

MÓDULO 6: RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO AMPLIFICADOR DE PEQUENOS SINAIS A JFET, FREQUÊNCIA DE CORTE SUPERIOR

Introdução: O circuito amplificador de sinal a JFET possui ganho alto, uma impedância alta de entrada e ampla faixa de resposta em frequência. São aplicados a circuitos com baixa corrente e é diferente do transistor bipolar, o qual controla uma corrente alta de coletor através de baixa potência aplicada à base. Através da aplicação de baixíssima tensão de entrada é possível controlar uma alta corrente de dreno. Pode operar na região linear ou em circuitos lógicos no corte e saturação. O circuito amplificador tem uma limitação em alta frequência e pode ser determinada realizando o modelo equivalente para alta frequência conforme é a seguir.

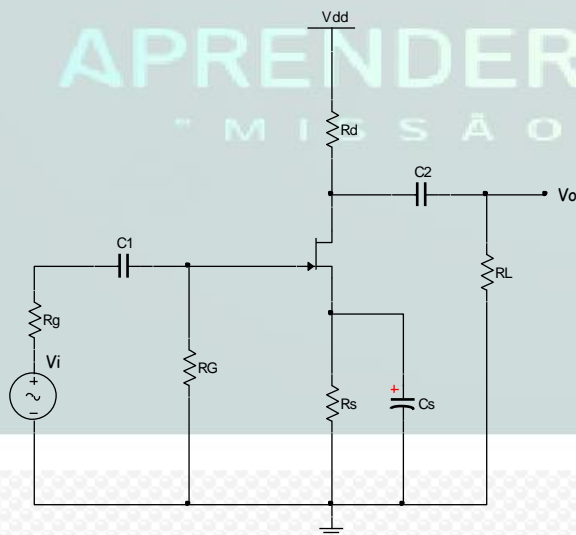
6. MODELO EQÜIVALENTE CA PARA O CIRCUITO A JFET.

CIRCUITO AUTOPOLARIZAÇÃO – Análise do modelo equivalente para o circuito amplificador em autopolarização a JFET.

CONSIDERAÇÕES: Considerar para análise em baixa frequência as seguintes condições:

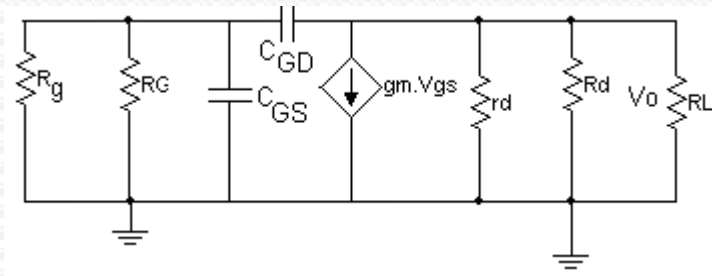
1. A fonte CC é um curto para sinal;
2. O capacitor no terminal fonte em paralelo com R_S um curto para sinal;
3. Os capacitores de acoplamento apresentam uma reatância capacitiva igual a zero.

O circuito RC formado por R_g , R_G e C_{GS} e R_D , R_L e C_{GD} combinados e por efeito Miller se comportam como um circuito passa baixa e pode-se determinar a frequência de corte do filtro. O circuito a seguir:



6.1 Modelo do amplificador a JFET para análise em alta frequência

O modelo equivalente do circuito para análise em frequências altas onde há somente as capacitâncias parasitas do transistor JFET. Do modelo equivalente calcula-se o o resistor equivalente e a capacitância de efeito Miller C_T .

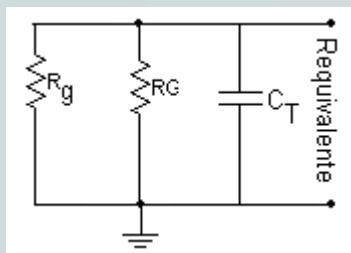


Para a determinação da frequência de corte superior, temos:

$$f_{CS} = \frac{1}{2\pi R_{\text{equival.}} C_T}$$

DETERMINAÇÃO DOS RESISTORES EQUÍVALENTES.

1. Entrada – O resistor equivalente da entrada é calculado pela resistência equivalente vista por C_1 . O $R_{\text{equivalente},1} = (R_G // R_g)$. A frequência de corte f_{CS} será dada por:



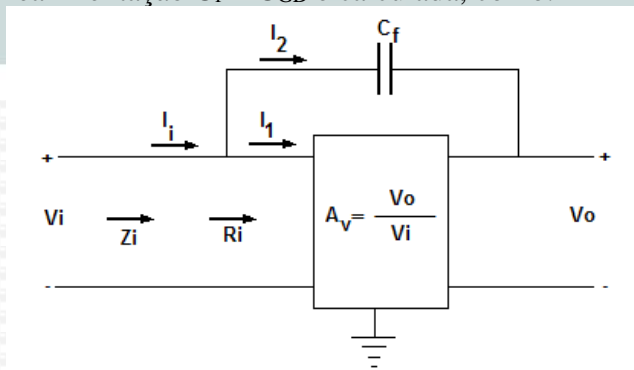
$$f_{C1} = \frac{1}{2\pi (R_G // R_g) C_T}$$

DETERMINAÇÃO DA CAPACITÂNCIA C_T

EFEITO DA CAPACITÂNCIA MILLER

As capacitâncias parasitas, entre terminais, internas ao dispositivo e outras influenciam na resposta em alta frequência.

Estas capacitâncias se multiplicam quando aplicadas à amplificadores e a capacitância de realimentação $C_f = C_{GD}$ é calculada, como:



Aplicando a lei de Kirchoff para a corrente resulta em:

$I_i = I_1 + I_2$, onde:

$$I_i = \frac{V_i}{Z_i} \text{ e } I_1 = \frac{V_i}{R_i}$$

$$\text{e } I_2 = \frac{V_i - V_0}{X_{Cf}} = \frac{V_i - A_v V_i}{X_{Cf}} = \frac{(1 - A_v) V_i}{X_{Cf}}$$

Substituindo obtém-se:

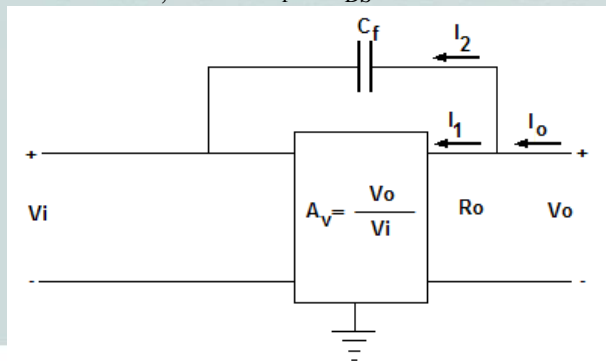
$$\frac{V_i}{Z_i} = \frac{V_i}{R_i} + \frac{(1 - A_v) V_i}{X_{Cf}}$$

$$\frac{1}{Z_i} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{X_{Cf}/(1 - A_v)}$$

$$\text{Onde } \frac{X_{Cf}}{1 - A_v} = \frac{1}{\omega \cdot (1 - A_v) C_f} = X_{CM}, \text{ onde } C_T = (1 - A_v) \cdot C_f.$$

$$\frac{1}{Z_i} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{X_{CT}}$$

Para a saída, temos $C_f = C_{DS}$:



Aplicando-se novamente a lei de Kirchoff, temos :

$$I_0 = I_1 + I_2, \text{ como } I_1 = \frac{V_0}{R_0} \text{ e } I_2 = \frac{V_0 - V_i}{X_{Cf}}$$

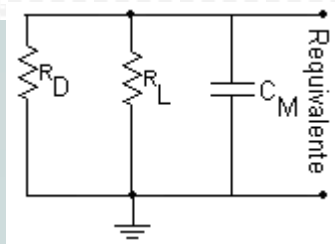
Como R_0 é grande o suficiente, tal que:

$$I_0 \cong \frac{V_0 - V_i}{X_{Cf}} = V_i = \frac{V_0}{A_v}.$$

$$I_0 = \frac{V_0 - V_0/A_V}{X_{Cf}} = \frac{V_0(1 - 1/A_V)}{X_{Cf}}$$

$$\frac{V_0}{I_0} = \frac{X_{Cf}}{1 - 1/A_V} = \frac{1}{\omega \cdot C_f(1 - 1/A_V)} = \frac{1}{\omega \cdot C_M}, \text{ onde } C_M = C_f(1 - 1/A_V)$$

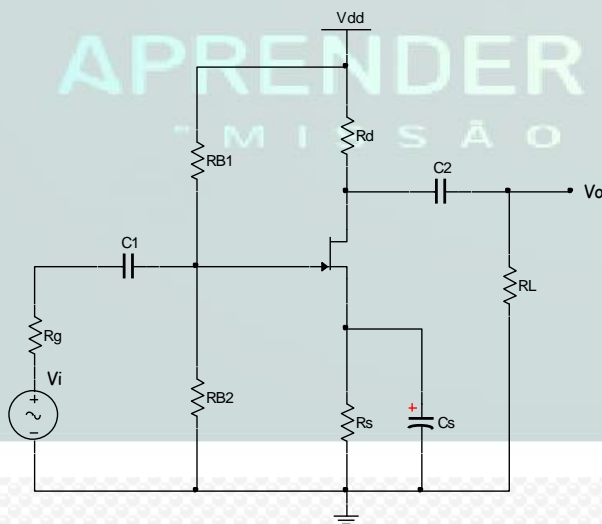
2. Saída - O resistor equivalente da saída é calculado pela resistência equivalente vista por C_T . O $R_{\text{equivalente},2} = (R_D // R_L)$. A frequência de corte f_{c2} será dada por:



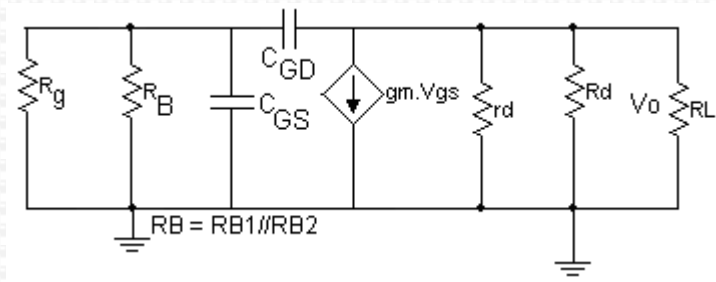
$$f_{C2} = \frac{1}{2\pi(R_L // R_D)C_M}$$

Obs.: Dentre as frequências de corte inferiores f_{c1} e f_{c2} escolhe-se como frequência de corte inferior a frequência de maior valor.

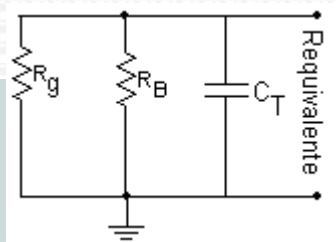
b) CIRCUITO DIVISOR DE TENSÃO - Análise do modelo equivalente para o circuito amplificador com divisor de tensão a JFET.



O modelo equivalente do circuito, análise em frequências médias onde os capacitores apresentam uma reatância capacitiva igual a zero. Do modelo equivalente calcula-se o ganho A_V .



Por efeito Miller, o modelo equivalente fica:



$$Z_{in} = R_B = (R_{B1} // R_{B2}) \text{ e } Z_O = R_D // r_d.$$

$$C_T = C_{GS} + C_{GD}(1 - A_V).$$

$$A_V = V_O/V_i, A_V = -g_m R_B (r_d // R_L // R_D) / (R_g + R_B).$$

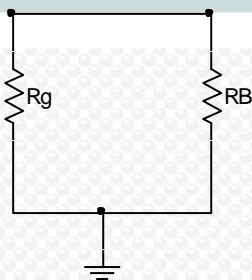
$$A_V = -g_m \frac{R_B}{R_g + R_B} (R_D // r_d // R_L) \cong -g_m \frac{R_B}{R_g + R_B} [R_D // R_L]$$

Para a determinação da frequência de corte, temos:

$$f_{CS} = \frac{1}{2\pi R_{equival.} C_T}$$

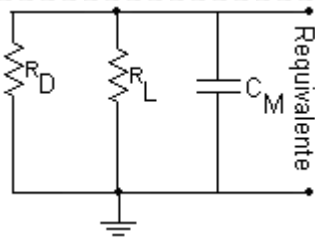
DETERMINAÇÃO DOS RESISTORES EQUIVALENTES.

1. Entrada - O resistor equivalente da entrada é calculado pela resistência equivalente vista por C_1 . O $R_{equivalente,1} = (R_B // R_g)$. A frequência de corte f_{C1} será dada por:



$$f_{C1} = \frac{1}{2\pi (R_B // R_g) C_T}$$

2. Saída - O resistor equivalente da saída é calculado pela resistência equivalente vista por C_2 . O $R_{equivalente,2} = (r_d // R_D // R_L)$. Podemos aproximar $r_d // R_D \cong R_D$, então a frequência de corte f_{C2} será dada por:

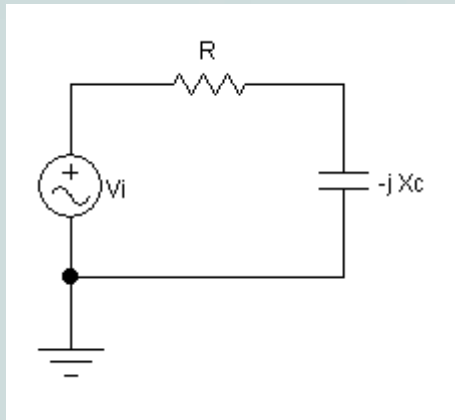


$$f_{C2} = \frac{1}{2\pi(R_D // R_L)C_M}$$

Obs.: Dentre as frequências de corte inferiores f_{C1} e f_{C2} escolhe-se como frequência de corte inferior a frequência de maior valor.

6.2 DIAGRAMA DE BODE COM A RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO AMPLIFICADOR A JFET.

A seguir apresentamos o circuito passa baixa para a curva inicial do amplificador. Para frequências acima da frequência de corte o circuito atenua e na frequência infinito a saída é zero.



Como $X_C = R$, na frequência de corte, temos: $1/\omega C = 1/2\pi f C = R$

$$f = \frac{1}{2\pi RC}, \text{ Na frequência de corte } f = f_2, \text{ então } f_2 = \frac{1}{2\pi RC}$$

A função de transferência do circuito será:

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{-jX_C}{R - jX_C} = \frac{1}{R / -jX_C + 1} = \frac{1}{1 + j 2\pi f RC}$$

Na frequência de corte inferior $X_C = R$, temos:

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{1 + j f 2\pi RC} = \frac{1}{1 + j f / f_2}$$



Circuitos Eletrônicos

Quando $f_2 = f$, então:

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{\text{SQR}(1^2 + 1^2)} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Calculando em dB, temos:

$$20 \log 1/\sqrt{2} = -3\text{dB}.$$

Ou seja na frequência de corte o ganho cai de 3dB ou de $\sqrt{2}$.

Chamando-se de $A_V = \frac{V_0}{V_i}$, temos:

$$A_V = 20 \log \frac{1}{\text{SQR}[(1^2 + (f/f_2)^2)]} = -20 \log_{10}[(1 + (f/f_2)^2)^{1/2}]$$

$$A_V = -10 \log[1 + (f/f_2)^2], \text{ daí:}$$

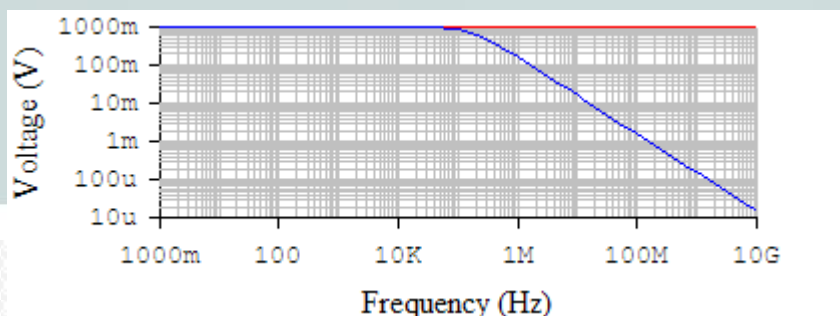
Para f igual a:

a) $0,1f_2$, temos: $A_V = -10 \log 1 + 0 = 0\text{dB}$.

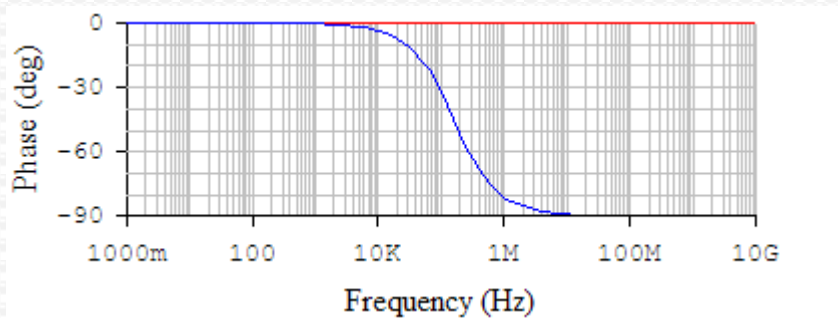
b) f_2 , temos: $A_V = -10 \log 2 = -3\text{dB}$.

c) $10f_2$, temos: $A_V = -10 \log 101 = -20\text{dB}$

O gráfico de resposta em frequência do passa-baixa, será:

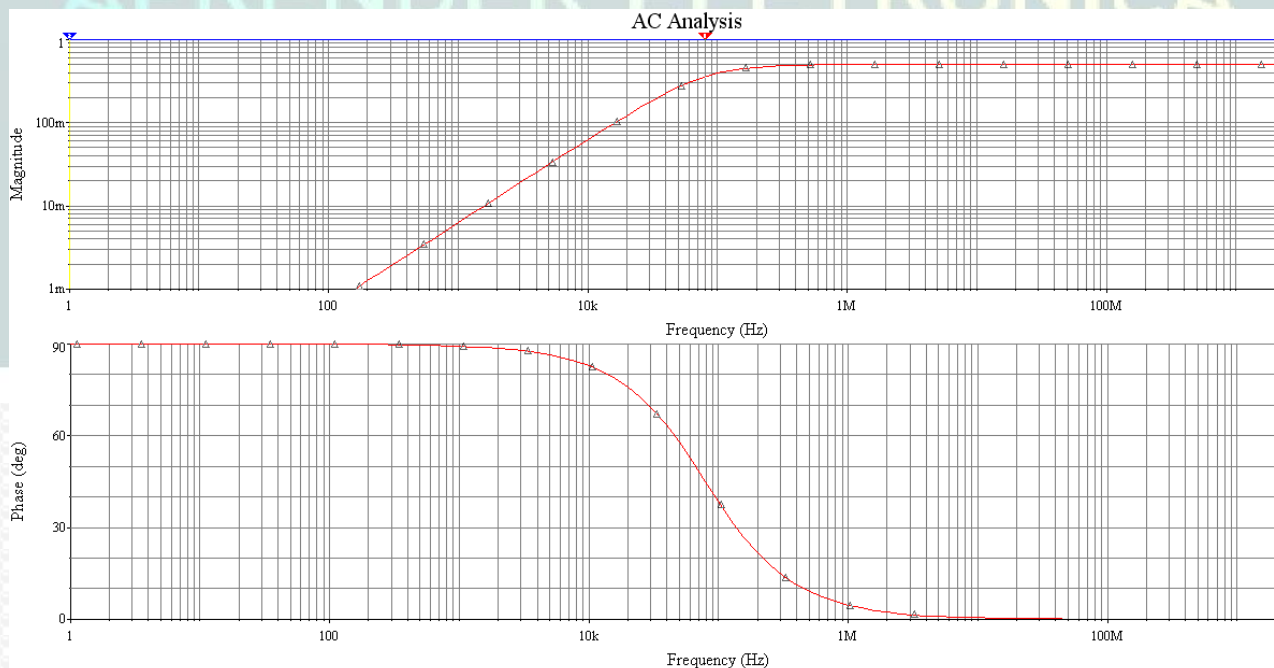
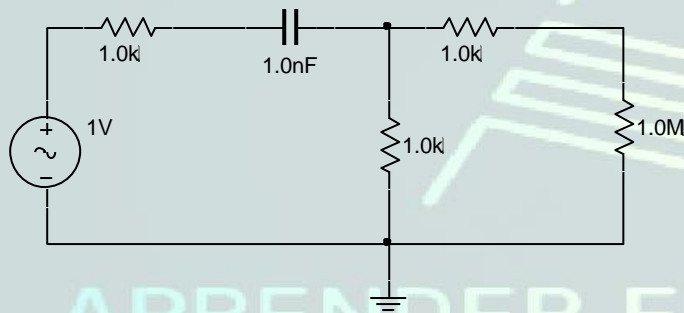


A fase será:



Exercício: Determinar para o circuito a seguir:

- A frequência de corte.
- Fazer o levantamento da curva de resposta em frequência da amplitude em Volts.
- Repetir o item b) em decibéis.
- Repetir o item b) com a fase do circuito.

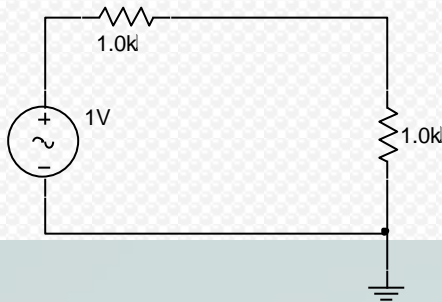


Pelo cálculo,

$$f = 1/(2 \text{ PI} \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 10^{-9}) = 79.617\text{Hz}.$$

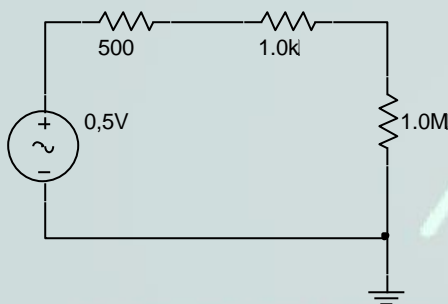
O ganho na frequência acima da frequência de corte inferior é igual a:

Cálculo do gerador equivalente de Thèvenin.



$$V_{TH} = V_g \cdot 1k / 2k = V_g/2 = 0,5V$$

$$R_{TH} = 1K//1K = 0,5K.$$



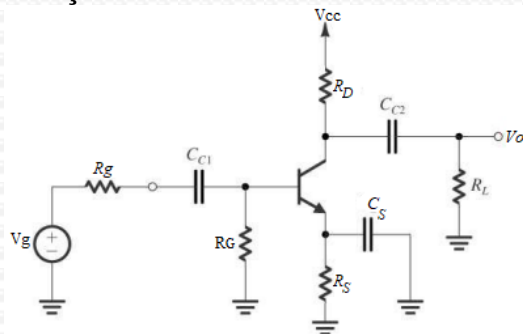
Novamente, gerador equivalente de Thèvenin, temos

$$V_o = 0,5 \cdot 10^6 / (10^6 + 1,5 \cdot 10^3) = 0,5V$$

Na frequência de corte inferior o ganho cai de raiz de 2, ou seja igual a 0,35V.

Exercício: Determinar a resposta em frequência do amplificador de pequeno sinal a JFET e a impedância de entrada e de saída, sabendo-se que: $V_{DD} = 15V$, $I_{DSS} = 12mA$, $C_{ENT} = 0,02\mu F$, $C_{SAÍDA} = 0,02\mu F$, $R_g = 100\Omega$, $V_P = -4V$, $y_{os} = 20\mu S$, $R_L = 40K$, $C_{GS} = 1pF$, $C_{DS} = 0,5pF$ e $C_{GD} = 2pF$ e $C_s = 100\mu F$. Repetir o problema sem C_s .

Solução:



Utilizando-se dos exemplos anteriores,

$I_D = 2,26mA$ e $V_{GS} = -2,26V$.

Pode-se calcular outros parâmetros como:

g_m e A_v e $r_d = 1/y_{os} = 50K\Omega$.

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 \text{ Eq. Schocley}$$

$$g_m = g_{m0} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)$$

Utilizando-se dos exemplos anteriores, $I_D = 2,26\text{mA}$ e $V_{GS} = -2,26\text{V}$.
Pode-se calcular outros parâmetros como g_m e A_v .

$$g_m = \frac{2I_{DSS}}{V_P} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right) = \frac{2I_{DSS}}{V_P} \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} = 2,61\text{mS}$$

$$A_v = -\frac{R_G}{R_g + R_G} (-g_m R_D // r_d // R_L) = -\frac{R_G}{R_g + R_G} [-g_m (r_d // R_D // R_L)]$$

O ganho será: $A_v = -4,97$

a) Resposta em frequência de corte inferior.

Considerar para a análise em frequência, as fontes de tensões e de sinal um curto e o circuito fonte comum (C_s muito grande, apresenta reatância muito baixa para a frequência).

$$f_{\text{INFA}} = \frac{1}{2\pi \cdot (R_G + R_f) \cdot C_{C1}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot (10^6 + 10^4) \cdot 0,02 \cdot 10^{-6}} = 7,88 \text{ Hz}$$

$$f_{\text{INFB}} = \frac{1}{2\pi \cdot (R_D + R_L) \cdot C_{C2}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot (40 \cdot 10^3 + 2 \cdot 10^2) \cdot 0,02 \cdot 10^{-6}} = 189,56 \text{ Hz}$$

Entre as frequências de corte inferior, escolhe-se a maior frequência, ou seja $f_{\text{INFB}} = 189 \text{ Hz}$.

b) Cálculo da frequência de corte superior.

Antes por efeito Miller, a capacitância refletida será:

$$C_{TA} = C_{GS} + C_{GD}(1 - A_v) = 1\text{pF} + 2[1 - (-4,91)] = 12,83\text{pF}$$

$$C_{TB} = C_{DS} + C_{GD}(1 - 1/A_v) = 0,5\text{pF} + 2[1 - (1/-4,91)] = 2,91\text{pF}$$

$$f_{\text{SUPA}} = \frac{1}{2\pi \cdot (R_G // R_f) \cdot C_{TA}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot (10^6 // 10^4) \cdot 12,83 \cdot 10^{-12}} \approx 1,25 \text{ MHz}$$

$$f_{\text{SUPB}} = \frac{1}{2\pi \cdot (R_D // R_L) \cdot C_{TB}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot (40 \cdot 10^3 // 2 \cdot 10^3) \cdot 2,91 \cdot 10^{-12}} = 2,87\text{MHz}$$

Entre as frequências de corte superior, escolhe-se a menor frequência, ou seja $f_{\text{SUPA}} = 1,25\text{MHz}$.

c) Impedância de entrada

$$Z_{\text{IN}} = R_G = 1\text{M}\Omega.$$



Circuitos Eletrônicos

d) Impedância de saída

$$Z_0 = R_D \cong 2K\Omega, r_d \geq 10R_D.$$

e) Sem o capacitor C_S .

O ganho do estágio sem acoplamento de saída (Sem R_L), será :

$$A_V = \frac{-g_m \cdot R_D / r_d}{1 + g_m \cdot R_S} = \frac{2,61 \cdot 10^{-3} \cdot 2K // 50K}{1 + 2,57 \cdot 10^{-3} \cdot 1K} = -1,44$$

f) O ganho do estágio com acoplamento de saída será:

$$A_V = - \frac{R_G}{R_g + R_G} \cdot \frac{-g_m R_D}{1 + g_m R_S} \cdot \frac{R_L}{R_L + R_D} = -1,36$$

g) Impedância de entrada

$$Z_{IN} = R_G = 1M\Omega.$$

h) Impedância de saída

$$Z_0 = R_D \cong 2K\Omega, r_d \geq 10R_D.$$

Antes por efeito Miller, a capacitância refletida será:

$$C_{TA} = C_{GS} + C_{GD}(1 - A_V) = 1pF + 2[1 - (-1,36)] = 5,72pF$$

$$C_{TB} = C_{DS} + C_{GD}(1 - 1/A_V) = 0,5pF + 2[1 - (1/-1,36)] = 3,97pF.$$

$$f_{SUPA} = \frac{1}{2\pi \cdot (R_G // R_g) \cdot C_{TA}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot (10^6 // 10^4) \cdot 5,72 \cdot 10^{-12}} \approx 2,80 \text{ MHz}$$

$$f_{SUPB} = \frac{1}{2\pi \cdot (r_d // R_D // R_L) \cdot C_{TB}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot (50 \cdot 10^3 \cdot 40 \cdot 10^3 // 2 \cdot 10^3) \cdot 3,97 \cdot 10^{-12}} \approx 21 \text{ MHz}$$

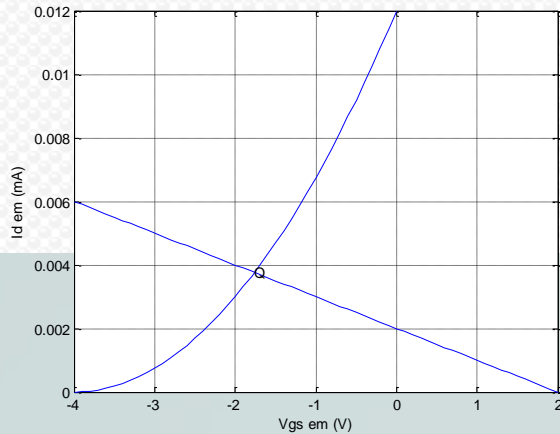
Entre as frequências de corte superior, escolhe-se a menor frequência, ou seja $f_{SUPA} = 2,80 \text{ MHz}$.

Exercício: Para o amplificador de pequeno sinal, divisor de tensão a JFET, pede-se:

- O ponto Q de polarização do circuito.
- A impedância de entrada e de saída.
- O ganho de tensão do circuito.
- A resposta em frequência do circuito inferior e superior.

São dados: $V_{DD} = 12V$, $y_{os} = 10\mu S$, $R_{B1} = 100K\Omega$, $R_{B2} = 20K\Omega$, $R_S = 1K\Omega$, $R_D = 2,0K\Omega$, $C_{C1} = 220nF$, $C_{C2} = 220nF$, $R_g = 1K\Omega$, $C_S = 470\mu F$, sendo $I_{DSS} = 12mA$ e $V_P = -4V$.

Pelo método gráfico, o ponto Q (-1,76V, 3,76mA)



Pelo método algébrico, fica:

$$A = R_S^2 = 10^6, B = 2R_S(V_P - V_{GG} - V_P^2/2R_S \cdot I_{DSS}) \text{ e } C = (V_P - V_{GG})^2.$$

$$I_{Dq} = [-B - \text{SQRT}(B^2 - 4AC)]/2A.$$

$$I_{Dq} = 3,76mA \text{ e } V_{GSq} = V_{GG} - R_S I_{Dq} = -1,76V$$

Os parâmetros calculados são: $f_{inf} = 41Hz$, $A_v = -6$, $f_{sup} = 2,1MHz$.

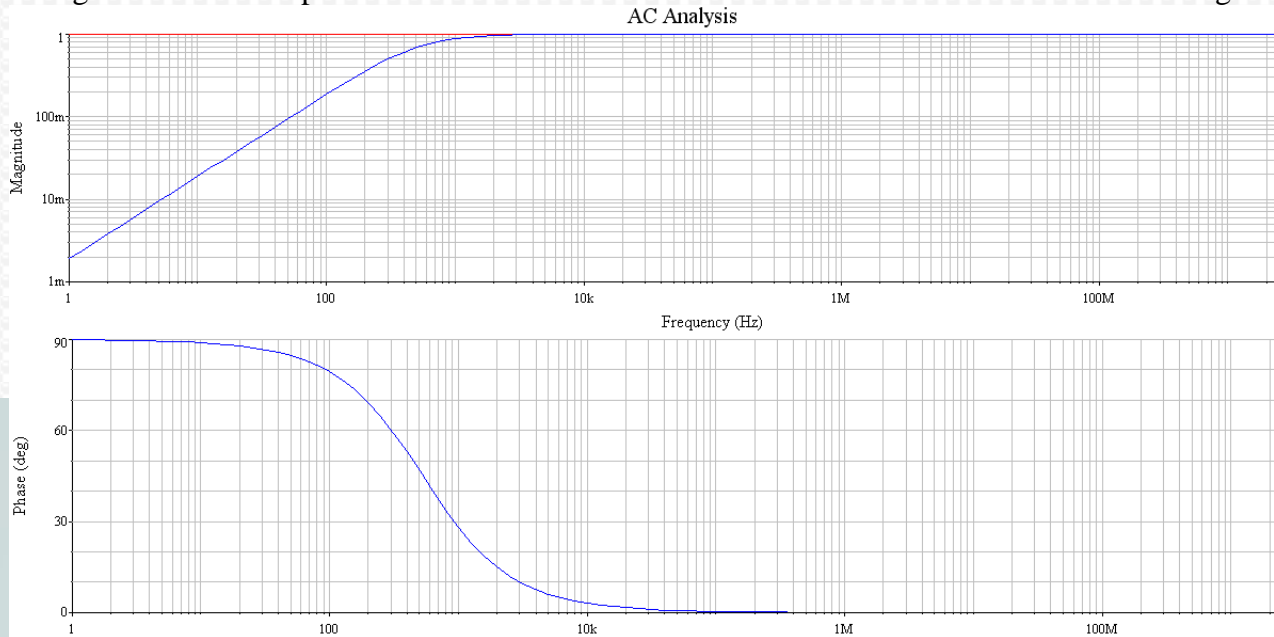
Exercício: Para o circuito a seguir, pede-se:

- A frequência de corte.
- Fazer o levantamento da curva de resposta em frequência da amplitude em Volts.
- Repetir o item b) em decibéis.
- Repetir o item b) com a fase do circuito.



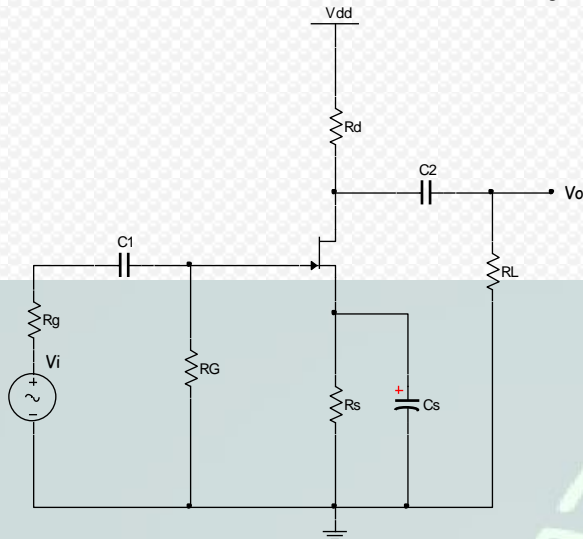
- A frequência de corte inferior é dada por:
 $f = 1 / (2\pi \cdot RC) = 1 / (2 \times 3,14 \times 10^3 \cdot 300 \cdot 10^{-9}) = 530Hz$.
 O ganho será: $V_0 = 1/\sqrt{2} = 0,707V$.

Os gráficos da amplitude em Volts e da fase de saída são mostrados a seguir.



EXERCÍCIOS PROPOSTOS

Os exercícios de 1 a 4 referem-se aos dados e figura a seguir: Dados $V_{dd} = 20V$, $C1 = C2 = 0,47\mu F$, $R_L = 40K$, $R_d = 1K$, $R_G = 1M$, $R_g = 1K$, $C_S = 470\mu F$, $C_{GS} = 2pF$, $C_{GD} = 3pF$ e $C_{DS} = 1pF$.



1.o Exercício: Calcular o ganho do circuito, sabendo-se que $g_m = 3mS$.

- a) $A_v = - 3,01$
- b) $A_v = - 2,92$
- c) $A_v = - 2,88$
- d) $A_v = - 3,00$
- e) $A_v = - 4,01$

Resposta: b

2.o Exercício: O capacitor Miller equivalente conforme modelo alta-frequência será:

- a) $C_T = 13,76pF$
- b) $C_T = 15,54pF$
- c) $C_T = 9,01pF$
- d) $C_T = 5,00pF$
- e) $C_T = 1,00pF$

Resposta: a

3.o Exercício: A frequência de corte superior do circuito:

- a) $f_{SUP} = 11,57MHz$
- b) $f_{SUP} = 12,47MHz$
- c) $f_{SUP} = 10,50MHz$
- d) $f_{SUP} = 3,47MHz$
- e) $f_{SUP} = 1,00MHz$

Resposta: a

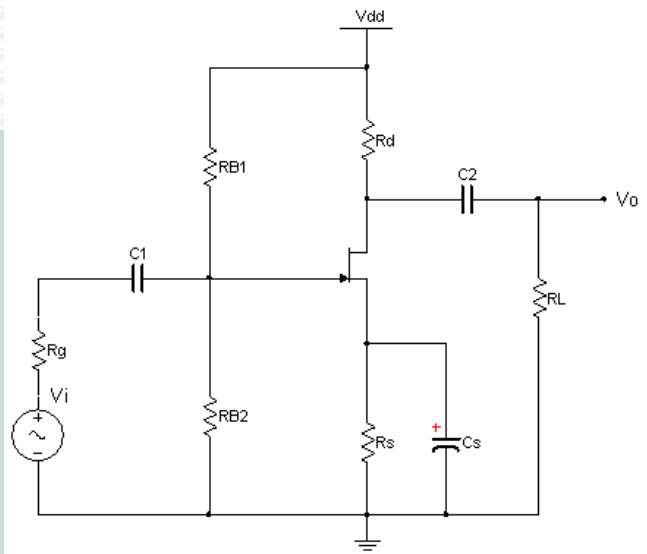
4.o Exercício: Qual das afirmações está correta.

- a) O ganho na frequência de corte superior é unitário

- b. O ganho na frequência de corte superior cai de 20dB
- c) O ganho na frequência de corte cai de 10dB
- d) A frequência de corte superior só depende do filtro RC de entrada
- e) O ganho na frequência de corte superior cai de 3dB

Resposta: e

As questões de 5 a 8 referem-se aos dados e figura a seguir: Dados $V_{DD} = 20V$, $R_{B1} = 20K$, $R_{B2} = 80K$, $C_1 = C_2 = 0,47\mu F$, $R_g = 1K$, $y_{os} = 10\mu S$, $C_s = 100\mu F$, $g_{m0} = 4mS$, $R_L = 40K$ e $R_D = 1K$.



5.0 Exercício: Calcular o ganho do circuito, sabendo-se que $g_m = 3mS$.

- a) $A_V = - 3,01$
- b) $A_V = - 2,75$
- c) $A_V = - 2,88$
- d) $A_V = - 3,00$
- e) $A_V = - 4,01$

Resposta: b

5.0 Exercício: O capacitor equivalente conforme modelo alta-freqüência será: .

- a) $C_T = 13,76pF$
- b) $C_T = 15,54pF$
- c) $C_T = 9,01pF$
- d) $C_T = 5,00pF$
- e) $C_T = 1,00pF$

Resposta: a

6.0 Exercício: A frequência de corte superior do circuito.

- a) $f_{SUP} = 12,29MHz$
- b) $f_{SUP} = 12,13MHz$
- c) $f_{SUP} = 10,40MHz$
- d) $f_{SUP} = 1,50MHz$
- e) $f_{SUP} = 3,53MHz$

Resposta: a



Circuitos Eletrônicos

7.o Exercício: Um amplificador têm $f_{SUP} = 1,0\text{MHz}$ e $f_{INF} = 10\text{KHz}$, podemos afirmar:

- a) A banda passante é igual a 900KHz
- b) A banda passante é igual a 990KHz
- c) A banda passante é igual a 1,01MHz
- d) O ganho na frequência de 1MHz é metade do ganho nas frequências médias.
- e) O ganho cai de 10dB nas frequências de cortes

Resposta: b

8.o Exercício: Qual das afirmações está correta.

- a) O ganho na frequência de corte inferior é unitário
- b) O ganho na frequência de corte inferior cai de 20dB
- c) O ganho na frequência de corte cai de 10dB
- d) A frequência de corte inferior só depende do filtro RC de entrada
- e) O ganho na frequência de corte inferior cai de 3dB

Resposta: e

BIBLIOGRAFIA:

Referência: **Livro Texto: Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos.**

Autores: Robert Boylestad e Louis Nashelsky, editora Pearson, Prentice Hall, 11.a edição, ano 2013.

OUTRAS REFERÊNCIAS

1. Microeletrônica – Sedra, A.S e Smith, K,C – 5.a edição Pearson.
2. Eletrônica Vol.1 – Malvino, A.P – 14.a edição, Editora Makron,
3. Circuitos Elétricos - Nilsson, J. W. / Riedel, S. A. / Marques, A. S., ano de 2008 Prentice Hall Brasil.
4. Circuitos com transistores Bipolares e MOS - Silva, M. M./Calouste, G., ano de 2010.
5. Dispositivos e Circuitos Eletrônicos, V.1 – Bogart, J. - ano de 2000 - Editora MAKRON.
6. Dispositivos e Circuitos Eletrônicos, V.2 – Bogart, J. - ano de 2000 - Editora MAKRON.