



**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MINAS GERAIS**

**Docente: Rildo Afonso de Almeida**

**Dispositivos Eletrônicos**



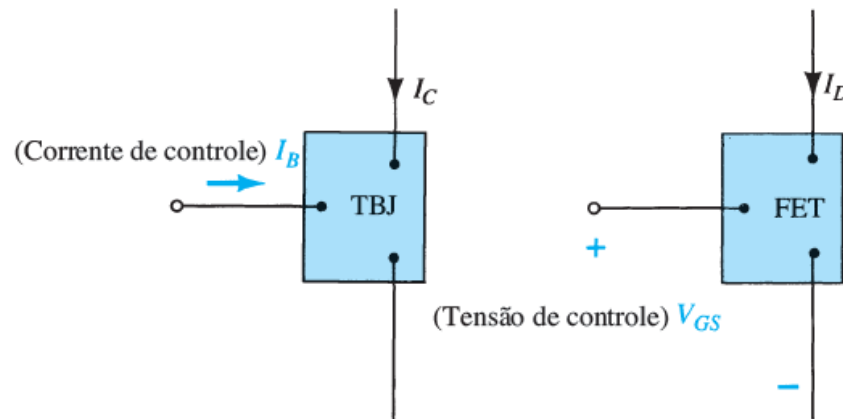
## 2 - Transistores de efeito de campo(FET).

O transistor de efeito de campo (FET, do inglês *field-effect transistor*) é um dispositivo de três terminais utilizado em várias aplicações que em muito se assemelham àquelas do transistor TBJ. Embora existam diferenças relevantes entre os dois tipos de dispositivo, existem também muitas semelhanças, que serão mostradas a seguir.

## 2 - Transistores de efeito de campo(FET).

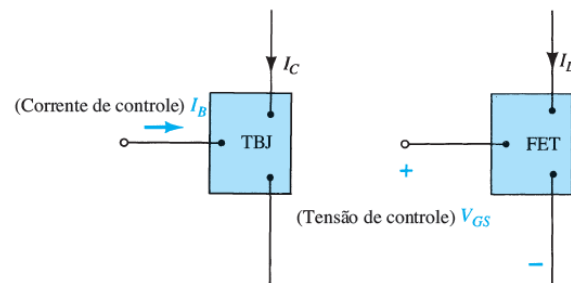
A principal diferença entre os dois tipos de transistor é o fato de que:

*O TBJ é um dispositivo controlado por corrente, enquanto o JFET é um dispositivo controlado por tensão.*



## 2 - Transistores de efeito de campo(FET).

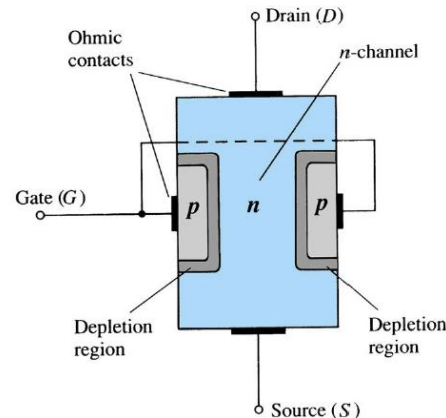
Em outras palavras, a corrente  $I_C$  é uma função direta do valor de  $I_B$ . Para o FET, a corrente  $I_D$  será uma função da tensão  $V_{GS}$  aplicada ao circuito de entrada. Em cada um dos casos, a corrente do circuito de saída é controlada por um parâmetro do circuito de entrada — em um caso é o valor de corrente, e, no outro, a tensão aplicada. Assim como há transistores bipolares *npn* e *pnp*, também há transistores de efeito de campo de *canal n* e de *canal p*.



## 2 - Transistores de efeito de campo(FET).

No entanto, é importante termos em mente que o TBJ é um dispositivo *bipolar* — o prefixo *bi* revela que o nível de condução é uma função de dois portadores de carga: elétrons e lacunas. O FET é um dispositivo *unipolar* que depende unicamente da condução de elétrons (canal *n*) ou de lacunas (canal *p*).

- Existem dois tipos de JFETs: canal N e canal P. O do tipo canal N é mais utilizado.





## 2 - Transistores de efeito de campo(FET).

O termo *efeito de campo* merece uma explicação. É conhecida a capacidade de um ímã permanente de atrair limalhas de ferro sem a necessidade de contato. O campo magnético do ímã permanente envolve as limalhas e as atrai pelo caminho mais curto determinado pelas linhas de fluxo magnético. Para o FET, é estabelecido um *campo elétrico* pelas cargas presentes que controlarão o caminho de condução do circuito de saída sem a necessidade de contato direto entre as grandezas controladoras e controladas.

## 2 - Transistores de efeito de campo(FET).

Quando um dispositivo é apresentado com um conjunto de aplicações similares às de outro, existe uma tendência natural de comparar algumas de suas características gerais:

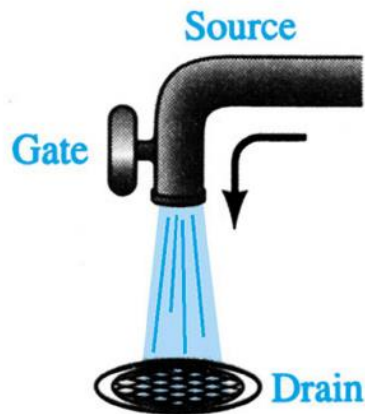
### TBJ x FET

Características	TBJ	FET
Impedância de entrada	<	>
Sensibilidade à temperatura	>	<
Controle de corrente de saída.	>	<
Ganho de tensão	>	<
Estabilidade	<	>
Tamanho	>	<

## 2 - Transistores de efeito de campo(FET)

### 2.1 - JFET

#### Analogia de funcionamento

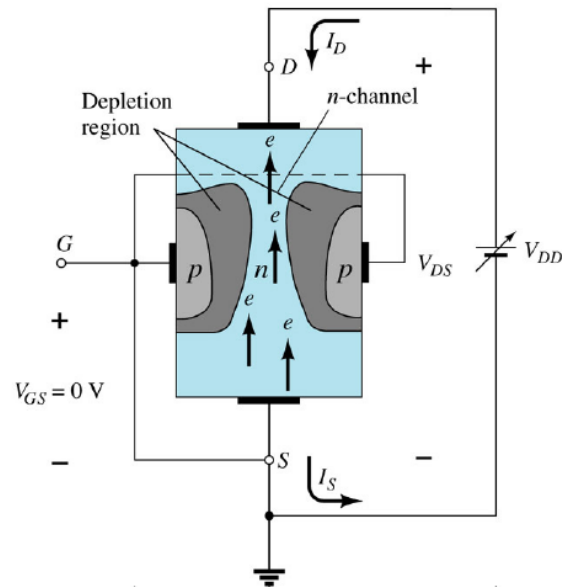




## 2 - Transistores de efeito de campo(FET)

### 2.1 - JFET

#### JFET (canal N) com polarização



$$V_D > V_S$$

$$V_{GS} = 0 \text{ V}$$

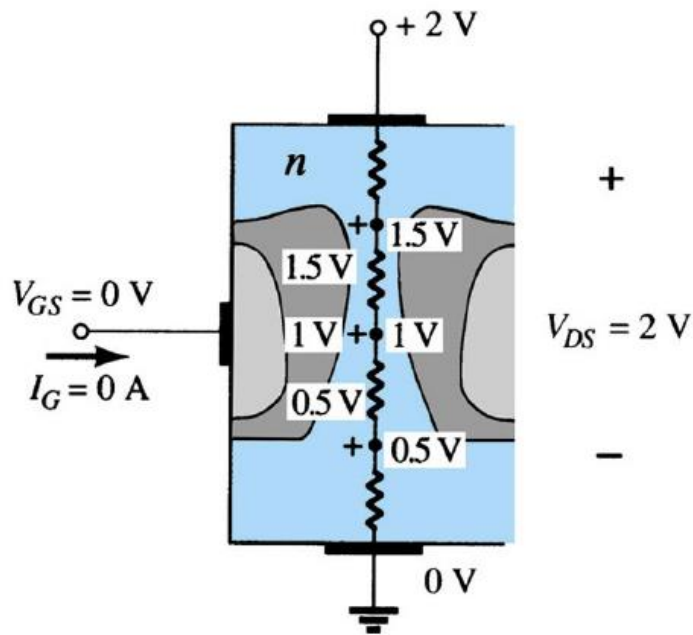
$$V_{DS} > 0 \text{ V}$$

$$I_D = I_S \neq 0 \text{ A}$$

- O fluxo de carga entre fonte e dreno é relativamente irrestrito e limitado somente pela resistência do canal N.
- A região de depleção é mais larga próximo do dreno, pois a polarização reversa dreno/porta é maior que a polarização reversa porta/fonte.

## 2 - Transistores de efeito de campo(FET)

### 2.1 - JFET

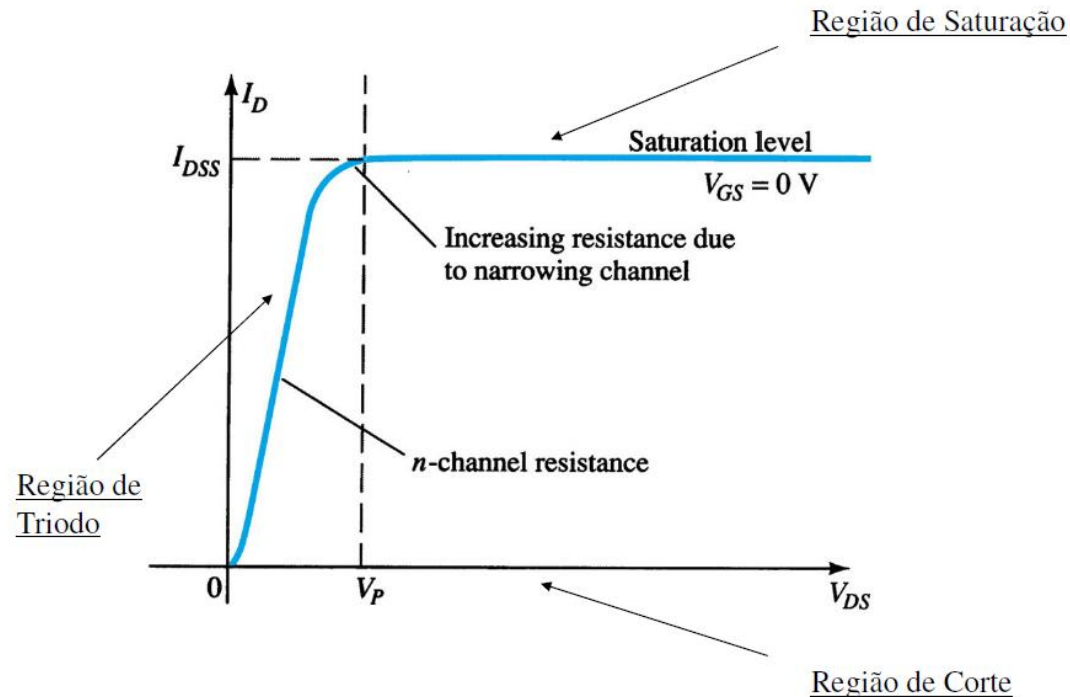


- Admitindo uma resistência uniforme do canal N, a variação dos potenciais reversos podem ser observados na figura.
- Próximo à fonte, a queda de tensão é menor (menor resistência) e próximo do dreno, a queda de tensão é maior (maior resistência).
- Como a junção PN está sempre polarizada reversamente, a corrente de porta  $I_G$  é sempre zero ( $I_G = 0\text{ A}$ )

## 2 - Transistores de efeito de campo(FET)

### 2.1 - JFET

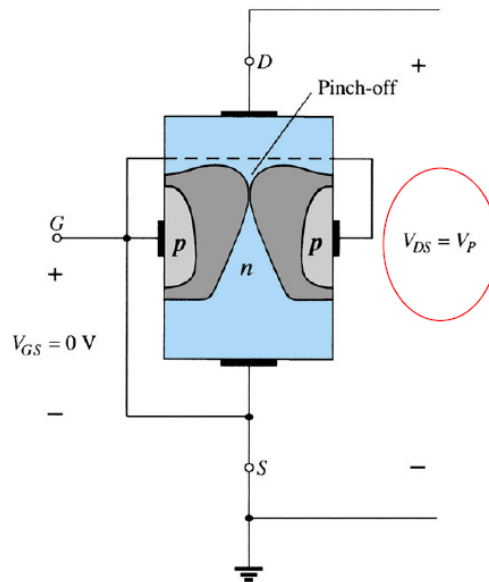
$I_{DS} \times V_{DS} (V_{GS} = 0 \text{ V})$



## 2 - Transistores de efeito de campo(FET)

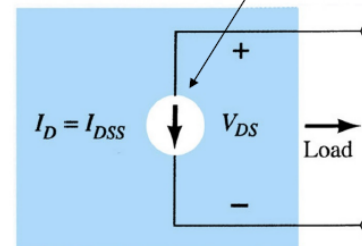
### 2.1 - JFET

#### Pinçamento – “Pinch-off”



- Apesar do estrangulamento,  $I_D \neq 0\text{ A}$ . Os portadores passam através da região de depleção. Nesta condição,  $I_{DS}$  passa a ser constante ( $I_{DS} = \text{cte}$  na saturação).

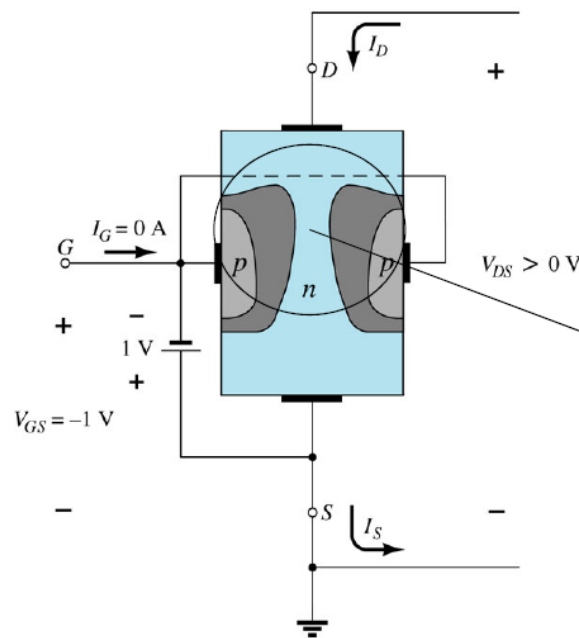
$V_{DS} \uparrow \rightarrow R_{ch} \uparrow \rightarrow I_{DS} = \text{cte}$ , característica de uma fonte de corrente.



Obs.:  $I_{DSS}$  é a corrente máxima de  $I_D$ , definida na condição de  $V_{GS} = 0\text{ V}$  e  $V_{DS} > V_P$ .

## 2 - Transistores de efeito de campo(FET)

### 2.1 - JFET



$$V_D > V_S$$

$$V_{GS} < 0 \text{ V}$$

$$V_{DS} > 0 \text{ V}$$

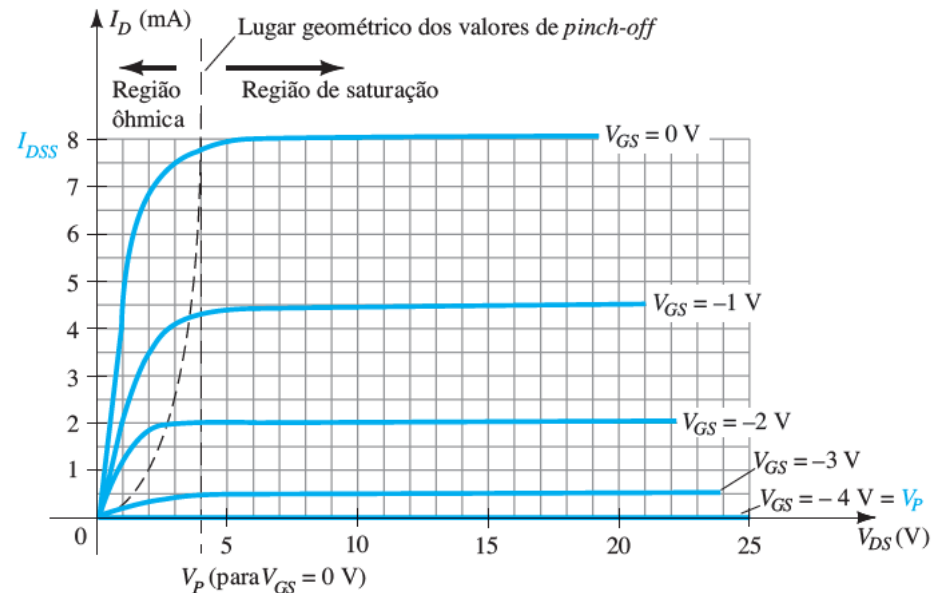
$$I_D = I_S \neq 0 \text{ A}$$

- A polarização negativa de  $V_{GS}$ , aumenta as camadas de depleção, diminuindo a “área” de passagem da corrente.
- O valor de  $V_{GS}$  que resulta em  $I_D = 0 \text{ A}$  é definido como  $V_p$  ( $V_{GS} = V_p$ ).

## 2 - Transistores de efeito de campo(FET)

### 2.1 - JFET

#### Curvas Características do JFET canal N

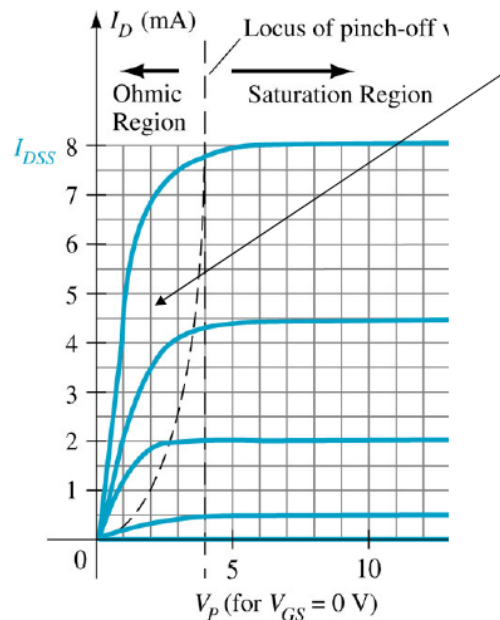


Curvas características do JFET de canal  $n$  com  $I_{DSS} = 8$  mA e  $V_P = -4$  V.

## 2 - Transistores de efeito de campo(FET)

### 2.1 - JFET

#### Resistor controlado por tensão



- Na região ôhmica, o JFET pode ser utilizado como um resistor controlado por tensão.

$$r_d = \frac{r_o}{\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2}$$

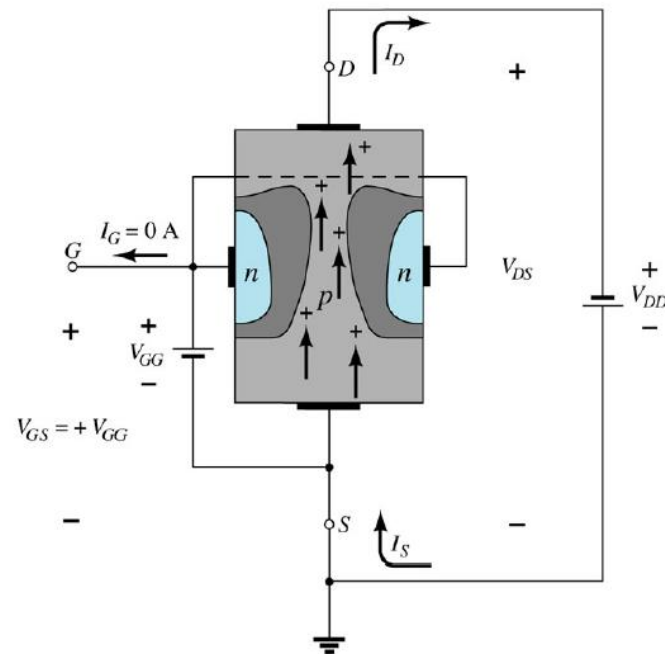
$r_o$  = resistência com  $V_{GS} = 0$  V

$r_d$  = resistência específica para um certo  $V_{GS}$

## 2 - Transistores de efeito de campo(FET)

### 2.1 - JFET

#### JFETS canal P



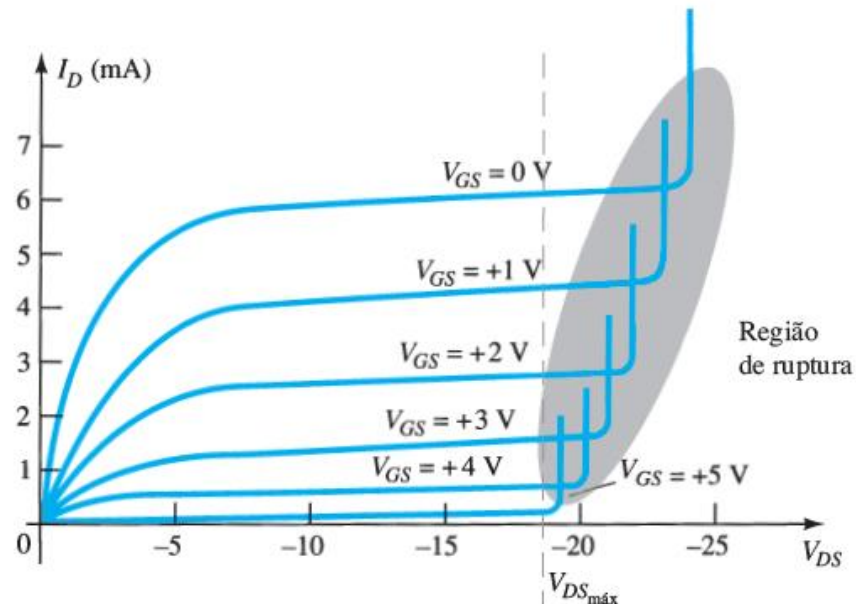


## 2 - Transistores de efeito de campo(FET)

### 2.1 - JFET

#### Características do JFET canal P

Observe que para valores elevados de  $V_{DS}$  a curva sobe abruptamente e alcança valores que parecem ilimitados.

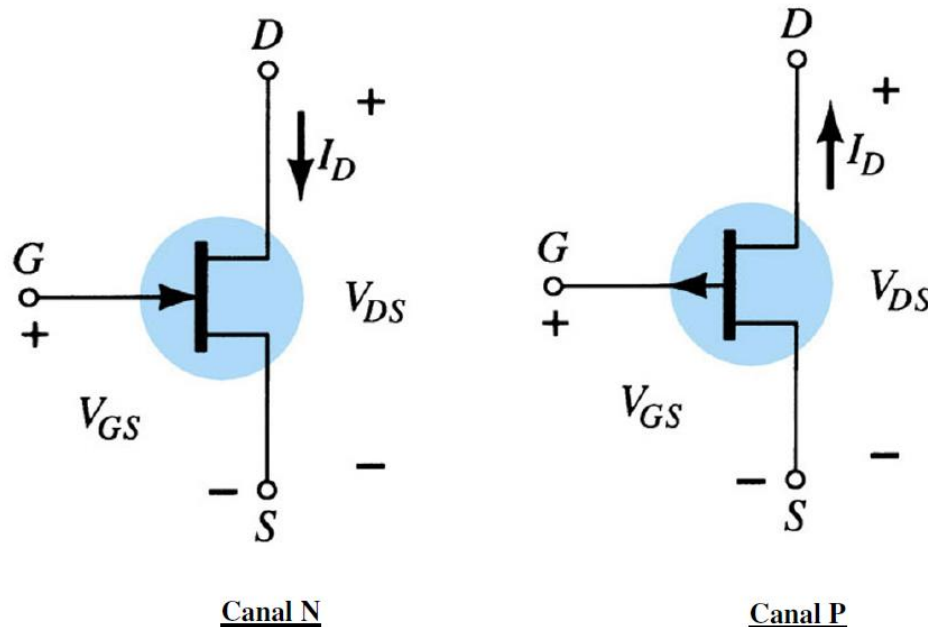


O crescimento vertical indica que houve uma ruptura, e a corrente através do canal (no sentido normalmente esperado) agora é limitada apenas pelo circuito externo.

## 2 - Transistores de efeito de campo(FET)

### 2.1 - JFET

#### Símbolos para o JFET



## 2 - Transistores de efeito de campo(FET)

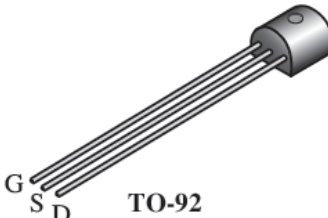
### 2.1 - JFET

#### ESPECIFICAÇÕES MÁXIMAS

Símbolo	Parâmetro	Valor	Unidade
$V_{DS}$	Tensão dreno-fonte	25	V
$V_{DG}$	Tensão dreno-porta	25	V
$V_{GS}$	Tensão porta-fonte	-25	V
$I_{GF}$	Corrente direta de porta	10	mA
$T_j, T_{stg}$	Faixa de temperatura da junção para operação e armazenagem	-55 a +150	°C

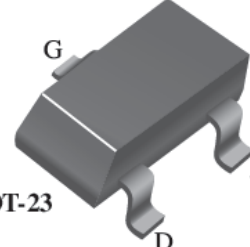
**FAIRCHILD**  
SEMICONDUCTOR™

**2N5457**



G  
S  
D TO-92

**MMBF5457**



G  
D  
S SOT-23

NOTA: Fonte e dreno são intercambiáveis.

**Amplificador de uso geral de canal *n***

Este dispositivo é um amplificador de áudio de baixo nível e transistor de chaveamento que pode ser usado para aplicações de chaveamento analógico.

## 2 - Transistores de efeito de campo(FET)

### 2.1 - JFET

#### CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS

Símbolo	Características	Máx.		Unidade
		2N5457	*MMBF5457	
$P_D$	Dissipação total do dispositivo Degradação acima de 25°C	625 5,0	350 2,8	mW mW/°C
$R_{\theta JC}$	Resistência térmica, junção para encapsulamento	125		°C/W
$R_{\theta JA}$	Resistência térmica, junção para ambiente	357	556	°C/W

## 2 - Transistores de efeito de campo(FET)

### 2.1 - JFET

**CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS** ( $T_A = 25^\circ\text{C}$  a menos que outro valor seja especificado).

Símbolo	Parâmetro	Condições de teste	Mín.	Típ.	Máx.	Unidade
---------	-----------	--------------------	------	------	------	---------

#### CARACTERÍSTICAS EM ESTADO DESLIGADO

$V_{(BR)GSS}$	Tensão de ruptura porta-fonte	$I_G = 10 \mu\text{A}, V_{DS} = 0$	-25			V
$I_{GSS}$	Corrente reversa de porta	$V_{GS} = -15 \text{ V}, V_{DS} = 0$ $V_{GS} = -15 \text{ V}, V_{DS} = 0, T_A = 100^\circ\text{C}$			-1,0 -200	nA nA
$V_{GS(off)}$	Tensão de corte porta-fonte	$V_{DS} = 15 \text{ V}, I_D = 10 \text{ nA}$	5457	-0,5	-6,0	V
$V_{GS}$	Tensão porta-fonte	$V_{DS} = 15 \text{ V}, I_D = 100 \mu\text{A}$	5457	-2,5		V

## 2 - Transistores de efeito de campo(FET)

### 2.1 - JFET

#### CARACTERÍSTICAS EM ESTADO LIGADO

$I_{DSS}$	Corrente de dreno para tensão nula na porta	$V_{DS} = 15 \text{ V}, V_{GS} = 0$	5457	1,0	3,0	5,0	mA
-----------	---	-------------------------------------	------	-----	-----	-----	----

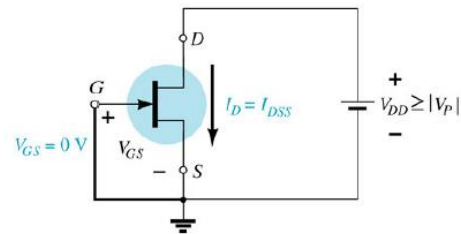
#### CARACTERÍSTICAS DE PEQUENO SINAL

$g_{fs}$	Condutância de transferência direta	$V_{DS} = 15 \text{ V}, V_{GS} = 0, f = 1,0 \text{ kHz}$	5457	1000		5000	$\mu\text{mhos}$
$g_{os}$	Condutância de saída	$V_{DS} = 15 \text{ V}, V_{GS} = 0, f = 1,0 \text{ MHz}$			10	50	$\mu\text{mhos}$
$C_{iss}$	Capacitância de entrada	$V_{DS} = 15 \text{ V}, V_{GS} = 0, f = 1,0 \text{ MHz}$			4,5	7,0	pF
$C_{rss}$	Capacitância de transferência reversa	$V_{DS} = 15 \text{ V}, V_{GS} = 0, f = 1,0 \text{ MHz}$			1,5	3,0	pF
NF	Figura de ruído	$V_{DS} = 15 \text{ V}, V_{GS} = 0, f = 1,0 \text{ kHz},$ $R_G = 1,0 \text{ megohm}, BW = 1,0 \text{ Hz}$				3,0	dB

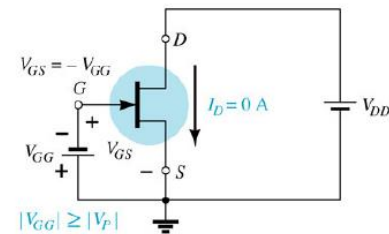
## 2 - Transistores de efeito de campo(FET)

### 2.1 - JFET

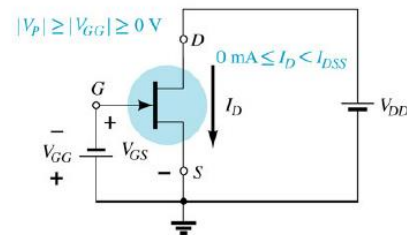
#### Resumo



(a)



(b)

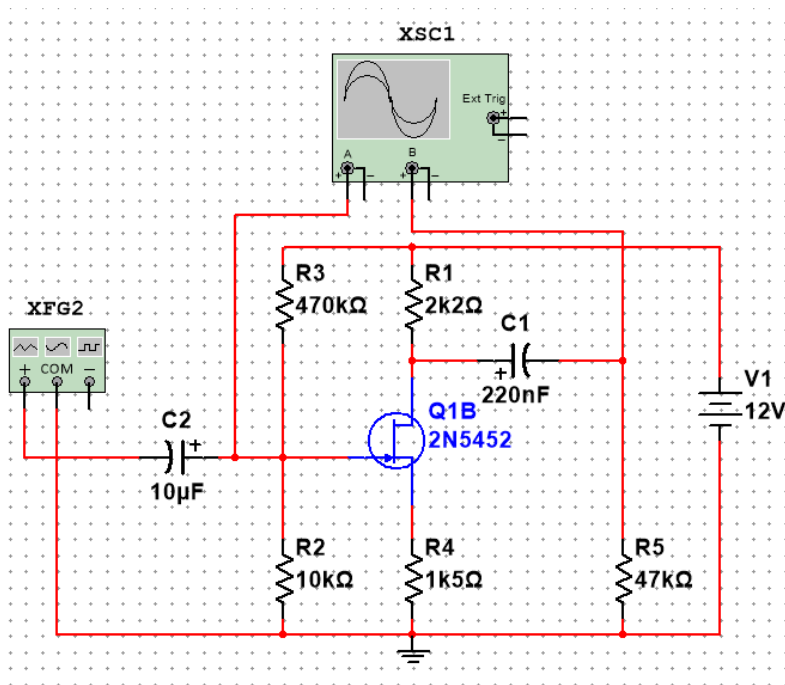


(c)

## 2 - Transistores de efeito de campo(FET)

### 2.1 – JFET - Exercício

## Amplificador Fonte Comum com Divisor Resistivo no Gate



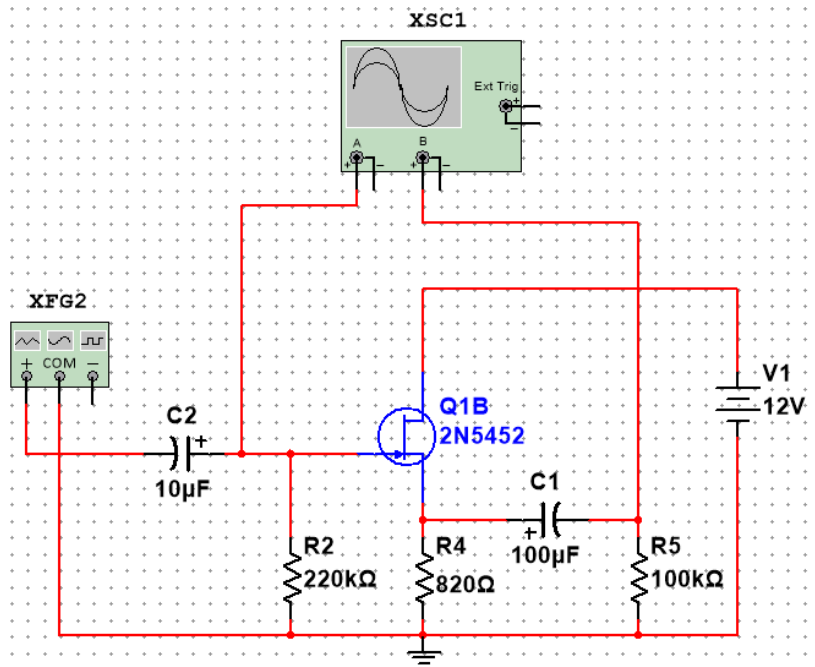
- 1) Montar o circuito no Multisim e verifique as forma de onda.
- 2) Instalar um capacitor de desacoplamento de 1uF no source de Q1B e verificar o comportamento.
- 3) Verifique como se comportaria o circuito se modificasse o resistor de dreno para 8k2.
- 4) Como comportaria com auto polarização, eliminando R3 e aumentando o valor de R2 para 1M.



## 2 - Transistores de efeito de campo(FET)

### 2.1 – JFET - Exercício

#### Amplificador Dreno Comum Com Auto Polarização(Seguidor de Fonte)



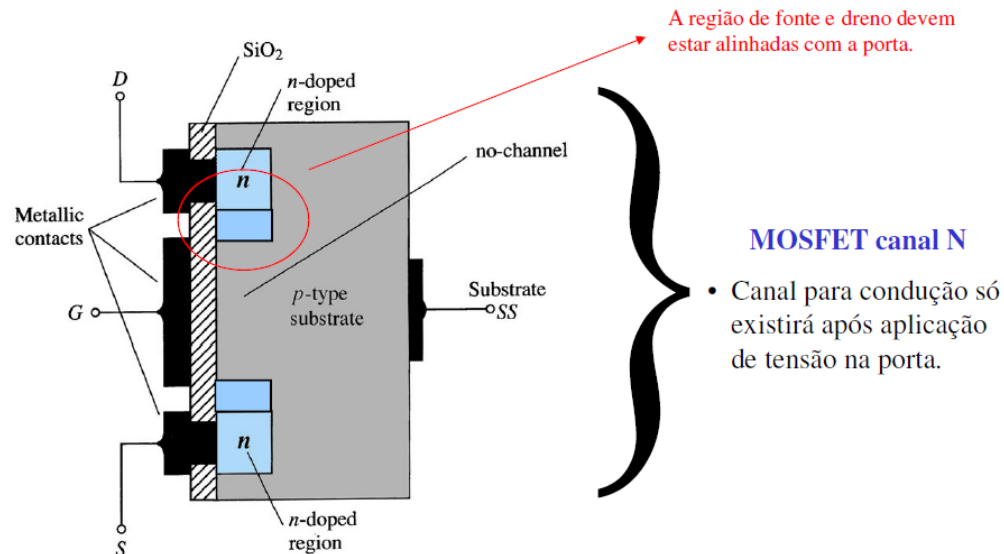
- 1) Montar o circuito no Multisim e verifique as forma de onda.
- 2) Através de um multímetro meça os seguintes parâmetros:  $V_{DS}$ ,  $V_S$ ,  $I_{DS}$  e  $V_{GS}$ .
- 3) Calcule o ganho do circuito através da formula  $G = V_{out}/V_{in}$  e caso o ganho seja diferente de 1, ajuste os componentes necessários para que o ganho seja unitário.

## 2 - Transistores de efeito de campo(FET)

### 2.2 – MOSFET

#### MOSFET Tipo Intensificação

- MOS – Metal Óxido Semicondutor.
- Equação de Shockley não é válida para este dispositivo.

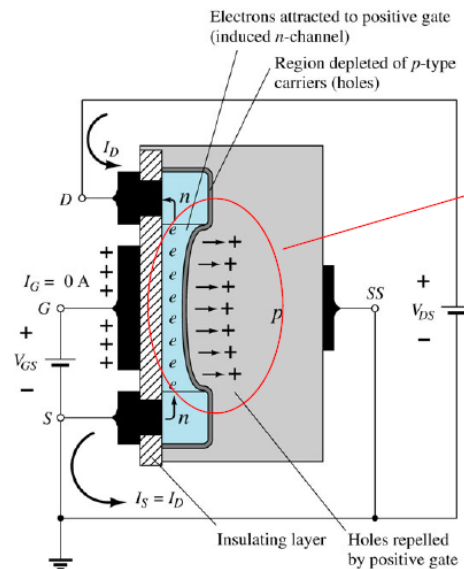


## 2 - Transistores de efeito de campo(FET)

### 2.2 – MOSFET

#### Operação Básica e Curvas Características

- Para  $V_{GS} = 0$  V, não existe o canal N formado por uma grande quantidade de portadores livres, ao contrário de um JFET canal N, onde para esta situação  $I_D = I_{DSS}$ .



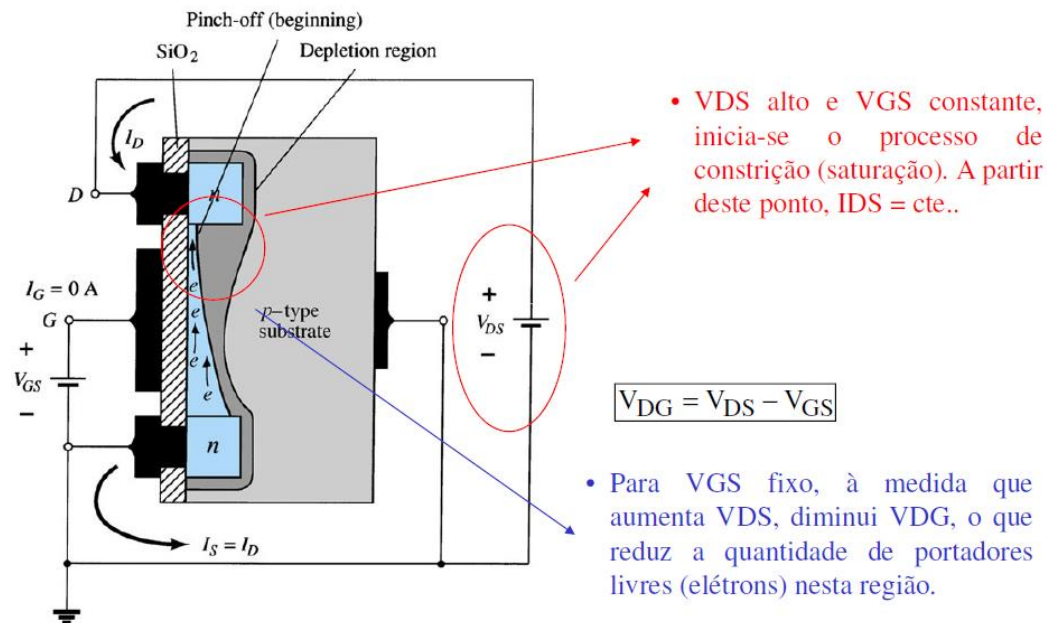
- Depleção dos portadores majoritários (lacunas) e aproximação dos portadores minoritários (elétrons).

- O valor de  $V_{GS}$  necessário para formar a camada de inversão é chamado de Tensão de Limiar ( $V_T$ ).

## 2 - Transistores de efeito de campo(FET)

### 2.2 – MOSFET

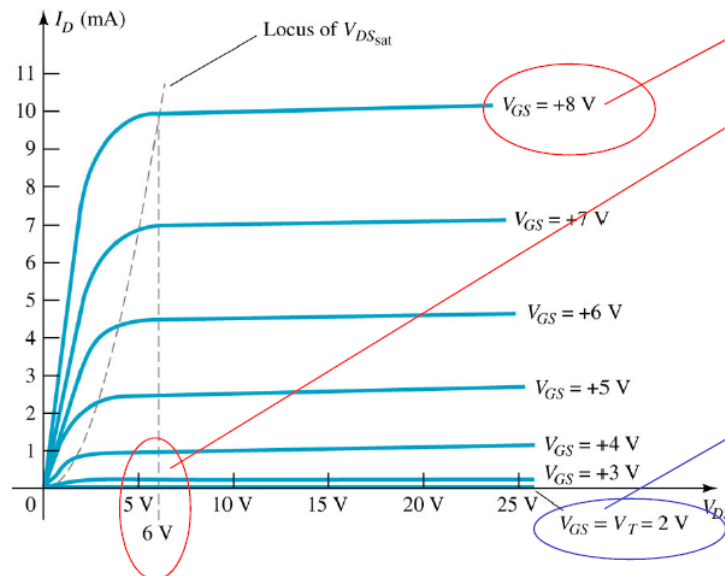
#### Operação Básica - Saturação



## 2 - Transistores de efeito de campo(FET)

### 2.2 – MOSFET

#### Operação Básica - Saturação



Para  $V_{GS} = 8 \text{ V}$ , a saturação ocorre para  $V_{DS} = 6 \text{ V}$ .

$$V_{DS} = f(V_{GS})$$

$$V_{DSsat} = V_{GS} - V_T$$

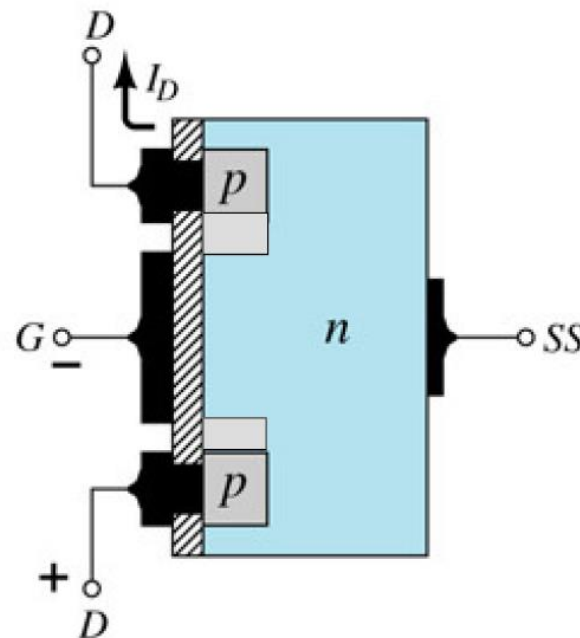
Portanto,  $V_T = 2 \text{ V}$ .

- Para  $V_{DS} > V_{DSsat}$ , MOS em saturação.
- Para  $V_{DS} < V_{DSsat}$ , MOS em triodo.

## 2 - Transistores de efeito de campo(FET)

### 2.2 – MOSFET

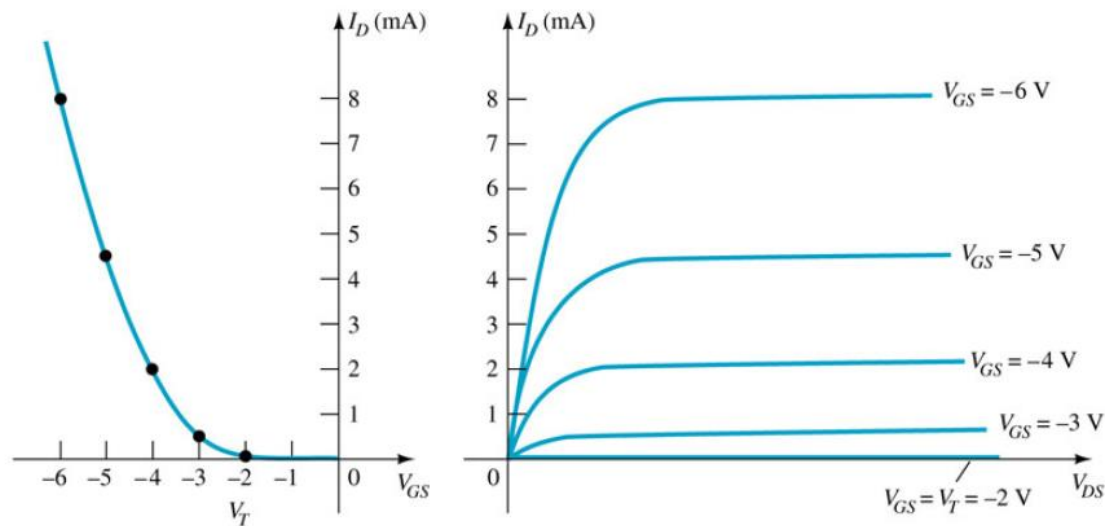
#### MOSFET Tipo P



## 2 - Transistores de efeito de campo(FET)

### 2.2 – MOSFET

#### MOSFET Tipo P

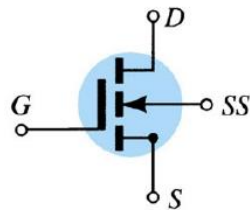


## 2 - Transistores de efeito de campo(FET)

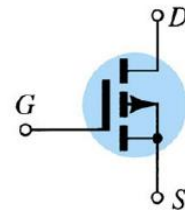
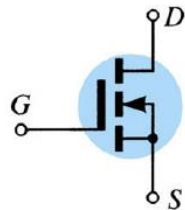
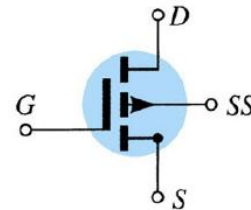
### 2.2 – MOSFET

#### Símbolos

*n*-channel



*p*-channel

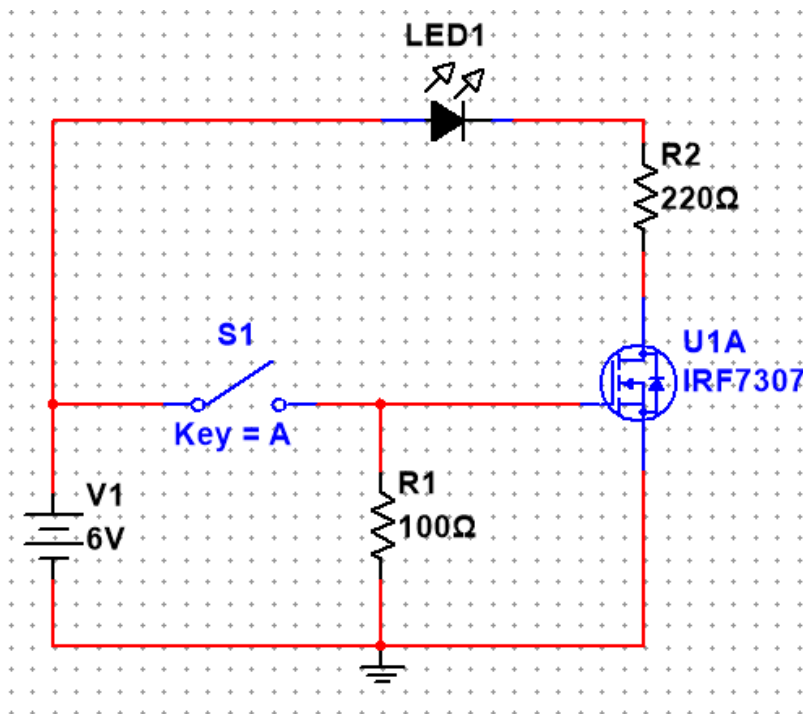




## 2 - Transistores de efeito de campo(FET)

### 2.2 – MOSFET - Exercício

#### Mosfet Canal N Funcionando Como Chave

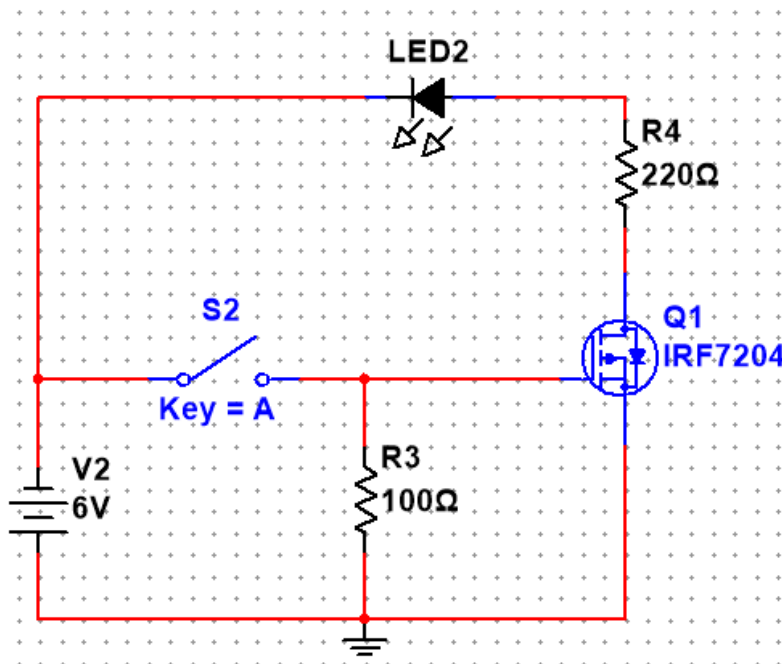


- 1) Montar o circuito no Multisim e verifique o funcionamento.
- 2) Através de um multímetro meça os seguintes parâmetros:  $V_{DS}$ ,  $V_{R2}$ ,  $I_{DS}$  e  $V_{LED1}$

## 2 - Transistores de efeito de campo(FET)

### 2.2 – MOSFET - Exercício

#### Mosfet Canal P Funcionando Como Chave

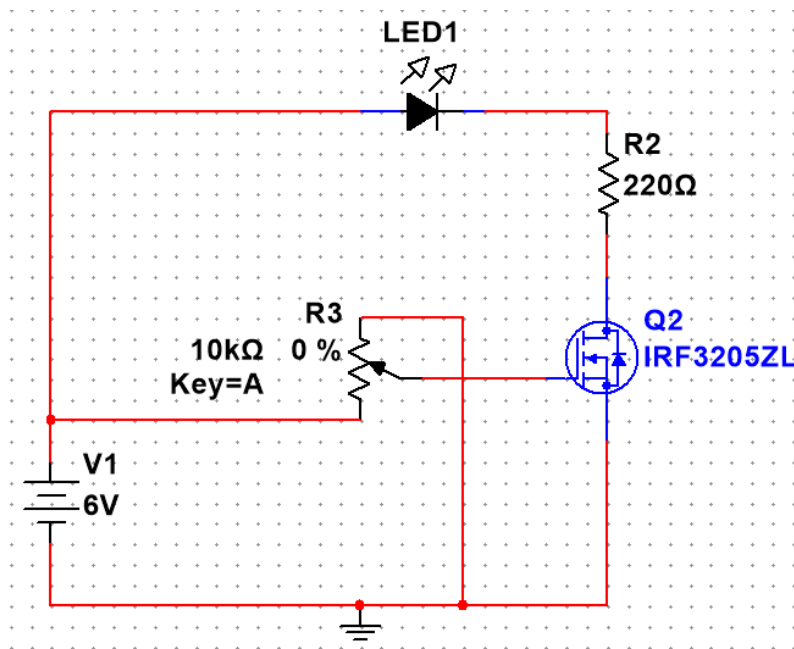


- 1) Montar o circuito no Multisim e verifique o funcionamento.
- 2) Através de um multímetro meça os seguintes parâmetros:  $V_{DS}$ ,  $V_{R4}$ ,  $I_{DS}$  e  $V_{LED2}$
- 3) Desconecte R3 e verifique o funcionamento

## 2 - Transistores de efeito de campo(FET)

### 2.2 – MOSFET - Exercício

Mosfet Canal N – Verificando  $V_{GS(th)}$



- 1) Montar o circuito no Multisim e verifique o funcionamento.
- 2) Através de um multímetro meça qual é a “Gate Threshold Voltage” característica de modelo de MOSFET.



## Bibliografia Básica

- 1-SEDRA, A.S. &SMITH, C. **Microeletrônica**, 4ª ed, Makron Books,2005.
- 2-MILLMAN, J. & HALKAIS, C.C, **Eletrônica**, 2ª ed, vol ½, McGrawHill do Brasil, 1981.
- 3-RASHID, M. H. **Power Electronics: Circuits, Devices and Applications**, 2ª ed, Prentice-Hall International, 1988.



## Bibliografia Complementar

- 1-MALVINO, Albert Paul. **Electronic Principles with Simulation CD**. McGraw-Hill Professional. 7ª edição. 2006.
- 2-BOYLESTAD, Robert ; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. Prentice Hall. 8a edição. , 2007.
- 3-MOHAN, N.; UNDERLAND, T. M. & ROBBINS, W.P **Power Electronics: Converters, Applications and Design**, 2ª ed, John Wiley and Sons, 1995.
- 4-RESENDE, S. M. **A física de materiais e dispositivos eletrônicos**, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, PE, Brasil, 1996