Acionamentos Eletrônicos

Aula 04 - Chaves controláveis – BJT, MOSFET, IGBT, GTO

Material Didático do Instituto Metrópole Digital - IMD
Versão 5.0 - Todos os Direitos reservados

Apresentação

A eletrônica de potência aplicada nos acionamentos eletrônicos apresenta uma boa variedade de tipos de chaves, a qual se aplica aos mais diversos tipos de circuitos e finalidades. Até aqui, estudamos as chaves não controláveis (diodos) e as semicontroláveis (tiristores), que atendem a diversas aplicações. No entanto, as chaves controláveis, também conhecidas como transistores de potência, apresentam tanto a entrada em condução como também de corte controlados, o que permite que as chaves eletrônicas sejam utilizadas cada vez mais em um número maior de aplicações.

Objetivos

- Estabelecer características e conceitos dos transistores de potência.
- Descrever o funcionamento de um transistor de potência.
- Identificar em que situação aplicar as chaves controladas

Transistores de Potência

O transistor comum é um componente eletrônico que revolucionou a eletrônica na década de 1950, ele surgiu para substituir as antigas válvulas e é utilizado como amplificador ou interruptor de um sinal.

Os transistores de potência são amplamente utilizados como chave por apresentarem diversas vantagens sobre os tiristores, a principal delas é a velocidade de chaveamento. Nesta aula, veremos quatro tipos de chaves controláveis de potência, os transistores de junção bipolar (BJT), o transistor de efeito de campo de óxido metálico semicondutor (MOSFET), o transistor bipolar de porta isolada (IGBT) e o tiristor de desligamento pelo gatilho (GTO). Apesar de associarmos as chaves controláveis aos transistores de potência, o GTO, que é um tiristor, apresenta as características de controle tal como os transistores de potência, por essa razão ele foi incluído nesse grupo (por também ser uma chave controlável). A Figura 1 mostra imagens dos quatro tipos de chaves controláveis.

Figura 01 - Imagens das chaves controláveis.

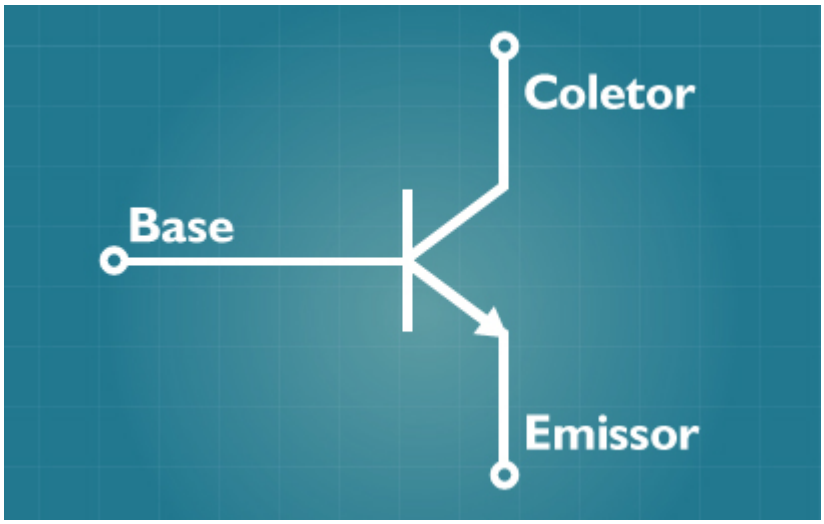
Fonte: Adaptado de (a) <http://3.imimg.com/data3/TM/TC/MY-7534222/npn-transistors-250x250.jpg>;
(b) <http://2.imimg.com/data2/KE/JM/MY-888516/power-mosfets-250x250.jpg>;
(c) <http://2.imimg.com/data2/RD/MC/MY-420289/igbt-500x500-250x250.jpg>;
(d) <http://3.imimg.com/data3/RQ/PM/MY-5068238413/abb-5sga-40l4501-250x250.jpg>.
Acesso em: 5 maio 2014.

Essas imagens das chaves controláveis são as mais comuns, mas elas podem ser diferentes de fabricante para fabricante.

Princípio de Funcionamento dos Transistores

Um transistor é um dispositivo de três terminais que é largamente utilizado na eletrônica devido às suas características de amplificação. A Figura 2 mostra o símbolo do transistor.

Figura 02 - Representação do transistor.

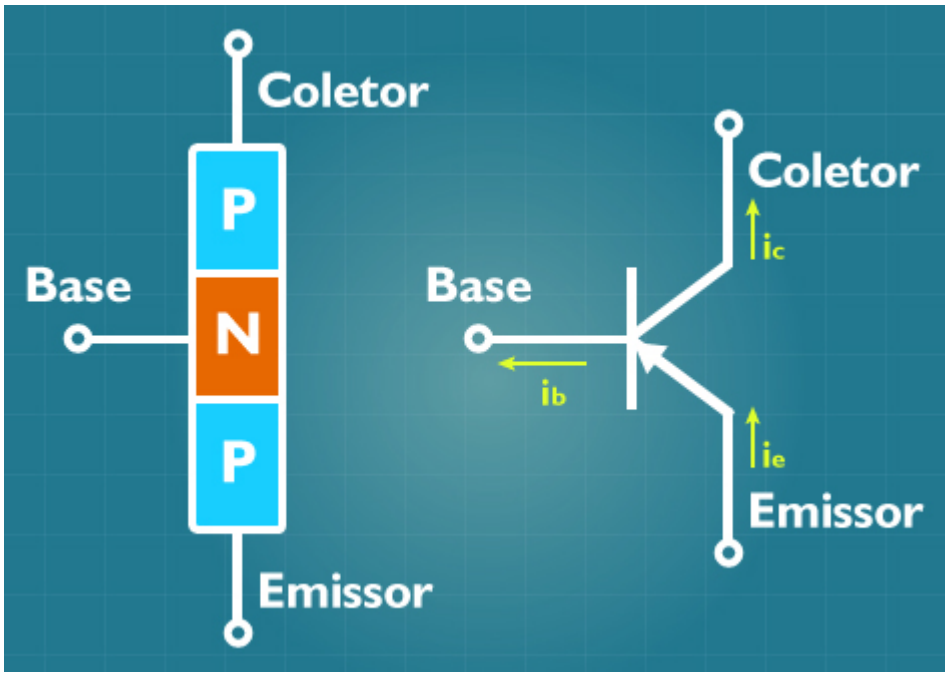


Fonte: Autoria Própria (2014).

De uma forma simples, podemos dizer que a tensão que é aplicada entre os terminais **base** e **emissor** controla a corrente que circula do **coletor** para o **emissor**. Essa característica permite o funcionamento do transistor como amplificador, pois uma pequena corrente circulando na base permite uma corrente bem maior circulando no coletor, e permite também o seu funcionamento como chave, que será explorado nesta aula.

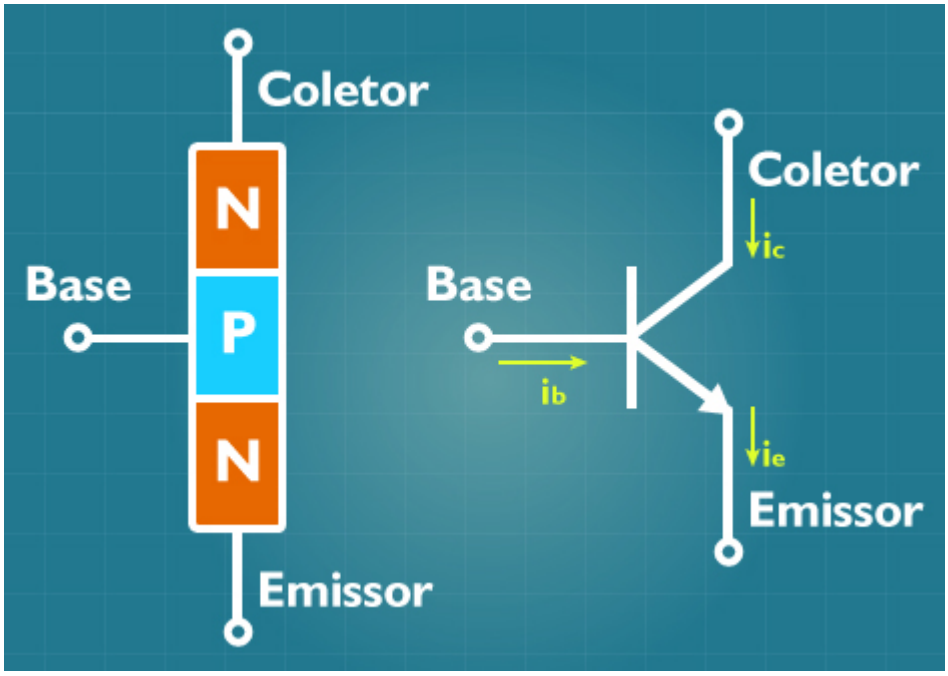
A composição física do transistor se assemelha ao diodo. A diferença é que o diodo apresenta a junção de dois materiais, um do tipo P e um do tipo N, enquanto que o transistor apresenta a junção de três materiais, dois do tipo P e um do tipo N ou o contrário, dois do tipo N e um tipo do P, como podem ser observados nas Figuras 3 e 4, respectivamente. As correntes ib , ic e ie são as correntes circulantes na base, coletor e emissor.

Figura 03 - Características construtivas do transistor PNP.



Fonte: Autoria Própria (2014).

Figura 04 - Características construtivas do transistor NPN.



Fonte: Autoria Própria (2014).

A diferença entre os dois tipos de transistores, PNP e NPN está na polaridade, com o sentido da corrente entre coletor e emissor. Isso implica também na mudança da polaridade da tensão aplicada na base do transistor, no entanto, o funcionamento de ambos é semelhante.

Existem duas equações básicas no estudo e análise de transistores, a Equação 1 podemos retirar do seu diagrama e a Equação 2 é definida a partir das características funcionais do transistor.

$$I_e = I_c + I_b \quad (1)$$

$$I_c = \beta \cdot I_b \quad (2)$$

Em que β é o parâmetro de ganho de corrente e é fornecido pelo fabricante do dispositivo.

Atividade 01

1. O que diferencia uma chave controlável das semi-controláveis e das não controláveis?

Para checar as respostas, clique aqui.

Respostas

1. O que diferencia uma chave controlável das semi-controláveis e das não controláveis?

   As chaves controláveis possuem tanto a condução como o corte controláveis, diferente das chaves semi-controláveis que possuem apenas a condução controlável e das não controláveis que não possuem controle sobre a condução ou corte.

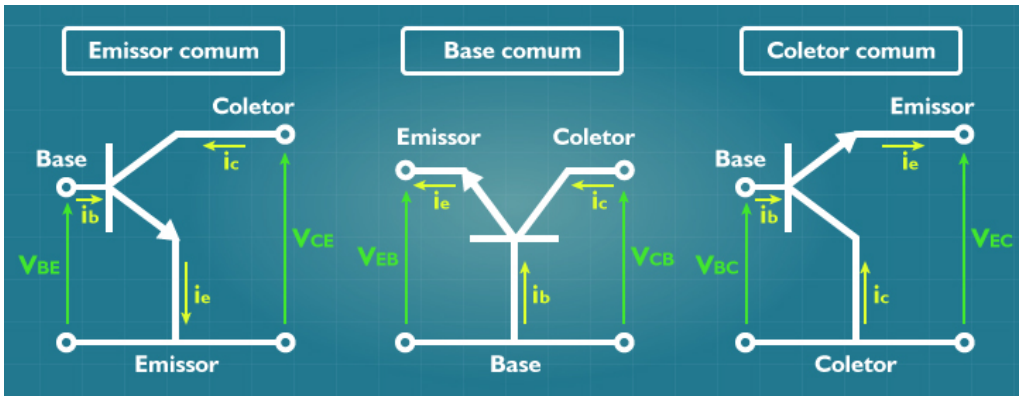
Transistores de Junção Bipolar (BJT)

O BJT é um transistor de potência bem popular por apresentar características como durabilidade e facilidade de polarização. Sua estrutura física é a de um transistor padrão e é exatamente como mostra as Figuras 3 e 4, podendo também

ser do tipo PNP ou NPN.

Para polarizar um transistor, ele pode ser ligado em três configurações básicas, base comum, emissor comum ou coletor comum, como mostrado na Figura 5 para o transistor NPN.

Figura 05 - Configurações de polarização do transistor NPN.



Fonte: Autoria Própria (2014).

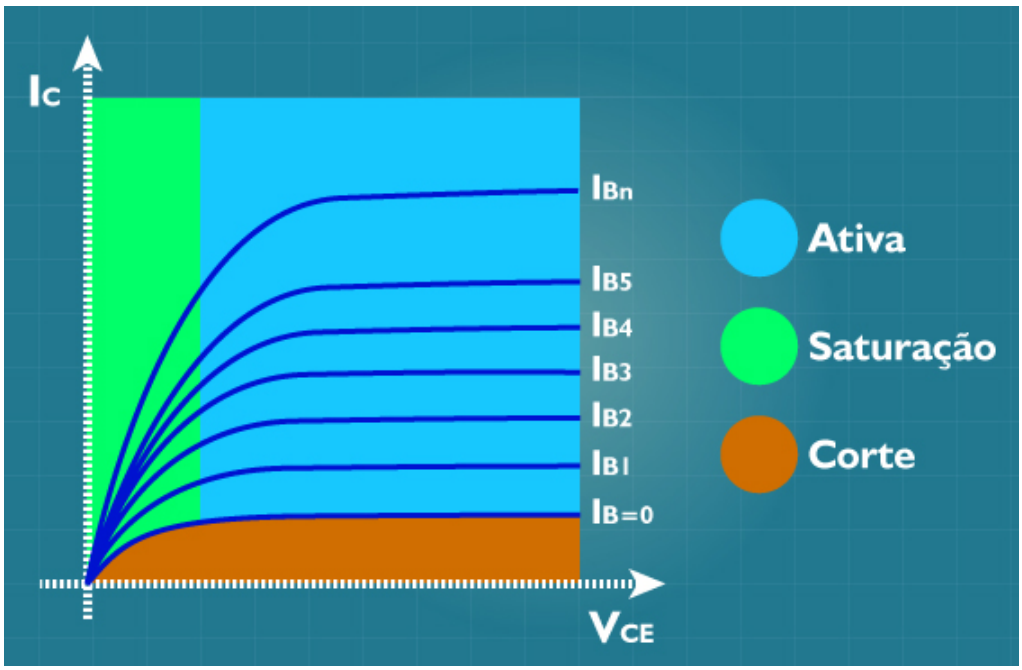
Para a operação do transistor como chave é mais comum o uso do transistor NPN na configuração emissor comum. Partindo dessa configuração, vamos analisar a forma de operação como chave. Um transistor opera em três situações possíveis: na região de corte, na região ativa ou na de saturação.

Região	Situação
Corte	O transistor não conduz corrente, ou por estar desligado ou porque a corrente da base não é suficiente para fazer o transistor entrar em condução.
Ativa	O transistor atua como um amplificador, a corrente no coletor é aumentada por um fator multiplicador em função da corrente da base.
Saturação	O transistor atua como um curto circuito. A corrente da base é elevada a ponto de fazer com que a tensão entre coletor e emissor seja muito pequena.

Quadro 1 - Regiões de condução e não condução do tiristor.
Fonte: Autoria Própria (2014).

A Figura 6 mostra a curva característica de operação do transistor.

Figura 06 - Curva de operação do transistor NPN na configuração emissor comum.



Fonte: Autoria Própria (2014).

O gráfico mostra como a corrente do coletor (IC) se comporta em relação à tensão entre coletor e emissor (VCE) e a corrente de base (IB). Quando a corrente na base é muito pequena, independente de qual seja a tensão entre coletor e emissor, o transistor encontra-se na região de corte, em laranja no gráfico. À medida que a corrente IB aumenta (considere que IB=0 < IB1 < IB2 < IB3 < IB4 < IB5 < IBn), dependendo do valor da tensão entre coletor e emissor, o transistor encontra-se na região de saturação ou na região ativa.

Para o funcionamento como chave, as regiões adequadas são as de corte e saturação, pois na região de corte o caminho entre o coletor e emissor está aberto (como uma chave aberta) e na região de saturação esse caminho está fechado, pois há condução de corrente e uma queda de tensão bem pequena, configurando uma chave fechada.

Atividade 02

---

1. Como um transistor BJT pode ser utilizado como chave? Como é a sua operação como chave?

Para checar as respostas, clique aqui.

Respostas

1. Como um transistor BJT pode ser utilizado como chave? Como é a sua operação como chave?

   Um transistor opera em três situações possíveis: na região de corte, na região ativa ou na de saturação. Na região de corte o transistor não conduz corrente, ou por estar desligado ou porque a corrente da base não é suficiente para fazer o transistor entrar em condução. Na região ativa o transistor atua como um amplificador, a corrente no coletor é aumentada por um fator multiplicador em função da corrente da base. Na região de saturação o transistor atua como um curto circuito. A corrente da base é elevada a ponto de fazer com que a tensão entre coletor e emissor seja muito pequena.

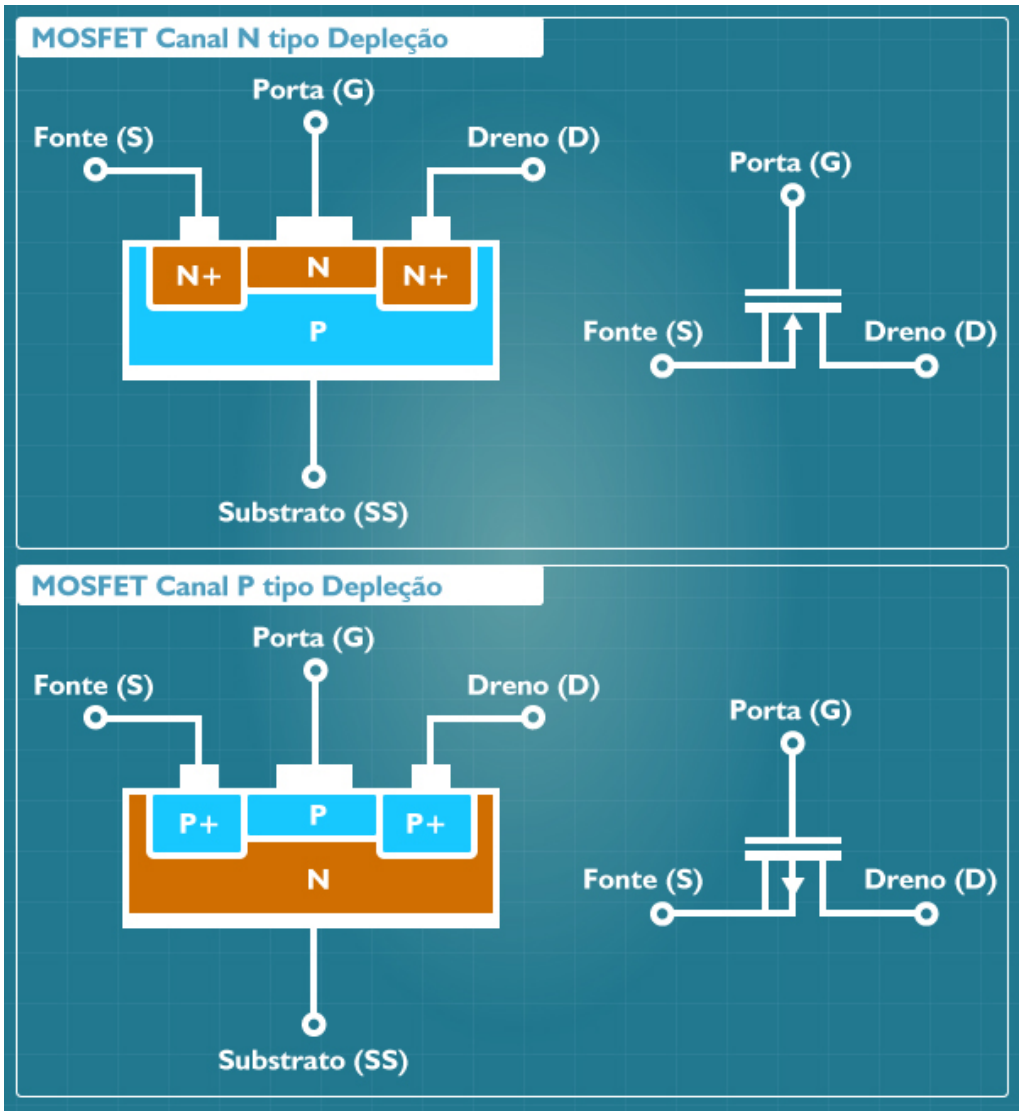
   Para o funcionamento como chave, as regiões adequadas são as de corte e saturação, pois na região de corte o caminho entre o coletor e emissor está aberto (como uma chave aberta) e na região de saturação esse caminho está fechado, pois há condução de corrente e uma queda de tensão bem pequena, configurando uma chave fechada.

Transistor de Efeito de Campo de Óxido Metálico Semicondutor (MOSFET)

MOSFET de potência tem o funcionamento semelhante ao do BJT, a principal diferença está na forma de controle. O BJT funciona a partir de uma corrente de base mínima para que flua uma corrente no coletor, o MOSFET funciona controlado por uma tensão, e não uma corrente como o BJT. Outra diferença relevante é o tempo de chaveamento, o MOSFET consegue operar a frequências superiores ao BJT.

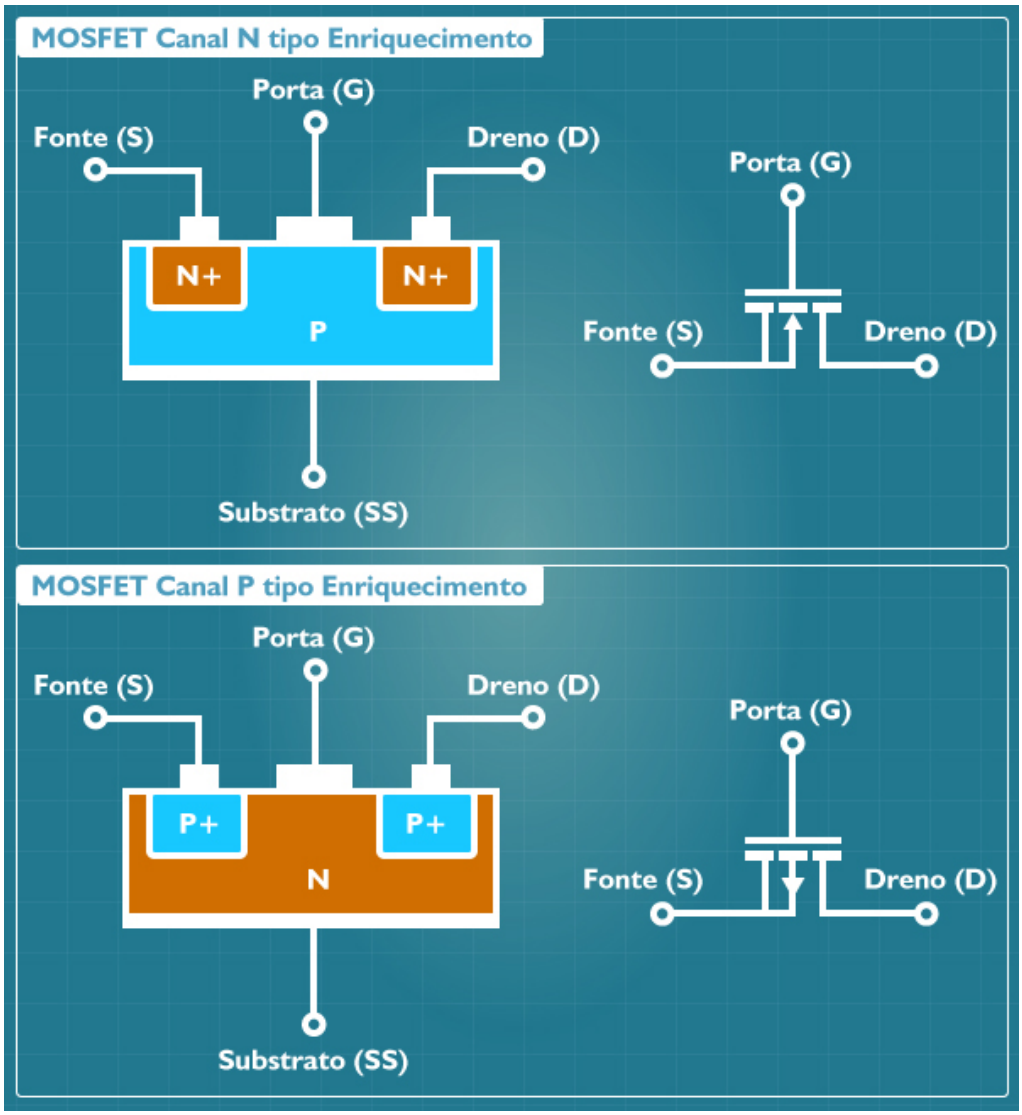
Os MOSFET se dividem em duas categorias, os MOSFET de depleção e os MOSFET de enriquecimento. A Figura 7 mostra o MOSFET tipo depleção, canal N e canal P, enquanto que a Figura 8 mostra o MOSFET de enriquecimento também canal N e canal P.

Figura 07 - Estrutura e símbolo do MOSFET tipo depleção.



Fonte: Autoria Própria (2014).

Figura 08 - Estrutura e símbolo do MOSFET tipo enriquecimento.



Fonte: Autoria Própria (2014).

O sinal “+” indica que o material é dopado fortemente. A dopagem é quando alguns outros elementos químicos são adicionados ao semicondutor puro (o silício é um bastante comum) como objetivo de modificar a sua propriedade semicondutora. Da dopagem obtemos os elementos tipo P e tipo N.

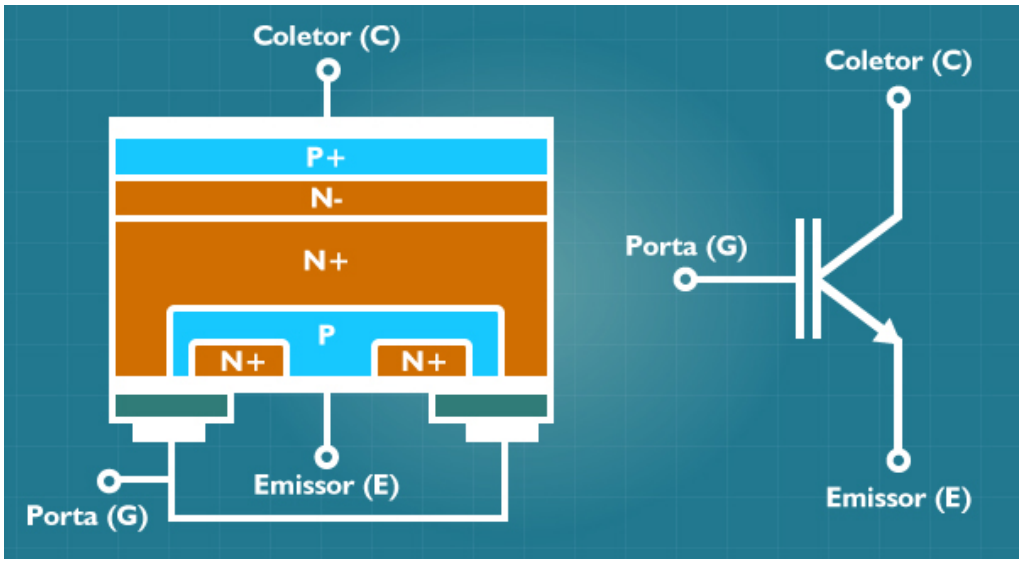
Os dois tipos de MOSFET, depleção e enriquecimento tem o mesmo princípio de funcionamento, a principal diferença está na existência de um canal físico no MOSFET tipo depleção, enquanto que no tipo enriquecimento esse canal é virtual, criado pelo deslocamento de elétrons.

Em linhas gerais, para se ter um MOSFET operando como chave, basta controlar a tensão na porta para controlar a passagem de corrente entre a fonte e o dreno.

Transistor Bipolar de Porta Isolada (IGBT)

O IGBT é um dispositivo mais completo que o BJT e o MOSFET. Ele aproveita as características boas tanto de um como de outro, como por exemplo, impedância de entrada alta e baixas perdas de chaveamento do MOSFET e baixa perda de condução do BJT. A Figura 9 mostra a estrutura física e o símbolo do IGBT.

Figura 09 - Estrutura e símbolo do IGBT.



Fonte: Autoria Própria (2014).

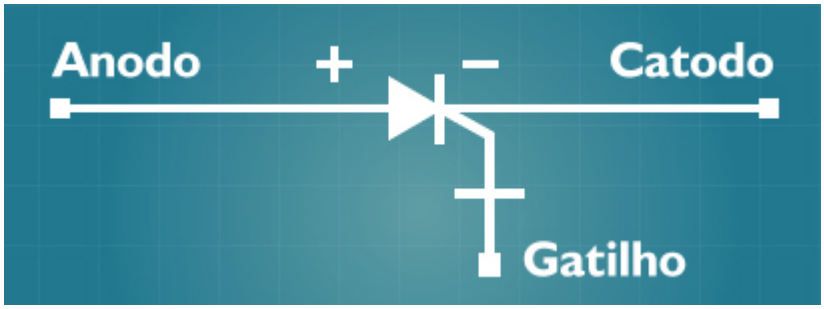
A estrutura do IGBT é composta por quatro camadas P e N alternadas. O seu controle é semelhante ao do MOSFET, por tensão, e o seu funcionamento é o mesmo do BJT e do MOSFET como chave, controlando a porta, podemos fazer com que o caminho entre coletor e emissor esteja fechado ou aberto.

Tiristor de Desligamento pelo Gatilho (GTO)

Apesar de estarmos estudando transistores de potência, o GTO foi colocado aqui por ser também considerada uma chave controlável, assim como os transistores apresentados até aqui. Esse tiristor especial permite que a comutação

ocorra usando também uma tensão no gatilho. Para conduzir, ele funciona exatamente da mesma forma que o SCR, precisa estar polarizado diretamente e ter um pulso de tensão positivo no gatilho. Porém, no GTO, podemos fazer a comutação aplicando um pulso negativo no gatilho, então o tiristor deixa de conduzir. A Figura 10 mostra o símbolo do GTO.

Figura 10 - Símbolo do GTO.



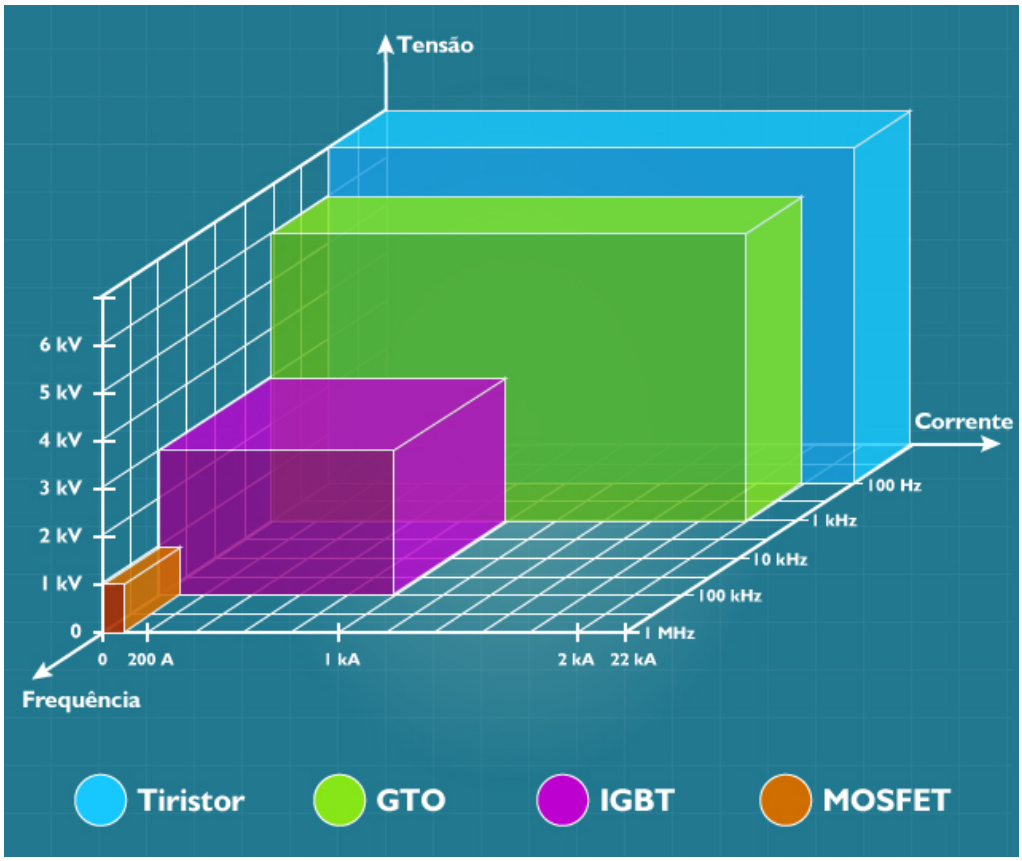
Fonte: Autoria Própria (2014).

Comparação entre as Chaves

Como você já deve ter percebido, existem muitas possibilidades de dispositivos que funcionam como chaves, desde as não controláveis (diodos), passando pelas semicontroláveis (tiristores), até as controláveis (transistores de potência). Então, é natural que surja uma dúvida: qual chave utilizar? A resposta para essa pergunta depende da aplicação a qual se deseja aplicar a chave. Os fatores que se deve levar em consideração são, principalmente, a potência (relação entre tensão e corrente) e a frequência, a velocidade com que a chave deve abrir e fechar.

A Figura 11 mostra em que situações se devem aplicar qual tipo de chave.

Figura 11 - Aplicação de chaves em função da frequência, tensão e corrente.



Fonte: Adaptado de <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/735px-Switches_domain.svg.png>. Acesso em: 16 abr. 2014.

O gráfico da Figura 11 não mostra todas as chaves, mas traz as mais aplicadas em circuitos de potência. Ele mostra, por exemplo, que o MOSFET é o dispositivo indicado para aplicações com frequência de chaveamento superior a 100 KHz, porém ele trabalha com potência mais baixa (P = V.I). À medida que se exige uma potência maior, então os dispositivos passam a operar a uma frequência mais baixa. Observe o caso dos tiristores, operam a até 100 Hz, porém conseguem chegar a uma potência elevada quando comparada com a permitida pelos outros dispositivos.

Portanto, para saber qual a chave mais adequada à aplicação é necessário conhecer as características do circuito e o valor máximo que é exigido de cada grandeza.

Nos acionamentos eletrônicos, existem diversos circuitos que utilizam as chaves, como por exemplo, os circuitos que estudaremos nas aulas seguintes, os conversores, que podem ser de vários tipos e operar a diversas frequências e potências.

Atividade 03

1. Que tipo de chaves devem ser utilizadas em frequências elevadas, acima de 10 kHz? E para corrente muito elevadas, acima de 2 kA?

Para checar as respostas, clique aqui.

Respostas

1. Que tipo de chaves devem ser utilizadas em frequências elevadas, acima de 10 kHz? E para corrente muito elevadas, acima de 2 kA?

   Para frequências acima de 10 kHz, os IGBT e os MOSFET são os mais indicados. Para correntes acima de 2 kA os tiristores são os mais indicados.

Leitura Complementar

BOYLESTAD, R.; NASHELSKY, L. Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos. Rio de Janeiro: LTC, 1998.

Para compreender um pouco mais sobre o funcionamento do transistor, é recomendada a leitura de um livro clássico no estudo da eletrônica. Nele, há informações mais detalhadas sobre as características e operação dos transistores.

Resumo

Nesta aula, você teve a oportunidade de ver as características básicas das chaves controláveis, que são na sua maioria transistores de potência. Viu também como eles funcionam, sua simbologia e como podem ser aplicados como chaves. Foi mostrado ainda quais os parâmetros que definem a chave a ser utilizada: potência e frequência requeridas.

Autoavaliação

1. Com que finalidade são utilizados os transistores de potência?
2. Qual a diferença entre o funcionamento do diodo e do transistor de potências como chave?
3. Qual a diferença no funcionamento dos transistores tipo PNP e NPN?
4. Quais as regiões de operação que são utilizadas no funcionamento do transistor como chave?
5. Como devem ser os sinais aplicados aos transistores para que possamos usá-los como chave?
6. Quando se deve usar um MOSFET de potência ao invés de um IGBT? E o contrário?

Para checar as respostas, clique aqui.

Respostas

1. Com que finalidade são utilizados os transistores de potência?

   São utilizados como chave de alta frequência de chaveamento.

2. Qual a diferença entre o funcionamento do diodo e do transistor de potências como chave?

   O diodo conduz apenas quando polarizado corretamente e se a tensão for superior a tensão de barreira, cortando caso sua polarização seja invertida ou a tensão caia abaixo da tensão de barreira. O usuário não tem controle sobre como e quando ocorrera esse chaveamento. Já o transistor de potência conduz apenas quando polarizado corretamente e se houver uma tensão aplicada a sua base (ou gate), podendo ser cortado com a remoção de tal tensão a qualquer momento, permitindo ao usuário realizar o controle de quando ele está conduzindo.

3. Qual a diferença no funcionamento dos transistores tipo PNP e NPN?

   A diferença entre os dois tipos de transistores, PNP e NPN está na polaridade, com o sentido da corrente entre coletor e emissor. Isso implica também na mudança da polaridade da tensão aplicada na base do transistor. Enquanto no transistor NPN, a tensão de base e coletor são positivas e o emissor é o terra, no transistor PNP a tensão de base e coletor são negativas em relação ao emissor (terra).

4. Quais as regiões de operação que são utilizadas no funcionamento do transistor como chave?

   A região de corte (chave aberta) e a de saturação (chave fechada).

5. Como devem ser os sinais aplicados aos transistores para que possamos usá-los como chave?

Utilizando um transistor NPN como exemplo, a tensão aplicada a base do transistor deve ser nula ou tão pequena que gera uma corrente insuficiente para colocá-lo em modo de condução. Nesse caso ele estará na região de corte. Se a tensão aplicada a base for muito elevada, fazendo surgir uma corrente de base elevada, isso provocará uma corrente muito maior entre o emissor e o coletor, fazendo a tensão entre esses dois terminais ser tão pequena que parecerá um curto-circuito. Assim, o transistor estará na região de saturação.

6. Quando se deve usar um MOSFET de potência ao invés de um IGBT? E o contrário?

   A utilização de um MOSFET deve ser recomendada nos casos em que a frequência seja muito elevada (acima de 100 kHz), sob pena de permitir uma potência menor (1 kV e até 100A). Mas se a necessidade for frequências na faixa de 1 kHz até 100 kHz e potências mais elevadas (até 3 kV e até 1 kA) os IGBTs são as melhores escolhas.

Referências

AHMED, A. **Eletrônica de potência.** São Paulo: Pearson Education, 2000.

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