

Acionamentos Eletrônicos

Aula 02 - Chaves não controláveis - Diodos de potência

Apresentação

Quando nos dispomos a estudar os circuitos que são responsáveis pelos acionamentos eletrônicos, deparamo-nos, logo de início, com as chaves, pois elas são essenciais para controlar o tipo e a grandeza da tensão que chega às partes integrantes do acionamento.

Nesta aula, iremos estudar o tipo de chave mais simples, o diodo. Apesar de ser simples, ele é essencial aos diversos circuitos que são utilizados para acionar motores hoje em dia.

Objetivos

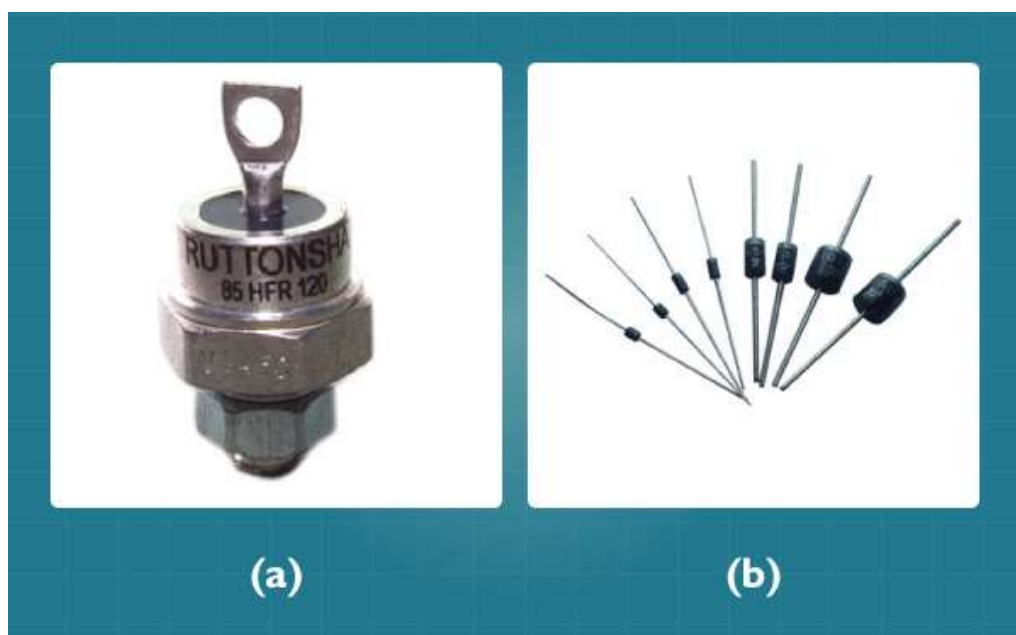
- Reconhecer as características dos diodos de potência
- Descrever o funcionamento de um diodo de potência como chave
- Estabelecer as diferenças entre as chaves controladas e não controladas

Diodos de potência

Um diodo é um dispositivo eletrônico dos mais simples. Em linhas gerais, podemos dizer que ele funciona como uma chave, ora aberto, ora fechado. Quando fazemos referência a um diodo de potência, isso quer dizer que esse diodo opera com potências mais elevadas do que os que são usados na eletrônica, mas seu princípio de funcionamento é o mesmo.

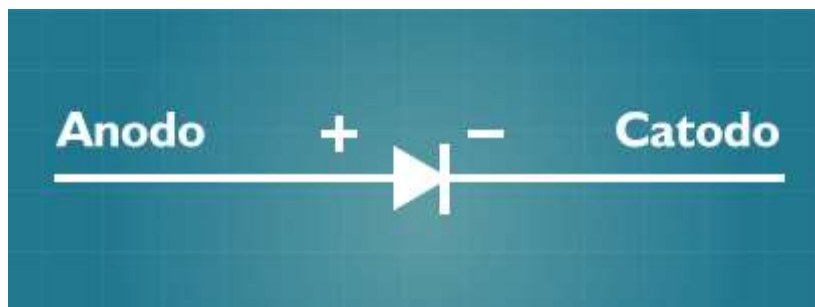
Nesse sentido, a Figura 1 mostra a diferença entre diodos quanto à sua capacidade de potência e a Figura 2 mostra o símbolo de um diodo, com a sua polaridade. A extremidade do diodo que assume a polaridade positiva é chamada de Anodo e a que assume a polaridade negativa de Catodo.

Figura 01 - Diodo de potência (a) e diodos usados em eletrônica de baixa tensão (b).



Fonte: (a) <<http://3.imimg.com/data3/JC/BS/MY-7426150/power-diode-250x250.jpg>>;
(b) <<http://2.imimg.com/data2/SB/QR/MY-786924/silicon-diodes-rectifiers-250x250.jpg>>.

Figura 02 - Símbolo e polaridade do diodo.

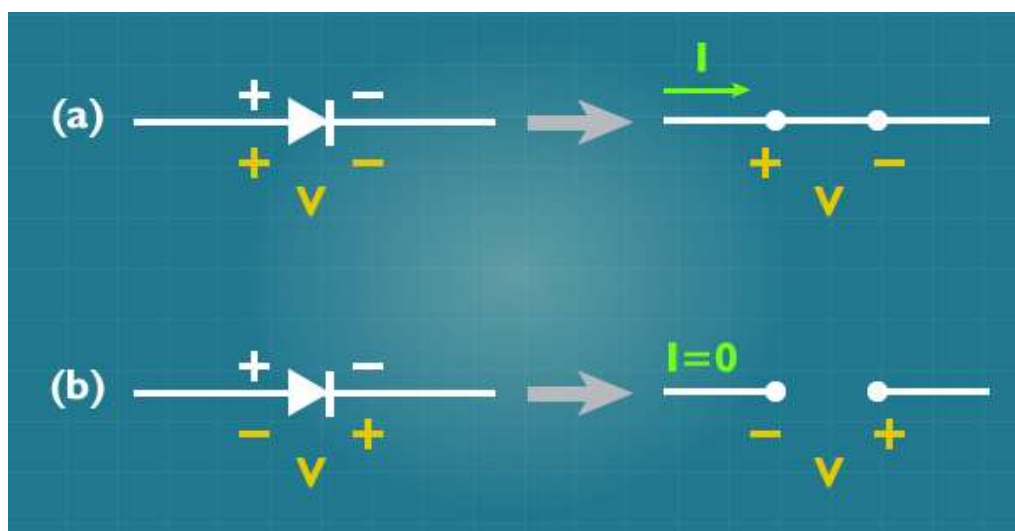


Fonte: Autoria Própria (2014).

Polarização

O funcionamento do diodo de potência é o mesmo do diodo convencional. Quando uma tensão com a mesma polaridade do diodo está sobre ele, então o diodo conduz deixando passar uma corrente elétrica, funcionando como um curto circuito. Já quando a polaridade é contrária, o diodo não conduz, bloqueando a passagem da corrente elétrica, funcionando como um circuito aberto. Portanto, o diodo permite a passagem de corrente em apenas um sentido. A Figura 3 mostra as situações de condução e não condução.

Figura 03 - Funcionamento do diodo: quando ele conduz (a) e quando ele não conduz (b).



Fonte: Autoria Própria (2014).

A Figura 3 (a) mostra a situação de polarização direta, quando é submetida ao diodo uma tensão positiva, ou seja, coincidindo com os sinais dos seus terminais. Nesse caso, o diodo comporta-se como um curto circuito, permitindo a passagem da

Nesse caso, o diodo comporta-se como um curto circuito, permitindo a passagem de corrente. Já na Figura 3 (b), é mostrada a polarização reversa, situação em que a tensão sobre o diodo é negativa, ou seja, tem a polaridade contrária à tensão do diodo. Nessas circunstâncias, o diodo passa a operar como um curto aberto, bloqueando a passagem de corrente.

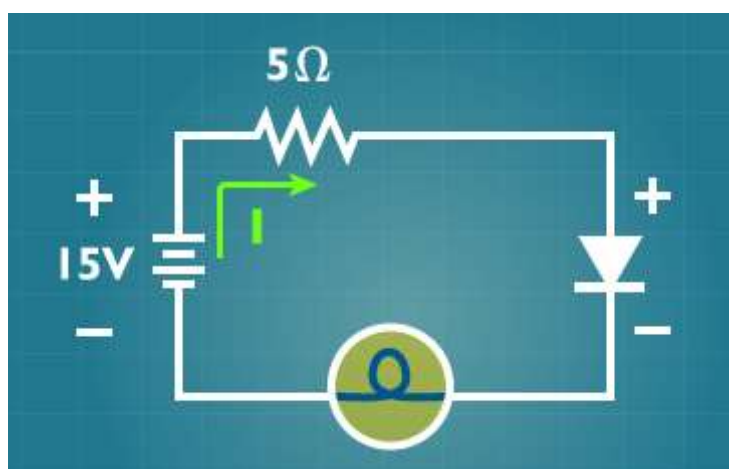
O diodo de potência enquadra-se na categoria de chave não controlada devido ao sinal transmitido a partir dele depender apenas da polaridade do sinal, como mostrado na Figura 3. Quanto às chaves controladas, permitem ou não a passagem do sinal também devido a um sinal externo. Existe outro fator que determina se o dispositivo conduzirá ou não além da polarização, como também o seu tempo de condução. Mas esses dispositivos controláveis serão estudados em aulas posteriores.

Exemplo

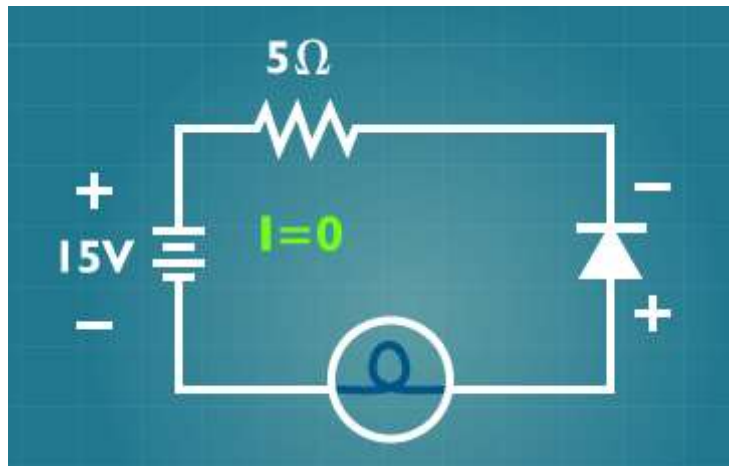
Represente dois circuitos elétricos que contenham, cada um, uma fonte de 15 Volts, uma resistência de $5\ \Omega$, um diodo e uma lâmpada, todos ligados em série. Porém, no primeiro, o diodo deve estar ligado de tal forma que o circuito conduza e a lâmpada acenda, já no segundo, a lâmpada não deve acender.

Resposta

Para o primeiro caso, em que a lâmpada deve acender, a polarização do diodo deve ser direta, ou seja, o potencial positivo da fonte deve coincidir com o terminal positivo do diodo:



Quanto à segunda situação, em que a lâmpada não deve acender, deve ocorrer a polarização reversa, ou seja, o potencial positivo da fonte deve coincidir com o terminal negativo do diodo:



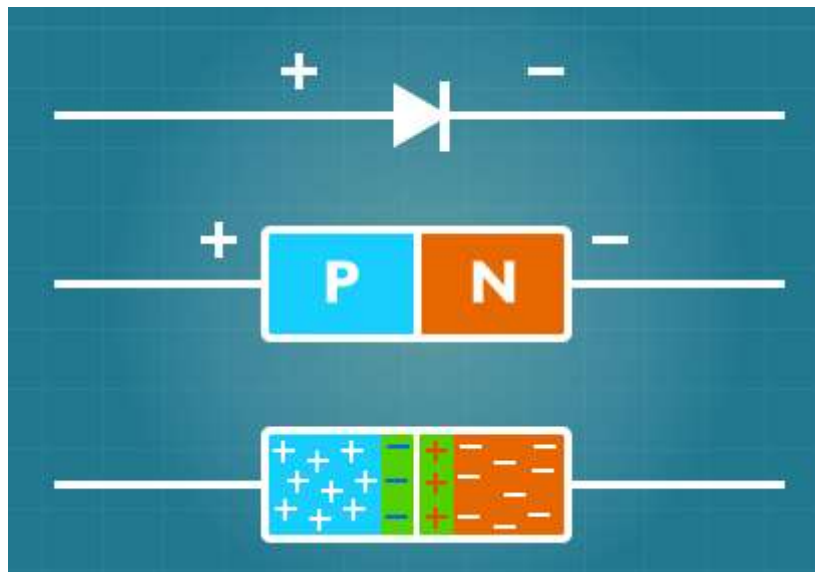
Aspectos construtivos

O diodo é construído a partir da junção de dois semicondutores, um tipo P e outro tipo N, por isso ele é também conhecido por junção PN ou diodo de junção.

No semicondutor tipo P, a falta de elétrons (lacunas) são os portadores majoritários, ou seja, esse material é carregado positivamente. Já no semicondutor tipo N, os elétrons são os portadores majoritários, isto é, ele é carregado negativamente.

Quando esses dois elementos são ligados, é natural que os elétrons e as lacunas se atraiam, e na superfície de contato entre eles há uma pequena fuga de alguns elétrons para a região tipo P e de lacunas para a região tipo N. Essa região é chamada de camada de depleção, como mostrado na Figura 4.

Figura 04 - Estrutura do diodo.



Fonte: Autoria Própria (2014).

Atividade 01

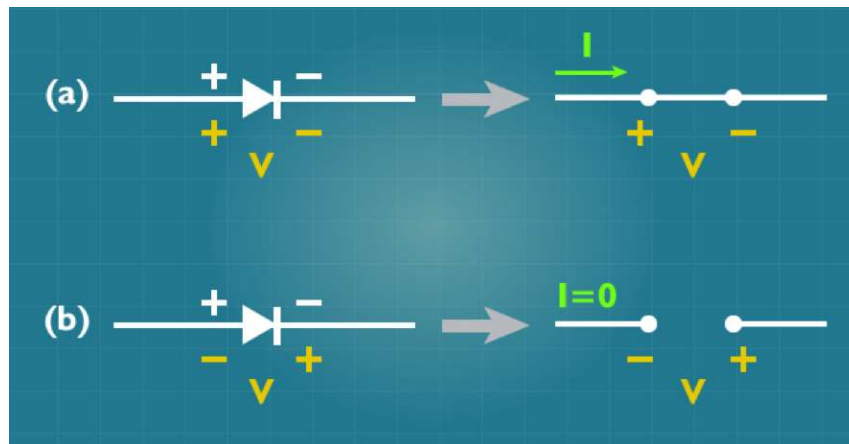
- 1. O que é polarização direta e polarização reversa nos diodos? Mostre um exemplo de um diodo polarizado diretamente e um polarizado reversamente.**

Para a checar a resposta, clique [aqui](#).

Respostas

- 1. O que é polarização direta e polarização reversa nos diodos? Mostre um exemplo de um diodo polarizado diretamente e um polarizado reversamente.**

A polarização direta é quando uma tensão com a mesma polaridade do diodo é aplicado sobre ele, então o diodo conduz deixando passar uma corrente elétrica, funcionando como um curto circuito. Já quando a polaridade é contrária, o diodo não conduz, bloqueando a passagem da corrente elétrica, funcionando como um circuito aberto.



Parâmetros básicos

Os principais parâmetros necessários de serem conhecidos para analisar o funcionamento de um diodo são os relacionados com as tensões e correntes que estão sobre o diodo dependendo da forma de operação.

A tensão sobre o diodo determina a sua forma de operação, e existem dois valores de tensão que são importantes para a análise do seu funcionamento: a tensão de barreira e a tensão reversa máxima.

Tensão de barreira (V_B) – É a tensão de condução do diodo. Ela indica qual a mínima tensão que deve ser aplicada sobre o diodo para a condução. Quando o diodo está polarizado diretamente, se for colocado sobre ele um valor de tensão baixo, menos que a tensão V_B , então o diodo, mesmo estando polarizado diretamente, não conduzirá a corrente. Para que o diodo conduza, é necessário fornecer uma tensão superior à tensão de barreira.

Tensão reversa máxima ($V_{R_{max}}$) – Também conhecida como tensão de ruptura. É a máxima tensão reversa que o diodo suporta. Quando esse valor é atingido, o diodo perde suas características operacionais desejadas. Se o diodo está polarizado reversamente quer dizer que há sobre ele uma tensão de polaridade contrária à polaridade do diodo. Essa tensão reversa máxima é o maior valor de tensão possível que se pode aplicar sobre o diodo na polarização reversa.

A corrente sobre o diodo pode assumir diferentes nomenclaturas dependendo da região de operação. Desse modo, pode ser corrente direta, corrente reversa de fuga e corrente de avalanche.

Corrente direta - É a corrente que circula pelo diodo quando o diodo está polarizado diretamente. É zero quando a tensão aplicada sobre o diodo na polarização direta é inferior à tensão de barreira.

Corrente reversa de fuga – É uma pequena corrente que circula pelo diodo quando ele está polarizado reversamente, ou seja, o diodo não deveria conduzir, mas devido às impurezas do material existe essa pequena fuga, quase desprezível.

Corrente de avalanche – É a corrente que circula pelo diodo quando a tensão de ruptura é atingida. Nesse caso, se na polarização reversa o valor da tensão sobre o diodo exceder a tensão de ruptura, então a corrente de avalanche passará a circular pelo diodo.

Atividade 02

- 1. Se estou planejando utilizar um diodo em uma aplicação que trabalha com tensões muito baixas, podendo acontecer da tensão não ser suficiente para polarizar o diodo diretamente, então devo ter mais atenção para garantir que o diodo entre em condução com a especificação de qual parâmetro do diodo? Por que?**

Para a checar a resposta, clique [aqui](#).

Respostas

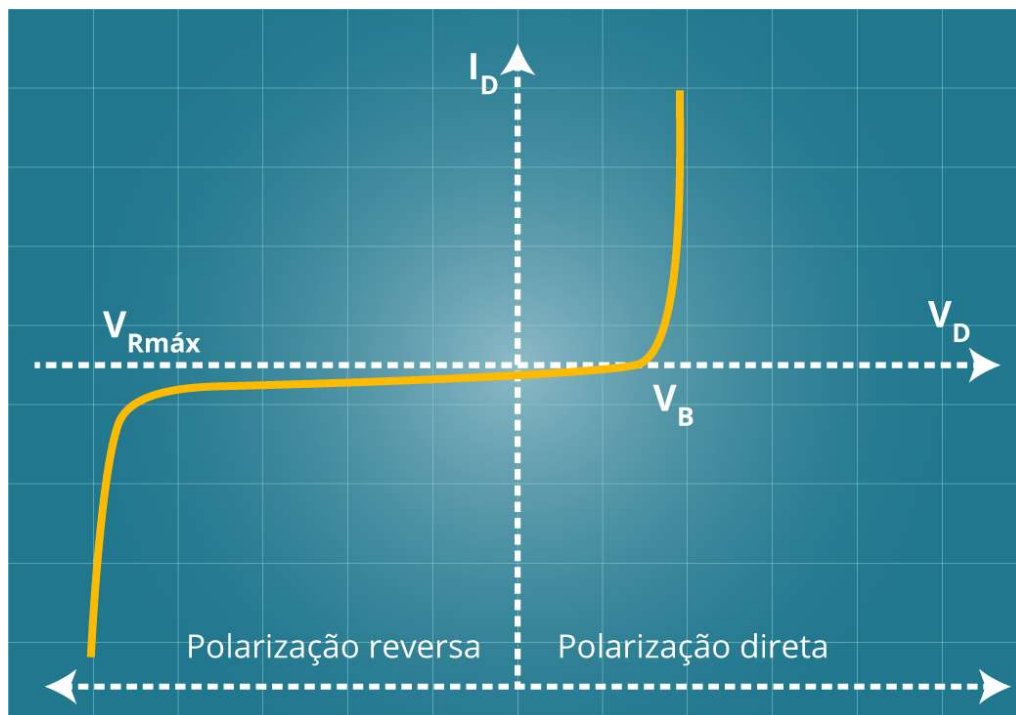
- 1. Se estou planejando utilizar um diodo em uma aplicação que trabalha com tensões muito baixas, podendo acontecer da tensão não ser suficiente para polarizar o diodo diretamente, então devo ter mais atenção para garantir que o diodo entre em condução com a especificação de qual parâmetro do diodo? Por que?**

A tensão de barreira (V_B). Pois é a tensão de condução do diodo. Ela indica qual a mínima tensão que deve ser aplicada sobre o diodo para a condução. Quando o diodo está polarizado diretamente, se for colocado sobre ele um valor de tensão baixo, menos que a tensão V_B , então o diodo, mesmo estando polarizado diretamente, não conduzirá a corrente. Quanto menor esse valor, maior a chance do diodo entrar em condução com tensões baixas.

Curva características e regiões de operação

A curva que mais caracteriza o funcionamento do diodo é o que mostra o comportamento da corrente em função da tensão aplicada. Este gráfico pode ser visualizado na Figura 5.

Figura 05 - Gráfico de tensão x corrente característico do diodo.



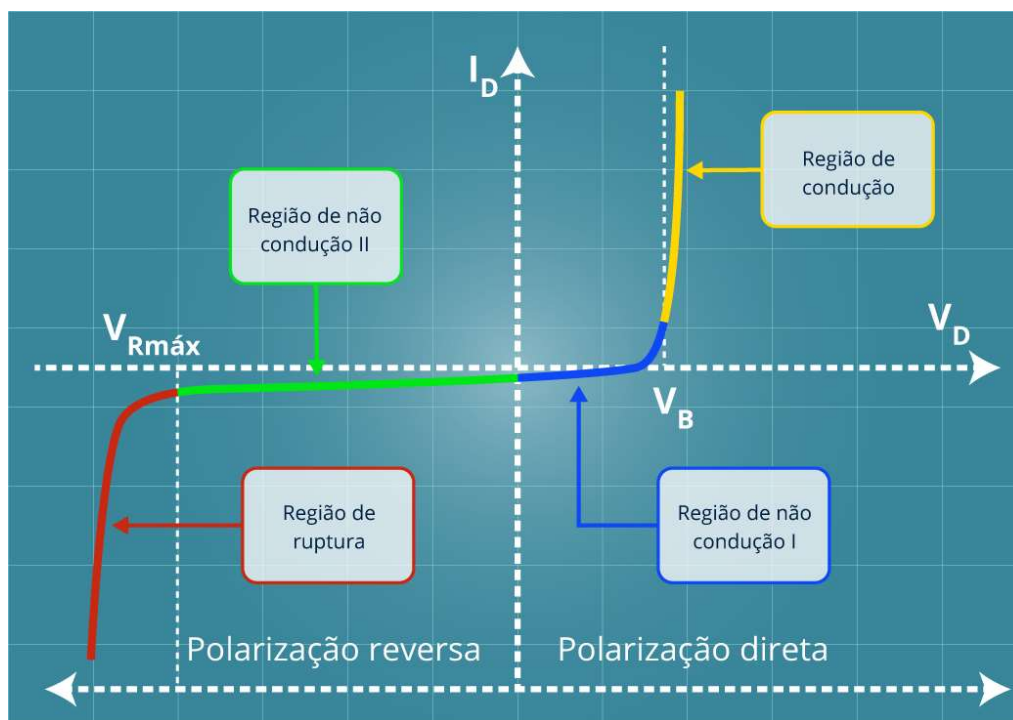
Fonte: Autoria Própria (2014).

A Figura 5 mostra o comportamento da corrente no diodo nas situações de polarização direta e reversa, destacando os pontos de tensão de barreira e tensão reversa máxima

reversa máxima.

Quanto à Figura 6, mostra as regiões de operação do diodo. Na polarização direta, se alimentarmos a tensão com o valor zero e formos aumentando, o diodo permanece sem conduzir (região de não condução I) até que a tensão atinja a tensão de barreira. Quando a tensão passa da tensão de barreira, então o diodo começa a conduzir (região de condução). Considerando agora a polarização reversa, se alimentamos a tensão com zero e formos aumentando, o diodo não conduz (região de não condução II), apenas uma pequena corrente de fuga é registrada, mas é considerada desprezível. Porém, se continuamos aumentando a tensão reversa até que se atinja a tensão de ruptura, o diodo passa a conduzir. Essa situação não é desejada na maioria das aplicações, mas para alguns diodos específicos essa característica é utilizada e bem-vinda.

Figura 06 - Regiões de operação do diodo.

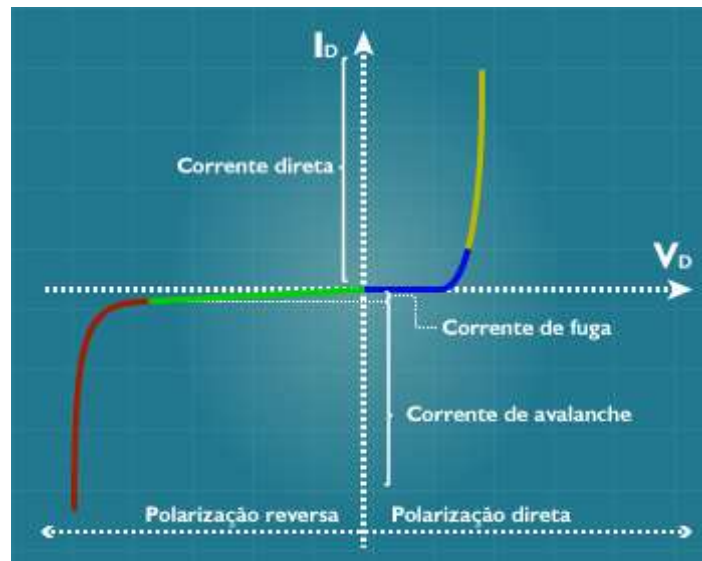


Fonte: Autoria Própria (2014).

A Figura 7 mostra a diferença das correntes em função da região de operação do diodo. Quando o diodo está polarizado diretamente, a corrente que circula por ele é a corrente direta, que vai de zero até a corrente máxima suportada pelo diodo. Na polarização reversa, se a tensão aplicada for inferior à tensão de ruptura, a corrente que circula pelo diodo é a corrente de fuga, que é uma corrente muito pequena e não é considerada. Mas se a tensão aumenta muito e atinge a tensão de ruptura, então a corrente passa a ser a corrente de avalanche, que é indesejada na maioria das aplicações.

parte das aplicações.

Figura 07 - Corrente no diodo em função da operação.



Fonte: Autoria Própria (2014).

Atividade 03

1. O que acontece se a tensão sobre um diodo, quando ele está polarizado reversamente, é muito grande?

Para a checar a resposta, clique [aqui](#).

Respostas

1. O que acontece se a tensão sobre um diodo, quando ele está polarizado reversamente, é muito grande?

Pode alcançar a tensão Tensão reversa máxima ($V_{R_{max}}$). Quando esse valor é atingido, o diodo perde suas características operacionais desejadas. Assim, passara a circular por ele a corrente de avalanche

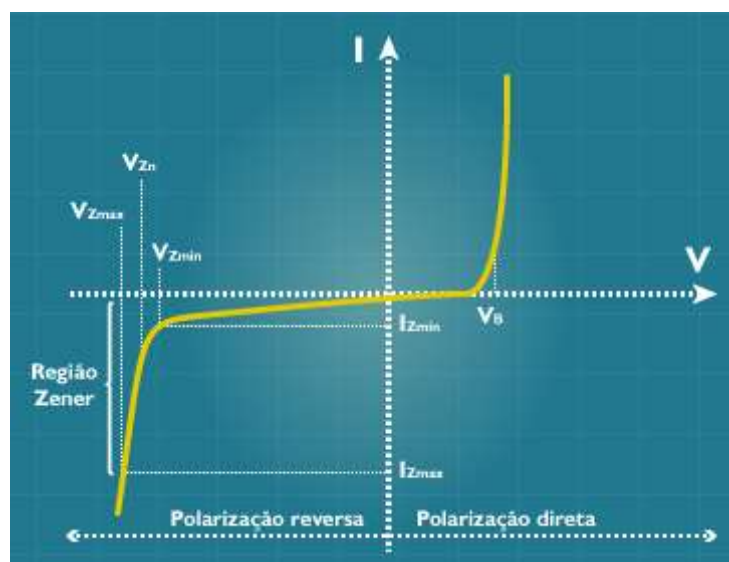
Tipos de diodos de potência

Nós já estudamos as características básicas dos diodos, porém existem diodos com funcionalidades um pouco diferentes, o que permite uma ampliação no uso dos diodos.

Diodo Zener

Também é conhecido como diodo regulador de tensão. No diodo convencional, quando a tensão atinge a tensão de ruptura, há um efeito indesejado, pois passa a existir uma corrente quando deveria ser corrente zero. O diodo Zener é projetado para operar também nessa região. Ele é um diodo convencional com a estrutura física reforçada para suportar o efeito avalanche, quando o diodo opera com a tensão superior à tensão de ruptura. No diodo Zener, a tensão de ruptura passa a ser chamada de tensão Zener. A sua curva de operação é mostrada na Figura 8.

Figura 08 - Corrente e tensões no diodo Zener.



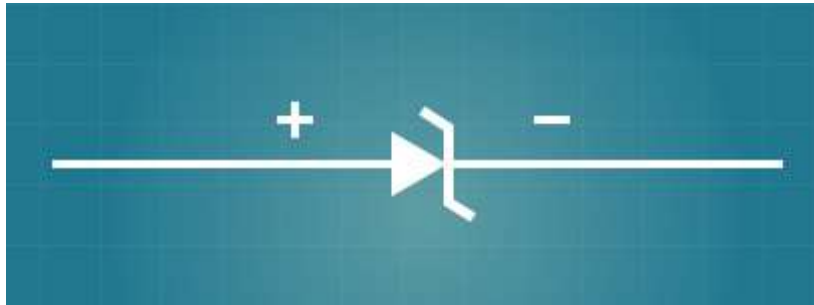
Fonte: Autoria Própria (2014).

O diodo Zener opera igual um diodo comum quando é polarizado diretamente, não permite a passagem de corrente se a tensão for menos que a tensão de barreira (V_B) e atua como um curto circuito permitindo a passagem da corrente quando a tensão supera a tensão de barreira. A diferença está quando o diodo opera na polarização reversa. Se a tensão atinge a tensão Zener mínima (V_{Zmin}) então o

polarização reversa. Se a tensão atingir a tensão Zener mínima (V_{Zmin}), então o diodo passa a conduzir, porém mantendo a tensão praticamente constante, desde que opere com o valor de corrente abaixo da corrente de Zener máxima (I_{Zmax}). Nesse caso, V_{Zn} é a tensão Zener nominal, V_{Zmax} é a tensão Zener máxima e I_{Zmin} é a corrente de Zener mínima.

A Figura 9 mostra o símbolo utilizado para o diodo Zener.

Figura 09 - Símbolo do diodo Zener.



Fonte: Autoria Própria (2014).

Tipos de diodos quanto ao tempo de recuperação

A construção do diodo é feita juntando dois tipos de materiais, o tipo P e o tipo N, como vimos anteriormente. A condução se dá quando há movimento de cargas, visto que a polarização direta força essa movimentação. Desse modo, havendo uma mudança na polarização (passando à polarização reversa), espera-se que a corrente seja reduzida a zero imediatamente. No entanto, devido às características do material, a corrente fica fluindo por um tempinho adicional em vez de cessar imediatamente. O tempo que a corrente leva até parar de fluir totalmente é chamado de **tempo de recuperação reversa**.

Em algumas aplicações, esse tempo de recuperação reversa não pode ser longo, já em outras, não há problema de ele existir. A diferença desse tempo nos diodos vai depender de como esse diodo é construído, uma vez que o custo é aumentado quando o diodo deve ser construído com um tempo de recuperação reversa muito baixo. Baseando-se nisso, existem três tipos de diodos: os diodos padrão, os de recuperação rápida e os Schottky, cada um usado em determinada aplicação. Esses diodos funcionam da mesma forma, como mostrado nesta aula, a diferença está no aspecto construtivo, na dopagem do material.

Diodo Padrão

Os diodos padrão também são chamados de genéricos e possuem tempo de recuperação reversa relativamente alto, da ordem de 25 μS . Esses diodos são utilizados em aplicações em que não seja necessária alta velocidade, como, por exemplo, retificadores, que estudaremos mais adiante.

Diodo de recuperação rápida

Esses diodos apresentam um tempo de recuperação reversa baixo, da ordem de 5 μS . São aplicados em situações em que é requerida alta velocidade de chaveamento, como é o caso dos conversores. Outra aplicação são as fontes chaveadas que operam a altas frequências e necessitam que esse tempo de transição seja rápido.

Diodo Schottky

O diodo Schottky é um diodo com tempo de recuperação reversa ultrarrápido. Isso acontece devido a aspectos construtivos. A primeira diferença do diodo convencional é que a tensão de barreira (V_B) é bem menor, o que implica em uma condução com uma tensão bem menor. A corrente de fuga também é menor, assim como o seu tempo de comutação.

Atividade 04

1. Qual a principal diferença entre um diodo comum e um diodo Zener?

Para a checar a resposta, clique [aqui](#).

Respostas

1. Qual a principal diferença entre um diodo comum e um diodo Zener?

O diodo Zener é projetado para operar também na região de condução reversa. Ele é um diodo convencional com a estrutura física reforçada para suportar o efeito avalanche, quando o diodo opera com a tensão superior à tensão de ruptura. No diodo Zener, a tensão de ruptura passa a ser chamada de tensão Zener.

Leitura Complementar

As características básicas dos diodos podem ser estudadas a partir de qualquer livro básico de eletrônica, como por exemplo, o que é sugerido como leitura complementar. Nele você poderá entender melhor o processo de dopagem, a polarização e as curvas características.

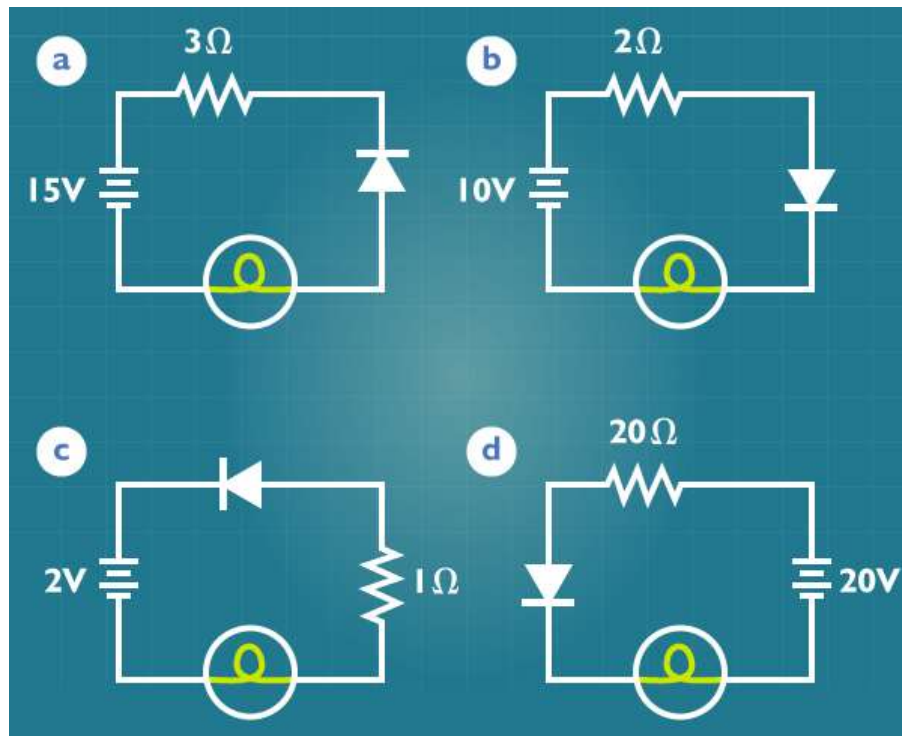
CRUZ, E. C. A.; CHUERI JR, S. **Eletrônica aplicada**. São Paulo: Editora Érica, 2007.

Resumo

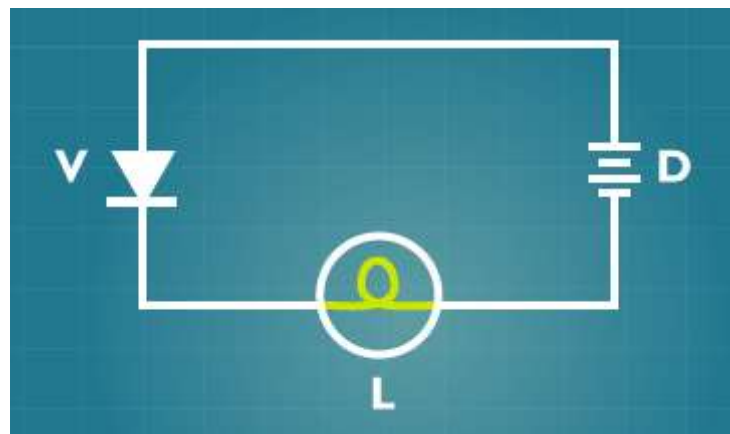
Nesta aula, você viu como um diodo funciona e suas principais características. Conheceu o comportamento da corrente em função da tensão aplicada, assim como a nomenclatura das variáveis envolvidas. Aqui você aprendeu a analisar as curvas que retratam as regiões de polarização direta e polarização reversa. Viu ainda os tipos mais comuns de diodos de potência.

Autoavaliação

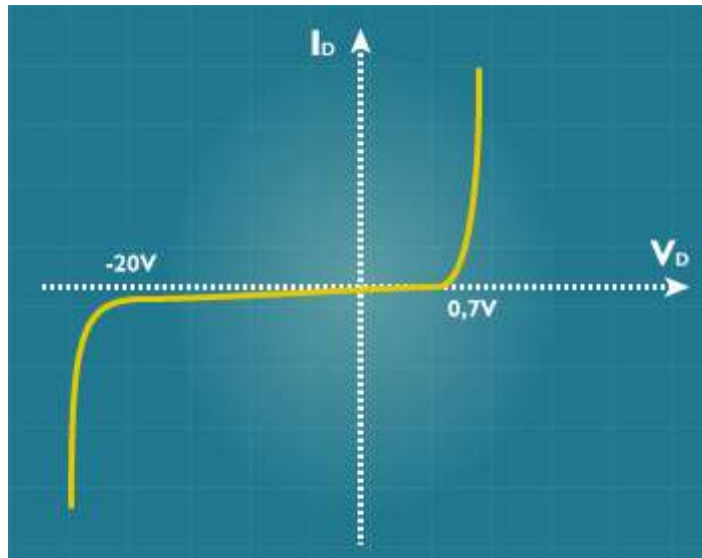
- 1. Considerando os circuitos abaixo, indique em quais deles as lâmpadas estão acesas. Considere que o símbolo representa a lâmpada.**



2. Considere o circuito:



E sabendo que um diodo do circuito é um diodo convencional e opera de acordo com o gráfico abaixo, responda:



- a. Se a tensão for 0,5 Volts, a lâmpada acende?
 - b. Se a tensão for 1,0 Volts, a lâmpada acende?
 - c. Se a tensão for 15 Volts, a lâmpada acende?
 - d. Se a tensão for -0,5 Volts, a lâmpada acende?
 - e. Se a tensão for -1,0 Volts, a lâmpada acende?
 - f. Se a tensão for -15 Volts, a lâmpada acende?
 - g. O que acontece se a tensão V for -25V?
3. Considerando um diodo convencional, responda:
- a. A corrente de fuga é capaz de acender a lâmpada do circuito do exercício 2?
 - b. Por que um diodo é comparado a uma chave?
4. Qual a diferença entre um diodo padrão e um de recuperação rápida?
5. Considerando o circuito abaixo, sabendo que V é uma tensão senoidal, como é o comportamento do diodo nesse caso? Desenhe um gráfico da tensão e indique o que ocorre em cada momento.



Para a checar a resposta, clique [aqui](#).

Respostas

1. Considerando os circuitos abaixo, indique em quais deles as lâmpadas estão acesas. Considere que o símbolo representa a lâmpada.

b e d

2. Considere o circuito:

- a. Se a tensão for 0,5 Volts, a lâmpada acende?

Não, pois não ultrapassa a tensão de barreira.

- b. Se a tensão for 1,0 Volts, a lâmpada acende?

Depende. Se a tensão de trabalho da lâmpada for de 0,3 V ela acenderia, pois a tensão aplicada ultrapassa a tensão de barreira. Caso contrário, mesmo polarizado corretamente, não irá acender devido a baixa tensão sobre a lâmpada.

- c. Se a tensão for 15 Volts, a lâmpada acende?

Sim, acende, pois atende todos os requisitos.

- d. Se a tensão for -0,5 Volts, a lâmpada acende?

Não, pois é uma tensão reversa e o diodo irá funcionar com um circuito aberto.

e. Se a tensão for -1,0 Volts, a lâmpada acende?

Não, pois é uma tensão reversa e o diodo irá funcionar com um circuito aberto.

f. Se a tensão for -15 Volts, a lâmpada acende?

Não, pois é uma tensão reversa e o diodo irá funcionar com um circuito aberto.

g. O que acontece se a tensão V for -25V?

Depende. Se o diodo suportar a corrente sem queimar, acenderia sim a lâmpada, caso contrário, muito provavelmente o diodo queimaria e não permitiria a passagem de corrente, mantendo a lâmpada apagada.

3. Considerando um diodo convencional, responda:

a. A corrente de fuga é capaz de acender a lâmpada do circuito do exercício 2?

Não, pois é uma corrente extremamente baixa, irrisória e portanto, desprezível.

b. Por que um diodo é comparado a uma chave?

Porque se polarizado diretamente, funciona como um curto, ou seja, uma chave fechada. Se polarizado inversamente, funciona como um circuito aberto, ou seja, uma chave aberta.

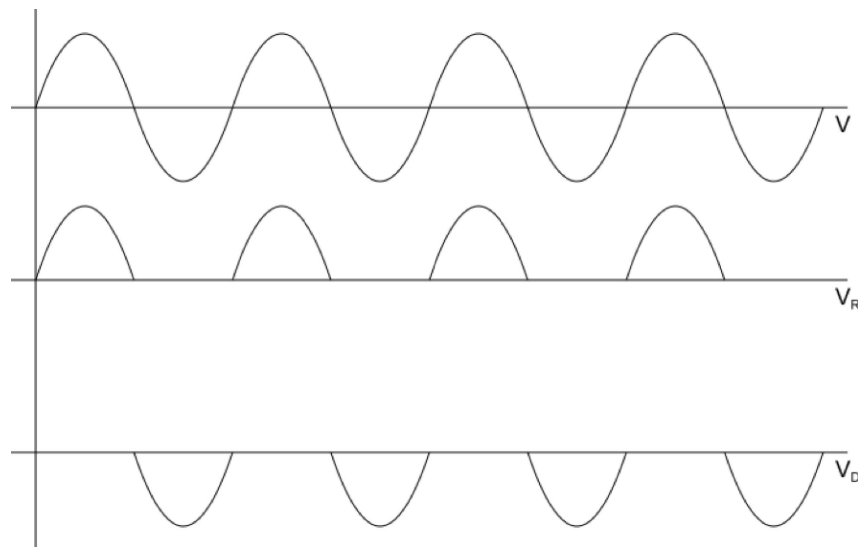
4. Qual a diferença entre um diodo padrão e um de recuperação rápida?

Os diodos padrão também são chamados de genéricos e possuem tempo de recuperação reversa relativamente alto, da ordem de 25 μ s. Esses diodos são utilizados em aplicações em que não seja

25 μ s. Esses diodos são utilizados em aplicações em que não seja necessária alta velocidade, como, por exemplo, retificadores.

Os diodos de recuperação rápida apresentam um tempo de recuperação reversa baixo, da ordem de 5 μ s. São aplicados em situações em que é requerida alta velocidade de chaveamento, como é o caso dos conversores.

5. Considerando o circuito abaixo, sabendo que V é uma tensão senoidal, como é o comportamento do diodo nesse caso? Desenhe um gráfico da tensão e indique o que ocorre em cada momento.



Analizando o diodo como um diodo ideal, temos que quando o semiciclo de V está positivo, o diodo estará com polarização direta e entrará em condução (funcionando como um curto), logo a tensão sobre ele (linha V_D do gráfico) será zero e a tensão V ficará completamente sobre o resistor R (linha V_R do gráfico). Quando o semiciclo de V for negativo, o diodo entra em polarização reversa, não conduzindo (funcionando como um circuito ou chave aberta), logo, a tensão V ficará completamente sobre o diodo e a tensão sobre o resistor será zero. Analisando como um diodo real, quando em condução, o diodo apresenta uma pequena tensão sobre ele (a tensão de barreira de 0,7 volts), logo, no gráfico, não seria exatamente zero, assim, como a tensão sobre o resistor não seria V e sim $V-0,7$ volts.

Referências

BARBI, I. **Eletrônica de potência**. 6. ed. Florianópolis: Edição do Autor, 2006. Disponível em: <<http://ivobarbi.com/PDF/livros/PotI/PotI.pdf>>. Acesso em: 26 fev. 2014.

RASHID, M. H. **Eletrônica de potência**. São Paulo: Makron, 1999