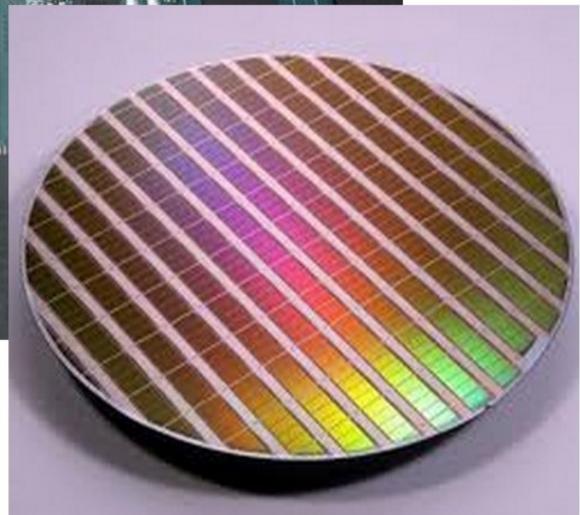
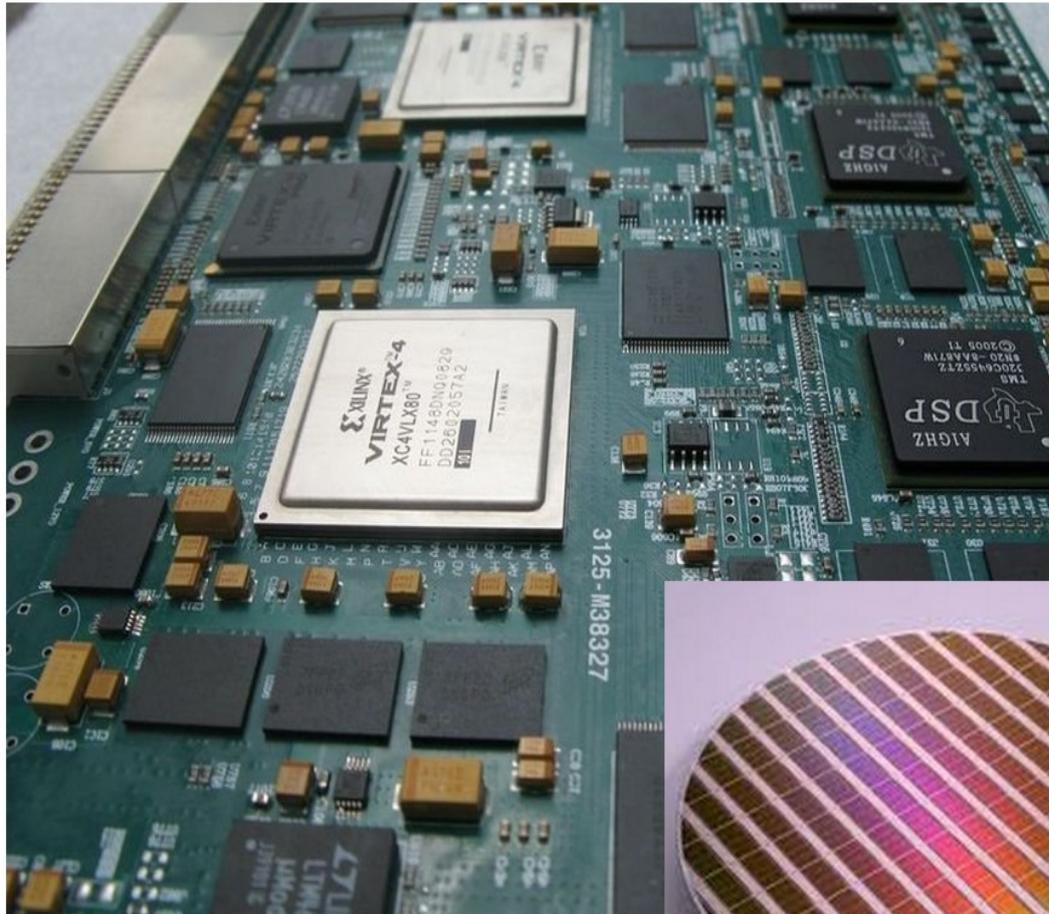


Eletrônica Analógica I



Eng. Décio Rennó de Mendonça Faria

fevereiro de 2022

Sumário

| | |
|--------|----|
| 1 | 1 |
| 1.1 | 1 |
| 1.2 | 1 |
| 1.3 | 2 |
| 1.4 | 3 |
| 2 | 4 |
| 2.1) | 4 |
| 2.2) | 5 |
| 2.3) | 5 |
| 2.4) | 6 |
| 2.4.1) | 8 |
| 2.5) | 9 |
| 2.5.1) | 9 |
| 2.5.2) | 11 |
| 3 | 12 |
| 3.1) | 12 |
| 3.2) | 14 |
| 3.3) | 15 |
| 3.5) | 16 |
| 3.6) | 18 |
| 3.7) | 21 |
| 4 | 23 |
| 4.1) | 23 |
| 4.1.1) | 25 |
| 4.1.2) | 25 |
| 4.1.3) | 26 |
| 4.2) | 27 |
| 4.3) | 31 |
| 5 | 32 |
| 5.1) | 32 |
| 5.2) | 33 |
| 5.3) | 35 |
| 5.4) | 36 |
| 5.5) | 37 |
| 5.6) | 38 |
| 5.7) | 39 |

| | |
|---|----|
| 6 Circuitos limitadores, grampeadores e ceifadores..... | 40 |
| 6.1) Circuitos Limitadores..... | 40 |
| 6.2) Circuitos ceifadores..... | 41 |
| 6.3) Circuitos grampeadores..... | 42 |
| 6.4) Circuitos grampeadores com capacitor..... | 43 |
| 7 Diodos especiais..... | 44 |
| 7.1) Varicap..... | 44 |
| 7.2) Diodo Emissor de Luz (LED)..... | 46 |
| 7.3) Fotodiodo..... | 48 |
| 7.4) Diodo Schottky..... | 49 |
| 8 O Transistor BJT..... | 50 |
| 8.1) Estrutura básica e o fator de amplificação β | 51 |
| 8.2) O valor de V_{BE} | 54 |
| 8.3) Símbolos utilizados..... | 54 |
| 8.4) Polarizações básicas..... | 55 |
| 8.4.1) Configuração Base Comum..... | 55 |
| 8.4.2) Configuração Emissor Comum..... | 57 |
| 8.4.3) Configuração Coletor Comum..... | 58 |
| 8.5) Polarizações com uma única fonte..... | 58 |
| 8.5.1) Polarização fixa..... | 59 |
| 8.5.2) Polarização estável do emissor..... | 60 |
| 8.5.3) Polarização com divisor de tensão..... | 63 |
| 8.5.4) Polarização com realimentação do coletor..... | 66 |
| 8.5.5) Valores práticos de β | 68 |

Prefácio

Este material tem como objetivo auxiliar o curso de eletrônica analógica para técnicos em eletrônica e telecomunicações. Ao final desta primeira parte do curso você será capaz de identificar e conhecer as funções dos vários componentes de uma fonte de alimentação linear. Além disso será capaz de identificar defeitos e realizar reparos. A primeira parte descreve de forma rápida e objetiva as teorias relacionadas aos materiais semicondutores, fornecendo a base necessária para compreensão do funcionamento dos circuitos eletrônicos, sem entrar em detalhes que, muitas vezes, causam desmotivação ao iniciante. A segunda parte descreve o funcionamento do diodo e suas aplicações, com circuitos práticos e exemplos de cálculo. A terceira parte deste material descreve o funcionamento e os passos necessários para projeto de fontes lineares, utilizando os conceitos adquiridos no estudo dos retificadores. Nesta etapa está incluída os circuitos de estabilização com diodo zener. Como conteúdo extra, explica o funcionamento de alguns diodos especiais. Finalizando, é apresentada a teoria dos transistores BJT incluindo as principais formas de polarização e cálculos em corrente contínua. Acompanha este material uma série de exercícios com respostas.

1 Materiais semicondutores

1.1 Estrutura cristalina

Os cristais de silício são materiais encontrados na natureza e são formados por átomos de um mesmo elemento químico, agrupados em uma estrutura chamada rede cristalina.

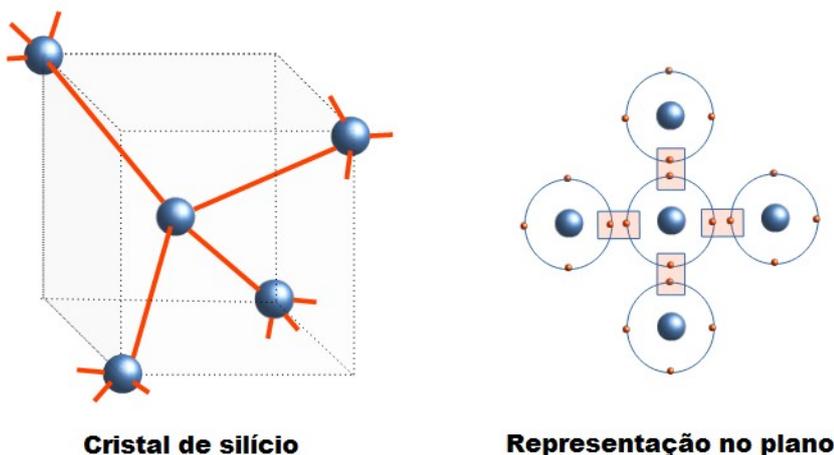


Fig.1 - Estrutura cristalina do silício.

1.2 O cristal de germânio e o cristal de silício

Os circuitos eletrônicos atuais utilizam basicamente cristais de germânio ou cristais de silício, sendo este último o mais utilizado.

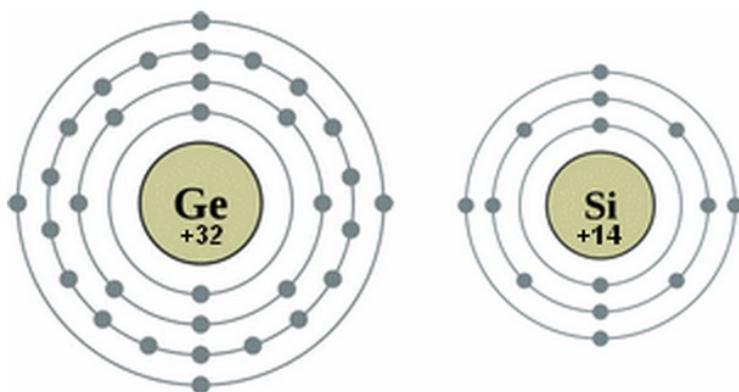


Fig.2 - Átomo de germânio e átomo de silício.

Como pode ser visualizado na ilustração acima, os átomos de germânio e os átomos de silício possuem 4 elétrons na sua última camada.

A teoria dos octetos expõe que os átomos dos elementos ligam-se uns aos outros na tentativa de completar a sua última camada de valência com 8 elétrons. Assim, o átomo é considerado estável quando possui oito elétrons na última camada. No cristal de silício, que possui 4 elétrons na última camada, esta rede cristalina é formada através de ligações covalentes, onde cada átomo compartilha seus elétrons com os átomos da vizinhança.

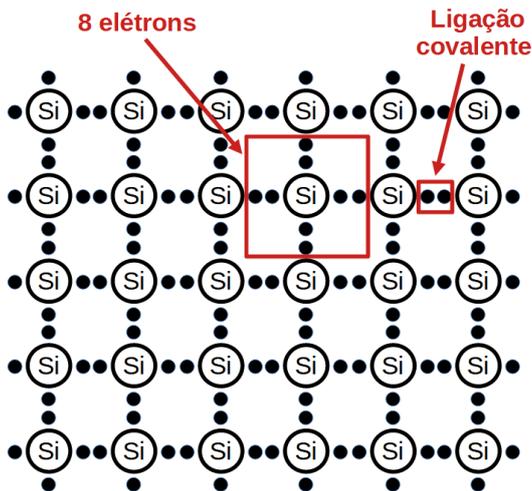


Fig. 3 - Ligações do cristal puro de silício

Esta estrutura não permite com facilidade a passagem da corrente elétrica, ao mesmo tempo, está longe de ser um isolante. Por essa característica, recebe o nome de semiconductor.

1.3 O cristal de silício utilizado na eletrônica

Os cristais encontrados na natureza não são puros. Durante sua formação outros elementos se ligam e ficam presos dentro da estrutura cristalina. Por essa razão, esses cristais não servem para construção de componentes eletrônicos. Os cristais de germânio, raramente são utilizados atualmente. Os cristais utilizados na eletrônica atual são fabricados a partir de uma técnica ou processo chamado de Czochralski.

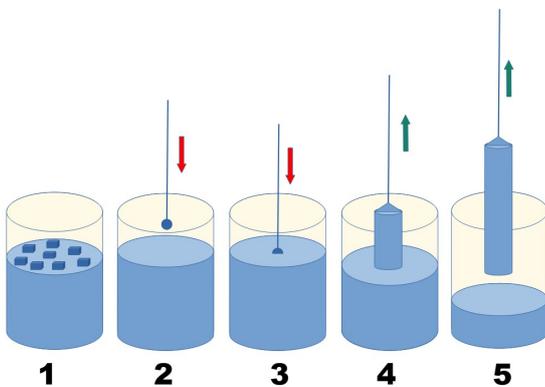


Fig.4 - Fabricação do cristal utilizado em circuitos eletrônicos.

O processo de Czochralski segue os seguintes passos:

- 1 - O silício puro é derretido entrando no estado líquido.
- 2 - Um pequeno pedaço de silício na forma cristalina é colocado no recipiente.
- 3 - Os átomos de silício derretidos começam a se ligar no cristal inserido
- 4 - Lentamente o cristal começa a ser retirado do recipiente
- 5 - Um bloco único de cristal puro está formado.

O resultado final desse processo é um bloco de silício puro, chamado de tarugo, que após esfriamento é fatiado formando as lâminas de silício.



Fig.5 - Tarugo de cristal de silício e lâminas cortadas. [1]

1.4 O cristal com impurezas

Um cristal semiconductor puro não tem aplicação em circuitos eletrônicos. Para que se torne útil, impurezas (outros elementos) são adicionadas à estrutura cristalina alterando suas propriedades. Ao adicionar elementos que possuam 5 elétrons na última camada (impurezas penta valentes), como fósforo ou antimônio, teremos uma estrutura cristalina com mais elétrons que o necessário para o compartilhamento.

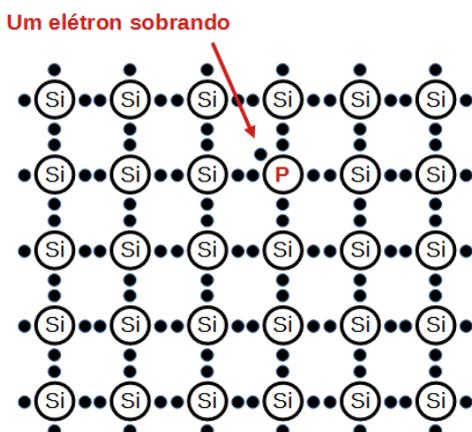


Fig.6 – Cristal de silício com um átomo de fósforo (Cristal N).

[1] Imagem Sumco Corporation, <http://www.sumcosi.com/english/products/lineup.html>

Podemos imaginar que se trata de um elétron livre, porém isso não é verdade. O átomo de fósforo possui 5 elétrons na última camada, e este elétron está na estrutura cristalina por esse motivo. Porém, como pela teoria dos octetos são necessários 8 elétrons para ligação entre os elementos, este elétron excede o número de elétrons compartilhados na ligação.

Um cristal com impurezas pentavalentes é chamado de cristal N, pois, como sabemos o elétron possui carga negativa.

O processo de inserção de átomos na estrutura cristalina é chamado de “dopagem”. Praticamente todos os componentes semicondutores são dopados.

Seguindo o mesmo raciocínio, um cristal puro pode ser dopado com impurezas que possuem somente 3 elétrons na última camada, por exemplo, boro, alumínio e gálio. Neste caso faltará um elétron para ser compartilhado e chamaremos de cristal P.



Fig.7 – Cristal de silício com um átomo de boro (Cristal P).

Por possuírem elétrons faltando ou sobrando os cristais dopados são melhores condutores se comparados ao cristal sem impurezas. Os cristais puros são chamados cristais intrínsecos e os cristais com impurezas cristais extrínsecos.

2 O diodo

2.1) Formação da Junção PN

Unindo um cristal N com um cristal P, os elétrons do cristal N tenderão a preencher as lacunas (falta de elétron, representada com carga positiva) do cristal P.

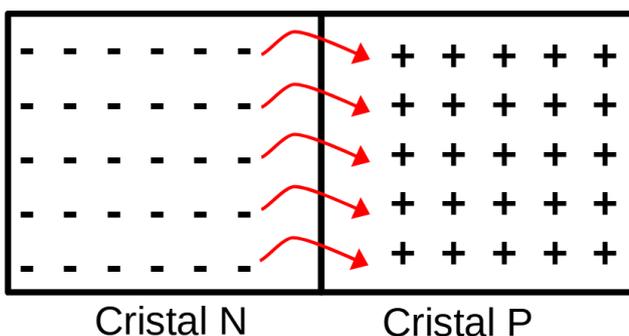


Fig.8 – Cristal N com cristal P formando uma junção PN.

Este deslocamento de cargas produz uma região chamada região de depleção, onde os elétrons que sobram na ligação do cristal N preenchem os espaços vazios do cristal P.

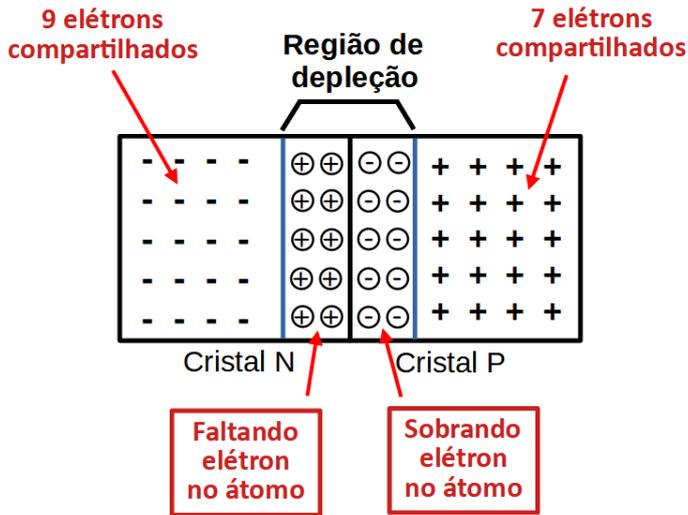


Fig.9 – Junção PN e a região de depleção.

2.2) A junção PN diretamente polarizada

A junção PN é a base de toda a eletrônica moderna. O componente mais simples formado por essa estrutura é o diodo. Para entender seu funcionamento vamos aplicar uma diferença de potencial (tensão elétrica) em uma junção PN e analisar o resultado.

Aplicando uma tensão positiva no cristal P e negativa no cristal N estamos injetando mais elétrons que poderão passar pela região de depleção em direção ao cristal P e ao mesmo tempo atraindo estes elétrons com o potencial positivo (lacunas) aplicado no cristal P, a junção PN funciona como um condutor de corrente elétrica.

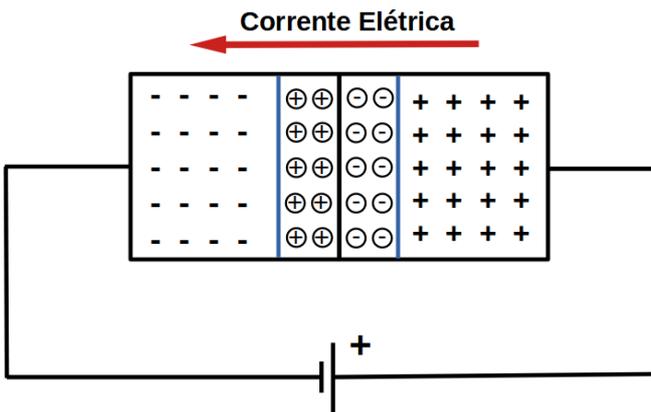


Fig.10 – Junção PN diretamente polarizada.

2.3) A junção PN reversamente polarizada

Invertendo o sentido da fonte, estamos aumentando o número de lacunas do cristal N e aumentando o número de elétrons do cristal P. Como consequência, haverá um aumento da região de depleção e nenhuma corrente circulará pelo circuito.

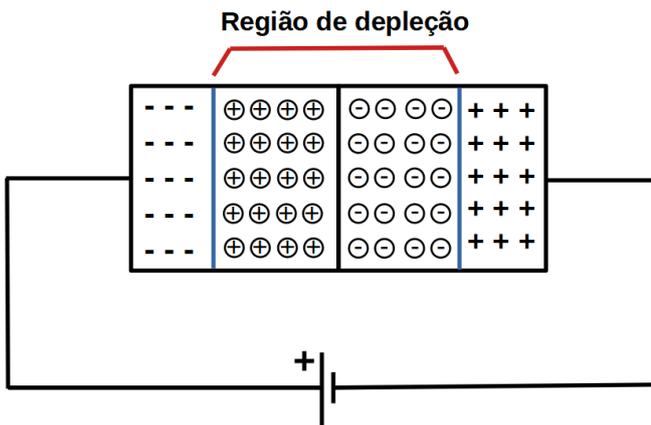


Fig.11 – Junção PN reversamente polarizada.

2.4) O diodo ideal

Na eletrônica dos semicondutores, o diodo é um componente formado de uma única junção PN tendo como principal característica a condução da corrente elétrica em um único sentido.

Fisicamente, no caso mais comum, possui dois terminais. O lado do cristal P é denominado anodo e o lado do cristal N é chamado de catodo, sendo utilizado o seguinte símbolo:

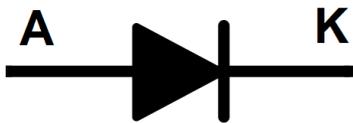


Fig. 12 – Símbolo do diodo (A – anodo, K – catodo).



Fig. 13 – Alguns encapsulamentos utilizados para os diodos.

No sentido convencional da corrente, esta circula do anodo para catodo. Neste modo dizemos que o diodo está diretamente polarizado.

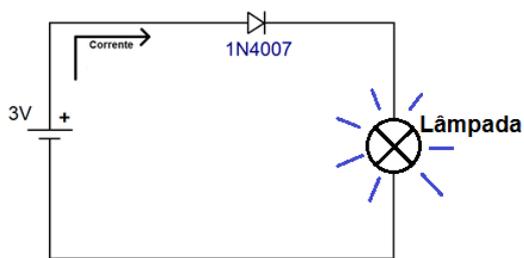


Fig. 14 – Circuito com diodo polarizado diretamente.

Perceba que a tensão positiva está no anodo. Uma vez que a tensão no anodo é maior que a do catodo o diodo está polarizado diretamente e conduz como se fosse uma chave fechada.

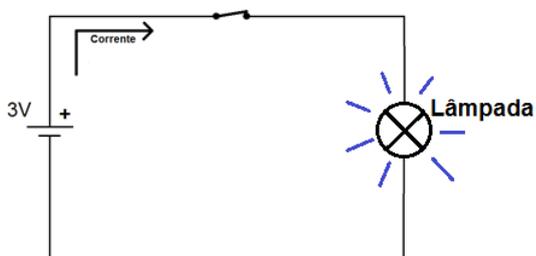


Fig. 15 – Circuito fechado representando o diodo polarizado diretamente.

Invertendo o sentido da fonte, a tensão mais positiva será aplicada no catodo. Nesta condição o diodo estará polarizado reversamente e não haverá circulação de corrente.

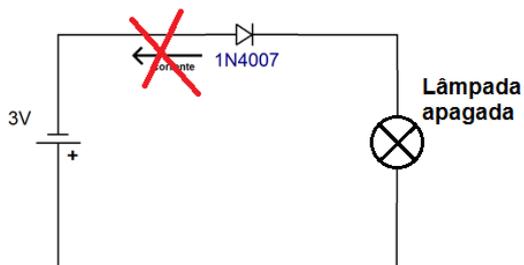


Fig. 16 – Circuito com diodo polarizado reversamente.

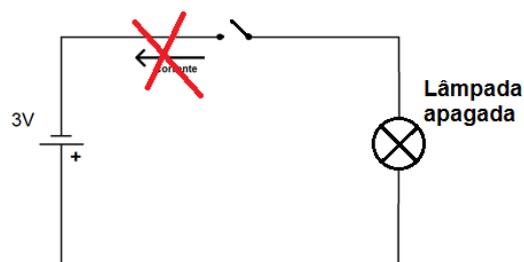
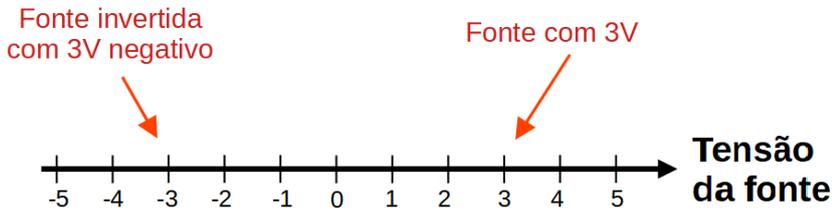


Fig. 17 – Circuito aberto representando o diodo polarizado reversamente.

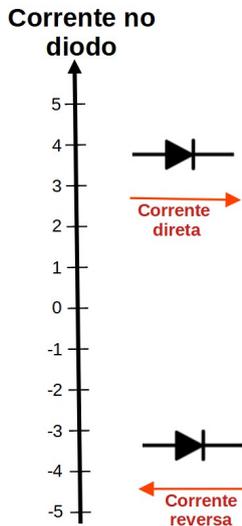
2.4.1) Curva de tensão no diodo ideal

A curva de resposta de um componente ou um circuito consiste em representar no plano cartesiano todas as variações de um determinado valor em função de outro. Para o diodo, podemos colocar no eixo X os valores de tensão da fonte. Por exemplo:



Perceba que estamos analisando a fonte nos dois sentidos. Os valores negativos indicam que a fonte está virada no sentido contrário, o valor zero é quando não existe tensão e os valores positivos são os valores da fonte no sentido normal indicado no esquema.

Continuando no mesmo raciocínio, podemos representar no eixo Y a corrente sobre o diodo:



Assim, para o diodo ideal temos a seguinte curva:

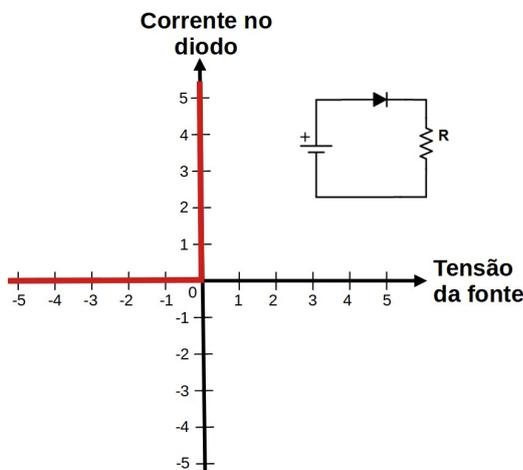


Fig. 18 – Curva de resposta do diodo ideal.

Como já mencionado, para valores negativos (fonte invertida) o diodo comporta-se como uma chave aberta e a corrente é zero. Para valores positivos de tensão, a corrente tende ao infinito pois o diodo conduz como uma chave fechada.

2.5) O diodo real

O diodo, como todos os componentes, não funciona de maneira ideal. Para que ocorra circulação de corrente na polarização direta, a fonte deve ser maior que um certo valor. Este valor é chamado por alguns autores de tensão de disparo, tensão de offset ou tensão limiar (em inglês threshold) representada como V_T .

De uma maneira geral temos:

$$V_T = 0,7V \text{ (Silício)}$$

$$V_T = 0,3V \text{ (Germânio)}$$

Com esta nova informação, podemos alterar nossa curva de representação para algo mais real:

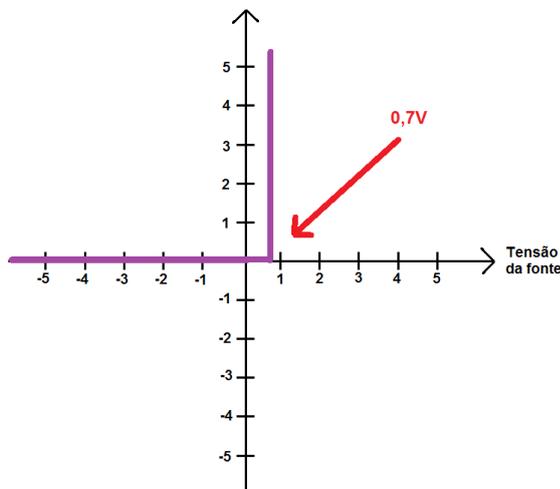


Fig. 19 – Curva de resposta aproximada do diodo de silício.

2.5.1) Curva de tensão do diodo real

A curva da fig. 19 é aproximada. Esta curva nos mostra que a partir de 0,7V o diodo conduz como uma chave fechada levando a corrente para valores muito altos, porém com uma queda de aproximadamente 0,7V. Nos diodos reais, a corrente aumenta aos poucos obedecendo a seguinte equação:

$$I_D = I_s (e^{KV_D/T_K} - 1)$$

Onde:

I_s = Corrente de saturação reversa

$K = 11.600/\eta$ com $\eta=1$ para o germânio e $\eta=2$ para o silício no início da curva

T_K = Temperatura em Kelvin ($T_K = \text{Temperatura em Celsius} + 273^\circ$)

e = Base do logaritmo natural $\approx 2,72$

V_D = Tensão aplicada no diodo

I_D = Corrente no diodo

Abaixo podemos ver a curva real do diodo de silício 1N4148 fabricado pela NXP.

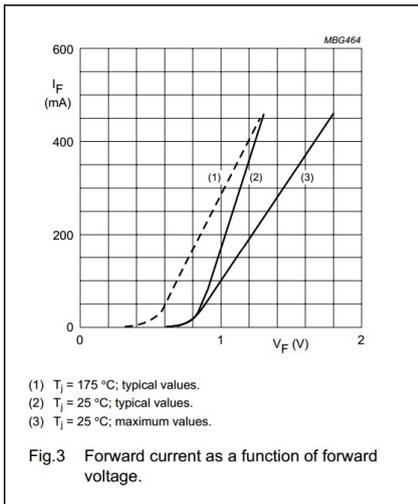


Fig. 20 – Curva de tensão x corrente direta do diodo 1N4148 da NXP.

Nesta curva, podemos observar vários pontos já comentados. Perceba que o fabricante traçou 3 curvas. Cada uma delas representa o comportamento do diodo em temperaturas e condições diferentes. A curva 2 é a curva da temperatura ambiente e normal de trabalho. O valor de T_K da equação provoca parte desta variação. A mudança na inclinação é devido a outros fatores não considerados nessa fórmula.

$$I_D = I_s \left(e^{KV_d/T_k} - 1 \right)$$

É importante salientar que, o valor de I_s dobra à cada 10°C e também muda a curva.

Analisando o início da curva, podemos ver uma variação exponencial. Mais uma vez podemos relacionar esta resposta à nossa equação, pois I_D varia de forma exponencial com as variações de V_D :

$$I_D = I_s \left(e^{KV_d/T_k} - 1 \right)$$

Podemos ver a curva começando em aproximadamente $0,6\text{V}$ e não $0,7\text{V}$ como esperado. Isso ocorre nos componentes práticos e varia com a dopagem, área do componente e outros parâmetros definidos na fabricação. Para o 1N4148 a NXP especifica valores entre $0,62\text{V}$ e $0,72\text{V}$ como valores normais esperados.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

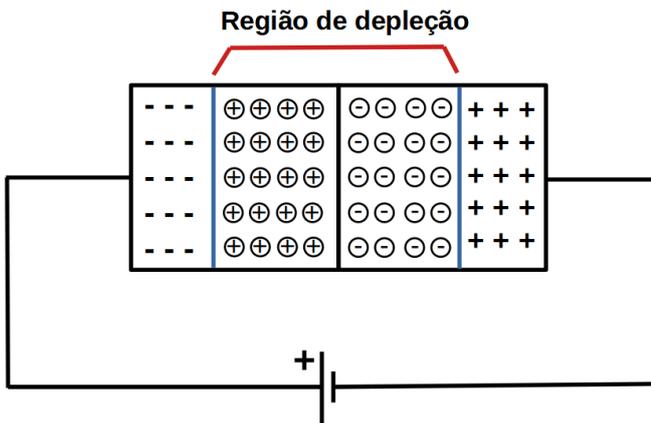
$T_j = 25\text{ °C}$ unless otherwise specified.

| SYMBOL | PARAMETER | CONDITIONS | MIN. | MAX. | UNIT |
|--------|-----------------|-----------------------|------|------|------|
| V_F | forward voltage | see Fig.3 | | | |
| | 1N4148 | $I_F = 10\text{ mA}$ | - | 1 | V |
| | 1N4448 | $I_F = 5\text{ mA}$ | 0.62 | 0.72 | V |
| | | $I_F = 100\text{ mA}$ | - | 1 | V |

Fig. 21 – Queda de tensão sobre o diodo 1N4148 em polarização direta.

2.5.2) Tensão de pico reversa (TPR)

Como é de se imaginar, um diodo polarizado reversamente conduz corrente no sentido reverso até um certo limite de tensão. Observando a figura 11, reproduzida abaixo, podemos ver o aumento da região de depleção provocado pela tensão reversa. Se esta tensão for muito alta, a região de depleção atinge o final do componente e o diodo passa a conduzir. A região da curva onde isso ocorre é chamada de Região de Breakdown, ou Região Zener.



Abaixo temos a curva de corrente em função da tensão do diodo, em destaque a Região Zener.

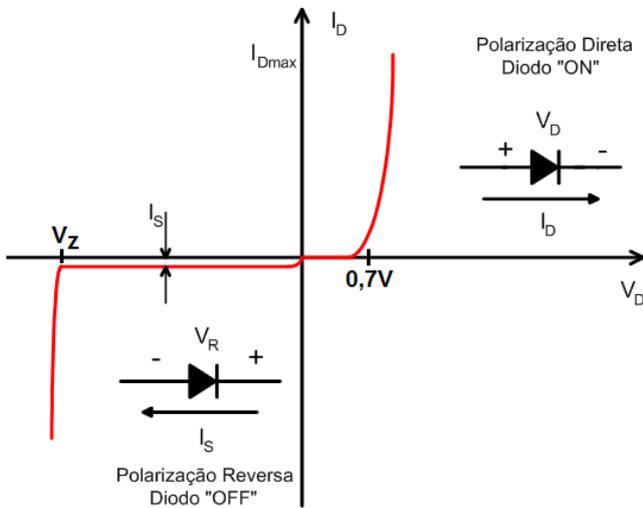


Fig. 22 – Curva de tensão x corrente destacando a Região Zener.

Desta forma, devemos tomar muito cuidado para não ultrapassar esse limite, principalmente quando substituímos componentes danificados. Os fabricantes denominam este valor limite como TPI (tensão de pico inversa), TPR (tensão de pico reversa), V_{RRM} , V_R entre outros.

| Characteristic | Symbol | 1N4001 | 1N4002 | 1N4003 | 1N4004 | 1N4005 | 1N4006 | 1N4007 | Unit |
|---------------------------------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| Peak Repetitive Reverse Voltage | V_{RRM} | | | | | | | | |
| Working Peak Reverse Voltage | V_{RWM} | 50 | 100 | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 | V |
| DC Blocking Voltage | V_R | | | | | | | | |
| RMS Reverse Voltage | $V_{R(RMS)}$ | 35 | 70 | 140 | 280 | 420 | 560 | 700 | V |

Fig. 23 – Especificação da TPR dos diodos da série 1N4001

3 Circuitos com diodos

3.1) Circuito série com entrada DC

O circuito abaixo ilustra uma aplicação de um circuito série com diodo retificador de silício 1N4007 polarizado diretamente:

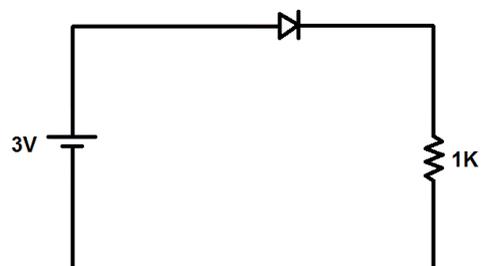
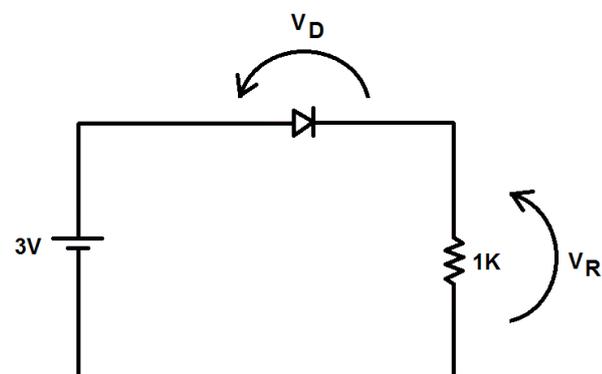


Fig. 24 – Circuito com fonte DC e diodo em série.

Neste circuito, claramente o diodo está polarizado diretamente, pois o lado positivo da fonte está ligado ao anodo, assim o “anodo está mais positivo que o catodo”, condição essa que caracteriza a polarização direta.

A princípio podemos pensar que, como o diodo está conduzindo e a tensão em cima da resistência é de 3V, porém isso não é verdade. Como o diodo de silício conduz somente a partir de 0,7V, **sempre existirá uma queda de tensão de 0,7V sobre ele**. Assim, teremos:



Onde:

$$V_D = 0,7V$$

$$V_R = 3 - 0,7 = 2,3V$$

Ou seja, apesar da fonte fornecer 3V, devido à queda de tensão de 0,7V no diodo, teremos uma tensão de somente 2,3V sobre a resistência.

Obs:

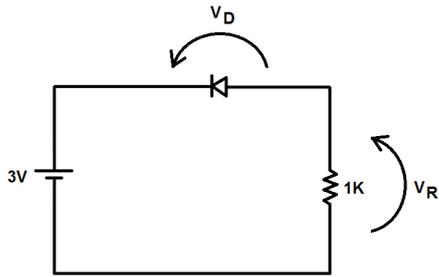
Se o diodo utilizado fosse de germânio teremos:

$$V_D = 0,3V$$

$$V_R = 3 - 0,3V = 2,7V$$

Obs: Quando não indicado considere o diodo como de Silício, diodos de germânio são especiais.

Considere agora o mesmo circuito com diodo invertido. Qual é a tensão V_D e qual é a tensão V_R ?



Resposta:

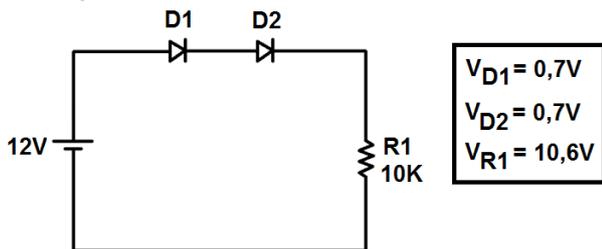
Como o diodo está polarizado reversamente (a tensão no anodo é menor que a tensão no catodo), não existe corrente, assim não existe tensão sobre a resistência e a tensão está totalmente sobre o diodo que não conduz.

$$V_D = 3V$$

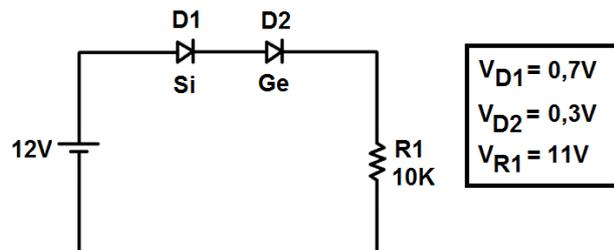
$$V_R = 0V$$

Seguem abaixo alguns exemplos deste tipo de circuito:

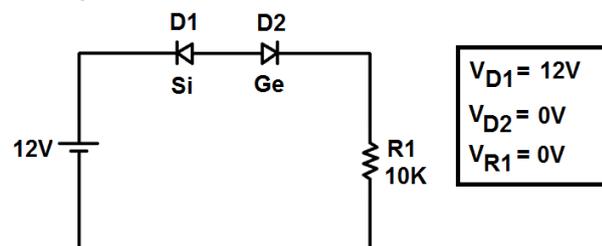
Exemplo 1:



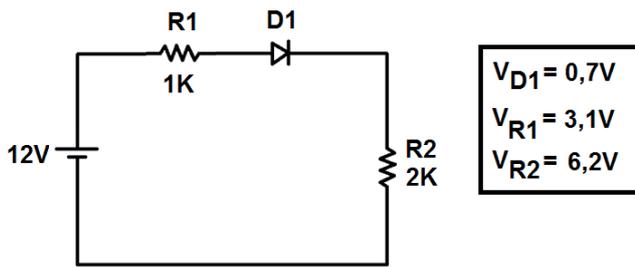
Exemplo 2:



Exemplo 3:



Exemplo 4:



3.2) Circuito paralelo com entrada DC

Vimos que o diodo com polarização direta em um circuito com corrente contínua sempre apresenta uma queda de 0,7V para o diodo de silício e 0,3V para o diodo de germânio. Vamos agora analisar qual é o valor da tensão V_o no circuito abaixo.

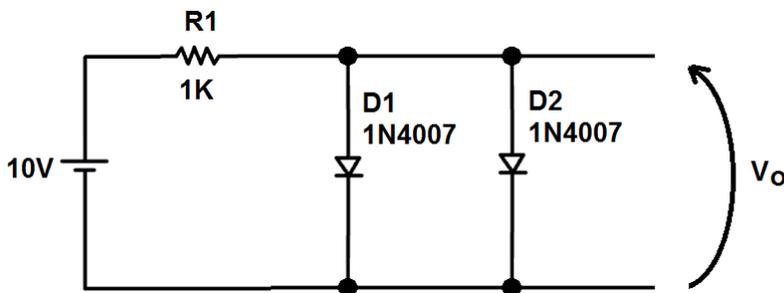


Fig. 25 – Circuito com fonte DC e diodo em paralelo.

Se fosse utilizado somente um diodo, com certeza diríamos que a tensão é 0,7V pois sabemos que o diodo 1N4007 é um diodo retificador de silício. Como existem dois caminhos iguais a corrente se divide entre os dois diodos. Porém, ao contrário do circuito com resistências, a queda de tensão não é alterada. No circuito com resistências, o que provoca a queda de tensão é a dificuldade que essa oferece à passagem da corrente elétrica, colocando duas resistências em paralelo você diminui essa dificuldade. No circuito com diodo, a queda de tensão se deve às propriedades já estudadas da junção PN. Assim, os dois diodos só começam a conduzir quando a tensão atinge 0,7V. Assim, neste circuito, $V_o = 0,7V$.

Vamos agora analisar um circuito com diodos diferentes:

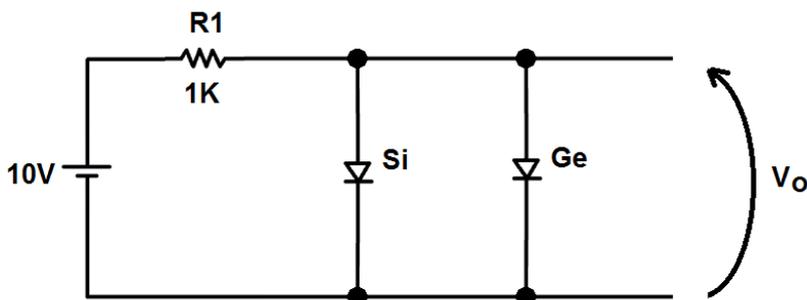


Fig. 26 – Circuito com fonte DC e diodo em paralelo diferentes.

No circuito acima temos um diodo de germânio, que começa a conduzir em 0,3V e um diodo de silício que começa a conduzir em 0,7V.

Sabemos que, teoricamente, após iniciar a condução, o diodo permanece com uma tensão fixa (0,3V para o germânio e 0,7V para o silício) sobre ele. Como o diodo de germânio inicia a

condução antes, esta tensão permanece em 0,3V e nunca atinge a tensão necessária para que o diodo de silício conduza. Assim, a corrente circula somente pelo diodo de germânio e a tensão V_o permanece em 0,3V.

3.3) Circuito paralelo com entrada DC (diodo real)

Vimos que, o valor de 0,7V é um valor adotado como fixo para todos os diodos de silício. Vimos também que, na realidade existe uma curva, e este valor varia com a corrente e a temperatura do circuito (fig. 20).

Variando a fonte do circuito da fig. 26, e traçando a curva real da queda de tensão sobre o diodo de silício com o diodo de germânio desligado temos:

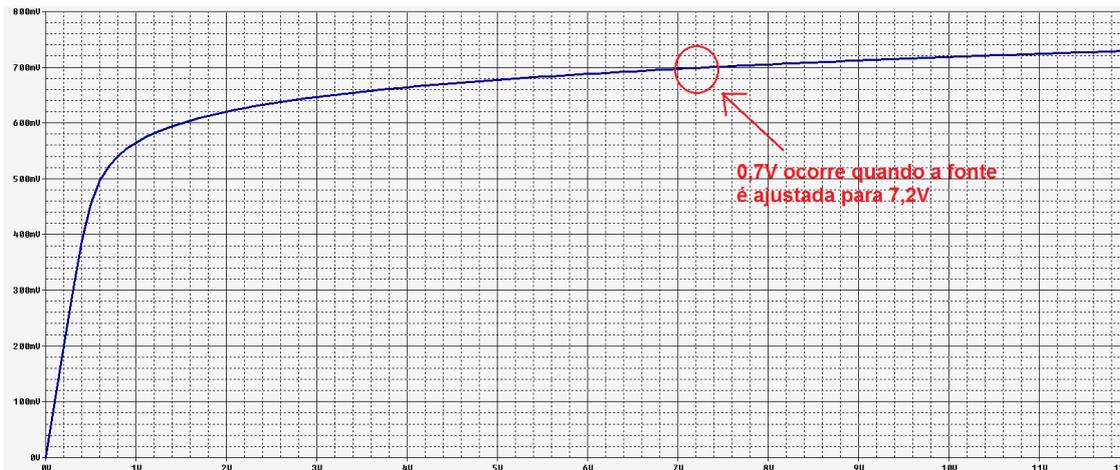


Fig. 27 – Queda de tensão sobre o diodo de silício x tensão da fonte.

Fazendo o mesmo para o diodo de germânio de sinal temos:

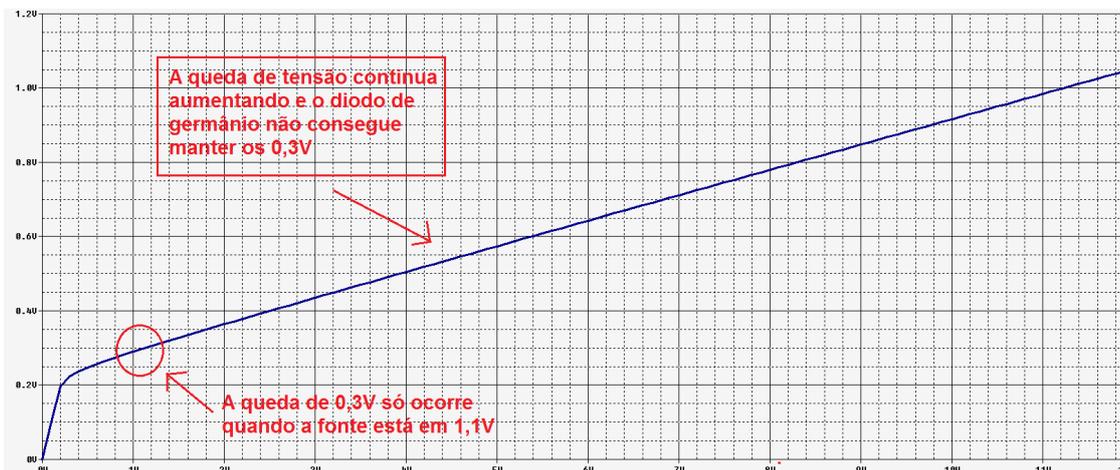


Fig. 28 – Queda de tensão sobre o diodo de germânio x tensão da fonte.

Como o diodo de germânio real não consegue manter os 0,3V teóricos, a tensão aumenta e o diodo de silício começa a conduzir. Abaixo, podemos ver a curva dos dois diodos e a queda de tensão sobre eles quando estão em paralelo. Um diodo de germânio de alta potência teoricamente conseguiria manter a tensão próxima de 0,3V, porém estes não são mais fabricados.



Fig. 29 – Queda de tensão sobre o diodo de germânio e silício x tensão da fonte.

3.5) Entrada senoidal, retificador de meia onda

A tensão alternada senoidal é uma tensão que varia com o tempo e inverte sua polaridade.

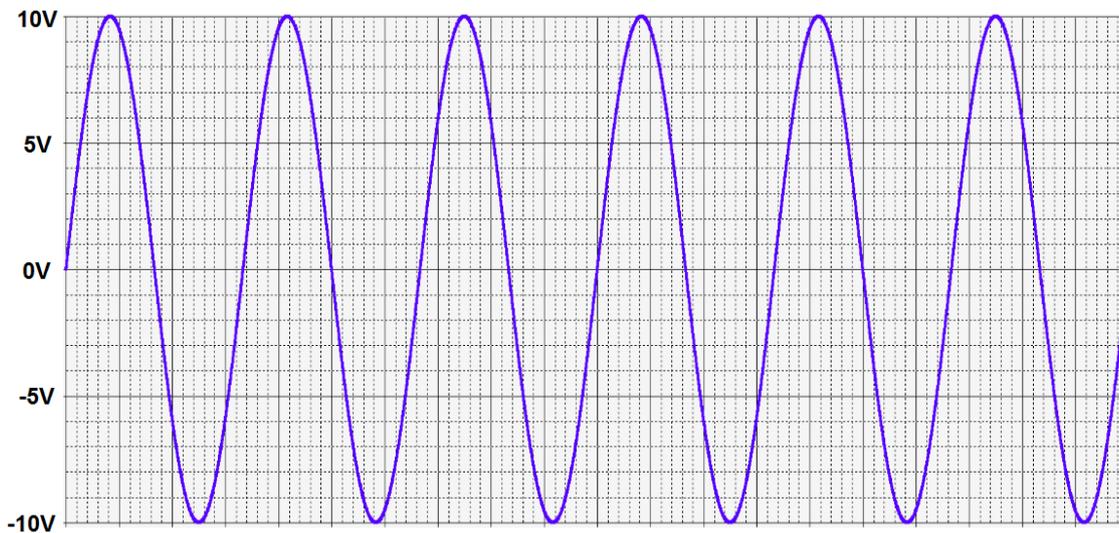


Fig. 32 – Forma de onda da tensão alternada senoidal.

Neste exemplo, o valor máximo da tensão é de 10V positivo e o valor mínimo é de 10V negativo. Este tipo de forma de onda é estudada no curso de eletricidade. Para nossa análise vamos considerá-la como sendo uma fonte de tensão que varia com o tempo.

Para diferenciá-la da fonte de tensão contínua, neste curso vamos usar a seguinte representação:



Fig. 33 – Símbolo da fonte de tensão alternada senoidal.

Antes de prosseguirmos vamos definir um novo valor de tensão chamado tensão eficaz (rms) que é mais utilizado que a tensão de pico. Este valor é estudado no curso de eletricidade. A relação entre tensão eficaz e tensão de pico é:

$$V_{rms} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}$$

Quando não indicado com o índice 'p' a tensão alternada está em rms (eficaz).

V = 10V ← Valor eficaz

Vp = 14,1V ← Valor de pico

O circuito abaixo apresenta uma configuração que é chamada de circuito retificador de meia onda:

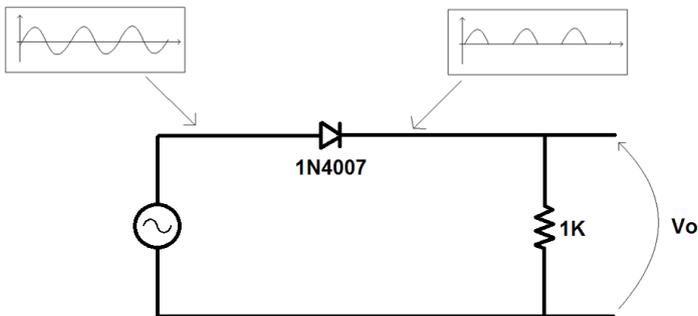


Fig. 34 – Circuito retificador de meia onda.

Inicialmente observe que a fonte é alternada senoidal, desta forma, metade do tempo a tensão está positiva e metade do tempo está negativa. Durante o ciclo positivo (parte positiva da onda) o diodo está polarizado diretamente e conduz fornecendo a tensão ao resistor e à saída Vo.

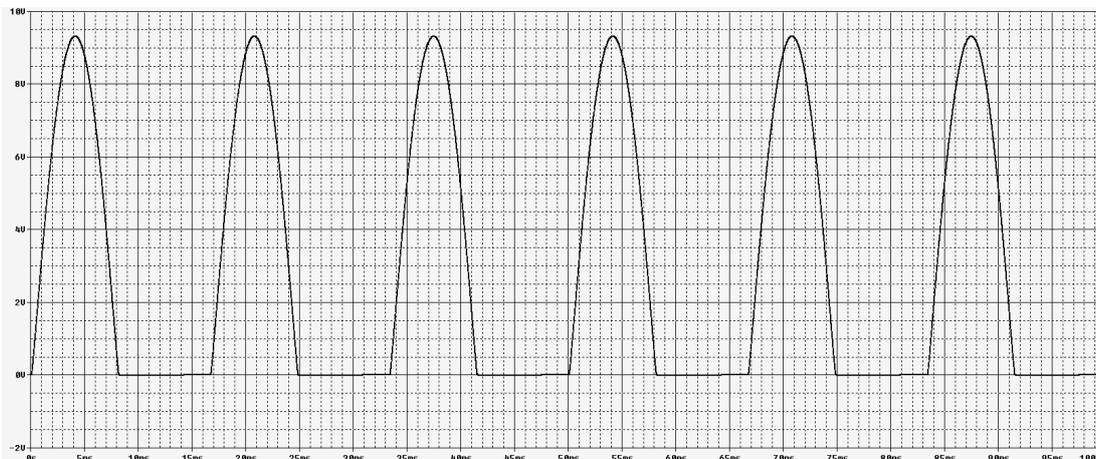


Fig. 35 – Sinal de saída do retificador de meia onda.

Durante o ciclo negativo o diodo fica polarizado reversamente, e nenhuma tensão aparece na saída. Este tipo de circuito é muito utilizado em fontes de alimentação pois é o primeiro passo que permite a transformação da tensão alternada em tensão contínua.

Para o retificador de meia onda, podemos calcular a tensão média de saída (soma das áreas acima e abaixo do eixo em um período) da seguinte forma:

$$V_{\text{média}} = \frac{V_{\text{máxima}}}{\pi}$$

Ou

$$V_{\text{média}} = 0,318 \cdot V_{\text{max}}$$

Exemplo: Uma tensão alternada de 22V de pico é retificada em meia onda. Calcular a tensão média na saída do retificador sem filtros.

Resposta:

$$V_{\text{média}} = \frac{22}{3,1415}$$

$$V_{\text{média}} = 7 \text{ V}$$

Um valor importante a ser observado é a tensão de pico reversa (TPR) máxima que o diodo deve suportar. No retificador de meia onda isso é definido pelo valor máximo do ciclo negativo da onda também chamado de tensão de pico (V_p).

$$TPR \geq V_p$$

3.6) Retificador de onda completa com center tap

Para entender como funciona o retificador de onda completa, precisamos conhecer os conceitos básicos de outro componente: O transformador.

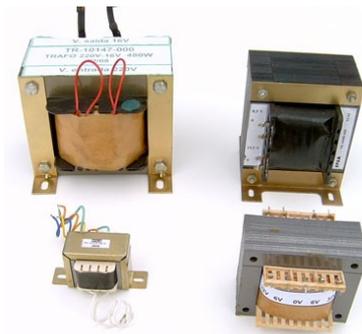


Fig. 36 – Transformadores.

O transformador é um componente que trabalha com tensões e correntes alternadas transformando seus valores.

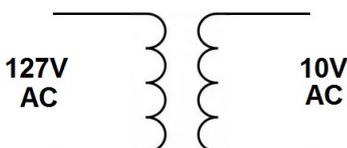


Fig. 37 – Símbolo do transformador.

No exemplo acima a tensão alternada senoidal de 127V existente entre os dois fios da entrada é transformada em uma tensão alternada senoidal de 10V entre os dois fios da saída.

Se o transformador possuir um fio ligado ao centro do enrolamento de saída (center tap), teremos metade da tensão de saída entre o centro e qualquer uma das pontas.

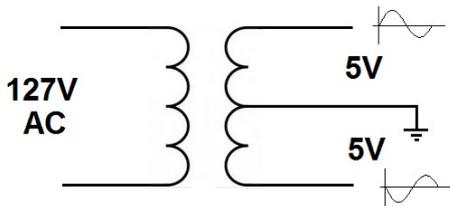


Fig. 38 – Transformador com center tap ligado ao terra.

Como mencionado, o retificador de meia onda é um circuito que pode ser utilizado como parte de um circuito para transformar a tensão alternada em tensão contínua. Porém, ele tem uma grande desvantagem: durante o ciclo negativo da tensão alternada, nenhuma tensão é fornecida à saída pelo diodo.

Em circuitos de baixo consumo e circuitos que não necessitam de uma tensão contínua regulada, os retificadores de meia onda podem ser utilizados. Porém, a grande maioria dos circuitos utiliza o retificador de onda completa em sua fonte de alimentação, conforme descrito abaixo:

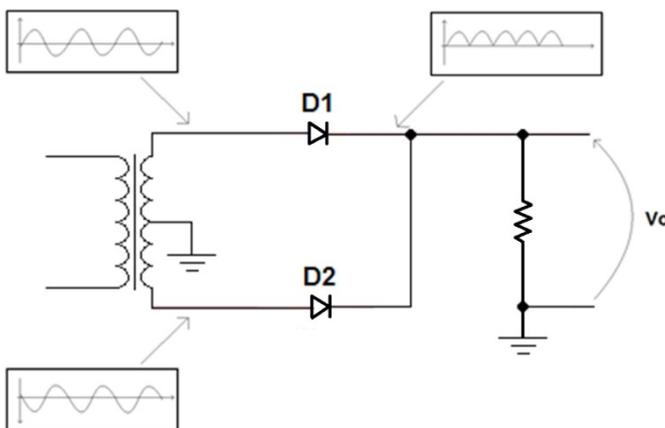


Fig. 39 – Circuito retificador em onda completa com center tap.

Como pode ser visto, quando a tensão no anodo de D1 está positiva, em D2 a tensão está negativa. O sinal na saída é resultado da soma dos sinais de D1 e D2.

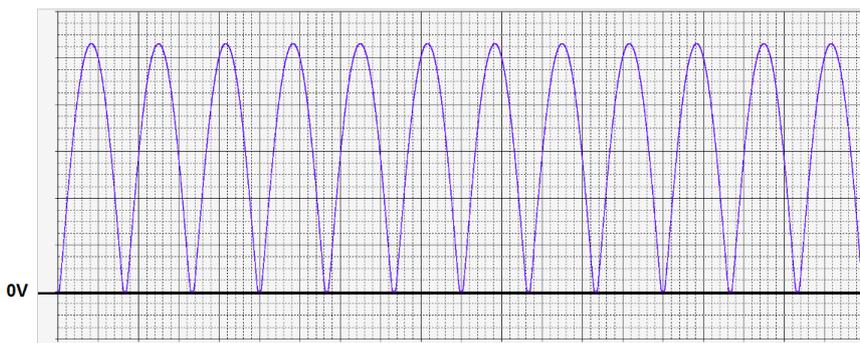
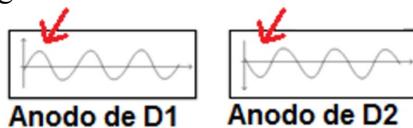


Fig. 40 – Tensão no anodo dos diodos em relação ao terra e sinal na resistência de carga.

Quando D1 está polarizado diretamente D2 está polarizado reversamente. Supondo uma tensão máxima (tensão de pico) da onda de 5 volts, no momento de pico (valor máximo) temos:

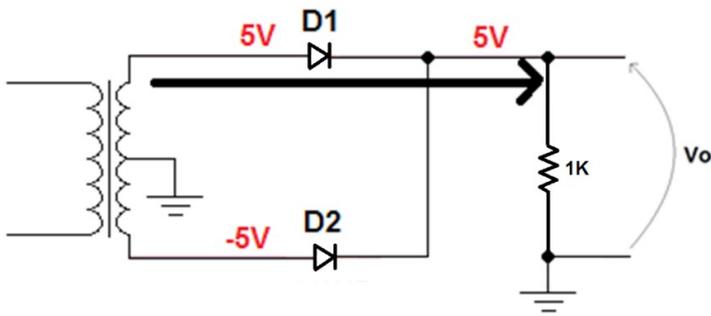


Fig. 41 – Diodo ideal D1 polarizado diretamente fornecendo 5V à saída.

Durante o ciclo negativo no anodo de D1, temos o ciclo positivo no anodo de D2:

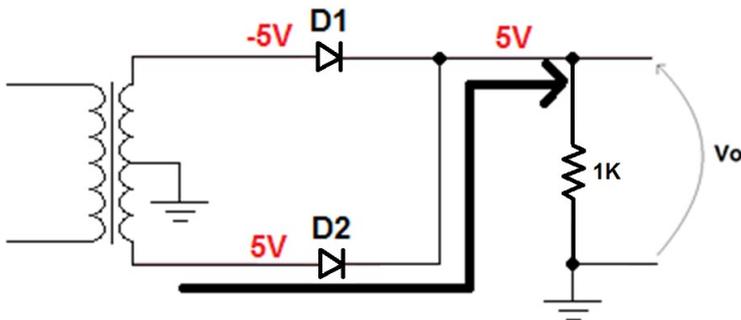


Fig. 42 – Diodo ideal D2 polarizado diretamente fornecendo 5V à saída.

A tensão média neste circuito é o dobro da tensão média fornecida pelo circuito de meia onda:

$$V_{média} = \frac{2 \cdot V_{máxima}}{\pi}$$

Ou seja, a tensão média é aproximadamente 0,636 do valor máximo.

$$V_{média} = 0,636 \cdot V_p$$

Um problema da retificação em onda completa com center tap é a tensão reversa de pico (TRP), que como pode ser observado nas figuras 42 e 43 corresponde ao dobro da tensão de pico.

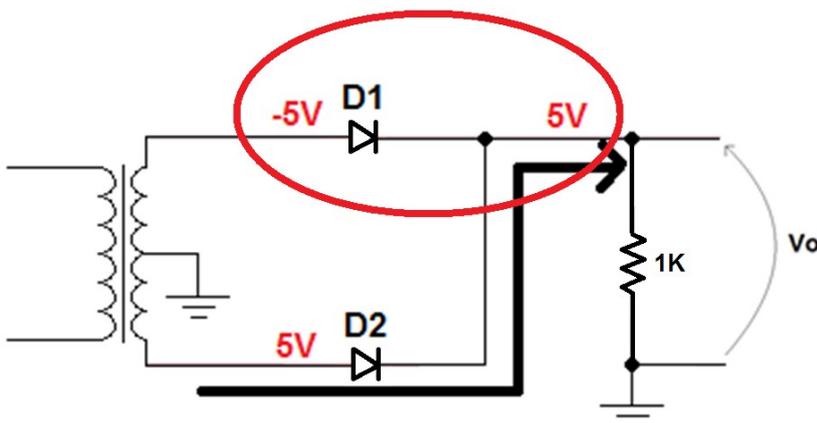


Fig. 43 – Tensão sobre o diodo nos picos de tensão da onda.

Observando o destaque na figura 43, podemos ver que no momento de pico, a tensão reversa em D1 é o dobro da tensão de pico da onda senoidal, ou seja 10V (-5V no anodo e 5V no catodo). Assim, para o retificador em onda completa com center tap:

$$TPR \geq 2 \cdot V_p$$

3.7) Retificador de onda completa em ponte

Uma das desvantagens do retificador em onda completa com center tap é a necessidade de se utilizar um transformador com uma saída de dois enrolamentos, pois, na prática utiliza-se o dobro de fio e um transformador fisicamente maior para se obter o center tap e as tensões desejadas.

Podemos utilizar um transformador simples, sem o center tap e obter os mesmos benefícios do retificador com center tap utilizando um circuito chamado de retificador em ponte.

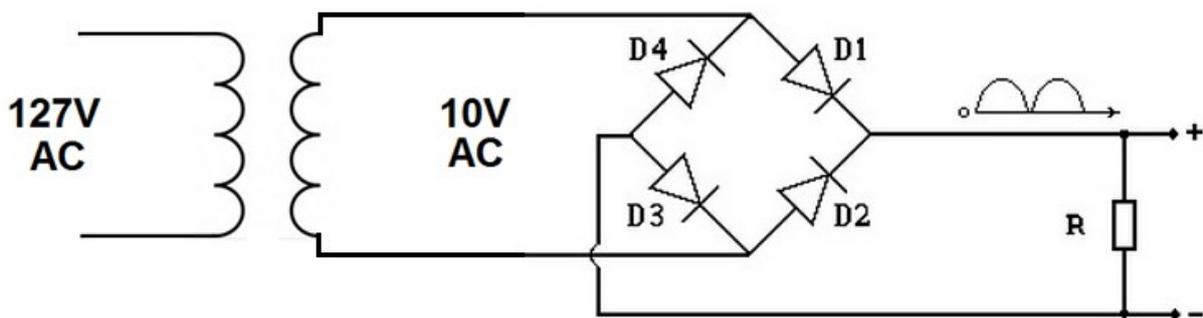


Fig. 44 – Circuito retificador em onda completa em ponte.

Inicialmente vamos considerar o ciclo positivo com uma tensão positiva no anodo de D1:

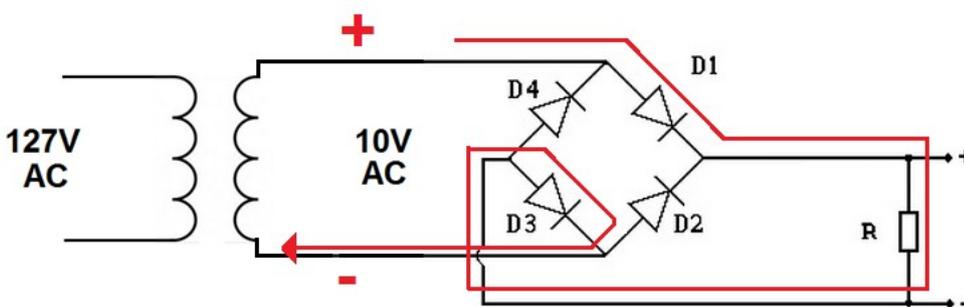


Fig. 45 – Sentido da corrente no semiciclo positivo da tensão.

A corrente circula somente pelos diodos polarizados diretamente, assim a corrente passa por D1, em seguida passa pela resistência R no sentido de cima para baixo e finalmente passa por D3 fechando o circuito.

Analisando agora o ciclo negativo com a tensão no anodo de D1 negativa temos:

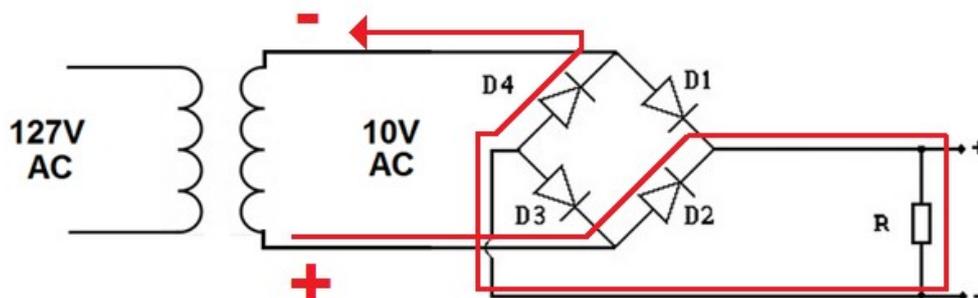


Fig. 46 – Sentido da corrente no semiciclo negativo da tensão.

Agora, a corrente passa por D2, em seguida passa pela resistência R no sentido de cima para baixo e finalmente passa por D4 fechando o circuito.

Perceba que, da mesma forma que no retificador com center tap, a corrente passa no mesmo sentido sobre a resistência.

O valor da tensão média é obviamente o mesmo que do center tap, ou seja:

$$V_{média} = \frac{2 \cdot V_{máxima}}{\pi}$$

ou

$$V_{média} = 0,636 \cdot V_p$$

Com relação ao valor da TPR nos diodos, o retificador em onda completa em ponte mais uma vez leva vantagem com relação ao retificador com center tap.

A TPR mínima exigida dos diodos é de:

$$TPR \geq V_p$$

Uma desvantagem do retificador em ponte é que, em circuitos práticos os diodos de silício apresentam queda de tensão de 0,7V. Assim, se o transformador fornece 5V de pico, nos retificadores de meia onda e center tap a tensão que chega a carga é de:

$$V_{saída} = V_p - 0,7V$$

Sendo $V_p = 5V$ teremos 4,3V na saída.

Para o retificador em ponte, temos dois diodos conduzindo em série. Assim temos uma queda de:

$$V_{saída} = V_p - 1,4V$$

Para $V_p = 5V$ teremos 3,6V na saída do retificador em ponte.

4 Fontes de alimentação

Os circuitos eletrônicos, para funcionarem corretamente, necessitam de uma tensão que, normalmente não é a tensão alternada fornecida pelas companhias de energia. De uma maneira geral, uma fonte de alimentação é um circuito que converte a tensão alternada da rede elétrica em uma tensão contínua com capacidade de corrente suficiente para “alimentar” os circuitos eletrônicos.

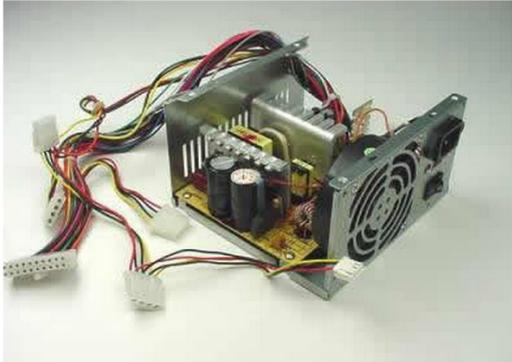


Fig. 47 – Fontes de alimentação.

4.1) Fonte com retificador e filtro capacitivo simples

Estudamos os retificadores de meia onda e os retificadores em onda completa. Estes circuitos são utilizados em fontes de alimentação, pois fazem a importante tarefa de fornecer um sinal positivo ou negativo sem inversão.

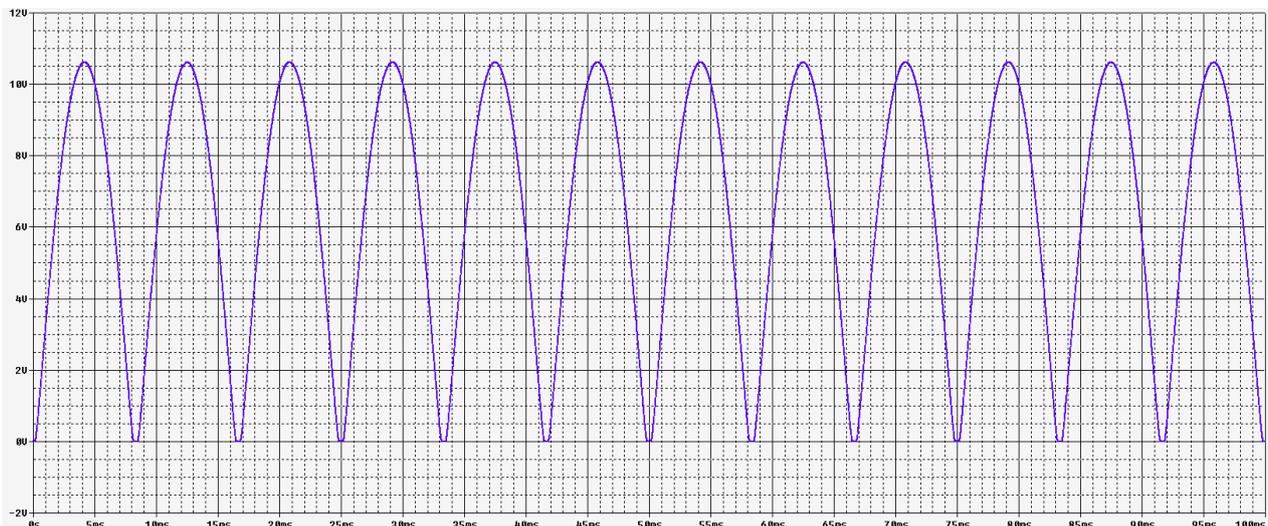


Fig. 48 – Tensão fornecida a uma carga após a retificação em onda completa.

Como visto, a tensão contínua desta onda é calculada por:

$$V_{DC} = 0,636 \cdot V_{max}$$

A tensão acima pode ser obtida pelo seguinte circuito:

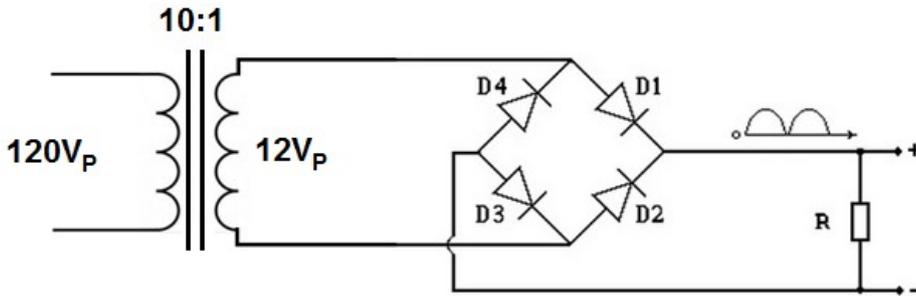


Fig. 49 – Circuito retificador em ponte.

A relação 10:1 indica que, o transformador diminui a tensão na proporção de 10 para 1. Se observarmos a forma de onda na fig. 48, vamos perceber que a tensão de pico não atinge os 12V. Como explicado anteriormente, existe uma queda de tensão de 0,7 nos diodos de silício. No retificador em ponte a corrente sempre passa por dois diodos, assim ocorre uma queda de 1,4V. Não se usam diodos de germânio em retificadores de fonte de alimentação.

A tensão retificada não inverte de polaridade, porém, está muito longe de ser uma tensão contínua (fixa em um único valor). Para transformar esses pulsos de tensão em uma tensão contínua usamos um componente chamado capacitor.

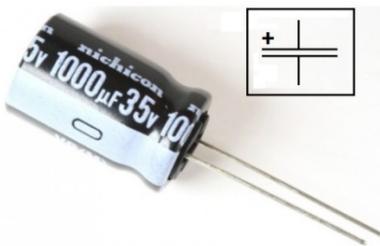


Fig. 50 – Capacitor eletrolítico usado como filtro e seu símbolo.

O capacitor é capaz de armazenar uma tensão e fornecê-la como se fosse uma bateria carregada. Utilizando o capacitor como filtro em nosso circuito retificador temos:

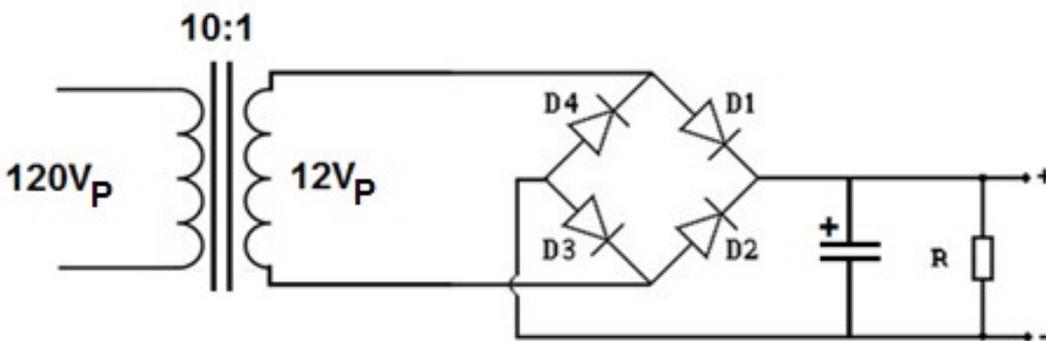


Fig. 51 – Circuito retificador em ponte com filtro.

Vejamos agora como fica nossa tensão na carga:

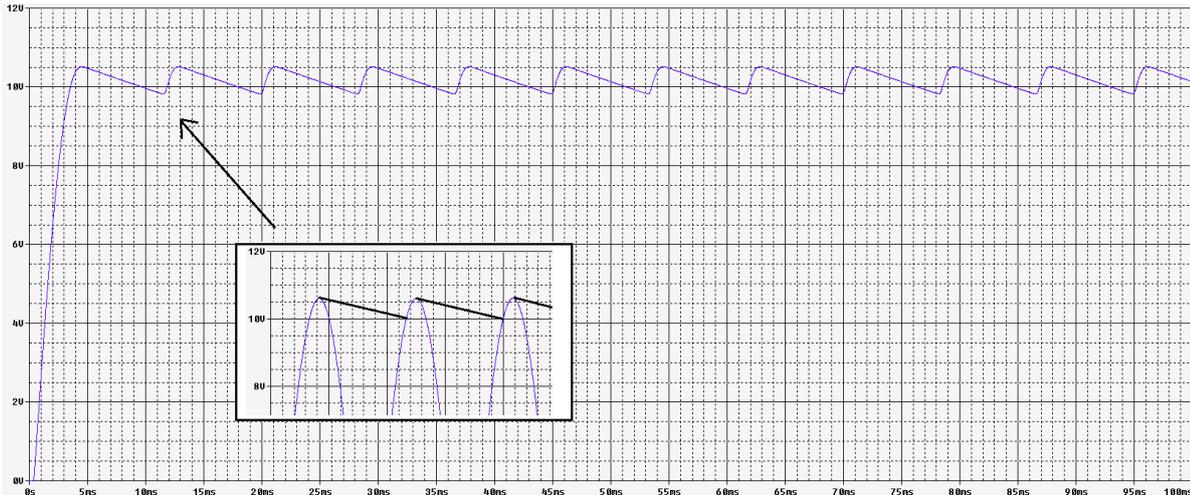


Fig. 52 – Efeito do capacitor no sinal de saída.

Neste circuito, o capacitor carrega com a tensão máxima fornecida pelo retificador. Quando a tensão cai, o capacitor continua carregado e começa a descarregar fornecendo corrente à carga (representada pelo resistor R). Com o uso do capacitor, temos um sinal quase contínuo próximo de 10V.

4.1.1) Fator de ripple

A tensão de saída fornecida pelo retificador em onda completa com filtro capacitivo é uma tensão contínua com uma variação que podemos considerar como tensão alternada. Esta tensão alternada que ocorre sobre a tensão contínua é chamada de tensão de ripple.

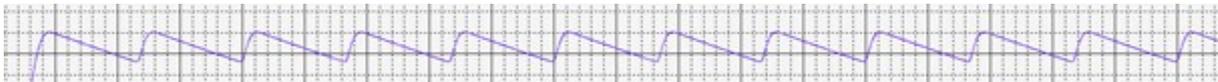


Fig. 53 – Tensão de ripple.

O fator de ripple é uma relação que permite avaliar a qualidade de uma fonte de alimentação DC (tensão contínua) em relação ao ripple.

$$r = \frac{V_r (rms)}{V_{dc}}$$

Assim, devemos medir o valor da tensão alterna (tensão de ripple) em rms e dividir pela tensão contínua.

4.1.2) O cálculo exato da tensão de ripple

Existem várias fórmulas na literatura que permitem estimar a tensão de ripple, porém todas elas falham na maioria dos testes práticos, pois são definidas através de aproximação.

Até a década de 80 era comum a utilização de curvas que permitiam com uma boa aproximação a resolução de problemas como este. No caso específico do cálculo do ripple, era possível utilizar as Curvas de Shade.

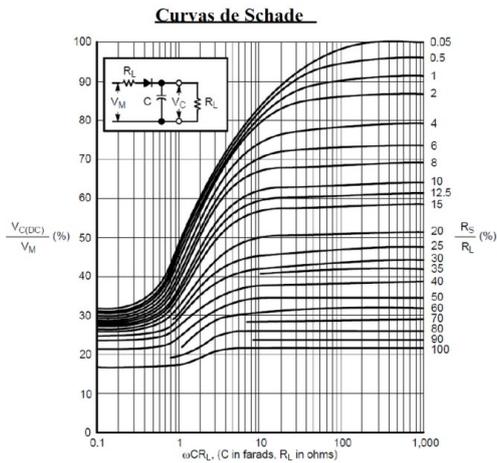


Fig. 54 – Antiga curva de Shade.

Atualmente, os modelos matemáticos dos componentes (modelos SPICE) permitem calcular com exatidão o comportamento e a resposta de um circuito antes da montagem física. Estes modelos são utilizados por programas como Proteus, Cadence, Tanner, HSpice entre outros.

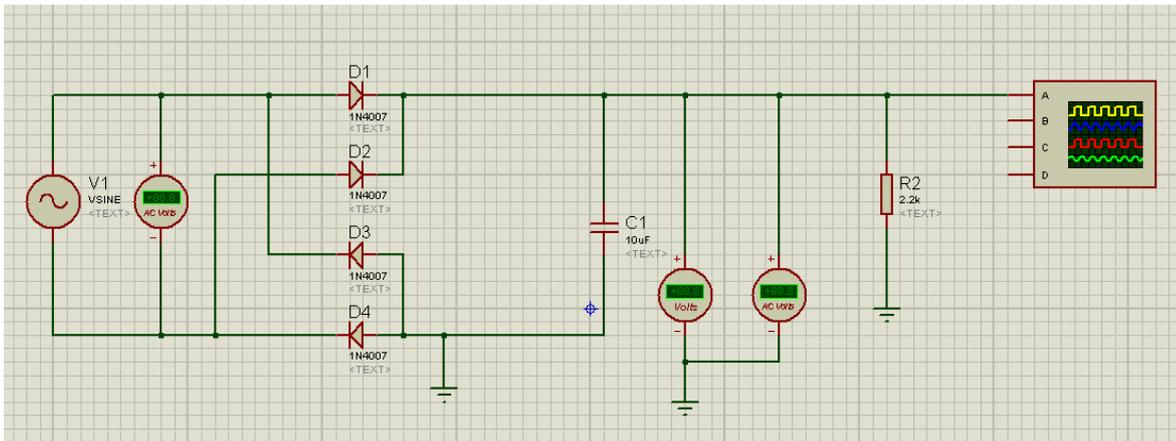


Fig. 55 – Circuito de teste montado no programa Proteus.

A simulação com modelos SPICE oferece resultados muito precisos e é amplamente utilizada em projetos amadores e profissionais em todo o mundo.

É importante salientar ainda que, a maioria dos fabricantes fornecem o modelo Spice dos componentes fabricados. Desta forma, é altamente recomendável utilizar o modelo fornecido pelo fabricante quando se deseja uma maior precisão nas respostas do simulador.

4.1.3) O cálculo aproximado da tensão de ripple

Para que possamos ter uma referência teórica, vamos utilizar a seguinte fórmula:

$$V_r (rms) = \frac{I_{dc}}{4 \cdot \sqrt{3} \cdot f \cdot C}$$

Onde:

I_{dc} = corrente consumida pela carga em amperes (A)

f = frequência do sinal de ripple (Hz)

C = capacitância em farads (F)

É importante observar que, para o retificador em onda completa a **frequência do ripple é o dobro da frequência da tensão senoidal de entrada**. Para a rede elétrica com 60Hz, o ripple possui uma frequência de 120Hz em onda completa e 60Hz em meia onda. Em amplificadores de áudio, por exemplo, o ripple, se não filtrado corretamente, aparece amplificado na saída do mesmo e percebido como ruído.

O cálculo do valor da tensão média depende da tensão de ripple e também não é possível calcular com exatidão. Neste curso, utilizaremos o valor de pico como valor médio, uma vez que vamos trabalhar com valores pequenos de ripple.

$$V_m \simeq V_{pico}$$

Exemplo:

Calcular a tensão de ripple de uma fonte de $10V_{pico}$ com retificador em onda completa, alimentada na rede elétrica de 60Hz com capacitor de 100uF quando alimenta uma carga de 200Ω .

Resposta:

Como vamos considerar a tensão média como tensão de pico, a corrente na carga pode ser calculada pela lei de Ohm.

$$I_{dc} = \frac{10}{200}$$

$$I_{dc} = 50 \cdot 10^{-3} \text{ mA}$$

$$V_r(rms) = \frac{I_{dc}}{4 \cdot \sqrt{3} \cdot f \cdot C}$$

$$V_r(rms) = \frac{50 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot \sqrt{3} \cdot 120 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}$$

$$V_r(rms) = 0,6 \text{ V}$$

4.2) Fonte com capacitor e filtro RC

Podemos reduzir ainda mais o ripple utilizando um filtro RC como mostra a figura abaixo:

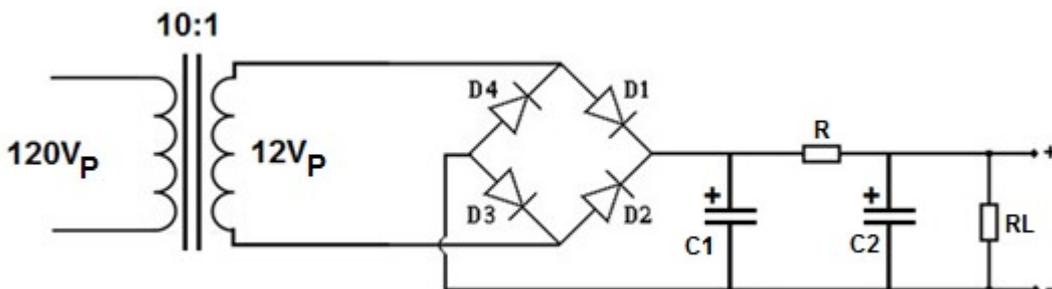


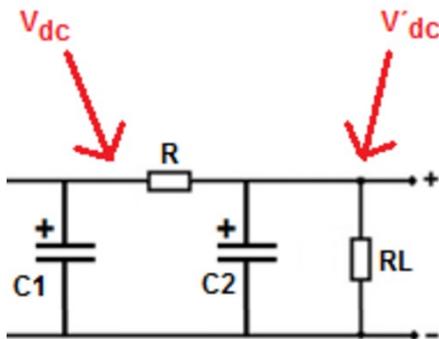
Fig. 56 – Fonte utilizando filtro RC.

O resistor R e o capacitor C2 formam um divisor de tensão para a tensão alternada. Assim, parte da tensão alternada fica sobre o resistor e chega atenuada na carga. O mesmo não acontece para a tensão contínua pois o capacitor não conduz em tensão contínua. Assim, a parte alternada (ripple) é atenuada e a parte contínua não.

Um problema deste tipo de filtro é que a corrente consumida pela carga passa pela resistência de filtro provocando uma queda de tensão. Assim, esse filtro provoca variações de tensão em circuitos com cargas variáveis.

Para calcular a tensão de saída deste filtro basta utilizar a regra do divisor de tensão considerando a resistência utilizada no filtro e a resistência da carga.

Assim:



$$V'_{dc} = V_{dc} \frac{R_L}{R_L + R}$$

Onde:

V'_{dc} = tensão na carga

V_{dc} = tensão antes do filtro

R = Resistência do filtro

R_L = Resistência da carga

Para calcular a tensão de ripple, fazemos o mesmo divisor de tensão, desta vez com o resistor de filtro e o capacitor:

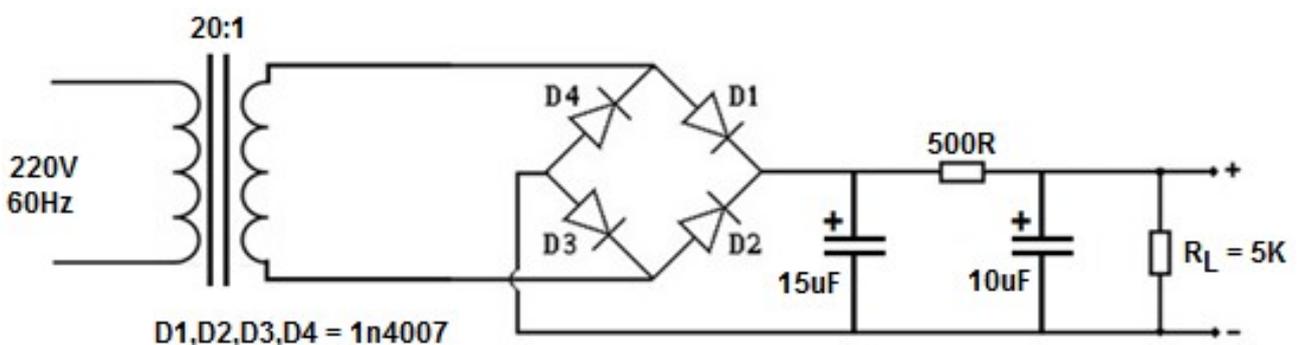
$$V'_r(rms) \approx V_r(rms) \frac{X_c}{R_L + X_c}$$

Onde

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

Exemplo:

Calcular no circuito abaixo as tensões e o ripple na carga R_L .



Resolvendo:

Primeiramente vamos calcular a tensão no secundário (saída) do transformador. Temos 220V eficaz na entrada. Com uma relação de 20 para 1 temos na saída:

$$V = \frac{220}{20}$$

$$V = 11 \text{ V}$$

Transformando para valor de pico temos:

$$V_p = 11 \cdot \sqrt{2} \quad V_p = 15,56 \text{ V}$$

Após a retificação, como estamos utilizando diodos de silício em ponte, teremos uma queda de tensão de 1,4V, assim nossa tensão em onda completa terá um valor de pico de:

$$V_p = 15,56 - 1,4 \quad V_p = 14,16 \text{ V}$$

A corrente total do circuito depende dos valores das resistências, no nosso circuito

$$R_{total} = R + R_L \quad R_{total} = 500 + 5 \text{ K} \quad R_{total} = 5,5 \text{ K}\Omega$$

Estimando um valor médio próximo de V_p , podemos fazer:

$$V_{dc} = 14 \text{ V} \text{ (valor estimado, só vale se o ripple for baixo)}$$

Com este valor podemos calcular a corrente do circuito:

$$I_{DC} = \frac{V_{DC}}{R_{total}} \quad I_{DC} = \frac{14}{5500} \quad I_{DC} = 2,55 \text{ mA}$$

Calculando agora a tensão de ripple temos:

$$V_r(rms) = \frac{I_{dc}}{4 \cdot \sqrt{3} \cdot f \cdot C} \quad V_r(rms) = \frac{2,55 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot \sqrt{3} \cdot 120 \cdot 15 \cdot 10^{-6}}$$

$$V_r(rms) = 0,205 \text{ V}$$

O fator de ripple neste ponto é de:

$$r = \frac{V_r(rms)}{V_{dc}} \quad r = \frac{0,205}{14}$$

$r = 0,0145$ ou seja um ripple de 1,45%.

Vamos agora calcular as tensões e o ripple **após o segundo filtro**.

Tensão em corrente contínua:

$$V_{RL} = V_{DC} \cdot \frac{5 \text{ K}}{5 \text{ K} + 500} \quad V_{RL} = 12,72 \text{ V}$$

Tensão de ripple:

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 120 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 132,65 \Omega$$

$$V'_r(rms) \simeq V_r(rms) \frac{X_c}{R + X_c}$$

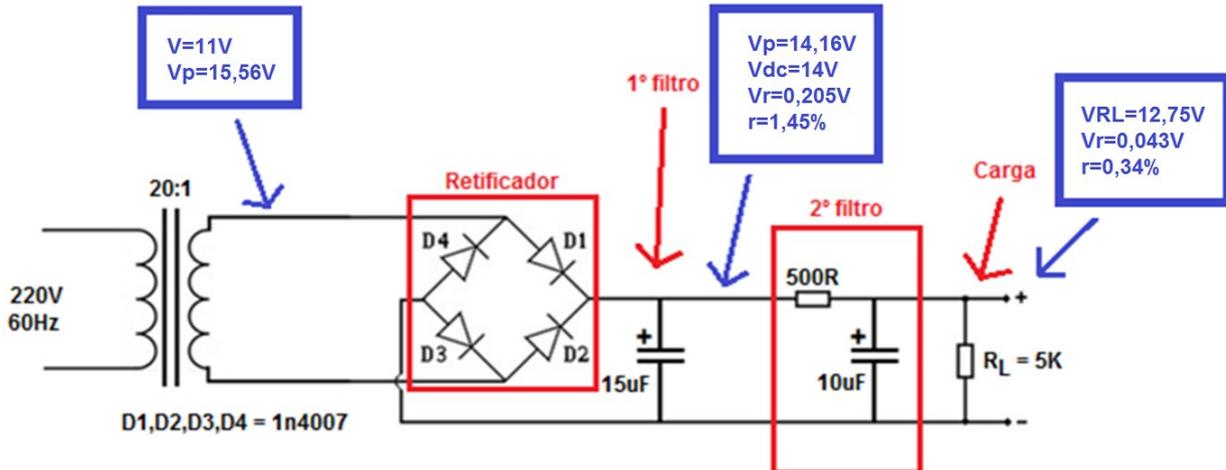
$$V'_r(rms) \simeq 0,205 \frac{132,65}{500 + 132,65}$$

$$V'_r(rms) \simeq 0,043 V$$

Recalculando o novo ripple temos:

$$r = \frac{V_r(rms)}{V_{dc}} \quad r = \frac{0,043}{12,72}$$

$r = 0,00338$ ou seja um ripple de 0,34%, resumindo:



4.3) Fontes com filtro LC

O resistor sendo utilizado como filtro provoca uma queda de tensão contínua indesejável. Além disso, essa variação ocorre em função da corrente da carga fazendo com que a fonte não seja estabilizada (tensão constante independente da carga). Uma solução muito comum é a utilização de indutor no lugar do resistor.

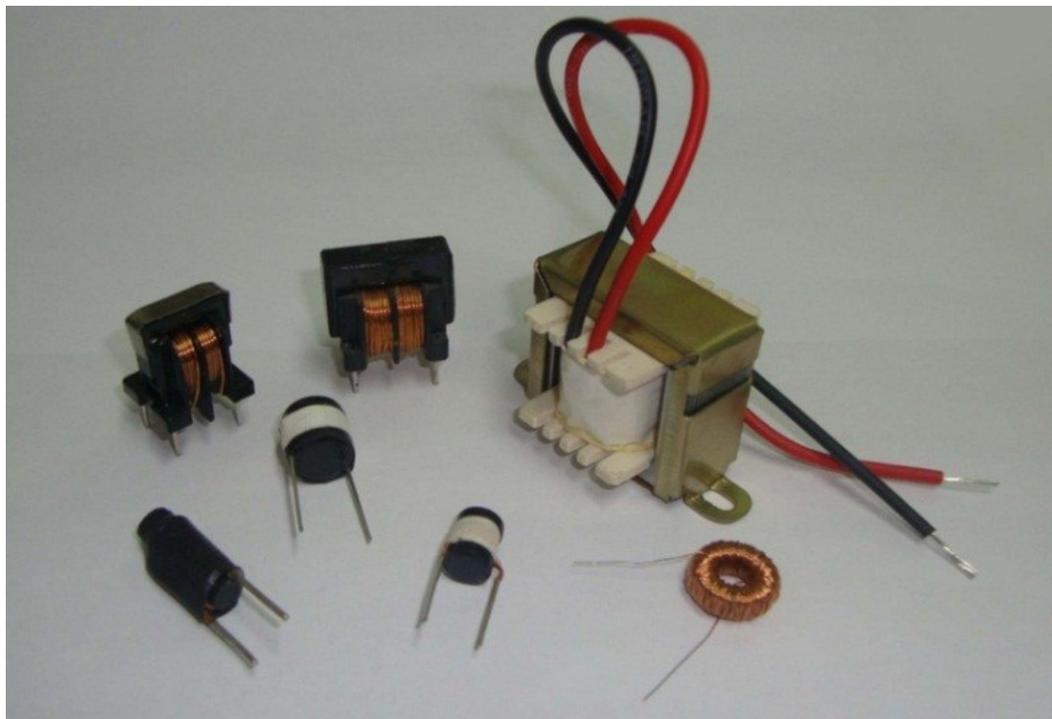


Fig. 57 – Indutores utilizados como filtro.

Este indutor apresentará uma dificuldade a passagem da corrente alternada (reatância indutiva) provocando somente uma pequena queda de tensão em corrente contínua. Este tipo de filtro é chamado de filtro LC.

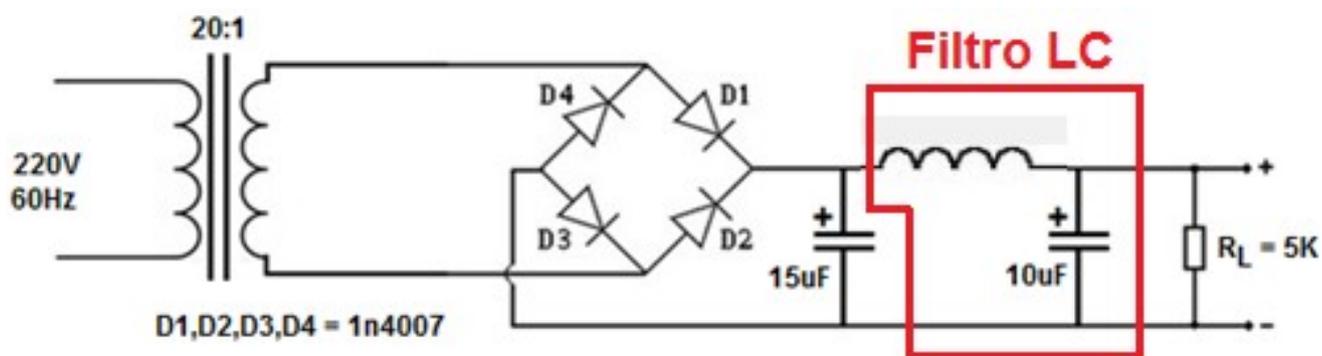
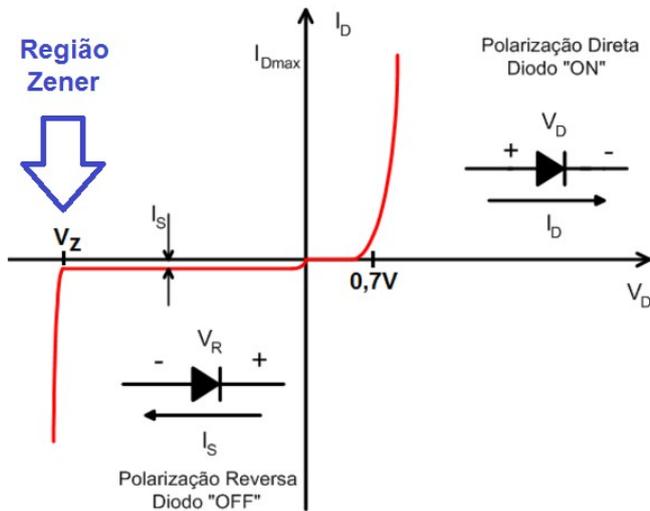


Fig. 58 – Filtro LC utilizado em fontes de alimentação.

5 Diodo Zener

5.1) Diodo Zener Ideal

O diodo zener é um diodo especialmente construído para trabalhar na região zener, região esta estudada na seção 2.5.2.



Como foi visto, existe um valor de tensão reversa limite, onde, a partir deste valor, o diodo conduz reversamente.

A curva de resposta de um diodo zener ideal é:

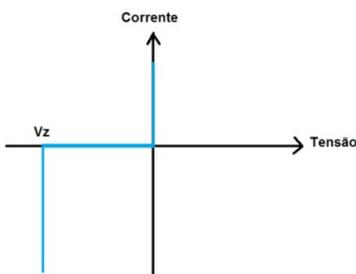


Fig. 59 – Curva ideal do diodo zener.

Na figura acima, podemos ver que a corrente reversa permanece em zero, como se o diodo fosse uma chave aberta até o valor negativo de tensão V_Z . Após este valor, o diodo conduz como se fosse um curto circuito, ou chave fechada.

A tensão onde a transição ocorre é chamada de “tensão Zener”. Como este valor depende somente das características do diodo, ele pode ser usado como referência de tensão em circuitos estabilizadores. Um diodo Zener possui uma simbologia especial para diferenciá-lo dos diodos comuns.

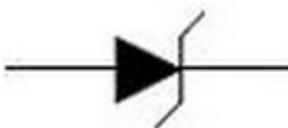


Fig. 60 – Símbolo do diodo Zener.

5.2) O circuito com diodo Zener e carga fixa

Abaixo, temos um circuito com diodo Zener e carga R_L :

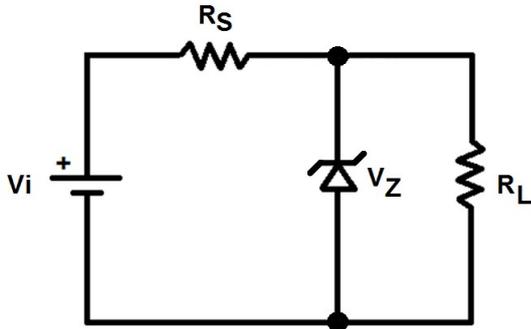


Fig. 61 – Circuito com diodo Zener e carga R_L fixa.

Considerando um valor de V_i bem maior que V_Z , devemos observar que, como a fonte de tensão é contínua, o diodo estará o tempo todo polarizado reversamente.

Existem duas situações a serem analisadas:

- Quando o valor da resistência R_L for muito baixo, a corrente em R_s será alta provocando uma queda de tensão grande em R_s , assim, a tensão que chega ao catodo do diodo não será suficiente para fazê-lo conduzir reversamente.
- Quando o valor da resistência R_L for alto, não teremos uma grande queda em R_s e conseqüentemente a tensão da fonte chegará ao catodo do diodo fazendo-o conduzir reversamente.

Para encontrar o ponto de operação do circuito devemos seguir os seguintes passos:

1º) Remover o diodo zener e calcular a tensão em R_L .

Sem o diodo, a tensão em R_L é calculada como um simples divisor de tensão:

$$V_L = \frac{R_L \cdot V_i}{R_s + R_L}$$

2º) Recolocar o diodo Zener no circuito.

Se V_L calculada $> V_Z$ do diodo \rightarrow diodo conduzirá e a tensão em R_L será V_Z .

Se V_L calculada $\leq V_Z$ do diodo \rightarrow a tensão em R_L será V_L .

Quando o **diodo Zener estiver conduzindo**, a corrente sobre ele pode ser calculada da seguinte forma:

Calcule a corrente em R_s fazendo:

$$I_{R_s} = \frac{V_i - V_Z}{R_s}$$

Calcule a corrente em R_L fazendo:

$$I_{RL} = \frac{V_z}{R_L}$$

Analisando o circuito podemos ver que, a corrente que passa pelo Zener é:

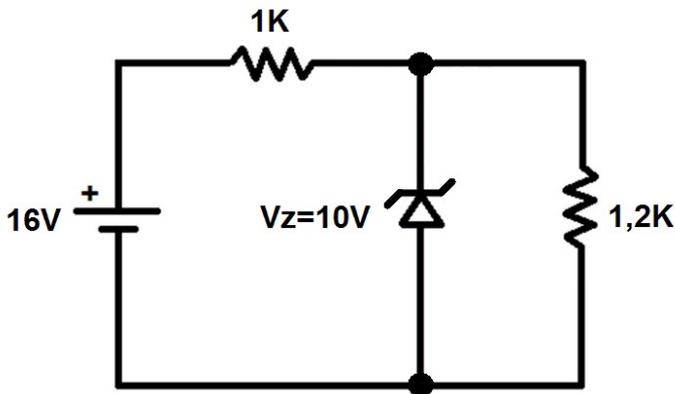
$$I_z = I_{Rs} - I_{RL}$$

A potência dissipada pelo diodo é muito importante e deve ser observada e calculada. Para calcular usamos a seguinte fórmula:

$$P_z = V_z \cdot I_z$$

Exemplo 1:

Calcular a potência dissipada no diodo Zener do circuito abaixo:



Retirando o diodo e calculando a tensão no resistor de 1,2K temos:

$$V_{1,2K} = \frac{16 \cdot 1,2K}{1K + 1,2K}$$

$$V_{1,2K} = 8,72V$$

Como o valor da tensão está abaixo da tensão Zener a tensão em $R_{1,2K}$ é 8,72V e a corrente no diodo é zero.

Exemplo 2:

Recalcular o circuito trocando a resistência de carga de 1,2K para 3K.

$$V_{3K} = \frac{16 \cdot 3K}{1K + 3K}$$

$$V_{3K} = 12V$$

Como $V_L > V_Z$ a tensão sobre a resistência de 3K será 10V que é a tensão do zener.

Calculando a corrente no resistor de 1K temos:

$$I_{1k} = \frac{16 - 10}{1K}$$

$$I_{1K} = 6mA$$

Calculando a corrente no resistor de 3K temos:

$$I_{3K} = \frac{10}{3K}$$

$$I_{3K} = 3,33mA$$

Assim a corrente e a potência sobre o diodo são:

$$I_z = 6m - 3,33m$$

$$I_z = 2,67mA$$

$$P_z = V_z \cdot I_z$$

$$P_z = 10 \cdot 2,67m$$

$$P_z = 26,7mW$$

5.3) O circuito com diodo Zener e carga variável

Vamos considerar agora um caso mais comum onde a carga R_L varia.

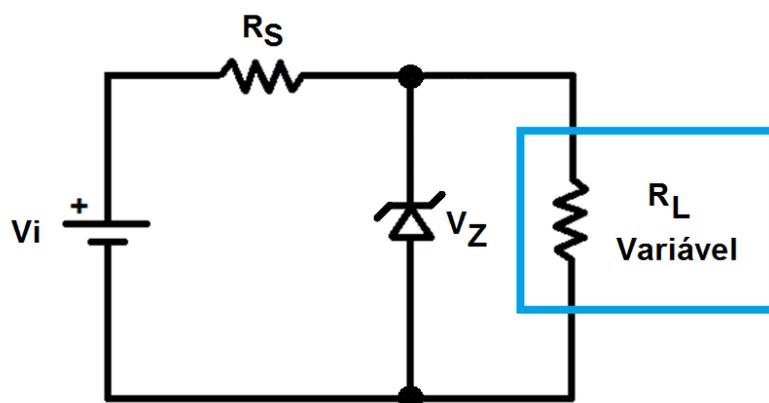


Fig. 62 – Circuito com diodo zener e carga R_L variável.

Como o valor de R_L varia, existe um valor mínimo para que a tensão fique estabilizada, este valor mínimo de R_L é aquele onde o divisor de tensão formado por R_S e R_L produz uma tensão em R_L igual à tensão V_Z . Ou seja:

$$V_L = \frac{V_i \cdot R_L}{R_S + R_L}$$

$$V_{imin} = \frac{V_z \cdot (R_s + R_L)}{R_L}$$

Isolando R_L para encontrar seu valor mínimo temos:

$$R_{Lmin} = \frac{R_s \cdot V_z}{V_i - V_z}$$

Nesta condição (R_{Lmin}) temos a maior corrente possível em R_L com a tensão fixa em V_z .

$$I_{Lmax} = \frac{V_z}{R_{Lmin}}$$

Perceba que a queda de tensão sobre R_s é constante quando o diodo Zener está conduzindo.

O valor máximo de corrente e potência no Zener ocorre quando a carga tem resistência infinita (circuito aberto) e valem:

$$I_{Zmax} = \frac{V_i - V_z}{R_s}$$

$$P_{zmax} = I_{Zmax} \cdot V_z$$

5.4) O circuito com diodo Zener e fonte variável

Para se ter uma tensão estabilizada (fixa no valor de V_z) na carga, a fonte V_i deve ter um valor suficiente para que o diodo atinja a tensão V_z .

Temos:

$$V_L = V_z = \frac{V_i \cdot R_L}{R_s + R_L}$$

Invertendo:

$$V_{imin} = V_z \cdot \frac{(R_s + R_L)}{R_L}$$

O valor máximo de V_i é limitado pela corrente máxima suportada pelo Zener.

Vimos que a corrente que passa pela resistência R_s é a soma das correntes do diodo e da carga:

$$I_{R_s} = I_z + I_L$$

I_Z que queremos determinar é o I_{Zmax} e I_L é fixo dado por:

$$I_{RL} = \frac{V_Z}{R_L}$$

Sabendo que, $V_i = V_{RS} + V_Z$, finalmente calculamos:

$$V_{imax} = (I_{Zmax} + I_{RL}) R_s + V_z$$

5.5) Calculando o valor de RS

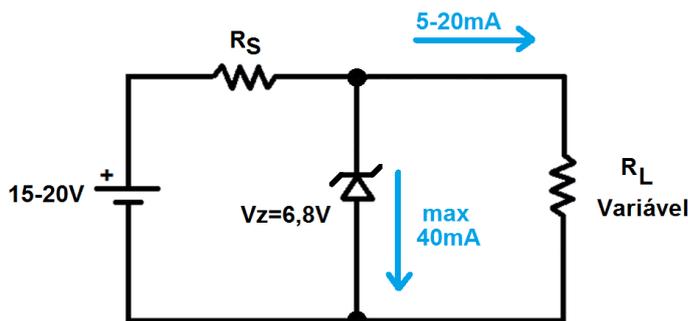
Até agora analisamos os circuitos com os seus valores já definidos. Vamos agora considerar um projeto prático com as seguintes condições:

A fonte varia de 15V À 20V

A corrente na carga varia de 5 à 20mA

A tensão de estabilização deve ser de 6,8V com corrente máxima no Zener de 40mA

Ou seja:



$$\begin{aligned} V_{MIN} &= 15V \\ V_{MAX} &= 20V \\ I_{Lmin} &= 5mA. \\ I_{Lmax} &= 20mA \\ V_Z &= 6,8V \\ I_{Zmax} &= 40mA \end{aligned}$$

Fig. 63 – Determinação de Rs em circuito com zener.

Com todos essas informações qual é o valor de Rs que coloca o circuito em operação? Na verdade não existe um único valor. Vamos calcular o valor mínimo e o valor máximo:

O valor máximo de Rs é definido na pior condição, ou seja a tensão de entrada está baixa e a corrente em R_L está alta.

$$R_{smax} = \frac{V_{MIN} - V_Z}{I_{Lmax} + I_{Zmin}}$$

Para garantir que o diodo sempre esteja conduzindo, vamos definir uma corrente mínima $I_{Zmin} = 4mA$ (10 vezes menor que o valor máximo). Assim:

$$R_{smax} = \frac{15 - 6,8}{20m + 4m}$$

$$R_{smax} = 342\Omega$$

Para o calcular o valor máximo levamos em conta a capacidade máxima de corrente no diodo zener e essa corrente máxima ocorre quando R_L consome o mínimo, assim:

$$R_{s_{min}} = \frac{V_{MAX} - V_Z}{I_{Lmin} + I_{Zmax}}$$

$$R_{s_{min}} = \frac{20 - 6,8}{5\text{ m} + 40\text{ m}}$$

$$R_{s_{min}} = 293 \Omega$$

Assim, a resistência R_s deve ter um valor entre 293Ω e 342Ω . Como 330Ω é um valor de resistor comum na indústria este é o valor ideal para o circuito.

5.6) O Diodo Zener real

Até agora consideramos a tensão V_Z como sendo fixa. Isto é o ideal, pois podemos fixar uma fonte de tensão baseado neste valor e teremos uma fonte muito estável.

Infelizmente, a tensão zener não é tão estável. Abaixo podemos ver as curvas de alguns diodos da série BZX84J da NXP.

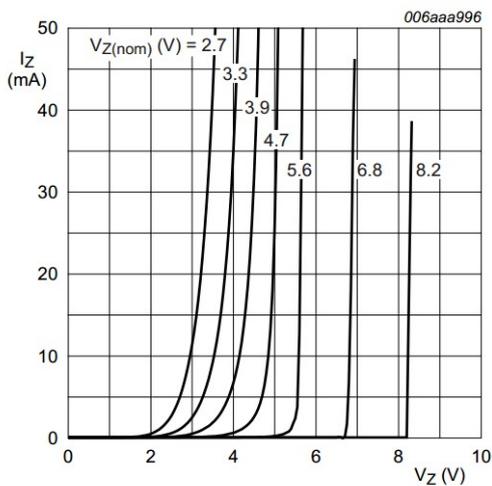


Fig. 64 – Curva de tensão x corrente em diodos zener.

Podemos facilmente perceber que, quando a corrente aumenta, a tensão V_Z muda de valor. Por exemplo, para o diodo de $2,7V$, a tensão ultrapassa $3V$ quando a corrente chega à $10mA$. Na verdade, o valor de $2,7V$ só ocorre quando a corrente está em $5mA$.

Além disso, o processo de fabricação não garante curvas tão exatas:

Table 8. Characteristics per type; BZX84J-B2V4 to f
T_j = 25 °C unless otherwise specified.

| BZX84J- xxx | Sel | Working voltage V _z (V) | | Differential resistance r _{diff} (Ω) | |
|----------------|-----|--|------|---|-----------------------|
| | | I _z = 5 mA | | I _z = 1 mA | I _z = 5 mA |
| | | Min | Max | Max | Max |
| 2V4 | B | 2.35 | 2.45 | 400 | 100 |
| | C | 2.2 | 2.6 | | |
| 2V7 | B | 2.65 | 2.75 | 450 | 100 |
| | C | 2.5 | 2.9 | | |
| 3V0 | B | 2.94 | 3.06 | 500 | 95 |
| | C | 2.8 | 3.2 | | |

Note: Red circles and arrows in the original image highlight the V_z values for the 2V7 diode.

Fig. 65 – Valores normais de tensão de um diodo zener de 2,7V.

Portanto, pense sempre no valor da tensão Zener como um valor de referência e nunca como um valor absoluto no circuito.

5.7) Regulação de tensão

A regulação de tensão é um parâmetro que avalia as variações de tensão de uma fonte de alimentação com relação à corrente fornecida. **Na verdade é uma medida de variação da fonte.** O valor ideal é 0%, quanto maior este valor pior é a fonte.

$$\%VR = \frac{V_{SC} - V_{CC}}{V_{CC}} \cdot 100\%$$

Onde:

%VR = porcentagem de regulação da fonte.

V_{SC} = tensão sem carga.

V_{CC} = tensão com carga.

Exemplo:

Uma fonte de 60V fornece 56V quando ligada à uma carga. Qual é o valor da regulação de tensão desta fonte?

Resolvendo:

$$\%VR = \frac{V_{SC} - V_{CC}}{V_{CC}} \cdot 100\%$$

$$\%VR = \frac{60 - 56}{56} \cdot 100\%$$

$$\%VR = 7,14\%$$

6 Circuitos limitadores, grampeadores e ceifadores

6.1) Circuitos Limitadores

Os circuitos chamados limitadores são aqueles que impedem que a tensão ultrapasse um determinado valor positivo ou negativo. Como exemplo vamos analisar o circuito abaixo:

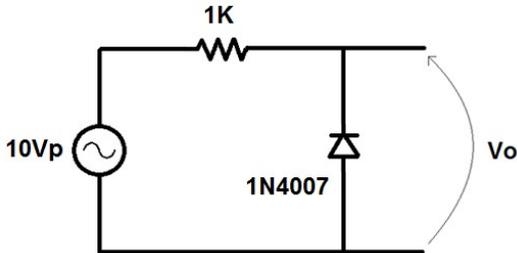


Fig. 66 – Circuito limitador.

Neste circuito, quando a tensão negativa ultrapassa 0,7V no catodo do diodo, ele conduz e somente 0,7V negativos aparecem na saída V_o .

Durante todo o ciclo positivo o diodo não conduz e a tensão da fonte aparece na saída.

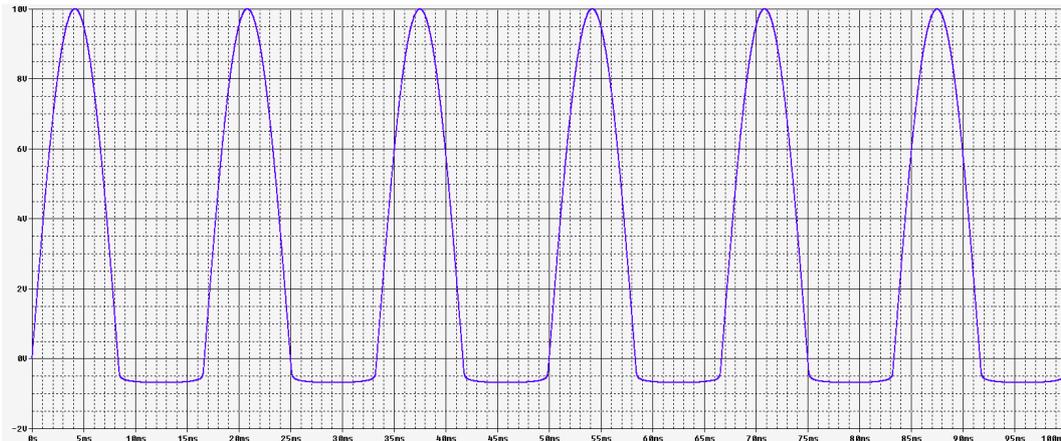


Fig. 67 – Sinal limitado negativamente em 0,7V.

Um outro exemplo:

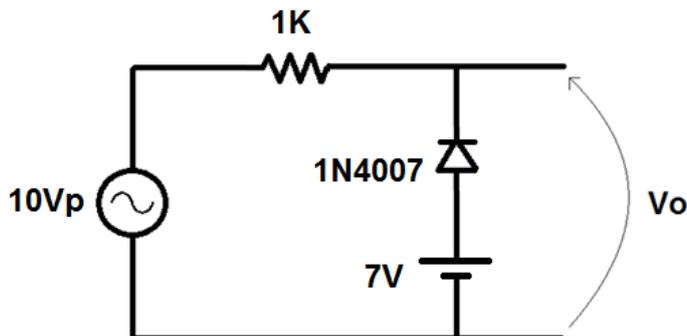


Fig. 68 – Circuito limitador utilizando fonte de tensão.

Vamos analisar por partes este circuito. Sabemos que no anodo existem 7V assim podemos fazer:

| Tensão no catodo | Tensão sobre o diodo | Condição |
|------------------|----------------------|-------------------------|
| 10V | 3V | Polarização reversa |
| 9V | 2V | Polarização reversa |
| 8V | 1V | Polarização reversa |
| 7V | 0V | Diodo não conduz |
| 6,3V | -0,7V | Diodo começa a conduzir |
| 6V | -1V * | Polarização direta |

* Ele irá conduzir ficando com 0,7V sobre o diodo.

Assim, abaixo de 6,3V a saída se mantém em 6,3V.

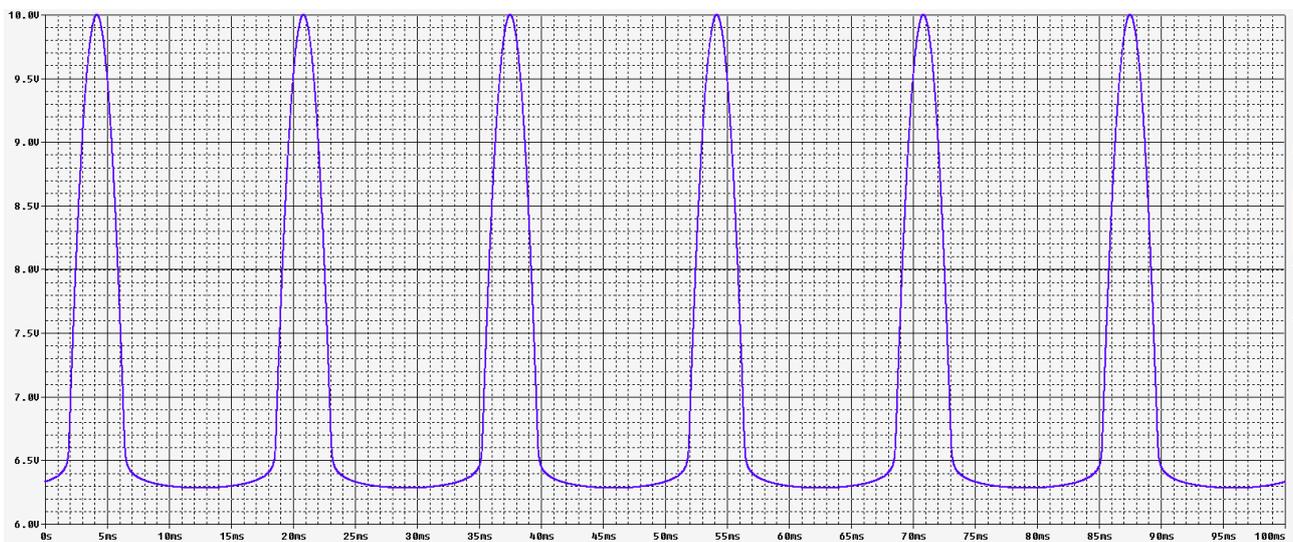


Fig. 69 - Sinal limitado em 6,3V.

6.2) Circuitos ceifadores

Um circuito ceifador é aquele que “ceifa” ou remove uma porção do sinal de entrada sem distorcer o restante do sinal. Os retificadores de meia onda e onda completa são exemplos de circuitos ceifadores.

Exemplo:

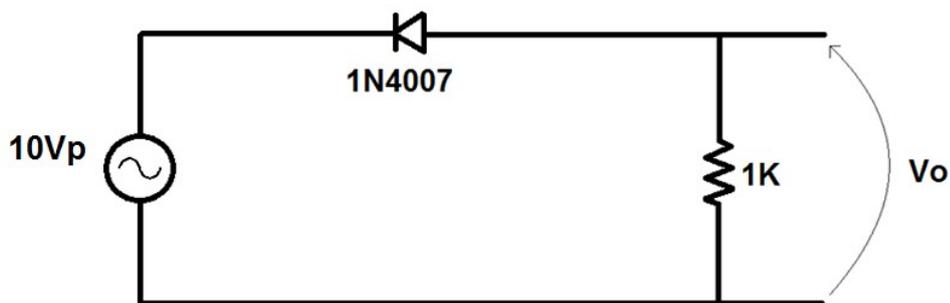


Fig. 70 – Circuito ceifador.

Na entrada temos uma onda senoidal com 10V de pico:

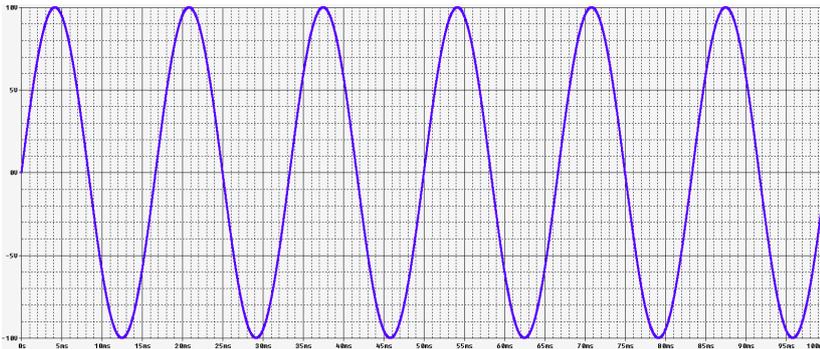


Fig. 71 – Sinal de entrada.

Como o diodo conduz somente na parte negativa da onda, na saída V_o temos:

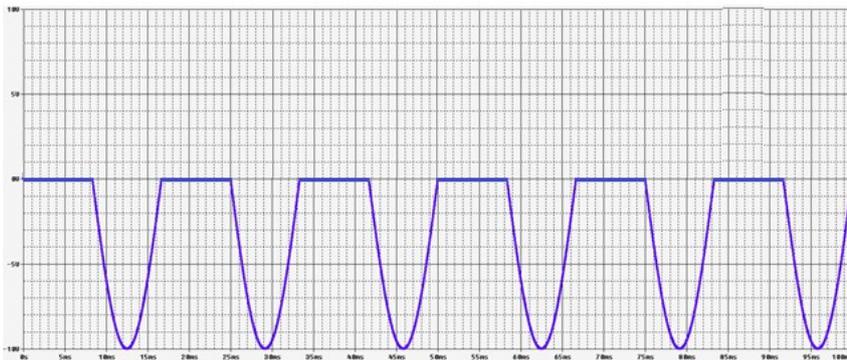


Fig. 72 – Sinal de saída.

6.3) Circuitos grampeadores

Um circuito grampeador é aquele que soma ou subtrai uma tensão ao sinal de entrada deslocando o sinal da saída para cima (mais positivo) ou para baixo (mais negativo). Por exemplo:

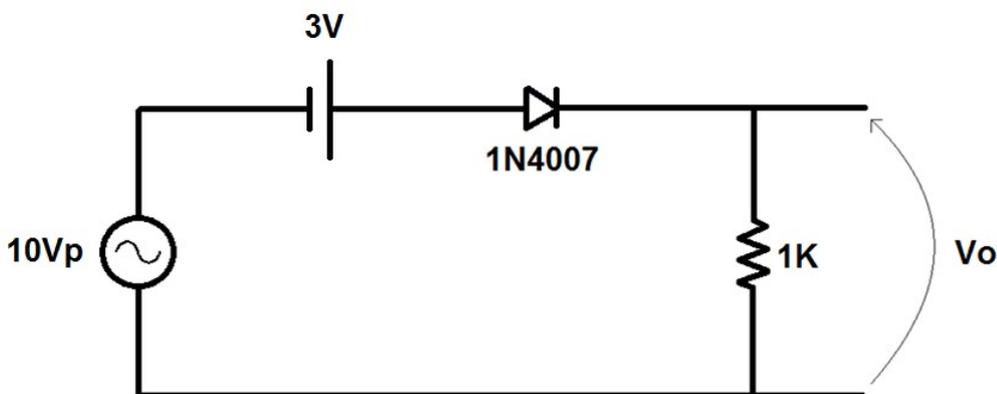


Fig. 73 – Circuito grampeador.

A fonte senoidal possui uma tensão de pico de 10V. Analisando o circuito, podemos perceber que, durante o pico positivo os 10V do sinal senoidal é somado a bateria de 3 volts. Mesmo

considerando a queda de 0,7 provocada pelo diodo de silício, temos sobre o resistor uma tensão de pico maior que a tensão alternada da entrada.

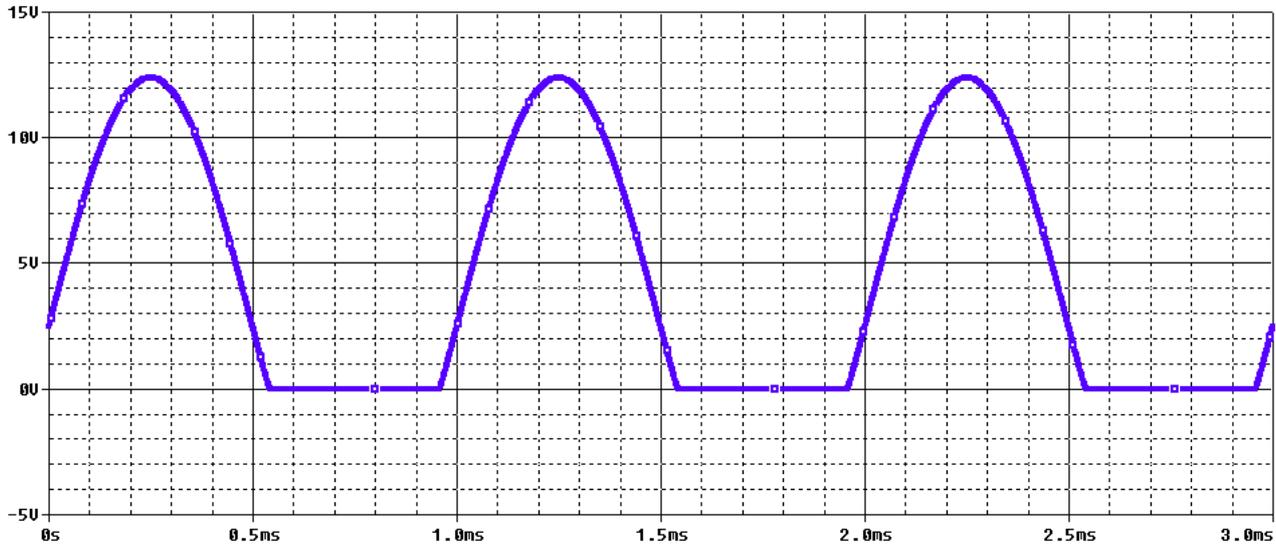


Fig. 74 – Sinal de saída deslocado 3V para cima e limitado em 0V.

6.4) Circuitos grameadores com capacitor

A utilização de uma fonte contínua no circuito grameador não é usual. Podemos utilizar um capacitor e obter o mesmo efeito. Por exemplo:

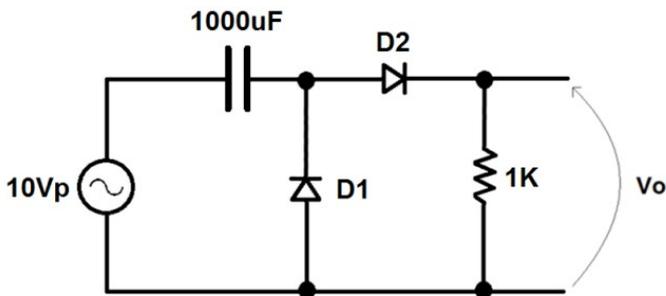


Fig. 75 – Circuito dobrador de tensão.

No primeiro instante, o capacitor está descarregado, assim a tensão na saída é a própria tensão do sinal de entrada. Durante o ciclo negativo o capacitor é carregado pelo diodo D1.

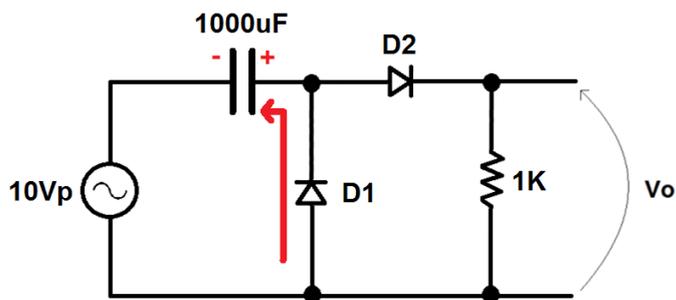


Fig. 76 – Carga do capacitor no circuito dobrador.

No próximo ciclo o sinal senoidal da entrada é somado à tensão do capacitor. Perceba que a tensão na saída é quase o dobro da tensão da entrada. Este circuito grampeador pode ser utilizado como dobrador de tensão.

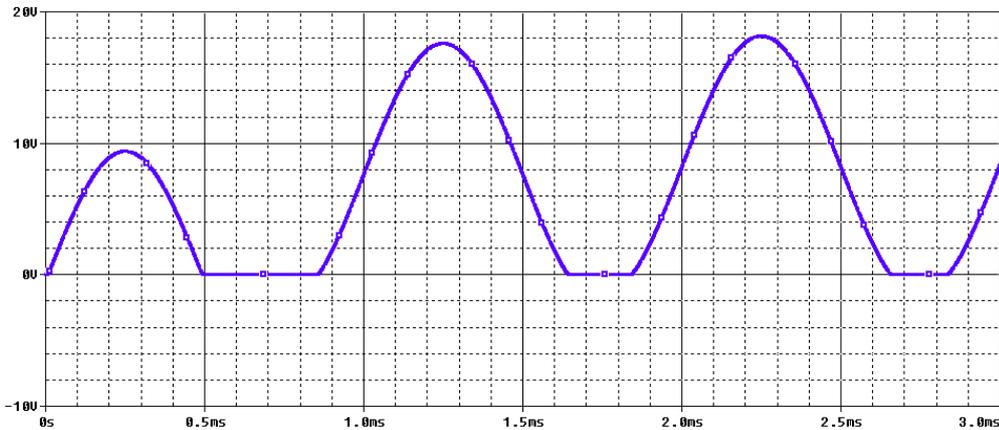


Fig. 77 – Sinal de saída do circuito dobrador.

7 Diodos especiais

7.1) Varicap

É visto em eletricidade que um capacitor é formado por duas placas condutoras separadas por um isolante.

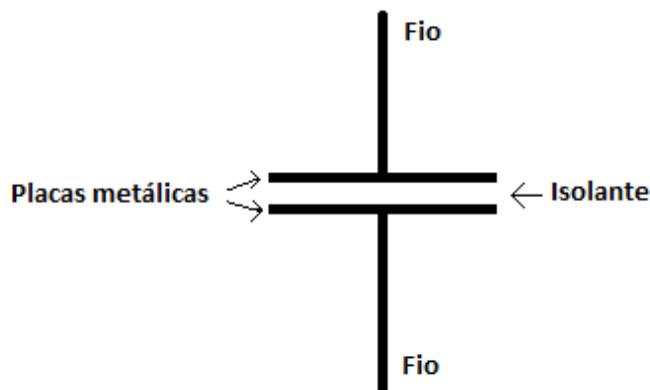


Fig. 78 – Construção básica de um capacitor.

A capacitância varia com a distância entre as placas. No diodo polarizado reversamente temos a mesma configuração, ou seja, temos duas regiões condutoras separadas pela região de depleção que faz a função do isolante.

O varicap é um diodo fabricado para trabalhar de forma reversa funcionando como capacitor. Aumentando a tensão reversa, ocorre um aumento da região de depleção e conseqüentemente uma diminuição da capacitância, diminuindo a tensão o efeito é o inverso.

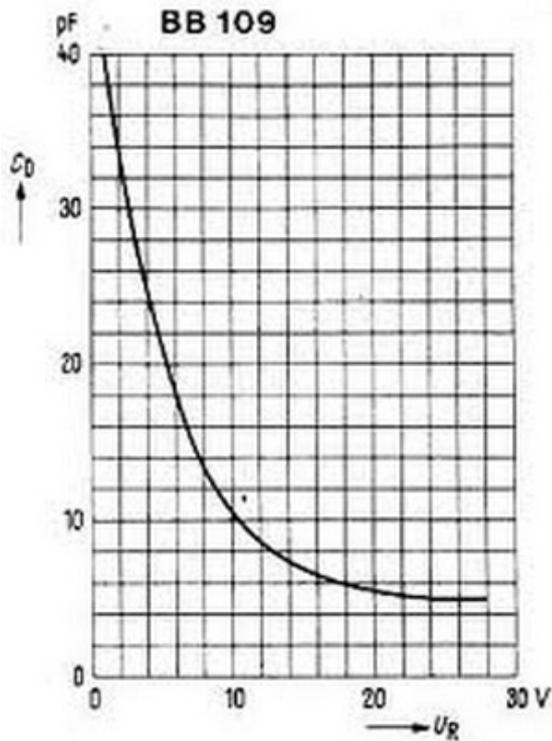


Fig. 79 – Capacitância em função da tensão reversa do diodo BB109.

No gráfico anterior podemos ver a variação da capacitância em função da tensão reversa.

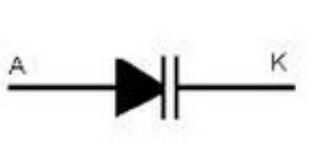


Fig. 80 – Símbolo de um diodo varicap.

O símbolo do varicap é o de um diodo com um capacitor. Ele pode ser utilizado como capacitor de sintonia em circuitos de rádio através das seguintes configurações:

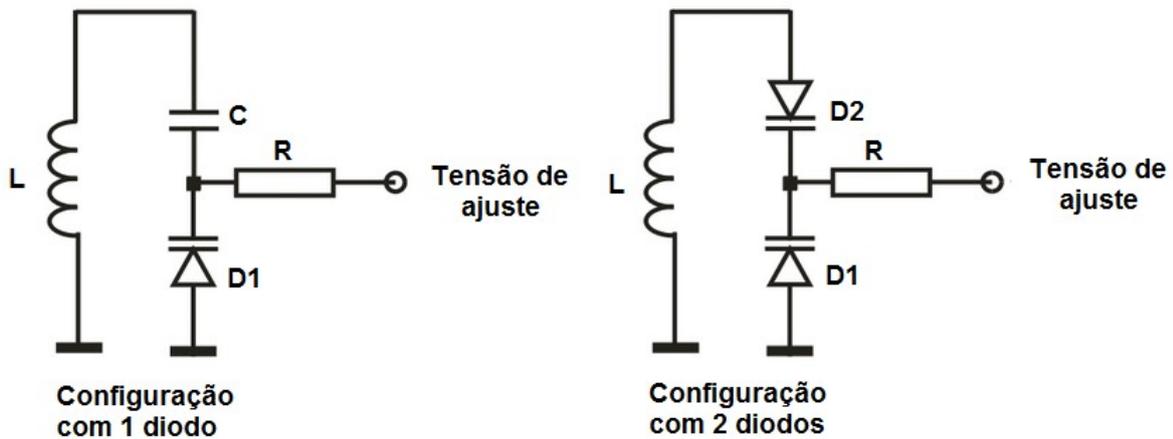


Fig. 81 – Configuração básica.

7.2) Diodo Emissor de Luz (LED)

Como o próprio nome diz, o LED é um diodo que emite luz. Em junções PN de silício e de germânio a maior parte da energia é dissipada em forma de calor e a luz emitida é insignificante. Em outros materiais como o fosfeto de arseneto de gálio (GaAsP) ou fosfeto de gálio (GaP) a quantidade de luz na junção é suficiente para ser emitida.

A frequência da energia luminosa ou em outras palavras a cor é determinada pelo material da junção PN. Abaixo temos algumas combinações de elementos que formam uma região de depleção e emitem luz quando polarizadas diretamente.

| Typical LED Characteristics | | | |
|-----------------------------|------------|-----------|--------------|
| Semiconductor Material | Wavelength | Colour | $V_F @ 20mA$ |
| GaAs | 850-940nm | Infra-Red | 1.2v |
| GaAsP | 630-660nm | Red | 1.8v |
| GaAsP | 605-620nm | Amber | 2.0v |
| GaAsP:N | 585-595nm | Yellow | 2.2v |
| GaP | 550-570nm | Green | 3.5v |
| SiC | 430-505nm | Blue | 3.6v |
| GaN | 450nm | White | 4.0v |

Fig. 82 – Comprimento de onda e material utilizado em alguns LEDs.

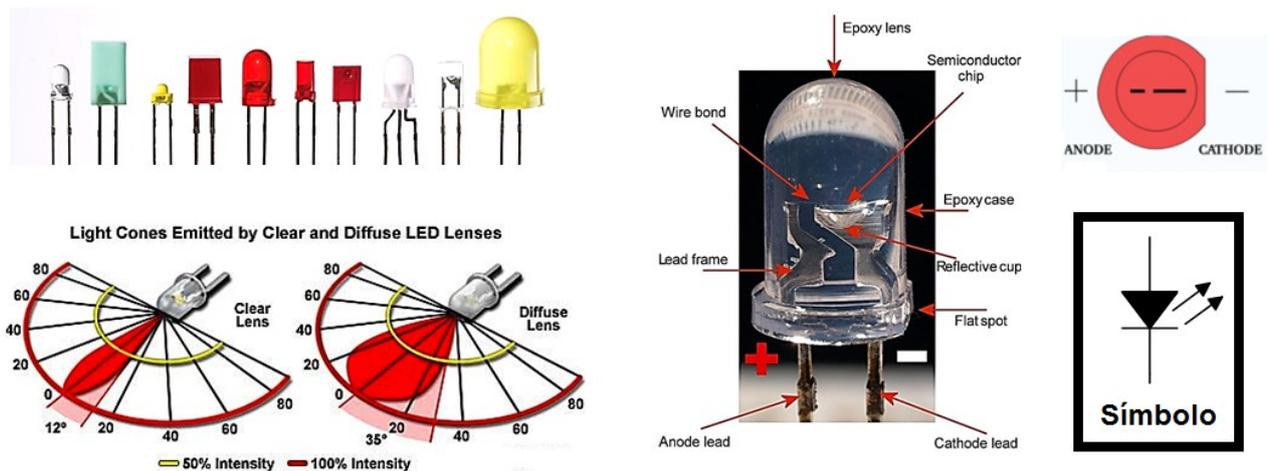


Fig. 83 - Diodo emissor de LUZ (LED) e seu símbolo.

O consumo de corrente ideal depende do tamanho, da cor e outros parâmetros. Quando não se tem a informação do fabricante é comum adotar **valores entre 15 e 20mA para os leds de 5mm e entre 20mA e 25mA para os leds de 10mm, com queda de tensão entre 2,2 e 3V.**

Atualmente existem leds de potência e leds Laser, com aplicação em redes de fibra ótica, impressoras, leitores de disco DVD, CD e Blu- Ray.



Fig. 84 - Cabo de fibra ótica por onde caminha a luz emitida por um LED laser.

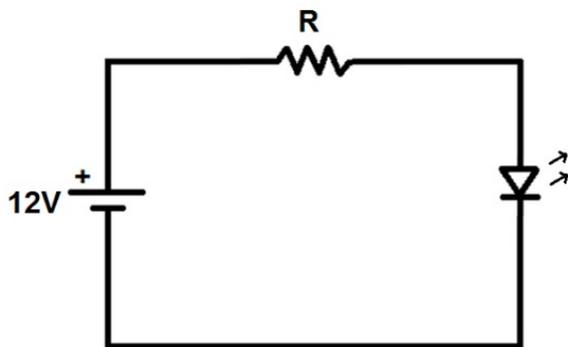
Atenção

Um LED sempre deve estar ligado em série com uma resistência para limitar sua corrente.

LED NÃO É LÂMPADA

Exemplo de cálculo de um circuito com LED:

Calcular o valor da resistência no circuito abaixo sabendo que o LED utilizado trabalha com 20mA e 2,5V.



Solução:

Sabendo que a fonte fornece 12V e a queda de tensão no LED é de 2,5V, temos sobre a resistência

$$V_R = 12V - 2,5V$$

$$V_R = 9,5V$$

Como a corrente que passa pela resistência é igual à corrente do LED temos $I_R = 20\text{mA}$, pela lei de Ohms podemos calcular o valor da resistência.

$$R = \frac{V_R}{I_R}$$

$$R = 475\Omega$$

O valor mais próximo utilizado na indústria é de 470Ω , sendo este o valor recomendado. Existem também conjunto de LEDs montado em blocos, painéis, fitas e outros arranjos. A teoria e cálculo utilizados nestes dispositivos é o mesmo utilizado para o LED simples.



Fig. 85 - Arranjos com LEDs.

7.3) Fotodiodo

O fotodiodo é um componente com junção PN fabricado para funcionar com polarização reversa. Ao contrário do diodo comum, ele conduz na polarização reversa quando luz incide sobre ele.

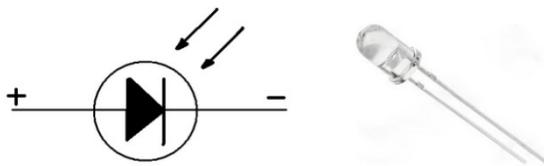
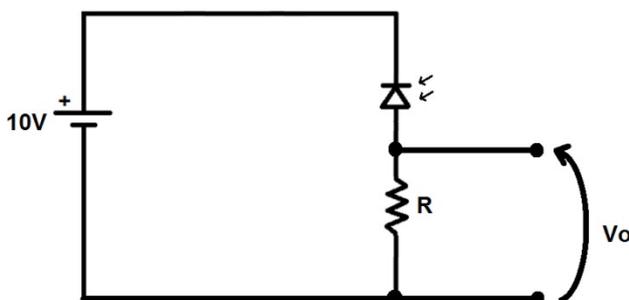


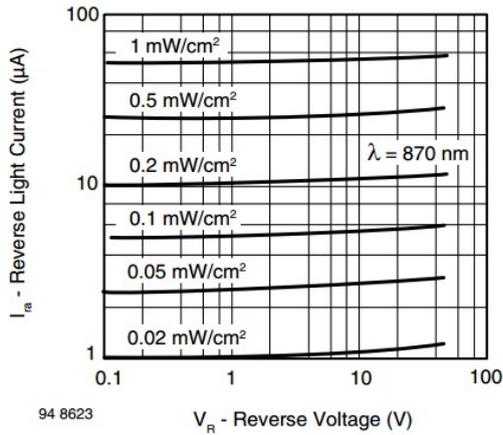
Fig. 86 – Fotodiodo.

Podemos perceber pela imagem acima que, o fotodiodo é fisicamente muito parecido com o diodo emissor de luz (LED). É muito utilizado em receptores de sinais de controle remoto, sensores de presença, sensores de barreira ótica, detectores de intensidade luminosa entre outros.

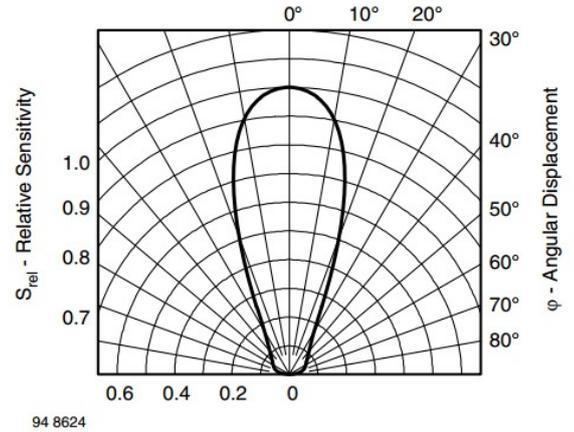
O circuito básico de ligação é:



Perceba que o diodo está polarizado reversamente. Portanto a corrente que passa pelo fotodiodo é baixa.



Reverse Light Current vs. Reverse Voltage



Relative Radiant Sensitivity vs. Angular Displacement

Na curva acima podemos ver que a luz provoca uma variação de aproximadamente 1uA à 80uA. Se utilizada uma resistência de 100KΩ, teremos na saída:

Sem luz (1uA):

$$V_R = 100K \cdot 1u$$

$$V_R = 0,1V$$

Com luz (80uA):

$$V_R = 100K \cdot 80u$$

$$V_R = 8,0V$$

Estes são os valores previsto para o circuito com luz e sem a incidência de luz. Também é possível visualizar o ângulo de resposta do componente. A luz incidente quando chega com mais de 30° não provoca variações significativas no circuito. Isso pode ser melhorado com lentes.

7.4) Diodo Schottky

O diodo schottky é um diodo formado por um cristal de silício, normalmente cristal N dopado fracamente e um metal como ilustra a figura abaixo.

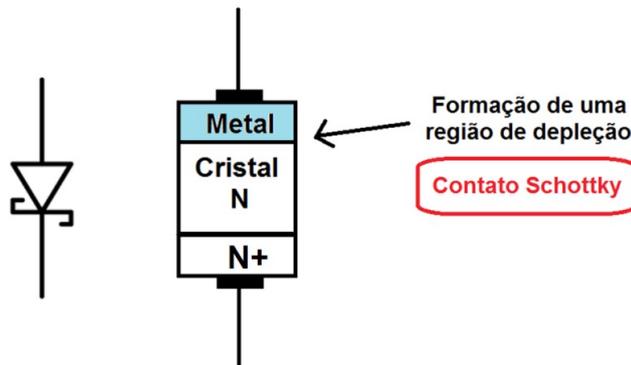


Fig. 87 – Diodo Schottky e seu símbolo.

A região fortemente dopada N+ evita que uma segunda região de depleção seja criada no terminal. Como os níveis energéticos do metal e do semiconductor são diferentes ocorre difusão de elétrons do cristal para o metal da mesma forma que na junção PN.

A grande vantagem destes diodos é o tempo de recuperação reversa muito baixa, ou seja, podem ser utilizados em circuitos com frequências elevadas e com correntes elevadas. Além disso produz uma queda de aproximadamente 0,2V e não 0,7V como nos diodos convencionais.

Diodo Schottky

Alta Frequência + Corrente Alta + queda de 0,2V

Estes diodos estão presentes em todas as fontes chaveadas modernas que trabalham em frequências da ordem de 20KHz à 50KHz. Apesar de parecerem vantajosos a ponto de deixarem obsoletos os diodos de silício tradicionais, estes diodos não substituem os diodos de silício convencionais, pois trabalham somente com baixas tensões e possuem uma corrente de saturação reversa alta se comparado com os diodos convencionais.

8 O Transistor BJT

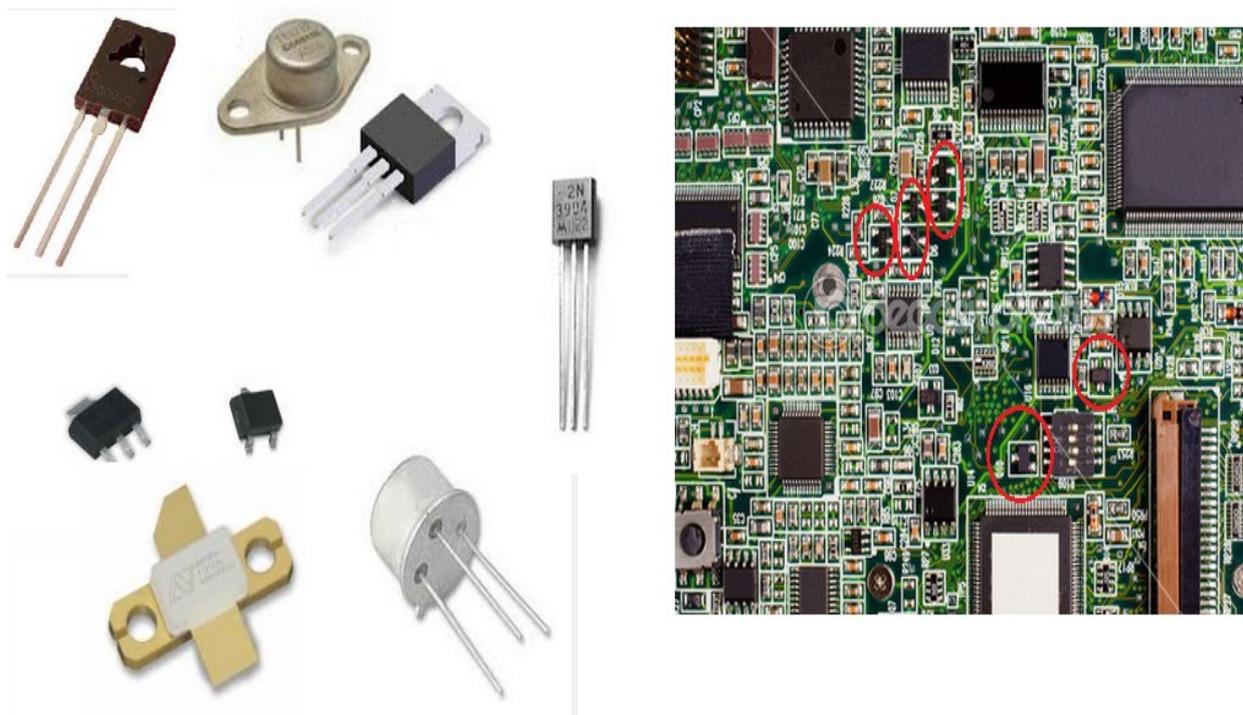


Fig. 88 – Transistores.

8.1) Estrutura básica e o fator de amplificação β

Vimos a junção PN e o diodo, um componente que possui dois terminais. Também vimos que uma junção PN pode ser polarizada diretamente ou reversamente. Agora vamos estudar uma outra estrutura formada por duas junções, uma polarizada diretamente e outra reversamente. Este novo componente possui 3 terminais e se chama transistor.

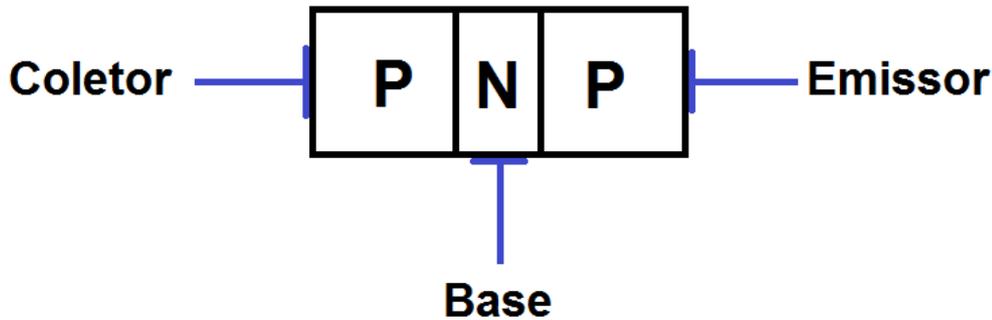


Fig. 89 – Configuração básica do transistor.

Na figura acima, a região P indica um cristal dopado com impurezas trivalentes (cristal P) e a região N um cristal com impurezas pentavalentes (cristal N). Como vimos, é formada uma região de depleção entre as junções. Neste caso temos duas regiões de depleção.

Primeiramente, vamos polarizar reversamente a junção entre base e coletor:

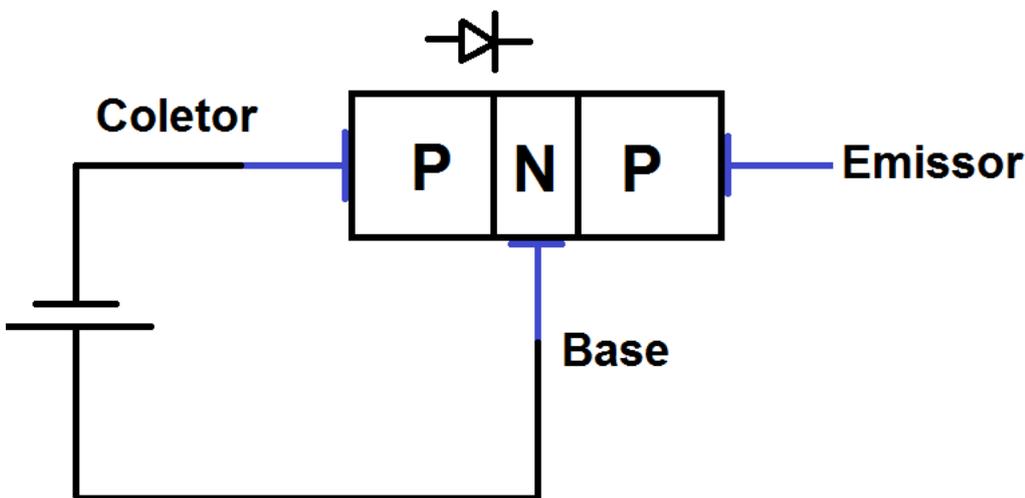


Fig. 90 – Junção base-coletor polarizada reversamente.

Obviamente, não haverá circulação de corrente e a região de depleção estará aumentada. Apenas alguns elétrons conseguem passar formando uma corrente reversa baixíssima de alguns poucos micro amperes.

Agora vamos polarizar diretamente a junção formada entre o emissor e a base:

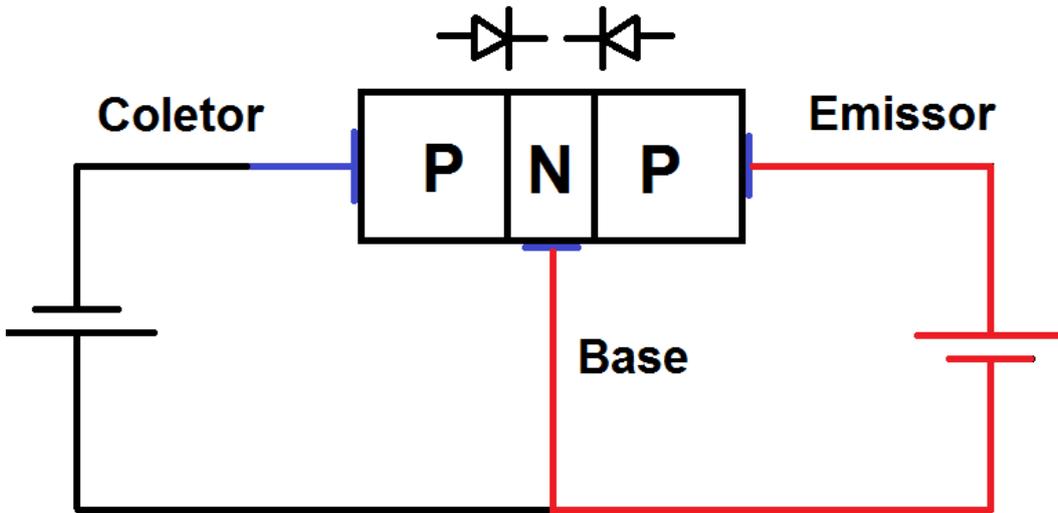


Fig. 91 – Em destaque, junção base-emissor diretamente polarizada.

Como agora existe circulação de corrente e uma grande quantidade de elétrons na base indo em direção ao emissor, os elétrons aplicados no coletor começam a encontrar um caminho em direção ao emissor e começa a circular uma corrente no coletor, não em direção à base, mas em direção ao emissor com seu potencial altamente positivo.

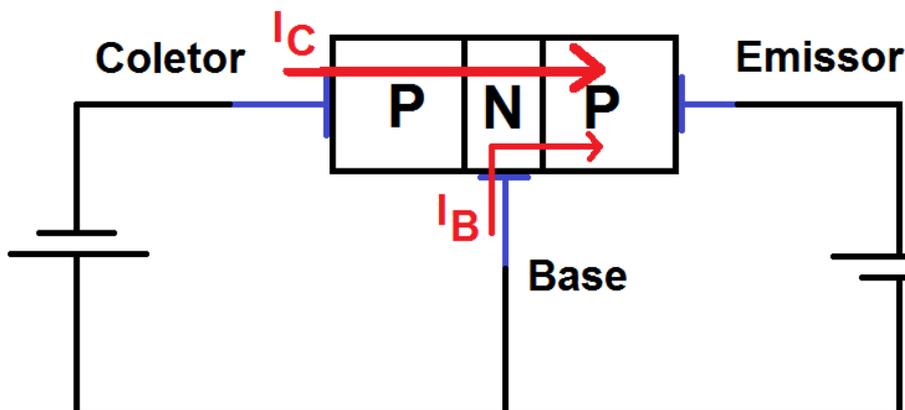


Fig. 92 – Sentido dos elétrons no transistor PNP.

É importante notar que, somente existe a corrente I_C quando existe a corrente I_B em direção ao emissor. Além disso, a corrente I_C , que é muito grande depende diretamente da corrente I_B , que é muito menor. Desta forma podemos estabelecer uma relação importantíssima:

$$I_c = \beta \cdot I_B$$

Onde β (beta) é o fator de amplificação pois determina o quanto I_c varia com relação à I_B . O valor de β dos transistores na prática está entre 50 à 400, sendo que a grande maioria possui valores em torno de 200.

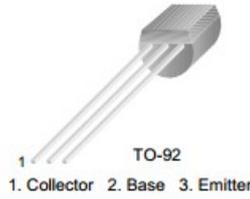
Um valor de $\beta = 200$, significa que a corrente de coletor é 200 vezes maior que a corrente da base. Nos datasheets (especificação dos componentes) muitas vezes o β vem especificado como h_{FE} .



BC237/238/239

Switching and Amplifier Applications

- Low Noise: BC239



NPN Epitaxial Silicon Transistor

Absolute Maximum Ratings $T_a=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

| Symbol | Parameter | Value | Units |
|-----------|-----------------------------|-------------|------------------|
| V_{CES} | Collector-Emitter Voltage | : BC237 | 50 V |
| | | : BC238/239 | 30 V |
| V_{CEO} | Collector-Emitter Voltage | : BC237 | 45 V |
| | | : BC238/239 | 25 V |
| V_{EBO} | Emitter-Base Voltage | : BC237 | 6 V |
| | | : BC238/239 | 5 V |
| I_C | Collector Current (DC) | 100 | mA |
| P_C | Collector Power Dissipation | 500 | mW |
| T_J | Junction Temperature | 150 | $^\circ\text{C}$ |
| T_{STG} | Storage Temperature | -55 ~ 150 | $^\circ\text{C}$ |

Electrical Characteristics $T_a=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

| Symbol | Parameter | Test Condition | Min. | Typ. | Max. | Units |
|---------------|--------------------------------------|--|------|------|------|-------|
| BV_{CEO} | Collector-Emitter Breakdown Voltage | $I_C=2\text{mA}, I_B=0$ | 45 | | | V |
| | | | 25 | | | V |
| BV_{EBO} | Emitter Base Breakdown Voltage | $I_E=1\mu\text{A}, I_C=0$ | 6 | | | V |
| | | | 5 | | | V |
| I_{CES} | Collector Cut-off Current | $V_{CE}=50\text{V}, V_{BE}=0$ $V_{CE}=30\text{V}, V_{BE}=0$ | | 0.2 | 15 | nA |
| | | | | 0.2 | 15 | nA |
| h_{FE} | DC Current Gain | $V_{CE}=5\text{V}, I_C=2\text{mA}$ | 120 | | 800 | |
| $V_{CE(sat)}$ | Collector-Emitter Saturation Voltage | $I_C=10\text{mA}, I_B=0.5\text{mA}$ $I_C=100\text{mA}, I_B=5\text{mA}$ | | 0.07 | 0.2 | V |
| | | | | 0.2 | 0.6 | V |
| $V_{BE(sat)}$ | Collector-Base Saturation Voltage | $I_C=10\text{mA}, I_B=0.5\text{mA}$ $I_C=100\text{mA}, I_B=5\text{mA}$ | | 0.73 | 0.83 | V |
| | | | | 0.87 | 1.05 | V |
| $V_{BE(on)}$ | Base-Emitter On Voltage | $V_{CE}=5\text{V}, I_C=2\text{mA}$ | 0.55 | 0.62 | 0.7 | V |
| f_T | Current Gain Bandwidth Product | $V_{CE}=3\text{V}, I_C=0.5\text{mA}, f=100\text{MHz}$ | | 85 | | MHz |
| | | $V_{CE}=5\text{V}, I_C=10\text{mA}, f=100\text{MHz}$ | 150 | 250 | | MHz |
| C_{ob} | Output Capacitance | $V_{CB}=10\text{V}, I_E=0, f=1\text{MHz}$ | | 3.5 | 6 | pF |
| C_{ib} | Input Base Capacitance | $V_{EB}=0.5\text{V}, I_C=0, f=1\text{MHz}$ | | 8 | | pF |
| NF | Noise Figure | $V_{CE}=5\text{V}, I_C=0.2\text{mA}, f=1\text{KHz}, R_G=2\text{K}\Omega$ $V_{CE}=5\text{V}, I_C=0.2\text{mA}, R_G=2\text{K}\Omega, f=30-15\text{KHz}$ | | 2 | 10 | dB |
| | | | | | 4 | dB |
| | | | | | 4 | dB |

h_{FE} Classification

| Classification | A | B | C |
|----------------|-----------|-----------|-----------|
| h_{FE} | 120 ~ 220 | 180 ~ 460 | 380 ~ 800 |

Fig. 93 – Valor de β dos transistores BC237, BC238 e BC239.

8.2) O valor de V_{BE}

Vimos que, a junção formada entre a base e o emissor deve estar polarizada diretamente para que o transistor funcione de maneira adequada. Como a junção PN é a mesma utilizada na construção dos diodos, a queda de tensão V_{BE} (Tensão entre Base e Emissor) é próxima de 0,7V e possui praticamente as mesmas características do diodo.

$$V_{BE} = 0,7 V$$

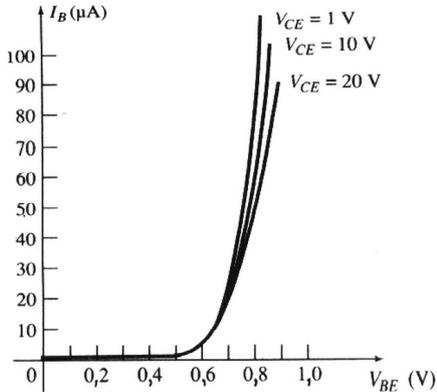


Fig. 94 – Tensão V_{BE} em função de I_B .

Na prática, é muito comum o técnico medir com um multímetro esta tensão para verificar se o transistor está funcionando. Somente esta informação não garante que o circuito com o transistor está correto, porém, valores muito baixos como 0,2V ou 0,3V e valores muito altos com 1V com certeza indicam falha no circuito ou no componente.

Obs: Os transistores modernos todos são feitos de silício. Somente na década de 50 e 60 foram utilizados transistores de germânio. Sendo uma raridade.

8.3) Símbolos utilizados

Estudamos um transistor formado pelo cristal P, cristal N e novamente cristal P. Esta configuração recebe o nome de Transistor PNP. Existem transistores fabricados com cristais formando uma estrutura NPN, e obviamente recebem o nome de transistor NPN. Abaixo podemos ver a estrutura e o símbolo utilizado em cada um:

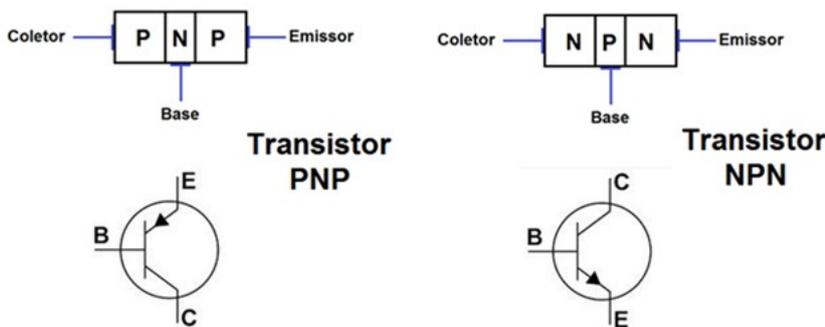


Fig. 95 – Representação dos transistores NPN e PNP.

Os transistores NPN são os mais comuns e trabalham com a tensão invertida com relação ao transistor PNP.

8.4) Polarizações básicas

Polarizar um transistor significa basicamente aplicar tensões e controlar as correntes de forma que ele possa funcionar como amplificador.

8.4.1) Configuração Base Comum

Vamos inicialmente analisar a polarização base comum com um transistor NPN.

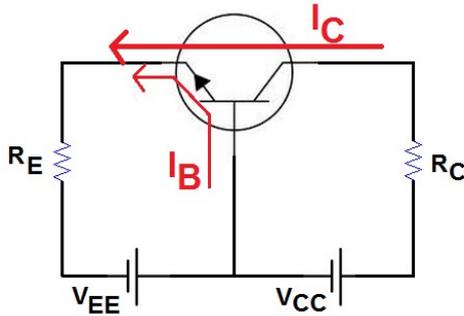


Fig. 96 – Circuito de polarização base comum de um transistor NPN.

Perceba que estamos adotando o sentido convencional da corrente, ou seja, a corrente vai do positivo da fonte para o negativo. Estamos também utilizando uma polarização direta entre a base e o emissor, com isso circula uma corrente na base que pode ser controlada pela resistência R_E .

Usando a Lei de Kirchoff para tensões podemos achar a tensão em R_E .

$$V_{RE} = V_{EE} - V_{BE}$$

Onde, $V_{BE} = 0,7V$.

Como a tensão em R_E depende somente da fonte e do valor desta resistência, podemos calcular o valor de R_E para fixar I_E em um valor desejado.

$$R_E = \frac{V_{EE} - 0,7}{I_E}$$

Como exemplo de cálculo vamos considerar: $V_{EE} = 10V$, $V_{CC} = 15V$ e a curva do transistor abaixo:

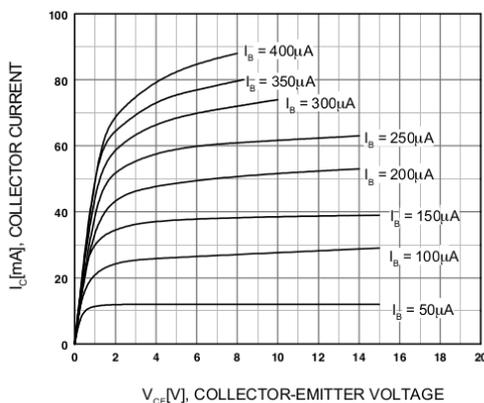


Fig. 97 – Curva de $I_C \times V_{CE}$ para vários valores de I_B de um transistor NPN.

Primeiramente devemos escolher um valor de V_{CE} no meio da curva para o transistor trabalhar. Valores muito altos de corrente I_C ou de tensão V_{CE} danificam o transistor e valores muito baixos podem fazer com que o sinal a ser amplificado seja cortado.

Escolhendo $V_{CE} = 6V$ devemos escolher um valor de I_B de modo que o transistor fique com uma corrente I_C entre o máximo e o mínimo permitido para o componente.

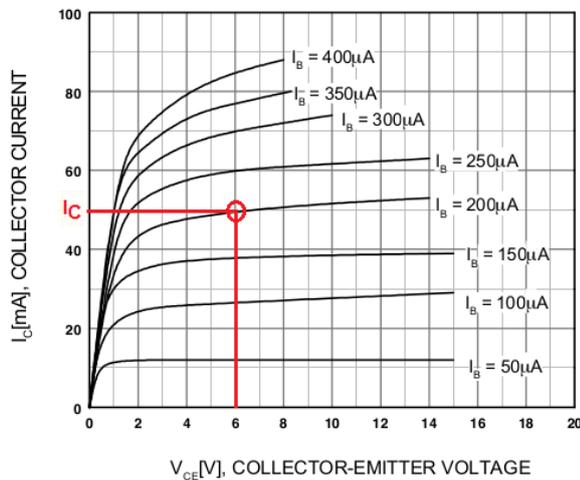


Fig. 98 – Ponto de operação escolhido.

Como podemos ver na figura acima, o ponto escolhido corresponde à tensão $V_{CE} = 6V$, $I_C = 50mA$, como $I_C \cong I_E$, $I_E = 50mA$ e da curva $I_B = 200\mu A$.

Para calcular R_E utilizamos a fórmula já vista:

$$R_E = \frac{V_{EE} - 0,7}{I_E}$$

$$R_E = \frac{10 - 0,7}{50m}$$

$$R_E = 186\Omega$$

Da mesma forma, o valor de R_C pode ser determinado considerando a tensão sobre ele e a corrente I_C :

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CB}}{I_C}$$

Como

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

$$V_{CB} = V_{CE} - V_{BE}$$

Assim

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE} + 0,7}{I_C} \quad R_C = \frac{15 - 6 + 0,7}{50m}$$

$$R_C = 194\Omega$$

8.4.2) Configuração Emissor Comum

A configuração emissor comum é a configuração mais utilizada em amplificadores. Abaixo um circuito com transistor NPN montado na configuração emissor comum.

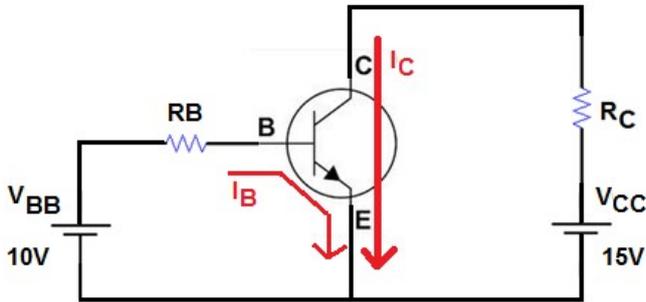
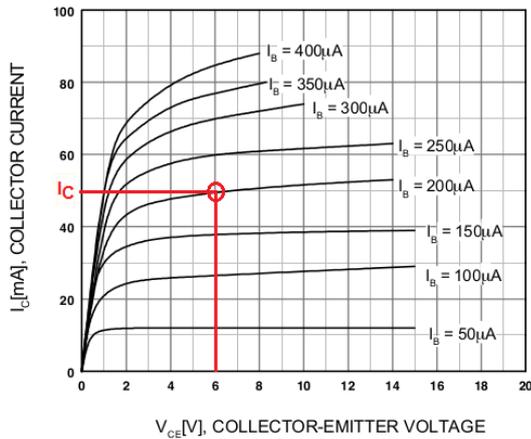


Fig. 99 – Circuito de polarização emissor comum com um transistor NPN.

Podemos usar nesta configuração a mesma curva utilizada para a polarização base comum.



Neste ponto temos:

$$\begin{aligned}
 I_C &= 50\text{mA} \\
 I_E &= 50\text{mA} \\
 I_B &= 200\mu\text{A} \\
 V_{CE} &= 6\text{V} \\
 V_{BE} &= 0,7\text{V}
 \end{aligned}$$

Devemos calcular R_B para que na base exista uma corrente $I_B = 200\mu\text{A}$. A tensão em R_B é a tensão da fonte V_{BB} menos $0,7\text{V}$ de queda em V_{BE} .

$$V_{RB} = V_{BB} - 0,7$$

Assim:

$$R_B = \frac{V_{BB} - 0,7}{I_B}$$

Neste nosso exemplo:

$$R_B = \frac{10 - 0,7}{200 \cdot 10^{-6}}$$

$$R_B = 46,5K\Omega$$

O valor do resistor R_C é calculado pela lei de Ohm. Temos em R_C a seguinte tensão:

$$V_{RC} = V_{cc} - V_{ce} \quad V_{RC} = 15 - 6 \quad V_{RC} = 9V$$

Usando agora a lei de Ohm encontramos o valor de R_C :

$$R_c = \frac{V_{RC}}{I_C} \quad R_c = \frac{9}{50 \cdot 10^{-3}}$$

$$R_C = 180\Omega$$

8.4.3) Configuração Coletor Comum

A polarização coletor comum pode ser feita utilizando os mesmos parâmetros utilizados na polarização emissor comum.

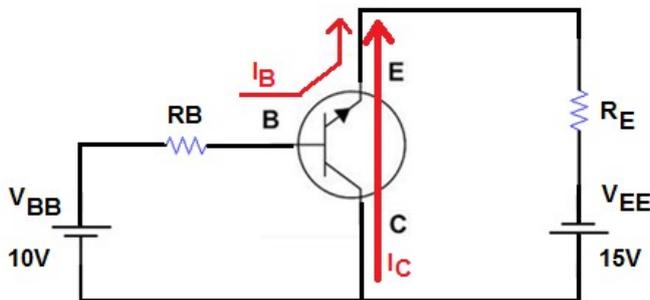


Fig. 100 – Circuito de polarização coletor comum de um transistor NPN.

Como se trata de uma configuração pouco utilizada não entraremos em detalhes neste curso.

8.5) Polarizações com uma única fonte

Estudaremos nesta parte do curso as polarizações utilizando uma única fonte de alimentação em substituição ao circuito anterior com duas fontes.

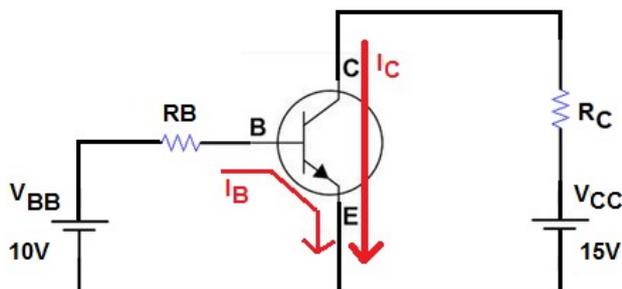


Fig. 101 – Circuito de polarização emissor comum com duas fontes.

8.5.1) Polarização fixa

A polarização fixa consiste na utilização direta da fonte de alimentação para criar a corrente de base através de um resistor.

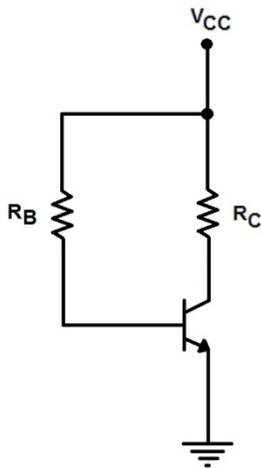


Fig. 102 – Circuito emissor comum com polarização fixa.

Como exemplo, vamos considerar $R_C = 2,2K$, $R_B = 240K$, $\beta = 50$ e $V_{CC} = 12V$.

Calculando I_B :

A tensão sobre o resistor R_B é a tensão da fonte menos 0,7, desta forma podemos achar a corrente por R_B .

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

$$I_B = \frac{12 - 0,7}{240 K}$$

$$I_B = 47,08 \mu A$$

Calculando I_C :

Podemos facilmente achar I_C uma vez que sabemos o valor de β .

$$I_C = \beta \cdot I_B \quad I_C = 50 \cdot 47,08 \cdot 10^{-6}$$

$$I_C = 2,35 mA$$

Calculando V_B :

A tensão na base é a própria tensão V_{BE} .

$$V_B = V_{BE}$$

$$V_B = 0,7 V$$

Calculando V_{RC} e V_C :

Para calcular V_C devemos achar a queda de tensão sobre R_C e subtrair da fonte.

$$V_{RC} = R_C \cdot I_C \quad V_{RC} = 2,2 K \cdot 2,35 m$$

$$V_{RC} = 5,17 V$$

$$V_C = V_{CC} - V_{RC} \quad V_C = 12 - 5,17$$

$$V_C = 6,83 V$$

Finalmente calculando V_{BC} :

V_{BC} é a diferença de potencial entre base (V_B) e coletor (V_C).

$$V_{BC} = V_B - V_C$$

$$V_{BC} = 0,7 - 6,83$$

$$V_{BC} = -6,13 V$$

O circuito com polarização fixa não é estável. O valor de β aumenta com a temperatura, assim, quando o circuito aquece a corrente I_C aumenta, aumentando ainda mais a temperatura e o valor de β provocando a chamada corrida térmica.

8.5.2) Polarização estável do emissor

Vimos que a polarização fixa tem o grave problema de poder ocorrer a corrida térmica, que pode levar o transistor à sua queima devido às altas correntes ou alta temperatura. A polarização estável do emissor melhora muito a estabilidade do circuito e evita a corrida térmica.

Sua configuração básica é:

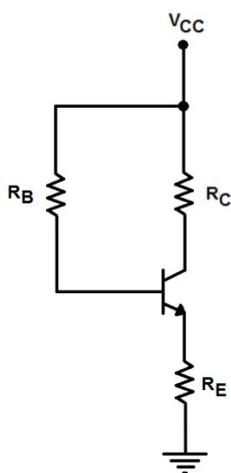


Fig. 103 – Circuito emissor comum com polarização estável do emissor.

Neste circuito, a corrente I_E que é praticamente igual à corrente I_C passa pelo resistor R_E provocando uma queda de tensão. Essa queda faz com que a tensão em R_B diminua devido ao aumento da tensão no emissor V_E . Com V_{RB} menor, ocorre uma diminuição no valor de I_B . Deste modo, o aumento de β é compensado pela diminuição de I_B mantendo I_C mais constante.

Neste circuito é possível demonstrar que:

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

Observe que, o resistor R_E aparece multiplicado pelo valor de $\beta + 1$. Matematicamente analisando, com o aumento de β , o valor do divisor aumenta e o valor de I_B diminui como esperado. Como exemplo, vamos supor um circuito com os seguintes valores:

$$V_{CC} = 20V$$

$$R_C = 2K\Omega$$

$$R_B = 430K\Omega$$

$$R_E = 1K\Omega$$

$$\beta = 50$$

Calculado I_B :

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

$$I_B = \frac{20 - 0,7}{430K + (50 + 1)1K}$$

$$I_B = 40,1 \mu A$$

Calculando I_C :

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

$$I_C = 50 \cdot 40,1 \cdot 10^{-6}$$

$$I_C = 2,01 mA$$

Calculando V_C :

Devemos calcular a queda em R_C e subtrair de V_{CC} .

$$V_C = V_{CC} - V_{RC}$$

$$V_C = V_{CC} - R_C \cdot I_C$$

$$V_C = 20 - 2K \cdot 2,01 m$$

$$V_C = 15,98 V$$

Calculando V_E :

A tensão em V_E é a tensão sobre o resistor R_E .

$$V_E = R_E \cdot I_E$$

$$V_E = 1\text{ K} \cdot 2,01\text{ m}$$

$$V_E = 2,01\text{ V}$$

Calculando V_{CE} :

A queda de tensão sobre o transistor é o valor da fonte menos as quedas nas resistências R_C e R_E .

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$

$$V_{CE} = 20 - 2,01\text{ m} (2\text{ K} + 1\text{ K})$$

$$V_{CE} = 13,97\text{ V}$$

Calculando V_B :

A tensão na base é tensão em V_E mais a queda em V_{BE} .

$$V_B = V_E + V_{BE}$$

$$V_B = 2,01 + 0,7$$

$$V_B = 2,71\text{ V}$$

Calculando V_{BC} :

Da mesma forma feita no circuito de polarização fixa.

$$V_{BC} = V_B - V_C$$

$$V_{BC} = 2,71 - 15,98$$

$$V_{BC} = -13,27\text{ V}$$

8.5.3) Polarização com divisor de tensão

Os circuitos anteriores dependem do β do transistor, que como vimos varia com a temperatura. O circuito com polarização estável do emissor compensa as variações do parâmetro β alterando a tensão no emissor.

O circuito com polarização com divisor de tensão permite polarizar o transistor de uma forma menos vulnerável as variações de β .

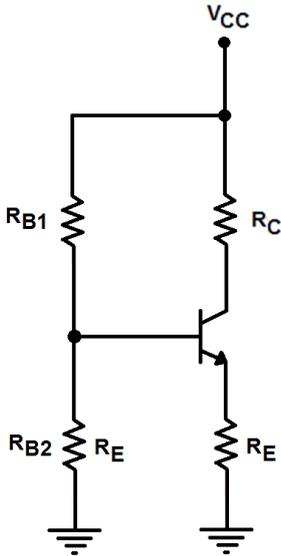


Fig. 104 – Circuito emissor comum com polarização com divisor de tensão.

Neste exemplo vamos considerar os seguintes valores:

$$V_{CC} = 22V$$

$$R_{B1} = 39K$$

$$R_{B2} = 3,9K$$

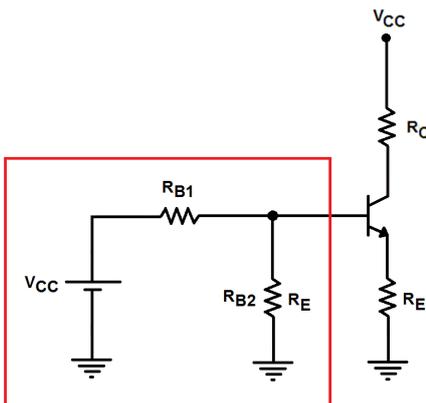
$$R_C = 10K$$

$$R_E = 1,5K$$

$$\beta = 140$$

Análise exata:

Temos na base uma fonte de tensão e duas resistências.



A fonte V_{CC} representa a própria tensão V_{CC} que alimenta o resistor R_C . Vamos agora através do teorema de Thevenin simplificar essa fonte.

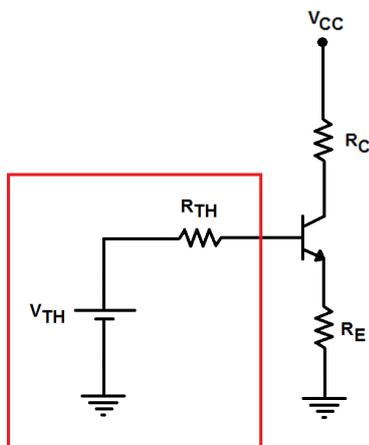
$$R_{TH} = \frac{R_{B1} \cdot R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \quad R_{TH} = \frac{39 K \cdot 3,9 K}{39 K + 3,9 K}$$

$$R_{TH} = 3,55 K$$

$$V_{TH} = \frac{V_{CC} \cdot R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \quad V_{TH} = \frac{22 \cdot 3,9 K}{39 K + 3,9 K}$$

$$V_{TH} = 2 V$$

Assim temos:



Como fizemos no circuito com polarização estável do emissor:

$$I_B = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + (\beta + 1) R_E}$$

Neste caso R_{TH} é a resistência de Thevenin e V_{TH} é a tensão de thevenin.

$$I_B = \frac{2 - 0,7}{3,55 K + (140 + 1) 1,5 K}$$

$$I_B = 6,05 \mu A$$

Calculando I_C :

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

$$I_C = 140 \cdot 6,05 \cdot 10^{-6}$$

$$I_C = 0,85 mA$$

Calculando V_C :

Devemos calcular a queda em R_C e subtrair de V_{CC} .

$$V_C = V_{CC} - V_{RC}$$

$$V_C = V_{CC} - R_C \cdot I_C$$

$$V_C = 22 - 10 K \cdot 0,85 m$$

$$V_C = 13,5 V$$

Calculando V_E : A tensão em V_E é a tensão sobre o resistor R_E .

$$V_E = R_E \cdot I_E$$

$$V_E = 1,5 K \cdot 0,85 m$$

$$V_E = 1,28 V$$

Calculando V_{CE} : A queda de tensão sobre o transistor é o valor da fonte menos as quedas nas resistências R_C e R_E .

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$

$$V_{CE} = 22 - 0,85 m (10 K + 1,5 K)$$

$$V_{CE} = 12,22 V$$

Calculando V_B : A tensão na base é tensão em V_E mais a queda em V_{BE} .

$$V_B = V_E + V_{BE}$$

$$V_B = 1,28 + 0,7$$

$$V_B = 1,98 V$$

Calculando V_{BC} : Da mesma forma feita no circuito de polarização fixa.

$$V_{BC} = V_B - V_C$$

$$V_{BC} = 1,98 - 13,5$$

$$V_{BC} = -11,52 V$$

Análise aproximada:

Se $\beta \cdot R_E \geq 10 \cdot R_2$ podemos achar o valor aproximado de V_B por divisor de tensão.

$$V_B = \frac{V_{CC} \cdot R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \quad V_B = \frac{22,3,9 K}{39 K + 3,9 K}$$

$$V_B = 2 V$$

$$\text{Como } V_E = V_B - 0,7$$

$$V_E = 1,3 V$$

Assim calculamos I_E que é praticamente igual à I_C .

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} \quad I_E = \frac{1,3}{1,5 K}$$

$$I_E = 0,87 \text{ mA} \quad \text{e} \quad I_C = 0,87 \text{ mA}$$

Como pode ser visto um erro muito pequeno com a facilidade de não precisar calcular V_{TH} e R_{TH} .

8.5.4) Polarização com realimentação do coletor

O circuito de polarização com realimentação do coletor é mostrado abaixo:

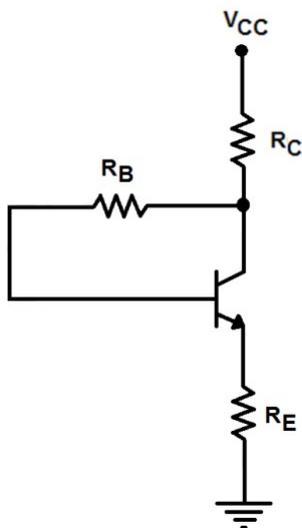


Fig. 105 – Circuito emissor comum com polarização de realimentação do coletor.

Este circuito apresenta uma estabilidade maior com as variações de temperatura se comparado ao circuito estável do emissor e ao divisor de tensão.

Como exemplo, vamos adotar os seguintes valores:

$$V_{CC} = 10 V$$

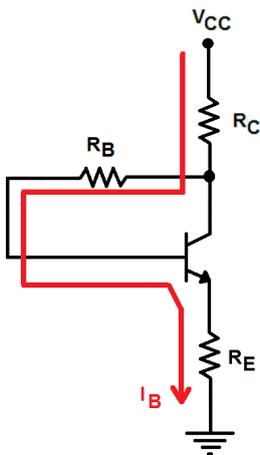
$$R_C = 4,7 K\Omega$$

$$R_B = 250 K\Omega$$

$$R_E = 1,2 K\Omega$$

$$\beta = 90$$

Para determinar o valor de I_B seguimos o seguinte caminho.



De onde podemos tirar a seguinte expressão:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + \beta \cdot (R_C + R_E)}$$

Resolvendo:

$$I_B = \frac{10 - 0,7}{250\text{ K} + 90 \cdot (4,7\text{ K} + 1,2\text{ K})}$$

$$I_B = 11,91\ \mu\text{A}$$

Calculando I_C :

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

$$I_C = 90 \cdot 11,91 \cdot 10^{-6}$$

$$I_C = 1,07\text{ mA}$$

Calculando V_{CE} :

A queda de tensão sobre o transistor é o valor da fonte menos as quedas nas resistências R_C e R_E .

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$

$$V_{CE} = 10 - 1,07\text{ m} (4,7\text{ K} + 1,2\text{ K})$$

$$V_{CE} = 3,69\text{ V}$$

Os valores de V_E , V_C e V_B e outros seguem o mesmo raciocínio utilizado nas polarizações apresentadas anteriormente.

8.5.5) Valores práticos de β

O valor de β , como vimos varia com a temperatura assim como outros parâmetros. Os datasheets fornecem os valores máximos e mínimos, bem como curvas de resposta dos componentes. Para o caso específico do valor de β a variação é muito grande. A figura abaixo mostra uma parte dos dados dos transistores BC238:

| | | | | | | |
|--------------|--------------------------------|---|------|------|------|----------------|
| $V_{BE(on)}$ | Base-Emitter On Voltage | $I_C=100mA, I_B=5mA$ $V_{CE}=5V, I_C=2mA$ | 0.55 | 0.87 | 1.05 | V |
| f_T | Current Gain Bandwidth Product | $V_{CE}=3V, I_C=0.5mA, f=100MHz$ $V_{CE}=5V, I_C=10mA, f=100MHz$ | 150 | 85 | 250 | MHz MHz |
| C_{ob} | Output Capacitance | $V_{CE}=10V, I_E=0, f=1MHz$ | | 3.5 | 6 | pF |
| C_{ib} | Input Base Capacitance | $V_{EB}=0.5V, I_C=0, f=1MHz$ | | 8 | | pF |
| NF | Noise Figure | $V_{CE}=5V, I_C=0.2mA,$ $f=1KHz R_G=2K\Omega$: BC237/238 $V_{CE}=5V, I_C=0.2mA$: BC239 $R_G=2K\Omega, f=30\sim 15KHz$: BC239 | | 2 | 10 | dB dB dB |

| h_{FE} Classification | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|
| Classification | A | B | C |
| h_{FE} | 120 ~ 220 | 180 ~ 460 | 380 ~ 800 |

Fig. 106 – Parte do Datasheet do transistor BJT BC238 da Fairchild, em destaque o valor de β .

Como pode ser visto o valor de β pode variar de um componente para outro do mesmo tipo e do mesmo fabricante. Mudança de valores de resistências e outros componentes é comum em linhas de produção para corrigir essa variação quando necessário.