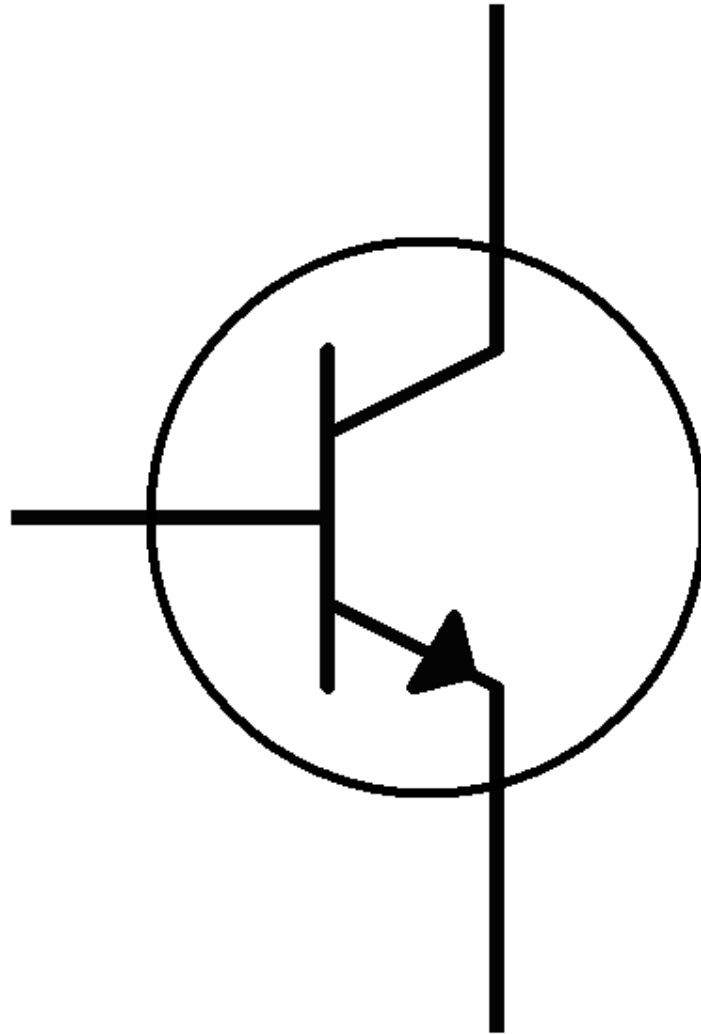


# Transistores II



Prof. Marcelo Wendling

2009

Versão 1.0

## Índice

1 – Transistor como Chave.....	3
1.1 – Definição de Corte e Saturação .....	3
1.2 – Corrente de Base .....	4
1.3 – Exercícios de Fixação .....	6
2 – Reguladores Transistorizados .....	9
2.1 – Regulador Série .....	9
2.2 – Regulador Paralelo .....	10
2.3 – Regulador com Amplificador de Erro .....	11
3 – Conexão Darlington .....	13
4 – Transistores por Efeito de Campo (FET).....	14
4.1 – JFET (Junction Field Effect transistor) .....	14
4.1.1 – Polarização do JFET.....	15
4.1.1.1 – Curvas de Dreno .....	16
4.1.1.2 – Curva de Transcondutância.....	17
4.1.1.3 – Polarização com $V_{GS}$ constante .....	18
4.1.1.4 – Autopolarização.....	20
4.1.2 – Aplicações do JFET .....	22
4.1.2.1 – Chave Analógica .....	22
4.1.2.2 – Multiplex Analógico .....	23
4.1.3 – Exercícios de Fixação.....	24
4.2 – MOSFET (Metal Oxide Semiconductor FET) .....	25
4.2.1 – MOSFET de Depleção.....	25
4.2.2 – MOSFET de Acumulação.....	26
4.2.3 – Proteção da Porta .....	28
4.2.4 – Aplicações do MOSFET .....	29
ANEXO A – Teste de Diodos e Transistores .....	31
Referências Bibliográficas.....	32

## 1 – Transistor como Chave

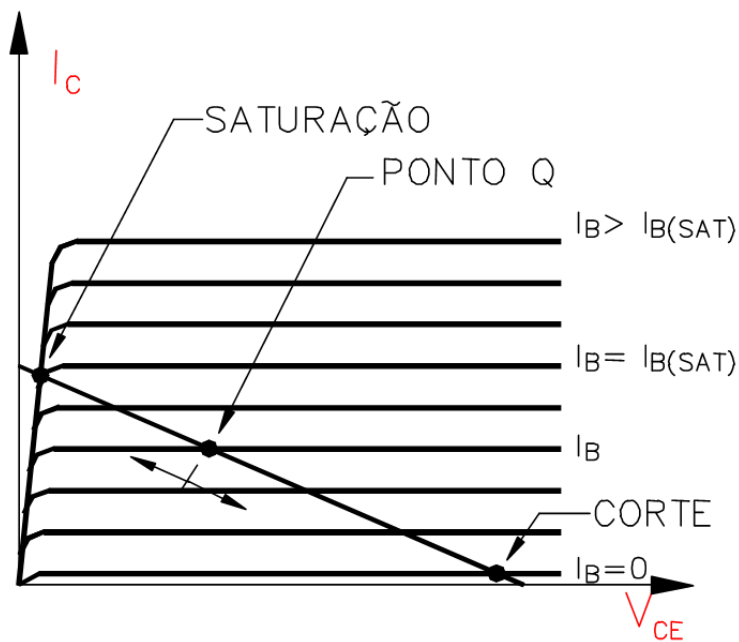
A forma mais simples de se usar um transistor é como uma chave, significando uma operação na saturação ou no corte e em nenhum outro lugar ao longo da reta de carga.

Quando o transistor está saturado, é como se houvesse uma chave fechada do coletor para o emissor. Quando o transistor está cortado, é como uma chave aberta.

### 1.1 – Definição de Corte e Saturação

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

Saturação é o ponto onde existe a interseção da reta de carga e a curva  $I_B = I_{B(SAT)}$ . Nesse ponto a corrente de coletor é máxima.



## 1.2 – Corrente de Base

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

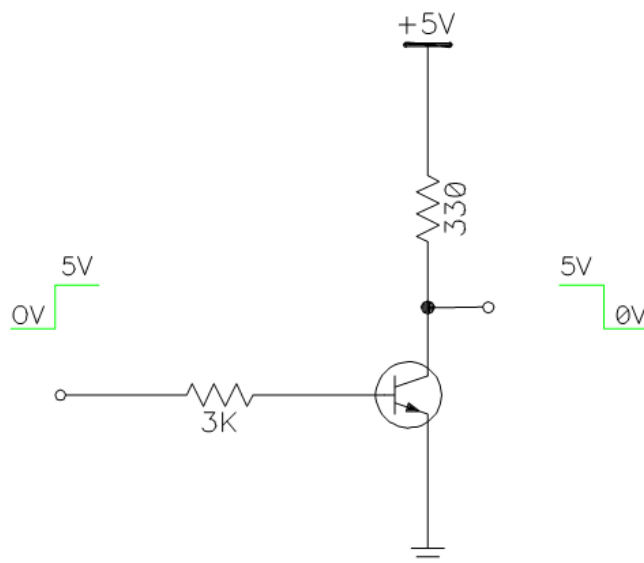
Saturação fraca significa que o transistor está levemente saturado, isto é, a corrente de base é apenas suficiente para operar o transistor na extremidade superior da reta de carga. Não é aconselhável a produção em massa de saturação fraca devido à variação de  $\beta$  e em  $I_{B(SAT)}$ .

Saturação forte significa dispor de corrente da base suficiente para saturar o transistor para todas as variações de valores de  $\beta$ . No pior caso de temperatura e corrente, a maioria dos transistores de silício de pequeno sinal tem um  $\beta$  maior do que 10.

Portanto, uma boa orientação de projeto para a saturação forte é de considerar um  $\beta_{(SAT)}=10$ , ou seja, dispor de uma corrente de base que seja de aproximadamente um décimo do valor saturado da corrente de coletor.

### EXEMPLO 1:

A abaixo mostra um circuito de chaveamento com transistor acionado por uma tensão em degrau. Qual a tensão de saída?



**SOLUÇÃO:**

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

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

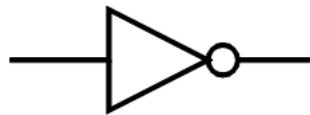
$$I_B = \frac{5 - 0,7}{3 \cdot 10^3} = 1,43mA$$

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

$$I_C = \frac{5}{330} = 15,2mA$$

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

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



**EXEMPLO 2:**

Recalcule os resistores  $R_B$  e  $R_C$  no circuito anterior para um  $I_C=10mA$ .

**SOLUÇÃO:**

- Cálculo de  $I_B$ :

Se  $I_C=10mA$  – utilizando um  $\beta$  para a saturação forte de 10 temos:

$$I_{B(SAT)} = \frac{I_C}{\beta} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{10} = 1,0mA$$

- Cálculo de  $R_C$ :

Ao considerar o transistor saturado, o  $V_{CE}$  de saturação é próximo de zero:

$$R_C = \frac{V_{CC}}{I_C} = \frac{5}{10 \cdot 10^{-3}} = 500\Omega$$

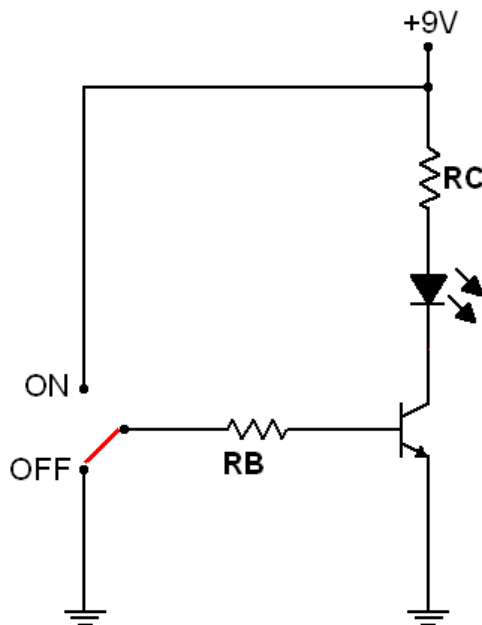
- Cálculo de  $R_B$ :

$$R_B = \frac{V_E - V_{BE}}{I_B} = \frac{5 - 0,7}{1 \cdot 10^{-3}} = 4,3k\Omega$$

### 1.3 – Exercícios de Fixação

1) No circuito abaixo, deseja-se que o LED seja acionado quando a chave estiver na posição ON e desativado quando a chave estiver na posição OFF.

Calcule os resistores  $R_C$  e  $R_B$  considerando que o transistor trabalhará na região de saturação quando a chave estiver na posição ON.



#### Parâmetros do Transistor:

$$V_{BEsat} = 0,7V$$

$$V_{CEsat} = 0,3V$$

$$\beta_{sat} = 20$$

$$I_{Cmax} = 200mA$$

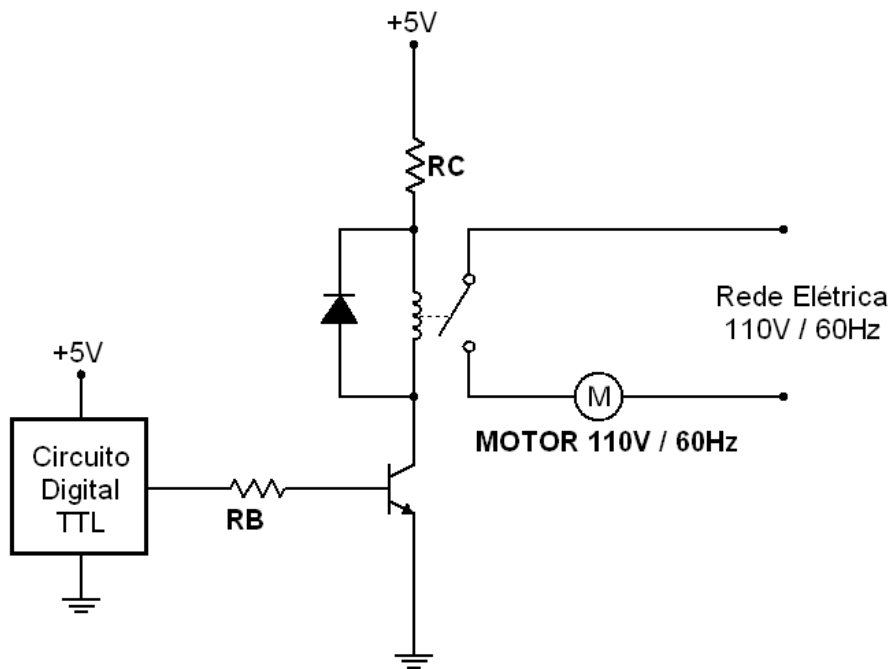
$$V_{CEmax} = 80V$$

#### Parâmetros do LED:

$$V_D = 1,5V$$

$$I_D = 25mA$$

2) Um circuito digital (TTL) foi projetado para acionar um motor de 110V / 60Hz sob determinadas condições. Para tanto, é necessário que um transistor como chave atue sobre um relé, já que nem o circuito digital, nem o transistor podem acionar este motor. O circuito utilizado para este fim está mostrado a seguir:



Neste circuito, em série com  $R_C$  coloca-se a bobina do relé. Esta bobina, normalmente, apresenta uma resistência da ordem de algumas dezenas de ohms. Por ser tão baixa, o resistor  $R_C$  tem a função de limitar a corrente no transistor, para não danificá-lo. O diodo em paralelo com a bobina serve para evitar que o transistor se danifique devido à corrente reversa gerada por ela no chaveamento do relé.

Calcule  $R_C$  e  $R_B$ .

**Parâmetros do Transistor:**

$$V_{BEsat} = 0,7V$$

$$V_{CEsat} = 0,3V$$

$$B_{sat} = 10$$

$$I_{Cmax} = 500mA$$

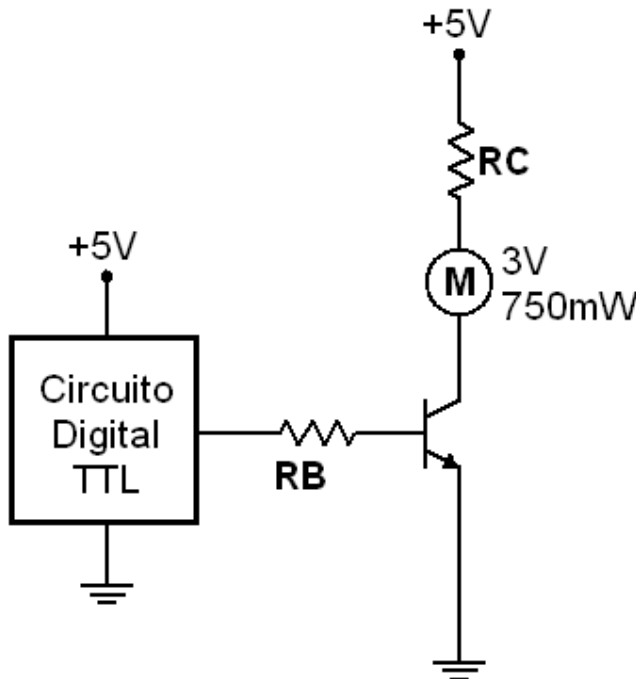
$$V_{CEmax} = 100V$$

**Parâmetros do Relé:**

$$R_R = 80\Omega$$

$$I_R = 50mA$$

**3)** Calcule os resistores de polarização do circuito abaixo, para que ele comande o acionamento de um motor DC de 3V / 750mW, a partir de um circuito digital TTL:



**Parâmetros do Transistor:**

$V_{BEsat} = 0,7V$

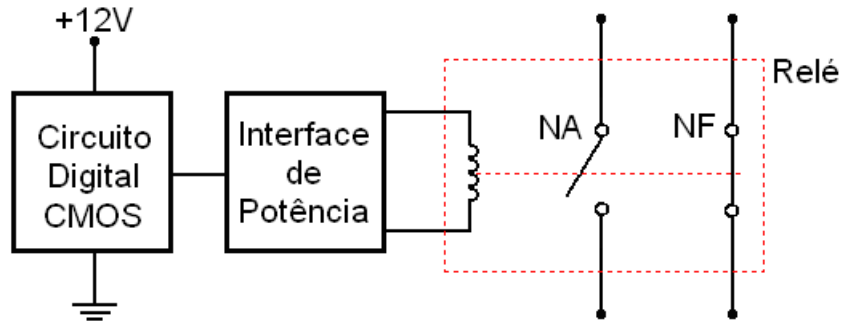
$V_{CEsat} = 0,3V$

$B_{sat} = 40$

$I_{Cmax} = 1,5A$

$V_{CEmax} = 60V$

4) Projete uma interface de potência para que um circuito digital CMOS, alimentado com 12V, acione um sistema de aquecimento de 220V / 1000W quando fornecer nível lógico "1" e um sistema de resfriamento de 220V / 500W quando fornecer nível lógico "0". Utilize um relé com contatos NA/NF.



**Parâmetros do Transistor:**

$V_{BEsat} = 0,6V$

$V_{CEsat} = 0,2V$

$B_{sat} = 10$

$I_{Cmax} = 500mA$

$V_{CEmax} = 100V$

**Parâmetros do Relé:**

$R_R = 60\Omega$

$I_R = 80mA$

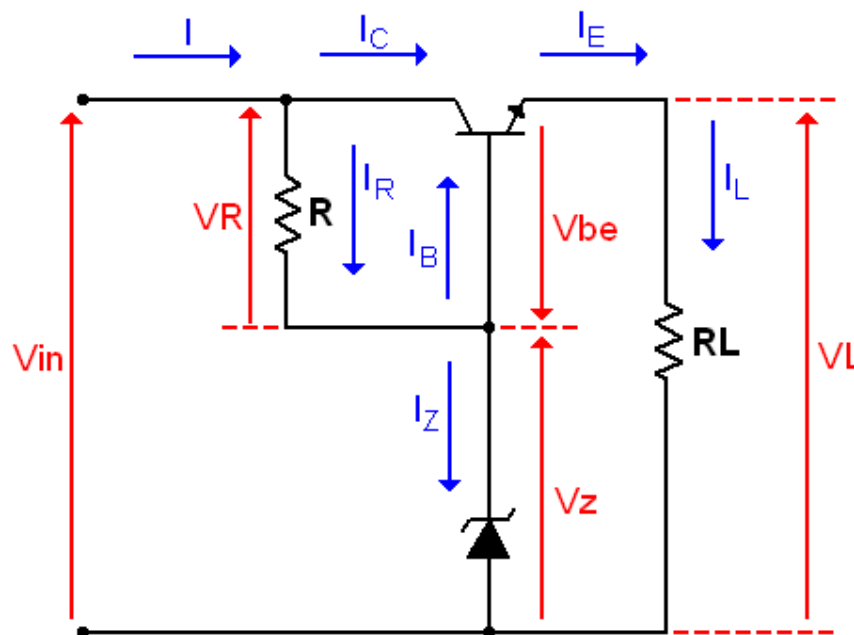


## 2 – Reguladores Transistorizados

Apresentaremos agora reguladores de tensão que utilizam de transistores bipolares como elementos de regulação.

### 2.1 – Regulador Série

A figura abaixo apresenta um regulador transistorizado em série, que é uma fonte de alimentação mais sofisticada em relação aos reguladores que utilizam apenas diodo zener.



O diodo zener atua apenas como elemento de referência enquanto que o transistor é o elemento regulador ou de controle. Observa-se que o transistor está em série com a carga, por isso o nome *regulador série*.

FUNCIONAMENTO:

- Tensão de saída:  $V_L = V_Z - V_{BE}$
- Como  $V_Z \gg V_{BE}$  então  $V_L \approx V_Z$
- Caso  $V_{in}$  aumente:
  - $V_{in} = V_R + V_Z$ , e  $V_R = V_{CB}$ , logo:

$$V_{in} = V_{CB} + V_Z \text{ e } V_{CE} = V_{CB} + V_{BE};$$

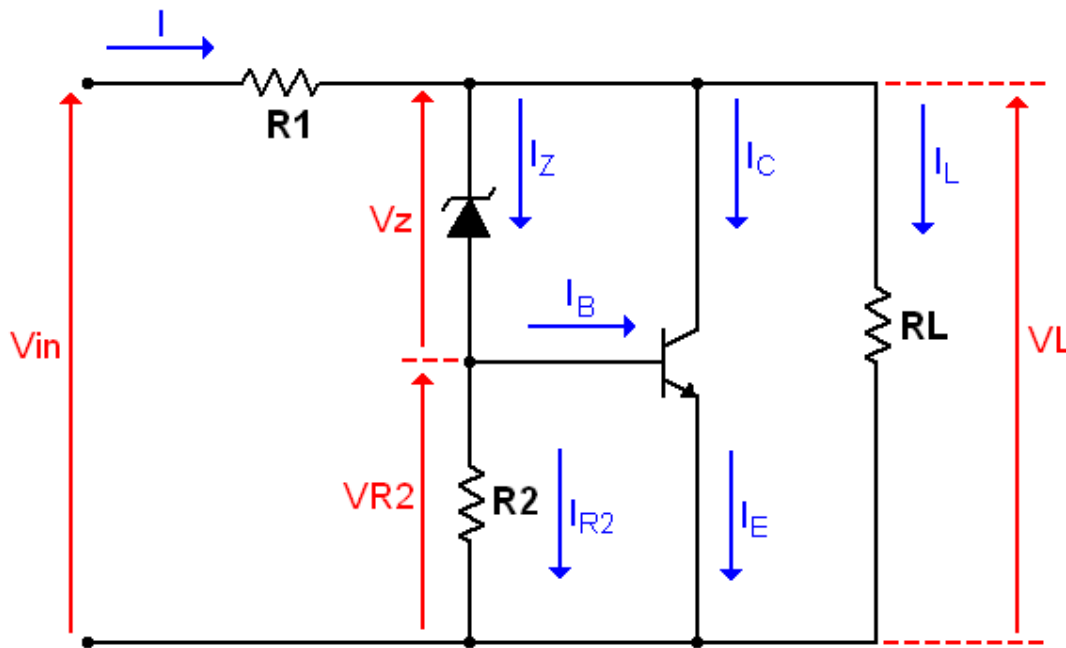
- Portanto, quando  $V_{in}$  aumenta, como  $V_Z$  é constante,  $V_{CB}$  também aumentará provocando um aumento de  $V_{CE}$ , de modo a suprir a variação na entrada, mantendo  $V_L$  constante:

$$V_L = V_{in} - V_{CE};$$

## 2.2 – Regulador Paralelo

A exemplo do regulador série, o transistor atua como elemento de controle e o zener como elemento de referência.

Nesse tipo de regulador, a carga fica em paralelo com o transistor, por isso o nome *regulador paralelo*, o circuito é mostrado abaixo:



FUNCIONAMENTO:

- $V_{CB} = V_Z$ , como  $V_Z$  é constante,  $V_{CB}$  será constante;
- $V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$ , como  $V_{CB} \gg V_{BE}$  logo:
  - $V_{CE} \approx V_{CB}$ , portanto  $V_{CE} \approx V_Z$

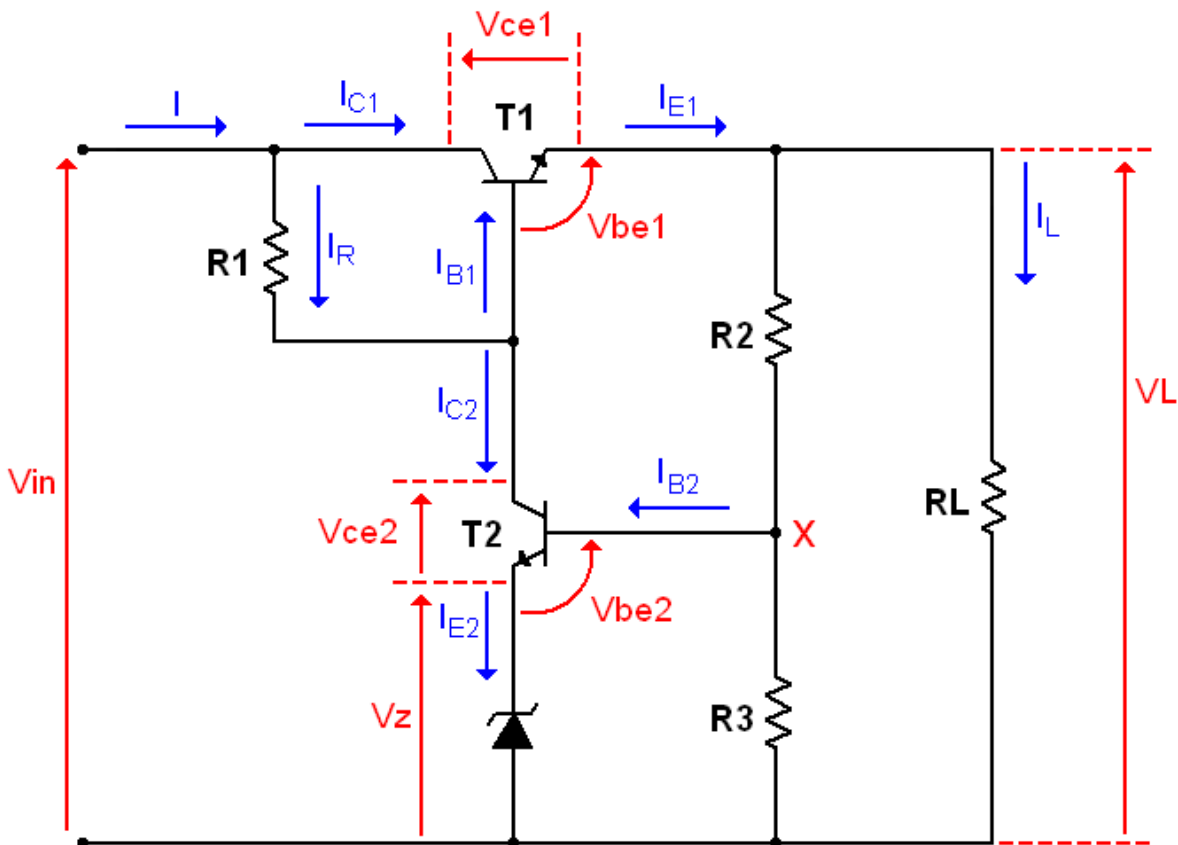
Ao variarmos a tensão de entrada, dentro de certos limites, como  $V_Z$  é fixa, variará  $V_{BE}$ , variando a corrente  $I_B$  e conseqüentemente  $I_C$ . Em outras palavras, variando-se a tensão de entrada ocorrerá uma atuação na corrente de base a qual controla a corrente de coletor.

Neste caso,  $V_{CE}$  tende a permanecer constante desde que  $I_Z$  não assuma valores menores que  $I_{Z(MIN)}$  e maiores que  $I_{Z(MAX)}$ .

### 2.3 – Regulador com Amplificador de Erro

O regulador com amplificador de erro torna o circuito mais sensível às variações da tensão de entrada, ou variações da corrente de carga, através da introdução de um transistor junto ao elemento de referência.

A figura abaixo ilustra esse tipo de regulador:



Os elementos que compõem o circuito possuem as seguintes funções:

- Diodo Zener: é utilizado como elemento de referência de tensão;

- Transistor T1: é o elemento de controle, que irá controlar a tensão de saída a partir de uma tensão de correção a ele enviada através de um circuito comparador;
- Transistor T2: é basicamente um comparador de tensão DC, ou seja, compara duas tensões,  $V_{R2}$  e  $V_{R3}$ , sendo a tensão  $V_{R3}$  fixa (tensão de referência), cuja finalidade é controlar a tensão de polarização do circuito de controle. Qualquer diferença de tensão entre os dois resistores irá fornecer à saída do comparador uma tensão de referência que será aplicada ao circuito de controle.

#### FUNCIONAMENTO:

Quando houver uma variação da tensão de entrada, a tendência é ocorrer uma variação da tensão de saída.

Supondo que  $V_{in}$  aumente, a tensão nos extremos de  $R_L$  tenderá a aumentar, aumentando a tensão  $V_{R2}$  e  $V_{R3}$ , mas, como a tensão no emissor de  $T_2$  é fixada por  $V_Z$ , então um aumento de tensão no ponto "X" provocará um aumento de  $V_{BE2}$ , que aumentará  $I_{B2}$  e conseqüentemente  $I_{C2}$ .

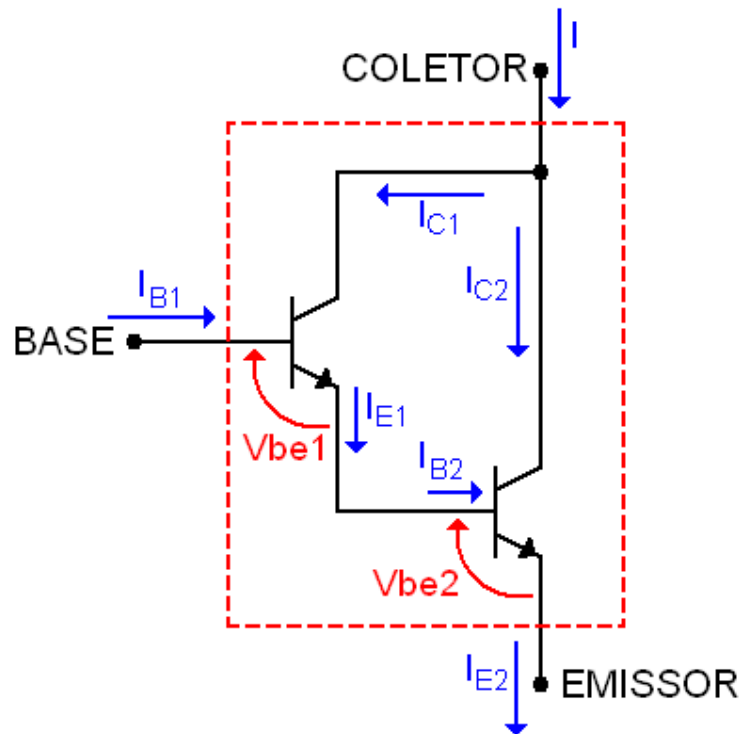
Quando  $I_{C2}$  aumenta, haverá um aumento da tensão em  $R_1$  ( $V_{R1}$ ), uma vez que a tensão do emissor de  $T_2$  é fixada pela tensão de zener ( $V_Z$ ).

Como  $V_{BE1}$  é fixa, então um aumento de  $V_{R1}$  provocará um aumento de  $V_{CE1}$ .

Lembrar que  $V_{R1} = V_{CB1}$  e que  $V_{CB1} + V_{BE1} = V_{CE1}$  e  $V_L = \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right)(V_Z + V_{BE2})$ .

### 3 – Conexão Darlington

A conexão Darlington é uma forma de acoplamento direto entre dois transistores, muito utilizada, como mostra da figura abaixo:



Trata-se de dois transistores T1 e T2, respectivamente com  $\beta_1$  e  $\beta_2$ , ligados em cascata, possuindo as seguintes características:

- $\beta_T = \beta_1 \cdot \beta_2 = \frac{i_C}{i_B}$
- $i_{E2} = \beta_T \cdot i_{B1}$
- $V_{BE} = V_{BE1} + V_{BE2}$

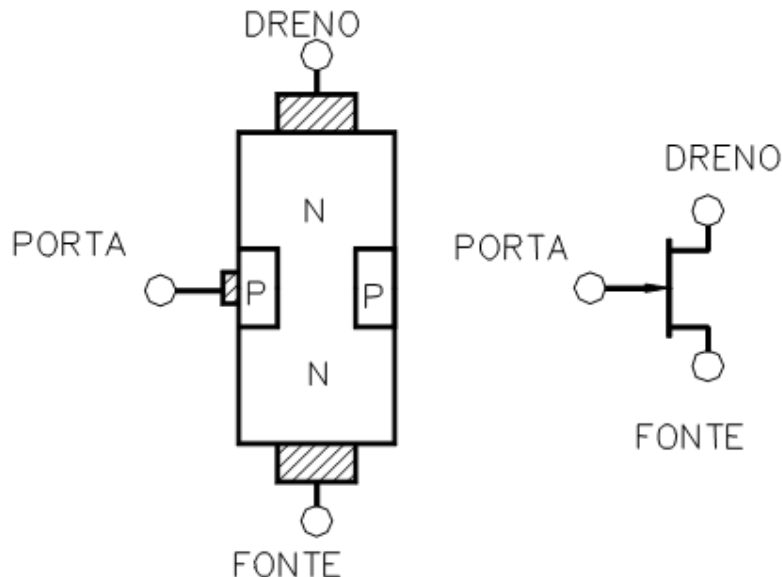
## 4 – Transistores por Efeito de Campo (FET)

Até agora foi estudado os transistores bipolares, se baseiam em dois tipos de cargas: lacunas e elétrons, e são utilizados amplamente em circuitos lineares. No entanto existem aplicações nos quais os transistores unipolares com a sua alta impedância de entrada são uma alternativa melhor. Este tipo de transistor depende de um só tipo de carga, daí o nome unipolar. Há dois tipos básicos: os transistores de efeito de campo de junção (JFET - Junction Field Effect transistor) e os transistores de efeito de campo de óxido metálico (MOSFET).

Os transistores bipolares são dispositivos controlados por corrente, isto é, a corrente de coletor é controlada pela corrente de base, enquanto nos transistores de efeito de campo (FET) a corrente é controlada pela tensão ou pelo campo elétrico.

### 4.1 – JFET (Junction Field Effect transistor)

Na figura abaixo, é mostrada a estrutura e símbolo de um transistor de efeito de campo de junção ou simplesmente JFET canal N:



O JFET é formado por três terminais:

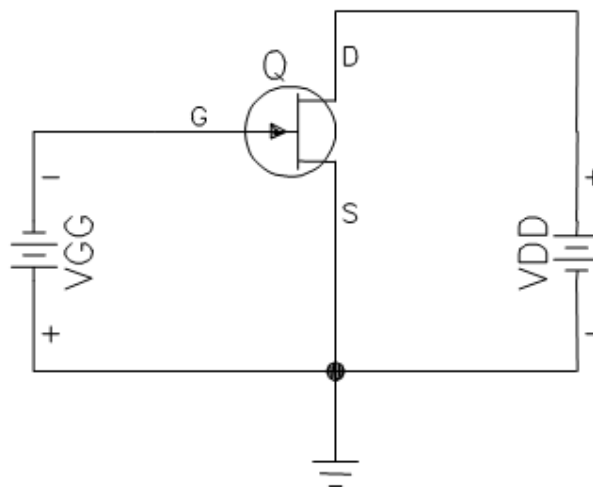
- **Fonte** (*source*) – por onde os elétrons entram;
- **Dreno** (*drain*) – de onde os elétrons saem;
- **Porta** (*gate*) – faz o controle da passagem dos elétrons.

O transistor pode ser um dispositivo com canal n (condução por elétrons) ou com canal p (condução por lacunas). Tudo que for dito sobre o dispositivo com canal n se aplica ao com canal p com sinais opostos de tensão e corrente.

O princípio de funcionamento do JFET é bem simples. O objetivo é controlar a corrente  $i_D$  que circula entre a fonte e o dreno. Isto é feito aplicando-se uma tensão (negativa) na porta.

#### 4.1.1 – Polarização do JFET

A figura abaixo mostra a polarização convencional de um JFET com canal n.



Uma alimentação positiva  $V_{DD}$  é ligada entre o dreno e a fonte, estabelecendo um fluxo de corrente através do canal. Esta corrente também depende da largura do canal.

Uma ligação negativa  $V_{GG}$  é ligada entre a porta e a fonte. Com isto a porta fica com uma polarização reversa, circulando apenas uma corrente de fuga, portanto, há uma alta impedância entre a porta e a fonte. A polarização reversa cria camadas de depleção em volta das regiões p e isto estreita o canal

condutor (D-S). Quanto mais negativa a tensão  $V_{GG}$ , mais estreito torna-se o canal.

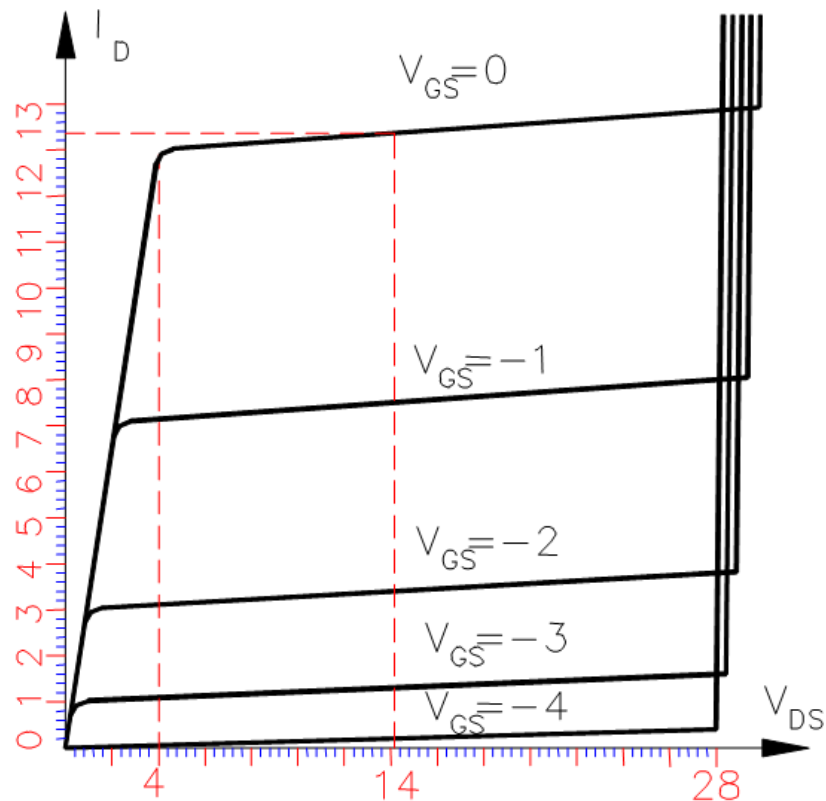
Para um dado  $V_{GG}$ , as camadas de depleção tocam-se e o canal condutor (D-S) desaparece. Neste caso, a corrente de dreno está cortada. A tensão  $V_{GG}$  que produz o corte é simbolizada por  $V_{GS(off)}$ .

#### 4.1.1.1 – Curvas de Dreno

Para um valor constante de  $V_{GS}$ , o JFET age como um dispositivo resistivo linear (na região ôhmica) até atingir a condição de pinçamento ou estrangulamento. Acima da condição de estrangulamento e antes da ruptura por avalanche, a corrente de dreno permanece aproximadamente constante.

Os índices  $I_{DSS}$  referem-se à corrente do dreno para a fonte com a porta em curto ( $V_{GS}=0V$ ).  $I_{DSS}$  é a corrente de dreno máxima que um JFET pode produzir.

Na figura a seguir, é mostrado um exemplo de curva para um JFET:





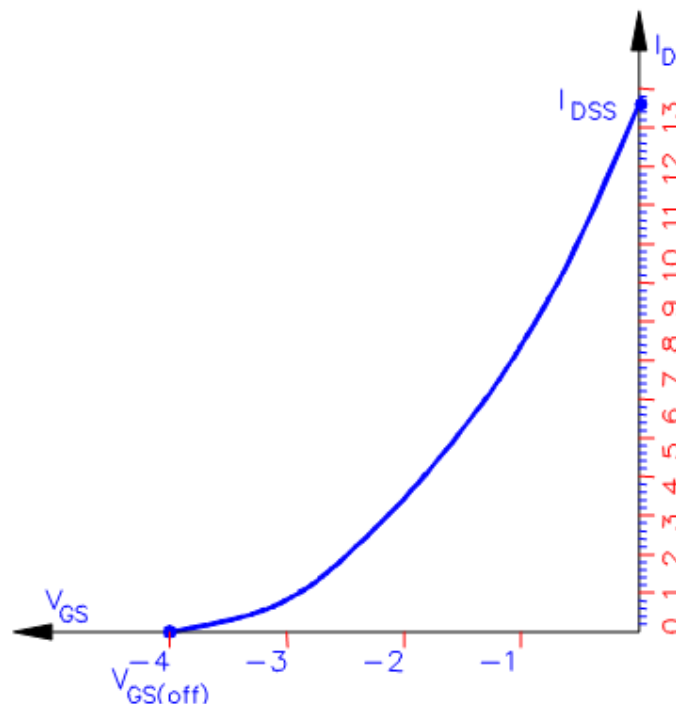
Quando o JFET está saturado (na região ôhmica),  $V_{DS}$  situa-se entre 0V e 4V, dependendo da reta de carga. A tensão de saturação mais alta (4V) é igual à intensidade da tensão de corte da porta-fonte ( $V_{GS(off)} = -4V$ ). Esta é uma propriedade inerente a todos os JFET.

Para polarizar um transistor JFET é necessário saber a função do estágio, isto é, se o mesmo irá trabalhar como amplificador ou como resistor controlado por tensão. Como amplificador, a região de trabalho é o trecho da curva, na figura, após a condição de pinçamento e à esquerda da região de tensão  $V_{DS}$  de ruptura. Se for como resistor controlado por tensão a região de trabalho é entre  $V_{DS}$  igual a zero e antes de atingir a condição de pinçamento.

#### 4.1.1.2 – Curva de Transcondutância

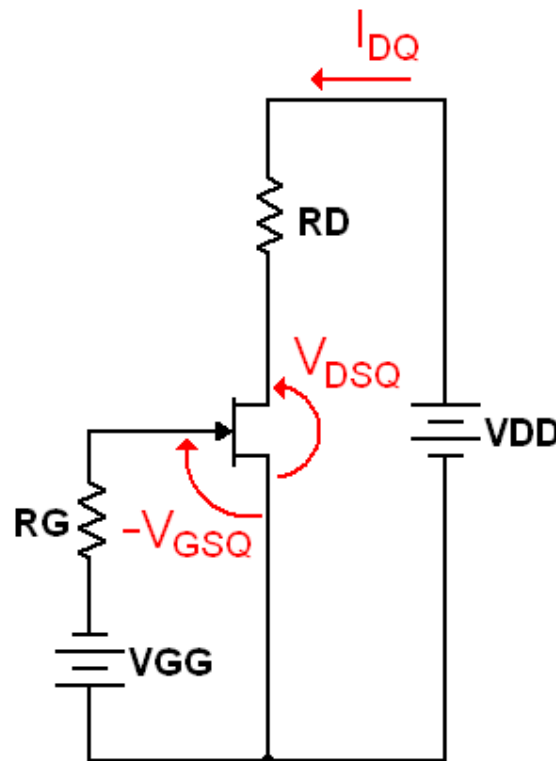
A curva de transcondutância ou transferência de um JFET é um gráfico da corrente de saída versus a tensão de entrada,  $I_D$  em função de  $V_{GS}$ . A sua equação é:

$$i_D = i_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)^2$$



#### 4.1.1.3 – Polarização com $V_{GS}$ constante

Neste tipo de polarização, impõe-se uma tensão  $V_{GSQ}$  constante na porta através de  $V_{GG}$  para se obter a corrente  $I_{DQ}$  desejada, a partir da curva de transcondutância do componente.



A impedância vista pelo terminal da porta é muito alta, pois junção está polarizada reversamente. Por isso,  $V_{GSQ} = -V_{GG}$ . Assim o resistor  $R_G$  é utilizado apenas para definir a impedância de entrada do circuito, não influenciando na polarização do JFET.

Logo, basta calcular o valor de  $R_D$  para polarizar o transistor.

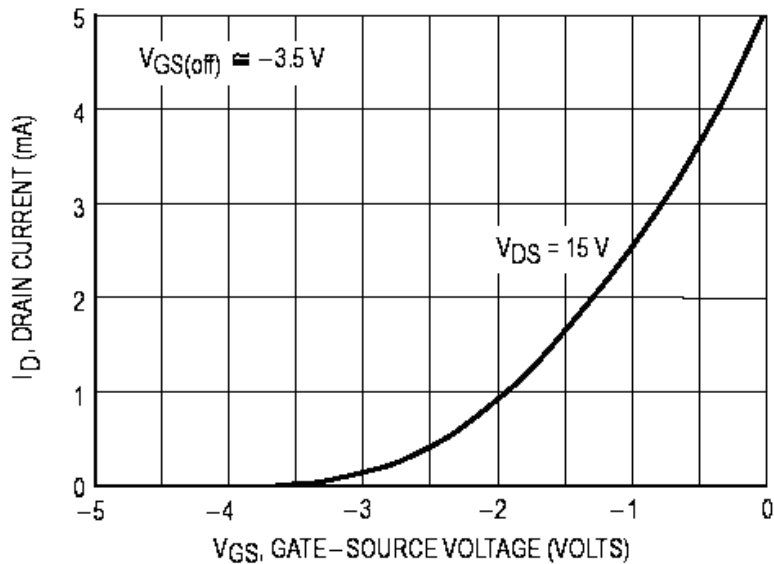
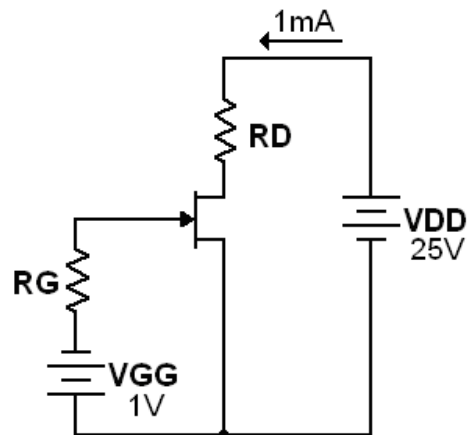
Da malha de saída obtemos:

$$R_D = \frac{V_{DD} - V_{DSQ}}{I_{DQ}}$$

EXEMPLO:

Polarizar o JFET do circuito abaixo no seguinte ponto quiescente:

$$I_{DQ} = 1\text{mA}; V_{DSQ} = 15\text{V}; V_{GSQ} = -1\text{V}$$



Para um  $V_{GSQ} = -1V$ , temos  $I_{DQ} = 2,5mA$ , portanto:

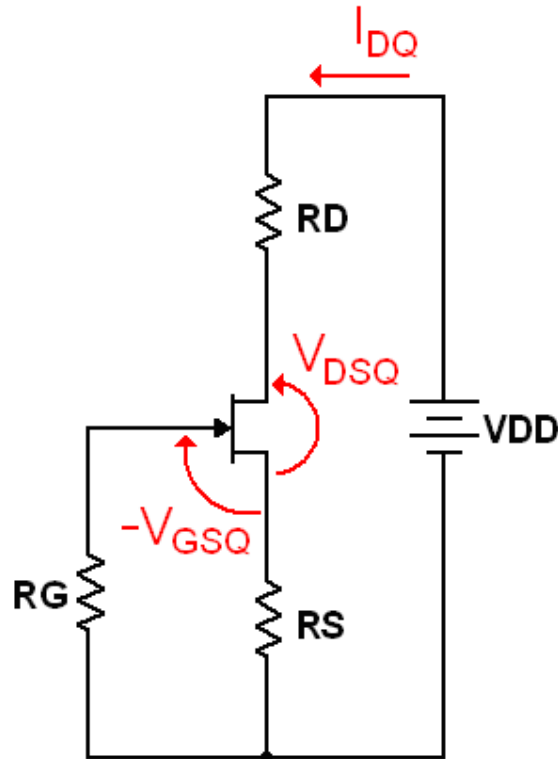
$$R_D = \frac{V_{DD} - V_{DSQ}}{I_{DQ}} = \frac{25 - 15}{2,5 \cdot 10^{-3}} = 4k\Omega$$

Este tipo de polarização apresenta dois grandes inconvenientes:

- 1) Necessita de duas fontes de alimentação;
- 2) Como os parâmetros do JFET apresentam tolerâncias altas, seu ponto quiescente pode ter variações.

#### 4.1.1.4 – Autopolarização

Esta polarização utiliza apenas uma fonte de alimentação, eliminando-se  $V_{GG}$ . Isto é feito utilizando-se um resistor  $R_S$  em série com a fonte do JFET, para gerar uma tensão reversa na junção porta-fonte.



O resistor  $R_S$  produz uma realimentação negativa. Se a corrente de dreno aumenta, a tensão sobre  $R_S$  também aumenta. Isto faz aumentar a tensão reversa porta-fonte ( $V_{GS}$ ) estreitando o canal, reduzindo novamente a corrente  $i_D$ . Por isso o nome autopolarização.

Podemos determinar os resistores de polarização através da curva de transferência do JFET e o ponto quiescente desejado.

Da malha de entrada obtém-se:

$$-V_{GS} = R_S i_D - R_G I_G$$

Como  $i_G$  é praticamente nula devido à alta impedância de entrada, temos:

$$-V_{GS} = R_S i_D$$

Pela curva de transferência com valores típicos, através dos pontos  $I_{DQ}$  e  $V_{GSQ}$  previamente escolhidos, determina-se o resistor  $R_S$ , pela malha de entrada:

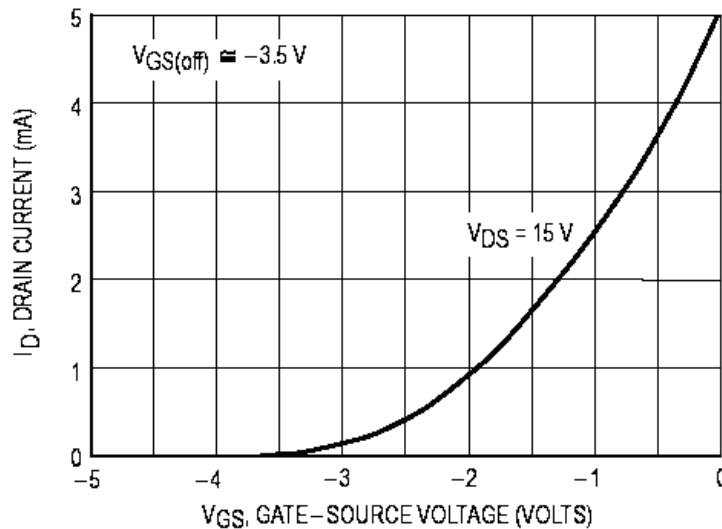
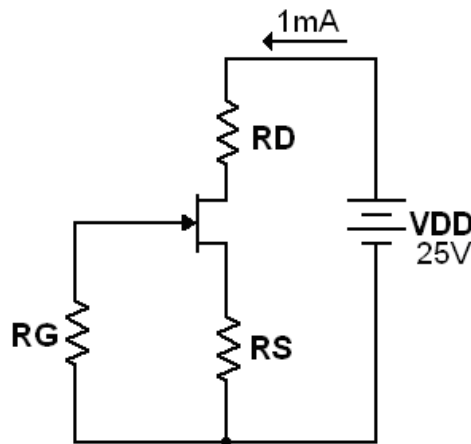
$$R_S = \frac{-V_{GSQ}}{i_{DQ}}$$

Pela malha de saída temos:

$$R_D = \frac{V_{DD} - V_{DSQ} + V_{GSQ}}{i_{DQ}}$$

EXEMPLO:

Dado o circuito abaixo, calcule os resistores  $R_D$  e  $R_S$  para a autopolarização do JFET, para  $I_{DQ} = 1\text{mA}$  e  $V_{DSQ} = 15\text{V}$ .





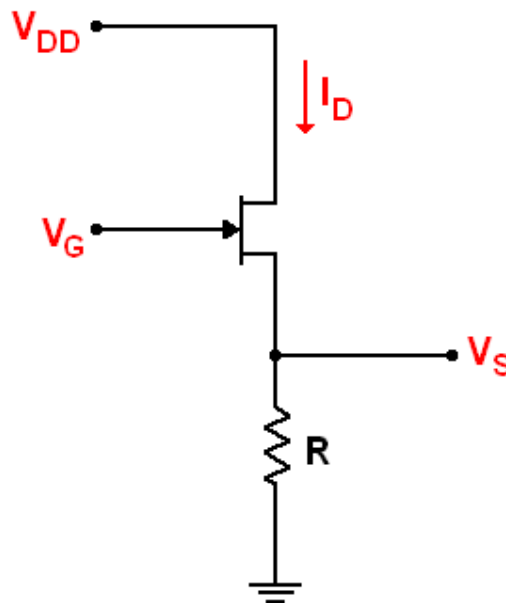
A partir da curva de transferência obtemos  $V_{GSQ} = -2V$  e, sendo assim:

$$R_S = \frac{-V_{GSQ}}{i_{DQ}} = \frac{-(-2)}{1.10^{-3}} = 2k\Omega \quad R_D = \frac{V_{DD} - V_{DSQ} + V_{GSQ}}{i_{DQ}} = \frac{25 - 15 - 2}{1.10^{-3}} = 8k\Omega$$

#### 4.1.2 – Aplicações do JFET

##### 4.1.2.1 – Chave Analógica

O circuito abaixo mostra um JFET polarizado para funcionar nas regiões de corte e saturação, como uma chave DC:



Quando  $V_G < V_{GS(OFF)}$ , o JFET encontra-se na região de corte, ou seja,  $I_D = 0$  e  $V_S \approx 0$ . Portanto, é como se ele funcionasse como uma chave aberta.

Quando  $V_G = 0V$ , para um valor adequado de  $R$ , a corrente  $I_D$  pode levar o JFET a operar na região de saturação. Portanto, é como se ele funcionasse como uma chave fechada, com  $V_S \approx V_{DD}$ .

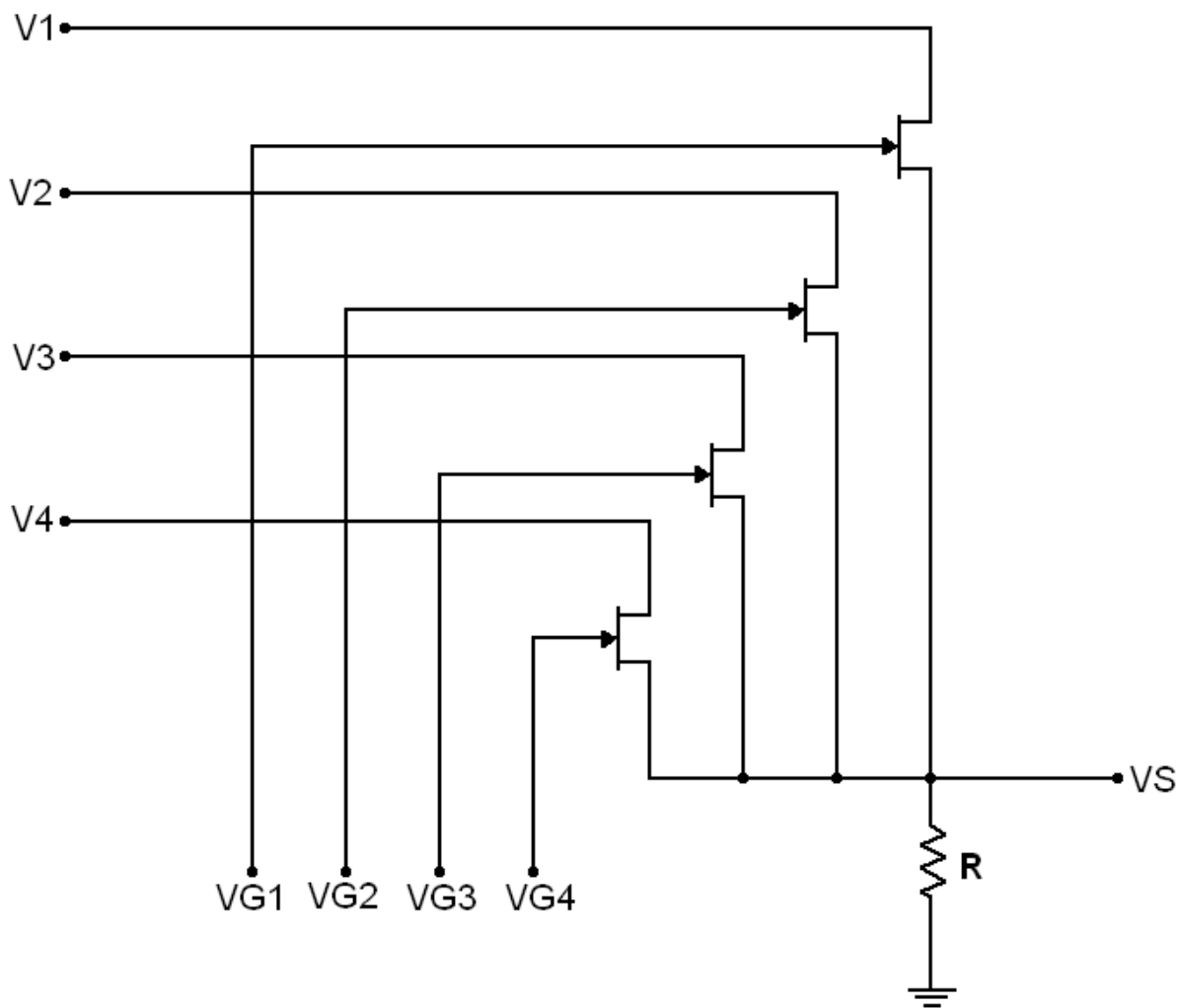
Na região de saturação, a resistência entre dreno e fonte, denominada  $R_{DS(on)}$ , pode ser calculada por:

$$R_{DS(on)} = \frac{V_{DS(sat)}}{i_{D(sat)}}$$

Portanto, quando  $V_{GS} = 0V$  a tensão  $V_{DD}$  fica dividida entre  $R_{DS(on)}$  e  $R$ . Para minimizar esse efeito, utiliza-se  $R \gg R_{DS(on)}$ .

#### 4.1.2.2 – Multiplex Analógico

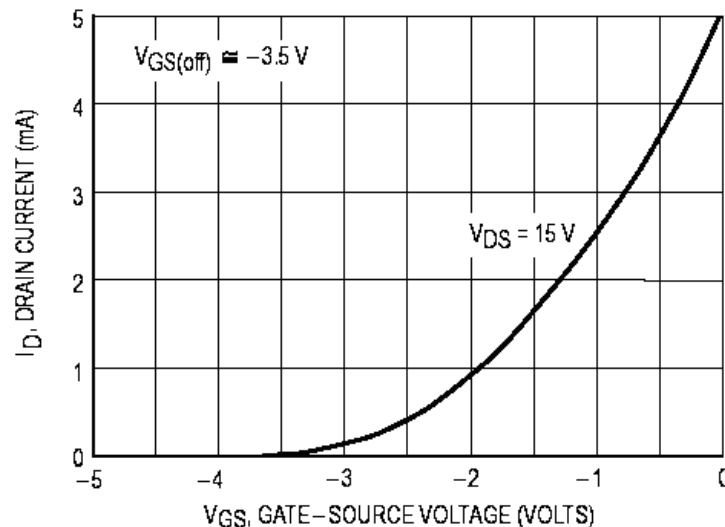
Ligando-se várias chaves analógicas em paralelo, tem-se um multiplexador de sinais analógicos, que pode selecionar uma entre as diversas informações presentes em suas entradas, para ser transmitida a outro circuito. A figura abaixo nos mostra um multiplex de 4 canais:





### 4.1.3 – Exercícios de Fixação

- 1) O que significa tensão de estrangulamento?
- 2) Qual o significado de  $I_{DSS}$ ?
- 3) O que é tensão de corte?
- 4) Qual a relação entre a tensão de estrangulamento e a tensão de corte?
- 5) Polarize o JFET com as características abaixo com  $V_{GS}$  constante para  $V_{DD} = 28V$ ,  $I_{DQ} = 3,5mA$  e  $V_{DSQ} = 15V$ .



- 6) Polarize o mesmo JFET pelo processo de autopolarização para as mesmas condições do exercício anterior.
- 7) Implemente uma chave analógica que funcione de forma inversa à da apresentada no tópico 4.1.2.1, ou seja, para:

$$V_G = 0V \Rightarrow V_S \cong 0V$$

$$V_G < V_{G(off)} \Rightarrow V_S \cong V_E$$





## 4.2 – MOSFET (Metal Oxide Semiconductor FET)

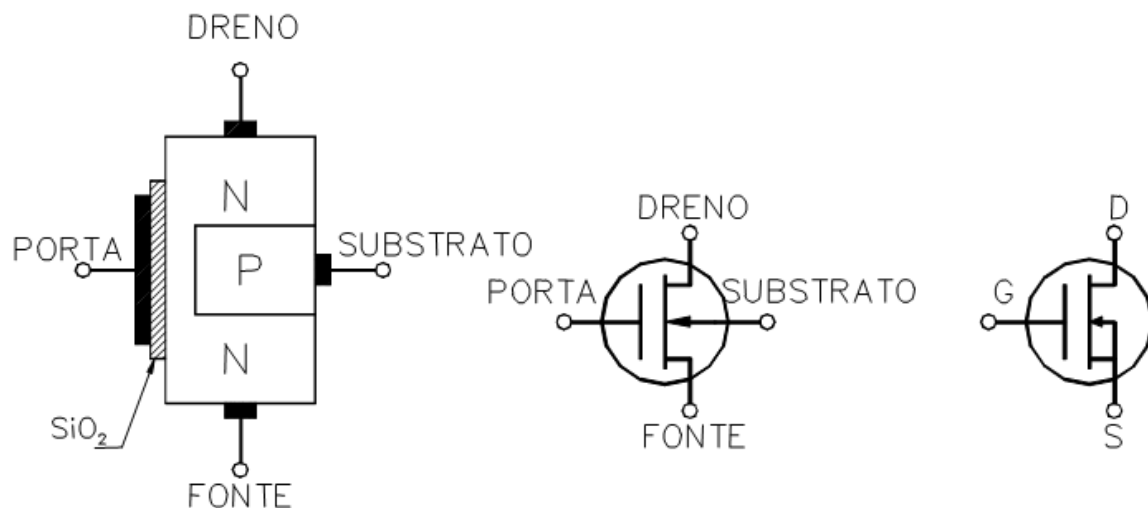
O FET de óxido de semicondutor e metal, MOSFET, tem uma fonte, uma porta e um dreno. A diferença básica para o JFET é que a porta é isolada eletricamente do canal. Por isso, a corrente de porta é extremamente pequena, para qualquer tensão positiva ou negativa.

Existem dois tipos de MOSFET que serão estudados: MOSFET de depleção e MOSFET de acumulação.

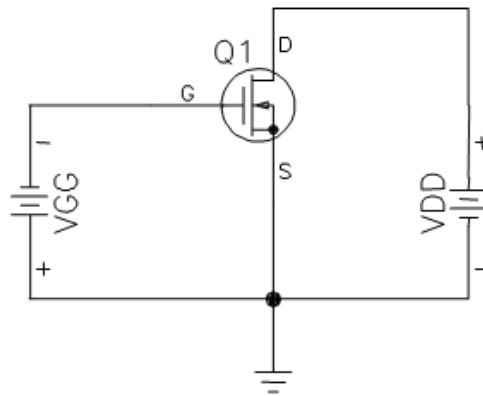
### 4.2.1 – MOSFET de Depleção

A figura a seguir mostra um MOSFET de modo depleção canal n e o seu símbolo. O substrato em geral é conectado a fonte (pelo fabricante). Em algumas aplicações usa-se o substrato para controlar também a corrente de dreno. Neste caso o encapsulamento tem quatro terminais.

Os elétrons livres podem fluir da fonte para o dreno através do material n. A região p é chamada de substrato, e ela cria um estreitamento para a passagem dos elétrons livres da fonte ao dreno.



A fina camada de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), que é um isolante, impede a passagem de corrente da porta para o material n.

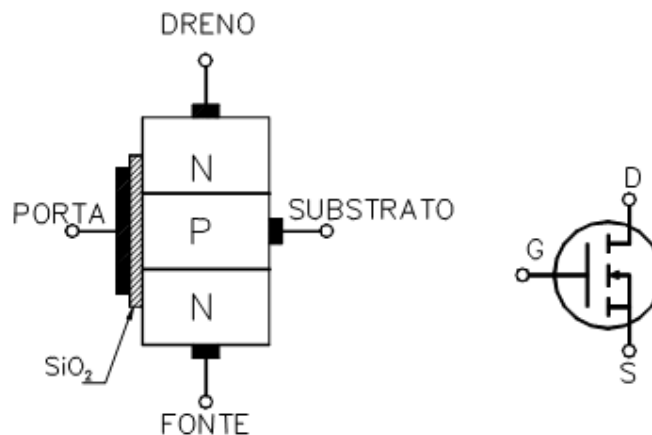


A anterior mostra o MOSFET de modo depleção com uma tensão de porta negativa. A tensão  $V_{DD}$  força os elétrons livres a fluir através do material n. Como no JFET, a tensão de porta controla a largura do canal. Quanto mais negativa a tensão, menor a corrente de dreno. Até um momento que a camada de depleção fecha o canal e impede fluxo dos elétrons livres. Com  $V_{GS}$  negativo o funcionamento é similar ao JFET.

Como a porta está isolada eletricamente do canal, pode-se aplicar uma tensão positiva na porta (inversão de polaridade bateria  $V_{GG}$  do circuito da figura anterior). A tensão positiva na porta aumenta o número de elétrons livres que fluem através do canal. Quanto maior a tensão, maior a corrente de dreno. Isto é que a diferencia de um JFET.

#### 4.2.2 – MOSFET de Acumulação

O MOSFET de modo crescimento ou intensificação é uma evolução do MOSFET de modo depleção e de uso generalizado na indústria eletrônica em especial nos circuitos digitais.



A anterior mostra um MOSFET de canal n do tipo crescimento e o seu símbolo. O substrato estende-se por todo caminho até o dióxido de silício. Não existe mais um canal n ligando a fonte e o dreno.

Quando a tensão da porta é zero, a alimentação  $V_{DD}$  força a ida dos elétrons livres da fonte para o dreno, mas substrato p tem apenas uns poucos elétrons livres produzidos termicamente. Assim, quando a tensão da porta é zero, o MOSFET fica no estado desligado (Off). Isto é totalmente diferente dos dispositivos JFET e MOSFET de modo depleção.

Quando a tensão na porta é positiva, ela atrai elétrons livres na região p. Os elétrons livres recombina-se com as lacunas na região próxima ao dióxido de silício. Quando a tensão é suficientemente positiva, todas as lacunas encostadas a dióxido de silício são preenchidas e elétrons livres começam a fluir da fonte para o dreno. O efeito é o mesmo que a criação de uma fina camada de material tipo n próximo ao dióxido de silício. Essa camada é chamada de camada de inversão tipo n. Quando ela existe, o dispositivo, normalmente aberto, de repente conduz e os elétrons livres fluem facilmente da fonte para o dreno.

O  $V_{GS}$  mínimo que cria a camada de inversão tipo n é chamado tensão de limiar, simbolizado por  $V_{GS(th)}$ . Quando  $V_{GS}$  é menor que  $V_{GS(th)}$ , a corrente de dreno é zero. Mas quando  $V_{GS}$  é maior  $V_{GS(th)}$ , uma camada de inversão tipo n conecta a fonte ao dreno e a corrente de dreno é alta.  $V_{GS(th)}$  pode variar de menos de 1V até mais de 5V dependendo do MOSFET.

A figura abaixo mostra as curvas  $I_D \times V_{DS}$  e  $I_D \times V_{GS}$  do MOSFET de modo intensificação e reta de carga típica. No gráfico  $I_D \times V_{DS}$ , a curva mais baixa é para  $V_{GS(th)}$ . Quando  $V_{GS}$  maior que  $V_{GS(th)}$ , a corrente de dreno é controlada pela tensão da porta.

A curva  $I_D \times V_{GS}$ , é a curva de transcondutância e é uma curva quadrática. O início da parábola está em  $V_{GS(th)}$ :

$$I_D = k(V_{GS} - V_{GS(th)})^2$$

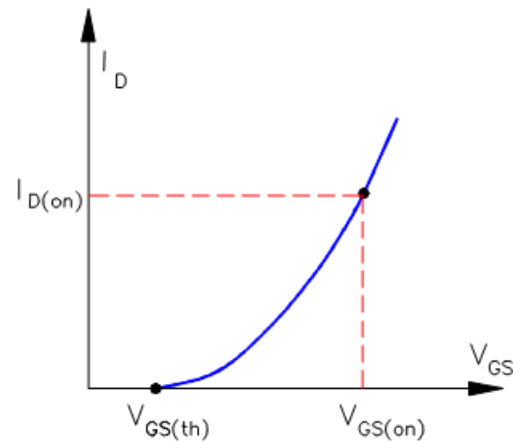
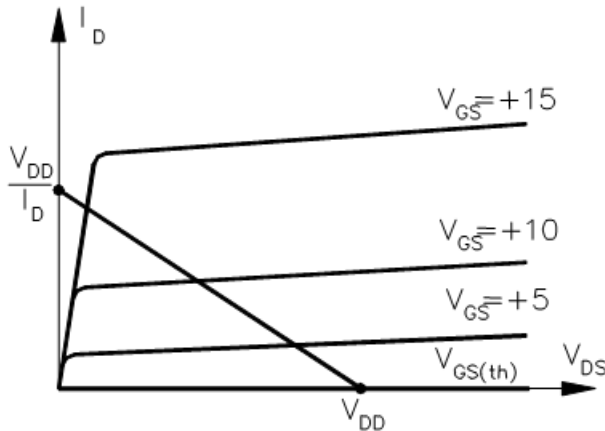
onde k é uma constante que depende do MOSFET em particular.

O fabricante fornece os valores de  $I_{D(on)}$  e  $V_{GS(on)}$ . Então reescrevendo a fórmula:

$$I_D = k \cdot I_{D(on)}$$

Onde:

$$k = \left( \frac{V_{GS} - V_{GS(th)}}{V_{GS(on)} - V_{GS(th)}} \right)^2$$



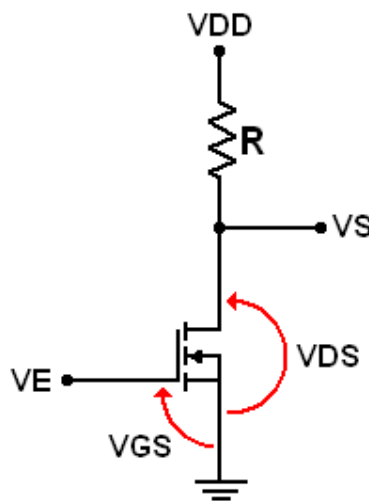
#### 4.2.3 – Proteção da Porta

Os MOSFET têm uma fina camada de dióxido de silício, um isolante que impede a circulação de corrente de porta tanto para tensões positivas como negativas. Essa camada isolante é mantida tão fina quanto possível para dar a porta um melhor controle sobre a corrente de dreno. Como a camada é muito fina, é fácil destruí-la com uma tensão porta – fonte excessiva. Além da aplicação direta de tensão excessiva entre a porta fonte, pode-se destruir a camada isolante devido a transientes de tensão causados por retirada/colocação do componente com o sistema ligado. O simples ato de tocar um MOSFET pode depositar cargas estáticas suficientes que excedam a especificação de  $V_{GS}$  máximo. Alguns MOSFET são protegidos por diodos zener internos em paralelo com a porta e a fonte. Mas eles têm como inconveniente, a diminuição da impedância de entrada.

#### 4.2.4 – Aplicações do MOSFET

O MOSFET é muito utilizado na fabricação de circuitos integrados de portas lógicas, registradores e memórias, entre outros. Isto se justifica pelo fato desse dispositivo dissipar baixíssima potência e, também, por possibilitar a integração em larga escala (ocupa uma pequena área).

Inicialmente analisemos um MOSFET de acumulação canal n funcionando como chave DC:



Para este circuito, analisaremos as seguintes situações:

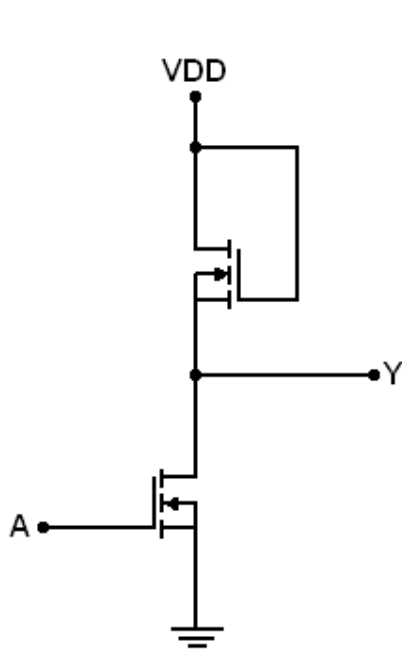
- Se  $V_E = V_{GS} = 0V$ , o transistor corta, pois  $V_{GS} < V_{GS(th)}$  e, portanto,  $V_S = V_{DS} = V_{DD}$ .
- Se  $V_E = V_{GS} = V_{DD}$ , para um valor adequado de  $R$ , o transistor satura e, portanto,  $V_S = V_{DS(sat)} \approx 0V$ .

Conclui-se que o circuito funciona como um inversor, pois com  $V_E = 0V$  tem-se  $V_S = V_{DD}$  e com  $V_E = V_{DD}$  temos  $V_S = 0V$ .

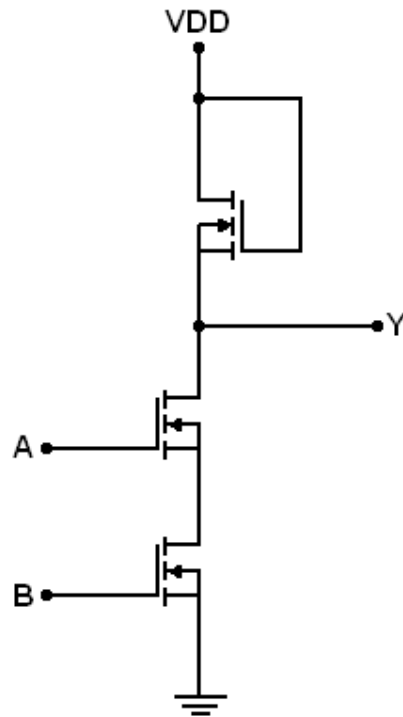
Para a implementação de circuitos lógicos utiliza-se, basicamente, o MOSFET como chave. Porém, como o resistor ocupa uma área muito grande no circuito integrado, ele é substituído por um MOSFET atuando como resistor de carga.

A figura a seguir mostra a implementação de duas portas lógicas utilizando MOSFET como componente:

### PORTA NOT

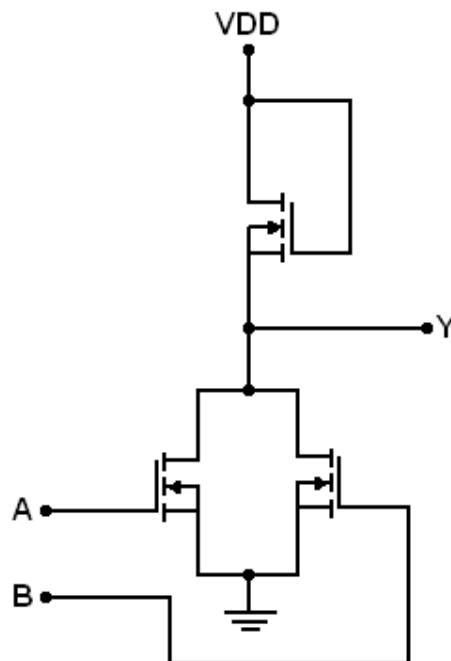


### PORTA NAND



EXERCÍCIO:

Prove que o circuito abaixo atua como uma porta NOR.



## **ANEXO A – Teste de Diodos e Transistores**

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

- Teste de funcionamento de um diodo com um ohmímetro.

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

- Teste de funcionamento de um transistor npn com um ohmímetro.

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

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



### Referências Bibliográficas

- BERTOLI, Roberto A. **Apostila de Eletrônica Básica.** 96 p.
- ZUIM, Edgar. **Apostila Reguladores.** 16 p.
- MARQUEZ, Ângelo E. B. CRUZ, Eduardo C. A. CHOUERI JÚNIOR, Salomão. **Dispositivos Semicondutores: Diodos e Transistores.** 7<sup>a</sup> ed. São Paulo: Érica, 2002. 389 p.