

MÓDULO CINCO: RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO AMPLIFICADOR DE PEQUENOS SINAIS A JFET E FREQUÊNCIA DE CORTE INFERIOR.

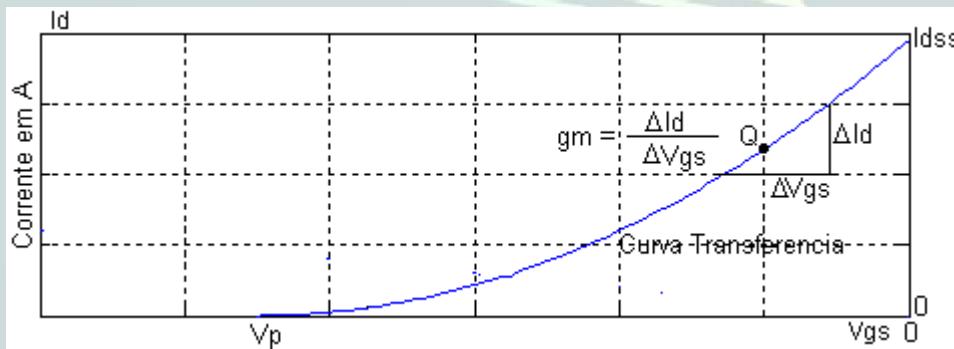
Introdução: O circuito amplificador de sinal a JFET possui ganho alto, uma impedância alta de entrada e ampla faixa de resposta em frequência. São aplicados para amplificar baixíssimos sinais. Diferente do transistor bipolar, a qual controla uma corrente alta de coletor através de baixa potência aplicada 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.

5. Parâmetros: transcondutância, impedância de entrada e saída e ganho do circuito.

5.1 Transcondutância (gm) – O termo transcondutância é utilizado para a condutância (Relação corrente-tensão I / V), e é definida por:

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}}$$

A transcondutância (gm) pode ser determinada graficamente, através da curva de transferência $I_D \times V_{GS}$. É definida para o ponto de operação do circuito como a seguir:



5.2 RELAÇÃO DA TRANSCONDUTÂNCIA gm COM A EQUAÇÃO DE SCHOCLEY

Fazendo a derivada $d(I_D)$ em relação $d(V_{GS})$ da equação de Schocley, chegamos a seguinte relação da transcondutância gm.

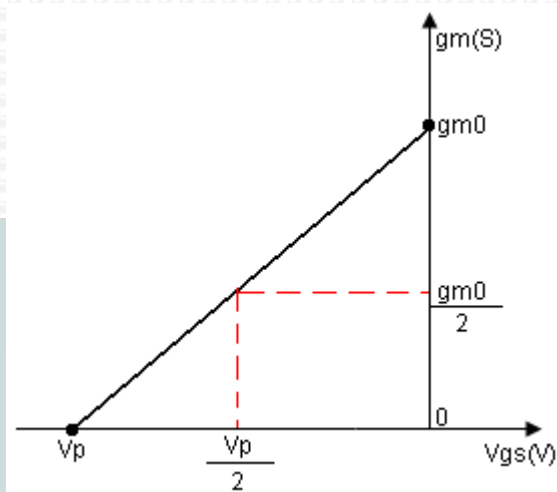
$$g_m = \frac{dI_D}{dV_{GS}} \Big|_Q = \frac{d}{dV_{GS}} \left[I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2 \right], \text{ a relação final de gm será:}$$

$$g_m = \frac{2I_{DSS}}{|V_P|} \left[1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right] \text{ e } g_{m0} = \frac{2I_{DSS}}{|V_P|}, \text{ onde } g_{m0} \text{ é para } V_{GS} = 0.$$

A relação final de gm, pode ser escrita como:

$g_m = g_{m0} \left[1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right]$ e é dada em Siemens (S).

5.3 GRÁFICO DE g_m versus V_{GS} .

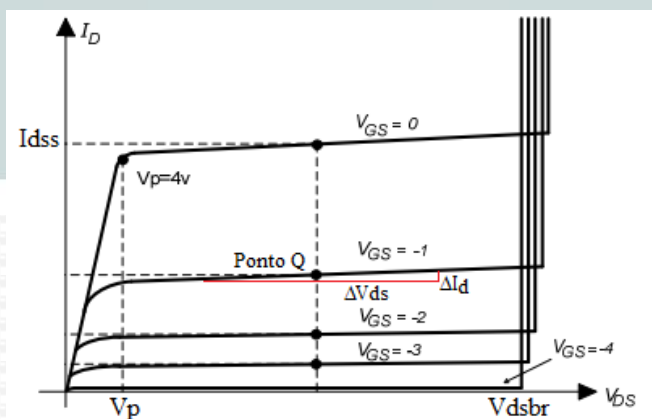


$$g_m = g_{m0} \left[1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right] = g_{m0} \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}}$$

É muito comum encontrar nas folhas de dados o valor de g_m dado por g_{fs} ou y_{fs} , onde y indica que esse parâmetro de um circuito equivalente de admitâncias, f significa transferência direta e s terminal fonte. Então: $g_m = g_{fs} = y_{fs}$

5.4 IMPEDÂNCIA DE ENTRADA E SAÍDA

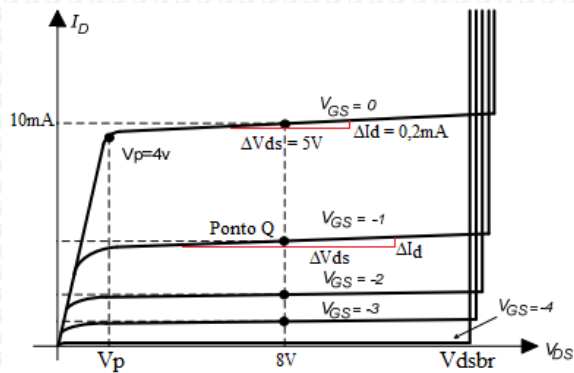
A impedância do FET é extremamente alta da ordem de $10^9 \Omega$ e a impedância de saída vale: $Z_i = \infty \Omega$ e a impedância de saída é igual a g_{os} onde $Z_0 = 1/g_{os}$ e $g_{os} = y_{os}$ e varia de 10 a $50 \mu S$. A impedância de saída é definida nas curvas características da figura a seguir de um JFET canal P. A inclinação da curva característica horizontal no ponto de operação. Notar que quanto mais horizontal for a inclinação da curva, maior a impedância de saída.



Uma aproximação para r_d pode ser escrita como:

$$r_d = \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_D} \Big|_{V_{GS} = \text{cte}}$$

Exemplo: Determine a impedância de saída para o JFET da figura a seguir com $V_{GS} = -2V$ e $V_{DS} = 8V$.



Para o ponto $V_{GS} = 0V$ e $V_{DS} = 8V$ traçar uma reta tangente e $\Delta V_{DS} = 5V$ e $\Delta I_D = 0,2mA$. Como:

$$r_d = \left. \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_D} \right|_{V_{GS}=\text{cte}}$$

$$r_d = \frac{5V}{0,2mA} = 25K\Omega$$

Para o ponto $V_{GS} = -1V$ e $V_{DS} = 8V$ traçar uma reta tangente e $\Delta V_{DS} = 8V$ e $\Delta I_D = 0,1mA$. Então:

$$r_d = \left. \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_D} \right|_{V_{GS}=\text{cte}} \quad r_d = \frac{8V}{0,1mA} = 80K\Omega$$

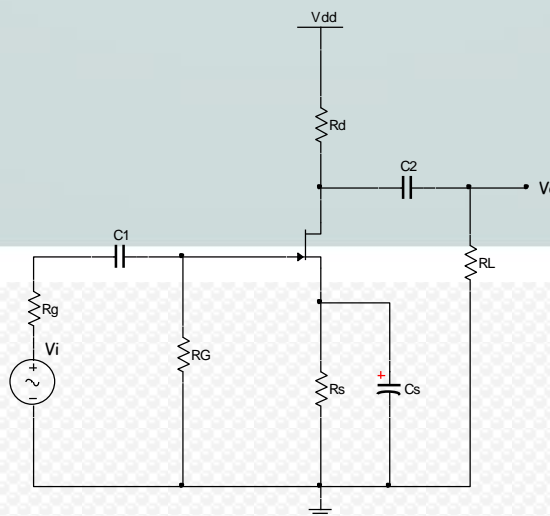
5.5 MODELO EQUIVALENTE CA PARA O CIRCUITO A JFET.

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

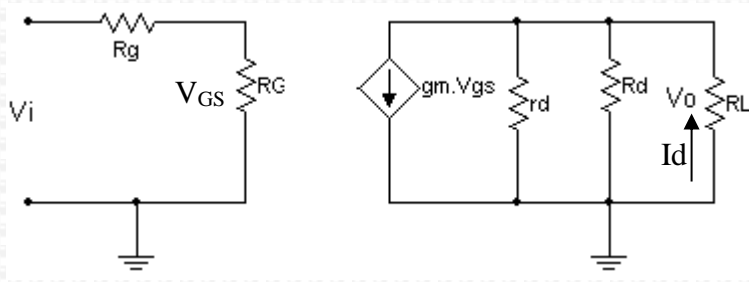
CONSIDERAÇÕES: Considerar para análise em baixa frequência as seguintes condições:

1. A fonte CC é um curto para sinal.
2. O capacitor no terminal fonte em paralelo com R_S um curto para sinal.

O circuito RC formado por R_g , R_G e C_1 e R_D , R_L e C_2 se comportam como um circuito passa alta e pode-se determinar a frequência de corte dos filtros. O circuito a seguir:



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 .



DETERMINAÇÃO DO GANHO A_V .

Para a entrada, temos: $V_{GS} = V_i R_G / (R_g + R_G)$ e $R_G \gg R_g \Rightarrow V_{GS} = V_i$.

Para a saída $V_0 = -I_D (R_L // R_D // r_d)$ e simplificando a expressão, temos: $V_0 = -I_D (R_L // R_D)$.

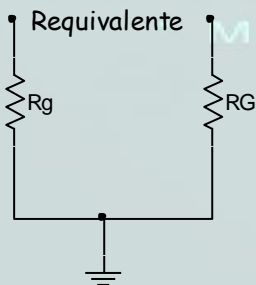
Como $I_D = g_m V_{GS} \Rightarrow V_0 = -g_m V_{GS} (R_L // R_D) \Rightarrow A_V = V_0 / V_i = -g_m (R_L // R_D)$.

Para a determinação da frequência de corte, temos:

$$f_{C_{1,2}} = \frac{1}{2\pi R_{\text{equiv.1,2}} C_{1,2}}$$

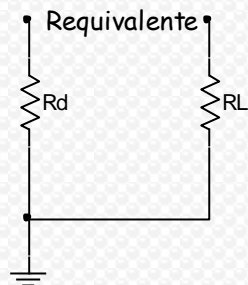
DETERMINAÇÃO DOS RESISTORES EQÜIVALENTES.

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_{C1} será dada por:



$$f_{C1} = \frac{1}{2\pi (R_g + R_G) C_1}$$

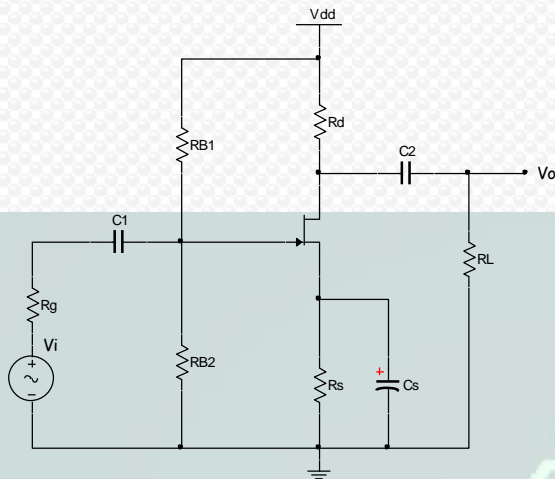
2. Saída - O resistor equivalente da saída é calculado pela resistência equivalente vista por C_2 . O $R_{\text{equivalente,2}} = (R_D + R_L)$. A frequência de corte f_{C2} será dada por:



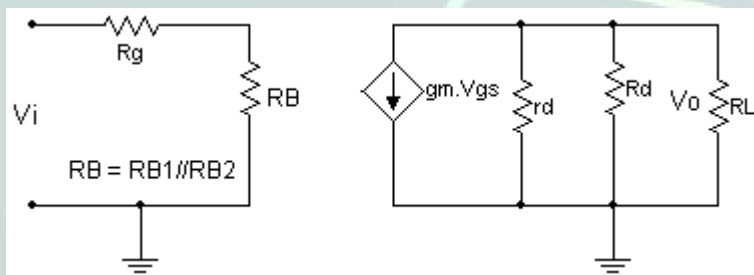
$$f_{C2} = \frac{1}{2\pi (R_D + R_L) C_2}$$

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

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 .



$Z_{in} = R_B = (R_{B1} // R_{B2})$ e $Z_O = R_D // r_d$ e uma aproximação quando $(r_d \geq 10R_D)$:
 $Z_O \cong R_D$.

DETERMINAÇÃO DO GANHO A_v .

Do modelo a entrada, temos: $V_{GS} = V_i R_B / (R_g + R_B)$.

Do modelo a saída $V_0 = -I_D (R_L // R_D // r_d)$ e simplificando a expressão, temos: $V_0 = -I_D (r_d // R_L // R_D)$.

Como $I_D = g_m V_{GS} \Rightarrow V_0 = -g_m V_{GS} (r_d // R_L // R_D) = -g_m V_i R_B / (R_g + R_B) (r_d // R_L // R_D)$ e o ganho $A_v = V_0 / V_i$,

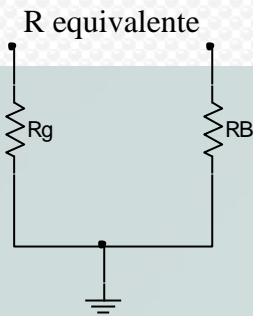
$$A_v = -g_m \frac{R_B}{R_g + R_B} (R_D // r_d // R_L) \cong -g_m \frac{R_B}{R_g + R_B} [R_D // R_L]$$

Para a determinação da frequência de corte, temos:

$$f_{C_{1,2}} = \frac{1}{2\pi R_{\text{equiv.1,2}} C_{1,2}}$$

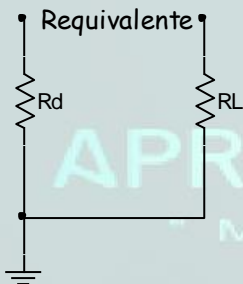
DETERMINAÇÃO DOS RESISTORES EQUÍVALENTES.

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



$$f_{C1} = \frac{1}{2\pi(R_g + R_B)C_1}$$

2. Saída - O resistor equivalente da saída é calculado pela resistência equivalente vista por C_2 . O $R_{\text{equivalente,2}} = (R_D + R_L)$. A frequência de corte f_{C2} será dada por:



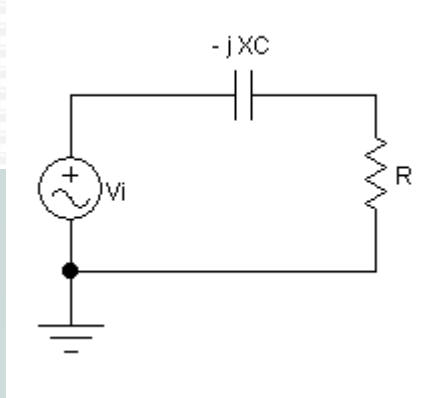
$$f_{C2} = \frac{1}{2\pi(R_D + R_L)C_2}$$

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

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

a) Frequência de corte inferior.

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



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

$$f = \frac{1}{2\pi RC}, \text{ Na frequência de corte } f = f_1, \text{ então } f_1 = \frac{1}{2\pi RC}$$

A função de transferência do circuito será:

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{R}{R - jX_C} = \frac{1}{1 - jX_C/R}$$

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

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{R}{R - jX_C} = \frac{1}{1 - j1/f 2\pi RC} = \frac{1}{1 - j f_1 / f}$$

Quando $f_1 = f$, então:

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{\sqrt{1^2 + 1^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$

Calculando em dB, temos:

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

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

Chamando-se de $A_v = \frac{V_o}{V_i}$, temos:

$$20 \log \frac{1}{\sqrt{1^2 + (f_1/f)^2}} = 20 \log [(1^2 + (f_1/f)^2)^{-1/2}] = -10 \log (1^2 + (f_1/f)^2)$$

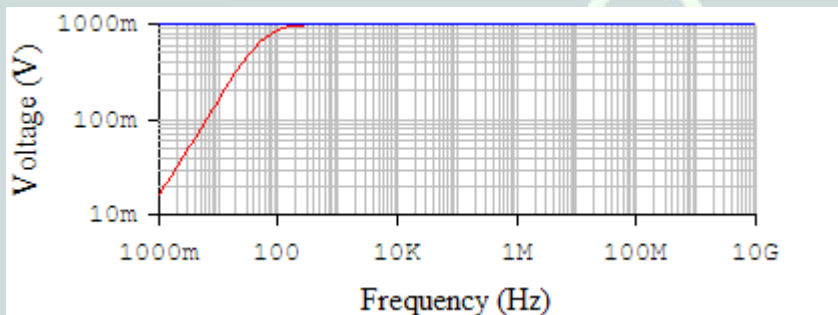
$A_v = -10 \log [1 + (f_1/f)^2]$, daí: Para f igual a:

a) $0,1f_1$ temos: $A_v = -10 \log [1 + 100] = -20\text{dB}$.

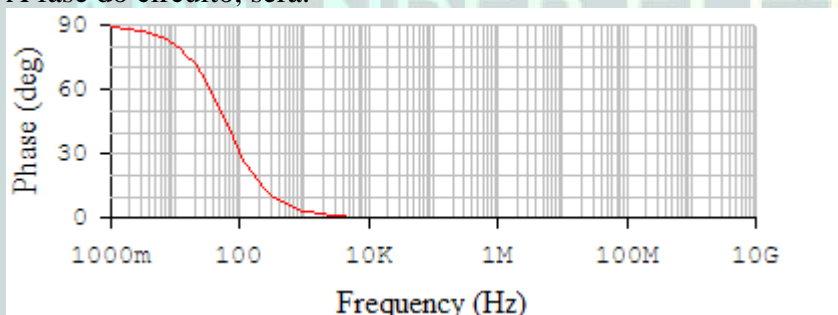
b) f_1 temos: $A_v = -10 \log [1 + 1] = -3\text{dB}$.

c) $10f_1$ temos: $A_v = -10 \log [1 + 0,01] = 0\text{dB}$

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

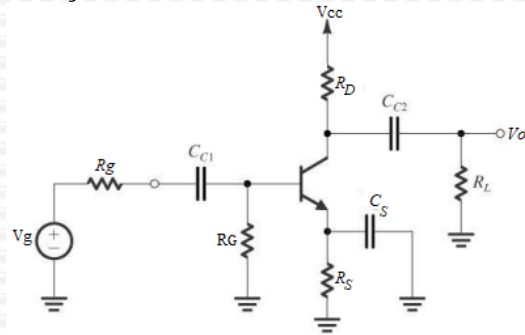


A fase do circuito, será:



EXERCÍCIO: Determinar a resposta em frequência do amplificador de pequeno sinal a JFET auto polarização e a impedância de entrada e de saída, sabendo-se que: $V_{DD} = 15\text{V}$, $I_{DSS} = 12\text{mA}$, $C_{C1} = 0,02\mu\text{F}$, $C_{C2} = 0,02\mu\text{F}$, $y_{os} = 20\mu\text{S}$, $R_G = 1\text{M}$, $R_g = 10\text{K}\Omega$, $V_P = -4\text{V}$, $R_S = 1\text{K}$, $R_D = 2\text{K}$ e $R_L = 40\text{K}$, e $C_S = 100\mu\text{F}$. Repetir o problema sem C_S .

Solução:



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

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

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

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

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

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 em frequência).

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

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

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

c) Impedância de entrada

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

d) Impedância de saída

$$r_d = 1/20\mu\text{S} = 50\text{K}\Omega.$$

$$Z_0 = R_D // r_d = 2\text{K}\Omega, (r_d \geq 10R_D)$$

e) Sem o capacitor C_S .

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

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

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

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

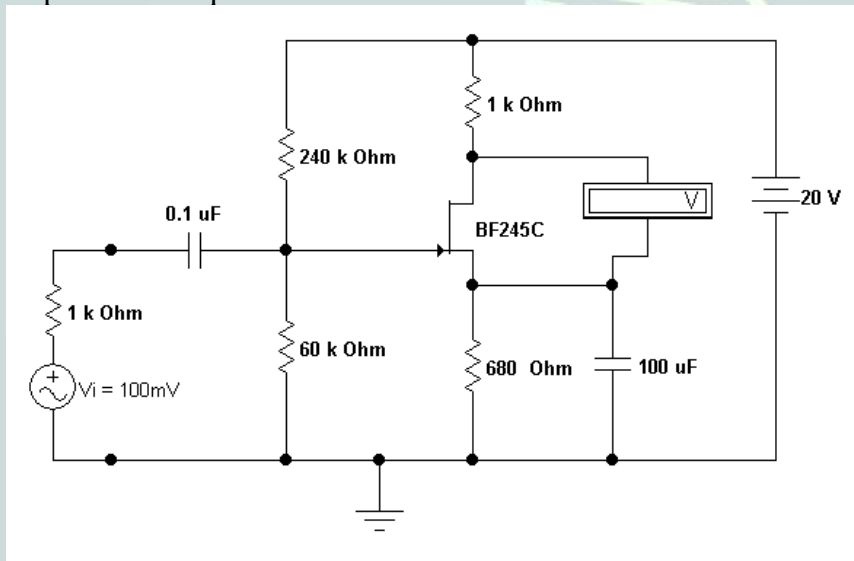
g) Impedância de entrada

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

h) Impedância de saída

$$Z_O = R_D = 2K\Omega, (r_d \geq 10R_D)$$

EXERCÍCIO: Para o amplificador FET com a polarização por divisor de tensão, determinar a resposta em frequência.



Método 1 : Gráfico

1) Calcule a tensão de porta em relação à terra.

$$V_{GG} = 20 \cdot \frac{60K}{300K} = 4V.$$

Da equação da corrente, temos:

$I_D = I_{DSS} \cdot (1 - V_{GS} / V_P)$, onde I_{DSS} , V_{GS} , são dados do transistor.

Podemos traçar a curva de transferência, adotando valores para V_{GS} e calculando valores da corrente I_D . Por exemplo, para $V_{GS} = \{0, -1, -2, -4\}$; os valores de I_D , podem ser calculados.

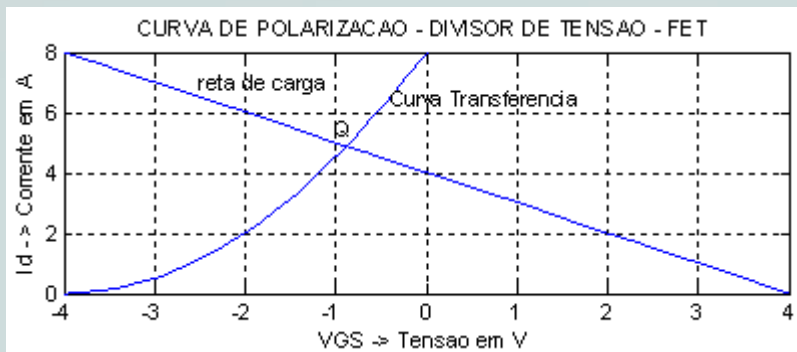
Com os valores de I_D e V_{GS} , pode-se traçar a curva de transferência, porém para retirar o ponto de trabalho, ou ponto quiescente Q, deve-se traçar a reta de carga. A equação da reta de carga é:

$$V_{GG} = V_{GS} + R_S I_D.$$

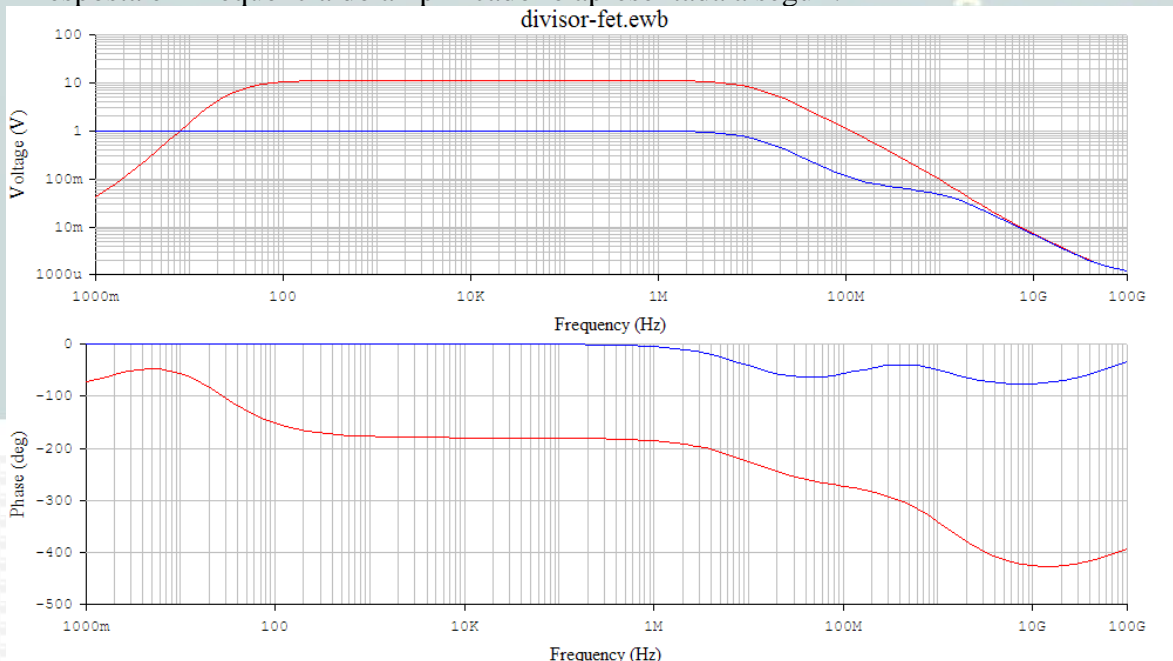
Novamente para traçar a reta de carga precisamos de 02 pontos, o primeiro fazendo $V_{GS} = 0$ e calculando $I_D = V_{GG} / R_S$ e o segundo fazendo $I_D = 0$ e calculando $V_{GS} = V_{GG}$.

O ponto de encontro entre estas 02 curvas define o ponto de trabalho do circuito. Do ponto Q pode-se prolongar uma reta paralela ao eixo V_{GS} e onde existe o encontro da paralela com o eixo define a corrente I_{DQ} e repetindo o processo para o eixo da corrente I_D , define-se a tensão V_{GSQ} .

A polarização do amplificador divisor de tensão é mostrada a seguir.



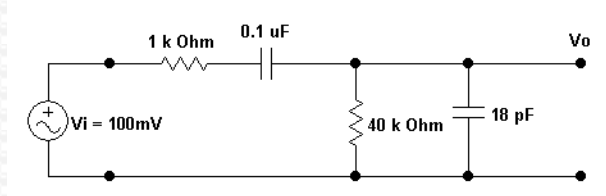
A resposta em frequência do amplificador é apresentada a seguir.



Cálculo da frequência de corte inferior.

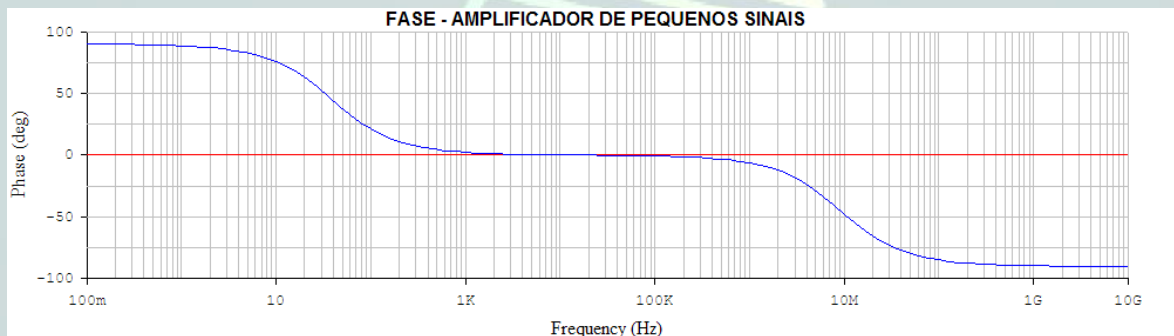
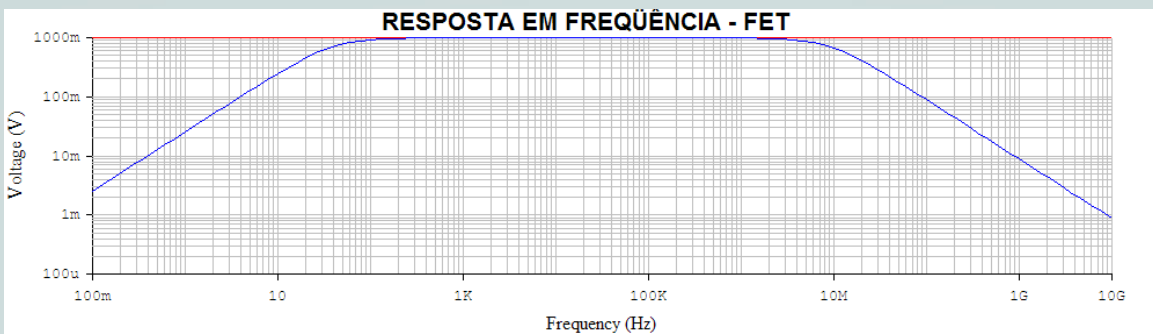
$$f_1 = \frac{1}{2 \times \pi(R_g + R_B)} = \frac{1}{2 \times 3,14(1K + 48K)} = 32,5\text{Hz}.$$

Um modelo exemplo, para análise em AC é apresentado a seguir e a sua resposta em frequência e fase.



$$F_{\text{corte}} = 39\text{Hz.}$$

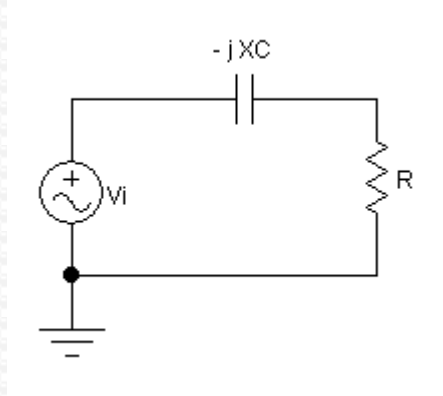
A resposta deste circuito em frequência e fase é apresentada a seguir.



A resposta em frequência do circuito pode ser calculada de acordo com os seguintes circuitos.

a) Frequência de corte inferior.

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



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

$$f = \frac{1}{2\pi RC}, \text{ Na frequência de corte } f = f_1, \text{ então } f_1 = \frac{1}{2\pi RC}$$

A função de transferência do circuito será:

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{R}{R - jX_C} = \frac{1}{1 - jX_C/R}$$

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

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{R}{R - jX_C} = \frac{1}{1 - j1/f \cdot 2\pi RC} = \frac{1}{1 - j f_1/f}$$

Quando $f_1 = f$, então:

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{\sqrt{1^2 + 1^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$

Calculando em dB, temos:

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

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

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

$$20 \log \frac{1}{\sqrt{1^2 + (f_1/f)^2}} = 20 \log [(1^2 + (f_1/f)^2)^{-1/2}] = -10 \log [1^2 + (f_1/f)^2]$$

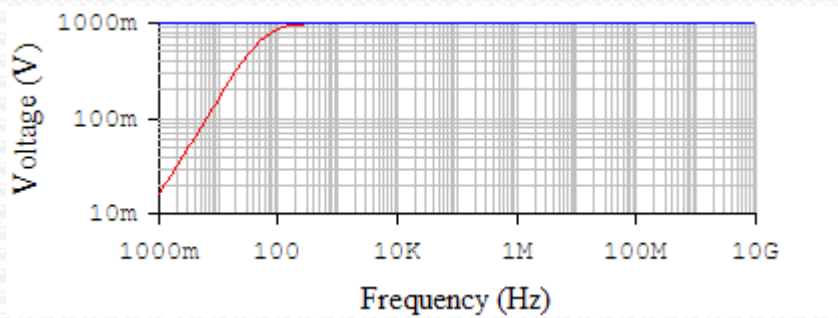
$A_V = -10 \log [1 + (f_1/f)^2]$, daí: Para f igual a:

a) $0,1f_1$ temos: $A_V = -10 \log [1 + 100] = -20 \text{ dB}$.

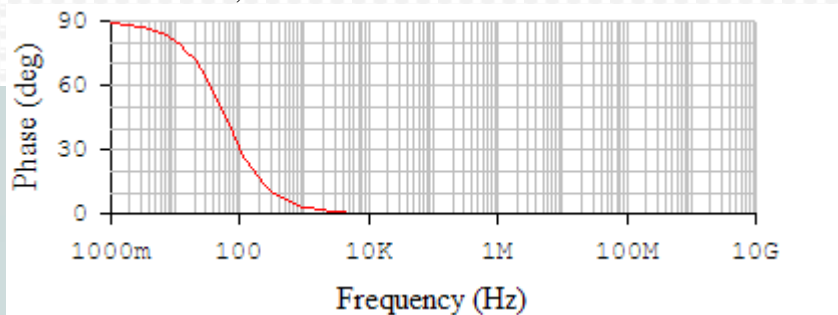
b) f_1 temos: $A_V = -10 \log [1 + 1] = -3 \text{ dB}$.

c) $10f_1$ temos: $A_V = -10 \log [1 + 0,01] = 0 \text{ dB}$

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

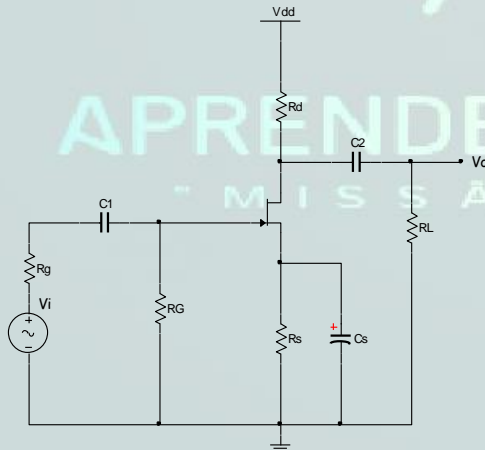


A fase do circuito, será:



EXERCÍCIOS PROPOSTOS

As questões de 1 a 4 referem-se ao circuito e aos dados a seguir: Dados $V_{DD} = 20V$, $R_G = 1M\Omega$, $C_1 = C_2 = 0,47\mu F$, $R_g = 10K$, $C_S = 100\mu F$, $g_{m0} = 4mS$, $R_L = 40K$ e $R_D = 1K$.



1.o Exercício: As impedâncias de entrada e de saída serão respectivamente.

- a) $Z_{IN} = 1M\Omega$ e $Z_{OUT} = 1K\Omega$.
- b) $Z_{IN} = 1M\Omega$ e $Z_{OUT} = 40K\Omega$.
- c) $Z_{IN} = 10K\Omega$ e $Z_{OUT} = 1K\Omega$.
- d) $Z_{IN} = 10K\Omega$ e $Z_{OUT} = 40K\Omega$.
- e) $Z_{IN} = 1M\Omega//10K\Omega$ e $Z_{OUT} = 1K\Omega//40K\Omega$.

Resposta: a

2.o Exercício: A frequência de corte inferior do circuito.

- a) $f_{INF} = 8,26\text{Hz}$
- b) $f_{INF} = 9,23\text{Hz}$
- c) $f_{INF} = 7,45\text{Hz}$
- d) $f_{INF} = 8,5\text{Hz}$
- e) $f_{INF} = 7,95\text{Hz}$

Resposta: a

3.o Exercício: Calcular o ganho do circuito, sabendo-se que $g_m = 3\text{mS}$.

- a) $A_V = - 4,01$
- b) $A_V = - 2,92$
- c) $A_V = - 3,15$
- d) $A_V = - 3,32$
- e) $A_V = - 2,57$

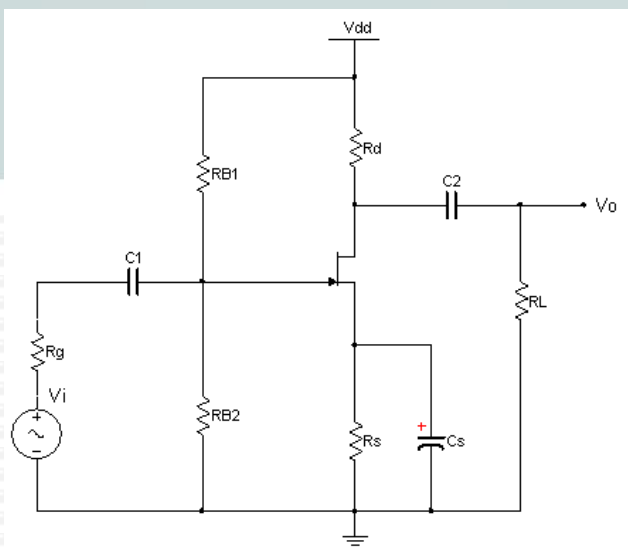
Resposta: b

4.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

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





Circuitos Eletrônicos

5.o Exercício: As impedâncias de entrada e de saída serão respectivamente.

- a) $Z_{IN} = 20K//80K$ e $Z_{OUT} = 1K\Omega$.
- b) $Z_{IN} = 20K$ e $Z_{OUT} = 40K\Omega$.
- c) $Z_{IN} = 20K\Omega$ e $Z_{OUT} = 1K\Omega$.
- d) $Z_{IN} = 20K//40K$ e $Z_{OUT} = 40K\Omega$.
- e) $Z_{IN} = 20K//80K\Omega$ e $Z_{OUT} = 1K\Omega//40K\Omega$.

Resposta: a

6.o Exercício: A frequência de corte inferior do circuito.

- a) $f_{INF} = 13,03Hz$
- b) $f_{INF} = 9,73Hz$
- c) $f_{INF} = 8,45Hz$
- d) $f_{INF} = 11,50Hz$
- e) $f_{INF} = 12,95Hz$

Resposta: a

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

- a) $A_v = - 3,15$
- b) $A_v = - 2,92$
- c) $A_v = - 2,24$
- d) $A_v = - 1,13$
- e) $A_v = - 1,27$

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