

## **Sumário**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Introdução</b>  | <b>5</b>  |
| <b>Amplificação com FET</b>                              | <b>6</b>  |
| <b>Polarização do FET</b>                                | <b>6</b>  |
| <b>Polarização do terminal dreno</b>                     | <b>7</b>  |
| <b>Polarização do terminal porta</b>                     | <b>7</b>  |
| <b>Estágio amplificador com FET</b>                      | <b>8</b>  |
| <b>Princípio de funcionamento</b>                        | <b>9</b>  |
| <b>Características dos estágios amplificadores a FET</b> | <b>12</b> |
| <b>Impedância de entrada</b>                             | <b>12</b> |
| <b>Ganho de tensão</b>                                   | <b>13</b> |
| <b>Apêndice</b>  | <b>15</b> |
| <b>Questionário</b>                                      | <b>15</b> |
| <b>Bibliografia</b>                                      | <b>15</b> |



**Espaço SENAI**

### **Missão do Sistema *SENAI***

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

# Introdução

---

A principal característica de um transistor de efeito de campo reside em sua altíssima impedância de entrada. Essa característica torna os FETs praticamente ideais para a utilização em amplificadores de entrada em receptores de rádio, osciloscópios, multímetros e outros instrumentos de precisão.

Este fascículo trata das técnicas de polarização e de amplificação empregando o FET, juntamente com uma análise comparativa do comportamento de circuitos empregando tais dispositivos em relação àqueles baseados no transistor bipolar.



***Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:***

- Transistor bipolar: ponto de operação
- Transistor de efeito de campo.

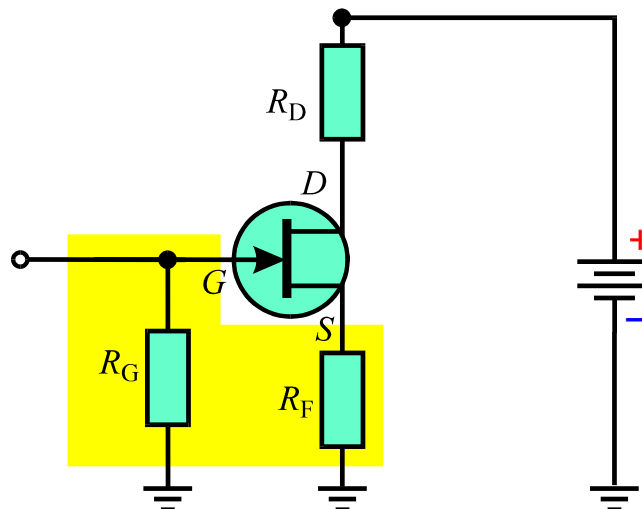
# Amplificação com FET

A amplificação de sinais em situações que demandem uma alta impedância de entrada é uma das aplicações mais importantes dos transistores de efeito de campo, citando-se por exemplo:

- Entrada de sinal em osciloscópios.
- Estágio inicial de sintonizadores de FM.

## POLARIZAÇÃO DO FET

As condições de funcionamento do circuito amplificador são determinadas pela forma de polarização do FET. Na análise a seguir, considere-se como exemplo a polarização de um  $n$ -JFET em um circuito na configuração **fonte comum**, mostrada na **Fig.1**.



**Fig.1** Circuito amplificador a FET na configuração fonte comum.

## POLARIZAÇÃO DO TERMINAL DRENO

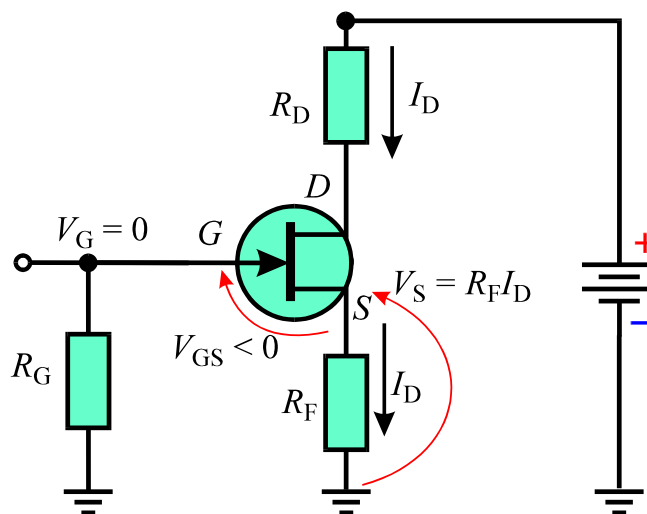
A operação normal do  $n$ -JFET é obtida quando o terminal dreno é mantido a um potencial positivo em relação ao terminal fonte. Um resistor de dreno  $R_D$  em conjunto com uma fonte de alimentação pode ser utilizado para este fim, na forma mostrada na **Fig.1**. O resistor  $R_D$  assume um papel semelhante àquele desempenhado pelo resistor de coletor em circuitos que utilizam transistores bipolares.

## POLARIZAÇÃO DO TERMINAL PORTA

Em condições normais de operação do  $n$ -JFET o terminal  $G$  fica submetido a um potencial inferior àquele do terminal  $S$ . O método mais usual para obtenção dessa relação entre potenciais, denominado de **autopolarização** ou polarização por fonte, ocorre naturalmente pelo uso dos resistores  $R_G$  e  $R_F$ , mostrados na **Fig.1**.

O resistor  $R_G$  no circuito das **Figs.1 e 2**, é de alta resistência de forma a preservar a alta impedância de entrada do JFET. Assim a tensão e corrente através de seus terminais são muito pequenas. Nessas condições, o terminal porta pode ser considerado praticamente aterrado, ou seja,

$$V_G \approx 0 \text{ V}$$

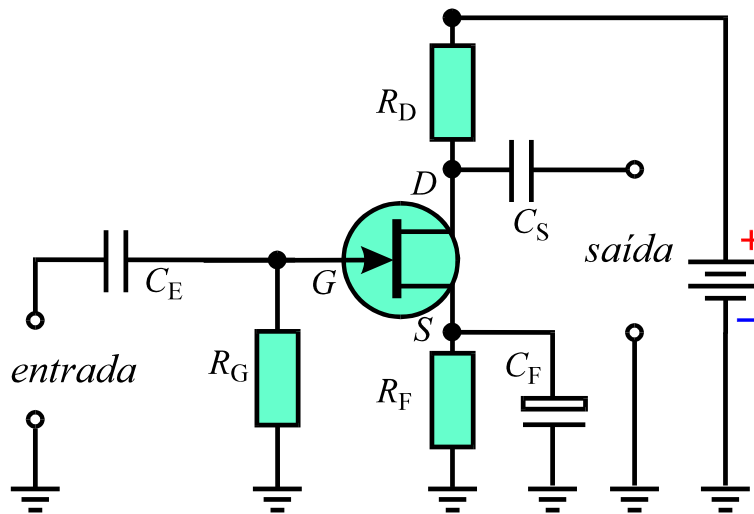


**Fig.2** Circuito da **Fig.1** com os parâmetros elétricos estabelecidos sobre os resistores  $R_G$  e  $R_F$ .

Como ilustrado na **Fig.2**, a corrente  $I_D$  provoca uma queda de tensão através do resistor  $R_F$ , tornando o terminal  $S$  positivo em relação ao terra. Como o terminal  $G$  está praticamente aterrado, conclui-se que o terminal  $S$  fica assim mantido a um potencial superior àquele do terminal  $G$ . Esse é o efeito de autopolarização, mencionado anteriormente.

## ESTÁGIO AMPLIFICADOR COM FET

O circuito completo de um estágio amplificador utilizando o dispositivo  $n$ -JFET é composto da fonte de alimentação, juntamente com os resistores de polarização e os capacitores de acoplamento e desacoplamento, conforme ilustrado na **Fig.3**.



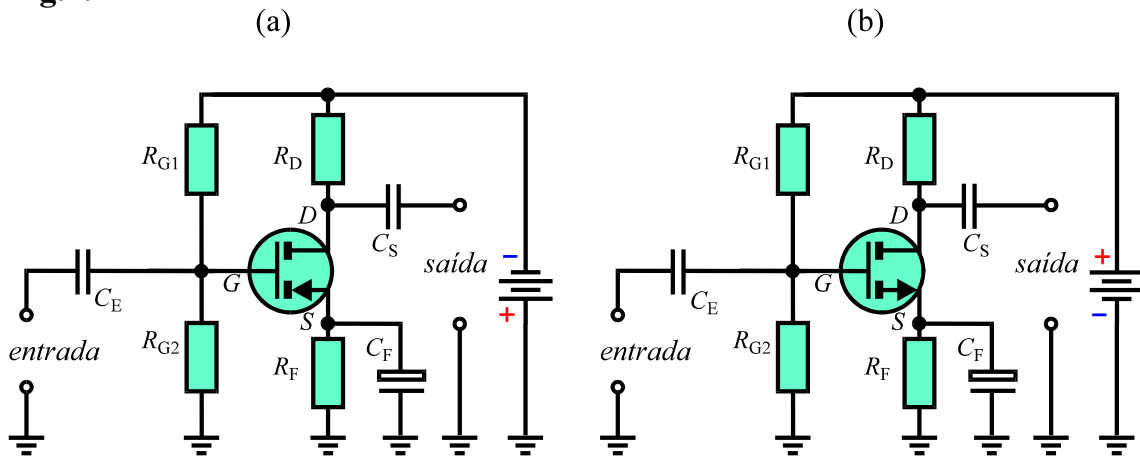
**Fig.3** Estágio amplificador empregando um  $n$ -JFET.

Os capacitores de entrada e saída,  $C_E$  e  $C_S$ , respectivamente, não são em geral do tipo eletrolítico devido às altas impedâncias de entrada e saída associadas ao dispositivo FET. O capacitor que pode ser do tipo eletrolítico no circuito da **Fig.3**, é aquele designado por  $C_F$ , utilizado no desacoplamento do terminal fonte.

Esquemas semelhantes àquele mostrado na **Fig.3** podem ser utilizados para a implementação de estágios amplificadores baseados em dispositivos  $p$ -JFET e MOSFET do tipo depleção, canais  $p$  e  $n$ .

Dispositivos MOSFET do tipo enriquecimento exigem o emprego da técnica de polarização com divisor de tensão, devido ao princípio de operação peculiar daquela classe de dispositivos. Os diagramas de circuito normalmente

utilizados para dispositivos MOSFET canal  $n$  e canal  $p$ , estão representados na Fig.4.

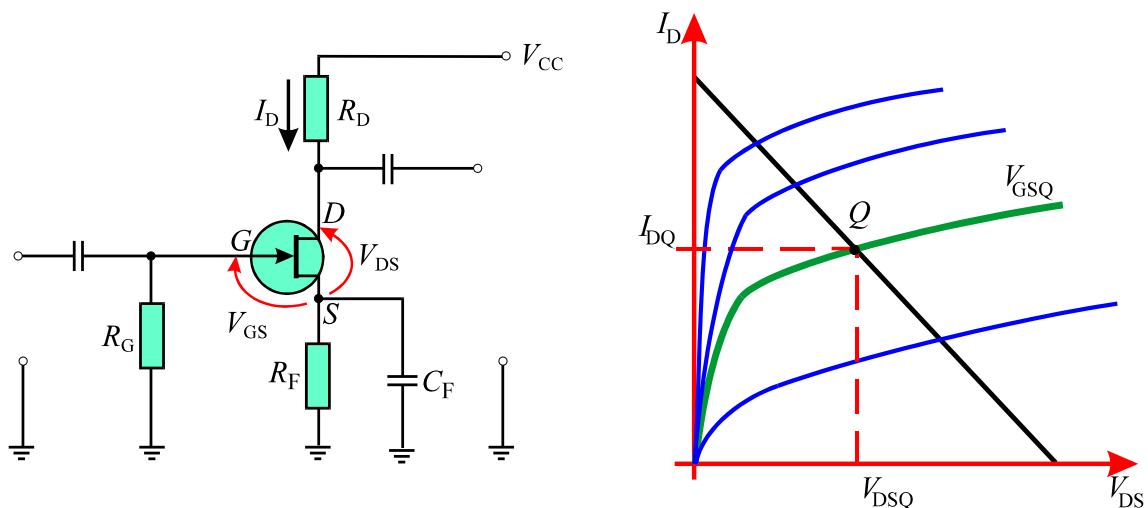


**Fig.4** Diagramas de circuito para estágios amplificadores baseados em dispositivos: **(a)** MOSFET canal  $n$ , **(b)** MOSFET canal  $p$ .

Para os circuitos mostrados na Fig.4, o valor da corrente quiescente  $I_{DQ}$  é estabelecido pela escolha dos valores de resistência  $R_{G1}$ ,  $R_{G2}$  e  $R_F$ .

## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O princípio de funcionamento de qualquer estágio amplificador com FET, pode ser analisado com base no circuito configurado com dispositivo do tipo  $n$ -JFET, conforme ilustrado na Fig.5.



**Fig.5** Estágio amplificador baseado em dispositivo  $n$ -JFET.

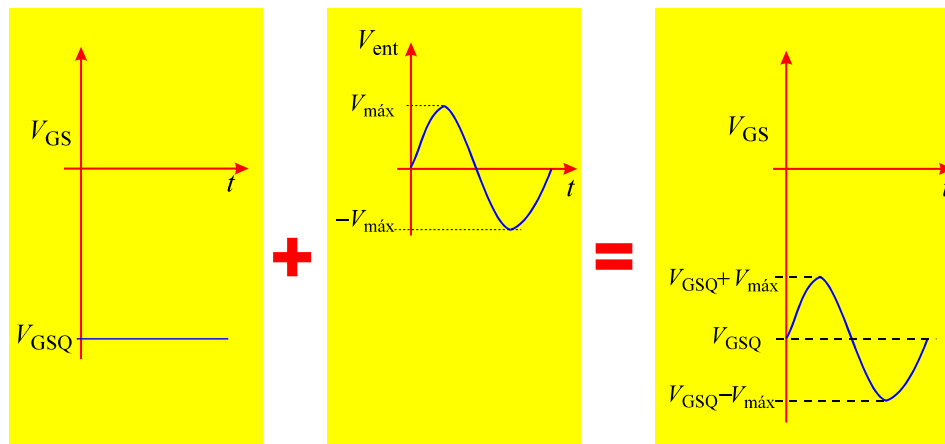
As curvas características de saída, mostradas na Fig.5, juntamente com a reta de carga do circuito, estabelecem os valores quiescentes  $I_{DQ}$  e  $V_{DSQ}$  para a

corrente de dreno e tensão dreno-fonte, respectivamente e o valor  $V_{GSQ}$  para a tensão entre porta e fonte.

Aplicando-se uma tensão senoidal na entrada do circuito da **Fig.5**, com a forma indicada na **Fig.6**, a tensão de entrada na porta do FET é dada por

$$V_{GS} = V_{GSQ} + V_{ent} \quad (1)$$

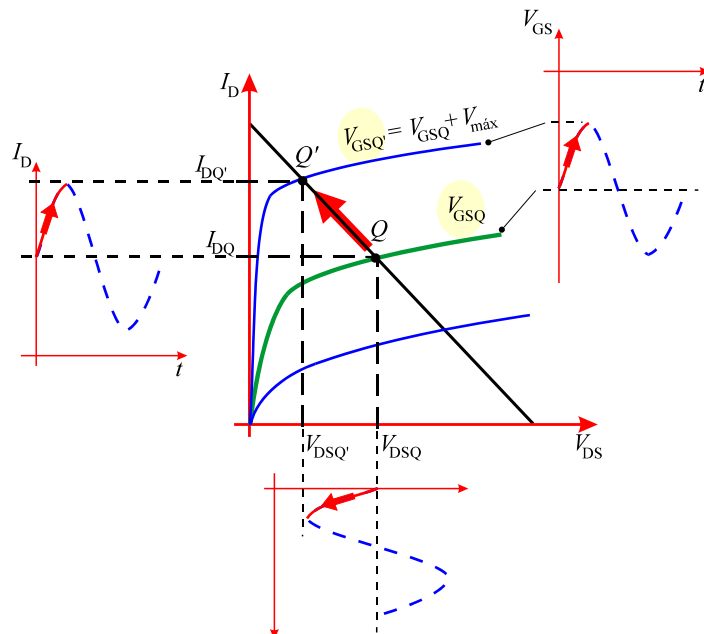
onde  $V_{ent}$  é a tensão associada ao sinal de entrada.



**Fig.6** Forma de onda da tensão de entrada aplicada ao estágio amplificador.

No semiciclo em que a tensão de entrada é positiva e crescente, a tensão  $V_{GS}$  aumenta, produzindo o deslocamento do ponto de operação ao longo da reta de carga, conforme ilustrado na **Fig.7**. Quando a tensão de entrada atinge o valor  $V_{máx}$  o ponto de operação está localizado no ponto  $Q'$ , conforme indicado na **Fig.7**. Naquele ponto a tensão entre porta e fonte torna-se

$$V_{GSQ'} = V_{GSQ} + V_{máx}$$



**Fig.7** Deslocamento do ponto de operação devido a uma tensão crescente positiva na entrada.



e a corrente de dreno e tensão dreno-fonte valem, respectivamente,  $I_{DQ'}$  e  $V_{DSQ'}$ .

A partir do momento em que a tensão de entrada começa a diminuir, o ponto de operação desloca-se ao longo da reta de carga, até o instante de tempo em que a tensão de entrada atinge o valor mínimo  $-V_{\text{máx}}$ .

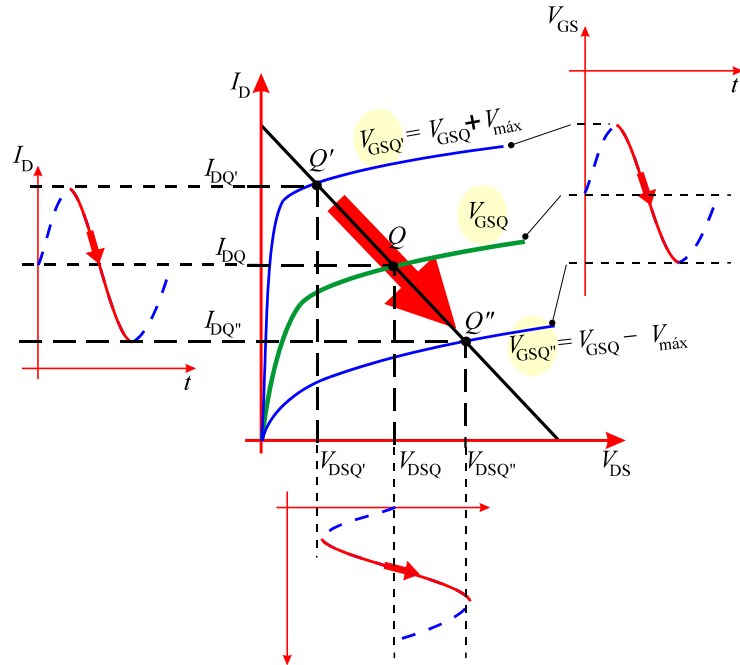
Nesse momento o ponto de operação está situado sobre o ponto  $Q''$  indicado na **Fig.8**. Nesse ponto tem-se

$$V_{GS} = V_{GSQ} - V_{\text{máx}}$$

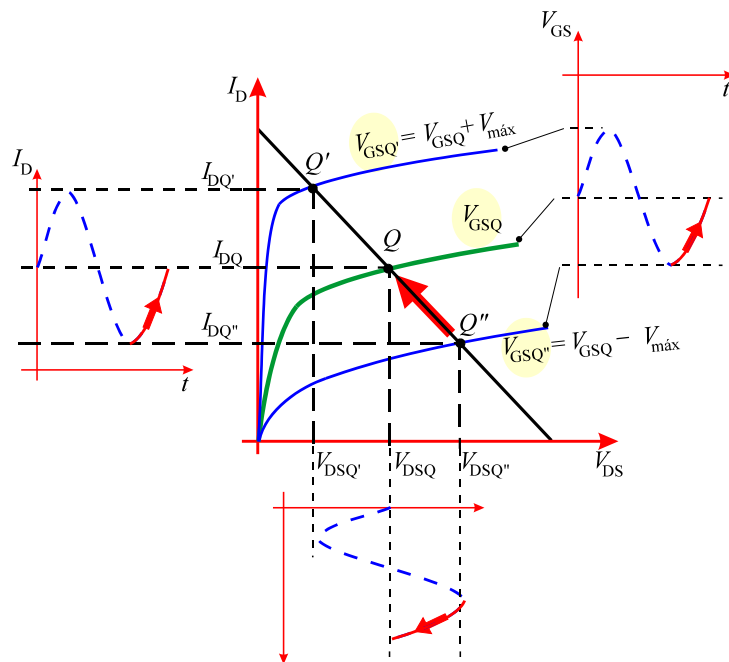
e a corrente de dreno e tensão dreno-fonte se tornam  $I_{DQ''}$  e  $V_{DSQ''}$ , respectivamente.

O ciclo se completa quando a tensão de entrada retorna ao valor nulo trazendo o ponto de operação do circuito de volta a sua posição inicial  $Q$ , conforme ilustrado na **Fig.9**.

Pela análise do ponto de operação do circuito de acordo com as **Figs.7 a 9**, conclui-se que a tensão de saída, após a

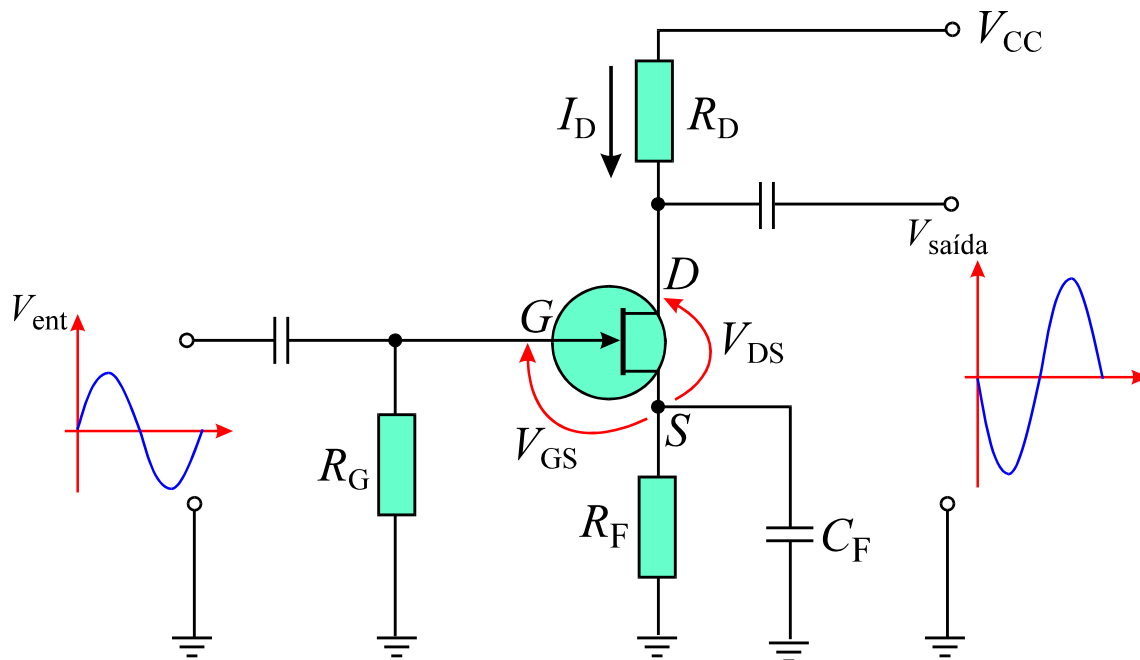


**Fig.8** Deslocamento do ponto de operação devido a uma tensão decrescente na entrada.



**Fig.9** Deslocamento do ponto de operação devido a uma tensão negativa crescente na entrada.

filtragem do nível *dc* pelo capacitor  $C_S$ , é uma versão invertida da tensão de entrada, conforme ilustrado na **Fig.10**.



**Fig.10** Tensões de entrada e saída no circuito amplificador baseado em um dispositivo *n*-JFET.

## CARACTERÍSTICAS DOS ESTÁGIOS AMPLIFICADORES A FET

Os parâmetros característicos de importância em estágios amplificadores a FET são:

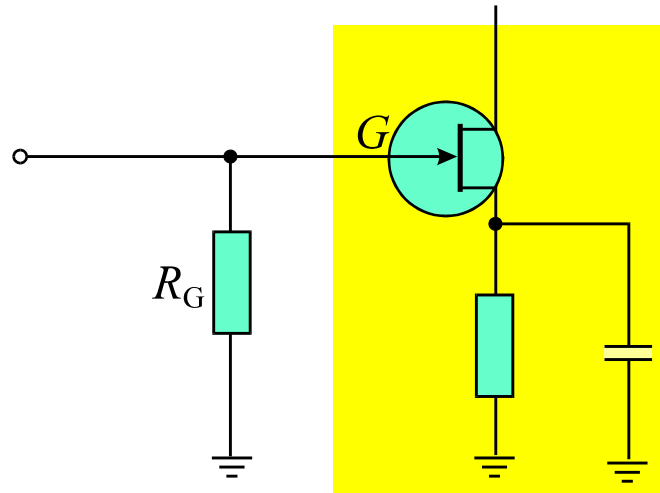
- Impedância de entrada.
- Ganho de tensão.

### IMPEDÂNCIA DE ENTRADA

Como em operação normal, a junção *pn* associada aos terminais da porta e da fonte permanece inversamente polarizada, a impedância da junção porta-fonte é muito alta. Dessa forma, a impedância de entrada do estágio amplificador a FET é determinada exclusivamente pelos valores dos parâmetros associados aos elementos de polarização do circuito.

O arranjo em paralelo do resistor  $R_G$  com a entrada do dispositivo FET, mostrado na **Fig.11**, implica que a impedância de entrada do estágio amplificador é dada por

$$Z_i = R_G$$



$$Z_i = R_G$$

**Fig.11** Porção de entrada de um amplificador FET.

Como o resistor  $R_G$  é normalmente escolhido com um valor de resistência de algumas centenas de quiloohms, a impedância de entrada de amplificadores FET pode ser considerada altíssima.

## GANHO DE TENSÃO

Em geral, os estágios amplificadores a FET exibem um pequeno ganho de tensão, que pode variar tipicamente entre 3 e 15. Apesar do baixo ganho, FETs são largamente utilizados na confecção de estágios amplificadores de alta impedância de entrada.

A **Tabela 1** resume as principais características e diferenças existentes entre amplificadores que utilizam transistor bipolar e aqueles baseados no dispositivo FET.

**Tabela 1** Parâmetros e características principais associadas a estágios amplificadores baseados em transistores bipolar e em dispositivos FET.

| Parâmetro              | Tipo de estágio amplificador  |  |
|------------------------|---|--|
|                        | Transistor bipolar  | FET  |
| Impedância de entrada  | -10 $\Omega$ a 1 k $\Omega$<br>-Uso na amplificação de sinais provenientes de fontes de baixa impedância. | -100 k $\Omega$ a 1 M $\Omega$<br>-Operação independe da impedância da fonte geradora do sinal.                  |
| Corrente de fuga       | Pequena, mas provoca alterações no ponto de operação.   | -Muito pequena. (alguns nanoampères)<br>-Pode ser compensada pela escolha adequada dos elementos de polarização. |
| Resposta em frequência | Capacitâncias de junção provocam diminuição do ganho em altas frequências.                                | Resposta superior àquela associada ao transistor bipolar.  |
| Ganho de tensão        | Elevado, podendo atingir um ganho próximo de 50.  | Pode atingir um ganho máximo próximo de 20.  |
| Ganho de potência      | Pode atingir valores elevados pela escolha adequada dos elementos do circuito.                            | Muito elevado, como resultado da baixíssima dissipação de potência do dispositivo.                               |

# Apêndice

## QUESTIONÁRIO

1. Cite algumas aplicações que utilizam o transistor de efeito de campo.
2. Em condições normais de operação qual é o valor aproximado do potencial do terminal porta de um estágio amplificador com JFET?
3. A que propósito servem os resistores  $R_G$ ,  $R_D$  e  $R_F$  e o capacitor  $C_F$  de um estágio amplificador com JFET?
4. Quais são os parâmetros característicos de um estágio amplificador a JFET?
5. Quais são as características principais que diferenciam amplificadores a JFET daqueles que utilizam o transistor bipolar?

## BIBLIOGRAFIA

CIPELLI, Antônio Marco Vicari & SANDRINI, Waldir João, Teoria e desenvolvimento de projetos de circuitos eletrônicos, 7<sup>a</sup>. edição, Érica, São Paulo (1983).

MALVINO, Albert Paul, Eletrônica, Vol.2, McGraw-Hill do Brasil, São Paulo (1986)

MILLMAN, Jacob & HALKIAS, Christos C. Eletrônica: dispositivos e circuitos, Vol.2, McGraw- Hill do Brasil, São Paulo (1981).