

# **SEMICONDUCTORES**

**Golberi de Salvador Ferreira, Dr.**

**- 2005 -**

## SUMÁRIO

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 1. HISTÓRICO DA ELETRÔNICA | 02 |
| 2. COMPONENTES PASSIVOS    | 04 |
| 3. SEMICONDUTORES          | 06 |
| 4. DIODO SEMICONDUTOR      | 11 |
| 5. DIODOS ESPECIAIS        | 21 |
| 6. CIRCUITOS COM DIODOS    | 29 |

**OBS:** Este material é o resultado de uma compilação de trabalhos realizados por diversos professores desta Instituição, aos quais transmitimos nossos agradecimentos.

# 1. HISTÓRICO DA ELETRÔNICA

## A VÁLVULA

### 1904: primeira válvula (diodo)

- ✓ Criada pelo cientista John Ambrose Fleming;
- ✓ Propiciou um avanço na criação de outros dispositivos e circuitos que permitiram a execução de muitas tarefas que estavam sendo descobertas pelo homem naquela época;
- ✓ Foi utilizada até meados da década de 80, sendo hoje um dispositivo raro, encontrado em rádios, televisores e aparelhos de som muito antigos;
- ✓ Porém, muitos dispositivos que trabalham em frequências muito altas e que são ainda muito utilizados, derivam da válvula;
- ✓ A válvula *diodo* é composta por duas placas metálicas, colocadas numa cápsula de vidro em vácuo. Um filamento aquece uma das placas polarizada negativamente, denominada *cátodo*, gerando um fluxo de elétrons (corrente elétrica  $I$ ) que atinge a segunda placa polarizada positivamente, denominada *ânodo*, conforme Figura 1.1.

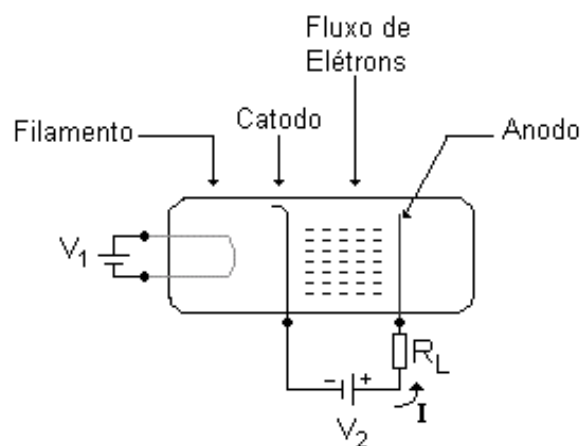


Figura 1.1 – Válvula diodo polarizada

- ✓ Invertendo-se a polarização, fazendo-se com que o cátodo fique polarizado positivamente em relação ao ânodo, a corrente elétrica deixa de circular pela carga  $R_L$ .

### 1908: válvula tríodo

- ✓ DeForest acrescentou à válvula diodo uma terceira placa entre o cátodo e o ânodo, denominada de *grade*;
- ✓ A grade passou a exercer um controle do fluxo de elétrons, criando a possibilidade de amplificar sinais elétricos. Esta válvula foi chamada de *tríodo*.

A válvula tríodo juntamente com a válvula diodo, foram as responsáveis pelo surgimento das transmissões sem fio, *radiotransmissão*. A partir daí, a busca passou a ser a de melhorar o desempenho do circuito e, para isso, era necessário desenvolver uma tecnologia para otimizar os dispositivos.

## O SEMICONDUTOR

### Década de 20

- ✓ A teoria dos semicondutores surge como promessa tecnológica.

### Década de 40

- ✓ Desenvolve-se a *física do estado sólido*, que investiga a estrutura, as propriedades e o comportamento elétrico dos semicondutores;
- ✓ Surge o *diodo semicondutor*, que substitui a válvula diodo, pois consome uma quantidade menor de energia e tem dimensões menores;
- ✓ Em seguida, surge o *transistor*, substituindo a válvula tríodo, e outros dispositivos que foram criados a partir da necessidade imposta pelos novos aparelhos que surgiram, e possibilitando o surgimento de outros mais.

Dentre muitas outras aplicações, a eletrônica pode ser usada para:

- ✓ a transmissão de sinais em tempo real;
- ✓ o desenvolvimento de equipamento bélico (construção de armas e de sistemas de controle de mísseis);
- ✓ o desenvolvimento de sistemas de controle, que podem substituir o homem pela máquina de forma irracional;
- ✓ salvar vidas;
- ✓ diagnosticar doenças e desenvolver métodos de cura;
- ✓ servir ao lazer das pessoas.

Portanto, ter o domínio da técnica implica, não apenas em saber manejá-la, mas também em compreender *para quem* ou *para que* ela servirá.

## 2. COMPONENTES PASSIVOS

### BIPOLos ELÉTRICOS

Um *bipolo elétrico* é um dispositivo qualquer que possui dois pólos ou terminais, aos quais podem ser ligados outros bipolos, formando um circuito elétrico. Genericamente, um bipolo pode ser representado pela Figura 2.1.



Figura 2.1 – Bipolo elétrico genérico

Os bipolos elétricos podem ser classificados em *geradores* ou *receptores*, em função dos sentidos convencionais de tensão e corrente relacionados a eles.

### GERADOR

Um bipolo *gerador* é aquele que transforma um tipo de *energia qualquer* em *energia elétrica*. Ele é, portanto, o elemento *ativo* de um circuito.

Exemplos:

Pilha  $\Rightarrow$  transforma energia química em elétrica  
Dinamo  $\Rightarrow$  transforma energia mecânica em elétrica

No bipolo gerador, a corrente tem o sentido do potencial menor para o maior, ou seja, coincide com o sentido da tensão sobre ele, como apresentado na Figura 2.2.

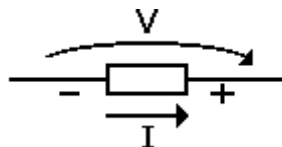


Figura 2.2 – Bipolo gerador

### RECEPTOR

Um bipolo *receptor* é aquele que transforma *energia elétrica* em um tipo de *energia qualquer*, sendo o elemento *passivo* de um circuito.

Exemplos:

Resistência  $\Rightarrow$  transforma energia elétrica em térmica  
Motor  $\Rightarrow$  transforma energia elétrica em mecânica

No bipolo receptor, a corrente tem o sentido do potencial maior para o menor, ou seja, contrário ao sentido da tensão sobre ele, como apresentado na Figura 2.3.

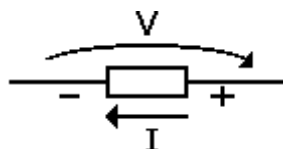


Figura 2.3 – Bipolo receptor

Em eletricidade e eletrônica, utilizam-se os símbolos específicos dos bipolos para representá-los nos circuitos elétricos. A Figura 2.4 mostra alguns símbolos de bipolos receptores.

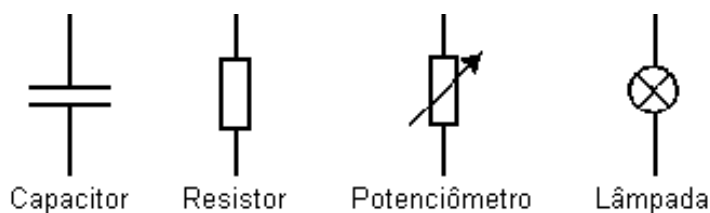


Figura 2.4 – Símbolos de alguns bipolos receptores

Num circuito elétrico, é possível que um gerador comporte-se como um receptor, em função dos sentidos de corrente e tensão impostos pelo circuito, ou seja, ele pode ser considerado um *receptor ativo*.

Já, um receptor nunca pode comportar-se como um gerador, por ser um elemento passivo.

### 3. SEMICONDUTORES

#### BANDAS DE ENERGIA

Na Figura 3.1 apresenta-se o modelo atômico de Bohr. Neste modelo, o átomo está dividido em duas partes: o *núcleo* e a *eletrosfera*. No núcleo encontram-se os prótons e os nêutrons. Já na eletrosfera estão os elétrons, distribuídos em sete camadas eletrônicas ou bandas de energia: K, L, M, N, O, P e Q.

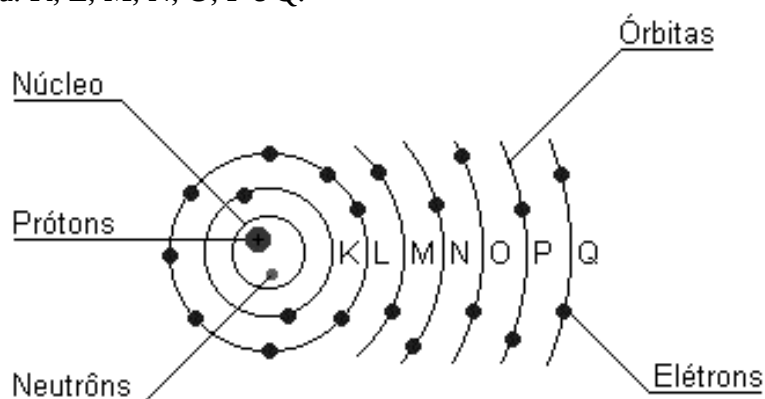


Figura 3.1 - Modelo atômico de Bohr

Cada banda de energia pode conter um número máximo de elétrons, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Número máximo de elétrons nas bandas de energia

| Banda de energia       | K | L | M  | N  | O  | P  | Q |
|------------------------|---|---|----|----|----|----|---|
| N.º máximo de elétrons | 2 | 8 | 18 | 32 | 32 | 18 | 2 |

Quanto maior a energia do elétron, maior é o raio de sua órbita ( $Q > P > O > \dots$ ), Figura 3.2, e mais fracamente ele está ligado ao núcleo.

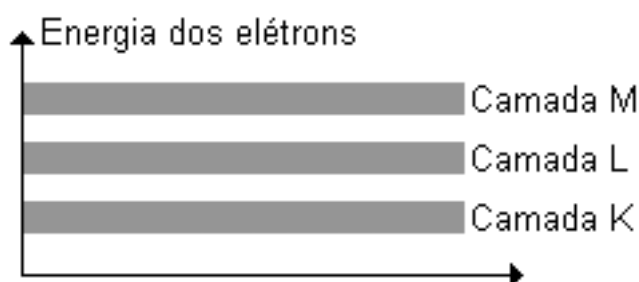


Figura 3.2 - Níveis de energia de um átomo

Um elétron na sua órbita gira com uma certa velocidade (energia cinética), fazendo com que sobre ele exista uma força centrífuga,  $F_c$ . Além disso, o núcleo também exerce sobre este elétron uma força, denominada de força de atração eletrostática  $F_e$ . O equilíbrio destas duas forças torna o elétron estável na sua órbita, Figura 3.3.

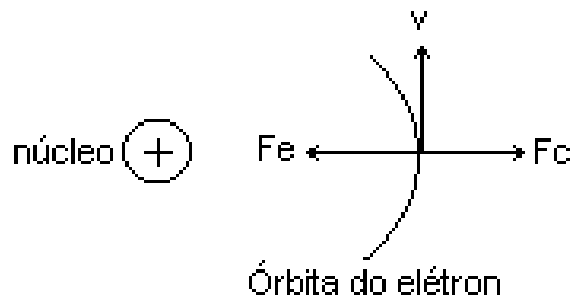


Figura 3.3 - Estabilidade de um elétron numa determinada órbita

A última órbita de um átomo é denominada de *banda de valência*. A *valência* de um átomo é o *número de elétrons da banda de valência*. São estes elétrons que farão ligações químicas para completar o número máximo de elétrons da banda de valência, de modo a tornar o átomo estável.

Os elétrons que estão na banda de valência têm mais facilidade para sair do átomo, quando recebem um acréscimo de energia, sob a forma de luz ou calor. Ao receberem este acréscimo de energia, os elétrons tornam-se livres, saem da banda de valência e dirigem-se para a *banda de condução*, onde sob a ação de um campo elétrico formam a corrente elétrica (I), Figura 3.4.

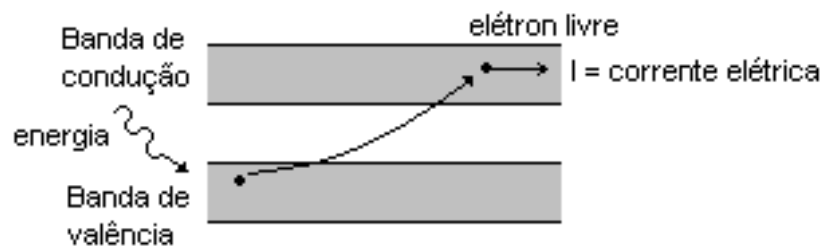


Figura 3.4 – Banda de valência e banda de condução

Entre as bandas de valência e de condução há uma região onde não é possível existir elétrons, denominada de *banda proibida*, Figura 3.5. Esta banda proibida define o comportamento elétrico do material. Assim, quanto maior a banda proibida, maior será a quantidade de energia necessária para retirar um elétron da banda de valência e levá-lo para a banda de condução.

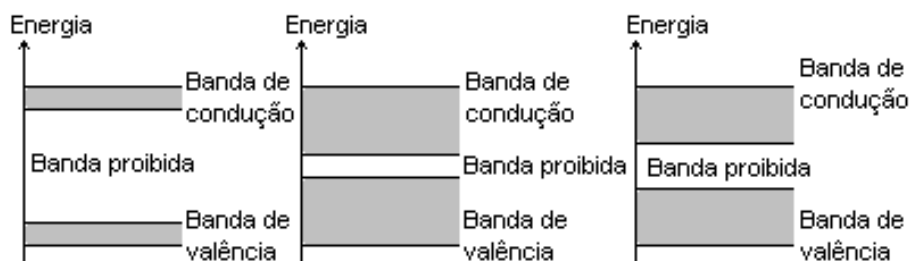


Figura 3.5 – Materiais isolantes, condutores e semicondutores

Os materiais *semicondutores* são sólidos ou líquidos, capazes de mudar com certa *facilidade* de sua condição de isolante para a de condutor. Isto é, podem sofrer grandes alterações em sua condutividade, pois a quantidade de energia necessária para retirar um

elétron da banda de valência e levá-lo para a banda de condução é intermediária entre a energia necessária para o isolante e o condutor. Em baixas temperaturas, os semicondutores puros comportam-se como isolantes. Sob temperaturas mais altas, ou luz ou com a adição de impurezas, porém, pode ser aumentada drasticamente a sua condutividade, podendo-se alcançar níveis que se aproximam dos metais.

## MATERIAIS SEMICONDUTORES INTRÍNSECOS

Na Figura 3.6, apresenta-se os átomos de dois materiais semicondutores intrínsecos ou puros, o silício (Si) e o germânio (Ge). Os semicondutores intrínsecos ou puros são aqueles encontrados em estado natural.

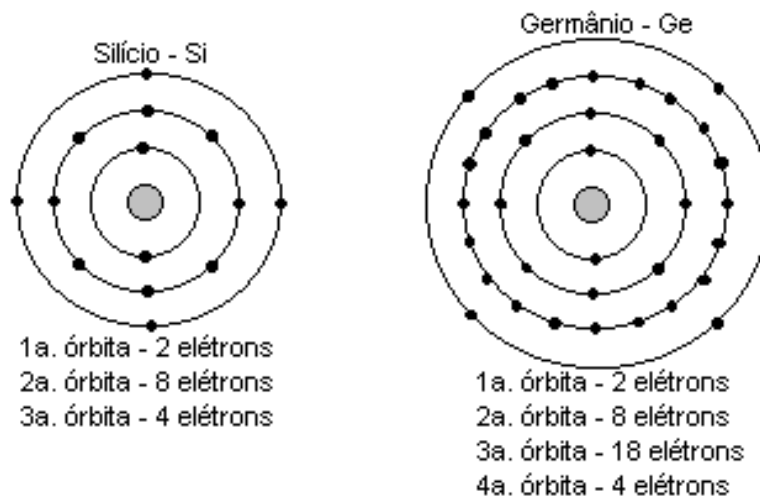


Figura 3.6 - Átomos de silício e germânio

Tanto o silício quanto o germânio são elementos *tetravalentes*, ou seja, que possuem quatro elétrons na camada de valência, Figura 3.7. Permitindo, assim, que os seus átomos façam quatro ligações covalentes ou de compartilhamento de elétrons, para tornarem-se estáveis.

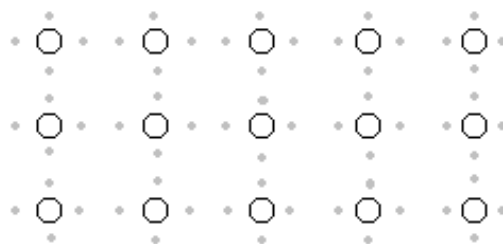


Figura 3.7 - Representação plana dos semicondutores

Existem, ainda, os semicondutores III-V que são formados por um elemento trivalente, o GaAs (Arseneto de Gálio) e por um elemento pentavalente, InP (Fosfeto de Índio). Porém, o material semiconductor intrínseco mais utilizado é o silício que é abundante na natureza, sendo encontrado nos cristais de quartzo (areia).

## CONDUÇÃO ELÉTRICA NOS SEMICONDUTORES

Num determinado instante quando recebe um acréscimo de energia e sai da banda de valência, o elétron livre deixa em seu lugar uma *lacuna*. Esta lacuna é um íon positivo, Figura 3.8.

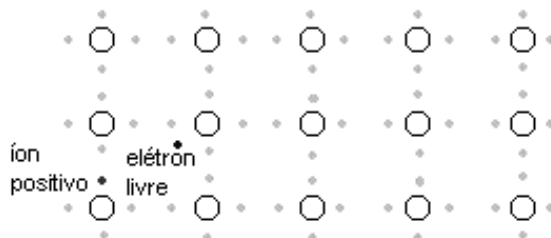


Figura 3.8 - Formação de um íon positivo

No instante seguinte, Figura 3.9, verifica-se que a lacuna também se move. Porém, a movimentação da lacuna ocorre sempre no sentido contrário à movimentação do elétron. Este fenômeno ocorre sempre que existe a condução elétrica no material semiconductor. Num material condutor o movimento das lacunas é desprezível.

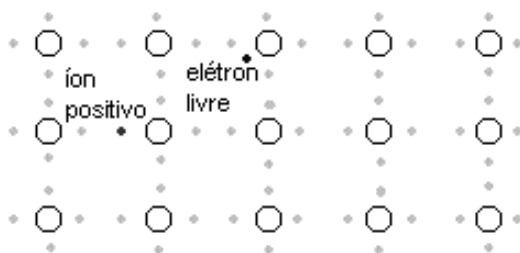


Figura 3.9 - Movimento da lacuna

## SEMICONDUTORES TIPO N E P

Para a maioria das aplicações não há elétrons livres suficientes num semiconductor intrínseco para produzir uma corrente elétrica utilizável. Portanto, para obter-se esta corrente elétrica utilizável foram criados os semicondutores do tipo N e P.

Consegue-se um *semiconductor tipo N* acrescentando-se ao cristal silício puro impurezas, ou elementos, pentavalentes. Desta forma, obtém-se quatro ligações covalentes e um elétron livre, Figura 3.10. No semiconductor tipo N os elétrons são os portadores de carga majoritários e as lacunas os minoritários.



Figura 3.10 – Semiconductor tipo N: cristal de silício com impureza pentavalente

Para obter-se um *semicondutor tipo P*, acrescenta-se ao cristal de silício puro impurezas trivalentes. Assim, têm-se três ligações covalentes e uma lacuna, Figura 3.11. Neste caso, as lacunas são os portadores de carga majoritários e os elétrons minoritários.

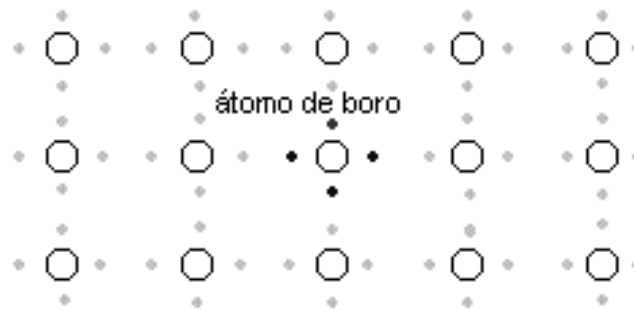


Figura 3.11 – Semicondutor tipo P: cristal de silício com impureza trivalente

O processo de introduzir átomos de impurezas num cristal de silício, de modo a aumentar tanto o número de elétrons livres quanto de lacunas, chama-se *dopagem*. Quando um cristal de silício foi dopado, ele passa a ser chamado de semicondutor *extrínseco*.

### EXERCÍCIOS

1. Qual é a órbita de valência de um átomo e o que é valência?
2. O que é e como é formada a banda de condução de um átomo?
3. O que é banda proibida?
4. O que define o comportamento elétrico dos materiais isolantes, condutores e semicondutores? Justifique.
5. O que são as lacunas e como elas se movimentam num material semicondutor?
6. O que são elementos trivalentes, tetravalentes e pentavalentes?
7. Defina material semicondutor.
8. Como o Silício é transformado em semicondutor tipo N e P?
9. Quais as principais diferenças entre o material semicondutor e o material condutor?
10. Que faz com que os elétrons permaneçam estáveis em órbitas bem determinadas?
11. É correto afirmar que os semicondutores tipo N e P estão, respectivamente, carregados negativamente e positivamente? Por quê?

## 4. DIODO SEMICONDUTOR

### JUNÇÃO PN

A união física de um semicondutor tipo P com um semicondutor tipo N forma uma junção PN, Figura 4.1. Esta junção PN recebe o nome de *diodo semicondutor*.

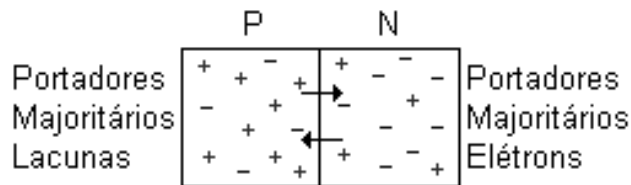


Figura 4.1 – Diodo semicondutor

Na formação da junção PN ocorre o processo de *recombinação*, no qual os elétrons do lado N mais próximos à junção migram para o lado P, Figura 4.2. Este processo ocorre até que haja o equilíbrio eletrônico e a estabilidade química, ou seja, quatro ligações covalentes em cada átomo.

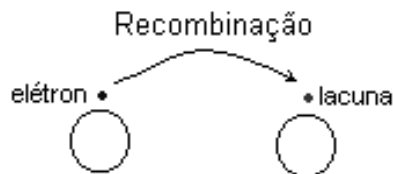


Figura 4.2 - Recombinação elétron – lacuna

Durante o processo de recombinação forma-se, próximo à junção, a *camada de depleção*, Figura 4.3. Nesta camada há a ausência de portadores majoritários.

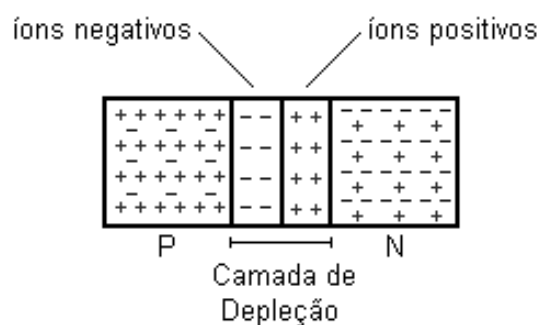


Figura 4.3 - Camada de depleção

Quando termina o processo de recombinação a camada de depleção fica ionizada, formando a *barreira de potencial* ( $V_\gamma$ ), Figura 4.4. Para o silício  $V_\gamma = 0,7V$  e para o germânio,  $V_\gamma = 0,3V$ .

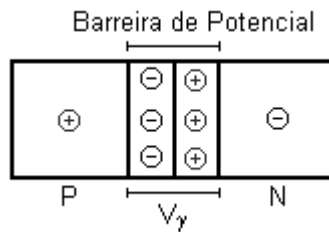


Figura 4.4 - Barreira de potencial

Na Figura 4.5 apresenta-se o símbolo elétrico do diodo semicondutor e o componente eletrônico, propriamente dito. No lado P do diodo semicondutor conecta-se um terminal que recebe o nome de *ânodo* (A). Já no lado N, o terminal é denominado de *cátodo* (K).

No símbolo elétrico do diodo semicondutor o lado que tem o traço transversal, corresponde ao cátodo. Logo, o outro lado é o ânodo.

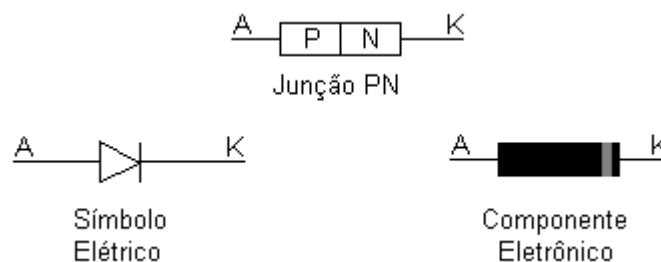


Figura 4.5 - Símbolo elétrico do diodo semicondutor

No componente eletrônico o lado que contém o anel cinza, ou prateado, é o cátodo. Consequentemente, o outro lado é o ânodo.

## POLARIZAÇÃO DA JUNÇÃO PN

### Polarização direta

Na polarização direta, Figura 4.6, conecta-se o terminal positivo da fonte de alimentação ( $V_{CC}$ ) ao ânodo do diodo e o terminal negativo, ao cátodo.

Desde que  $V_{CC} > V_{\gamma}$ , os elétrons livres do lado N, repelidos pelo terminal negativo de  $V_{CC}$ , atravessam a barreira de potencial e migram para o lado P. Alguns destes elétrons livres recombina-se com as lacunas, mas a maioria é atraída pelo terminal positivo de  $V_{CC}$ . Estabelece-se, assim, um fluxo de elétrons livres do cátodo para o ânodo, que é o sentido real de corrente. Levando-se em conta o sentido convencional, há uma corrente elétrica ( $I_D$ ) do ânodo para o cátodo de alta intensidade.

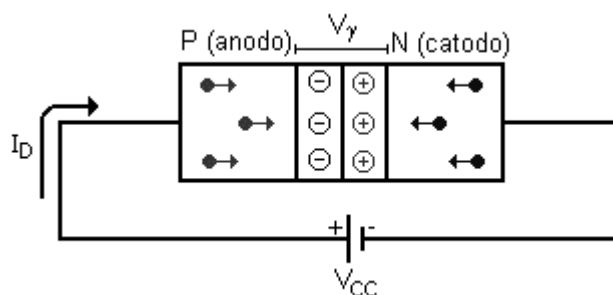


Figura 4.6 - Polarização direta do diodo

Logo, o diodo comporta-se como um condutor e apresenta uma resistência direta ou de condução ( $R_D$ ) muitíssimo pequena, Figura 4.7.

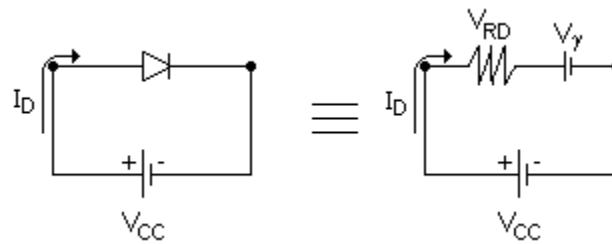


Figura 4.7 - Comportamento do diodo na polarização direta

### Polarização reversa

Na polarização reversa, Figura 4.8, conecta-se o terminal positivo de  $V_{CC}$  ao cátodo do diodo e o terminal negativo, ao ânodo.

Nesta situação os elétrons livres do lado N, são atraídos pelo terminal positivo de  $V_{CC}$ , deixando nos seus lugares as lacunas. Já no lado P, as lacunas são atraídas pelo terminal negativo de  $V_{CC}$ , ficando em seus lugares íons negativos. Portanto, há um aumento da barreira de potencial,  $V_{\gamma} = V_{CC}$ . Nesta situação, muito poucos elétrons livres conseguem atravessar a barreira de potencial e estabelecer um fluxo de elétrons do cátodo para o ânodo. Consequentemente, a corrente elétrica convencional do ânodo para o cátodo é muito pequena. Esta corrente chamada de corrente reversa ou de fuga ( $I_R$ ), pois flui do terminal negativo de  $V_{CC}$  para o positivo, é desprezível.

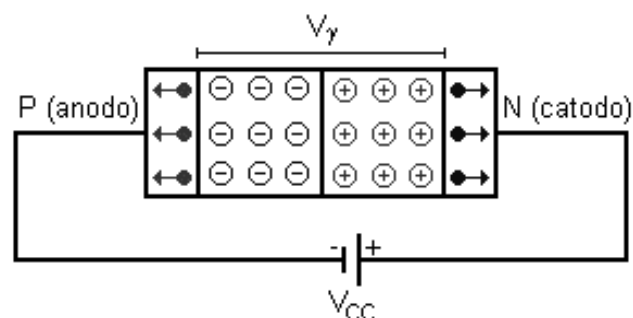


Figura 4.8 - Polarização reversa do diodo

Portanto, na polarização reversa o diodo comporta-se como um circuito aberto, ou seja, apresenta uma resistência reversa ( $R_R$ ) muitíssimo alta, Figura 4.9.

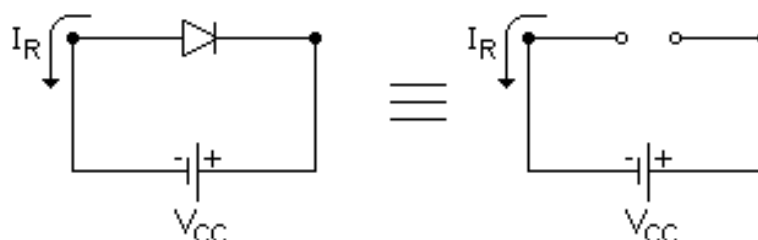


Figura 4.9 - Comportamento do diodo na polarização reversa

Ao utilizar-se um diodo num circuito deve-se atender, principalmente, às seguintes especificações:

- tensão de condução:  $V_D \geq V_\gamma$ ;
- corrente direta máxima:  $I_{DM}$ ;
- potência máxima dissipada:  $P_{DM} = V_D \times I_{DM}$ ;
- máxima tensão reversa ou tensão de ruptura:  $V_{BR}$ ;
- corrente reversa ou de fuga:  $I_R$ .

Como exemplo apresenta-se na Tabela 2 as especificações do diodo 1N4001.

Tabela 2: especificações do diodo 1N4001

|                        |          |            |
|------------------------|----------|------------|
| Corrente direta máxima | $I_{DM}$ | 1A         |
| Corrente de fuga       | $I_R$    | 10 $\mu$ A |
| Tensão de ruptura      | $V_{BR}$ | 50V        |
| Potência máxima        | $P_{DM}$ | 1W         |

O comportamento do diodo nas polarizações direta e reversa e as suas principais características são representadas na forma de uma curva chamada de *curva característica* do diodo, Figura 4.10.

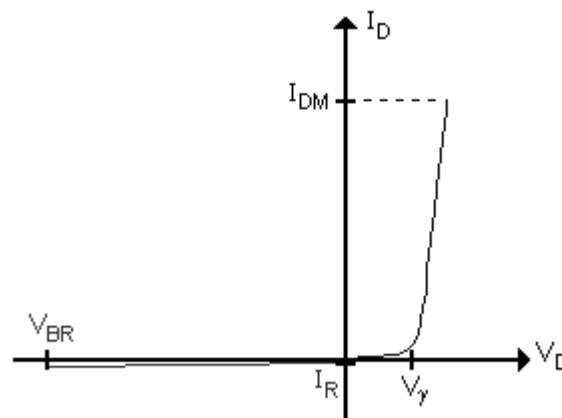


Figura 4.10 - Curva característica do diodo semicondutor

### CONCEITO DE RETA DE CARGA

Além de observar-se as principais características ao empregar-se o diodo num circuito, deve-se utilizar um resistor limitador ( $R_L$ ) para protegê-lo contra uma corrente elevada, Figura 4.11.

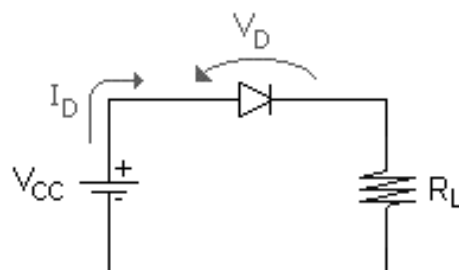


Figura 4.11 - Diodo alimentado e com resistor limitador

Quando inserido num circuito, circula pelo diodo uma corrente elétrica ( $I_D$ ) desde que a tensão sobre ele ( $V_D$ ) seja maior que  $V_\gamma$ . Estes dois parâmetros representam o ponto Quiescente (Q) ou de trabalho do diodo.

Para a obtenção do ponto Q, graficamente, utiliza-se a *reta de carga*, que é o conjunto de todos os pontos Quiescentes possíveis, Figura 4.12.

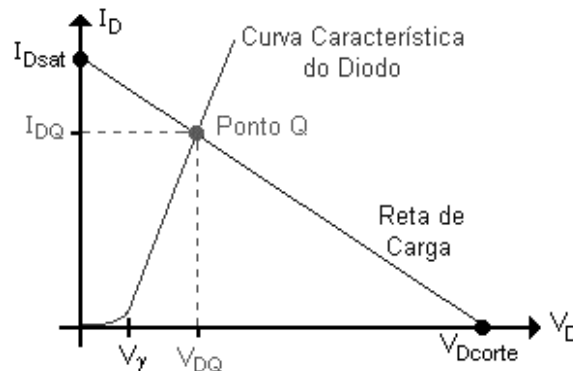


Figura 4.12 - Reta de carga e ponto quiescente do diodo

Para a obtenção da reta de carga necessita-se de dois pontos conhecidos de trabalho do diodo:

Ponto de corte:  $I_{Dcorte} = 0$   $V_{Dcorte} = V_{CC}$ ;

Ponto de saturação:  $V_{Dsat} = 0$   $I_{Dsat} = \frac{V_{CC}}{R_L}$ .

O ponto Q está na interseção da reta de carga com a curva característica do diodo, cujas coordenadas são:  $(V_D, I_D)$ .

Utilizando-se as coordenadas do ponto Q, determina-se a potência dissipada pelo diodo através da seguinte expressão:

$$P_D = V_D \times I_D$$

## MODELOS DE DIODOS

Analiticamente, pode-se determinar o ponto Q substituindo-se no circuito o diodo por um de seus modelos.

Nestes modelos, sempre que o diodo estiver polarizado reversamente, ou seja, não conduz corrente ele é substituído por um circuito aberto (resistência de condução  $\rightarrow \infty$ ).

No modelo 1, Figura 4.13, o diodo quando polarizado diretamente é considerado ideal, ou seja, quando conduz corrente é um curto-circuito (resistência de condução  $\rightarrow 0$ ). Portanto,  $V_D = 0V$ .

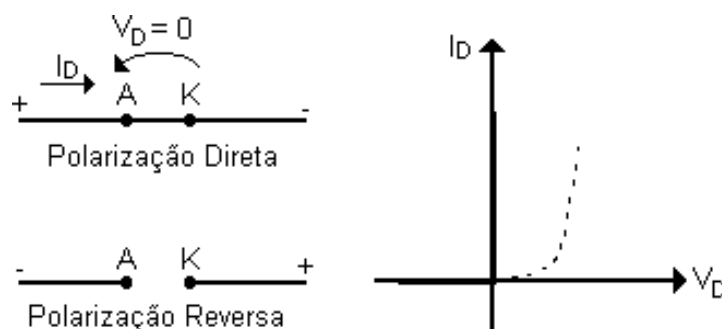


Figura 4.13 - Modelo 1: diodo ideal

Na Figura 4.14 apresenta-se o modelo 2 para o diodo. Neste modelo, quando o diodo conduz considera-se o valor da barreira de potencial. Portanto,  $V_D = V_\gamma$ .

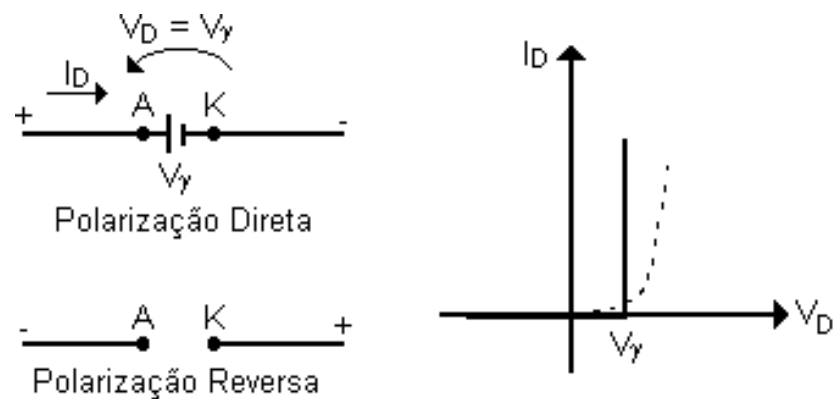


Figura 4.14 - Modelo 2: diodo com  $V_\gamma$

O modelo 3 ou modelo linear, Figura 4.15, é o modelo que apresenta o comportamento mais próximo do ideal. Neste modelo, além de  $V_\gamma$  considera-se também a queda de tensão na resistência interna do diodo ( $R_D$ ). Portanto:

$$V_D = V_\gamma + R_D \times I_D$$

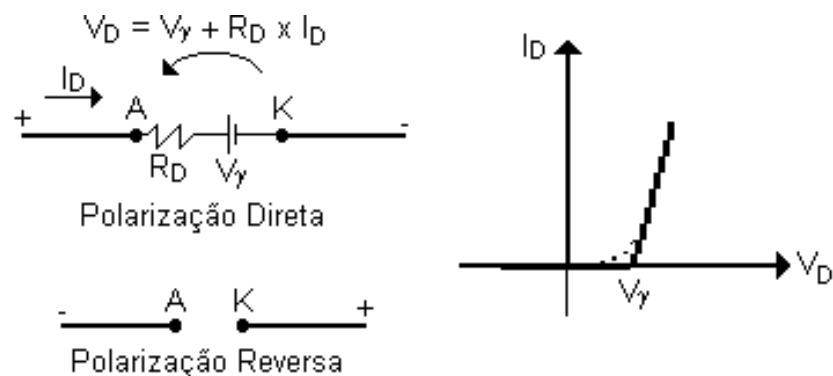


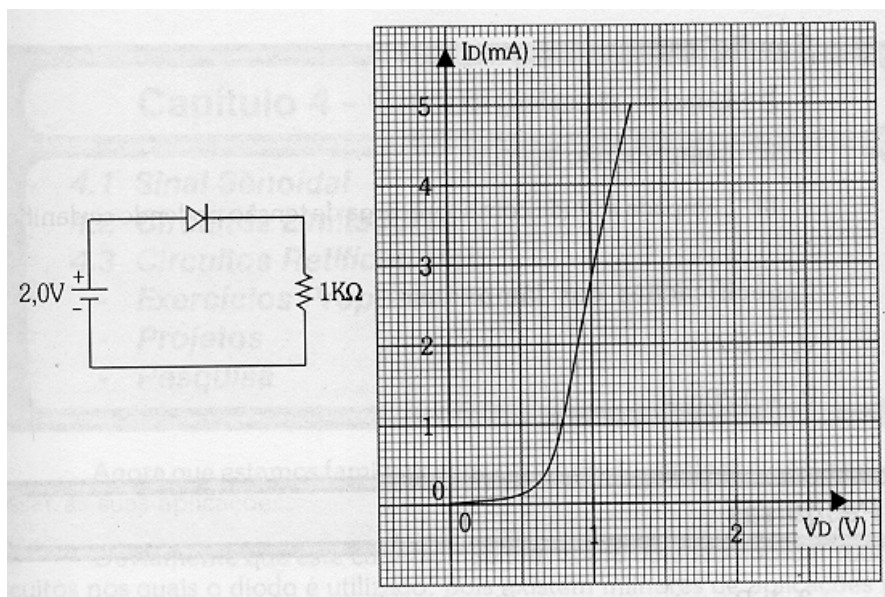
Figura 4.15 - Modelo 3: diodo com  $V_\gamma$  e  $R_D$

Para adotar-se um dos três modelos, leva-se em conta o valor da fonte de alimentação ( $V_{CC}$ ) e da barreira de potencial do diodo ( $V_\gamma$ ):

- ⇒ se  $V_{CC} \geq 10 \cdot V_\gamma$ , adota-se o modelo 1, ou seja, considera-se o diodo ideal;
- ⇒ se  $V_{CC} < 10 \cdot V_\gamma$  e  $R_L \gg R_D$ , adota-se o modelo 2
- ⇒ se  $V_{CC} < 10 \cdot V_\gamma$  e se  $R_L$  for da mesma ordem de grandeza de  $R_D$ , adota-se o modelo 3.

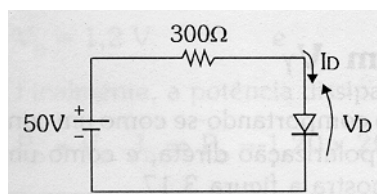
## EXERCÍCIOS

12. O que é recombinação e como ela ocorre?
13. O que é camada de depleção e como ela se forma?
14. O que é barreira de potencial e qual o seu valor para os diodos de silício e germânio?
15. O que acontece com os portadores majoritários na polarização direta?
16. Por que os portadores majoritários não circulam pelo diodo na polarização reversa?
17. O que é corrente reversa?
18. Explique quais são as principais especificações do diodo semicondutor, destacando-as na sua curva característica.
19. Qual é a potência dissipada num diodo de silício com polarização direta, se a tensão do diodo for de 0,7 V e a corrente de 100 mA ?
20. Determinar a reta de carga, o ponto quiescente (Q) e a potência dissipada pelo diodo no circuito a seguir, dada a sua curva característica.



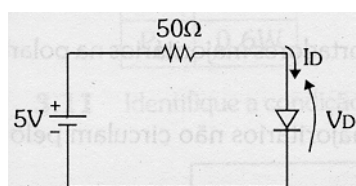
21. Para os circuitos a seguir, utilizando-se os três modelos de diodos, calcular o valor das correntes nos diodos ( $I_D$ ) e analisar os resultados obtidos.

### Circuito 1:



Especificações do diodo:  $V_\gamma = 0,7 \text{ V}$  e  $R_D = 10 \Omega$

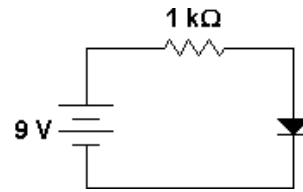
### Circuito 2:



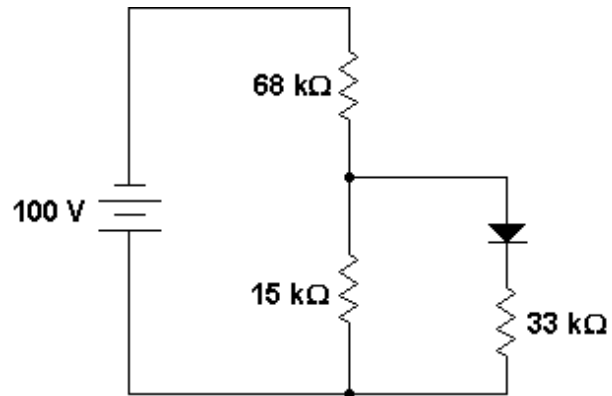
Especificações do diodo:  $V_\gamma = 0,7 \text{ V}$  e  $R_D = 10 \Omega$

22. Esboçar a curva característica de um diodo de silício com  $V_\gamma = 0,7 \text{ V}$  e  $V_{BR} = 50 \text{ V}$ . Explicar com suas palavras cada parte do gráfico.

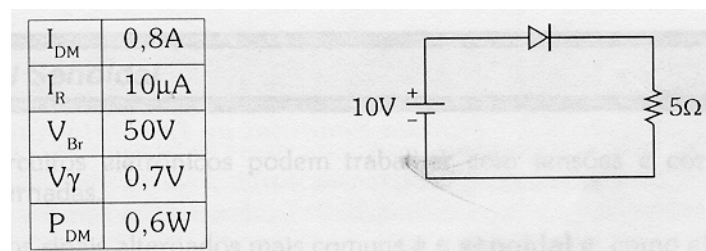
23. Para o circuito ao lado, calcular a corrente e a potência dissipada pelo diodo. Considerar o modelo 2 para o diodo.



24. Qual o valor da tensão reversa sobre o diodo, no circuito ao lado?



25. O circuito abaixo apresenta um problema. Identificá-lo e propor uma solução.



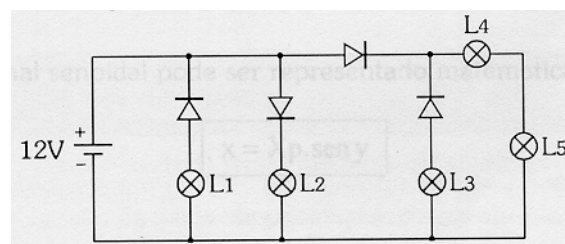
26. Identificar a condição das lâmpadas no circuito abaixo, de acordo com a seguinte convenção:

I - lâmpada acende;

II - lâmpada não acende;

III - lâmpada acende com sobrecarga de tensão, podendo danificar-se.

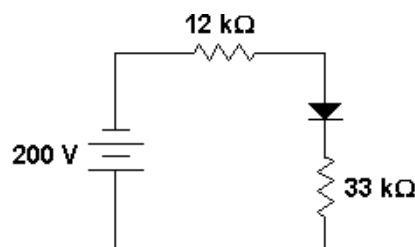
Especificações das lâmpadas:  $V_L = 6 \text{ V}$  e  $P_L = 120 \text{ mW}$



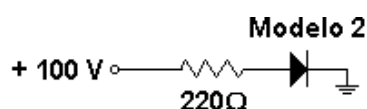
27. Aqui estão alguns diodos e suas especificações de tensão de ruptura ( $V_{BR}$ ) e corrente máxima ( $I_{DM}$ ):

| Diodo  | $V_{BR}$ (V) | $I_{DM}$ (A) |
|--------|--------------|--------------|
| 1N914  | 75           | 0,2          |
| 1N4001 | 50           | 1,0          |
| 1N1185 | 120          | 35,0         |

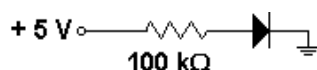
Qual desses diodos rompe-se, quando utilizado no circuito a seguir?



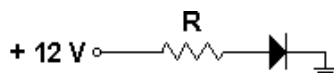
28. Quais os diodos relacionados no exercício anterior, que podem ser utilizados no circuito a seguir?



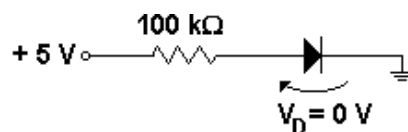
29. No circuito abaixo,  $V_D = 5$  V. O diodo está aberto ou em curto?



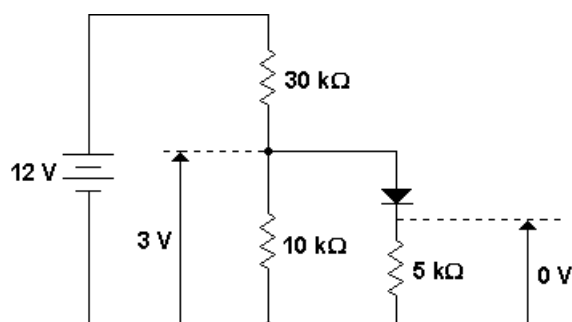
30. No circuito abaixo, a resistência R está em curto. Qual será a tensão sobre o diodo? O que acontecerá ao diodo?



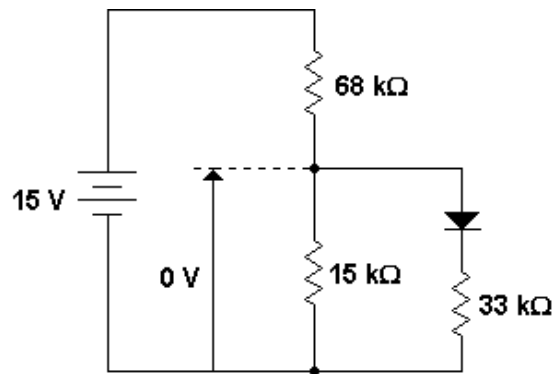
31. O que há de errado com o circuito abaixo?



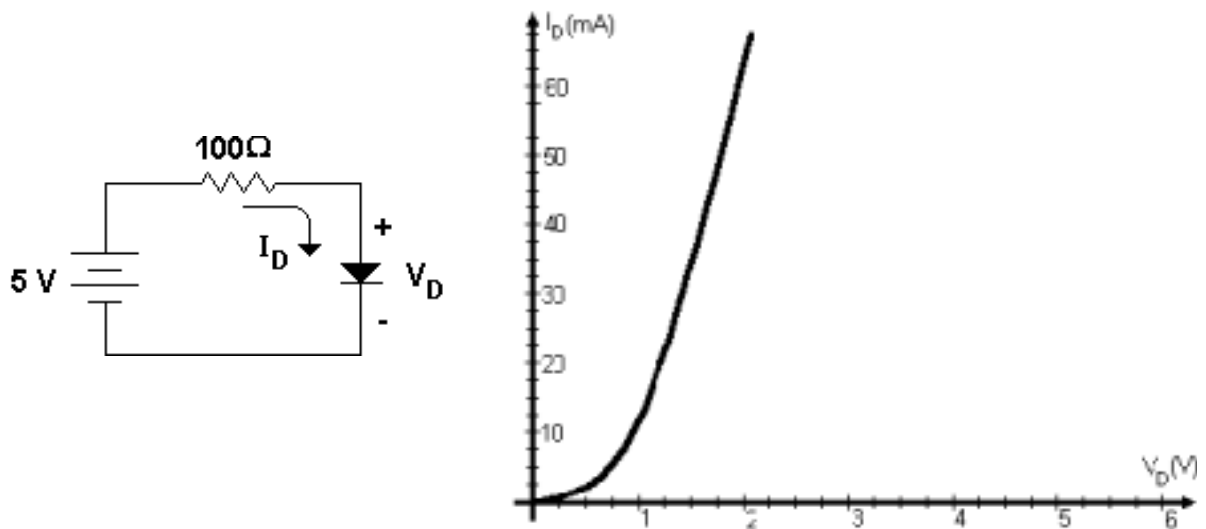
32. Quais os possíveis problemas do circuito abaixo?



33. Quais os problemas do circuito da figura abaixo?



34. Para o circuito da figura abaixo, calcular a corrente de saturação, a tensão de corte e o ponto Q, dado a curva característica do diodo. Qual o valor da potência dissipada pelo diodo?



## 5. DIODOS ESPECIAIS

### DIODO ZENER

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

No diodo normal, quando ele está polarizado reversamente, se a tensão reversa é muito grande, ele rompe-se permitindo passar por ele uma corrente reversa intensa. Este efeito é denominado efeito avalanche e consiste num aumento repentino da corrente reversa, dissipando uma potência suficiente para causar a ruptura da junção PN. A tensão na qual este efeito ocorre é chamada tensão de ruptura ou *breakdown voltage* ( $V_{BR}$ ), Figura 5.1, sendo uma das características que deve-se especificar nos projetos que utilizam diodos.

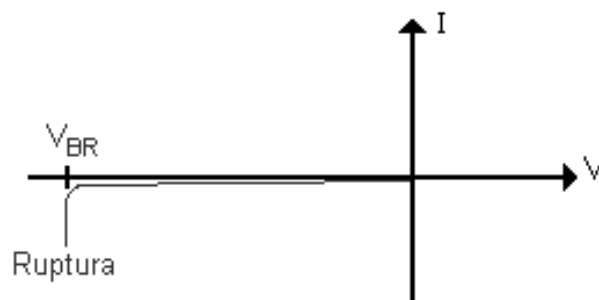


Figura 5.1 - Efeito avalanche no diodo retificador

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

Pela curva característica do diodo zener, Figura 5.2, observa-se que a tensão reversa  $V_Z$  mantém-se praticamente constante quando a corrente reversa está entre  $I_{Zm}$  (corrente zener mínima) e  $I_{ZM}$  (corrente zener máxima).

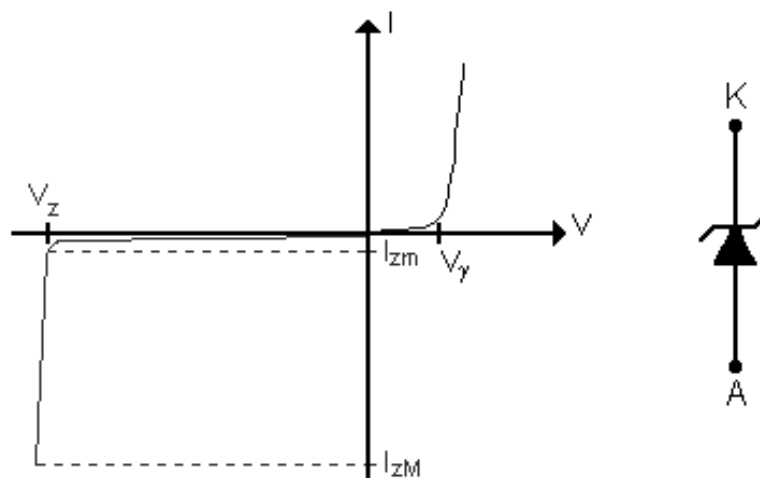


Figura 5.2 - Curva característica e símbolo elétrico do diodo zener

### Especificações máximas

As principais especificações do diodo zener são:

$V_Z$ : tensão zener;

$I_{ZM}$ : corrente zener máxima;

$P_{ZM}$ : potência zener máxima. O diodo zener dissipa esta potência quando sua corrente atinge o valor  $I_{ZM}$ , ou seja:  $P_{ZM} = V_Z \cdot I_{ZM}$ ;

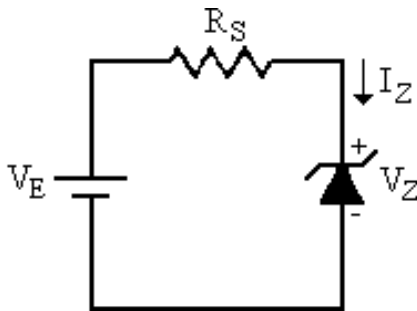
$R_Z$ : resistência zener. Esta resistência reflete a pequena variação de  $V_Z$  em função de  $I_Z$  e pode ser calculada por:

$$R_Z = \frac{\Delta V_Z}{\Delta I_Z}$$

### Regulação de tensão

Como  $V_Z$  permanece, praticamente, constante na polarização reversa, a grande aplicação do diodo zener é de, nesta região, poder atuar como regulador de tensão.

Considerando o circuito da Figura 5.3, no qual o diodo zener está reversamente polarizado por uma fonte de tensão de entrada  $V_E$ , que o alimenta e a uma resistência limitadora de corrente  $R_S$ , pode-se determinar a tensão  $V_Z$  e a corrente  $I_Z$  no diodo zener analiticamente através da equação do circuito:



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

Figura 5.3 - Diodo zener polarizado reversamente

A equação acima considera a tensão zener constante para correntes entre  $I_{Zm}$  e  $I_{ZM}$ , ou seja, adota um modelo ideal para o diodo zener, como mostra a Figura 5.4.

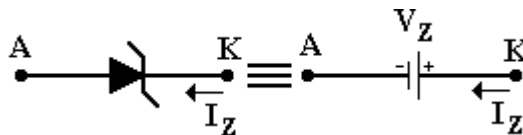
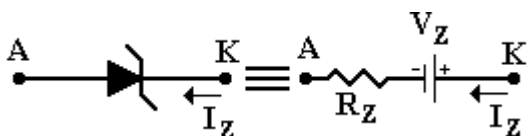


Figura 5.4 - Modelo ideal do diodo zener

Porém, se a precisão desejada para os cálculos de  $V_Z$  e  $I_Z$  for maior, pode-se utilizar o modelo linear que leva em consideração a resistência zener  $R_Z$ , ficando a equação da seguinte forma:



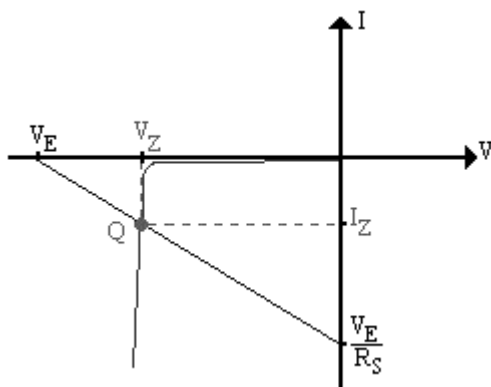
$$V_E = R_S \cdot I_Z + R_Z \cdot I_Z + V_Z$$

Figura 5.5 - Modelo linear do diodo zener

Como a variação da tensão zener é muito pequena, normalmente  $R_Z$  é desconsiderada nos cálculos. Por outro lado, como é possível determinar  $V_Z$  e  $I_Z$  graficamente, naturalmente, os resultados obtidos levam em consideração estas variações e isto pode ser feito pela reta de carga, traçada a partir dos seguintes pontos:

- tensão de corte:  $V_{Z\text{corte}}$  (para  $I_Z = 0$ ):  $V_{Z\text{corte}} = V_E$
- corrente de saturação  $I_{Z\text{saturação}}$  (para  $V_Z = 0$ ):  $I_{Z\text{sat}} = \frac{V_E}{R_S}$ , desprezando-se  $R_Z$ .

A Figura 5.6, mostra a reta de carga traçada sobre a curva característica do diodo zener na região reversa.



**Observação:** na curva característica, os pontos da reta de carga são negativos, pois o diodo está trabalhando na região reversa.

Figura 5.6 - Curva característica e reta de carga do diodo zener

Desta forma, o ponto quiescente (Q) do diodo zener pode ser determinado pela interseção da curva característica com a reta de carga, correspondendo aos valores de tensão  $V_Z$  sobre o diodo zener e a corrente  $I_Z$  que passa por ele.

Considerando que a tensão de entrada aumentou para um valor  $V_E'$  ou a resistência diminuiu para um valor  $R_S'$ , isto acarretará um deslocamento do ponto quiescente, denominado agora  $Q'$ , como apresentado na Figura 5.7.

Assim, percebe-se que para ambos os gráficos da Figura 5.7, que mesmo que a corrente no diodo zener tenha aumentado para  $I_Z'$ , a tensão sobre ele permanece praticamente constante, já que  $V_Z \cong V_Z'$ .

Por isso, o diodo zener é chamado de *regulador de tensão*.

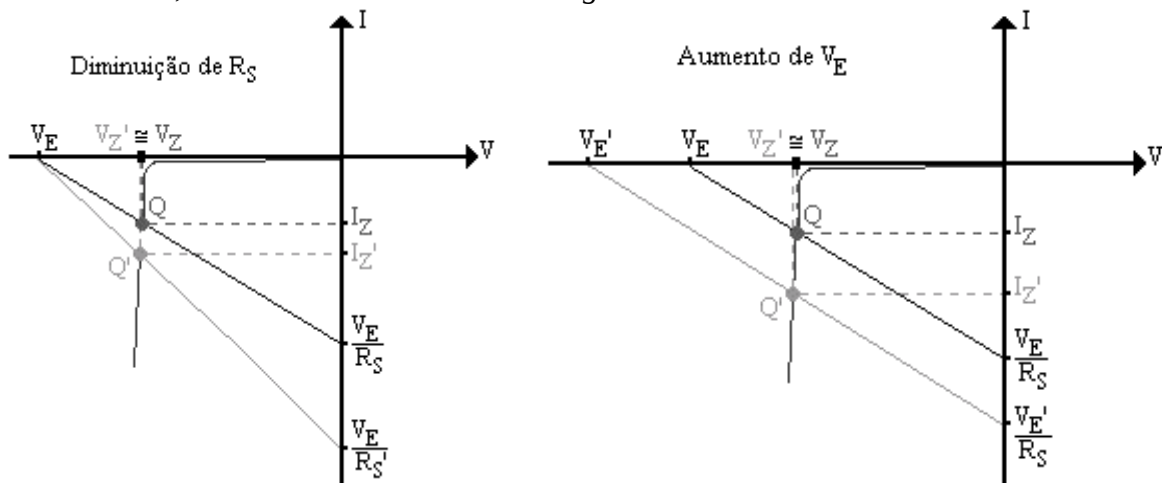


Figura 5.7- Deslocamento do ponto quiescente

## DIODO EMISSOR DE LUZ (LED)

Num diodo polarizado diretamente, os elétrons livres atravessam a junção e combinam-se com as lacunas. À medida que esses elétrons caem de um nível mais alto de energia para um mais baixo, eles irradiam energia. Nos diodos comuns essa energia é dissipada na forma de calor. Mas no *diodo emissor de luz* (LED), a energia é irradiada na forma de luz. Os LEDs substituíram as lâmpadas incandescentes em várias aplicações devido a sua baixa tensão, vida longa e rápido chaveamento liga-desliga.

Os diodos comuns são feitos de silício, um material opaco que bloqueia a passagem da luz. Os LEDs são diferentes. Usando-se elementos como o gálio, o arsênio e o fósforo, um fabricante pode produzir LEDs que irradiam luz vermelha, verde, amarela, azul, laranja ou infravermelha (invisível). Os LEDs que produzem radiação visível são úteis em instrumentos, calculadoras, etc. Os LEDs infravermelhos encontram aplicação em sistemas de alarme contra roubo e outras áreas que exijam radiação invisível.

Os LEDs têm uma queda de tensão típica de 1,5 a 2,5V, para correntes entre 10 e 50mA. A queda de tensão exata depende da corrente, da cor e da tolerância do LED.

A Figura 5.8 mostra o símbolo esquemático de um LED, onde as setas para fora simbolizam a luz irradiada.

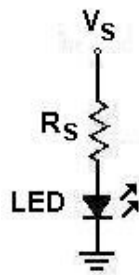


Figura 5.8 - Símbolo do LED

O brilho de um LED depende da corrente que circula pelo mesmo. Idealmente, a melhor forma de se controlar o brilho é vincular o LED a uma fonte de corrente. A melhor coisa para se obter uma fonte de corrente, é utilizar uma fonte de tensão ( $V_S$ ) de valor elevado associada a uma resistência ( $R_S$ ) elevada em série. Neste caso, a corrente no LED é dada por:

$$I_{LED} = \frac{V_S - V_{LED}}{R_S}$$

Quanto maior a tensão da fonte, menor o efeito que a  $V_{LED}$  produz, ou seja, um valor alto de  $V_S$  encobre a variação na tensão do LED.

A Figura 5.9(a) mostra um *indicador de sete segmentos*, que contém sete LEDs retangulares (de A a G). Cada LED é chamado de um segmento, porque ele faz parte do dígito que está sendo exibido. A Figura 5.9(b) é o diagrama esquemático de um indicador de sete segmentos. Neste diagrama, estão incluídos os resistores externos em série para limitar as correntes a níveis seguros para os LEDs. Aterrando-se um ou mais resistores, pode-se formar qualquer dígito de 0 a 9.

Um indicador de sete segmentos, também, pode exibir as letras maiúsculas A, C, E e F, mais as letras minúsculas b e d. Os instrutores de microprocessadores, freqüentemente, usam um indicador de sete segmentos para mostrar todos os dígitos de 0 a 9, mais as letras A, B, C, E, D, E e F.

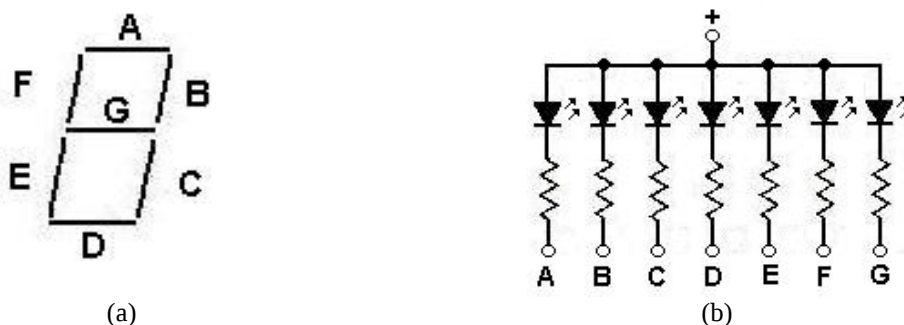


Figura 5.9 – (a) Indicador de sete segmentos e (b) diagrama esquemático

## FOTODIODO

Como já visto, a corrente reversa num diodo corresponde ao fluxo de portadores minoritários. Estes portadores existem porque a energia térmica mantém os elétrons de valência desalojados de suas órbitas, produzindo no processo elétrons livres e lacunas. A vida média dos portadores minoritários é curta, mas enquanto dura eles podem contribuir para a corrente reversa.

Quando incide energia luminosa sobre uma junção *pn*, ela também pode desalojar elétrons de valência, ou seja, a quantidade de luz incidente na junção pode controlar a corrente reversa de um diodo. O *fotodiodo* é um diodo que foi otimizado na sua sensibilidade para a luz. Nesse diodo, uma janela permite que a luz passe através do invólucro e chegue até a junção, produzindo elétrons livres e lacunas. Quanto mais intensa a luz, maior o número de portadores minoritários e maior a corrente reversa.

A Figura 5.10 mostra o símbolo esquemático de um fotodiodo, onde as setas para dentro representam a luz incidente. Neste circuito, a fonte polariza reversamente e o resistor em série limita a corrente reversa do fotodiodo. À medida que a luz torna-se mais brilhante, a corrente reversa aumenta. Em fotodiodos típicos, a corrente típica situa-se na faixa de dezenas de microampères.

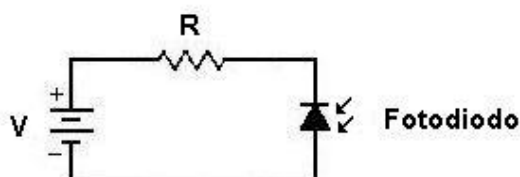


Figura 5.10 - Fotodiodo

O fotodiodo é um exemplo de um *fotodetector*, um componente optoeletrônico que converte a luz incidente numa quantidade elétrica.

## OPTOACOPLADOR

Um *optoacoplador*, também chamado optoisolador ou isolador óptico, associa um LED a um fotodetector num único invólucro. A Figura 5.11 mostra um exemplo de um optoacoplador, no qual existe um LED no lado da entrada e um fotodiodo no lado da saída.

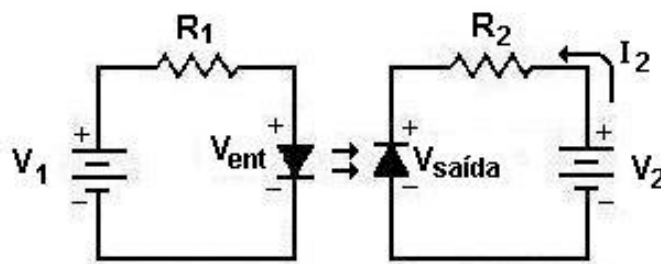


Figura 5.11 - Optoacoplador

A tensão da fonte  $V_1$  e o resistor em série  $R_1$ , produzem uma corrente através do LED. Por sua vez, a luz emitida pelo LED atinge o fotodiodo e isto estabelece a corrente reversa  $I_2$ . Somando-se as tensões ao longo da malha de saída tem-se que:

$$V_s - V_2 + R_2 \cdot I_2 = 0 \quad \text{ou} \quad V_s = V_2 - R_2 \cdot I_2$$

Observa-se que a tensão de saída depende da corrente reversa  $I_2$ . Se a tensão de entrada  $V_1$  variar, a quantidade de luz emitida pelo LED também variará. Assim, a tensão de saída variará de acordo com a tensão de entrada. Por isso, a associação de um LED com um fotodiodo é chamada de fotodiodo, pois este dispositivo é capaz de acoplar um sinal de entrada a uma saída de maneira óptica.

A principal vantagem de um optoacoplador, é a isolamento elétrico entre os circuitos de entrada e de saída. Uma vez que o único contato entre a entrada e a saída, é um feixe de luz. Por causa disso, é possível obter-se uma resistência de isolamento entre os dois circuitos na faixa de milhares de megaohms. Uma isolamento como essa é necessária em aplicações com alta tensão, onde os potenciais dos dois circuitos podem diferir em vários milhares de Volts.

## DIODO SCHOTTKY

Em baixas frequências, um diodo comum pode desligar-se facilmente quando a polarização varia de direta para reversa. Mas, à medida que a frequência aumenta, o diodo chega num ponto onde não pode desligar-se suficientemente rápido para evitar uma corrente considerável durante parte do semiciclo negativo.

No retificador de meia onda, Figura 5.12(a), a tensão de saída em baixas frequências é o sinal retificado de meia onda clássico, mostrado na Figura 5.12(b). À medida que a frequência aumenta para a faixa dos megahertz, o sinal de saída começa a desviar-se da sua forma normal, como mostra a Figura 5.12(c). Percebe-se alguma condução no início do semiciclo negativo, pois o *tempo de recuperação reversa* - tempo necessário para um diodo polarizado diretamente desligar-se - torna-se importante.

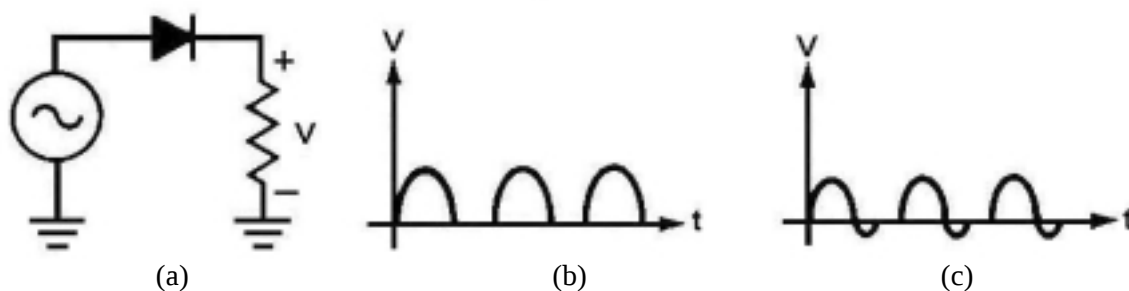


Figura 5.12 - (a) retificador de meia onda, (b) saída normal e (c) saída distorcida

A solução para o tempo de recuperação reversa é o diodo *Schottky*. Esse diodo com finalidade específica emprega um metal como o ouro, a prata ou a platina num lado da junção e silício dopado, tipicamente do tipo *n*, do outro lado, como apresentado na Figura 5.13(a).

Quando o diodo está polarizado diretamente, os elétrons livres do lado *n* ganham energia suficiente para ocupar órbitas grandes. Por causa disso, os elétrons livres podem atravessar a junção e penetrar no metal, produzindo uma corrente direta elevada. Como os metais não possuem lacunas, não há corrente reversa e, também, não haverá tempo de recuperação reversa.

A Figura 5.13(b) mostra um circuito aplicativo e o símbolo esquemático de um diodo Schottky. A falta de corrente reversa significa que o diodo Schottky pode desligar-se mais rápido do que um diodo comum, como mostra a Figura 5.13(c). Na verdade, um diodo Schottky pode retificar facilmente sinais de frequências acima de 300MHz.

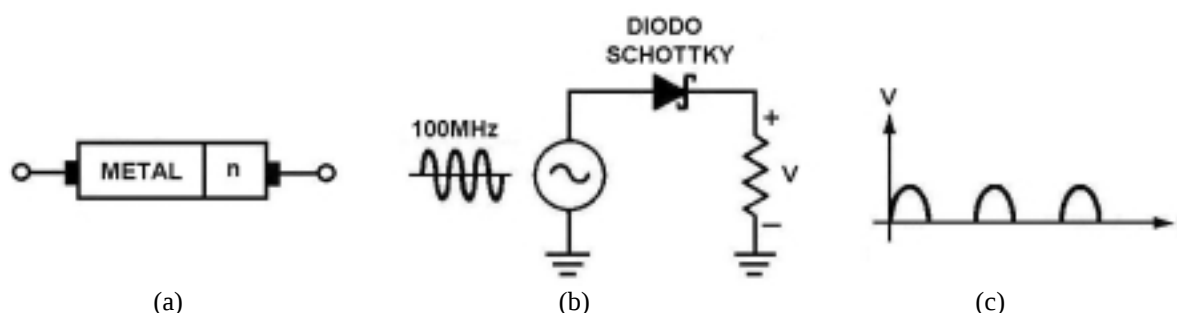


Figura 5.13 - Diodo Schottky (a) estrutura, (b) circuito retificador e (c) saída em 100 MHz

Uma aplicação importante dos diodos Schottky é nos computadores digitais. A velocidade dos computadores depende da rapidez com que seus diodos e transistores conseguem ligar/desligar. Como no diodo Schottky não há corrente reversa, ele tornou-se a peça fundamental da família lógica TTL Schottky de baixa potência, um grupo de dispositivos digitais amplamente usado.

## VARACTOR

O *varactor* também chamado capacitância de tensão variável, varicap, epicap ou diodo de sintonia, é muito usado em receptores de televisão, de FM e outros equipamentos de comunicação.

Quando polarizado reversamente, um diodo de pequeno sinal tem uma resistência reversa que se situa na faixa dos megaohms. Em baixas frequências, o diodo é comparado a um circuito aberto. Mas, em altas frequências há um outro percurso para a corrente que precisa ser levado em conta.

Na Figura 5.14(a) a camada de depleção está entre as regiões *p* e *n*. Quando polarizado reversamente, um diodo de silício assemelha-se a um capacitor, pois as regiões *p* e *n* são como as placas do capacitor e a camada de depleção comparam-se ao dielétrico. O circuito externo pode carregar essa capacitância, retirando elétrons de valência do lado *p* e adicionando elétrons livres ao lado *n*. A ação é a mesma que retirar elétrons de uma placa do capacitor e depositá-los na outra.

A capacitância deste diodo é chamada de *capacitância de transição*, representada por  $C_T$ . Como a camada de depleção fica mais larga quanto maior for a tensão reversa, a capacitância de transição torna-se menor, pois aumenta a distância entre as placas do capacitor. Assim, a capacitância é controlada pela tensão.

A Figura 5.14(b) mostra o circuito equivalente para um diodo polarizado reversamente. Uma resistência reversa elevada  $R_R$  está em paralelo com a capacitância de transição  $C_T$ . Em baixas frequências, a capacitância é desprezível e o diodo parece, essencialmente, aberto porque  $R_R$  aproxima-se de infinito. Em frequências mais altas, a capacitância controlada pela tensão torna-se o efeito dominante. A Figura 5.14(c) indica como a capacitância varia com a tensão reversa aplicada.

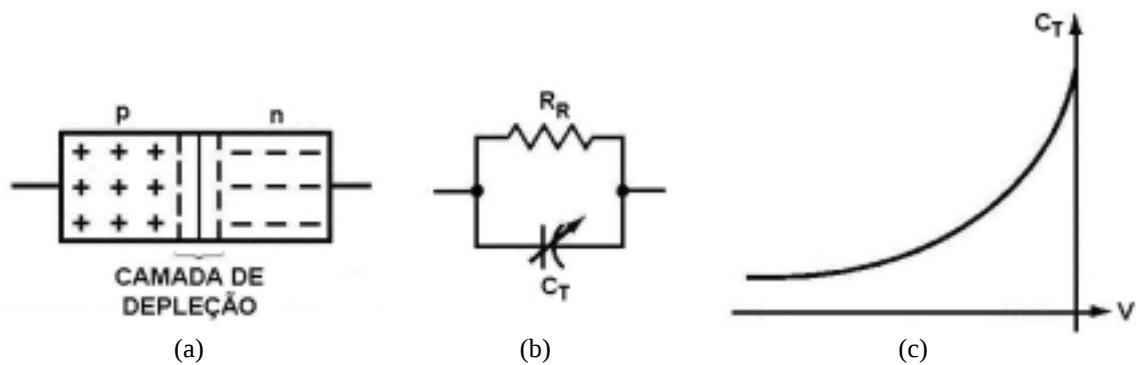


Figura 5.14 - Varactor (a) Estrutura, (b) circuito equivalente e (c) capacitância de transição x tensão reversa

Os *varactores* são diodos de silício otimizados para a sua capacitância variável. Por ser a capacitância controlada pela tensão, eles substituíram os capacitores sintonizados mecanicamente em muitas aplicações, como nos receptores de televisão e nos rádios de automóveis.

## VARISTOR

As descargas elétricas, falhas nas linhas de transmissão, chaveamento de carga reativa, entre outros, podem poluir a tensão da linha pela superposição de picos, vales e outros transitórios a tensão normal de alimentação. Os vales são quedas de tensão abruptas que duram cerca de microssegundos ou menos. Os picos são sobretensões rápidas de 500 até mais de 2000V. Em alguns equipamentos são usados filtros entre a linha de alimentação e o primário do transformador, para eliminar os problemas causados pelos transitórios na linha.

Um dos componentes usados para filtrar a linha é o *varistor*, também chamado de supressor de transitório. Esse dispositivo semicondutor assemelha-se com dois diodos zener, um de costas para o outro, com uma tensão de ruptura bem alta em qualquer sentido. O varistor corta todos os picos de tensão acima da tensão especificada, protegendo o equipamento.

## 6. CIRCUITOS COM DIODOS

### SINAL SENOIDAL

Os circuitos eletrônicos podem trabalhar com tensões e correntes contínuas e alternadas.

Um dos sinais alternados mais comuns é o senoidal, que pode ser representado matematicamente por:

$$x = X_P \cdot \text{sen}(y)$$

onde:  $x$  é o valor instantâneo;  
 $X_P$  é o valor de pico;  
 $y$  é o domínio da função.

No domínio angular, temos  $y = \theta$ , onde  $\theta$  é o ângulo e pode ser dado em graus ( $^\circ$ ) ou em radianos (rad).

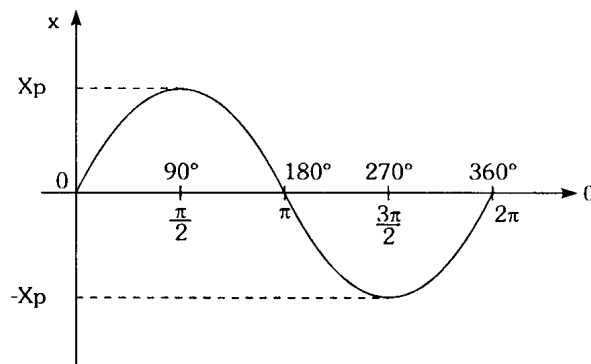


Figura 6.1 - Função senoidal no domínio angular:  $x = X_P \cdot \text{sen}(\theta)$

No domínio temporal, temos  $y = \omega t$ , onde  $\omega$  é a velocidade angular dada em radianos por segundo (rad/s) e  $t$  é o tempo dado em segundos (s).

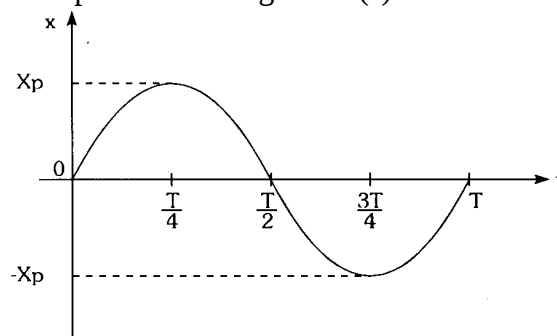


Figura 6.2 - Função senoidal no domínio temporal:  $x = X_P \cdot \text{sen}(\omega t)$  e  $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$

onde:  $f$  é a frequência do sinal em hertz (Hz);  
 $T$  é o período do sinal em segundos (s).

Ainda sobre o sinal senoidal, três definições são importantes:

- O valor pico a pico:  $X_{PP} = 2 \cdot X_P$
- O valor médio:  $X_m = 0$
- O valor eficaz:  $X_{rms} = \frac{X_P}{\sqrt{2}}$

## CIRCUITOS RETIFICADORES

A geração e distribuição de energia elétrica é feita na forma de tensões senoidais, porém muitos aparelhos eletrônicos são alimentados por tensões contínuas. Sendo assim, necessitam de circuitos que transformam tensões alternadas em tensões contínuas. Estes circuitos são denominados retificadores. Porém, a tensão alternada na entrada de um circuito retificador deve ser adequada ao seu padrão de tensão, ou seja, a tensão da rede elétrica, antes de ser ligada ao retificador, precisa ser reduzida, trabalho este realizado pelo transformador.

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

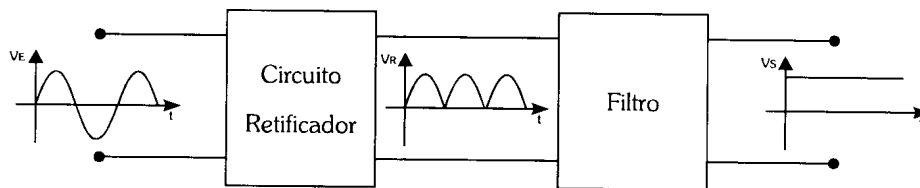


Figura 6.3 - Diagrama de blocos de uma fonte de alimentação

## TRANSFORMADORES

Existem vários tipos de transformadores, porém, para o estudo dos retificadores, apenas dois interessam.

### Transformador abaixador de tensão

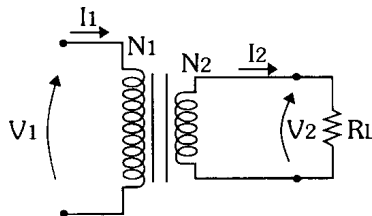


Figura 6.4 - Transformador abaixador de tensão

O transformador é constituído de um núcleo de ferro laminado, que serve para fazer o acoplamento magnético entre os dois enrolamentos feitos sobre ele: o enrolamento primário, no qual é ligada a tensão da rede, e o enrolamento secundário, no qual podem ser ligados uma carga, um filtro ou um circuito regulador de tensão.

No transformador, as tensões e as correntes dos enrolamentos primário ( $V_1$  e  $I_1$ ) e secundário ( $V_2$  e  $I_2$ ), estão relacionadas ao número de espiras destes enrolamentos ( $N_1$  e  $N_2$ ):

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

No transformador ideal, a redução da tensão ocorre sem perda de potência, isto é, a potência entregue ao primário é igual à potência fornecida ao secundário:

$$P_1 = P_2 \\ V_1 I_1 = V_2 I_2$$

### Transformador com derivação central no secundário

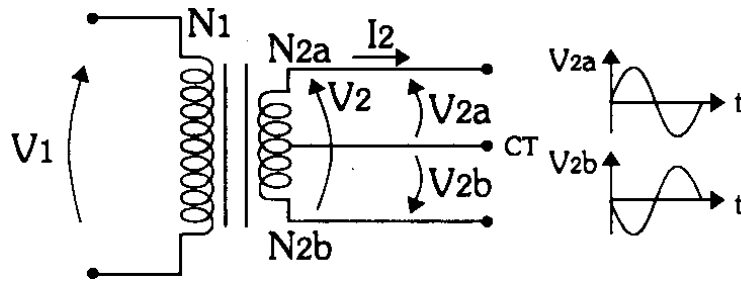


Figura 6.5 - Transformador com derivação central no secundário

Este transformador funciona como se tivesse dois secundários e, portanto, as relações entre as tensões, correntes e número de espiras são as mesmas que as do transformador visto anteriormente. Porém, o terminal central é comum aos dois enrolamentos secundários, fazendo com que as suas tensões sejam defasadas de  $180^\circ$ .

### RETIFICADOR DE MEIA ONDA

É o mais simples dos retificadores. A sua constituição básica é um diodo em série com uma carga  $R_L$ .

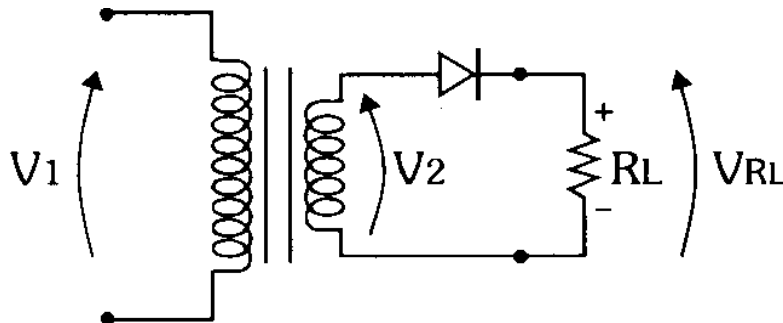


Figura 6.6 - Retificador de meia onda

**Obs.:** Como, normalmente, o sinal senoidal de entrada a ser retificado tem uma amplitude muito maior que  $V_\gamma$ , para efeito de análise, será considerado o modelo do diodo ideal.

No semiciclo positivo de  $V_2$ , o diodo está diretamente polarizado, logo ele conduz, fazendo com que a tensão de saída seja igual à de entrada.

No semiciclo negativo de  $V_2$ , o diodo está reversamente polarizado, logo ele não conduz, fazendo com que a tensão na saída seja nula.

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

$$V_m = \frac{V_P}{\pi}$$

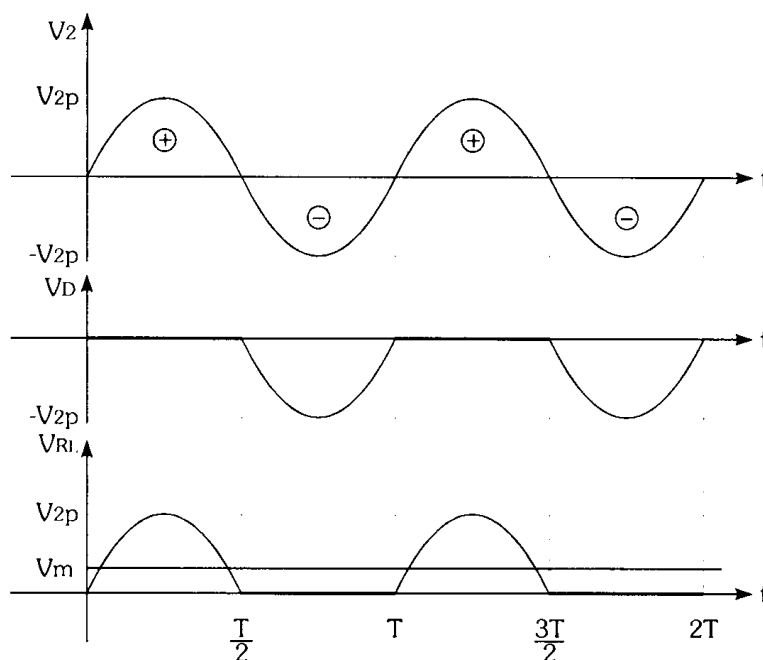


Figura 6.7 - Formas de onda num retificador de meia onda

Assim, pode-se calcular a corrente média na carga (igual a corrente média no diodo), da seguinte forma:

$$I_m = \frac{V_m}{R_L}$$

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

$$I_{DM} \geq I_m \quad e \quad V_{Br} \geq V_P$$

### RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA COM DERIVAÇÃO CENTRAL

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

Usando um transformador com derivação central é possível obter uma retificação completa.

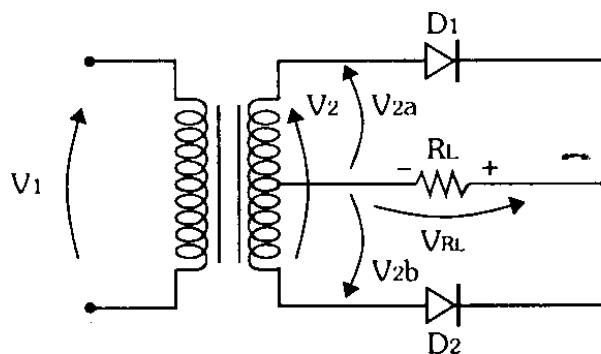


Figura 6.8 - Retificador de onda completa com derivação central.

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

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

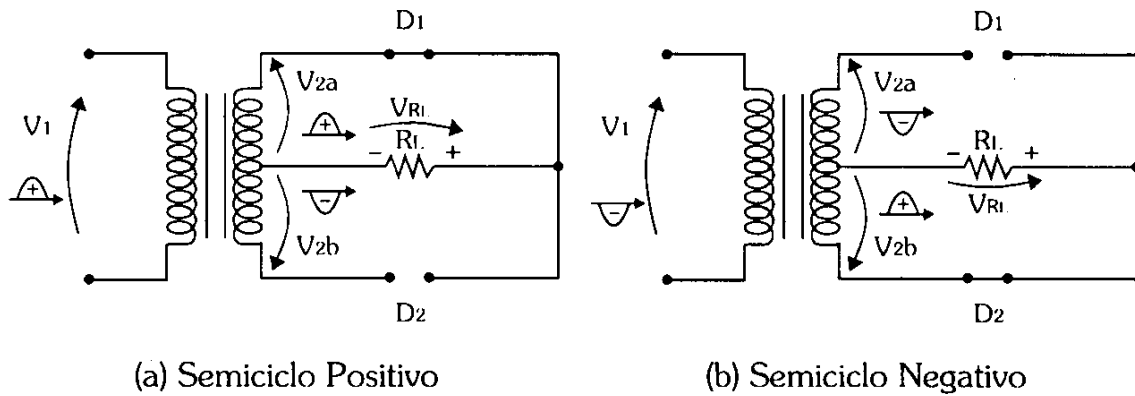


Figura 6.9 - Comportamento do retificador de onda completa com derivação central

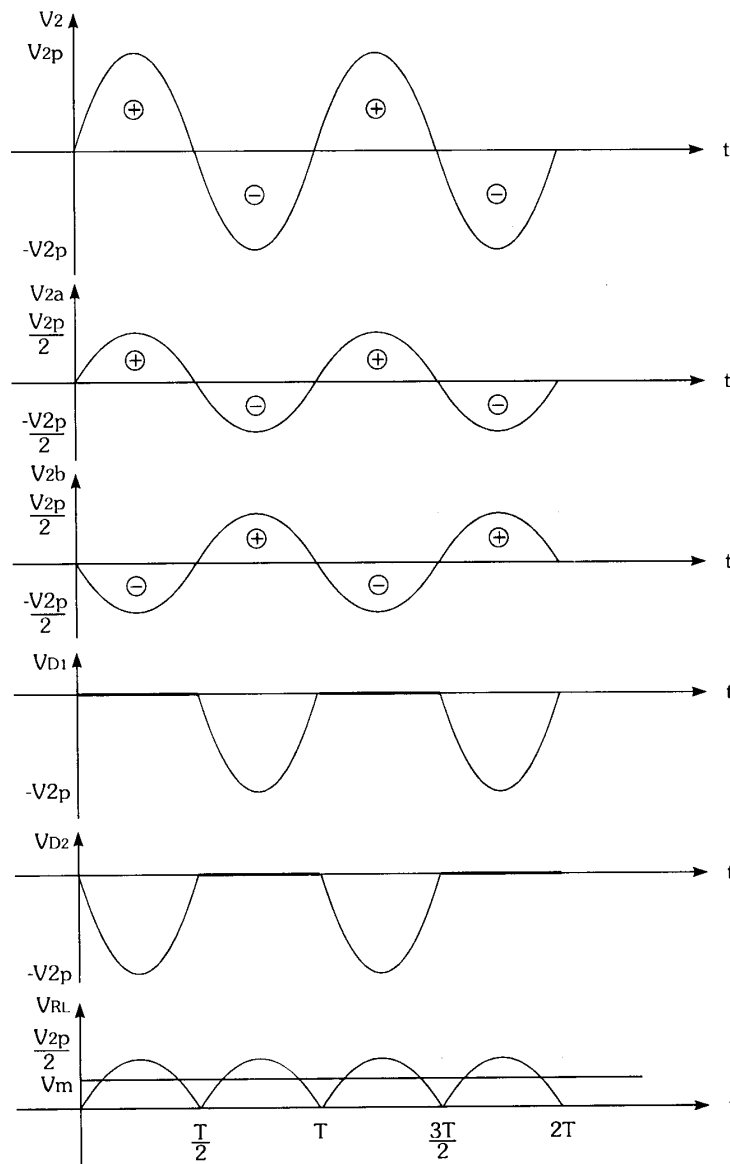


Figura 6.10 - Formas de onda no retificador de onda completa com derivação central

Neste caso, a frequência da tensão de saída dobra de valor e, portanto, a tensão média na carga também dobra. Por outro lado, como a tensão de pico na carga é metade da tensão de pico no secundário do transformador, a tensão média final é a mesma que se obteria usando um retificador de meia onda com este mesmo transformador (ignorando-se a derivação central), ou seja:

$$V_m = \frac{2 \times \frac{V_P}{2}}{\pi} = \frac{V_P}{\pi} \quad e \quad I_m = \frac{V_m}{R_L}$$

Porém, a vantagem deste retificador está na especificação do diodo e na qualidade da filtragem. Em relação às especificações dos diodos, tem-se uma grande vantagem neste circuito. Como cada diodo conduz corrente num semiciclo, a corrente que eles devem suportar corresponde à metade da corrente média na carga. Por outro lado, a tensão reversa que os diodos devem suportar é a tensão total de pico do secundário, já que suas duas metades somam-se sobre os diodos quando estes estão cortados. Assim:

$$I_{DM} \geq \frac{I_m}{2} \quad e \quad V_{Br} \geq V_P$$

## RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA EM PONTE

Este circuito utiliza uma ponte de diodos, tendo algumas vantagens em relação aos anteriores.

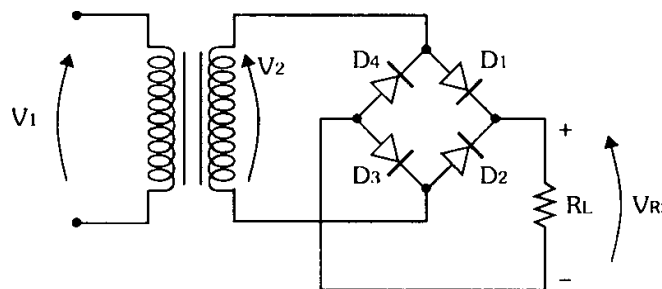


Figura 6.11 - Retificador de onda completa em ponte

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

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

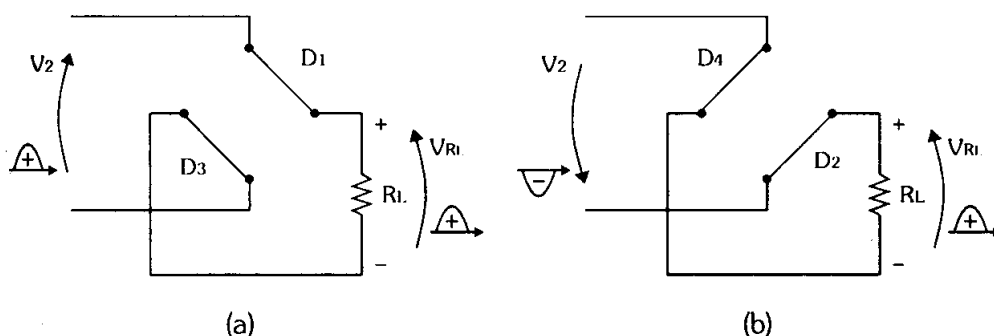


Figura 6.12 - Comportamento do retificador de onda completa em ponte

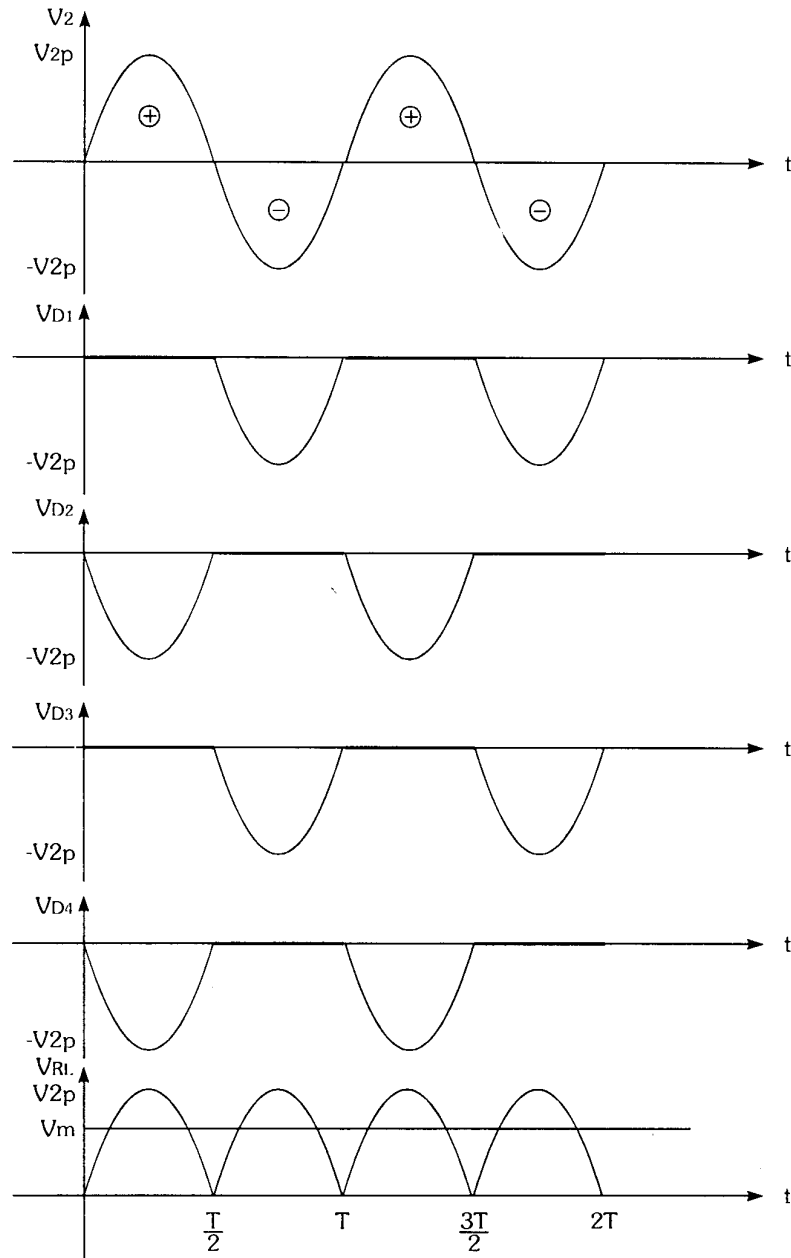


Figura 6.13 - Formas de onda no retificador de onda completa em ponte

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

$$V_m = \frac{2 \times V_P}{\pi} \quad e \quad I_m = \frac{V_m}{R_L}$$

Porém, neste circuito, a tensão de pico na carga corresponde à tensão de pico na saída do transformador e, portanto, a tensão média final é o dobro da tensão média obtida pelos retificadores anteriores, caso o mesmo transformador seja utilizado.

Em relação às especificações dos diodos, como cada diodo conduz corrente somente num semiciclo, a corrente que eles devem suportar corresponde à metade da corrente média na carga. Quanto à tensão reversa, os diodos devem suportar a tensão de pico do secundário.

$$I_{DM} \geq \frac{I_m}{2} \quad e \quad V_{Br} \geq V_P$$

## FILTRO CAPACITIVO

A utilização de um filtro capacitivo é muito comum nas fontes de alimentação que não necessitam de boa regulação, ou seja, que podem ter pequenas oscilações na tensão de saída. Um exemplo, é o eliminador de baterias cujo circuito vem todo montado na caixinha que vai ligada à rede elétrica.

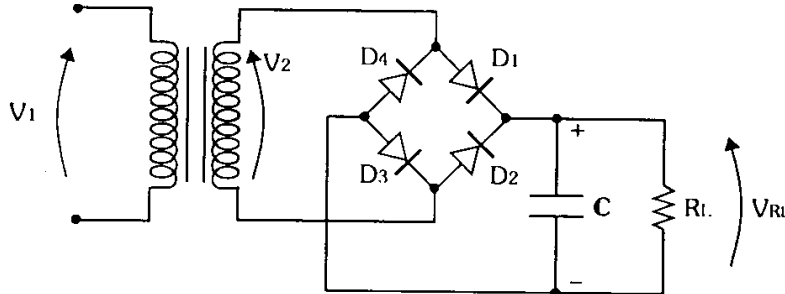


Figura 6.14 - Fonte de alimentação retificada

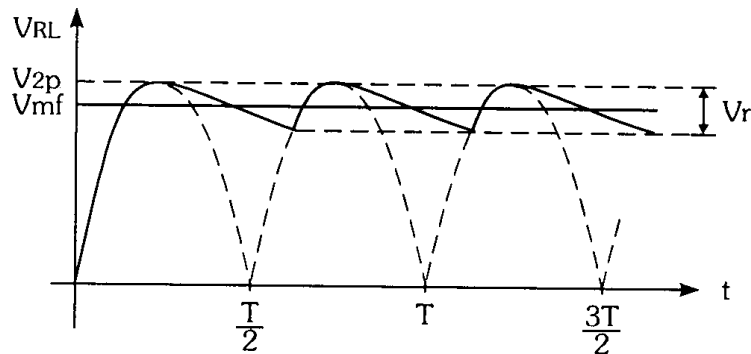


Figura 6.15 - Forma de onda na saída da fonte de alimentação retificada

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

Quando, no segundo semiciclo, a tensão retificada fica maior que a tensão no capacitor, os diodos  $D_2$  e  $D_4$  passam a conduzir carregando novamente o capacitor até o valor de pico, e assim sucessivamente, formando uma ondulação denominada ripple. A descarga do capacitor é lenta devido à constante de tempo  $R_L C$ , ou seja, quanto maior o capacitor ou a resistência de carga, maior a constante de tempo e menor o ripple. Porém, mesmo com o ripple, percebe-se que a filtragem aumenta o valor médio da tensão de saída, que será chamada de  $V_{mf}$ . O valor de pico a pico do ripple, pode ser calculado pela equação abaixo:

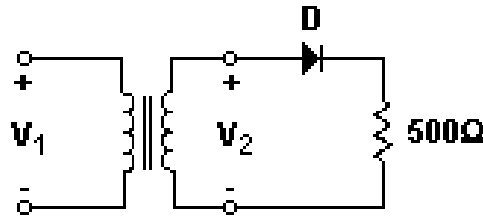
$$V_r = \frac{V_{mf}}{f \cdot R_L \cdot C}$$

onde:  $V_{mf}$  é a tensão média na carga após a filtragem;  
 $f$  é a frequência da ondulação;  
 $R_L$  é a resistência de carga;  
 $C$  é o capacitor de filtro.

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

## EXERCÍCIOS

35. O transformador da figura abaixo, tem uma tensão no secundário ( $V_2$ ) de 30 VCA. Qual a tensão de pico ( $V_p$ ), a tensão média ( $V_m$ ) e a corrente média ( $I_m$ ) através da resistência de carga ( $R_L$ ) ? Desenhar as formas de onda da tensão no secundário ( $V_2$ ), no diodo ( $V_D$ ) e na carga ( $V_{RL}$ ).



36. Aqui estão alguns diodos e a sua especificação de IDM:

- a. 1N914:  $IDM = 50 \text{ mA}$
- b. 1N3070:  $IDM = 100 \text{ mA}$
- c. 1N4002:  $IDM = 1 \text{ A}$
- d. 1N1183:  $IDM = 35 \text{ A}$

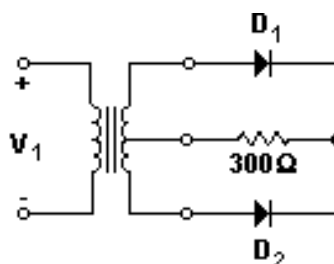
Se a tensão do secundário ( $V_2$ ) for de 115 VCA no circuito do exercício anterior, qual o tipo de diodo dado acima que pode ser utilizado ?

37. Aqui estão alguns diodos e sua especificação de VBR:

- a. 1N914:  $VBR = 20 \text{ V}$
- b. 1N3070:  $VBR = 50 \text{ V}$
- c. 1N4002:  $VBR = 100 \text{ V}$
- d. 1N1183:  $VBR = 175 \text{ V}$

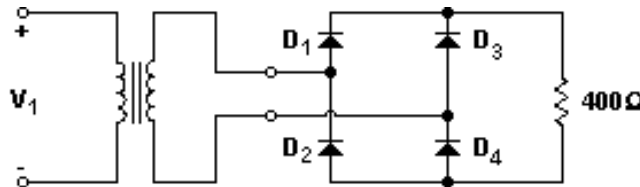
Dada uma tensão do secundário ( $V_2$ ) de 60 VCA no circuito do exercício anterior, qual a VBR através do diodo. Qual dos diodos citados acima pode ser usado ?

38. Na figura abaixo, a tensão no secundário ( $V_2$ ) é de 40 VCA. Qual a tensão de pico, a tensão média ( $V_m$ ) e a corrente média ( $I_m$ ) na carga ( $R_L$ ) ? Desenhar as formas de onda da tensão total no secundário ( $V_2$ ), nos enrolamentos A e B do secundário ( $V_{2A}$  e  $V_{2B}$ ), nos diodos ( $V_{D1}$  e  $V_{D2}$ ) e na carga ( $V_{RL}$ ).



39. Se a tensão do secundário ( $V_2$ ) for de 60 VCA no circuito acima, qual dos diodos apresentados anteriormente têm especificações de IDM e VBR suficiente para ser utilizado ?

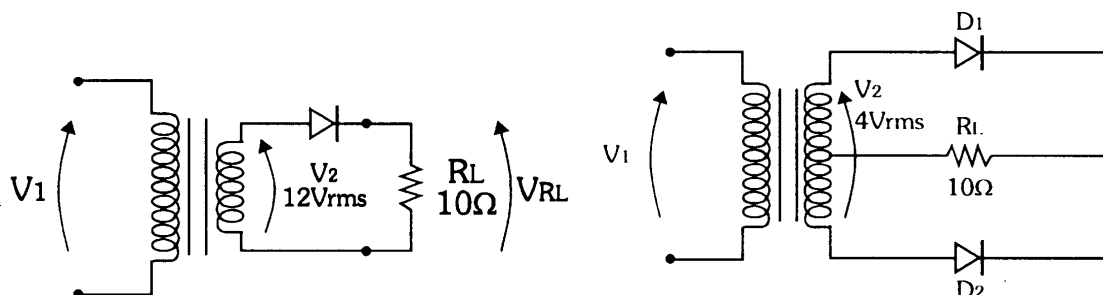
40. Dada uma tensão do secundário ( $V_2$ ) de 40 VCA no circuito do exercício anterior, calcular a corrente média na carga ( $I_m$ ) e a VBR através de cada diodo. Qual a corrente máxima ( $I_{DM}$ ) que passa através de cada diodo.
41. Se a tensão do secundário ( $V_2$ ) na figura abaixo for de 30 VCA, qual a tensão média ( $V_m$ ) e a corrente média ( $I_m$ ) através da resistência de carga ( $R_L$ ) ? Qual a VBR através de cada diodo ? Desenhar as formas de onda da tensão no secundário ( $V_2$ ), nos diodos ( $VD_1$ ,  $VD_2$ ,  $VD_3$  e  $VD_4$ ) e na carga ( $V_{RL}$ ).

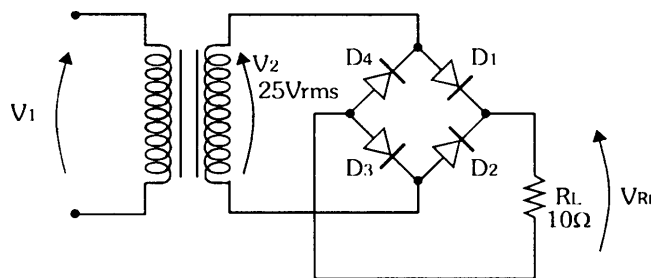


42. A tensão do secundário ( $V_2$ ) no circuito do exercício anterior é de 60 VCA. Qual a corrente média na carga ( $I_m$ ) ? Qual a corrente máxima através de cada diodo ( $I_{DM}$ ) ? Qual a VBR através de cada diodo ?
43. No circuito do exercício anterior, a tensão no secundário é de 40 VCA. Qual é a tensão média ( $V_m$ ) e a corrente média na carga ( $I_m$ ) ? Qual a corrente máxima em cada diodo ( $I_{DM}$ ) ? Qual a VBR através de cada diodo ?
44. Os diodos do circuito do exercício anterior têm especificação  $I_{DM}$  de 150 mA e uma especificação de VBR de 75 V. Estes diodos são adequados para uma tensão do secundário ( $V_2$ ) de 40 VCA ?
45. Se todos os diodos do circuito do exercício anterior tiverem uma especificação  $I_{DM}$  de 0,5 A e uma especificação de VBR de 50 V, eles são adequados para uma tensão do secundário ( $V_2$ ) de 60 VCA ?

46. Para os circuitos das figuras abaixo, determine:

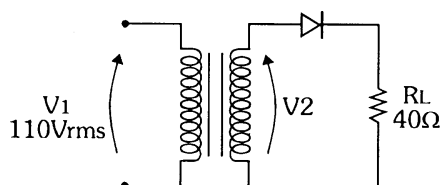
- ✓ A nomenclatura usual;
- ✓ As formas de onda das tensões no circuito;
- ✓ valor da tensão em cada um dos elementos do circuito;
- ✓ valor da corrente em cada um dos elementos;
- ✓ A potência dissipada pela carga;
- ✓ A especificação dos diodos.





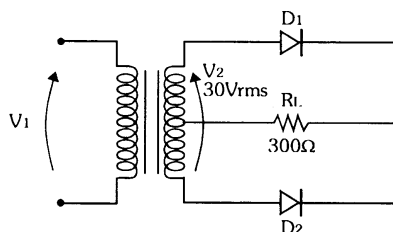
47. A figura abaixo mostra um transformador com relação de espiras  $N_1/N_2=55$  e com tensão no primário de  $110V_{RMS}$  ligado a um retificador de meia onda (diodo de germânio) com uma carga de  $40\Omega$ . Considerando o valor de  $V_\gamma$  do diodo (modelo 2), determine:

- ✓ As formas de onda das tensões no circuito;
- ✓ valor da tensão em cada um dos elementos do circuito;
- ✓ valor da corrente em cada um dos elementos;
- ✓ A potência dissipada pela carga;
- ✓ A especificação do diodo.



48. A figura abaixo mostra um transformador com tensão no secundário de  $30V_{RMS}$  ligado a um retificador de onda completa com derivação central com uma carga de  $300\Omega$ , determine:

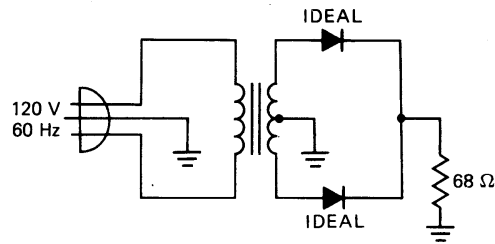
- ✓ As formas de onda das tensões no circuito;
- ✓ valor da tensão em cada um dos elementos do circuito;
- ✓ valor da corrente em cada um dos elementos;
- ✓ A potência dissipada pela carga;
- ✓ A especificação do diodo.



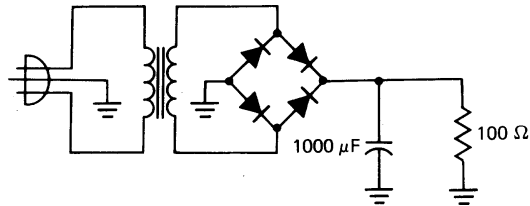
49. Projetar uma fonte com tensão de entrada de  $110V_{RMS}/60Hz$  e tensão média de saída de  $15V$  com ripple de  $0,5V$ , para alimentar um circuito que tem resistência de entrada equivalente a  $500\Omega$ . Utilizar o retificador de onda completa com derivação central.

50. Projetar uma fonte de tensão que substitua uma bateria de um aparelho eletrônico formada por duas pilhas de  $1,5V$  e que tem um consumo de potência de  $7,5mW$ . O ripple deve ser de no máximo  $0,15V$ . Utilizar o retificador de sua escolha.

51. Na figura abaixo a tensão do secundário é de 40VRMS. Utilizando diodos ideais, calcule a tensão na carga. Especifique o diodo.



52. Qual a tensão na carga e a ondulação no circuito abaixo, para uma tensão no secundário de 17,7VRMS.



53. A tensão da linha é tipicamente de  $115\text{VRMS} \pm 10\%$ . Calcule o valor de pico para uma linha baixa e para uma linha alta.

54. O transformador da figura abaixo tem uma tensão do secundário de 30VRMS. Qual a tensão de pico na resistência de carga? A tensão média? A corrente média através da resistência de carga?

