

Centro de Formação Profissional Pedro Martins Guerra

ELETRÔNICA GERAL

FIEMG

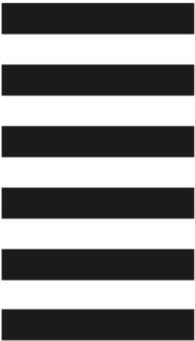
CIEMG

SESI

SENAI

IEL

Sistema FIEMG



Presidente da FIEMG

Robson Braga de Andrade

Gestor do SENAI

Petrônio Machado Zica

**Diretor Regional do SENAI e
Superintendente de Conhecimento e Tecnologia**

Alexandre Magno Leão dos Santos

Gerente de Educação e Tecnologia

Edmar Fernando de Alcântara

Elaboração

Equipe Técnica - Núcleo Eletroeletrônica

Unidade Operacional

Centro de Formação Profissional Pedro Martins Guerra

Revisão

Equipe Técnica - Centro de Formação Profissional Pedro Martins Guerra
Itabira/MG 2005

FIEMG

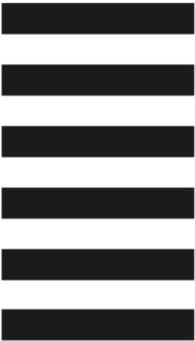
CIEMG

SESI

SENAI

IEL

Sistema FIEMG



Sumário

APRESENTAÇÃO	4
1. FISICA DOS SEMICONDUTORES	5
1.1 CONDUÇÃO NOS SEMICONDUTORES.....	5
1.2 DOPAGEM DE SEMICONDUTORES.....	7
2. DIODO DE JUNÇÃO	9
2.1 JUNÇÃO PN	9
2.2 DIODO DE JUNÇÃO IDEAL	12
2.3 DIODO DE JUNÇÃO REAL	12
2.4 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DO DIODOS.....	14
2.5 COMPORTAMENTO DO DIODO EM AC	14
2.6 REGIME MÁXIMO DO DIODO EM CC	15
2.7 EFEITO DA TEMPERATURA NA CARACTERÍSTICA	16
2.8 RESISTÊNCIA DO DIODO.....	16
2.9 TEMPO DE CHAVEAMENTO DO DIODO	17
2.10 CLASSIFICAÇÃO DOS DIODOS	17
3. RETIFICADORES	22
3.1 RETIFICADOR DE 1/2 ONDA.....	22
3.2 RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA.....	25
3.3 RETIFICADOR EM PONTE.....	27
3.4 FILTROS	30
4. TRANSISTOR BIPOLAR DE JUNÇÃO (TBJ).....	36
5. AMPLIFICADORES DE POTÊNCIA	45
5.1 DISSIPADORES DE CALOR	54
6. JFET.....	55
7. AMPLIFICADORES OPERACIONAIS.....	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

FIEMG

CIEMG

SESI

SENAI

IEL

Apresentação

“Muda a forma de trabalhar, agir, sentir, pensar na chamada sociedade do conhecimento. “

Peter Drucker

O ingresso na sociedade da informação exige mudanças profundas em todos os perfis profissionais, especialmente naqueles diretamente envolvidos na produção, coleta, disseminação e uso da informação.

O **SENAI**, maior rede privada de educação profissional do país, sabe disso, e, consciente do seu papel formativo, educa o trabalhador sob a égide do conceito da competência:” **formar o profissional com responsabilidade no processo produtivo, com iniciativa na resolução de problemas, com conhecimentos técnicos aprofundados, flexibilidade e criatividade, empreendedorismo e consciência da necessidade de educação continuada.**”

Vivemos numa sociedade da informação. O conhecimento, na sua área tecnológica, amplia-se e se multiplica a cada dia. Uma constante atualização se faz necessária. Para o **SENAI**, cuidar do seu acervo bibliográfico, da sua infraestrutura, da conexão de suas escolas à rede mundial de informações – Internet - é tão importante quanto zelar pela produção de material didático.

Isto porque, nos embates diários, instrutores e alunos, nas diversas oficinas e laboratórios do **SENAI**, fazem com que as informações, contidas nos materiais didáticos, tomem sentido e se concretizem em múltiplos conhecimentos.

O **SENAI** deseja, por meio dos diversos materiais didáticos, aguçar a sua curiosidade, responder às suas demandas de informações e construir *links* entre os diversos conhecimentos, tão importantes para sua formação continuada!

Gerência de Educação e Tecnologia

1. Física dos Semicondutores

1.1. Condução nos semicondutores

Estrutura atômica

Qualquer substância ou material conhecido pode ser subdividido em partes cada vez menores, até que se chegue à menor delas, a molécula. Pode-se então definir como molécula “**a menor partícula a qual se pode dividir um corpo sem que este perca suas propriedades fundamentais**”. A partir do ponto em que se descobriu a molécula, conseguiu-se subdividi-la ainda mais, mas desta feita não é mais possível conseguir que o material conserve suas propriedades fundamentais.

A estas subdivisões da molécula deu-se o nome de **ÁTOMO**, palavra de origem grega, que significa A=não TOMO=divisão, ÁTOMO=NÃO DIVISÍVEL.

O átomo é formado por um grande número de partículas, dentre as quais, podemos destacar:

- **ELÉTRONS: parte do átomo com carga elétrica negativa (-).**
- **PRÓTONS: parte do átomo com carga elétrica positiva (+).**
- **NÊUTRONS: parte do átomo que não tem carga elétrica.**

Os prótons e os nêutrons constituem o chamado núcleo do átomo tendo em seu redor, num movimento de rotação, os elétrons, dispostos em órbitas concêntricas. É importante lembrar que somente a **camada periférica** de um átomo pode apresentar-se incompleta, as demais estão sempre completas.

Os elétrons que se encontram nesta camada periférica, são chamados de **elétrons de valência**, e possuem a característica de serem quase que completamente livres, para participar de fenômenos químicos e elétricos.

ELÉTRON DE VALÊNCIA: elétrons da camada externa, responsáveis pela atividade química ou elétrica do elemento.

Quando um grupo de átomos está disposto simetricamente entre si, um elétron de valência muitas vezes gira em torno de dois núcleos, ao invés de um só. Quando isto acontece, os elétrons de valência unem os átomos nos quais giram ao redor, a este tipo de ligação dá-se o nome de ligação covalente.

LIGAÇÃO COVALENTE: união entre dois átomos através de seus elétrons de valência.

Se, num material, após todas as ligações covalentes terem se realizado, ainda restarem elétrons que não possuem uniões firmes, estes são denominados de elétrons livres. Quanto maior o número de elétrons livres, maior a condutividade.

A partir desse conceito podemos então definir:

- **CONDUTOR:** material que possui grande quantidade de elétrons livres.
- **ISOLANTE:** material que possui pouca ou nenhuma quantidade de elétrons livres.
- **SEMICONDUTOR:** existem certos materiais, com moléculas especiais, que se situam entre os dois grupos e não são nem bons condutores, nem bons isolantes, chamam-se semicondutores, pois possuem elétrons livres, mas em pequena quantidade. Destes materiais os mais conhecidos são: o Germânio (Ge) e o Silício (Si).

O número de valência destes dois elementos equivale ao número ou quantidade de elétrons na última camada periférica. Estes átomos possuem uma outra particularidade, que é a de se combinarem entre si, para formar o que denominamos de estrutura cristalina.

Estrutura cristalina

O Ge por problemas de limitações (temperatura) teve o seu uso abandonado e o silício passou a ser o cristal mais utilizado para a fabricação de componentes eletrônicos. O silício é um elemento químico pertencente ao quarto grupo da tabela periódica. Cada átomo possui 14 elétrons na coroa. A camada mais interna é ocupada somente por dois elétrons e a seguinte por oito. Os quatro elétrons restantes circulam numa terceira camada eletrônica. Portanto nesta terceira camada para que o átomo atingisse a estabilidade química, seriam necessários mais quatro elétrons. No estado sólido e sob condições adequadas de fabricação, o silício constitui uma rede cristalina, onde cada átomo tem quatro átomos vizinhos equidistantes, interligados por pontes de pares de elétrons, **ligação covalente**; e todos os elétrons de valência dos átomos de silício, na estrutura cristalina, são envolvidos pelas ligações entre átomos. Estão, desse modo, presos em um lugar, sendo denominados elétrons presos.

Conceito de lacuna

A rede cristalina se encontra sempre a uma temperatura acima do zero absoluto, ou seja, contém sempre determinada quantidade de energia térmica. O resultado da presença dessa energia térmica é que os átomos e os elétrons vibram em torno de suas posições de repouso, o que tem como consequência o aparecimento de forças mecânicas adicionais na rede cristalina. Se a energia introduzida for tão elevada que supere as forças de ligação, alguns elétrons poderão escapar de suas ligações covalentes. Tais elétrons ficam livres de seus átomos e com isso se tornam móveis; são denominados, então, elétrons livres e estão, do mesmo modo como as moléculas de um gás, em permanente movimento. Ao mesmo tempo, estão sempre colidindo com os átomos da estrutura em oscilação, modificando constantemente a direção do movimento. Aparece um movimento em ziguezague irregular desses elétrons, no qual, em termos de valores médios não há direção predominante.

Quando um elétron abandona uma ligação covalente, fica faltando, nesse lugar, uma carga elétrica negativa, provocando então a formação de uma **lacuna**.

Verifica-se que essa lacuna, ou seja, uma carga negativa faltante na ligação da rede, também pode ser considerada como uma partícula autônoma, carregada positivamente.

Existem, pois, com a introdução de calor, elétrons livres e lacunas de igual número, e ambas as espécies de portadores contribuem para a condutividade do semicondutor.

1.2. Dopagem de Semicondutores

Semicondutor intrínseco

É uma estrutura cristalina formada somente por átomos do mesmo cristal, sendo, portanto um material semicondutor muito puro. A natureza dos semicondutores é tal que mesmo quantidades muito pequenas de certas impurezas podem alterar drasticamente suas propriedades elétricas. Por esta razão, um semicondutor não seria chamado verdadeiramente intrínseco, a menos que, o nível de impurezas fosse muito pequeno. A figura 01 ilustra a estrutura cristalina do Si, a qual é idêntica a do Ge.

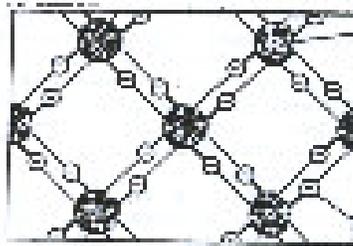


Figura 01 – A estrutura do silício numa representação bidimensional.

Semicondutor extrínseco

Na aplicação da eletrônica, o material semicondutor é dopado, isto é, propositalmente são adicionadas certas impurezas para resultar, em uma predominante condução de elétrons ou lacunas, qualquer que seja o requerido. As impurezas usadas são geralmente de dois tipos: uma delas é formada por elementos que possuem três elétrons de valência e a outra por um elemento que possui cinco elétrons de valência. A primeira é chamada de **impureza tipo-P**, e a outra é chamada de **impureza tipo-N**, após a impureza ter sido adicionada, o material é então denominado um **semicondutor extrínseco**.

Dopagem do semicondutor

A **dopagem** é um processo químico que tem por finalidade introduzir átomos estranhos a uma substância na sua estrutura cristalina; podendo esta ser do tipo N ou do tipo P, o que dará origem ao cristal N ou então ao cristal P, conforme apresentado a seguir:

Dopagem em tipo N (cristal N)

Quando o processo de dopagem introduz na estrutura cristalina do Ge ou do Si uma quantidade de átomos com mais de quatro elétrons na última camada, forma-se uma nova estrutura cristalina denominada de **cristal N**. Tomemos como exemplo, a introdução de átomos de fósforo, que possuem cinco elétrons na última camada, dos cinco elétrons externos do fósforo, quatro encontram um elétron no cristal, que possibilita a ligação covalente, o quinto elétron do fósforo não forma ligação covalente porque não encontra um elétron na estrutura que possibilite esta formação. Este elétron isolado tem a característica de se libertar facilmente do átomo, passando a vagar livremente dentro da estrutura do cristal, constituindo-se um portador livre de carga elétrica. Veja na figura 02:

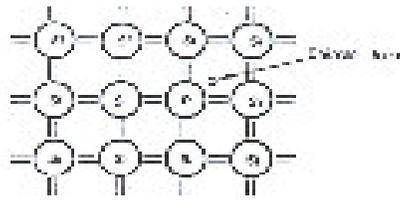


Figura 02

Dopagem em tipo P (cristal P)

A utilização de átomos com menos de quatro elétrons na última camada, originará um tipo de estrutura chamada de cristal P, tomando como base o átomo de índio, por exemplo, verifica-se a falta de um elétron para que os elementos com quatro elétrons (Si ou Ge) se combinem de forma covalente. Veja na figura 03:

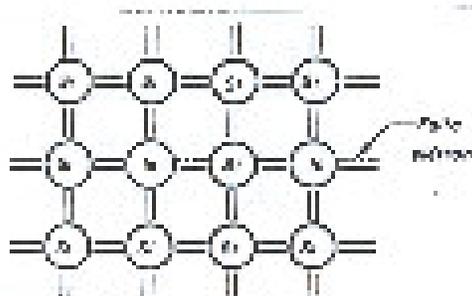


Figura 03

2. Diodo de Junção

2.1. Junção PN

Se unirmos cristais do tipo P a cristais do tipo N, de maneira a constituirmos um cristal único (junção na qual é mantida a continuidade da estrutura cristalina), esta junção será denominada de **JUNÇÃO PN** ou **DIODO DE JUNÇÃO**.

Observações:

Nos elementos tipo N, os elétrons serão denominados portadores majoritários de carga, existindo também nesses elementos os portadores minoritários de carga que são as lacunas.

Nos elementos tipo P, as lacunas serão denominadas portadores majoritários de carga, existindo também nesses elementos os portadores minoritários de carga que são os elétrons.

O material N apresenta um grande número de elétrons e o material P um grande número de lacunas logo, quando dispostos a formar uma junção PN como na figura 04, haverá passagem de lacunas do elemento P ao N e de elétrons do N para o P durante a difusão, as áreas que se encontram em torno da junção, ficarão livres dos portadores de carga (elétrons e lacunas), devido à recombinação entre esses portadores e suas conseqüentes anulações. Com a formação de íons positivos de um dos lados da junção e negativos do outro, teremos um decréscimo nas correntes, o que é facilmente compreendido se lembrarmos que um elétron que tentar passar através da junção vindo do lado N, encontrará uma barreira negativa do lado P, que o repelirá; dando-se o mesmo com as lacunas, ficando claro que neste material ocorrerá um equilíbrio de cargas em torno da junção.

Com o acúmulo de íons positivos de um dos lados da junção e negativos do outro, se estabelecerá uma região de carga espacial ou região de cargas. Devido a pouca quantidade de cargas móveis esta região é chamada de **REGIÃO DE DEPLEXÃO**.

As cargas que se formaram nesta região de espaço de cargas dão origem a uma diferença de potencial V_0 , e esta diferença de potencial pode ser esquematicamente representada por uma bateria, associada à junção.

Dentro da região de cargas existe uma carga positiva no lado de tipo N, e uma carga negativa no lado do tipo P, e isto dá origem a uma **barreira de potencial**.

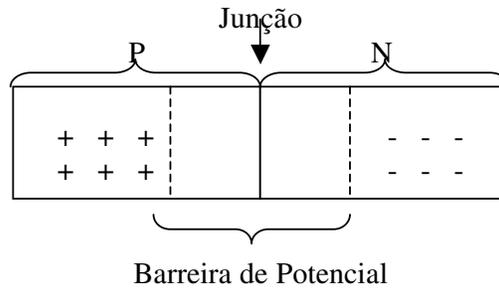


Figura 04 – Junção PN

Junção PN polarizada inversamente

A junção PN tem propriedades de retificadores, e se a conectamos a uma fonte de tensão, chamada de fonte de polarização, poderemos observar como tal dispositivo opera, na figura 05, temos uma bateria conectada aos terminais da junção, de tal forma que o pólo positivo está ligado ao material N, e o negativo ao material P. Assim, os portadores majoritários são atraídos pela bateria, ou seja, as lacunas do material P são atraídas pelo pólo negativo da bateria e os elétrons do material N pelo positivo.

Como estes portadores se afastam da junção a largura da barreira de potencial é aumentada, e quando a força de resistência do campo da barreira se iguala à da tensão aplicada, surge uma nova condição de equilíbrio, pois, nestas condições, os campos internos (da barreira) e externo (da tensão aplicada) somam-se; onde com a barreira aumentada, não pode haver fluxo de corrente, pois a barreira age como se fora um isolante

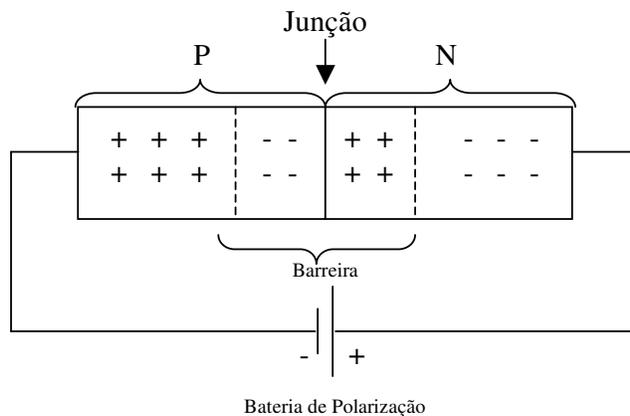


Figura 05 – Junção PN polarizada inversamente

Junção PN polarizada diretamente

Ocorre polarização direta quando o pólo positivo da bateria está ligado ao material P e o negativo ao material N, nesta situação a maioria dos portadores majoritários são repelidos em direção à junção (claro que uma lacuna não existe fisicamente, e quando falamos em movimento de lacuna subentende-se que um elétron se move no sentido oposto a ela).

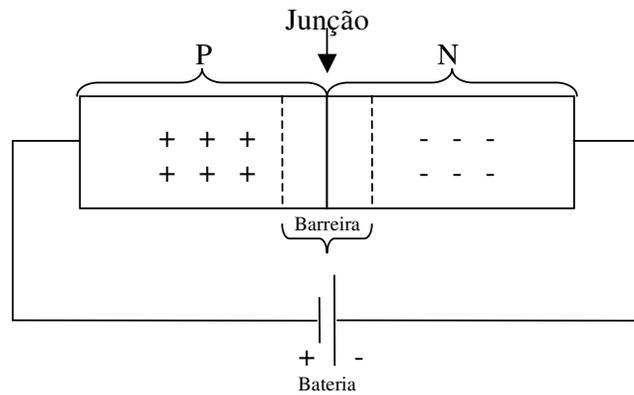


Figura 06 – Junção PN polarizada diretamente

O primeiro efeito disto é a neutralização de alguns íons doadores e receptores, e conseqüentemente uma redução na barreira de potencial. Até aqui, a corrente somente aumentou ligeiramente. Um aumento da tensão eventualmente reduzirá o potencial da barreira a zero, e então elétrons e lacunas irão se mover através da junção, os elétrons recombinando-se com elétrons no lado de tipo N assim, uma corrente agora flui através da junção. E esta corrente é aumenta rapidamente com somente um pequeno aumento adicional na tensão.

A corrente que flui quando uma polarização direta é aplicada é chamada de **corrente direta**, e consiste essencialmente de um fluxo de portadores em maioria de cada um dos lados através da junção. Estes portadores em maioria que cruzam a junção, tornam-se no outro lado portadores em minoria. Na figura 07 temos uma representação da junção não polarizada.

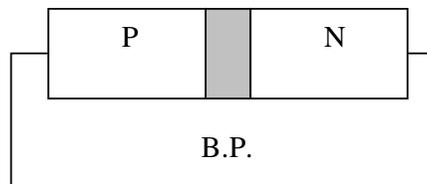


Figura 07 – Junção PN não polarizada

Até agora tínhamos visto, para efeito de explicação, um modelo teórico onde destacávamos os materiais P e N e os portadores de cargas. No entanto, nos circuitos usamos uma representação simbólica, como indica a figura 08.

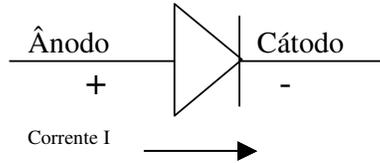


Figura 08 – Símbolo do diodo de junção

O símbolo usado quer dizer que o fluxo de corrente é do material P para o material N, ou seja, do anodo para o catodo e os sinais mais (+) e menos (-) indicam a polarização direta que produzirá tal corrente.

2.2. Diodo de Junção Ideal

Como diodo de junção ideal, se compreende um diodo que apresenta características especiais, conduzindo ou bloqueando completamente.

Condução no diodo ideal

Um diodo ideal, polarizado diretamente, deve conduzir a corrente elétrica sem apresentar resistência, comportando-se como um interruptor fechado, o qual equivale ao circuito do diodo ideal em condução.

Bloqueio do diodo ideal

Polarizando inversamente um diodo semiconductor, ideal, deve-se comportar como um isolante perfeito, impedindo completamente a circulação de corrente. A condição de bloqueio de um diodo também pode ser denominada de corte do diodo, por que o diodo corta a circulação de corrente; comportando-se como um interruptor aberto, o qual equivale ao circuito do diodo ideal em corte.

2.3. Diodo de Junção Real

O diodo de junção real apresenta algumas diferenças em relação ao diodo de junção ideal. Estas diferenças existem porque o processo de purificação dos cristais semicondutores para fabricação de componentes eletrônicos não é perfeito. Após a purificação ainda existe nos cristais uma pequena quantidade de impurezas originárias da formação do material na natureza. Estas impurezas, chamadas de portadores minoritários, resultantes da deficiência na purificação fazem com que as características de condução e bloqueio dos diodos reais se distanciem dos ideais.

Condução no diodo real

Dois fatores diferenciam o diodo real no sentido de condução:

- A barreira de potencial*
- A resistência interna*

A barreira de potencial, existente na junção dos cristais, faz com que o diodo entre em condução efetiva apenas a partir do momento em que a tensão da bateria externa atinge um valor maior que a tensão da barreira de potencial, veja na figura 09:

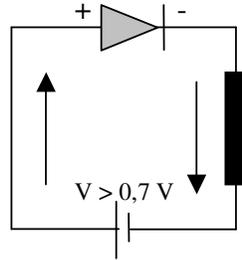


Figura 09 – Diodo Real

A resistência interna é devida ao fato de que o cristal dopado não é um condutor perfeito; esta, na condução, normalmente é menor que 1Ω , como na maioria dos casos em que o diodo é utilizado, as tensões e resistências externas do circuito são muito maiores que os valores internos do diodo ($0,7\text{v}$ e 1Ω), podemos normalmente considerar o diodo real igual ao ideal no sentido de condução, sem provocar um erro significativo.

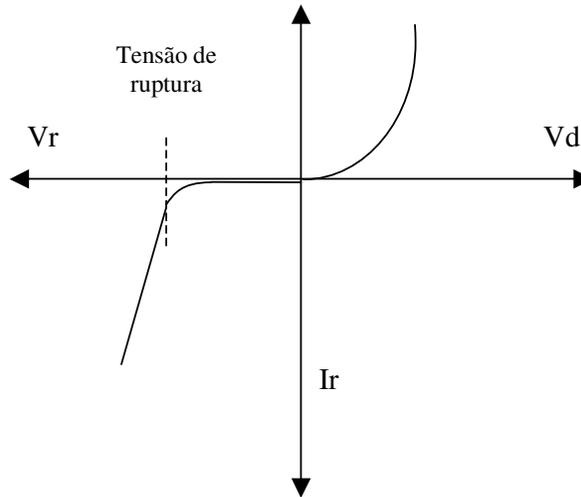
Bloqueio no diodo real

O diodo real polarizado inversamente, não é capaz de impedir completamente a existência de corrente no sentido inverso, fluindo uma pequena corrente inversa (que é desprezível), sendo esta denominada de **corrente de fuga**, é da ordem de alguns microampéres. Isto significa que no sentido inverso o diodo apresenta uma resistência elevadíssima (vários Mega Ohms).

Como a corrente de fuga é muito pequena comparada com a corrente de condução, a resistência inversa do diodo pode ser desprezada na análise da grande maioria dos circuitos, considerando-se o diodo como ideal.

2.4. Características e propriedades do diodo

A figura 10, representa a curva característica de um diodo, com polarização direta e reversa.



V_d = Tensão direta I_d = Corrente direta
 V_r = Tensão reversa I_r = Corrente reversa

Figura 10 - Curva característica do Diodo Real

A curva da figura 10 será a mesma para os elementos de germânio e silício. Como já se sabe, pode ser polarizado diretamente ou reversamente. Em polarização direta o germânio começa a conduzir com cerca de 0,3V, e o silício com cerca de 0,6V. Podemos notar pela curva (em polarização direta), que para pequenos valores de tensão V_d , quase não temos I_d , passando a existir corrente somente quando atingirmos as características de condução do germânio e do silício. Em polarização reversa, notamos que para pequenos valores de tensão a corrente I_r é aproximadamente constante. Se aumentarmos V_r até próximo da tensão de ruptura, notaremos que I_r quase não apresenta variações, sendo ainda de pequeno valor. Ao atingirmos a tensão de ruptura, ocorrerá o efeito avalanche (**Break Down**), que consiste no seguinte:

A tensão reversa aplicada à junção, aumenta a barreira de potencial, e conseqüentemente um elétron minoritário presente nesta região será acelerado devido ao campo elétrico. Com o aumento gradativo da tensão reversa, mais e mais elétrons são acelerados, dando origem a novos elétrons livres e a posteriores aumentos de corrente. Pois bem, elevando-se a corrente, mais portadores serão liberados, estabelecendo-se um ciclo que culminará com a ruptura do elemento semiconductor (Break Down).

2.5. Comportamento do diodo em AC

Considerando inicialmente o primeiro semiciclo da tensão alternada, de 0 a π . Neste intervalo, a tensão é positiva e o diodo fica polarizado diretamente, deixando passar uma corrente que tem a mesma forma de onda senoidal da

tensão aplicada, com exceção da parte inicial e final do semiciclo, que apresenta alguma distorção, devido ao fato de que a característica do diodo não é linear nesta região, (figura 11).

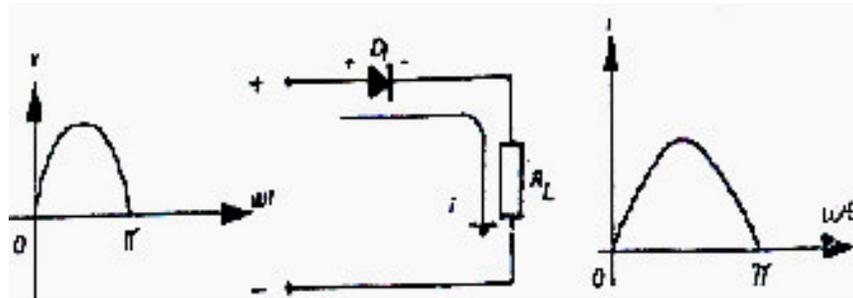


Figura 11

No semiciclo seguinte, de π a 2π , a tensão se torna negativa, e o diodo é polarizado inversamente; agora ele oferece uma resistência muito alta à passagem da corrente, circulando somente a corrente de fuga, que pode ser desprezada em comparação com a corrente direta, (figura 12).

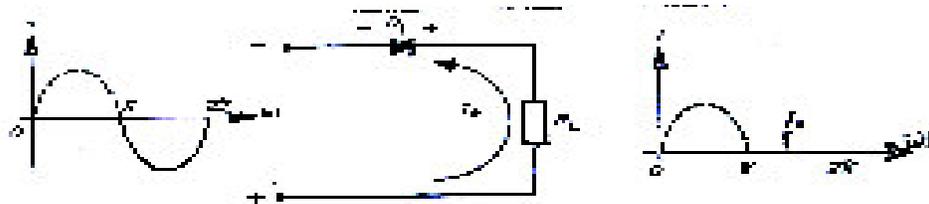


Fig. 12

Figura 12

2.6. Regime máximo do diodo em CC

Os regimes máximos do diodo em CC estabelecem os limites da tensão e corrente que podem ser aplicados ao componente em circuitos de corrente contínua, sem provocar danos a sua estrutura. Analisando o comportamento do diodo em condução e bloqueio verifica-se que os fatores que dependem diretamente do circuito ao qual o diodo está conectado são:

Corrente de condução (I_f)

Tensão reversa (V_r)

Pois a tensão de condução V_d não depende do circuito (0,7 V para o silício e 0,3 V para o germânio) e a corrente de fuga depende apenas do material do diodo (alguns microamperes).

Corrente máxima de condução:

A corrente de condução máxima de cada tipo de diodo é dada pelo fabricante em folhetos técnicos, nestes folhetos, a corrente máxima de condução aparece designada pela sigla I_f .

Tensão reversa máxima:

As tensões reversas colocam o diodo em bloqueio. Nesta condição toda a tensão aplicada ao circuito fica aplicada sobre o diodo. Cada diodo tem a estrutura preparada para suportar um determinado valor de tensão reversa. Aplicando um valor de tensão reversa superior ao especificado para cada diodo, a corrente de fuga aumenta excessivamente e o diodo é danificado. Os fabricantes de diodos fornecem em folhetos técnicos o valor característico de tensão máxima que o diodo suporta sem sofrer a ruptura. Este valor aparece designado pela sigla **Vr**.

Na tabela a seguir encontram-se as especificações básicas de alguns diodos retificadores (25° C).

Diodos	Corrente direta máxima (A)	Tensão de pico inversa (V)
IN 4606	0,2	70
BY 126	1,0	650
DY 127	1,0	1250
BYX 10	2,0	800
IN 4001	1,0	50
IN 4004	1,0	400
IN 4007	1,0	1000
IN 1615 R	5,0	600

2.7. Efeito da temperatura na característica

Uma junção PN sofre influência da temperatura. A temperatura máxima do elemento silício, está por volta de 150° C, enquanto que a do germânio acha-se por volta de 100° C. para cada aumento de 1° C na temperatura, teremos em decorrência, uma queda na tensão direta, cerca de 2,5 mV / ° C.

2.8. Resistência do diodo

Resistência estática

A partir da característica direta do diodo podemos observar que não é um elemento ôhmico e sua resistência é em função do ponto de operação. A resistência estática é também denominada **resistência contínua** e é significativa para circuitos com pontos de operação fixos.

Resistência dinâmica

A resistência dinâmica é determinada a partir das variações em torno do ponto quiescente, ambas as resistências dependem do ponto de trabalho, porém, convém lembrar que a resistência dinâmica tem interesse para regiões de pequenas variações de tensão e corrente, e não em toda a característica do diodo.

A resistência que um diodo oferece em polarização direta é denominada **resistência direta** e é extremamente baixa; da ordem de algumas dezenas de ohms, e a resistência reversa apresenta valores da ordem de algumas dezenas de milhões de ohms.

2.9. Tempo de chaveamento do diodo

Quando o diodo passa da condição reversa para a condição direta ou vice versa, há a passagem por um transitório, decorrendo certo intervalo de tempo antes que o diodo volte ao regime estacionário. O tempo de recuperação direta t_{fr} é a diferença de tempos entre o ponto que corresponde a 10% do valor final da tensão do diodo e o ponto que corresponde a 10% do valor final da tensão; na maioria das aplicações, o t_{fr} não constitui na prática um problema sério e, assim, consideramos apenas a mais importante situação, que é a **recuperação reversa**.

Tempo de recuperação reversa do diodo:

Quando uma tensão externa polariza diretamente uma junção PN, a densidade de portadores minoritários em regime permanente é muito grande; estes, em cada caso, foram fornecidos pelo outro lado da junção, onde, sendo majoritários, são fornecidos abundantemente. Se a tensão externa é repentinamente alterada (invertida) de direta para reversa em um circuito cujo diodo é atravessado por uma corrente direta, a nova corrente (reversa) do diodo não cairá imediatamente para seu valor de regime permanente, pois a corrente não pode atingir seu valor de regime enquanto a distribuição de portadores minoritários não tornar a densidade de portadores minoritários injetados ou em excesso quase nula. Durante este intervalo de tempo o diodo continuará conduzindo facilmente, e a corrente será determinada pela resistência externa no circuito do diodo.

2.10. Classificação dos diodos

Diodo Zener

Diodos projetados com capacidades adequadas de dissipação de potência para operar na região de ruptura podem ser empregados como **dispositivos de tensão constante, tensão de referência ou de avalanche**.

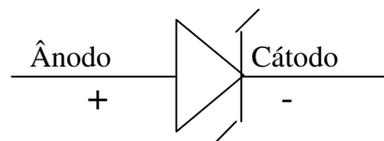


Figura 13 – Simbologia do Diodo Zener

Os diodos zener são usados da seguinte forma: a fonte **V** e o resistor **R** são selecionados de maneira que, inicialmente, o diodo esteja operando na região de ruptura. A tensão sobre o diodo, que é também a tensão na carga **R1**, é igual a **Vz**, e a corrente do diodo é denominada **Iz**. O diodo irá regular, agora, a tensão na carga contra as variações de corrente (na carga) e também contra as variações de tensão na fonte de alimentação, pois na região de ruptura, grandes variações na corrente do diodo produzem pequenas variações na tensão (do diodo); além disso, como existem mudanças na corrente de carga ou na tensão de alimentação, a corrente do diodo “se acomodará” a estas mudanças para manter a tensão na carga **aproximadamente constante**.

Como os diodos zener são empregados para tensões superiores a 2V; abaixo desta tensão é comum o uso de diodos polarizados diretamente para serem usados como reguladores de tensão, e como referência; pois a característica volt-ampère de um diodo polarizado diretamente é igual à característica reversa, exceto que, para a característica direta, o joelho ocorre para uma tensão mais baixa. Para alcançar tensões maiores, colocamos vários diodos em série. Tal conjunto de diodos, encapsulados como um único dispositivo, é encontrado com tensões de até 5V, sendo às vezes preferidos aos diodos zener polarizados reversamente, que em baixas tensões tem valores muito altos de resistência dinâmica.

As características elétricas do diodo zener são:

- Tensão Zener
- Potência Zener
- Coeficiente de temperatura
- Tolerância

- *Tensão Zener*: a tensão zener (tensão de ruptura) dos diodos zener depende do processo de fabricação e da resistividade da junção semicondutora. Os diodos zener são fabricados para valores de tensão zener da ordem de 2V até algumas dezenas de volts.

- *Potência Zener*: o diodo zener funciona na região de ruptura, apresentando um valor determinado de tensão sobre seus terminais (**Vz**), sendo percorrido por uma corrente inversa. Nestas condições verifica-se que o componente dissipa potência em forma de calor. A potência é dada pelo produto de tensão e corrente:

$$\begin{array}{l} P = V \cdot I \longrightarrow \text{POTÊNCIA} \\ P_z = V_z \cdot I_z \longrightarrow \text{POTÊNCIA ZENER} \end{array}$$

O valor da potência determina a dissipação máxima que o componente pode suportar, o que possui uma relação direta como a região de funcionamento do zener, a qual é definida por dois valores de corrente, uma vez que sua tensão inversa é constante; sendo estas:

- **Iz** máximo
- **Iz** mínimo

O valor de **Iz** máximo é definido pela potência zener:

$$I_z \text{ máx} = \frac{P_z}{V_z}$$

O valor de **Iz** mínimo é definido como 10% do valor de **Iz** máximo.

- *Tolerância*: a tolerância do diodo zener informa a variação que pode existir entre o **valor especificado** e o valor real da tensão reversa do diodo zener. Isto significa que um diodo zener de 12V pode ter uma tensão reversa real, por exemplo, de 11,5V.

Diodo Túnel

O diodo túnel apresenta características bem diferentes do diodo semiconductor comum dentro de uma determinada região, cuja principal peculiaridade é apresentar uma região de resistência negativa, isto é, a corrente pelo diodo diminui, enquanto a queda de potencial entre seus terminais aumenta. A curva característica apresentada no gráfico da figura 14, ilustra tal situação.

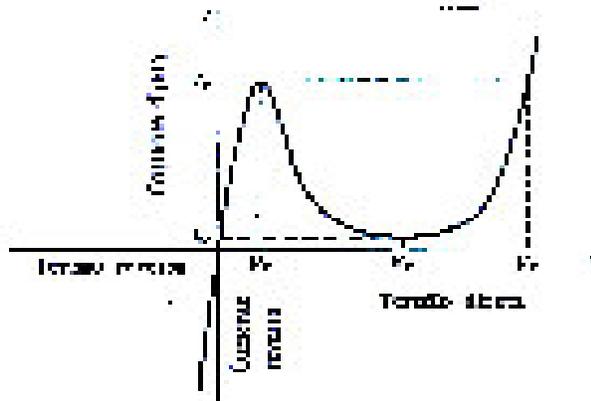


Figura 14 - Característica volt-ampère de um diodo túnel

Normalmente este diodo é aplicado em: osciladores, detectores, etc

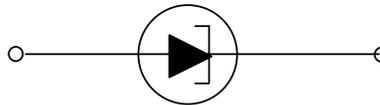


Figura 15 - Simbologia do Diodo Túnel

Varicap

Os varicaps são diodos semicondutores especiais que substituem os capacitadores variáveis, em circuitos de alta frequência. Nestes diodos aproveitam-se as características da capacidade da junção PN quando polarizada reversamente, pois um aumento da tensão reversa aplicada ao diodo, faz com que haja um aumento da largura da barreira de potencial e conseqüentemente uma diminuição da capacidade da junção. Este tipo de diodo é indicado para moduladores de FM, sintonizadores de FM, controle de frequência, etc.

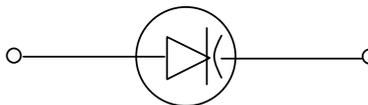


Figura 16 – Símbolo do varicap

Diodo emissor de luz - LED

O diodo do tipo LED é um diodo semiconductor que apresenta emissão de luz regida pelo fenômeno da eletroluminescência. Assim como é necessário fornecer energia para gerar o par elétron-lacuna, da mesma maneira a energia é liberada

quando um elétron se recombina com uma lacuna. Esta energia liberada é transferida para o cristal sob forma de calor. Em outros semicondutores tais como o arseneto de gálio, há uma quantidade considerável de recombinação direta. Nestas circunstâncias a energia liberada pelo elétron, ao cair da banda de condução para a banda de valência, aparece em forma de radiação. Um diodo que funcione nestas condições é chamado de **Diodo Emissor de Luz (LED)**, embora a maior parte da radiação emitida esteja na faixa do infravermelho. A eficiência do processo de geração de luz aumenta com a corrente injetada e com a diminuição da temperatura. A luz está concentrada perto da junção devido ao fato de que a maior parte dos portadores se recombinam nas vizinhanças da mesma. O diodo emissor de luz, identificado comumente como diodo LED é representado pelo símbolo apresentado na figura 17.

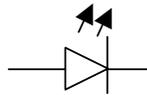


Figura 17 – Símbolo do LED

Os diodos LED são encontrados com as mais diversas formas e dimensões, conforme mostra a figura 18.

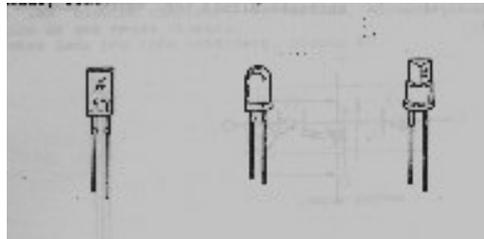


Figura 18 – Tipos mais comuns de Diodo

O catodo de um diodo LED, de formato redondo, pode ser identificado por um “corte” na base do encapsulamento. (figura 19)

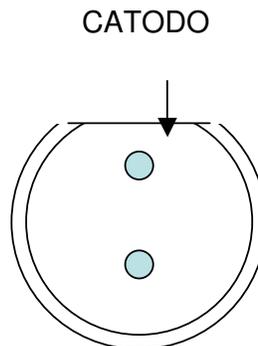


Figura 19 - Corte no lado do Catodo (Vista de baixo)

Características do diodo LED

- *Corrente direta nominal (I_f):* É um valor de corrente de condução indicado pelo fabricante no qual o LED apresenta um rendimento luminoso ótimo (normalmente 20mA).

- *Tensão direta nominal (Vf)*: Especificação que define a queda da tensão típica do diodo no sentido de condução. A queda de tensão nominal (Vf) ocorre no componente quando a corrente direta tem valor nominal (If).

- *Tensão reversa máxima (Vr)*: Especificação que determina o valor máximo de tensão, que o LED suporta, no sentido inverso sem sofrer ruptura. A tensão inversa máxima dos LED's é pequena, da ordem de 5V.

A tabela abaixo apresenta as características de alguns diodos LED.

LED	COR	Vf a If = 20 mA	If máx.
LD 30C	Vermelho	1,6V	100mA
LD 37I	Verde	2,4V	60mA
LD 31I	amarelo	2,4V	60mA

LED bicolor

O LED bicolor consiste, na verdade, de dois LED's colocados dentro de uma mesma cápsula.

Estes LED's têm três terminais. (figura 20)

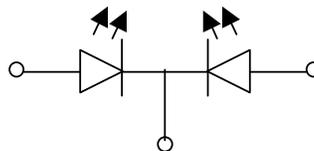


Figura 20 - LED bicolor

LED infra-vermelho

A luz infra-vermelha é um tipo de irradiação que não é visível ao olho humano, este tipo de luz é usado principalmente em alarmes, controle remoto, etc. Assim os LED's que emitem esta luz, funcionam como os outros, porém não se pode observar visualmente se estão ligados ou não.

Fotodiodo

O fotodiodo é um diodo semicondutor com junção PN cuja característica é operar na polarização inversa da junção. Na polarização inversa a corrente é praticamente nula, porém, se o cristal for devidamente dopado, o número de portadores aumenta tremendamente sob luz incidente, pois esta fornece energia sob forma de fótons. E este é o princípio básico do funcionamento de um fotodiodo.

A aplicação do fotodiodo se verifica em leitura de cartões, circuitos digitais, acopladores ópticos, etc.

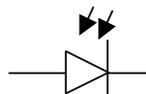


Figura 21 - Símbolo do fotodiodo

3. Retificadores

3.1. Retificadores de 1/2 onda

A retificação de meia onda é um processo de transformação de CA em CC, que permite o aproveitamento de apenas um semiciclo da tensão de entrada, na carga, (figura 22).

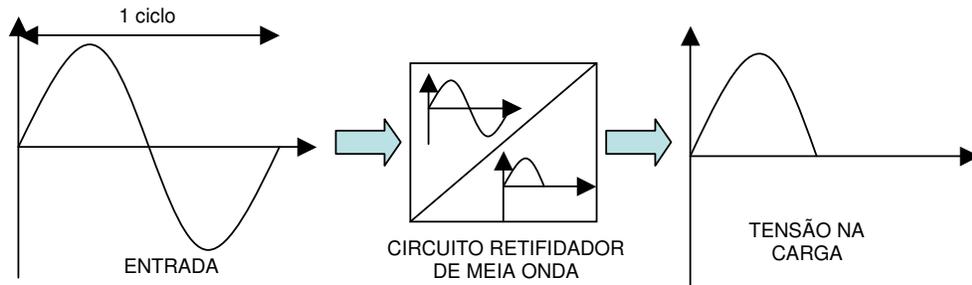


Figura 22 - Entrada e Saída na retificação de 1/2 onda

Funcionamento

Primeiro semiciclo

Durante o primeiro semiciclo a tensão é positiva no ponto A, com relação ao ponto B. esta polaridade de tensão de entrada coloca o diodo em condução, permitindo a circulação de corrente. (figura 23)

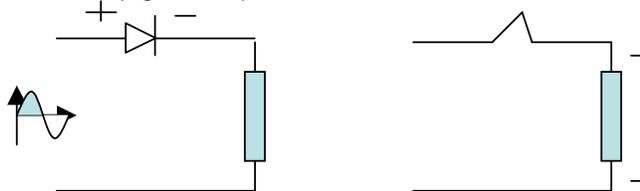


Figura 23

A tensão sobre a carga assume a mesma forma da tensão de entrada, (figura 24).

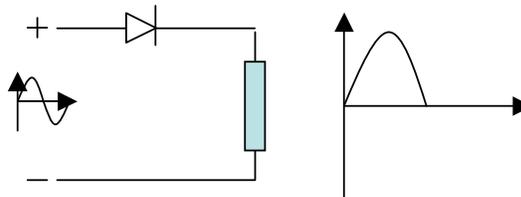


Figura 24

O valor de pico de tensão sobre a carga é menor que o valor do pico de tensão da entrada, porque o diodo, durante a condução, apresenta uma pequena queda de tensão V_d (0,7 para o silício e 0,3V para o germânio). Entretanto, na maioria dos casos, a queda de tensão sobre o diodo pode ser desprezada porque o seu valor é muito pequeno em relação ao valor total do pico de tensão sobre a carga.

Segundo semiciclo

Durante o segundo semiciclo, a tensão de entrada é negativa no ponto A, com relação ao ponto B, esta polaridade de tensão de entrada coloca o diodo em bloqueio, logo não há corrente, (figura. 25).

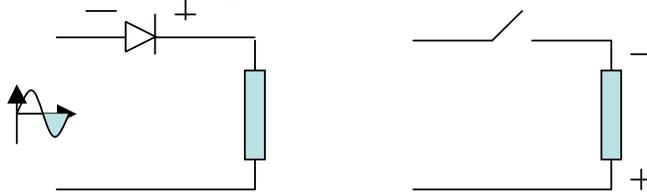


Figura 25

Nesta condição toda a tensão de entrada é aplicada sobre o diodo, que atua como interruptor aberto, e a tensão na carga é nula porque não há circulação de corrente, (figura 26).

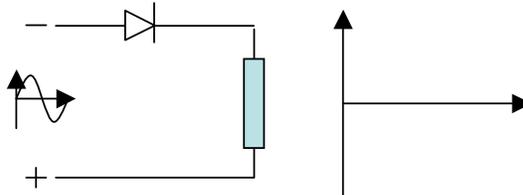


Figura 26

Observa-se que para cada ciclo completo da tensão de entrada, apenas um semiciclo passa para a carga, enquanto o outro semiciclo fica sobre o diodo. Os gráficos da figura 27 ilustram o que foi descrito.

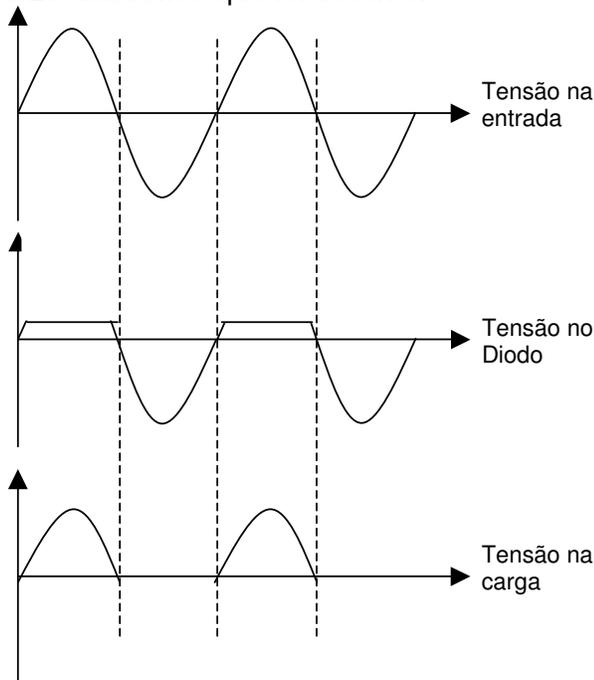


Figura 27 - Tensão de entrada x diodo x saída

Retificação de meia onda com tensão de saída negativa

Dependendo da forma como o diodo está colocado no circuito retificador, pode-se obter uma tensão CC positiva ou negativa em relação ao terra.

Tensão e corrente CC de saída da retificação de meia onda.

Tensão de saída

A tensão na carga, apesar de ser contínua, não é constante, recebendo o nome de contínua pulsante. O valor médio DC de um sinal alternado senoidal é nulo, assim se conectarmos um voltímetro DC para medir um sinal senoidal, a leitura indicada pelo aparelho será zero. Se medirmos, com um medidor DC, o sinal da figura 26, que é um sinal retificado de meia onda, pulsante e senoidal, o medidor fornecerá o valor DC do sinal também denominado valor contínuo.

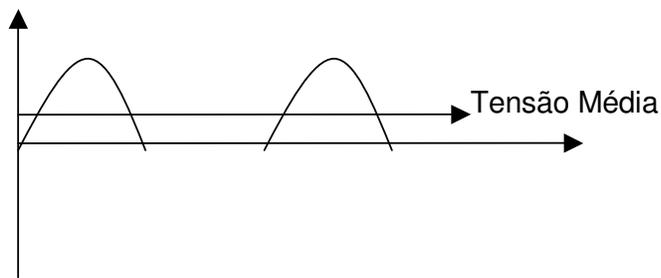


Figura 28 – Tensão de saída e tensão média

O valor DC é dado pela relação abaixo:

$$V_{dc} = 1 / \pi \times (E_m)$$

Esta relação representa a área sob a curva, dividida pelo período da onda retificada.

É importante notar que num circuito retificador de meia onda, quando o diodo for polarizado reversamente, aparece uma tensão em seus terminais denominada **tensão de pico reversa**. E de acordo com a aplicação da Segunda Lei de Kirchhoff, em um retificador de ½ onda, determinamos que o valor da tensão de pico é o valor máximo da tensão alternada aplicada.

Corrente de saída

Na retificação de meia onda a corrente de saída também é pulsante, uma vez que a tensão sobre a carga é pulsante, isto implica que a corrente média na saída (sobre a carga) é uma média entre os períodos de existência e inexistência de corrente, (figura 28.1).

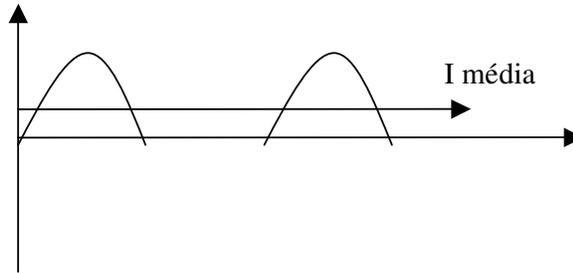


Figura 28.1 – Corrente média de saída

Inconvenientes da retificação de meia onda:

A retificação de meia onda apresenta alguns inconvenientes, decorrentes da sua condição de funcionamento.

- O rendimento é baixo (45%) em relação à tensão eficaz de entrada
- Nas retificações com transformador existe um mau aproveitamento da capacidade de transformação porque a corrente circula em apenas um semiciclo

3.2. Retificação de onda completa

É um processo de conversão de corrente alternada em corrente contínua que faz o aproveitamento dos dois semiciclos da tensão de entrada, (figura 29).

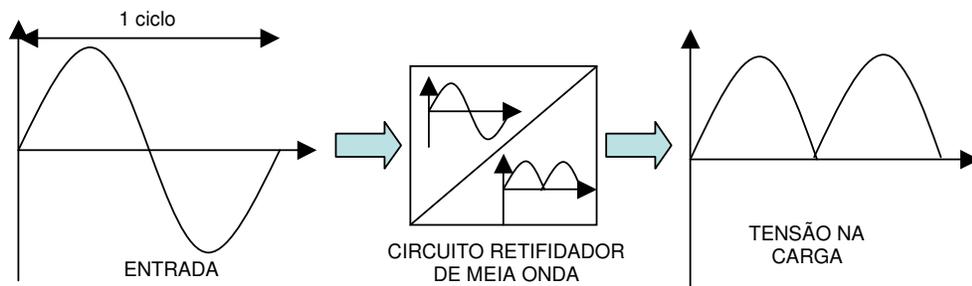


Figura 29 – Corrente média de saída

O circuito retificador de onda completa é o mais empregado nos equipamentos eletrônicos porque realiza um melhor aproveitamento da energia aplicada na entrada. Esta retificação pode ser realizada de duas maneiras distintas:

- Empregando um transformador com derivação central e dois diodos.
- Empregando quatro diodos ligados em ponte.

Retificação de onda completa com dois diodos.

A retificação de onda completa com derivação central, é a denominação técnica do circuito retificador de onda completa que emprega dois diodos com um

transformador com derivação central. A figura 31 apresenta a configuração deste tipo de circuito retificador.

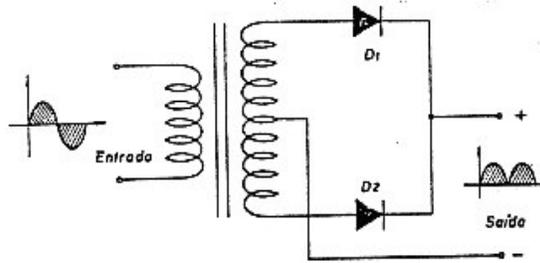


Figura 30 – Retificador de onda completa com 2 diodos

Este tipo de retificação também é chamado de retificação de onda completa **CENTER TAPE**, a expressão significa **DERIVAÇÃO CENTRAL**.

Funcionamento

O princípio de funcionamento do circuito retificador de onda completa pode ser facilmente compreendido, considerando-se cada um dos semiciclos da tensão de entrada isoladamente, conforme mostra a figura 31.

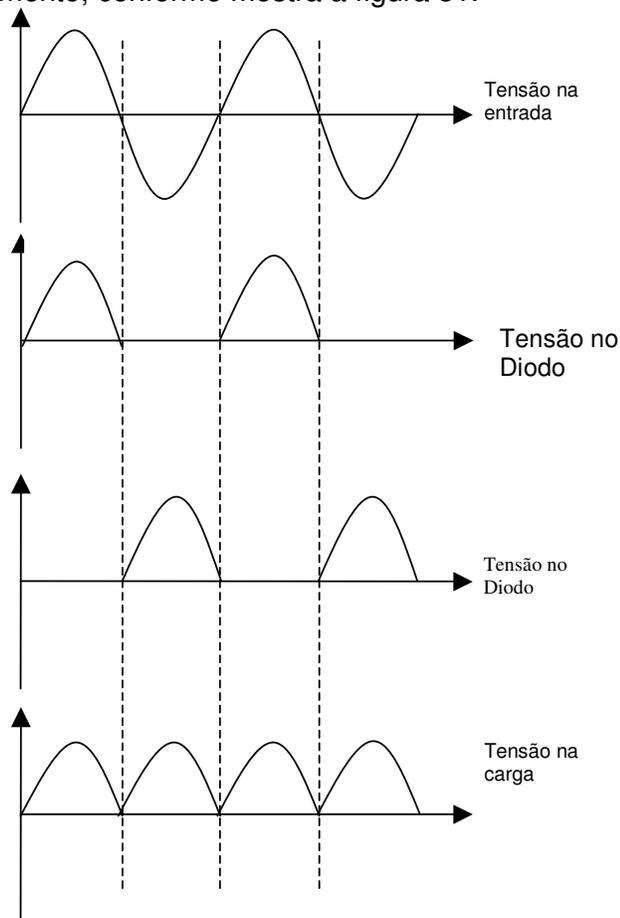


Figura 31

Para tensões de entrada acima de 10Vca pode-se considerar a queda de tensão no diodo, desenvolvendo a equação como:

$$V_{cc} = \left(\frac{E_m - V_d}{\pi} \right) \text{ desconsiderando } V_d \text{ têm-se:}$$

$$V_{cc} = 2 \cdot \frac{E_m}{\pi} \text{ como } E_m = V_{ca} \cdot \sqrt{2}$$

$$V_{cc} = 2 \cdot \frac{V_{ca} \cdot \sqrt{\pi}}{\pi} \text{ simplificando: } \sqrt{\pi} / \pi \text{ têm-se:}$$

$$V_{cc} = 2 \cdot V_{ca} \cdot 0,45$$

Corrente de saída

A corrente média na saída da retificação de onda completa depende da tensão média:

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

Relação entre frequência de entrada e frequência de saída:

Na retificação de onda completa cada ciclo da tensão CA de entrada é transformado em dois semiciclos de tensão sobre a carga. Desta forma, a frequência dos picos de tensão sobre a carga é o dobro da frequência da rede, (figura 32).

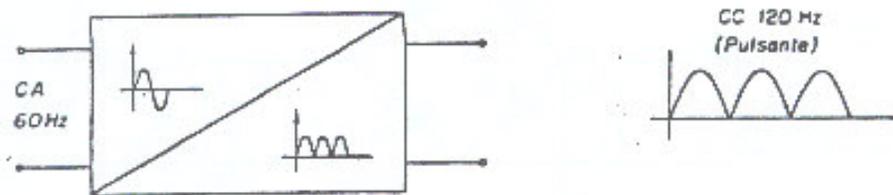


Figura 32

3.3 Retificador em ponte:

A retificação em ponte com quatro diodos entrega à carga uma onda completa sem que seja necessário utilizar um transformador com derivação central. A figura 33 apresenta a configuração da retificação de onda completa em ponte.

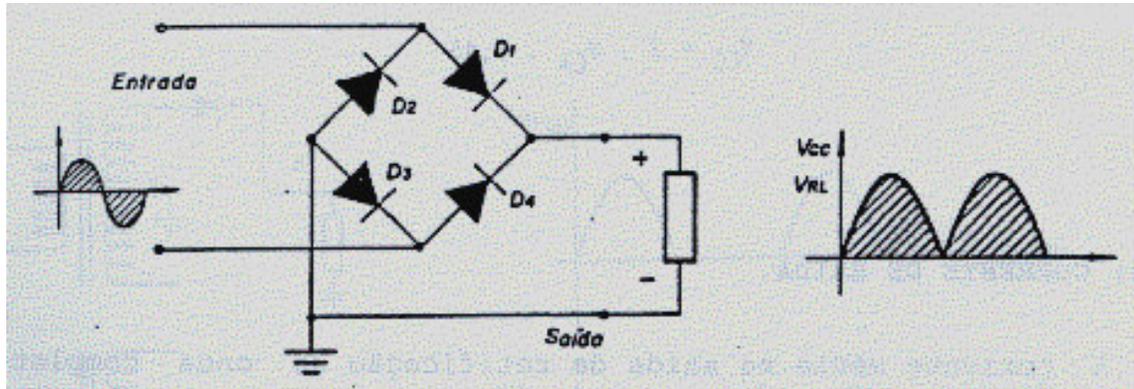


Figura 33

Funcionamento

Primeiro Semiciclo

Considerando a tensão positiva no terminal de entrada superior, teremos:

Diodo 1 – anodo positivo em relação ao catodo = CONDUÇÃO

Diodo 2 – catodo positivo em relação ao anodo = BLOQUEIO

Diodo 3 – catodo negativo em relação ao anodo = CONDUÇÃO

Diodo 4 – anodo negativo em relação ao catodo = BLOQUEIO

Segundo Semiciclo

No segundo semiciclo ocorre a intervenção da polaridade nos terminais de entrada do circuito, onde teremos:

Diodo 1 = anodo negativo em relação ao catodo – BLOQUEIO

Diodo 2 = catodo negativo em relação ao anodo – CONDUÇÃO

Diodo 3 = catodo positivo em relação ao anodo – BLOQUEIO

Diodo 4 = anodo positivo em relação ao catodo – CONDUÇÃO

A ponte retificadora entrega à carga, os dois semiciclos, da mesma forma que a retificação de ponto central, com uma freqüência da CC pulsante igual ao dobro da freqüência da rede.

A ponte retificadora também pode ser representada em esquema conforme mostra a figura 34

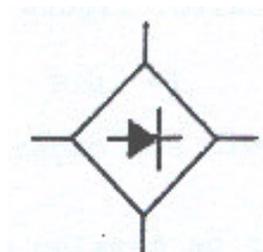


Figura 34

Tensão e corrente CC de saída da retificação em ponte

Tensão de Saída

A ponte retificadora fornece na saída o mesmo tipo de forma de onda que a retificação com derivação central, contudo, há uma diferença em termos de tensão de pico sobre a carga, devido ao fato de que na ponte retificadora em cada semiciclo existem dois diodos em série, o que implica que o pico de tensão sobre a carga é 1,4V menor que o pico de tensão na entrada (para diodos de Si), (figura 35).

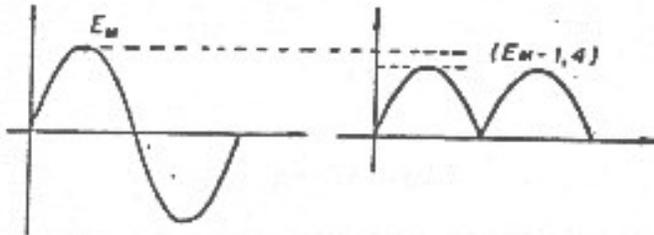


Figura 35

Para tensões acima de 20 Vca na entrada da ponte pode-se desconsiderar as quedas de tensão nos diodos (2Vd) de forma que o desenvolvimento da equação resulta em:

Tensão CC média na saída	⇒	$V_{cc} = \frac{2 \times E_m - 2V_d}{\pi}$
-----------------------------	---	--

Para uma mesma tensão de saída, a retificação em ponte usa apenas uma tensão no secundário, enquanto que a retificação com derivação central, necessita de duas tensões, com o terminal central comum. As figuras 36 e 37 mostram claramente o que foi descrito:

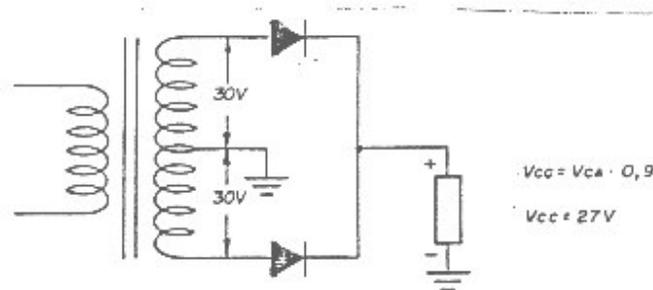


Figura 36

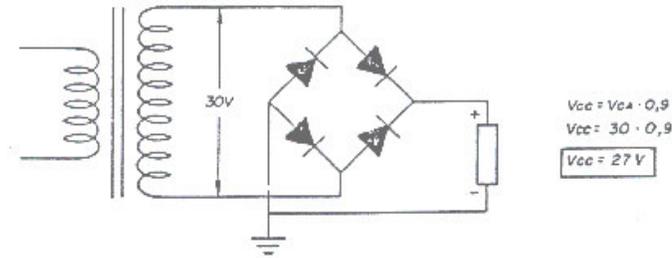


Figura 37

Conseqüentemente o transformador é melhor aproveitado nas retificações em ponte porque o secundário trabalha integralmente nos dois semiciclos.

Corrente de saída

A Corrente de saída é dada pela mesma equação utilizada na retificação de ponto médio:

$$I_{DC} = \frac{V_{dc}}{R_L \text{ (carga)}}$$

3.4 Filtros

Uma tensão alternada, após ser retificada, reduz-se a uma tensão contínua pulsativa, ou seja, ainda guarda em si as alternâncias da CA. Contudo, a corrente contínua CC que desejamos não pode conter oscilações, e para evitá-las usamos um circuito de filtro, (figura 38).

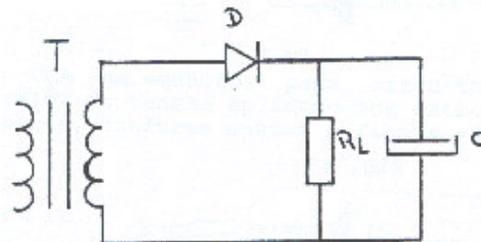


Figura 38 – Circuito retificador de 1/2 onda com filtro

A filtragem é freqüentemente realizada colocando-se um capacitor ligado em paralelo com a carga. Este sistema baseia-se no fato de que o capacitor armazena durante o período de condução do diodo, e fornece esta mesma energia para a carga durante o período em que o diodo está cortado. Desse modo, o tempo durante o qual a corrente passa pela carga R_L , é prolongado e a ondulação é consideravelmente menor. A tensão de ondulação é definida a partir do seu valor médio ou CC.

Filtro capacitivo

Tanto o retificador de meia onda quanto o de onda completa, apresentam como resultados, correntes contínuas, porém pulsantes, como mostra a figura 39.

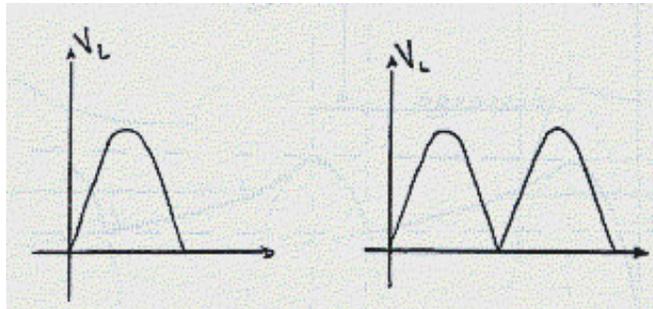


Figura 39 - Saída de um retificador sem filtro

Se conectarmos um capacitor em paralelo com a carga, como mostra a figura 40, observaremos uma diminuição na variação (ou na ondulação) da tensão de saída.

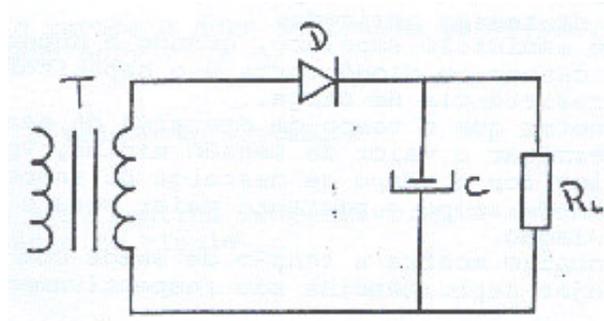


Figura 40

A tensão de saída com o capacitor é mostrada na figura 41.

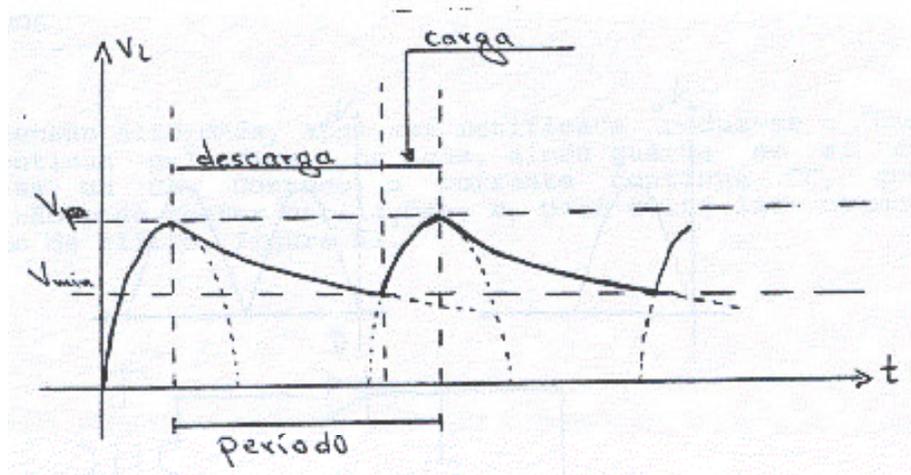


Figura 41

Durante o meio ciclo em que o anodo for positivo em relação ao catodo, do diodo, o diodo conduz e o capacitor C se carrega simultaneamente com o valor da tensão aplicada.

Durante o semiciclo seguinte, quando o anodo for negativo em relação ao catodo, o diodo corta e o capacitor C descarrega-se através da resistência de carga.

É fácil notar que o tempo de descarga da associação RL x C é que vai determinar o valor da tensão mínima, V_{pmin} .

Quanto maior for o tempo de descarga da associação maior será a constante de tempo e, portanto, maior será o valor mínimo e menor a ondulação. A figura 42, mostra a tensão de saída com três capacitores de filtro cujas capacitâncias são respectivamente $C1 < C2 < C3$.

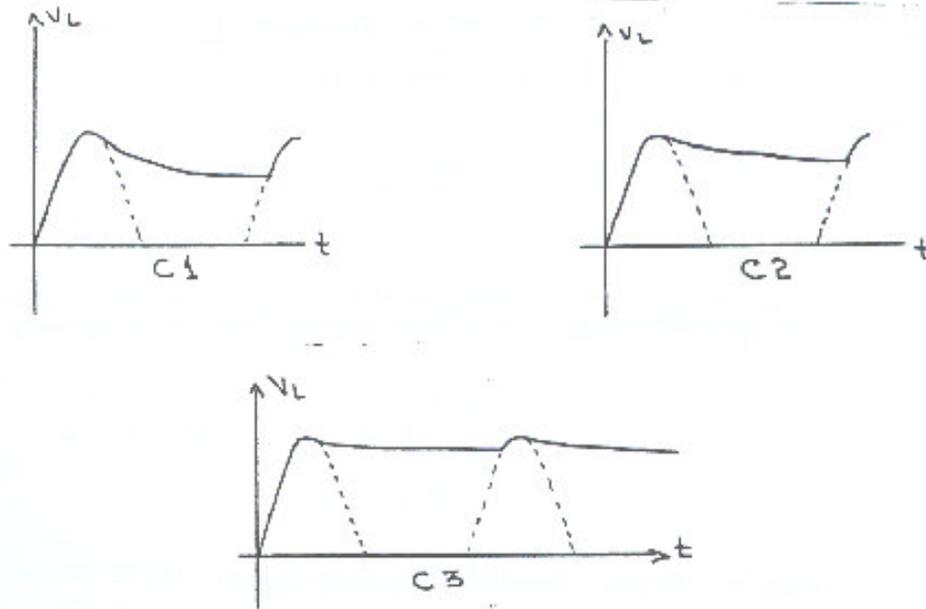


Figura 42

Essa ondulação recebe o nome de **tensão de ripple**, e seu valor pico a pico é dado por:

$$V_{rpp} = V_p - V_{pmin}$$

As figuras 43 e 44 mostram respectivamente a tensão de saída na carga e a tensão de ripple.

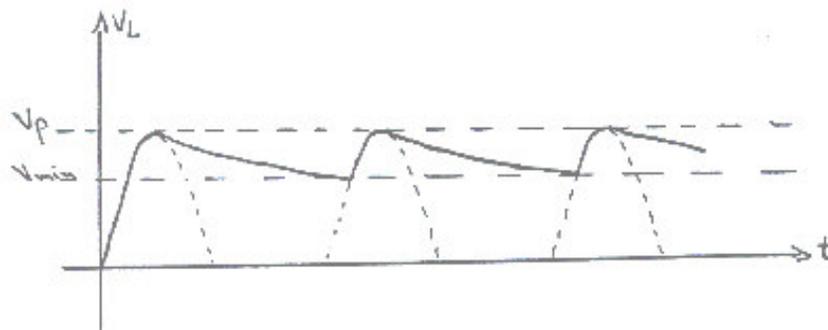


Figura 43

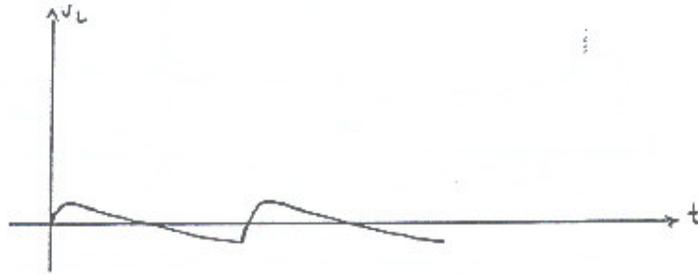


Figura 44

Ripple: fator, tensão e percentagem

Para uma melhor compreensão do equacionamento do fenômeno e para uma melhor visualização do circuito, analisaremos a forma de onda da figura 45, que se aproxima em muito, da tensão de saída de um circuito com filtro.

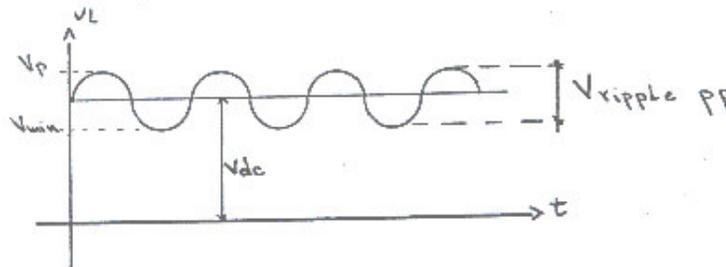


Figura 45

Essa figura mostra um sinal contínuo e constante V_{dc} , somado a uma senoide.

Medindo esta tensão com o voltímetro DC, obteríamos o valor médio ou contínuo, isto é, V_{dc} ; se medirmos essa mesma tensão com um voltímetro AC, mediríamos somente o valor eficaz da senoide, que é a ondulação indesejável.

Por definição a expressão matemática do fator de ripple é:	E a percentagem de ripple é dada pela relação:
$r = \frac{\text{tensão eficaz de ripple}}{\text{tensão contínua}}$ $r = \frac{V_r \text{ eficaz}}{V_{dc}}$	$\% r = 100 \cdot r$ $\% r = 100 \cdot \frac{V_{ref}}{V_{dc}}$

Capacitor de filtro em onda completa:

Do mesmo modo que no circuito de meia onda, o capacitor de filtro vai ligado em paralelo com a carga. A figura 46 mostra a tensão num circuito retificador de onda completa sem conectarmos o capacitor de filtro, e a figura 47 mostra a forma de onda que resulta após conectarmos o capacitor de filtro. Deve-se notar que o sinal filtrado apresenta um nível DC e um sinal de ripple em cima.

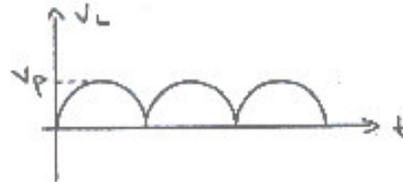
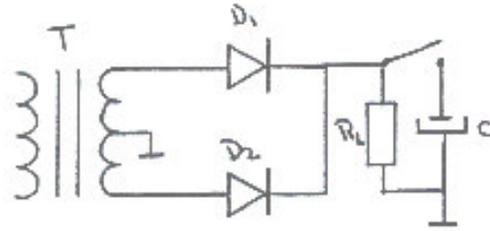


Figura 46

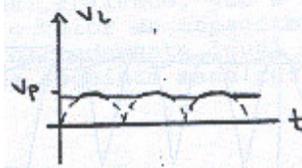
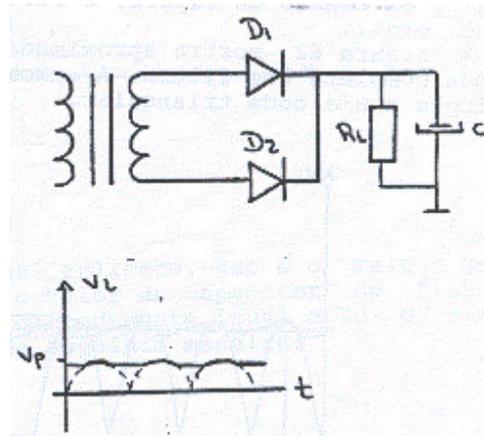


Figura 47

Analisando a figura 48, que mostra um retificador de onda completa com filtro e sua forma de onda, podemos destacar dois tempos particulares.

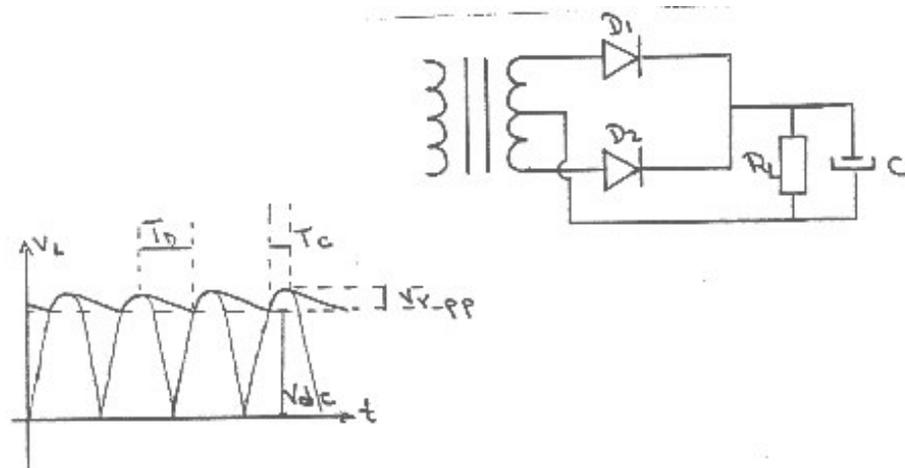


Figura 48

O intervalo T_c é o intervalo de tempo em que o capacitor se carrega e o intervalo de tempo T_d é o intervalo de tempo em que o capacitor se descarrega através da resistência de carga, onde o valor do capacitor e o valor da resistência de carga, influenciam no intervalo de tempo T_d da descarga, e obviamente no valor da tensão de ripple, no fator de ripple, no valor contínuo V_{dc} , etc...

O valor contínuo ou V_{dc} é dado por:	É o valor eficaz da tensão de ripple é dado por:
$V_{dc} = V_p - 1/2 V_{rpp} \quad (1)$	$V_{ref} = \frac{V_{rp}}{2} = 1/2 \frac{V_{rpp}}{2} \quad (2)$

4. Transistor Bipolar de Junção (TBJ)

Após o estudo do diodo de junção, que é o componente essencial de dois terminais, vamos agora começar a abordar dispositivos semicondutores de três terminais. Eles são muito mais utilizados e de funções mais complexas, que vão desde amplificação de sinais até a lógica digital. O nome transistor bipolar reflete o fato de que o fluxo de corrente nestes elementos ser direcional, ou seja, uma parte é formada por elétrons e outra por lacunas.

Outro fato curioso está no nome: o prefixo TRANS vem da palavra inglesa TRANSFER e o sufixo SISTOR de RESISTOR. Combinando ambas, temos algo semelhante a resistor de transferência. À medida que nos aprofundamos no estudo do dispositivo mostraremos esta característica fundamental.

Enfim, o transistor de junção (que fora desenvolvido no início da década de 50) revolucionou a tecnologia até alcançar o estágio atual. Para se ter uma idéia do significado da invenção do transistor, historiadores da ciência referem-se à nossa época como a Era do Transistor!

Estrutura física

A figura 49, mostra duas estruturas cristalinas: uma NPN e outra PNP. Visualmente percebem-se três regiões: emissor, base e coletor. O emissor é dopado fortemente, pois, dele partem os elétrons para a outra região, a base. Na base, que é fina e fracamente dopada, a maioria dos elétrons injetados pelo emissor passa para o coletor. O coletor é a maior das três regiões, pois nele é gerada uma quantidade de calor maior, e é assim designado pelo fato dos elétrons da base convergirem para lá (diz-se que o coletor junta os elétrons da base). O nível de dopagem do coletor é intermediário, está entre o da base e o do emissor.

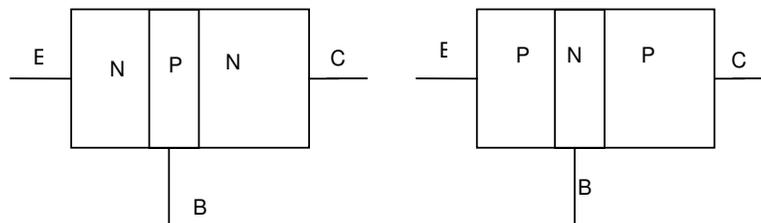


Figura 49 - Estruturas físicas

Modos de operação – polarização

Fazemos a abordagem dos transistores de silício pelos mesmos motivos que nos levaram a fazer tal escolha para o diodo, objeto de nossos estudos anteriores. Tais motivos eram as especificações de tensão/corrente mais altas e a menor sensibilidade à temperatura. Lembre-se, também, que a 25°C a barreira de potencial era aproximadamente 0,7V. Na figura 50 temos a ilustração da estrutura cristalina NPN com as regiões sombreadas. Estudaremos a estrutura PNP mais adiante.

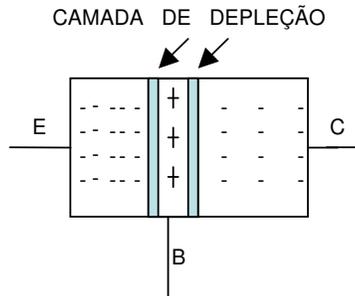


Figura 50

Observe, nas figuras anteriores, que existem duas junções nas estruturas cristalinas: uma entre base-coletor e outra entre base-emissor. O diodo situado entre a base-emissor é denominado diodo emissor e o outro, entre base-coletor, diodo coletor. Como são dois diodos, temos quatro hipóteses para polarização simultânea de todos eles. Veja o quadro a seguir:

Denominação do modo de polarização	Diodo emissor	Diodo coletor
Corte	Reverso	Reverso
Não se aplica	Reverso	Direto
Ativo	Direto	Reverso
Saturação	Direto	Direto

Os modos de corte e saturação são aqueles em que o transistor é usado para operar como chave eletrônica em circuitos lógicos (por exemplo, em computadores). No modo ativo, o transistor opera como fonte de corrente e é capaz de amplificar sinais. Vejamos, adiante, a descrição da operação em cada um dos modos.

Modo ativo do transistor NPN – polarização direta-reversa – Esta situação está ilustrada na figura 51, duas fontes de tensão externas são usadas para estabelecer as condições de operação. A tensão V_{be} faz com que a base tipo P esteja em um potencial mais alto do que o emissor tipo N; portanto, se a d.d.p. entre as duas regiões for aproximadamente 0,7V, este diodo está diretamente polarizado. A tensão na junção base-coletor V_{cb} faz com que o coletor tipo N esteja em um potencial mais alto do que a base tipo P; portanto, este diodo está reversamente polarizado.

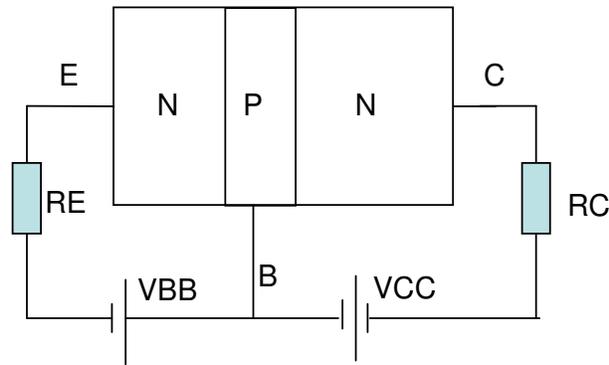


Figura 51

Relação entre as correntes I_b , I_c e I_e

Você já tem conhecimento sobre a ordem de grandeza entre as correntes que circulam no transistor polarizado direta e reversamente. Esta relação depende do nível de dopagem entre as regiões constituintes do transistor. Como foi mencionado, a base, o coletor e o emissor são fraca, média e intensamente dopados, respectivamente. Na prática, os transistores modernos de baixa potência têm corrente de coletor, que são cerca de 99% da corrente de emissor. Portanto, resta à base 1%.

Dados estes percentuais, é razoável admitir e relacioná-las por meio de números adimensionais denominados α e β . A relação α mede quão próxima a corrente de coletor I_c está de I_e , ou seja, é o quociente entre elas. β é a razão entre I_c e I_b , e basicamente nos permite dizer o quanto os portadores majoritários do emissor (os elétrons) fluem pelo coletor e qual a taxa se recombina na base. Matematicamente, temos:

$$\alpha = \frac{I_c}{I_e} \text{ e } \beta = \frac{I_c}{I_b}$$

Obs.:

É freqüente o uso de h_{fe} (índices maiúsculos) para representar o β envolvendo I_c e I_b contínuos. Muitos se referem a ele como β_{cc} . O β_{ca} é representado por h_{fe} (índices minúsculos).

Simbologia

Apesar de estarmos estudando a estrutura transistora tipo NPN, na figura 52, apresentamos a seguir os símbolos de ambos os tipos.

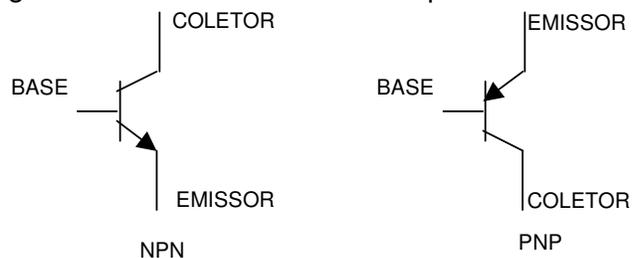


Figura 52 - Simbologias

Observe que o símbolo do transistor PNP está de cabeça para baixo, é de praxe desenhá-lo assim e o motivo será explicado futuramente.

Conexões do transistor bipolar

Nossa avaliação do funcionamento do transistor tem sido realizada sob o circuito montado com a estrutura cristalina NPN. Existem configurações típicas elaboradas com o TBJ e é essencial aprender a reconhecê-las apenas com um olhar lançado sobre um circuito transistorizado. São três as configurações com terminal em comum: base, emissor e coletor.

Observe-as na figura 53:

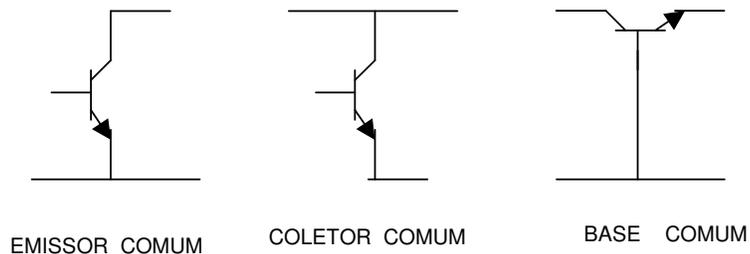


Figura 53

Obs.:

Se você retornar à ilustração da estrutura cristalina NPN em funcionamento, verá que se trata de uma configuração em base comum, pois este terminal é comum a V_{bb} e a V_{cc} .

Análise na configuração Emissor-Comum (EC)

Entre as três configurações do TBJ, a mais utilizada, na prática, é a em emissor comum, requerendo assim uma análise mais cuidadosa. Faremos o emprego da estrutura cristalina do TBJ NPN pela última vez, pois daqui para frente sempre empregaremos o símbolo em nossas análises.

Para analisar a ligação E, primeiramente colocamos o transistor na vertical, com o emissor em baixo. Cuidamos para que esse terminal seja realmente comum às duas fontes, ligando os negativos nele. Dois resistores R_b e R_c limitam a corrente na base e no coletor, nessa ordem. Veja a ilustração da figura 54.

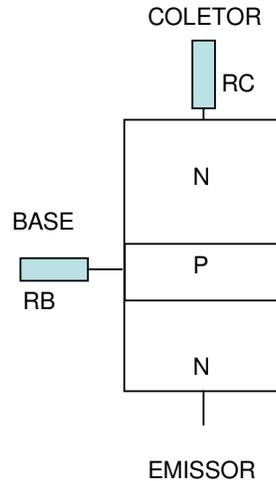


Figura 54

Especificações de um TBJ

Pretendemos, aqui, apresentar algumas especificações úteis do transistor bipolar.

Deixamos claro que o uso do manual do fabricante ou Databook é de vital importância e que o aluno não deve se contentar em saber apenas as especificações que apresentaremos. O quadro abaixo apresenta as principais características de um TBJ com a descrição de cada uma.

Parâmetro	Descrição (o fabricante pode fornecer valores mínimos, típicos ou máximos)
I _b	Corrente de base
I _c	Corrente de coletor
I _e	Corrente de emissor
P _d	Potência dissipada
V _{ceo}	Tensão de coletor ao emissor com a base aberta
V _{cbo}	Tensão de coletor à base com emissor aberto
V _{ebo}	Tensão de emissor à base com o coletor aberto
ΔP	Fator de degradação
R _{thj}	Resistência térmica da junção

As três primeiras especificações são óbvias. Especificar a potência P_d é importante para evitar o inconveniente de destruir o transistor por excessiva dissipação de calor. Matematicamente, podemos encontrá-la por:

$$P_d = V_{ce} \cdot I_c$$

Esta não é toda a potência que o transistor dissipa, mas está próxima dela, pois as componentes da potência dissipada nos diodos emissor e coletor são desprezíveis em comparação com ela.

As três tensões: V_{ce0} , V_{cbo} e V_{ebo} são importantes na escolha do transistor. V_{ce0} e V_{ebo} são boas aproximações para as tensões de ruptura dos diodos coletor e emissor, respectivamente.

Todas as especificações de componentes eletrônicos são feitas a determinadas temperaturas. ΔP mede o fator de degradação da especificação de potência à medida que nos distanciamos das temperaturas ideais de funcionamento.

O último parâmetro é importante para a escolha do irradiador de calor, visto que, em algumas circunstâncias, a quantidade de calor gerada na junção não é trocada com o meio ambiente. Nestas circunstâncias, o irradiador de calor bem-dimensionado muitas vezes resolve o problema.

O transistor como chave

O primeiro circuito que estudamos com o transistor é a configuração típica de uma chave. Com um projeto consistente, o transistor opera apenas no modo de saturação e corte. Esta aplicação é o ceme do funcionamento dos computadores e circuitos digitais. Estude-a com atenção e perspicácia, pois futuramente você entrará em contato direto com os circuitos digitais e a base da operação destes será vista aqui.

Esquema do circuito

A chave eletrônica com o transistor é feita usando-se o terminal da base como controle e a saída é retirada no coletor, ambos relativos ao terra. Veja a figura 55:

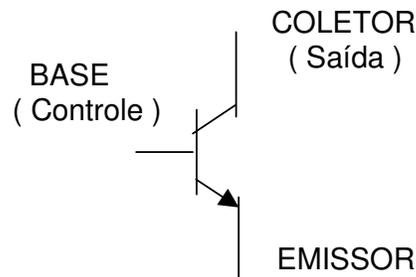


Figura 55

O controle é, tipicamente, um sinal quadrado que varia de 0 a um nível fixo, que é 5V para circuitos denominados TTL (Transistor – Transistor Lógico). Quando o sinal de controle está em 0V, a malha da base está submetida a 0V de d.d.p.; portanto, não há corrente na base e, por conseguinte, no coletor também não. Como $I_c = 0A$, a queda de tensão em R_c é nula e, para que a lei de Kirchhoff das tensões continue válida, V_{ce} tem de assumir o valor da fonte V_{cc} , chave aberta.

No instante em que i pulso sobe para o nível alto – nível fixo de tensão – há corrente na base e, se esta corrente for suficientemente alta, o transistor entra na região de saturação tornando V_{ce} próximo à 0V. A corrente circulante no coletor é I_{csat} e, de coletor para emissor, o transistor se assemelha a uma chave fechada. Novamente para a lei de Kirchhoff permanecer inalterada, o resistor de coletor R_c tem entre seus terminais a tensão da fonte V_{cc} . É importante observar que, o sinal quadrado de saída é exatamente o oposto ao do controle. Isto é devido às

condições em que ocorrem os chaveamentos. Quando controle = 0V, a saída = Vcc. Caso contrário, se controle = Vbb, a saída = 0V. Por isso, os sinais são recíprocos.

Condição suficiente para o funcionamento da chave eletrônica

A condição necessária e essencial é que a corrente Ib seja grande o suficiente para levar Ic à saturação. Os profissionais que projetam chaves a transistor usam uma regra superdimensionada para escolha dos resistores Rb e Rc. Eles adotam um $\beta = 10$; este β praticamente não se encontra, mesmo em transistores de potência que são conhecidos por terem betas pequenos. Dessa maneira dividimos o projeto em três etapas:

1ª etapa – O resistor Rc normalmente é a carga que se deseja acionar. É imprescindível conhecer sua resistência elétrica ou a corrente de funcionamento. Esta corrente deverá ser tida como Icsat.

2ª etapa – Podemos calcular Ib usando um beta crítico igual a 10. portanto, $I_b = I_{csat}/10$.

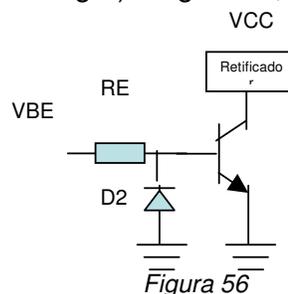
3ª etapa – Encontramos o valor de Rb usando a lei de Ohm, já que sabemos que a tensão nos terminais dele deve ser $V_{bb} - 0,7V$ e Ib, acabamos de encontrar:

$$R_b = (V_{bb} - 0,7V) / I_b.$$

Acionando carga com o transistor

No estudo feito acima, buscamos especificar um resistor de base que o transistor saturasse irremediavelmente. Na prática, a chave é muito usada para acionar relés, motores CC de pequena capacidade, lâmpadas de baixa potência, LED's indicadores etc. Veja um exemplo do acionamento por relés:

- Usando relés ligar (ou desligar) cargas CA, figura 56



Obs.:

Toda vez que um transistor chavear cargas indutivas é necessário acrescentar um diodo, reversamente polarizado, em paralelo com a carga. Isto porque quando a carga está sendo acionada (transistor saturado) a indutância da carga recebe energia da fonte. Durante o desligamento (transistor indo para o corte) ocorre a inversão da tensão nos terminais da carga (lei de Lenz) para manter a corrente circulando no mesmo sentido. Essa tensão pode ser suficientemente alta e destruir o diodo coletor. O diodo D, faz o retorno da corrente e dissipa a energia armazenada na indutância da carga, protegendo o transistor.

Outra aplicação importante do transistor, é como fonte de corrente, pois nesta, o transistor é capaz de amplificar sinais CA, veremos um pouco à frente, em nossos estudos, como polarizar circuitos transistorizados na região ativa e prepará-los para a amplificação.

Outros transistores especiais Fototransistor

É um transistor otimizado para operar a partir da luz. Existe uma janela transparente para incidência de luz (fótons). A luz converge para a junção base-coletor reversa, diodo reverso, e quebra ligações covalentes na banda de valência. Os elétrons são elevados à banda de condução e podem circular lá como intensidade da luz adequada ao funcionamento do dispositivo, aquela que possui o comprimento de onda certo e pode ser visível ou não. Veja na figura 57 sua simbologia.

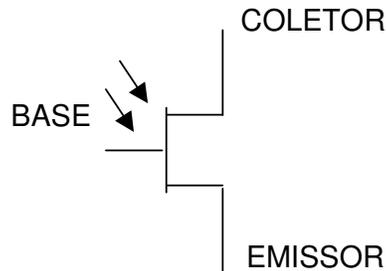


Figura 57 – Simbologia do Fototransistor

Optoacoplador com fototransistor

Como o fototransistor é um receptor de luz e atua somente na presença dela, os fabricantes oferecem um pequeno CI que incorpora o par emissor-receptor. Este par é bastante aplicado na isolação elétrica entre circuitos eletrônicos.

Transistor multiemissor e multicoletor

A figura 58 mostra a sua simbologia

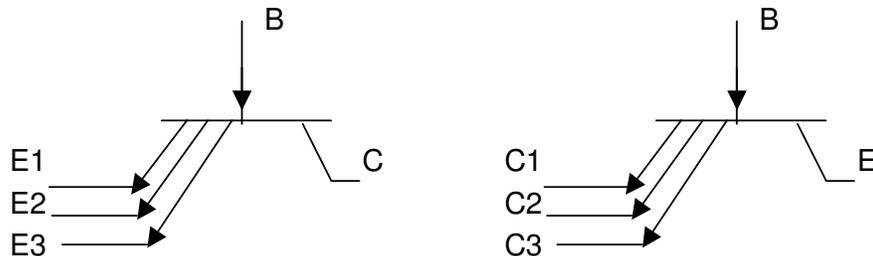


Figura 58

Obs.:

No caso do transistor multiemissor, basta que um dos transistores tenha o emissor colocado, por exemplo, no terra para que todas as bases estejam em 0,7V. De forma equivalente, se no símbolo um dos emissores vai ao terra, a base assume 0,7V de potencial e circulam as correntes I_c e I_b correspondentes à quantidade de emissores em condução. No caso do multicoletor é necessário que pelo menos um dos transistores tenha o coletor em V_{cc} , através de R_c , para existir I_b e I_e .

Transistor Darlington – Consiste em uma conexão de dois transistores. O emissor do primeiro vai à base do segundo; os coletores são ligados juntos e à base do primeiro. O emissor do segundo e a conexão em comum dos coletores são: a base, o emissor e o coletor do Darlington, respectivamente. A razão principal da conexão é a obtenção de um transistor cujo beta é o produto de β_1 e β_2 .

5. Amplificadores de Potência

Os estágios amplificadores, estudados até este ponto, tratam da amplificação de sinais com maior ênfase no ponto de vista de tensão. Porém, para que possamos aplicar estes sinais à carga, que geralmente têm valor de resistência baixo, alguns poucos Ohms, é necessário que eles sofram também uma amplificação de corrente.

Do exposto, entende-se claramente que os sinais a serem amplificados passam por estágios amplificadores de tensão e corrente, isto é, são amplificadores em potência para acionar a carga. Os transistores do estágio final de amplificação (potência) dissipam grande quantidade de calor, visto que, neste, a potência do sinal é elevada (acima de 0,5W).

Deve-se tomar cuidado de montá-los em irradiadores de calor (dissipadores), a fim de que possam trocar de calor com o meio externo, evitando a sua destruição por dissipação excessiva de potência.

Os transistores dos estágios iniciais são de potência inferior (abaixo de 0,5W) e não necessitam de dissipadores. Estes estágios recebem a denominação de pré-amplificadores.

Os amplificadores de potência que discutiremos operam em três classes distintas, que são: A, B e AB.

Definições

Ganho de tensão (A_v)

Conforme já estudado, o ganho de tensão é a relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada

Ganho de corrente (A_i)

O ganho de corrente é a relação entre as correntes CA's de coletor e de base, podendo ser aproximada ao β com erro desprezível.

Ganho de potência (A_p)

O ganho de potência é a relação entre a potência de saída (P_o) e a potência de entrada (P_{in}) de um amplificador.

Potência de carga (P_I)

Correspondente ao valor de potência CA na saída do amplificador, isto é, sobre a carga.

Potência de dissipação do transistor (P_d)

Deve-se tomar o cuidado de especificar a potência do transistor como sendo maior que a potência quiescente (P_{dq}), visto que a condição de dissipação de potência ocorre quando não há sinal na entrada do mesmo, ou seja, P_d diminui à medida que a tensão pico a pico na carga aumenta.

Rendimento ou eficiência do amplificador em porcentagem ($\eta\%$)

Corresponde à relação entre a potência CA em RL com a potência entregue pela fonte Vcc.

Amplificadores Classe D

Os amplificadores de áudio tradicionais são circuitos analógicos que amplificam tensões e as aplicam em transdutores como fones e auto-falantes, sem alterações de suas características, conforme mostra a figura 1.

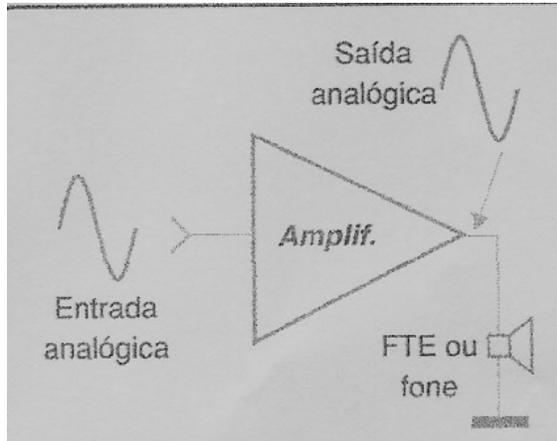


Figura 1

É relativamente simples construir um circuito amplificador linear usando componentes tradicionais como válvulas, transistores bipolares ou mesmo transistores de efeito de campo. Até mesmo um único transistor polarizado apropriadamente pode se tornar um amplificador simples, excitando um pequeno alto-falante ou fone de ouvido, veja a figura 2.

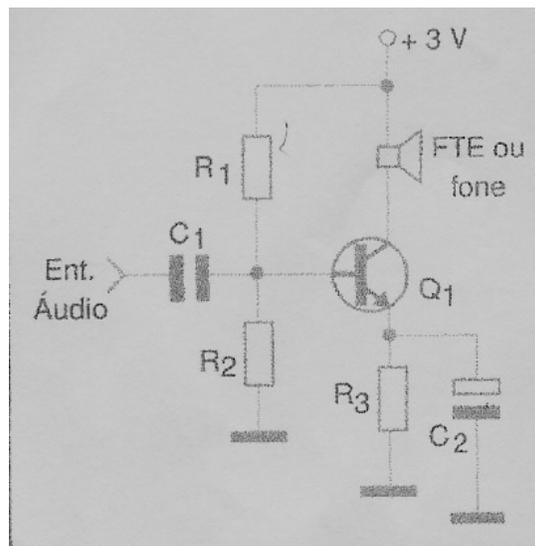


Figura 2

No entanto, esse tipo de circuito não atende as necessidades modernas, principalmente dos equipamentos alimentados por baterias, visto que seu rendimento é muito baixo.

A maior parte da energia que é entregue a esse tipo de circuito é convertida em calor nos componentes de potencia. É só observar que os transistores de saída, mesmo para equipamentos com potências relativamente baixas, precisam ser montados em bons dissipadores de calor. Ao tocar nesses dissipadores quando o equipamento funciona, dá para se ter a idéia de quanta energia é perdida na forma de calor.

Para atender as necessidades dos novos equipamentos, são utilizadas configurações de baixo consumo e alto rendimento. São os “amplificadores de Classe D” que, para entender melhor vamos explica-los desde o inicio, comparando-os com amplificadores tradicionais.

A configuração mais simples para um amplificador é justamente a que mostramos na figura 2 e que pode ser analisada de uma forma mais completa com o circuito da figura 3.

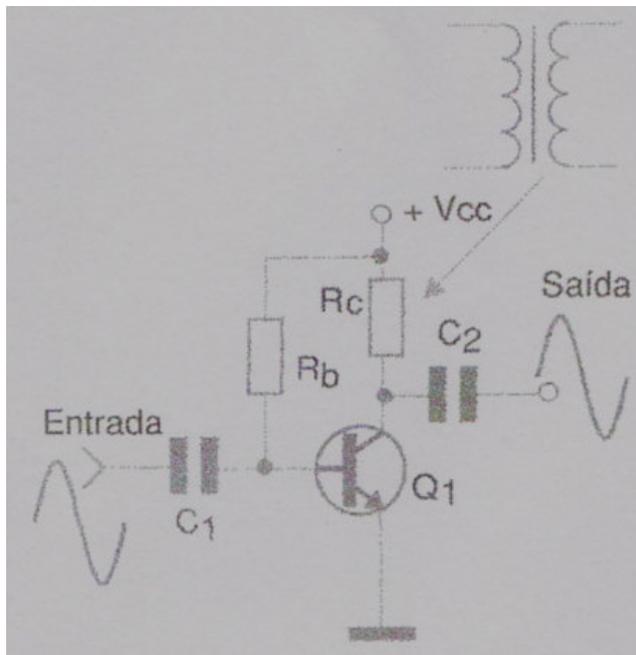


Figura 3

Nessa configuração, o transistor deve ser polarizado pelo resistor R_b de modo que ele opere no centro da reta de carga, exibida na figura 4.

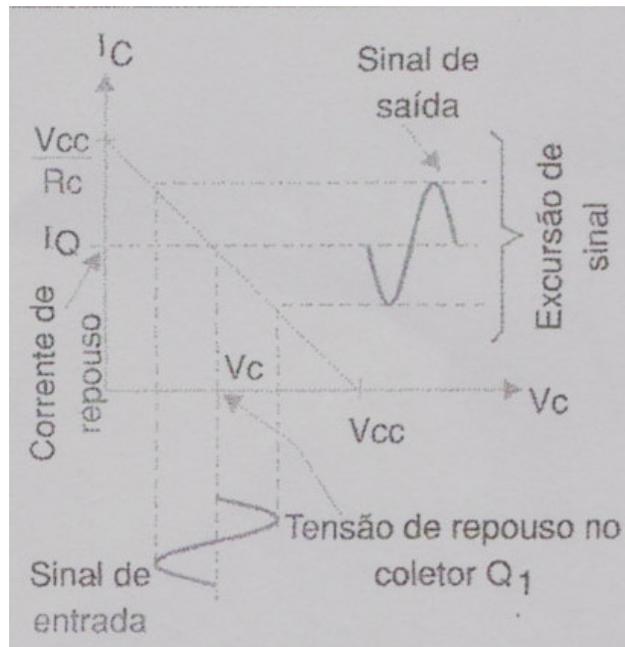


Figura 4

Isso significa que o transistor juntamente com o transformador, que alimenta, formam um divisor de tensão e no coletor do transistor existe uma tensão equivalente a aproximadamente metade da tensão da alimentação. Assim, quando os sinais de áudio são colocados na entrada desse circuito, eles fazem com que a tensão aplicada ao transformador oscile entre um máximo próximo da tensão de alimentação e um mínimo perto de 0 V, conforme ilustra a figura 5.

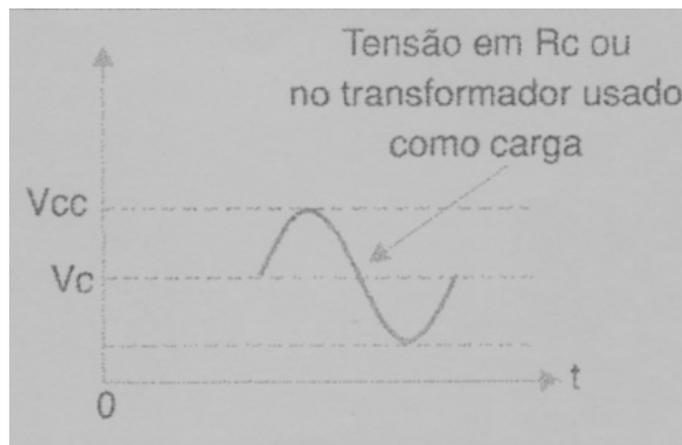


Figura 5

È evidente que, na ausência do sinal o transistor precisa permanecer em condução para que a tensão no seu coletor se mantenha em metade nesse circuito são tais que mais da metade da potencia é dissipada na forma de calor, fora o fato de que mesmo em repouso seu consumo é alto. Algo inadmissível para uma aplicação alimenta por bateria.

Classe B

Um tipo de circuito que oferece um ganho de rendimento em relação ao anterior e por isso ainda é encontrado em algumas aplicações portáteis econômicas como rádios AM e FM de baixo custo é o que corresponde à etapa de saída Classe B em Push-Pull, cujo diagrama é apresentado na figura 6.

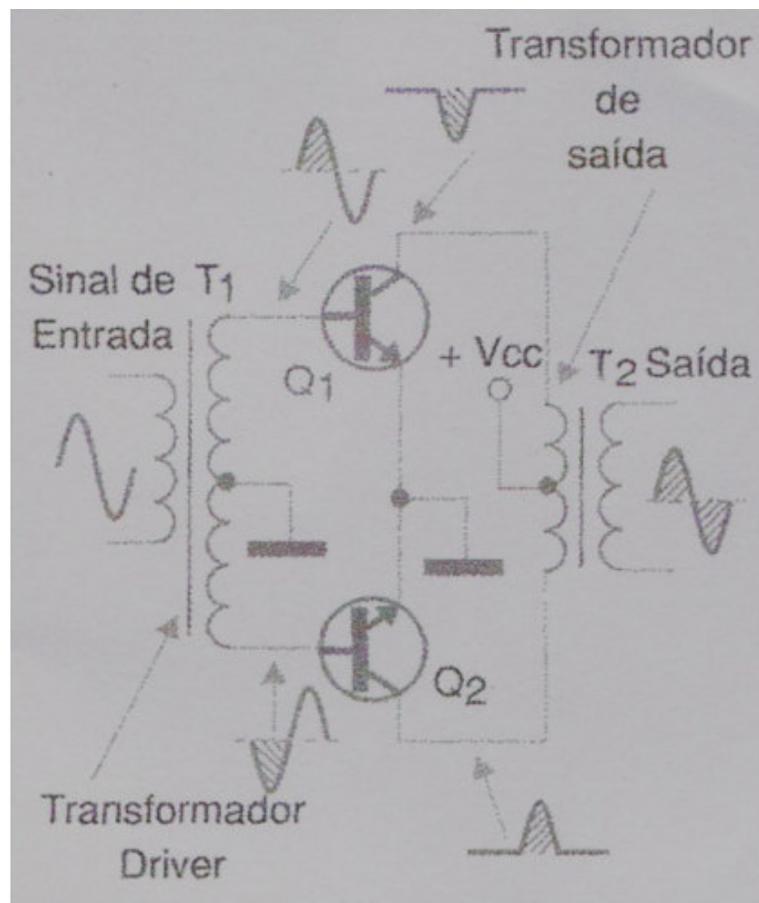


Figura 6

Nesse circuito, o que se faz é polarizar os dois transistores de tal forma que eles fiquem perto do início do ponto de condução ou mesmo no corte, usando para essa finalidade seu primário, os semiciclos positivos polarizam o transistor A de modo que ele amplifique os sinais, enquanto que os semiciclos negativos polarizam o transistor B no mesmo sentido.

Assim, enquanto o transistor A amplifica apenas os semiciclos positivos do sinal, o transistor B amplifica apenas os semiciclos negativos. Na ausência de sinal, nenhum dos dois transistores conduz e o consumo do circuito é extremamente baixo. No coletor dos transistores temos um outro transformador que é empregado como carga, o qual reúne os sinais amplificados recuperando sua forma original que aparece no seu secundário, observe a figura 7.

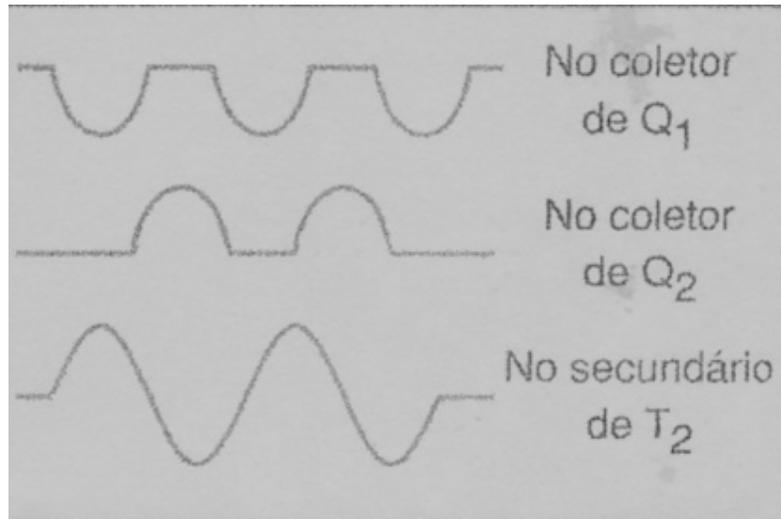


Figura 7

Apesar de seu bom rendimento, este circuito tem alguns problemas. O maior está no fato de se necessitar de um transformador drive e de transformador de saída, que são componentes problemático, quanto ao custo e ao tamanho, principalmente se precisarmos de potências elevadas. O segundo ponto refere-se a que transistores “demoram” um pouco para começar a conduzir com o sinal aplicado, pois só fazem isso quando a tensão de base chega aos 0,7 V. Isso introduz uma certa distorção no sinal, conforme mostra a figura 8.

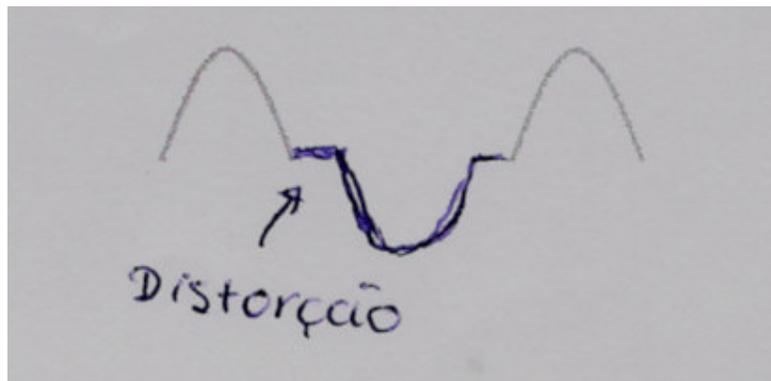


Figura 8

Polarizando-se o circuito de modo que o transistor fique prestes a conduzir, veja a figura 9, podemos eliminar essa distorção e obter amplificadores de boa potência e excelente qualidade de som.

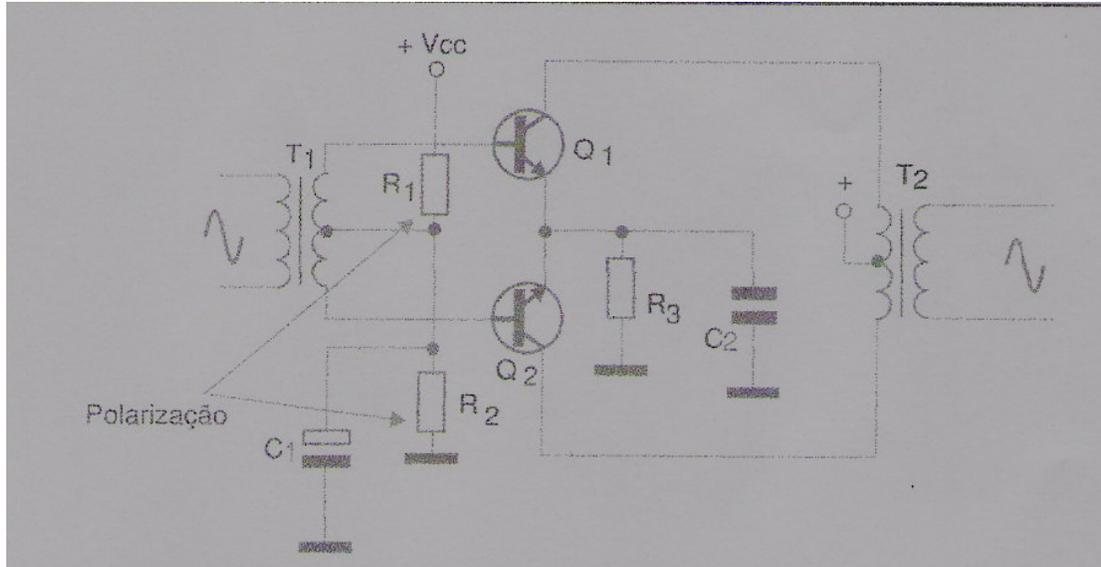


Figura 9

Na verdade usando transformadores feitos com chapas especiais (ultralineares) e válvulas em lugar dos transistores (ou mesmo MOSFETS de potência), a distorção por cruzamento (cross-over) como conhecida, pode ser reduzida a valores desprezíveis obtendo-se com isso os melhores amplificadores em qualidade de som.

Existem grupos de entusiastas de som que dizem que tais amplificadores são insubstituíveis em termos de qualidade de som e compra equipamentos especiais que custam milhares de dólares. Um amplificador "ultralinear" com saída em push-pull classe AB usando válvulas com anodos revestidos de ouro pode ter preços que chegam perto dos 10.000 de dólares.

Classe C

Nos amplificadores classe C os elementos ativos como, por exemplo, os transistores, são polarizados de modo que eles conduzam apenas metade dos ciclos dos sinais de entrada. Atente para a figura 10.

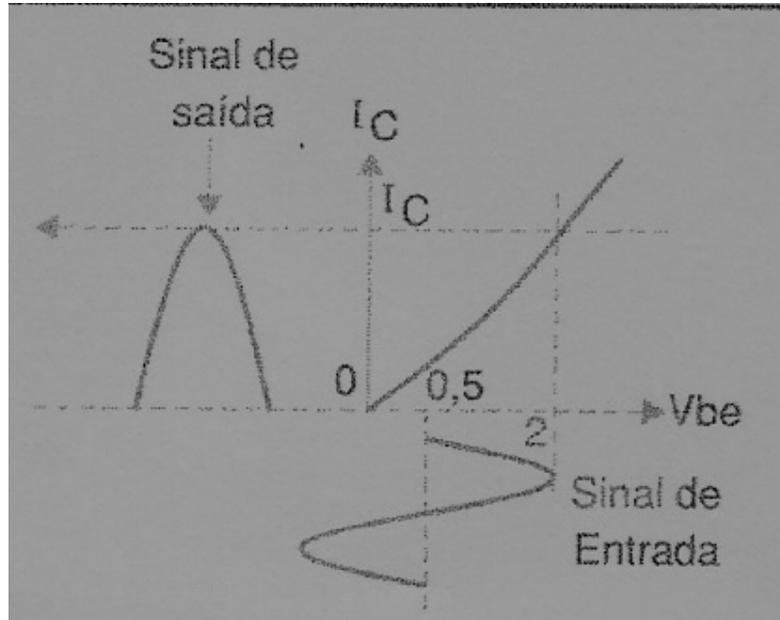


Figura 10

Esses amplificadores não são empregados em ampliações que envolvem sinais de áudio pela distorção que introduzem. Todavia com o uso de filtros de saída apropriados que eliminam as harmônicas geradas no processo de amplificação e devolvam a forma senoidal original de um sinal de alta freqüência, eles podem ser usados sem transmissores.

NA figura 11 mostramos uma etapa de saída típica de um transmissor em classe C.

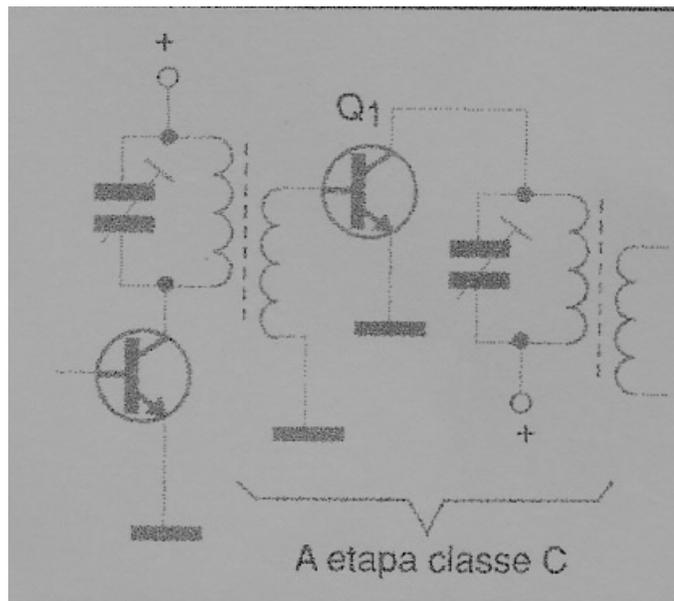


Figura 11

A idéia básica das etapas em classe D é trabalhar com impulsos. Trata-se, de certa forma, de uma digitalização do sinal de áudio, se considerarmos que os impulsos são quantidades discretas. Vamos partir de uma configuração simples (em ponte) usando transistores de efeito de campo de potencia, a qual e dada na figura 12.

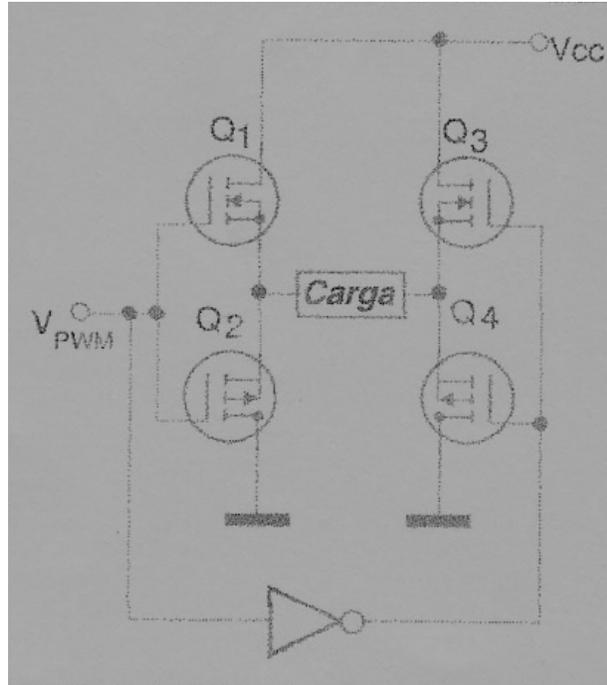


Figura 12

Tomando como exemplo um sinal de entrada de áudio que corresponda a uma senóide, podemos transforma-lo em impulsos amostrando sua intensidade num certo numero de instantes. Dessa forma, pelo critério de Nyquist, que é usado quando se trata da digitalização de sinais, vemos que para podermos reproduzir esse sinal com fidelidade precisamos ter um numero de pelo menos 3 amostragens por ciclo de sinal.

Na pratica, a amostragem é feita com uma freqüência muitas vezes mais elevada do que a maior freqüência de áudio que deve ser reproduzida. Nos circuitos comuns empregados em equipamentos comerciais, para se recuperar o sinal original com boa fidelidade, a amostragem deve ser feita numa freqüência pelo menos 10 vezes mais alta que a freqüência maior que se deseja produzir.

Assim como é visto na figura 13, com um grande numero de amostragens, poderemos recuperar o sinal original com mais facilidade quando o passarmos por um filtro apropriado.

Podemos dizer que transformaremos a intensidade do sinal não em valores digitais (como num conversor ADC), mas sim em pulsos de largura proporcional a essa intensidade.

5.1. Dissipadores de calor

A potência desenvolvida sob forma de calor no coletor dos transistores de saída é muito alta, fazendo valer algumas considerações importantes. Por exemplo, à temperatura ambiente (25°C), a troca de calor entre o meio ambiente e a cápsula (invólucro) do transistor, que poderá ser metálica ou plástica, pode ser suficiente para uma determinada condição de funcionamento do equipamento.

Porém, com o aumento desta temperatura, esta troca de calor para a mesma condição anterior de trabalho poderá não ser tão eficiente, fazendo com que os transistores permaneçam quentes por uma faixa de tempo, tendo como conseqüência o suprimento de uma corrente reversa nos terminais de coletor. Esta corrente simada ao nível quiescente, faz com que a dissipação de potência nos transistores seja ainda maior. Este efeito é cumulativo e termina por levar os transistores à destruição. A este fenômeno denominamos deriva térmica.

Uma forma de minimizar este efeito é fazer com que a área de superfície do encapsulamento do transistor seja aumentada. Para isso utilizamos os dissipadores de calor, que são massas metálicas (chapas de metal) de modelos variados, podendo ou não ser alteradas, com o propósito de melhorar a transferência de calor do encapsulamento para o meio ambiente. Em alguns casos, o terminal de coletor é conectado a uma placa metálica ou à carcaça do encapsulamento, a fim de facilitar a conexão com o dissipador e melhorar a dissipação de calor. Quando isso acontece, é necessário, às vezes, isolar o terminal de coletor do terra do circuito. Para isso, são utilizados isoladores de mica, por se tratar de um material que é bom isolante elétrico e condutor térmico.

Outros acessórios são amplamente utilizados, como, por exemplo, isoladores plásticos (buchas) para isolar terminais e/ou parafusos de fixação, pasta térmica para reduzir a resistência térmica entre o dissipador e o encapsulamento, entre outros. A figura 59 a seguir ilustram alguns tipos de transistores e dissipadores de comum utilização.

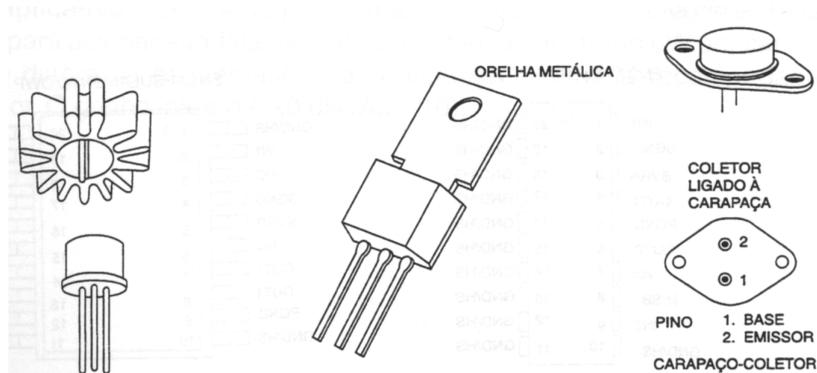


Figura 59

6. JFET

JFET - TRANSISTORES DE JUNÇÃO POR EFEITO DE CAMPO
(Junction Field Effect Transistor)

É um dispositivo semiconductor que requer um campo elétrico para o controle de sua corrente de operação. É, também, conhecido como transistor unipolar, por possuir apenas um tipo de portador de corrente (elétrons ou lacunas).

Comparação entre FET e Transistor Bipolar:

- O FET tem impedância de entrada muitas vezes maior;
- O FET tem comutação mais rápida;
- O FET apresenta elevada sensibilidade térmica;
- O FET quase não gera ruídos;
- O FET tem ganhos e potências de trabalho menores.

Tipos de FET

Classificação da família FET		
De junção (FET)	Tipo depleção	Canal tipo N e tipo P
De porta isolada (MOSFET ou IGFET)	Tipo depleção	Canal tipo N e tipo P
	Tipo intensificação / indução	Canal tipo N e tipo P
	VMOS / DMOS / TMOS	Canal tipo N e tipo P
	Híbrido com TBJ (IGBT)	-----
De arsenieto de gálio – GaAs GaAsFET ou MESFET	Tipo depleção	Canal N

A figura 60, mostra a seção em corte de um JFET canal N. A região denominada substrato é feita de material do tipo P, no qual está incrustado o material do tipo N para produzir o canal. Os terminais nas extremidades do canal são conhecidos como dreno (D – drain) e fonte (S – source). No centro do material tipo N existe outra região tipo P, denominada porta (G – gate).

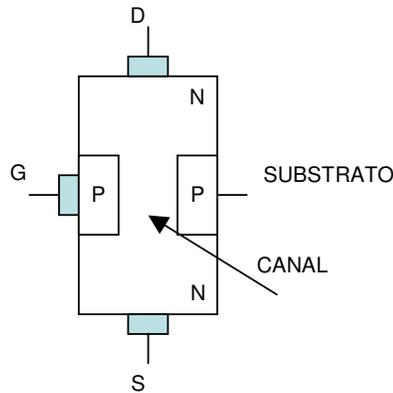


Figura 60

Polarização de um FET

Normalmente o substrato é conectado internamente ao terminal de porta. Como veremos, isso aumenta o controle sobre o canal.

Não há necessidade de resistência na porta, pois em ambos os casos a junção porta-canal deve estar reversamente polarizada. A polarização direta na porta-canal não tem significado, em termos de controle da corrente I_{ds} , e deve ser evitada para manutenção das características do JFET.

Princípio de funcionamento

Junção porta-canal com polarização reversa $V_{gs} = 0V$

Circulará uma corrente no canal (I_{ds}) que será diretamente proporcional ao valor V_{ds} aplicado. O canal comporta-se como um resistor e, devido ao sentido da corrente, o potencial no dreno (D) será mais positivo que na fonte (S), para o JFET canal tipo N. se o JFET for canal do tipo P, o potencial em (D) será mais negativo que em (S).

Fazer $V_{gs} = 0V$ significa conectar a porta à fonte eletricamente. A corrente I_{ds} provoca, internamente, quedas de tensão bem distribuídas e isto reverte a polarização da junção porta-canal de forma variada. A camada de depleção será esticada em direção ao dreno e estreitada na fonte (para o JFET canal N).

Esta polarização produz uma região de depleção no canal que limita a corrente através dele. Quanto maior a queda de tensão no canal (V_{ds} maior), mais larga é a região de depleção que se forma e mais reduzida será a corrente. Estes dois efeitos se opõem e, a partir de uma determinada tensão V_{ds} , eles estarão em equilíbrio e a corrente I_{ds} permanecerá constante. Esta tensão é conhecida como tensão de pinçamento (pinch-off) e simbolizada por V_p . A tal corrente remanescente é denominada corrente máxima do dreno I_{dss} , especificada para $V_{ds} \geq V_p$ e $V_{gs} = 0V$. perceba os detalhes na figura 61.

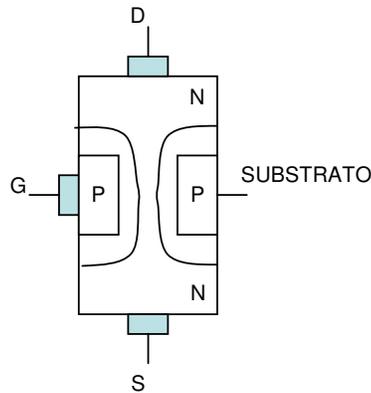


Figura 61

Junção porta-canal com polarização reversa $V_{gs} < 0$

Nestas condições, a camada de depleção se alargará devido à polarização reversa adicional imprimida pela fonte V_{gs} . O campo elétrico formado pela camada de depleção provocará o estreitamento do canal e, conseqüentemente, um aumento na sua resistência e diminuição na corrente I_{ds} . Assim, variações na tensão entre a porta e a fonte refletem-se em variações na corrente do canal. Outra vez, devido à queda de tensão interna no canal, a camada de depleção será mais “esticada” em direção ao dreno.

Se continuarmos a aumentar (negativamente) V_{gs} , será atingido um valor no qual a região de depleção ocupará todo o canal. Com esse valor de V_{gs} o canal fica completamente deplecionado de portadores de carga – elétrons no canal N e lacunas no canal P; o canal em efeito desaparece. Essa tensão V_{gs} é denominada tensão de corte $V_{gs}(\text{corte})$ ou $V_{gs}(\text{off})$, a qual obviamente é negativa para o JFET canal N e positiva para o canal P.

Polarização direta da junção porta-canal $V_{gs} > 0$

O JFET não foi otimizado para funcionar deste modo. Esta polarização produz corrente pelo canal, o que pode danificá-lo. Ademais, a junção porta-canal não pode exceder a 0,7V, já que ela basicamente é um diodo.

Simbologia

Veja na figura 62, a simbologia dos JFET's

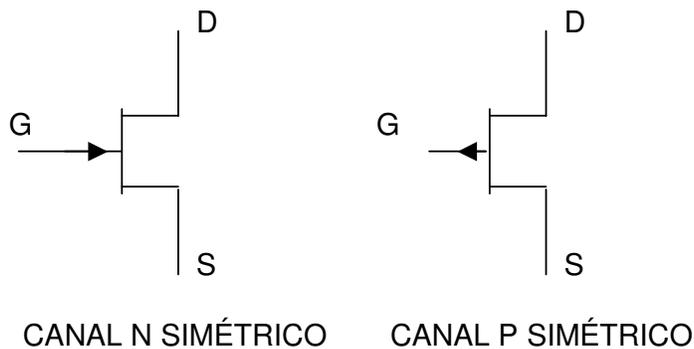


Figura 62

Algumas terminologias importantes

I_{dss} : corrente máxima que um JFET pode conduzir. Dada para um determinado valor de V_{ds} e $V_{gs} = 0V$.

I_{gss} : corrente reversa na junção porta-canal

$V_{gs(corte)} = V_{gs(off)}$: valor de tensão reversa na junção porta-canal, que fecha completamente o canal e torna $I_d = 0^A$.

V_p : tensão de pinch-off, pinçamento ou constrição. Valor de tensão V_{ds} a partir da qual a corrente I_d torna-se constante.

BV : máxima tensão que pode ser aplicada à junção porta-canal.

BV_{dss} : máxima tensão que pode ser aplicada entre dreno e fonte.

Aplicações do JFET como chave

Dentre as aplicações mais importantes e populares do JFET, encontramos algumas que realmente são bastante distintas das encontradas para o transistor bipolar.

Novamente, se queremos um componente como chave devemos trabalhar com apenas dois pontos da reta de carga dele. Aqui é bastante fácil fazê-lo operar assim. Se $V_{gs} = 0V$, o canal está completamente aberto, de forma que, de dreno para a fonte, o JFET assemelha-se a um chave fechada. Se o $V_{gs} = V_{gs(off)}$, o canal estará fechado e o JFET assemelha-se a um chave aberta.

A chave série e paralela

Se desejarmos chavear uma pequena tensão CA (menor que 100mV) através de uma carga, uma boa escolha é usar as configurações série e paralela de chave a JFET.

Na chave série, os terminais dreno-fonte são colocados em série com a carga. Fazendo $V_{gs} = 0V$ ou $V_{gs} = V_{gs(off)}$, controla-se a permanência ou não do sinal na saída respectivamente. Deve-se considerar a resistência $r_{ds(on)}$ e usar a regra do divisor de tensão para achar a tensão na carga. Observe o esquema:

Na chave paralela, os terminais dreno-fonte estão em paralelo com a carga. Fazendo $V_{gs} = V_{gs(off)}$ ou $V_{gs} = 0V$, permite-se ou não a presença de tensão na saída, respectivamente. Se a chave estiver ligada, a resistência $r_{ds(on)}$ é colocada em paralelo com R_L e o equivalente ($R_L // r_{ds(on)}$) é usado na regra do divisor com R_s para encontrar V_s . Caso a chave esteja aberta, apenas R_L entra no cálculo da tensão de saída, usando a regra do divisor de tensão. Observe a figura abaixo):

Multiplexação analógica

Uma aplicação bastante interessante e útil é a multiplexação de sinais no tempo. A idéia consiste em transmitir vários sinais elétricos analógicos em um mesmo fio, mas em tempos diferentes.

Vamos analisar um “Mux” de três canais (entradas) com JFET. Na verdade são três chave série com um terminal em comum. Através dos terminais de controle Vgs1, Vgs2 e Vgs3 permitimos ou não a passagem dos sinais pelos JFETs. Lembramos que os sinais devem ter amplitudes menores que 100mV.

Definições úteis

- MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.
- IGFET – Insulated Gate Field Effect Transistor.
- MESFET – Gallium Arsenide (GaAs) Devices – The Mesfet.
- IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor.
- NMOS = N – Channel Metal Oxide Semiconductor.
- PMOS = P – Channel Metal Oxide Semiconductor.

As aplicações nas áreas de potência dos MOSFETs têm consideravelmente. Sua melhor característica é ter velocidade de chaveamento superior a qualquer outro tipo de dispositivo de alta potência. A razão para isto é o fluxo de corrente unidirecional, que não causa armazenamento de cargas e, por conseguinte, sem acomodação das mesmas. Na verdade, a velocidade depende da carga e descarga da Porta-Fonte – efeito capacitivo -, mas bons circuitos externos podem propiciar resultados excelentes durante o chaveamento. Diversos fabricantes colocaram MOSFETs de potência no mercado, usando designações diferentes: a Motorola usa TMOS, a Internacional Rectifier (IR) adotou HEXFET, a Siemens colocou o seu MOS com canal em V como SIPMOS, VMOS e DMOS também são de uso fluente. Aqui abordaremos os MOSFETs de uma forma geral, centralizando o nosso foco no VMOS, que, apesar de ter sido o primeiro, ainda não encontrou concorrente em altas frequências.

7. Amplificadores Operacionais

Um amplificador operacional, ou amp-op, é um amplificador diferencial de ganho muito alto com impedância de entrada muito alta e baixa impedância de saída. Normalmente se utiliza o amplificador operacional para que se obtenham variações na tensão (amplitude e polaridade), para a construção de osciladores, filtros e alguns circuitos de instrumentação. Um amp-op contém alguns estágios amplificadores diferenciais para produzir um ganho de tensão muito alto.

A figura 63 abaixo mostra um amp-op básico com duas entradas e uma saída, uma vez que o estágio de entrada é um estágio de entrada de amplificador diferencial.

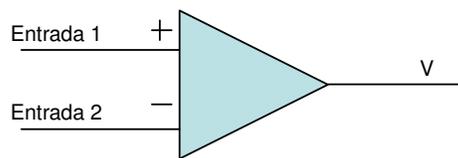


Figura 63

Aplicações

Os amplificadores operacionais nos permite executar diversas tarefas como: ganho constante, fontes reguladas, compensação de tensão, demodulação em áudio, operações com tensões, geradores de rampas, etc; as quais são conseguidas pelas diferentes configurações em que o A.O. opera. Estas configurações são conseguidas pelas ligações de resistores e/ou capacitores externos; dentre as quais podemos citar:

Circuitos AMP-OP Práticos

O amp-op pode ser conectado a uma grande variedade de circuitos estabelecendo várias possibilidades operacionais. Nesta seção, abordamos alguns dos circuitos mais comuns.

Amplificador Inversor

O amplificador de ganho constante mais amplamente usado é o amplificador inversor, mostrado na figura anterior. A saída é obtida pela multiplicação da entrada por um ganho fixo ou constante, fixado pelo resistor de entrada (R_1) e o resistor de realimentação (R_f) – esta saída também é invertida em relação à entrada.

Amplificador Não-Inversor

A conexão da figura 64 mostra um circuito com amp-op que trabalha como um amplificador não-inversor ou multiplicador de ganho constante. Deve-se observar que a conexão amplificador inversor é mais amplamente usada porque tem melhor estabilidade em frequência.

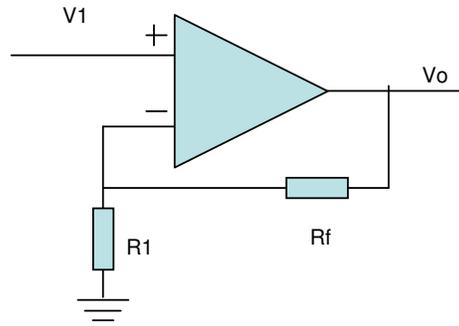


Figura 64 – Não inversor

Seguidor Unitário

O circuito seguidor-unitário, fornece em ganho unitário (1) sem inversão de polaridade ou fase. Do circuito equivalente é claro que a saída tem a mesma polaridade e amplitude da entrada. O circuito opera como um circuito seguidor de emissor ou de fonte, exceto que o ganho é exatamente um.

Amplificador Somador

Provavelmente, o mais usado dos circuitos amp-ops é o circuito amplificador somador mostrado na figura 65. O circuito mostra um circuito amplificador somador de três entradas, o qual fornece um meio de somar algebricamente (adicionando) três tensões, cada uma multiplicada por um fator de ganho constante. A tensão de saída pode ser expressada em termos das entradas como

$$V_o = - \left(\frac{R_f}{R_1} V_1 + \frac{R_f}{R_2} V_2 + \frac{R_f}{R_3} V_3 \right)$$

Em outras palavras, cada entrada adiciona uma tensão à saída, multiplicada pelo seu correspondente fator de ganho. Se mais entradas são usadas, cada qual acrescenta uma componente adicional à saída.

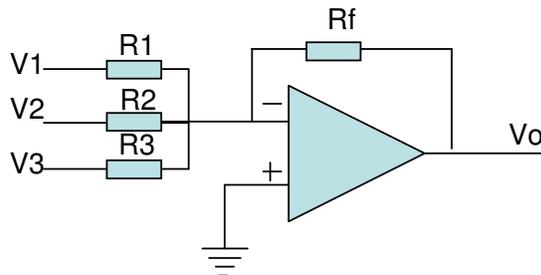


Figura 65 - Somador

Integrador

Até agora, a entrada e os componentes de realimentação eram resistores. Se o componente de realimentação usado for um capacitor, a conexão resultante é chamada de *integrador*. O circuito, com terra-virtual, mostra que uma expressão para a tensão entre entrada e saída pode ser deduzida em função da corrente I , da entrada para a saída. A operação de integração é semelhante à de somar, uma vez que constitui uma soma da área sob a forma de onda ou curva em um período de tempo

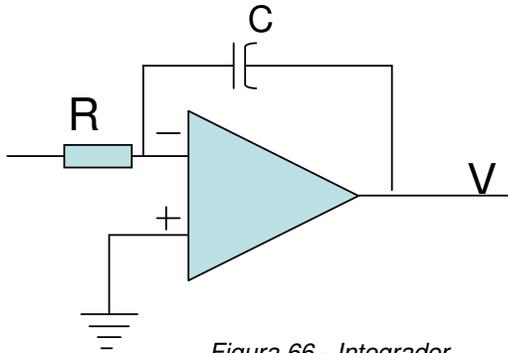


Figura 66 - Integrador

Referências Bibliográficas

SENAI. MG. *Eletrônica Digital*

IDOETA, Ivan Valeije, CAPUANO, Francisco Gabriel. *Elementos de Eletrônica Digital*. 34ª Edição. São Paulo. Ed. Érica. 2002.

LOURENÇO, Antônio Carlos, CRUZ, Eduardo C. A.. *Circuitos Digitais - Estude e Use*. 5ª Edição. São Paulo. Ed. Érica. 2002.

TOCCI, Ronald J., LASKOWSKI, Lester P.. *Microprocessadores e Microcomputadores*. 2ª Edição. Rio de Janeiro. Ed. Prentice-Hall do Brasil. 1983.

<http://www.i-magazine.com.br/imagazine/picbook/cap1.htm> em 15/07/2004.