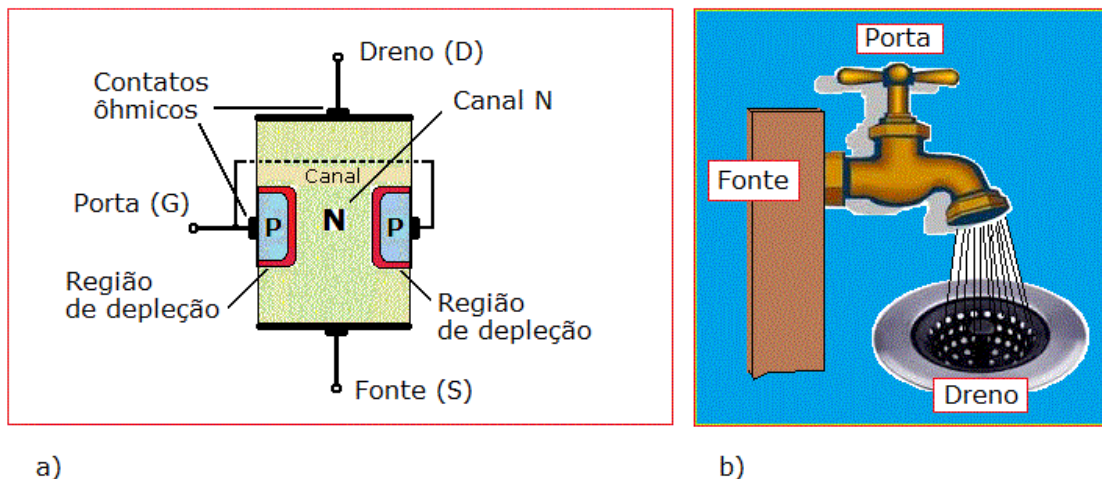


# Transistor de Efeito de Campo - FET

## FET - Aspectos gerais

O FET (Field Effect Transistor) ou transistor de efeito de campo é um dispositivo unipolar (um tipo de portador - elétron ou lacuna), constituído a partir de uma barra de material do tipo "P" ou "N" denominado "Canal", nas extremidades da barra contatos metálicos formando um terminal chamado dreno ou "drain" e outro denominado fonte, supridor ou "source", entre os contatos dreno-fonte existem ainda duas regiões "P" ou duas regiões "N", interligadas, difundidas no interior da barra chamadas de porta ou "gate".

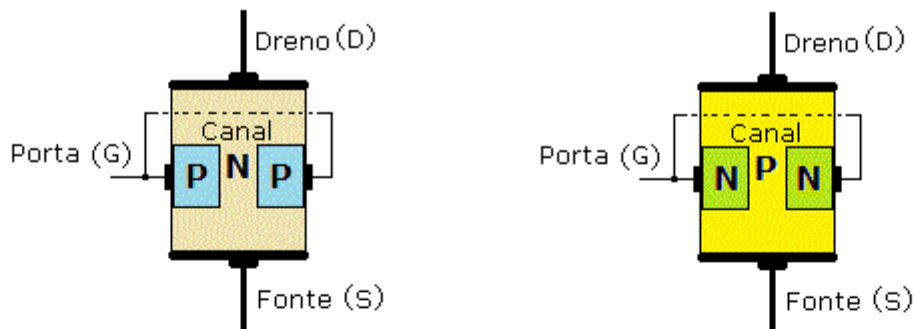
Sua operação parte do princípio em que um campo elétrico perpendicular a um fluxo de corrente controla a resistência de um canal constituído por portadores do tipo "P" ou portadores do tipo "N" os quais constituem, respectivamente, FET de canal P e FET de canal N.



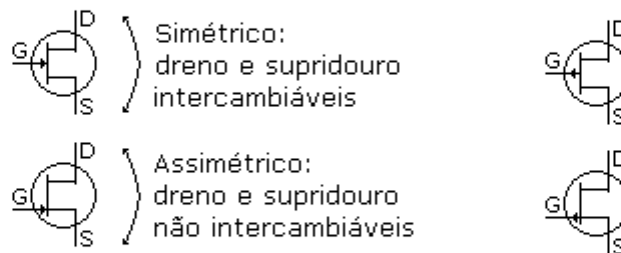
**Figura 1** - a) Transistor de efeito de campo de junção JFET. b) Analogia do fluxo de água para o mecanismo de controle do JFET.

## FET de Junção ou JFET

Na ausência de um potencial aplicado ao JFET restam duas junções **P-N** não polarizadas. O resultado é uma região de depleção em cada junção. A região de depleção não possui portadores livres, e portanto, não permite a condução através da região. Quando estas regiões avançam até se tocarem no interior do canal a passagem de corrente, da fonte ao dreno, é cortada.



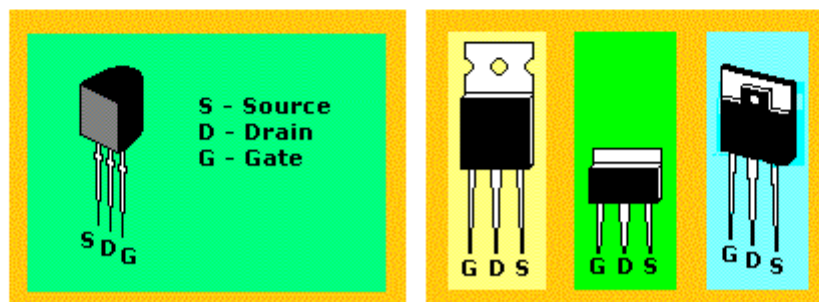
**ESTRUTURA**



Simétrico:  
dreno e supridor  
intercambiáveis

Assimétrico:  
dreno e supridor  
não intercambiáveis

**SÍMBOLO**



**ENCAPSULAMENTO**

**Figura 2** - Estrutura, símbolos e encapsulamentos dos JFETs simétrico e assimétrico canal P e canal N.

## Comparação do JFET ao Transistor de Junção Bipolar - TJB

O JFET é um dispositivo controlado por tensão enquanto o TJB é controlado por corrente. O JFET é mais estável, por outro lado, O TJB é mais sensível principalmente às variações de temperatura.

### Vantagens em comparação ao transistor bipolar:

- Impedância de entrada extremamente elevada, da ordem de 100 M
- Maior imunidade a ruído
- Maior estabilidade térmica
- Fabricação relativamente simples
- Como desvantagens apresenta menor velocidade de resposta e menor produto ganho x banda passante (PGL)

### Basicamente dois Tipos:

- O FET de junção ou JFET
- O FET de metal óxido semiconductor de porta isolada, MOSFET ou IG-FET

O MOSFET é também chamado de IG-FET (Isolated Gate) porta isolada, porque apresenta a porta internamente isolada por uma camada de silício  $\text{SiO}_2$ , O que faz apresentar uma resistência de entrada bem mais elevada que o JFET.

### Principais aplicações:

- Amplificadores de tensão para pequenos sinais
- Medidores de alta impedância de entrada
- Circuitos digitais, principalmente quando integrado

**Funcionamento** - O funcionamento de um JFET canal P, é análogo ao JFET canal N, necessário apenas inverter a polaridade das fontes de alimentação dreno-supridor (VDS) e gate-supridor VGS. As figuras a seguir, irão mostrar na sequência, o princípio de funcionamento do JFET de junção canal N.

## Funcionamento - Região de Saturação

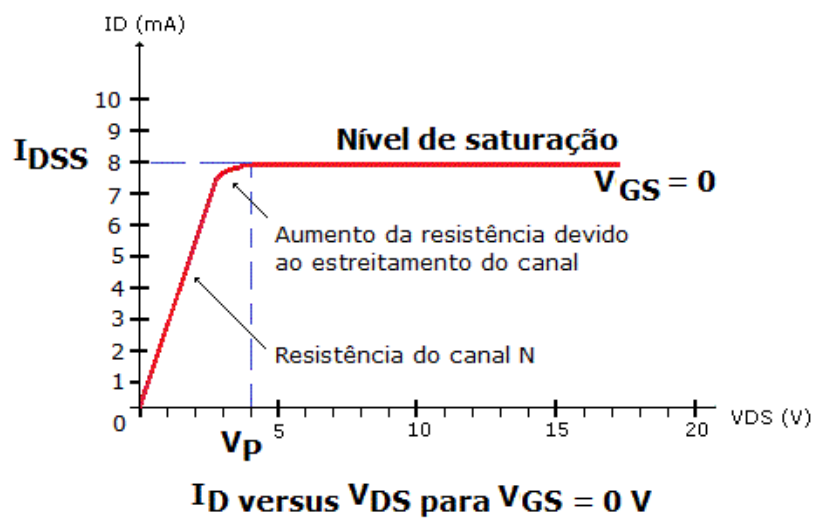
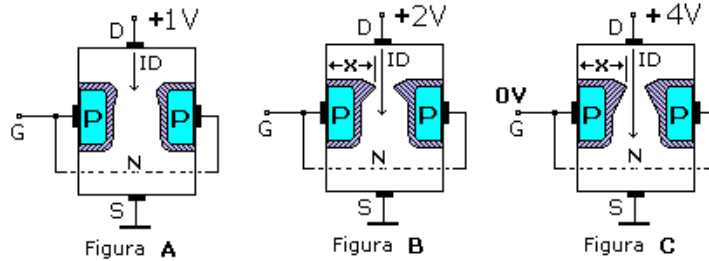
**Polarização dreno-supridor com  $V_{GS} = 0 \rightarrow$  Região de Saturação** - As figuras A, B e C mostram na sequência o efeito da polarização dreno-supridor com  $V_{GS}=0$ .

Estrangulamento ( $V_{pi}$ )

$V_{DS} = V_{pi}$

$V_{GS} = 0$

$I_D = I_D \text{ Saturação}$



**Figura 4** - Região de saturação.

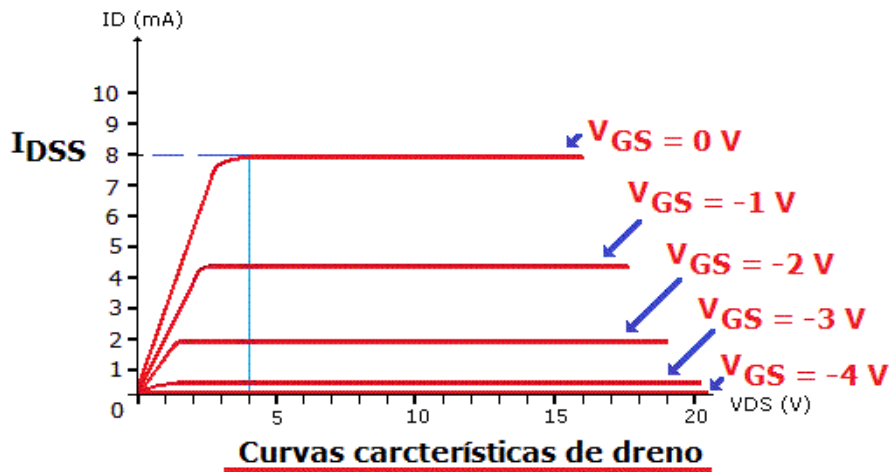
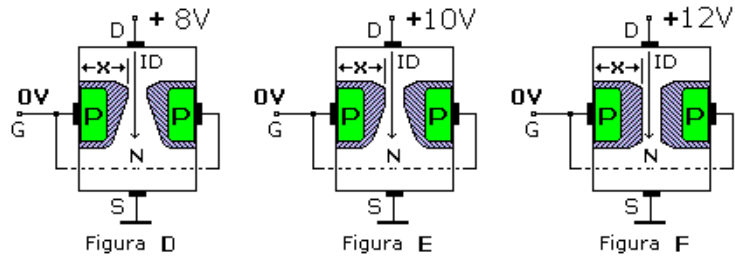
## Funcionamento - Região Ativa

**Controle de  $I_D$  exercido por  $V_{GS}$  → Região ativa** - As figuras D, E e F mostram na sequência o avanço das zonas de depleção em direção a outra extremidade do canal. A partir da figura F, tem início à região ativa do JFET onde o controle da corrente  $I_D$  passa a ser exercido por  $V_{GS}$ .

Região ativa

$V_{pi} < V_{DS} < V_p$

$I_D$  proporcional a  $V_{GS}$

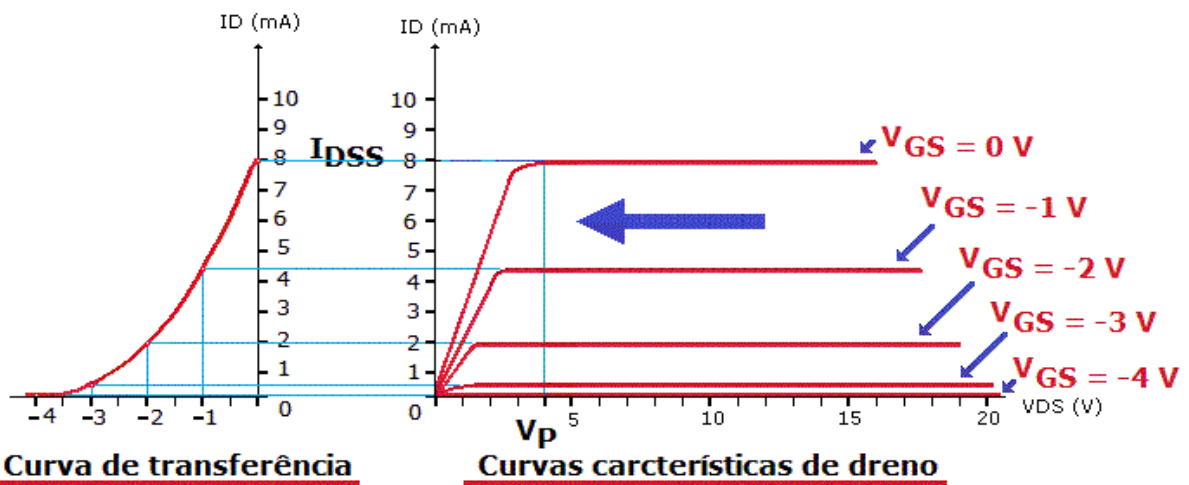
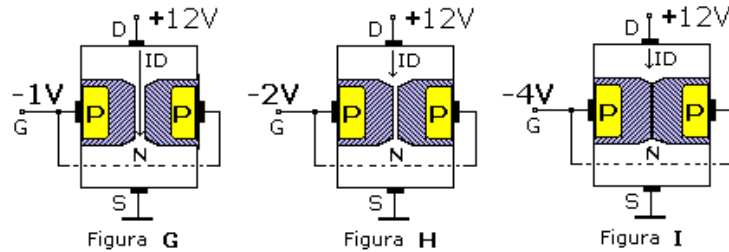


**Figura 5 - Região Ativa.**

## Funcionamento - Região de Corte

**ID corta com -VGS → Região de Corte** - As figuras G, H e I mostram na sequência o estreitamento do canal até alcançar o corte, onde ocorre o pinçamento e ID corta com -VGS ou VGSoff que neste JFET do exemplo é -4 Volts.

Pinçamento ( $V_p$ )  
 $V_{GS} = V_{GS\ off} (-4v)$   
 $I_D = I_D\ Corte$



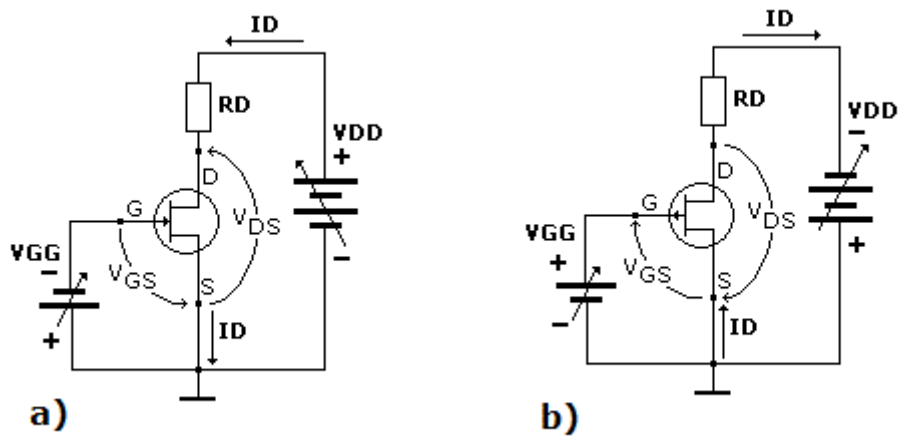
Obtenção da curva de transferência a partir das curvas de dreno

**Figura 6** - Região de saturação.

## Polarização do JFET

Polarizar um dispositivo é fixar um ponto de trabalho ou ponto quiescente por meio de componentes periféricos, podendo esse ponto ser visualizado na característica de saída do dispositivo.

A figura abaixo, representa dois circuitos de polarização (tipo autopolarização), para os JFETs canal N e Canal P respectivamente.



**Figura 7:** a) Polarização do JFET canal N - b) Polarização do JFET canal P.

## Característica de transferência (VGS x ID) - Parte I

A física por trás do funcionamento do JFET é a mesma para todos os JFETs.

Apenas o tamanho das regiões dopadas, o nível de dopagem etc. mudam de um JFET para outro.

Por isso todos os JFETs tem uma curva de transferência (transcondutância) que é o gráfico de uma equação do tipo  $Y=ax^2$ .

Vamos representar a característica de transferência de um determinado JFET que apresenta:  $V_p = -4 \text{ v}$  e  $IDSS = 12 \text{ mA}$ .

Como ponto de partida, consideramos 5 pontos estratégicos tendo como limites "0" e "VGSoff" e aplicaremos a formula de transferência para encontrar "ID" correspondente a cada ponto, conforme mostra a figura 6.

A partir da expressão  $ID = IDSS \cdot (1 - VGS/VP)^2$  (Equação de Shockley) encontraremos os valores de ID mostrados na 3ª coluna da tabela.

A partir da expressão

$$ID = IDSS \times \left(1 - \frac{VGS}{Vp}\right)^2$$

Encontraremos os valores de ID mostrados na terceira coluna da tabela ao lado.

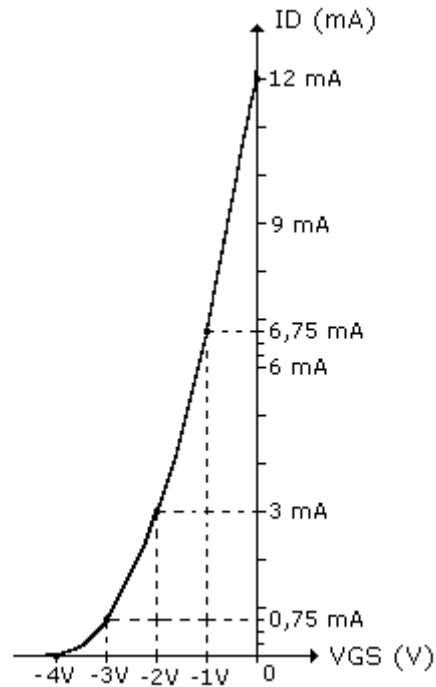
Pontos	VGS (V)	ID (mA)
P1	0	12 mA
P2	-1V	6,75 mA
P3	-2V	3,0 mA
P4	-3V	0,75 mA
P5	-4V	0 mA

**Figura 8:** - a) Equação de transferência - b) Tabela com resultados



## Característica de transferencia (VGS x ID) - Parte II

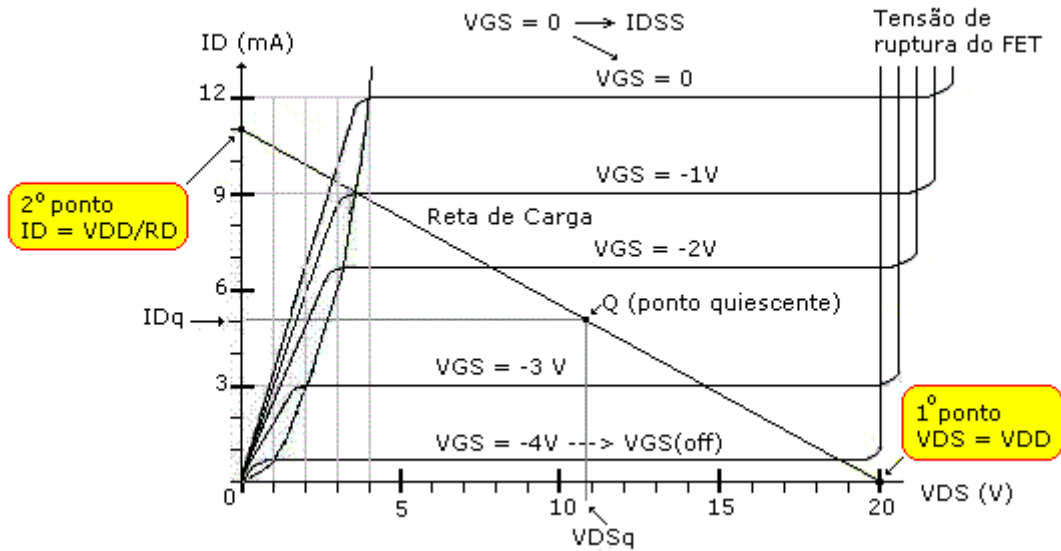
Utilizamos os dados da tabela anterior (tela 08) para representar graficamente as características de transferência (VGS x ID) do FET em questão. O resultado é o gráfico representado na figura abaixo.



**Figura 9** - Característica de transferencia (VGS x ID).

## Característica de Saída

Tomando como base as características de entrada do FET anterior e considerando o máximo valor da tensão de alimentação suportada por este ( $V_{DS\text{ máx}} = 20$  Volts), poderemos representar em um gráfico as características de saída ( $V_{DS} \times I_D$ ), também denominada "curvas de dreno".



**Figura 10** - Reta de carga e ponto de trabalho na característica de saída.

## Definição da reta de carga e ponto de trabalho - ponto quiescente "Q"

Com base no circuito de polarização do FET, aplicando Kirchoff na malha de dreno, temos:

$$VDD = RD \cdot ID + VDS$$

que corresponde a equação de uma reta em um sistema ( $ID \times VDS$ ) e para traçá-la necessitamos dois pontos, a saber:

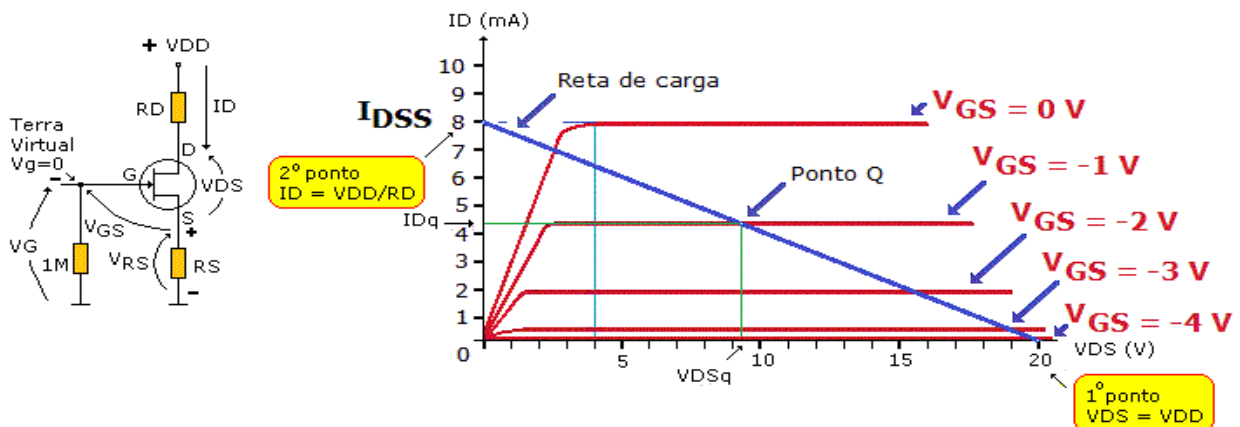
Primeiro ponto:

$$ID = 0 \rightarrow VDS = VDD$$

Segundo ponto:

$$VDS = 0 \rightarrow ID = VDD/RD$$

A partir destes dois pontos traçaremos a reta de carga na característica de saída do dispositivo e localizaremos nesta, o ponto de trabalho ou ponto quiescente, conforme visto na figura 10.



**Figura 11** - Circuito de autopolarização e reta de carga.

## Autopolarização do JFET - Parte I

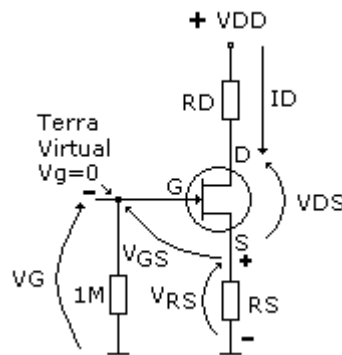
Com um JFET autopolarizado, conforme mostrado na figura abaixo, a tensão da fonte (supridor) é igual ao produto da corrente de dreno pela resistência ( $r_s$ ) de supridor, assim temos:

$$V_S = I_D \cdot R_S$$

A tensão porta-supridor é o negativo dessa tensão, que é igual a

$$V_{GS} = -I_D \cdot R_S$$

Essa é a equação para encontrar o ponto de trabalho (ponto "Q") em um JFET autopolarizado, conforme mostrado na figura abaixo.



**Figura 15** - JFET autopolarizado.

## Autopolarização do JFET - Parte II - Conceito do Terra Virtual

**Analogia** - Faremos a seguinte análise: como não ha corrente no Gate  $V_{GS}=0$ , então considera-se um curto-circuito virtual entre os terminais de gate e terra, embora a resistência do gate seja extremamente elevada, conceitualmente nestas condições o terminal do gate torna-se um terra virtual, assim sendo:

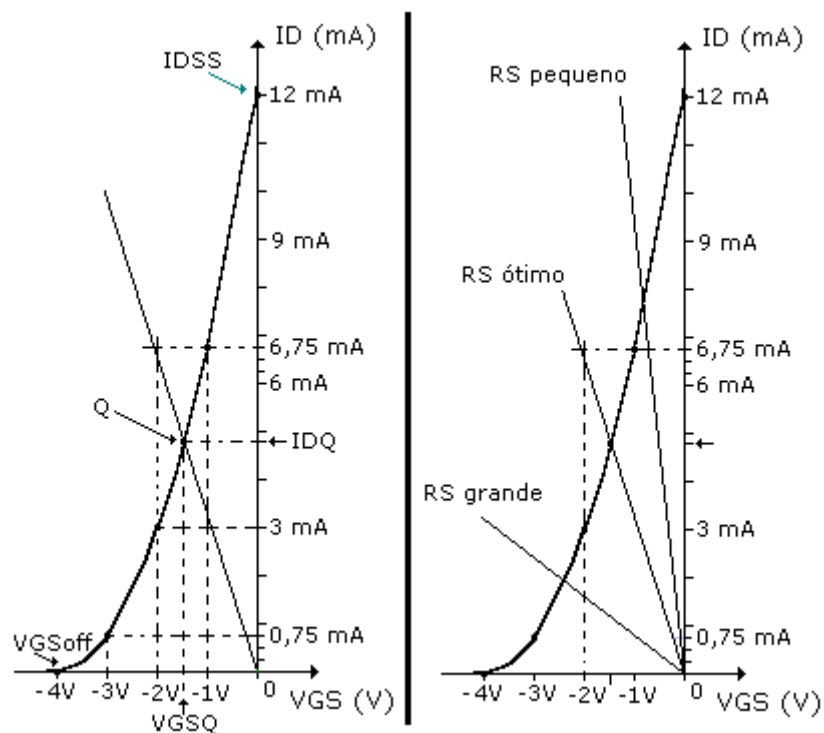
$$V_G = V_{GS} + V_{RS} \rightarrow 0 = V_{GS} + V_{RS} \rightarrow -V_{GS} = V_{RS}$$

$$R_S = V_{RS}/I_D \rightarrow R_S = -V_{GS}/I_D \text{ e } I_D = -V_{GS}/R_S$$

Os dados desta equação permitem determinar a linha de autopolarização, a partir dos valores de  $V_{GS}$  e  $I_D$  quiescente. Com  $V_{RS} = -V_{GS}$ , podemos calcular o resistor  $R_S$  a partir da tensão gate supridor dividida pela corrente do dreno, conforme a expressão:

$$R_S = -V_{GS}/I_D = -2\text{v}/4\text{mA} = 0,5 \times 10^3 \Omega = 0,5 \text{ k}\Omega \text{ ou } 500 \Omega$$

Os dados desta equação permitem determinar a linha de autopolarização, a partir dos valores de  $V_{GS}$  e  $I_D$  quiescente, mostrados na figura 10. Este exemplo considera determinado JFET de  $V_{GSoff} = -4\text{V}$ , e o ponto quiescente em  $V_{GSq} = -2\text{V}$  e  $I_{Dq} = 4 \text{ mA}$ , o valor do resistor de supridor  $R_S$ , será:

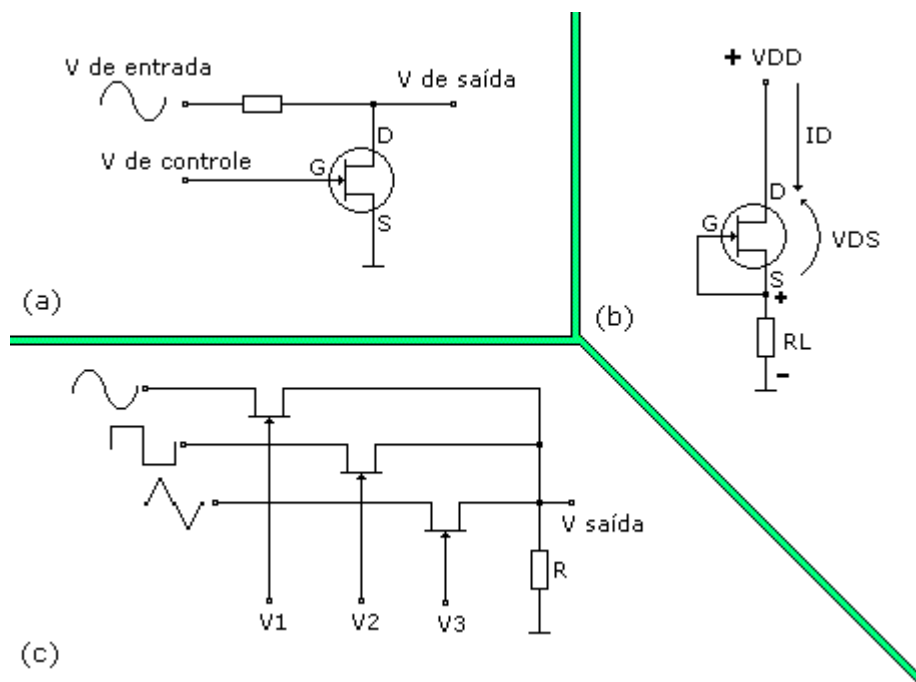


**Figura 13:** a) Linha de autopolarização - b) Deslocamento do ponto de trabalho "Q" por diferentes valores de  $R_S$ .

## Aplicações do JFET

A figura 14 mostra as seguintes aplicações:

- Em a), temos o JFET utilizado como **chave eletrônica**, que permite ou bloqueia a passagem um sinal analógico a partir de uma tensão CC de controle aplicada ao gate.
- Em b), temos o JFET utilizado como **fonte de corrente**, fornece uma corrente constante, para uma carga variável.
- Em C), temos o JFET utilizado como **multiplexador analógico**, capaz de selecionar uma ou mais formas de ondas sem sobrecarregar as respectivas fontes.



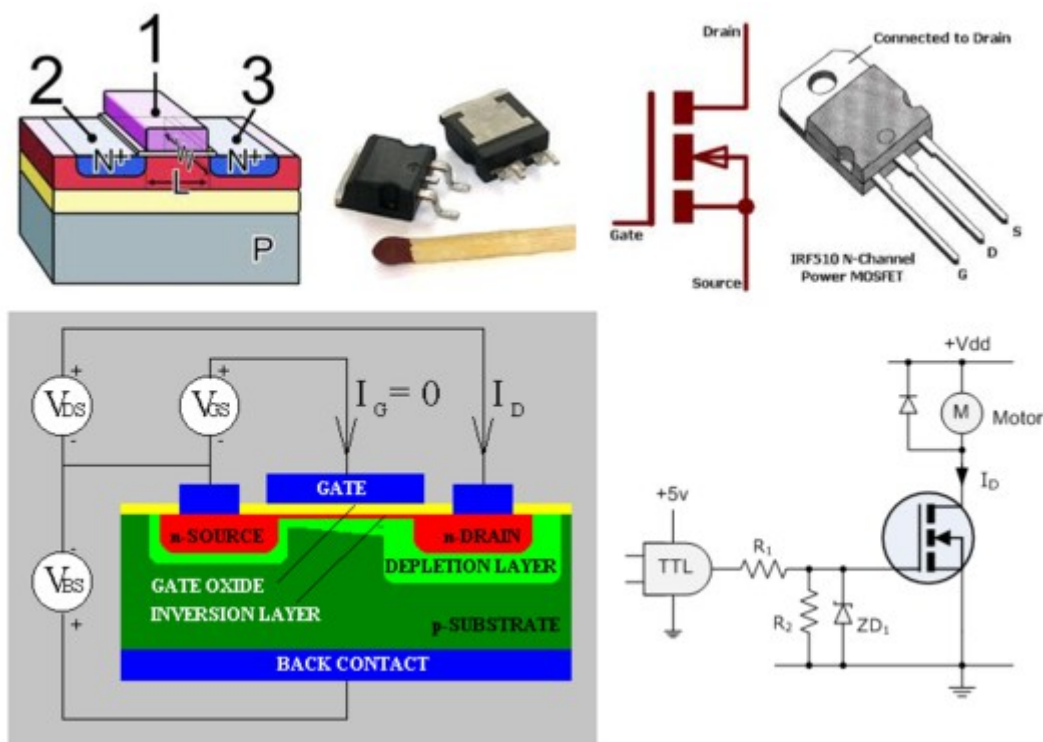
**Figura 14:** Aplicações do JFET: a) Chave analógica - b) Limitador de corrente - c) Multiplexador analógico .

# Transistor de Efeito de Campo de Metal óxido semicondutor - MOSFET

## MOSFET - Transistor de Efeito de Campo de Metal óxido semicondutor

Além do FET discreto ou FET de junção - JFET, existe um outro tipo de transistor de efeito de campo chamado MOSFET, que significa "transistor de efeito de campo de metal óxido semicondutor". Na Figura 20 temos, para o MOSFET, as seguintes representações:

- **Estrutura** que representa MOSFET.
- **Encapsulamento** do tipo, dispositivo para montagem em superfície - SMD e outro para montagem em placa convencional.
- **Símbolo do MOSFET** canal N. Para representar o canal P, é só inverter o sentido da seta no interior do canal.
- **Circuito chaveador**, para controlar um motor a partir de uma porta AND, que usa a lógica TTL.



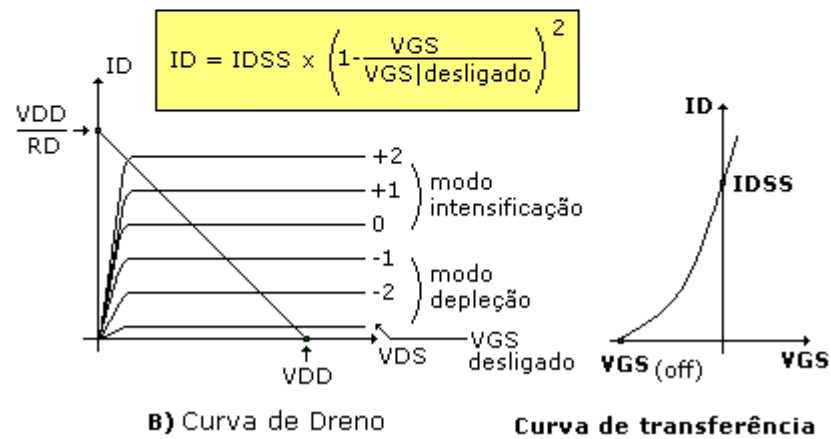
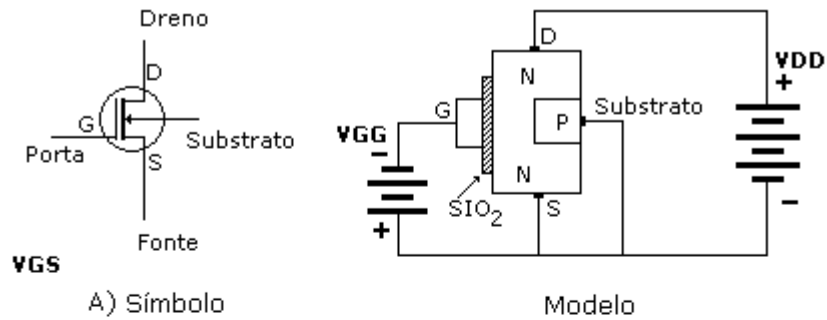
**Figura 15:** MOSFET: a) Estrutura, encapsulamento, simbologia e circuito.

Quanto ao funcionamento, o MOSFET ainda divide-se em **modo depleção** ou normalmente ligado, e **modo intensificação** ou enriquecimento.

## MOSFET modo depleção ou modo normalmente ligado

**MOSFET modo depleção** - Também chamado normalmente ligado, porque conduz quando  $V_{GS}=0$ , seu funcionamento depende das regiões de depleção.

A possibilidade do uso de uma tensão positiva na porta é o que distingue o MOSFET modo depleção de um JFET.

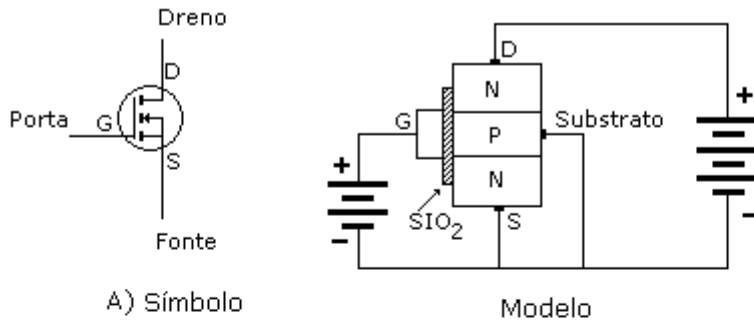


**Figura 16** - MOSFET modo depleção: a) Símbolo, modelo e polarização - b) Curva de dreno e curva de transcondutância.

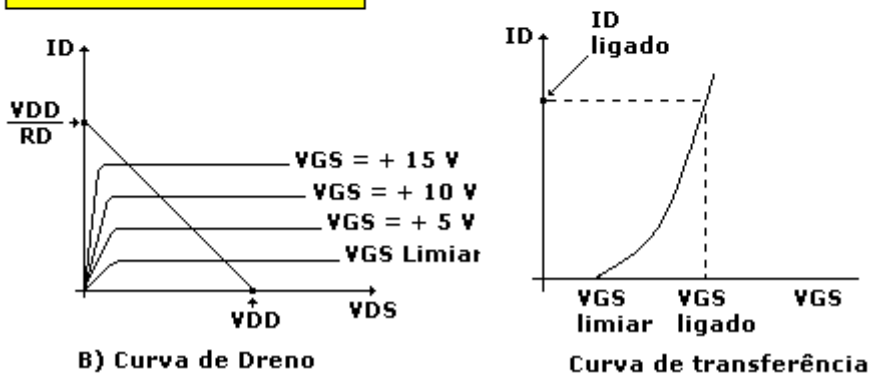


## MOSFET modo intensificação ou modo enriquecimento

**MOSFET modo intensificação** - No modo intensificação tem menor capacitância e impedância de entrada mais elevada, seu funcionamento depende da intensificação da condutividade do canal.



$$I_D = K (V_{GS} - V_{GS \text{ limiar}})^2$$

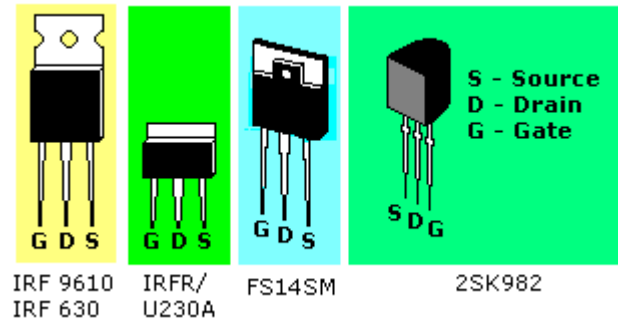


**Figura 17** - MOSFET modo intensificação: a) Símbolo, modelo e polarização - b) Curva de dreno e curva de transcondutância.

## Aplicações com MOSFET - Parte I

Nesta primeira década do século XXI, os MOSFETs estão sendo largamente empregado na fabricação de monitores de vídeo, principalmente em circuitos de proteção de saída horizontal e fonte de alimentação chaveadas para monitores de diversas marcas conceituadas no Brasil.

A figura seguinte mostra alguns dos MOSFETs utilizados para esta finalidade.

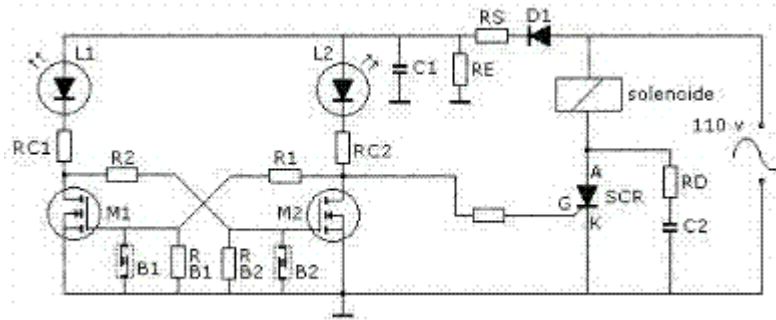


**Figura 18** - MOSFETs utilizados em monitores de vídeos para computadores.

## Aplicações com MOSFET - Parte II

Um outro tipo de aplicação, desta vez para o MOSFET de potência, é representada por um circuito detector de nível destes empregados na área de automação, conforme representa o diagrama esquemático da figura 24.

B1 e B2 são os sensores de nível.



**Figura 19** - Circuito detector de nível de líquido.

## Referências

- ALMEIDA, Antonio Carlos; *Notas de aulas de Eletrônica, Eletrotécnica e Instalações Elétricas*. SENAI/CEFET-BA, 1978 - 2008
- BOGART, Theodore F. J.; *Dispositivos e Circuitos Eletrônicos*. São Paulo - SP, Makron Books
- BOYLESTAD, Robert L, NASHELSKY - Tradução: Rafael Monteiro Simon; *Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos*. São Paulo - SP, Prentice Hall
- BROPHY, James J.; *Eletrônica Básica*. Rio de Janeiro - RJ, Editora Guanabara Dois S.A.
- COTRIM, Ademaro A. M. B.; *Instalações Elétricas*. São Paulo - SP, Prentice Hall
- CREDER, Hélio; *Instalações Elétricas*. Rio de Janeiro - RJ, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.
- FIGINI, Gianfranco - tradução: Carlos Antonio Lauand; *Eletrônica Industrial: Circuitos e Aplicações*. São Paulo - SP, Hemus Editora Limitada
- MALVINO, Albert Paul - tradução: Romeu Abdo; *Eletrônica: volume 1*. São Paulo - SP, Makron Books
- KAUFMAN, Milton & WILSON J. A.; *Eletrônica Básica*. São Paulo - SP, McGraw-Hill do Brasil