tensão porta fonte excessiva. Além da aplicação direta de tensão excessiva entre a porta fonte, pode-se destruir a camada isolante devido a transientes de tensão causados por retirada/colocação do componente com o sistema ligado. O simples ato de tocar um MOSFET pode depositar cargas estáticas suficiente que exceda a especificação de V_{GS} máximo. Alguns MOSFET são protegidos por diodos zener internos em paralelo com a porta e a fonte. Mas eles têm como inconveniente, diminuir a impedância de entrada.

8 - FOTO TRANSISTOR E ACOPLADOR ÓPTICO

8.1 FOTO TRANSISTOR

Os foto transistores são constituídos basicamente de duas junções, havendo uma janela que permite a incidência de a luz sobre a junção base-emissor, aumentando a condutividade deste diodo emissor, com o conseqüente aumento da corrente de coletor.

Na Figura 8.1 abaixo, temos um exemplo de curva $I_C \times V_{CE}$.

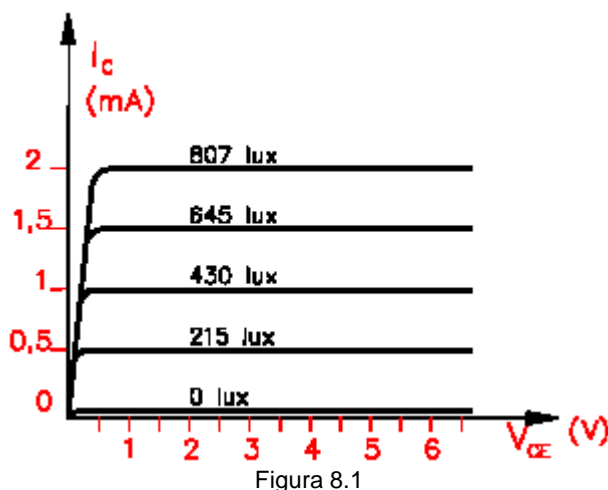


Figura 8.1

Sempre que houver luz incidindo sobre a base, haverá uma corrente de base e, portanto, o transistor deixa de ser aberto.

Um fotodiodo é uma alternativa ao foto transistor. A diferença é que a luz incidindo no fotodiodo gera a corrente que atravessa o diodo, enquanto no foto transistor, esta mesma luz produz uma corrente de base e por sua vez uma corrente de coletor que é β vezes maior que no fotodiodo. A maior sensibilidade do foto transistor traz como desvantagem uma redução na velocidade de chaveamento.

8.2 ACOPLADOR ÓPTICO

A Figura 8.2 abaixo mostra um acoplador óptico. Consiste de um LED próximo a um foto transistor, ambos encapsulados em um mesmo invólucro. Ele é muito mais sensível que um LED e fotodiodo devido ao ganho β . O funcionamento é simples, qualquer variação em V_S produz uma variação na corrente do LED, que faz variar a emissão de luz e, portanto, a corrente no foto transistor. Isso por sua vez, produz uma variação na tensão dos terminais coletor-emissor. Em suma, um sinal de tensão é acoplado do circuito de entrada para o circuito de saída.

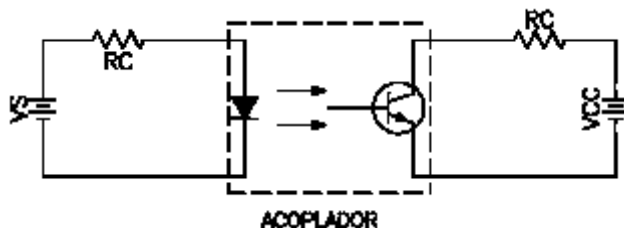


Figura 8.2

A grande vantagem de um acoplador óptico é o isolamento elétrico entre os circuitos de entrada e de saída. Não existe nenhuma relação entre os terras de entrada e saída.

9 AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

OBJETIVOS: Analisar o funcionamento de um amplificador operacional e seus principais parâmetros.

9.1 INTRODUÇÃO TEÓRICA

O nome amplificador operacional (também denominado op-amp) é usado quando muitos amplificadores convencionais são necessários para implementar uma grande variedade de operações lineares ou não lineares. Neste caso é construído um circuito básico cujas operações poderão ser agilizadas bastando para tanto, proceder apenas pequenas modificações externas ao circuito como a introdução ou alteração de resistores, capacitores, indutores, etc.

Existem atualmente uma grande variedade de amplificadores operacionais, geralmente encerrados em um único chip (pastilha), resultando em um custo de fabricação muito baixo.

O símbolo de um op-amp é mostrado abaixo:

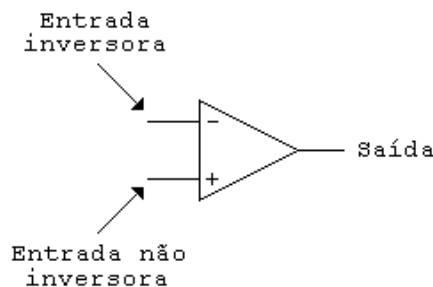


Figura 9.1

- a) um sinal aplicado na entrada (+) aparecerá na saída amplificado, e com a mesma fase.
 b) um sinal aplicado na entrada (-) aparecerá na saída amplificado, porém, defasado 180°.

Para a construção de op-amps utiliza-se tanto a tecnologia bipolar como a unipolar, sendo esta última recomendável quando se deseja altíssimas impedâncias de entrada.

Além da alta impedância de entrada, outra característica importante do op-amp é o seu ganho elevado, que em malha aberta pode chegar a 100.000 vezes, que em última análise, pode ser considerado infinito.

Os fabricantes especificam esse ganho como:

A_{VOL} (ganho de tensão para grandes sinais) = $100V/mV = 100.000 = 100\text{ dB}$

A quantidade de componentes dentro de um chip de um op-amp (transistores, resistores, diodos, etc.), determinam sua escala de integração.

A figura 9.2 abaixo mostra um chip LM339 que contém quatro op-amps.

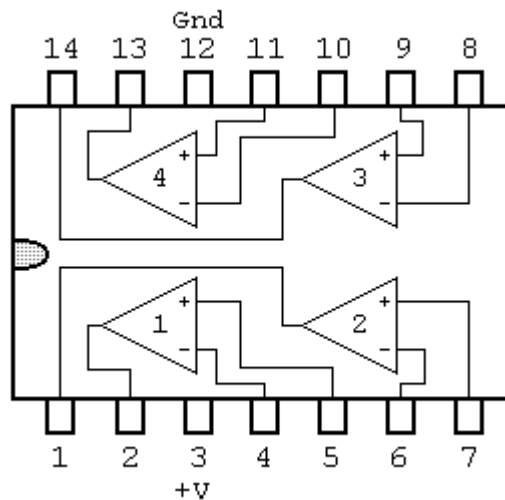


Figura 9.2

9.2 O AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL

O AmpOp ideal constitui um modelo simplificado de um amplo conjunto de amplificadores de tensão atualmente existentes no mercado. Caracteriza-se pelas seguintes quatro propriedades. Ver figura 9.3 abaixo:

- (i) impedância de entrada infinita;
- (ii) impedância de saída nula;
- (iii) ganho de tensão infinito;
- (iv) ausência de qualquer limitação em frequência e em amplitude.

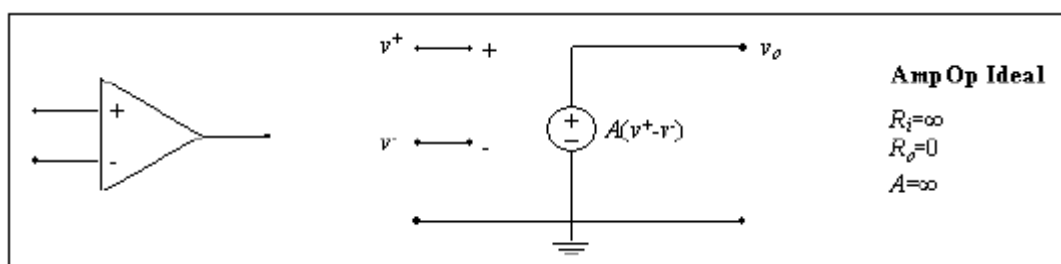


Figura 9.3

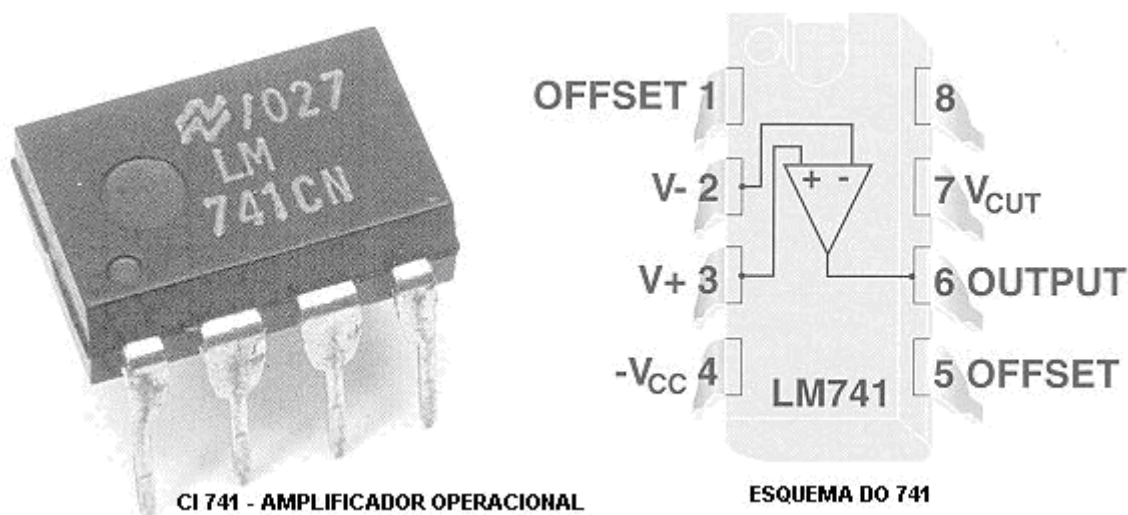


Figura 9.4 Aspecto físico e ligação interna do Amp-op 741

A principal consequência do conjunto de propriedades apenas enunciado é, na prática, a possibilidade de estabelecer um curto-circuito virtual entre os dois terminais de entrada do AmpOp. Com efeito, a existência de uma tensão finita na saída só é compatível com um ganho infinito desde que a diferença de potencial entre os dois terminais de entrada seja nula. A natureza virtual deste curto-circuito deve-se à coexistência de uma igualdade entre tensões sem ligação física entre terminais. Na Figura 9.5 abaixo ilustram-se o significado prático de um curto-circuito virtual.

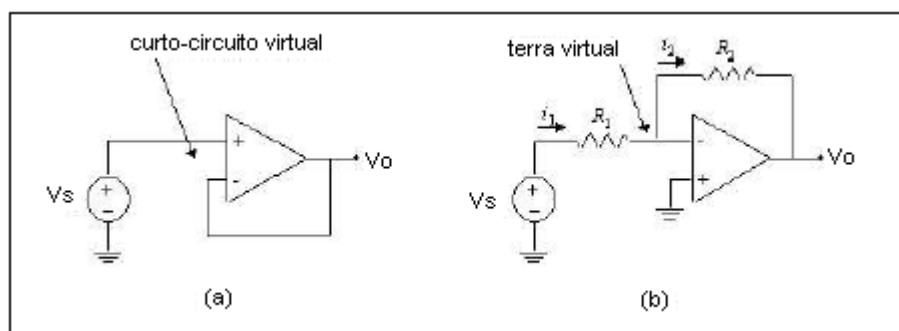


Figura 9.5

Por exemplo, no caso da montagem em (a) a relação entre as tensões nos nós é isto é, a tensão na saída do AmpOp segue a da fonte de sinal aplicada na entrada.

$$V_d = V(+)=V(-)=V_s$$

Por outro lado, no caso da montagem representada em (b) verifica-se que:

$$V(+)=V(-)=0$$

Ou seja, que o terminal negativo do amplificador se encontra ao nível da massa, sem no entanto se encontrar fisicamente ligado a ela. Diz-se então que o terminal negativo do amplificador operacional constitui uma terra virtual.

9.3 PARÂMETROS ELÉTRICOS CC:

Ganho de tensão diferencial - ganho para grandes sinais: A_{VOL}

Geralmente esse ganho é fornecido em decibéis, sendo a relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada. Pode ser assim calculado:

$$A_{dB} = 20 \log |A_v| = 20 \log \left| \frac{V_o}{V_i} \right|$$

Como exemplo, um ganho de tensão de 500 é a mesma coisa que:

$$A_{dB} = 20 \log 500 = 20(2,69897) = 53,98 \text{ dB}$$

Por outro lado, uma ganho de 60dB corresponde a:

$$\frac{60}{20} = \log A_v \rightarrow 3 = \log A_v$$

$$A_v = \text{antilog } 3 = 1.000$$

OBS: antilog de 3 é a mesma coisa que 10^3 .

EXEMPLOS:

- a) Um amplificador operacional possui um ganho de tensão igual a 820. Calcular o ganho em dB.

Solução:

$$A_{dB} = 20 \log 820 = 20(2,914) = 58,28 \text{ dB}$$

- b) Sabe-se que um amplificador operacional tem um ganho de 50dB. Calcule o ganho em tensão.

Solução:

$$50 = 20 \log A_v \rightarrow \frac{50}{20} = \log A_v$$

$$A_v = \text{antilog } 2,5 = 10^{2,5} = 316,22$$

Resistência de entrada simples: R_{in}

É a resistência medida em cada um dos terminais de entrada. Trata-se de um parâmetro muito importante quando vários estágios são interligados.

Os op-amps fabricados com a tecnologia bipolar tem uma resistência de entrada típica de $1 \text{ M}\Omega$, enquanto que na tecnologia bipolar essa resistência varia entre 10^{12} a $10^{15} \Omega$.

Resistência de saída: R_o

A resistência típica é da ordem de 100Ω , a qual depende do estágio de saída usado para fornecer sinal à carga.

O amplificador operacional possui um estágio de entrada, o qual recebe o sinal e um estágio de saída para fornecer o sinal à carga; em alguns casos, possui também um estágio intermediário, conforme ilustra o diagrama de blocos abaixo:

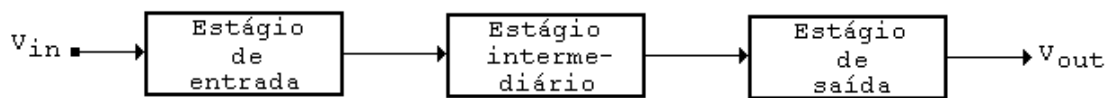


Figura 9.6

O estágio intermediário serve para compensar eventuais distúrbios operacionais entre entrada e saída como, perda de amplitude de sinal, casamento de impedâncias, etc.

Veja a seguir alguns estágios de saída usados nos op-amps.

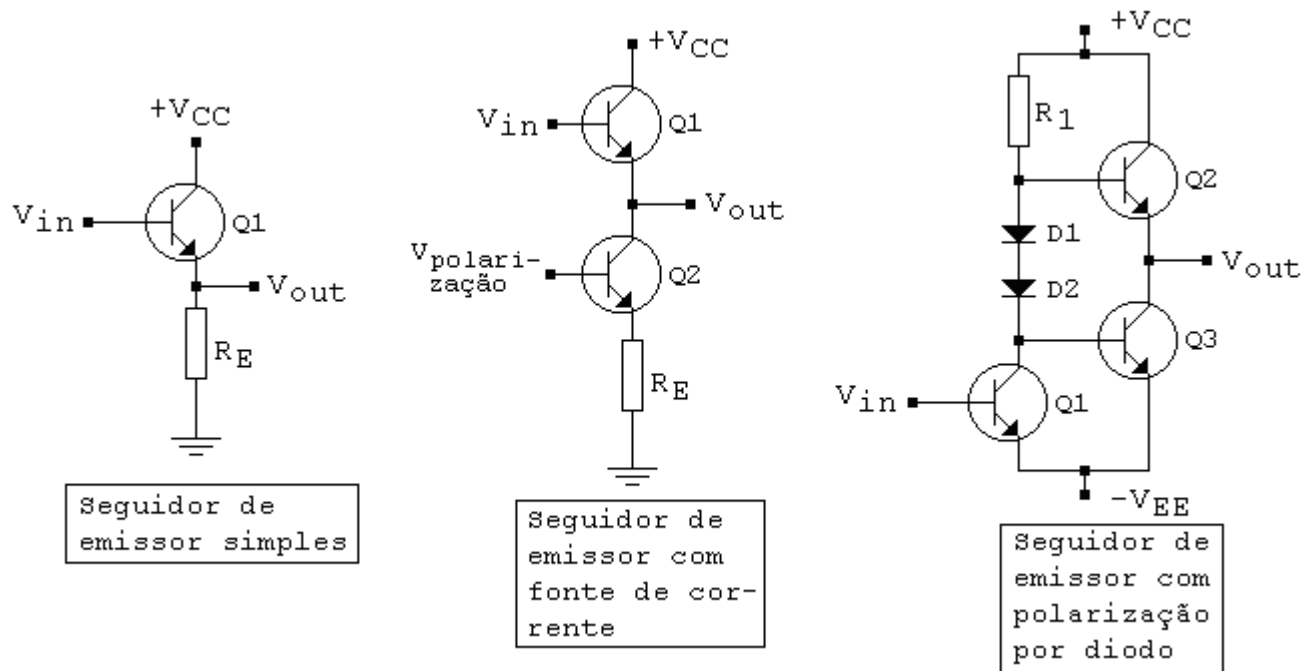


Figura 9.7

Taxa de rejeição em modo comum (Common Mode Rejection Ratio - CMRR)

É definida como a relação do ganho de tensão diferencial com o ganho de tensão em modo comum.

$$CMRR = \frac{Ad}{Ac} \rightarrow CMRR = 20 \log \left| \frac{Ad}{Ac} \right| \text{ dB}$$

Para um valor de CMRR = 80, corresponde a:

$$\frac{Ad}{Ac} = \text{antilog} \frac{CMRR(dB)}{20} = \text{antilog} \frac{80}{20} = 10^4 = 10.000$$

Isto significa que o sinal comum ou de mesma polaridade é amplificado com um ganho 10.000 vezes menor do que as entradas diferenciais ou de polaridades opostas.

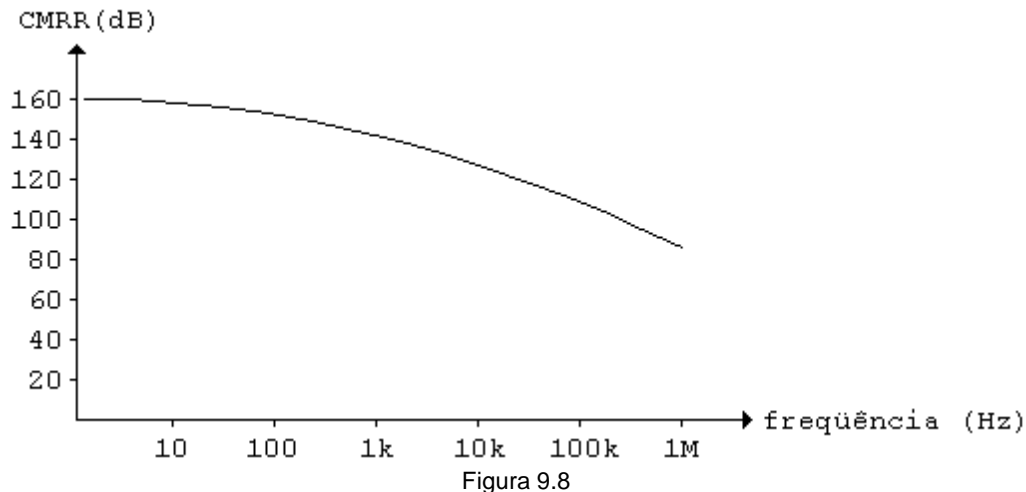
EXEMPLO: Em um amplificador operacional de CMRR = 120dB, aplica-se nas entradas um sinal comum (mesma polaridade) de 1V. Qual será a saída?

Solução:

$$\frac{Ad}{Ac} = \text{antilog} \frac{120}{60} = \text{antilog} 6 = 10^6 = 1.000.000$$

$$V_o = \frac{1}{1.000.000} = 1\mu V$$

A taxa de rejeição de modo comum sofre interferência da frequência, isto é, tende a diminuir com o aumento da frequência, conforme pode ser observado no gráfico a seguir:



Tensão de offset (entrada): V_{os}

É definida como sendo a tensão diferencial necessária entre as entradas de um amplificador diferencial para forçar a saída em 0V.

No caso ideal V_{os} deveria ser de 0V, mas na prática é de alguns mV.

Quando o op-amp opera com grandes sinais esta pequena tensão de offset é aceitável, mas em pequenos sinais pode implicar em erros consideráveis.

Portanto, quando um op-amp for utilizado para operar com sinais muito baixos, deve-se escolher um com tensão de offset desprezível ou que permita o ajuste desta tensão, como no caso do op-amp LM357 mostrado abaixo:

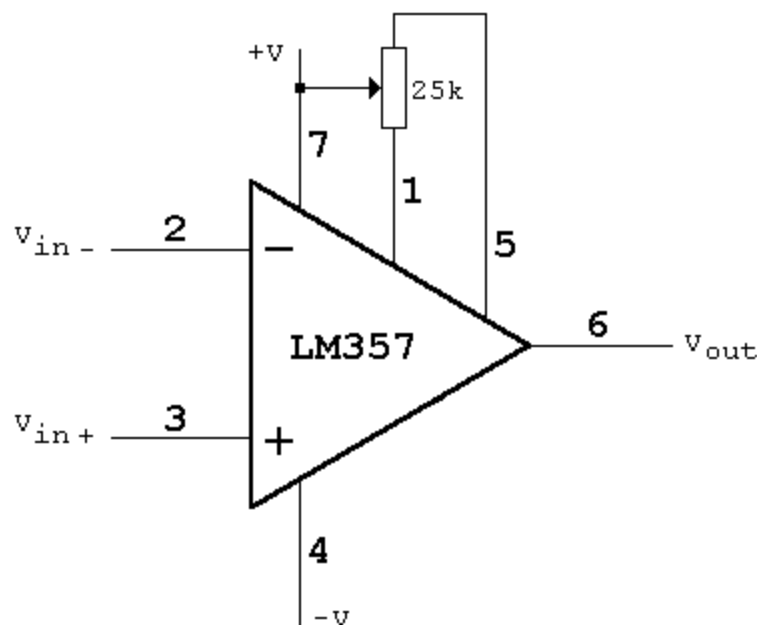


Figura 9.9

O fabricante recomenda o uso de um trimpot ou potenciômetro de $25k\Omega$ entre os pinos 1 e 5, que deve ser ajustado até que a saída seja 0V com os terminais de entrada aterrados ($V_d = 0V$).

Corrente de polarização: $I_{polarização}$

Para que o CI de um op-amp opere adequadamente é necessário fornecer-lhe uma corrente de polarização, de acordo com as especificações do fabricante. Para CIs fabricados com a tecnologia bipolar essa corrente é da ordem da microampères e para os fabricados segundo a tecnologia unipolar essa corrente é da ordem de nanoampères e em alguns casos picoampères.

Geralmente os fabricantes especificam essa corrente à temperatura de $25^\circ C$, no entanto, aumenta bastante com a temperatura. O gráfico abaixo dá uma idéia da variação da corrente com a temperatura para um op-amp fabricado segundo a tecnologia unipolar.

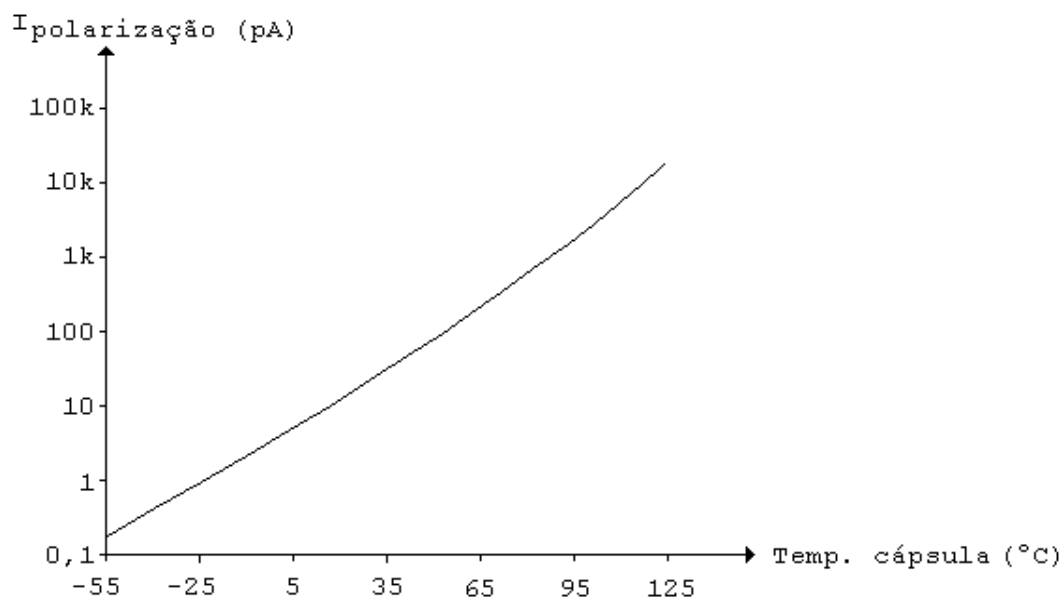


Figura 9.10

Desvio

É o termo que descreve a mudança na tensão de saída em função da variação da temperatura, mesmo quando esta é ajustada em 0V à temperatura ambiente.

O desvio da tensão de offset é dado por $\Delta V_{OS} / \Delta T$ e em geral varia entre 5 e $40 \mu V / ^\circ C$. Adota-se como regra geral uma variação da ordem de $3,3 \mu V / ^\circ C$ para cada mV da tensão de offset original.

A corrente de offset também sofre desvio em função da temperatura. O valor típico desse desvio ($\Delta I_{OS} / \Delta T$) é da ordem 0,01 a $0,5 nA / ^\circ C$.

9.4 PARÂMETROS ELÉTRICOS CA:**Banda passante: B**

A banda passante do ganho unitário de um op-amp especifica a frequência superior na qual o ganho se reduz à unidade (ganho = 1), devido as capacitâncias resultantes da fabricação do circuito.

A banda passante é especificada por alguns fabricantes como largura de banda, do inglês BW - *Bandwidth*.

À medida que o ganho aumenta a banda passante diminui, conforme ilustra o gráfico abaixo:

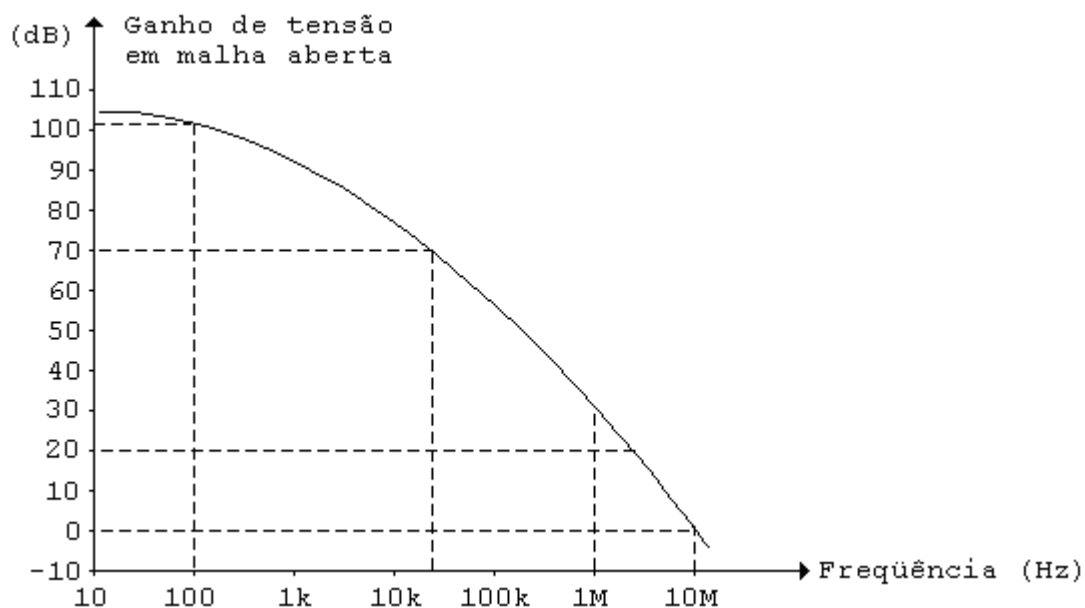


Figura 9.11

Observa-se que na frequência de 100Hz o ganho está ao redor de 100dB enquanto que ao redor de 30kHz o ganho cai para 70dB; em 10MHz o ganho cai para 0dB.

A banda passante pode ser especificada pelo tempo de subida: t_r

$$B = 0,35 / t_r$$

Se o fabricante especificar um tempo de subida (rise time) $t_r = 0,25\mu s$, o valor da banda passante será:

$$B = 0,35 / 0,25\mu s = 1,4MHz$$

O ganho está relacionado com a banda passante (B) e a faixa de passagem (FP).

A faixa de passagem representa a máxima frequência que um op-amp pode responder em função do ganho. Assim:

$$G = \frac{B}{FP} \rightarrow FP = \frac{B}{G}$$

Se um op-amp operar com um ganho de 100 e se $t_r = 0,4\mu s$, a FP será:

$$B = 0,35 / 0,4\mu s = 875kHz$$

$$FP = \frac{875kHz}{100} = 8,75kHz$$

Isto significa que com ganho igual a 100, a máxima frequência fica limitada a 8,75kHz.

Operando com um ganho menor, por exemplo 20, a FP aumentará:

$$FP = \frac{875kHz}{20} = 43,75kHz$$

Exemplos:

a) Um op-amp tem um $t_r = 0,12\mu s$. Qual deverá ser o ganho para uma faixa de passagem de 40kHz?

Solução:

$$B = 0,35 / 0,12\mu s = 2,92MHz$$

$$G = \frac{2,92MHz}{0,04MHz} = 73$$

b) Um op-amp cujo $t_r = 0,35\mu s$ deve operar com ganho igual a 50. Qual é a faixa de passagem para esse ganho?

Solução:

$$B = 0,35 / 0,35\mu s = 1MHz$$

$$FP = \frac{1MHz}{50} = 20kHz$$

Taxa de variação: SR (Slew Rate)

A taxa de variação é um parâmetro que indica quão rápido a tensão de saída muda com o tempo. Os valores típicos vão de 0,5V/ μs a 50V/ μs , sendo que valores maiores indicam maior velocidade de operação do dispositivo.

Quando essa taxa de variação é muito baixa, em frequências mais altas ocorre uma distorção entre os sinais de entrada e saída.

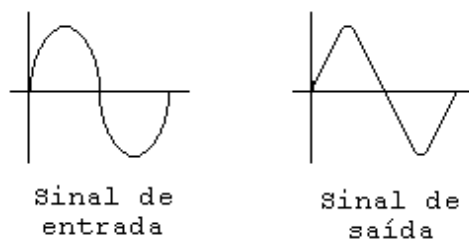


Figura 9.12

Observa-se que o sinal de saída não acompanhou a variação relativa ao sinal de entrada, apresentando distorção.

9.5 MONTAGENS BÁSICAS

O AmpOp é vulgarmente utilizado em duas configurações básicas: a **montagem inversora** e a **montagem não-inversora**. Os circuitos estudados neste capítulo constituem todos eles ou variações ou combinações destas duas configurações básicas.

No que diz respeito às metodologias de análise de circuitos com AmpOps, existem basicamente as seguintes duas alternativas:

(i) uma que assume a presença de um curto-circuito virtual entre os dois terminais de entrada do AmpOp (em conjunto com correntes nulas de entrada);

(ii) e uma outra que considera o AmpOp como uma fonte de tensão controlada por tensão e utiliza as metodologias convencionais de análise de circuitos. Adiante se verá que a primeira metodologia é de mais simples aplicação aos circuitos com AmpOps ideais, ao contrário da segunda, que se destina essencialmente à análise de circuitos com AmpOps reais, neste caso com limitações em ganho, frequência, e impedâncias de entrada e de saída.

MONTAGEM INVERSORA

Considere-se na Figura abaixo, o esquema elétrico da montagem inversora do AmpOp.

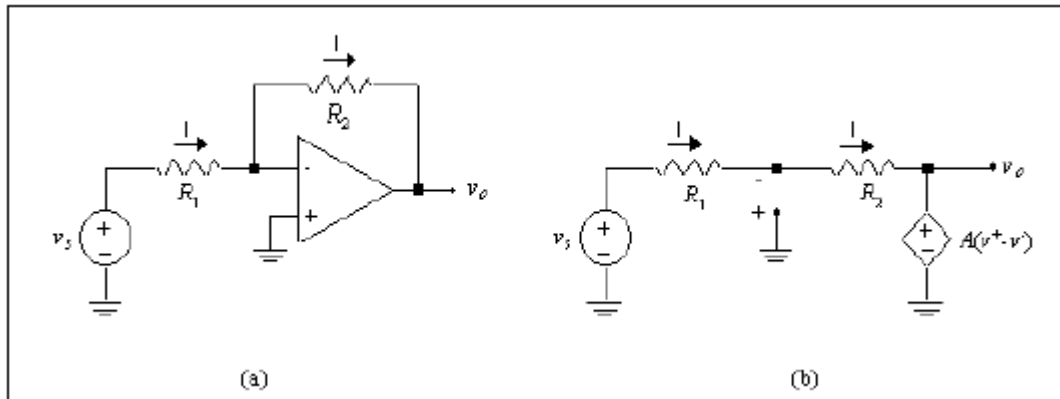


Figura 9.13

Tendo em conta o fato da existência de um curto-circuito virtual entre os dois terminais de entrada, o que implica a igualdade $V(+) = V(-) = 0$, e ainda o fato de as correntes nos nós de entrada serem nulas, $I(-) = I(+) = 0$, verifica-se então que:

$$V_s - R_1 \cdot I = 0 \quad \text{e} \quad V_o + R_2 \cdot I = 0$$

Como;

$$\frac{V_s}{R_1} = -\frac{V_o}{R_2}$$

Daí:

$$\frac{V_o}{V_s} = -\frac{R_2}{R_1}$$

O qual é apenas função do cociente entre os valores das resistências R_2 e R_1 .

MONTAGEM NÃO-INVERSORA

Considere-se na Figura abaixo a montagem não inversora do AmpOp.

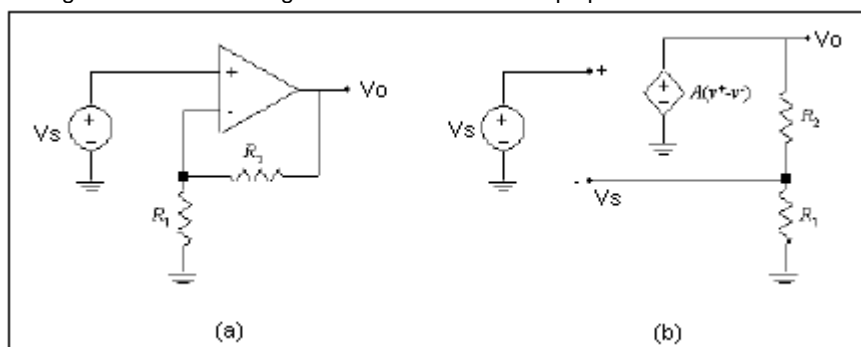


Figura 9.14

A existência de um curto-circuito virtual entre os nós de entrada do amplificador permite escrever a igualdade entre as três tensões:

$$V_s = V(+) = V(-)$$

Daí V_s aparece entre R_1 e R_2 e pela regra do divisor de tensão:

$$V_s = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_o$$

De onde:

$$\frac{V_o}{V_s} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

O ganho de tensão desta montagem é positivo, superior à unidade e, mais uma vez, dependente apenas do cociente entre os valores das resistências R_1 e R_2 .

9.6 - CIRCUITOS COM AMPOPS

As montagens **inversora** e **não - inversora** são utilizadas numa infinidade de aplicações de processamento de sinal, designadamente de amplificação, filtragem, retificação de sinais, conversão e simulação de impedâncias, conversão tensão - corrente e corrente - tensão, etc. A seguir, estudam-se algumas aplicações que permitem ilustrar o enorme potencial prático do amplificador operacional de tensão.

SEGUIDOR DE TENSÃO

O circuito seguidor de tensão constitui uma das aplicações mais comuns do amplificador operacional (Figura 6; na literatura inglesa este circuito é designado por *buffer*, cuja tradução para a Língua Portuguesa é circuito amortecedor ou tampão).

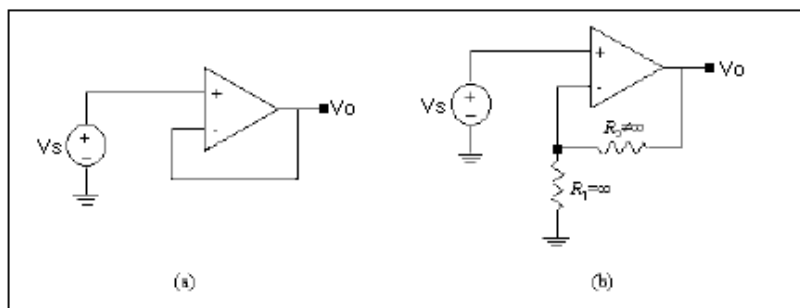


Figura 9.15

O seguidor de tensão implementa um ganho unitário entre a entrada e a saída, resultado que à primeira vista poderia parecer destituído de aplicação prática.

$$V_o/V_s = 1$$

AMPLIFICADOR SOMADOR INVERSOR

O circuito da Figura abaixo é derivado do amplificador inversor, tendo mais de uma entrada

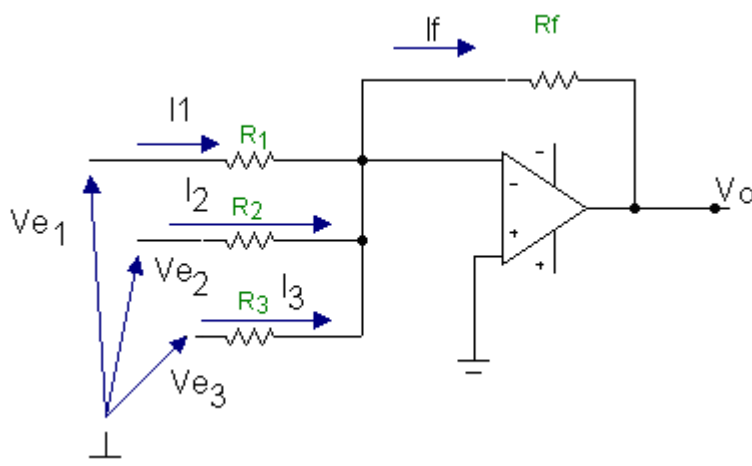


Figura 9.16

Para obter a expressão de $V_o = f(v_1, v_2, v_3)$ faremos as mesmas considerações já feitas na análise do amplificador inversor, de forma que :

$$I_f = I_1 + I_2 + I_3 \quad \text{onde: } I_1 = v_1/R_1, \quad I_2 = v_2/R_2, \quad I_3 = v_3/R_3 \quad \text{e como } V_o = -R_f \cdot I_f$$

$$V_o = -R_F.(V_1/R_1 + V_2/R_2 + V_3/R_3)$$

A tensão de saída é uma combinação linear das tensões de entrada.

Se fizermos $R_1 = R_2 = R_3 = R$ resultará:

$$V_o = -R_F/R.(V_1 + V_2 + V_3)$$

E se $R_f = R$

$$V_o = - (V_1 + V_2 + V_3)$$

O circuito soma as tensões de entrada e inverte.

Obs: O número de entradas está limitado à capacidade de corrente na saída.

AMPLIFICADOR DA DIFERENÇA

A utilização conjunta das montagens inversora e não-inversora permite realizar um circuito que implementa a amplificação da diferença entre dois sinais (Figura 9.17 abaixo).

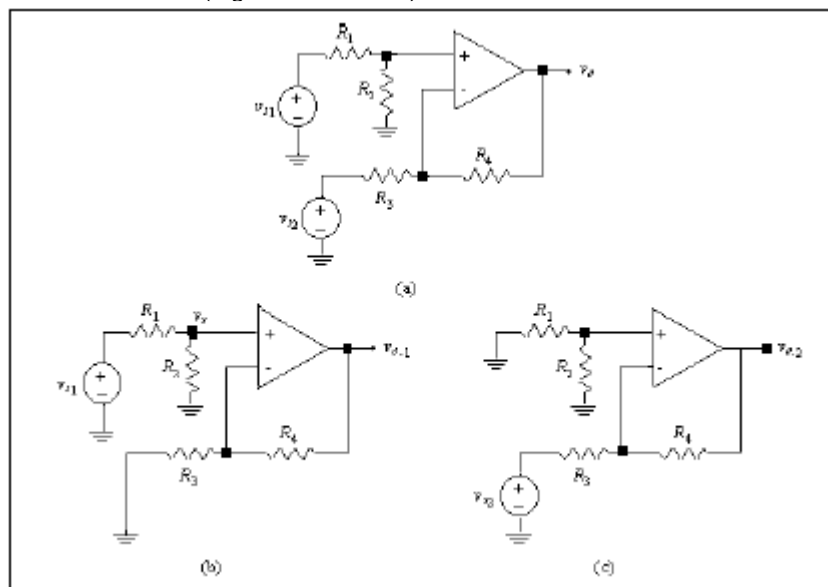


Figura 9.17

A aplicação do teorema da sobreposição das fontes permite identificar as seguintes duas contribuições para a tensão na saída do AmpOp (Figuras b e c): a parcela

$$v_{o-1} = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)v_x = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)\left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)v_{s1} = \frac{\left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)}{\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)}v_{s1}$$

a qual basicamente coincide com a expressão da montagem não - inversora afetada do divisor resistivo implementado pelas resistências R_1 e R_2 na entrada, e a parcela

$$v_{o-2} = -\frac{R_4}{R_3}v_{s2}$$

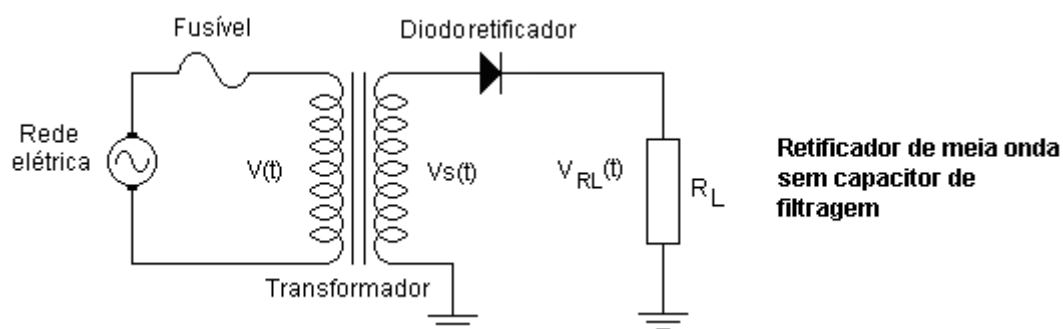
relativa à montagem inversora implementada pelas resistências R_3 e R_4 sobre o sinal v_2 (note-se que, neste caso, as resistências ligadas ao nó positivo do AmpOp não alteram em nada o funcionamento da montagem inversora).

De acordo com as expressões acima), a tensão na saída é

$$v_o = \frac{\left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)}{\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)}v_{s1} - \frac{R_4}{R_3}v_{s2}$$

que no caso particular em que se verifica a igualdade entre os cocientes R_4/R_3 e R_2/R_1 se simplifica para

$$v_o = \frac{R_4}{R_3}(v_{s1} - v_{s2})$$

**BIBLIOGRAFICAS:**

MALVINO, Albert Paul. *Eletrônica*. 4ª ed. vols. 1 e 2. São Paulo, Ed. McGraw-Hill, 1995

MALVINO, Albert Paul - *Eletrônica no laboratório*. São Paulo, Ed. McGraw-Hill, 1987

BOYLESTAD, Robert & NASHIELSKY, Louis. *Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos*. Rio de Janeiro, Ed. Prentice/Hall Brasil, 1993

IBRAPE. *MANUAL DE TRANSISTORES - DADOS PARA PROJETOS* - 1.990

Hino Nacional

Ouviram do Ipiranga as margens plácidas
De um povo heróico o brado retumbante,
E o sol da liberdade, em raios fúlgidos,
Brilhou no céu da pátria nesse instante.

Se o penhor dessa igualdade
Conseguimos conquistar com braço forte,
Em teu seio, ó liberdade,
Desafia o nosso peito a própria morte!

Ó Pátria amada,
Idolatrada,
Salve! Salve!

Brasil, um sonho intenso, um raio vívido
De amor e de esperança à terra desce,
Se em teu formoso céu, risonho e límpido,
A imagem do Cruzeiro resplandece.

Gigante pela própria natureza,
És belo, és forte, impávido colosso,
E o teu futuro espelha essa grandeza.

Terra adorada,
Entre outras mil,
És tu, Brasil,
Ó Pátria amada!
Dos filhos deste solo és mãe gentil,
Pátria amada, Brasil!

Deitado eternamente em berço esplêndido,
Ao som do mar e à luz do céu profundo,
Fulguras, ó Brasil, florão da América,
Iluminado ao sol do Novo Mundo!

Do que a terra, mais garrida,
Teus risonhos, lindos campos têm mais flores;
"Nossos bosques têm mais vida",
"Nossa vida" no teu seio "mais amores."

Ó Pátria amada,
Idolatrada,
Salve! Salve!

Brasil, de amor eterno seja símbolo
O lábaro que ostentas estrelado,
E diga o verde-louro dessa flâmula
- "Paz no futuro e glória no passado."

Mas, se ergues da justiça a clava forte,
Verás que um filho teu não foge à luta,
Nem teme, quem te adora, a própria morte.

Terra adorada,
Entre outras mil,
És tu, Brasil,
Ó Pátria amada!
Dos filhos deste solo és mãe gentil,
Pátria amada, Brasil!

Hino do Estado do Ceará

Poesia de Thomaz Lopes
Música de Alberto Nepomuceno
Terra do sol, do amor, terra da luz!
Soa o clarim que tua glória conta!
Terra, o teu nome a fama aos céus remonta
Em clarão que seduz!
Nome que brilha esplêndido luzeiro
Nos fulvos braços de ouro do cruzeiro!

Mudem-se em flor as pedras dos caminhos!
Chuvas de prata rolem das estrelas...
E despertando, deslumbrada, ao vê-las
Ressoa a voz dos ninhos...
Há de florar nas rosas e nos cravos
Rubros o sangue ardente dos escravos.
Seja teu verbo a voz do coração,
Verbo de paz e amor do Sul ao Norte!
Ruja teu peito em luta contra a morte,
Acordando a amplidão.
Peito que deu alívio a quem sofria
E foi o sol iluminando o dia!

Tua jangada afoita enfune o pano!
Vento feliz conduza a vela ousada!
Que importa que no seu barco seja um nada
Na vastidão do oceano,
Se à proa vão heróis e marinheiros
E vão no peito corações guerreiros?

Se, nós te amamos, em aventuras e mágoas!
Porque esse chão que embebe a água dos rios
Há de florar em meses, nos estios
E bosques, pelas águas!
Selvas e rios, serras e florestas
Brotem no solo em rumorosas festas!
Abra-se ao vento o teu pendão natal
Sobre as revoltas águas dos teus mares!
E desfraldado diga aos céus e aos mares
A vitória imortal!
Que foi de sangue, em guerras leais e francas,
E foi na paz da cor das hóstias brancas!



GOVERNO DO
ESTADO DO CEARÁ
Secretaria da Educação