

FET

(FIELD EFFECT TRANSISTOR)

OBJETIVOS:

- entender o funcionamento de um transistor unipolar;
- analisar e entender as curvas características de um transistor unipolar;
- analisar o funcionamento de um transistor unipolar, através de circuitos de polarização básicos.

INTRODUÇÃO TEÓRICA

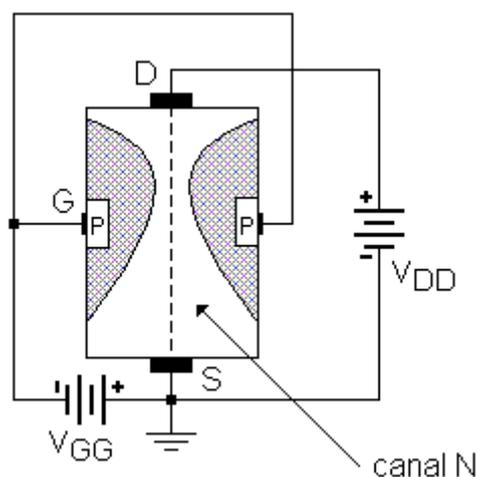
O FET (Field Effect Transistor) que traduzindo para o português significa Transistor de Efeito de Campo (TEC) é um transistor unipolar.

Nos transistores bipolares, para que haja controle de corrente, torna-se necessário envolver correntes de elétrons e lacunas. Nos transistores unipolares para que haja controle de corrente estão envolvidas correntes de elétrons quando o mesmo é do tipo canal n ou estão envolvidas correntes de lacunas quando o mesmo é do tipo canal p .

Os FETs possuem algumas vantagens com relação aos transistores bipolares como: impedância de entrada elevadíssima; relativamente imune à radiação; produz menos ruído e possui melhor estabilidade térmica. No entanto, apresentam algumas desvantagens como: banda de ganho relativamente pequena e maior risco de dano quando manuseado.

A exemplo do transistor bipolar, o FET é um dispositivo de três terminais, contendo uma junção $p-n$ básica, podendo ser do tipo de junção (JFET) ou do tipo *metal-óxido-semicondutor* (MOSFET).

A figura abaixo mostra a estrutura física de em FET canal n com seus respectivos terminais:



D - (drain) ou dreno: de onde os portadores majoritários saem;

S - (source) ou fonte: é o terminal no qual os portadores majoritários entram;

G - (gate) ou porta: são regiões fortemente dopadas em ambos os lados do canal. Quando o canal é *n* o gate é *p*.

V_{DD} é a tensão aplicada entre o dreno e a fonte;

V_{GG} é a tensão aplicada entre o gate (porta) e a fonte;

V_{DS} é a tensão medida entre o dreno e a fonte;

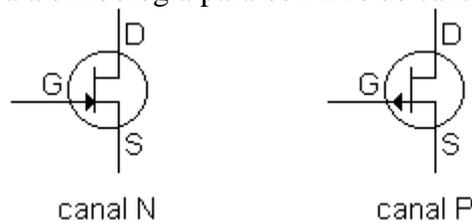
V_{GS} é a tensão medida entre o gate (porta) e a fonte.

Comparativamente a um transistor bipolar, podemos então estabelecer as equivalências entre os terminais:

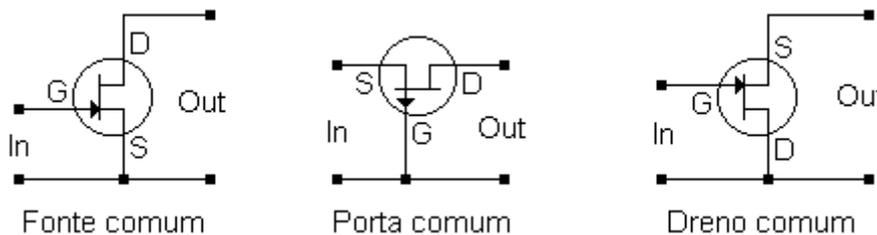
D - (drain) = coletor
S - (source) = emissor
G - (gate) = base

Através do canal, portanto, circulam os portadores majoritários, da fonte (S) para o dreno (D).

A figura a seguir mostra a simbologia para os FETs de canal *n* e canal *p*:



CONFIGURAÇÕES: A exemplo dos transistores bipolares, são três as configurações básicas para os transistores unipolares, como mostra a figura abaixo:

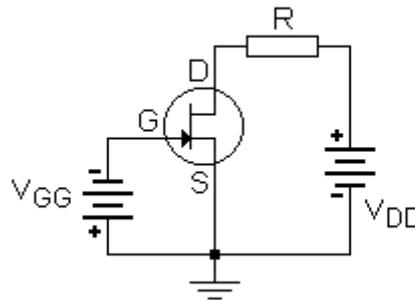


As equivalências são as seguintes:

Fonte comum = emissor comum
Porta comum = base comum
Dreno comum = coletor comum

A configuração dreno comum também é denominada *seguidor de fonte*.

POLARIZAÇÃO CONVENCIONAL: A figura abaixo mostra um FET de canal n polarizado de forma convencional. É importante verificar a polaridade das baterias V_{GG} e V_{DD} . Quando o FET é de canal n a tensão de dreno é positiva.

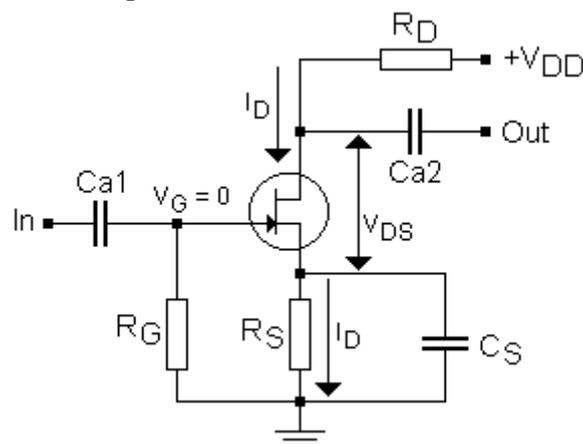


O FET também pode ser usado como amplificador de sinal, desde que adequadamente polarizado.

A grande vantagem na utilização do mesmo está na sua impedância muito elevada de entrada e sua quase total imunidade à ruídos.

O FET possui uma impedância de entrada extremamente alta, da ordem de $100M\Omega$ ou mais. Por ser praticamente imune a ruídos é muito utilizado para estágios de entrada de amplificadores de baixo nível, mais especificamente em estágios de entrada de receptores FM de alta fidelidade.

A figura abaixo mostra um amplificador convencional:

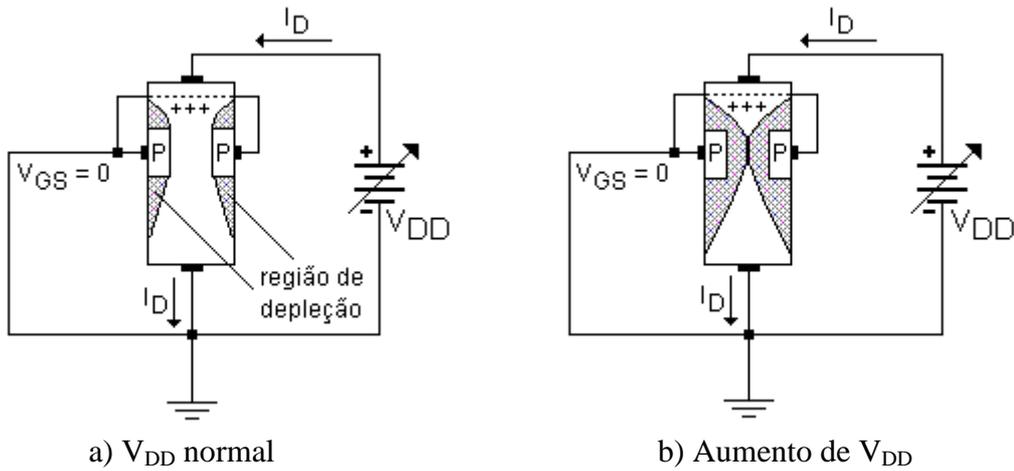


Trata-se de um amplificador com auto polarização, pois possui uma única fonte de alimentação e um resistor R_S para se obter a tensão de polarização *gate-source*.

A presença do resistor R_S resulta em uma tensão devido a queda de tensão $I_D R_S$, provocando uma queda de tensão em R_S . Como a tensão no *gate* é zero, pois não há corrente DC no *gate* ou no resistor R_G , a tensão entre *gate* e *source* é uma tensão negativa, que constitui a tensão de polarização V_{GS} . Assim teremos:

$$V_{GS} = 0 - I_D R_S = - I_D R_S$$

FUNCIONAMENTO: Consideremos o FET canal n conforme mostra a figura abaixo, para $V_{GS} = 0$.

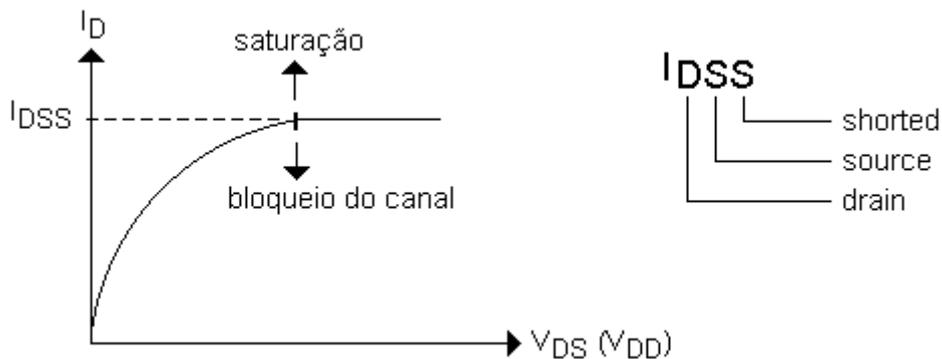


A medida que a tensão V_{DD} aumenta, aumenta a polarização inversa e a corrente de dreno circula através do canal, produzindo uma queda de tensão ao longo do canal, que é mais positiva no terminal *drain* (dreno), produzindo a região de depleção.

Conforme a tensão V_{DD} aumenta, a corrente I_D também aumenta, resultando em uma região de depleção maior. O aumento da região de depleção provoca um aumento da resistência entre *drain* e *source*. O aumento da região de depleção pode ser feito até que todo o canal seja abrangido (veja fig. b).

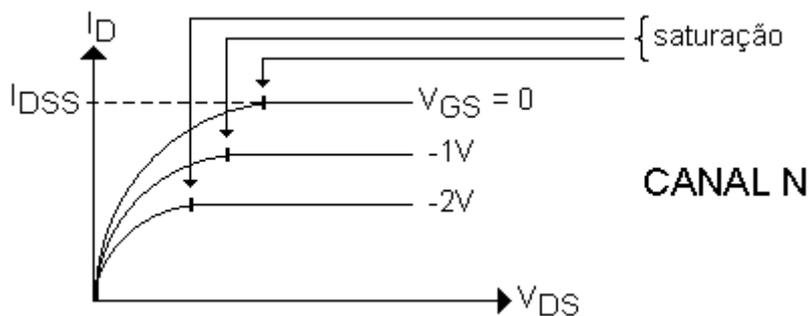
A partir daí, qualquer aumento de V_{DD} resultará apenas em aumento da tensão nos terminais da região de depleção e a corrente I_D permanece constante.

A curva a seguir mostra que o aumento de I_D ocorre até que toda a região de depleção esteja totalmente formada, após o que, a corrente de dreno satura e permanece constante para qualquer aumento de V_{DD} .



I_{DSS} é um parâmetro importante usado para especificar a operação de um FET, que significa corrente de *drain* para *source* com *gate-source* em curto ($V_{GS} = 0$).

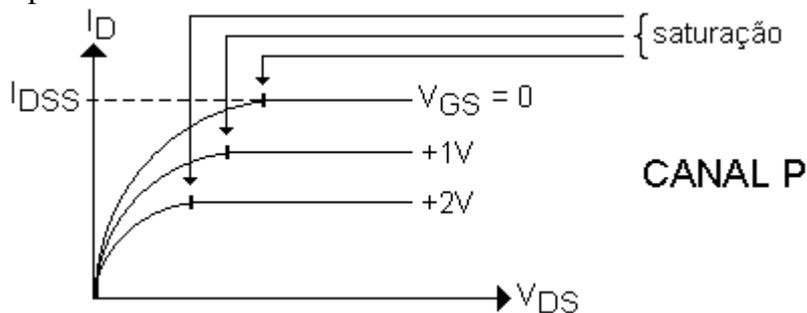
CARACTERÍSTICA DRAIN-SOURCE (DRENO-FONTE): A curva abaixo mostra que aumentando V_{GS} (mais negativa para um FET de canal n), a corrente de saturação será menor, e desta forma, o *gate* atua como controle.



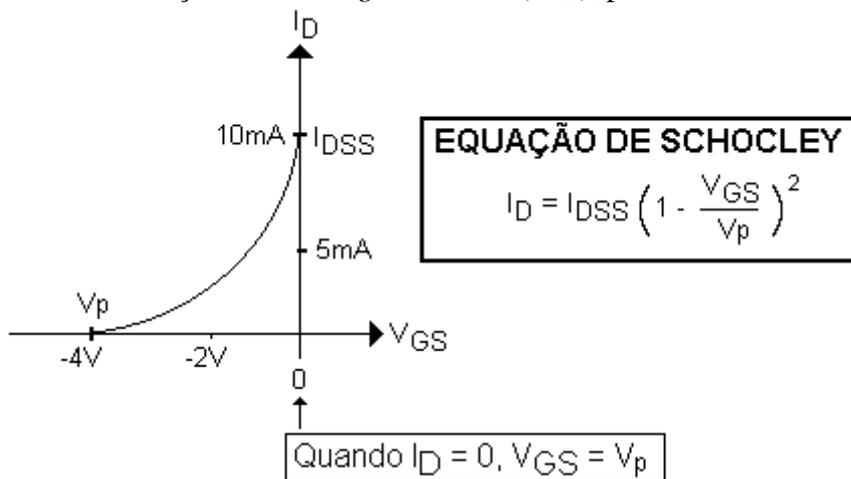
Nestas condições, I_D diminui a medida que V_{GS} fica mais negativa (observe o ponto de saturação com $-2V$). Tornando V_{GS} mais negativa, haverá um momento em que não haverá mais I_D , independentemente do valor de V_{DS} .

Essa tensão denomina-se tensão de estrangulamento *gate-source* representada por $V_{GS(OFF)}$ ou V_p .

A figura abaixo mostra a curva para um FET de canal *p*. A única diferença é a polaridade de V_{GS} que neste caso é positiva.

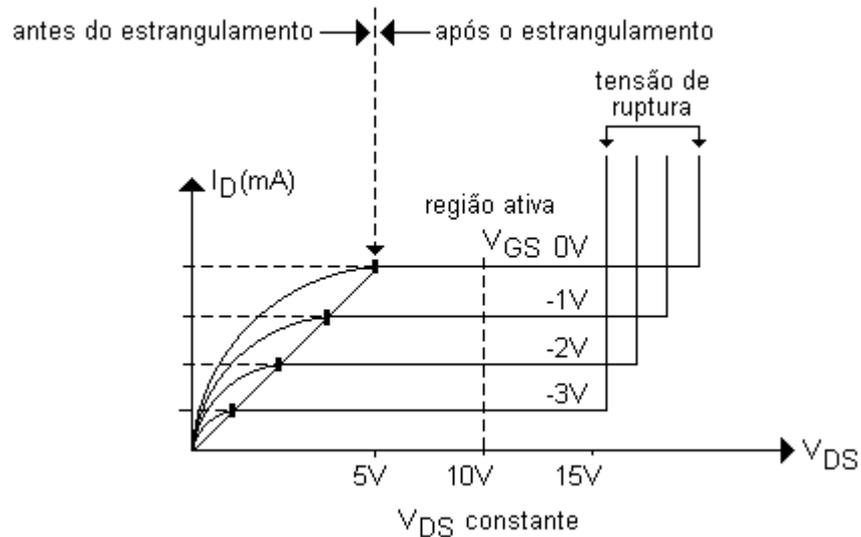


CARACTERÍSTICA DE TRANSFERÊNCIA: A figura a seguir mostra o gráfico de transferência da corrente de dreno I_D em função da tensão *gate-source* (V_{GS}), para um valor constante de V_{DS} .



No gráfico acima, observa-se a característica de transferência quando $V_{GS} = 0$, $I_D = 0$, $V_{GS} = V_p$.

A figura abaixo nos mostra que quando ocorre o estrangulamento, este estrangulamento se verifica com valores menores de V_{DS} e quando mais negativa for a tensão V_{GS} . Esta curva recebe o nome de curva de dreno.



Normalmente o FET é polarizado para operar após o estrangulamento na região de saturação da corrente, onde nesta região o dispositivo tem sua operação definida mais facilmente pela equação de *Schockley*. Vejamos um exemplo:

Determinar a corrente de dreno de um FET canal *n* com tensão de estrangulamento = -3V e corrente de saturação *drain-source* (I_{DSS}) de 10mA para as seguintes tensões V_{GS} :

- 0V
- 1,4V
- 1,8V

Solução:

pela equação de *Schockley*, $I_D = I_{DSS}(1 - V_{GS} / V_p)^2$, temos:

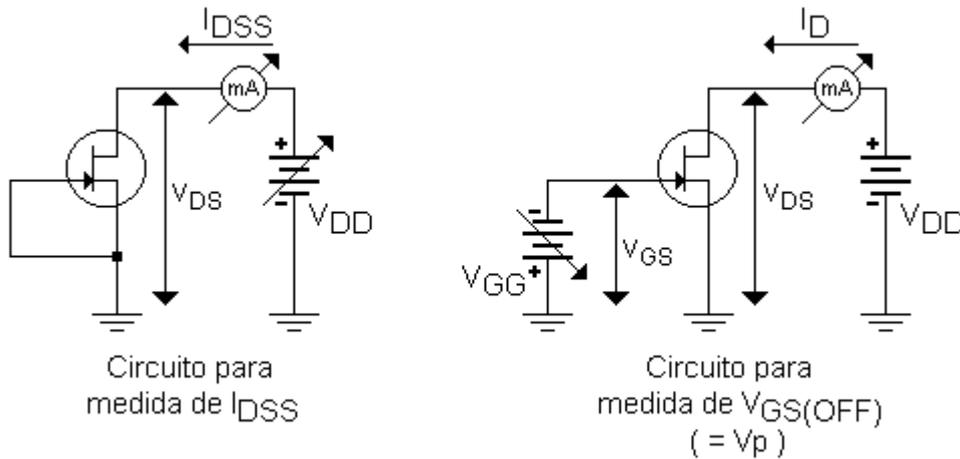
- $I_D = 10\text{mA}[1 - (0/-3)]^2 = 10\text{mA}$
- $I_D = 10\text{mA}[1 - (-1,4/-3)]^2 = 2,84\text{mA}$
- $I_D = 10\text{mA}[1 - (-1,8/-3)]^2 = 1,6\text{mA}$

PARÂMETROS IMPORTANTES:

I_{DSS} : corrente de saturação dreno-fonte (*drain-source*). É a corrente na qual o canal é estrangulado quando os terminais *gate* e *source* estão em curto ($V_{GS} = 0$). É um parâmetro importantíssimo do dispositivo.

$V_{GS(OFF)} = V_p$: tensão de corte (estrangulamento) *gate-source*. Tensão entre *gate* e *source* para a qual o canal *drain-source* é estrangulado, resultando em praticamente nenhuma corrente de dreno.

Os circuitos a seguir são usados para medir I_{DSS} e $V_{GS(OFF)}$:



BV_{GSS} : tensão de ruptura *source-gate*. A tensão de ruptura de uma junção *source-gate* é medida em uma corrente especificada com os terminais *drain-source* em curto.

O valor da tensão de ruptura indica um valor limite de tensão nos terminais *gate-source*, acima do qual a corrente do dispositivo deve ser limitada pelo circuito externo para evitar danos ao FET.

A tensão de ruptura é um valor limite de tensão e deve ser usado na escolha da fonte de tensão de dreno.

$g_{fs} = g_m$: transcondutância de transferência direta em fonte-comum. Ela é medida com os terminais *drain-source* em curto, sendo uma indicação da amplificação do FET em termos de sinal alternado.

A unidade de medida de g_m é em *Siemens* com valores típicos da ordem de 1mS a 10mS.

$$g_{fs} = \Delta I_p / \Delta V_{GS}, \text{ com } V_{DS} = 0$$

$$g_m = g_{mo}[1 - (V_{GS} / V_{GS(OFF)})]$$

$$g_{mo} = \frac{2I_{DSS}}{|V_{GS(OFF)}|} = \frac{2I_{DSS}}{|V_p|}$$

g_{mo} é parâmetro ganho de “ac” máximo do FET e ocorre para a polarização $V_{GS} = 0$.

Exemplo: calcular a transcondutância (g_m) de um FET com as especificações: $I_{DSS} = 15\text{mA}$ e $V_{GS(OFF)} = -3\text{V}$, nos seguintes pontos de polarização:

- a) $V_{GS} = 0$
- b) $V_{GS} = -1,2\text{V}$
- c) $V_{GS} = -1,7\text{V}$

Solução:

pela equação $g_{mo} = 2I_{DSS} / |V_{GS(OFF)}|$, temos:

$$g_{mo} = 2(15\text{mA}) / |-3\text{V}| = 30 \times 10^{-3} / 3 = 10\text{mS} \text{ ou } 10.000\mu\text{S}$$

- a) $g_m = g_{mo}(1 - V_{GS} / V_p) = 10\text{mS}[1 - (0 / -3)] = 10\text{mS}$ ou $10.000\mu\text{S}$
b) $g_m = g_{mo}(1 - V_{GS} / V_p) = 10\text{mS}[1 - (-1,2 / -3)] = 6\text{mS}$ ou $6.000\mu\text{S}$
c) $g_m = g_{mo}(1 - V_{GS} / V_p) = 10\text{mS}[1 - (-1,7 / -3)] = 4,33\text{mS}$ ou $4.330\mu\text{S}$

$r_{ds(on)}$: resistência *drain-source* para o dispositivo ligado. A resistência dreno-fonte para o dispositivo ligado é importante quando se utiliza o mesmo como chave eletrônica.

Quando o FET está polarizado em sua região de saturação, ou ôhmica, de operação, apresenta uma resistência entre dreno e fonte de dezenas e algumas vezes centenas de ohms.

PARTE PRÁTICA

MATERIAIS NECESSÁRIOS

- 1 - Gerador de áudio
- 1 - Fonte de alimentação 0-20V
- 1 - Osciloscópio
- 1 - Multímetro analógico ou digital
- 1 - Módulo de ensaios ELO-1

CIRCUITO AMPLIFICADOR FONTE COMUM:

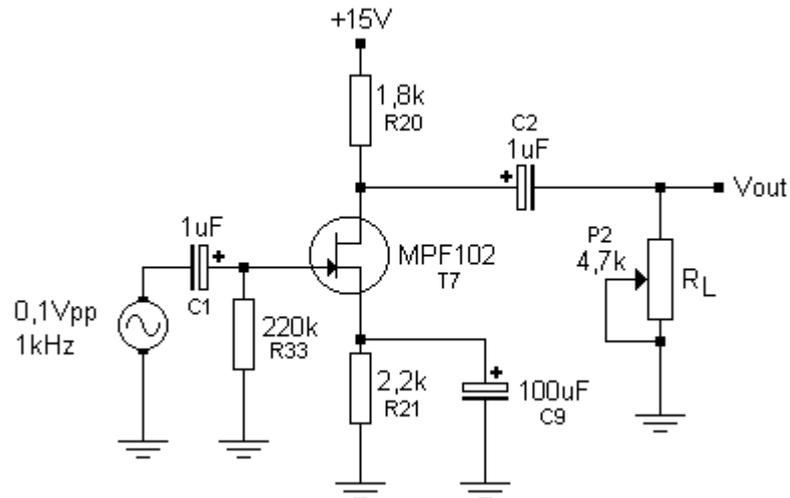
Como sabemos, a curva de transcondutância do FET é parabólica, e por isso a operação do amplificador fonte comum produz uma distorção quadrática.

Em virtude disso, é um amplificador muito utilizado para operar somente com sinais de pequena amplitude.

Devido ao fato de g_m ser relativamente baixo, o amplificador fonte comum tem como consequência um ganho de tensão relativamente baixo.

Desta forma, os amplificadores com FET não podem competir com amplificadores com transistores bipolares, quando o ganho de tensão é fator preponderante.

1 - Monte o circuito da figura a seguir:



- 2 - Suponha que o FET usado no circuito tenha um ganho típico da ordem de $2.000\mu S$. Calcule o ganho de tensão sem carga (A), a tensão de saída (V_{out}) e a impedância de saída (r_{out}). Anote esses valores na tabela 1.
- 3 - Para o amplificador com carga infinita (sem o resistor de carga R_L), ajuste o gerador de áudio na entrada para $0,1V_{pp}$ a uma frequência de $1kHz$.
- 4 - Observe o sinal na saída, o qual deve ser uma senóide amplificada. Meça e anote a tensão de saída de pico a pico. Depois calcule o ganho de tensão. Anote suas respostas na tabela 1.
- 5 - Ligue o potenciômetro de $4,7k\Omega$ como carga variável e ajuste a carga até que a tensão na saída seja a metade da tensão sem carga.
(*procedendo desta forma, você estará encontrando a impedância Thèvenin pelo método de casamento de impedâncias*).
- 6 - Desligue o potenciômetro e meça sua resistência, anotando esse valor na tabela 1.
- 7 - Repita os passos 2 a 6 usando outro FET.

TABELA 1

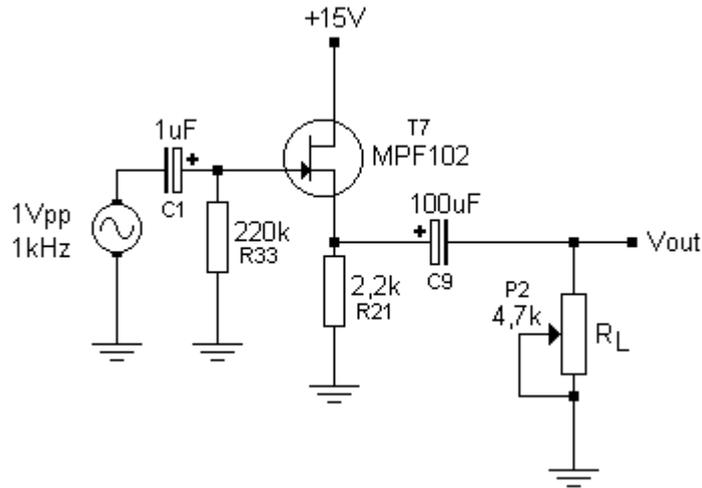
VALOR CALCULADO				VALOR MEDIDO		
FET	V_{OUT}	A	r_{out}	V_{OUT}	A	r_{out}
1(T7)						
2(T8)						

SEGUIDOR DE FONTE (DRENO COMUM):

O amplificador dreno comum ou seguidor de fonte é análogo ao amplificador seguidor de emissor ou coletor comum. O ganho de tensão aproxima-se da unidade enquanto que a impedância de entrada aproxima-se do infinito, limitada apenas pelos resistores externos conectados ao terminal *gate*.

É um circuito muito utilizado na entrada dos instrumentos de medida.

1 - Monte o circuito da figura abaixo:



2 - Suponha que o FET usado no circuito tenha um ganho típico da ordem de $2.000\mu S$. Calcule o ganho de tensão sem carga (A), a tensão de saída (V_{out}) e a impedância de saída (r_{out}). Anote esses valores na tabela 2.

3 - Para o amplificador com carga infinita (sem o resistor de carga R_L), ajuste o gerador de áudio na entrada para $1V_{pp}$ a uma frequência de $1kHz$.

4 - Meça e anote a tensão de saída de pico a pico. Depois calcule o ganho de tensão. Anote suas respostas na tabela 2.

5 - Meça a impedância de saída pelo método de casamento de impedâncias, usado anteriormente.

6 - Desligue o potenciômetro e meça sua resistência, anotando esse valor na tabela 2.

7 - Repita os passos 2 a 6 usando outros FETs.

TABELA 2

VALOR CALCULADO				VALOR MEDIDO		
FET	V_{OUT}	A	r_{out}	V_{OUT}	A	r_{out}
1(T7)						
2(T8)						

FORMULÁRIO:

Ganho de tensão (amplificador fonte comum):

$$A = -g_m R_D$$

onde:

A = ganho de tensão sem carga

g_m = transcondutância

R_D = resistência de dreno

Resistência de saída (amplificador fonte comum):

$$r_s = 1/g_m$$

Resistência de saída (amplificador dreno comum):

$$r_s = R_S // 1/g_m$$

QUESTÕES:

1 - A principal vantagem de um amplificador com FET é:

- a) seu alto ganho de tensão;
- b) sua baixa corrente de dreno;
- c) sua alta impedância de entrada;
- d) seu alto valor de transcondutância.

2 - Em relação a um amplificador convencional com transistor bipolar, podemos afirmar que um amplificador com FET apresenta maior ganho de tensão:

- a) certo
- b) errado

3 - Em um FET de canal n em que condições ocorre a saturação?

4 - O que é tensão de estrangulamento?

5 - Determine a corrente de dreno de um FET canal n com tensão de estrangulamento (V_p) = -3,75V; $I_{DSS} = 9\text{mA}$, para as seguintes tensões *gate-source* (V_{GS}): 0V; -1,15V; -1,5V; -1,75V e -2,3V (apresentar cálculos).

Cálculos: