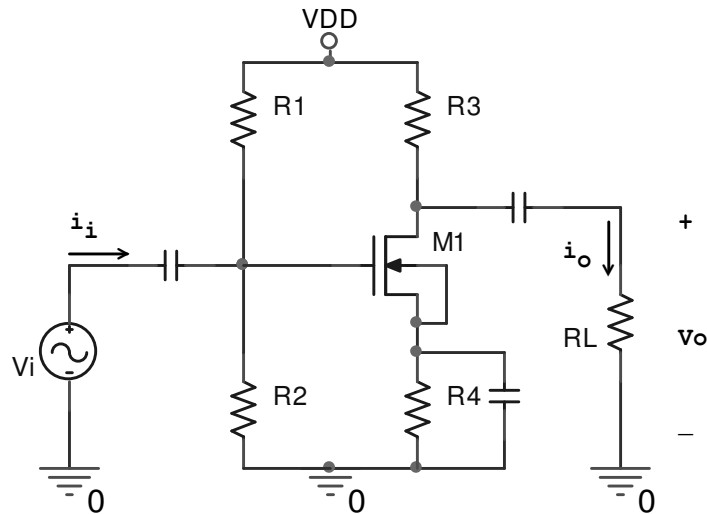
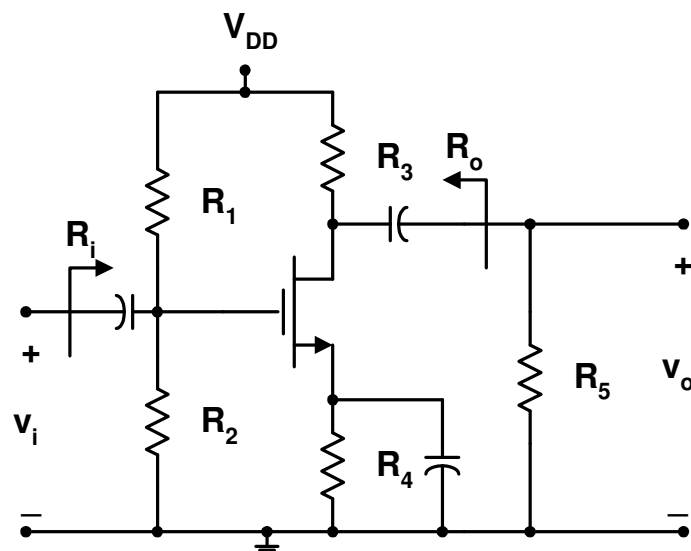


1. No circuito amplificador da figura o transístor é caracterizado por  $k'_n(W/L)=1,47 \text{ mA/V}^2$ ,  $V_t=1,5 \text{ V}$  e  $\lambda=0 \text{ V}^{-1}$ .  $V_{DD}=10 \text{ V}$ ,  $R_1=1,5 \text{ M}\Omega$ ,  $R_2=1 \text{ M}\Omega$  e  $R_L=3,9 \text{ k}\Omega$ .



- Desenhe o circuito equivalente para a análise DC. Dimensione os valores das resistências  $R_3$  e  $R_4$  de modo a obter  $I_D=1,21 \text{ mA}$  e  $V_{DS}=4,05 \text{ V}$ . Calcule os parâmetros do modelo de pequenos sinais para o transístor:  $g_m$  e  $r_o$ .
- Desenhe o circuito equivalente para a análise AC. Determine as expressões que permitem calcular os parâmetros do amplificador e calcule os seus valores: as resistências de entrada  $R_i$  e de saída  $R_o$  e os ganhos de tensão  $A_v=v_o/v_i$  e de corrente  $A_i=i_o/i_i$ . Não recorra directamente as expressões do formulário.
- Para o sinal de entrada  $v_i(t)=100 \sin(\omega t) \text{ mV}$ , calcule os sinais  $v_G(t)$ ,  $i_D(t)$  e  $v_D(t)$ , componentes DC e AC.

2. No circuito amplificador da figura o transístor é caracterizado por  $k'_n(W/L)=2 \text{ mA/V}^2$ ,  $V_t=1 \text{ V}$  e  $\lambda=0 \text{ V}^{-1}$ .  $V_{DD}=12 \text{ V}$ ,  $R_1=2 \text{ M}\Omega$ ,  $R_2=1 \text{ M}\Omega$ ,  $R_3=1,5 \text{ k}\Omega$ ,  $R_4=300 \Omega$  e  $R_5=1,5 \text{ k}\Omega$ .



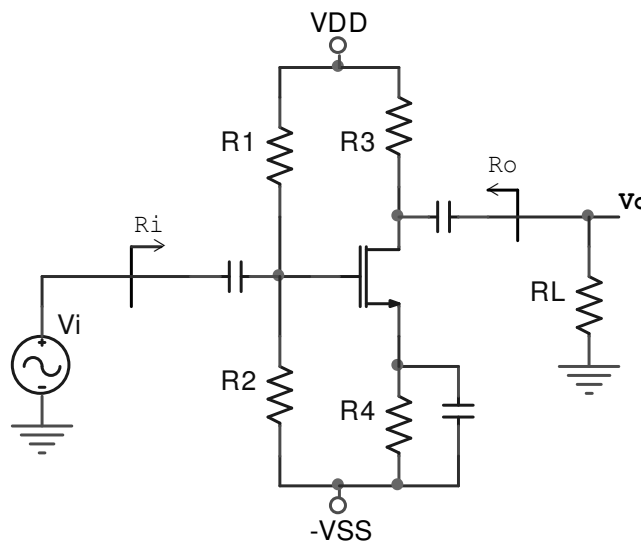
- Desenhe o circuito equivalente para a análise DC. Calcule o ponto de funcionamento em repouso:  $I_D$ ,  $V_{GS}$  e  $V_{DS}$ . Calcule os parâmetros do modelo de pequenos sinais para o transístor:  $g_m$  e  $r_o$ .

## Electrónica I – LEIC – Exercícios com Transístor de Efeito de Campo (MOSFET)

- b)** Desenhe o circuito equivalente para a análise AC. Determine as expressões que permitem calcular os parâmetros do amplificador e calcule os seus valores: as resistências de entrada  $R_i$  e de saída  $R_o$  e os ganhos de tensão  $A_v = v_o/v_i$  e de corrente  $A_i = i_o/i_i$ .  $i_o$  é a corrente na resistência  $R_5$  e  $i_i$  é a corrente de entrada da fonte  $v_i$ .
- c)** Para o sinal de entrada  $v_i(t) = 10 \sin(\omega t)$  mV, calcule os sinais  $i_i(t)$ ,  $v_G(t)$ ,  $i_D(t)$ ,  $v_D(t)$ ,  $i_o(t)$  e  $v_o(t)$ .
- d)** Calcule a amplitude máxima para o sinal de entrada  $v_i(t)$ , de modo a não verificar distorção no sinal de saída  $v_o(t)$ .
- e)** Se retirar do circuito o condensador de contorno da resistência  $R_4$ , quais as alterações aos parâmetros do amplificador calculados na alínea b)?

- 
- 3.** Identifique, evidencie e comente as diferenças principais entre os dois tipos de transístores: de junção bipolar (BJT) e de efeito de campo (MOSFET).
- 

- 4.** No circuito seguinte, o transístor é caracterizado por  $V_t = 1$  V,  $k'_n(W/L) = 2$  mA/V<sup>2</sup> e  $\lambda = 0,01$  V<sup>-1</sup>. Considere  $V_{DD} = V_{SS} = 5$  V,  $R_1 = R_2$  e  $R_L = 10$  k $\Omega$ .

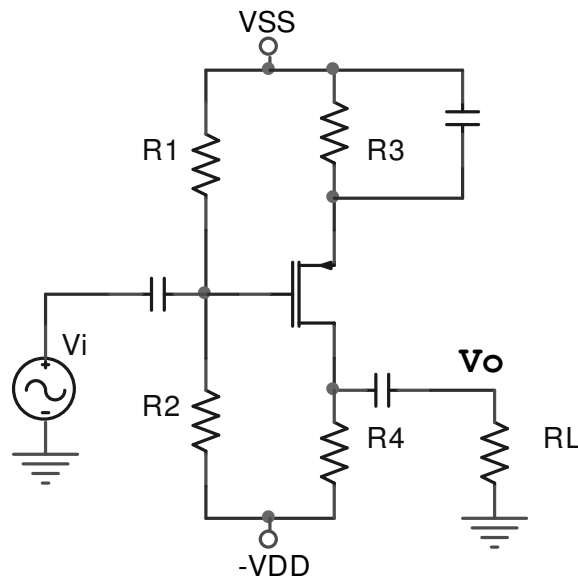


- a)** Desenhe o circuito equivalente para a análise DC de ponto de funcionamento em repouso. Para  $I_D = 1$  mA e  $V_{DS} = 4$  V, dimensione valores para as resistências  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$ . Despreze o efeito de  $\lambda$  na análise DC.
- b)** De que modo as resistências  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$  influenciam o ponto de funcionamento em repouso?
- c)** Calcule os parâmetros do modelo híbrido de pequenos sinais para o transístor. Desenhe o circuito equivalente para a análise AC de pequenos sinais.  $v_i$  é a tensão de entrada e  $v_o$  é a tensão de saída. Considere a análise a baixas frequências,  $C \rightarrow \infty$ .
- d)** Calcule as resistências de entrada  $R_i$  e de saída  $R_o$  da montagem e indicadas no circuito. Indique todos os passos do cálculo das expressões para  $R_i$  e  $R_o$ .

## Electrónica I – LEIC – Exercícios com Transístor de Efeito de Campo (MOSFET)

- e) Calcule os ganhos de tensão  $A_v = v_o/v_i$  e de corrente  $A_i = i_o/i_i$ .  $i_o$  é a corrente na resistência de carga  $R_L$  e  $i_i$  é a corrente de entrada da fonte  $v_i$ . Indique todos os passos do cálculo das expressões para  $A_v$  e  $A_i$ .
- f) Para um sinal de entrada  $v_i(t) = 100 \times \sin(\omega t)$  mV, calcule os sinais  $i_i(t)$ ,  $i_D(t)$ ,  $i_o(t)$ ,  $v_{GS}(t)$ ,  $v_{DS}(t)$  e  $v_o(t)$ , componentes DC e AC.
- g) Qual a amplitude máxima de um sinal sinusoidal  $v_i(t)$  de entrada, de modo a manter o transístor na zona de saturação.

5. No circuito seguinte, o transístor é caracterizado por  $V_t = -1$  V,  $k'_p(W/L) = 2$  mA/V<sup>2</sup> e  $\lambda = -0,01$  V<sup>-1</sup>. Considere  $V_{DD} = V_{SS} = 5$  V,  $R_1 = R_2$  e  $R_L = 10$  k $\Omega$ .



- a) Desenhe o circuito equivalente para a análise DC de ponto de funcionamento em repouso. Para  $I_D = 1$  mA e  $V_{DS} = -4$  V, dimensione valores para as resistências  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$ . Despreze o efeito de  $\lambda$  na análise DC.
- b) De que modo as resistências  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$  influenciam o ponto de funcionamento em repouso?
- c) Calcule os parâmetros do modelo híbrido de pequenos sinais para o transístor. Desenhe o circuito equivalente para a análise AC de pequenos sinais.  $v_i$  é a tensão de entrada e  $v_o$  é a tensão de saída.
- d) Calcule as resistências de entrada  $R_i$  e de saída  $R_o$  da montagem. Indique todos os passos do cálculo das expressões para  $R_i$  e  $R_o$ .
- e) Calcule os ganhos de tensão  $A_v = v_o/v_i$  e de corrente  $A_i = i_o/i_i$ .  $i_o$  é a corrente na resistência de carga  $R_L$  e  $i_i$  é a corrente de entrada da fonte  $v_i$ . Indique todos os passos do cálculo das expressões para  $A_v$  e  $A_i$ .
- f) Para um sinal de entrada  $v_i(t) = 100 \times \sin(\omega t)$  mV, calcule os sinais  $i_i(t)$ ,  $i_D(t)$ ,  $i_o(t)$ ,  $v_{GS}(t)$ ,  $v_{DS}(t)$  e  $v_o(t)$ , componentes DC e AC.

6. No circuito da figura 1, o transístor é caracterizado por  $K'_n(W/L)=1 \text{ mA/V}^2$ ,  $V_t=1 \text{ V}$  e  $\lambda=0 \text{ V}^{-1}$ .  $V_{DD}=10 \text{ V}$ ,  $R_1=R_2=10 \text{ M}\Omega$ ,  $R_4=6 \text{ k}\Omega$ .

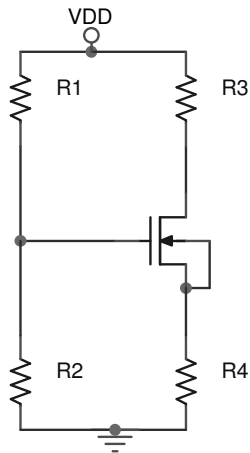


Figura 1.

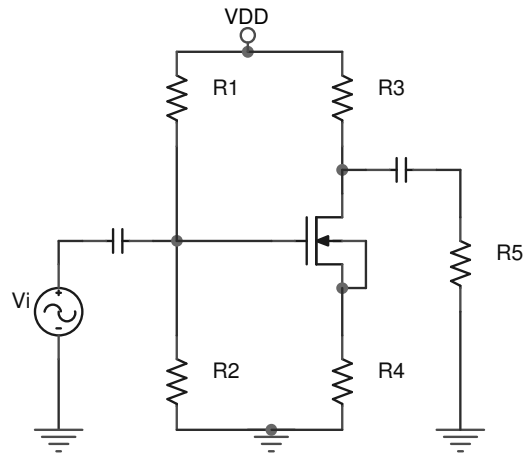
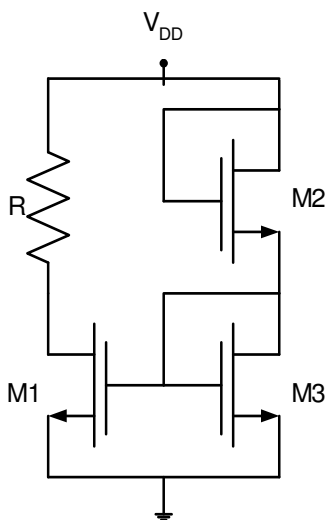


Figura 2.

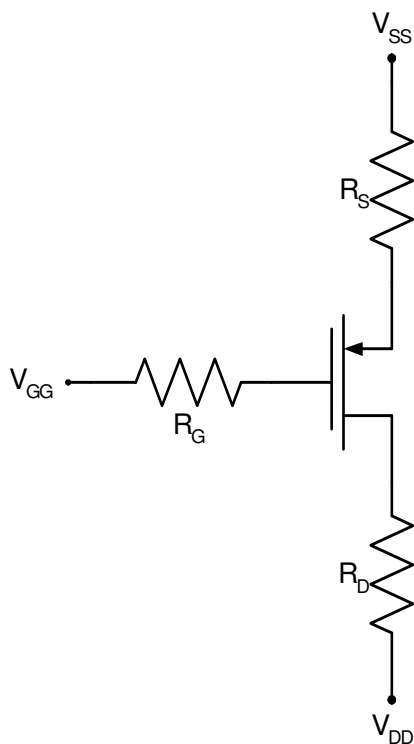
- Calcule o valor da resistência  $R_3$  de modo a ter o transístor na zona de saturação e uma tensão dreno-fonte de  $4 \text{ V}$ .
- De que modo o valor da resistência  $R_3$  influencia o ponto de funcionamento em repouso. Calcule a gama de valores de  $R_3$  que mantém o transístor na região de saturação.
- Considere agora o circuito da figura 2, uma montagem amplificadora construída a partir do circuito da figura 1, com resistência de carga  $R_5=6 \text{ k}\Omega$ . Calcule o ganho de tensão e as resistências de entrada e saída.
- De que modo os valores das resistências no circuito influenciam os parâmetros do amplificador calculados na alínea anterior.



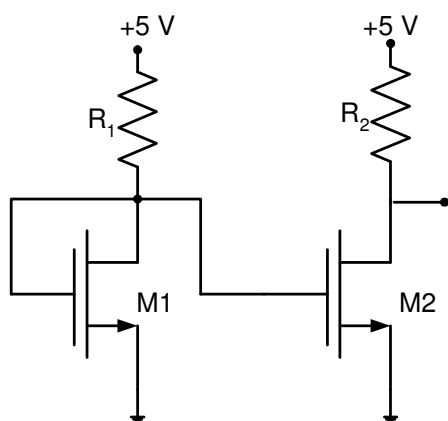
7. No circuito da figura todos os transístores são caracterizados por  $K'_n(W/L)=0,1 \text{ mA/V}^2$ ,  $V_t=1 \text{ V}$  e  $\lambda=0 \text{ V}^{-1}$ .  $V_{DD}=+5 \text{ V}$ .

Calcule o valor máximo para a resistência  $R$  que mantém o transístor M1 na zona de saturação.

8. No circuito da figura, o transístor é caracterizado por  $K'_p(W/L)=0,1 \text{ mA/V}^2$ ,  $V_t=-1 \text{ V}$  e  $\lambda=0 \text{ V}^{-1}$ .  $V_{DD}=-10 \text{ V}$ ,  $V_{SS}=10 \text{ V}$ ,  $R_G=1 \text{ M}\Omega$ ,  $R_D=3 \text{ k}\Omega$ ,  $R_S=2 \text{ k}\Omega$ .



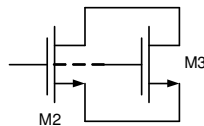
- Calcule o ponto de funcionamento em repouso para os seguintes casos:  $V_{GG}=V_{SS}$  e  $V_{GG}=0 \text{ V}$ .
- Calcule os valores de  $V_{GG}$  para os quais ocorre transição na zona de funcionamento do transístor, mantendo os outros componentes do circuito com valores constantes.
- Com  $V_{GG}=0 \text{ V}$ , calcule a gama de valores de  $R_D$  que mantém o transístor na região de saturação, mantendo os outros componentes do circuito com valores constantes.
- Com  $V_{GG}=0 \text{ V}$ , calcule o valor mínimo de  $V_{DD}$  que mantém o transístor na região de saturação, mantendo os outros componentes do circuito com valores constantes.
- Considere agora que tem um MOSFET de enriquecimento canal n. Que modificações efectuará ao circuito para obter os mesmos valores de ponto de funcionamento em repouso. Caracterize o transístor.



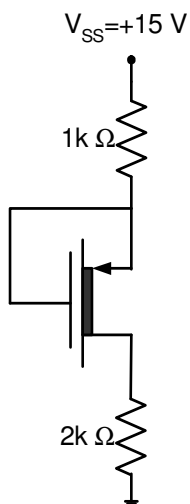
9. No circuito da figura todos os transístores são caracterizados por  $k'_n=20 \text{ }\mu\text{A/V}^2$ ,  $V_t=1 \text{ V}$ ,  $L=2 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $W=30 \text{ }\mu\text{m}$  e  $\lambda=0 \text{ V}^{-1}$ .

Calcule  $R_1$  para obter uma corrente  $I_{D1}=150 \text{ }\mu\text{A}$ .

Se  $R_1=R_2$ , calcule a tensão no dreno do transístor  $M_2$ .



Suponha que liga um transístor  $M_3$  ao transístor  $M_2$  com os terminais correspondentes ligados, com se indica na figura atrás. Calcule o valor da resistência  $R_2$  que permite ter  $V_{DS2}=V_{DS1}$ .



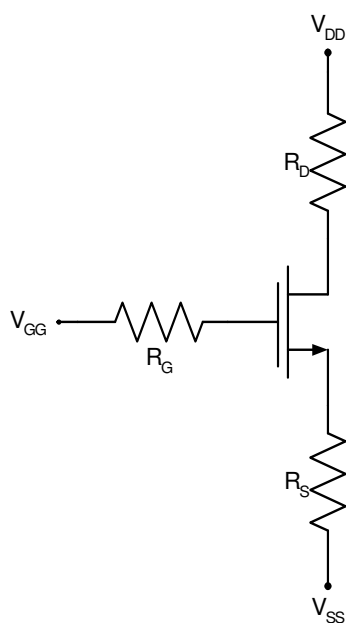
**10.** No circuito da figura o transístor de depleção canal p é caracterizado por  $k'_p = 8 \mu\text{A}/\text{V}^2$ ,  $V_t = 2 \text{ V}$ ,  $L = 2 \mu\text{m}$ ,  $W = 500 \mu\text{m}$  e  $\lambda = 0 \text{ V}^{-1}$ .

Calcule as correntes no circuito.

Calcule as tensões de dreno e fonte do transístor.

Calcule o valor mínimo para  $V_{SS}$  que mantém o transístor na zona de saturação.

**11.** No circuito da figura, o transístor é caracterizado por  $K'_n(W/L) = 0,1 \text{ mA}/\text{V}^2$ ,  $V_t = 1 \text{ V}$  e  $\lambda = 0 \text{ V}^{-1}$ .  $V_{DD} = 10 \text{ V}$ ,  $V_{SS} = -10 \text{ V}$ ,  $R_G = 1 \text{ M}\Omega$ ,  $R_D = 3 \text{ k}\Omega$ ,  $R_S = 2 \text{ k}\Omega$ .



**a.** Calcule o ponto de funcionamento em repouso para os seguintes casos:  $V_{GG} = V_{SS}$  e  $V_{GG} = 0 \text{ V}$ .

**b.** Calcule os valores de  $V_{GG}$  para os quais ocorre transição na zona de funcionamento do transístor, mantendo os outros componentes do circuito com valores constantes.

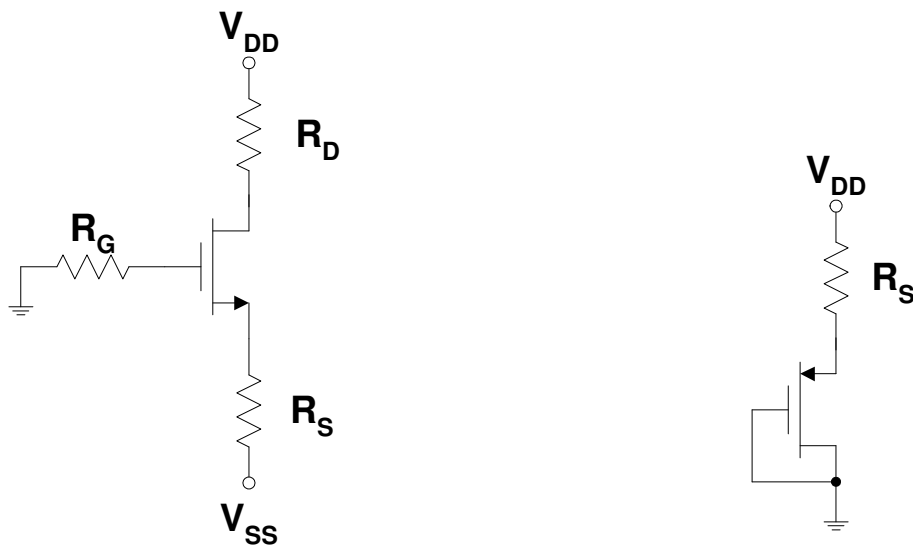
**c.** Com  $V_{GG} = 0 \text{ V}$ , calcule a gama de valores de  $R_D$  que mantém o transístor na região de saturação, mantendo os outros componentes do circuito com valores constantes.

**d.** Com  $V_{GG} = 0 \text{ V}$ , calcule o valor mínimo de  $V_{DD}$  que mantém o transístor na região de saturação, mantendo os outros componentes do circuito com valores constantes.

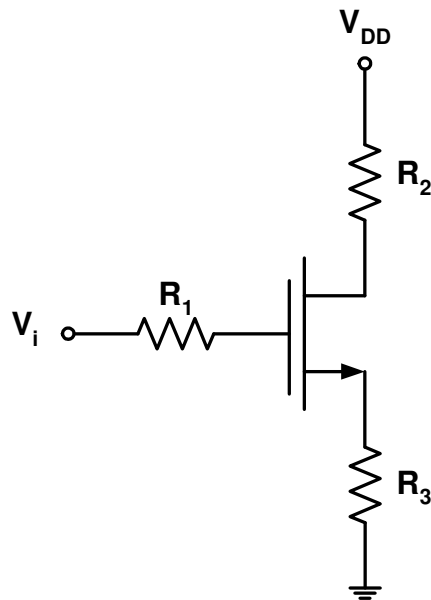
**12. MOSFET de enriquecimento**

- a. Um transístor com  $k'_n(W/L)=0,2 \text{ mA/V}^2$ ,  $V_t=1,5 \text{ V}$  e  $\lambda=0,02 \text{ V}^{-1}$  opera com  $V_{GS}=3,5 \text{ V}$ . Calcule a corrente de dreno para  $V_{DS}=2 \text{ V}$  e para  $V_{DS}=10 \text{ V}$ . A partir destes valores, calcule a resistência de saída  $r_o$ , para aquele valor de  $V_{GS}$ .
- b. Para um determinado transístor com  $V_t=1 \text{ V}$ , observaram-se as seguintes situações ( $V_{DS}=0,2 \text{ V}$ ,  $V_{GS}=2 \text{ V}$ ,  $I_D=0,1 \text{ mA}$ ) e ( $V_{DS}=0,2 \text{ V}$ ,  $V_{GS}=5 \text{ V}$ ,  $I_D=0,4 \text{ mA}$ ). Na operação de um MOSFET para valores baixos de  $V_{DS}$ ,  $I_D$  é proporcional a  $(V_{GS}-V_t)V_{DS}$ . Calcule a constante de proporcionalidade e a gama de valores da resistência dreno-fonte para a variação de  $V_{GS}=2 \text{ V}$  a  $5 \text{ V}$ .
- c. Compare as características dos MOSFET canal n e canal p, no que se refere ao seu comportamento físico e circuitos de polarização.

- 
- 13.** Nos circuitos da figura os transístores são caracterizados por  $|V_t|=1 \text{ V}$ ,  $k'(W/L)=1 \text{ mA/V}^2$  e  $\lambda=0 \text{ V}^{-1}$ .  $V_{DD}=+5 \text{ V}$ ,  $V_{SS}=-5 \text{ V}$ .  $R_G=1 \text{ M}\Omega$ ,  $R_D=6 \text{ k}\Omega$ ,  $R_S=6 \text{ k}\Omega$ . Determine as tensões e as correntes nos dois circuitos.

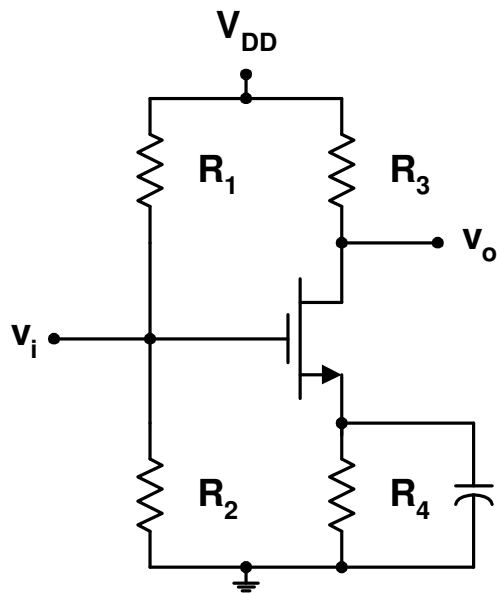


- 14.** No circuito da figura,  $V_{DD}=15\text{ V}$ ,  $R_1=1\text{ M}\Omega$ ,  $R_2=2\text{ k}\Omega$  e  $R_3=2\text{ k}\Omega$ . O transístor é caracterizado por  $k'(W/L)=2\text{ mA/V}^2$ ,  $V_t=1,5\text{ V}$  e  $\lambda=0\text{ V}^{-1}$ .



- a)** Calcule o ponto de funcionamento em repouso de tensões e correntes no transístor para  $V_i=-V_{DD}$ ,  $V_i=0\text{ V}$ ,  $V_i=V_{DD}/2$  e  $V_i=V_{DD}$ .
- b)** Com  $V_i \in [-V_{DD}, V_{DD}]$ , calcule os valores de  $V_i$  correspondentes a transições na zona de funcionamento do transístor.
- c)** Escolha um valor de  $V_i$  correspondente a um ponto de funcionamento do transístor na região de tródo. Nesta situação, calcule a resistência dreno-fonte correcta e aproximada.
- d)** Escolha um valor de  $V_i$  correspondente a um ponto de funcionamento do transístor na região de saturação. Nesta situação, calcule a resistência dreno-fonte. Nesta alínea, considere  $\lambda=0,01\text{ V}^{-1}$ .
- e)** Para  $V_i$  uma onda quadrada de valores mínimo  $0\text{ V}$  e máximo  $V_{DD}$ , calcule o sinal de tensão no dreno do transístor. Esboce ambos os sinais.
- f)** Escolha um novo valor de  $V_i \in [-V_{DD}, V_{DD}]$  para um dos pontos de transição calculados na alínea b). Por alteração única de  $R_2$ , calcule o novo valor desta resistência correspondente ao novo valor de  $V_i$  de transição.





**15.** No circuito da figura pretende-se  $I_D=182\ \mu\text{A}$ ,  $V_{DS}=7,29\ \text{V}$ , uma resistência de entrada  $R_i=42\ \text{k}\Omega$  e um ganho de tensão  $A_v=v_o/v_i=-2,75$ .  $V_{DD}=10\ \text{V}$ ,  $V_t=1\ \text{V}$  e  $k'(W/L)=0,1\ \text{mA/V}^2$ .

Dimensione as resistências do circuito:  
 $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$ .