

Circuitos Eletrônicos

Aula 07 - Transistor Bipolar, Mosfet e Jfet

Apresentação

Nessa aula continuaremos nossos estudos relacionados aos transistores bipolares, dando ênfase a configuração emissor-comum. Além disso, estudaremos um tipo diferente de transistor. Eles são chamados **transistores de efeito de campo** ou **FET** (Field-Effect Transistor). Faremos um breve estudo sobre os dois tipos de FET existentes no mercado, o JFET, transistor de efeito de campo de junção, e o MOSFET, transistor de efeito de campo metal-óxido-semicondutor.

Objetivos

Ao final desta aula, você será capaz de:

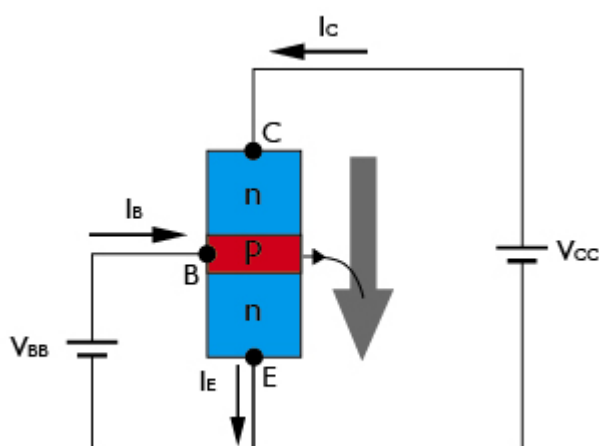
- Identificar características de funcionamento da configuração emissor comum;
- Identificar as regiões de trabalho e as características de saída;
- Diferenciar a configuração emissor comum da configuração base comum;
- Identificar as características do funcionamento de um JFET e de um MOSFET

Configuração Emissor Comum

Na aula passada, continuamos o estudo dos transistores. Vimos os conceitos das configurações de trabalho e nos aprofundamos na configuração base comum. Analisamos seus gráficos com parâmetros de entrada e saída.

Na configuração emissor comum, o próprio nome já indica que o terminal emissor do transistor é comum tanto à entrada quanto à saída da montagem do dispositivo no circuito eletrônico. Nesta configuração, a entrada é aplicada entre os terminais base-emissor e verificamos a saída entre os terminais coletor-emissor. Veja a figura a seguir:

Figura 01 - Transistor NPN na configuração emissor comum.



A configuração emissor comum é a configuração mais utilizada e encontrada nos circuitos eletrônicos. Mesmo em uma configuração diferente, temos as mesmas relações de corrente da configuração passada, ou seja:

$$I_E = I_C + I_B$$

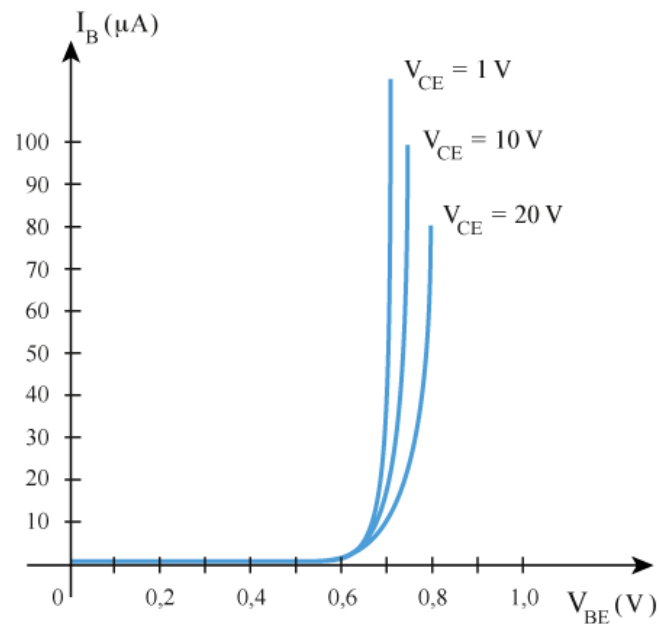
$$I_C = \alpha I_E$$

Faremos também, nessa aula, a mesma análise dos parâmetros de entrada e de saída dessa configuração.

Análise dos parâmetros de entrada

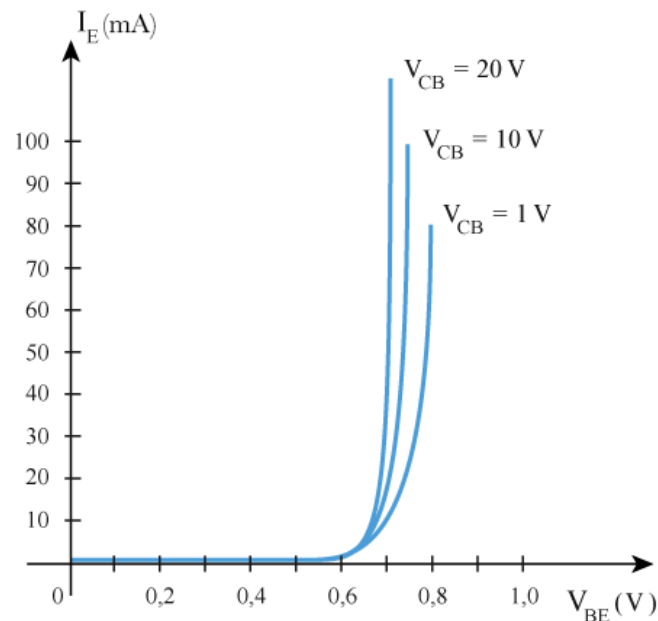
Analisaremos os parâmetros de entrada dessa configuração, que são a **corrente da base (I_B)**, pela **tensão base emissor (V_{BE})**, para diversas **tensões coletor emissor (V_{CE})**. Assim, temos o gráfico abaixo:

Figura 02 - Parâmetros de entrada para o transistor na configuração emissor-comum.



Muito parecido com o gráfico dos parâmetros de entrada do transistor na configuração base comum, não é verdade? Ele está logo aqui embaixo. Faça uma comparação e encontre as diferenças!

Figura 03 - Parâmetros de entrada para a configuração base comum.



Os gráficos são muito parecidos, a diferença está nos detalhes. Note primeiro a escala da corrente do emissor (configuração base comum) e a corrente da base (configuração emissor comum). A primeira está numa escala de mili-amperes, enquanto a segunda está numa escala de micro-amperes, ou seja, mil vezes menor.

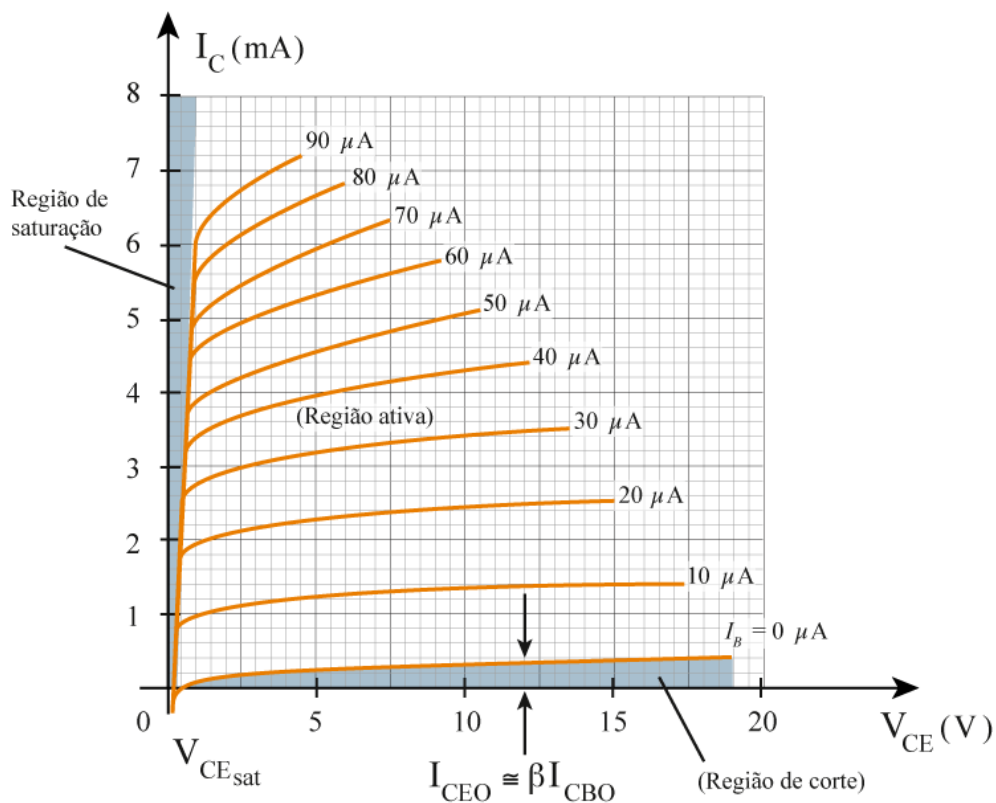
Vamos agora analisar a tensão base emissor. Com o mesmo aumento nos dois casos, temos curvas muito parecidas. Entretanto, repare que elas são mais inclinadas para uma maior tensão de coletor-base enquanto que uma maior inclinação é adquirida com uma tensão menor coletor emissor, ambas com parâmetro variável.

O comportamento do transistor com o aumento da tensão na junção base emissor é praticamente idêntico à configuração base comum. O transistor “liga” quando a tensão base emissor é maior do que $0,7\text{ V}$ (transistores feitos de silício), proporcionando o aumento da corrente do emissor.

Análise dos parâmetros de saída

Na configuração emissor comum, os parâmetros de saída são a **corrente do coletor (I_C)** pela **tensão coletor emissor (V_{CE})**, para diversos valores de **corrente de base I_B** . Observe, por exemplo, o gráfico a seguir:

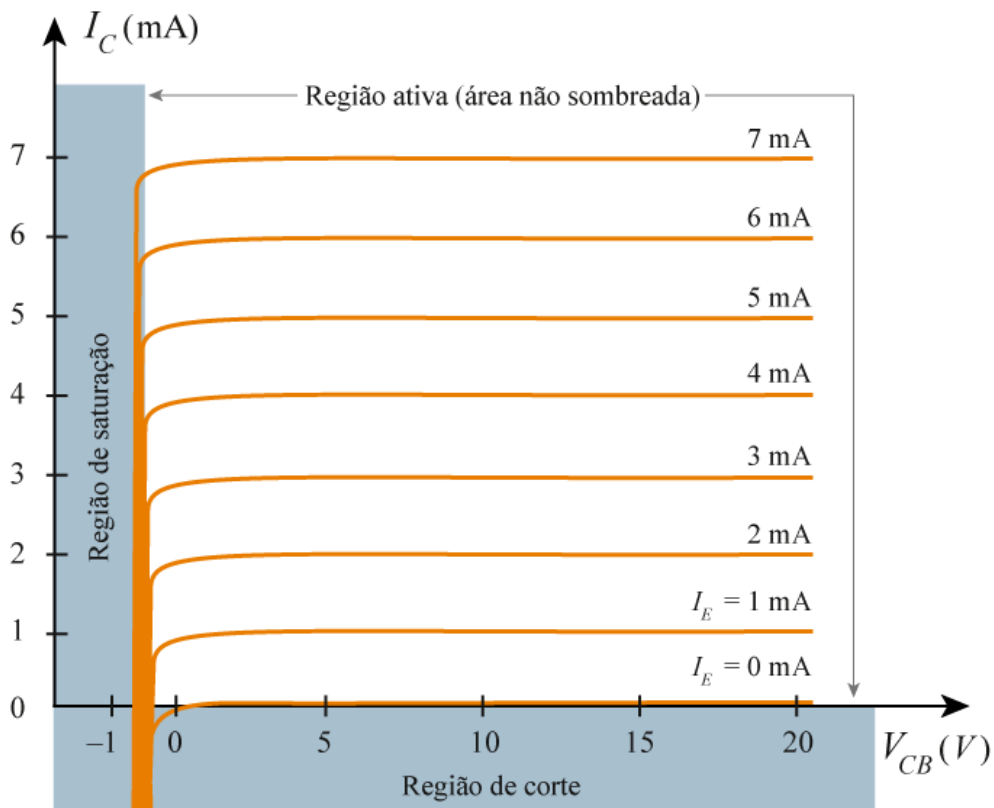
Figura 04 - Gráfico dos parâmetros de saída do transistor operando na configuração emissor comum.



O gráfico dos parâmetros de saída da configuração emissor comum também é muito parecido com o seu equivalente da configuração base comum, analisado na aula passada.

Podemos destacar, novamente, três importantes regiões no gráfico. A região de corte, a região ativa e a região de saturação. As características dessas regiões são semelhantes às da configuração base-comum. Abaixo está o gráfico da configuração base comum, faça a comparação entre eles.

Figura 05 - Parâmetros de saída do transistor no modo de configuração base comum.



Quais diferenças você pode notar?

Em cada uma das regiões, podemos ver claras diferenças. Observe a princípio, a região ativa. Veja que ela é muito mais linear na configuração base emissor do que na configuração emissor comum. Ou seja, na configuração emissor comum, a tensão coletor-emissor modifica o valor da corrente do coletor.

Mais uma vez, para se trabalhar na região ativa, deve-se polarizar a junção base-emissor diretamente, enquanto a junção base-coletor deve ser polarizada inversamente. Nessa região, as aplicações variam desde a amplificação de tensão ou corrente até a potência.

Observe agora a região de corte. Note que ela é menos definida do que na configuração base comum. Quando a corrente do emissor I_E na configuração base comum é igual a zero, a corrente do coletor também é zero, ou muito próxima disso (ver gráfico da Figura 5). Agora, compare com a corrente do coletor na configuração emissor comum (ver gráfico da figura 4). Repare que a primeira curva do gráfico é feita com a corrente da base $I_B = 0$.

A região de saturação é muito semelhante. Retomando a sessão anterior, veja que a corrente de base é muito pequena, na ordem de micro-amperes. Essa pequena corrente consegue controlar uma corrente na ordem de mili-amperes, 1000 vezes maior. A relação entre a corrente do coletor e a corrente de base é chamado de β (lê-se beta).

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

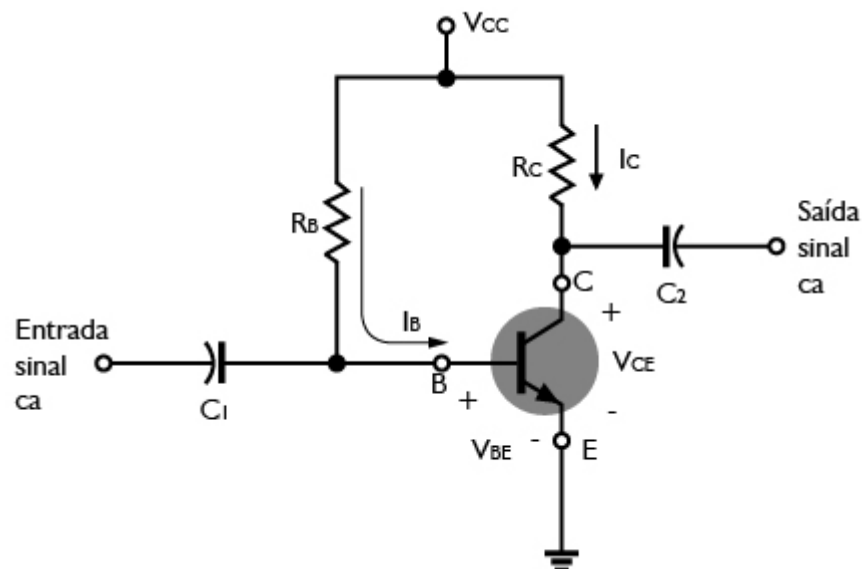
Em transistores encontrados no mercado, temos um β que varia tipicamente entre 40 a 400. Veremos a seguir alguns circuitos que exemplificam melhor o uso do transistor nessa configuração específica.

Atividade 01

1. Caracterize e diferencie as configurações emissor comum e coletor comum.
2. Diga onde é aplicado o sinal de entrada e onde é verificado o sinal de saída em amplificadores que utilizem as seguintes configurações:
 - a. Emissor comum
 - b. Coletor comum
 - c. Base comum
3. O transistor possui dois parâmetros importantes o α (alfa) e o β (beta). Eles relacionam quais grandezas dos transistores bipolares?

Circuito Exemplo 1

Figura 06 - Circuito exemplo 1, transistor operando com polarização fixa.



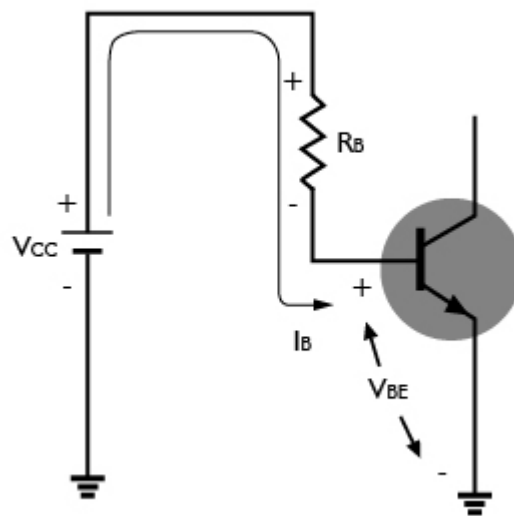
No circuito da figura anterior, o transistor está ligado a uma fonte de tensão de 12V. Além disso, pode-se ver claramente a entrada do circuito no lado esquerdo, onde temos a presença de um sinal alternado. Ele passa por um pequeno capacitor, chamado capacitor de acoplamento. Ele também está presente na saída, mas à direita do circuito.

Você consegue identificar em que modo de operação está esse transistor? A entrada está na junção base-emissor, enquanto que a saída está entre o coletor e o emissor. Percebe-se que o emissor está aterrado, comum à entrada e à saída. Logo, é fácil ver que o transistor está sendo utilizado numa configuração emissor comum!

Depois que identificamos a configuração, temos que descobrir em qual região está trabalhando o transistor do circuito acima. Para isso, vamos descobrir alguns valores específicos.

Os valores das correntes vão depender diretamente do valor da fonte e dos resistores. Usando a lei de Kirchhoff das malhas, podemos fazer as seguintes análises:

Figura 07 - Primeira malha para análise.



De acordo com a malha indica na figura acima, podemos obter a seguinte equação:

$$V_{CC} - V_{RB} - V_{BE} = 0$$

A tensão da fonte, menos a tensão do resistor da base (R_B), menos a tensão base emissor V_{BE} , é uma malha fechada e, sendo assim, a soma de todas as quedas de tensão em uma malha é igual a zero. Usando a primeira lei de Ohm, $U = R \cdot I$, podemos fazer a seguinte expansão:

$$\begin{aligned} V_{RB} &= I_B \cdot R_B \\ V_{CC} - I_B \cdot R_B - V_{BE} &= 0 \\ I_B \cdot R_B &= V_{CC} - V_{BE} \\ I_B &= \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \end{aligned}$$

Vamos imaginar que a fonte V_{CC} tem uma tensão de 12V. O resistor ligado ao coletor do transistor sendo de 4,4 k Ω (R_C) e o resistor ligado à base (R_B), com o valor em torno de 100 vezes maior, 440k Ω , por exemplo. O transistor é de silício, logo V_{BE} vale 0,7V. Além disso, o β do transistor é 100, por exemplo.

Assim, teremos:

$$I_B = \frac{12 - 0,7}{440 \times 10^3} = 25,68 \mu A$$

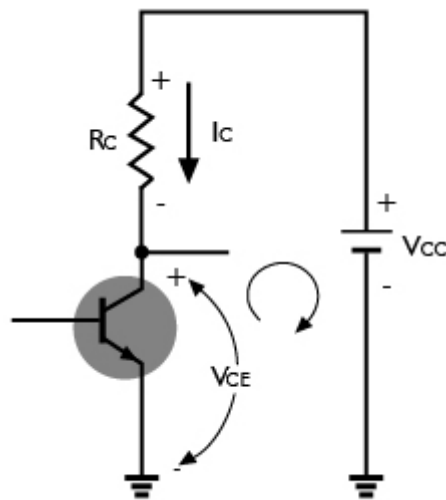
Como $\beta = 50$, teremos:

$$I_C = \beta I_B$$

$$I_C = 50 * 25,68 \mu A = 1,2 mA$$

Com o valor da corrente do coletor em mãos, podemos analisar a outra malha:

Figura 08 - Segunda malha para análise.



Dessa malha, podemos usar a lei de Kirchhoff e dizer que:

$$V_{CC} - V_{RC} - V_{CE} = 0$$

Novamente, aplicando a primeira lei de ohm no resistor C, teremos:

$$V_{RC} = R_C * I_C$$

$$V_{RC} = 4,4 k\Omega * 1,2 mA = 5,64 V$$

Jogando esse valor na equação acima, temos:

$$12 - 5,64 - V_{CE} = 0$$

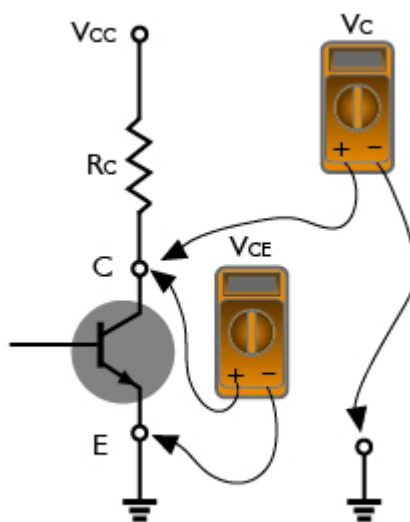
$$V_{CE} = 6,35 V$$

Utilizando desse arranjo de resistores, podemos concluir que o resistor de silício foi acoplado ao circuito na configuração emissor comum. Pelos valores das correntes decorrentes das polarizações encontradas, podemos concluir que esse transistor está trabalhando na região ativa. O sinal de entrada está sendo amplificado. A mudança de uma configuração poderia se dar “jogando” com os valores dos resistores. Assim, poderíamos mudar as polarizações e levar o transistor a trabalhar numa região diferente, dependendo das nossas necessidades.

Circuito Exemplo 1 - pt.2

Veja agora a diferença entre medir diferença de potencial entre dois pontos quaisquer em um circuito e medir um único potencial com relação ao terra. Usaremos, como exemplo, a tensão entre coletor e emissor.

Figura 09 - Diferenciação das tensões entre o coletor e o emissor da tensão do coletor e do emissor.



Na figura anterior, vemos a representação da tensão V_{CE} , medida pelo voltímetro, ou seja, a diferença de potencial entre os pontos C e E. Isso pode ser diferente da tensão do coletor, representado pelo segundo voltímetro, à direita. Nesses casos elas são iguais, já que não existe um resistor entre o emissor e o terra. A relação entre essas tensões é $V_{CE} = V_C - V_E$, ou seja, a diferença de potencial entre o coletor e o emissor é igual a tensão do coletor até o terra menos a tensão do emissor até o terra.

Configuração coletor-comum

A última configuração a ser explorada é a coletor-comum. A maioria das aplicações utilizando o transistor em modo coletor-comum são encontradas nos casamentos de impedância. Nos amplificadores operacionais, tópico que estudaremos posteriormente, temos o uso desses dispositivos eletrônicos também para a função de casamento de impedância. Aproveitaremos as aulas seguintes para discutir essa técnica.

Os transistores de efeito de campo

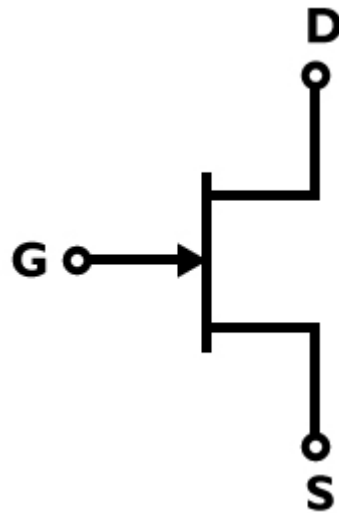
O grande diferencial dos FET, em relação aos TJB estudados previamente, é que nestes o controle da corrente de saída é feito a partir de uma corrente de entrada. Já nos transistores de efeito de campo, a corrente de saída é controlada por uma tensão de entrada.

Vamos falar de cada um deles.

JFET: Transistor de efeito de campo de junção

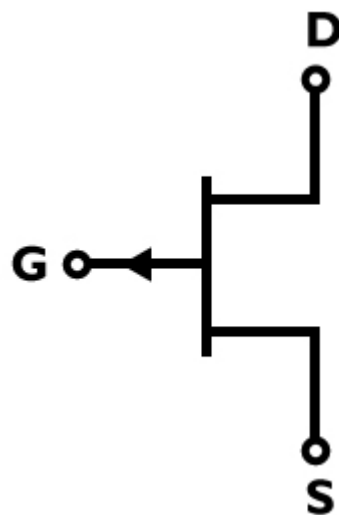
Diferente do TBJ, que era um dispositivo bipolar, como o próprio nome já dizia, o JFET é um dispositivo unipolar, ou seja, enquanto no TBJ temos correntes de portadores minoritários e majoritários (elétrons e lacunas - dependendo do tipo de transistor - NPN ou PNP), no JFET temos apenas um desses portadores. Se forem elétrons, trata-se do JFET tipo canal N e, se forem lacunas, trata-se de um JFET tipo canal P. Na figura a seguir, podemos observar a simbologia utilizada para cada um desses JFETs.

Figura 10 - Simbologia da JFET tipo canal N.



Fonte: Cruz e Choueri Junior (2008).

Figura 11 - Simbologia da JFET tipo canal P.



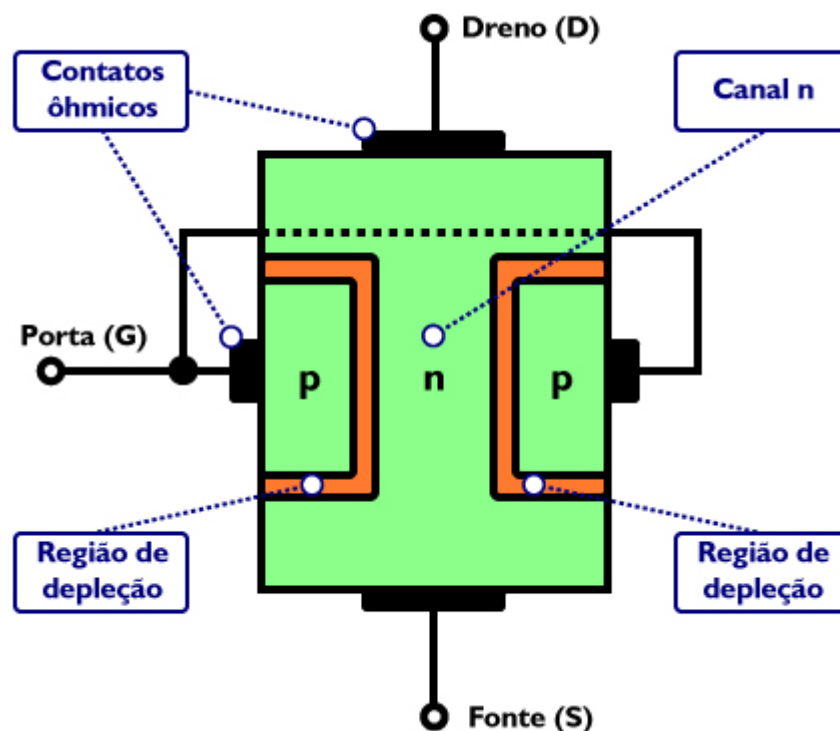
Fonte: Cruz e Choueri Junior (2008).

Você pode observar também as siglas para cada uma das três portas, são elas G, D e S, que representam, respectivamente, os terminais de *gate* (porta), *drain* (dreno) e *source* (fonte).

Configuração coletor-comum - pt.2

Podemos observar com mais detalhes na figura a seguir. Veja que temos, semelhante ao que acontece com o transistor, uma junção de semicondutores dopados do tipo P, tipo N e do tipo P. Entretanto, a distribuição entre eles é muito diferente.

Figura 12 - JFET tipo canal N.



Fonte: Boylestad e Nashelsky (2005).

Boylestad usa uma ótima analogia em seu livro "Dispositiva eletrônica e teoria de circuitos" para explicar o funcionamento do FET. Ele compara o JFET a um sistema hidráulico, como mostra a figura a seguir:

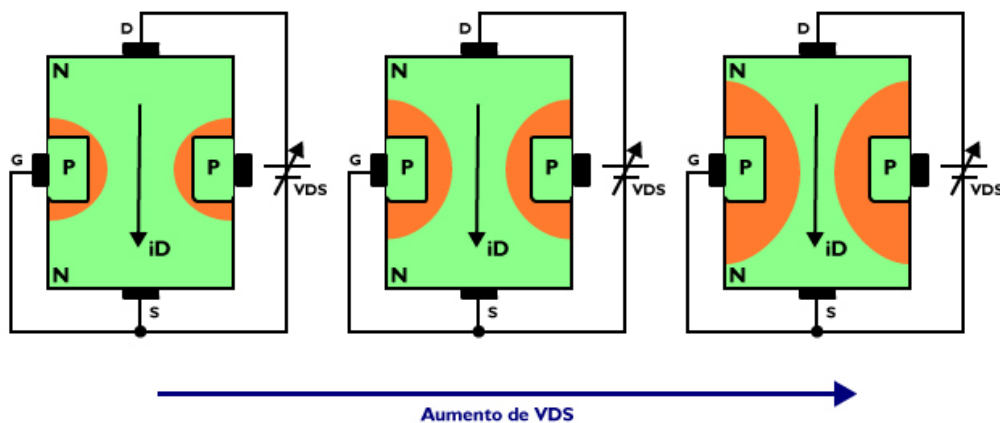
Figura 13 - Analogia feita por Boylestad para explicar o funcionamento do JFET.



Fonte: Boylestad e Nashelsky (2005).

Dependendo da tensão aplicada à porta (*gate*), mais água (portadores de carga) irá fluir da fonte (*source*) para o dreno (*drain*). Para entender o funcionamento do JFET vamos analisar a figura a seguir:

Figura 14 - Funcionamento do JFET - porta não polarizada.

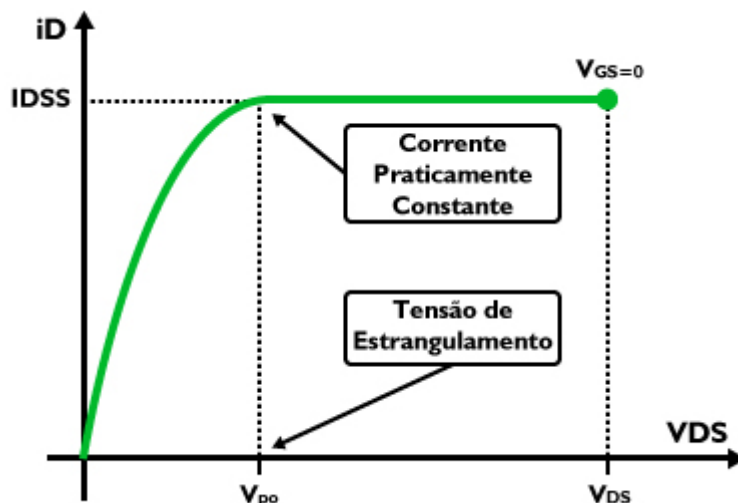


Fonte: Marques; Cruz e Choueri Junior (2012).

Se aplicarmos uma pequena tensão entre o dreno e a fonte (v_{DS}) e se a porta não estiver polarizada, aparecerá uma pequena corrente (i_D). O problema é que, se quisermos aumentar a corrente, temos que aumentar a tensão v_{DS} . Entretanto, à

medida que aumentamos essa tensão, temos também um aumento da região de depleção, aumentando a resistência dentro do JFET, até termos um “estrangulamento” do canal.

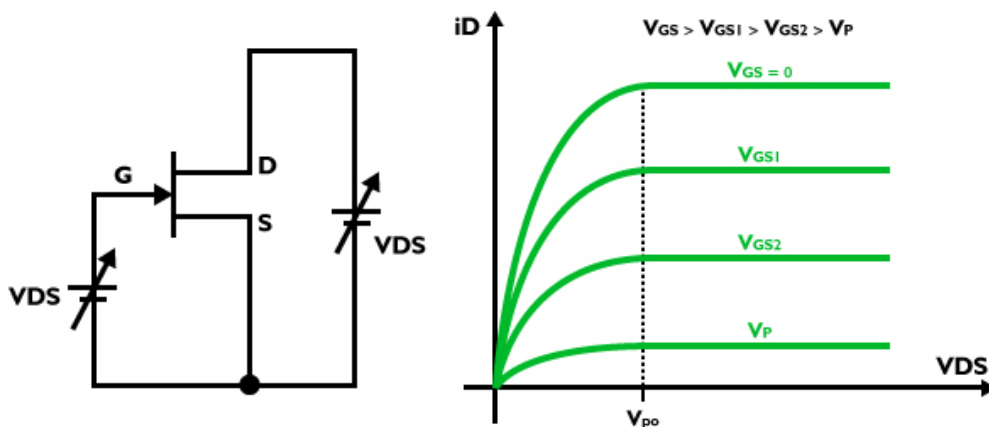
Figura 15 - Gráfico da curva de dreno para tensão = 0 na porta.



Fonte: Marques; Cruz e Choueri Junior (2012).

Se aplicarmos uma tensão negativa na porta do JFET, teremos um estreitamento do canal ainda mais rápido até chegarmos ao valor de corte, representado no gráfico abaixo como V_P .

Figura 16 - Polarização negativa aplicada a porta do JFET (Gate). O estrangulamento é antecipado.



Fonte: Marques; Cruz e Choueri Junior (2012).

Esse gráfico é muito semelhante ao gráfico das características de saída de um transistor TJB. Entretanto, a grande vantagem de se usar um JFET é que sua impedância de entrada é altíssima.

Aproveitando-se da subida antes do ponto de tensão V_{Po} , o JFET é utilizado como uma resistência que tem o seu valor alterado por meio da aplicação de uma tensão na porta.

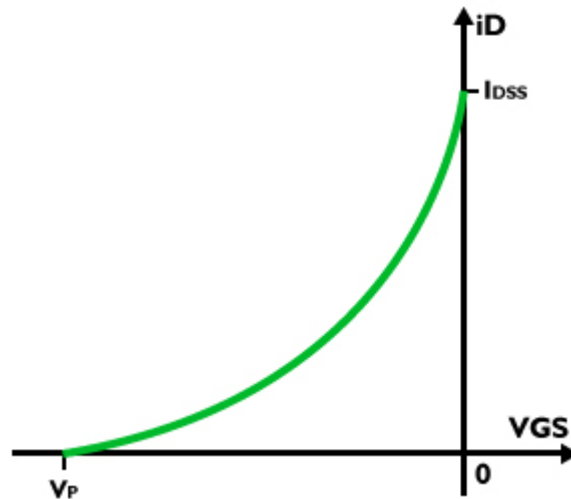
MOSFET

Metal oxide semiconductor field effect transistor ou transistor de efeito de campo metal-óxido-semicondutor: o nome pode assustar um pouco, mas o MOSFET é tão simples de se entender quanto os outros dispositivos semicondutores estudados até então. Os MOSFET se parecem muito com os JFET, entretanto um ponto chave da sua construção determina a diferença entre eles. O contato metálico da porta (*gate*) é separado do substrato interior por uma camada isolante (de dióxido de silício), fazendo com que a impedância de entrada dos MOSFET seja ainda maior do que a dos JFET, que já eram grandes! Isso implica em correntes também menores no terminal da porta.

Sua natureza também permite uma miniaturização maior do que a do transistor bipolar de junção. Eles podem ser fabricados numa escala vinte vezes menor do que o TJB, permitindo o seu uso em circuitos integrados, por exemplo.

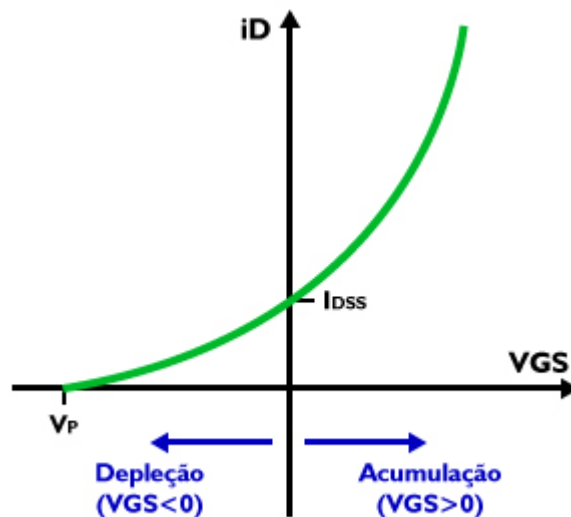
Existem dois tipos de MOSFET, os de acumulação e os de depleção. Os MOSFET do tipo depleção funcionam de forma semelhante aos JFET com uma particularidade. Com a diminuição da tensão do gate, temos o aumento do valor da corrente. Mas se a polaridade muda, temos a continuação do aumento da corrente, diferente do comportamento apresentado pelo JFET. Veja as figuras a seguir.

Figura 17 - Tensão V_{GS} pela corrente I_D do JFET.



Fonte: Marques; Cruz e Choueri Junior (2012).

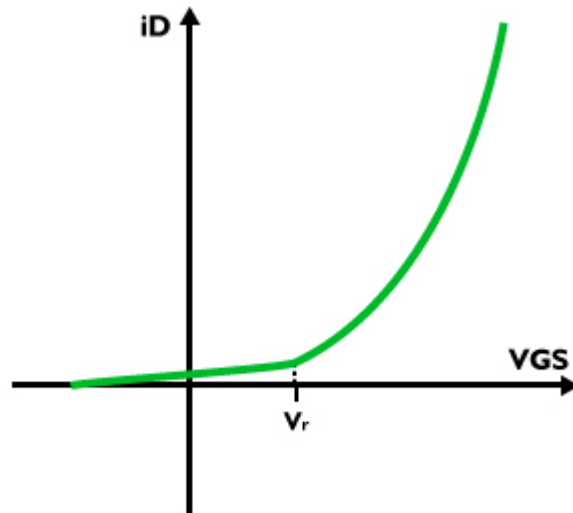
Figura 18 - Tensão V_{GS} pela corrente I_D do MOSFET.



Fonte: Marques; Cruz e Choueri Junior (2012).

Repare que a corrente continua a subir mesmo do lado direito do gráfico, o que não acontece no JFET. Essa é uma característica do MOSFET de depleção. Já o MOSFET de acumulação, por ter uma construção diferenciada, funciona somente com tensões positivas de V_{GS} . Veja o seu gráfico na figura seguinte:

Figura 19 - Tensão V_{GS} pela corrente I_D do MOSFET.



Fonte: Marques; Cruz e Choueri Junior (2012).

Note, também, a natureza não linear da subida da tensão, outra característica do MOSFET de acumulação. Essas curvas são chamadas curvas de transferência.

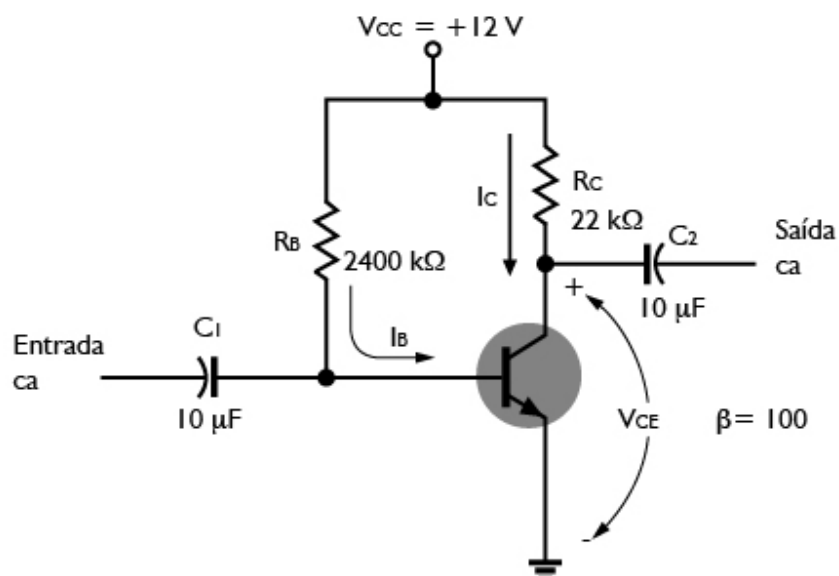
Resumo

Nessa aula, vimos de forma mais aprofundada a configuração emissor comum. Analisamos os gráficos tanto de entrada quanto de saída. Comparamos o funcionamento com a configuração estudada previamente e mostramos um arranjo de resistores para polarizar o transistor, a fim de colocá-lo nesse modo de operação.

Nesta aula, vimos um tipo diferente de transistor, os efeitos de campo. Estudamos os transistores JFET e também os MOSFET, seus funcionamentos básicos e suas características principais.

Autoavaliação

1. Quais as principais diferenças entre a configuração base comum e o emissor comum, com relação aos parâmetros de entrada?
2. E com relação aos parâmetros de saída? Justifique.
3. Do circuito abaixo, calcule:



- a. Corrente da base e Corrente do coletor;
- b. Tensão coletor-emissor, V_{CE} .

- c. Tensão da base, VB
 - d. Tensão do coletor, VC.
 - e. Tensão base-coletor VBC.
4. O JFET é um dispositivo unipolar ou bipolar? Justifique.
 5. Com relação à entrada, em que os transistores de efeito de campo diferem dos bipolares de junção?
 6. Diferencie o JFET do MOSFET.
 7. Qual o nome das portas de um transistor de efeito de campo?
 8. Qual a principal característica dos JFET, que se torna ainda mais importante nos MOSFET?

Referências

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 8. ed. [s.l.]: Pearson, 2012.

FERREIRA, Aitan Póvoas. **Curso básico de Eletrônica**. 4. ed. Rio de Janeiro: Biblioteca técnica Freitas Bastos, 1987.

GUSSOW, Milton. **Eletricidade Básica**. 2. ed. [s.l.]: McGraw-Hill, 1997.

MARQUES, Angelo Eduardo B.; CHOURERI JUNIOR, Salomao; CRUZ, Eduarod Cesar Alves. **Dispositivos semicondutores: Diodos e Transistores**. 13. ed. rev. São Paulo: editora Érica, 2012.