

# 1 DIODO SEMICONDUTOR E RETIFICAÇÃO

## 1.1 FÍSICA DOS SEMICONDUTORES

### A ESTRUTURA DO ÁTOMO

O átomo é formado basicamente por 3 tipos de partículas elementares: Elétrons, prótons e nêutrons. A carga do elétron é igual a do próton, porém de sinal contrário. Os elétrons giram em torno do núcleo distribuindo-se em diversas camadas, num total de até sete camadas. Em cada átomo, a camada mais externa é chamada de valência, e geralmente é ela que participa das reações químicas

Todos os materiais encontrados na natureza são formados por diferentes tipos de átomos, diferenciados entre si pelo seus números de prótons, elétrons e nêutrons. Cada material tem uma infinidade de características, mas uma especial em eletrônica é o comportamento à passagem de corrente. Pode-se dividir em três tipos principais:

### MATERIAIS CONDUTORES DE ELETRICIDADE

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

### MATERIAIS ISOLANTES

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

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

### MATERIAL SEMICONDUTOR

Materiais que apresentam uma resistividade elétrica intermediária. Como exemplo temos o germânio e silício

### ESTUDO DO SEMICONDUTORES

Os átomos de germânio e silício tem uma camada de valência com 4 elétrons. Quando os átomos de germânio (ou silício) agrupam-se entre si, formam uma estrutura cristalina, ou seja, são substâncias cujos átomos se posicionam no espaço, formando uma estrutura ordenada. Nessa estrutura, cada átomo une-se a quatro outros átomos vizinhos, por meio de ligações covalentes, e cada um dos quatro elétrons de valência de um átomo é compartilhado com um átomo vizinho, de modo que dois átomos adjacentes compartilham os dois elétrons, ver Figura 1-1.

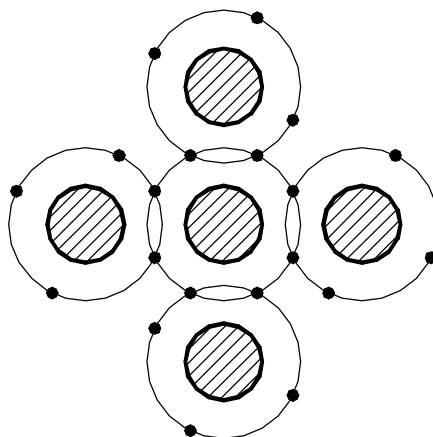


Figura 1-1

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

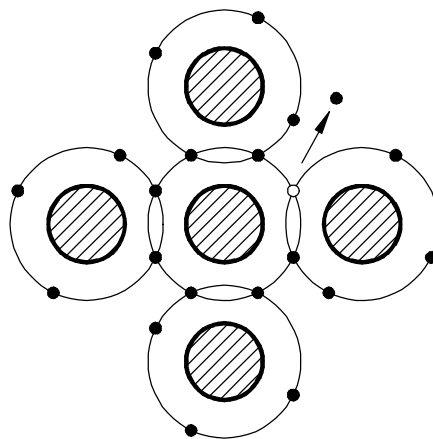


Figura 1-2

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

Sempre que uma ligação covalente é rompida, surgem, simultaneamente, um elétron e uma lacuna. Entretanto, pode ocorrer o inverso, um elétron preencher o lugar de uma lacuna, completando a ligação covalente (processo de recombinação). Como tanto os elétrons quanto as lacunas sempre aparecem e desaparecem aos pares, pode-se afirmar que o número de lacunas é sempre igual ao de elétrons livres.

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

### IMPUREZAS

Os cristais de silício (ou germânio. Mas não vamos considerá-lo, por simplicidade e também porque o silício é de uso generalizado em eletrônica) são encontrados na natureza misturados com outros elementos. Dado a dificuldade de se controlar as

características destes cristais é feito um processo de purificação do cristal e em seguida é injetado através de um processo controlado, a inserção proposital de impurezas na ordem de 1 para cada  $10^6$  átomos do cristal, com a intenção de se alterar produção de elétrons livres e lacunas. A este processo de inserção dá-se o nome de dopagem.

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

### IMPUREZA DOADORA

São adicionados átomos pentavalentes (com 5 elétrons na camada de valência. Ex.: Fósforo e Antimônio). O átomo pentavalente entra no lugar de um átomo de silício dentro do cristal absorvendo as suas quatro ligações covalentes, e fica um elétron fracamente ligado ao núcleo do pentavalente (uma pequena energia é suficiente para se tornar livre).

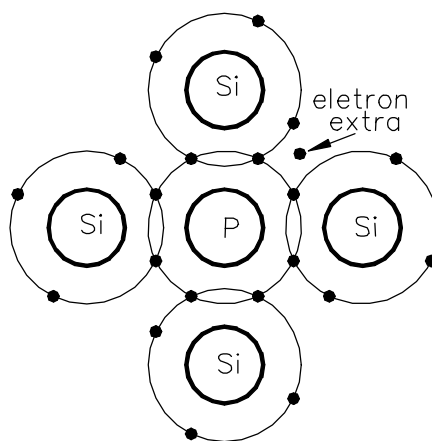


Figura 1-3

### IMPUREZA ACEITADORA

São adicionados átomos trivalentes (tem 3 elétrons na camada de valência. Ex.: Boro, alumínio e gálio). O átomo trivalente entra no lugar de um átomo de silício dentro do cristal absorvendo três das suas quatro ligações covalentes. Isto significa que existe uma lacuna na órbita de valência de cada átomo trivalente.

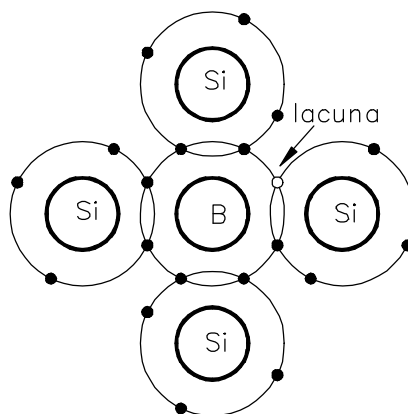


Figura 1-4

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

### SEMICONDUTOR TIPO N

O cristal que foi dopado com impureza doadora é chamado semiconductor tipo  $n$ , onde  $n$  está relacionado com negativo. Como os elétrons livres excedem em número as lacunas

num semicondutor tipo  $n$ , os elétrons são chamados portadores majoritários e as lacunas, portadores minoritários.

### SEMICONDUTOR TIPO P

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

## 1.2 DIODO

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

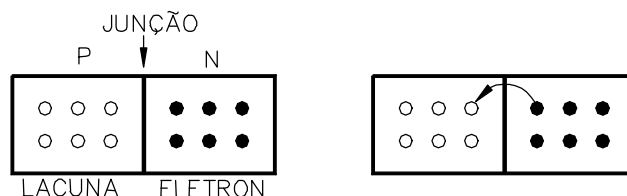


Figura 1-5

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

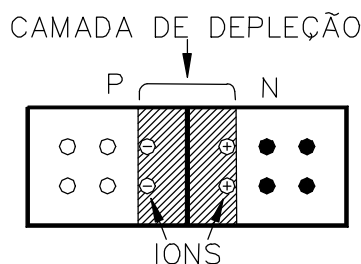
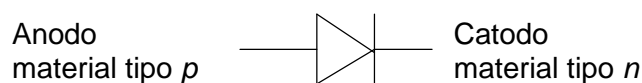


Figura 1-6

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

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

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



## POLARIZAÇÃO DO DIODO

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

### POLARIZAÇÃO DIRETA

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

### POLARIZAÇÃO REVERSA

Invertendo-se as conexões entre a bateria e a junção  $pn$ , isto é, ligando o pólo positivo no material tipo  $n$  e o pólo negativo no material tipo  $p$ , a junção fica polarizada inversamente.

No material tipo  $n$  os elétrons são atraídos para o terminal positivo, afastando-se da junção. Fato análogo ocorre com as lacunas do material do tipo  $p$ . Podemos dizer que a bateria aumenta a camada de depleção, tornando praticamente impossível o deslocamento de elétrons de uma camada para outra.

## CURVA CARACTERÍSTICA DE UM DIODO

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

### POLARIZAÇÃO DIRETA

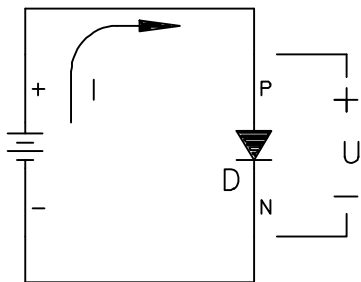


Figura 1-7

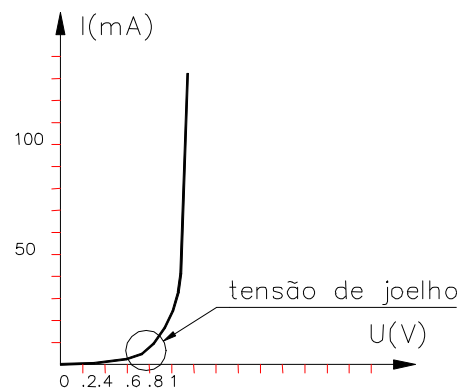


Figura 1-8

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

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

### TENSÃO DE JOELHO

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

### POLARIZAÇÃO REVERSA DO DIODO

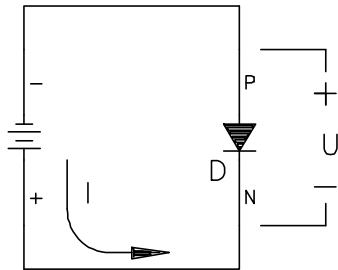


Figura 1-9

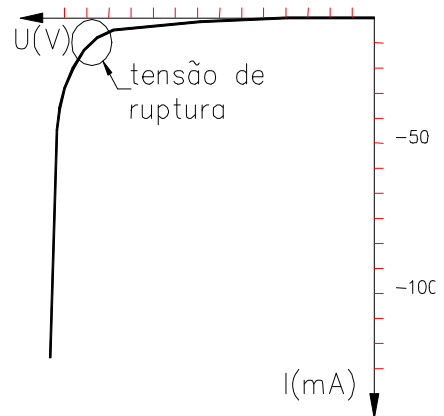


Figura 1-10

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

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

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

GRÁFICO COMPLETO.

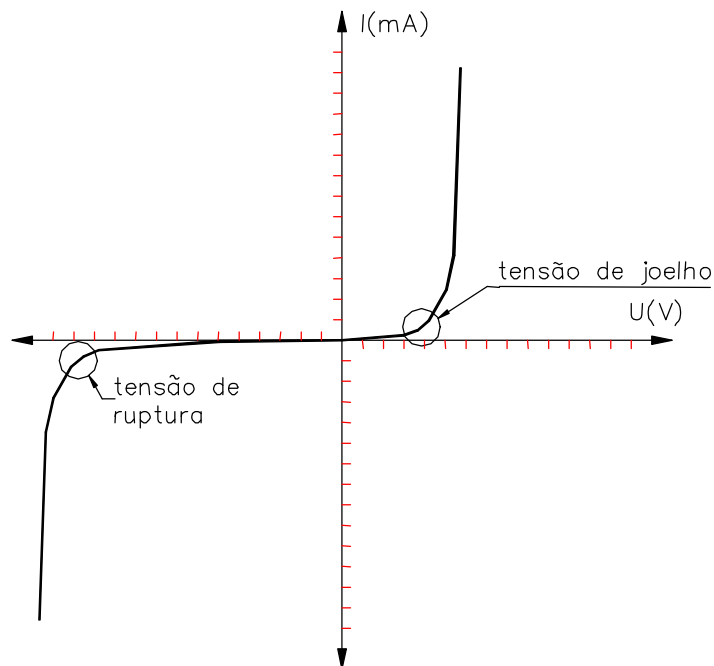


Figura 1-11

### ESPECIFICAÇÕES DE POTÊNCIA DE UM DIODO

Em qualquer componente, a potência dissipada é a tensão aplicada multiplicada pela corrente que o atravessa e isto vale para o diodo:

$$P = U \cdot I$$

Eq. 1-2

Não se pode ultrapassar a potência máxima, especificada pelo fabricante, pois haverá um aquecimento excessivo. Os fabricantes em geral indicam a potência máxima ou corrente máxima suportada por um diodo.

Ex.: 1N914 -  $P_{MAX} = 250mW$

1N4001 -  $I_{MAX} = 1A$

Usualmente os diodos são divididos em duas categorias, os diodos para pequenos sinais (potência especificada abaixo de 0,5W) e os retificadores ( $P_{MAX} > 0,5W$ ).

## RESISTOR LIMITADOR DE CORRENTE

Num diodo polarizado diretamente, uma pequena tensão aplicada pode gerar uma alta intensidade de corrente. Em geral um resistor é usado em série com o diodo para limitar a corrente elétrica que passa através deles.

$R_S$  é chamado de resistor limitador de corrente. Quanto maior o  $R_S$ , menor a corrente que atravessa o diodo e o  $R_S$ .

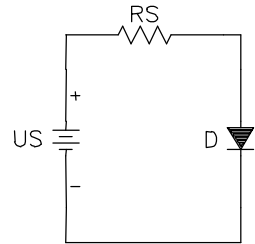


Figura 1-12

## RETA DE CARGA

Sendo a curva característica do diodo não linear, torna-se complexo determinar através de equações o valor da corrente e tensão sobre o diodo e resistor. Um método para determinar o valor exato da corrente e da tensão sobre o diodo, é o uso da reta de carga. Baseia-se no uso gráfico das curvas do diodo e da curva do resistor.

Na Figura 1-12, a corrente  $I$  através do circuito é a seguinte:

$$I = \frac{U_R}{R_S} = \frac{U_S - U_D}{R_S} \quad \text{Eq. 1- 3}$$

No circuito em série a corrente é a mesma no diodo e no resistor. Se forem dados a tensão da fonte e a resistência  $R_S$ , então são desconhecidas a corrente e a tensão sob o diodo. Se, por exemplo, no circuito da Figura 1-12 o  $U_S = 2V$  e  $R_S = 100\Omega$ , então:

$$I = \frac{2 - U_D}{100} = -0,01 * U_D + 20mA \quad \text{Eq. 1- 4}$$

Se  $U_D = 0V \Rightarrow I = 20mA$ . Esse ponto é chamado de ponto de saturação, pois é o máximo valor que a corrente pode assumir.

E se  $I = 0A \Rightarrow U_D = 2V$ . Esse ponto é chamado corte, pois representa a corrente mínima que atravessa o resistor e o diodo.

A Eq. 1-4 indica uma relação linear entre a corrente e a tensão ( $y = ax + b$ ). Sobrepondo esta curva com a curva do diodo tem-se:

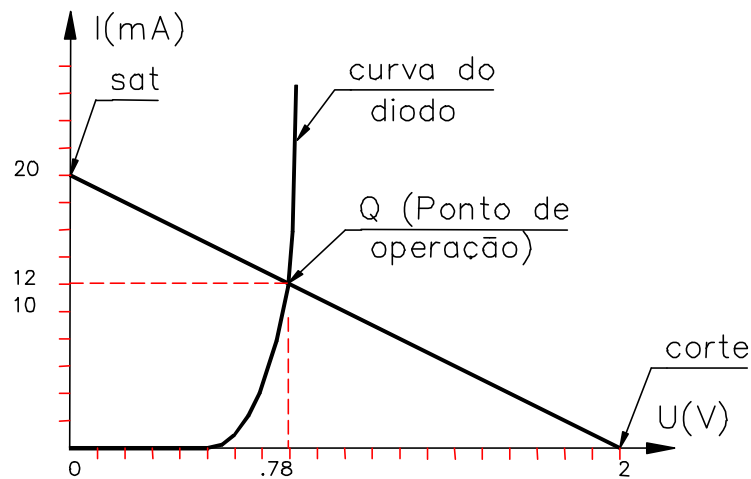


Figura 1-13

( $I=0A, U=2V$ ) - Ponto de corte  $\Rightarrow$  Corrente mínima do circuito

( $I=20mA, U=0V$ ) - Ponto de saturação  $\Rightarrow$  Corrente máxima do circuito

( $I=12mA, U=0,78V$ ) - Ponto de operação ou quiescente  $\Rightarrow$  Representa a corrente através do diodo e do resistor. Sobre o diodo existe uma tensão de 0,78V.

### 1.3 DIODO EMISSOR DE LUZ E FOTODIODO

O diodo emissor de luz (LED) é um diodo que quando polarizado diretamente emite luz visível (amarela, verde, vermelha, laranja ou azul) ou luz infravermelha. Ao contrário dos diodos comuns não é feito de silício, que é um material opaco, e sim, de elementos como gálio, arsênico e fósforo. É amplamente usada em equipamentos devido a sua longa vida, baixa tensão de acionamento e boa resposta em circuitos de chaveamento.

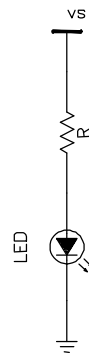


Figura 1-14

A polarização do LED é similar ao um diodo comum, ou seja, acoplado em série com um resistor limitador de corrente, como mostrado na Figura 1-14. o LED é esquematizado como um diodo comum com seta apontando para fora como símbolo de luz irradiada. A corrente que circula no LED é:

$$I_D = \frac{V_s - V_D}{R} \quad \text{Eq. 1- 5}$$

Para a maioria dos LED's disponíveis no mercado, a queda de tensão típica é de 1,5 a 2,5V para correntes entre 10 e 50mA.

#### FOTODIODO

É um diodo com encapsulamento transparente, reversamente polarizado que é sensível a luz. Nele, o aumento da intensidade luminosa, aumenta sua a corrente reversa

Num diodo polarizado reversamente, circula somente os portadores minoritários. Esses portadores existem porque a energia térmica entrega energia suficiente para alguns elétrons de valência saírem fora de suas órbitas, gerando elétrons livres e lacunas, contribuindo, assim, para a corrente reversa. Quando uma energia luminosa incide numa junção *pn*, ela injeta mais energia ao elétrons de valência e com isto gera mais elétrons livres. Quanto mais intensa for a luz na junção, maior será corrente reversa num diodo.



## 1.4 APROXIMAÇÕES DO DIODO

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

### 1ª APROXIMAÇÃO (DIODO IDEAL)

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

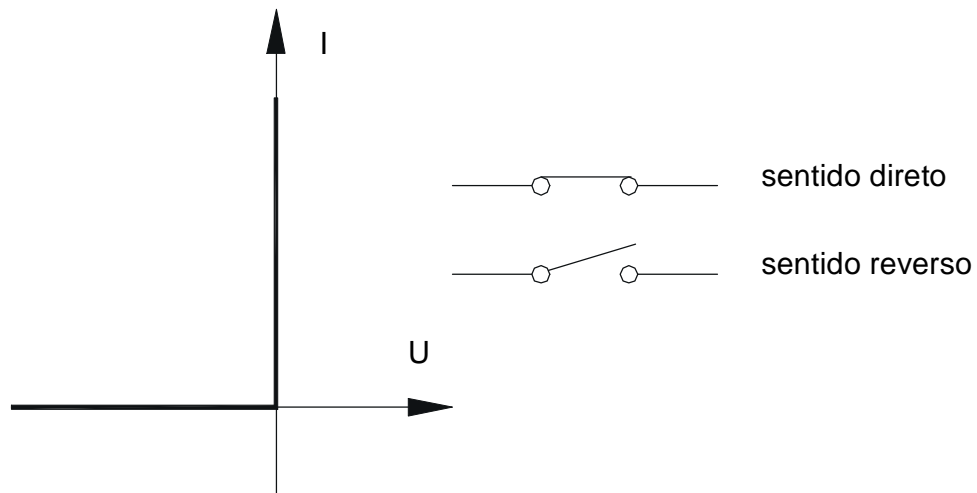


Figura 1-15

### 2ª APROXIMAÇÃO

Leva-se em conta o fato de o diodo precisar de 0,7V para iniciar a conduzir.

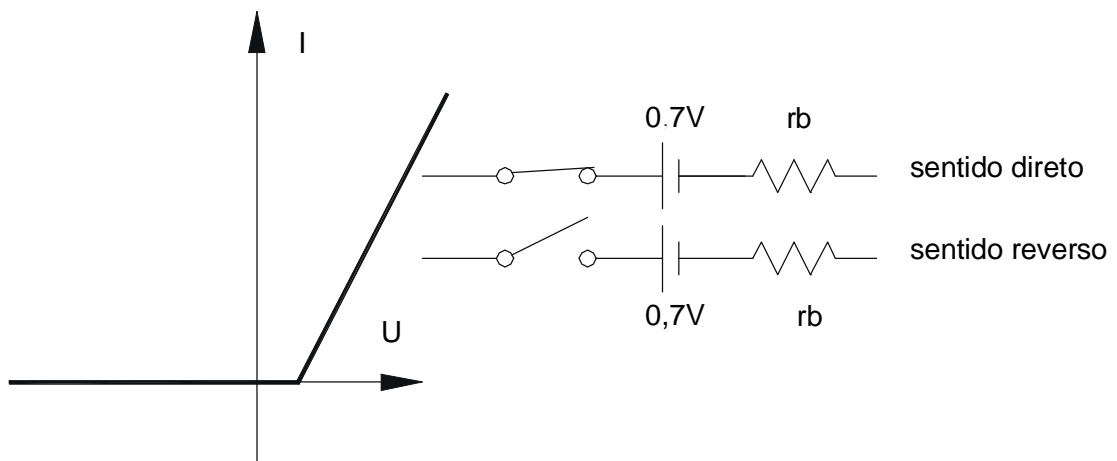


Figura 1-16

Pensa-se no diodo como uma chave em série com uma bateria de 0,7V.

### 3ª APROXIMAÇÃO

Na terceira aproximação considera a resistência interna do diodo.

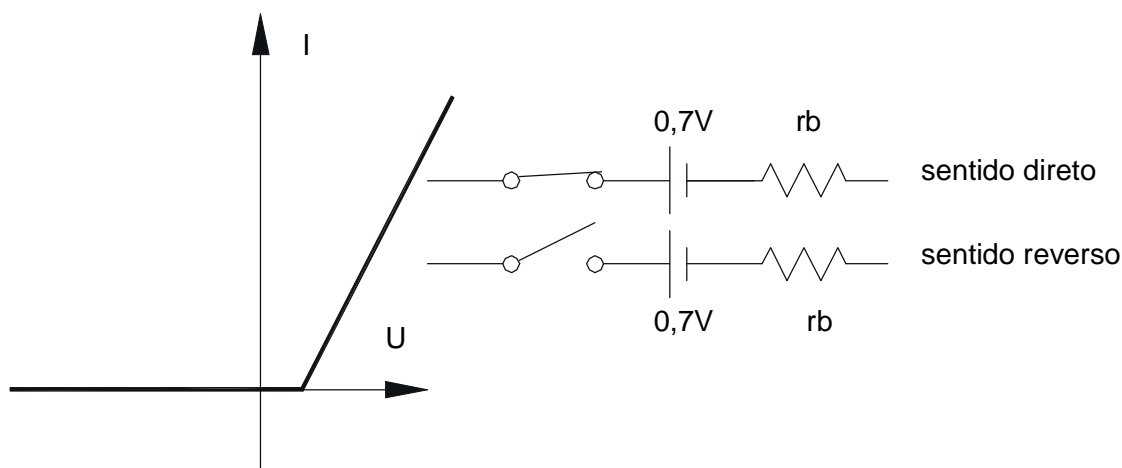


Figura 1-17

Obs.: Ao longo do curso será usada a 2ª aproximação.

Exemplo 1-1 Utilizar a 2ª aproximação para determinar a corrente do diodo no circuito da Figura 1-18:

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

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

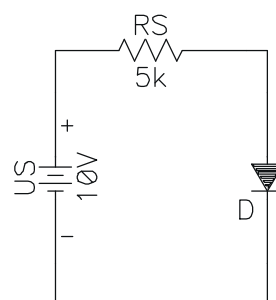


Figura 1-18

### RESISTÊNCIA CC DE UM DIODO

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

$R_D$  - Resistência cc no sentido direto

$R_R$  - Resistência cc no sentido reverso

### RESISTÊNCIA DIRETA

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

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

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

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

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

Nota-se que a resistência cc diminuí com o aumento da tensão

### RESISTÊNCIA REVERSA

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

$$R_{S1} = 20/25nA = 800M\Omega$$

$$R_{S2} = 75/5\mu A = 15M\Omega$$

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

## 1.5 RETIFICADORES DE MEIA ONDA E ONDA COMPLETA

É comum em circuitos eletrônicos o uso de baterias de alimentação. Devido ao alto custo de uma bateria se comparado com a energia elétrica, torna-se necessário a criação de um circuito que transforme a tensão alternada de entrada em uma tensão contínua compatível com a bateria. O diodo é um componente importante nesta transformação. É que se verá neste item.

### ONDA SENOIDAL

A onda senoidal é um sinal elétrico básico. Sinais mais complexos podem ser representados por uma soma de sinais senoidais.

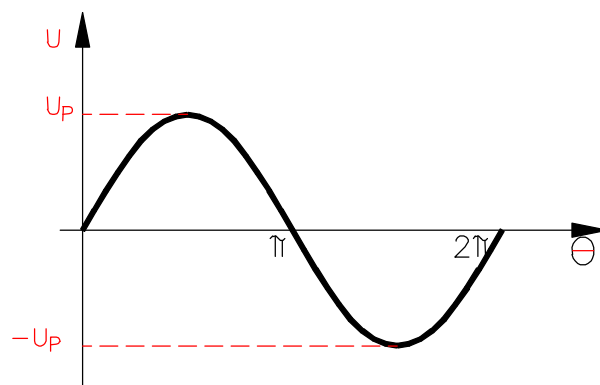


Figura 1-19

A equação que representa a curva da Figura 1-19 é a seguinte:

$$U = U_p \sin \theta \quad \text{Eq. 1-6}$$

onde:

$U \Rightarrow$  tensão instantânea

$U_p \Rightarrow$  tensão de pico

Algumas maneiras de se referir aos valores da onda:

*Valor de pico*  $U_p \Rightarrow$  Valor máximo que a onda atinge

*Valor de pico a pico* ( $U_{pp}$ )  $\Rightarrow$  Diferença entre o máximo e mínimo que a onda atinge  $U_{pp} = U_p - (-U_p) = 2 U_p$

*Valor eficaz* ( $U_{RMS}$ ) (*Root Mean Square*)

O valor rms é valor indicado pelo voltímetro quando na escala *ca*. O valor rms de uma onda senoidal, é definido como a tensão *cc* que produz a mesma quantidade de calor que a onda senoidal. Pode-se mostrar que:

$$V_{RMS} = 0,707 U_p \quad \text{Eq. 1-7}$$

*Valor médio*

O valor médio é quantidade indicada em um voltímetro quando na escala *cc*. O valor médio de uma onda senoidal ao longo de um ciclo é zero. Isto porque cada valor da primeira metade do ciclo, tem um valor igual mas de sinal contrário na segunda metade do ciclo.

## O TRANSFORMADOR

As fontes de tensões utilizadas em sistemas eletrônicos em geral são menores que  $30V_{CC}$  enquanto a tensão de entrada de energia elétrica costuma ser de  $127V_{RMS}$  ou  $220V_{RMS}$ . Logo é preciso um componente para abaixar o valor desta tensão alternada. O componente utilizado é o transformador. O transformador é a grosso modo constituído por duas bobinas (chamadas de enrolamentos). A energia passa de uma bobina para outra através do fluxo magnético. Abaixo um exemplo de transformador:

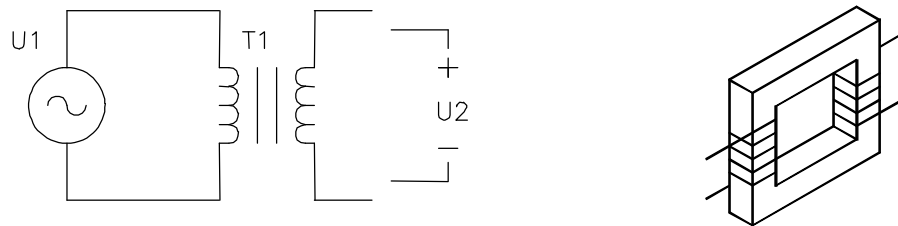


Figura 1-20

A tensão de entrada  $U_1$  está conectada ao que se chama de enrolamento primário e a tensão de saída ao enrolamento secundário.

No transformador ideal:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad \text{Eq. 1-8}$$

Onde:

$U_1$  tensão no primário

$U_2$  tensão no secundário

$N_1$  número de espiras no enrolamento primário

$N_2$  número de espiras no enrolamento secundário

A corrente elétrica no transformados ideal é:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad \text{Eq. 1-9}$$

Exemplo 1-2 Se a tensão de entrada for  $115 V_{RMS}$ , a corrente de saída de  $1,5A_{RMS}$  e a relação de espiras 9:1. Qual a tensão no secundário em valores de pico a pico? E a corrente elétrica no primário?

SOL.

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} \Rightarrow \frac{U_2}{115} = \frac{1}{9} \Rightarrow U_2 = 12,8 V_{RMS}$$

$$U_{2PP} = 12,8 / 0,707 = 18V_{PP}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \Rightarrow \frac{I_1}{1,5} = \frac{1}{9} \Rightarrow I_1 = 0,167A_{RMS}$$

obs.: a potência elétrica de entrada e de saída num transformador ideal são iguais.

$$P = U \cdot I = 115 \cdot 0,167 = 12,8 \cdot 1,5 = 19,2W$$

## RETIFICADOR DE MEIA ONDA

O retificador de meia onda converte a tensão de entrada ( $U_{\text{SECUNDÁRIO}}$ ) ca numa tensão pulsante positiva  $U_R$ . Este processo de conversão de AC para CC, é conhecido como “retificação”. Na Figura 1-21 é mostrado um circuito de meia onda.

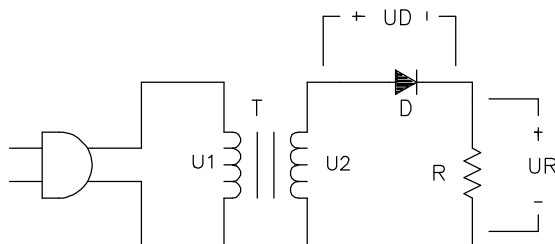


Figura 1-21

Considerando o diodo como ideal, as curvas são as mostrada na Figura 1-22. A saída do secundário tem dois ciclos de tensão: Um semiciclo positivo e um negativo. Durante o semiciclo positivo o diodo está ligado no sentido direto e age como uma chave fechada e pela lei das malhas toda a tensão do secundário incide no resistor R. Durante o semiciclo negativo o diodo está polarizado reversamente e não há corrente circulando no circuito. Sem corrente elétrica circulando implica em não ter tensão sob o resistor e toda a tensão do secundário fica no diodo. Este circuito é conhecido como retificador de meio ciclo porque só o semiciclo positivo é aproveitado na retificação.

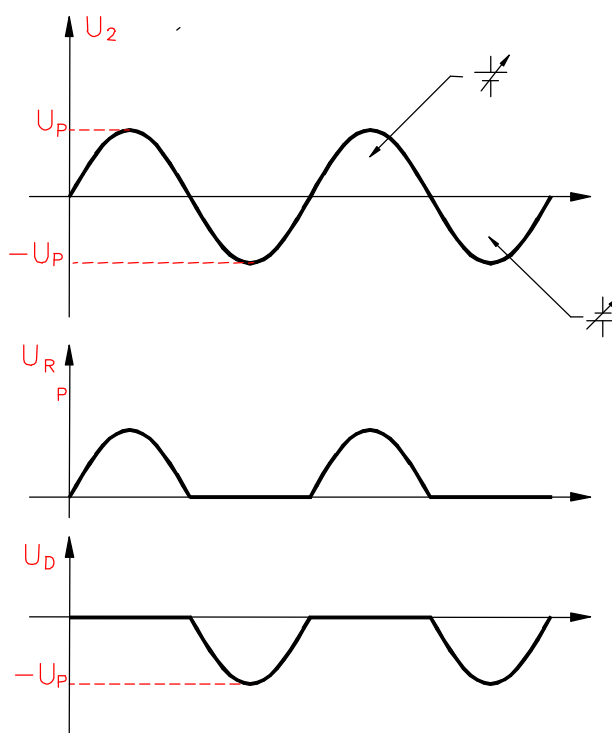


Figura 1-22

O resistor R indicado no circuito representa a carga ôhmica acoplada ao retificador, podendo ser tanto um simples resistor como um circuito complexo e normalmente ele é chamado de *resistor de carga* ou simplesmente de *carga*.

### VALOR CC OU VALOR MÉDIO

A tensão média de um retificador de meia onda mostrada por um voltímetro é dado por:

$$V_{CC} = 0.318 U_P \text{ diodo ideal}$$

Eq. 1-10

$$V_{CC} = 0.318 (U_P - V_G) \text{ diodo 2ª aproximação}$$

Eq. 1-11

## RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA

A Figura 1-23 mostra um retificador de onda completa. Observe a tomada central no enrolamento secundário. Por causa dessa tomada, o circuito é equivalente a dois retificadores de meia onda. O retificador superior retifica o semiciclo positivo da tensão do secundário, enquanto o retificador inferior retifica o semiciclo negativo da tensão do secundário.

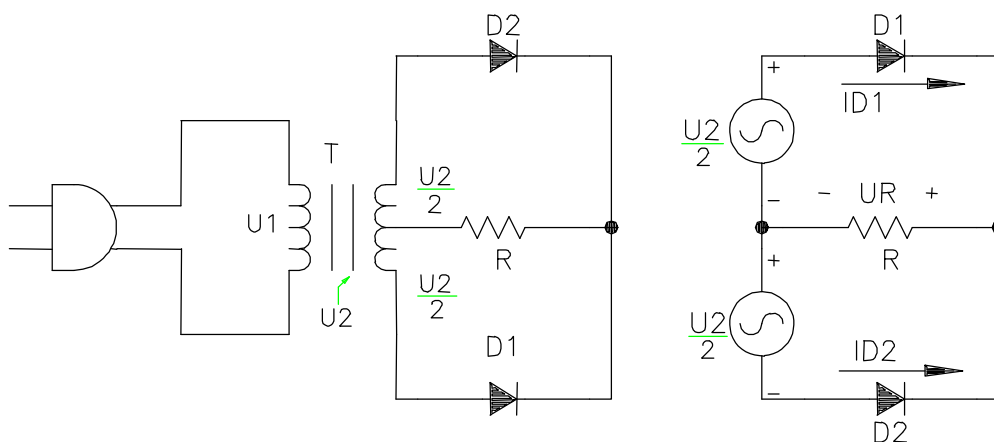


Figura 1-23

As duas tensões denominadas de  $U_2/2$  na Figura 1-23 são idênticas em amplitude e fase. O transformador ideal pode ser, portanto, substituído por duas fontes de tensão idênticas, como mostra a Figura 1-23 à direita, sem alteração no funcionamento elétrico da rede. Quando  $U_2/2$  é positiva,  $D_1$  está diretamente polarizado e conduz mas  $D_2$  está reversamente polarizado e cortado. Analogamente, quando  $U_2/2$  é negativa,  $D_2$  conduz e  $D_1$  cortado.

Considerando os dois diodos ideais, temos a curva de tensão sobre o resistor de carga mostrada na Figura 1-24.

### VALOR CC OU VALOR MÉDIO

A tensão média de um retificador de meia onda mostrada por um voltímetro é similar o do retificador de meia onda com a observação de que agora tem-se um ciclo completo e o valor será o dobro. É dado por:

$$V_{CC} = 2 \cdot 0.318 (U_P/2) = 0,318 U_P \text{ diodo ideal}$$

Eq. 1-12

$$V_{CC} = 0.636 (U_P/2 - V_G) \text{ diodo 2ª aproximação}$$

Eq. 1-13

### FREQÜÊNCIA DE SAÍDA

A freqüência de saída de onda completa é o dobro da freqüência de entrada, pois a definição de ciclo completo diz que uma forma de onda completa seu ciclo quando ela

começa a repeti-lo. Na Figura 1-24, a forma de onda retificada começa a repetição após um semiciclo da tensão do secundário. Supondo que a tensão de entrada tenha uma frequência de 60Hz, a onda retificada terá uma frequência de 120Hz e um período de 8,33ms.

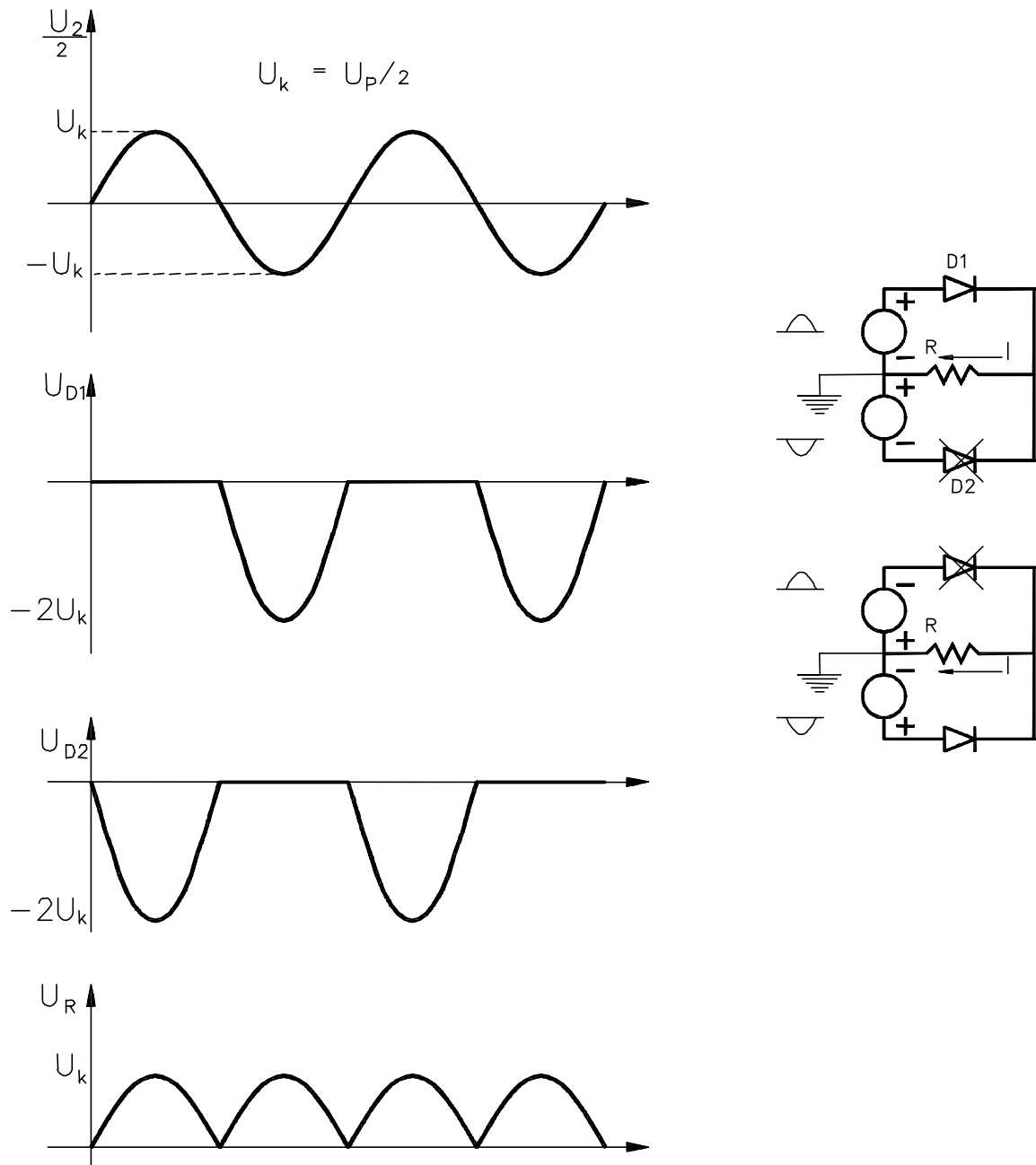


Figura 1-24

## RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA EM PONTE

Na Figura 1-25 é mostrado um retificador de onda completa em ponte. Com o uso de quatro diodos no lugar de dois, elimina-se o uso da tomada central do transformador.

Durante o semiciclo positivo da tensão  $U_2$ , o diodo  $D_3$  recebe um potencial positivo em seu anodo, e o  $D_2$  um potencial negativo no catodo. Dessa forma,  $D_2$  e  $D_3$  conduzem,  $D_1$  e  $D_4$  ficam reversamente polarizado e o resistor de carga  $R$  recebe todo o semiciclo positivo da tensão  $U_2$ .

Durante o semiciclo negativo da tensão  $U_2$ , o diodo  $D_4$  recebe um potencial positivo em seu anodo, e o diodo  $D_1$  um potencial negativo no catodo, devido à inversão da polaridade de  $U_2$ . Os diodos  $D_1$  e  $D_4$  conduzem e os diodos  $D_2$  e  $D_3$  ficam reversamente polarizado.

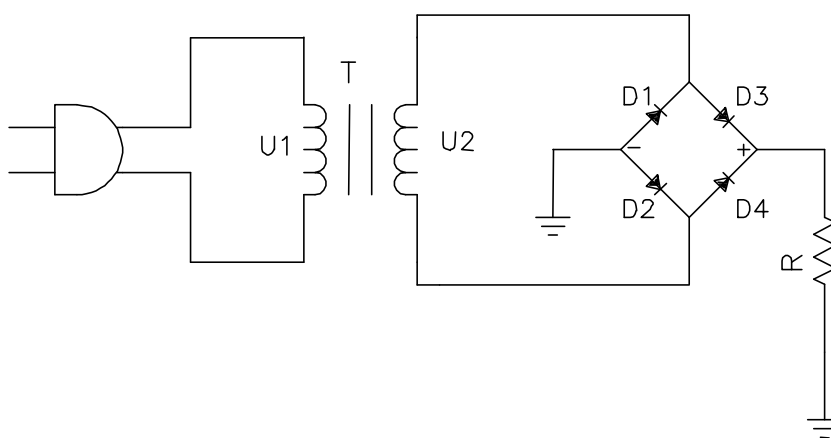


Figura 1-25

A corrente  $I$  percorre o resistor de carga sempre num mesmo sentido. Portanto a tensão  $U_R$  é sempre positiva. Na Figura 1-26 é mostrado as formas de ondas sobre o resistor de carga e os diodos, considerando os diodos ideais.

Na Tabela 1-1 é feito uma comparação entre os três tipos de retificadores. Para diodos ideais.

Tabela 1-1

	MEIA ONDA	ONDA COMPLETA	PONTE
N.º de Diodos	1	2	4
Tensão Pico de Saída	$U_P$	$0,5U_P$	$U_P$
Tensão cc de Saída	$0,318 U_P$	$0,318 U_P$	$0,636 U_P$
Tensão Pico Inversa no Diodo	$U_P$	$U_P$	$U_P$
Frequência de Saída	$f_{ent}$	$2 f_{ent}$	$2 f_{ent}$
Tensão de saída (rms)	$0,45 U_P$	$0,45 U_P$	$0,9 U_P$



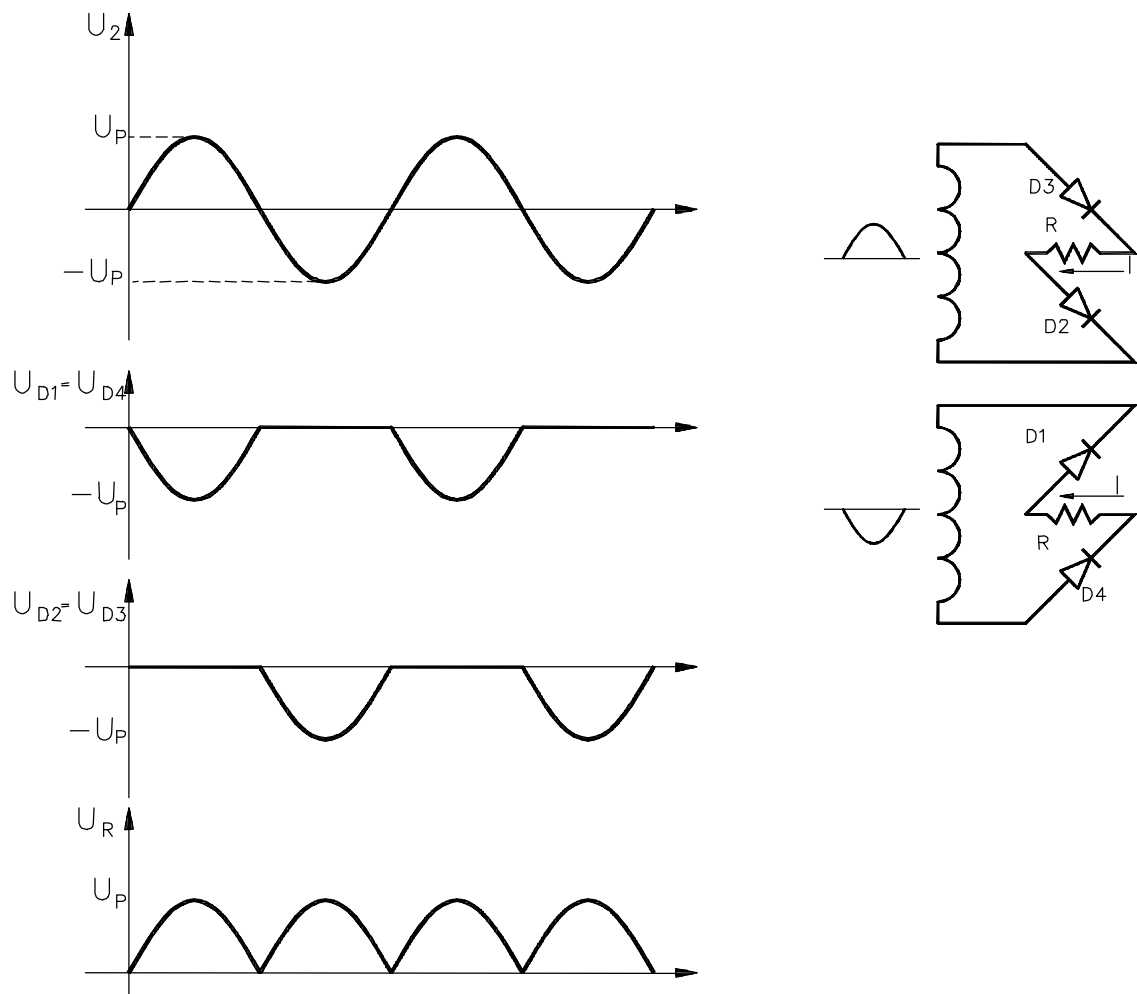
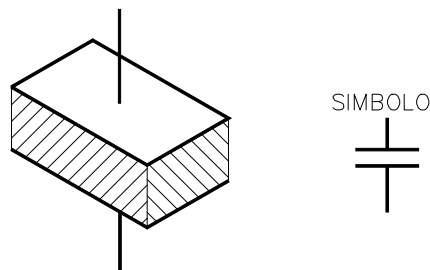


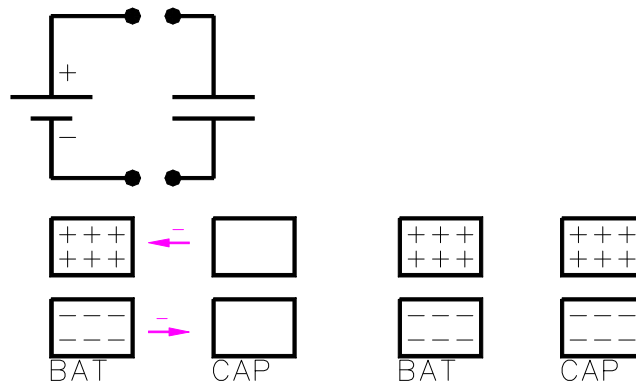
Figura 1-26

## 1.6 CAPACITOR

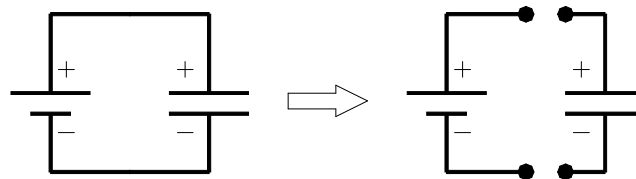
Componente eletrônico, constituído por duas placas condutoras, separadas por um material isolante.



Ao ligar uma bateria com um capacitor descarregado, haverá uma distribuição de cargas e após um certo tempo as tensões na bateria e no capacitor serão as mesmas. E deixa de circular corrente elétrica.



Se o capacitor for desconectado da bateria, as cargas elétricas acumuladas permanecem no capacitor, e portanto é mantida a diferença de potencial no capacitor.



O capacitor pode armazenar carga elétrica.

O capacitor se opõe a variação de tensão elétrica.

A capacidade que tem um capacitor para armazenar cargas depende da sua capacitância.

$$C = \frac{\epsilon \cdot S}{d} \quad \text{Eq. 1-15}$$

onde:

$\epsilon$  = constante dielétrica (F/m)

$S$  = área de uma das placas (são iguais) ( $\text{m}^2$ )

$d$  = Espessura do dielétrico em metro (m)

$C$  = Capacitância em Farads (F)

em geral se usa submúltiplos do Farad:  $\mu\text{F}$ ,  $\text{nF}$ ,  $\text{pF}$

## DETALHES SOBRE OS CAPACITORES

### TIPOS DE CAPACITORES

papel

mica

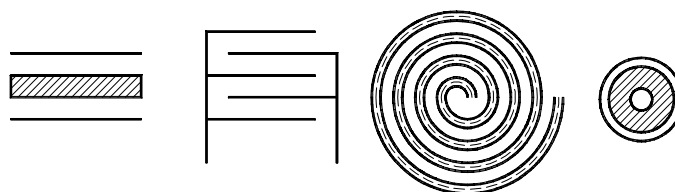
tântalo

cerâmica

eletrolítico

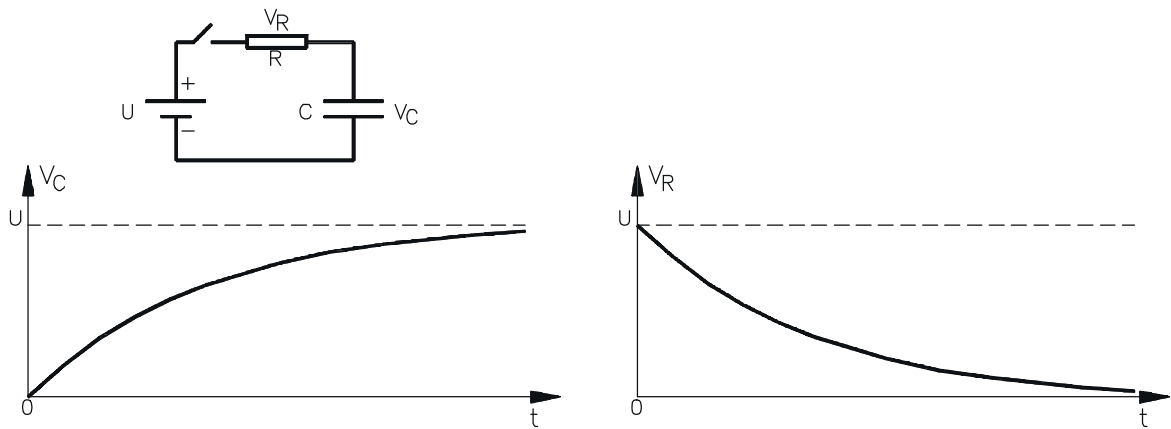
variável (distância / área)  $\Rightarrow$  (Padder; Trimmer)

### DISPOSIÇÃO DAS PLACAS



### CARGA E DESCARGA DO CAPACITOR

Suponha que o capacitor esteja descarregado e em  $t=0s$  a chave do circuito abaixo é fechada.



As tensões no capacitor e resistor seguem as seguintes equações:

$$V_C = U \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad \text{Eq. 1-16}$$

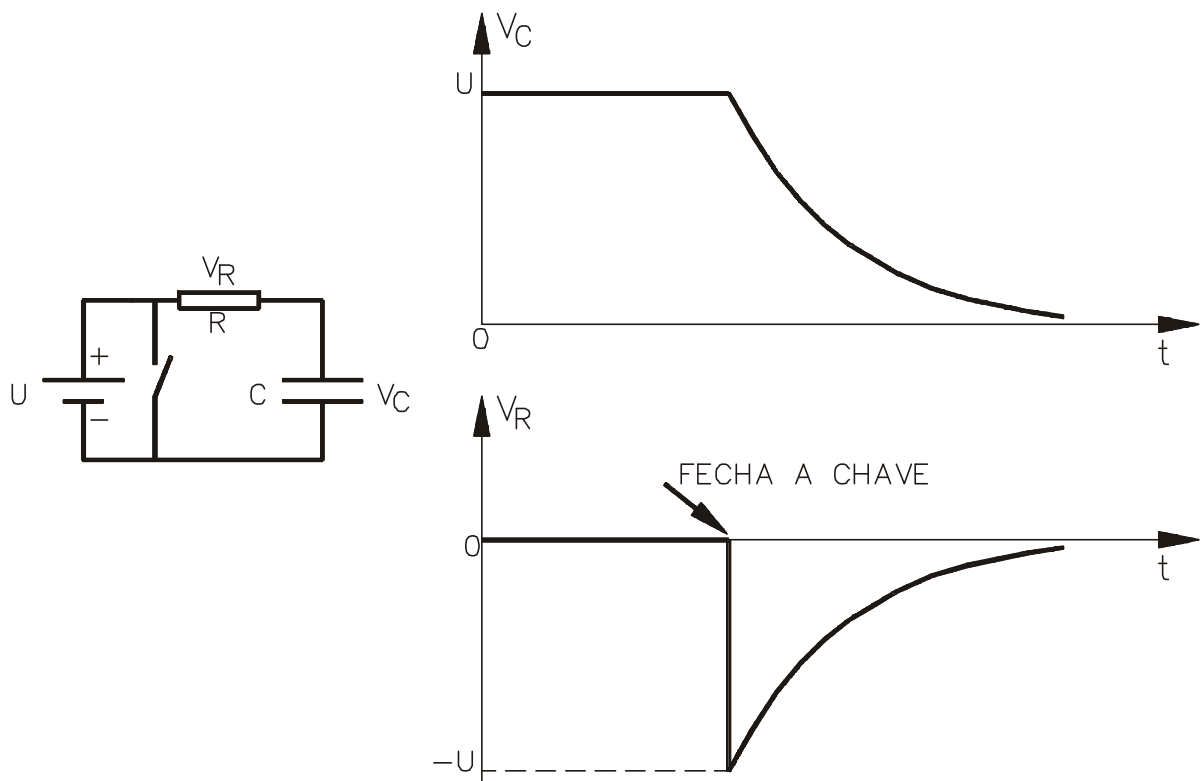
$$V_R = U \cdot e^{-t/\tau} \quad \text{Eq. 1-17}$$

onde  $\tau = RC$  e é chamada de constante de tempo do circuito.

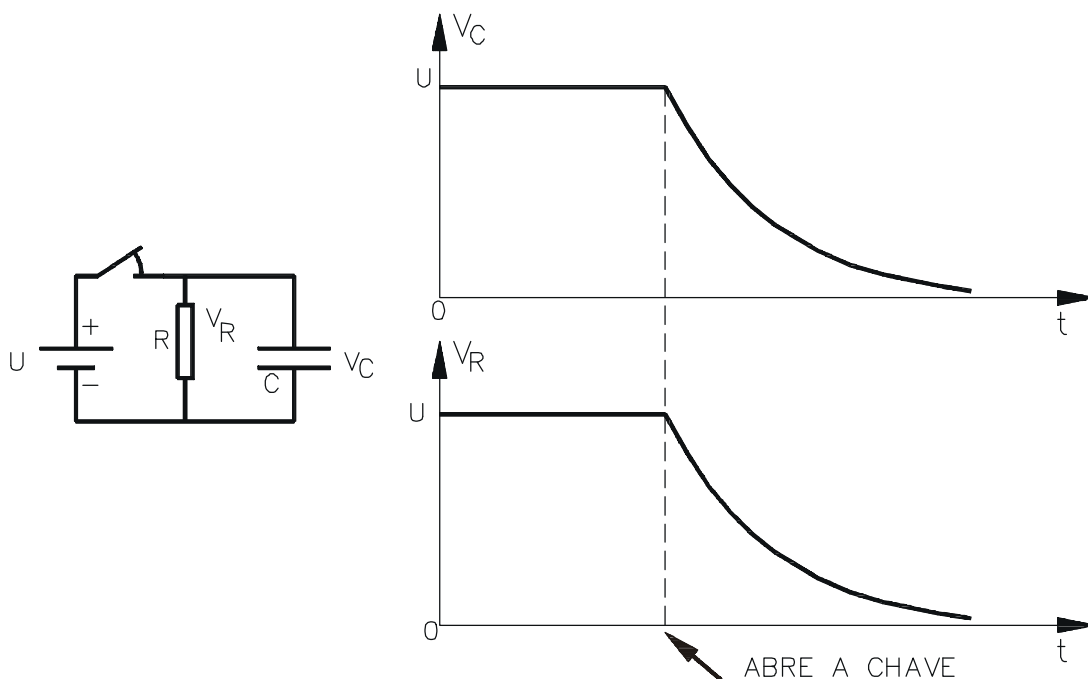
Quando  $t = \tau$ , a tensão no capacitor atinge 63% da tensão da fonte

### CIRCUITOS COM CAPACITOR E RESISTOR

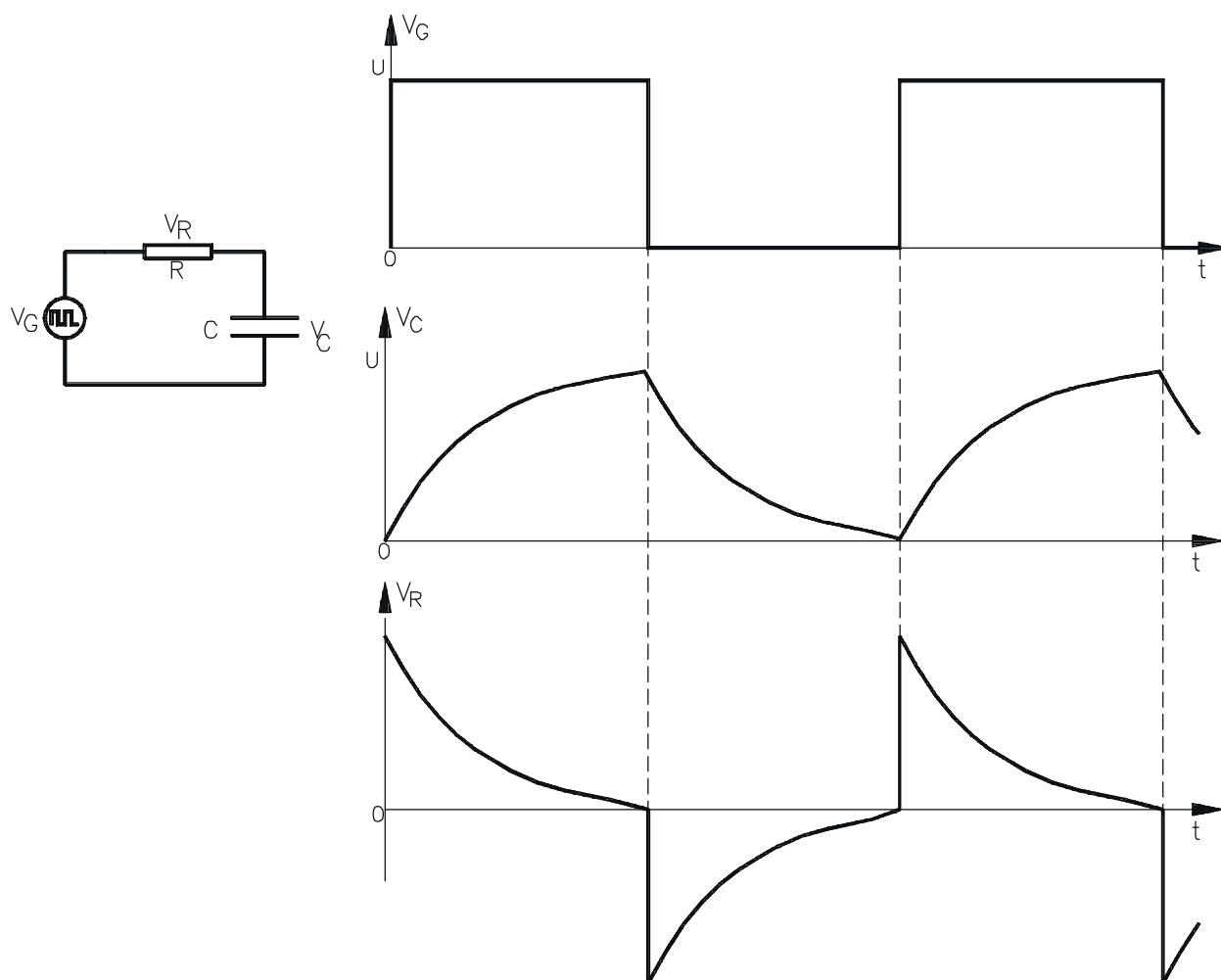
Resistor em série com o capacitor



## Resistor em paralelo com o capacitor



## Resistor em série com capacitor e com um gerador de onda quadrada



## 1.7 FILTRO PARA O RETIFICADOR

A tensão de saída de um retificador sobre um resistor de carga é pulsante como mostrador por exemplo na Figura 1-26. Durante um ciclo completo na saída, a tensão no resistor aumenta a partir de zero até um valor de pico e depois diminui de volta a zero. No entanto a tensão de uma bateria deve ser estável. Para obter esse tipo de tensão retificada na carga, torna-se necessário o uso de filtro.

O tipo mais comum de filtro para circuitos retificadores é o filtro com capacitor mostrado na Figura 1-27. O capacitor é colocado em paralelo ao resistor de carga.

Para o entendimento do funcionamento do filtro supor o diodo como ideal e que, antes de ligar o circuito, o capacitor esteja descarregado. Ao ligar, durante o primeiro quarto de ciclo da tensão no secundário, o diodo está diretamente polarizado. Idealmente, ele funciona como uma chave fechada. Como o diodo conecta o enrolamento secundário ao capacitor, ele carrega até o valor da tensão de pico  $U_P$ .

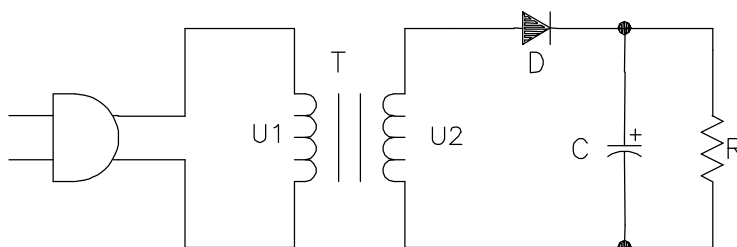


Figura 1-27

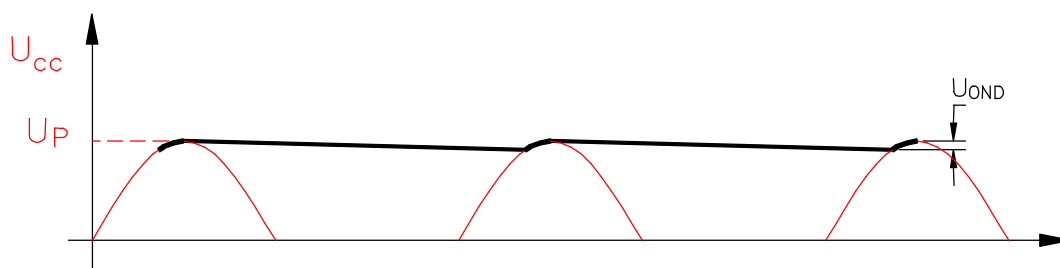


Figura 1-28

Logo após o pico positivo, o diodo pára de conduzir, o que significa uma chave aberta. Isto devido ao fato de o capacitor ter uma tensão de pico  $U_P$ . Como a tensão no secundário é ligeiramente menor que  $U_P$ , o diodo fica reversamente polarizado e não conduz. Com o diodo aberto, o capacitor se descarrega por meio do resistor de carga. A idéia do filtro é a de que o tempo de descarga do capacitor seja muito maior que o período do sinal de entrada. Com isso, o capacitor perderá somente uma pequena parte de sua carga durante o tempo que o diodo estiver em corte.

O diodo só voltará a conduzir no momento em que a tensão no secundário iniciar a subir e seja igual a tensão no capacitor. Ele conduzirá deste ponto até a tensão no secundário atingir o valor de pico  $U_P$ . O intervalo de condução do diodo é chamado de ângulo de condução do diodo. Durante o ângulo de condução do diodo, o capacitor é carregado novamente até  $U_P$ . Nos retificadores sem filtro cada diodo tem um ângulo de condução de  $180^\circ$ .

Na Figura 1-28 é mostrada a tensão sob a carga. A tensão na carga é agora uma tensão cc mais estável. A diferença para uma tensão cc pura é uma pequena ondulação (*Ripple*) causada pela carga e descarga do capacitor. Naturalmente, quanto menor a ondulação, melhor. Uma forma de reduzir a ondulação é aumentar a constante de tempo de descarga ( $R.C$ ). Na prática é aumentar o valor do capacitor. Outra forma de reduzir a ondulação é optar pelo uso de um retificador de onda completa, no qual a frequência de ondulação é o dobro do meia onda. Neste caso é carregado duas vezes a cada ciclo da tensão de entrada e descarrega-se só durante a metade do tempo de um meia onda. Pode-se relacionar a tensão de ondulação na seguinte fórmula:

$$U_{\text{OND}} = \frac{I}{fC} \quad \text{Eq. 1-18}$$

onde:

$U_{\text{OND}}$  = tensão de ondulação pico a pico

$I$  = corrente cc na carga

$f$  = frequência de ondulação

$C$  = capacitância

A escolha de um capacitor de filtro, depende, então, do valor da tensão de ondulação. Quanto menor, melhor. Mas não é viável que a tensão de ondulação seja zero. Como regra de projeto, o habitual é escolher a tensão de ondulação como sendo 10% da tensão de pico do sinal a ser retificado.

### CORRENTE DE SURTO (IMPULSIVA)

Instantes antes de energizar o circuito retificador, o capacitor do filtro está descarregado. No momento em que o circuito é ligado, o capacitor se aproxima de um curto. Portanto, a corrente inicial circulando no capacitor será muito alta. Este fluxo alto de corrente é chamado corrente de surto. Neste momento o único elemento que limita a carga é a resistência dos enrolamentos e a resistência interna dos diodos. O pior caso, é o capacitor estar totalmente descarregado e o retificador ser ligado no instante em que a tensão da linha é máxima. Assim a corrente será:

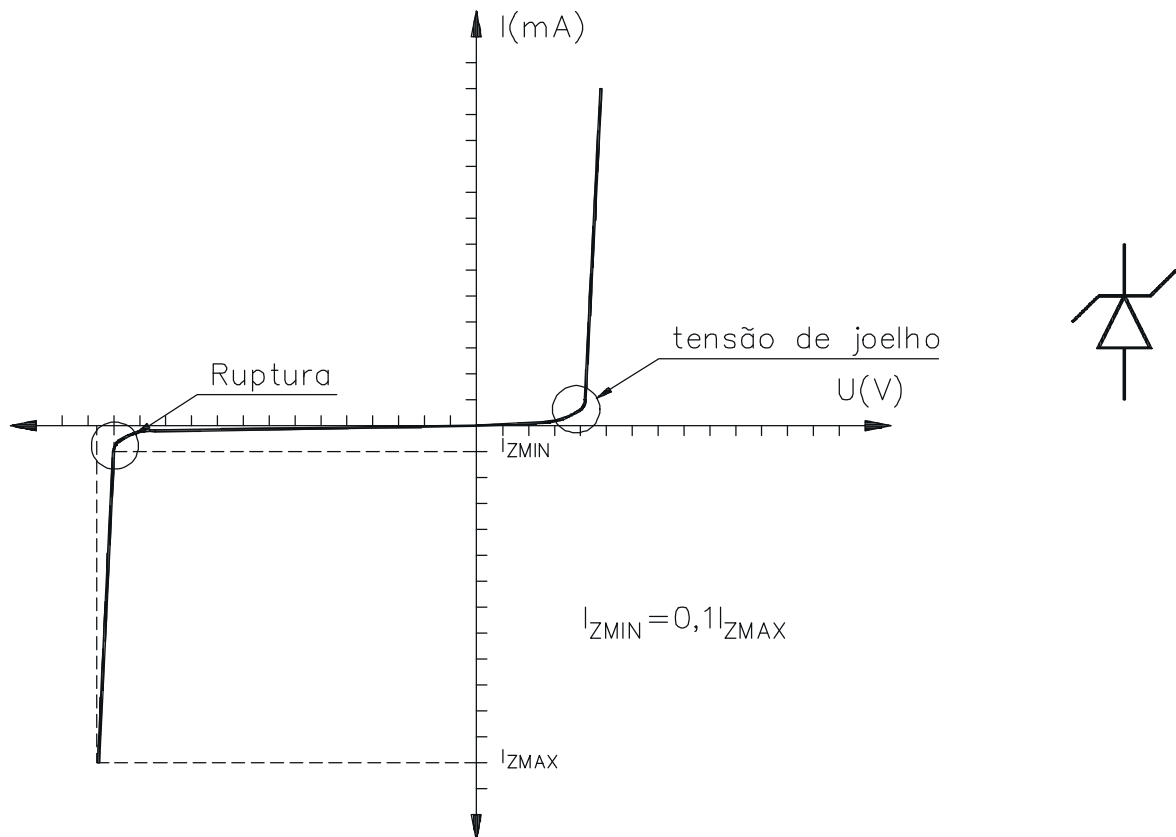
$$I_{\text{SURTO}} = \frac{U_p}{R_{\text{ENROLAMENTO}} + R_{\text{DIODO}}} \quad \text{Eq. 1-19}$$

Esta corrente diminui tão logo o capacitor vá se carregando. Em um circuito retificador típico, a corrente de surto não é uma preocupação. Mas, quando a capacitância for muito maior do que 1000uF, a constante de tempo se torna muito grande e pode levar vários ciclos para o capacitor se carregar totalmente. Isto tanto pode danificar os diodos quanto o capacitor.

Um modo de diminuir a corrente de surto é incluir um resistor entre os diodos e o capacitor. Este resistor limita a corrente de surto porque ele é somado ao enrolamento e à resistência interna dos diodos. A desvantagem dele é, naturalmente, a diminuição da tensão de carga cc.

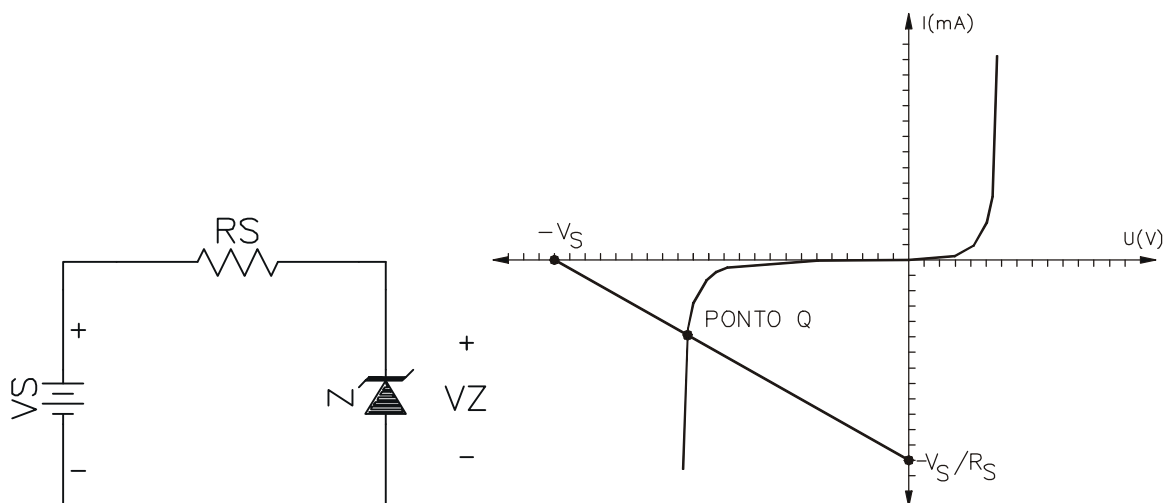
## 1.8 DIODO ZENER

O diodo zener é um diodo construído especialmente para trabalhar na tensão de ruptura. Abaixo é mostrado a curva característica do diodo zener e sua simbologia.



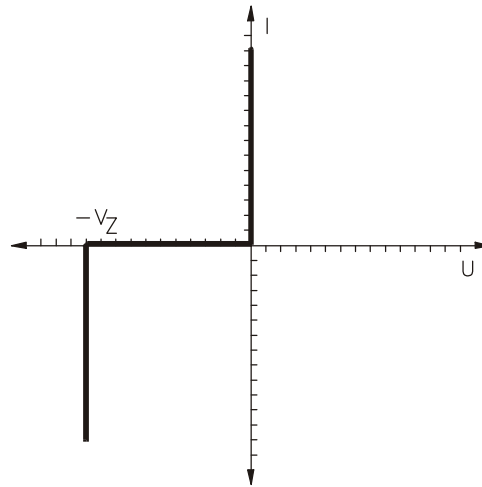
O diodo zener se comporta como um diodo comum quando polarizado diretamente. Mas ao contrário de um diodo convencional, ele suporta tensões reversas próximas a tensão de ruptura.

A sua principal aplicação é a de conseguir uma tensão estável (tensão de ruptura). Normalmente ele está polarizado reversamente e em série com um resistor limitador de corrente. Graficamente é possível obter a corrente elétrica sob o zener com o uso de reta de carga.



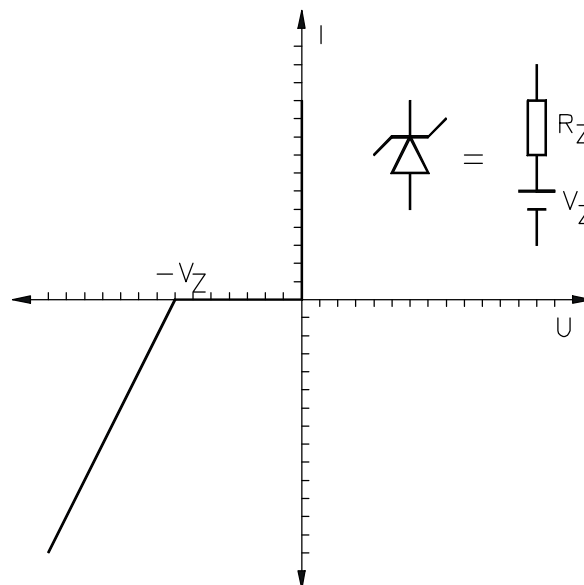
### DIODO ZENER IDEAL

O zener ideal é aquele que se comporta como uma chave fechada para tensões positivas ou tensões negativas menores que  $-V_Z$ . Ele se comportará como uma chave aberta para tensões negativas entre zero e  $-V_Z$ . Veja o gráfico abaixo



### SEGUNDA APROXIMAÇÃO

Uma Segunda aproximação é considera-lo como ideal mas que a partir da tensão de ruptura exista uma resistência interna.



### CORRENTE MÁXIMA NO ZENER

$$P_Z = V_Z * I_Z$$

Exemplo 1-3: Se um diodo zener de 12V tem uma especificação de potência máxima de 400mW, qual será a corrente máxima permitida?

SOL.:

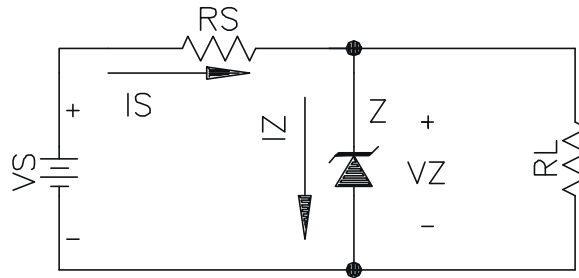
$$I_{ZMÁXIMA} = \frac{400mW}{12V} = 33,33mA$$

- Este zener suporta até 33,3mA.



## REGULADOR DE TENSÃO COM ZENER

Objetivo: manter a tensão sobre a carga constante e de valor  $V_Z$ .



Tensão na carga

- enquanto o diodo cortado

$$V_{RL} = \frac{R_L}{R_S + R_L} * V_S \quad \text{Eq. 1-20}$$

- Com o diodo conduzindo reversamente

$$V_{RL} = V_Z \quad \text{Eq. 1-21}$$

Corrente sob  $R_S$ .

$$I_S = \frac{V_S - V_Z}{R_S} \quad \text{Eq. 1-22}$$

sob  $R_L$

$$I_L = V_Z / R_L \quad \text{Eq. 1-23}$$

sob o zener

$$I_S = I_Z + I_L \Rightarrow I_Z = I_S - I_L \quad \text{Eq. 1-24}$$

Tensão de Ripple na carga ( $\Delta V_L$ )

Considerando  $R_Z \ll R_L, R_S$

$$\Delta V_L = \frac{R_Z}{R_S} * \Delta V_S \quad \text{Eq. 1-25}$$

$\Delta V_S$  - variação de entrada

$R_Z$  - resistência do zener

$R_S$  - resistência da entrada

## CÁLCULO DO RESISTOR DE CARGA $R_S$ .

$$R_S < \frac{V_{S\text{MIN}} - V_Z}{I_{L\text{MAX}} + I_{Z\text{MIN}}} \quad \text{Eq. 1-25}$$

- garante a corrente mínima para a carga

$$R_s > \frac{V_{S\text{MAX}} - V_Z}{I_{L\text{MIN}} + I_{Z\text{MAX}}} \quad \text{Eq. 1- 26}$$

- garante que sob o zener não circule uma corrente maior que  $I_{Z\text{MAX}}$

Exemplo 1-4: Um regulador zener tem uma tensão de entrada de 15V a 20V e a corrente de carga de 5 a 20mA. Se o zener tem  $V_Z=6,8\text{V}$  e  $I_{Z\text{MAX}}=40\text{mA}$ , qual o valor de  $R_S$ ?

SOL.:

$$R_S < (15-6,8)/(20\text{mA}+40\text{mA})=342\Omega \text{ e } R_S > (20-6,8)/(5\text{mA}+40\text{mA})=293\Omega \quad 293\Omega < R_S < 342\Omega$$

## 1.9 CIRCUITO COM DIODOS

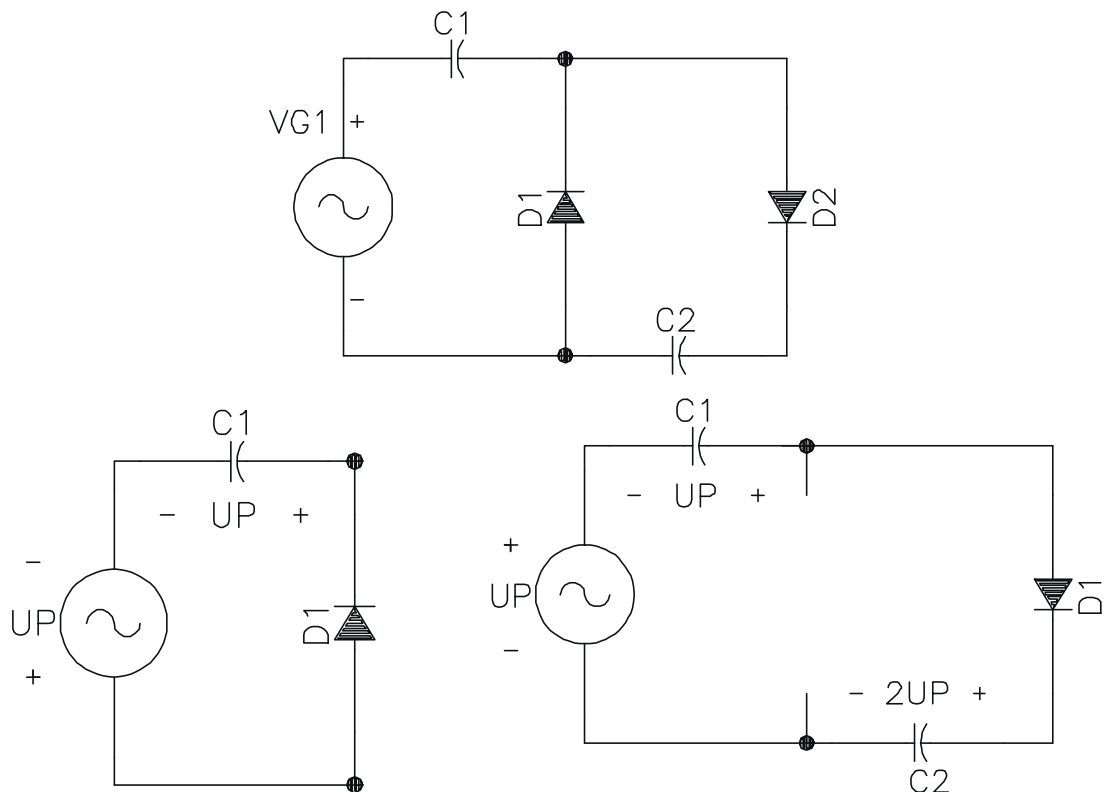
### MULTIPLICADORES DE TENSÃO

Formado por dois ou mais retificadores que produzem uma tensão cc igual a um múltiplo da tensão de pico da entrada ( $2V_p$ ,  $3V_p$ ,  $4V_p$ )

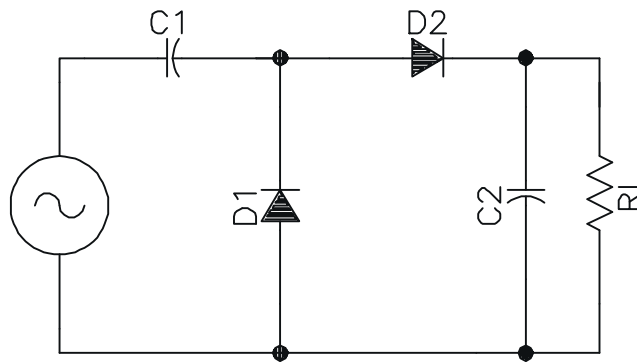
#### DOBRADOR DE TENSÃO DE MEIA ONDA

No pico do semiciclo negativo,  $D_1$  está polarizado diretamente e  $D_2$  reversamente, isto faz  $C_1$  carregar até a tensão  $V_p$ .

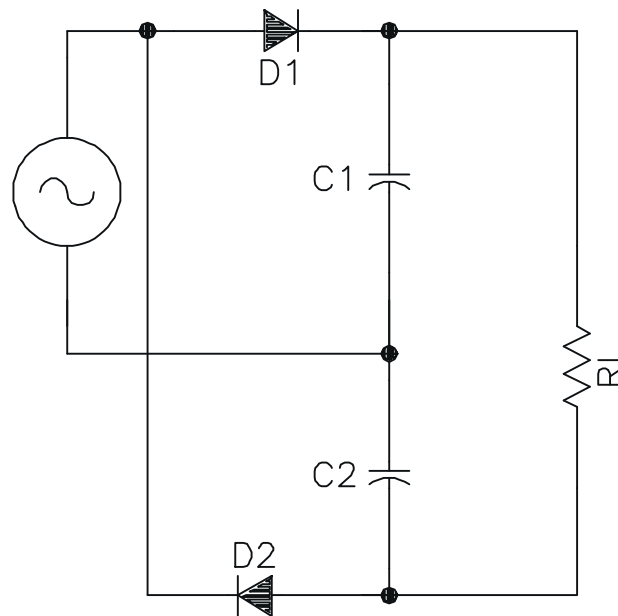
No pico do semiciclo positivo,  $D_1$  está polarizado reverso e  $D_2$  direto. Pelo fato da fonte e  $C_1$  estarem em série,  $C_2$  tentará se carregar até  $2V_p$ . Depois de vários ciclos, a tensão através de  $C_2$  será igual a  $2V_p$ .



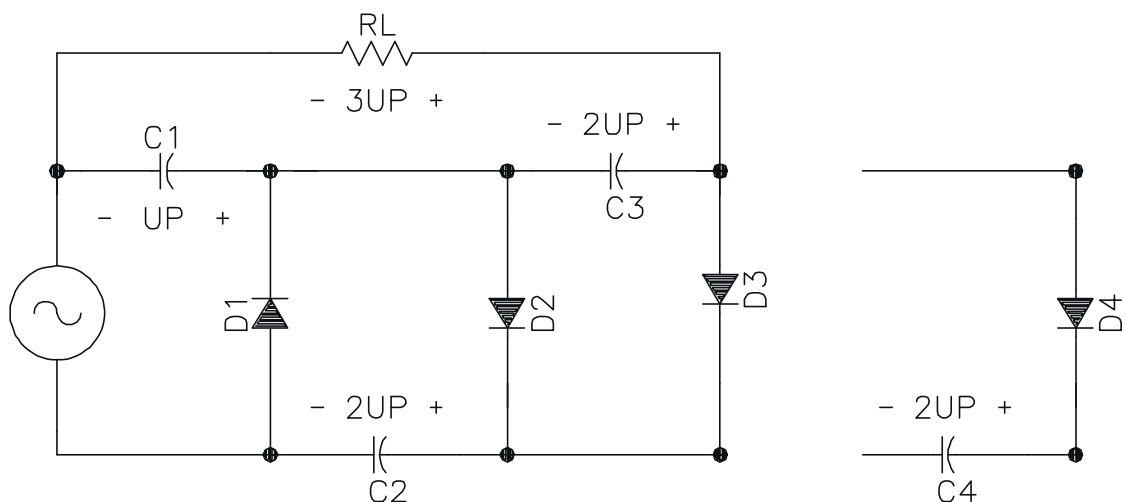
Redesenhando o circuito e ligando uma resistência de carga



### DOBRADOR DE TENSÃO DE ONDA COMPLETA

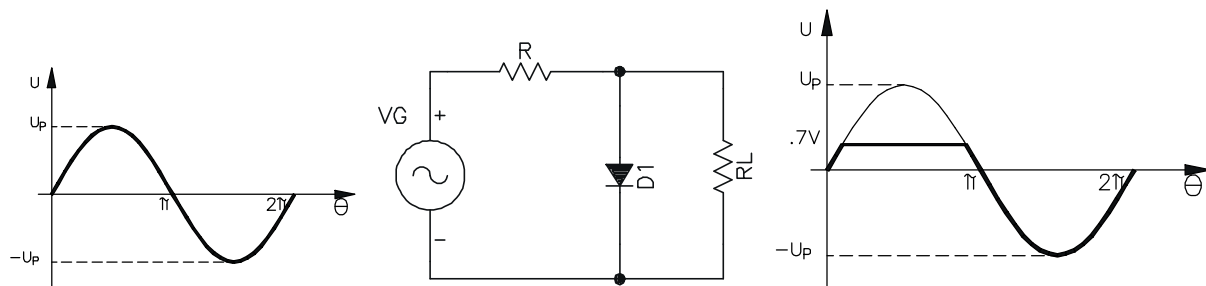
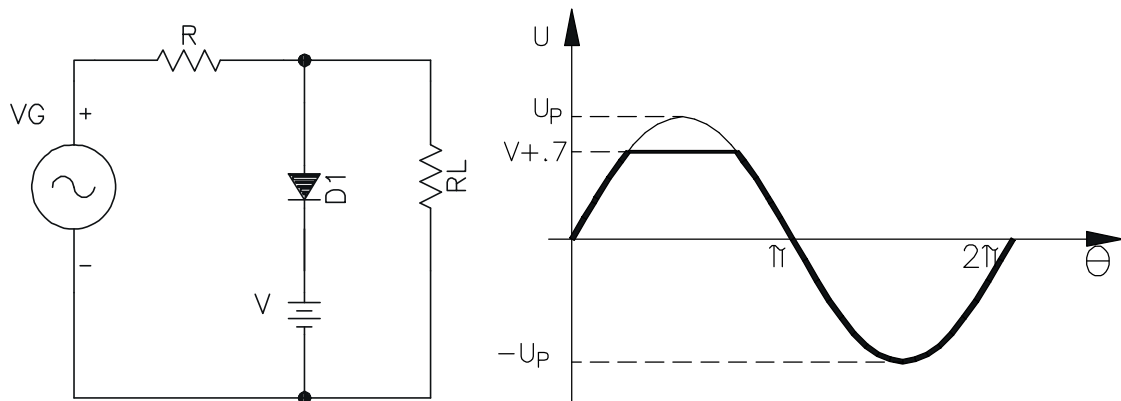
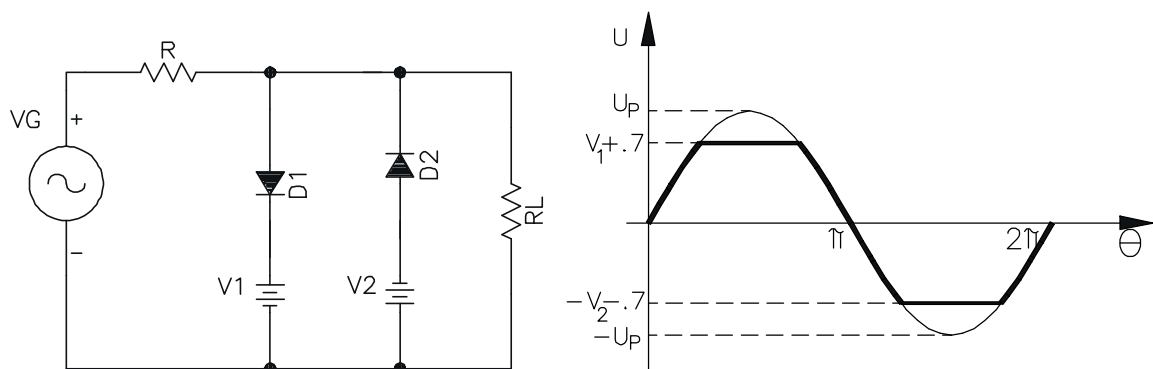
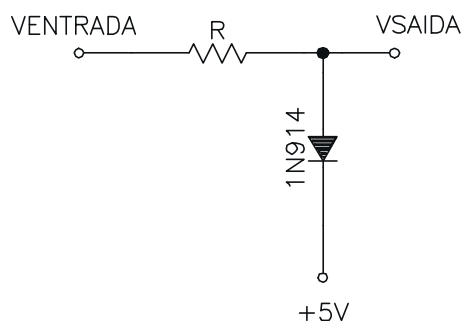


### TRIPLICADOR E QUADRIPLICADOR DE TENSÃO



### LIMITADORES

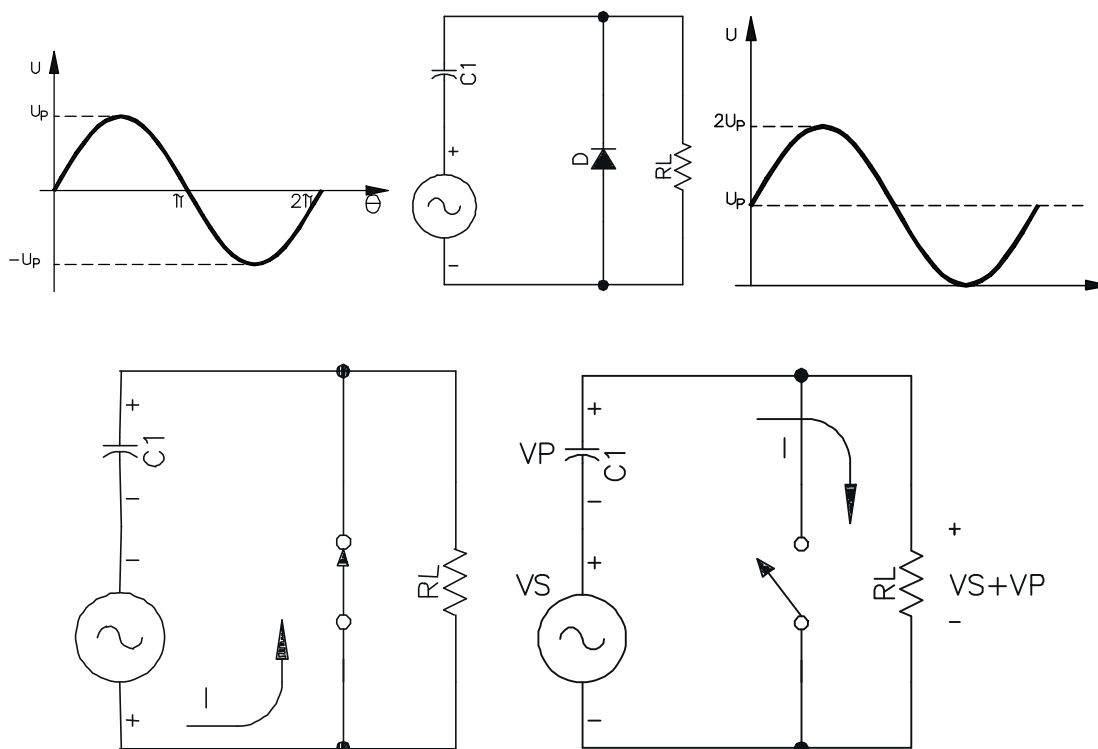
- Retira tensões do sinal acima ou abaixo de um dado nível.
- Serve para mudar o sinal ou para proteção.

**LIMITADOR POSITIVO (OU CEIFADOR)****LIMITADOR POLARIZADO****ASSOCIAÇÃO DE LIMITADORES****USO COMO PROTEÇÃO DE CIRCUITOS**

- 1N914 conduz quando a tensão de entrada excede a  $5,7V$ .
- Este circuito é chamado *grampo de diodo*, porque ele mantém o sinal num nível fixo.

## GRAMPEADOR CC

O grampeador cc soma uma tensão cc ao sinal (não confundir com grampo de diodo). Por exemplo, se o sinal que chega oscila de  $-10\text{V}$  a  $+10\text{V}$ , um grampeador cc positivo produziria uma saída que idealmente oscila de  $0$  a  $+20\text{V}$  (um grampeador negativo produziria uma saída entre  $0$  e  $-20\text{V}$ ).



## 1.10 EXERCÍCIOS

Ex. 1-1) Num dado circuito, quando um diodo está polarizado diretamente, sua corrente é de  $50\text{mA}$ . Quando polarizado reversamente, a corrente cai para  $20\text{nA}$ . Qual a razão entre a corrente direta e a reversa?

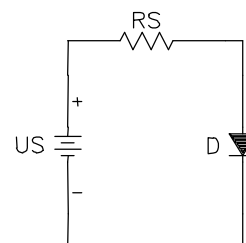
Ex. 1-2) Qual a potência dissipada num diodo de silício com polarização direta se a tensão de diodo for de  $0,7\text{V}$  e a corrente de  $100\text{mA}$ ?

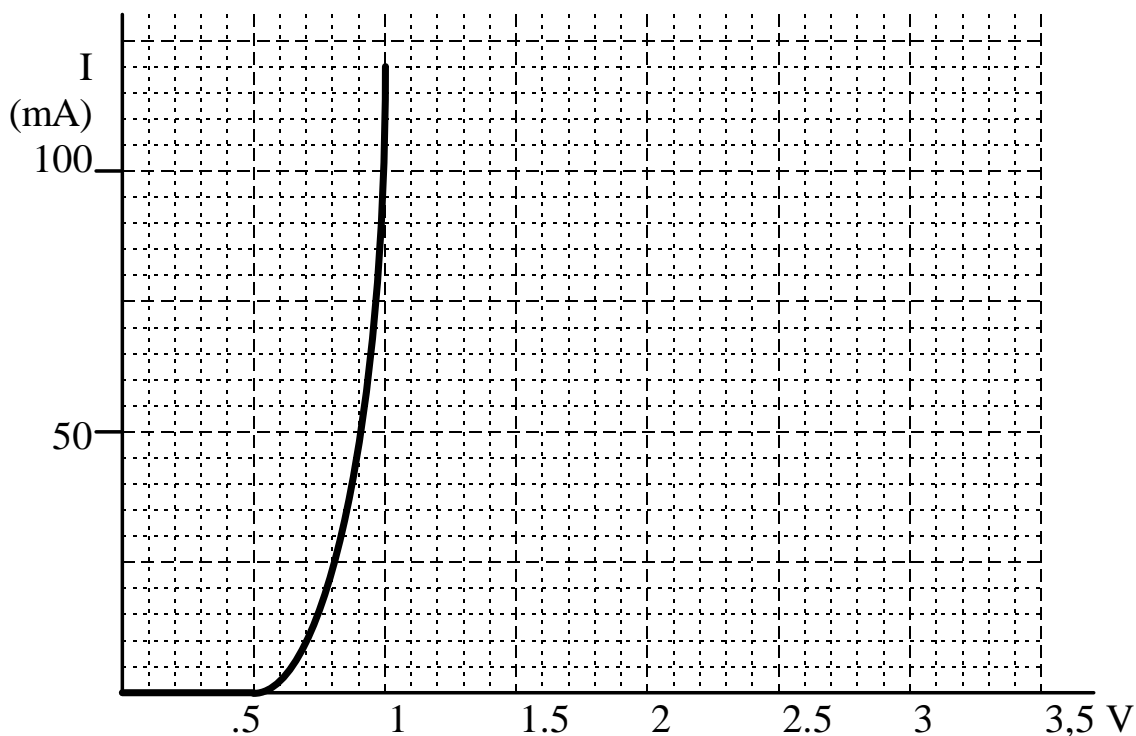
Ex. 1-3) Faça o gráfico  $I \times V$  de um resistor de  $2\text{k}\Omega$ . Marque o ponto onde a corrente é de  $4\text{mA}$ .

Ex. 1-4) Suponha  $V_S = 5\text{V}$  e que a tensão através do diodo seja  $5\text{V}$ . O diodo está aberto ou em curto?

Ex. 1-5) Alguma faz com que  $R$  fique em curto no circuito ao lado. Qual será a tensão do diodo? O que acontecerá ao diodo?

Ex. 1-6) Você mede  $0\text{V}$  através do diodo do circuito ao lado. A seguir você testa a tensão da fonte, e ela indica uma leitura de  $+5\text{V}$  com relação ao terra (-). O que há de errado com o circuito?





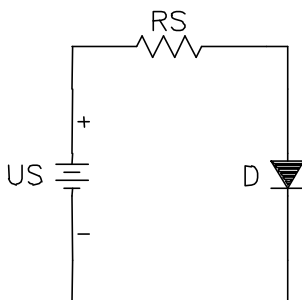
Ex. 1-7) Uma fonte de tensão de 2,5V leva o diodo a Ter um resistor limitador de corrente de  $25\Omega$ . Se o diodo tiver a característica  $I \cdot V$  abaixo, qual a corrente na extremidade superior da linha de carga: a tensão na extremidade mais baixa da linha de carga? Quais os valores aproximados da tensão e da corrente no ponto Q?

Ex. 1-8) Repita o exercício anterior para uma resistência de  $50\Omega$ . Descreva o que acontece com a linha de carga.

Ex. 1-9) Repita o Ex. 1-7 para uma fonte de tensão de 1,5V. o que acontece com a linha de carga?

Ex. 1-10) Um diodo de silício tem uma corrente direta de 50mA em 1V. Utilize a terceira aproximação para calcular sua resistência de corpo.

Ex. 1-11) A tensão da fonte é de 9V e da resistência da fonte é de  $1k\Omega$ . Calcule a corrente através do diodo



Ex. 1-12) No circuito acima, a tensão da fonte é de 100V e a resistência da fonte de  $220\Omega$ . Quais os diodos relacionados abaixo podem ser utilizados?

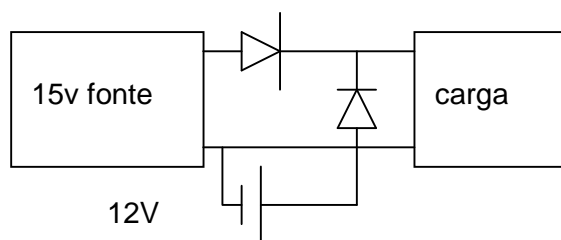
Diodo	$V_{ruptura}$	$I_{MÁX}$
-------	---------------	-----------

1N914	75V	200mA
1N4001	50V	1A
1N1185	120V	35A

Ex. 1-13) E se eu inverter a polaridade da fonte?

Ex. 1-14) No circuito acima qual deverá ser o valor de R para se obter uma corrente de diodo de 10mA? (suponha  $V_S=5V$ )

Ex. 1-15) Alguns sistemas como alarme contra roubo, computadores, etc. utilizam uma bateria auxiliar no caso da fonte de alimentação principal falhar. Descreva como funciona o circuito abaixo.



Ex. 1-16) Encontre a capacitância de um capacitor de placas paralelas se a dimensão de cada placa retangular é de 1x0,5 cm, a distância entre as placas é 0,1mm e o dielétrico é o ar. Depois, encontre a capacitância tendo a mica como dielétrico.

$$\epsilon_{Ar}=8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\epsilon_{mica}=5 \times \epsilon_{Ar}$$

$$\epsilon_{Vidro}=7,5 \times \epsilon_{Ar}$$

$$\epsilon_{cerâmica}=7500 \times \epsilon_{Ar}$$

Ex. 1-17) Encontre a distância entre as placas de um capacitor de 0,01 $\mu$ F de placas paralelas, se a área de cada placa é 0,07 m<sup>2</sup> e o dielétrico é o vidro.

Ex. 1-18) Um capacitor possui como dielétrico um disco feito de cerâmica com 0,5 cm de diâmetro e 0,521 mm de espessura. Esse disco é revestido dos dois lados com prata, sendo esse revestimento as placas. Encontre a capacitância.

Ex. 1-19) Um capacitor de placas paralelas de 1 F possui um dielétrico de cerâmica de 1mm de espessura. Se as placas são quadradas, encontre o comprimento do lado de uma placa.

Ex. 1-20) No instante  $t=0s$ , uma fonte de 100V é conectada a um circuito série formado por um resistor de 1k $\Omega$  e um capacitor de 2 $\mu$ F descarregado. Qual é:

- A tensão inicial do capacitor?
- A corrente inicial?
- tempo necessário para o capacitor atingir a tensão de 63% do seu valor máximo?

Ex. 1-21) Ao ser fechada, uma chave conecta um circuito série formado por uma fonte de 200V, um resistor de 2M $\Omega$  e um capacitor de 0,1 $\mu$ F descarregado. Encontre a tensão no capacitor e a corrente no instante  $t=0,1s$  após o fechamento da chave.

Ex. 1-22) Para o circuito usado no problema 6, encontre o tempo necessário para a tensão no capacitor atingir 50V. Depois encontre o tempo necessário para a tensão no capacitor aumentar mais 50V (de 50V para 100V). Compare os resultados.

Ex. 1-23) Um simples temporizador RC possui uma chave que quando fechada conecta em série uma fonte de 300V, um resistor de 16M $\Omega$  e um capacitor descarregado de 10 $\mu$ F. Encontre o tempo entre a abertura e o fechamento.

Ex. 1-24) Um retificador em ponte com um filtro com capacitor de entrada, tem uma tensão de pico na saída de 25V. Se a resistência de carga for de  $220\Omega$  e a capacitância de  $500\mu\text{F}$ , qual a ondulação de pico a pico (Ripple)?

Ex. 1-25) A figura abaixo mostra uma fonte de alimentação dividida. Devido à derivação central aterrada, as tensões de saída são iguais e com polaridade oposta. Quais as tensões de saída para uma tensão do secundário de  $17,7\text{Vac}$  e  $C=500\mu\text{F}$ ? Qual a ondulação de pico a pico? Quais as especificações mínima de ID e VZ ? qual a polaridade de C1 e C2?

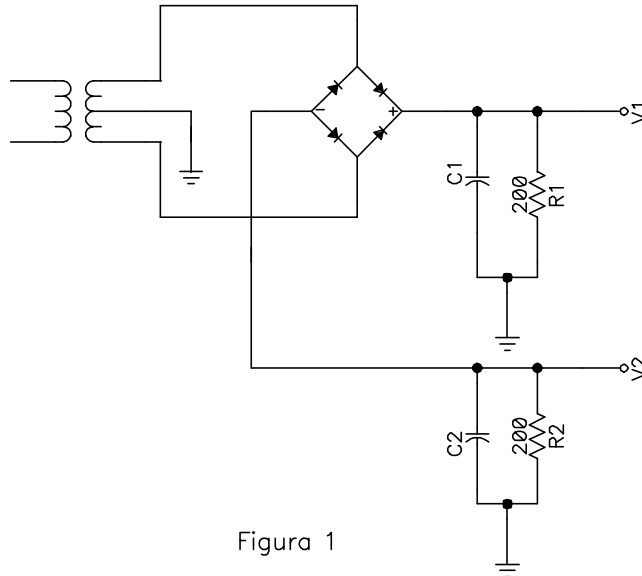


Figura 1

Ex. 1-26) Você mede  $24\text{Vac}$  através do secundário da figura abaixo. Em seguida você mede  $21,6\text{Vac}$  através do resistor de carga. Sugira alguns problemas possíveis.

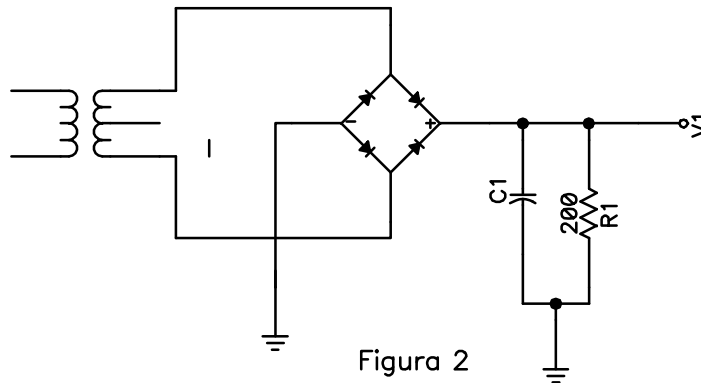


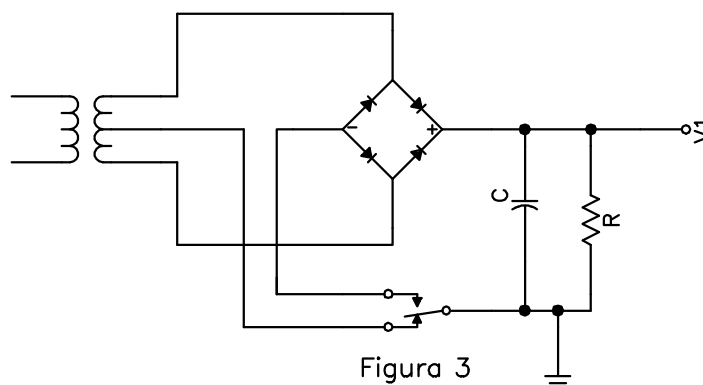
Figura 2

Ex. 1-27) Você está construindo um retificador em ponte com um filtro com capacitor de entrada. As especificações são uma tensão de carga de 15V e uma ondulação de 1V para uma resistência de carga de  $680\Omega$ . Qual a tensão em rms no enrolamento do secundário? Qual deve ser o valor do capacitor de filtro?

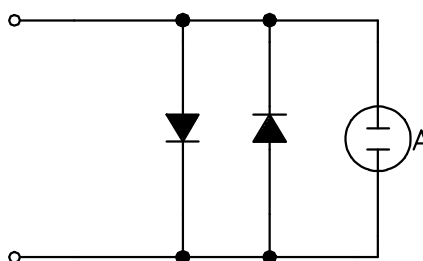
Ex. 1-28) A fonte de alimentação dividida da figura 1 tem uma tensão do secundário de  $25\text{Vac}$ . Escolha os capacitores de filtro, utilizando a regra dos 10 por cento para a ondulação.



Ex. 1-29) A tensão do secundário na figura abaixo é de 25Vac. Com a chave na posição mostrada, qual a tensão de saída ideal? Com a chave na posição mais alta, qual a tensão de saída ideal?

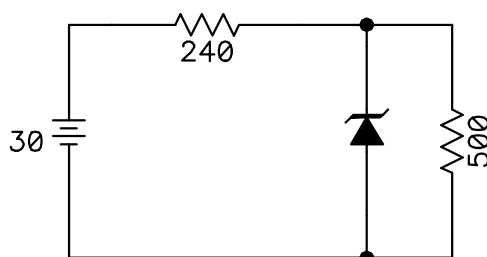


Ex. 1-30) O amperímetro da figura abaixo tem uma resistência de medidor de  $2k\Omega$  e uma corrente para fundo de escala de  $50\mu A$ . Qual a tensão através desse amperímetro quando ele indicar fundo de escala? Os diodos às vezes são ligados em derivação (Shunted) através do amperímetro, como mostra a figura 4. Se o amperímetro estiver ligado em série com um circuito, os diodos podem ser de grande utilidade. Para que você acha que eles podem servir?



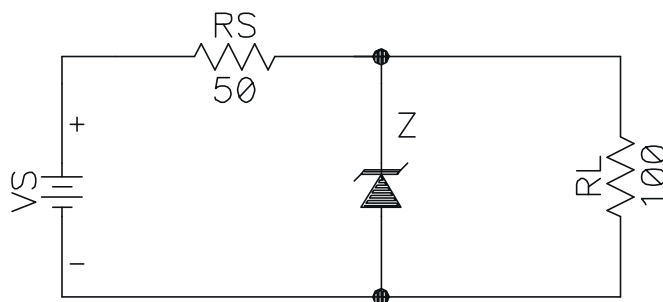
Ex. 1-31) Dois reguladores zener estão ligados em cascata. O primeiro tem um  $R_s = 680\Omega$  e um  $R_z = 10\Omega$ . O segundo tem um  $R_s = 1,2k\Omega$  e  $R_z = 6\Omega$ . Se o Ripple da fonte for de 9V de pico a pico, qual Ripple na saída?

Ex. 1-32) Na figura abaixo, o 1N1594 tem uma tensão de zener de 12V e uma resistência zener de  $1,4\Omega$ . Se você medir aproximadamente 20V para a tensão de carga, que componente você sugere que está com defeito? Explique por quê?



Ex. 1-33) Projete um regulador zener que preencha as seguintes especificações: tensão da carga é de 6,8V, tensão da fonte de 20V  $\pm 20\%$ , e corrente de carga é de 30mA  $\pm 50\%$ .

Ex. 1-34) para  $V_{RL} = 4,7V$  e  $I_{ZMAX} = 40mA$ . Quais valores  $V_S$  pode assumir?

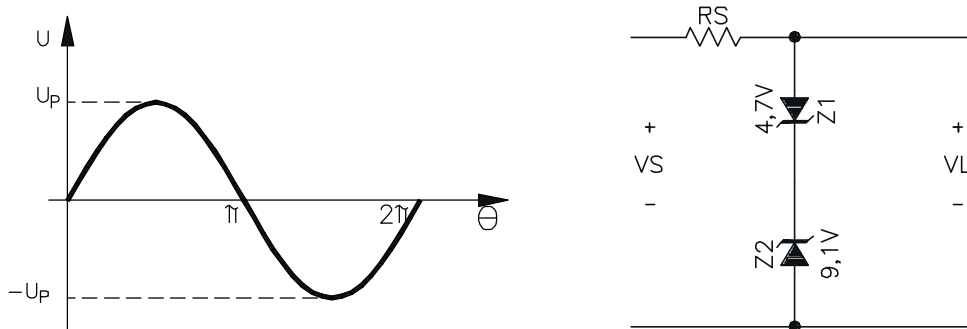


Ex. 1-35) No exercício anterior qual a tensão na carga para cada uma das condições abaixo:

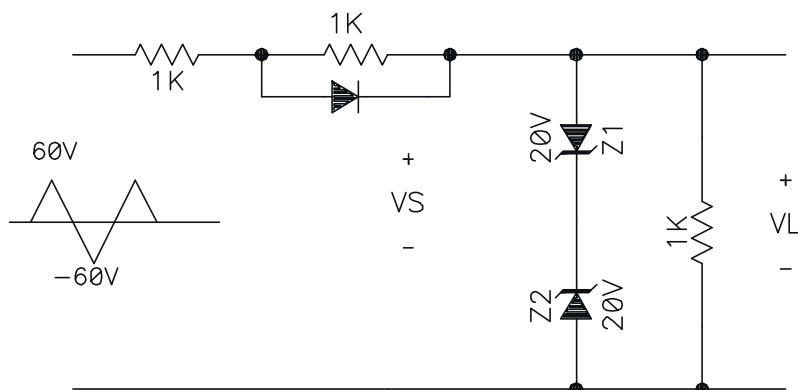
- diodo zener em curto
- diodo zener aberto
- resistor em série aberto
- resistor de carga em curto

O que ocorre com  $V_L$  e com o diodo zener se o resistor em série estiver em curto?

Ex. 1-36) Qual o sinal de saída?



Ex. 1-37) Qual o sinal sob  $V_L$ ?

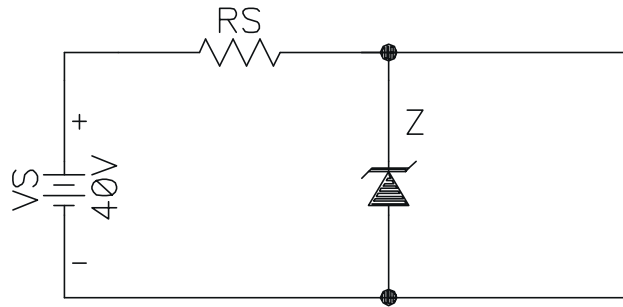


Ex. 1-38) Um regulador zener tem  $V_z = 15V$  e  $I_{zmax} = 100mA$ .  $V_S$  pode variar de 22 a 40V.  $R_L$  pode variar de  $1k\Omega$  a  $50k\Omega$ . Qual o maior valor que a resistência série pode assumir?

Ex. 1-39) Um diodo zener tem uma resistência interna de  $5\Omega$ . Se a corrente variar de 10 a 20mA, qual a variação de tensão através do zener?

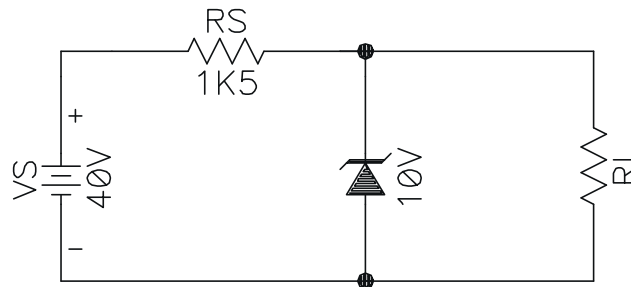
Ex. 1-40) Uma variação de corrente de 2mA através do diodo zener produz uma variação de tensão de 15mV. Qual o valor da resistência?

Ex. 1-41) Qual o valor mínimo de  $R_S$  para o diodo não queimar ( $V_z = 15V$  e  $P_{ZMAX} = 0,5W$ )?



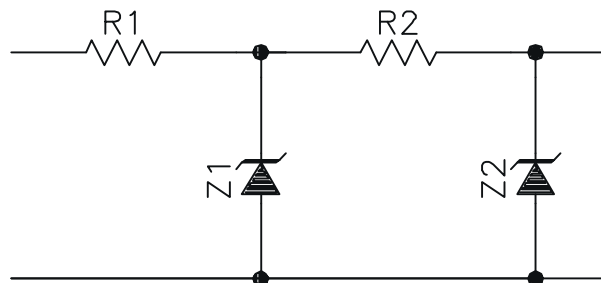
Ex. 1-42) no exercício anterior, se  $R_S = 2k\Omega$ , qual a corrente sobre o zener, e qual a potência dissipada no zener?

Ex. 1-43) Qual o valor de  $I_Z$  para  $R_L = 100k$ ,  $10k$  e  $1k\Omega$ ?



Ex. 1-44) No exercício anterior suponha que a fonte tenha um Ripple de 4V. Se a resistência zener for de  $10\Omega$ , qual o Ripple de saída?

Ex. 1-45) Dois reguladores zener estão ligados em cascata. O primeiro tem uma resistência em série de  $680\Omega$  e um  $R_Z = 6\Omega$ . O segundo tem uma resistência série de  $1k2\Omega$  e  $R_Z = 6\Omega$ . Se a ondulação da fonte for 9V de pico a pico, qual a ondulação na saída?





## TRANSISTOR NÃO POLARIZADO

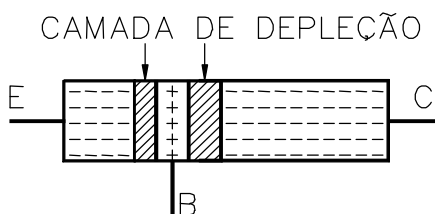


Figura 2-2

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

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

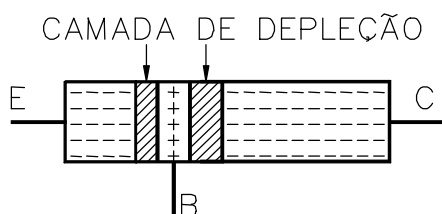


Figura 2-2 mostra as camadas de depleção nas junções do transistor *npn*.

## POLARIZAÇÃO DO TRANSISTOR NPN

As junções do transistor podem ser polarizadas diretamente ou reversamente.

### JUNÇÕES COM POLARIZAÇÃO DIRETA

Na Figura 2-3 a bateria B1 polariza diretamente o diodo emissor, e a bateria B2 polariza diretamente o diodo coletor. Os elétrons livres entram no emissor e no coletor, juntam-se na base e retornam para as baterias. O fluxo de corrente elétrica é alto nas duas junções.

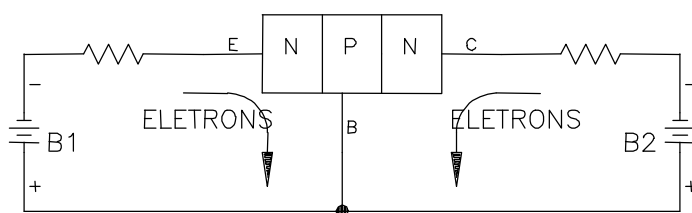


Figura 2-3

### JUNÇÕES COM POLARIZAÇÃO REVERSA

Na Figura 2-4 os diodos emissor e coletor ficam reversamente polarizado. A corrente elétrica circulando é pequena (corrente de fuga).

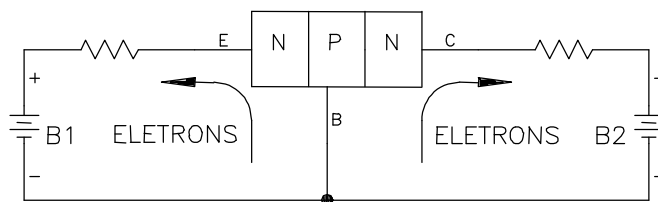


Figura 2-4

### JUNÇÕES COM POLARIZAÇÃO DIRETA - REVERSA

Na Figura 2-5 o diodo coletor está reversamente polarizado e diodo emissor diretamente polarizado. A princípio espera-se uma corrente de fuga no diodo coletor e uma alta corrente no diodo emissor. No entanto isto não acontece, nos dois diodos as correntes são altas.

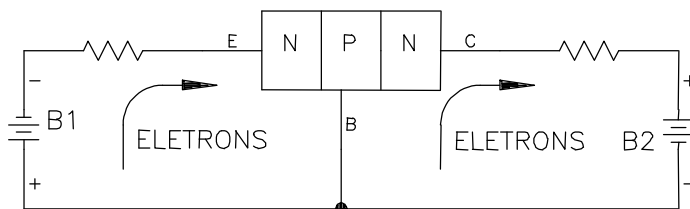


Figura 2-5

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

Como a base é muito fina, grande parte dos elétrons da base passam a junção base-coletor. Esta junção, polarizada reversamente, dificulta a passagem dos portadores majoritários do cristal de base (lacunas) para o coletor, mas não dos elétrons livres. Esses atravessam sem dificuldade a camada de depleção penetram na região de coletor. Lá os elétrons livres são atraídos para o pólo positivo da bateria B2.

Em suma, com a polarização direta do diodo emissor, é injetado uma alta corrente em direção a base. Na base uma pequena parcela da corrente, por recombinação, retorna ao pólo negativo da bateria B1 e o restante da corrente flui para o coletor e daí para o pólo positivo da bateria B2. Ver Figura 2-6.

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

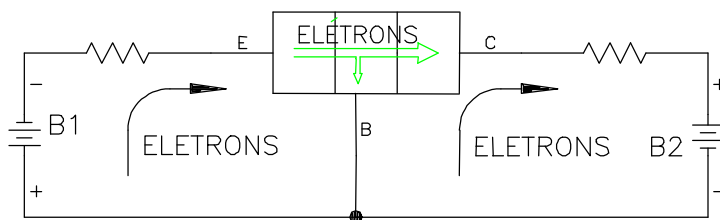


Figura 2-6

## TRANSISTOR PNP

No transistor *pn*p as regiões dopadas são contrárias as do transistor *np*n. Isso significa que as lacunas são portadores majoritários no emissor em vez dos elétrons livres.

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

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

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

## AS CORRENTES NO TRANSISTOR

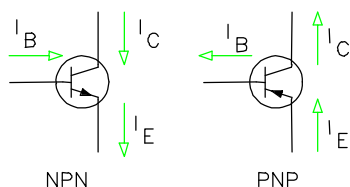
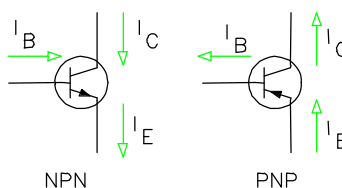


Figura 2-7



A Figura 2-7

Figura 2-7 mostra o símbolo esquemático para um transistor *pn*p e *np*n. A diferenciação a nível de esquemático é feita através da seta no pino do emissor. A direção da seta mostra o fluxo de corrente convencional. Na figura é mostrado também o sentido das correntes convencionais  $I_B$ ,  $I_C$  e  $I_E$ .

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

$$I_E = I_C + I_B \quad \text{Eq. 2- 1}$$

A relação entre a corrente contínua de coletor e a corrente contínua de base é chamada de ganho de corrente  $\beta_{CC}$ :

$$\beta_{CC} = \frac{I_C}{I_B} \quad \text{Eq. 2- 2}$$

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

$$\alpha_{CC} = \frac{I_C}{I_E} \quad \text{Eq. 2- 3}$$

Quanto mais fina e levemente dopada a base, mais alto o  $\alpha_{CC}$ .

Pode-se relacionar o  $\alpha_{CC}$  com o  $\beta_{CC}$  :

$$\beta_{CC} = \alpha_{CC} / (1 - \alpha_{CC}) \quad \text{Eq. 2- 4}$$

### TESTE DE DIODOS E TRANSISTORES.

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

Teste de funcionamento de um diodo com um ohmímetro.

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

Teste de funcionamento de um transistor *npn* com um ohmímetro

1. Encosta-se a ponta de prova negativa na base do transistor
2. Encosta-se a ponta de prova positiva no coletor do transistor  
O ohmímetro deve indicar resistência alta.
3. Muda-se a ponta de prova positiva para o emissor do transistor  
O ohmímetro deve indicar resistência alta.
4. Inverte-se as pontas de provas, isto é, encosta-se a positiva na base e repete os itens 2 e 3. As resistências devem ser baixas.

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

### MONTAGEM BÁSICA COM TRANSISTOR

Na Figura 2-8, o lado negativo de cada fonte de tensão está conectado ao emissor. Neste caso denomina-se o circuito como montado em emissor comum. Além da montagem em emissor comum, existem a montagem em coletor comum e base comum, analisadas mais a frente. O circuito é constituído por duas malhas. A malha da esquerda que contém a tensão  $V_{BE}$  e malha da direita com a tensão  $V_{CE}$ .

$$V_S = R_S I_B + V_{BE} \quad \text{Eq. 2- 5}$$

$$V_{CC} = I_C R_C + V_{CE} \quad \text{Eq. 2- 6}$$



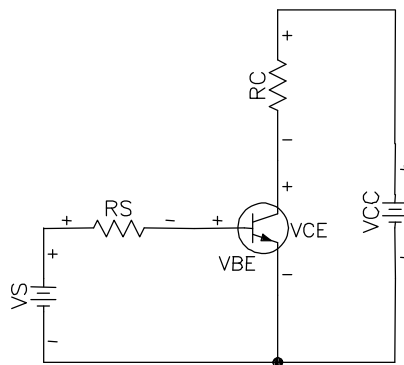


Figura 2-8

### RELAÇÃO $I_B$ VERSUS $V_{BE}$

Existe uma relação entre  $I_B$  e  $V_{BE}$ , ou seja, para cada  $I_B$  existe uma tensão  $V_{BE}$  correspondente (Figura 2-9). Naturalmente, esta curva semelhante a curva do diodo.

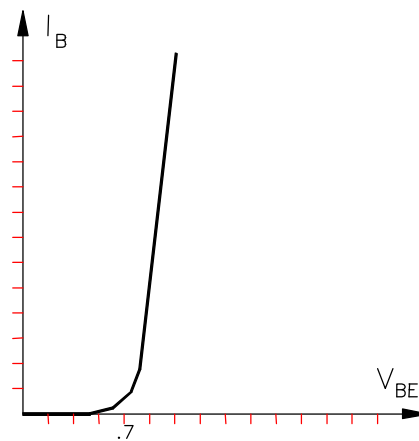


Figura 2-9

### RELAÇÃO $I_C$ VERSUS $V_{CE}$

A partir de  $V_{CC}$  e  $V_S$  é possível obter diversos valores de  $I_C$  e  $V_{CE}$ . A Figura 2-10 mostra esta relação supondo um  $I_B$  fixo.

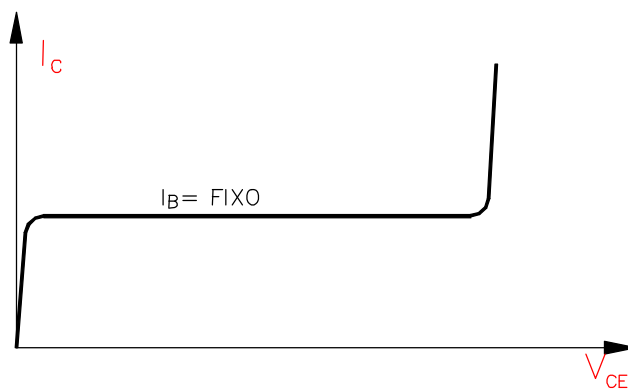


Figura 2-10

A parte inicial da curva é chamada de região de saturação. É toda a curva entre a origem e o joelho. A parte plana é chamada de região ativa. Nesta região uma variação do  $V_{CE}$  não influencia no valor de  $I_C$ .  $I_C$  mantém-se constante e igual a  $I_B \beta_{CC}$ . A parte final é a região de ruptura e deve ser evitada.

Na região de saturação o diodo coletor está polarizado diretamente. Por isso, perde-se o funcionamento convencional do transistor, passa a simular uma pequena resistência ôhmica entre o coletor e emissor. Na saturação não é possível manter a relação  $I_C = I_B \beta_{CC}$ . Para sair da região de saturação e entrar na região ativa, é necessário uma polarização reversa do diodo coletor. Como  $V_{BE}$  na região ativa é em torno de 0,7V, isto requer um  $V_{CE}$  maior que 1V.

A região de corte é um caso especial na curva  $I_C \times V_{CE}$ . É quando  $I_B = 0$  (equivale ao terminal da base aberto). A corrente de coletor com terminal da base aberto é designada por  $I_{CEO}$  (corrente de coletor para emissor com base aberta). Esta corrente é muito pequena, quase zero. Em geral se considera: Se  $I_B = 0 \Rightarrow I_C = 0$ .

O gráfico da Figura 2-10, mostra a curva  $I_C \times V_{CE}$  para um dado  $I_B$ . Habitualmente o gráfico fornecido pelo fabricante leva em consideração diversos  $I_B$ 's. Um exemplo está na Figura 2-11.

Notar no gráfico que para um dado valor de  $V_{CE}$  existem diversas possibilidades de valores para  $I_C$ . Isto ocorre, porque é necessário ter o valor fixo de  $I_B$ . Então para cada  $I_B$  há uma curva relacionando  $I_C$  e  $V_{CE}$ .

No gráfico de exemplo, a tensão de ruptura está em torno de 80V e na região ativa para um  $I_B = 40\mu A$  tem-se que o  $\beta_{CC} = I_C / I_B = 8mA / 40\mu A = 200$ . Mesmo para outros valores de  $I_B$ , o  $\beta_{CC}$  se mantém constante na região ativa.

Na realidade o  $\beta_{CC}$  não é constante na região ativa, ele varia com a temperatura ambiente e mesmo com  $I_C$ . A variação de  $\beta_{CC}$  pode ser da ordem de 3:1 ao longo da região ativa do transistor. Na Figura 2-12 é mostrado um exemplo de variação de  $\beta_{CC}$ .

Os transistores operam na região ativa quando são usados como amplificadores. Sendo a corrente de coletor (saída) proporcional a corrente de base (entrada), designa-se os circuitos com transistores na região ativa de circuitos lineares. As regiões de corte e saturação, por simularem uma chave controlada pela corrente de base, são amplamente usados em circuitos digitais.

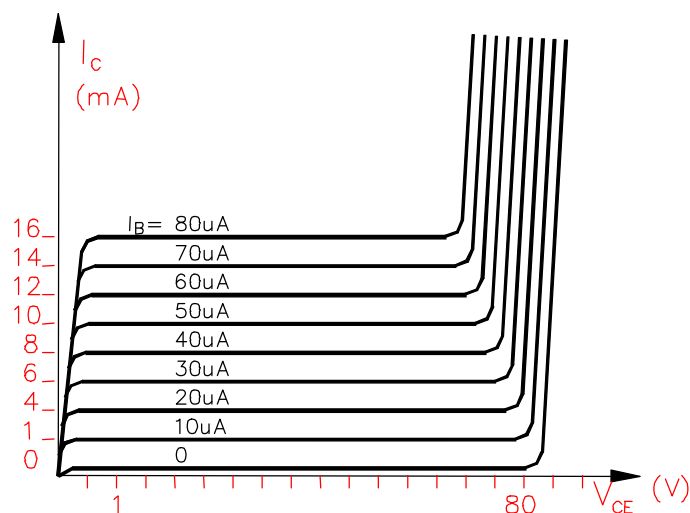


Figura 2-11

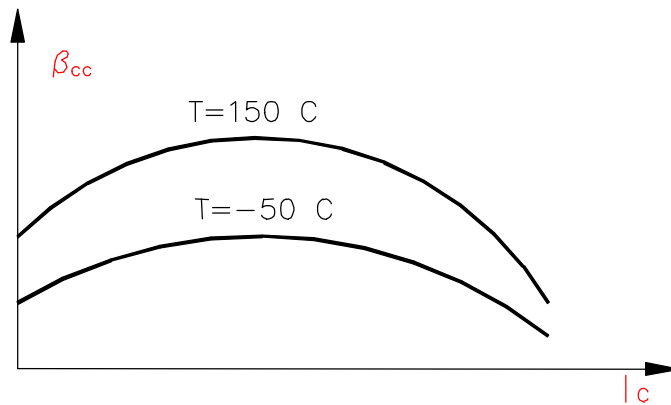


Figura 2-12

### O MODELO DE EBERS-MOLL

Na análise ou projeto de um circuito transistorizado, tem-se dificuldade em trabalhar com o transistor a nível de malhas. Uma opção é a de se criar um circuito equivalente para o transistor usando componentes mais simples como fonte ou resistor.

O modelo de Ebers-Moll é um circuito equivalente do transistor levando em consideração que ele esteja trabalhando na região ativa, ou seja: o diodo emissor deve estar polarizado diretamente; o diodo coletor deve estar polarizado reversamente e a tensão do diodo coletor deve ser menor do que a tensão de ruptura. Veja Figura 2-13.

O modelo faz algumas simplificações:

1.  $V_{BE} \approx 0,7V$
2.  $I_C = I_E \Rightarrow I_B = I_E / \beta_{CC}$
3. despreza a diferença de potencial produzida pela corrente de base ao atravessar a resistência de espalhamento da base .

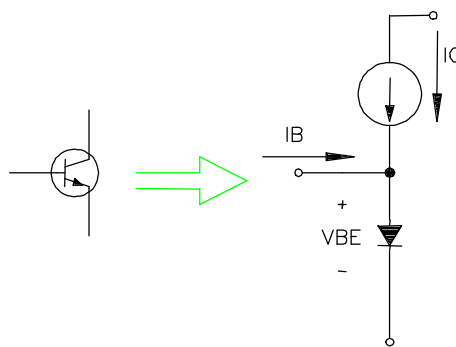


Figura 2-13 Modelo Ebers-Moll

### 3 POLARIZAÇÃO DE TRANSISTORES

Um circuito transistorizado pode ter uma infinidade de funções e os transistores para cada função tem um ponto de funcionamento correto. Este capítulo estuda como estabelecer o ponto de operação ou quiescente de um transistor. Isto é, como polariza-lo.

#### 3.1 RETA DE CARGA

A Figura 3-1 mostra um circuito com polarização de base. O problema consiste em saber os valores de correntes e tensões nos diversos componentes. Uma opção é o uso da reta de carga.

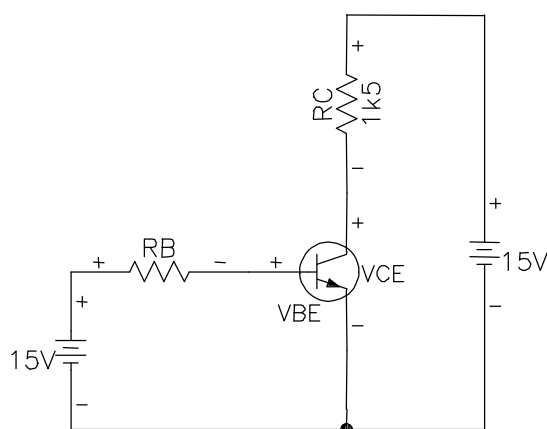


Figura 3-1

a conceito de reta de carga estudado no capítulo sobre diodos, também se aplica a transistores. usa-se a reta de carga em transistores para obter a corrente  $I_C$  e  $V_{CE}$  considerando a existência de um  $R_C$ . A análise da malha esquerda fornece a corrente  $I_C$ :

$$I_C = (V_{CC} - V_{CE}) / R_C \quad \text{Eq. 3- 1}$$

Nesta equação existem duas incógnitas,  $I_C$  e  $V_{CE}$ . A solução deste impasse é utilizar o gráfico  $I_C \times V_{CE}$ . Com o gráfico em mãos, basta Calcular os extremos da reta de carga:

$$V_{CE} = 0 \Rightarrow I_C = V_{CC} / R_C \text{ ponto superior} \quad \text{Eq. 3- 2}$$

$$I_C = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} \text{ ponto inferior} \quad \text{Eq. 3- 3}$$

A partir da reta de carga e definido uma corrente  $I_B$  chega-se aos valores de  $I_C$  e  $V_{CE}$ .

**Exemplo 3-1** No circuito da Figura 3-1 suponha  $R_B = 500\Omega$  Construa a linha de carga no gráfico da Figura 3-2 e meça  $I_C$  e  $V_{CE}$  de operação.

**SOL.:** Os dois pontos da reta de carga são:

$$V_{CE} = 0 \Rightarrow I_C = V_{CC} / R_C (15) / 1k5 = 10\text{mA ponto superior}$$

$$I_C = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} = 15\text{V ponto inferior}$$

O corrente de base é a mesma que atravessa o resistor  $R_B$ :

$$I_B = \frac{15 - 0,7}{500K} = 29\mu A$$

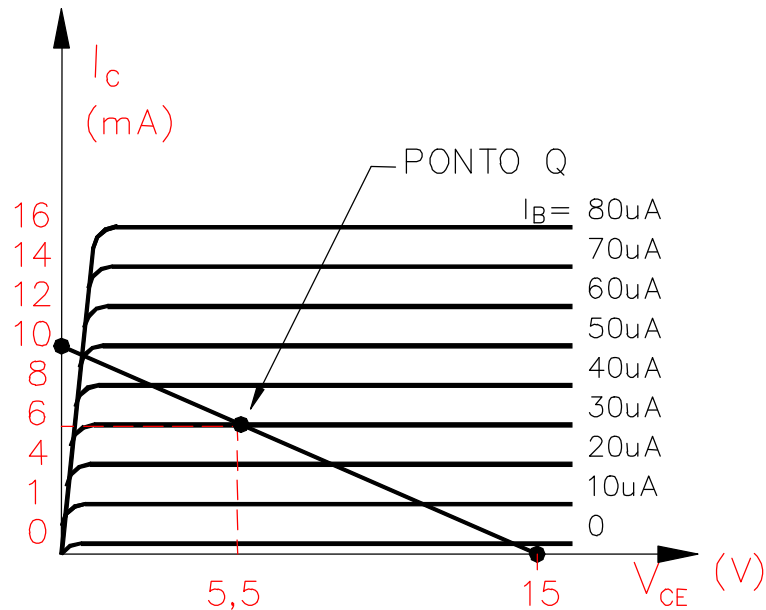


Figura 3-2

Após traçar a reta de carga na curva do transistor chega-se aos valores de  $I_C = 6\text{mA}$  e  $V_{CE} = 5,5\text{V}$ . Este é o ponto de operação do circuito (ponto Q- ponto quiescente).

O ponto Q varia conforme o valor de  $I_B$ . um aumento no  $I_B$  aproxima o transistor para a região de saturação, e uma diminuição de  $I_B$  leva o transistor região de corte. Ver Figura 3-3

O ponto onde a reta de carga intercepta a curva  $I_B = 0$  é conhecido como corte. Nesse ponto a corrente de base é zero e corrente do coletor é muito pequena ( $I_{CE0}$ ).

A interseção da reta de carga e a curva  $I_B = I_{B(\text{SAT})}$  é chamada saturação. Nesse ponto a corrente de coletor é máxima.

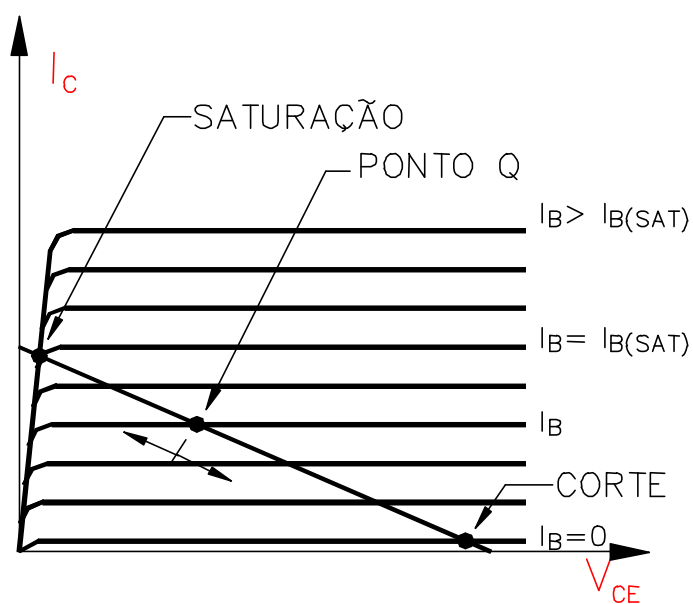


Figura 3-3

## 3.2 O TRANSISTOR COMO CHAVE

A forma mais simples de se usar um transistor é como uma chave, significando uma operação na saturação ou no corte e em nenhum outro lugar ao longo da reta de carga. Quando o transistor está saturado, é como se houvesse uma chave fechada do coletor para o emissor. Quando o transistor está cortado, é como uma chave aberta.

### CORRENTE DE BASE

A corrente de base controla a posição da chave. Se  $I_B$  for zero, a corrente de coletor é próxima de zero e o transistor está em corte. Se  $I_B$  for  $I_{B(SAT)}$  ou maior, a corrente de coletor é máxima e o transistor satura.

Saturação fraca significa que o transistor está levemente saturado, isto é, a corrente de base é apenas suficiente para operar o transistor na extremidade superior da reta de carga. Não é aconselhável a produção em massa de saturação fraca devido à variação de  $\beta_{CC}$  e em  $I_{B(SAT)}$ .

Saturação forte significa dispor de corrente da base suficiente para saturar o transistor para todas as variações de valores de  $\beta_{CC}$ . No pior caso de temperatura e corrente, a maioria dos transistores de silício de pequeno sinal tem um  $\beta_{CC}$  maior do que 10. Portanto, uma boa orientação de projeto para a saturação forte é de considerar um  $\beta_{CC(SAT)}=10$ , ou seja, dispor de uma corrente de base que seja de aproximadamente um décimo do valor saturado da corrente de coletor.

Exemplo 3-2 A Figura 3-4 mostra um circuito de chaveamento com transistor acionado por uma tensão em degrau. Qual a tensão de saída?

SOL.: Quando a tensão de entrada for zero, o transistor está em corte. Neste caso, ele se comporta como uma chave aberta. Sem corrente pelo resistor de coletor, a tensão de saída iguala-se a +5V.

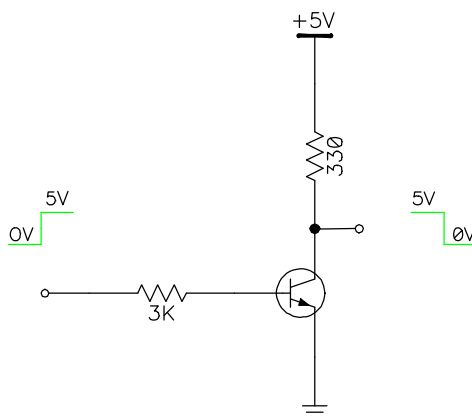


Figura 3-4

Quando a tensão de entrada for de +5V, a corrente de base será:

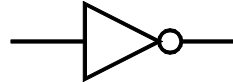
$$I_B = \frac{5 - 0,7}{3K} = 1,43mA$$

Supondo o transistor com um curto entre coletor e o emissor (totalmente saturado). A tensão de saída vai a zero e a corrente de saturação será:

$$I_{C(SAT)} = \frac{5}{330} = 15,2\text{mA}$$

Isto é aproximadamente 10 vezes o valor da corrente de base, ou seja, certamente há uma saturação forte no circuito.

No circuito analisado, uma tensão de entrada de 0V produz uma saída de 5V e uma tensão de entrada de 5V, uma saída de 0V. Em circuitos digitais este circuito é chamado de porta inversora e tem a representação abaixo:



Exemplo 3-3 Recalcule os resistores  $R_B$  e  $R_C$  no circuito da Figura 3-4 para um  $I_C=10\text{mA}$ .

SOL.: Cálculo de  $I_B$

$$\text{Se } I_C = 10\text{mA} \Rightarrow I_{B(sat)} = I_C / \beta_{CC(SAT)} = 10\text{mA} / 10 = 1,0\text{mA}$$

Cálculo de  $R_C$

ao considerar o transistor saturado, o  $V_{CE}$  de saturação é próximo de zero.

$$R_C = V_{CC} / I_C = 5 / 10\text{mA} = 500\Omega$$

Cálculo de  $R_B$

$$R_B = V_E - V_{BE} / I_B = 5 - 0,7 / 1\text{mA} = 4\text{k}30\Omega$$

### 3.3 O TRANSISTOR COMO FONTE DE CORRENTE

A Figura 3-5 mostra um transistor como fonte de corrente. Ele tem um resistor de emissor  $R_E$  entre o emissor e o ponto comum. A corrente de emissor circula por esse resistor produzindo uma queda de tensão de  $I_E R_E$ .

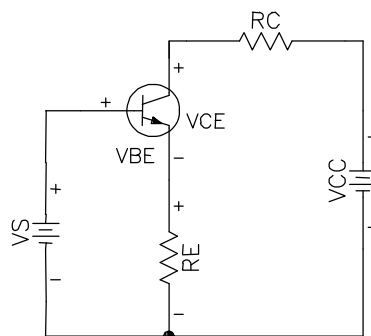


Figura 3-5

A soma das tensões da malha de entrada da é:

$$V_{BE} + I_E R_E - V_S = 0$$

logo,  $I_E$

$$I_E = \frac{V_S - V_{BE}}{R_E}$$

Como  $V_{BE}$ ,  $V_S$ , e  $R_E$  são aproximadamente constantes, a corrente no emissor é constante. Independe de  $\beta_{CC}$ ,  $R_C$  ou da corrente de base.

### 3.4 O TRANSISTOR COMO AMPLIFICADOR

#### CIRCUITOS DE POLARIZAÇÃO EM EMISSOR COMUM

Fontes de alimentação e resistores polarizam um transistor, isto é, eles estabelecem valores específicos de tensões e correntes nos seus terminais, determinando, portanto, um ponto de operação no modo ativo (o ponto de operação).

A Figura 3-6 mostra o circuito de polarização por base já estudado anteriormente, a principal desvantagem dele é a sua susceptibilidade à variação do  $\beta_{CC}$ . Em circuitos digitais, com o uso de  $\beta_{CC(SAT)}$ , isto não é problema. Mas em circuitos que trabalham na região ativa, o ponto de operação varia sensivelmente com o  $\beta_{CC}$ . Pois:  $I_C = \beta_{CC} * I_B$ .

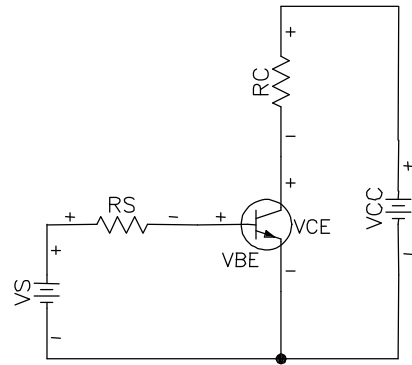


Figura 3-6

#### POLARIZAÇÃO POR DIVISOR DE TENSÃO

O circuito mais usado em amplificadores é chamado de polarização por divisor de tensão. A Figura 3-7 mostra o circuito.

A principal evolução do circuito em relação ao polarização por base é de fixar uma tensão na base, via os resistores  $R_1$  e  $R_2$ . O valor de  $I$  deve ser bem maior que  $I_B$  para a corrente  $I_B$  não influenciar na tensão sob  $R_2$ . Como regra prática, considerar a corrente  $I$  20 vezes maior que  $I_B$ .

Para a análise da tensão em  $V_{R2}$ , observar que  $R_1$  e  $R_2$  formam um divisor de tensão. Supondo  $I \gg I_B$ :

$$V_{R2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} \quad \text{Eq. 3-4}$$

\* a tensão  $V_{R2}$  não depende de  $\beta_{CC}$

Com o valor de  $V_{R2}$  é simples o cálculo de  $I_E$ . Deve-se olhar a malha de entrada:

$$V_{R2} = V_{BE} + V_E \quad \text{Eq. 3-5}$$

como  $V_E = I_E R_E$

$$I_E = \frac{V_{R2} - V_{BE}}{R_E} \quad \text{Eq. 3-6}$$

Análise da malha de saída:

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

considerando  $I_E = I_C$

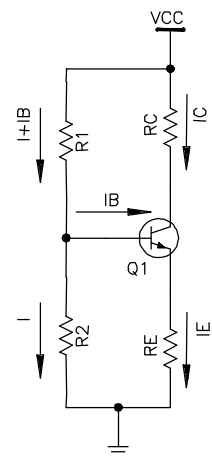


Figura 3-7



$$V_{CC} = I_C (R_C + R_E) + V_{CE} \quad \text{Eq. 3- 7}$$

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C + R_E} \quad \text{Eq. 3- 8}$$

Notar que  $\beta_{CC}$  não aparece na fórmula para a corrente de coletor. Isto quer dizer que o circuito é imune a variações em  $\beta_{CC}$ , o que implica um ponto de operação estável. Por isso a polarização por divisor de tensão é amplamente utilizada.

Exemplo 3-4 Encontre o  $V_B$ ,  $V_E$ ,  $V_{CE}$  e  $I_E$  para o circuito da Figura 3-8.

SOL.: Cálculo de  $V_{R2}$  a partir da Eq. 3-4

$$V_B = V_{R2} = \frac{1K}{6K8 + 1K} 30 = 3,85V$$

Cálculo de  $I_E$  a partir da Eq. 3-6

$$I_E = \frac{3,85 - 0,7}{750} = 4,2mA$$

cálculo de  $V_E$

$$V_E = I_E R_E = 4,2m \cdot 750 = 3,15V$$

cálculo de  $V_{CE}$  a partir da Eq. 3-7

$$V_{CE} = 30 - 4,2m \cdot (3k + 750) = 14,3V$$

## REGRAS DE PROJETO

Sempre ao polarizar um transistor, deseja-se manter o ponto Q de operação fixo independente de outros parâmetros externos. ou seja, espera-se um divisor de tensão estabilizado. Para minimizar o efeito do  $\beta_{CC}$ , considerar:

$$R_2 \leq 0,01\beta_{CC} R_E \quad \text{Eq. 3- 9}$$

onde o valor de  $\beta_{CC}$  é o do pior caso, ou seja, o menor  $\beta_{CC}$  que o transistor pode ter.

O defeito desta regra, é o fato de um baixo  $R_2$  influenciar negativamente na impedância de entrada. Então como opção pode-se considerar

$$R_2 \leq 0,1\beta_{CC} R_E \quad \text{Eq. 3- 10}$$

assim  $R_2$  será maior, mas com possibilidade de degradação na estabilidade do ponto Q. Quando se segue a regra da Eq. 3-10 designa-se o circuito de polarização por *divisor tensão firme* e quando se segue a regra da Eq. 3-9 é polarização por *divisor de tensão estabilizado*.

Na escolha do ponto de operação da curva  $I_C \times V_{CE}$ , deve-se dar preferência a um ponto central, isto é,  $V_{CE} = 0,5 V_{CC}$  ou  $I_C = 0,5 I_{C(SAT)}$ . De forma que o sinal possa excursionar ao máximo tanto com o aumento de  $I_B$  quanto com a diminuição.

Por último, aplicar a regra de  $V_E$  ser um decimo de  $V_{CC}$ .

$$V_E = 0,1 V_{CC} \quad \text{Eq. 3- 11}$$

Exemplo 3-5 Polarizar um transistor por divisão de tensão firme. Dados:

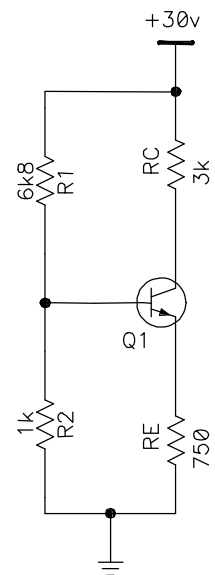


Figura 3-8

$$V_{CC} = 10V, I_C = 10mA \text{ e } \beta_{CC} = 100$$

SOL.: Cálculo de  $R_E$  aplicando a regra da Eq. 3-11

$$V_E = 0,1 * 10 = 1V$$

$$I_E = I_C$$

$$R_E = V_E / I_E = 100\Omega$$

cálculo de  $R_C$  a partir da Eq. 3-8 e  $V_{CE} = 0,5 V_{CC}$

$$R_C = \frac{10 - 5}{10m} - 100 = 400\Omega$$

cálculo de  $R_2$  a partir da Eq. 3-10

$$R_2 \leq 0,1 * 100 * 100 = 1000$$

$$R_2 = 1000\Omega$$

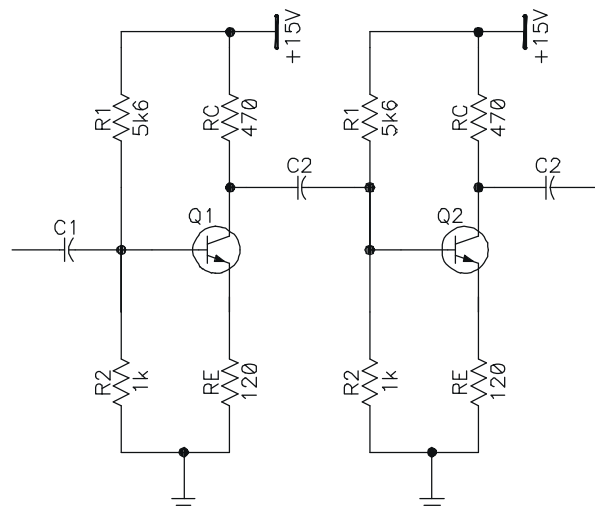
cálculo de  $R_1$  Eq. 3-4

$$V_{R_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = 1,0 + 0,7 = \frac{1000}{1000 + R_1} * 10$$

$$R_1 = 4888 = 4k7\Omega$$

### 3.5 EXERCÍCIOS

Ex. 3-1) No circuito da figura abaixo, encontre as tensões  $V_E$  e  $V_{CE}$  de cada estágio.



Ex. 3-2) Projete um circuito de polarização por divisor de tensão com as seguintes especificações:  $V_{CC} = 20V$ ,  $I_C = 5mA$ ,  $80 < \beta_{CC} < 400$ .

Considere  $V_E = 0,1 V_{CC}$  e  $V_{CE} = V_{CC} / 2$

Ex. 3-3) O transistor da figura abaixo tem um  $\beta_{CC} = 80$ .

- Qual a tensão entre o coletor e o terra?
- Desenhe a linha de carga.
- Para  $\beta_{CC} = 125$ , calcule a tensão na base, a tensão no emissor e a tensão de coletor.