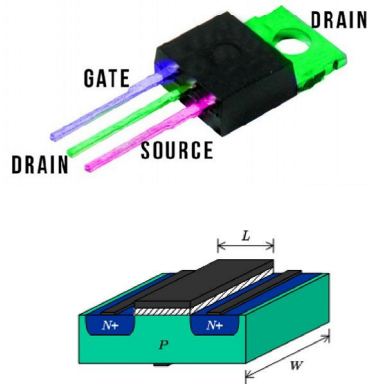


O MOSFET como Amplificador

Professor:

Dr. Jorge L. Aching Samatelo
jlasm001@gmail.com



Índice

- ☐ Polarização CC do MOSFET
- ☐ Circuitos de Polarização CC do MOSFET
- ☐ Projeto do Circuito de Polarização
- ☐ Operação em Pequeno Sinal
- ☒ Caracterização de Amplificadores baseados em MOSFET
- ☒ Bibliografia

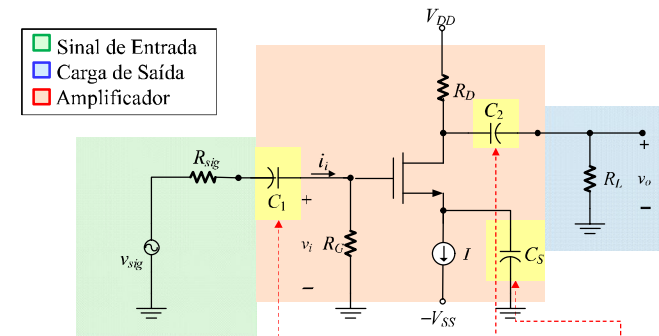
4

Caracterização de Amplificadores baseados em MOSFET

5

O Amplificador Fonte Comum (FC)

- ☐ Configuração mais amplamente empregada.



Capacitores de acoplamento:

- ☐ Acoplam o sinal de entrada ao amplificador (C_1) e o de saída à carga (C_2), ambos sinais CA, sem interferir na polarização (CC) do MOSFET.
- ☐ Geralmente C_1 e C_2 tem valores próximos entre si, sendo ambos menores do que C_S .

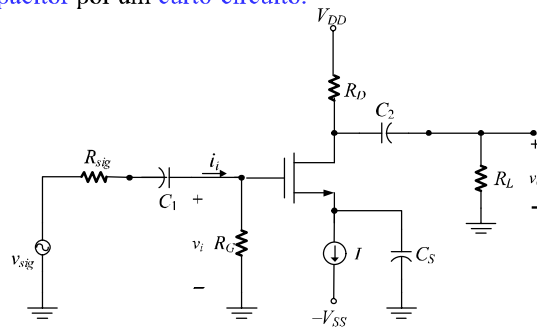
Capacitor de *bypass* (capacitor de desvio):

- ☐ Estabelece um terra no emissor para o sinal CA, sem interferir na polarização (CC) do MOSFET.
- ☐ Geralmente C_S é da ordem de alguns μF ou algumas dezenas de μF (dependo da frequência do sinal).

O Amplificador Fonte Comum (FC)

Análise para pequeno sinal

- ❑ **Análise em CA:** Elimine as fontes CC substituindo
- Cada fonte CC de tensão por um curto-circuito.
 - Cada fonte CC de corrente por um circuito aberto.
 - Cada capacitor por um curto-circuito.

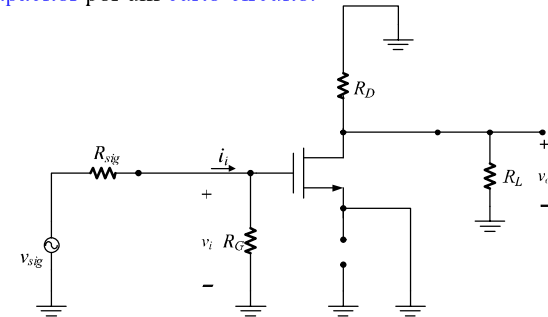


7

O Amplificador Fonte Comum (FC)

Análise para pequeno sinal

- ❑ **Análise em CA:** Elimine as fontes CC substituindo
- Cada fonte CC de tensão por um curto-circuito.
 - Cada fonte CC de corrente por um circuito aberto.
 - Cada capacitor por um curto-circuito.

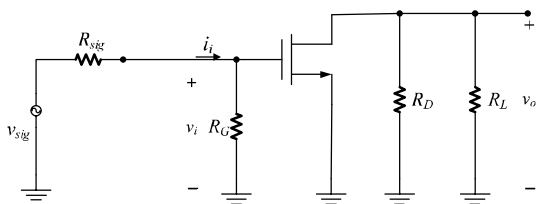


8

O Amplificador Fonte Comum (FC)

Análise para pequeno sinal

- ❑ **Análise em CA:** Redesenhando o circuito.

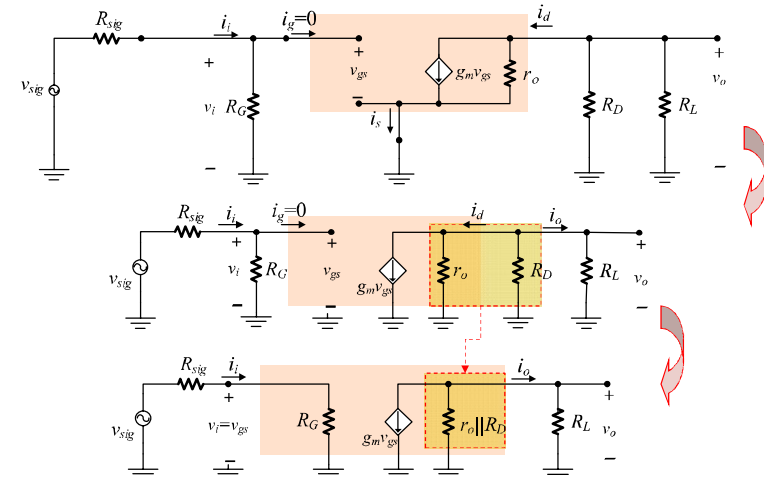


9

O Amplificador Fonte Comum (FC)

Análise para pequeno sinal

- ❑ **Substituindo o MOSFET por um Modelo de Pequenos Sinais:** Como não há um resistor no emissor, o modelo mais conveniente é o π -híbrido.

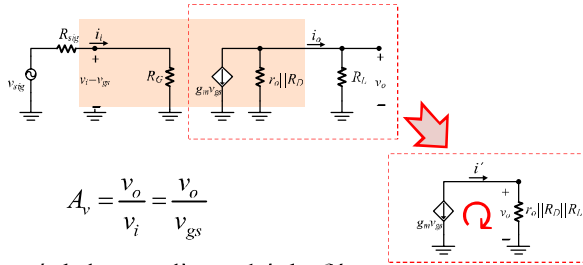


10

O Amplificador Fonte Comum (FC)

Análise para pequeno sinal

Grandezas próprias do amplificador



□ Ganho de tensão A_v :

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_o}{v_{gs}}$$

□ A relação entre v_o e v_{gs} será dada ao aplicar a lei de Ohm no circuito de saída:

$$v_o = (r_o \parallel R_D \parallel R_L) i' = (r_o \parallel R_D \parallel R_L) (-g_m v_{gs}) = -(r_o \parallel R_D \parallel R_L) g_m v_{gs}$$

□ Por tanto:

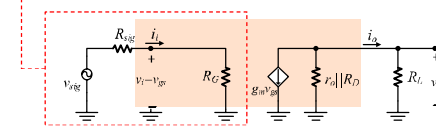
$$A_v = \frac{v_o}{v_{gs}} = \frac{-(r_o \parallel R_D \parallel R_L) g_m v_{gs}}{v_{gs}} = -(r_o \parallel R_D \parallel R_L) g_m$$

11

O Amplificador Fonte Comum (FC)

Análise para pequeno sinal

Grandezas próprias do amplificador

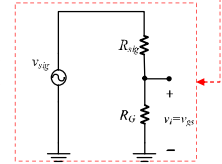


□ Ganho global de tensão G_v :

$$G_v = \frac{v_o}{v_{sig}} = \frac{v_o}{v_{sig}} \frac{v_i}{v_i} = \left(\frac{v_o}{v_i} \right) \left(\frac{v_i}{v_{sig}} \right) = A_v \left(\frac{v_i}{v_{sig}} \right)$$

□ A relação entre v_i e v_{sig} será obtida pelo divisor de tensão presente no circuito de entrada, ou seja:

$$v_i = \left(\frac{R_G}{R_{sig} + R_G} \right) v_{sig}$$



□ Então:

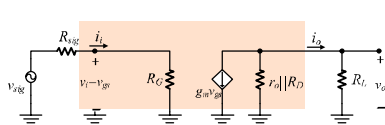
$$G_v = A_v \left(\frac{v_i}{v_{sig}} \right) = -g_m (r_o \parallel R_D \parallel R_L) \left(\frac{R_G}{R_{sig} + R_G} \right)$$

12

O Amplificador Fonte Comum (FC)

Análise para pequeno sinal

Grandezas próprias do amplificador



□ Resistência de entrada R_{in} :

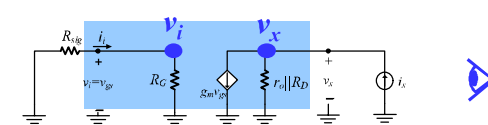
$$R_{in} = \frac{v_i}{i_i} = \frac{R_G i_i}{i_i} = R_G$$

13

O Amplificador Fonte Comum (FC)

Análise para pequeno sinal

Grandezas observadas a partir da saída



□ Resistência de saída R_{out} :

$$R_{out} = \frac{v_x}{i_x} \Big|_{v_{sig}=0}$$

□ Aplicando o **análise nodal**:

➤ Nó de tensão v_i :

$$\frac{v_i}{R_{sig}} + \frac{v_i}{R_G} = 0 \Rightarrow v_i = v_{gs} = 0 \quad (1)$$

➤ Nó de tensão v_x :

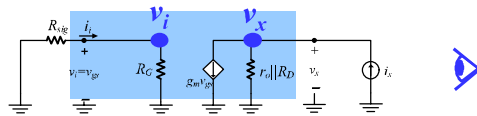
$$i_x = g_m v_{gs} + \frac{v_x}{r_o \parallel R_D} \Rightarrow i_x = \underbrace{g_m v_{gs}}_{=0} + \frac{v_x}{r_o \parallel R_D} \Rightarrow i_x = \frac{v_x}{r_o \parallel R_D} \quad (2)$$

14

O Amplificador Fonte Comum (FC)

Análise para pequeno sinal

Grandezas observadas a partir da saída



Resistência de saída R_{out} :

$$R_{out} = \left. \frac{v_x}{i_x} \right|_{v_{sig}=0}$$

Substituindo a Equação (2) na definição da resistência de saída, obtemos:

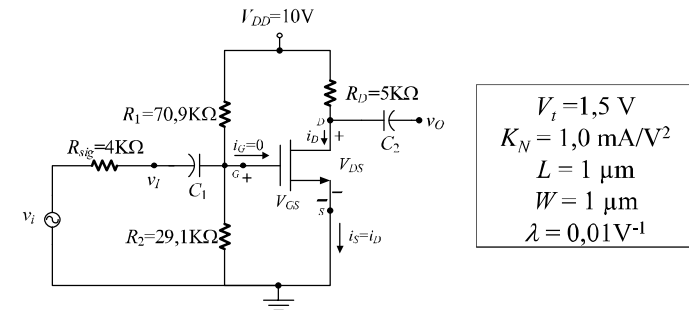
$$R_{out} = \left. \frac{v_x}{i_x} \right|_{v_{sig}=0} = \left. \frac{(r_o \parallel R_D) i_x}{i_x} \right|_{v_{sig}=0} = r_o \parallel R_D$$

15

O Amplificador Fonte Comum (FC)

Exemplo:

Analisar o amplificador com MOSFET mostrado na seguinte figura, determinar seu ganho de tensão A_v , R_{in} , R_{out} .

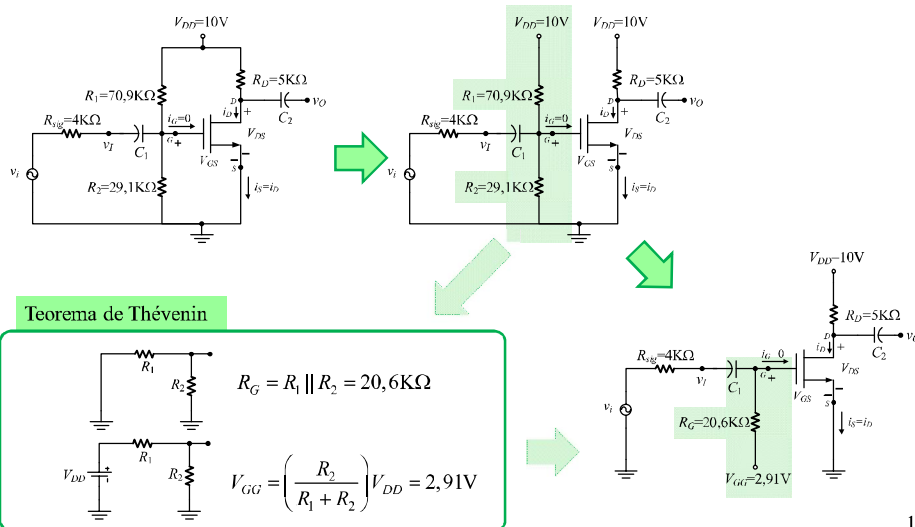


16

O Amplificador Fonte Comum (FC)

Solução:

Redesenhando o circuito.



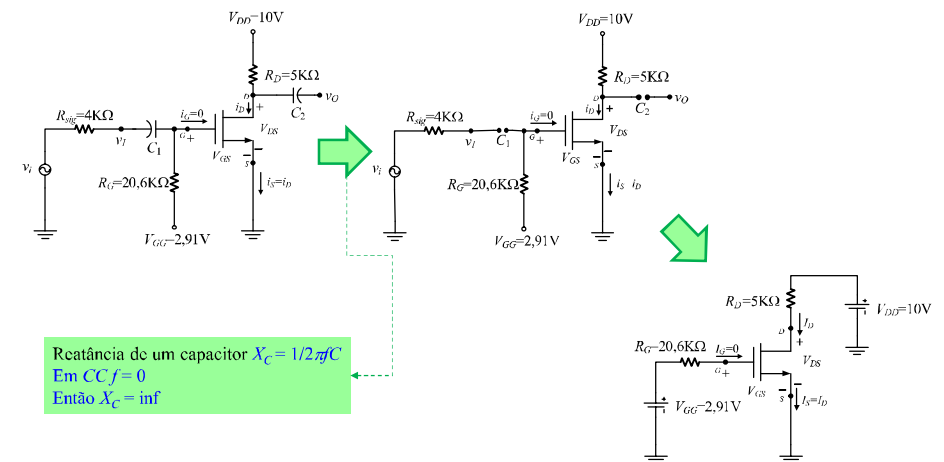
17

O Amplificador Fonte Comum (FC)

Solução:

PASO 1 (Análise em CC): determinar o **ponto Q** do MOSFET.

➤ Cada capacitor por um **circuito aberto**.

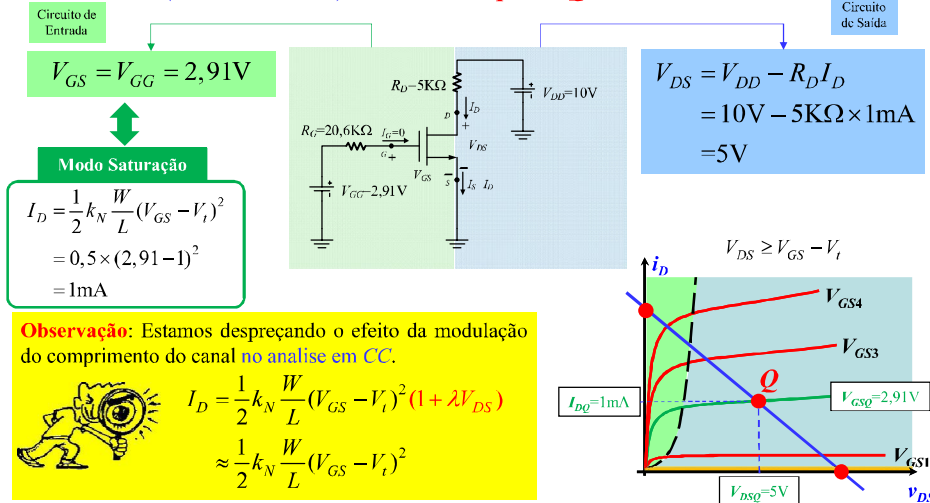


18

O Amplificador Fonte Comum (FC)

Solução:

❑ **PASO 1 (Análise em CC):** determinar o **ponto Q** do MOSFET.

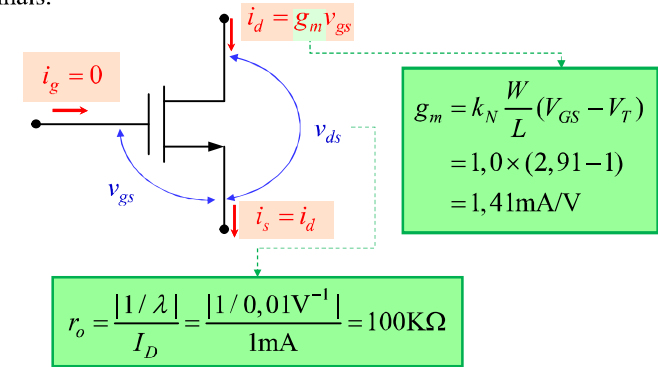


19

O Amplificador Fonte Comum (FC)

Solução:

❑ **PASO 2 (Análise em CA):** Calcule os valores dos parâmetros do modelo para pequenos sinais.



Observação: Usando no modelo o valor de r_o , estamos incluindo **na análise em CA** o efeito da modulação do comprimento do canal.

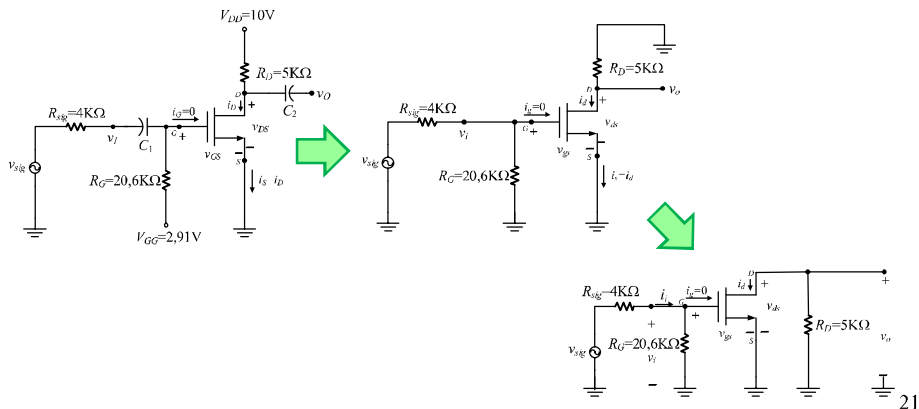
20

O Amplificador Fonte Comum (FC)

Solução:

❑ **PASO 2 (Análise em CA):** Calcule os valores dos parâmetros do modelo para pequenos sinais.

- Cada **fonte CC de tensão** por um **curto-circuito**.
- Cada **fonte CC de corrente** por um **circuito aberto**.
- Cada **capacitor** por um **curto-circuito**.

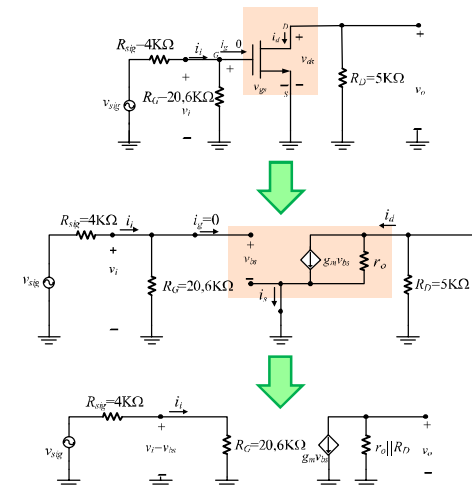


21

O Amplificador Fonte Comum (FC)

Solução:

❑ **PASO 3 e 4 (Análise em CA):** Substitua o MOSFET por um de seus modelos equivalentes.

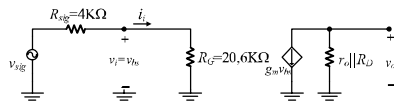


22

O Amplificador Fonte Comum (FC)

Solução:

❑ **PASO 5 (Análise em CA):** Determinamos as grandezas de interesse.



➤ Ganho de tensão A_v :

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -(r_o \parallel R_D) g_m = -6,7143$$

➤ Ganho global de tensão G_v :

$$G_v = \frac{v_o}{v_{sig}} = -g_m (r_o \parallel R_D) \left(\frac{R_G}{R_{sig} + R_G} \right) = -5,62$$

➤ Resistencia de entrada R_{in} :

$$R_{in} = \frac{v_i}{i_i} = R_G = 20,6K\Omega$$

➤ Resistencia de saída R_{out} :

$$R_{out} = \frac{v_x}{i_x} \Big|_{v_{sig}=0} = r_o \parallel R_D = 4,79K\Omega$$

23

Características do Amplificador FC com uma resistência em paralelo

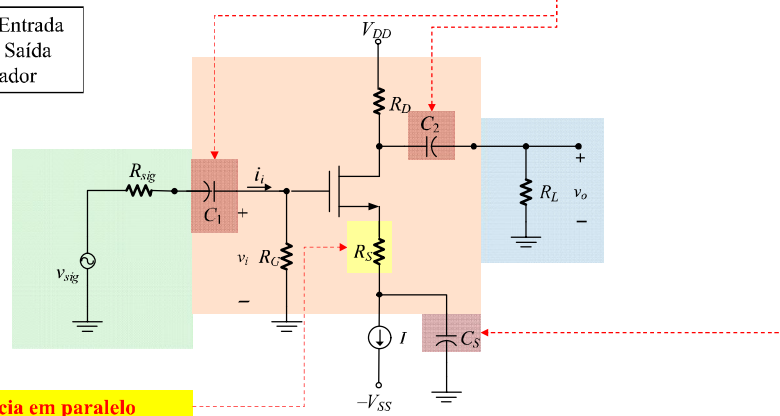
24

O amplificador FC com uma resistência em paralelo

❑ Neste caso a configuração será:

Capacitores de acoplamento e de desvio.

- Sinal de Entrada
- Carga de Saída
- Amplificador



Resistencia em paralelo

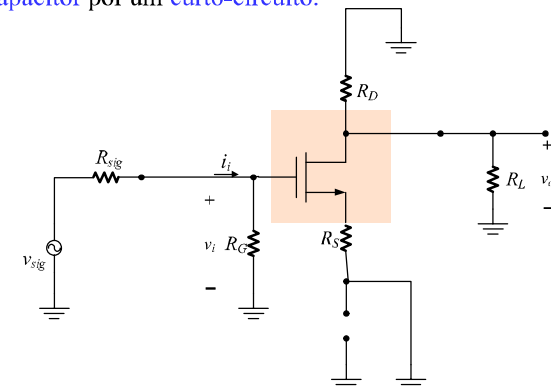
25

O amplificador FC com uma resistência em paralelo

Análise para pequeno sinal

❑ **Análise em AC:** Elimine as fontes CC substituindo

- Cada fonte CC de tensão por um curto-circuito.
- Cada fonte CC de corrente por um circuito aberto.
- Cada capacitor por um curto-circuito.

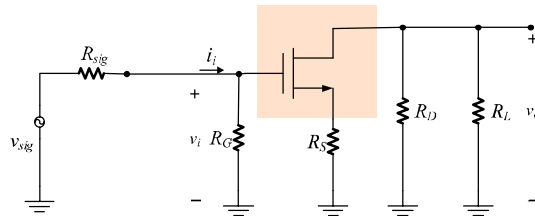


26

O amplificador FC com uma resistência em paralelo

Análise para pequeno sinal

❑ **Análise em AC:** Redesenhando o circuito.

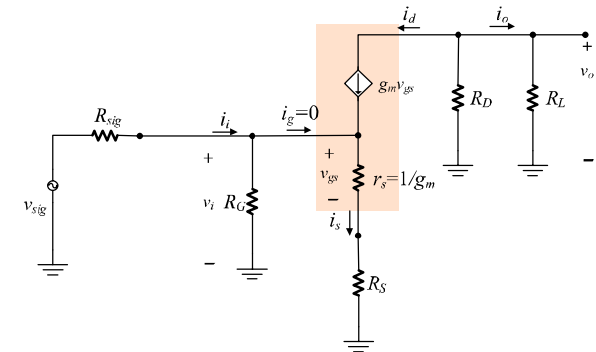


27

O amplificador FC com uma resistência em paralelo

Análise para pequeno sinal

❑ **Substituindo o MOSFET por um Modelo de Pequenos Sinais:** o modelo mais conveniente é o modelo T, já que a resistência R_e do emissor aparecerá em série com a resistência de emissor r_e do modelo T:

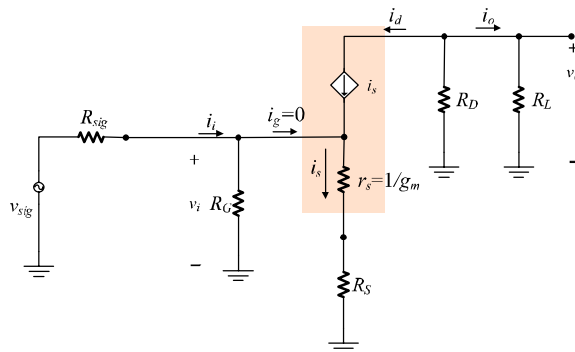


28

O amplificador FC com uma resistência em paralelo

Análise para pequeno sinal

❑ **Substituindo o MOSFET por um Modelo de Pequenos Sinais:** o modelo mais conveniente é o modelo T, já que a resistência R_e do emissor aparecerá em série com a resistência de emissor r_e do modelo T:

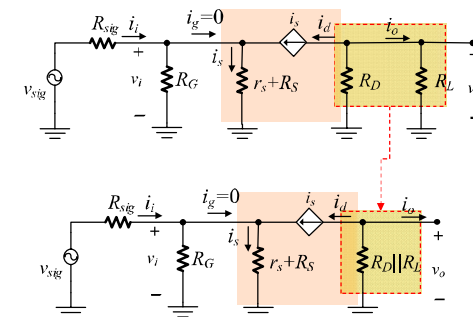


29

O amplificador FC com uma resistência em paralelo

Análise para pequeno sinal

❑ **Substituindo o MOSFET por um Modelo de Pequenos Sinais:** Redesenhando o circuito.

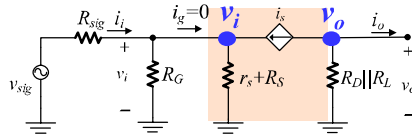


30

O amplificador FC com uma resistência em paralelo

Análise para pequeno sinal

Grandezas próprias do amplificador



□ Ganho de tensão A_v :

$$A_v = \frac{v_o}{v_i}$$

□ Aplicando o **análise nodal**:

➤ Nó de tensão v_i :

$$\underbrace{i_g}_{=0} + i_s = \frac{v_i}{r_s + R_S} \Rightarrow v_i = (r_s + R_S)i_s \quad (1)$$

➤ Nó de tensão v_o :

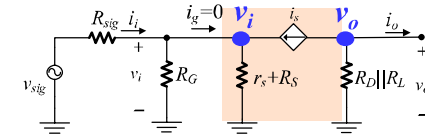
$$i_s + \frac{v_o}{R_D \parallel R_L} = 0 \Rightarrow v_o = -(R_D \parallel R_L)i_s \quad (2)$$

31

O amplificador FC com uma resistência em paralelo

Análise para pequeno sinal

Grandezas próprias do amplificador



□ Ganho de tensão A_v :

$$A_v = \frac{v_o}{v_i}$$

□ Substituindo as equações (1) e (2) na definição do ganho de tensão A_v :

$$\begin{aligned} A_v &= \frac{v_o}{v_i} = \frac{-(R_D \parallel R_L) \cancel{i_s}}{(r_s + R_S) \cancel{i_s}} = \frac{-R_D \parallel R_L}{r_s + R_S} \\ &= \frac{-g_m(R_D \parallel R_L)}{1 + g_m R_S} \end{aligned}$$

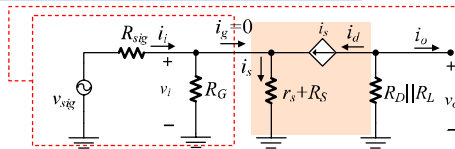
$r_s = \frac{1}{g_m}$

32

O amplificador FC com uma resistência em paralelo

Análise para pequeno sinal

Grandezas próprias do amplificador



□ Resistência de entrada R_{in} :

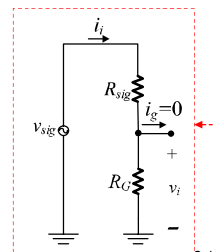
$$R_{in} = \frac{v_i}{i_i}$$

□ A relação entre v_i e i_i será dada ao aplicar a lei de *Ohm* no circuito de entrada:

$$v_i = R_G i_i$$

□ Então:

$$R_{in} = \frac{v_i}{i_i} = \frac{R_G \cancel{i_i}}{\cancel{i_i}} = R_G$$

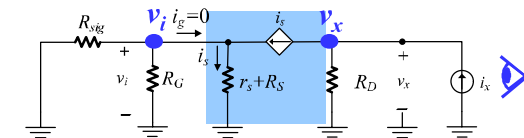


34

O amplificador FC com uma resistência em paralelo

Análise para pequeno sinal

Grandezas observadas a partir da saída



□ Resistência de saída R_{out} :

$$R_{out} = \frac{v_x}{i_x} \Big|_{v_{sig}=0}$$

□ Aplicando o **análise nodal**:

➤ Nó de tensão v_i :

$$\frac{v_i}{R_{sig}} + \frac{v_i}{R_G} + \underbrace{i_g}_{=0} = 0 \Rightarrow \frac{v_i}{R_{sig}} + \frac{v_i}{R_G} = 0 \Rightarrow v_i = 0 \quad (1)$$

➤ Nó de tensão v_x :

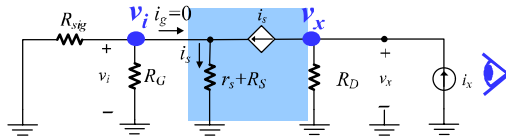
$$i_x = \underbrace{i_s}_{=0} + \frac{v_x}{R_D} \Rightarrow i_x = \frac{\cancel{v_i}}{r_s + R_S} + \frac{v_x}{R_D} \Rightarrow i_x = \frac{v_x}{R_D} \quad (2)$$

35

O amplificador FC com uma resistência em paralelo

Análise para pequeno sinal

Grandezas observadas a partir da saída



Resistência de saída R_{out} :

$$R_{out} = \left. \frac{v_x}{i_x} \right|_{v_{sig}=0}$$

Substituindo a Equação (2) na definição da resistência de saída, obtemos:

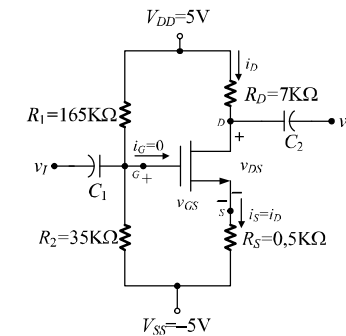
$$R_{out} = \left. \frac{v_x}{i_x} \right|_{v_{sig}=0} = \frac{R_D \parallel i_x}{i_x} \bigg|_{v_{sig}=0} = R_D$$

36

O amplificador FC com uma resistência em paralelo

Exemplo:

Analisar o amplificador com MOSFET mostrado na seguinte figura, determinar seu ganho de tensão A_v , R_{in} , R_{out} .



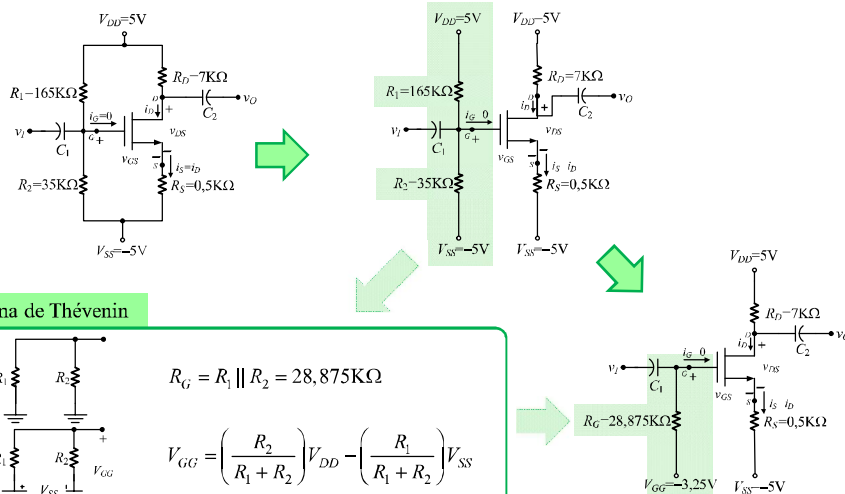
$$\begin{aligned} V_t &= 0.8 \text{ V} \\ K_N &= 2 \text{ mA/V}^2 \\ L &= 1 \mu\text{m} \\ W &= 1 \mu\text{m} \\ \lambda &= 0 \text{ V}^{-1} \end{aligned}$$

37

O amplificador FC com uma resistência em paralelo

Solução:

Redesenhando o circuito.



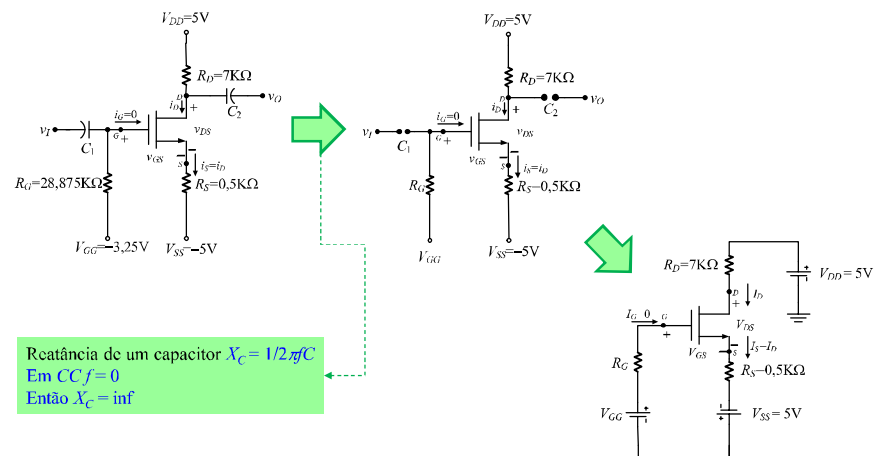
38

O amplificador FC com uma resistência em paralelo

Solução:

PASO 1 (Análise em CC): determinar o **ponto Q** do MOSFET.

➤ Cada capacitor por um **circuito aberto**.

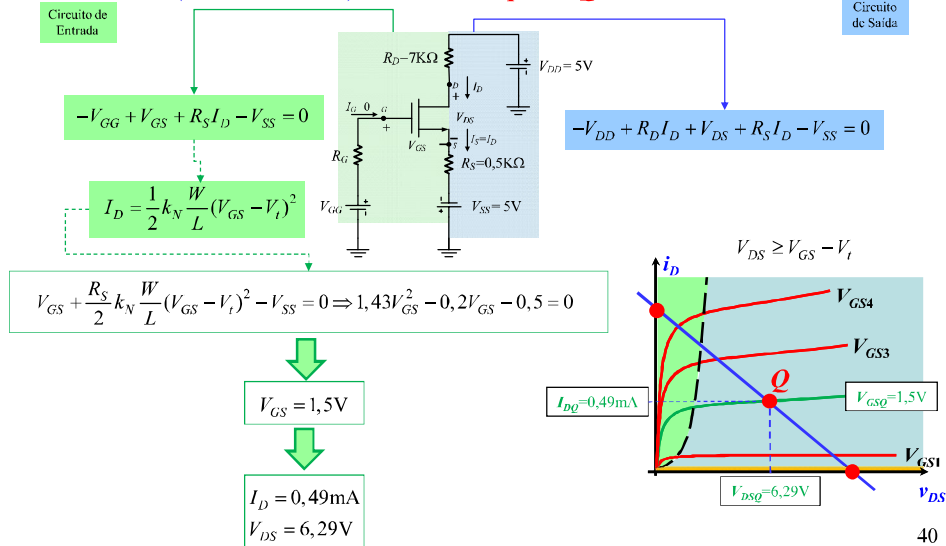


39

O amplificador FC com uma resistência em paralelo

Solução:

❑ **PASO 1 (Análise em CC):** determinar o **ponto Q** do MOSFET.

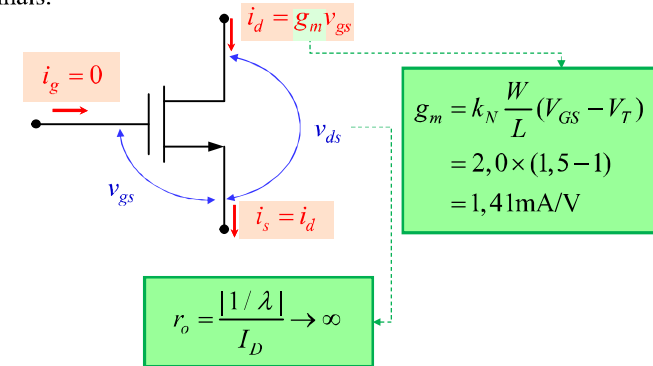


40

O amplificador FC com uma resistência em paralelo

Solução:

❑ **PASO 2 (Análise em CA):** Calcule os valores dos parâmetros do modelo para pequenos sinais.



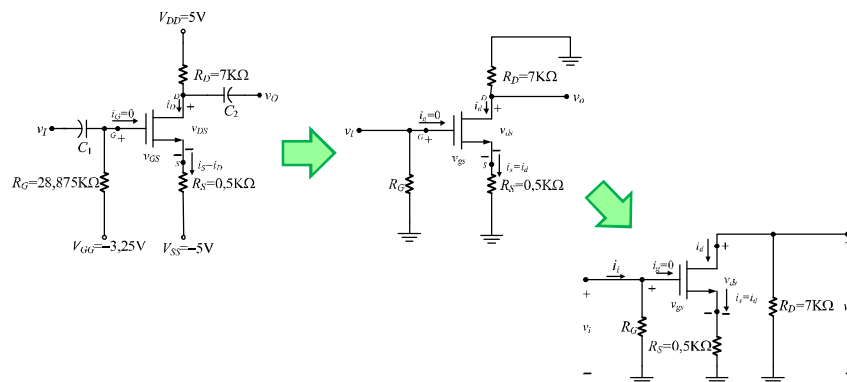
41

O amplificador FC com uma resistência em paralelo

Solução:

❑ **PASO 2 (Análise em CA):** Calcule os valores dos parâmetros do modelo para pequenos sinais.

- Cada **fonte CC de tensão** por um **curto-circuito**.
- Cada **fonte CC de corrente** por um **circuito aberto**.
- Cada **capacitor** por um **curto-circuito**.

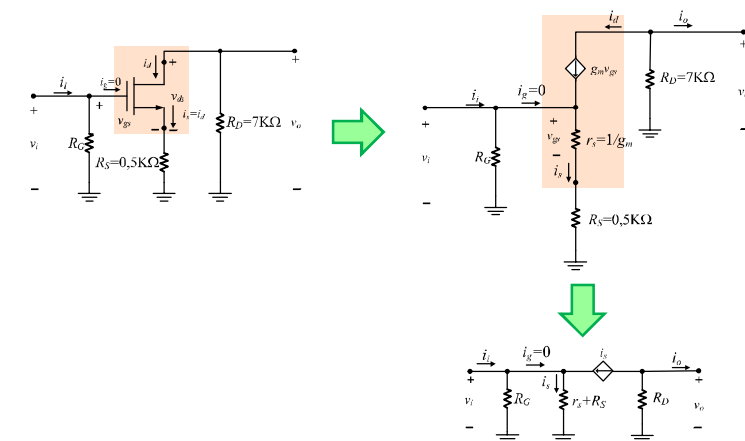


42

O amplificador FC com uma resistência em paralelo

Solução:

❑ **PASO 3 e 4 (Análise em CA):** Substitua o MOSFET por um de seus modelos equivalentes.

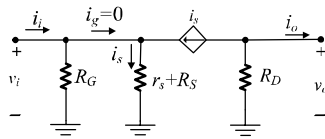


43

O amplificador FC com uma resistência em paralelo

Solução:

❑ **PASO 5 (Análise em CA):** Determinamos as grandezas de interesse.



➤ Ganho de tensão A_v :

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{g_m R_D}{1 + g_m R_S} = -5,77$$

➤ Resistência de entrada R_{in} :

$$R_{in} = \frac{v_i}{i_i} = R_G = 28,8 \text{ K}\Omega$$

➤ Resistência de saída R_{out} :

$$R_{out} = \left. \frac{v_x}{i_x} \right|_{v_{sig}=0} = R_D = 7 \text{ K}\Omega$$

44

Características do Amplificador Dreno Comum (DC)

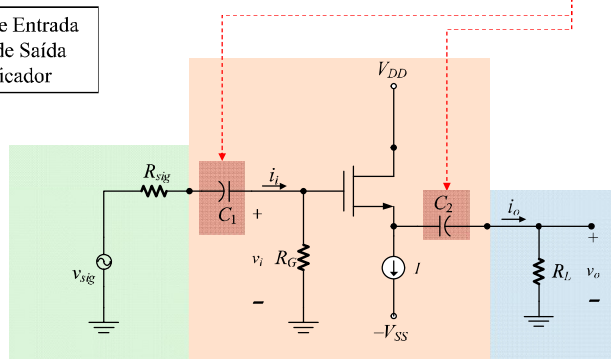
45

O amplificador Dreno Comum (DC)

❑ Neste caso a configuração será:

Capacitores de acoplamento

- Sinal de Entrada
- Carga de Saída
- Amplificador



❑ Este circuito também é conhecido como **seguidor de emissor**.

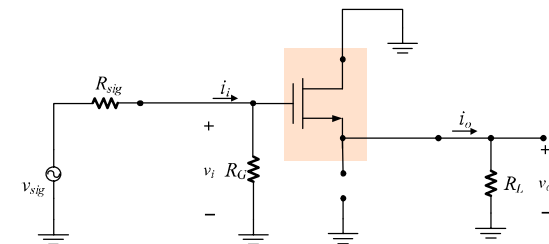
46

O amplificador Dreno Comum (DC)

Análise para pequeno sinal

❑ **Análise em AC:** Elimine as fontes CC substituindo

- Cada fonte CC de tensão por um **curto-circuito**.
- Cada fonte CC de corrente por um **circuito aberto**.
- Cada capacitor por um **curto-circuito**.

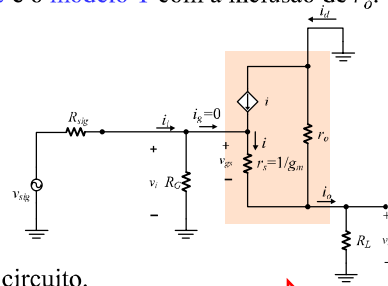


47

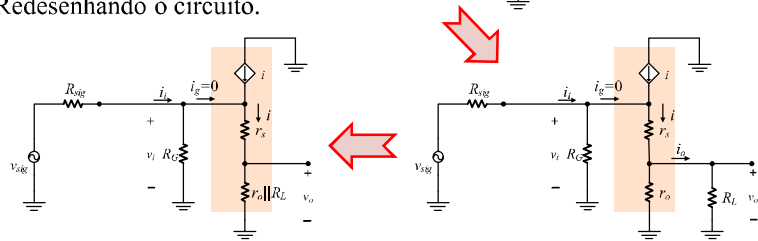
O amplificador Dreno Comum (DC)

Análise para pequeno sinal

- Substituindo o MOSFET por um Modelo de Pequenos Sinais: o modelo mais conveniente é o modelo T com a inclusão de r_o .



- Redesenhando o circuito.



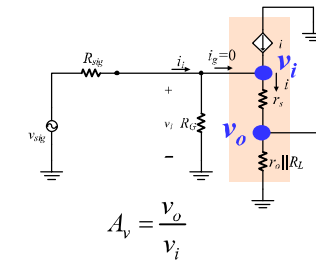
48

O amplificador Dreno Comum (DC)

Análise para pequeno sinal

Grandezas próprias do amplificador

- Ganho de tensão A_v :



- Aplicando o análise nodal:

➤ Nó de tensão v_i :

$$i_g + i = \frac{v_i}{r_s + r_o \parallel R_L} \Rightarrow v_i = (r_s + r_o \parallel R_L)i \quad (1)$$

➤ Nó de tensão v_o :

$$i = \frac{v_o}{r_o \parallel R_L} \Rightarrow v_o = (r_o \parallel R_L)i \quad (2)$$

49

O amplificador Dreno Comum (DC)

Análise para pequeno sinal

Grandezas próprias do amplificador

- Ganho de tensão A_v :

$$A_v = \frac{v_o}{v_i}$$

- Substituindo as equações (1) e (2) na definição do ganho de tensão A_v :

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{(r_o \parallel R_L) i}{(r_s + r_o \parallel R_L) i} = \frac{r_o \parallel R_L}{r_s + r_o \parallel R_L}$$

$$= \frac{g_m (r_o \parallel R_L)}{1 + g_m r_o \parallel R_L}$$

$$r_s = \frac{1}{g_m}$$

50

O amplificador Dreno Comum (DC)

Análise para pequeno sinal

Grandezas próprias do amplificador

- Resistencia de entrada R_{in} :

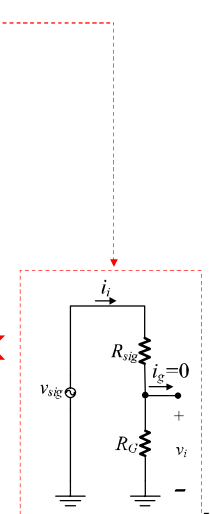
$$R_{in} = \frac{v_i}{i_i}$$

- A relação entre v_i e i_i será dada ao aplicar a lei de Ohm no circuito de entrada:

$$v_i = R_G i_i$$

- Então:

$$R_{in} = \frac{v_i}{i_i} = \frac{R_G i_i}{i_i} = R_G$$



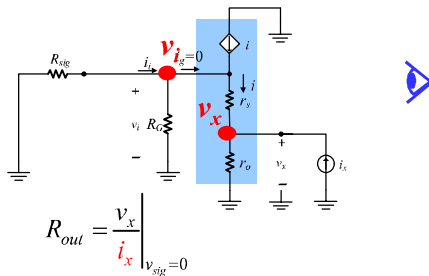
51

O amplificador Dreno Comum (DC)

Análise para pequeno sinal

Grandezas próprias do amplificador

□ Resistência de saída R_{out} :



□ Aplicando o **análise nodal**:

➤ Nó de tensão v_i :

$$\frac{v_i}{R_{sig}} + \frac{v_i}{R_G} + \underbrace{i_g}_{=0} = 0 \Rightarrow \frac{v_i}{R_{sig}} + \frac{v_i}{R_G} = 0 \Rightarrow v_i = 0 \quad (1)$$

➤ Nó de tensão v_x :

$$i_x + \underbrace{i}_{=0} = \frac{v_x}{r_o} \Rightarrow i_x + \frac{v_i - v_x}{r_s} = \frac{v_x}{r_o} \Rightarrow i_x = \left(\frac{1}{r_s} + \frac{1}{r_o} \right) v_x = \frac{v_x}{r_s \parallel r_o} \quad (2)$$

52

Bibliografia

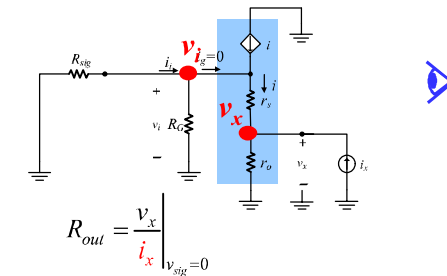
54

O amplificador Dreno Comum (DC)

Análise para pequeno sinal

Grandezas próprias do amplificador

□ Resistência de saída R_{out} :



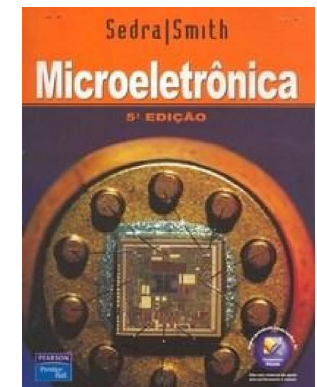
□ Substituindo a Equação (2) na definição da resistência de saída, obtemos:

$$R_{out} = \frac{v_x}{i_x} \bigg|_{v_{sig}=0} = \frac{(r_s \parallel r_o) \cancel{i_x}}{\cancel{i_x}} \bigg|_{v_{sig}=0} = r_s \parallel r_o$$

53

Bibliografia

Sedra, Adel S; Smith, Kenneth C.
Microeletrônica (5^{ta} Edição). Pearson
Prentice Hall, São Paulo, 2007



55

Bibliografia

Boylestad, Robert L.; Nashelsky, Louis.
Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos (11va Edição). Pearson, Prentice Hall, São Paulo, 2013.

