

# ECM305

## Sistemas Eletrônicos

Transistor de Efeito  
de Campo (TEC/FET)  
E  
MOSFET

*Sergio R. Augusto*

# Objetivo

- Tipos de MOSFETs;
- Curvas características;
- Uso como chave e aplicações



# Transistores de Efeito de Campo

- ▶ Vantagens dos FETs em relação aos BJTs.
  - resistência de entrada alta;
  - produzem menos ruído sendo mais adequados em amplificadores de baixo nível (Ex: receptores de FM de alta fidelidade);
  - maior estabilidade térmica.
  - Ocupam menor área sendo mais adequados para a fabricação de circuitos integrados.
- ▶ Desvantagens dos FETs em relação aos BJTs.
  - banda de ganho relativamente pequena;
  - maior susceptibilidade a danos quando manuseado.

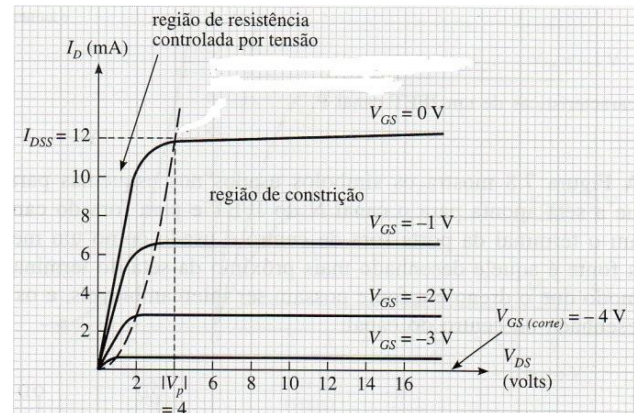
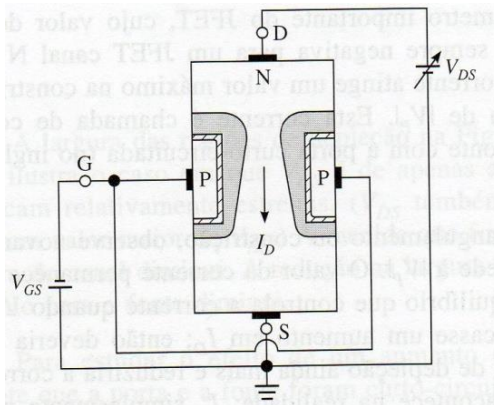
# Tipos de Transistor de Efeito de Campo

- **JFET (TECJ)**: *junction field-effect transistor* - transistor de efeito de campo de junção :valor mais histórico;
- **MOSFET**: *metal-oxide-semiconductor* FET- FET com semicondutor de óxido metálico: o mais utilizado. Base de construção dos dispositivos CMOS (*Complementary MOS* usados em CIs e processadores)

# JFET ou TECJ

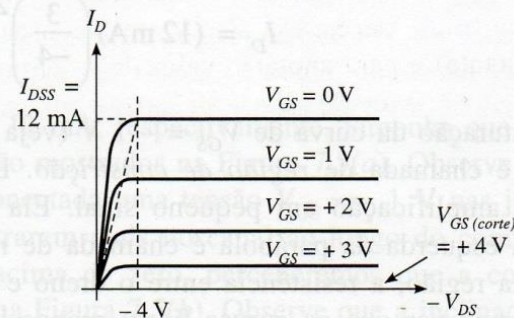
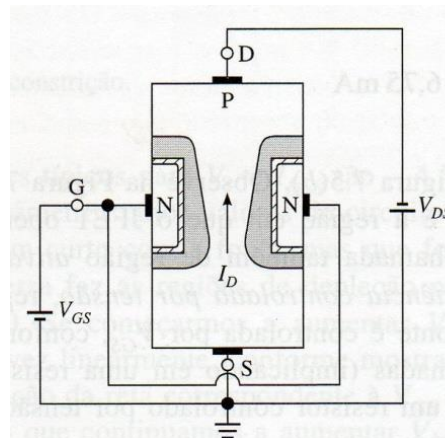
- ▶ Barra de semiconductor tipo N (P) incrustada com materiais tipo P (N) de cada lado, formando um canal.
- ▶ As regiões P (N) são interconectadas a um terminal denominado *Gate* (G) e os extremidades da barra N (P) são denominados Drain (Dreno) e Source (Fonte).
- ▶ A tensão de Gate (porta)  $V_{GS}$  controla, através de campo elétrico, a largura do canal, controlando o fluxo de corrente do Dreno para a Fonte ( $I_D$ ).
- ▶ Alta Resistência de entrada ( $I_G \approx 0$ ).

## JFET canal N

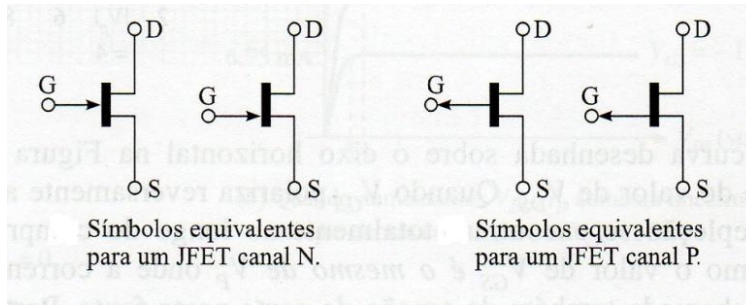


## JFET canal P

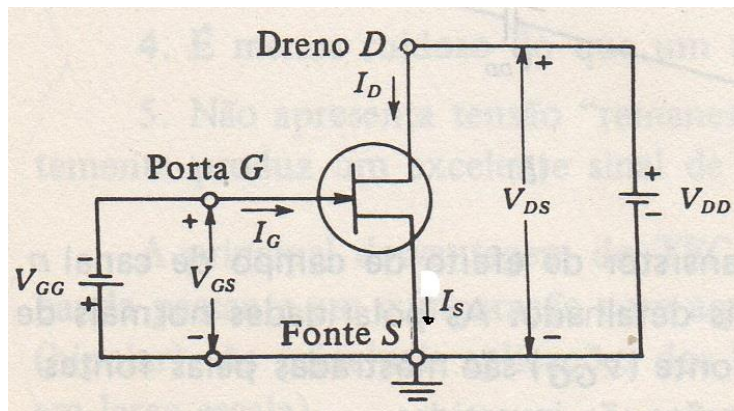
OBS: notar que os valores de  $V_{DS}$  são negativos,  $V_{GS}$  positivo e  $I_D$  positiva saindo pelo Dreno



# Simbologia FET

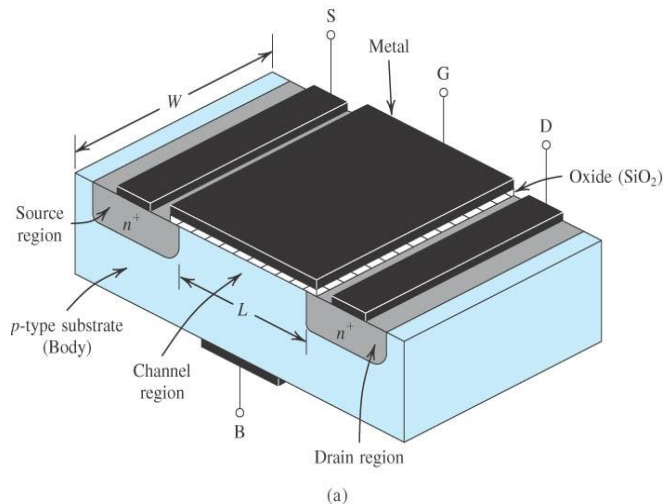


- Para um FET canal N,  $I_D$  e  $V_{DS}$  são positivos e  $V_{GS}$  negativo
- Para um FET canal P,  $I_D$  e  $V_{DS}$  são negativos e  $V_{GS}$  positivo

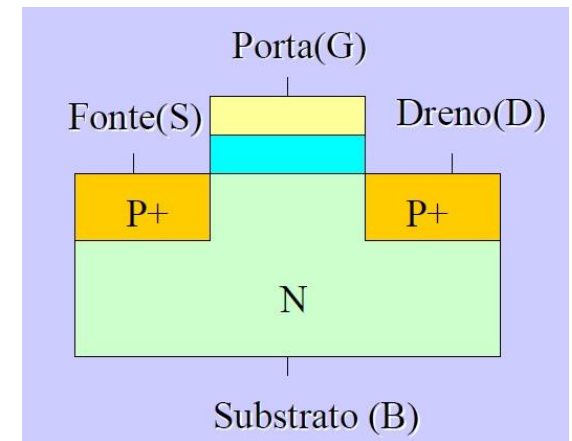
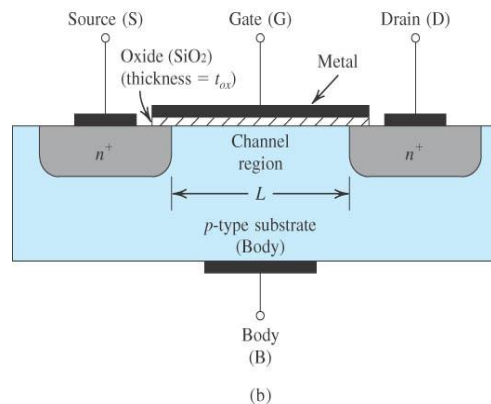


# MOSFET

- Similar ao JFET (ambos são dispositivos cujo canal é controlado pela tensão porta-fonte).
- O que distingue o MOSFET do JFET é o fato do terminal de porta em um MOSFET ser isolado de sua região do canal



MOSFET canal N ou NMOS



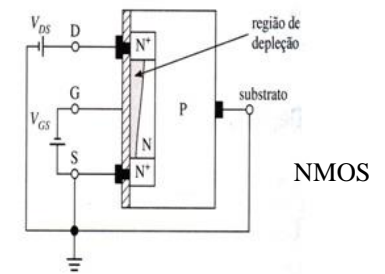
MOSFET canal P ou PMOS

# Tipos de MOSFET

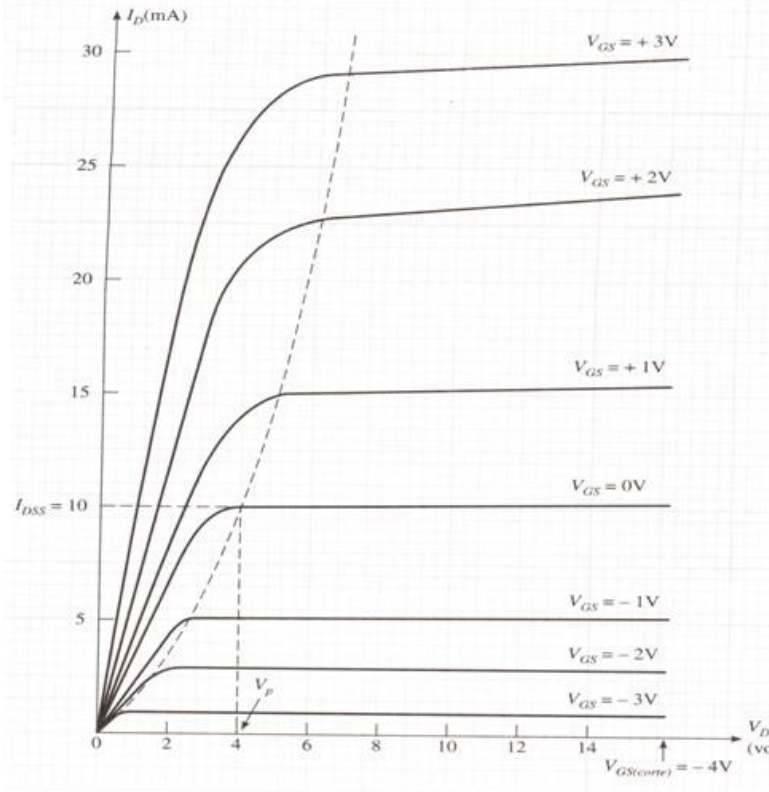
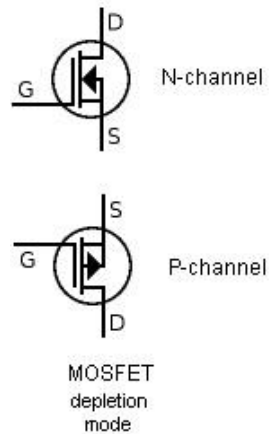
- ▶ MOSFET de Indução, Crescimento, Intensificação, ou Enriquecimento (*enhancement MOSFET*)
  - MOSFET's de indução não apresentam canal na ausência de tensão aplicada no *gate* ( $V_{GS}$ ).
  - Utilizados em chaveamento.
  - São os mais comumente utilizados.
- ▶ MOSFET de depleção (*depletion MOSFET*)
  - MOSFET's de depleção apresentam um canal fisicamente implantado na fabricação.
  - Uso por exemplo em RF e aplicações lineares.



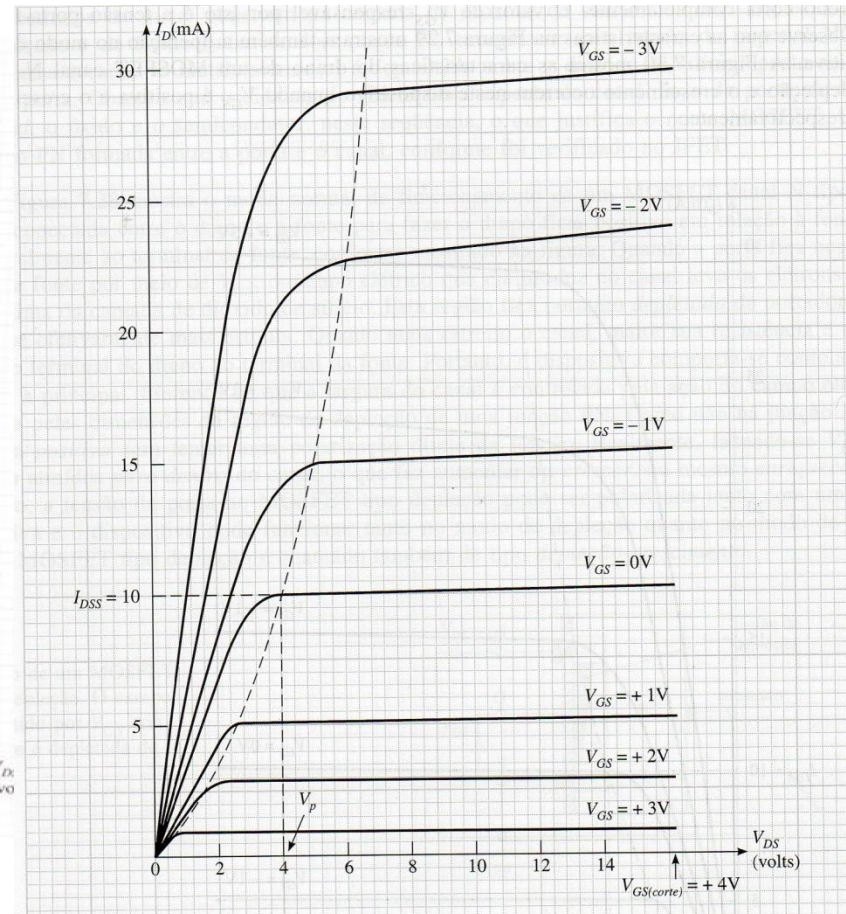
# MOSFETs Tipo Depleção



- Já existe um canal pré-existente.
- $V_{GS}$  pode ser negativa ou positiva, modulando a largura do canal e, portanto, controlando  $I_D$  ( $I_G = 0$ ).
- Notar que para  $V_{GS} = 0$  temos passagem de corrente  $I_D$ .



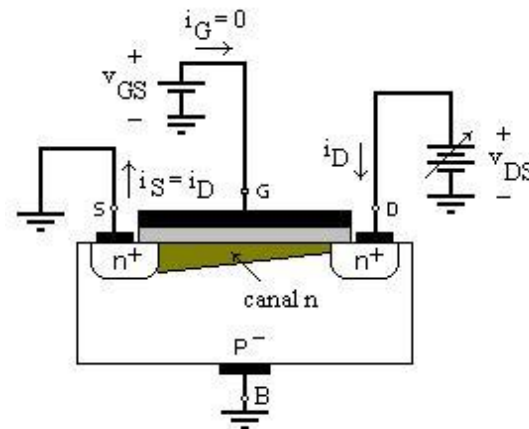
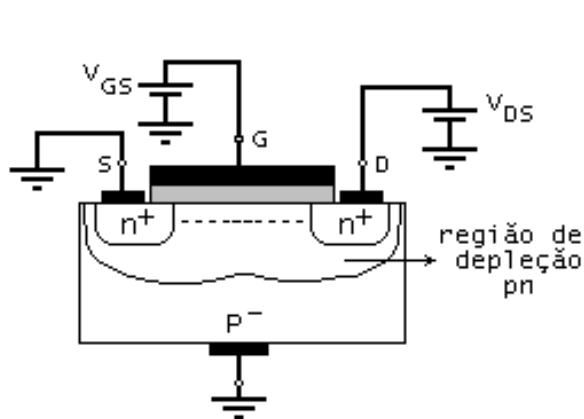
Características de dreno de um MOSFET canal N tipo depleção



Características de dreno canal P tipo depleção  
OBS:  $V_{DS}$  e  $I_D$  são negativos para PMOS

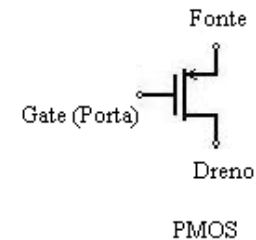
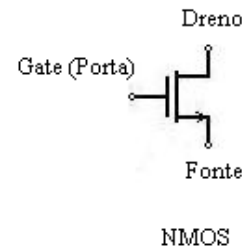
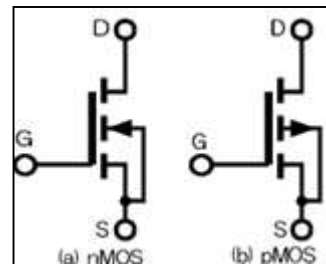
# MOSFETs tipo Indução ou Intensificação

- Não existe canal inserido na fabricação.
- Canal é formado aplicando-se  $V_{GS}$ .
- Não conduz com  $V_{GS} = 0$ .



Exemplo NMOS

Simbologia



# Tensão de Limiar MOSFET de Indução

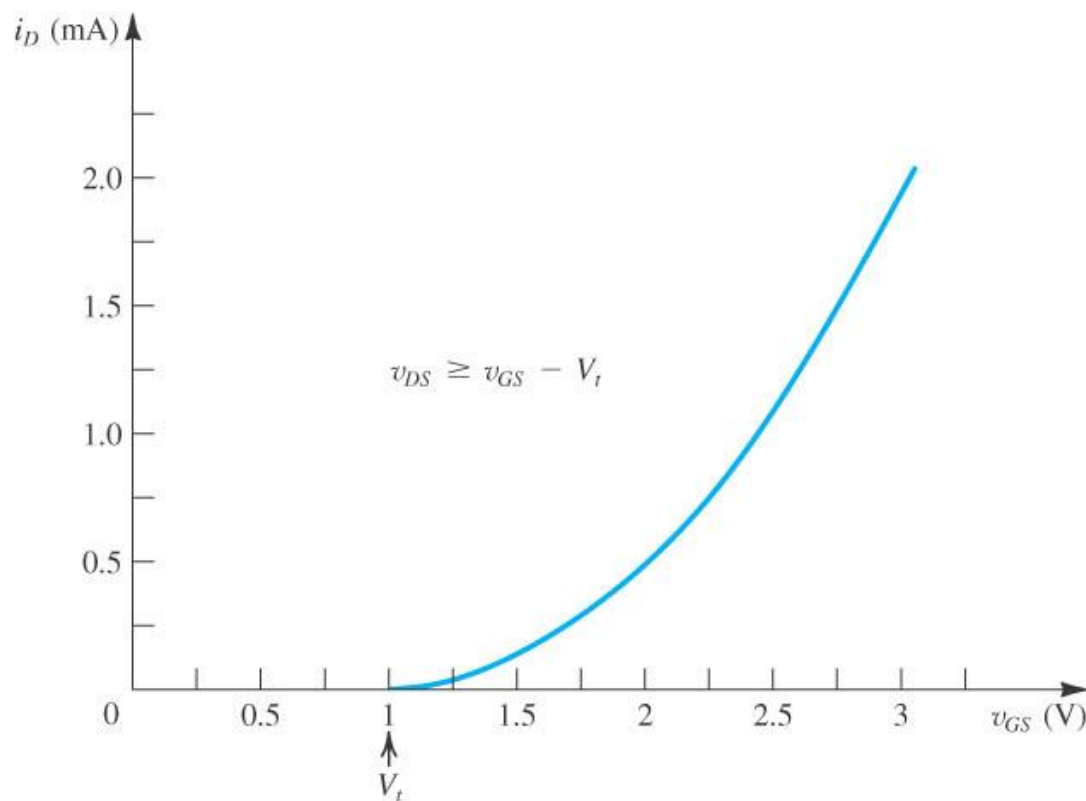
- O canal não fica suficientemente condutivo para que a corrente de dreno  $I_D$  circule enquanto  $V_{GS}$  não atingir uma certa tensão de limiar (*threshold*)  $V_t$ .

- Para tensões porta-fonte abaixo da tensão  $V_t$  haverá o estrangulamento do canal, impedindo a circulação de corrente.

Portanto:

$$I_D = 0$$

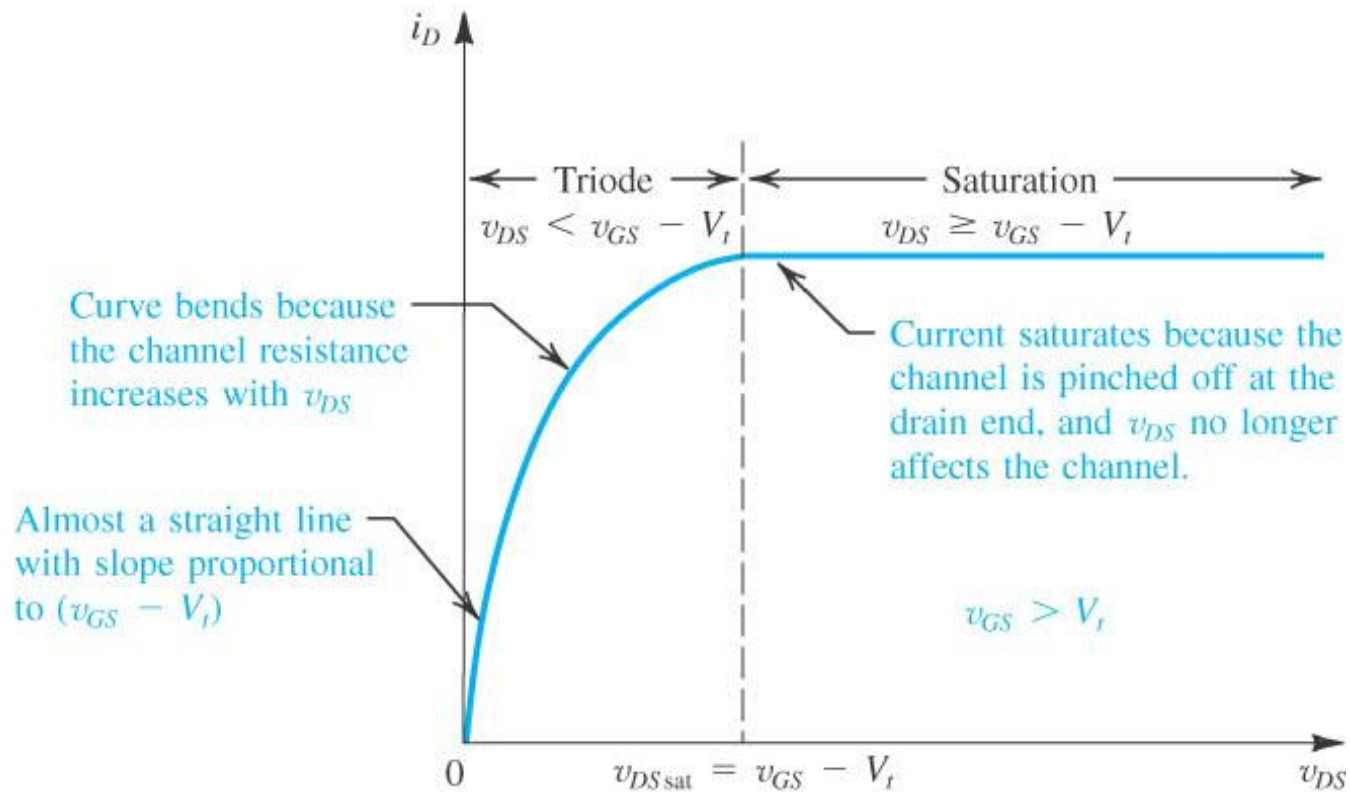
- Pode-se construir MOSFET's de indução canal P (*PMOS transistor*) ou N (*NMOS transistor*). No PMOS a corrente circula da fonte p/ o dreno através do canal P (substrato tipo n) quando  $V_{GS} < -V_t$ . Note que neste caso, teremos tensões  $V_{GS}$  e  $V_{DS}$  negativas.



Característica de transferência  $I_D \times V_{GS}$  para um NMOS de indução,

# Característica $i_D$ x $v_{DS}$ para $V_{GS}$ Constante (NMOS)

- Supondo  $V_{GS} > V_t$



# Regiões de Operação MOSFET de Indução – Exemplo NMOS

- **Região Triodo** ( $V_{GS} > V_t$ )

Apresenta uma região linear com inclinação e uma região não linear como efeito da variação da resistência do canal com o aumento de  $V_{DS}$ .

$$V_{DS} < V_{DSsat} \Rightarrow V_{GD} > V_t \quad ; \quad I_D = 2K \left[ (V_{GS} - V_t)V_{DS} - \frac{1}{2}V_{DS}^2 \right]$$

onde:  $V_{DSsat} = V_{GS} - V_t$

e  $K$  é uma cte dependendo do processo de fabricação

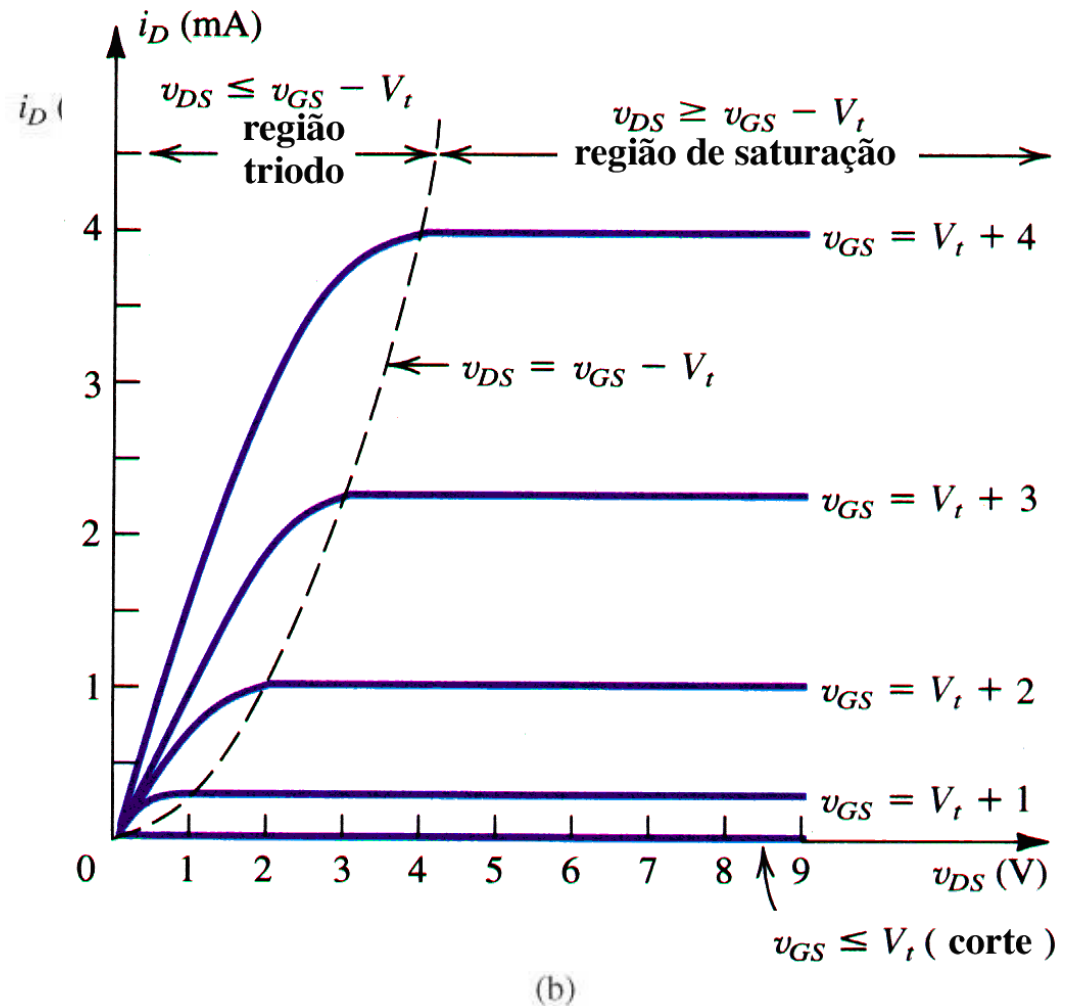
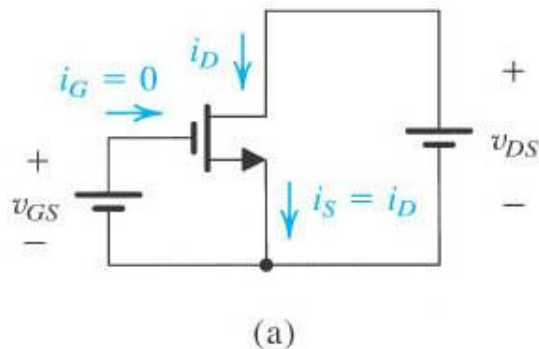
- **Região de Saturação** ( $V_{GS} \geq V_t$ )

$$V_{DS} \geq V_{DSsat} \Rightarrow V_{GD} \leq V_t \quad ; \quad I_D = K(V_{GS} - V_t)^2$$

- **Região de Corte**

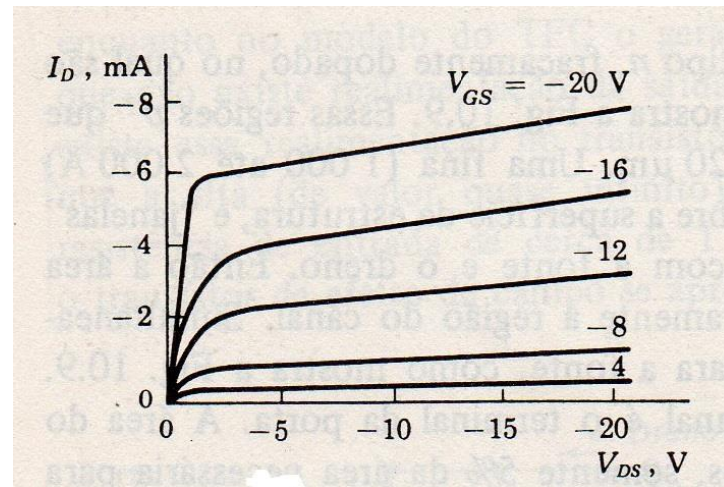
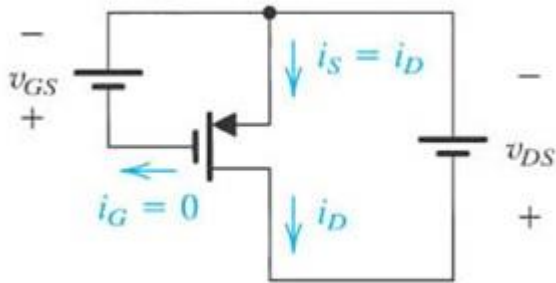
$$V_{GS} \leq V_t \Rightarrow I_D = 0$$

# Curvas características de Dreno MOSFETs de Indução Canal N (NMOS)



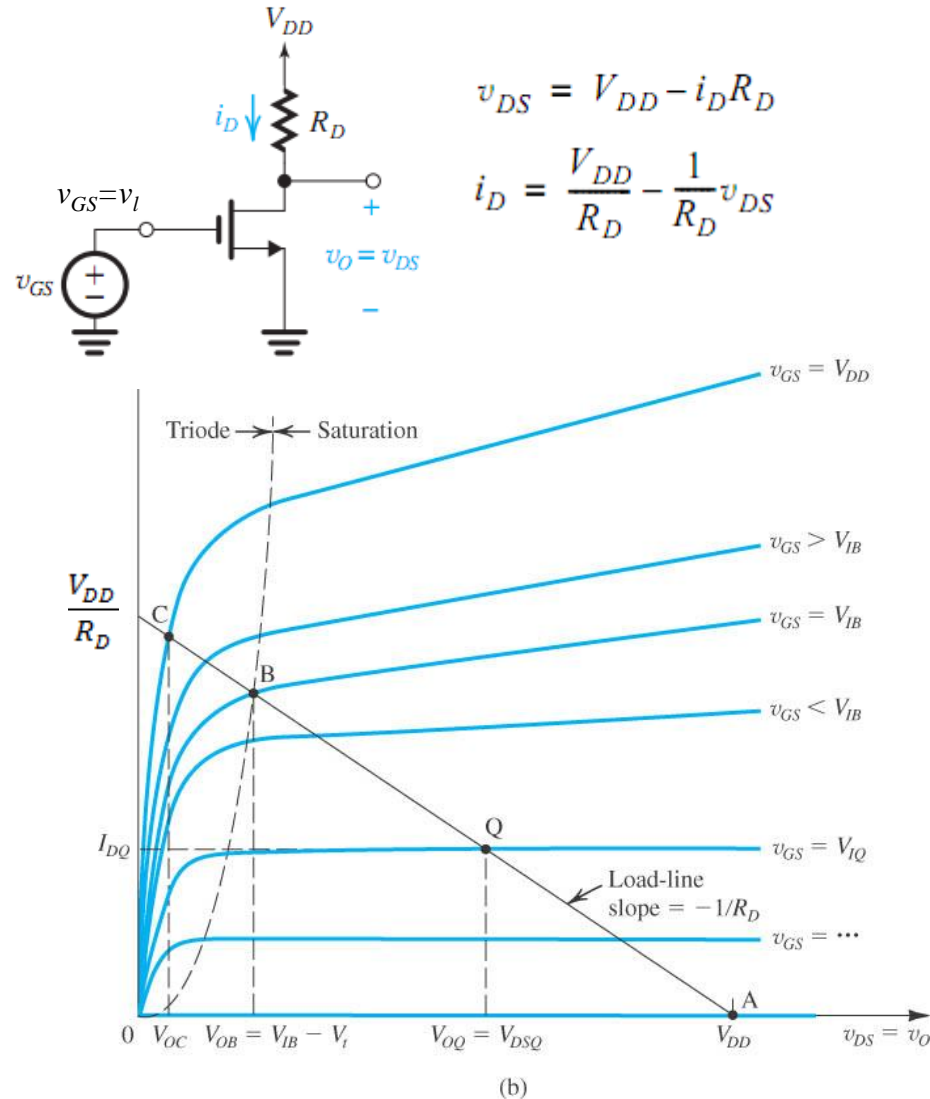
# Curvas características de Dreno MOSFETs de Indução Canal P (PMOS)

- $V_{GS}$ ,  $V_{DS}$  e  $V_T$  são negativas.
- Corrente  $I_D$  é negativa (entra pelo terminal *Source* e sai pelo *Drain*)
- Para iniciar a condução  $V_{SG} \geq |V_t|$





# Reta de carga (NMOS Indução)

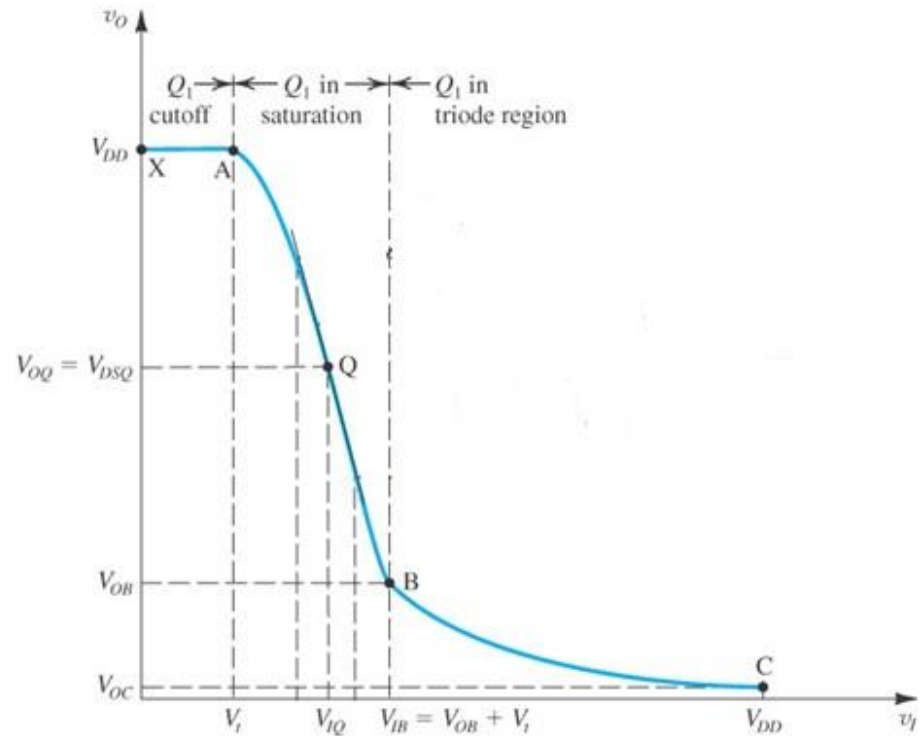


-Saturação: uso como amplificador

-Corte e Triodo: operação como chave

Na região triodo o MOSFET se comporta como uma resistência  $R_{DS}$  entre *Drain* e *Source*

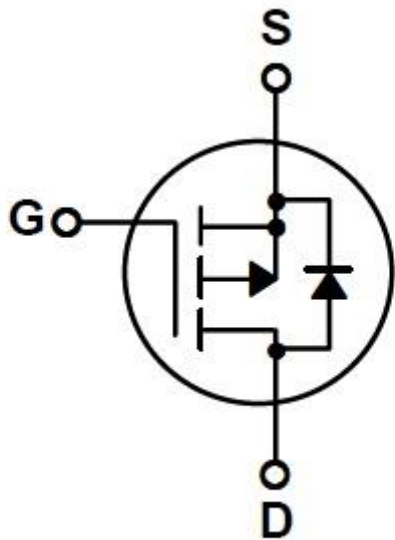
$$P_D = R_{DS} * I_{D-eficaz}^2$$



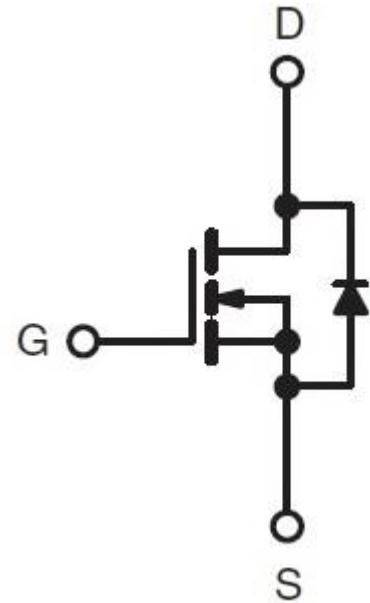


# MOSFETS de Potência (DMOS)

- Usados muito em chaveamento
- Apresentam um diodo parasita entre Dreno e Fonte



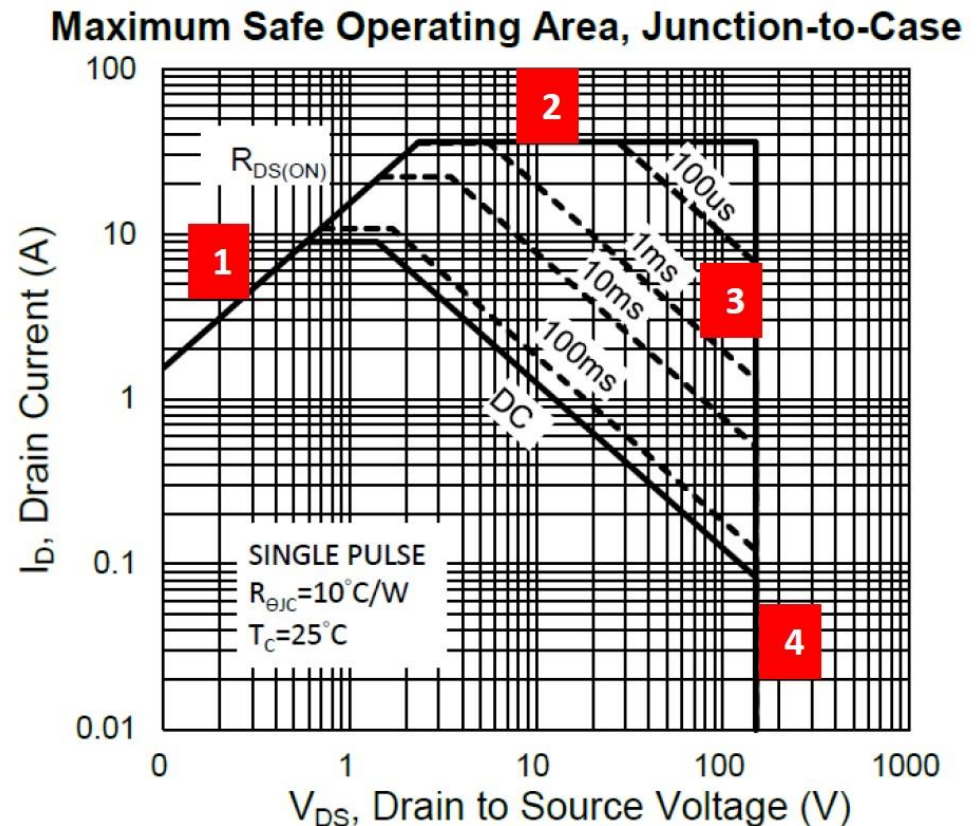
CANAL P



CANAL N

# Região de Operação Segura (SOA)

- 1- Limite  $R_{DS(ON)}$   
(dependência entre  $V_{DS}$  e  $I_D$ )
- 2-Limite Corrente  $I_D$
- 3- Limite por temperatura  
(Potência)
- 4- Limite de Tensão  $V_{DS}$   
(breakdown)



# Exemplo de Folha de Dados (*datasheet*)

## MGSF1N03L, MVGSF1N03L

### Power MOSFET

30 V, 2.1 A, Single N-Channel, SOT-23

These miniature surface mount MOSFETs low  $R_{DS(on)}$  assure minimal power loss and conserve energy, making these devices ideal for use in space sensitive power management circuitry. Typical applications are dc-dc converters and power management in portable and battery-powered products such as computers, printers, PCMCIA cards, cellular and cordless telephones.

#### Features

- Low  $R_{DS(on)}$  Provides Higher Efficiency and Extends Battery Life
- Miniature SOT-23 Surface Mount Package Saves Board Space
- MV Prefix for Automotive and Other Applications Requiring Unique Site and Control Change Requirements; AEC-Q101 Qualified and PPAP Capable
- These Devices are Pb-Free and are RoHS Compliant

#### MAXIMUM RATINGS ( $T_J = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)


Parameter	Symbol	Value	Unit
Drain-to-Source Voltage	$V_{DS}$	30	V
Gate-to-Source Voltage	$V_{GS}$	$\pm 20$	V
Continuous Drain Current	$I_D$	2.1	A
Continuous Drain Current	$I_{DL}$	1.5	A
Power Dissipation	$P_D$	0.69	W
Continuous Drain Current	$I_D$	1.6	A
Continuous Drain Current	$I_{DL}$	1.2	A
Power Dissipation	$P_D$	0.42	W
Pulsed Drain Current	$I_{DM}$	6.0	A
ESD Capability	ESD	125	V
Operating Junction and Storage Temperature	$T_J, T_{STG}$	$-55$ to $150$	$^\circ\text{C}$
Source Current (Body Diode)	$I_S$	2.1	A
Lead Temperature for Soldering Purposes	$T_L$	260	$^\circ\text{C}$

#### THERMAL RESISTANCE RATINGS

Parameter	Symbol	Max	Unit
Junction-to-Foot - Steady State	$R_{\theta JA}$	180	$^\circ\text{C/W}$
Junction-to-Ambient - Steady State (Note 1)	$R_{\theta JA}$	300	
Junction-to-Ambient - $t < 10$ s (Note 1)	$R_{\theta JA}$	250	
Junction-to-Ambient - Steady State (Note 2)	$R_{\theta JA}$	400	

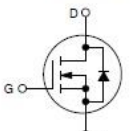
Stresses exceeding those listed in the Maximum Ratings table may damage the device. If any of these limits are exceeded, device functionality should not be assumed, damage may occur and reliability may be affected.

1. Surface-mounted on FR4 board using  $650\text{ mm}^2$ , 1 oz. Cu pad size.
2. Surface-mounted on FR4 board using  $50\text{ mm}^2$ , 1 oz. Cu pad size.
3. ESD Rating Information: HBM Class 0.

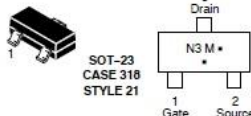
  
**ON Semiconductor®**  
[www.onsemi.com](http://www.onsemi.com)

$V_{(BR)DSS}$	$R_{D(on)}$ TYP	$I_D$ MAX
30 V	80 m $\Omega$ @ 10 V	2.1 A
	125 m $\Omega$ @ 4.5 V	

N-Channel



MARKING DIAGRAM/  
PIN ASSIGNMENT



SOT-23  
CASE 318  
STYLE 21

N3 = Specific Device Code  
M = Date Code\*  
\* = Pb-Free Package

(Note: Microdot may be in either location)  
\*Date Code orientation and/or overbar may vary depending upon manufacturing location.

#### ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping†
MGSF1N03LT1G	SOT-23 Pb-Free	3000 / Tape & Reel
MGSF1N03LT3G	SOT-23 (Pb-Free)	10000 / Tape & Reel
MVGSF1N03LT1G	SOT-23 (Pb-Free)	3000 / Tape & Reel

†For information on tape and reel specifications, including part orientation and tape sizes, please refer to our Tape and Reel Packaging Specification Brochure, BRD8011.D.

## MGSF1N03L, MVGSF1N03L

#### ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
<b>OFF CHARACTERISTICS</b>					
Drain-to-Source Breakdown Voltage ( $V_{GS} = 0\text{ Vdc}$ , $I_D = 10\text{ }\mu\text{Adc}$ )	$V_{(BR)DSS}$	30	—	—	Vdc
Zero Gate Voltage Drain Current ( $V_{DS} = 30\text{ Vdc}$ , $V_{GS} = 0\text{ Vdc}$ ) ( $V_{DS} = 30\text{ Vdc}$ , $V_{GS} = 0\text{ Vdc}$ , $T_J = 125^\circ\text{C}$ )	$I_{DSS}$	—	—	1.0 10	$\mu\text{Adc}$
Gate-Body Leakage Current ( $V_{GS} = \pm 20\text{ Vdc}$ , $V_{DS} = 0\text{ Vdc}$ )	$I_{GSS}$	—	—	$\pm 100$	nAdc

#### ON CHARACTERISTICS (Note 4)

Gate Threshold Voltage ( $V_{DS} = V_{GS}$ , $I_D = 250\text{ }\mu\text{Adc}$ )	$V_{GS(th)}$	1.0	1.7	2.4	Vdc
Static Drain-to-Source On-Resistance ( $V_{GS} = 10\text{ Vdc}$ , $I_D = 1.2\text{ Adc}$ ) ( $V_{GS} = 4.5\text{ Vdc}$ , $I_D = 1.0\text{ Adc}$ )	$r_{DS(on)}$	—	0.08 0.125	0.10 0.145	$\Omega$

#### DYNAMIC CHARACTERISTICS

Input Capacitance ( $V_{DS} = 5.0\text{ Vdc}$ )	$C_{iss}$	—	140	—	pF
Output Capacitance ( $V_{DS} = 5.0\text{ Vdc}$ )	$C_{oss}$	—	100	—	
Transfer Capacitance ( $V_{DS} = 5.0\text{ Vdc}$ )	$C_{rss}$	—	40	—	

#### SWITCHING CHARACTERISTICS (Note 5)

Turn-On Delay Time	$t_{d(on)}$	—	2.5	—	ns
Rise Time	$t_r$	—	1.0	—	
Turn-Off Delay Time	$t_{d(off)}$	—	16	—	
Fall Time	$t_f$	—	8.0	—	
Gate Charge (See Figure 6)	$Q_T$	—	6000	—	pC

#### SOURCE-DRAIN DIODE CHARACTERISTICS

Continuous Current	$I_S$	—	—	0.6	A
Pulsed Current	$I_{SM}$	—	—	0.75	
Forward Voltage (Note 5)	$V_{SD}$	—	0.8	—	V

Product parametric performance is indicated in the Electrical Characteristics for the listed test conditions, unless otherwise noted. Product performance may not be indicated by the Electrical Characteristics if operated under different conditions.

4. Pulse Test: Pulse Width  $\leq 300\text{ }\mu\text{s}$ , Duty Cycle  $\leq 2\%$ .
5. Switching characteristics are independent of operating junction temperature.

# Exemplo de Folha de Dados (datasheet)

MGSF1N03L, MVGSF1N03L

## TYPICAL ELECTRICAL CHARACTERISTICS

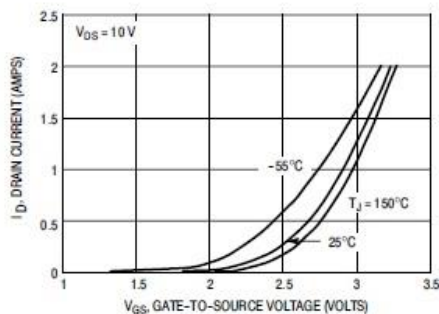


Figure 1. Transfer Characteristics

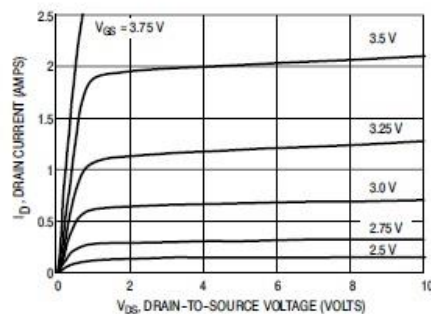


Figure 2. On-Region Characteristics

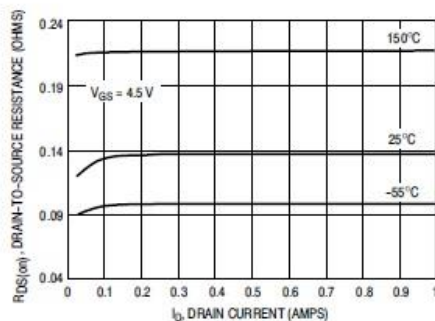


Figure 3. On-Resistance versus Drain Current

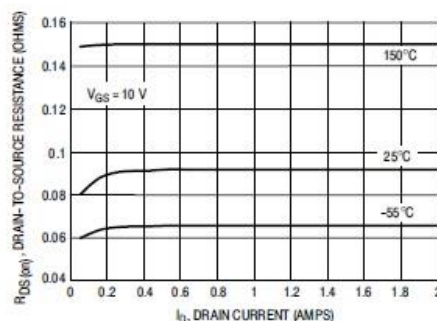


Figure 4. On-Resistance versus Drain Current

MGSF1N03L, MVGSF1N03L

## TYPICAL ELECTRICAL CHARACTERISTICS

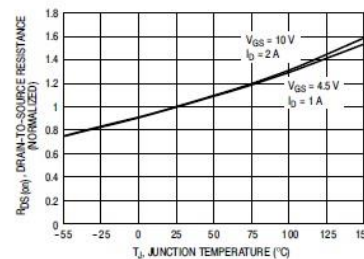


Figure 5. On-Resistance Variation with Temperature

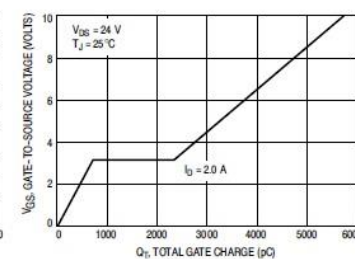


Figure 6. Gate Charge

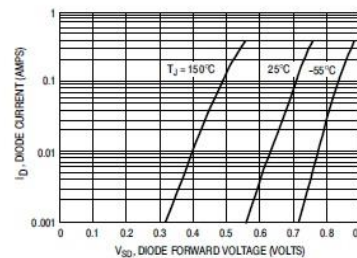


Figure 7. Body Diode Forward Voltage

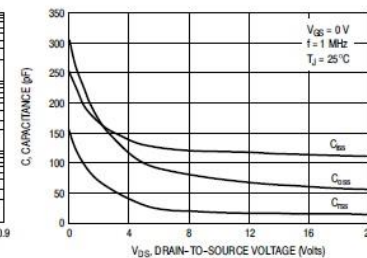


Figure 8. Capacitance

MGSF1N03L, MVGSF1N03L

## TYPICAL ELECTRICAL CHARACTERISTICS

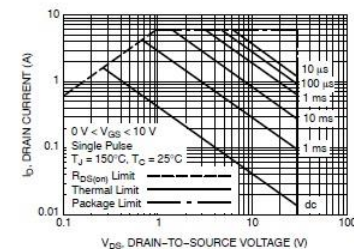
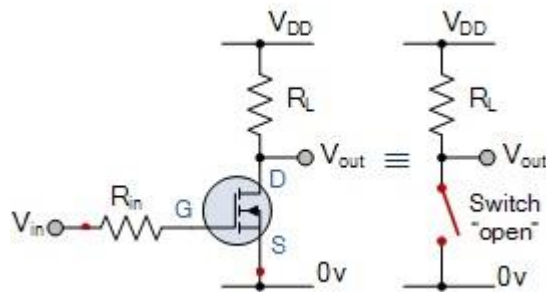


Figure 9. Maximum Rated Forward Biased Safe Operating Area

# MOSFET de Indução operando Como chave

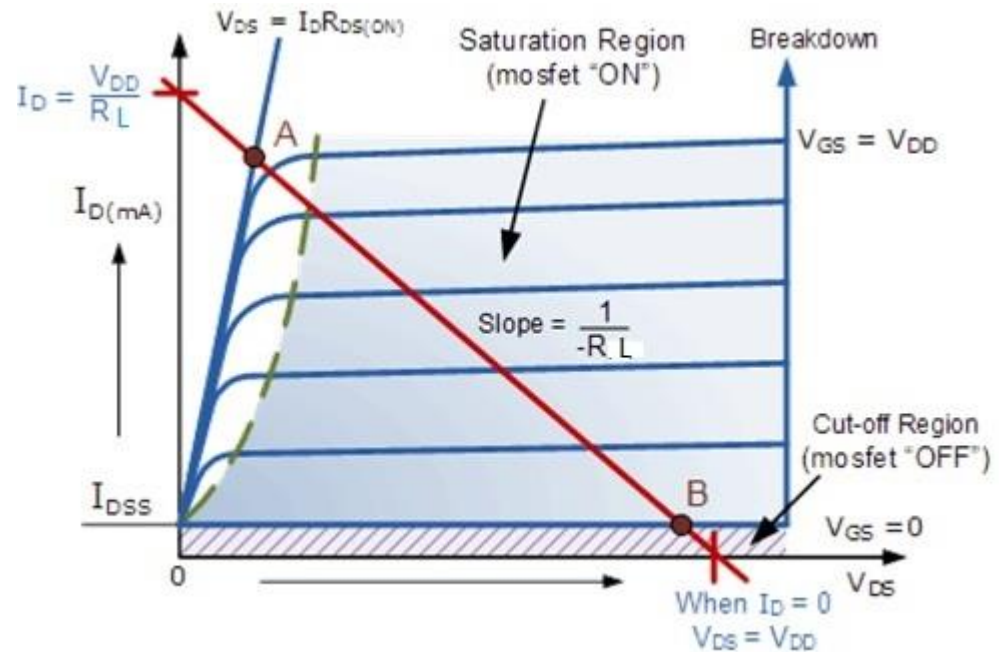
## 1- Corte (Ponto B)- Chave aberta



### Condição:

$$V_{GS} < V_T \rightarrow V_{GS} < V_{GS(th)}(\text{min}) \text{ (datasheet)}$$

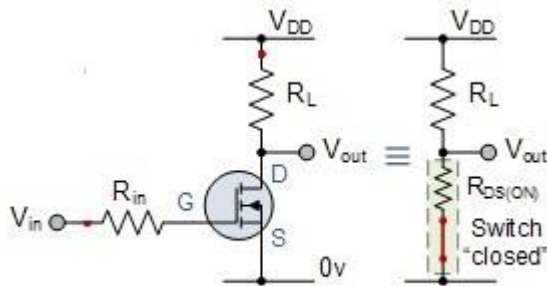
Teremos então  $I_D = 0$ ,  $V_{out} = V_{DS} = V_{DD} = '1'$





# MOSFET de Indução operando Como chave (cont.)

## 2- Região Triodo (Ponto A)- Chave fechada



### Condição:

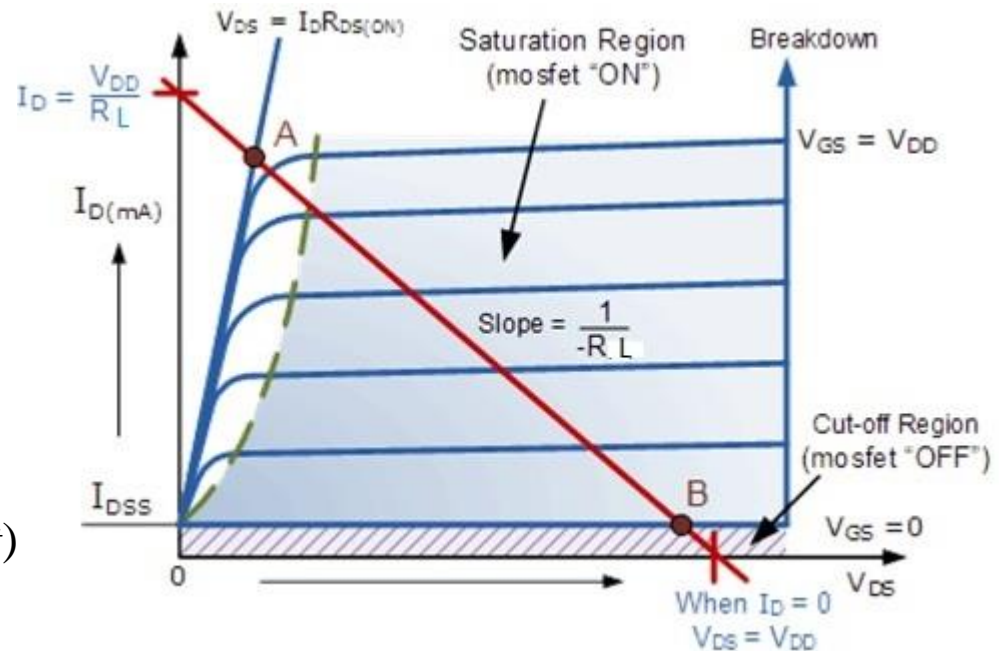
$V_{GS} > V_T \rightarrow V_{GS} > V_{GS(th)}(\text{max})$  (datasheet)

$V_{GS} < V_{GSmax}$  (datasheet)

*Na verdade devemos fazer  $V_{GS}$  maior que  $V_T$  e também suficiente para operarmos na região de triodo com a corrente de coletor desejada e baixa  $V_{DS}$ .*

*Normalmente desprezamos  $R_{DS(ON)}$  e*

*$I_D = V_{DD}/R_L$ ,  $V_{out} = V_{DS} = 0V = '0'$*

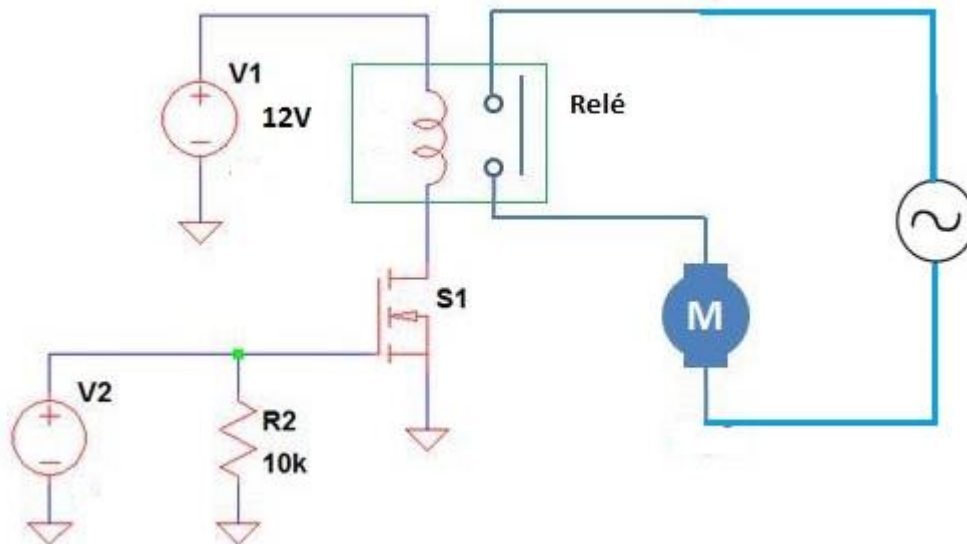


Os MOSFETS têm alta capacitância de entrada e devemos usar  $R_{in}$  de valor baixo.

Normalmente usam-se CIs drivers para o acionamento do Gate.

## Exemplo

- Um relé de 12V é usado para acionar um pequeno motor de corrente alternada. Utiliza-se um transistor NMOS modelo MGSF1N03L. O relé consome 0,5A para acionar. A tensão V2 é usada para ligar e desligar o relé. Determine o valor de V2 que permite ativar o relé e o valor de V2 que permite desligá-lo, fazendo a corrente de dreno do MOSFET igual a zero.

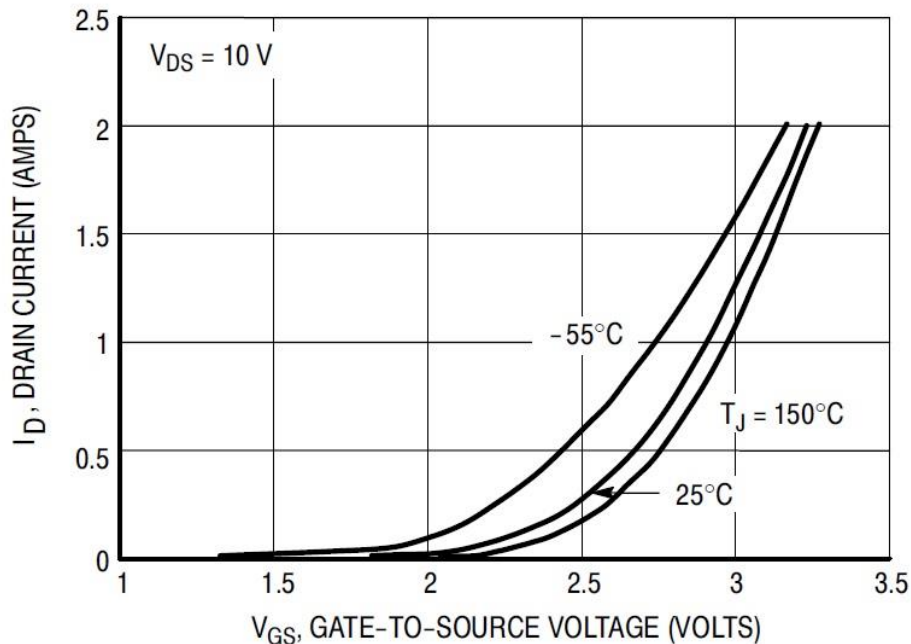


## Exemplo (cont.)

- Para o corte, devemos ter:
- $V_{GS} < V_{GS(th)}(\min) \rightarrow V_{GS} < 1V$  (da folha de dados)  $\rightarrow V_2 < 1,0V$

ON CHARACTERISTICS (Note 4)

Gate Threshold Voltage ( $V_{DS} = V_{GS}$ , $I_D = 250 \mu A_{dc}$ )	$V_{GS(th)}$	1.0	1.7	2.4	Vdc
--	--------------	-----	-----	-----	-----



Notar que da folha de dados do transistor:

$$I_{Dmax} = 2,1 A > 0,5A \text{ (corrente relé)}$$

$$V_{DSmax} = V_{DSS} = V_{(BR)DSS} = 30 V > 12V \text{ (tensão relé)}$$



# Exemplo (cont.)

- Para trabalharmos na região triodo:
- 1-  $V_{GS} > V_{GS(th)}(max) \rightarrow V_{GS} > 2,4V$

## ON CHARACTERISTICS (Note 4)

Gate Threshold Voltage ( $V_{DS} = V_{GS}$ , $I_D = 250 \mu A_{dc}$ )	$V_{GS(th)}$	1.0	1.7	2.4	Vdc
--	--------------	-----	-----	-----	-----

- 2- Por outro lado, analisando a curva característica de Dreno, vemos que para termos uma corrente  $I_D$  de 0,5A devemos ter no mínimo uma tensão  $V_{GS}$  de 3,0V (com 2,75V atingimos ao redor de 0,25A). Por outro lado com  $V_{GS}$  3,0V a tensão  $V_{DS}$  (e portanto  $R_{DS(ON)}$ ) é ainda um pouco alta. Escolhendo  $V_{GS}$  3,25V temos um menor  $V_{DS}$  (ao redor de zero) e acima desse valor de  $V_{GS}$  a tensão  $V_{DS}$  praticamente não varia.
- Logo, escolhemos  $V_{GS} = V_2 \geq 3,25V$  para nível alto
- Como  $R_{DS(ON)}$  (e portanto  $V_{DS}$ ) diminui com o aumento de  $V_{GS}$ , é sempre vantajoso trabalhar com  $V_{GS}$  elevado (bem acima do limiar)
- Por outro lado, deve-se sempre ter  $V_{GS} < V_{GS(max)}$  fornecido pelo fabricante. No caso do transistor utilizado,  $V_{GS(max)} = 20V$

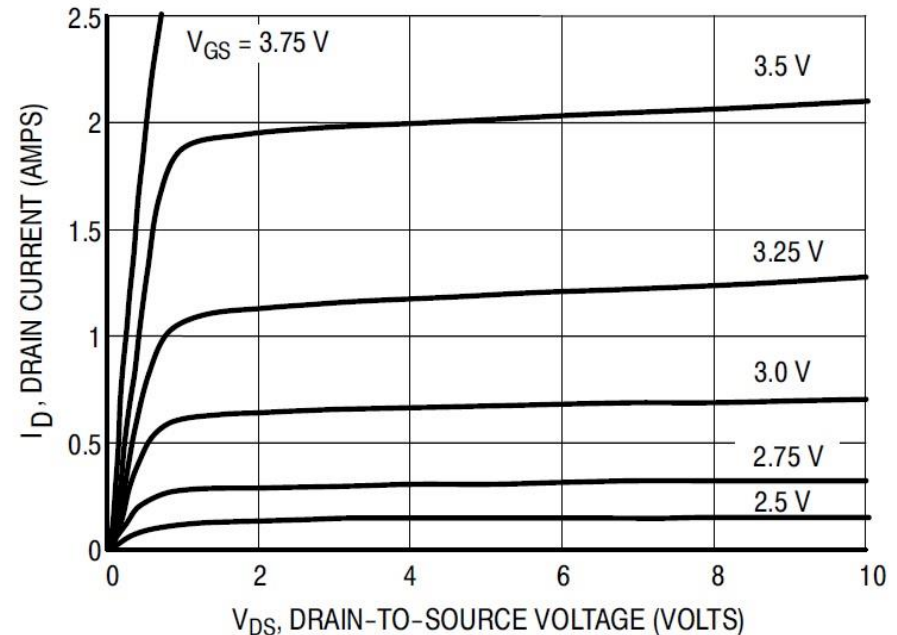
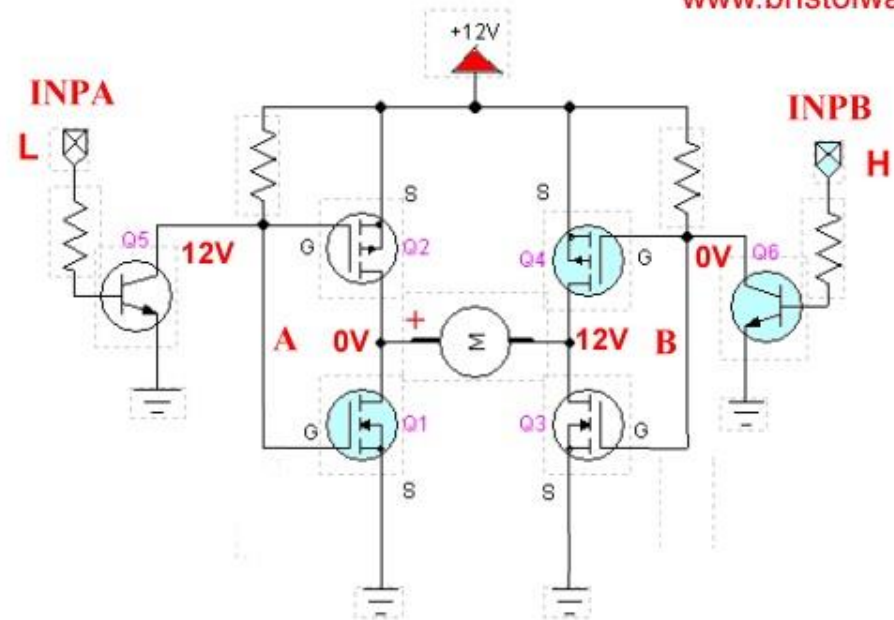
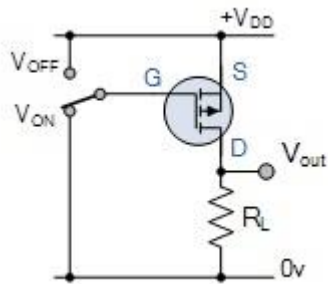
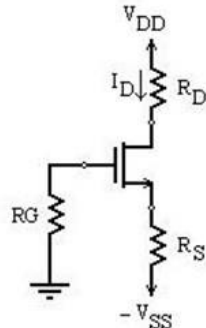
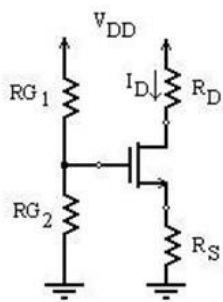


Figure 2. On-Region Characteristics

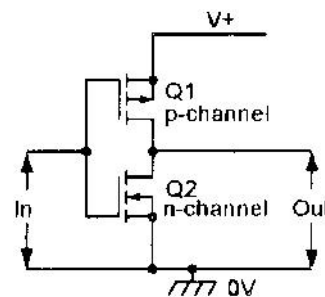
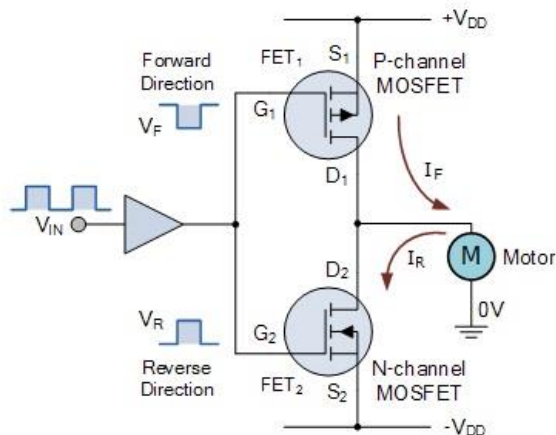
# Exemplos de Circuitos com MOSFETs

www.bristolwatch.com



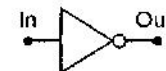
INPA	INPB	Result
L	L	A HIGH B HIGH
H	H	A LOW B LOW
H	L	A LOW B HIGH
L	H	A HIGH B LOW

**Two Input  
H-Bridge**



**Inversor CMOS**

In	Out
0	1
1	0

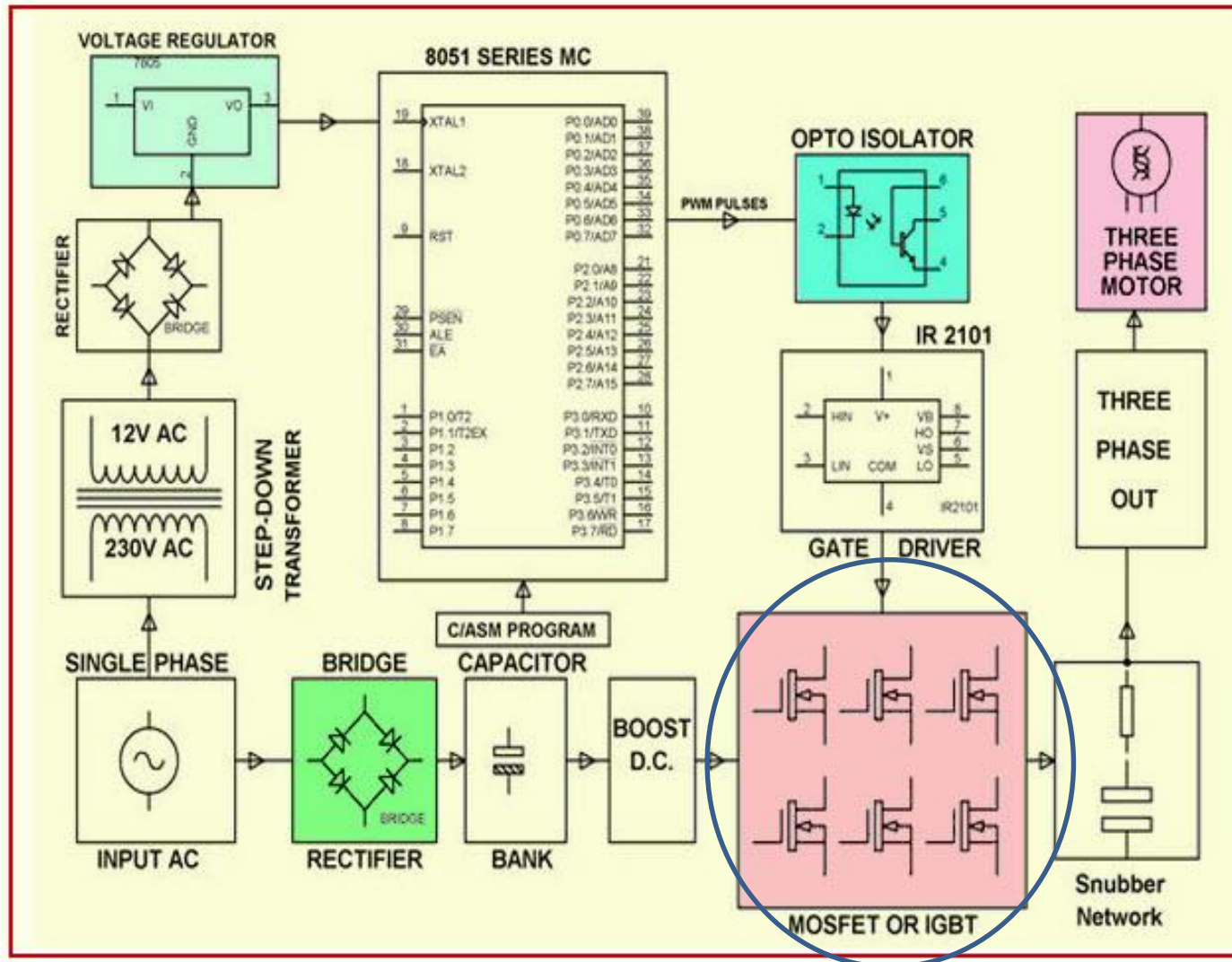


(a)

(b)

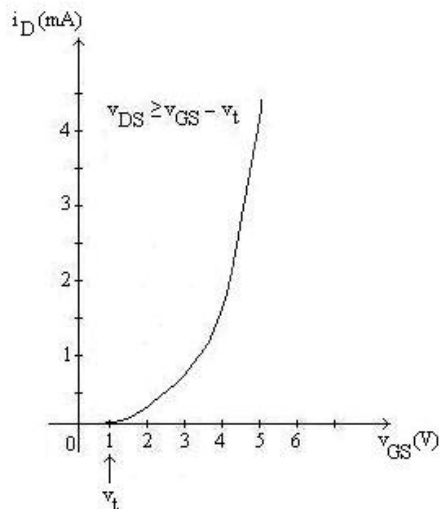
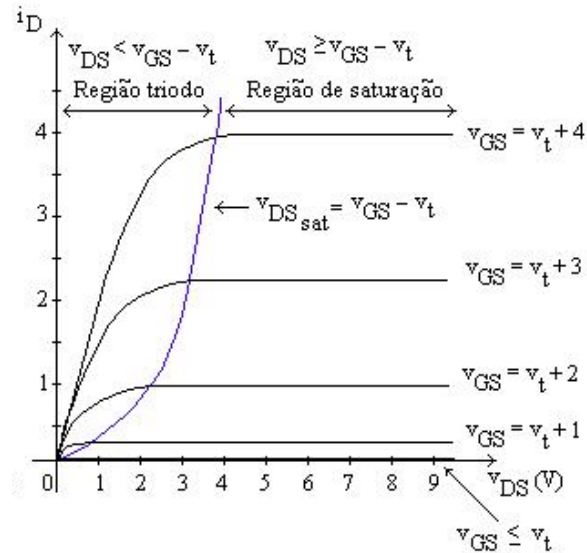
(c)

# Exemplo: Acionamento com Microcontrolador



# Comparativo MOSFET e BJT

## ► MOSFET



## ► BJT

