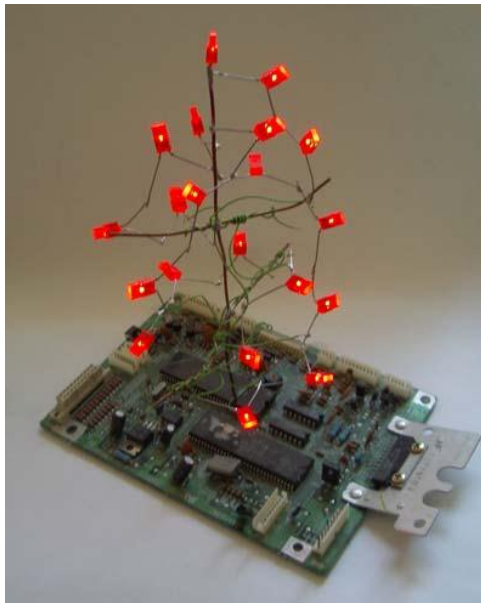




CAMPUS ZONA NORTE DE NATAL

Apostila

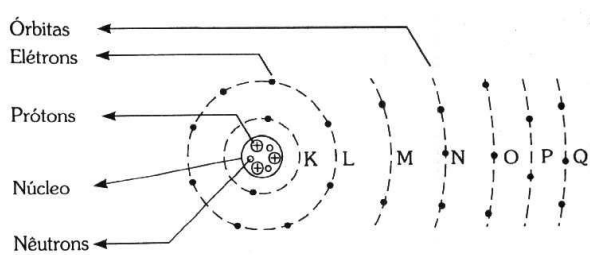
Eletrônica Analógica



Capítulo 1- Teoria dos Semicondutores e o Diodo Semicondutor

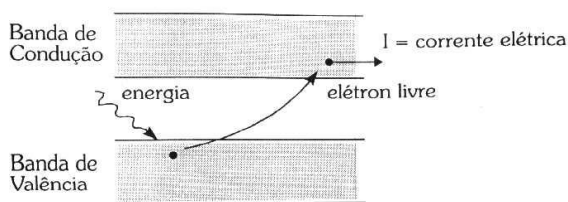
1 - Bandas de Energia

Um átomo é formado por elétrons que giram ao redor de um núcleo composto por prótons e nêutrons, sendo que o número de elétrons, prótons e nêutrons é diferente para cada tipo de elemento químico.



A última órbita de um átomo define a sua valência, ou seja, a quantidade de elétrons desta órbita que pode se libertar do átomo através do bombardeio de energia externa (calor, luz ou outro tipo de radiação) ou se ligar a outro átomo através de ligações covalentes (compartilhamento de elétrons da última órbita de um átomo com os elétrons da última órbita de outro átomo).

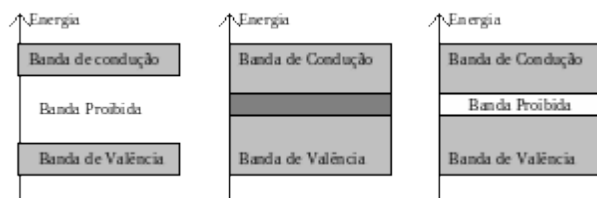
Esta órbita mais externa recebe, por isso, o nome de órbita de valência ou banda de valência.



Os elétrons da banda de valência são os que têm mais facilidade de sair do átomo. Em primeiro lugar porque eles têm uma energia maior e, em segundo lugar, porque, por estarem a uma distância maior em relação ao núcleo do átomo, a força de atração eletrostática é menor. Com isso uma pequena quantidade de energia recebida faz com que eles se tornem elétrons livres que, sob a ação de um campo elétrico formam a corrente elétrica.

O fato dessas órbitas estarem a distâncias bem-definidas em relação ao núcleo do átomo, faz com que entre uma órbita e outra exista uma região onde não é possível existir elétrons, denominada banda proibida.

O tamanho dessa banda proibida na última camada de elétrons define o comportamento elétrico do material, como na figura abaixo, onde três situações diferentes estão representadas.



Isolantes, Condutores e Semicondutores

No primeiro caso, um elétron, para se livrar do átomo, tem que dar um salto de energia muito grande. Desta forma, pouquíssimos elétrons têm energia suficiente para sair da banda de valência e atingir a banda de condução, fazendo com que a corrente elétrica neste material seja sempre muito pequena. Esses materiais são chamados de isolantes.

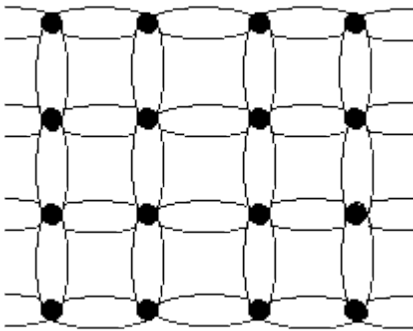
No segundo caso, um elétron pode passar facilmente da banda de valência para a banda de condução sem precisar de muita energia. Isso acontece principalmente nos materiais metálicos, onde a própria temperatura ambiente é suficiente para o surgimento de uma grande quantidade de elétrons livres. Esses materiais são chamados de condutores.

O terceiro caso é um intermediário entre os dois outros. Um elétron precisa dar um salto pequeno e, por isso, esses materiais possuem características intermediárias em relação aos dois anteriores sendo, portanto, chamados de semicondutores.

2 - Materiais Semicondutores Intrínsecos

Existem vários tipos de materiais semicondutores. Os mais comuns e mais utilizados são o silício (Si) e o germânio (Ge).

Estes dois elementos caracterizam-se por serem tetravalentes, ou seja, por possuírem quatro elétrons na camada de valência, como mostra a figura abaixo.



Hoje em dia, o silício é o material mais utilizado já que é bastante abundante na natureza e, portanto, mais barato.

3 - Condução Elétrica nos Semicondutores

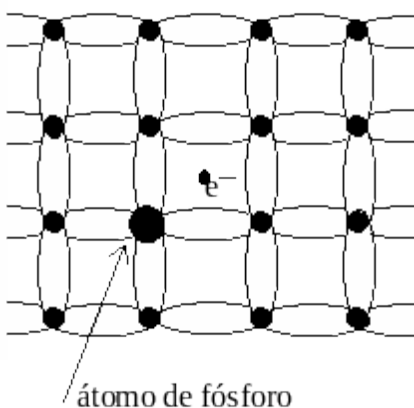
Em semicondutores temos dois tipo de condução:

- Movimento dos íons positivos : Lacunas.
- Movimento dos elétrons livres : Elétrons

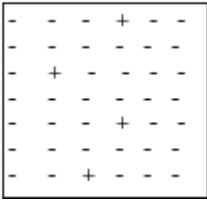
Para toda movimentação de um íon positivo em um determinado sentido, temos a movimentação do elétron no sentido contrário.

4 - Semicondutores Tipo N e P

Quando num cristal de silício é acrescentado uma quantidade de átomos de um material pentavalente (com cinco elétrons na camada de valência) como, por exemplo, o arsênio (As), o antimônio (Sb) e o fósforo (P), estes elementos estranhos, também chamados de impurezas, assumem a mesma estrutura do cristal de silício fazendo, cada impureza, quatro ligações covalentes com seus átomos vizinhos mais próximos, como mostra a figura a seguir.



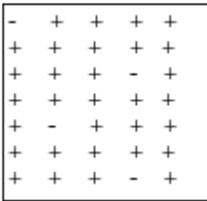
Desta forma, o número de elétrons livres é maior que o número de lacunas geradas pelo calor a temperatura ambiente) ou seja, neste semicondutor os elétrons livres são portadores majoritários e as lacunas são portadores minoritários, como mostra a figura abaixo.



Semicondutor Tipo N

De maneira análoga, se as impurezas encontradas são de átomos de material trivalente (alumínio, boro, gálio, etc), as ligações covalentes formarão lacunas.

Desta forma o número de lacunas é maior que o número de elétrons livres gerados pelo calor a temperatura ambiente), ou seja, neste semicondutor as lacunas são portadores majoritário e os elétrons livres são portadores minoritários, como mostra a figura abaixo.

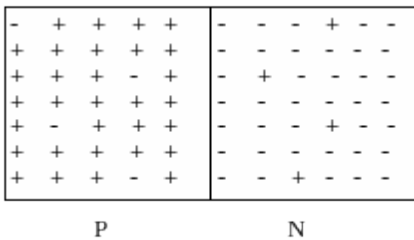


Semicondutor Tipo P

5 - O Diodo Semicondutor

5.1 - A Junção PN

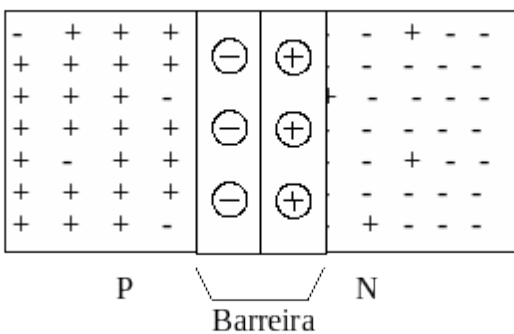
O diodo semicondutor é constituído basicamente por uma junção PN, ou seja, pela união física de um material **P** com um **N**.



Junção PN

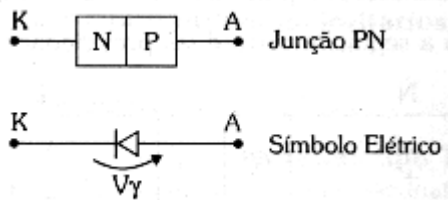
Com esta união há uma recombinação de elétrons e lacunas na região da junção, formando uma barreira de potencial, já que a migração dos elétrons cria regiões de íons positivos e negativos.

íons negativos íons positivos



Barreira de Potencial

Cada lado do diodo recebe um nome: O lado P chama-se de ANODO(A) e o lado N chama-se de CATODO(K).



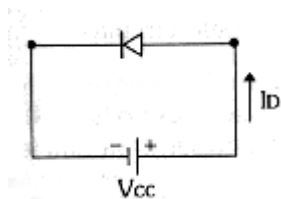
5.2 - Polarização Direta da Junção PN

Com uma tensão aplicada aos terminais do diodo, algumas características da barreira de potencial são alteradas.

Uma polarização direta ocorre quando o potencial positivo da fonte encontra-se ligado no lado P e o potencial negativo no lado N.

Desta forma os elétrons do lado N são empurrados pelo terminal negativo da fonte e atravessam a barreira de potencial.. Do lado P preenchem as lacunas, mas continuam se movimentando em direção ao terminal positivo da fonte, estabelecendo, assim, uma corrente elétrica.

Nestas condições o diodo se comporta praticamente como um curto-circuito. (R muito pequeno)

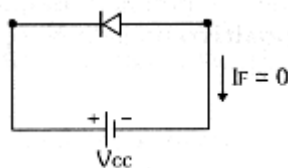


5.3 - Polarização Reversa da Junção PN

A polarização reversa ocorre quando o potencial negativo da fonte encontra-se no lado P e o potencial positivo do lado N.

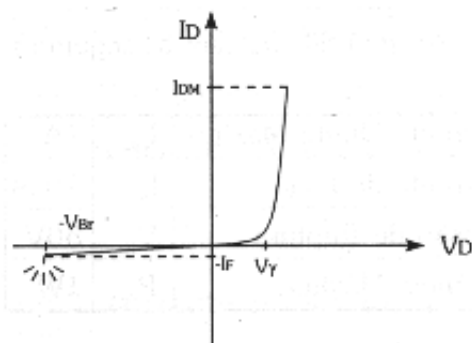
Por causa da polarização reversa, os elétrons do lado N são atraídos para o terminal positivo e as lacunas para o terminal negativo da fonte. Com isso formam-se mais íons positivos do lado N e íons negativos no lado P, aumentando, assim, a barreira de potencial.

A pequena corrente que circula é chamada de corrente de fuga (portadores minoritários) e pode ser desprezada na maioria dos casos.



Nestas condições o diodo se comporta como um circuito aberto (resistência muito alta).

Portanto o diodo é um dispositivo que conduz corrente apenas em um único sentido, quando está polarizado diretamente.

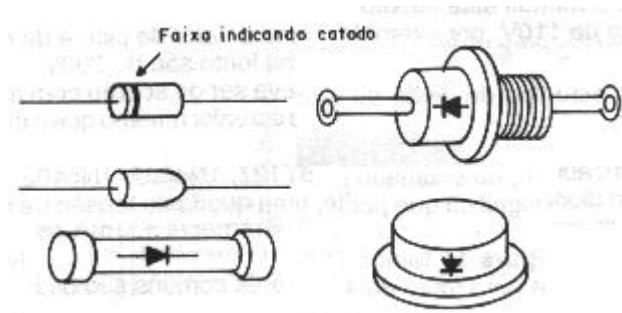


5.3 - Principais Especificações do Diodo

1. Como a junção PN possui uma barreira de potencial, na polarização direta só existe corrente elétrica se a tensão aplicada ao diodo for maior que V_γ (0,7V)
2. Na polarização direta existe uma corrente máxima que o diodo pode conduzir (I_{DM}) e uma potência máxima de dissipação (P_{DM}):

$$P_{DM} = V \cdot I_{DM}$$

3. Na polarização reversa existe uma tensão máxima chamada de tensão de ruptura ou breakdown (V_{BR}).
4. Na polarização reversa existe uma corrente muito pequena denominada de corrente de fuga (I_F)



Capítulo 2 - Circuitos com Diodos

1 - Sinal Senoidal

Um dos sinais elétricos alternados mais comuns é o senoidal. O sinal senoidal pode ser representado matematicamente por:

$$x = X_p \cdot \sin(y)$$

onde:

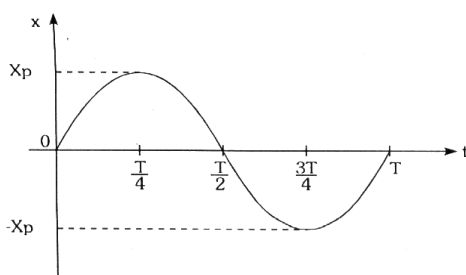
x: valor instantâneo da variável x

X_p : valor de pico da variável x

y: domínio da função x

Em eletricidade usamos dois domínios:

- angular ($y = \theta$) ($0 < \theta < 2\pi$)
- temporal ($y = \omega \cdot t$) ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$)



Sinal Senoidal

É importante o conhecimento destas três definições:

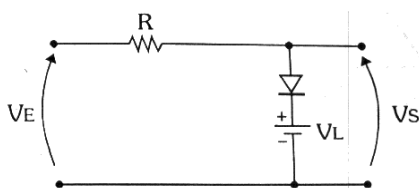
- Valor de pico a pico (X_{pp})
 $X_{pp} = 2.X_p$
- Valor médio (X_M)
 $X_M = 0$
- Valor eficaz (X_{RMS}) ou (X_{EF})
 $X_{RMS} = \frac{X_p}{\sqrt{2}}$

2 - Circuitos Limitadores

O limitador é um circuito que, como o próprio nome diz. Tem como objetivo limitar a tensão de saída do circuito num valor predeterminado, podendo ser negativo, positivo ou ambos.

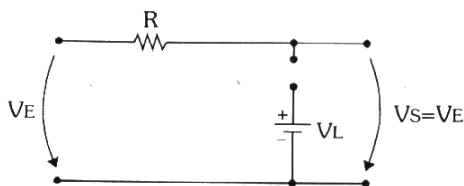
2.1 - Limitador Positivo

A figura 2 mostra o aspecto de um limitador positivo.

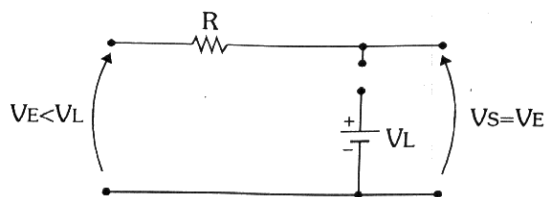


Limitador Positivo

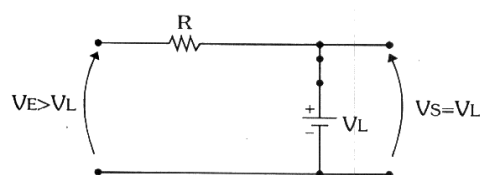
Considerando-se o diodo ideal, se a tensão de entrada V_E é negativa, o diodo fica reversamente polarizado, ou seja, funciona como um circuito aberto, fazendo com que a tensão da saída V_S seja igual a V_E , como mostra a figura abaixo.



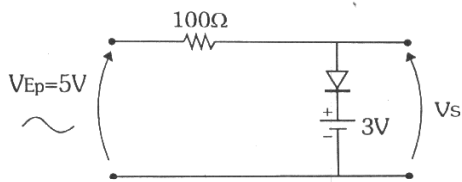
Se a tensão de entrada V_E é positiva e menor que V_L , o diodo permanece polarizado reversamente e, portanto, a tensão de saída V_S continua sendo igual a V_E , como mostra a figura abaixo.



Porém, se a tensão de entrada V_E é positiva e maior que V_L , o diodo fica diretamente polarizado, comportando-se como um condutor, fazendo com que a tensão de saída V_S fique limitada ao valor de V_L , como mostra a figura a seguir.

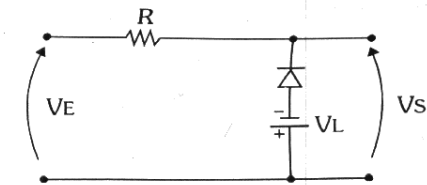


Exemplo 1 - Determine a forma de saída do circuito limitador positivo mostrado na figura 6, usando o diodo ideal e um sinal de entrada senoidal com pico de 5 V.



2.2 - Limitador Negativo

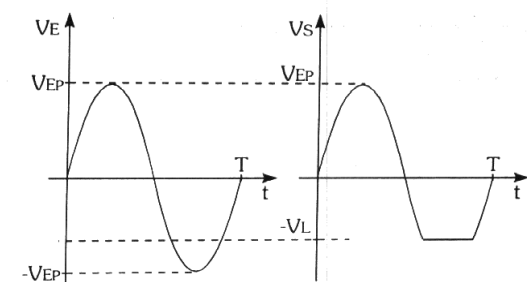
Invertendo-se o diodo e a fonte V_L , tem-se o circuito limitador negativo, como mostra abaixo.



Limitador Negativo

Neste caso, tanto as tensões de entrada positivas quanto as negativas menores que V_L polarizam o diodo reversamente, fazendo com que a tensão de saída seja igual à de entrada.

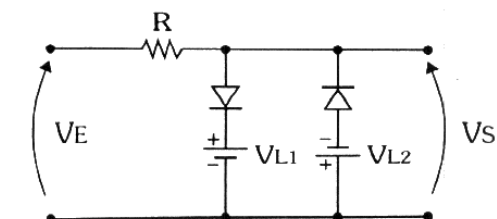
Porém, para tensões de entrada negativas maiores que V_L , a tensão de saída permanece em V_L , como mostra abaixo.



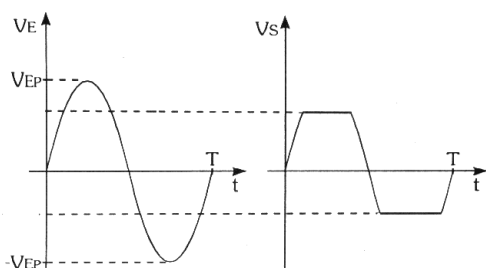
Sinal de Entrada e Saída

2.3 - Limitador Duplo

Associando-se os limitadores positivo e negativo, pode-se obter o limitador duplo, como mostra as figuras a seguir.



Limitador Duplo



Sinal de Entrada e Saída

3 - Circuitos Retificadores

A geração e distribuição de energia elétrica é efetuada na forma de tensões alternadas senoidais, porém vários aparelhos eletrônicos precisam de tensões contínuas. Sendo assim, necessitam de circuitos que transformam tensões alternadas em tensões contínuas. Estes circuitos são denominados de retificadores.

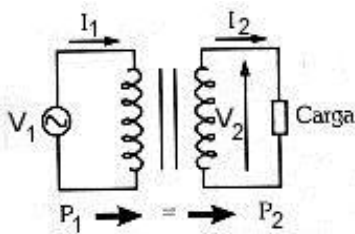
Porém a tensão alternada na entrada de um circuito retificador deve ser adequada ao seu padrão de tensão, ou seja, à tensão da rede elétrica, antes de ser ligada ao retificador, precisa ser reduzida, trabalho este realizado pelo transformador.

Ainda, após o retificador, é necessário eliminar as variações da tensão contínua para que a mesma torne-se constante, o que é feito através de filtros ou circuitos reguladores de tensão.

A este conjunto de circuitos dá-se o nome de fonte de tensão ou fonte de alimentação.

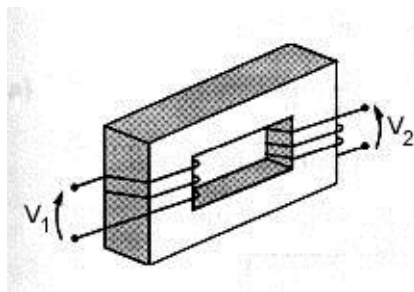
3.1 - Transformadores

O transformador é uma máquina elétrica que transforma níveis de tensão e corrente em um circuito. Dentre os vários tipos de trafos, vamos falar sobre dois: O trafa abaixador e o trafa abaixador com tap central.



Transformador

O transformador é constituído por dois enrolamentos, o primário, no qual é ligado à tensão da rede, e o secundário, no qual pode ser ligado a carga. Um núcleo de aço, ferrite ou ar realiza o acoplamento magnético entre os enrolamentos.



As relações entre as tensões e correntes dos enrolamentos estão relacionadas ao número de espiras destes enrolamentos.

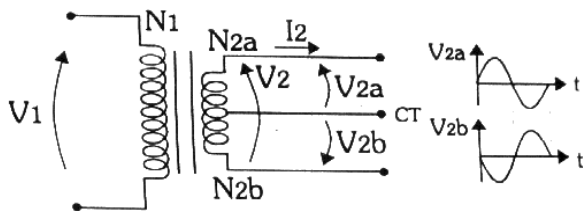
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{e} \quad \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

Idealmente a transformação ocorre sem perda de potência, isto é:

$$V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2$$

Exemplo 2 - Determinar o número de espiras do secundário de um transformador projetado para reduzir a tensão da rede de 220V para 12V eficazes, sabendo-se que ele possui 1000 espiras no enrolamento primário.

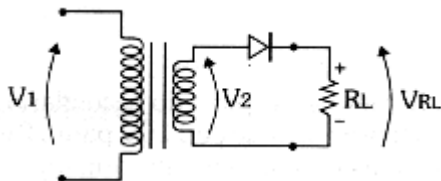
O transformador com Tap Central permite a obtenção de duas tensões no seu secundário, geralmente de mesmo valor eficaz e com polaridade invertida.



Transformador com Tap Central

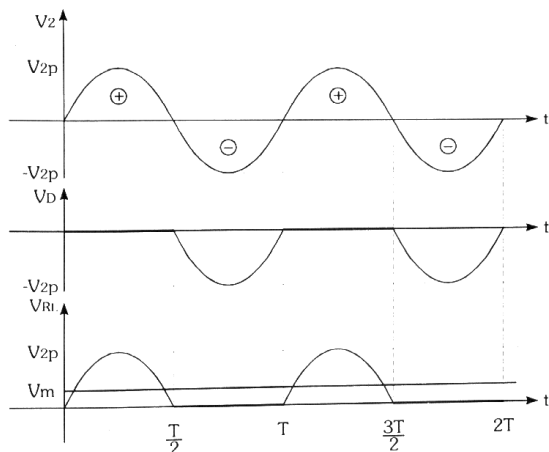
3.2 - Retificador de Meia Onda

O mais simples dos retificadores é o retificador de meia-onda. A sua constituição básica é um diodo em série com uma carga R_L .



Retificador de Meia-onda

Pelo circuito do retificador de meia onda, vê-se que durante o semiciclo positivo de V_2 , o diodo conduz (polarização direta), fazendo com que a tensão de saída seja igual à de entrada. Porém, no semiciclo negativo, o diodo corta (polarização reversa), fazendo com que a tensão de saída seja nula e a tensão de entrada caia toda em cima do diodo como mostra a figura abaixo.



Formas de ondas

Como a forma de onda na carga não é mais senoidal, embora a frequência seja a mesma da tensão de entrada, o seu valor médio deixa de ser nulo, existindo uma corrente média dada por:

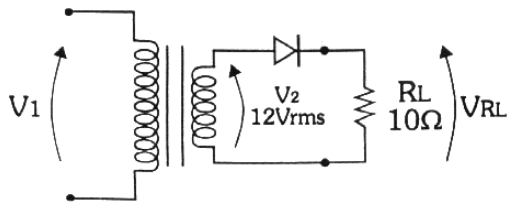
$$V_M = \frac{V_{2P}}{\pi} \quad I_M = \frac{V_M}{R_L}$$

Para que o diodo não queime, ele deve suportar tanto esta corrente média quanto a tensão de pico reversa:

$$I_{DM} > I_M \quad V_{BR} > V_{2P}$$

Exemplo 3 - No circuito abaixo determine:

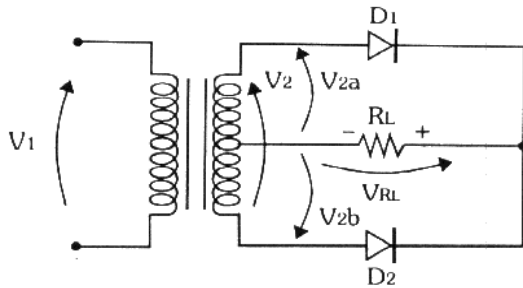
1. a tensão média na carga.
2. corrente média
3. especificações do diodo.



3.3 - Retificador de Onda-Completa com Tap

O retificador de onda completa faz com que tanto o semiciclo positivo quanto o negativo caiam sobre a carga sempre com a mesma polaridade.

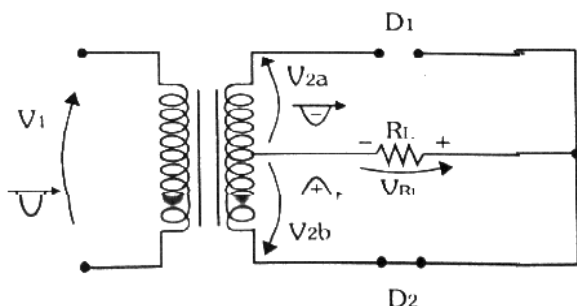
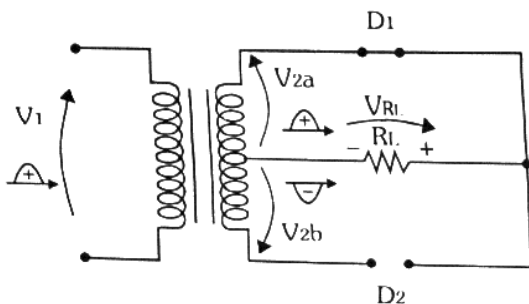
Usando um transformador com tap central, isto é possível através do circuito mostrado na figura abaixo.



Retificador de onda completa

Durante o semiciclo positivo, o diodo D_1 conduz e o diodo D_2 corta, fazendo com que a tensão na carga seja positiva e igual à tensão no secundário superior do transformador.

Durante o semiciclo negativo o diodo D_1 corta e o diodo D_2 conduz, fazendo com que a tensão na carga tenha a mesma polaridade que a da situação anterior e a mesma amplitude.



Neste caso a frequência do sinal de saída dobra de valor e, portanto a tensão média na carga também dobra. Por outro lado, como a tensão de pico na carga é a metade da tensão de pico no secundário do trafo, a tensão média final é a mesma que se obteria usando um retificador de meia onda com este mesmo trafo.

$$V_M = \frac{V_{2P}}{\pi} I_M = \frac{V_M}{R_L}$$

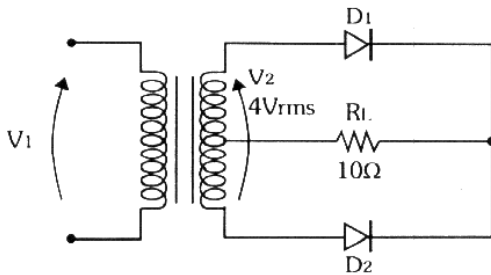
Porém a vantagem está na especificação do diodo e na qualidade da filtragem.

Como cada diodo conduz somente num semiciclo, ele conduz metade da corrente média. Por outro lado, a tensão reversa que ele deve suportar corresponde a tensão total de pico do secundário.

$$I_{DM} > I_M/2 \quad V_{BR} > V_{2P}$$

Exemplo 4 - No circuito abaixo determine:

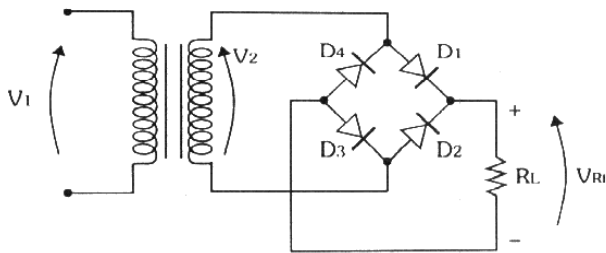
1. a tensão média na carga.
2. corrente média
3. especificações do diodo.



Retificador de onda completa

3.4 - Retificador de Onda Completa em Ponte

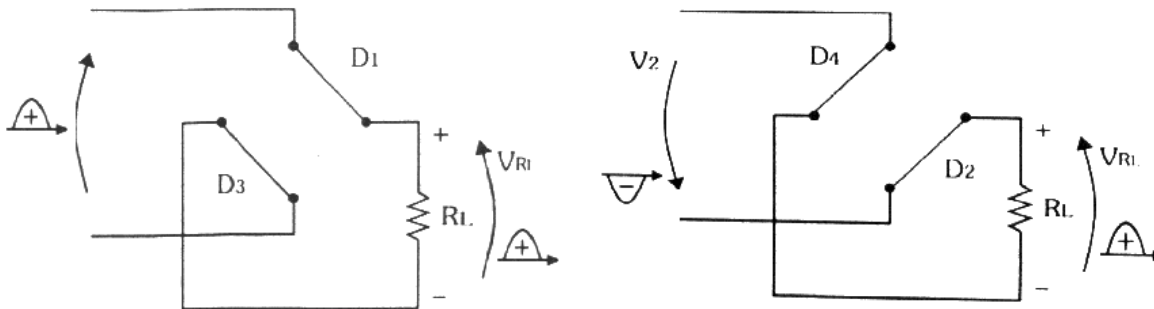
Outro tipo de retificador de onda completa é mostrado na figura abaixo. Algumas vantagens são obtidas.



Retificador em ponte

Durante o semiciclo positivo, os diodos D_1 e D_3 conduzem e os diodos D_2 e D_4 cortam. Transferindo, assim, toda a tensão de entrada para a carga.

Durante o semiciclo negativo, os diodos D_2 e D_4 conduzem e os diodos D_1 e D_3 cortam, fazendo com que toda a tensão de entrada caia sobre a carga com a mesma polaridade que a do semiciclo positivo.



Como neste caso a frequência da tensão de saída dobra de valor, a tensão média na carga também dobra, ou seja:

$$V_M = \frac{2 \cdot V_{2P}}{\pi} \quad I_M = \frac{V_M}{R_L}$$

Os diodos são especificados a partir dos seguintes critérios:

$$I_{DM} > I_M/2 \quad V_{BR} > V_{2P}$$

Exemplo 5 - Um retificador em ponte recebe 25 Vrms e alimenta uma carga de 10 Ω . Determine:

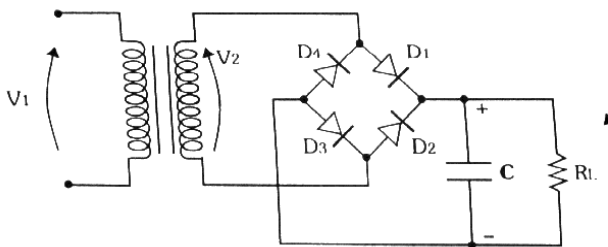
1. a tensão média na carga.
2. corrente média
3. especificações do diodo.
4. formas de onda na carga e no diodo D_1 .

3.5 - Filtro capacitivo

Para que a fonte de alimentação fique completa, falta ainda fazer a filtragem do sinal retificado para que o mesmo se aproxime o máximo possível de uma tensão contínua e constante.

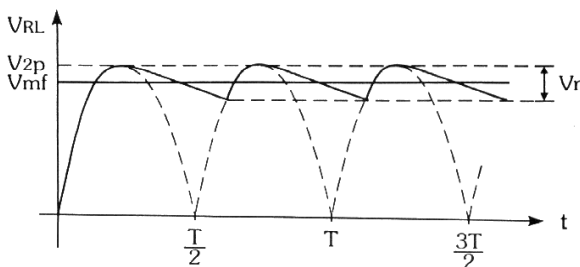
A utilização de um filtro capacitivo é muito comum nas fontes que não necessitam de boa regulação, ou seja, que podem ter pequenas oscilações na tensão de saída. Um exemplo é o eliminador de pilhas de uso geral.

A figura abaixo mostra a ligação de um filtro capacitivo ligado a um retificador de onda completa em ponte.



Fonte com Filtro Capacitivo

Com o filtro o sinal de saída fica com a forma mostrada abaixo.



Forma de Onda na Saída da Fonte

Com o primeiro semiciclo do sinal retificado o capacitor carrega-se através dos diodos D_1 e D_3 até o valor de pico. Quando a tensão retificada diminui, os diodos que estavam conduzindo ficam reversamente polarizados, fazendo com que o capacitor se descarregue lentamente pela carga R_L .

Quando no segundo semiciclo, a tensão retificada fica maior que a tensão no capacitor, os diodos D_2 e D_4 passam a conduzir carregando novamente o capacitor até o valor de pico, e assim sucessivamente, formando uma ondulação chamada *ripple*.

Quanto maior o capacitor ou a resistência de carga, menor será a ondulação. O valor médio da tensão de saída será chamado de V_{MF} e pode ser calculado pelas equações abaixo:

$$V_{MF} = \frac{2.C.R.f.V_p}{1 + 2.C.R.f}$$

Retificador 1/2 Onda:

$$V_{MF} = \frac{4.C.R.f.V_p}{1 + 4.C.R.f}$$

Retificador Onda Comp.

Onde:

V_{MF} : Tensão média após filtragem

f: frequência da ondulação

R: Resistência de carga em ohms

C: Capacitor de filtro em farads

O valor de pico a pico do ripple também pode ser calculado pela equação abaixo:

$$V_{RIPPLE} = \frac{V_{MF}}{C.R.f}$$

Assim, para o projeto de uma fonte de alimentação deve-se antes estipular a tensão média de saída e o ripple desejado, para em seguida, calcular o capacitor necessário para a filtragem, as especificações dos diodos e as especificações do transformador.

Exemplo 4. Qual seria a nova tensão média do circuito do exemplo 3 se usássemos um capacitor de $100\mu F$

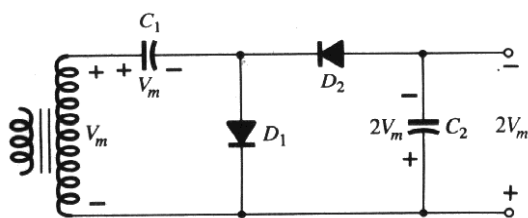
Exemplo 5. Qual seria a nova tensão média do circuito do exemplo 4 se usássemos um capacitor de $220\mu F$

Exemplo 6 - Projetar uma fonte de alimentação com tensão de alimentação de $220 V_{RMS}/60 Hz$ e tensão média de saída de $5 V$ com ripple de $0,1V$, para alimentar um circuito que tem resistência de entrada equivalente a $1 k\Omega$. Utilizar o retificador em ponte.

Capítulo 3 - Aplicações e Diodos Especiais

1 - Circuitos Multiplicadores de Tensão

São empregados para gerarem tensões duas, três, quatro ou mais vezes maiores que a tensão de pico do secundário do transformador.

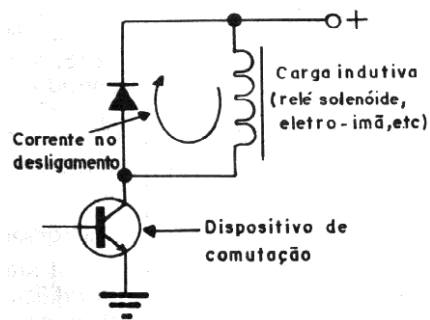


2 - Proteção contra alta-tensão

Diodos também são utilizados na proteção de dispositivos delicados contra altas tensões geradas por interrupção de corrente em circuitos indutivos.

Quando um relé é desligado, por exemplo, na sua bobina surgem altas tensões que podem queimar o dispositivo que o controla, por exemplo, um transistor.

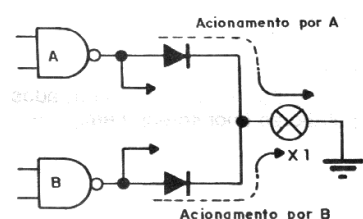
A tensão que aparece nestas condições tem polaridade inversa do acionamento. Assim se ligarmos um diodo em paralelo, conforme a figura abaixo, quando a tensão perigosa surgir ela polariza o diodo no sentido direto, fazendo-o conduzir e absorver a tensão, evitando que a mesma se propague pelo resto do circuito.



Veja que na operação do transistor (dispositivo de comutação), o diodo está polarizado no sentido inverso, não influenciando no acionamento.

3 - Acionamento em circuitos digitais

Diodos também estão presentes em circuitos digitais funcionando como “válvulas de retenção”. Por exemplo, na figura a seguir o diodo impede que a corrente “volte” para **B**, quando acionarmos a lâmpada por **A**.



4 - Especificações de Diodos

Mostraremos a seguir algumas características elétricas dos diodos mais comuns em circuitos eletrônicos. Informações completas podem ser obtidas em “HandBooks” ou em “sites” de fabricantes na Internet.

Diodo	I_{DM} (mA)	V_{BR} (V)	Uso
1N 914	75	75	Geral
1N 4148	200	75	Geral
1N 4001	1000	50	Retificação
1N 4002	1000	100	Retificação
1N 4003	1000	200	Retificação
1N 4004	1000	400	Retificação
1N 4005	1000	600	Retificação
1N 4006	1000	800	Retificação

1N 4007	1000	1000	Retificação
BY 249	7000	300	Retificação

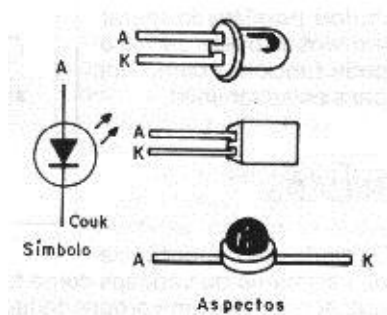
Alguns endereços para pesquisa:

- <http://www.semiconductors.phillips.com>
- <http://www.sci.siemens.com>
- <http://www.national.com>

5 - Diodo Emissor de Luz - LED

Num diodo, quando polarizado diretamente, uma grande quantidade de portadores atravessa a região de depleção na qual, alguns deles, recombina-se com átomos ionizados. Nesse processo, os elétrons perdem energia na forma de radiação. Nos diodos de Silício ou Germânio, essa radiação é irradiada na forma de calor, mas em compostos de arsenato de gálio (GaAs), existe a liberação de energia na forma de luz.

Esses diodos são chamados de diodos emissores de luz ou, simplesmente, **LED** (Light Emitting Diode) e podem emitir luz visível, infravermelho ou ultravioleta.



Os LEDs de luz visível são fabricados acrescentando partículas de fósforo, que dependendo da quantidade podem irradiar luz vermelha, amarela, laranja, verde ou azul, sendo muito utilizado na sinalização de aparelhos eletrônicos e fabricação de displays alfanuméricos.

Os infravermelhos são fabricados com InSb (antimoneto de Índio) com aplicação em alarmes, transmissão de dados por fibra ótica, controle remoto e etc. Também é utilizado o GaAs acrescido de alumínio.

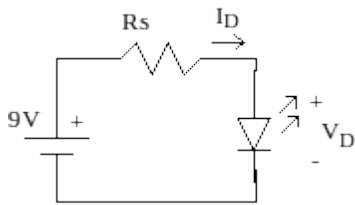
Os ultravioletas são fabricados a partir do sulfato de Zinco (ZnS).

Também encontramos LEDs bicolores em um mesmo encapsulamento. Possuindo três terminais, dependendo de qual for alimentado, ele acenderá com uma luz diferente.

Os LEDs têm as mesmas características dos diodos comuns, ou seja, só conduzem quando polarizados diretamente com uma tensão maior ou igual a V_D . Comercialmente eles trabalham normalmente com correntes na faixa de 10mA a 50mA e tensões na faixa de 1,5 a 2,5 V.

Assim para polarizar um LED, deve-se utilizar um resistor limitador de corrente para que o mesmo não se danifique.

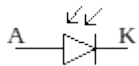
Exemplo 1 - Determine R_S para que o LED do circuito abaixo ($V_D=2,0V$, $I=15\text{ mA}$) funcione adequadamente, com uma bateria de 9 V.



6 - Fotodiodo

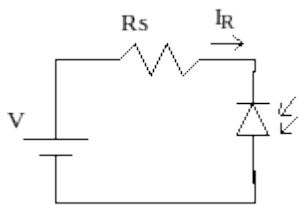
Como foi visto anteriormente, num diodo comum polarizado reversamente existe uma corrente de fuga mantida pela energia térmica e temperatura ambiente. Assim, se houver incidência de luz sobre a junção PN essa energia também pode gerar portadores contribuindo para aumentar a corrente reversa.

Um fotodiodo é portanto um diodo com uma janela sobre a junção PN que permite a entrada da luz. Essa luz produz elétrons livres e lacunas aumentando a quantidade de portadores e, conseqüentemente, controlando a corrente reversa.



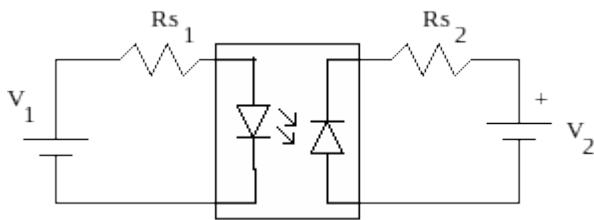
Desta forma, quanto maior a incidência de luz, maior a corrente no fotodiodo polarizado reversamente. A corrente pode chegar a dezenas de microamperes, mas devem-se ser sempre ligados em série com um resistor limitador.

São encontrados fotodiodos sensíveis a vários tipo de luz, infravermelha, ultravioleta, etc. sendo aplicados em alarme, medidores de intensidade luminosa, sensores e etc.



7 - Optoacoplador

Um optoacoplador (ou acoplador óptico) nada mais é do que um LED associado a um fotodiodo num mesmo invólucro.



Quando o LED é polarizado diretamente ele emite uma luz que atinge o fotodiodo, fazendo com que sua corrente reversa seja proporcional a intensidade luminosa emitida pelo LED.

Isso significa que a corrente de saída depende da corrente de entrada mesmo havendo uma isolação elétrica entre os dois estágios. O meio transmissor é a luz.

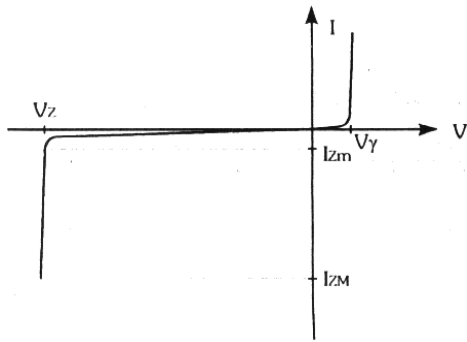
Este dispositivo é muito utilizado em aparelhos com circuitos em altas e baixas tensões, permitindo uma isolação segura entre eles. Também são utilizados na decodificação de sinais pulsados, como em mouses, leitura de cartões perfurados, etc.

8 - Diodo Zener

O diodo zener é um dispositivo que tem quase as mesmas características que um diodo normal. A diferença está na forma como ele se comporta quando está polarizado reversamente.

No diodo normal, polarizado reversamente, ocorre um fenômeno chamado de *efeito avalanche* ou *efeito zener*, que consiste num aumento repentino da corrente reversa, dissipando potência suficiente para ruptura da junção PN, danificando o diodo. A tensão na qual ocorre o efeito zener é chamada de *tensão de ruptura* ou *Breakdown voltage* (V_{BR}).

O diodo zener é construído com uma área de dissipação de potência suficiente para suportar o efeito avalanche. Assim, a tensão na qual este efeito ocorre é denominado de tensão zener (V_Z) e pode variar em função do tamanho e do nível de dopagem da junção PN. Comercialmente são encontrados diodos com V_Z de 2 a 200 volts.



Pela curva característica acima, observa-se que a tensão reversa V_Z mantém-se praticamente constante quando a corrente reversa está entre I_{Zmin} (mínima) e I_{Zmax} (máxima).

Nesta região, o diodo zener dissipa uma potência P_Z que pode ser calculada por:

$$P_Z = V_Z \cdot I_Z$$

Com esta sua propriedade de tensão constante a grande aplicação do diodo Zener é de atuar como regulador de tensão.

8.1 - Especificações

As principais especificações do diodo zener são:

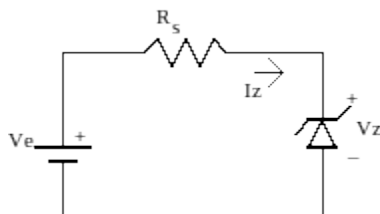
- V_D : Tensão de condução na polarização direta
- V_Z : Tensão Zener
- I_{Zmax} : Corrente zener máxima
- I_{Zmin} : Corrente zener mínima ($I_{Zmin}=0,1 \times I_{Zmax}$)
- P_{ZM} : Potência zener máxima

Os componentes fabricados pela Phillips recebem a codificação BZX79, BZV60, BZT03 e BZW03 de acordo com a P_{ZM} : 0,5; 0,5; 3,25 e 6 W, respectivamente.

O valor da tensão zener forma o restante do código. Por exemplo um diodo com $V_Z=5,6V$ teria o código BZX79C5V6 ou BZV60C5V6.

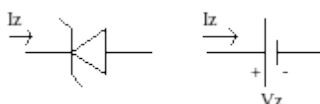
8.2 - Regulador de Tensão com Zener

No circuito abaixo formado por um diodo zener polarizado reversamente pela fonte V_E e um resistor limitador de corrente, temos que:

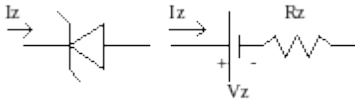


$$V_E = R_S \cdot I_Z + V_Z$$

A tensão V_Z permanece constante para correntes entre I_{Zmin} e I_{Zmax} . Podendo o diodo ser substituído pelo seu modelo ideal.



Para uma melhor precisão nos cálculos pode-se usar o modelo real que contém uma resistência **R_z** em série.



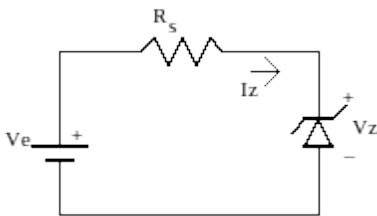
Na especificação de um circuito regulador devemos nos preocupar em definir limites para **V_E** e **R_S** de modo a não danificar o diodo.

Duas considerações devem ser observadas na obediência deste limite.

- O diodo zener não regula (desliga) caso que a corrente que passa por ele seja menor que a corrente zener mínima (**I_{Zmin}**). Esta condição limita o valor mínimo da tensão de entrada e o valor máximo da resistência limitadora de corrente.
- O diodo zener se danifica caso a corrente que passa por ele seja maior que a corrente zener máxima (**I_{Zmax}**), ou caso a potência dissipada por ele seja maior que a potência zener máxima (**I_{Zmax}**).

Exemplo 2 - Dado o circuito abaixo ($R_S=120\Omega$) e as especificações do diodo zener, determinar os valores máximos e mínimo da tensão de entrada para que o diodo zener funcione como um regulador de tensão.

Diodo BZX79C6V2 - 0,5W - $I_{Zmin}=5mA$



*Exemplo 3 - No circuito acima V_E está fixo em 25 V, determinar os valores máximos e mínimo da resistência **R_S** para que o diodo zener funcione como um regulador de tensão.*

Diodo BZT03C9V1 - 3,25W - $I_{Zmin}=50mA$

8.3 - Regulador de Tensão com Carga

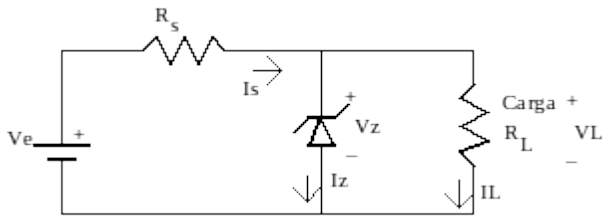
As quatro aplicações básicas dos reguladores de tensão, são as seguintes:

- Estabilizar uma tensão de saída para uma carga fixa a partir de uma tensão constante.
- Estabilizar uma tensão de saída para uma carga variável a partir de uma tensão constante.
- Estabilizar uma tensão de saída para uma carga fixa a partir de uma tensão com ripple.
- Estabilizar uma tensão de saída para uma carga variável a partir de uma tensão com ripple.

O primeiro caso seria o mais simples, por exemplo, se desejássemos alimentar um aparelho de 4,5 V a partir de uma bateria de 12 V. O último caso é o mais geral, geralmente o encontrado nas fontes de tensão com filtros capacitivos.

Basicamente, o projeto de um regulador de tensão com carga consiste no cálculo da resistência limitadora de corrente **R_S** conhecendo-se as demais variáveis do circuito:

- Tensão de entrada (constante ou com ripple)
- Carga (fixa ou variável)
- Tensão de saída esperada
- Especificações do diodo zener



Equações fundamentais:

$$I_S = I_Z + I_L \quad V_Z = V_L = R_L \cdot I_L$$

$$V_E = R_S \cdot I_S + V_Z$$

Exemplo 4 - Determine R_S do regulador de tensão acima para que uma fonte de tensão de 12 V fixos alimente um circuito com carga constante de 1 k Ω e tensão de 5,6 V, usando um diodo zener de $V_Z = 5,6V$ e $I_{Zmax} = 100mA$.

Solução: O resistor R_S deve satisfazer as condições dadas pelas especificações do diodo.

- Com a corrente mínima definimos o valor máximo para R_S
- Com a corrente máxima definimos o valor mínimo para R_S
- Definimos um valor comercial para R_S dentro do intervalo estabelecido.
- Calculamos a potência dissipada pelo resistor.

Exemplo 5 - Uma fonte de alimentação foi projetada para alimentar uma carga de 560 Ω com tensão de 15V. Porém o sinal de saída do filtro capacitivo corresponde a uma tensão de 22V com ripple de 5Vpp. Determinar R_S do regulador de tensão que elimina o ripple desta fonte e estabiliza sua tensão em 15V.

Solução: O resistor R_S deve satisfazer as condições dadas pelas especificações do diodo e pela variação da tensão de entrada..

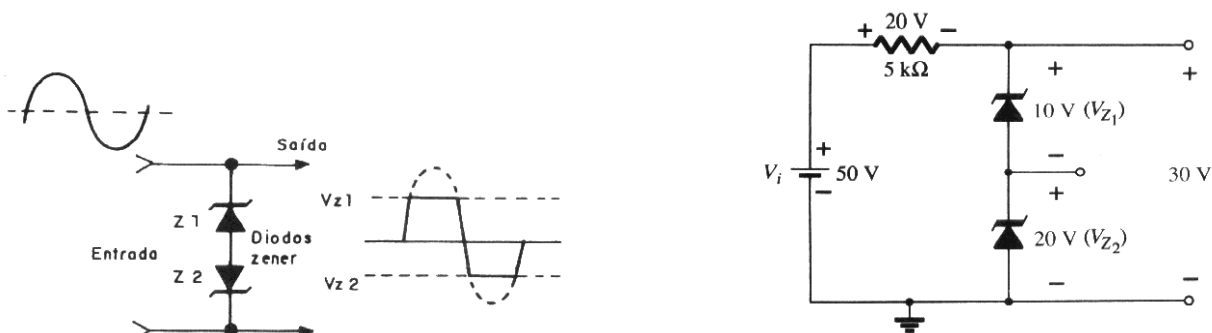
- Com a corrente mínima definimos o valor máximo para R_S . A corrente mínima acontece para o valor mínimo de V_E .
- Com a corrente máxima definimos o valor mínimo para R_S . A corrente máxima acontece para o valor máximo de V_E .
- Definimos um valor comercial para R_S dentro do intervalo estabelecido.
- Calculamos a potência dissipada pelo resistor.

Exemplo 6 - Suponha que um walk-man tem um consumo fixo de 0,45 W em 4,5 V. Projete um regulador de tensão para alimentá-lo através de uma bateria-12V usando o diodo BZX79B4V7(0,5W-5mA).

Exemplo 7 - Um eliminador de pilha fornece na sua saída uma tensão de 12V com ripple de 3Vpp. Projete um regulador de tensão para alimentar um circuito digital com consumo fixo em 150mA em 5V. Use o diodo BZX79C5V1 (0,5W-5mA).

8.4 - Outras Aplicações do Diodo Zener

O diodo zener ainda será bastante explorado em conjunto com outros dispositivos, tais como transistores e amplificadores operacionais. Sozinho, ele ainda pode ser utilizado com circuito limitador duplo ou como referência para fontes com vários níveis de tensão (figuras abaixo).



Capítulo 4 – Transistores Bipolares

1 - A Revolução

Com o passar dos anos, a indústria dos dispositivos semicondutores foi crescendo e desenvolvendo componentes e circuitos cada vez mais complexos, a base de diodos. Em 1948, na Bell Telephone, um grupo de pesquisadores, liderados por Shockley, apresentou um dispositivo formado por três camadas de material semicondutor com tipos alternados, ou seja, um dispositivo com duas junções. O dispositivo recebeu o nome de **TRANSISTOR**.

O impacto do transistor, na eletrônica, foi grande, já que a sua capacidade de amplificar sinais elétricos permitiu que em pouco tempo este dispositivo, muito menor e consumindo muito menos energia, substituísse as **VÁLVULAS** na maioria das aplicações eletrônicas. O transistor contribuiu para todas as invenções relacionadas, como os circuitos integrados, componentes optoeletrônicos e microprocessadores. Praticamente todos os equipamentos eletrônicos projetados hoje em dia usam componentes semicondutores.

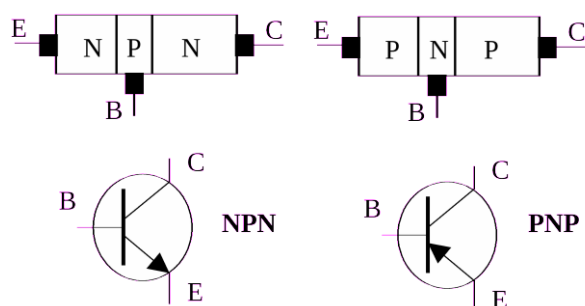
As vantagens sobre as difundidas válvulas eram bastantes significativas, tais como:

- Menor tamanho
- Muito mais leve
- Não precisava de filamento
- Mais resistente
- Mais eficiente, pois dissipa menos potência
- Não necessita de tempo de aquecimento
- Menores tensões de alimentação.

Hoje em dia as válvulas ainda sobrevivem em alguns nichos de aplicações, em aparelhos fabricados na década de 70 e devido ao romantismo de alguns usuários.

2 - O Transistor Bipolar

O princípio do transistor é poder controlar a corrente. Ele é montado numa estrutura de cristais semicondutores, de modo a formar duas camadas de cristais do mesmo tipo intercaladas por uma camada de cristal do tipo oposto, que controla a passagem de corrente entre as outras duas. Cada uma dessas camadas recebe um nome em relação à sua função na operação do transistor, As extremidades são chamadas de **emissor** e **coletor**, e a camada central é chamada de **base**. Os aspectos construtivos simplificados e os símbolos elétricos dos transistores são mostrados na figura abaixo. Observe que há duas possibilidade de implementação.



O transistor da esquerda é chamado de **NPN** e o outro de **PNP**.

O transistor é hermeticamente fechado em um encapsulamento plástico ou metálico de acordo com as suas propriedades elétricas.

2.1 - Características Construtivas

O emissor é fortemente dopado, com grande número de portadores de carga. O nome emissor vem da propriedade de emitir portadores de carga.

A base tem uma dopagem média e é muito fina, não conseguindo absorver todos os portadores emitidos pelo emissor

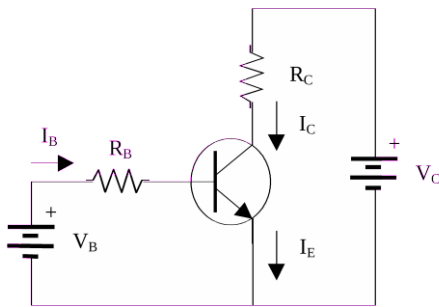
O coletor tem uma dopagem leve e é a maior das camadas, sendo o responsável pela coleta dos portadores vindos do emissor.

Da mesma forma que nos diodos, são formadas barreiras de potencial nas junções das camadas P e N.

O comportamento básico dos transistores em circuitos eletrônicos é fazer o controle da passagem de corrente entre o emissor e o coletor através da base. Para isto é necessário polarizar corretamente as junções do transistor.

3. Funcionamento

Polarizando diretamente a junção base-emissor e inversamente a junção base-coletor, a corrente de coletor I_C passa a ser controlada pela corrente de base I_B .



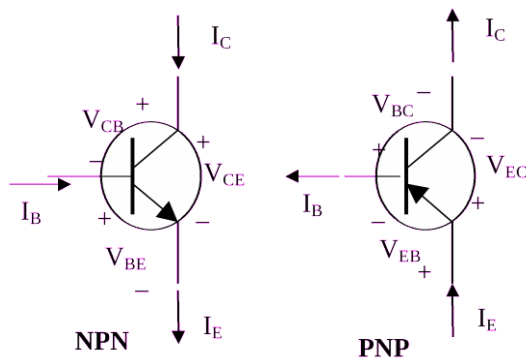
- Um aumento na corrente de base I_B provoca um aumento na corrente de coletor I_C e vice-versa.
- A corrente de base sendo bem menor que a corrente de coletor, uma pequena variação de I_B provoca uma grande variação de I_C . Isto significa que a variação de corrente de coletor é um reflexo amplificado da variação da corrente na base.
- O fato do transistor possibilitar a amplificação de um sinal faz com que ele seja considerado um dispositivo ativo.

Este efeito amplificação, denominado ganho de corrente pode ser expresso matematicamente pela relação entre a variação de corrente do coletor e a variação da corrente de base, isto é:

$$\text{Ganho}(\beta) = \frac{I_C}{I_B}$$

Obviamente, a corrente de coletor não pode aumentar infinitamente. Há um limite definido pelo transistor e elementos periféricos (resistores).

Para a análise dos circuitos com transistores, vamos encontrar as seguintes grandezas elétricas



Aplicando as leis de Kirchoff obtemos:

$$I_E = I_C + I_B$$

NPN: $V_{CE} = V_{BE} + V_{CB}$

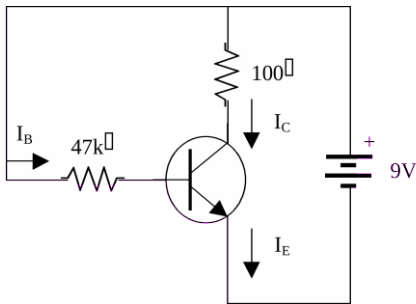
PNP: $V_{EC} = V_{EB} + V_{BC}$

São definidos três estados para os transistores:

- CORTE: Não há corrente de base e conseqüentemente corrente de coletor.
- SATURAÇÃO: A corrente de coletor atingiu o seu máximo, indicado por uma tensão $V_{CE} < 0,2V$
- ATIVA: A corrente de coletor é proporcional a corrente de base

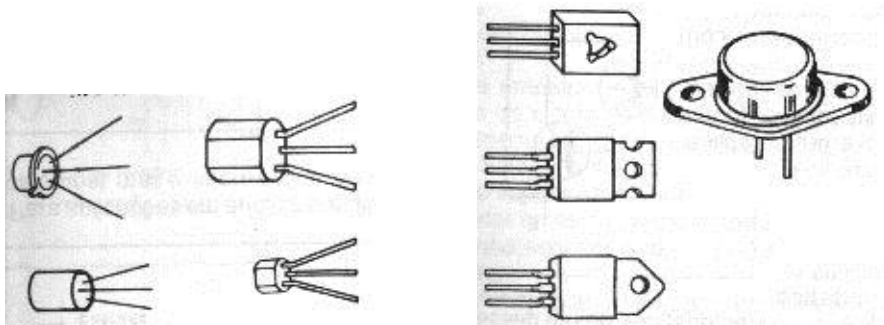
Exemplo 1 - No circuito com o transistor de silício ($\beta=100$) abaixo determine:

1. Correntes I_B , I_C e I_E
2. Tensão V_{CE}
3. Queda de tensão do resistor de 100Ω



4 - Classificação dos Transistores

Os primeiros transistores eram dispositivos simples destinados a operarem apenas com correntes de baixa intensidade, sendo, portanto, quase todos iguais nas principais características. Com o passar dos anos, ocorreram muitos aperfeiçoamentos nos processos de fabricação que levaram os fabricantes a produzirem transistores capazes de operar não só com pequenas correntes mas também com correntes elevadas, o mesmo acontecendo com às tensões e até mesmo com a velocidade.



O estudo das características principais é efetuado por famílias (grupo de transistores com características semelhantes), que são:

Uso Geral:

- Pequenos sinais
- Baixas Frequências
- Corrente I_C entre 20 e 500mA
- Tensão máxima entre 10 e 80 V
- Frequência de transição entre 1 e 200 MHz

Potência:

- Correntes elevadas
- Baixas frequências
- Corrente I_C inferior a 15A
- Frequência de transição entre 100 kHz e 40 MHz
- Uso de radiadores de calor

RF - Rádio Frequência:

- Pequenos sinais
- Frequências elevadas
- Correntes I_C inferior a 200mA
- Tensão máxima entre 10 e 30V
- Frequência de transição em 1,5 GHz

5 - Os Limites dos Transistores

Os transistores, como quaisquer outros dispositivos têm suas limitações (valores máximos de alguns parâmetros) que devem ser respeitadas, para evitar que os mesmos se danifiquem. Os manuais técnicos fornecem pelo menos quatro parâmetros que possuem valores máximos:

- Tensão máxima de coletor - V_{CEMAX}
- Corrente máxima de coletor - I_{CMAX}
- Potência máxima de coletor - P_{CMAX}
- Tensão de ruptura das junções

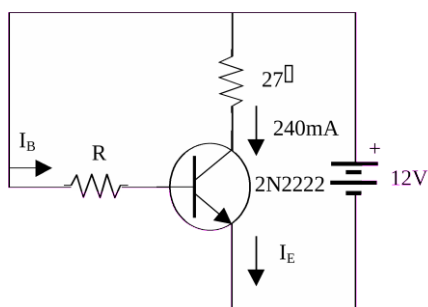
$$P_{CMAX} = V_{CEMAX} \cdot I_{CMAX}$$

Exemplos de parâmetros de transistores comuns.

Tipo	Pola- Ridade	V_{CEMAX} (V)	I_{CMAX} (mA)	β
BC 548	NPN	45	100	125 a 900
2N2222	NPN	30	800	100 a 300
TIP31A	NPN	60	3000	20 a 50
2N3055	NPN	80	15000	20 a 50
BC559	PNP	-30	-200	125 a 900
BFX29	PNP	-60	-600	50 a 125

Exemplo 2 - No circuito com o transistor de silício 2N2222 ($\beta=120$) abaixo determine:

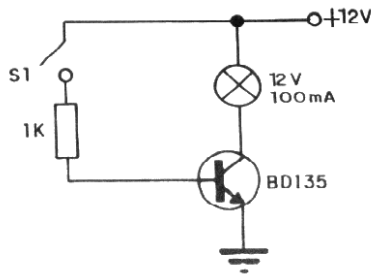
4. Corrente I_B
5. Tensão V_{CE}
6. Potência dissipada pelo transistor



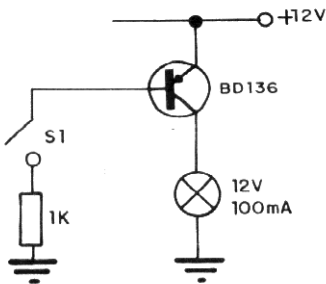
6 - Transistor como Chave

A utilização do transistor nos seus estados de SATURAÇÃO e CORTE, isto é, de modo que ele ligue conduzindo totalmente a corrente entre emissor e o coletor, ou desligue sem conduzir corrente alguma é conhecido como operação como chave.

A figura abaixo mostra um exemplo disso, em que ligar a chave S1 e fazer circular uma corrente pela base do transistor, ele satura e acende a lâmpada. O resistor ligado a base é calculado, de forma que, a corrente multiplicada pelo ganho dê um valor maior do que o necessário o circuito do coletor, no caso, a lâmpada.



Veja que temos aplicada uma tensão positiva num transistor NPN, para que ele sature e uma tensão negativa, para o caso de transistores PNP, conforme mostra a figura abaixo.



6.1 - Cálculo de Resistores para Uso como Chave Eletrônica.

O uso do transistor como chave implica em polarizá-lo na região de corte ou de saturação. Como o corte do transistor depende apenas da tensão de entrada, o cálculo dos transistores é efetuado baseado nos parâmetros de saturação.

Um transistor comum, quando saturado, apresenta um V_{CE} de aproximadamente 0,2V e um ganho de valor mínimo (entre 10 e 50) para garantir a saturação. A corrente de coletor de saturação depende da resistência acoplada ao coletor ou da corrente imposta pelo projeto.

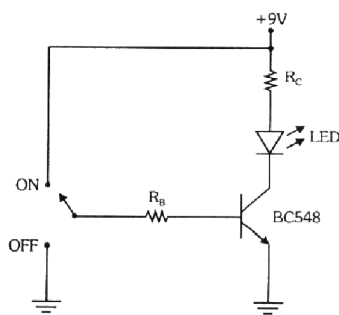
Exemplo 3 - No circuito a seguir, deseja-se que o LED seja acionado quando a chave estiver na posição ON e desligado quando a chave estiver na posição OFF.

Parâmetros do transistor BC 548:

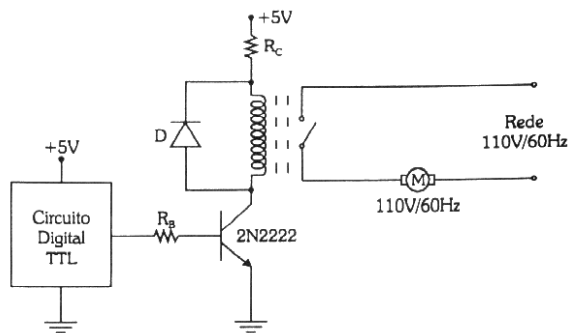
$$V_{BE}=0,7V \quad V_{CE}=0,3V$$

$$I_{C_{MAX}}=200mA \quad V_{CE_{MAX}}=30V \quad \beta=20$$

Parâmetros do LED: $V_f=1,5V$ $I_D=25mA$



Exemplo 4 - Um circuito digital (TTL) foi projetado para acionar um motor de 220V/60Hz sob determinadas condições. Para tanto, é necessário que um transistor como chave atue sobre um relé, já que nem o circuito digital, nem o transistor podem acionar este motor. O circuito utilizado para este fim esta mostrado a seguir.



Neste circuito, em série com R_C , coloca-se a bobina do relê. Esta bobina, normalmente, apresenta uma resistência DC da ordem de algumas dezenas de ohms. Por ser tão baixa, o resistor R_C , tem a função de limitar a corrente no transistor, para não danificá-lo. O diodo em paralelo com a bobina serve para evitar que o transistor se danifique devido à tensão reversa gerada por ela no chaveamento do relê.

Parâmetros do 2N2222:

$$V_{BE}=0,7V \quad V_{CE}=0,3V \quad \beta=10$$

$$I_{C_{MAX}}=500mA \quad V_{CE_{MAX}}=100V$$

Parâmetros do relê:

$$R_R=80\Omega \quad I_R=50mA$$

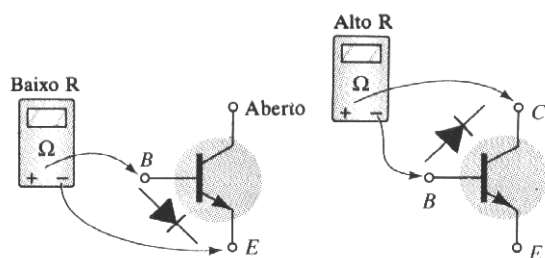
7 - Teste de Transistores

Há três maneiras de se verificar um transistor: com o traçador de curvas, os medidores digitais e o ohmímetro.

O traçador de curvas plota em uma tela as curvas características de saída do dispositivo em análise, permitindo uma análise detalhada.

Alguns multímetros digitais possuem a opção de medição de h_{FE} ou β utilizando soquetes que aparecem ao lado da chave comutadora do instrumento. O valor de ganho é calculado para uma corrente de base fixa que varia de instrumento para instrumento.

Um ohmímetro ou as escalas de resistência de um multímetro digital, pode ser utilizado para determinar o estado de um transistor. Lembre-se de que, para um transistor na região ativa, a junção base-emissor está diretamente polarizada, e a junção base-coletor está reversamente polarizada. Assim, portanto, a junção diretamente polarizada deve registrar um valor de resistência mais ou menos baixo, enquanto que a junção reversamente polarizada, um valor muito mais alto de resistência. Para um transistor NPN a junção base-emissor deve ser testada, como mostra a figura abaixo, resultando em uma leitura na faixa de 100Ω a alguns $k\Omega$. A junção base-coletor deve apresentar leituras acima de $100\ k\Omega$.

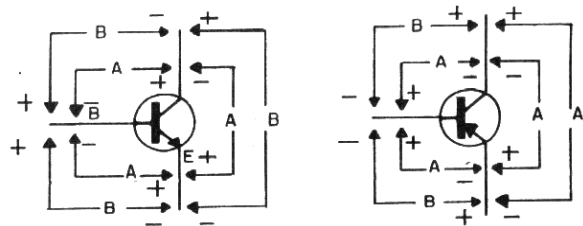


Para um transistor PNP, os terminais devem ser trocados de posição a cada medição.

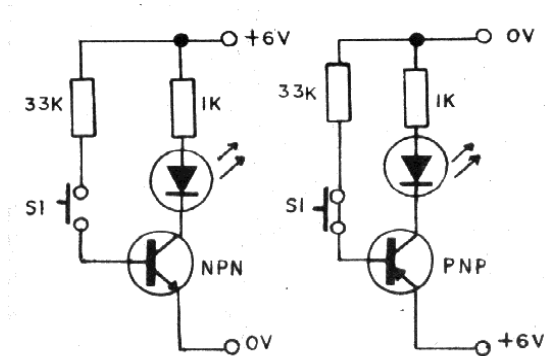
Obviamente, uma resistência pequena ou grande demais em ambas as direções (invertendo os terminais), para cada junção de um transistor NPN ou PNP, indica que se trata de um dispositivo defeituoso.

Com base nestas leituras pode se identificar os terminais do transistor, mas é mais prático observar o seu encapsulamento e consultar o manual.

A figura a seguir resume os valores de resistência que devem ser encontrados a cada medição (**A**: Alta; **B**: Baixa).



Outra maneira de se provar um transistor é com um circuito simples destinado a isso, como a da figura a seguir.



Apertando o interruptor de pressão o LED deve acender se transistor em teste estiver bom.

Se o LED acender antes de pressionarmos o interruptor então o transistor está em curto. Se não acender quando pressionarmos o interruptor então o transistor está aberto.

Se o LED acender fraco antes de apertarmos S1 então o transistor está com fuga.

8 - Técnicas de solução de problemas

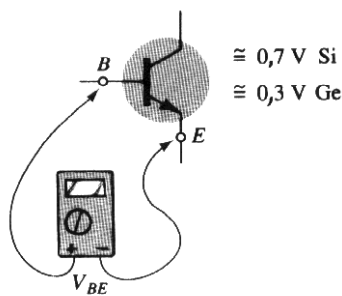
A arte de contornar problemas é um tópico bem abrangente, de forma que todas as alternativas e técnicas existentes não podem ser abordadas completamente. Entretanto o técnico deve conhecer alguns “macetes” e medidas básicas que consigam isolar a área do problema, e possibilitar a identificação de uma solução.

Obviamente, o primeiro passo para a identificação do problema é entender bem o comportamento do circuito, e ter alguma idéia dos níveis de tensão e correntes existentes. Para o transistor na região ativa, o nível DC mais importante a ser medido é a tensão base-emissor.

Para um transistor ligado, a tensão V_{BE} deve ser aproximadamente 0,7V

As conexões apropriadas para a medição de V_{BE} aparecem na figura a seguir. Observe que a ponta de teste vermelha (positiva) do multímetro está conectada no terminal de base para um transistor NPN, e a ponta preta no terminal do emissor. Devemos suspeitar de qualquer leitura totalmente diversa do esperado, como 0V, 4V ou 12V, ou até mesmo valor negativo, devendo-se verificar as conexões do dispositivo ou circuito. Para um transistor PNP podem ser utilizadas as mesmas conexões, mas as leituras serão negativas.

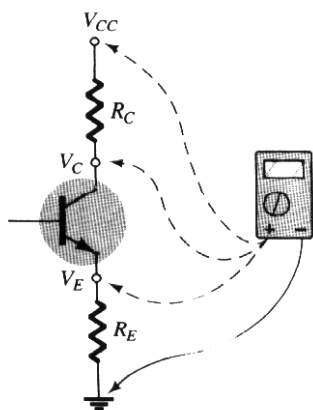
Um nível de tensão de igual importância é a tensão coletor-emissor. Lembre-se das características gerais de um TBJ, que valores de V_{CE} em torno de 0,3V sugerem um dispositivo saturado, condição que não deve existir, a menos que o transistor esteja sendo utilizado no modo de chaveamento.



Para um transistor típico na região ativa, a tensão V_{CE} é normalmente 25% a 75% de V_{CC} .

Para $V_{CC}=20V$, uma leitura de 1 a 2V ou 18 a 20V para V_{CE} é certamente um resultado estranho merecendo uma análise mais cuidadosa. Nestes casos há, no mínimo, duas possibilidades, ou o dispositivo está danificado e comporta-se como um circuito aberto entre os terminais de coletor-emissor, ou uma conexão na malha coletor-emissor está aberta estabelecendo $I_C=0mA$

Um dos métodos mais eficientes de verificação de operação do circuito é checar os níveis de tensão relativo ao terra. Para isso, coloca-se a ponta preta (negativa) do volímetro no terra e troca-se a ponta vermelha (positiva) no terminal considerado.

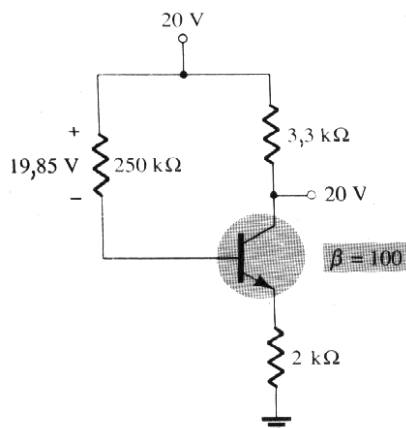


Na figura acima se a ponta vermelha for conectada diretamente a V_{CC} , deve-se obter a leitura de V_{CC} volts. Em V_C a leitura deve fornecer um valor menor, já que há uma queda de tensão através de R_C e V_E deve ser menor que V_C , devido a tensão coletor-emissor V_{CE} . Algum valor não esperado para um destes pontos pode ser aceitável, mas em certas ocasiões pode representar conexão malfeita ou dispositivo defeituoso. Se V_{RC} e V_{RE} apresentarem valores aceitáveis, mas V_{CE} for de 0V, é provável que o TBJ esteja com defeito, resultando em um curto-circuito entre os terminais de coletor e emissor.

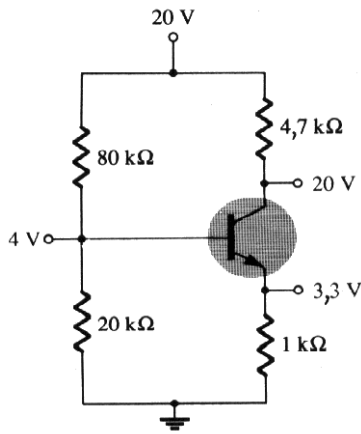
Via de regra, os níveis de corrente são calculados a partir dos níveis de tensão, não necessitando da inserção no circuito de um multímetro com a função de miliamperímetro.

Para esquemas de circuitos extensos, em geral são fornecidos níveis de tensão específicos, facilitando a identificação e verificação de possíveis pontos problemáticos.

Exemplo 5 - Baseado nas leituras fornecidas, determine se o circuito está operando adequadamente.

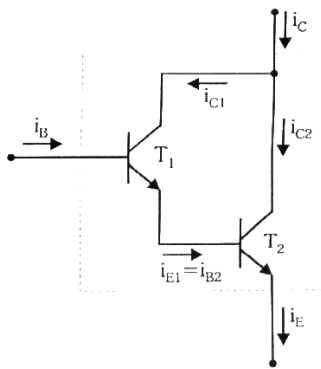


Exemplo 6 - Baseado nas leituras determine o estado do transistor e se o circuito está operando corretamente.



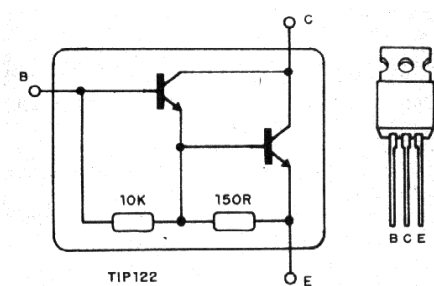
9 - Transistores DARLINGTON

Quando acoplamos dois transistores diretamente, da forma abaixo, estamos realizando a conexão DARLINGTON.



O ganho de corrente do circuito aumenta bastante sendo $\beta_T = \beta_1 \times \beta_2$.

Podem ser encontrados transistores montados desta forma num único encapsulamento. Pelo seu alto ganho de corrente, ele deve suportar altas correntes, sendo aplicado em amplificadores de potência e fontes de alimentação.



10 - Radiadores de calor

Os transistores tem sua potência máxima especificada em função da temperatura ambiente (25° C) e da temperatura interna do transistor. Se a temperatura aumentar a potência máxima dissipada tende a diminuir.

Uma maneira usual de compensar a diminuição da potência de dissipação de um transistor é a utilização de dissipadores de calor.

Trata-se de uma chapa metálica de boa condutibilidade térmica (alumínio), geralmente com aletas, na qual é acoplado o transistor, aumentando-se a área de contato entre ele e o meio ambiente e, conseqüentemente facilitando a troca de calor.

Só para ter uma idéia da importância do dissipador de calor, num transistor TIP 29, a potência máxima passa de 2W para 30W com dissipador.

Capítulo 5 – Transistores de Efeito de Campo

1 - Introdução

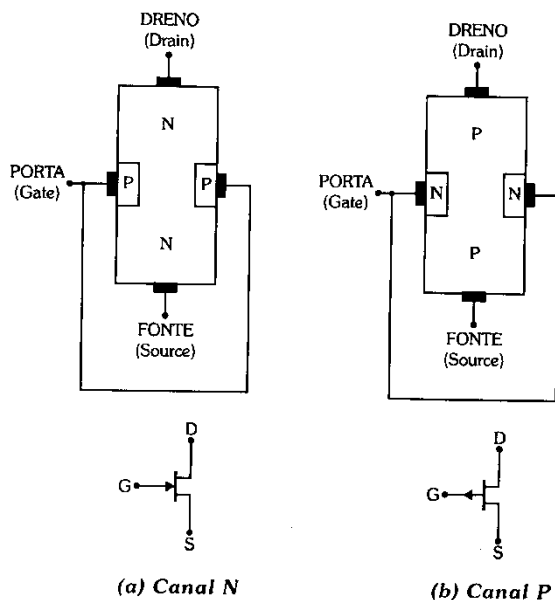
Os transistores bipolares são dispositivos controlados por corrente, isto é, a corrente de coletor é controlada pela corrente de base. Existe, no entanto, um outro tipo de transistor, no qual a corrente é controlada pela **tensão pelo campo elétrico**. São os chamados **transistores de efeito de campo** ou simplesmente **FET** (*Field-Effect Transistor*).

Existem dois tipos de FETs:

- a) **JFET** – FET de junção;
- b) **MOSFET** – FET com porta isolada.

2- JFET (*Junction Field-Effect Transistor*)

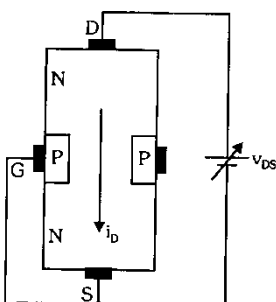
O JFET é um dispositivo unipolar e fisicamente pode ser encontrado em dois tipos: **JFET – canal N** e **JFET – canal P**. A figura a seguir mostra o aspecto construtivo de cada um deles:



O JFET é formado por três terminais: **fonte** (*source*) – por onde os elétrons entram, **dreno** (*drain*) – de onde os elétrons saem e **porta** (*gate*) – que faz o controle da passagem dos elétrons.

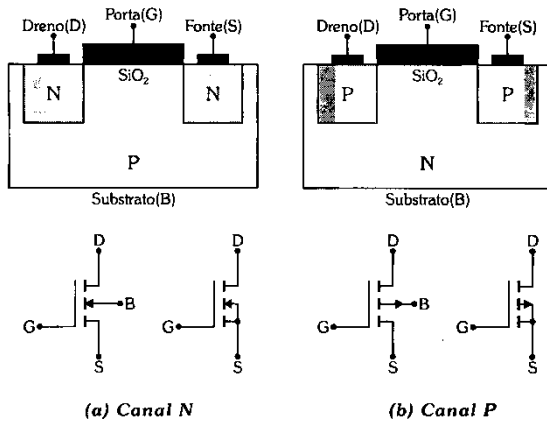
O princípio de funcionamento do JFET é bem simples. O objetivo é controlar a corrente i_D que circula entre a fonte e o dreno. Isto é feito aplicando-se uma tensão na porta.

Com o potencial de porta igual a zero, ou seja, $V_G=0$ ou $V_{GS}=0$, aplicando-se uma tensão entre o dreno e a fonte (V_D ou V_{DS}), surge uma corrente i_D , como indicada na figura abaixo:



3- MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor*)

Neste tipo de FET, existe uma camada isolante de dióxido de silício (SiO_2) entre o terminal de porta e o componente propriamente dito. Isto resulta numa resistência neste terminal altíssima e, conseqüentemente, numa corrente de porta praticamente nula. Abaixo vemos o aspecto construtivo do MOSFET:



O surgimento do MOSFET representou um grande avanço tecnológico por ser de fabricação muito simples, ter alto desempenho (alta impedância de entrada e baixo ruído) e propiciar a integração em larga escala, isto é, pelo fato de ter um tamanho muito reduzido (cerca de 20 vezes menor que o transistor bipolar), permite que um grande número de transistores seja produzido num mesmo circuito integrado. O baixíssimo consumo de energia resultante da alta impedância de entrada, a possibilidade de integração em larga escala, o tamanho reduzido e o baixo custo permitem que os CIs de portas lógicas, registradores e memórias sejam produzidos a partir da tecnologia dos MOSFETs.

Capítulo 5 - Circuitos Reguladores de Tensão

1 - Estabilização com Transistor

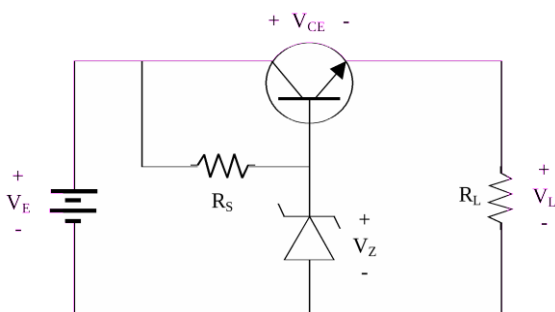
Ao estudarmos as fontes de tensão verificamos a existência de várias etapas na obtenção de uma tensão fixa a partir de uma tensão alternada.

- Transformação de amplitude
- Retificação
- Filtragem
- Regulação

A etapa de regulação, a qual cabe manter a tensão de saída fixa para vários valores de corrente de saída, era desempenhada pelos diodos **ZENER's**.

Como já estudamos, o diodo Zener tem suas limitações, e os circuitos reguladores projetados com este elemento são utilizados para baixos níveis de corrente de saída.

Com os transistores, podemos ampliar esta faixa de corrente, quando usamos a configuração abaixo, conhecida como circuito regulador série.



A tensão de entrada V_E pode ser constante (desejando estabilizá-la num valor menor) ou vir de um circuito retificador com filtro, cuja saída apresenta ondulação (ripple).

O diodo zener garante a estabilidade e o transistor permite ampliar a faixa de valores de correntes de saída, sem sobrecarregar o diodo zener. R_S é um resistor limitador de corrente para o diodo zener.

A tensão de saída pode ser determinada pela malha externa e pela malha de saída:

Malha externa: $V_S = V_E - V_{CE} \text{ (I)}$

Malha de saída: $V_S = V_Z - V_{BE} \text{ (II)}$

Malha do transistor: $V_{CE} = V_{CB} + V_{BE} \text{ (III)}$

Malha interna: $V_E = V_{CB} + V_Z \text{ (IV)}$

Sendo este circuito estabilizador de tensão, ele deve compensar tanto as variações de tensão de entrada, como as variações de corrente de saída (causadas pelas variações na carga R_L).

Pela equação (II) nota-se que a tensão de saída V_S é constante, pois tanto a tensão zener V_Z como a tensão V_{BE} são estáveis.

Podemos tentar explicar a ação de regulação da seguinte forma:

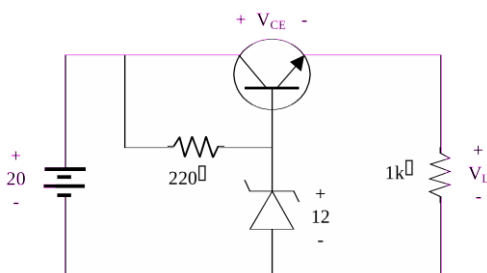
1. Se a tensão de saída diminuir, a tensão base-emissor aumenta, fazendo com que o transistor conduza mais, e desta forma aumentando a tensão de saída - mantendo a saída constante.
2. Se a tensão de saída aumentar, a tensão base-emissor diminui, e o transistor conduz menos, reduzindo assim, a tensão de saída, mantendo a saída constante.
3. Um aumento da tensão de entrada, aumenta a tensão base-coletor (IV). Como V_{BE} é constante, V_{CE} aumenta (III). Portanto, pela equação (II) V_S permanece constante.
4. Se V_E diminuir, V_{CB} diminui (IV). Pela equação (III) V_{CE} diminui. Pela equação (II) V_S permanece constante.

1.1 - Limitações

Obviamente, o circuito regulador apresenta suas limitações. O transistor tem seus valores máximos e mínimos para V_{CE} e I_C , que limita os valores máximos e mínimos da tensão de entrada e corrente de saída, para que haja tanto a estabilização da tensão como a proteção do transistor e do diodo zener.

- Tensão máxima de entrada
 $V_{E \text{ MAX}} = V_{CE \text{ MAX}} + V_S$
- Tensão mínima de saída
 $V_{E \text{ MIN}} = V_{CE \text{ SAT}} + V_S$
- Corrente máxima de saída
 $I_{S \text{ MAX}} = I_{C \text{ MAX}}$
- Potência máxima dissipada pelo transistor
 $P_{C \text{ MAX}} = (V_{E \text{ MAX}} - V_S) \cdot I_{S \text{ MAX}}$

Exemplo 1 - Calcule a tensão de saída e a corrente no zener do circuito regulador da figura abaixo. ($\beta=50$)

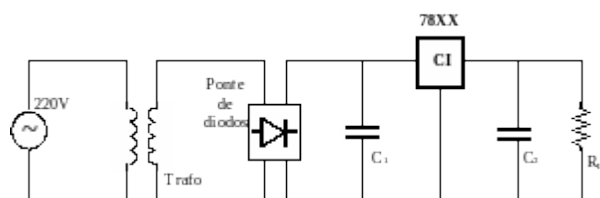


2 - Estabilização com Circuitos Integrados

Há uma classe de CIs disponíveis que operam como reguladores de tensão. Estes CIs contêm circuitos mais sofisticados que proporcionam uma regulação quase perfeita e até proteção contra curto-circuito na saída da fonte.

As série mais difundidas de reguladores de tensão são as **uA78XX** e a **uA79XX**. Estes CIs possuem três terminais. Um para receber a tensão não regulada. Um para o aterramento e o terceiro entrega a tensão regulada.

Uma fonte de tensão com este regulador apresenta a seguinte forma:



O capacitor de filtragem principal C_1 não precisa ter valor elevado, são usados valores de 220 a 470 μ F. Isto porque o ripple é eliminado principalmente pelo CI. O capacitor C_2 é utilizado para supressão de ruídos de alta frequência, tendo valores típicos na ordem de 100nF.

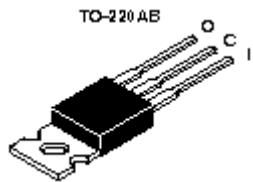
Os valores de tensão de saída dependem do tipo do CI utilizado, a tabela a seguir mostra os valores disponíveis e seus respectivos limites de tensão de entrada.

CI Regulador	Tensão de Saída	Tensão de entrada (volts)	
		Mín	Máx
7805	5,0	7,3	25
7806	6,0	8,3	25
7808	8,0	10,5	25
7810	10,0	12,5	28
7812	12,0	14,6	30
7815	15,0	17,7	30
7818	18,0	21,0	33
7824	24,0	27,1	38

A série 79XX apresenta características idênticas para a regulação de tensões negativas.

Apesar do fabricante especificar que o CI suporta correntes de até 2,2A, ele só é utilizado para correntes de no máximo 1A, com o uso recomendado de radiador de calor para correntes maiores que 500mA.

2.1 - Encapsulamento 78xx

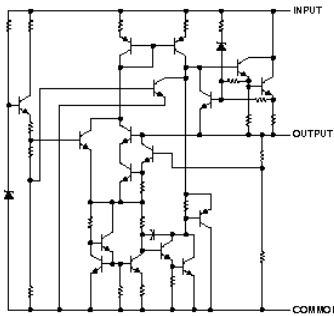


O - Output - Saída

C - Common - Terra

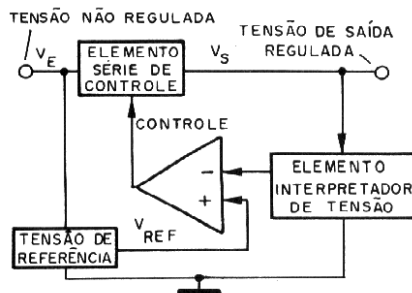
I - Input - Entrada

2.2 - Esquema interno



- 17 transistores
- 2 diodos zeners
- 21 resistores
- 1 capacitor

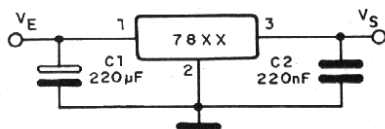
2.3 - Diagrama de Blocos



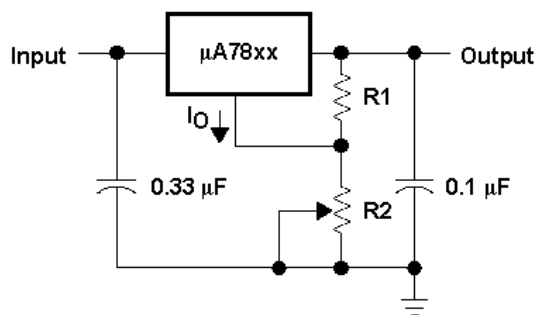
- **Tensão de referência:** Fornece uma tensão de referência estável (zener)
- **Interpretador de tensão:** Amostra o nível de tensão de saída.
- **Elemento comparador:** Compara a referência com a tensão de saída produzindo um sinal de erro
- **Elemento de controle:** Utiliza o sinal de erro para modificar a tensão de saída de modo a estabilizá-la.

2.4 - Aplicações Básicas

A montagem básica deste CI esta mostrada na figura a seguir.



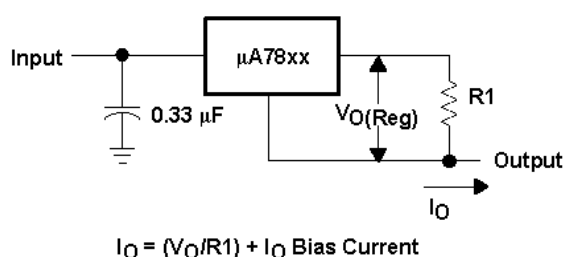
Com algumas modificações podemos conseguir tensões maiores que a tensão regulada do CI.



$$V_0 = V_{XX} + \left(\frac{V_{XX}}{R_1} + I_0 \right) \cdot R_2$$

Onde $I_0 = 3$ a 10 mA (depende do tipo de CI)

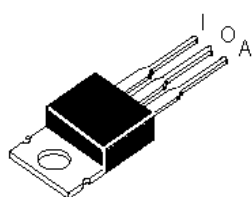
Podemos projetar uma fonte de corrente para diversas aplicações, como recarregadores de bateria, usando o 78XX.



3 - Fonte de Tensão com saída variável.

Apesar da série uA78xx permitir, através da adição de componentes auxiliares, a obtenção de tensões de saída variáveis, existem CI's dedicados para isto.

O **LM317** permite que a tensão de saída seja ajustável entre 1,2V e 37V, podendo fornecer até 500mA de corrente de saída.

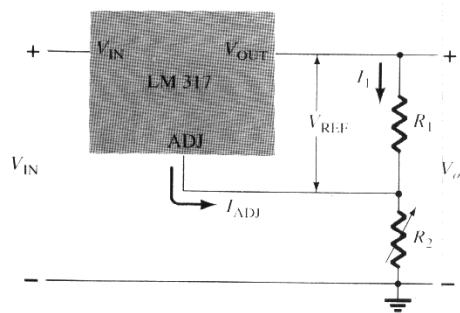


O - Output - Saída

A - Adjustment - Ajuste

I - Input - Entrada

O esquema de ligação é o mostrado na figura a seguir. A tensão de entrada deve ser **superior em 3V** a maior tensão de saída pretendida.



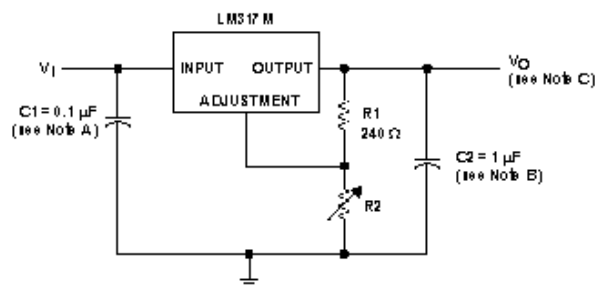
A tensão de saída é dada por:

$$V_0 = V_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{ADJ} \cdot R_2$$

Onde $V_{REF} = 1,25V$ e $I_{ADJ} = 100\mu A$.

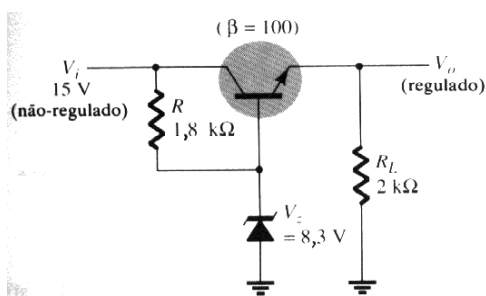
Exemplo 2 - Determine a tensão regulada no circuito acima para $R_1 = 240\Omega$ e $R_2 = 2,4 k\Omega$.

Para melhorar a filtragem e eliminar possíveis ruídos, devemos adicionar capacitores na entrada e saída do regulador.

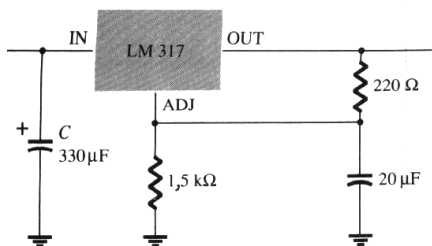


Exercícios de Fixação

1. Calcule a corrente no diodo zener e a tensão de saída no circuito abaixo.



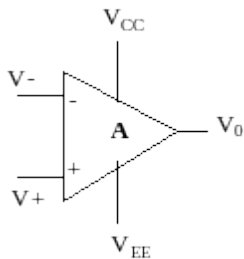
2. Calcule a tensão de saída para o circuito abaixo. Qual o valor mínimo da tensão não regulada que deve ser entregue ao circuito?



Capítulo 6 - Amplificadores Operacionais

1 - Características Básicas

- O Amplificador Operacional é um circuito eletrônico integrado composto de resistores, transistores e capacitores.
- No princípio, os Amplificadores Operacionais (AMP OP) foram utilizados para realizar operações matemáticas, resultando no nome “operacional”
- Atualmente é utilizado principalmente em Instrumentação, na manipulação de sinais elétricos de pequena intensidade obtidos por transdutores de grandezas físicas. Exemplos: Sensores de luminosidade, pressão, velocidade, som, nível, etc.
- Na análise de circuitos é tratado como um componente discreto, sem entrar no seu conteúdo interno.
- Símbolo e circuito equivalente:



$$V_0 = A.(V_+ - V_-)$$

V_+ : Entrada não inversora

V_- : Entrada inversora

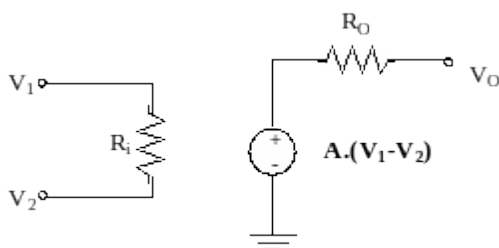
V_0 : Saída (ou V_S)

V_{CC} : Alimentação positiva

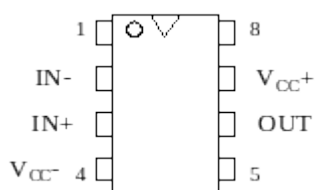
V_{EE} : Alimentação negativa (ou V_{CC-})

R_i : Resistência de entrada

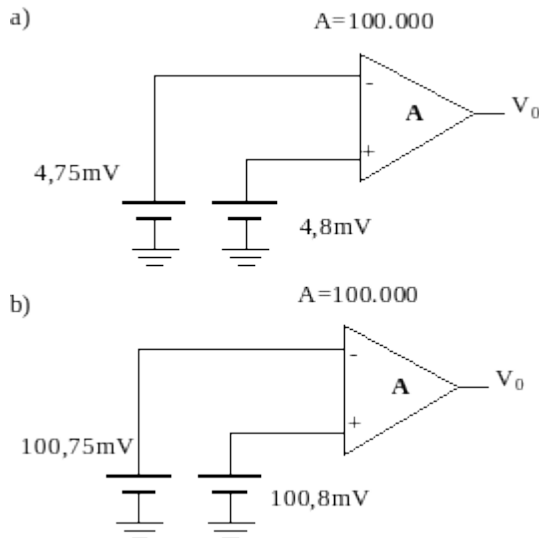
R_O : Resistência de saída



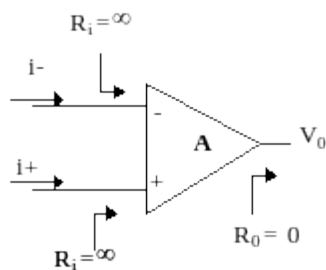
- Fisicamente é apresentado em vários invólucros, sendo o mais comum o DIL (DUAL-IN-LINE) de 8 pinos.
- Abaixo temos a pinagem do **CI μA 741**



Exemplo 1 - Calcule o sinal de saída nos circuitos a seguir:



2 - Amplificador Operacional Ideal



$$V_0 = A \cdot (V_+ - V_-)$$

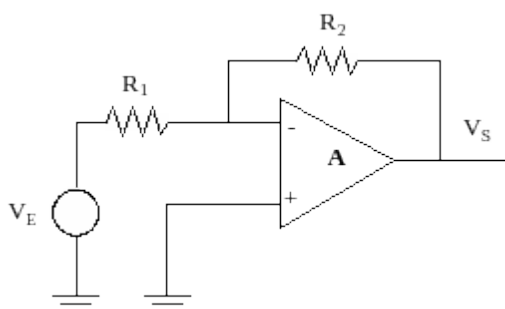
Na teoria este componente deveria ter as seguintes características:

- O Amplificador Operacional (AMP OP) nunca satura, isto é, ele pode fornecer qualquer valor de tensão na sua saída
- Não há corrente nas entradas do operacional ($i_+ = i_- = 0$, pois $R_i = \infty$)
- O AMP OP tem impedância de saída nula ($R_0 = 0$), isto quer dizer que a tensão de saída se mantém para qualquer nível de corrente.
- O AMP OP ideal tem ganho A constante, independentemente da frequência dos sinais de entrada.
- O AMP OP ideal deve ter ganho infinito.

3 - Circuitos com Amplificador Operacional

Os AMP OPs podem desempenhar inúmeras funções em um circuito, dependendo da configuração dos elementos externos. Vamos citar aqui quatro configurações básicas.

3.1 - Amplificador Inversor



O resistor R_2 é chamado de resistor de realimentação negativa, pois interliga a saída com a entrada inversora do operacional.

Para a análise do circuito devemos calcular o ganho de tensão do circuito (A_v), isto é, determinar o comportamento da tensão de saída do circuito em função da sua tensão de entrada.

Para a análise precisamos introduzir o conceito de “curto-circuito virtual” ou “terra virtual”.

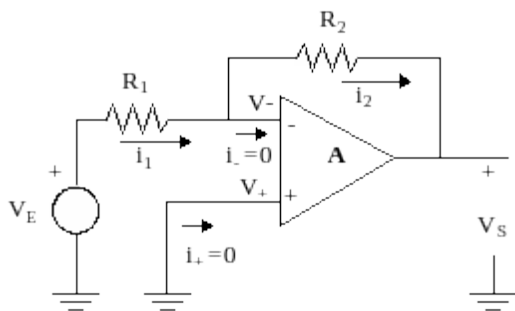
Sabemos que $V_S = A \cdot (V_+ - V_-)$.

Temos que: $(V_+ - V_-) = V_S / A$, supondo $A = \infty$, podemos considerar $V_+ - V_- \approx 0$ que significa $V_+ = V_-$.

Do ponto de vista da tensão podemos considerar que as entradas V_+ e V_- estão em curto-circuito.

Do ponto de vista da corrente temos um circuito aberto introduzindo o termo “curto virtual” (mesma tensão e corrente nula)

Determinação do ganho de tensão do circuito



- Pela Técnica do curto virtual

$V_+ = V_- = 0$ “ V_- ” é um terra virtual.

- 1ª equação

$$V_E - R_1 \cdot i_1 = 0$$

$$V_E = R_1 \cdot i_1$$

$$i_1 = V_E / R_1$$

- 2ª equação

$$V_S + R_2 \cdot i_2 = 0$$

$$V_S = -R_2 \cdot i_2$$

$$i_2 = -V_S / R_2$$

- 3ª equação

$$i_1 = i_2$$

$$V_E / R_1 = -V_S / R_2$$

$$A_v = \frac{V_S}{V_E} = -\frac{R_2}{R_1}$$

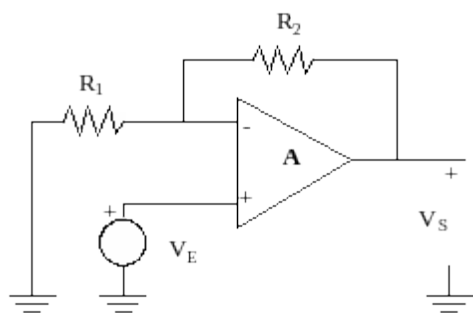
Conclusões:

- A tensão de saída é aumentada ou atenuada, tendo sua polaridade invertida, de acordo com o ganho de tensão A_V
- O ganho é dado apenas pela relação entre os resistores R_2 e R_1 .
- O ganho independe das características do AMP OP

Exemplo 3 - Projete um amplificador inversor empregando um AMP OP ideal com $A_V = -10$. Adote $R_1 = 1k\Omega$. Esboçe a forma de onda do circuito para uma tensão de entrada senoidal com amplitude de 1V e 1Hz.

3.2 - Amplificador Não-Inversor

Modificando a posição da fonte de tensão de entrada, obtemos um amplificador que não inverte a polaridade do sinal de saída.



$$A_V = \frac{V_S}{V_E} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

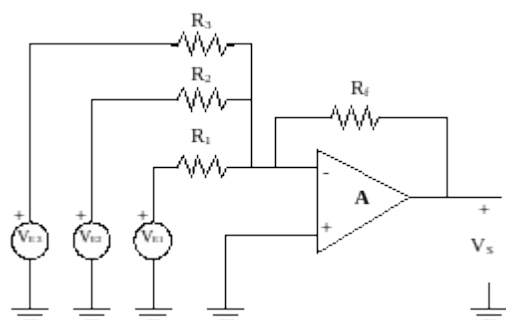
Exemplo 4 - Comprove a expressão do ganho de tensão do amplificador não inversor utilizando o conceito de curto-virtual

Exemplo 5 - Projete um amplificador não inversor empregando um AMP OP ideal com $A_V = 10$. Adote $R_1 = 3k\Omega$. Esboçe a forma de onda do circuito para uma tensão de entrada senoidal com amplitude de 1V e 1Hz.

3.3 - Amplificador Somador Inversor

Nesta configuração a saída do circuito é uma soma ponderada das entradas.

A ponderação é feita pelos resistores em série com as fontes e o resistor de realimentação (R_f).



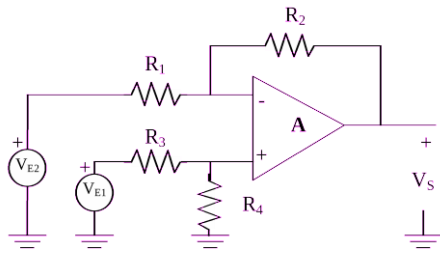
$$V_S = - \left[\frac{R_f}{R_1} V_{E1} + \frac{R_f}{R_2} V_{E2} + \frac{R_f}{R_3} V_{E3} \right]$$

Se o circuito tiver mais entradas podemos adicionar mais termos a fórmula, seguindo o padrão resistor R_f sobre resistor de entrada R_n .

Exemplo 6: Projete um circuito somador com três entradas, de modo que o sinal de saída seja dado por $V_S = -(4V_{E1} + 2V_{E2} + V_{E3})$

3.4 - Amplificador de Diferenças

A saída do circuito é proporcional à diferença entre as duas tensões de entrada ($V_{E1}-V_{E2}$)



Se usarmos R_4 / R_3 igual a R_2 / R_1 temos que:

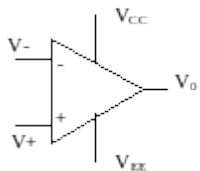
$$V_S = \frac{R_2}{R_1} \cdot (V_{E1} - V_{E2})$$

Exemplo 7: Em um determinado processo térmico, temos dois termômetros que medem a temperatura fora do forno e dentro do forno. Projete um circuito que forneça um sinal elétrico três vezes maior que a diferença entre os sinais oriundos dos termômetros interno e externo.

4 - Alimentação dos AMP OP's

Sabemos que as entradas do AMP OP. não consomem corrente, o que equivale a dizer que o AMP OP não consome potência dos circuitos que alimentam suas entradas. Por outro lado, sabemos que sua saída é capaz de fornecer uma tensão proporcional à diferença das tensões de entrada a qualquer carga colocada em sua saída, portanto o AMP OP ideal é capaz de fornecer qualquer potência em sua saída.

A energia necessária para isto é obtida por meio dos terminais de alimentação V_{CC} e V_{EE} .



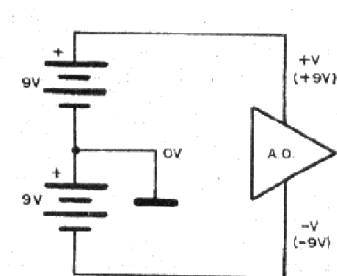
O terminal de alimentação mais positivo é chamado de V_{CC} ou $+V_{CC}$. O terminal mais negativo é chamado de V_{EE} ou $-V_{CC}$. Usualmente, omitem-se esses terminais dos diagramas elétricos para não congestionar os desenhos. Mas, obviamente, eles estão sempre conectados.

Na grande maioria das aplicações, nenhum dos dois terminais de alimentação está aterrado. Normalmente emprega-se $V_{EE} = -V_{CC}$. Em particular os valores de $V_{CC} = 15\text{ V}$ e $V_{EE} = -15\text{ V}$ são os mais usuais. Valores de 9 e -9 volts também são muito empregados.

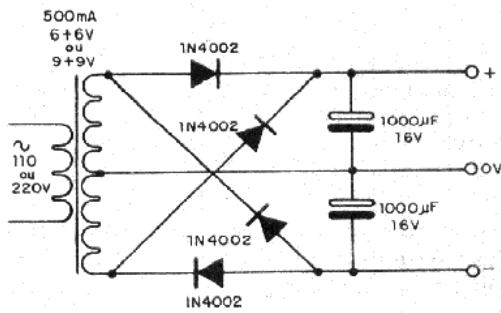
4.1 - Formas de Alimentação

As fontes de alimentação com três terminais (+V, 0, -V) são chamadas de fontes simétricas.

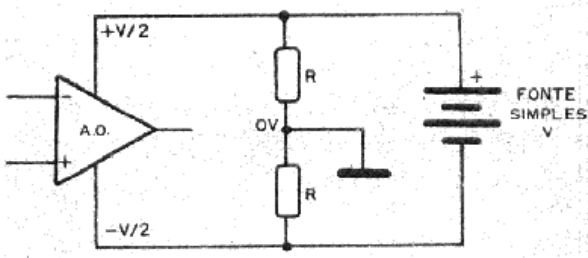
- Fonte simétrica de 9-0-9 volts com baterias.



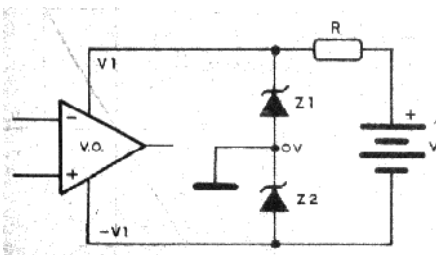
- Fonte Simétrica com transformador



- Alimentação a partir de fonte simples

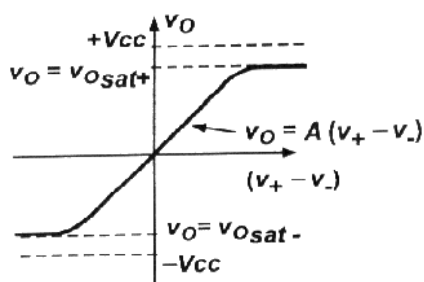
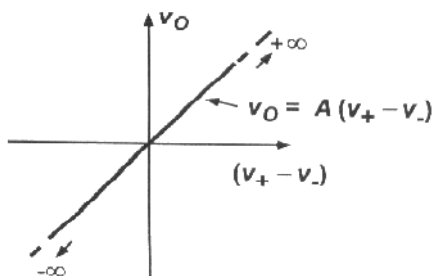


- Fonte com Zener



4.2 - Saturação em AMP OP's

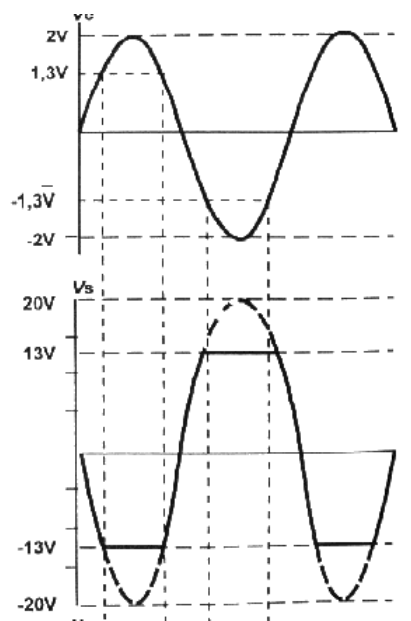
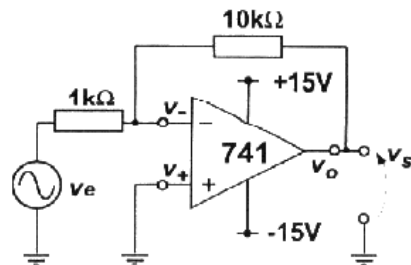
Os valores das tensão de alimentação estabelecem os limites de excursão do sinal de saída do AMP OP. Para um AMP OP ideal, sabemos que $V_0 = A \cdot (V_+ - V_-)$. Para um AMP OP real, enquanto o $|V_0|$ for muito menor que $|V_{CC}|$ temos $V_0 = A \cdot (V_+ - V_-)$. No entanto quando $|V_0|$ se aproxima do valor de $|V_{CC}|$, o AMP OP deixa de se comportar segundo a lei anterior e tende a assumir um valor constante. Neste caso, diz-se que a saída está **saturada**.



Os valores de tensão para os quais ocorrem a saturação dependem do AMP OP utilizado. Este dado só pode ser fornecido pelo próprio fabricante do AMP OP e portanto consulte o manual para determiná-lo. No caso do 741, existe uma diferença de aproximadamente 2V entre a fonte de alimentação e o máximo (mínimo) valor de saída, ou seja, para $V_{CC} = -V_{EE} = +15V$ tem-se $V_{0SAT} = \pm 13V$.

A figura a seguir apresenta a forma de onda de saída de um amplificador inversor de ganho -10, onde observamos claramente o ceifamento da forma de onda (V_s) quando V_0 atinge os valores de saturação.

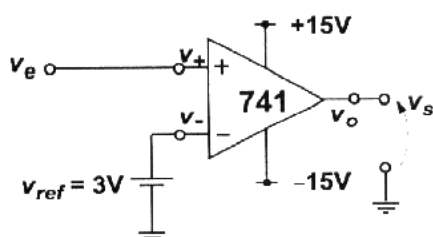
É importante salientar que quando o circuito está saturado não podemos utilizar o conceito do curto-circuito virtual.

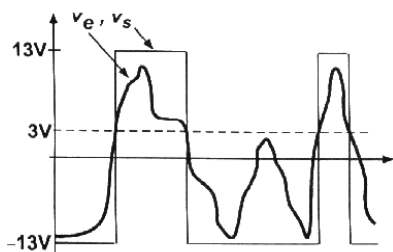


5 - O Circuito Comparador de tensões

Em algumas aplicações, o AMP OP opera exclusivamente na região saturada, e portanto a sua saída assume os valores de saturação. Naturalmente, em tais circuitos não podemos aplicar a relação fundamental e, mais importante, não podemos aplicar o conceito do curto-circuito virtual para determinar a operação do circuito.

O comparador de tensões utiliza um AMP OP saturado. A função de um comparador de tensões é comparar a tensão de suas entradas com uma tensão de sua outra entrada e produzir um sinal de saída de valor alto ou baixo, dependendo de qual entrada é maior. Este circuito nada mais é do que um AMP OP sendo empregado em malha aberta (sem realimentação). Normalmente, o que este circuito faz é simplesmente comparar o valor do sinal de entrada V_+ com um valor de referência (V_-). Como o ganho do AMP OP é elevado (em torno de 200.000 para o 741) assim que o valor do sinal V_0 se torna maior que o valor de referência, a saída do operacional satura em $+V_{0SAT}$. Se o valor do sinal se tornar menor que o valor de referência, a saída do operacional satura em $-V_{0SAT}$.

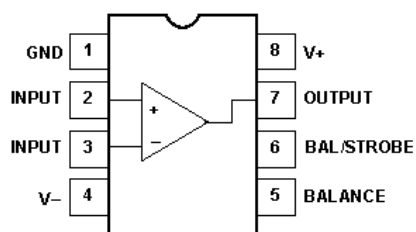




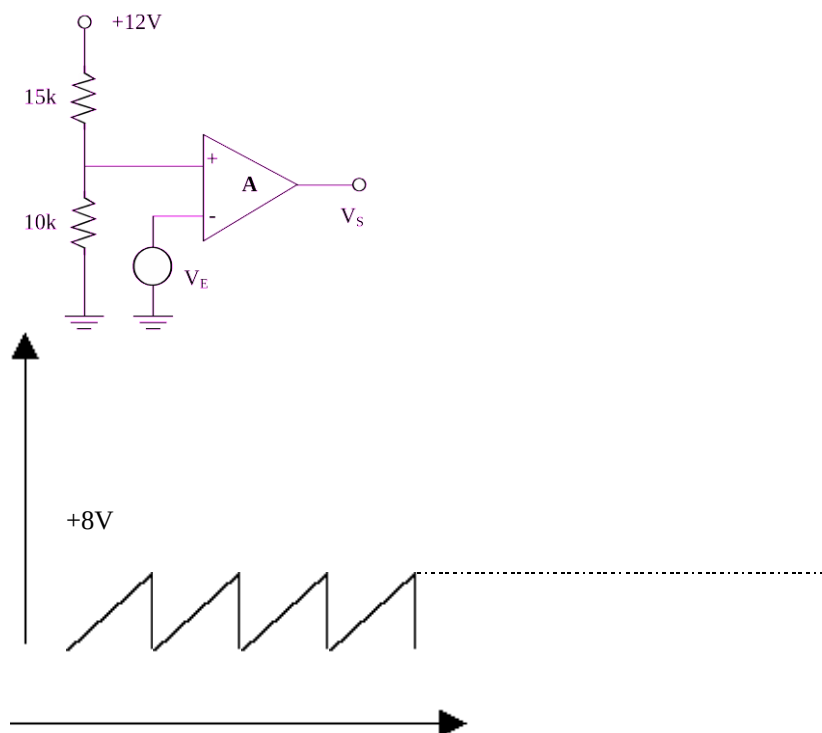
Perceba que o circuito está convertendo um sinal analógico em um sinal digital em sua saída (conversor analógico digital).

Embora todos os AMP OP possam ser utilizados como comparadores, em frequências superiores a centenas de kHz é recomendável a utilização de CI's dedicados para comparação de tensão. (Por exemplo: **LM 311**).

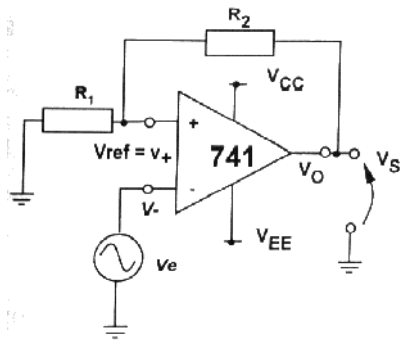
Pinagem do CI LM311



Exemplo 8 - Esboce o sinal de saída do circuito comparador. A entrada é uma onda triangular conforme o gráfico abaixo e a alimentação é feita em $\pm 12V$.



5.1 - O Circuito Regenerativo de Schmitt



O circuito acima é um comparador onde a tensão V_E é comparada com uma referência que depende da tensão de saída.

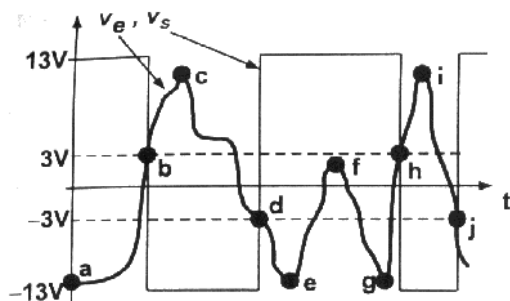
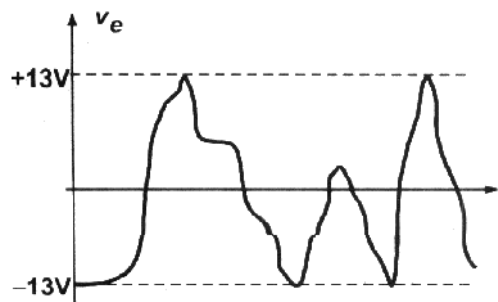
Devido a realimentação positiva o circuito opera na região de saturação, portanto a saída está sempre em V_{0SAT} ou $-V_{0SAT}$. Caso a saída esteja no seu valor alto, o valor de referência será:

$$V_{REF1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{0SAT}$$

Caso a saída esteja no seu valor baixo, o valor de referência será:

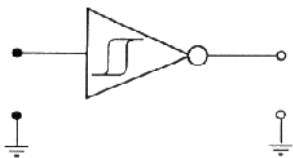
$$V_{REF2} = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{0SAT}$$

Ao alimentarmos o circuito anterior com 15V e utilizarmos os resistores $R_2=10k\Omega$ e $R_1=3k\Omega$ teremos as referências de 3 e -3 volts. Ao aplicarmos uma tensão V_E com a forma abaixo teremos uma onda de saída com valores de 13 e -13 volts, dependendo da tensão de entrada.



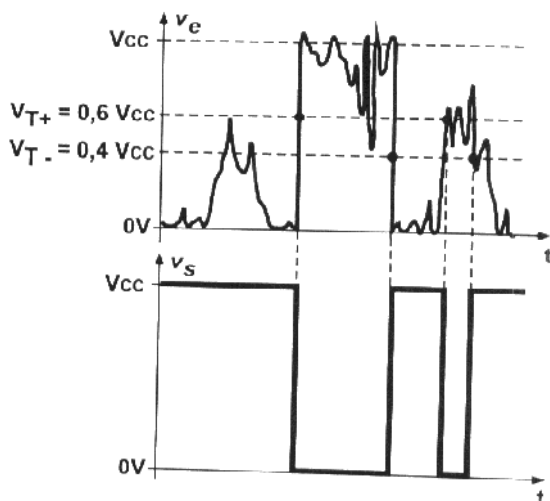
Quando o sinal de entrada vem de um valor baixo (**ponto a**) onde a saída está em alta (**ref=3V**), somente ao atingir +3V (**ponto b**) é que a saída muda para o valor baixo. Por outro lado, quando o sinal de entrada vem de um valor alto (**intervalo b-d**) onde a saída está em valor baixo, somente ao atingir -3V é que a saída muda de estado (**ponto d**).

Esta propriedade de duas referências é utilizado na recuperação de sinais digitais deteriorados por ruídos. Os circuitos específicos para isto são portas lógicas especiais representadas pela figura abaixo.



Os circuitos são alimentados com $+V_{CC}$ e 0 V . O fabricante estabelece referências de 40% e 60% de V_{CC} . O sinal estando em um nível baixo, a referência é ajustada em 60%, podendo suportar ruídos de até 59% de V_{CC} . Caso esteja em nível alto, a referência é ajustada em 40%, podendo suportar uma queda de até 41% de V_{CC} . Desta forma são eliminados os ruídos de um determinado sinal.

A figura a seguir mostra o comportamento de uma porta inversora Schmitt Trigger submetida a um sinal de entrada ruidoso.



6 - Circuitos Osciladores com AMP OP

Utilizando AMP OPs podemos construir circuitos geradores de sinais quadrados e triangulares (dentes de serra). O circuito abaixo gera um sinal de saída com forma quadrática.

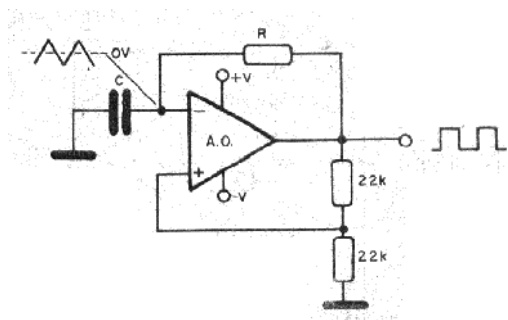
Este circuito compara a tensão do capacitor com uma referência obtida a partir do sinal de saída. ($\pm \frac{V}{2}$).

Inicialmente com o capacitor descarregado, o AMP OP satura no valor positivo. O capacitor começa a ser carregado através de "R".

Quando a tensão do capacitor ultrapassar a tensão de referência ($+\frac{V}{2}$) o AMP OP comutará a saída para a saturação negativa.

A referência muda para ($-\frac{V}{2}$) e a tensão do capacitor começa a descarregar e a carregar negativamente em direção a $-V$.

Ao alcançar a referência ($-\frac{V}{2}$) há uma nova comutação e o ciclo se reinicia.



Obviamente o tempo de carga e descarga do capacitor é o fator que define a frequência da onda gerada. Com isso controlando os valores de R e C variamos a frequência da tensão gerada.

Utilizando resistores de realimentação positiva de mesmo valor (na figura anterior temos $22k\Omega$), podemos calcular a frequência com a seguinte equação:

$$f = \frac{0,455}{R.C}$$

Exemplo 9 - Utilizando um AMP OP, projete um circuito que forneça um sinal quadrado com frequência de 1Hz.