

PSI2306: Eletrônica

Ao final deste curso você deverá estar apto a:

- **Analisar e Projetar amplificadores com transistores bipolares e FET! considerando os requisitos de ganho (de tensão, corrente), impedância (de entrada/de saída) e a resposta em frequência**
- **Analisar e projetar circuitos com Amplificadores Operacionais (AOs) considerando as limitações de desempenho reais dos AOs.**
- **Identificar as principais configurações de amplificadores de potência e explicar suas características fundamentais**
- **Explicar e empregar conceitos de realimentação negativa para ajustar valores de ganho, impedância e resposta em frequência de amplificadores de um modo geral**

Sedra|Smith

Microeletrônica

5ª EDIÇÃO



PEARSON
Prentice
Hall



Site com material de apoio
para professores e alunos

2007 Pearson Education do Brasil (Tradução).

PSI 2306 – Eletrônica

Programação para a Primeira Prova

Até a primeira prova você deverá estar apto a:

- **Analisar e Projetar amplificadores com transistores bipolares e FET! considerando os requisitos de ganho (de tensão, corrente), impedância (de entrada/de saída) e a resposta em frequência**
- Analisar e projetar circuitos com Amplificadores Operacionais (AOs) considerando as limitações de desempenho reais dos AOs
- Identificar as principais configurações de amplificadores de potência e explicar suas principais características
- Explicar e empregar conceitos de realimentação negativa para ajustar valores de ganho, impedância e resposta em frequência de amplificadores de um modo geral



CAPITULO 5

Amplificadores com Transistores

Aula 1

PSI 2306 – Eletrônica

Programação para a Primeira Prova

Aula	Matéria	Capítulo/ página (inglês)
1 ^a	Revisão de transistor bipolar de junção - TBJ (funcionamento interno e expressões básicas) - Exemplo 5.4 O TBJ como amplificador para pequenos sinais (as condições c.c., a corrente de coletor e a transcondutância)	Sedra, Cap. 5, p. 235-240 (277-285); p. 263-264 (421-423); p. 275-276 (443-445).
2 ^a	A corrente de base e a resistência de entrada da base, a resistência de entrada do emissor. Ganho de tensão, Exemplo 5.38, modelos equivalentes (modelos π -híbrido e T)	Sedra, Cap. 5, p. 276-279 (445-450)
3 ^a	Aplicação dos modelos equivalentes para pequenos sinais, Efeito Early, Exemplo 5.14 O amplificador emissor comum (EC) - Exercício 5.43	Sedra, Cap. 5 p. 290-293 (467-470)
4 ^a	O amplificador em emissor comum com resistência de emissor. Exercício 5.44	Sedra, Cap. 5 p. 293-296 (470-474)
5 ^a	O amplificador em base comum. O Amplificador em coletor comum. Exercício 5.47	Sedra, Cap. 5 p. 296-301 (475-484)
6 ^a	Resposta em frequência dos circuitos RC Pólos e zeros, funções de primeira ordem, curvas de Bode (pólo simples, zero simples). Exemplo E.1, exemplo E.2	Sedra, Apend. D, p. 823-825 (D6-D9) Sedra, Apend. E, p.830-833 (E1-E6)
7 ^a	Teorema de Miller. Exemplo 6.7 Resposta em alta frequência do Emissor Comum Exemplo 5.18	Sedra, Cap. 6, p. 363-364 (578-580) Sedra, Cap. 5, p. 306-310 (491-497)
8 ^a	Resposta em baixa frequência do Emissor Comum Exemplo 5.19	Sedra, Cap. 5, p. 310-314 (497-503)
9 ^a	Resposta em alta e baixa frequência do Fonte Comum Exemplo 4.12	Sedra, Cap. 4, p. 202-208 (326-335)
10 ^a	Aula de Exercícios	
1^a. Semana de provas		
Data:		

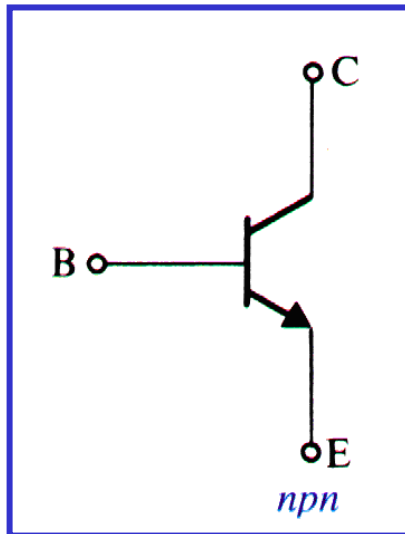
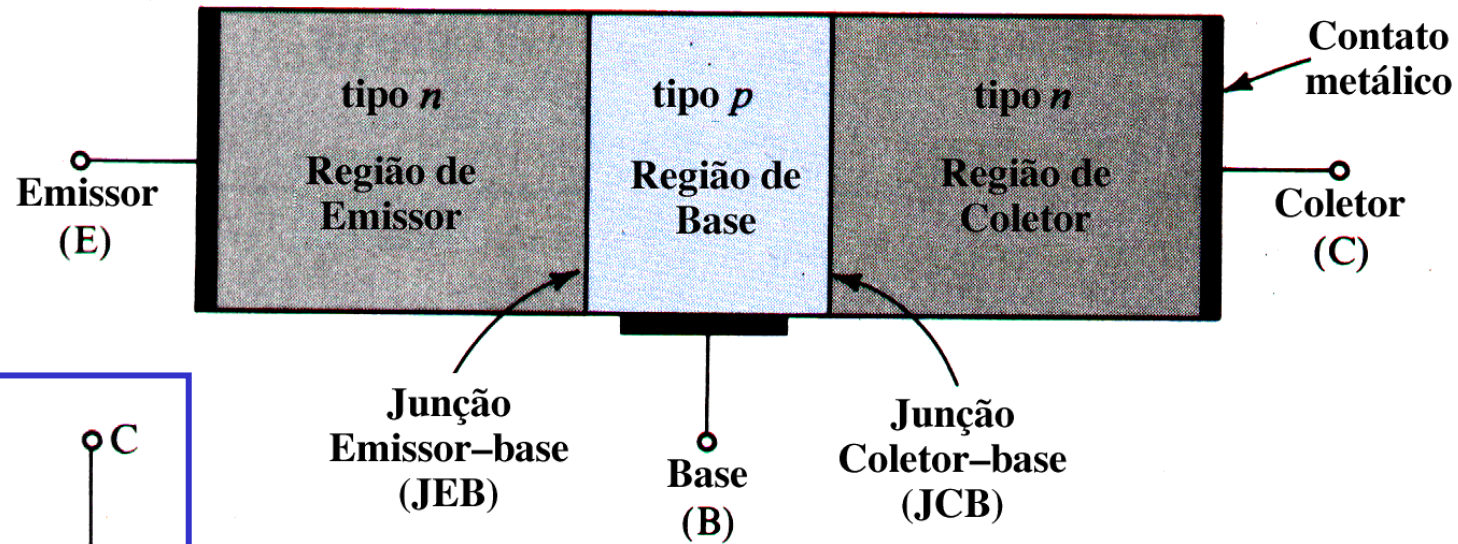
1ª Aula:

Revisão do TBJ (princípio de operação e polarização) e introdução ao seu uso como amplificador

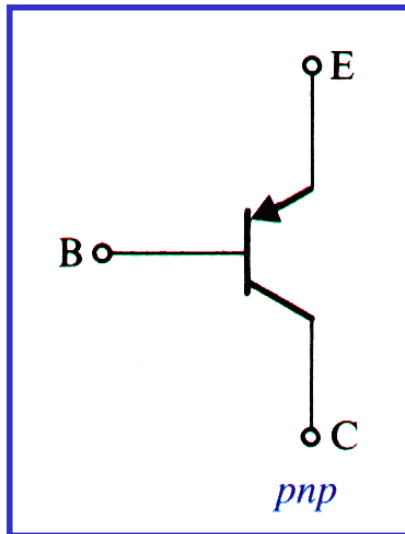
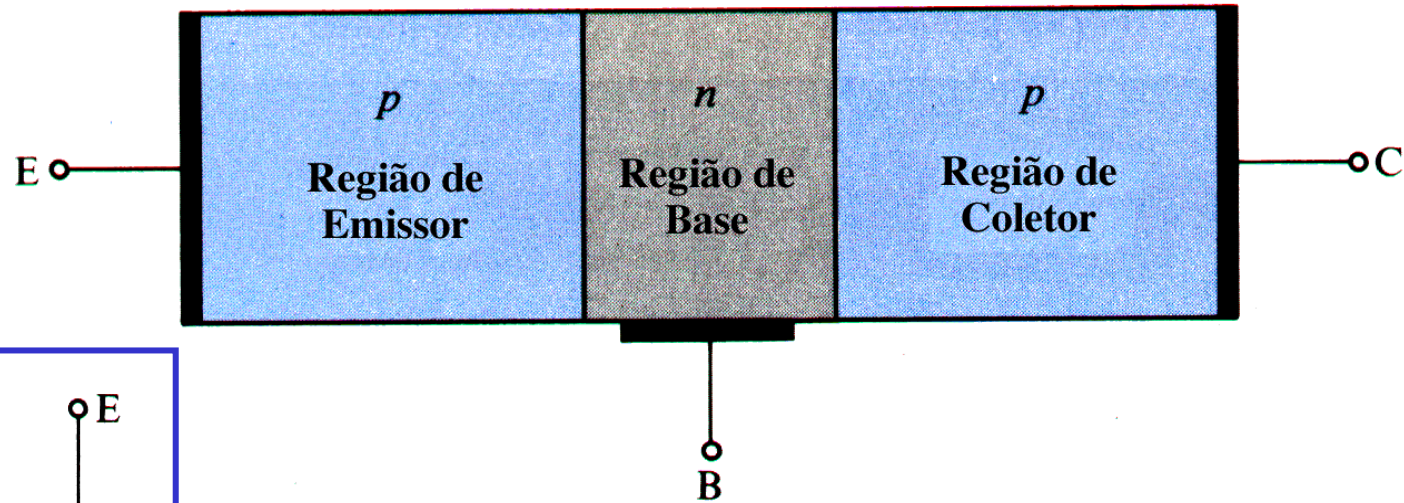
Ao final desta aula você deverá estar apto a:

- **Explicar o princípio de funcionamento do TBJ (revisão)**
- **Identificar, explicar e utilizar as expressões de corrente de um TBJ (revisão)**
- **Analisar e projetar circuitos de polarização para TBJs (reg. ativa e saturação)- novidade, você já fez para FET**
- **Explicar o princípio de amplificação em TBJs**
- **Explicar o papel da transcondutância de TBJs e FETs na determinação dos parâmetros de amplificação**

O Transistor Bipolar de Junção (npn)



O Transistor Bipolar de Junção (pnp)



Modos de Operação

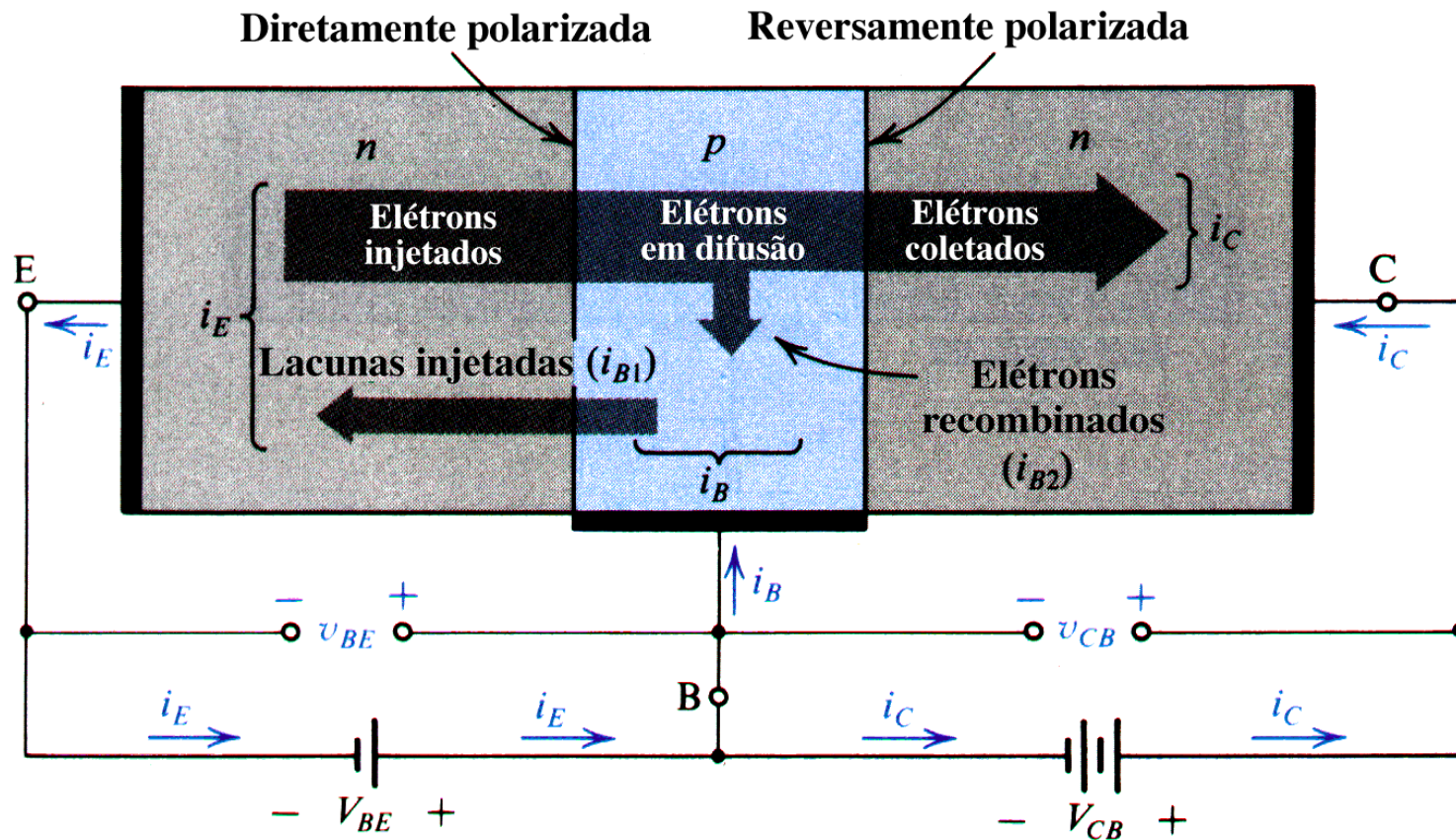
Tabela 5.1 MODOS DE OPERAÇÃO DO TBJ.

Modo	JEB	JBC
Corte	Reversa	Reversa
Ativo	Direta	Reversa
Saturação	Direta	Direta
Ativo Reverso	Reversa	Direta

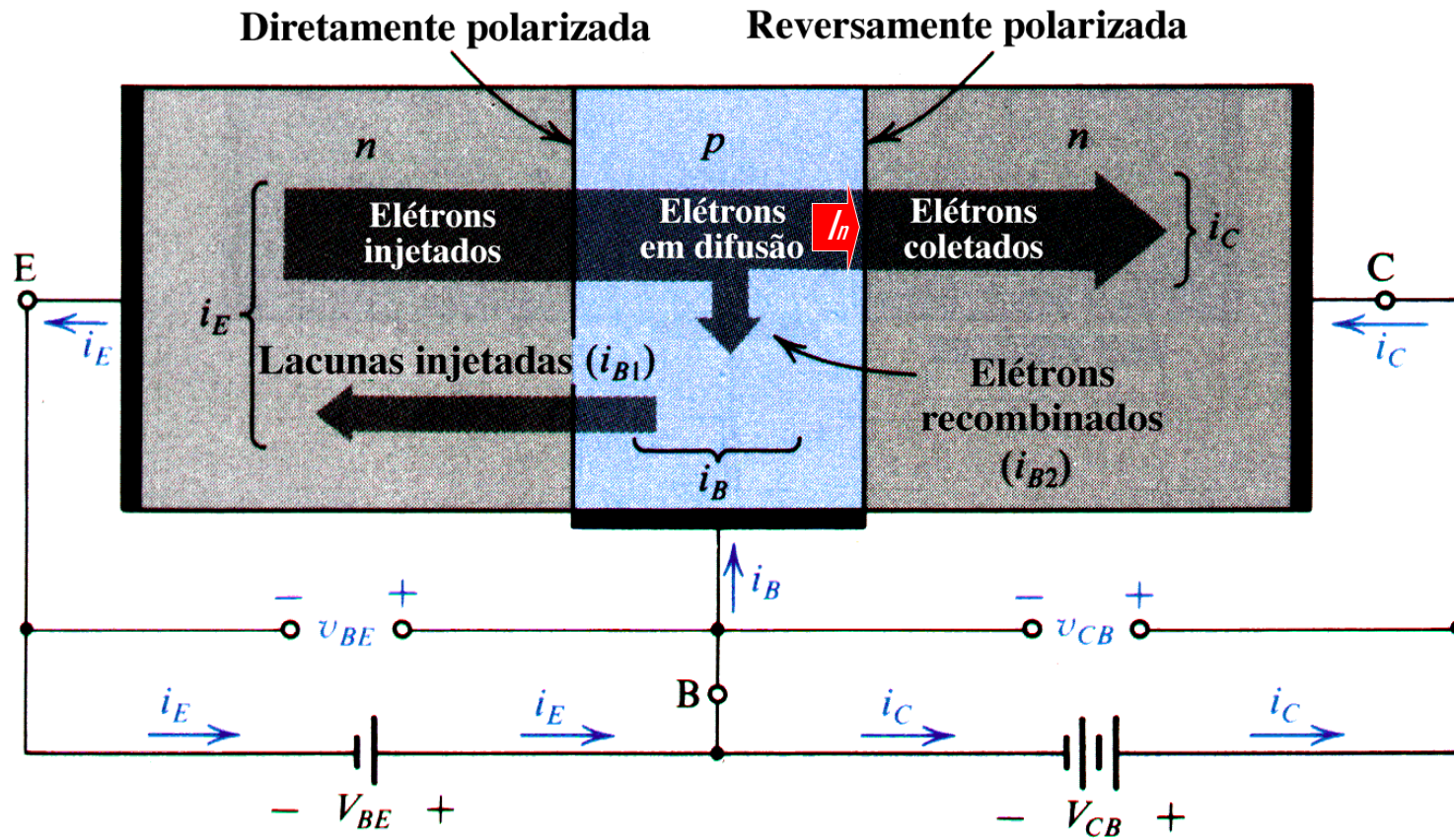
INDEPENDENTE SE NPN OU PNP!!!

O Transistor Bipolar

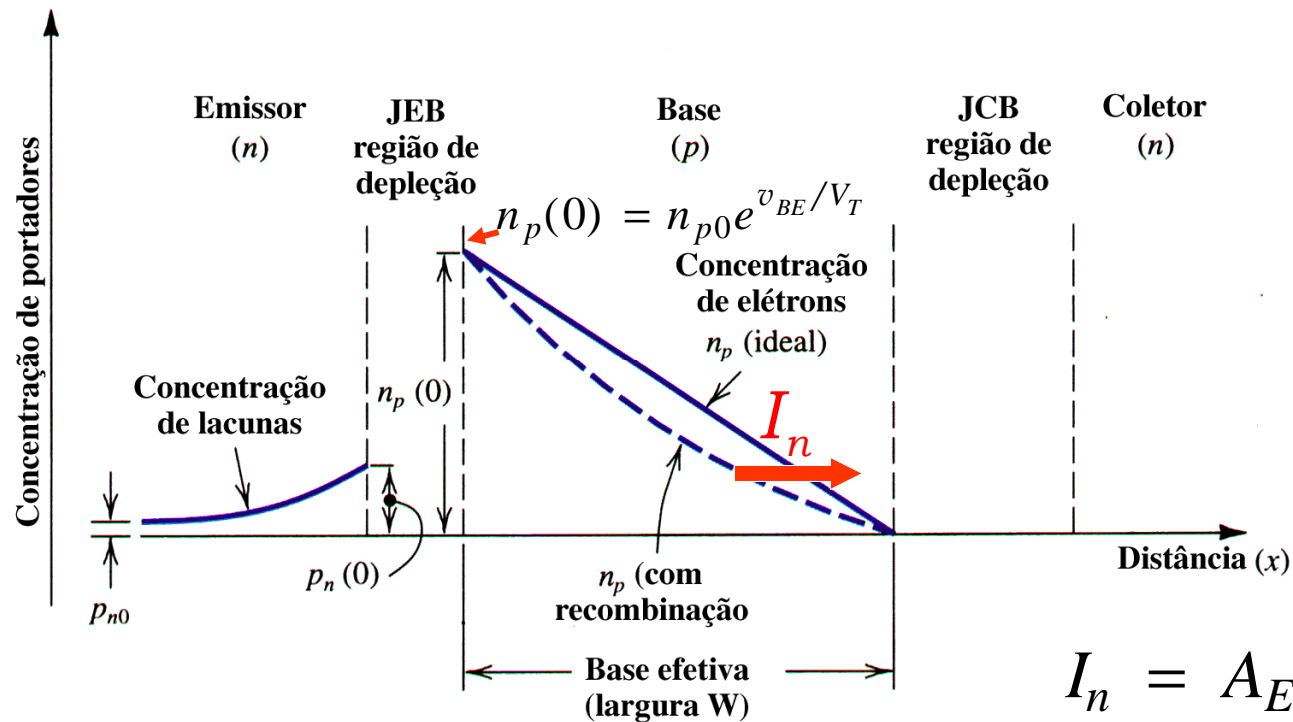
j_{BE} dir. pol. e j_{BC} rev. pol. (modo ativo)



As correntes no emissor e no coletor



A distribuição de portadores minoritários



$$I_n = A_E q D_n \frac{dn_p(x)}{dx}$$

$$= A_E q D_n \left(- \frac{n_p(0)}{W} \right)$$

A corrente no coletor

$$I_n = A_E q D_n \frac{dn_p(x)}{dx} = A_E q D_n \left(-\frac{n_p(0)}{W} \right)$$

$$= A_E q D_n \left(-\frac{n_{p0} e^{v_{BE}/V_T}}{W} \right)$$

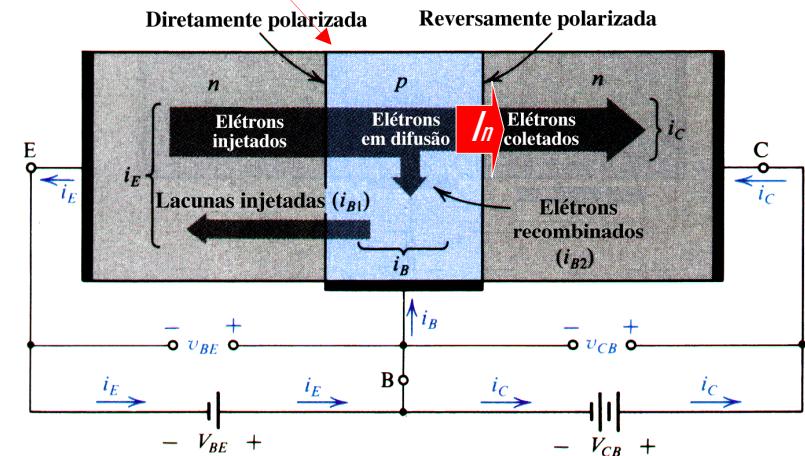
$$I_C = -I_n = A_E q D_n \left(\frac{n_{p0} e^{v_{BE}/V_T}}{W} \right)$$

$$= \frac{A_E q D_n n_{p0}}{W} e^{v_{BE}/V_T} = \frac{A_E q D_n n_i^2}{N_A W} e^{v_{BE}/V_T}$$

$$= I_S e^{v_{BE}/V_T}$$

sendo I_S a corrente de saturação

$$n_p(0) = n_{p0} e^{v_{BE}/V_T}$$



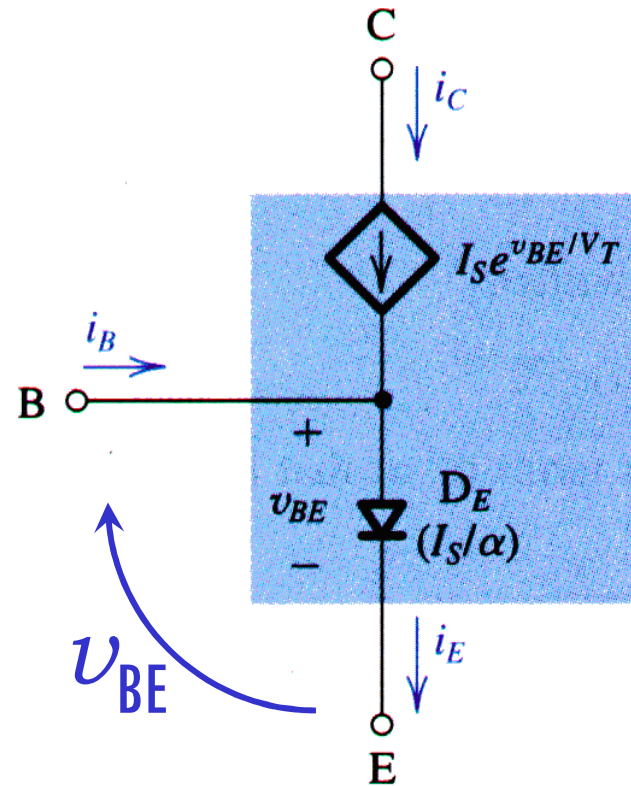
lembrem, no diodo

$$I_S = A q n_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right)$$

Um modelo para o Transistor NPN na região ativa

$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T}$$

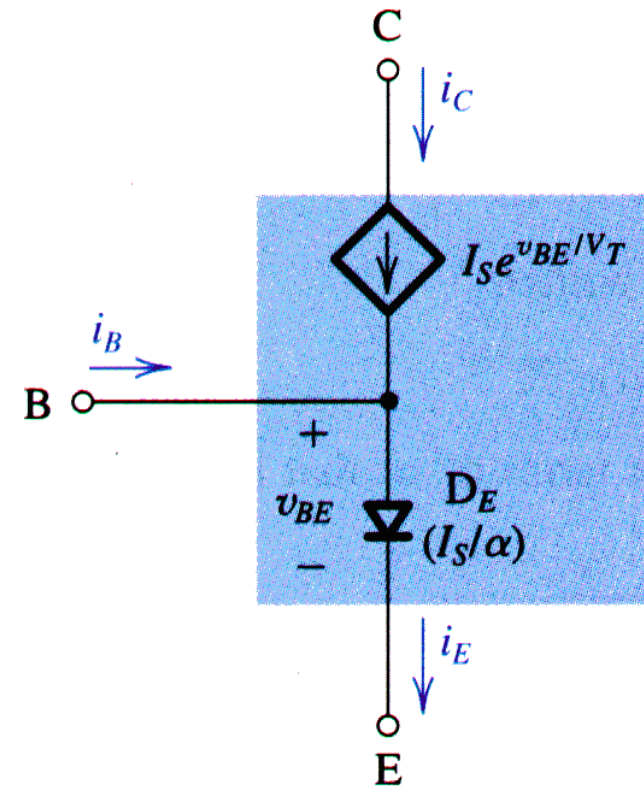
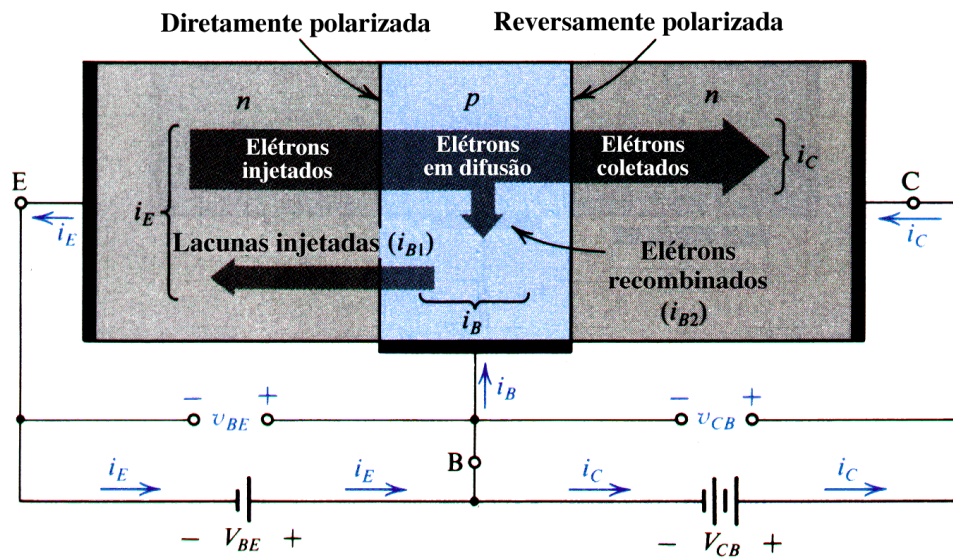
$$i_E = (I_S/\alpha) e^{v_{BE}/V_T}$$



Modelo (npn) para grandes sinais na região ativa!

O Transistor Bipolar

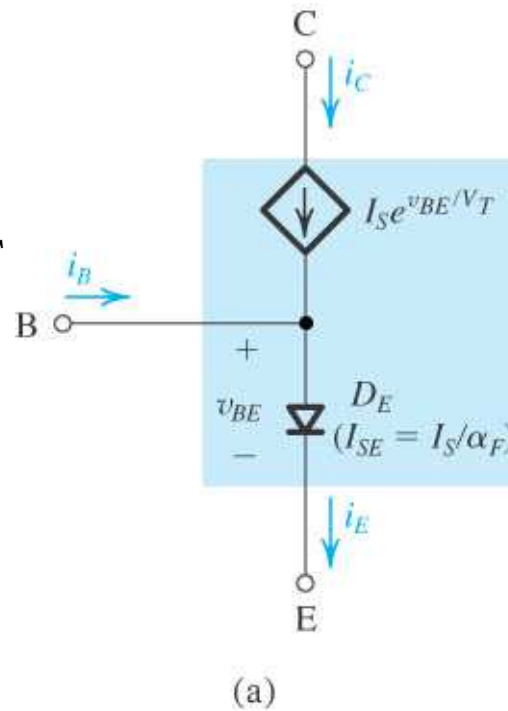
j_{BE} dir. pol. e j_{BC} rev. pol. (modo ativo)



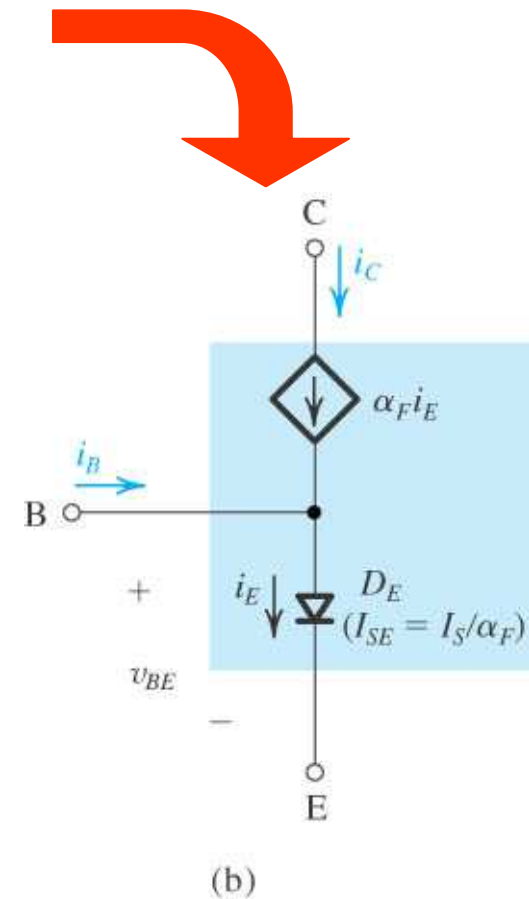
Adequando Modelos

$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T}$$

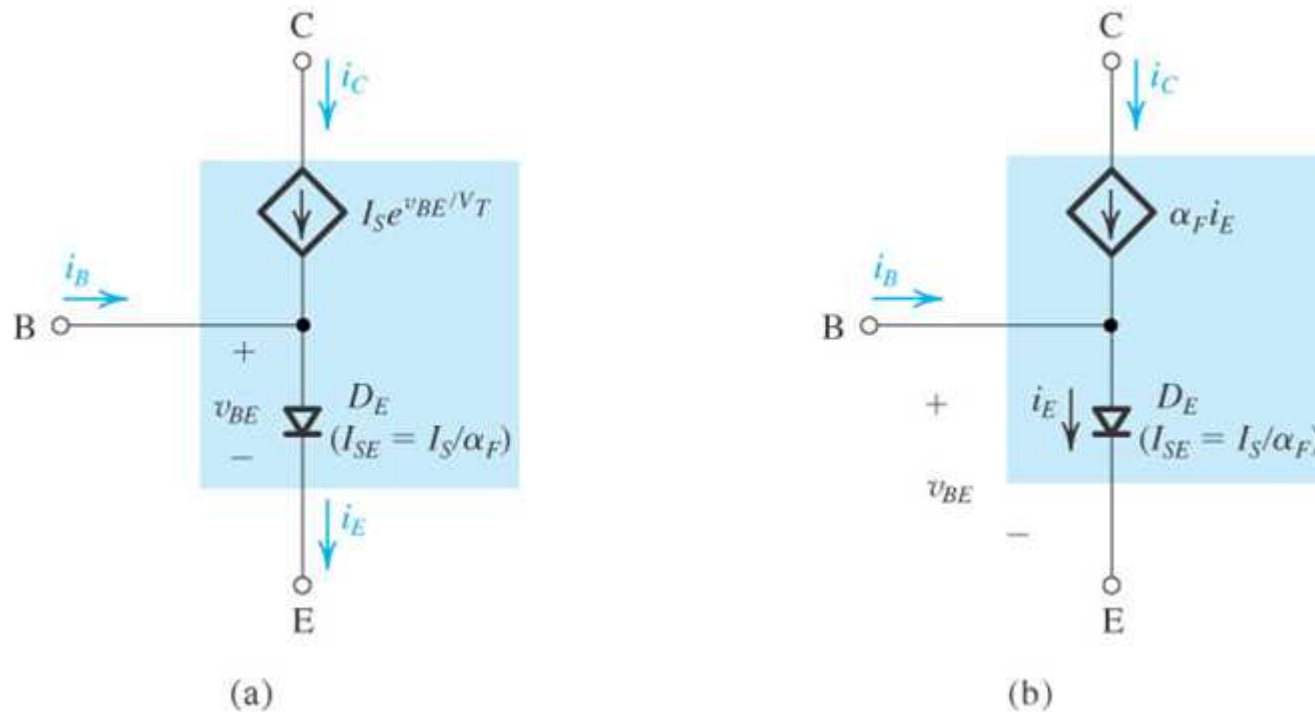
$$i_E = \underbrace{(I_S/\alpha_F)}_{I_{SE}} e^{v_{BE}/V_T}$$



modo ativo



Alguns modelos para o Transistor NPN na região ativa



Modelos (npn) para grandes sinais na região ativa!

Expressões para as Correntes em um Transistor Bipolar na Região Ativa

$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T}$$

$$i_B = \frac{i_C}{\beta} = \left(\frac{I_S}{\beta} \right) e^{v_{BE}/V_T}$$

$$i_E = \frac{i_C}{\alpha} = \left(\frac{I_S}{\alpha} \right) e^{v_{BE}/V_T}$$

Para Silício temos:

$$v_{BE} \approx 0,7V$$

$$i_E = i_C + i_B$$

$$I_C = \beta I_B = \alpha \left(= \frac{\beta}{\beta + 1} \right) I_E$$

$$I_C = I_S e^{v_{BE}/V_T}$$

Nota: Para o transistor *pnp*, substitua v_{BE} por v_{EB}

$$i_C = \alpha i_E \quad i_B = (1 - \alpha) i_E = \frac{i_E}{\beta + 1}$$

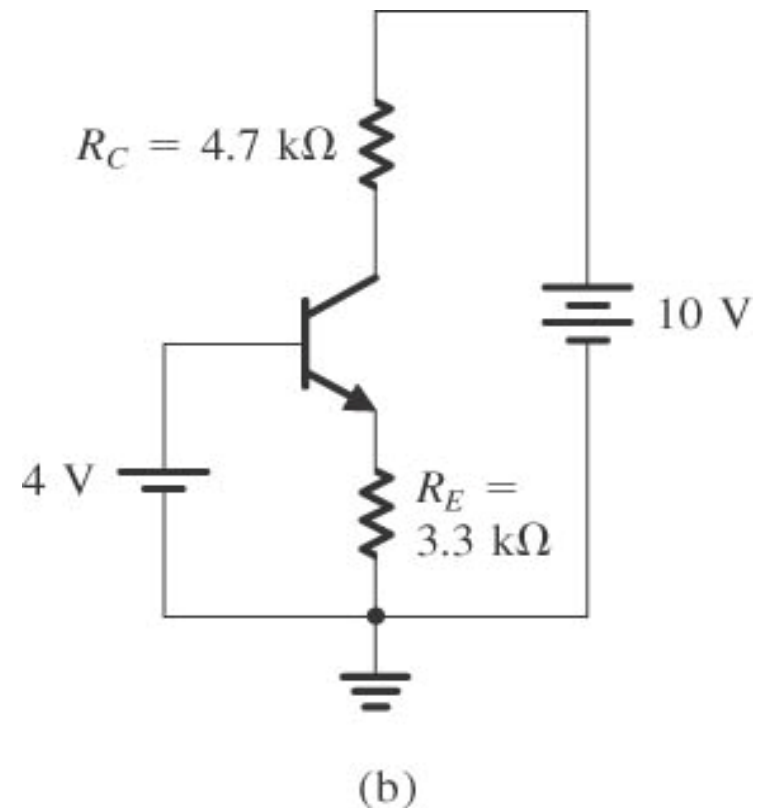
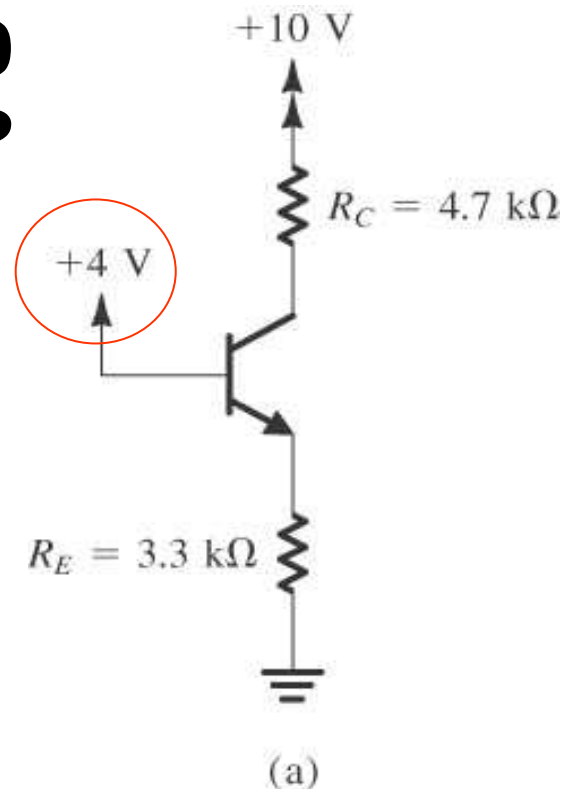
$$i_C = \beta i_B \quad i_E = (\beta + 1) i_B$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad \alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

V_T = tensão térmica = $kT/q \cong 25$ mV a temperatura ambiente

Exemplo 5.4: Considere o circuito mostrado na Figura 5.34(a), o qual está redesenhado na Figura 5.34(b) para lembrar ao leitor da convenção empregada no decorrer deste livro para indicar as conexões das fontes \mathcal{C} . Desejamos analisar esse circuito para determinar todas as tensões nodais e correntes dos ramos. Vamos supor que β é especificado com um valor de 100.

$\beta = 100$
 $I's? V's?$



Exemplo 5.4

$\beta = 100 \rightarrow I's? V's?$

OBS: normalmente se inicia a análise com a malha B-E

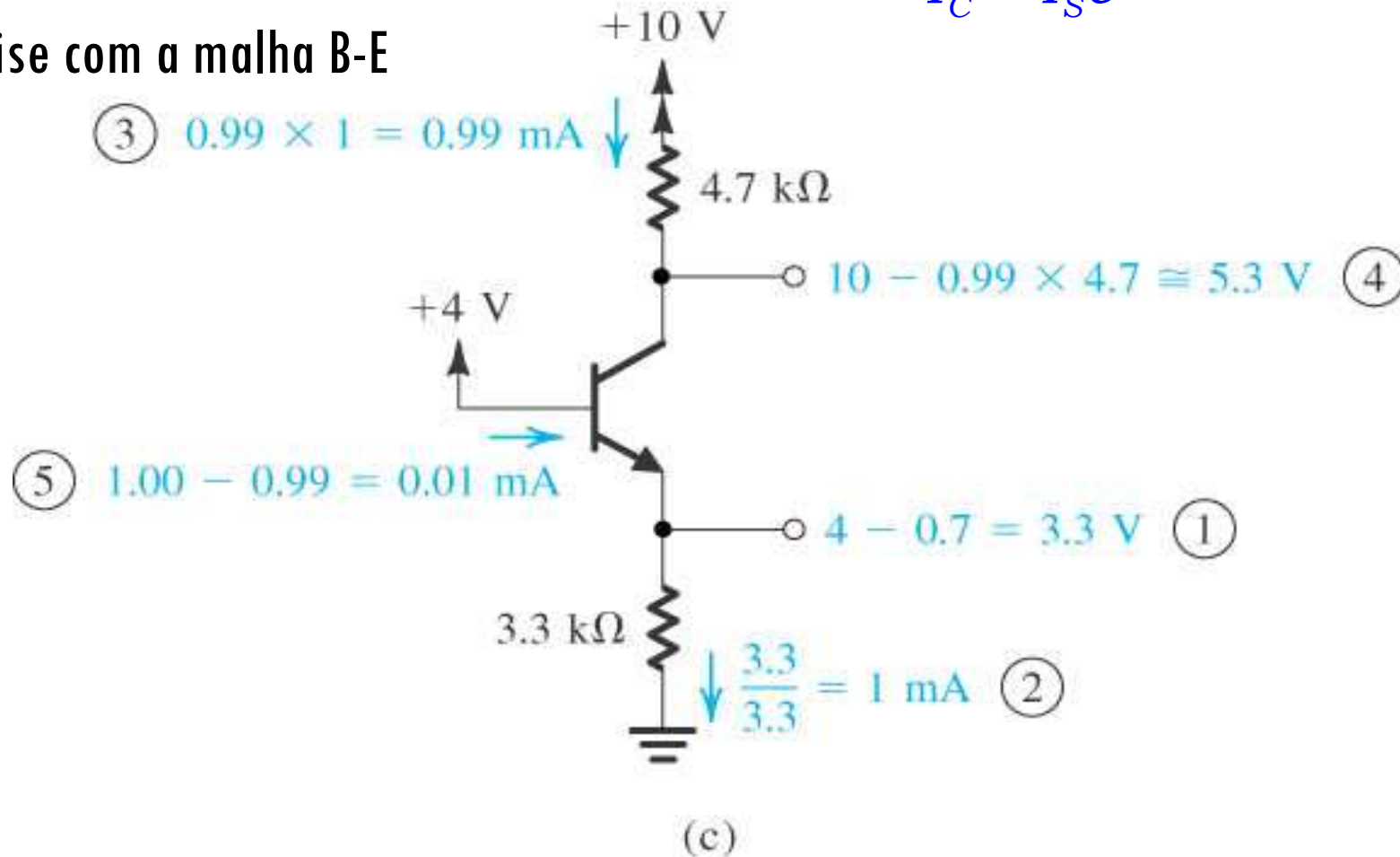
suponho modo ativo, pois JCB rev pol e JCB dir pol

$$v_{BE} \approx 0,7V$$

$$i_E = i_C + i_B$$

$$I_C = \beta I_B = \alpha \left(= \frac{\beta}{\beta + 1} \right) I_E$$

$$I_C = I_S e^{V_{BE}/V_T}$$



Exemplo 5.5

$\beta > 50 \rightarrow I's? V's?$

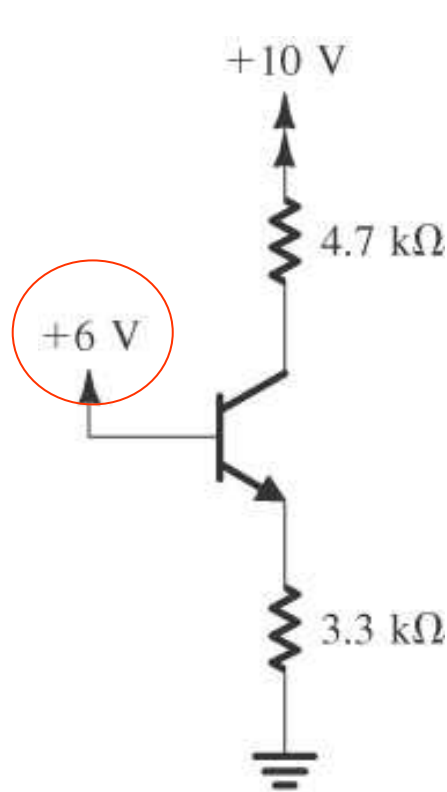
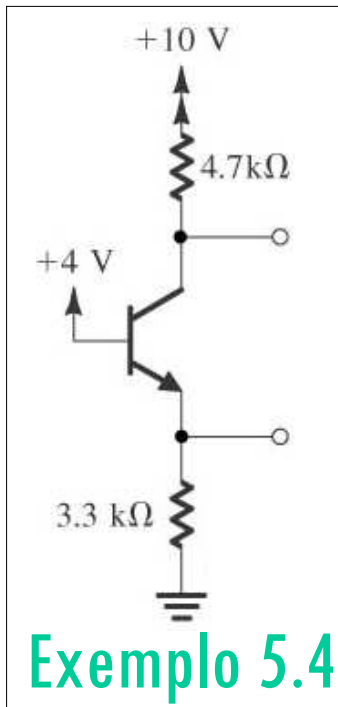
$$v_{BE} \approx 0,7V$$

$$i_E = i_C + i_B$$

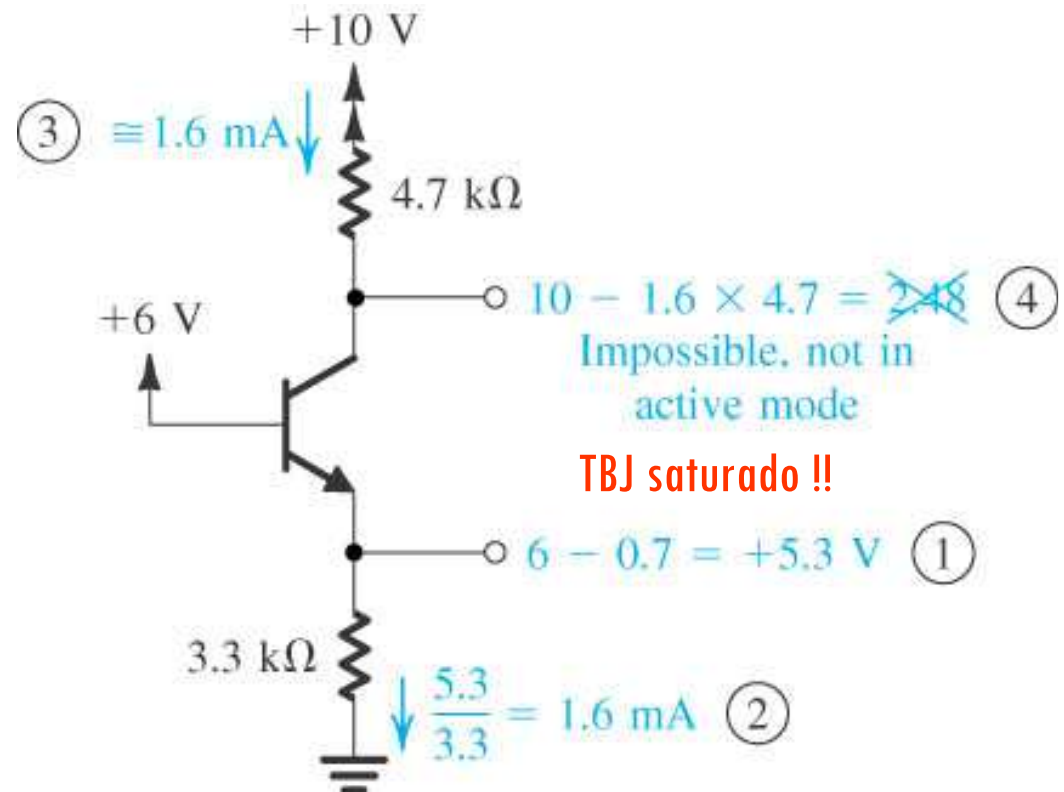
$$I_C = \beta I_B = \alpha \left(= \frac{\beta}{\beta + 1} \right) I_E$$

$$I_C = I_S e^{v_{BE}/V_T}$$

Suponho modo ativo,
com JCB **rev** pol
e JEB **dir** pol



(a)



(b)

Modos de Operação

Tabela 5.1 MODOS DE OPERAÇÃO DO TBJ.

Modo	JEB	JBC
Corte	Reversa	Reversa
Ativo	Direta	Reversa
Saturação	Direta	Direta
Ativo Reverso	Reversa	Direta

INDEPENDENTE SE NPN OU PNP!!!

Na região de saturação

~~$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T}$$~~

~~$$i_C = \beta i_B$$~~

$$i_E = i_C + i_B$$

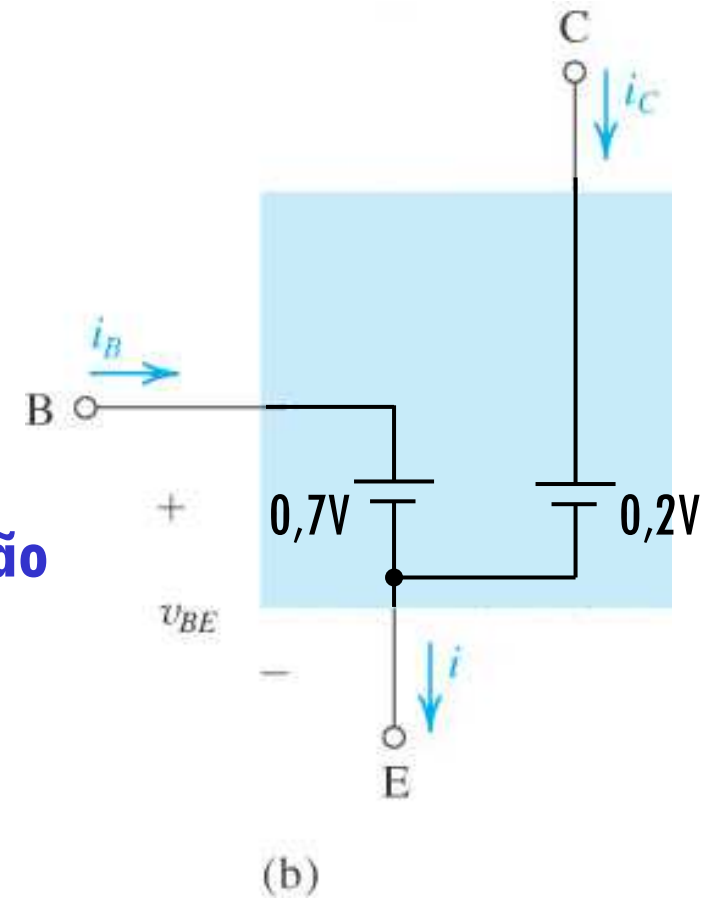
$$V_{BE} = 0,7V$$

$$V_{CE_{sat}} = 0,2V$$

$$\beta_{FORÇADO} = \frac{i_{Csat}}{i_B}$$

Região Ativa

Região Saturação



Na região de saturação

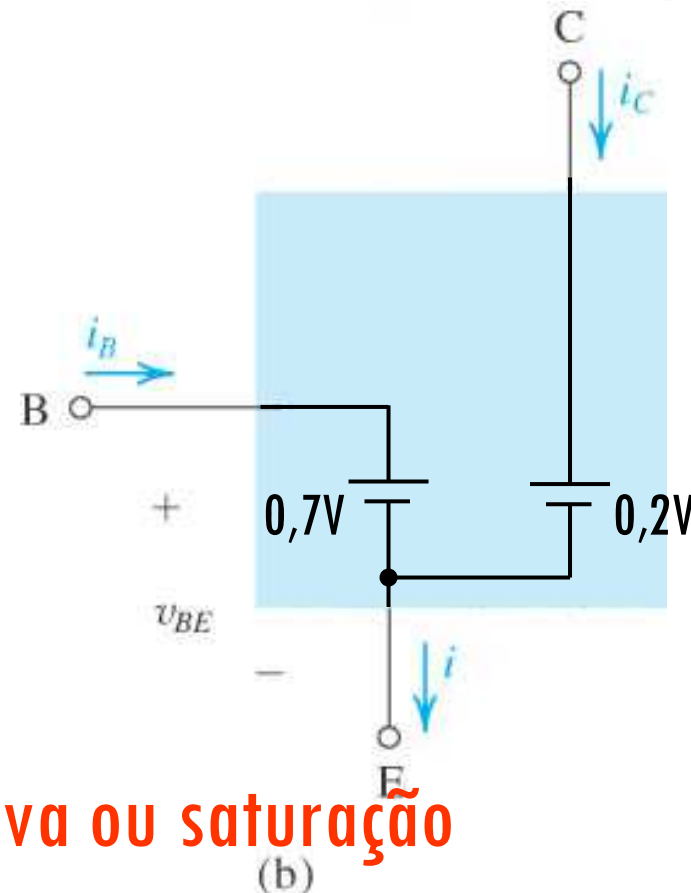
- Assuma inicialmente ativa (se ninguém falar nada)
- Confira se ativa ou saturação
- Se saturação, refaça, considerando as seguintes expressões:

$$i_E = i_C + i_B$$

$$V_{BE} = 0,7V$$

$$V_{CE_{sat}} = 0,2V$$

$$\beta_{FORÇADO} = \frac{i_{C_{sat}}}{i_B}$$



- Sempre confira ao final se ativa ou saturação

Exemplo 5.5

Na região de saturação

$\beta > 50$
 $I_S?$ $V_S?$

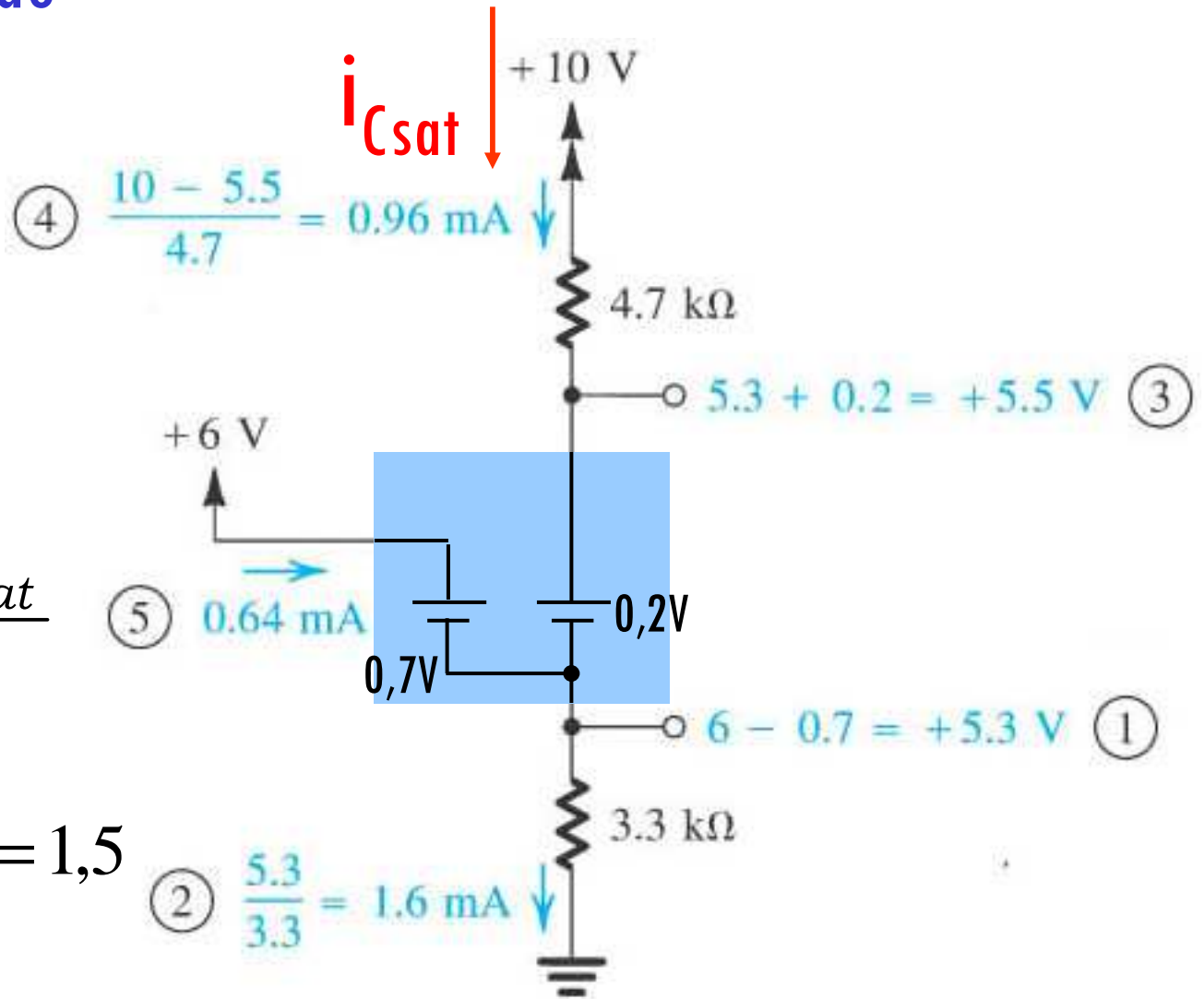
$$i_E = i_C + i_B$$

$$V_{BE} = 0,7V$$

$$V_{CE_{sat}} = 0,2V$$

$$\beta_{FORÇADO} = \frac{i_{C_{sat}}}{i_B}$$

$$\beta_{FORÇADO} = \frac{0,96}{0,64} = 1,5$$



Exercício 5.5

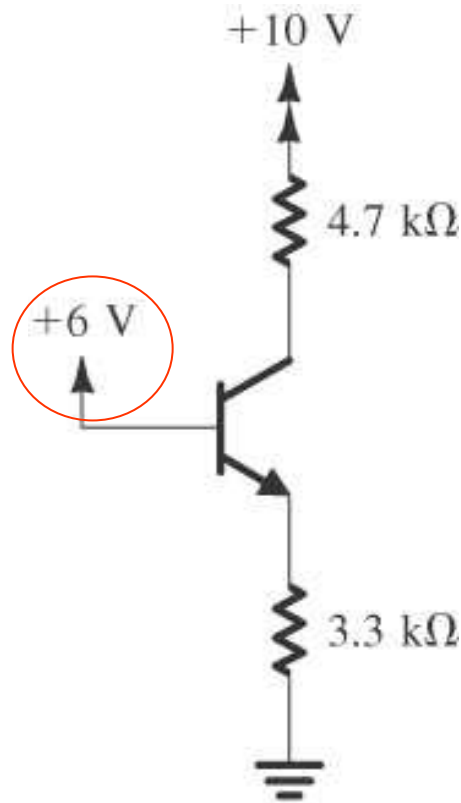
$\beta > 50 \rightarrow I_s? V_s?$

suponho modo saturação,
pois JCB dir pol
e JCB dir pol

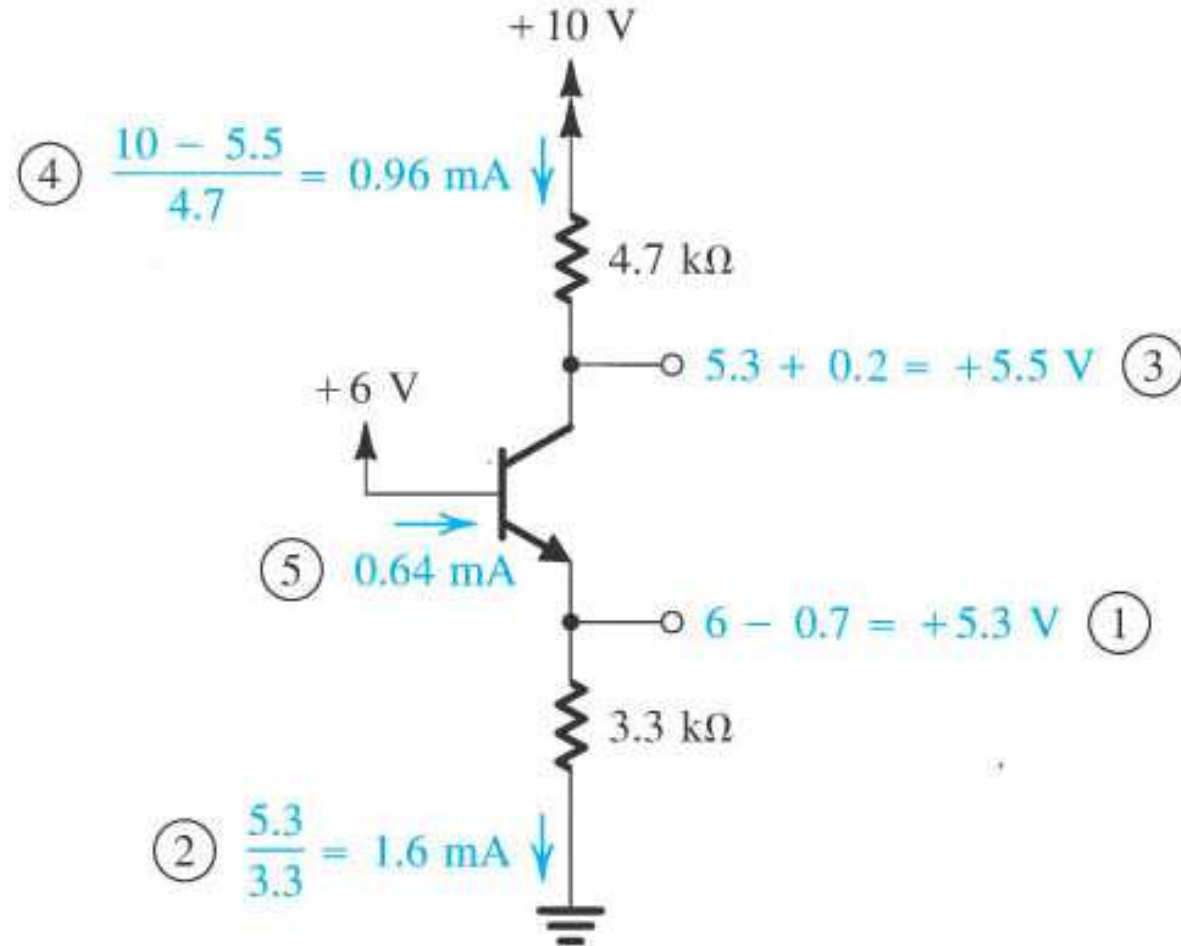
$$i_E = i_C + i_B$$

$$V_{BE} \approx 0,7V$$

$$V_{CE} \approx 0,2V$$



(a)

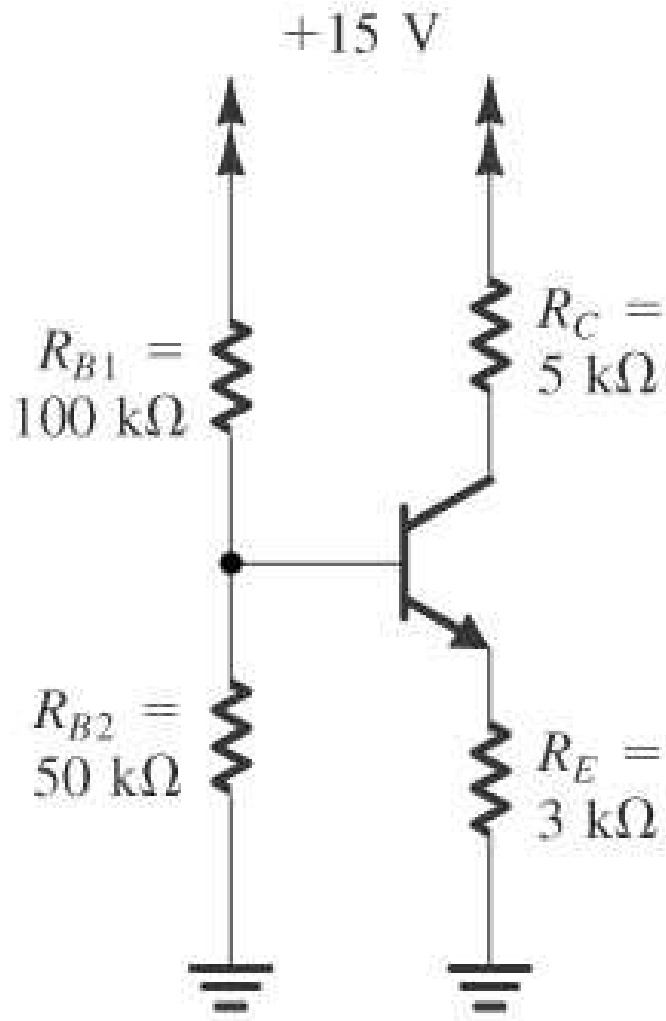


(c)

Exemplo 5.10 Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar todas as tensões nodais e todas as correntes nos ramos. Suponha $\beta = 100$.

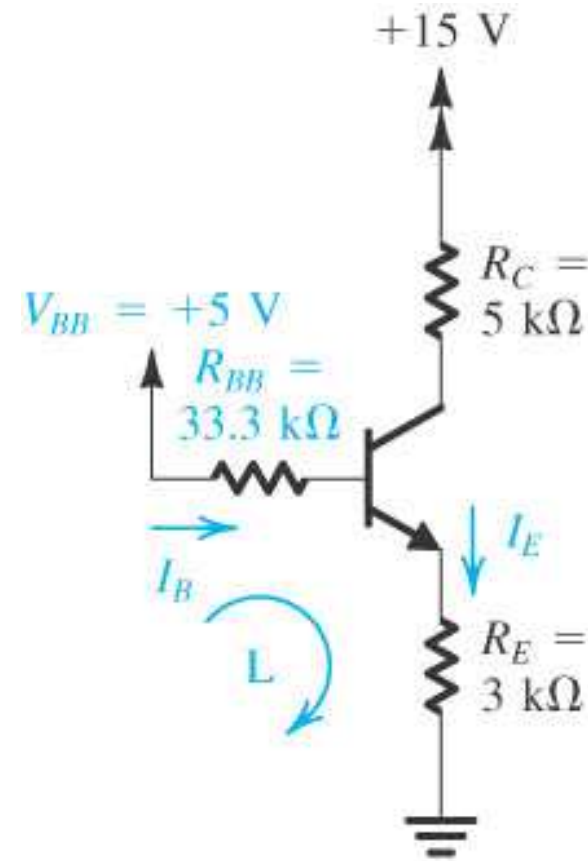
$$V_{BB} = +15 \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} = 15 \frac{50}{100 + 50} = +5V$$

$$R_{BB} = (R_{B1} // R_{B2}) = (100k // 50k) = 33,3k\Omega$$



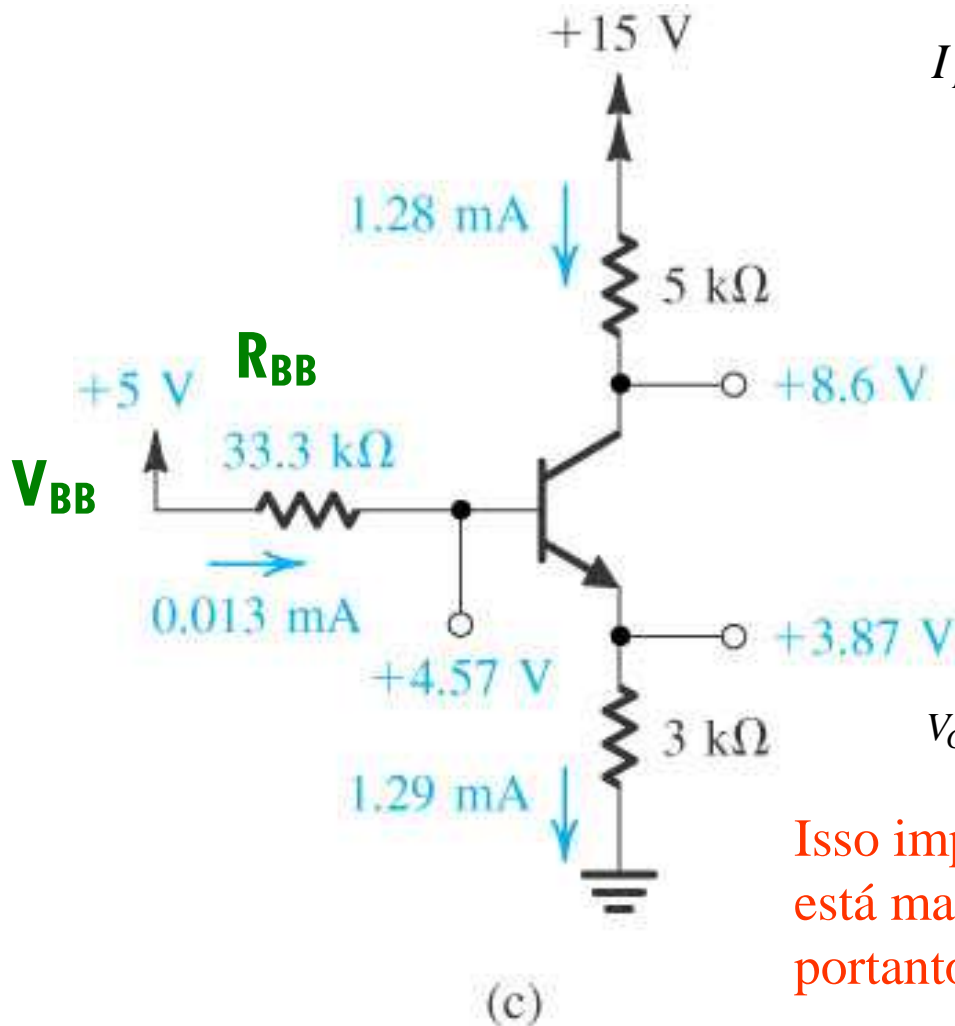
(a)

Thévenin
→



(b)

Exemplo 5.10 Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar todas as tensões nodais e todas as correntes nos ramos. Suponha $\beta = 100$.



$$V_{BB} = I_B R_{BB} + V_{BE} + I_E R_E$$

$$I_B = \frac{I_E}{\beta + 1}$$

$$I_E = \frac{5 - 0,7}{3 + (33,3/101)} = 1,29 \text{ mA}$$

$$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + [R_{BB}/(\beta + 1)]}$$

$$I_B = \frac{1,29}{101} = 0,0128 \text{ mA}$$

$$V_B = V_{BE} + I_E R_E$$

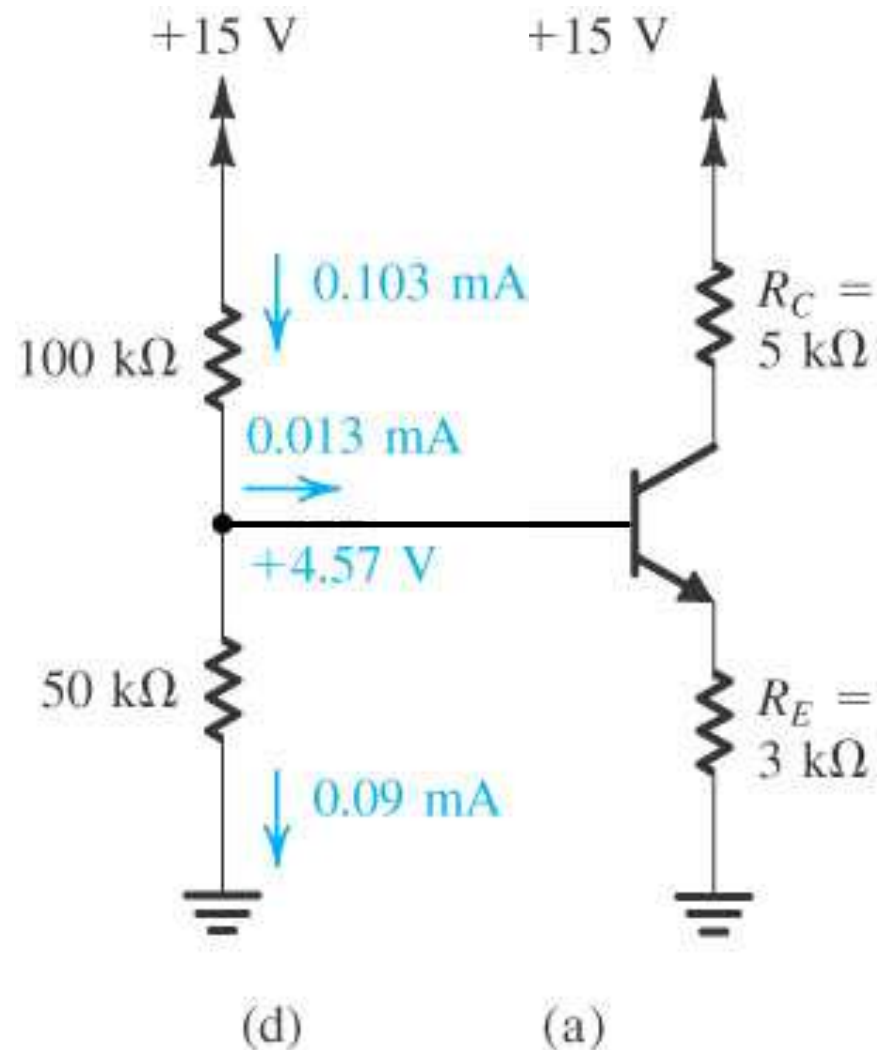
$$= 0,7 + 1,29 \times 3 = 4,57 \text{ V}$$

$$I_C = \alpha I_E = 0,99 \times 1,29 = 1,28 \text{ mA}$$

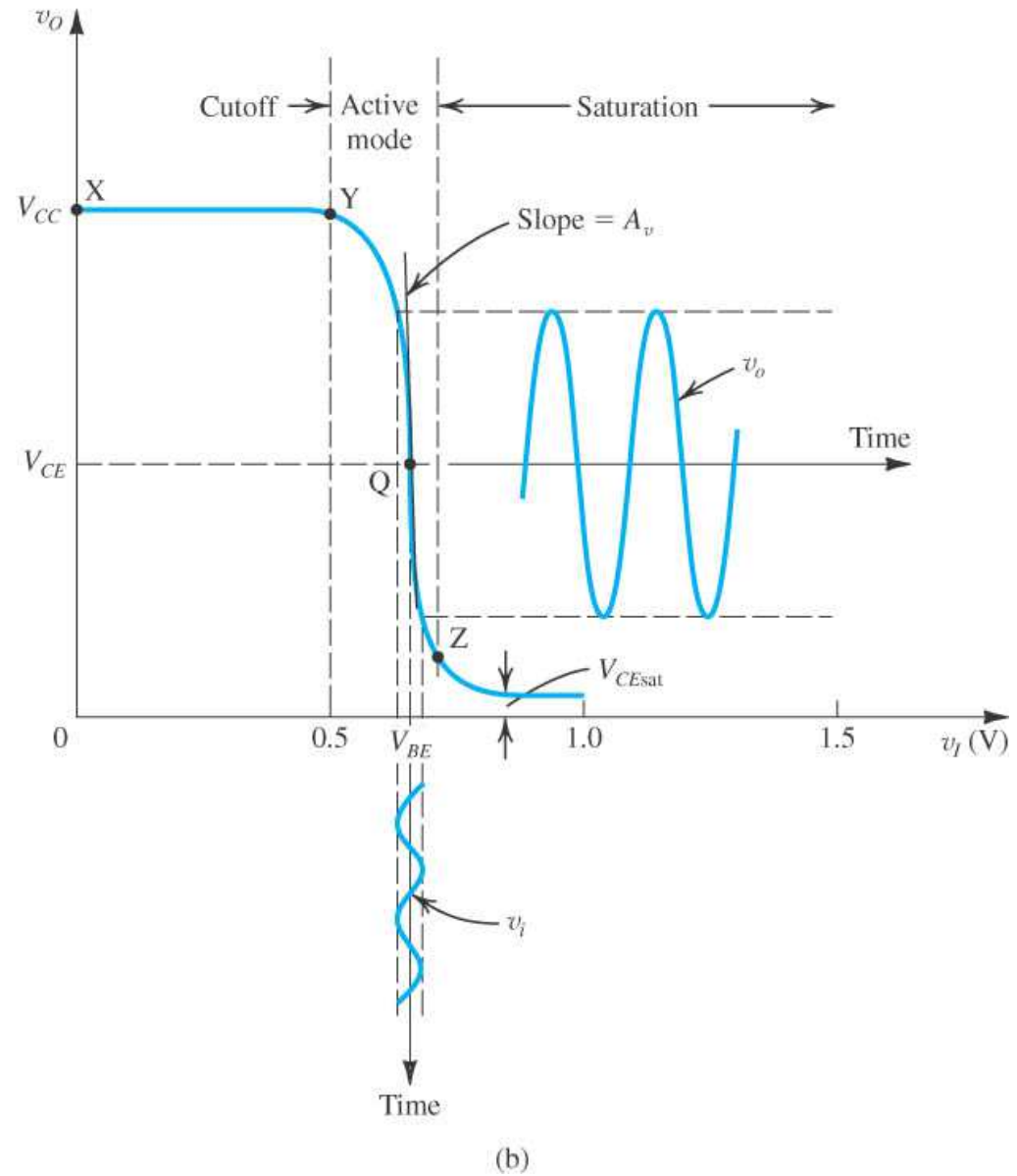
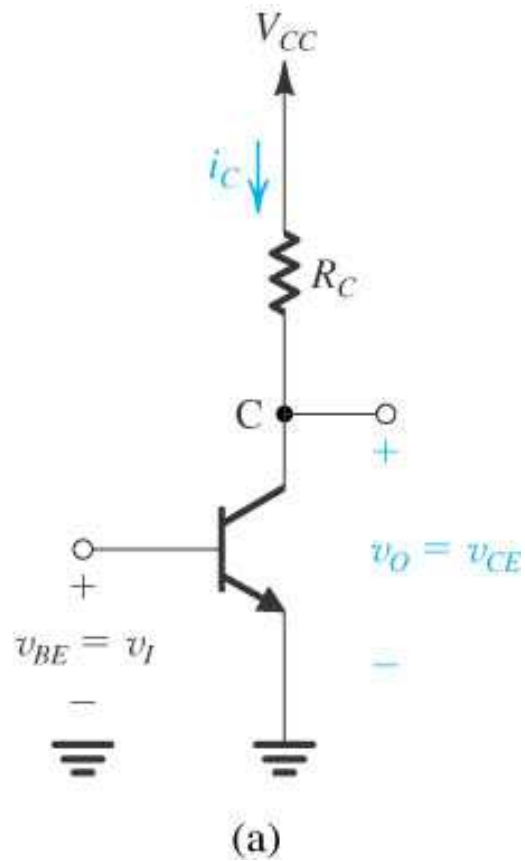
$$V_C = +15 - I_C R_C = 15 - 1,28 \times 5 = 8,6 \text{ V}$$

Isso implica que o potencial no coletor está mais alto do que a base de 4,03 V, portanto, o transistor está no modo ativo

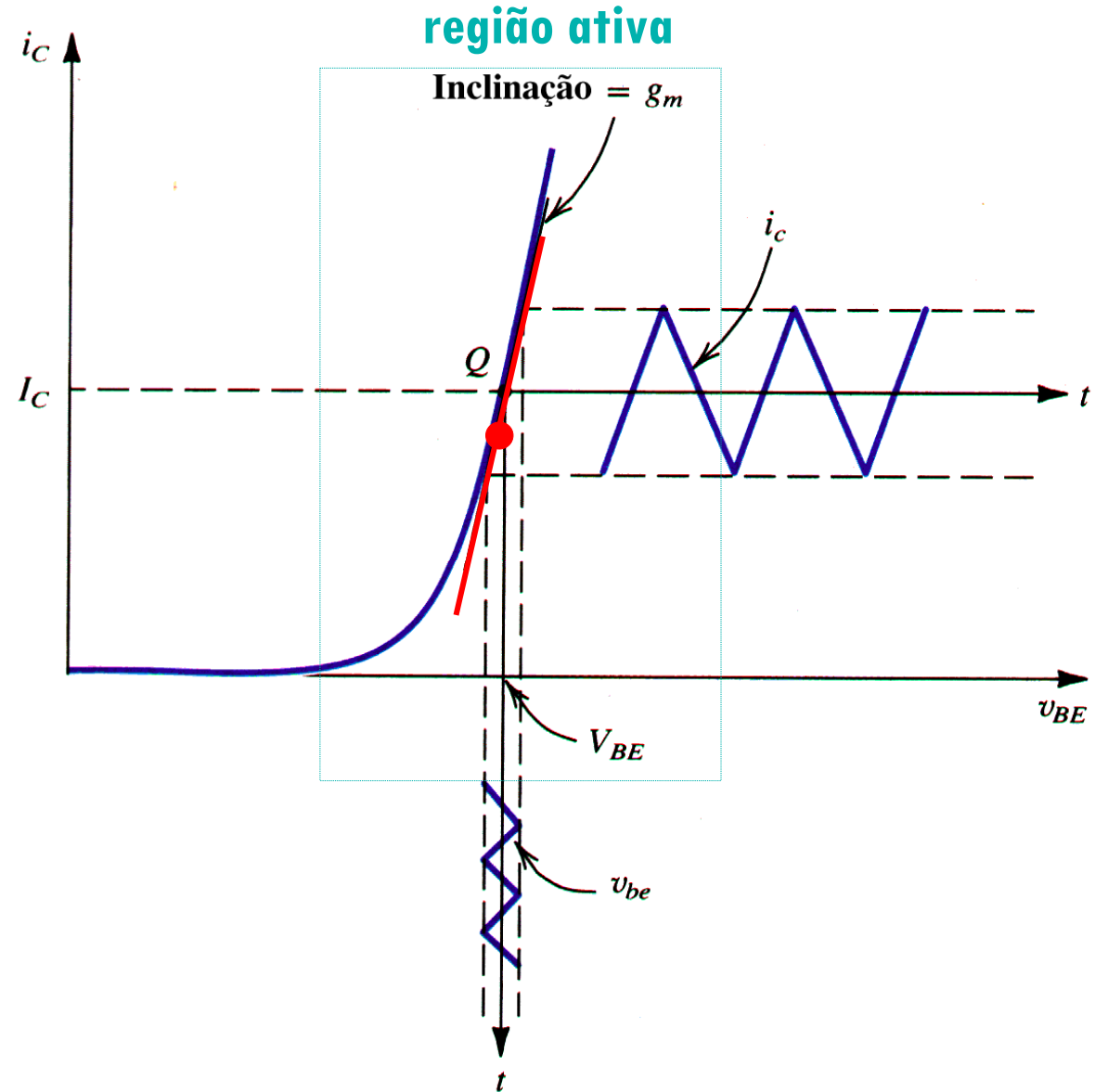
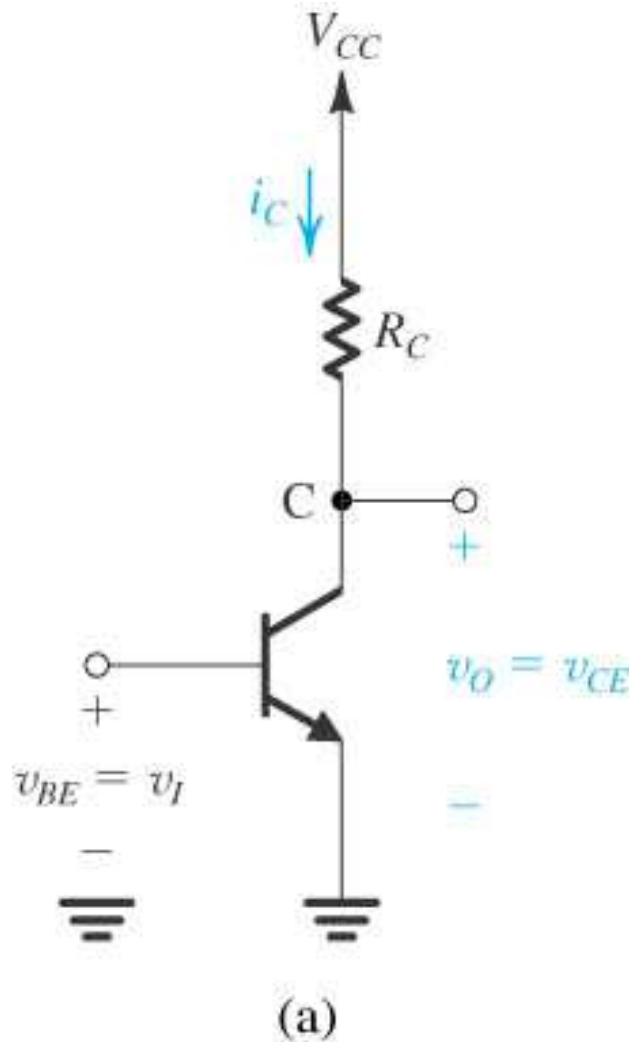
Exemplo 5.10 Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar todas as tensões nodais e todas as correntes nos ramos. Suponha $\beta = 100$.



5.6 0 Transistor TBJ como Amplificador



Criando um Modelo para Pequenos Sinais para o Transistor TBJ



Criando um Modelo para Pequenos Sinais para o Transistor TBJ: A transcondutância

Entrada: $v_{BE} = V_{BE} + v_{be}$

Saída: $i_C = I_C + i_c$

$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T}$$

$$i_C = I_S e^{(V_{BE} + v_{be})/V_T} = I_S e^{V_{BE}/V_T} e^{v_{be}/V_T} = I_C e^{v_{be}/V_T}$$

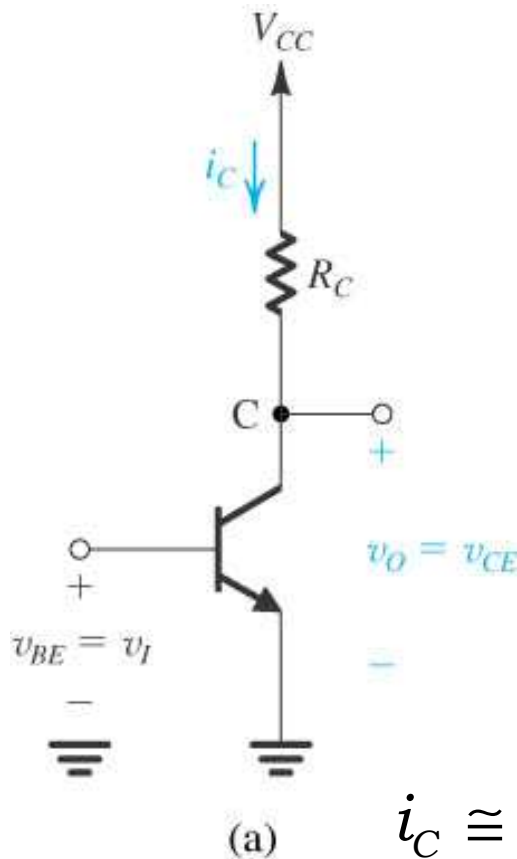
Expandindo e^{v_{be}/V_T} em série de Taylor:

$$e^{v_{be}/V_T} = \left(1 + \frac{v_{be}}{V_T} + \frac{v_{be}^2}{2V_T^2} + \dots \right)$$

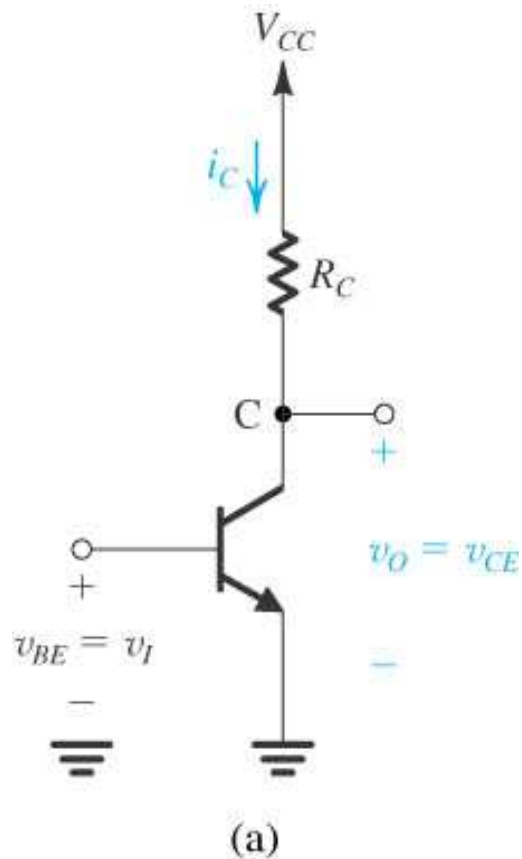
$$i_C = I_C e^{v_{be}/V_T} = I_C \left(1 + \frac{v_{be}}{V_T} + \frac{v_{be}^2}{2V_T^2} + \dots \right)$$

$$i_C \cong I_C \left(1 + \frac{v_{be}}{V_T} \right) \quad \text{se} \quad \frac{v_{be}^2}{2V_T^2} \ll \frac{v_{be}}{V_T} \quad \text{ou} \quad v_{be} \ll 2V_T$$

$$v_{be} < 10\text{mV}$$



Criando um Modelo para Pequenos Sinais para o Transistor TBJ: A transcondutância



Entrada: $v_{BE} = V_{BE} + v_{be}$

Saída: $i_C = I_C + i_c$

$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T}$$

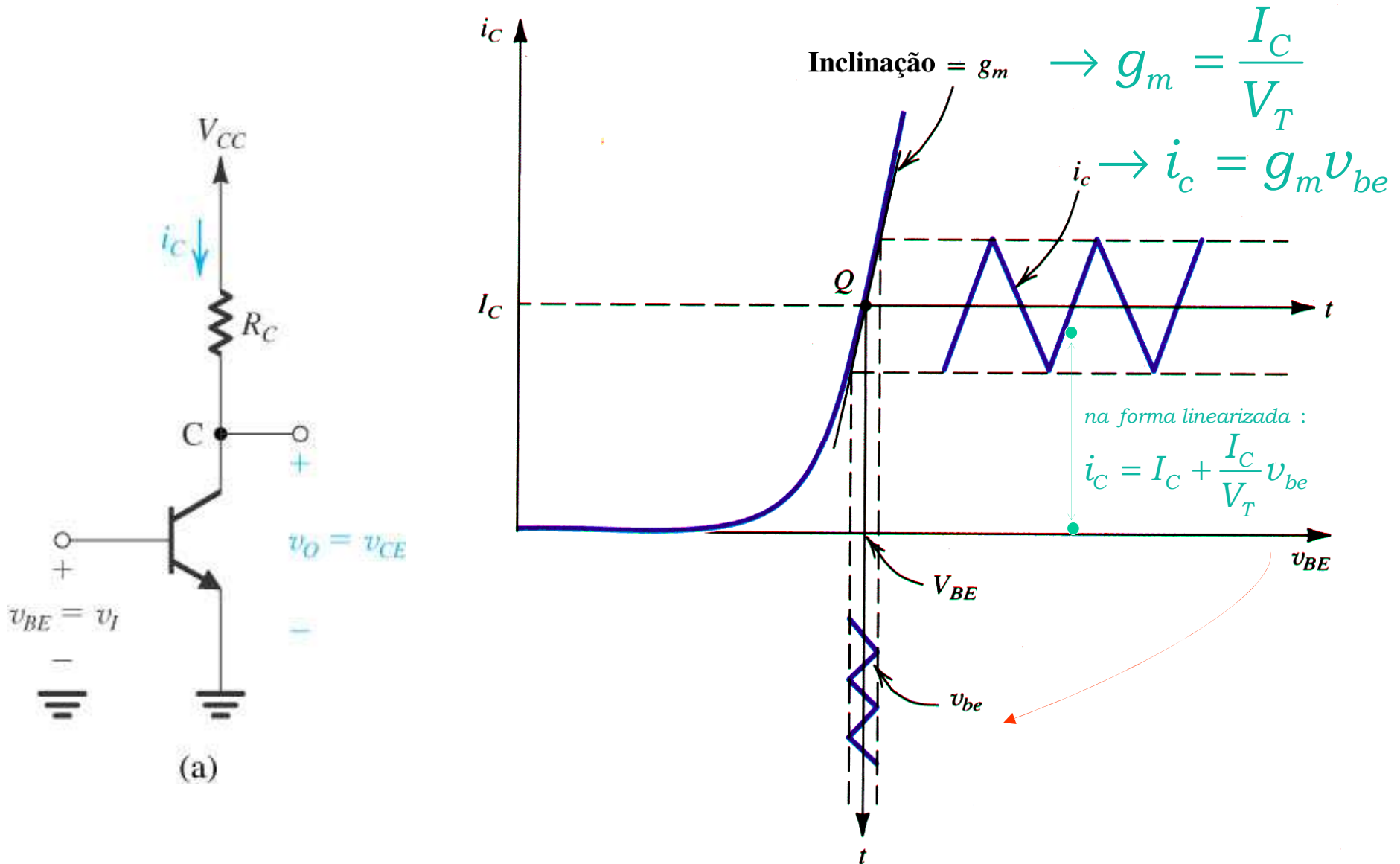
$$i_C \cong I_C \left(1 + \frac{v_{be}}{V_T} \right) \quad \text{Se } v_{be} < 10\text{mV}$$

$$i_C = I_C + i_c \cong I_C \left(1 + \frac{v_{be}}{V_T} \right) = I_C + I_C \frac{v_{be}}{V_T}$$

$$i_C = I_C + \frac{I_C}{V_T} v_{be} \quad \text{e} \quad i_c = \frac{I_C}{V_T} v_{be}$$

$$\therefore \frac{i_c}{v_{be}} = \frac{I_C}{V_T} = g_m \quad \text{ou seja, } i_c = g_m v_{be}$$

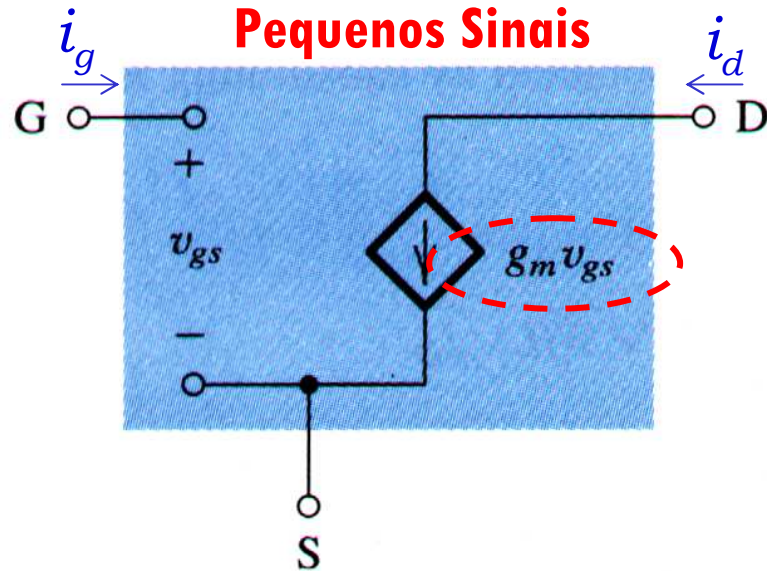
Criando um Modelo para Pequenos Sinais para o Transistor TBJ: A transcondutância



Criando um Modelo para Pequenos Sinais para o Transistor TBJ: A transcondutância

FET

Pequenos Sinais

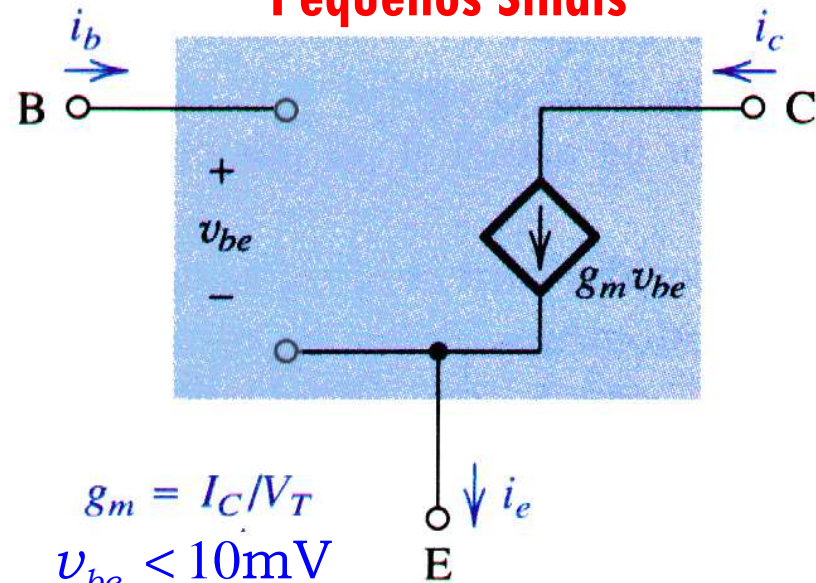


$$g_m = \frac{\partial i_{DS}}{\partial v_{GS}} = k'_n \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_t)$$

$$i_d = g_m v_{gs}$$

Bipolar

Pequenos Sinais



$$g_m = I_C / V_T$$

$$v_{be} < 10\text{mV}$$



CAPITULO 5

Amplificadores com Transistores

Aula 2

PSI 2306 – Eletrônica

Programação para a Primeira Prova

Aula	Matéria	Capítulo/ página (inglês)
1 ^a	Revisão de transistor bipolar de junção - TBJ (funcionamento interno e expressões básicas) - Exemplo 5.4 O TBJ como amplificador para pequenos sinais (as condições c.c., a corrente de coletor e a transcondutância)	Sedra, Cap. 5, p. 235-240 (277-285); p. 263-264 (421-423); p. 275-276 (443-445).
2 ^a	A corrente de base e a resistência de entrada da base, a resistência de entrada do emissor. Ganho de tensão, Exemplo 5.38, modelos equivalentes (modelos π -híbrido e T)	Sedra, Cap. 5, p. 276-279 (445-450)
3 ^a	Aplicação dos modelos equivalentes para pequenos sinais, Efeito Early, Exemplo 5.14 O amplificador emissor comum (EC) - Exercício 5.43	Sedra, Cap. 5 p. 290-293 (467-470)
4 ^a	O amplificador em emissor comum com resistência de emissor. Exercício 5.44	Sedra, Cap. 5 p. 293-296 (470-474)
5 ^a	O amplificador em base comum. O Amplificador em coletor comum. Exercício 5.47	Sedra, Cap. 5 p. 296-301 (475-484)
6 ^a	Resposta em frequência dos circuitos RC Pólos e zeros, funções de primeira ordem, curvas de Bode (pólo simples, zero simples). Exemplo E.1, exemplo E.2	Sedra, Apend. D, p. 823-825 (D6-D9) Sedra, Apend. E, p.830-833 (E1-E6)
7 ^a	Teorema de Miller. Exemplo 6.7 Resposta em alta frequência do Emissor Comum Exemplo 5.18	Sedra, Cap. 6, p. 363-364 (578-580) Sedra, Cap. 5, p. 306-310 (491-497)
8 ^a	Resposta em baixa frequência do Emissor Comum Exemplo 5.19	Sedra, Cap. 5, p. 310-314 (497-503)
9 ^a	Resposta em alta e baixa frequência do Fonte Comum Exemplo 4.12	Sedra, Cap. 4, p. 202-208 (326-335)
10 ^a	Aula de Exercícios	
1^a. Semana de provas		
Data:		

2ª Aula:

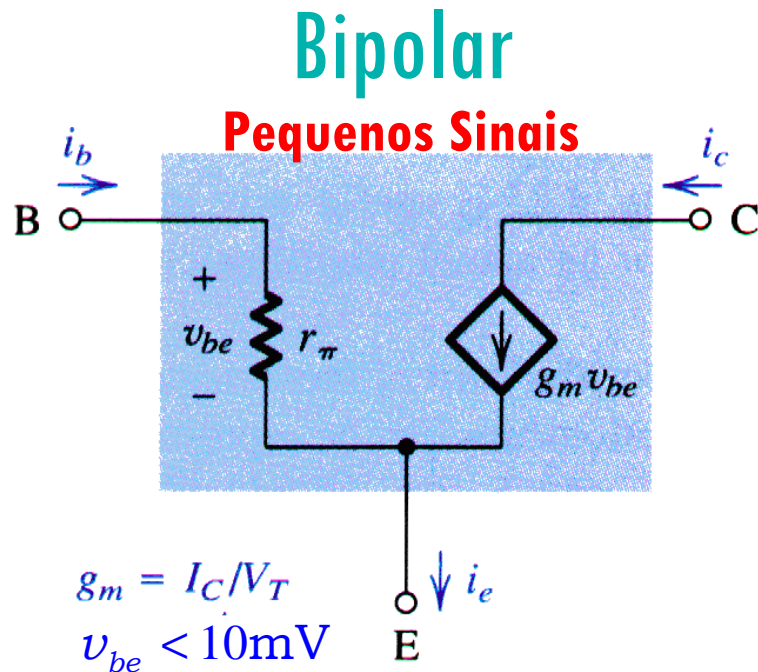
Estudo de Amplificadores com TBJ

Criando Modelos para Pequenos Sinais para o TBJ

Ao final desta aula você deverá estar apto a:

- **Explicar os principais parâmetros que definem um circuito amplificador (ganhos e impedâncias)**
- **Construir modelos para pequenos sinais para o transistor TBJ**
- **Analisar e projetar circuitos de polarização empregando modelos para pequenos sinais para o TBJ**
- **Esboçar as formas de onda em circuitos amplificadores básicos com TBJ**

O Modelo para Pequenos Sinais para o Transistor TBJ: a resistência r_π



$i_b \neq 0!!! \rightarrow$ resistência entre b e e
estabelecer uma relação entre v_{be} e i_b (resistência)

$$i_C = I_C + i_c = I_C + \frac{I_C}{V_T} v_{be}$$

$$i_B = \frac{I_C}{\beta} + \frac{i_c}{\beta} = \frac{I_C}{\beta} + \frac{1}{\beta} \frac{I_C}{V_T} v_{be}$$

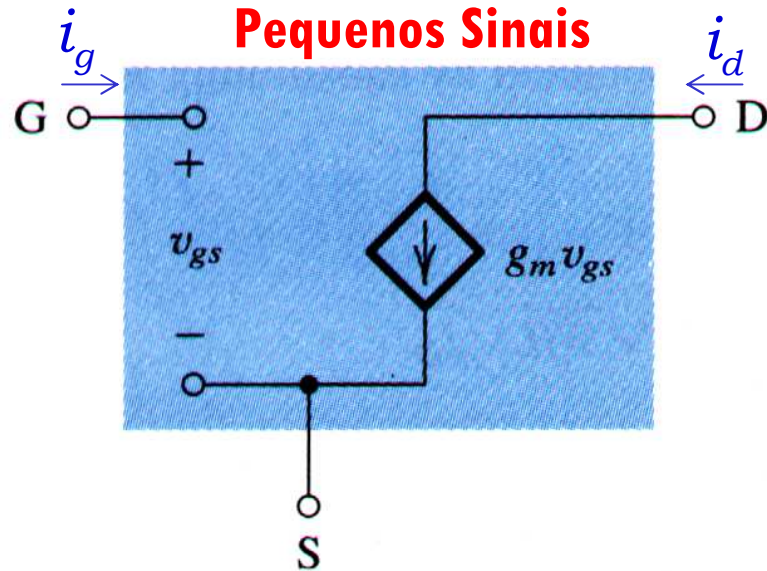
$$i_b = \frac{1}{\beta} \frac{I_C}{V_T} v_{be} = \frac{g_m}{\beta} v_{be} \rightarrow r_\pi = \frac{\beta}{g_m}$$

$$v_{be} = r_\pi i_b$$

O Modelo para Pequenos Sinais para o Transistor TBJ: a resistência r_π

FET

Pequenos Sinais

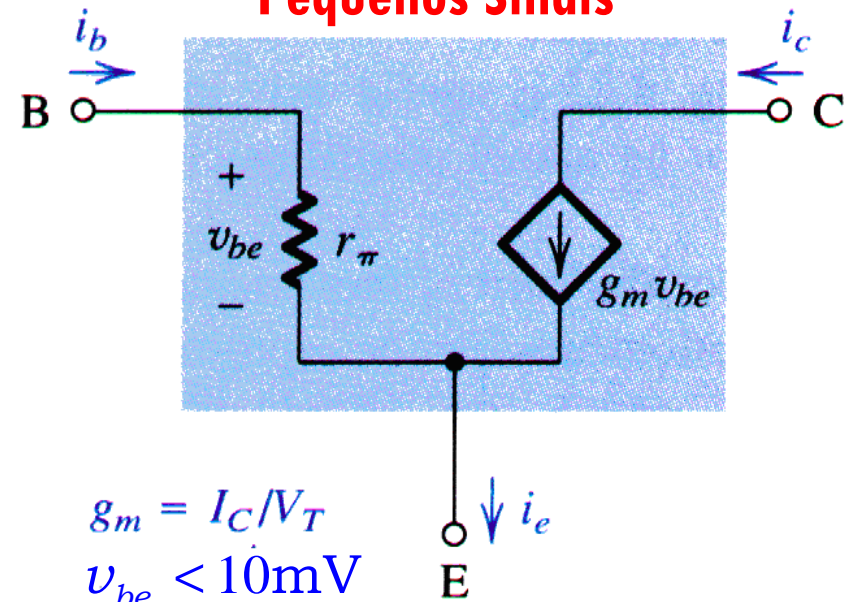


$$g_m = \frac{\partial i_{DS}}{\partial v_{GS}} = k'_n \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_t)$$

$$i_d = g_m v_{gs}$$

Bipolar

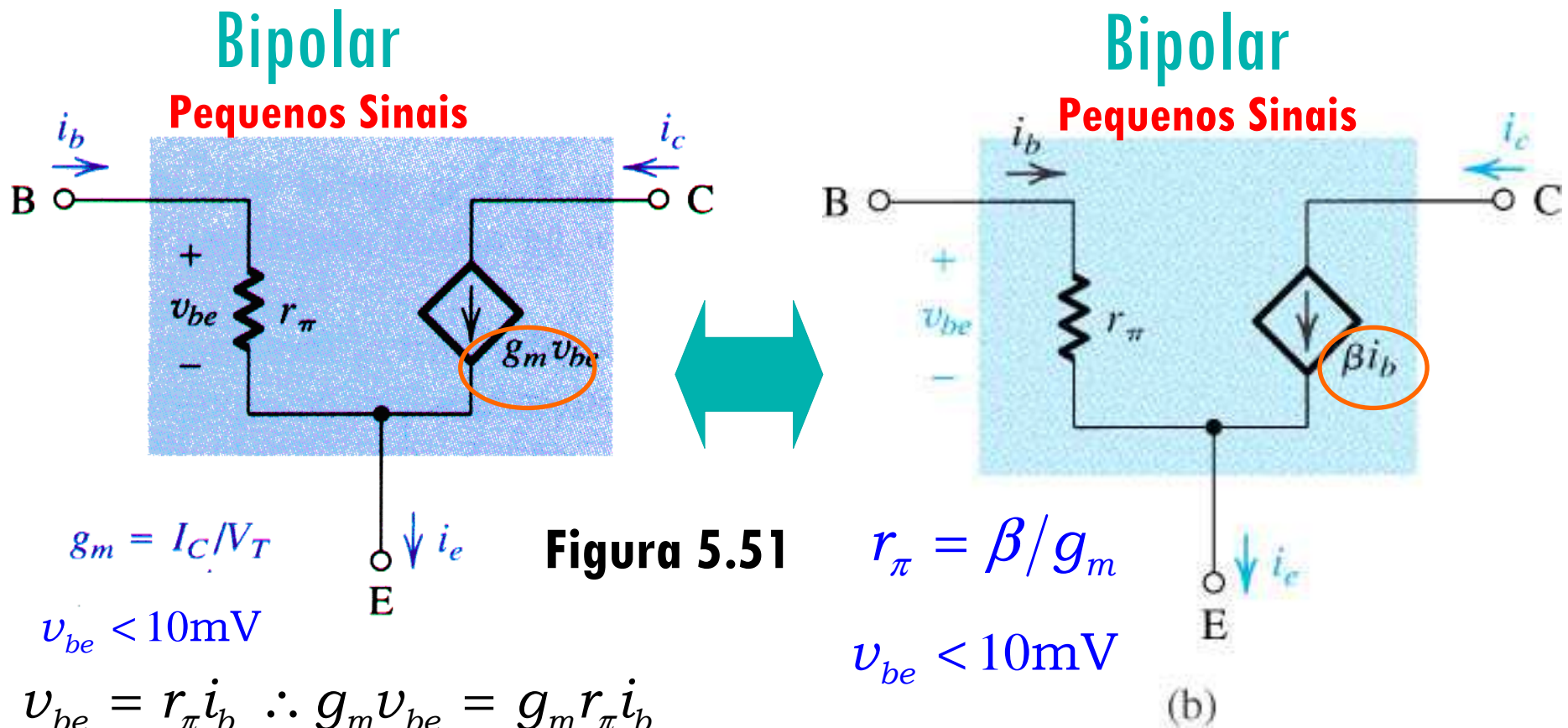
Pequenos Sinais

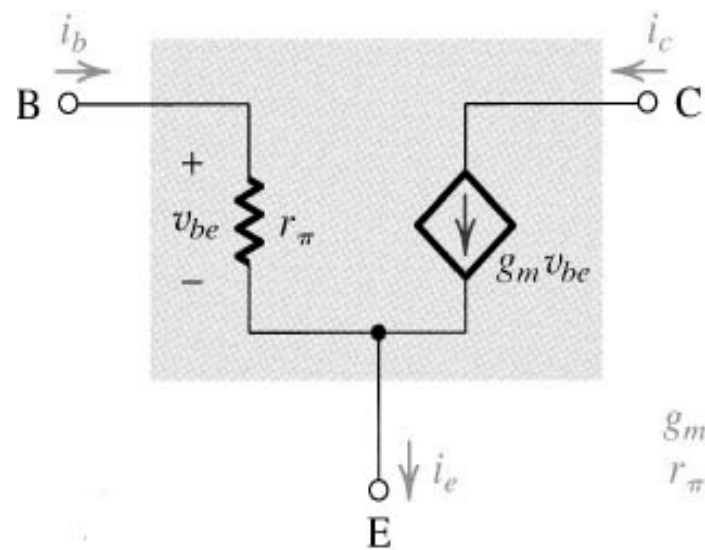


$$g_m = I_C / V_T$$

$$v_{be} < 10\text{mV}$$

O Modelo para Pequenos Sinais para o Transistor TBJ: a resistência r_π

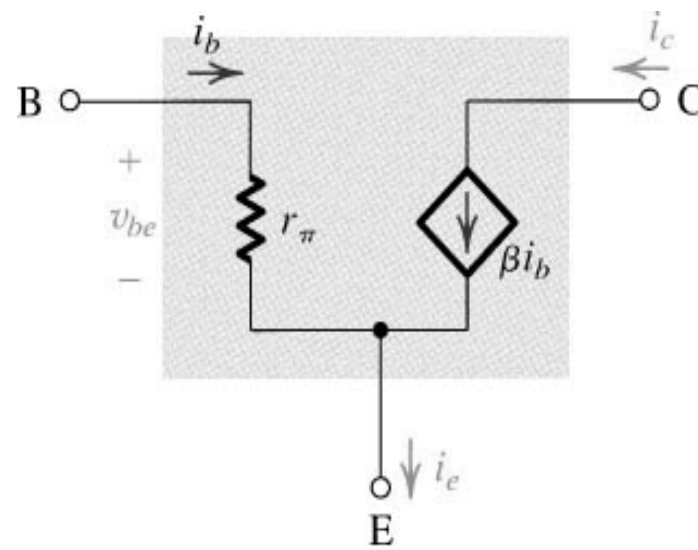




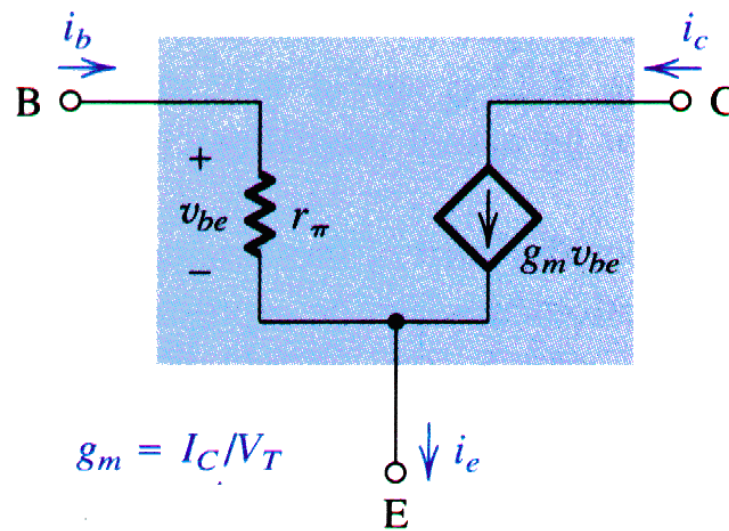
$$g_m = I_C / V_T$$

$$r_\pi = \beta / g_m$$

(a)



(b)



$$g_m = I_C / V_T$$

Figura 5.51

Exemplo 5.14: Desejamos analisar o circuito abaixo (Fig.5.53.a) para determinar seu ganho de tensão. Suponha $\beta = 100$

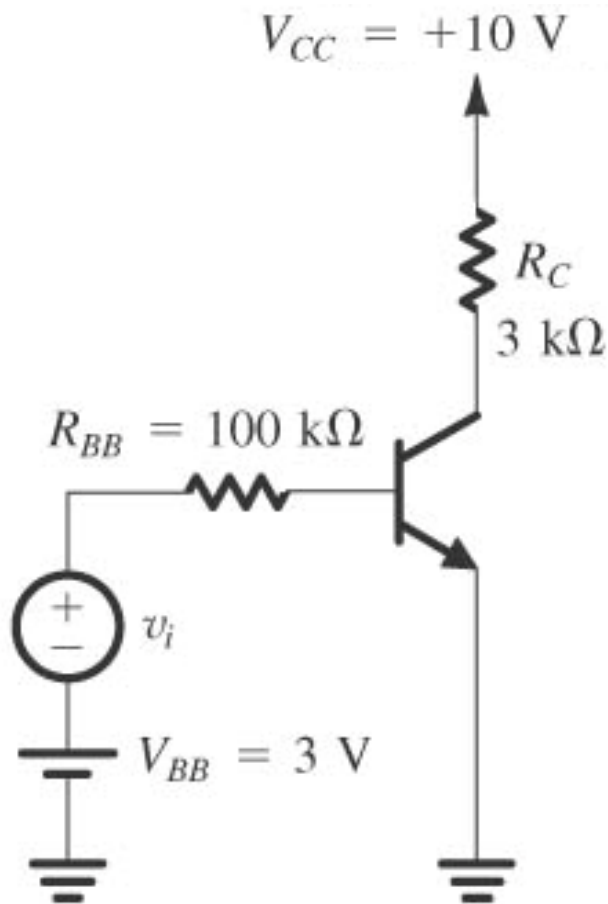


Fig.5.53.a

Estratégia de análise:

1. Determine o ponto de operação cc do TBJ e em particular o valor da corrente cc de coletor, I_C
2. Calcule os valores dos parâmetros do modelo para pequenos sinais: $g_m = I_C / V_T$ e $r_\pi = \beta / g_m$
3. Elimine as fontes cc substituindo cada fonte cc de tensão por um curto-circuito e cada fonte cc de corrente por um circuito aberto.
4. Substitua o TBJ por um dos seus modelos equivalentes. Embora qualquer um dos modelos possa ser utilizado, um deles deve ser mais conveniente dependendo do circuito a ser analisado.
5. Analise o circuito resultante para determinar as grandezas de interesse (por exemplo, ganho de tensão, resistência de entrada).

Exemplo 5.14: Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar seu ganho de tensão. Suponha $\beta = 100$

1. Determine o ponto de operação *cc* do TBJ e em particular o valor da corrente *cc* de coletor, I_C (com $v_i = 0$)

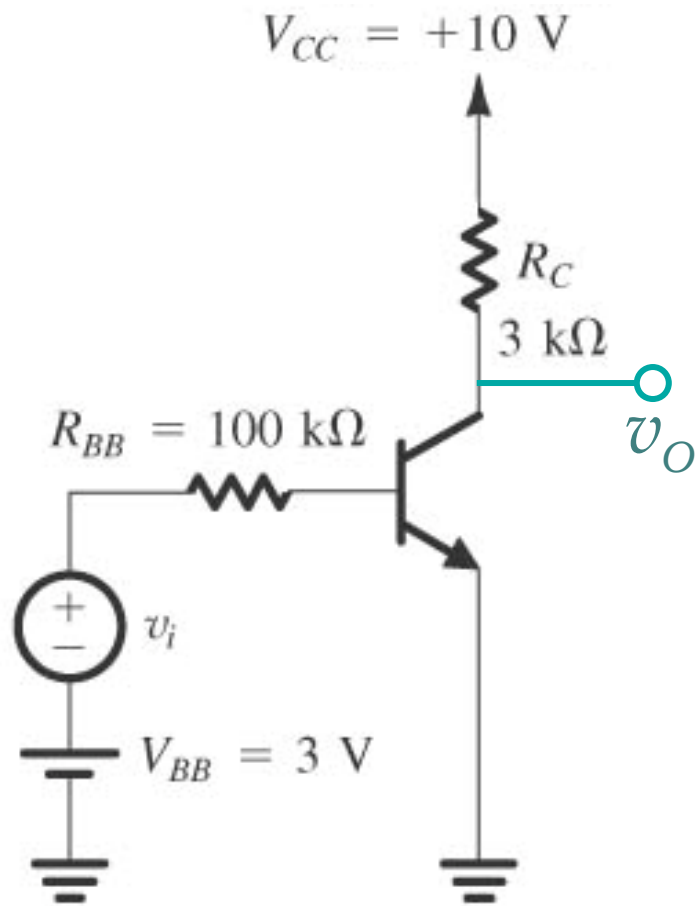


Fig.5.53.a

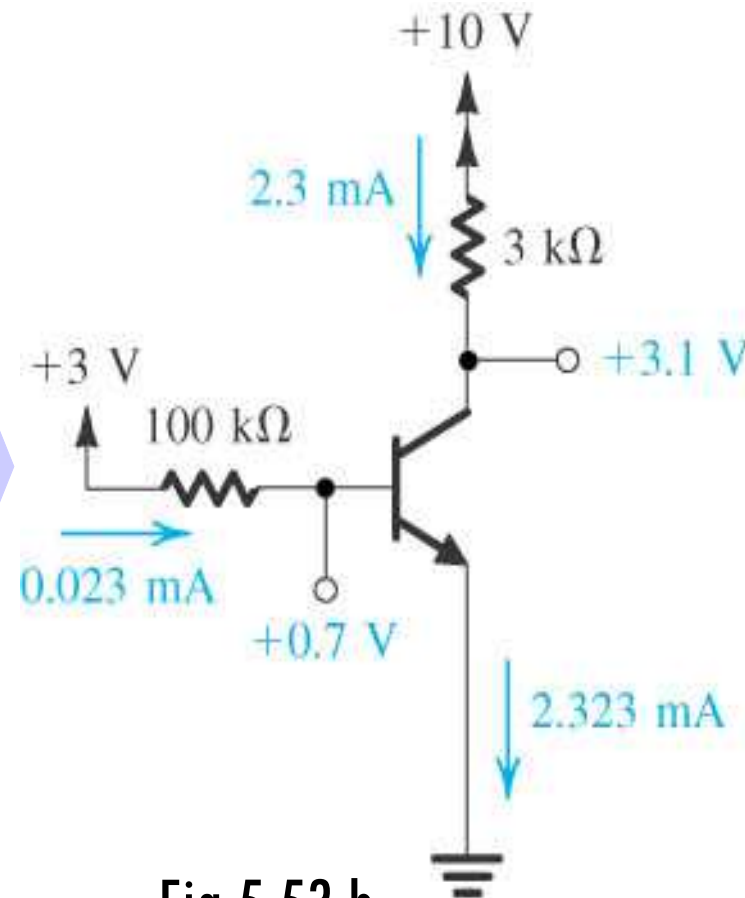
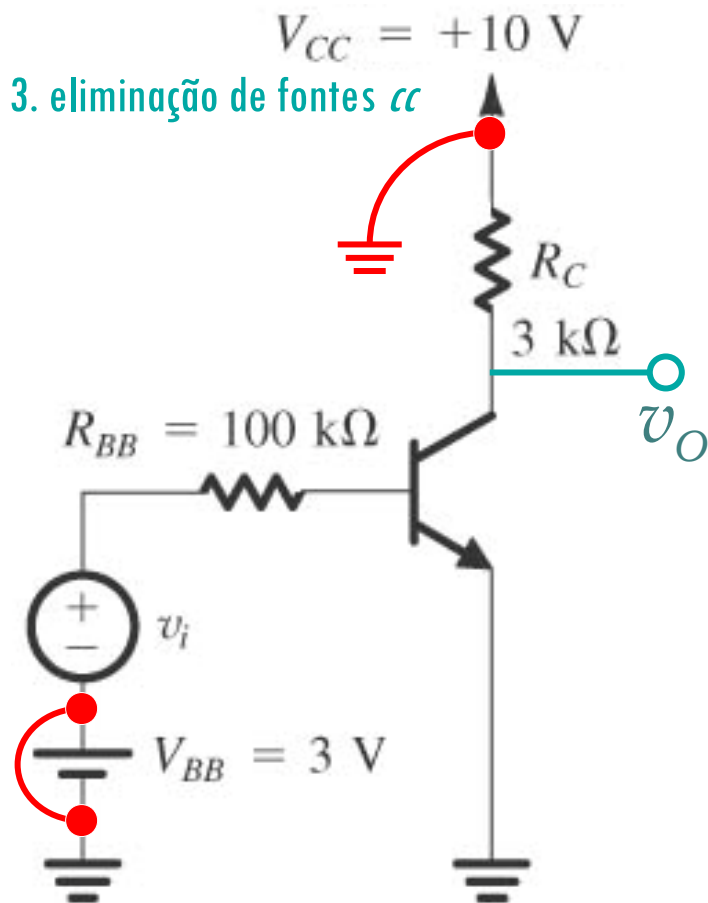


Fig.5.53.b

Exemplo 5.14: Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar seu ganho de tensão. Suponha $\beta = 100$

2. Calcule os valores dos parâmetros do modelo para pequenos sinais: $g_m = I_C / V_T$ e $r_\pi = \beta / g_m$
3. Elimine as fontes cc substituindo cada fonte cc de tensão/corrente por curto-circuitos/circuitos abertos
4. Substitua a TBJ por um dos seus modelos equivalentes

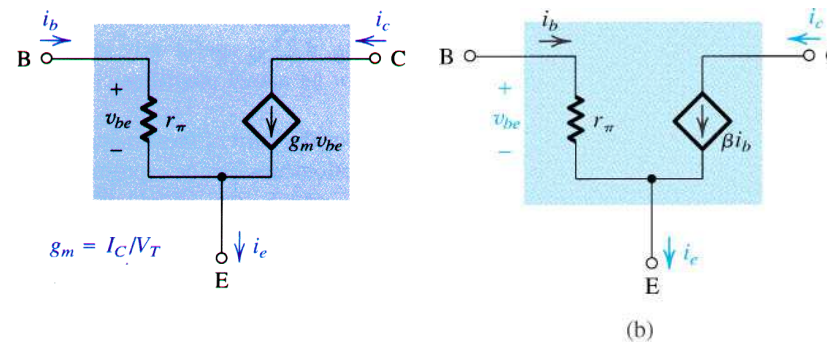


2. parâmetros

$$g_m = I_C / V_T = 2,3 \text{ mA} / 25 \text{ mV} = 92 \text{ mA/V}$$

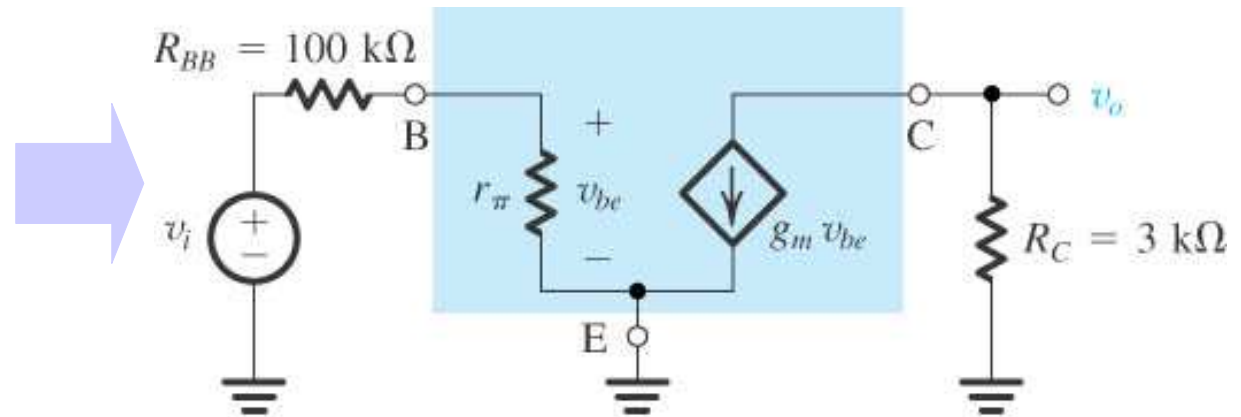
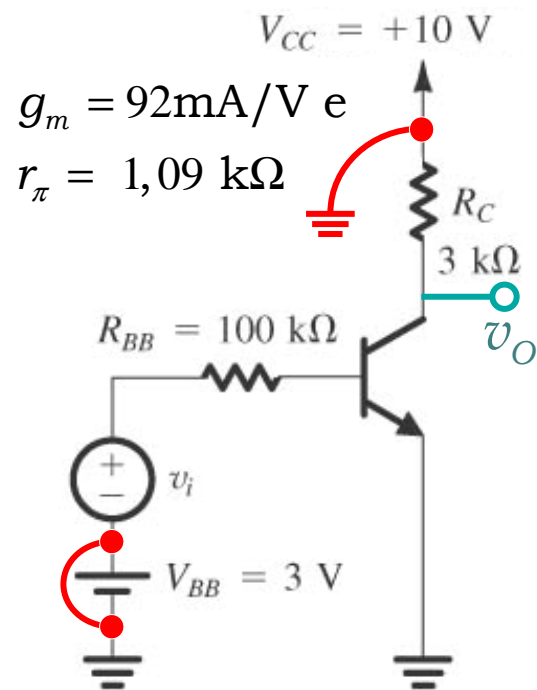
$$r_\pi = \beta / g_m = 100 / 92 \text{ mA/V} = 1,09 \text{ k}\Omega$$

4. modelos



Exemplo 5.14: Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar seu ganho de tensão. Suponha $\beta = 100$

5. Analise o circuito resultante para determinar as grandezas de interesse (por exemplo, ganho de tensão, resistência de entrada).



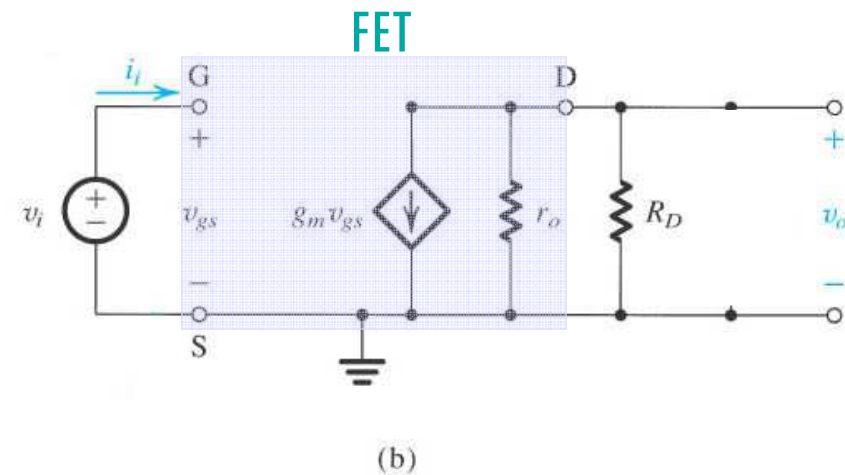
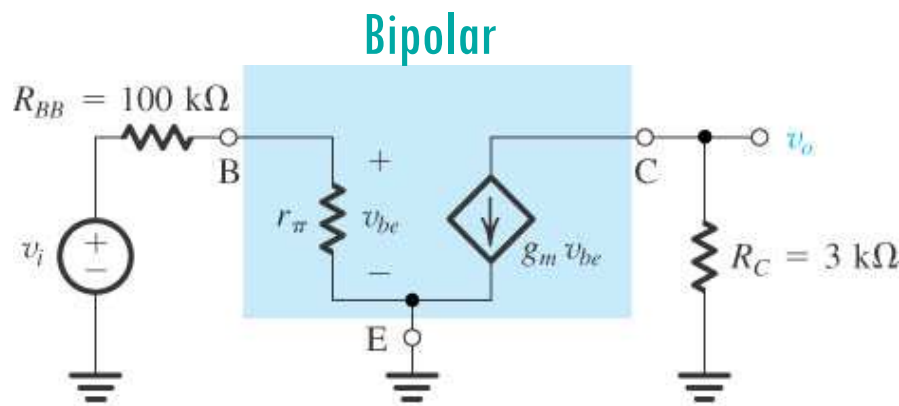
$$v_o = -g_m v_{be} \times R_C \quad v_{be} = \frac{r_\pi}{R_{BB} + r_\pi} v_i$$

$$A_v \Big|_{\text{Carga}=\infty} = \frac{v_o}{v_i} \Big|_{\text{Carga}=\infty} = -\frac{r_\pi}{R_{BB} + r_\pi} g_m R_C$$

$$A_v \Big|_{\text{Carga}=\infty} = -\frac{1,09}{100 + 1,09} 92m \times 3k = -2,98 \frac{V}{V}$$

Exemplo 5.14: Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar seu ganho de tensão. Suponha $\beta = 100$

5. Analise o circuito resultante para determinar as grandezas de interesse (por exemplo, ganho de tensão, resistência de entrada).



$$v_{be} = v_i \frac{r_{\pi}}{r_{\pi} + R_{BB}} = v_i \frac{1,09}{101,09} = 0,011v_i$$

$$v_o = -g_m v_{be} R_C = -92 \times 0,011v_i \times 3 = -3,04v_i$$

$$A_v \Big|_{c \arg a = \infty} = \frac{v_o}{v_i} \Big|_{c \arg a = \infty} = -3,04 \text{ V/V}$$

onde o sinal menos indica uma inversão de fase.

Exemplo 5.15: A fim de nos habituarmos mais um pouco com a operação de amplificadores com transistor, vamos considerar as formas de onda em vários pontos do circuito analisado no exemplo anterior. Para isso suponha que v_i tem uma forma de onda triangular. Determine primeiro a amplitude máxima permitida a v_i . Depois, com a amplitude de v_i em seu valor máximo, determine as formas de onda de $i_B(t)$, $v_{BE}(t)$, $i_C(t)$ e $v_C(t)$.

Uma restrição à amplitude do sinal v_i é a aproximação para pequenos sinais, a qual estipula que v_{be} não deve exceder cerca de 10 mV. Se tomarmos v_{be} como uma onda triangular de 20 mV de pico a pico e trabalharmos de trás para frente, a Equação (4.49) pode ser usada para determinar o valor máximo de pico possível para v_i ,

$$\hat{V}_i = \frac{\hat{V}_{be}}{0,011} = 0,91 \text{ V}$$

Para verificar se o transistor permanece ou não no modo ativo quando v_i tem um valor de pico de $\hat{V}_i = 0,91 \text{ V}$, devemos determinar o valor da tensão de coletor. A tensão de coletor se constituirá de uma onda triangular v_C sobreposta a um valor $V_C = 3,1 \text{ V}$.

A tensão de pico da forma de onda triangular será:

$$\hat{V}_C = \hat{V}_i \times \text{ganho} = 0,91 \times 3,04 = 2,77 \text{ V}$$

Isso implica que quando a saída excursiona no sentido negativo, a tensão no coletor atinge o valor mínimo de $3,1 - 2,77 = 0,33 \text{ V}$, que é menor do que a tensão na base $\cong 0,7 \text{ V}$. Logo TBJ satura!!!!

(Cont. Exemplo 5.15) Portanto, o transistor não permanecerá no modo ativo para v_i tendo um valor de pico de 0,91 V. Podemos determinar facilmente, que é necessário neste caso, o valor máximo do pico do sinal de entrada para o qual transistor permanece no modo ativo durante todo o tempo. Isso pode ser feito calculando-se o valor de \hat{V}_i que corresponde ao valor mínimo da tensão de coletor, igual à tensão de base, que é aproximadamente 0,7 V. Logo

$$\hat{V}_i = \frac{3,1 - 0,7}{3,04} = 0,79 \text{ V}$$

Assim, vamos escolher aproximadamente 0,8 V, conforme mostrado na Figura 4.29(a), e completar a análise deste problema. O sinal da corrente de base será triangular, com um

valor de pico de $\hat{I}_b = \frac{\hat{V}_i}{R_{BB} + r_\pi} = \frac{0,8}{100 + 1,09} = 0,008 \text{ mA}$

A tensão de pico de base-emissor será: $\hat{V}_{be} = \hat{V}_i \frac{r_\pi}{r_\pi + R_{BB}} = 0,8 \frac{1,09}{100 + 1,09} = 8,6 \text{ mV}$

A componente da corrente de pico do coletor será: $\hat{I}_c = \beta \hat{I}_b = 100 \times 0,008 = 0,8 \text{ mA}$

A componente da tensão no coletor será: $\hat{V}_c = 3,04 \times 0,8 = 2,43 \text{ V}$

A Figura 5.54(e) mostra um esboço da tensão total no coletor v_c versus tempo. Observe a inversão de fase entre o sinal de entrada v_i e o sinal de saída v_c . Observe também que, embora a tensão mínima do coletor seja ligeiramente menor do que a tensão na base, o transistor permanecerá no modo ativo.

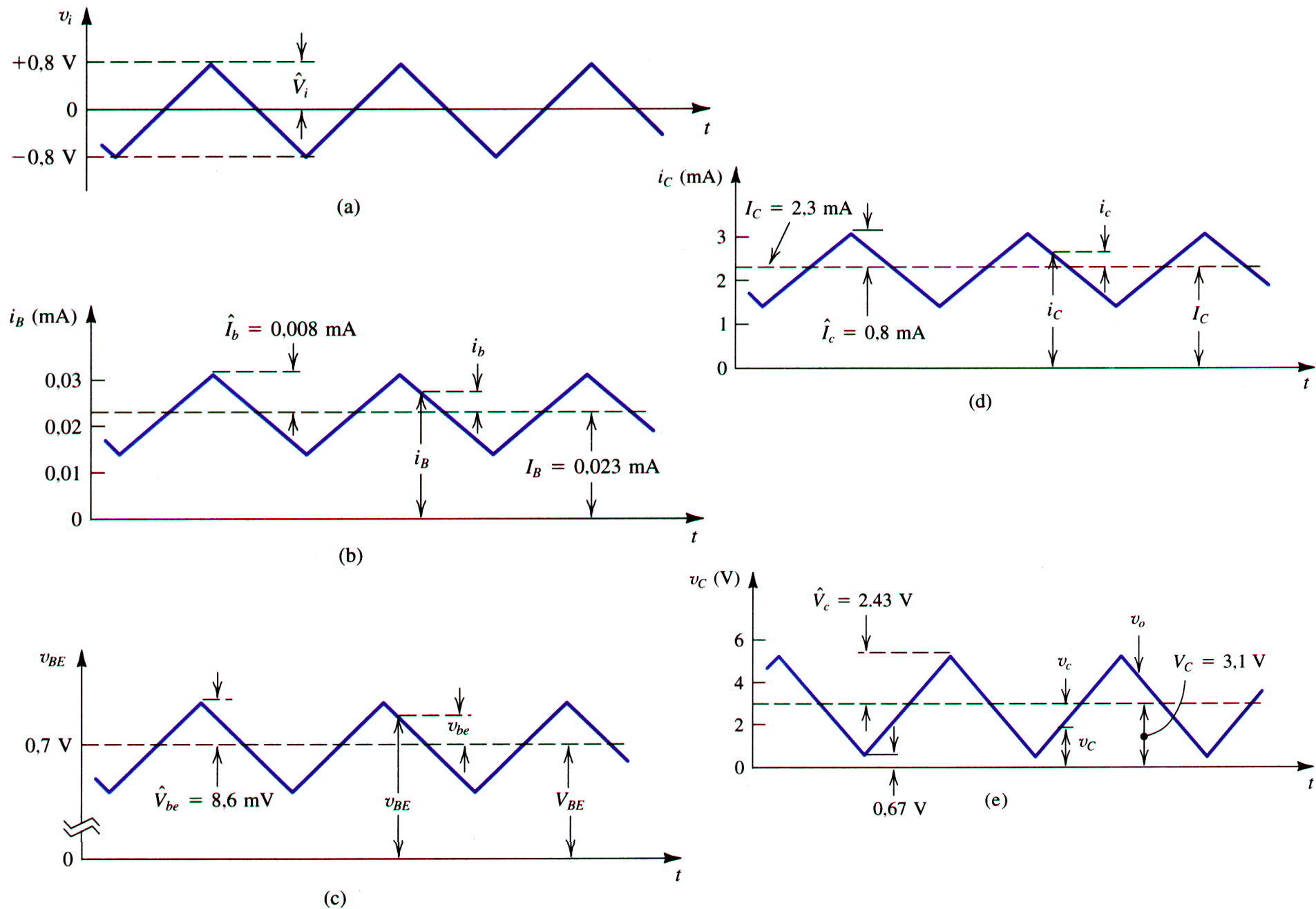


Figura 5.54 Formas de onda dos Sinais do circuito da Fig. 5.53.

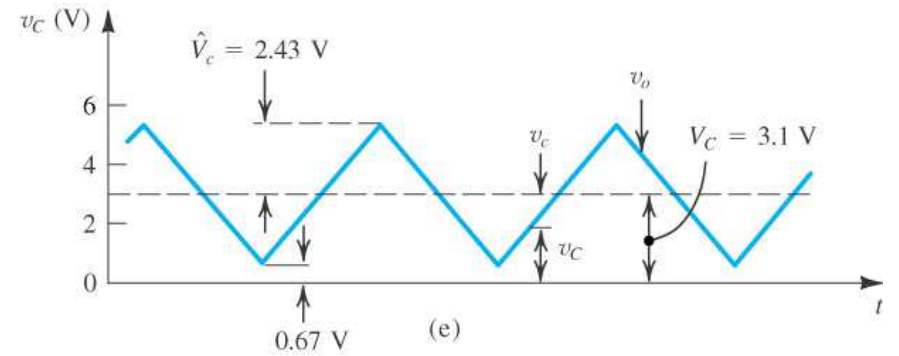
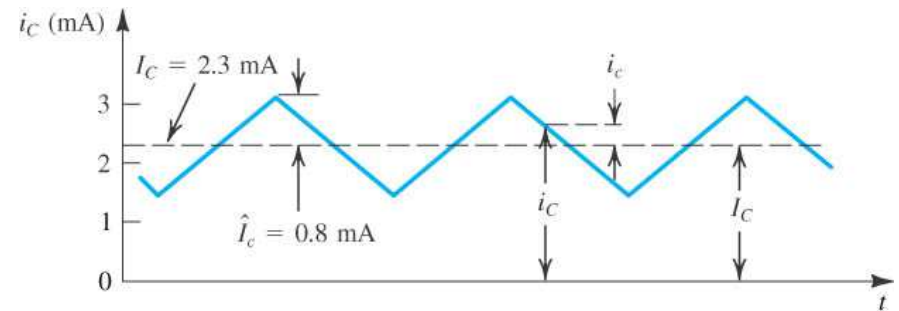
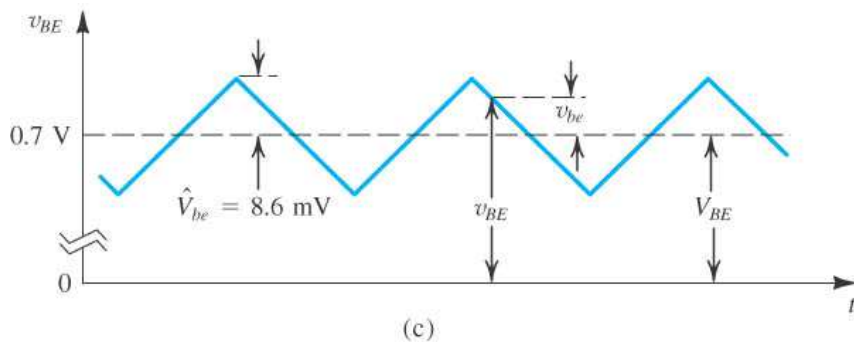
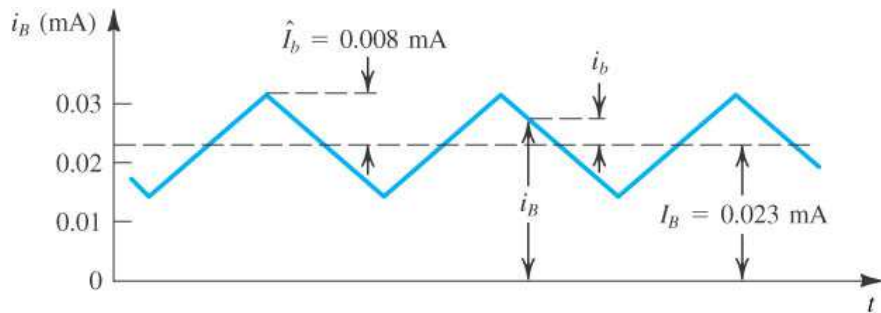
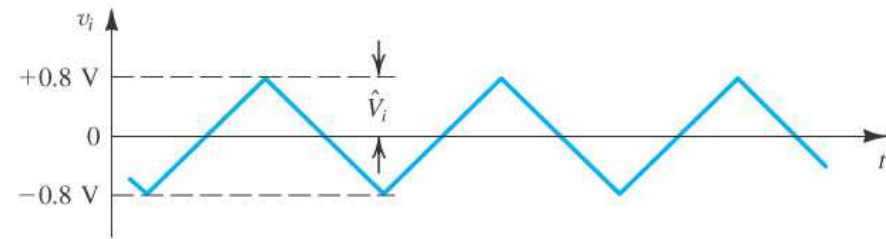
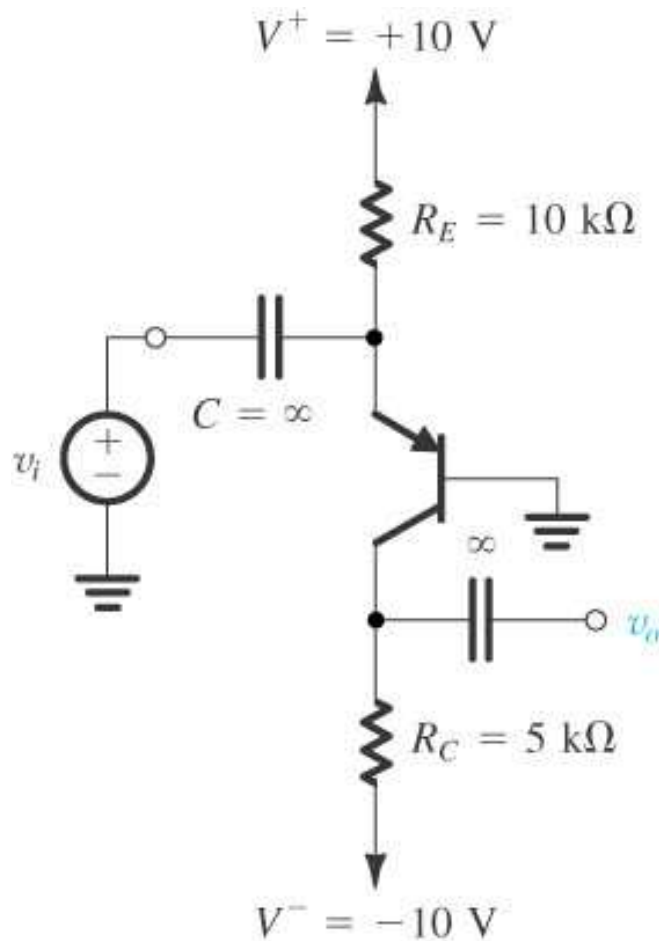


Figura 5.54 Formas de onda dos Sinais do circuito da Fig. 5.53.

Exemplo 5.16: (RECOMENDAÇÃO): Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar o ganho de tensão e as formas de onda nos vários pontos do circuito. O capacitor C é um capacitor de acoplamento cuja função é acoplar o sinal v_i ao emissor e ao mesmo tempo bloquear grandezas cc . Desse modo a polarização cc estabelecida juntamente por V^+ , V^- , R_E e R_C não será alterada quando o sinal v_i for conectado. Para o objetivo deste exemplo, suporemos C como sendo de valor infinito — isto é, agirá como um perfeito curto-circuito nas frequências de interesse e $\beta = 100$. De forma similar, um outro capacitor de valor muito alto será usado para acoplar o sinal de saída v_o para outras partes do sistema.

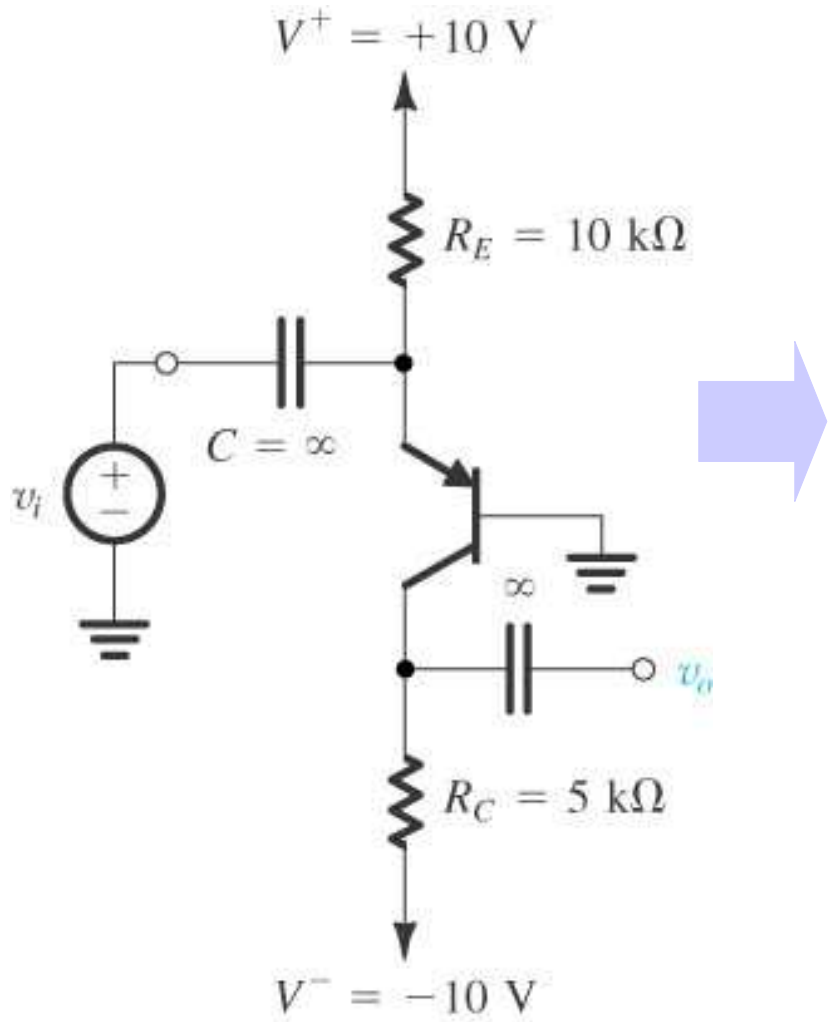


Estratégia de análise:

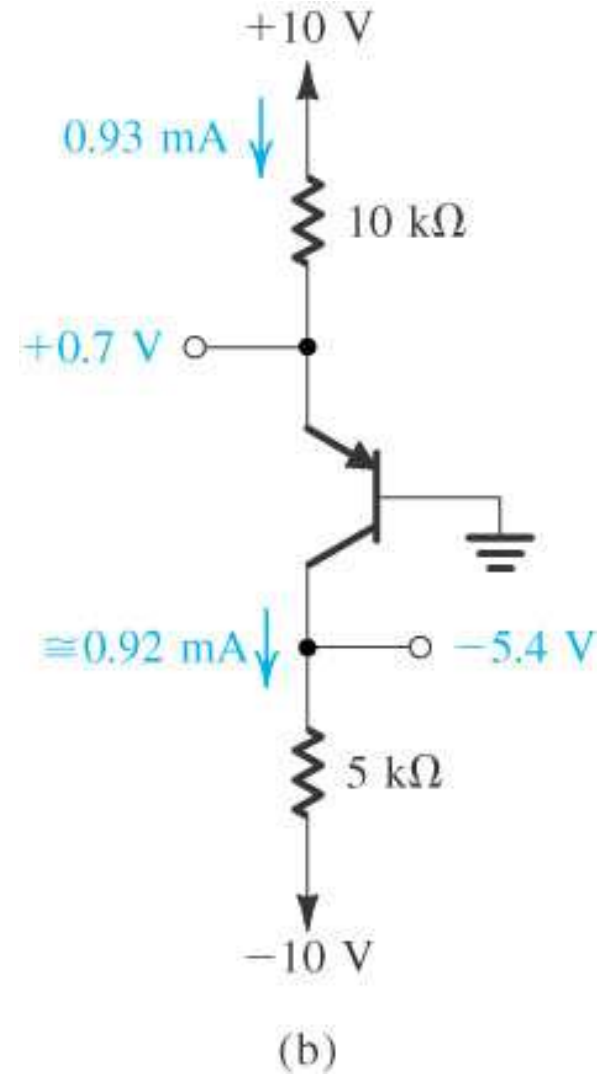
1. Determine o ponto de operação cc do TBJ e em particular o valor da corrente cc de coletor, I_C
2. Calcule os valores dos parâmetros do modelo para pequenos sinais: $g_m = I_C / V_T$, $r_p = \beta / g_m$ e/ou $r_e = V_T / I_E$
3. Elimine as fontes cc substituindo cada fonte cc de tensão por um curto-circuito e cada fonte cc de corrente por um circuito aberto. Substitua os capacitores externos por curtos (freq medias).
4. Substitua a TBJ por um dos seus modelos equivalentes. Embora qualquer um dos modelos possa ser utilizado, um deles deve ser mais conveniente dependendo do circuito a ser analisado.
5. Analise o circuito resultante para determinar as grandezas de interesse (por exemplo, ganho de tensão, resistência de entrada).

Exemplo 5.16:

1. Determine o ponto de operação cc do TBJ e em particular o valor da corrente cc de coletor, I_C

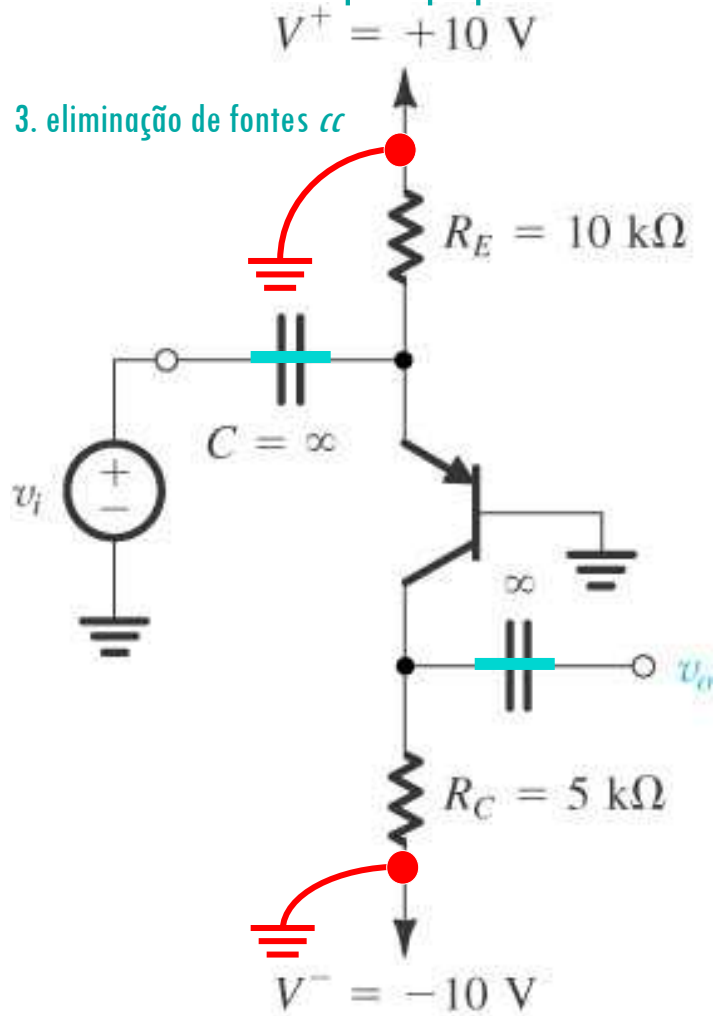


Supondo Reg Ativa



Exemplo 5.16:

2. Calcule os valores dos parâmetros do modelo para pequenos sinais: $g_m = I_C / V_T$; $r_\pi = \beta / g_m$ e/ou $r_e = V_T / I_E$
3. Elimine as fontes cc substituindo cada fonte cc de tensão/corrente por curto-circuitos/circuitos abertos e os caps por curtos (sinal passa integralmente)
4. Crie o circuito para peq sinais e substitua a TBJ por um dos seus modelos equivalentes



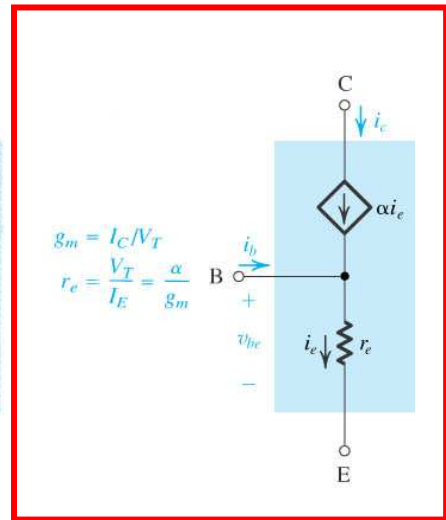
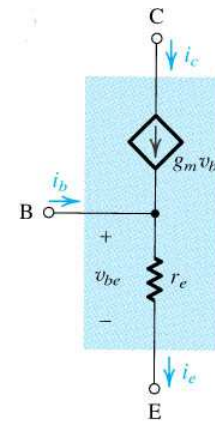
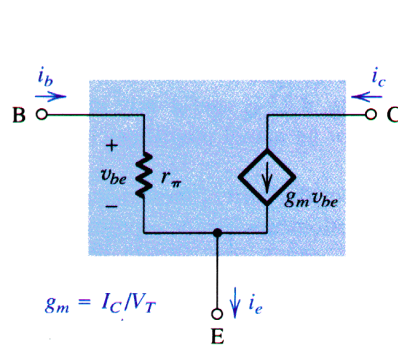
2. parâmetros

$$g_m = I_C / V_T = 0,92\text{mA} / 25\text{mV} = 37\text{mA/V}$$

$$r_\pi = \beta / g_m = 100 / 37\text{mA/V} = 2,7\text{ k}\Omega$$

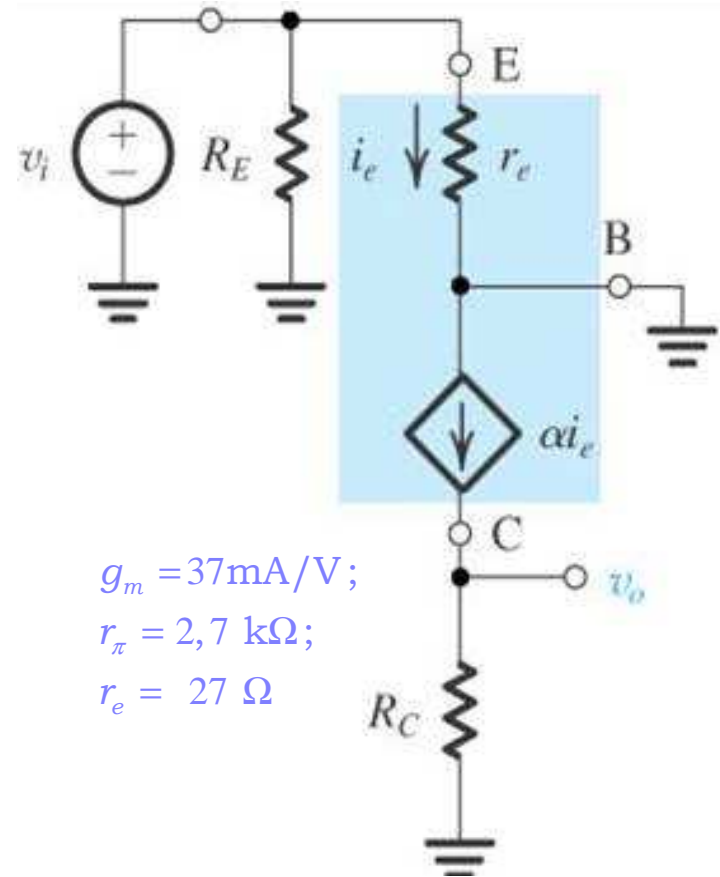
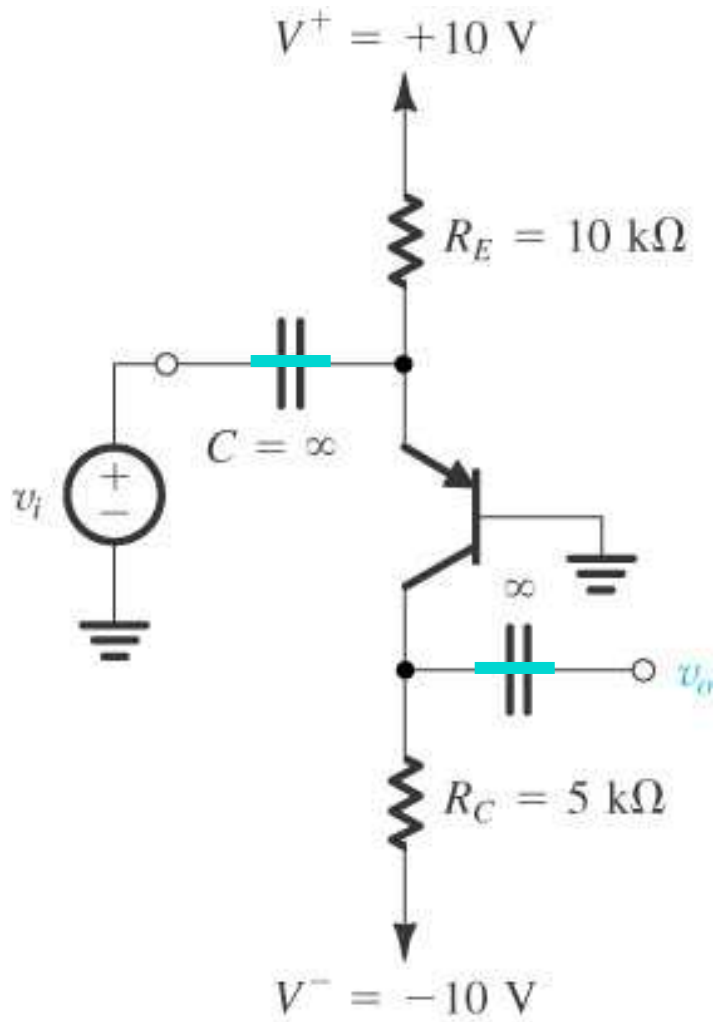
$$r_e = V_T / I_E = 25\text{mV} / 0,93\text{mA/V} = 27\ \Omega$$

4. circuito/modelos para peq sinais



Exemplo 5.16:

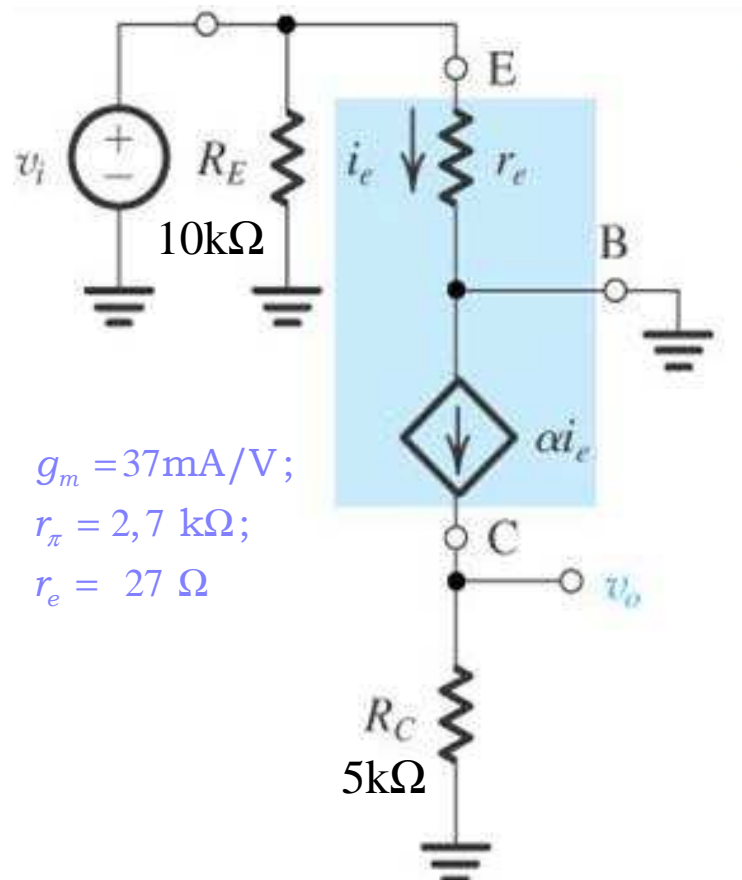
5. Analise o circuito resultante para determinar as grandezas de interesse (por exemplo, ganho de tensão, resistência de entrada).



$g_m = 37 \text{ mA/V};$
 $r_\pi = 2,7 \text{ k}\Omega;$
 $r_e = 27 \Omega$

Exemplo 5.16:

5. Analise o circuito resultante para determinar as grandezas de interesse (por exemplo, ganho de tensão, resistência de entrada).



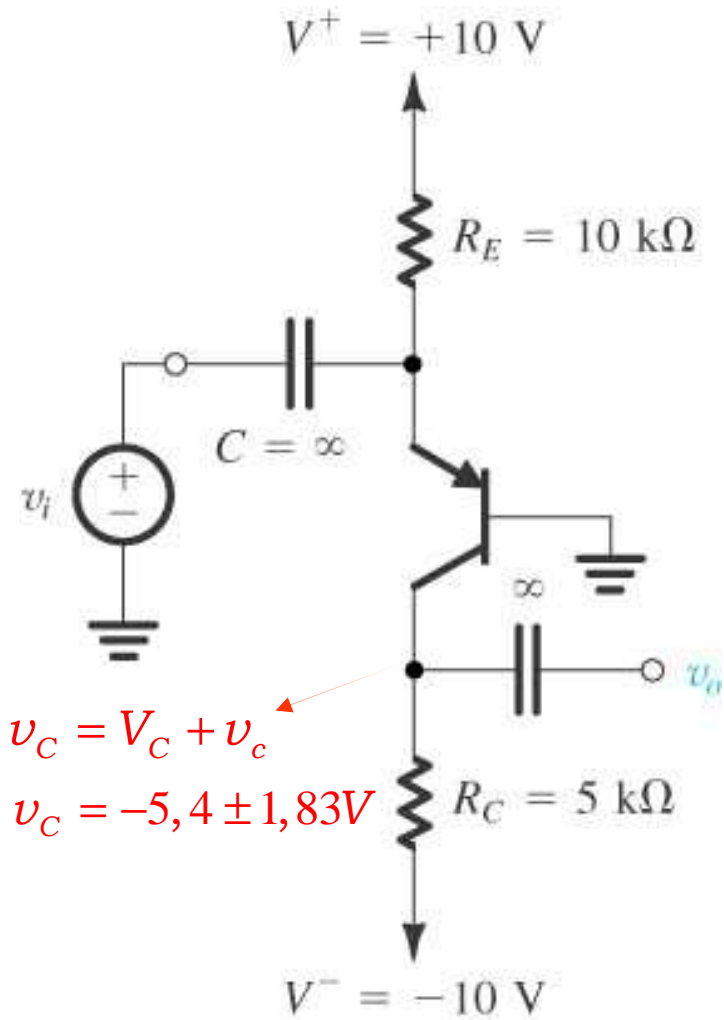
$$i_e = \frac{v_i}{r_e}$$

$$v_O = -\alpha i_e \times R_C$$

$$A_v \Big|_{\text{Carga}=\infty} = \frac{v_O}{v_i} \Big|_{\text{Carga}=\infty} = -\alpha \frac{-1}{r_e} R_C$$

$$A_v \Big|_{\text{Carga}=\infty} = \frac{0,99}{27} 5\text{k} = +183 \frac{\text{V}}{\text{V}}$$

Exemplo 5.16: Máxima excursão para pequenos sinais?



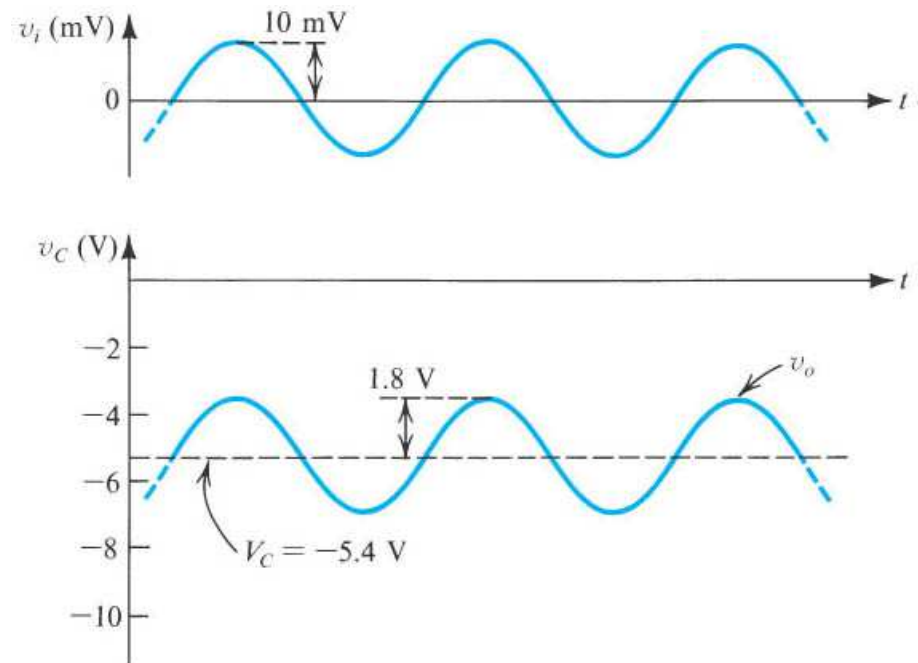
$$v_C = V_C + v_c$$

$$v_C = -5,4 \pm 1,83 \text{ V}$$

$$v_{eb_{\text{MAX}}} = \pm 10 \text{ mV}$$

$$v_{o_{\text{MAX}}} = v_{i_{\text{MAX}}} A_v \Leftrightarrow v_{c_{\text{MAX}}} = v_{eb_{\text{MAX}}} A_v$$

$$v_{c_{\text{MAX}}} = 0,01 \times 183 = \pm 1,83 \text{ V}$$

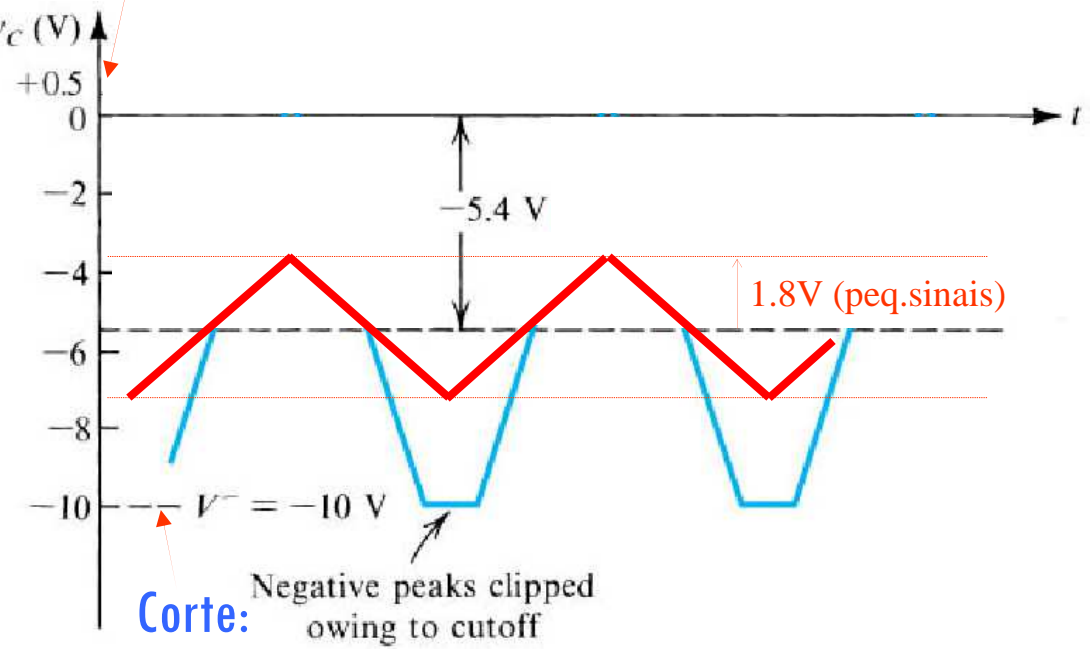
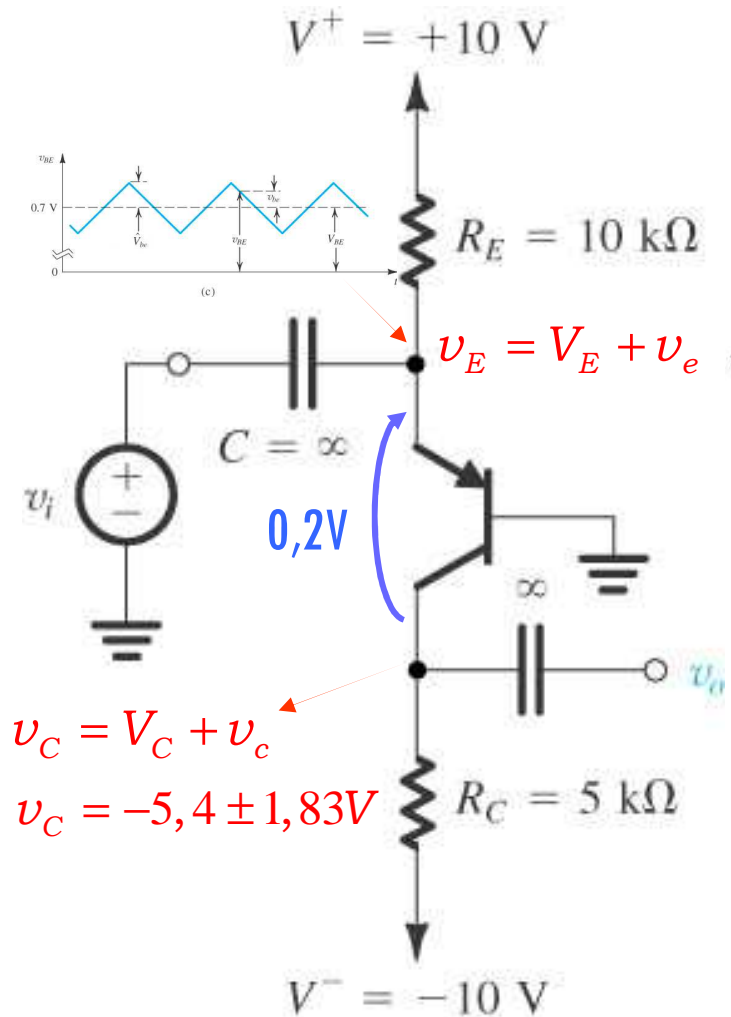


Exemplo 5.16: Máxima excursão para grandes sinais?

6. Máxima excursão para grandes sinais: analisar corte e saturação

Saturação:

$$v_C = v_{BE} - v_{EC_{SAT}} = 0,7 - 0,2 = +0,5V$$



$$i_C = 0 \rightarrow v_C = V^- + R_C i_C = -10V$$



CAPITULO 5

Amplificadores com Transistores

Aula 3

PSI 2306 – Eletrônica

Programação para a Primeira Prova

Aula	Matéria	Capítulo/ página (inglês)
1 ^a	Revisão de transistor bipolar de junção - TBJ (funcionamento interno e expressões básicas) - Exemplo 5.4 O TBJ como amplificador para pequenos sinais (as condições c.c., a corrente de coletor e a transcondutância)	Sedra, Cap. 5, p. 235-240 (277-285); p. 263-264 (421-423); p. 275-276 (443-445).
2 ^a	A corrente de base e a resistência de entrada da base, a resistência de entrada do emissor. Ganho de tensão, Exemplo 5.38, modelos equivalentes (modelos π -híbrido e T)	Sedra, Cap. 5, p. 276-279 (445-450)
3 ^a	Aplicação dos modelos equivalentes para pequenos sinais, Efeito Early, Exemplo 5.14 O amplificador emissor comum (EC) - Exercício 5.43	Sedra, Cap. 5 p. 290-293 (467-470)
4 ^a	O amplificador em emissor comum com resistência de emissor. Exercício 5.44	Sedra, Cap. 5 p. 293-296 (470-474)
5 ^a	O amplificador em base comum. O Amplificador em coletor comum. Exercício 5.47	Sedra, Cap. 5 p. 296-301 (475-484)
6 ^a	Resposta em frequência dos circuitos RC Pólos e zeros, funções de primeira ordem, curvas de Bode (pólo simples, zero simples). Exemplo E.1, exemplo E.2	Sedra, Apend. D, p. 823-825 (D6-D9) Sedra, Apend. E, p.830-833 (E1-E6)
7 ^a	Teorema de Miller. Exemplo 6.7 Resposta em alta frequência do Emissor Comum Exemplo 5.18	Sedra, Cap. 6, p. 363-364 (578-580) Sedra, Cap. 5, p. 306-310 (491-497)
8 ^a	Resposta em baixa frequência do Emissor Comum Exemplo 5.19	Sedra, Cap. 5, p. 310-314 (497-503)
9 ^a	Resposta em alta e baixa frequência do Fonte Comum Exemplo 4.12	Sedra, Cap. 4, p. 202-208 (326-335)
10 ^a	Aula de Exercícios	
1^a. Semana de provas		
Data:		

3ª Aula:

Estudo do Amplificador Emissor Comum

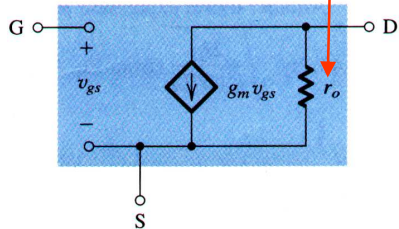
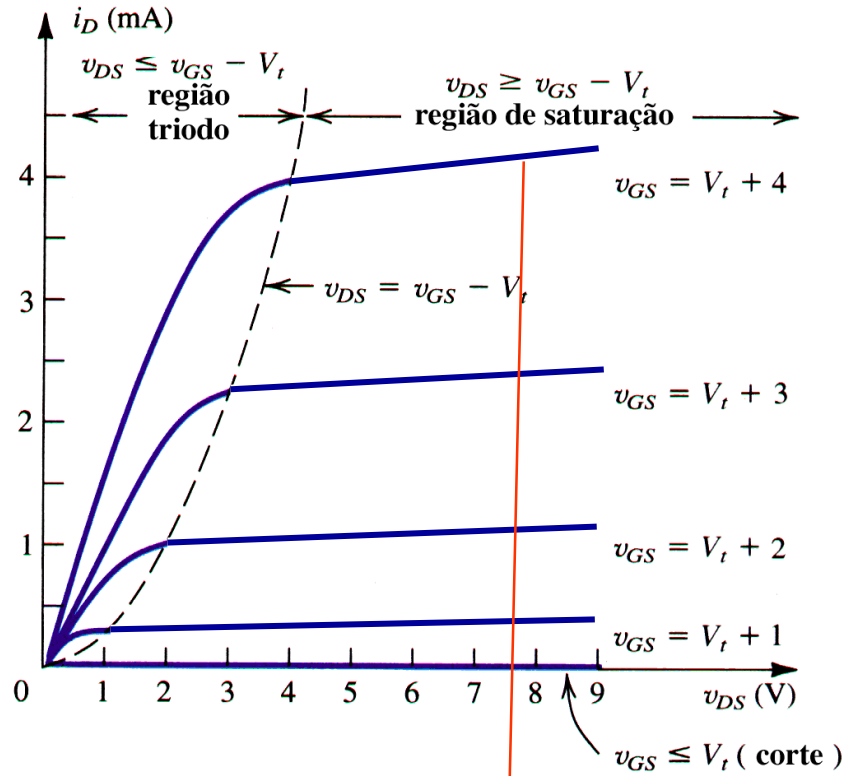
Ao final desta aula você deverá estar apto a:

- **Analisar circuitos amplificadores na configuração emissor comum determinando parâmetros como ganhos e impedâncias**
- **Comparar o desempenho do Amplificador EC (TBJ) com o Amplificador FC (FET)**

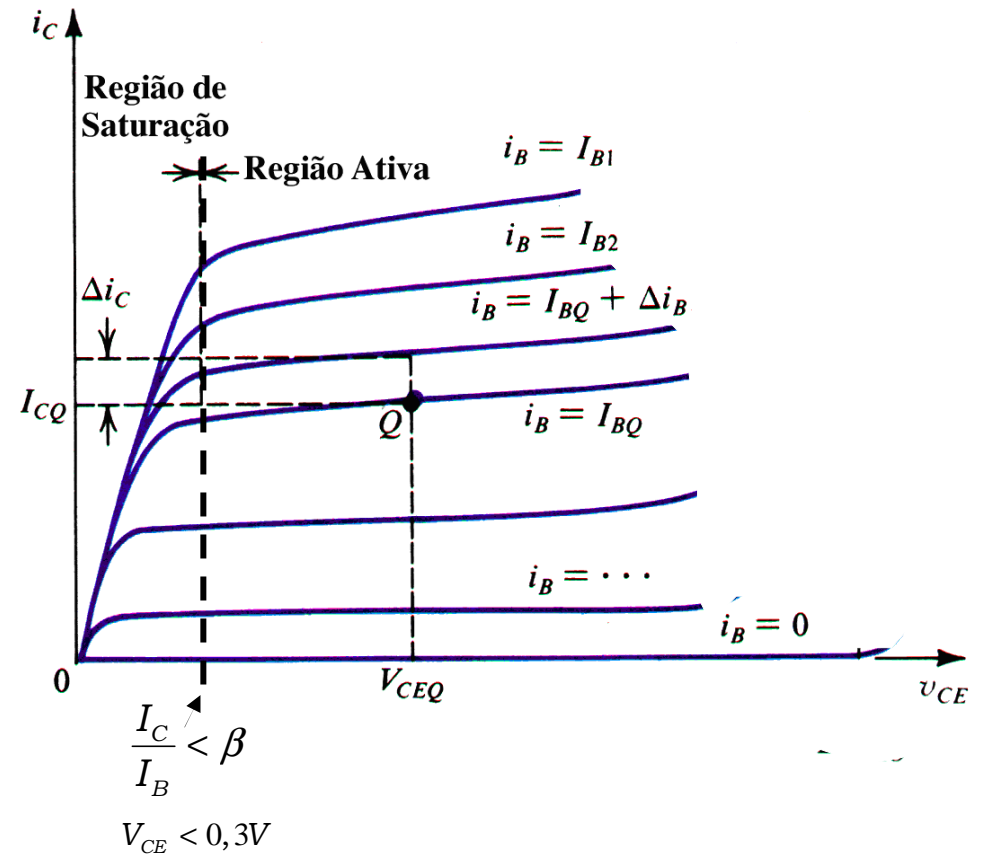
Aprimorando o Modelo do TBJ

O Efeito Early

FET: curva $i_D \times v_{DS}$

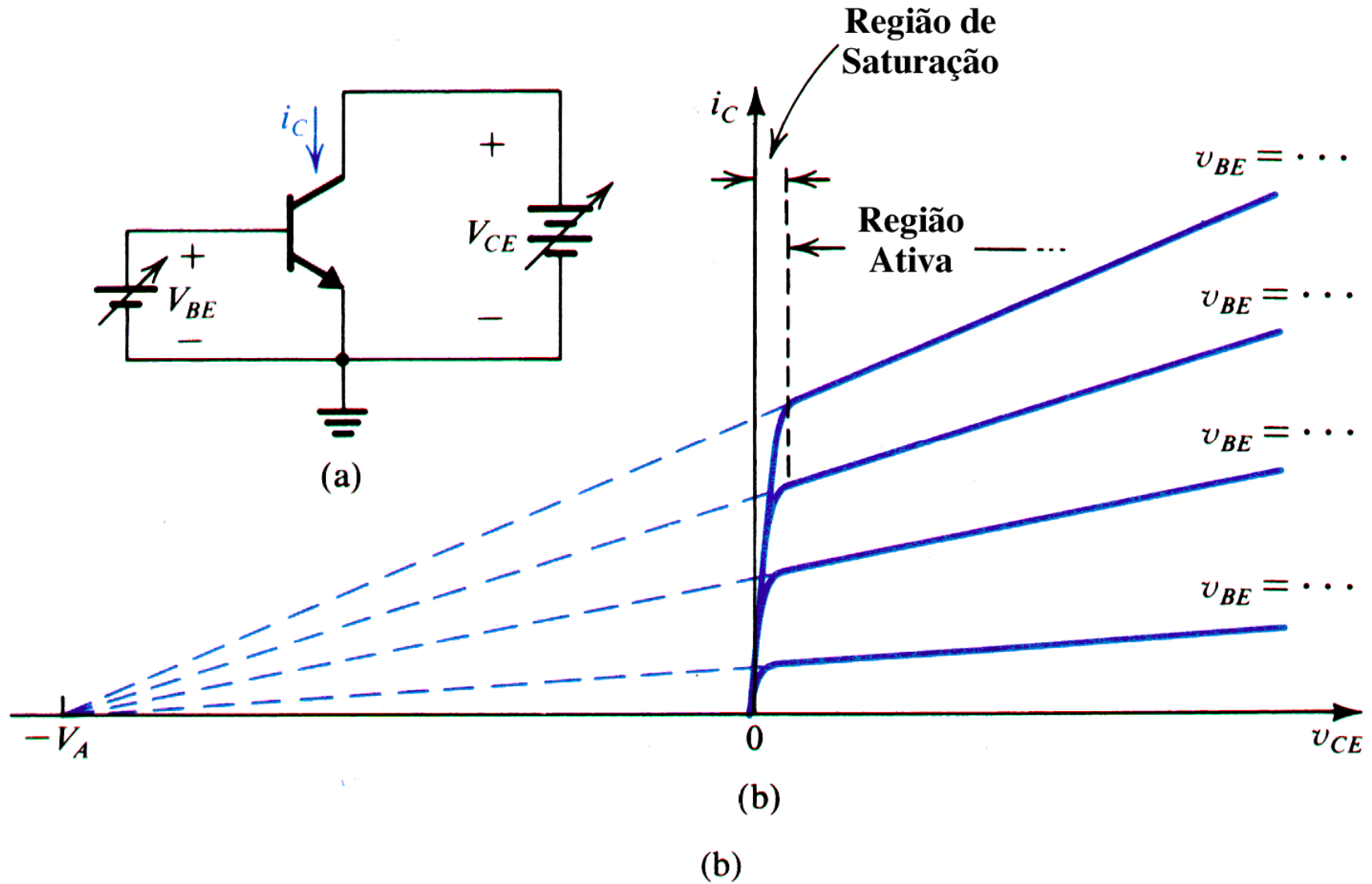


TBJ: curva $i_C \times v_{CE}$



Aprimorando o Modelo do TBJ

O Efeito Early

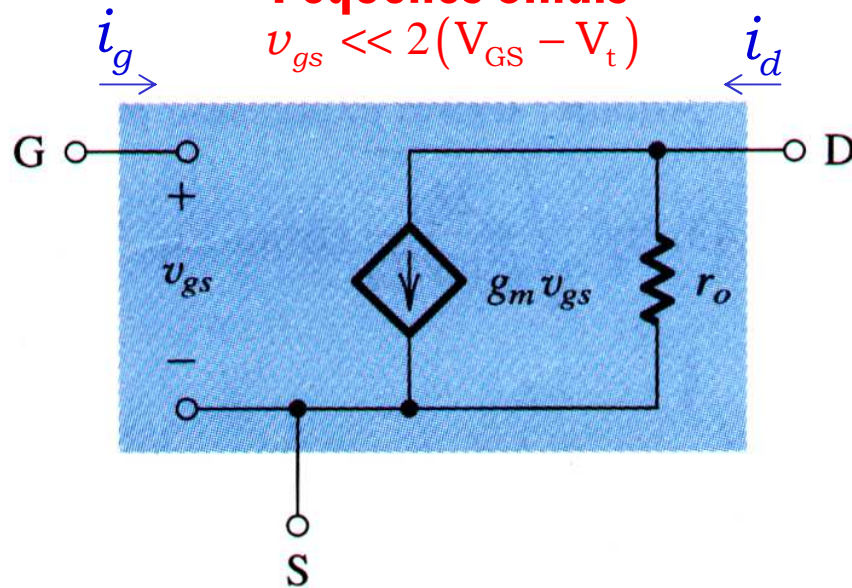


O Modelo π -híbrido para Pequenos Sinais para o Transistor TBJ

FET

Pequenos Sinais

$$v_{gs} \ll 2(V_{GS} - V_t)$$

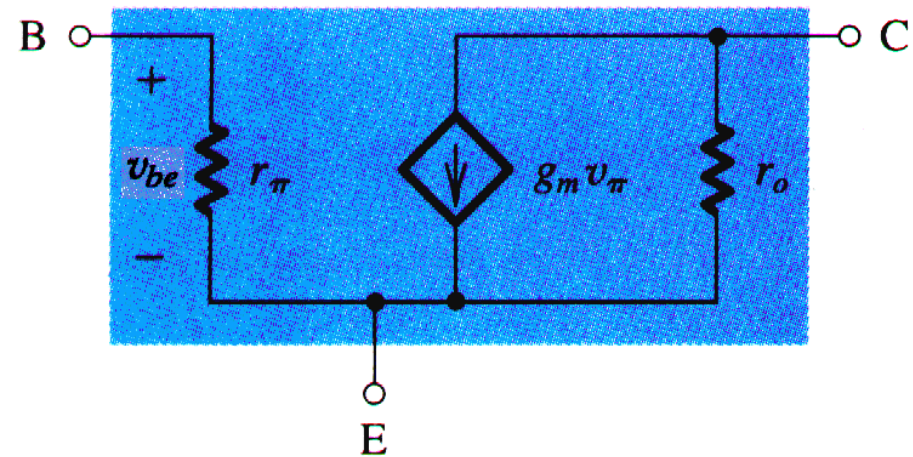


$$g_m = k'_n \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_t) \quad r_o \approx \frac{V_A}{I_D}$$

Bipolar

Pequenos Sinais

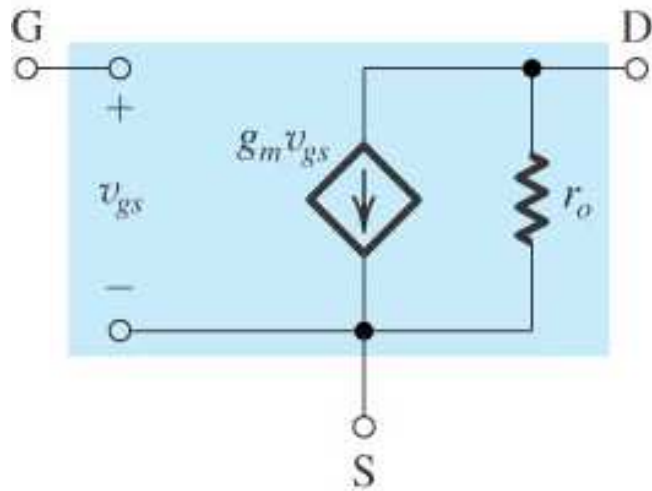
$$v_{be} < 10\text{mV}$$



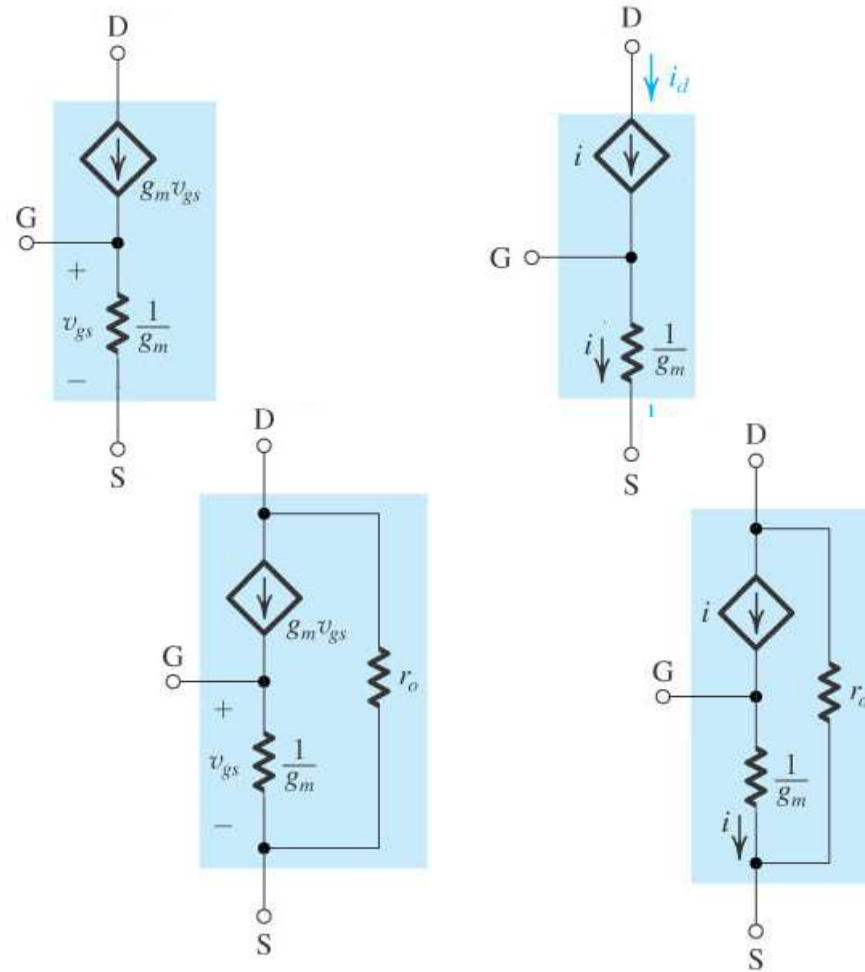
$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad r_\pi = \frac{\beta}{g_m} \quad r_o \approx \frac{V_A}{I_C}$$

Os Modelos para Pequenos Sinais para o FET

(utilizados em Introdução à Eletrônica)

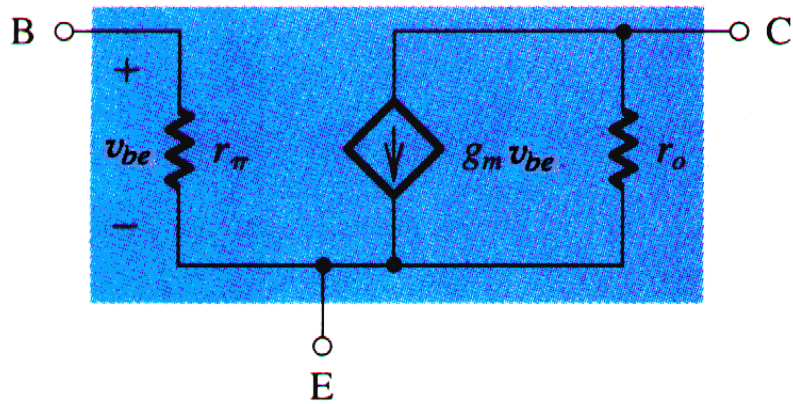


Modelo Tradicional
(π -Híbrido)

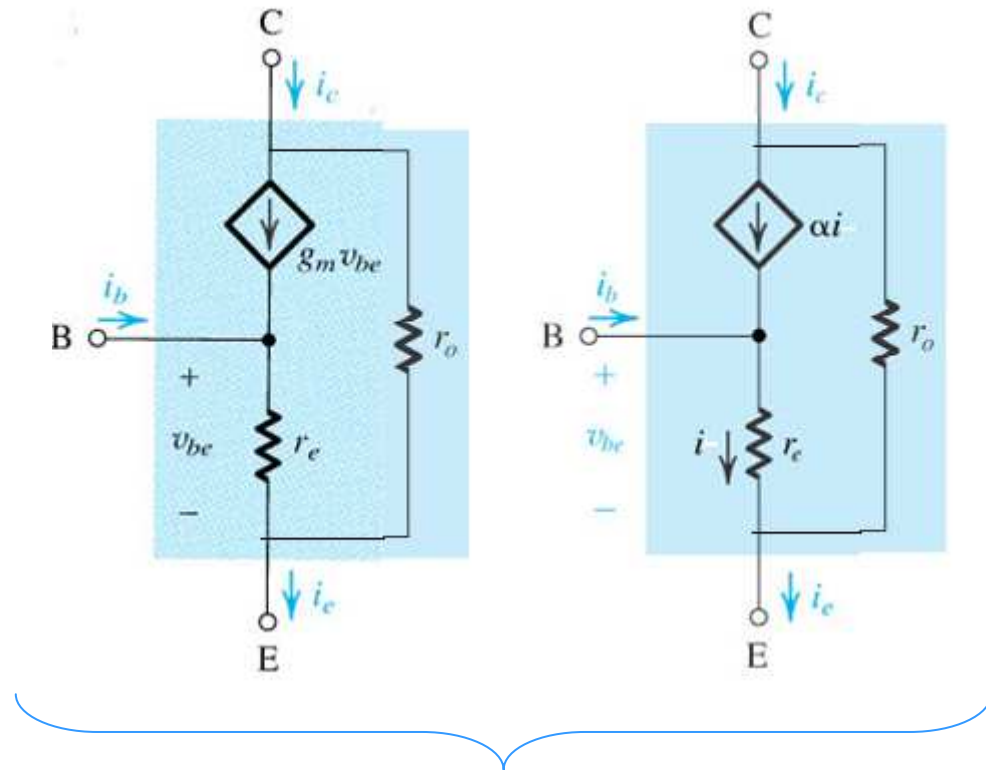


Modelo T

Os Modelos para Pequenos Sinais para o TBJ



Modelo Tradicional
(π -Híbrido)



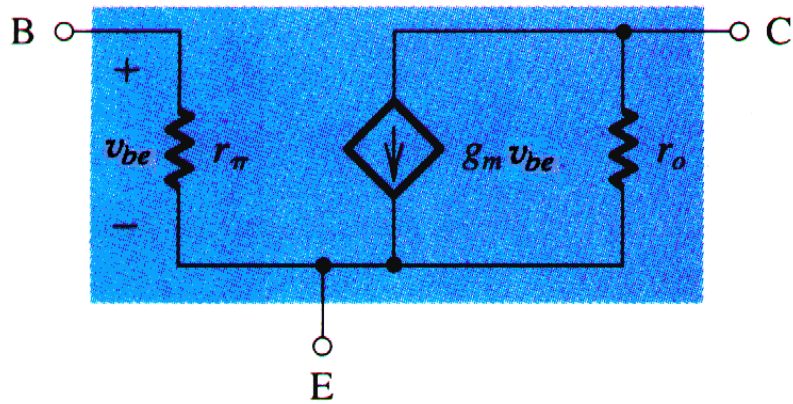
Modelo T

$$v_{be} = i_b r_\pi$$

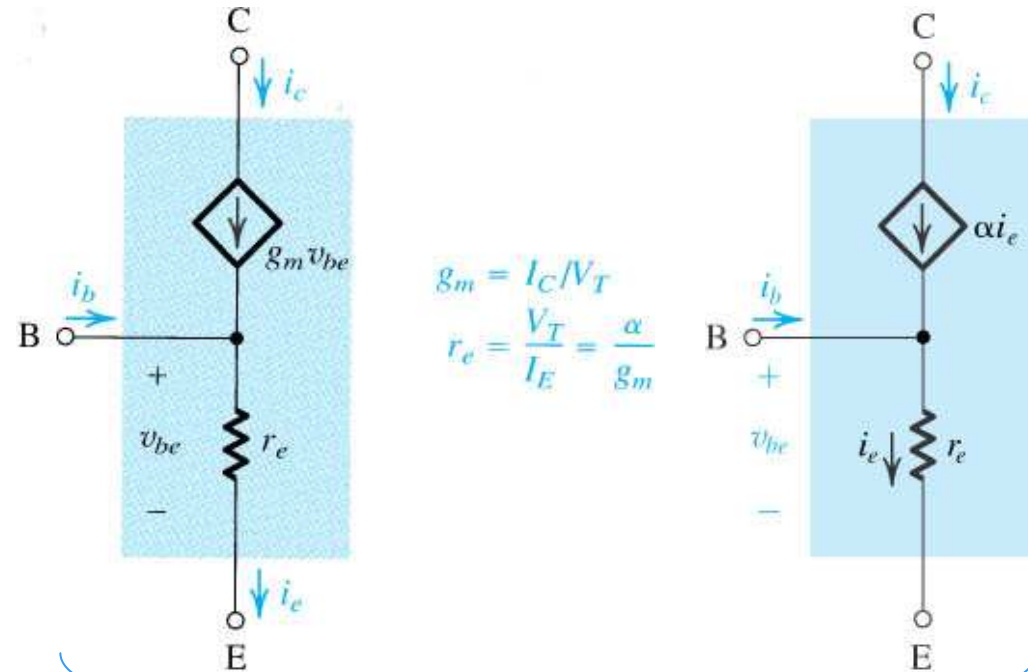
$$v_{be} = i_e r_e = (\beta + 1) i_b r_e$$

$$i_b r_\pi = (\beta + 1) i_b r_e \rightarrow r_e = \frac{r_\pi}{\beta + 1}$$

Os Modelos para Pequenos Sinais para o TBJ



Modelo Tradicional
(π -Híbrido)



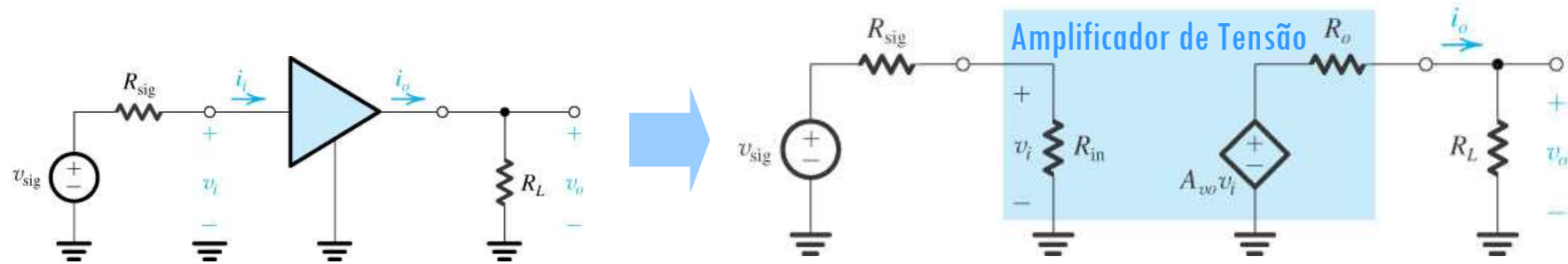
Modelo T

$$r_e = \frac{r_\pi}{\beta + 1} = \frac{\beta}{g_m} \frac{1}{\beta + 1} = \frac{\alpha}{g_m}$$

$$r_e = \frac{\alpha}{g_m} = \frac{V_T}{I_C / \alpha} = \frac{V_T}{I_E}$$

Uma palavra sobre Circuitos Amplificadores

(Introdução à Eletrônica – vídeo aula 22)



$$A_{vo} = \left. \frac{v_o}{v_i} \right|_{\text{Carga}=\infty} \quad (\text{max } A_v)$$

$$R_i = \left. \frac{v_i}{i_i} \right|_{\text{Carga}=\infty}$$

$$A_v = \left. \frac{v_o}{v_i} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$

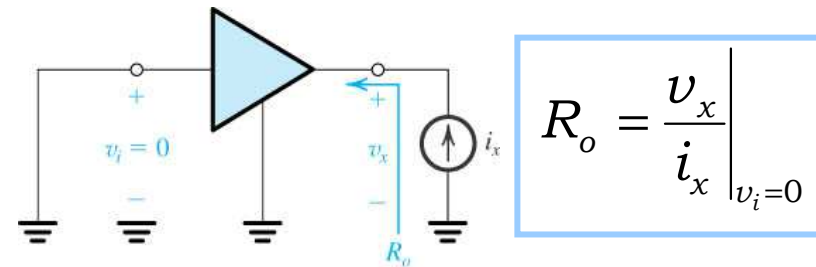
$$R_{in} = \left. \frac{v_i}{i_i} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$

$$A_i = \left. \frac{i_o}{i_i} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$

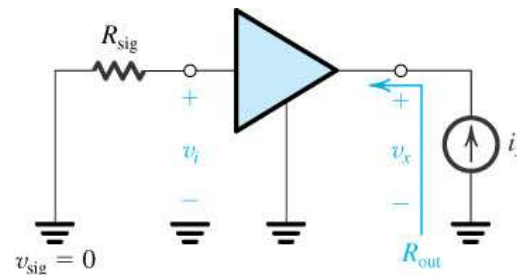
$$A_{is} = \left. \frac{i_o}{i_i} \right|_{\text{Carga}=\text{curto}} \quad (\text{max } A_i)$$

$$G_v = \left. \frac{v_o}{v_{sig}} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$

$$G_{vo} = \left. \frac{v_o}{v_{sig}} \right|_{\text{Carga}=\infty}$$



$$R_o = \left. \frac{v_x}{i_x} \right|_{v_i=0}$$



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

3ª Aula:

Parte 2: Estudo do Amplificador Emissor Comum

Ao final desta aula você deverá estar apto a:

- **Analisar circuitos amplificadores na configuração emissor comum determinando parâmetros como ganhos e impedâncias**
- **Comparar o desempenho do Amplificador EC (TBJ) com o Amplificador FC (FET)**

Tabela 5.3 RELAÇÕES ENTRE OS PARÂMETROS DO MODELO PARA PEQUENOS SINAIS DO TBJ

Parâmetros do Modelo em Termos das Correntes de Polarização cc :

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \qquad r_e = \frac{V_T}{I_E} = \alpha \left(\frac{V_T}{I_C} \right)$$
$$r_\pi = \frac{V_T}{I_B} = \beta \left(\frac{V_T}{I_C} \right) \qquad r_o = \frac{V_A}{I_C}$$

Em termos de g_m :

$$r_e = \frac{\alpha}{g_m} \qquad r_\pi = \frac{\beta}{g_m}$$

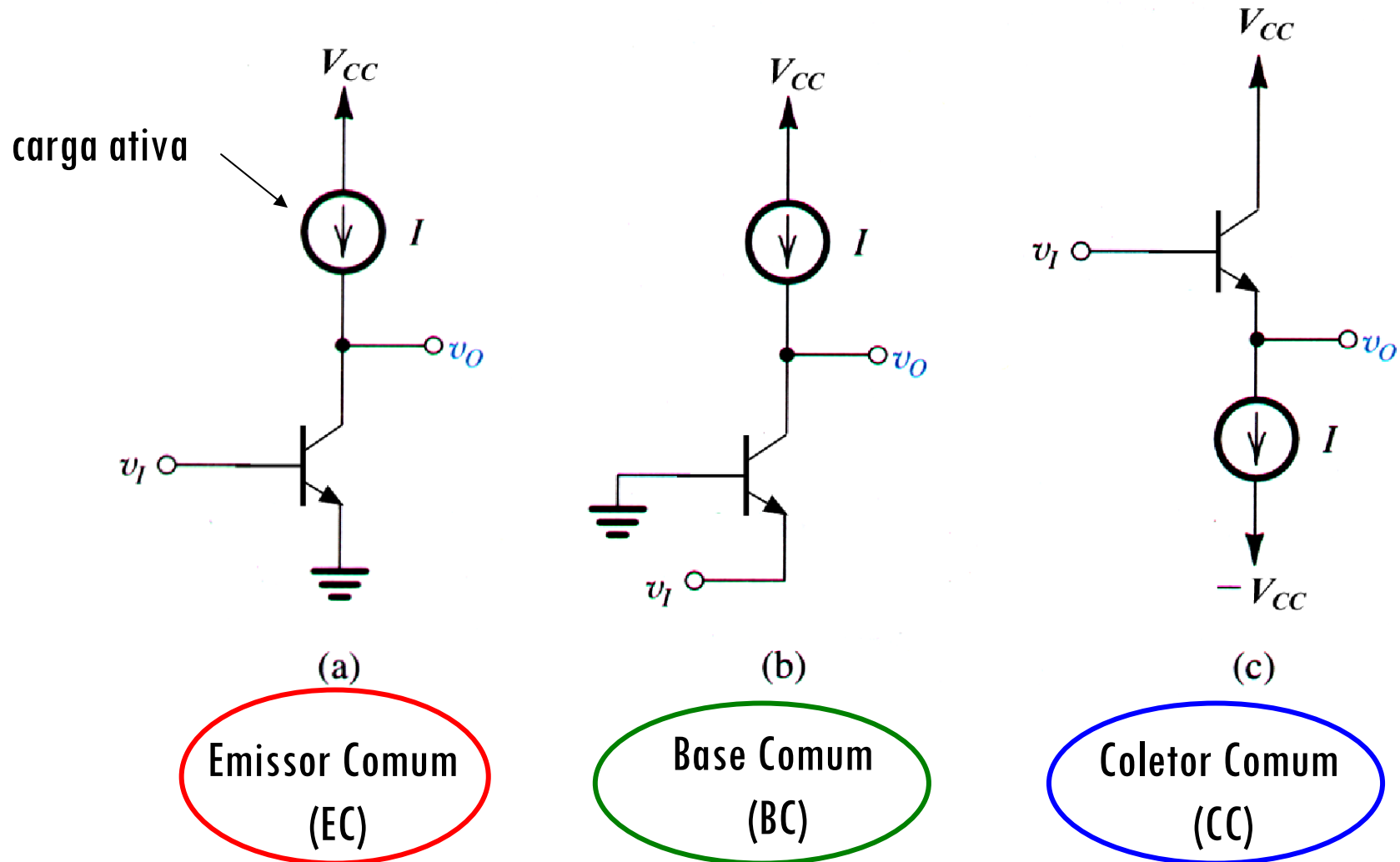
Em termos de r_e :

$$g_m = \frac{\alpha}{r_e} \qquad r_\pi = (\beta + 1)r_e \qquad g_m + \frac{1}{r_\pi} = \frac{1}{r_e}$$

Relações entre α e β :

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \qquad \alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \qquad \beta + 1 = \frac{1}{1 - \alpha}$$

Configurações Básicas de Amplificadores TBJ em CIs



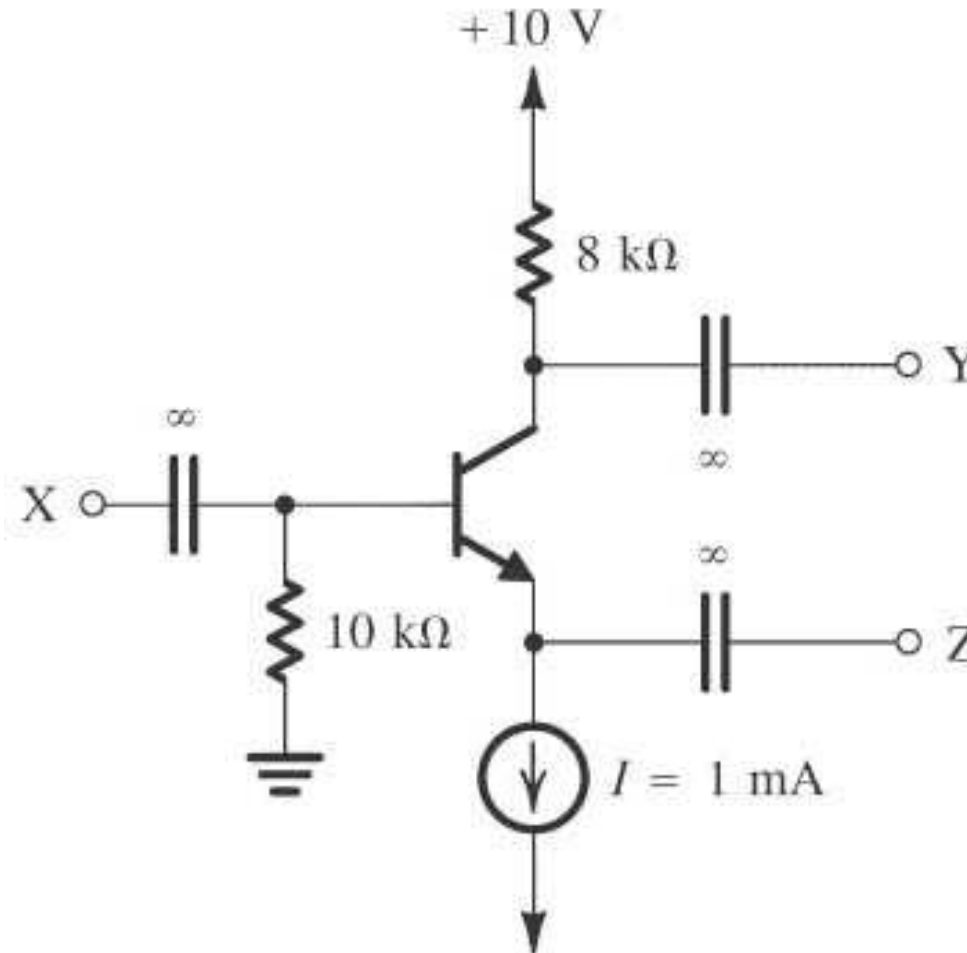
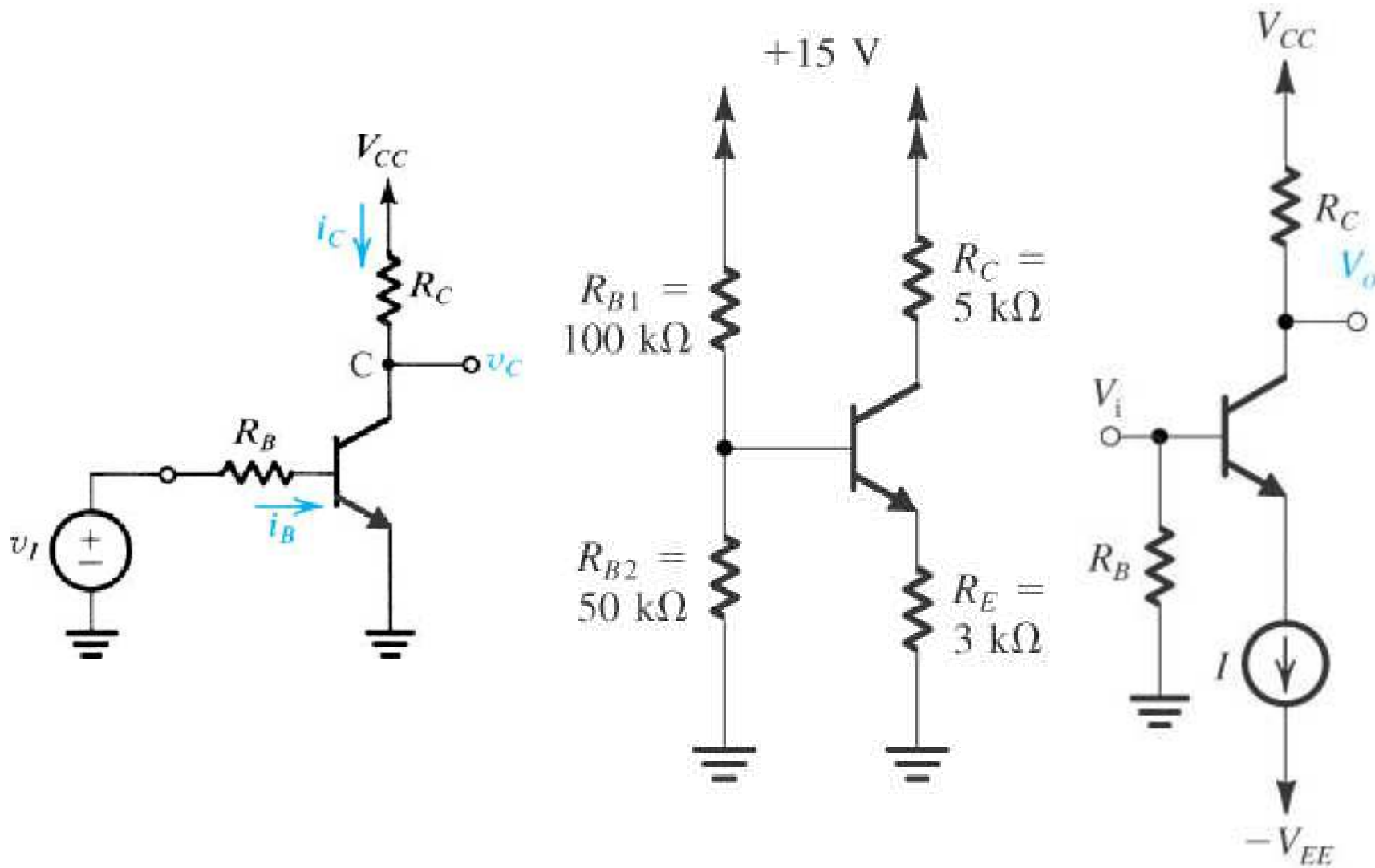


Figure E5.40 Polarização do TBJ, e como podem ser implementadas as três configurações: X, Y e Z são possíveis nós para aplicação (entrada) e retirada (saída) de sinais.

Exemplos: EC – X-entrada, Y-saída e Z=0, BC – Z-entrada, Y-saída e X=0;

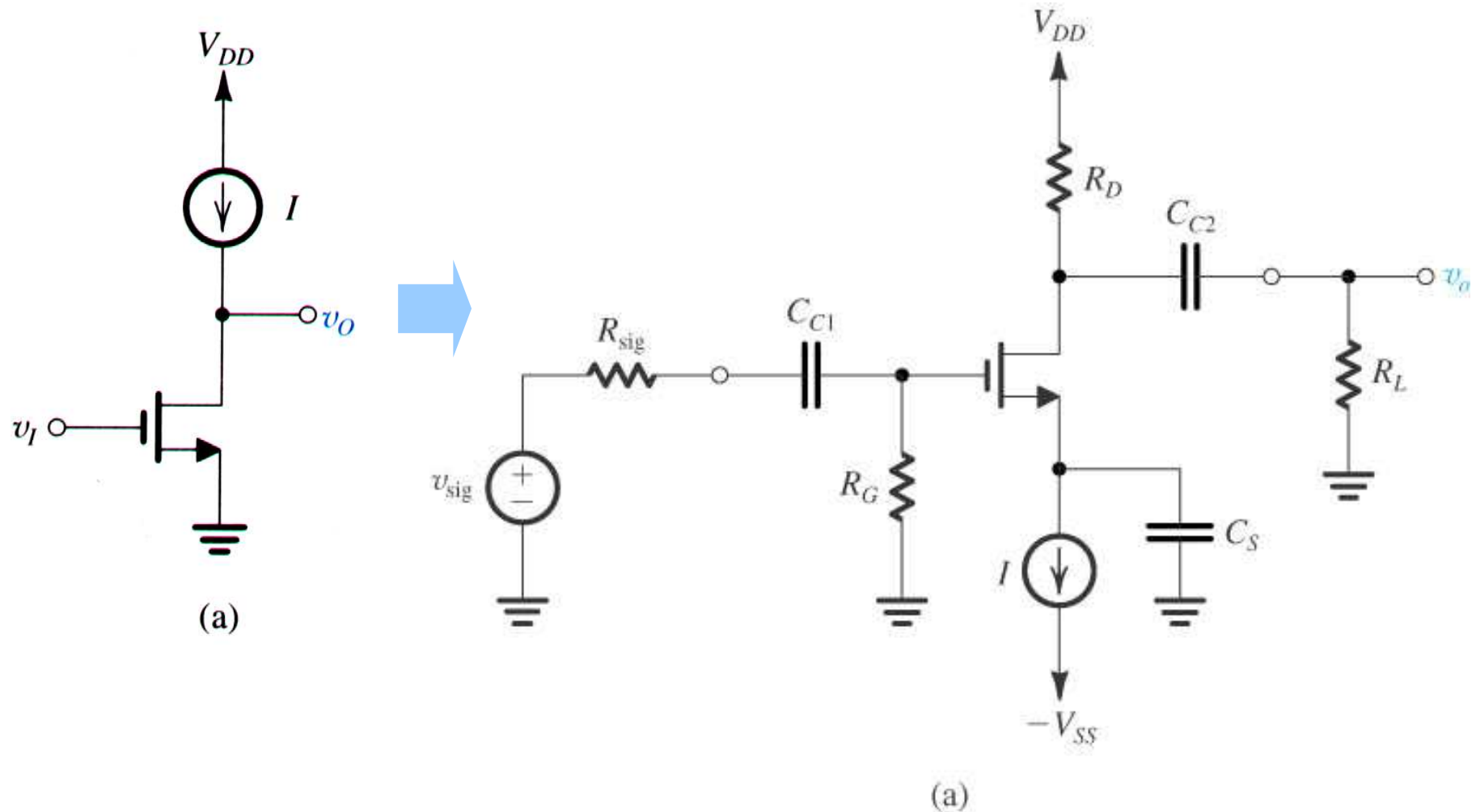
CC – X-entrada, Z-saída e Y=0. **Terminal Y não pode ser entrada!!!**

O Amplificador TBJ Emissor Comum (EC) (exemplos de montagem)



Revisão: O Amplificador MOS Fonte Comum

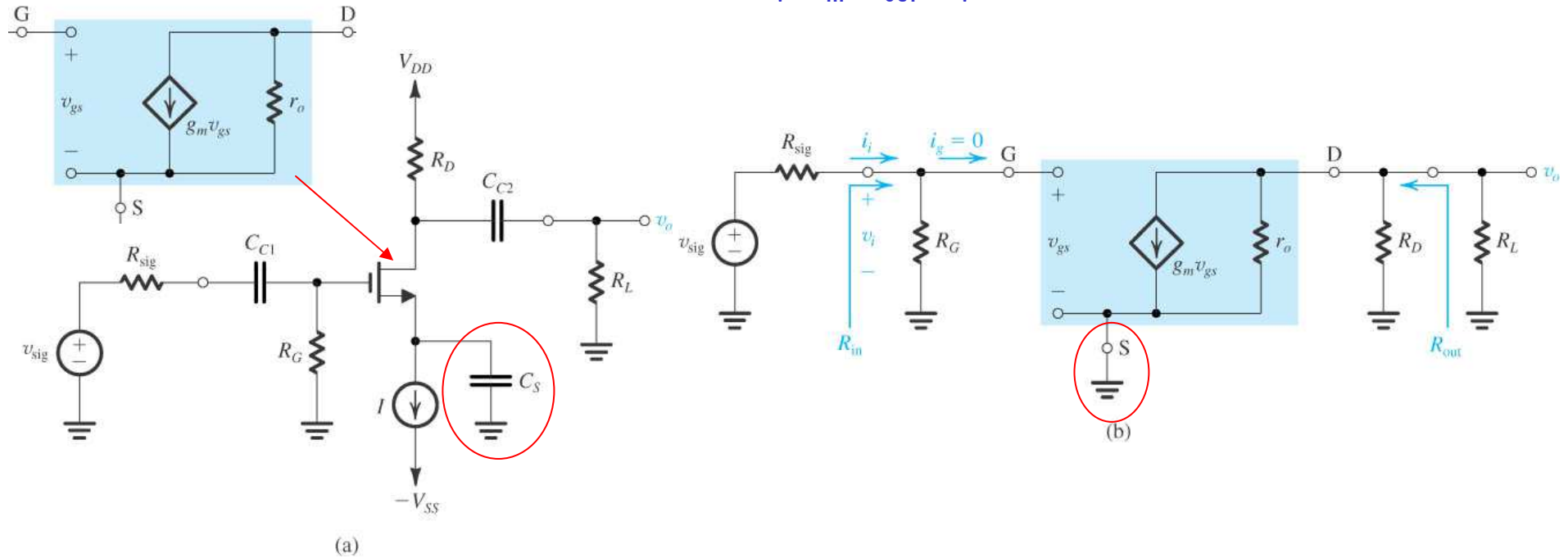
(Introdução à Eletrônica – vídeo aula 22, 21'~35')



O Amplificador MOS Fonte Comum

(Introdução à Eletrônica – vídeo aula 22, 21'~35')

$A_v, R_{in}, R_{out}, G_v$

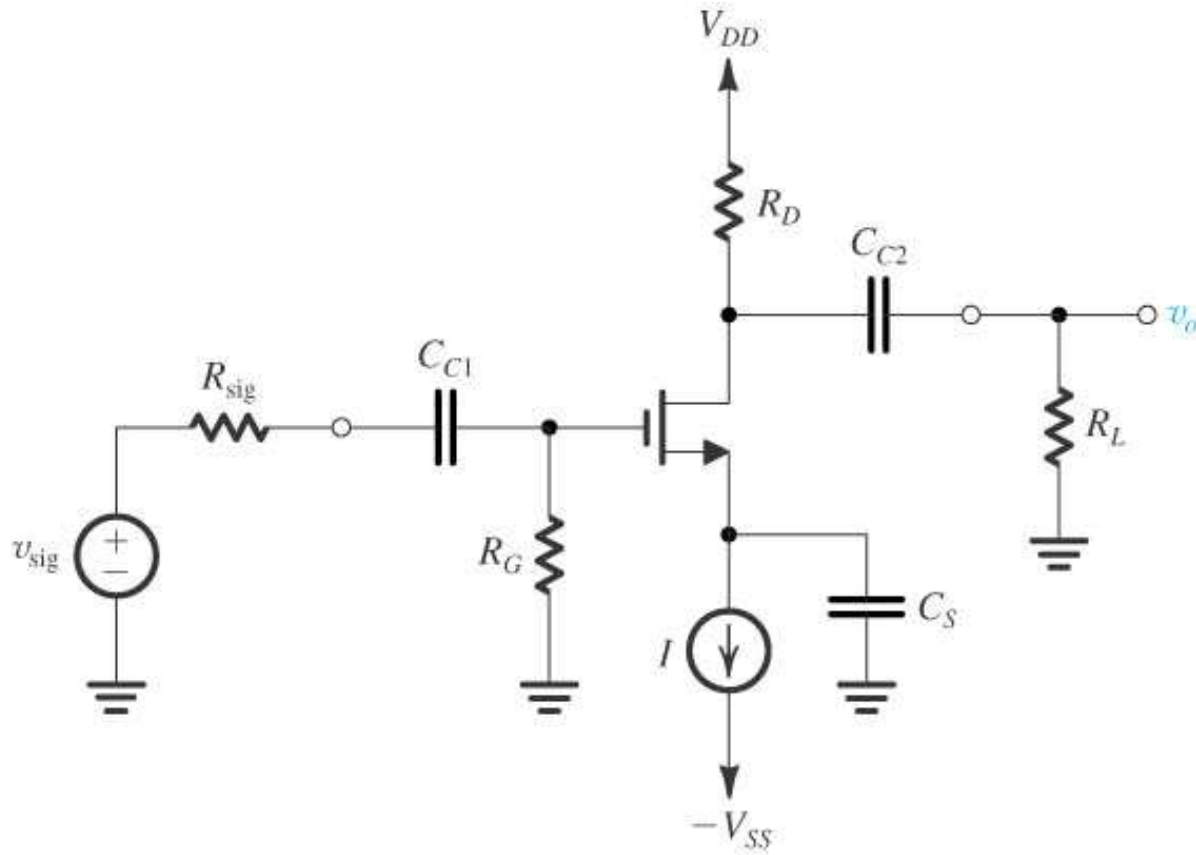


$$A_v = \left. \frac{v_o}{v_i} \right|_{\text{Carga}=R_L} \Rightarrow A_v = -g_m (R_D \parallel r_o \parallel R_L)$$

$$R_{in} = \left. \frac{v_i}{i_i} \right|_{\text{Carga}=R_L} \Rightarrow v_i = R_G i_i \rightarrow R_{in} = \frac{v_i}{i_i} = R_G (= R_i)$$

O Amplificador MOS Fonte Comum

(Introdução à Eletrônica – vídeo aula 22, 21'~35')



(a)

$$A_v = -g_m (R_D \parallel r_o \parallel R_L)$$

$$R_{in} = R_G$$

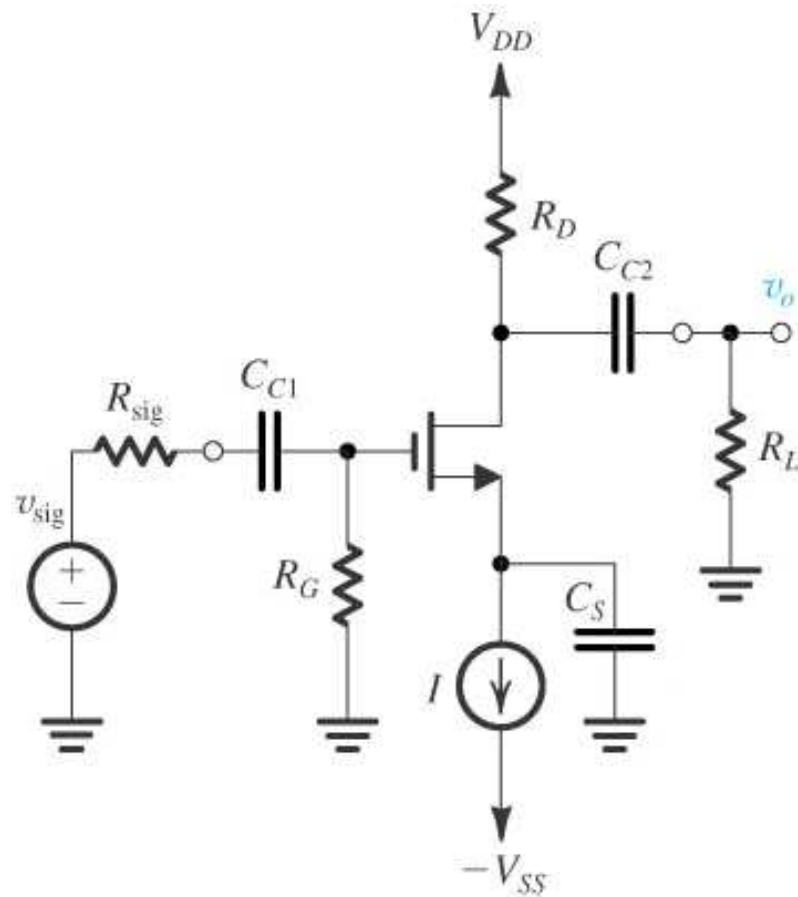
$$R_{out} = (r_o \parallel R_D)$$

$$G_v = \frac{R_G}{R_G + R_{sig}} A_v$$

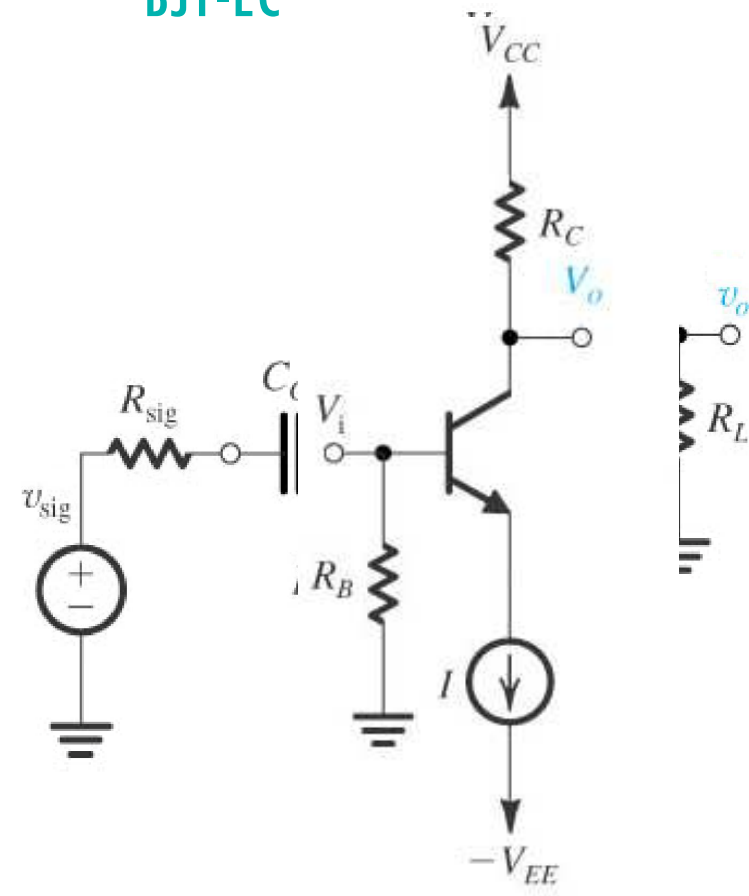
O Amplificador TBJ Emissor Comum (EC)

Comparação FC

FET-FC

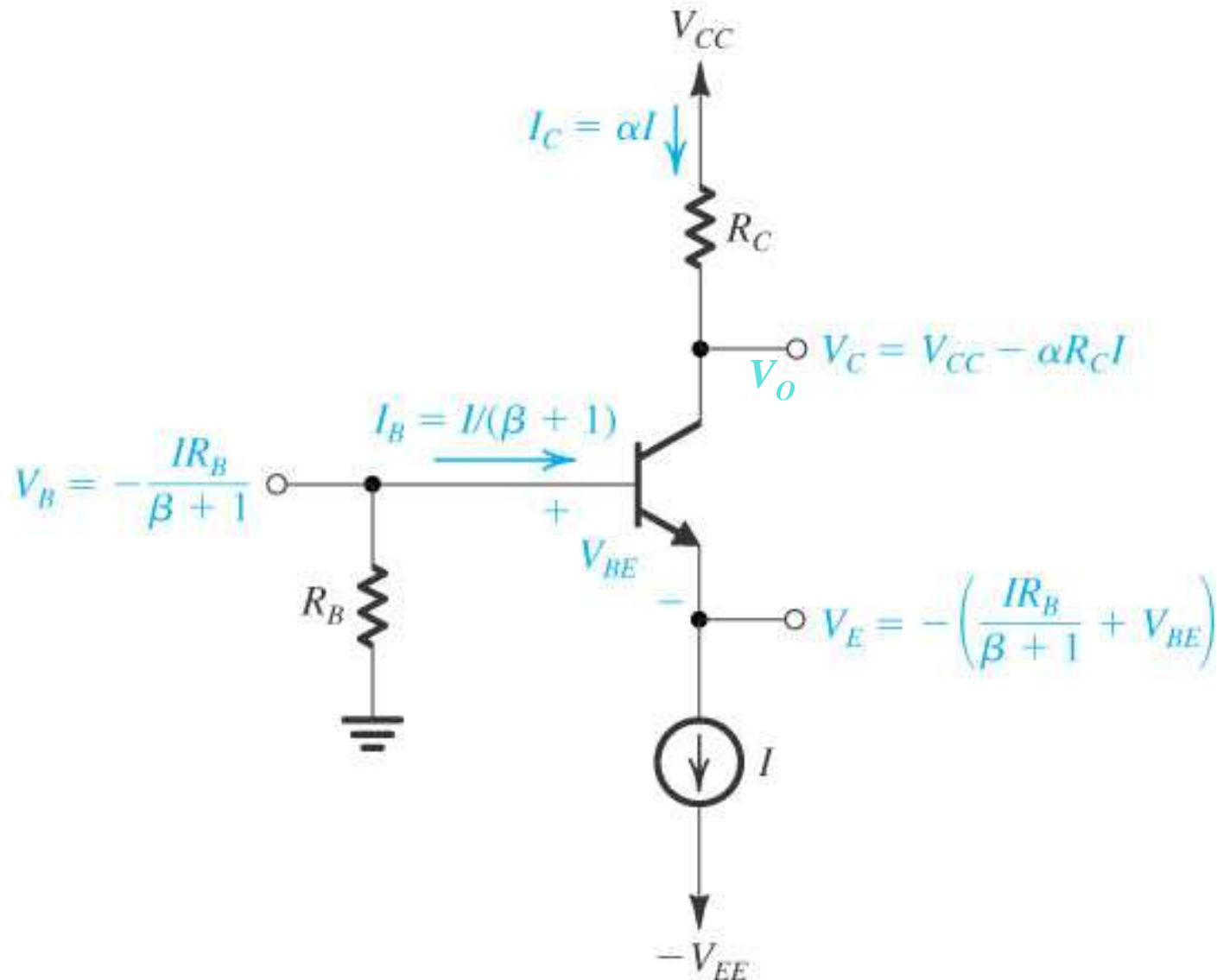


BJT-EC



O Amplificador TBJ Emissor Comum (EC)

Polarização



O Amplificador TBJ Emissor Comum sem R_e (EC)

Análise Pequenos Sinais

2. parâmetros

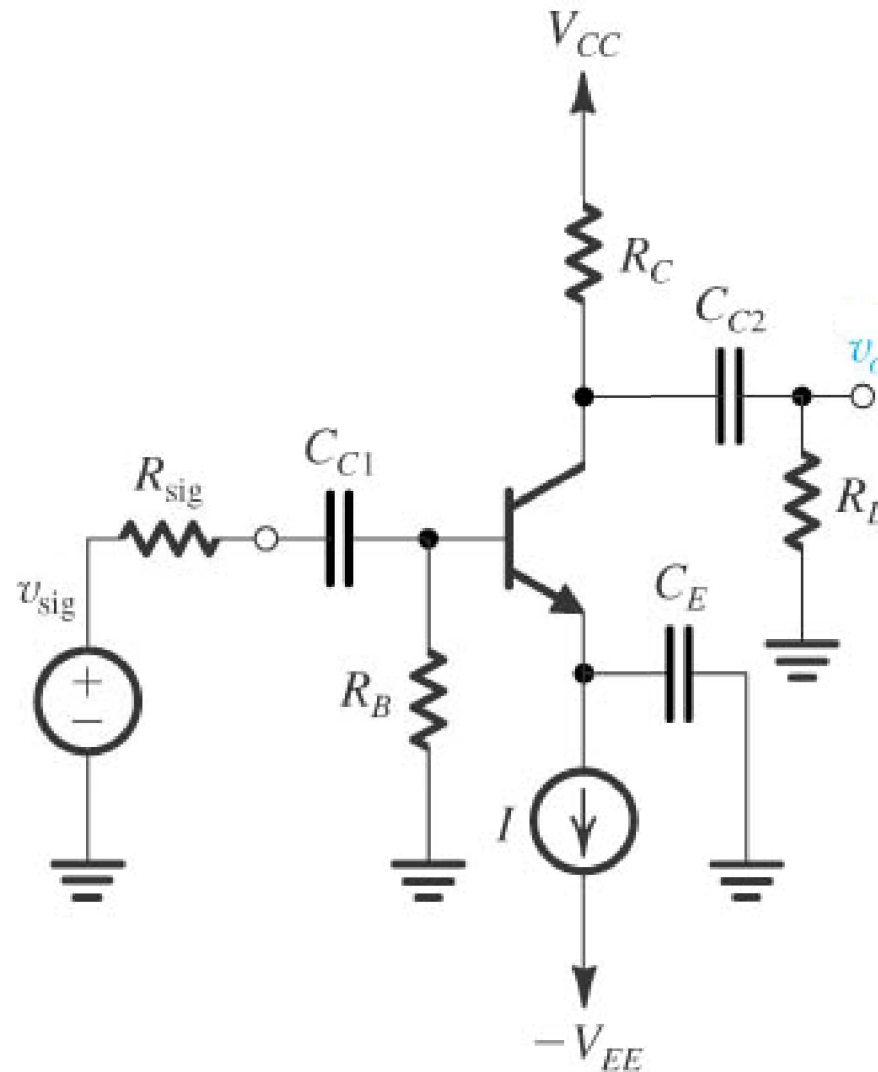
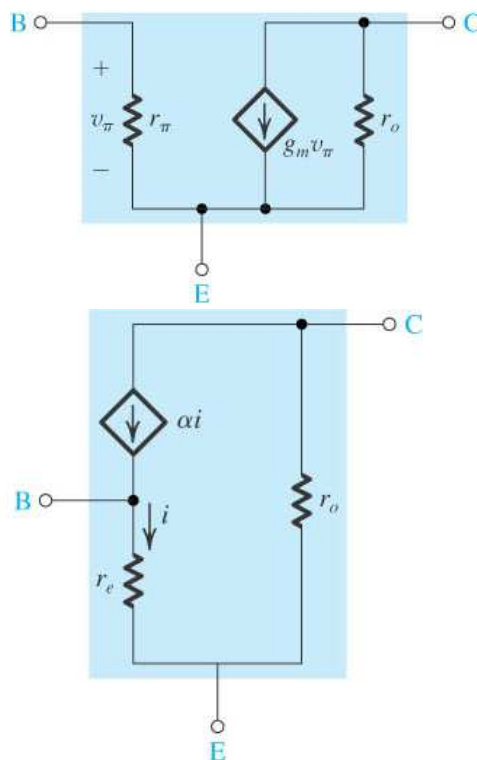
$$g_m = I_C / V_T$$

$$r_\pi = \beta / g_m$$

$$r_e = \alpha / g_m$$

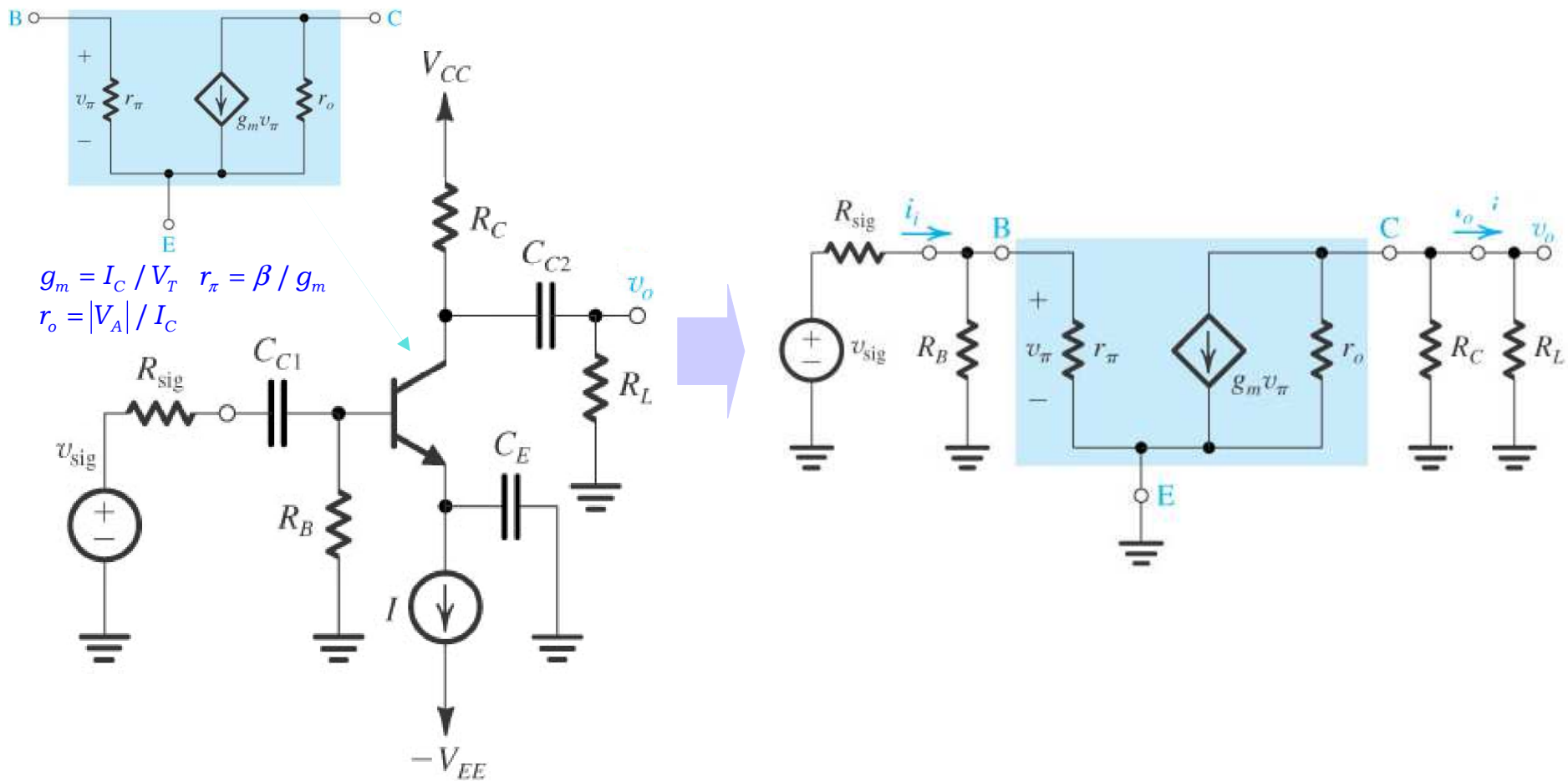
$$r_o = |V_A| / I_C$$

4. modelos



O Amplificador TBJ Emissor Comum sem R_e (EC)

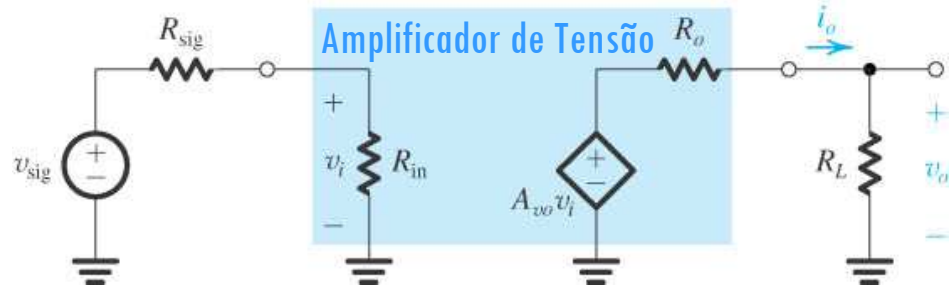
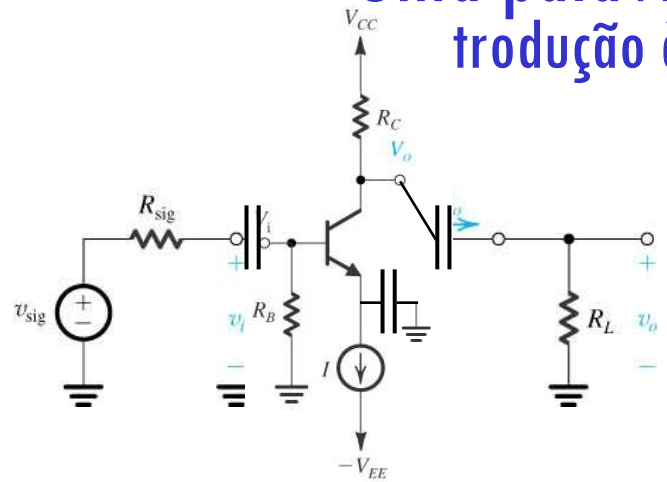
Análise Pequenos Sinais



Agora basta determinar as grandezas de interesse (ganhos, impedâncias, etc.)

Uma palavra sobre Circuitos Amplificadores

rodução à Eletrônica – vídeo aula 22, item 2, 14')



$$A_{vo} = \left. \frac{v_o}{v_i} \right|_{\text{Carga}=\infty}$$

(max A_v)

$$R_i = \left. \frac{v_i}{i_i} \right|_{\text{Carga}=\infty}$$

$$A_v = \left. \frac{v_o}{v_i} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$

$$R_{in} = \left. \frac{v_i}{i_i} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$

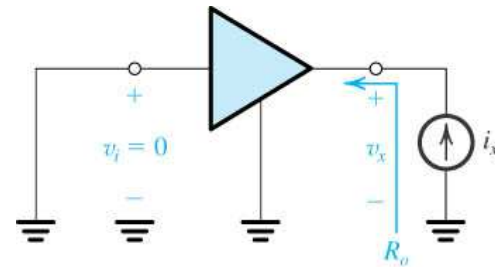
$$A_i = \left. \frac{i_o}{i_i} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$

$$A_{is} = \left. \frac{i_{os}}{i_i} \right|_{\text{Carga}=\text{curto}}$$

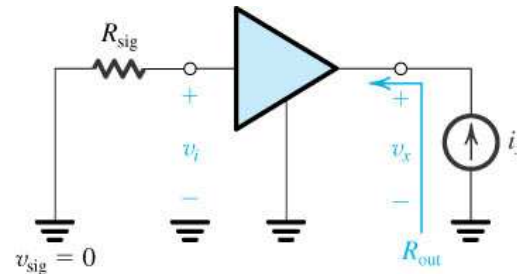
(max A_i)

$$G_v = \left. \frac{v_o}{v_{sig}} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$

$$G_{vo} = \left. \frac{v_o}{v_{sig}} \right|_{\text{Carga}=\infty}$$



$$R_o = \left. \frac{v_x}{i_x} \right|_{v_i=0}$$

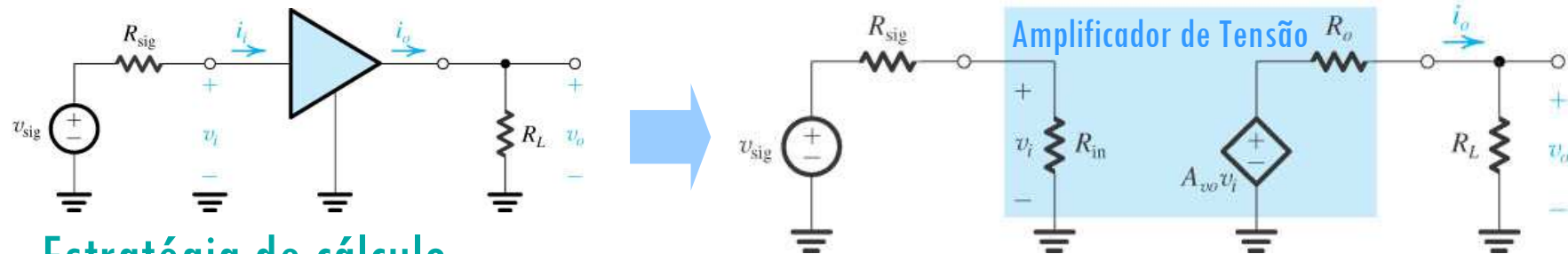


$$R_{out} = \left. \frac{v_x}{i_x} \right|_{v_{sig}=0}$$

Escolhemos estas!!!

Uma palavra sobre Circuitos Amplificadores

(Introdução à Eletrônica – vídeo aula 22, item 2, 14')



Estratégia de cálculo:

1. Ganho de Tensão: Determinar diretamente a relação v_o por v_i (ou V_{sig}).
2. Impedância de Entrada: Determinar diretamente a relação v_i por i_i
3. Impedância de Saída: Curto-circuitar a fonte de tensão de entrada (v_{sig}) e determinar a relação v_x por i_x
4. Ganho de Corrente (em curto circuito): Curto-circuitar a saída (R_L) e determinar a corrente i_o

$$A_v = \left. \frac{v_o}{v_i} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$

$$R_{in} = \left. \frac{v_i}{i_i} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$

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

$$A_{is} = \left. \frac{i_{os}}{i_i} \right|_{\text{Carga}=\text{curto}} \quad (\text{max } A_i)$$

$$G_v = \left. \frac{v_o}{v_{sig}} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$

Relações

$$\bullet \frac{v_i}{v_{sig}} = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{sig}}$$

$$\bullet A_v = A_{vo} \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

$$\bullet A_{vo} = G_m R_o$$

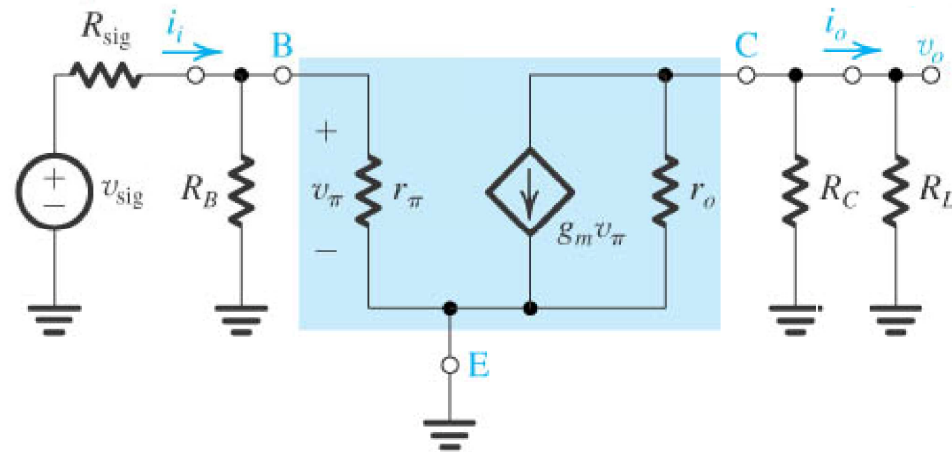
$$\bullet G_v = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{sig}} A_{vo} \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

$$\bullet G_{vo} = \frac{R_i}{R_i + R_{sig}} A_{vo}$$

$$\bullet G_v = G_{vo} \frac{R_L}{R_L + R_{out}}$$

O Amplificador TBJ Emissor Comum sem R_e (EC)

Análise Pequenos Sinais em frequências médias



Estratégia de cálculo:

1. Ganho de Tensão: Determinar diretamente a relação v_o por v_i (ou v_{sig}).
2. Impedância de Entrada: Determinar diretamente a relação v_i por i_i
3. Impedância de Saída: Curto-circuitar a fonte de tensão de entrada (v_{sig}) e determinar a relação v_x por i_x
4. Ganho de Corrente (em curto circuito): Curto-circuitar a saída (R_L) e determinar a corrente i_o

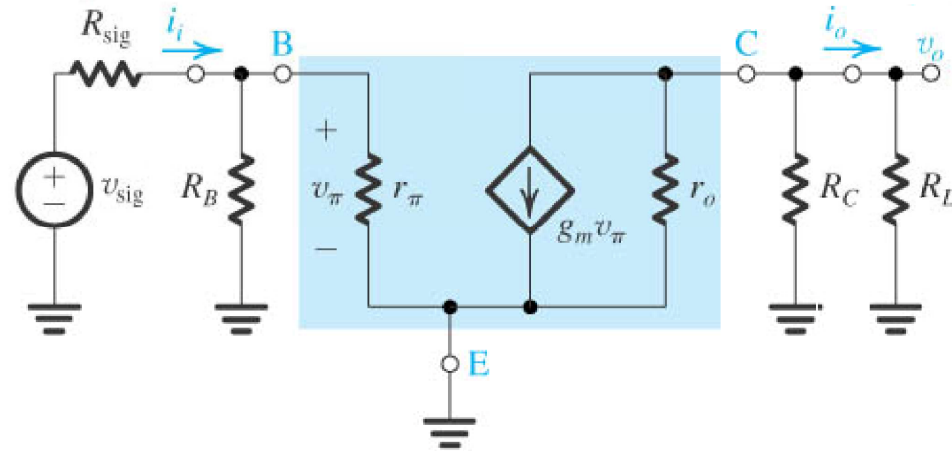
$$A_v = \left. \frac{v_o}{v_i} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$
$$R_{in} = \left. \frac{v_i}{i_i} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$
$$R_{out} = \left. \frac{v_x}{i_x} \right|_{v_{sig}=0}$$
$$A_{iS} = \left. \frac{i_{oS}}{i_i} \right|_{\text{Carga}=\text{curto}}$$
$$G_v = \left. \frac{v_o}{v_{sig}} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$

O Amplificador TBJ Emissor Comum sem R_e (EC)

Análise Pequenos Sinais em frequências médias

$$A_v = \left. \frac{v_o}{v_i} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$

$$G_v = \left. \frac{v_o}{v_{sig}} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$



$$R_{in} = \left. \frac{v_i}{i_i} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$

1. Ganho de Tensão: Determinar diretamente a relação v_o por v_i (ou v_{sig}).

$$v_o = -(R_L \parallel R_C \parallel r_o) g_m v_\pi$$

$$\text{Se } v_\pi = v_i \rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = -g_m (r_o \parallel R_C \parallel R_L)$$

$$G_v? \quad v_\pi = v_{sig} \frac{(R_B \parallel r_\pi)}{R_{sig} + (R_B \parallel r_\pi)}$$

$$v_o = -(R_L \parallel R_C \parallel r_o) g_m v_{sig} \frac{(R_B \parallel r_\pi)}{R_{sig} + (R_B \parallel r_\pi)}$$

$$G_v = \frac{v_o}{v_{sig}} = - \frac{(R_B \parallel r_\pi)}{R_{sig} + (R_B \parallel r_\pi)} g_m (r_o \parallel R_C \parallel R_L)$$

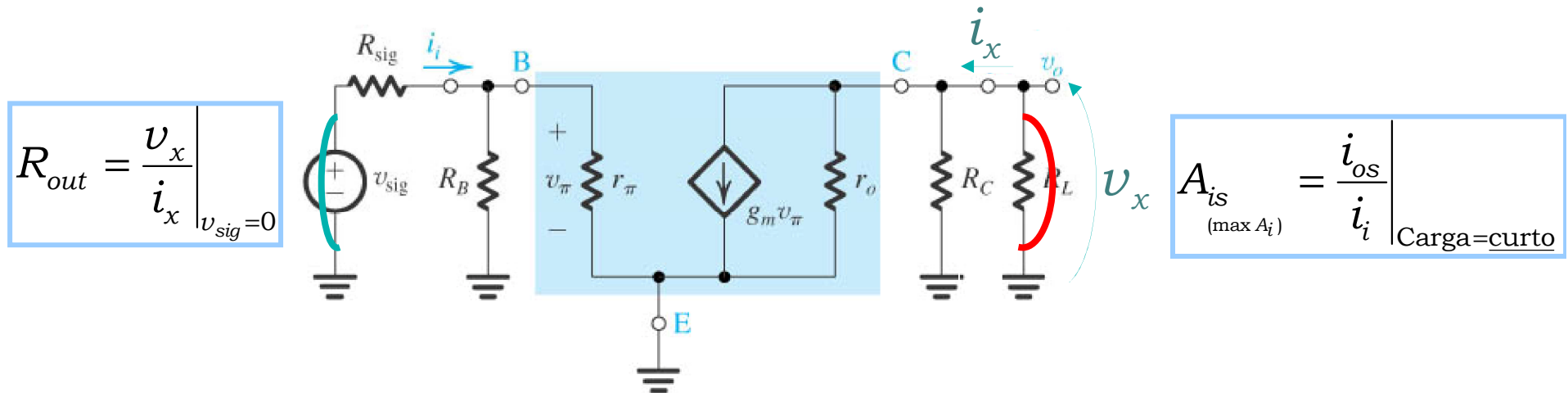
2. Impedância de Entrada: Determinar diretamente a relação v_i por i_i

$$\text{Se } v_\pi = v_i \rightarrow R_{in} = \frac{v_i}{i_i} = \frac{(R_B \parallel r_\pi) i_i}{i_i}$$

$$R_{in} = R_B \parallel r_\pi$$

O Amplificador TBJ Emissor Comum sem R_e (EC)

Análise Pequenos Sinais



3. Impedância de Saída: Curto-circuitar a fonte de tensão de entrada (v_{sig}) e determinar a relação v_x por i_x

$$v_{sig} = 0 \rightarrow i_i = 0 \rightarrow v_{\pi} = 0$$

$$\text{Se } v_{\pi} = 0 \rightarrow g_m v_{\pi} = 0 \text{ (aberto)}$$

$$v_x = (r_o \parallel R_C) i_x$$

$$\frac{v_x}{i_x} = R_{out} = (r_o \parallel R_C)$$

4. Ganho de Corrente (em curto circuito): Curto-circuitar a saída (R_L) e determinar a corrente i_o

$$i_i = \frac{v_{\pi}}{r_{\pi} \parallel R_B}$$

$$i_{os} = -(i_{R_C} + i_{r_o} + g_m v_{\pi})$$

$$i_{os} = -g_m v_{\pi}$$

$$i_{os} = -g_m (r_{\pi} \parallel R_B) i_i$$

$$A_{is} = \frac{i_{os}}{i_i} = -g_m (r_{\pi} \parallel R_B)$$

$$A_{is} \approx -g_m r_{\pi} = -g_m \frac{\beta}{g_m} = -\beta$$

2. parâmetros

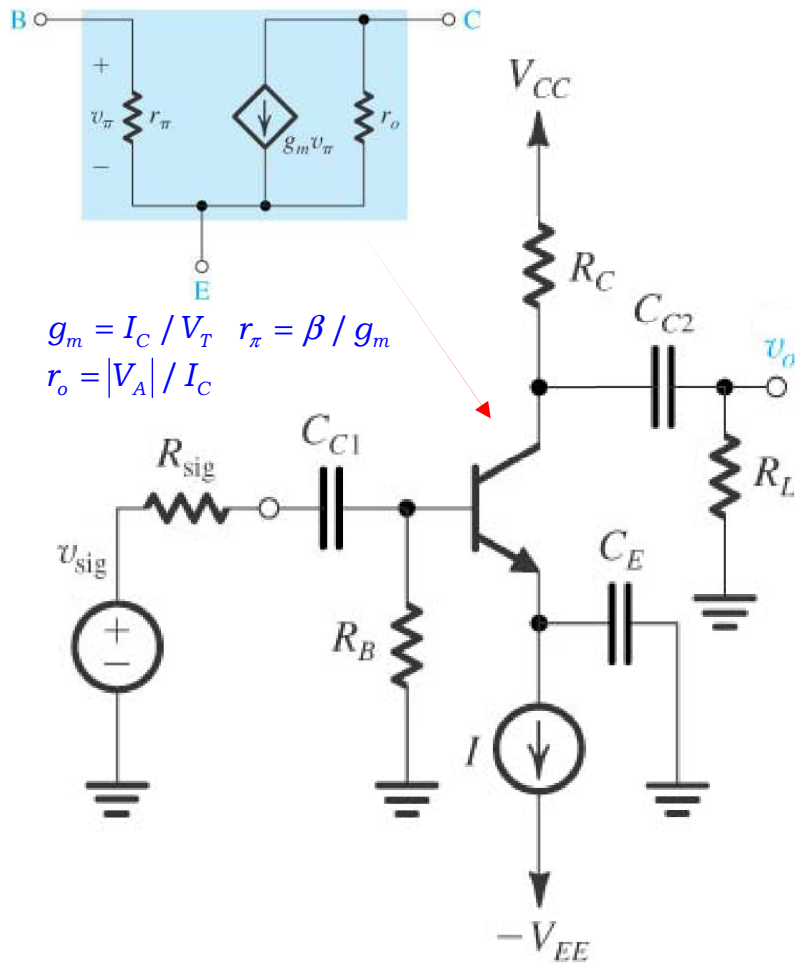
$$g_m = I_C / V_T$$

$$r_{\pi} = \beta / g_m$$

$$r_o = |V_A| / I_C$$

O Amplificador TBJ Emissor Comum sem R_e (EC)

Análise Pequenos Sinais em frequências médias



$$A_v = -g_m (r_o \parallel R_C \parallel R_L)$$

$$R_{in} = R_B \parallel r_\pi$$

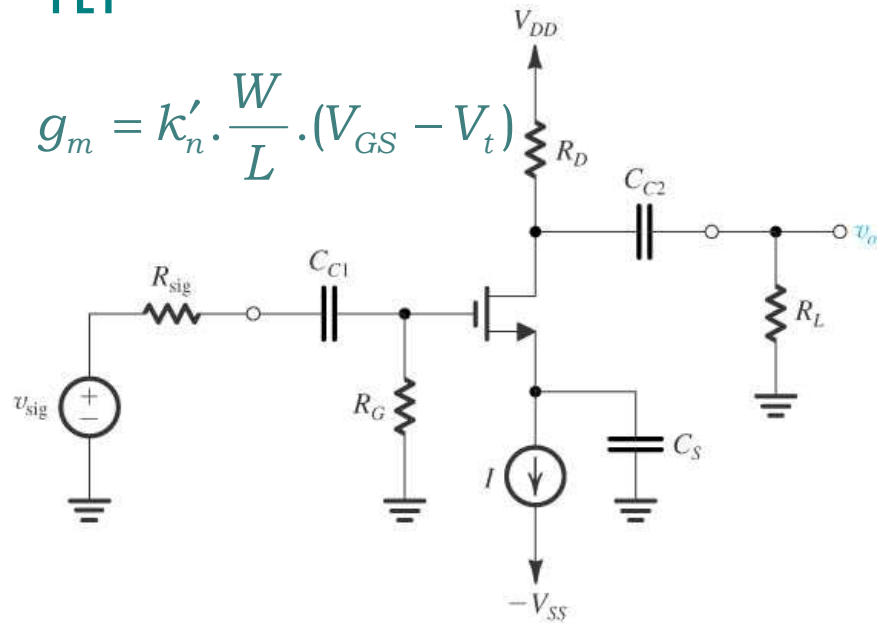
$$R_{out} = (r_o \parallel R_C)$$

$$A_{is} \approx -g_m r_\pi = -g_m \frac{\beta}{g_m} = -\beta$$

$$G_v = \frac{v_o}{v_{sig}} = -\frac{(R_B \parallel r_\pi)}{R_{sig} + (R_B \parallel r_\pi)} g_m (r_o \parallel R_C \parallel R_L)$$

Os Amplificadores MOS Fonte Comum e BJT Emissor Comum em frequências médias

FET



$$g_m = k'_n \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_t)$$

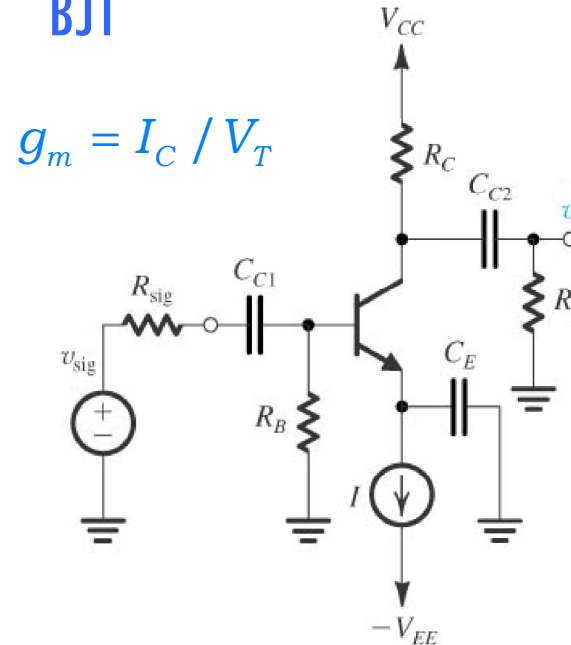
$$A_v = -g_m (r_o \parallel R_D \parallel R_L)$$

$$R_{in} = R_G$$

$$R_{out} = (r_o \parallel R_D)$$

$$A_{is} = -g_m R_G$$

BJT



$$g_m = I_C / V_T$$

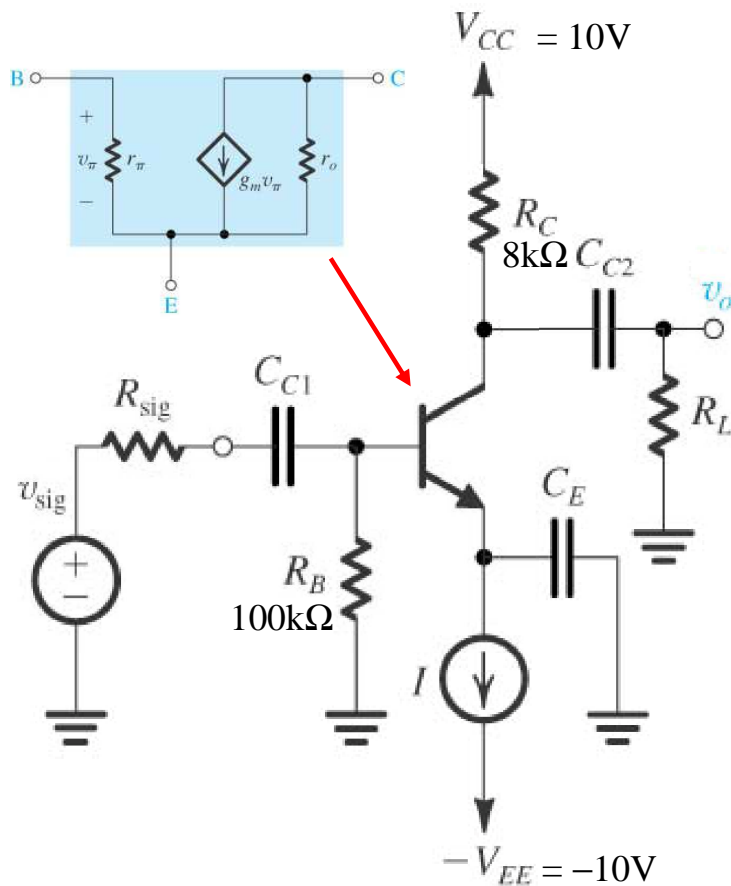
$$A_v = -g_m (r_o \parallel R_C \parallel R_L)$$

$$R_{in} = R_B \parallel r_\pi$$

$$R_{out} = (r_o \parallel R_C)$$

$$A_{is} \approx -g_m r_\pi = -\beta$$

Exercício 5.43: Considere o amplificador abaixo ($\beta=100$, $V_A = 100V$). Determine R_{in} (com e sem R_B), A_{v_o} (com e sem r_o), R_{out} (com e sem r_o) e A_{is} (com e sem R_B). Determine A_v quando $R_L = 5k\Omega$. Encontre G_v se $R_{sig} = 5k\Omega$. Se $v_i = 5mVp$, qual a máxima amplitude permitida para v_{sig} e qual o v_o correspondente?

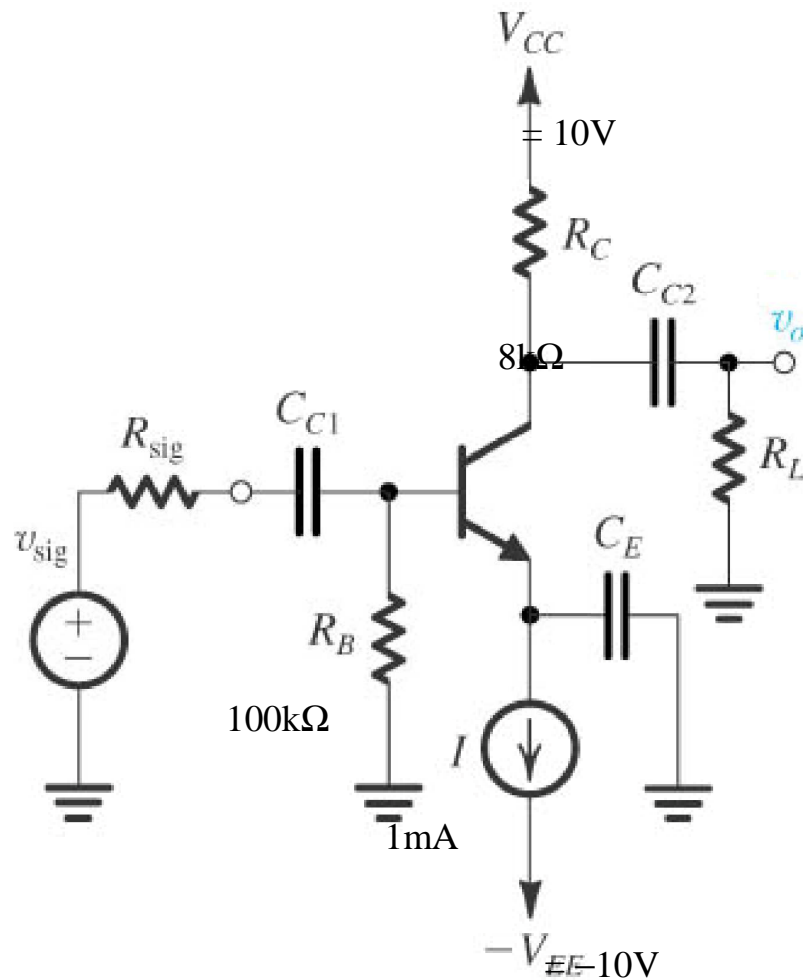


Estratégia de análise:

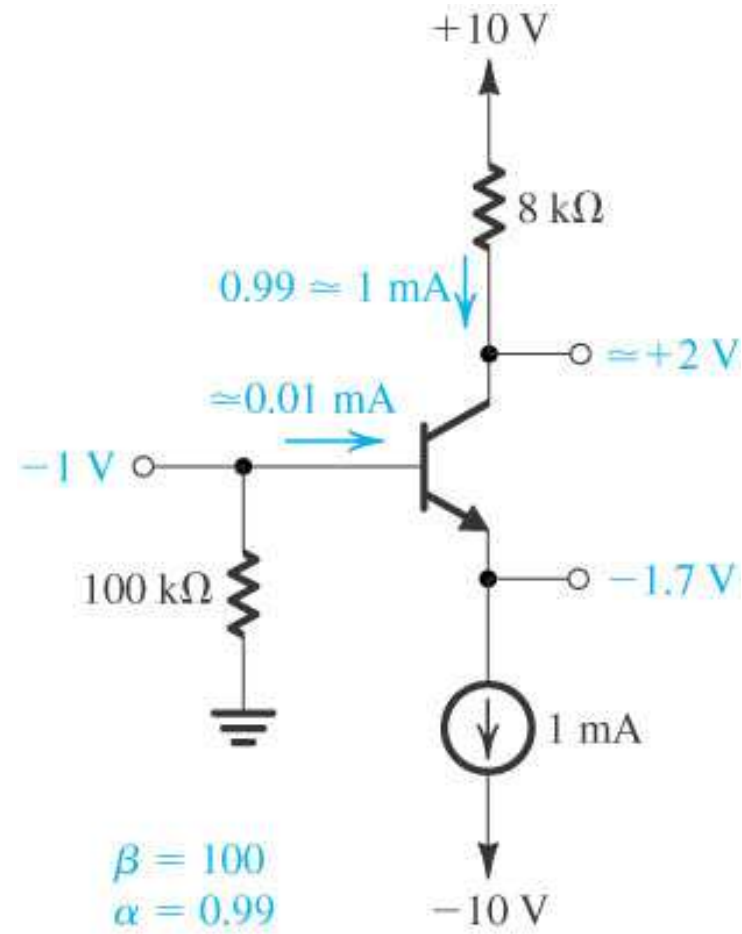
1. Determine o ponto de operação cc do TBJ e em particular o valor da corrente cc de coletor, I_C
2. Calcule os valores dos parâmetros dos modelos para pequenos sinais: $g_m = I_C / V_T$; $r_{\pi} = \beta / g_m$; $r_e = V_T / I_E$; $r_o = V_A / I_C$
3. Elimine as fontes cc substituindo cada fonte cc de tensão por um curto-circuito e cada fonte cc de corrente por um circuito aberto. Substitua os capacitores externos por curtos (freq. médias).
4. Substitua a TBJ por um dos seus modelos equivalentes. Embora qualquer um dos modelos possa ser utilizado, um deles deve ser mais conveniente dependendo do circuito a ser analisado.
5. Analise o circuito resultante para determinar as grandezas de interesse (por exemplo, ganho de tensão, resistência de entrada).

Exercício 5.43: Considere o amplificador abaixo ($\beta=100$, $V_A = 100V$). Determine R_{in} (com e sem R_B), A_{v_o} (com e sem r_o), R_{out} (com e sem r_o) e A_{is} (com e sem R_B). Determine A_v quando $R_L = 5k\Omega$. Encontre G_v se $R_{sig} = 5k\Omega$. Se $v_i = 5mVp$, qual a máxima amplitude permitida para v_{sig} e qual o v_o correspondente?

1. Determine o ponto de operação cc do TBJ e em particular o valor da corrente cc de coletor, I_C .

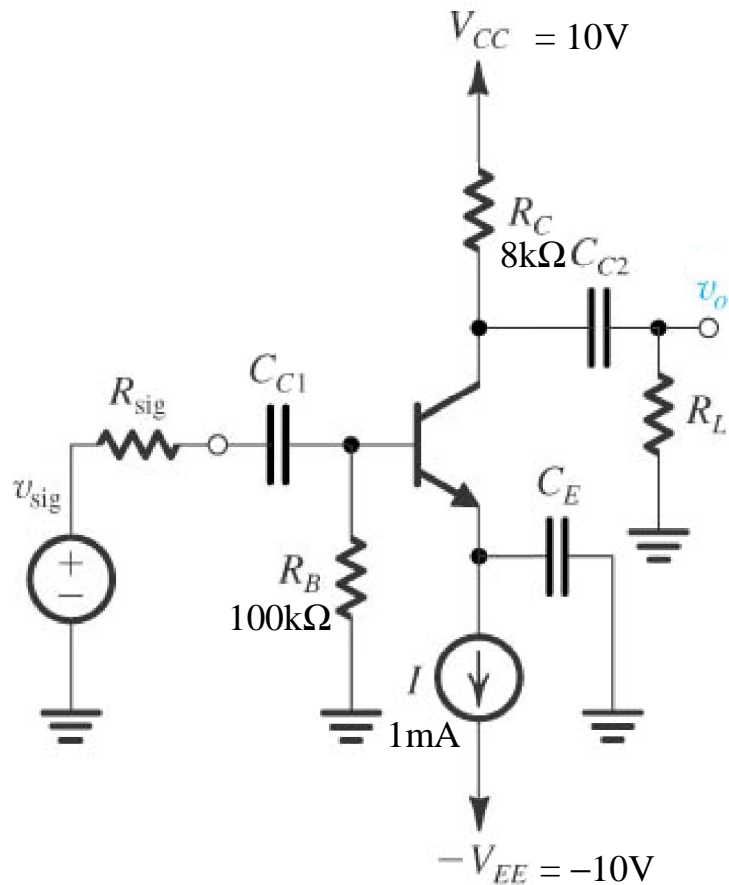


Supondo Reg Ativa

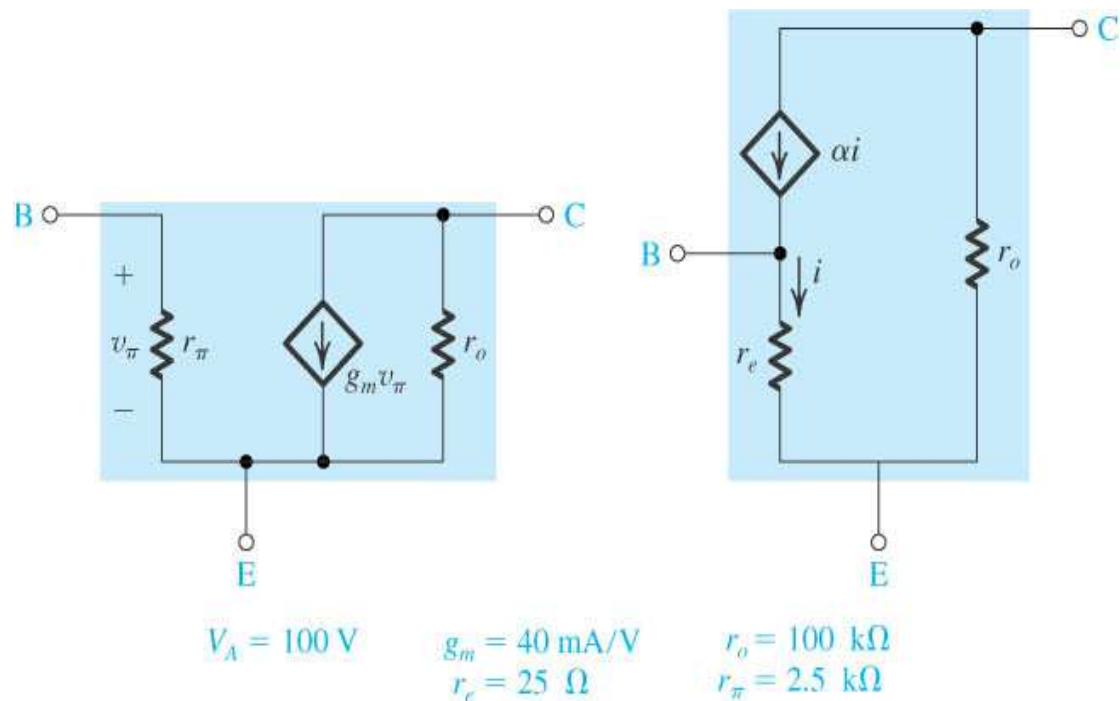


(a)

Exercício 5.43: Considere o amplificador abaixo ($\beta=100$). Determine R_{in} (com e sem R_B), A_{v_o} (com e sem r_o), R_{out} (com e sem r_o) e A_{i_s} (com e sem R_B). Determine A_v quando $R_L = 5k\Omega$. Encontre G_v se $R_{sig} = 5k\Omega$. Se $v_i = 5mV_p$, qual a máxima amplitude permitida para v_{sig} e qual o v_o correspondente?

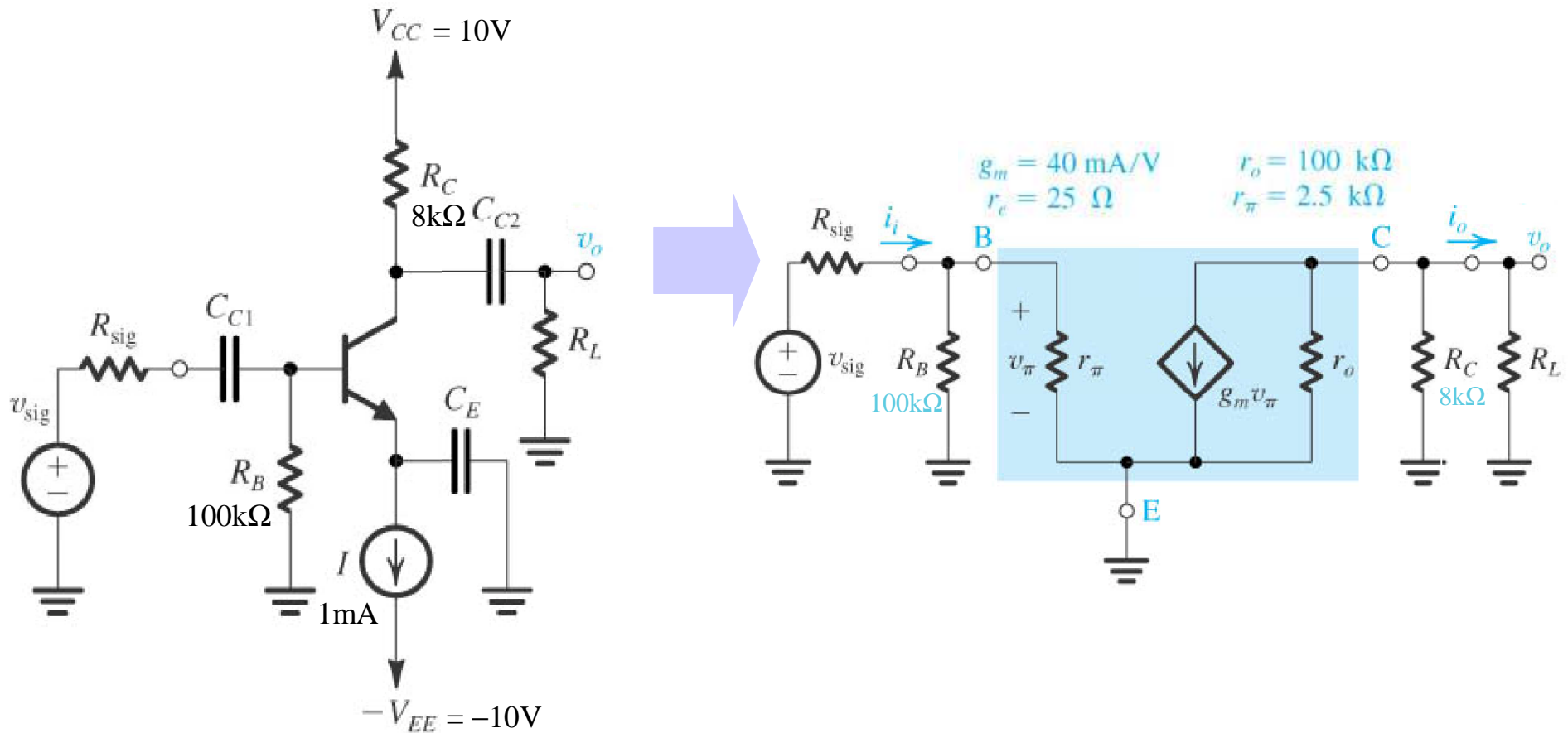


2. Calcule os valores dos parâmetros dos modelos para pequenos sinais: $g_m = I_C/V_T$; $r_\pi = \beta/g_m$; $r_e = V_T/I_E$; $r_o = V_A/I_C$



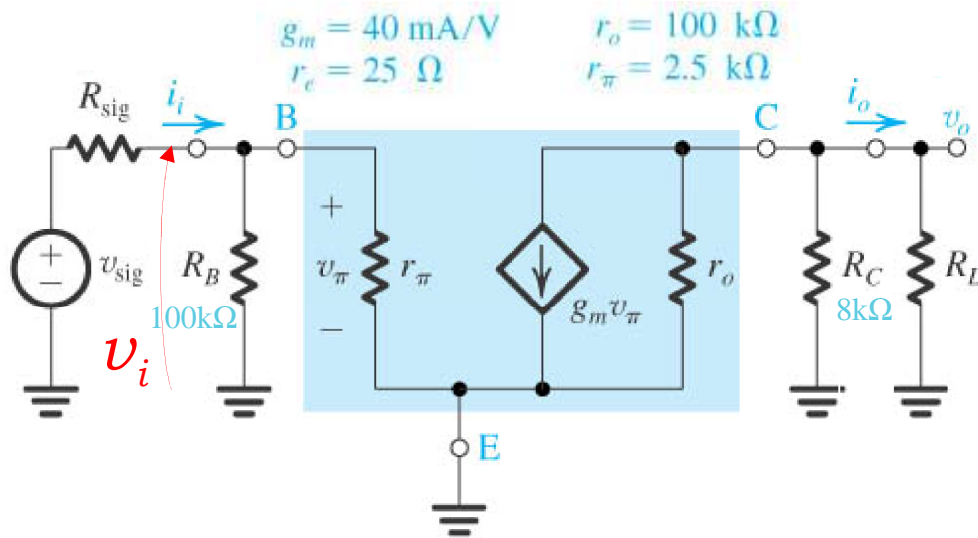
Exercício 5.43: Considere o amplificador abaixo ($\beta=100$). Determine R_{in} (com e sem R_B), A_{v_o} (com e sem r_o), R_{out} (com e sem r_o) e A_{i_s} (com e sem R_B). Determine A_v quando $R_L = 5k\Omega$. Encontre G_v se $R_{sig} = 5k\Omega$. Se $v_i = 5mV_p$, qual a máxima amplitude permitida para v_{sig} e qual o v_o correspondente?

3. Elimine as fontes \mathcal{L} substituindo cada fonte \mathcal{L} de tensão por um curto-circuito e cada fonte \mathcal{L} de corrente por um circuito aberto. Substitua os capacitores externos por curtos (freq. medias).
4. Substitua a TBJ por um dos seus modelos equivalentes. Embora qualquer um dos modelos possa ser utilizado, um deles deve ser mais conveniente dependendo do circuito a ser analisado.



Exercício 5.43: Considere o amplificador abaixo ($\beta=100$). Determine R_{in} (sem e com R_B), A_{v_o} (sem e com r_o), R_{out} (sem e com r_o) e A_{i_s} (sem e com R_B). Determine A_v quando $R_L = 5k\Omega$. Encontre G_v se $R_{sig} = 5k\Omega$. Se $v_i = 5mV_p$, qual a máxima amplitude permitida para v_{sig} e qual o v_o correspondente?

5. Analise o circuito resultante para determinar as grandezas de interesse (ganho de tensão, res de entrada, etc).



$$R_{in} = \frac{v_i}{i_i} \Big|_{\text{Carga}=R_L}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \Big|_{\text{Carga}=R_L}$$

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

$$A_{i_s} = \frac{i_{os}}{i_i} \Big|_{\text{Carga}=\text{curto}}$$

(max A_i)

$$G_v = \frac{v_o}{v_{sig}} \Big|_{\text{Carga}=R_L}$$

$$G_v = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{sig}} A_{v_o} \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

$$A_v = -g_m (r_o \parallel R_C \parallel R_L)$$

$$R_{in} = R_B \parallel r_\pi$$

$$R_{out} = (r_o \parallel R_C)$$

$$A_{i_s} \approx -g_m r_\pi = -g_m \frac{\beta}{g_m} = \beta$$



CAPITULO 5

Amplificadores com Transistores

Aula 4

PSI 2306 – Eletrônica

Programação para a Primeira Prova

Aula	Matéria	Capítulo/ página (inglês)
1 ^a	Revisão de transistor bipolar de junção - TBJ (funcionamento interno e expressões básicas) - Exemplo 5.4 O TBJ como amplificador para pequenos sinais (as condições c.c., a corrente de coletor e a transcondutância)	Sedra, Cap. 5, p. 235-240 (277-285); p. 263-264 (421-423); p. 275-276 (443-445).
2 ^a	A corrente de base e a resistência de entrada da base, a resistência de entrada do emissor. Ganho de tensão, Exemplo 5.38, modelos equivalentes (modelos π -híbrido e T)	Sedra, Cap. 5, p. 276-279 (445-450)
3 ^a	Aplicação dos modelos equivalentes para pequenos sinais, Efeito Early, Exemplo 5.14 O amplificador emissor comum (EC) - Exercício 5.43	Sedra, Cap. 5 p. 290-293 (467-470)
4 ^a	O amplificador em emissor comum com resistência de emissor. Exercício 5.44	Sedra, Cap. 5 p. 293-296 (470-474)
5 ^a	O amplificador em base comum. O Amplificador em coletor comum. Exercício 5.47	Sedra, Cap. 5 p. 296-301 (475-484)
6 ^a	Resposta em frequência dos circuitos RC Pólos e zeros, funções de primeira ordem, curvas de Bode (pólo simples, zero simples). Exemplo E.1, exemplo E.2	Sedra, Apend. D, p. 823-825 (D6-D9) Sedra, Apend. E, p.830-833 (E1-E6)
7 ^a	Teorema de Miller. Exemplo 6.7 Resposta em alta frequência do Emissor Comum Exemplo 5.18	Sedra, Cap. 6, p. 363-364 (578-580) Sedra, Cap. 5, p. 306-310 (491-497)
8 ^a	Resposta em baixa frequência do Emissor Comum Exemplo 5.19	Sedra, Cap. 5, p. 310-314 (497-503)
9 ^a	Resposta em alta e baixa frequência do Fonte Comum Exemplo 4.12	Sedra, Cap. 4, p. 202-208 (326-335)
10 ^a	Aula de Exercícios	
1^a. Semana de provas		
Data:		

4ª Aula:

Estudo do Amplificador Emissor Comum com R_e

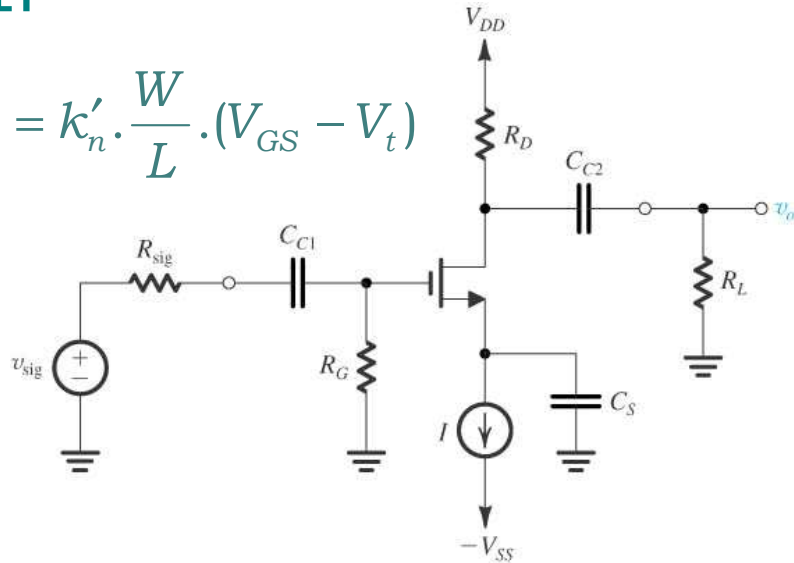
Ao final desta aula você deverá estar apto a:

- **Analisar modificações em circuitos visando adequar parâmetros como ganhos e impedâncias**
- **Realizar análises para determinação de parâmetros de amplificadores diretamente sobre o circuito elétrico**

Os Amplificadores MOS Fonte Comum sem e com R_e

FET

$$g_m = k'_n \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_t)$$



$$A_v = -g_m (r_o \parallel R_D \parallel R_L)$$

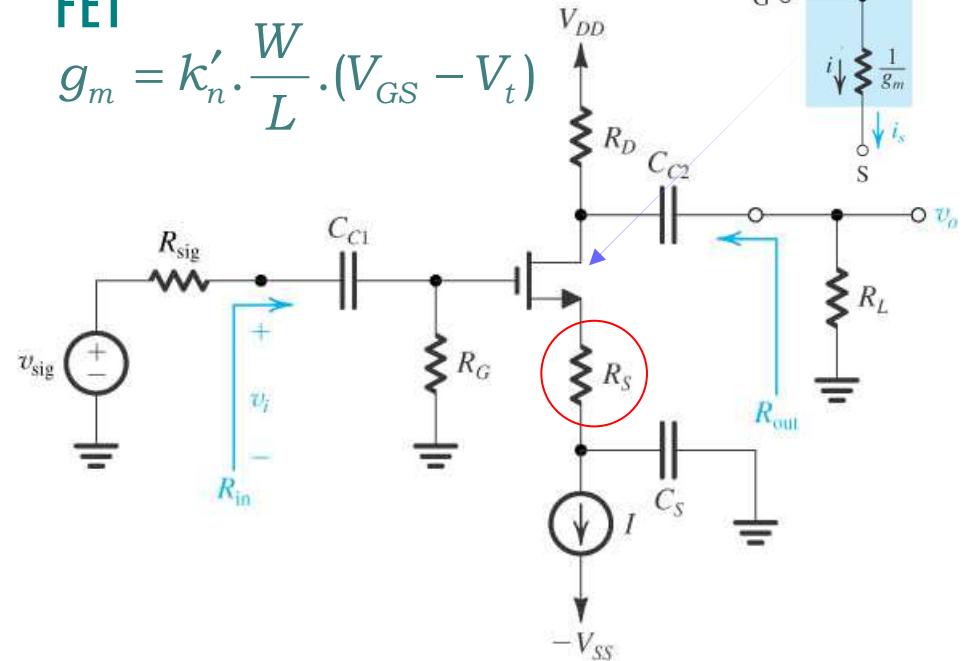
$$R_{in} = R_G$$

$$R_{out} = (r_o \parallel R_D)$$

$$A_{is} = -g_m R_G$$

FET

$$g_m = k'_n \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_t)$$



$$A_v = -g_m \frac{(R_D \parallel R_L)}{1 + g_m R_S}$$

$$R_{in} = R_G$$

$$R_{out} = R_D$$

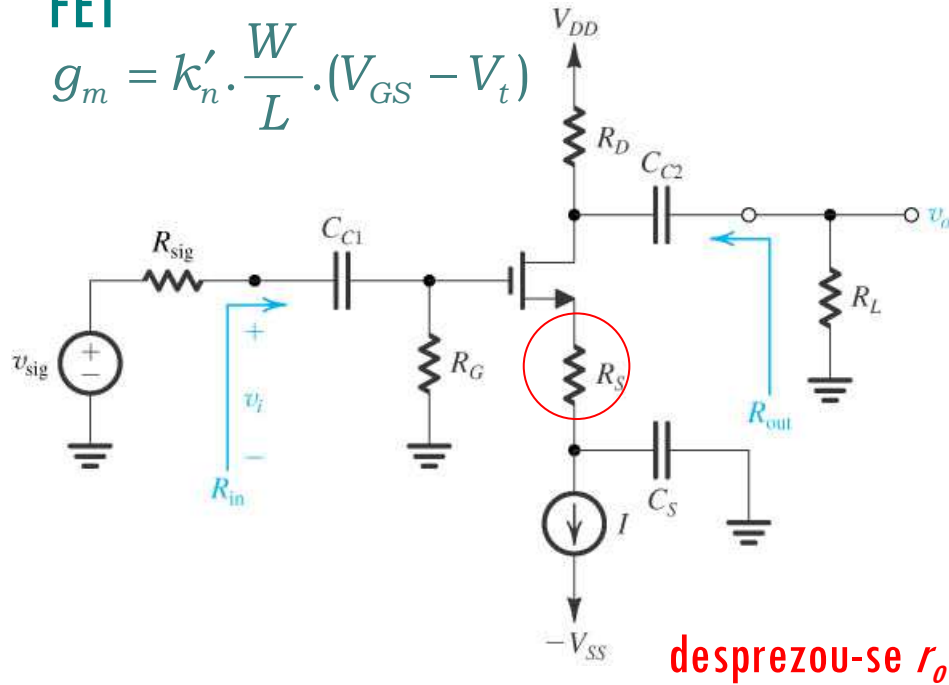
$$A_{is} = -g_m R_G$$

desprezou-se r_o

O Amplificador BJT Emissor Comum com Resistência de Emissor (R_e) em frequências médias

FET

$$g_m = k'_n \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_t)$$



$$A_v = -g_m \frac{(R_D \parallel R_L)}{1 + g_m R_S}$$

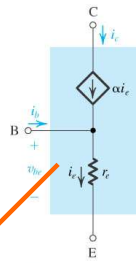
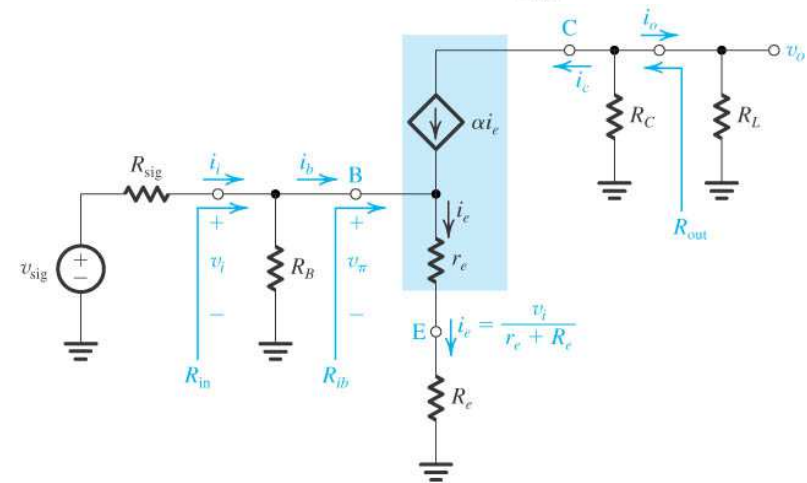
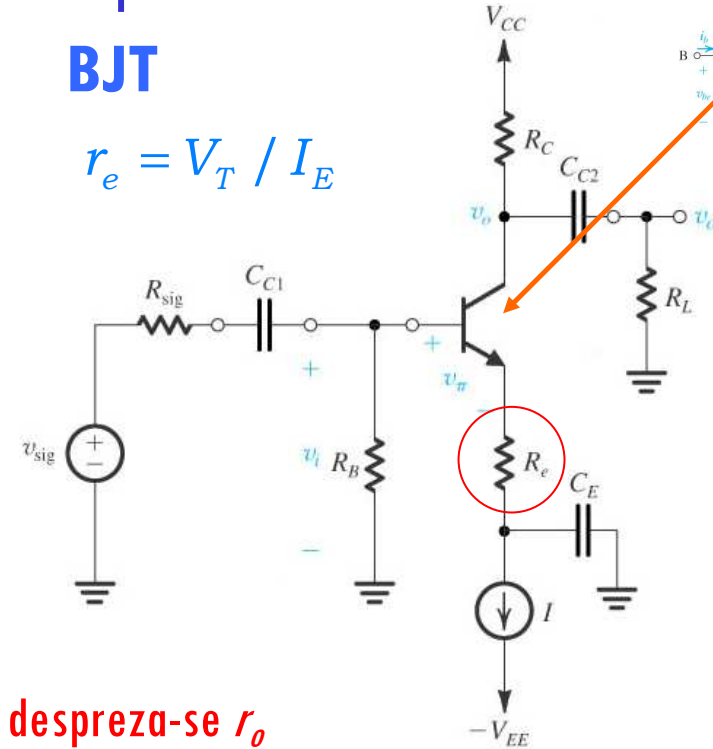
$$R_{in} = R_G$$

$$R_{out} = R_D$$

$$A_{is} = -g_m R_G$$

BJT

$$r_e = V_T / I_E$$



O Amplificador TBJ Emissor Comum com R_e (EC)

Análise Pequenos Sinais em frequências médias

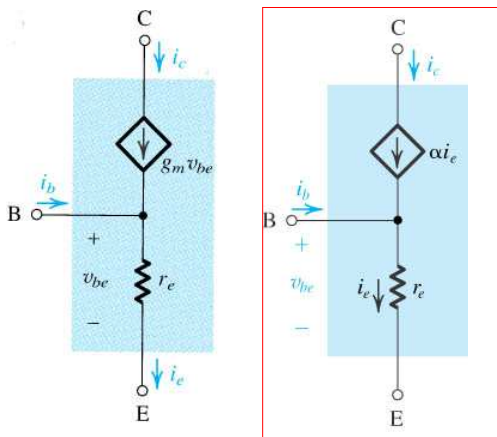
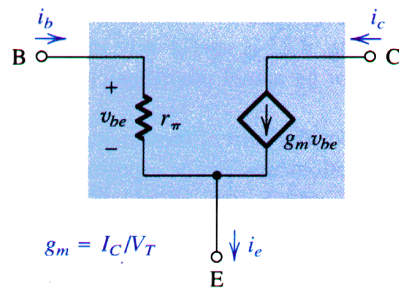
2. parâmetros

$$g_m = I_C / V_T$$

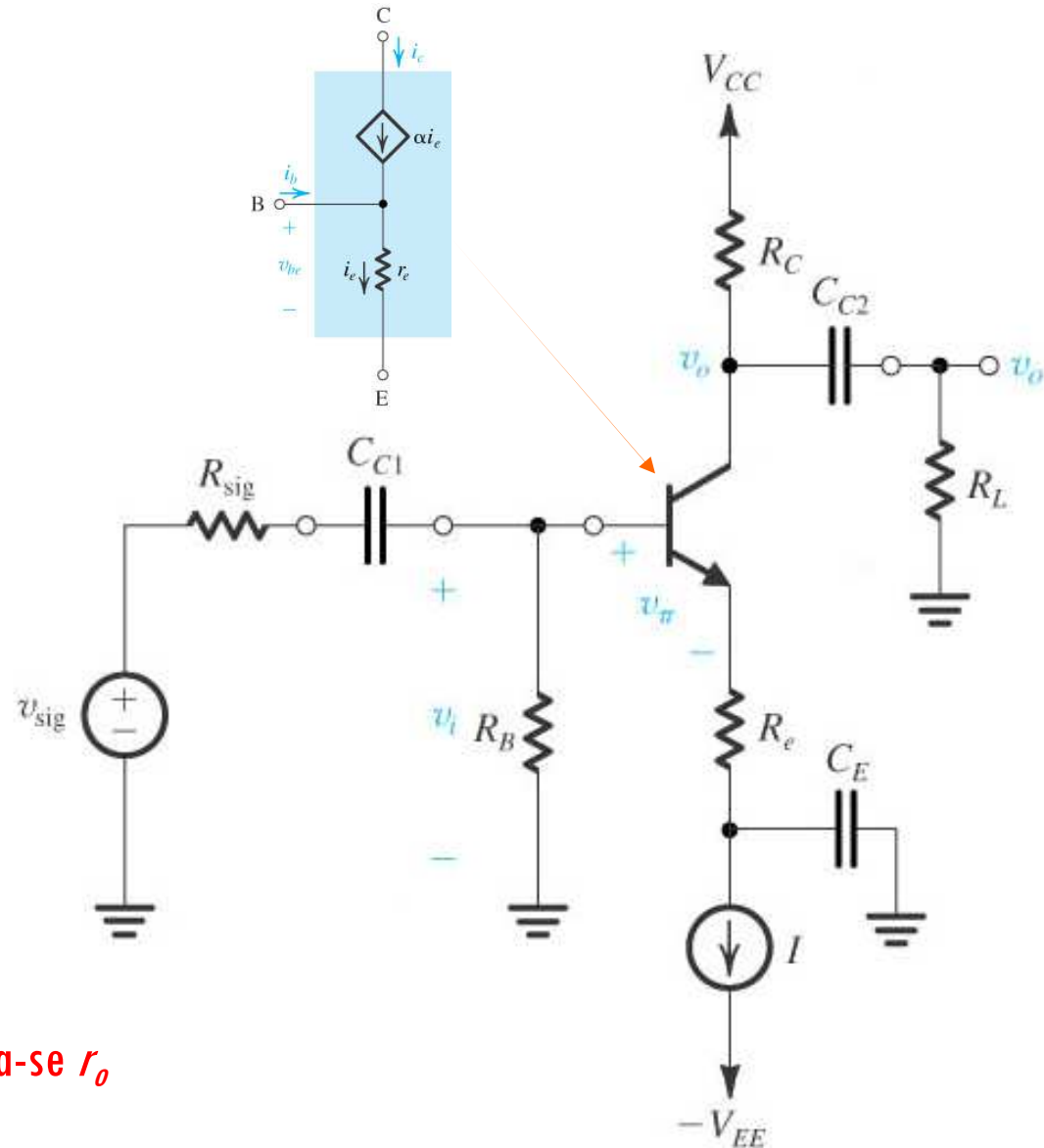
$$r_\pi = \beta / g_m$$

$$r_e = V_T / I_E$$

4. modelos

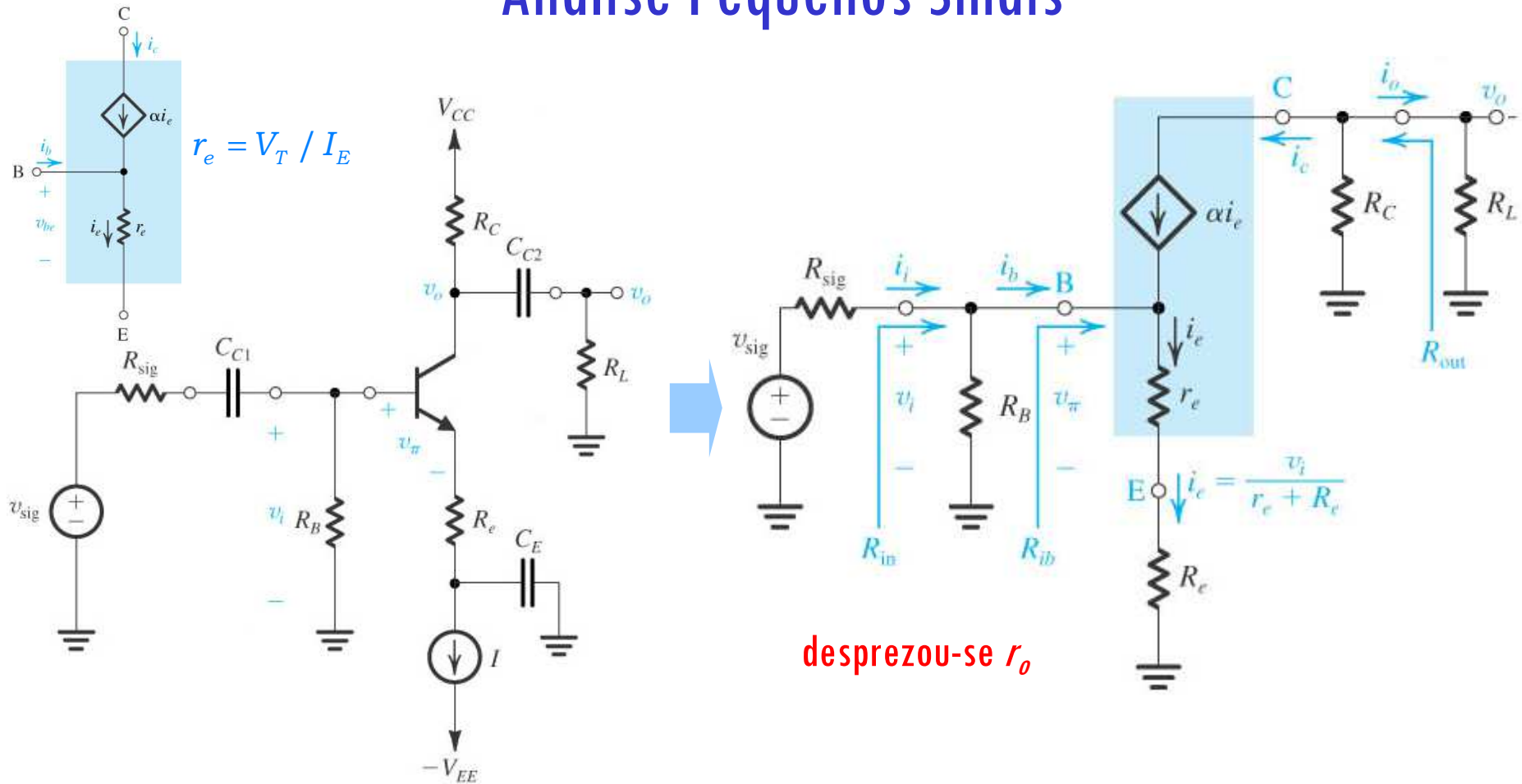


despreza-se r_o



O Amplificador TBJ Emissor Comum com R_e (EC)

Análise Pequenos Sinais



$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \Big|_{\text{Carga}=R_L}$$

$$R_{in} = \frac{v_i}{i_i} \Big|_{\text{Carga}=R_L}$$

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

$$A_{is} = \frac{i_{os}}{i_i} \Big|_{\text{Carga}=\text{curto}}$$

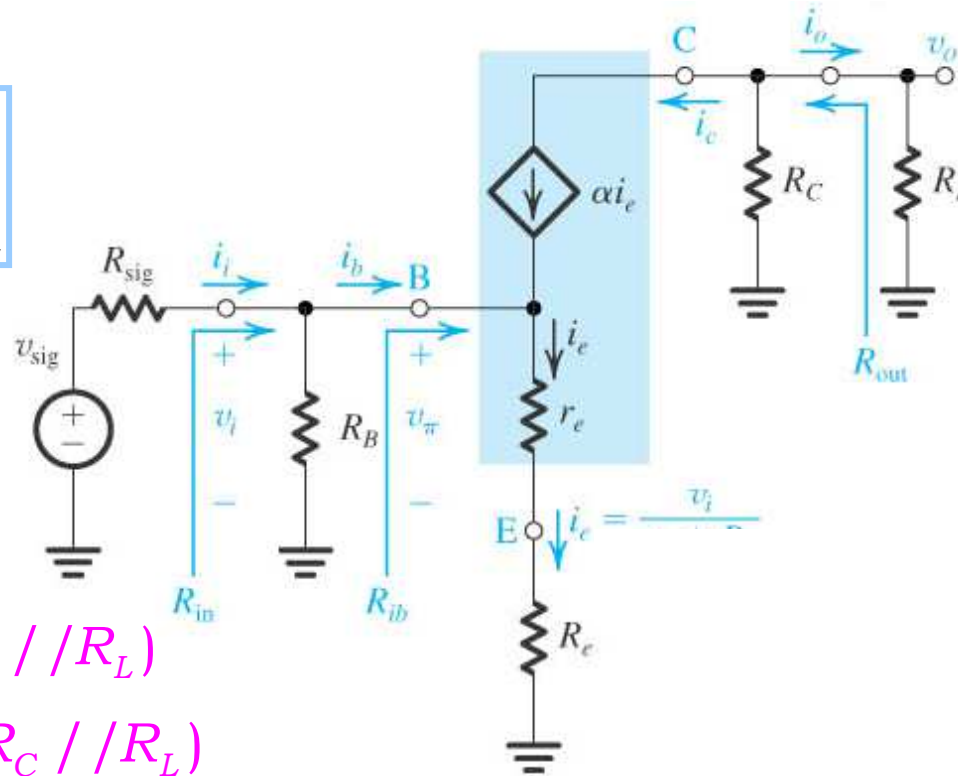
(max A_i)

$$G_v = \frac{v_o}{v_{sig}} \Big|_{\text{Carga}=R_L}$$

O Amplificador TBJ Emissor Comum com R_e (EC)

Análise Pequenos Sinais

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \Big|_{\text{Carga}=R_L}$$



$$\begin{aligned} v_o &= -i_c(R_C // R_L) \\ &= -\alpha i_e(R_C // R_L) \\ &= -\frac{\alpha v_i (R_C // R_L)}{(r_e + R_e)} \end{aligned}$$

$$\rightarrow A_{vo} = -\frac{\alpha R_C}{r_e + R_e} = -\frac{\alpha}{r_e} \frac{R_C}{1 + R_e / r_e}$$

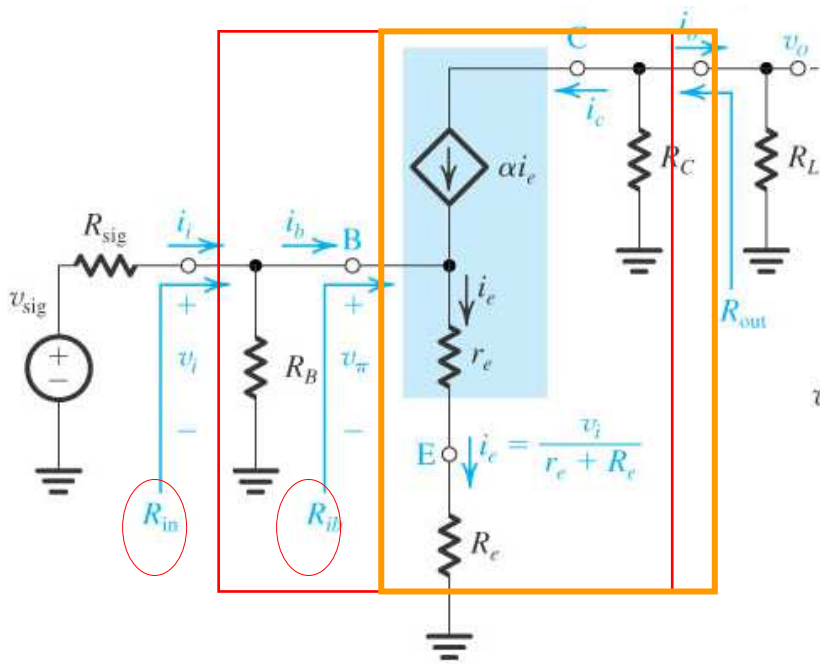
$$\rightarrow A_v = -\frac{\alpha(R_C // R_L)}{r_e + R_e} \cong -\frac{R_C // R_L}{r_e + R_e}$$

para $\alpha \approx 1$

$$\rightarrow A_{vo} = -g_m \frac{R_C}{1 + R_e / r_e} \cong -\frac{g_m R_C}{1 + g_m R_e}$$

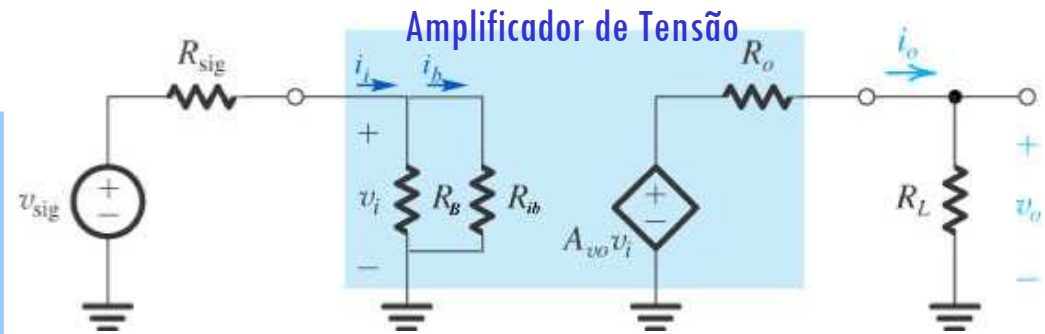
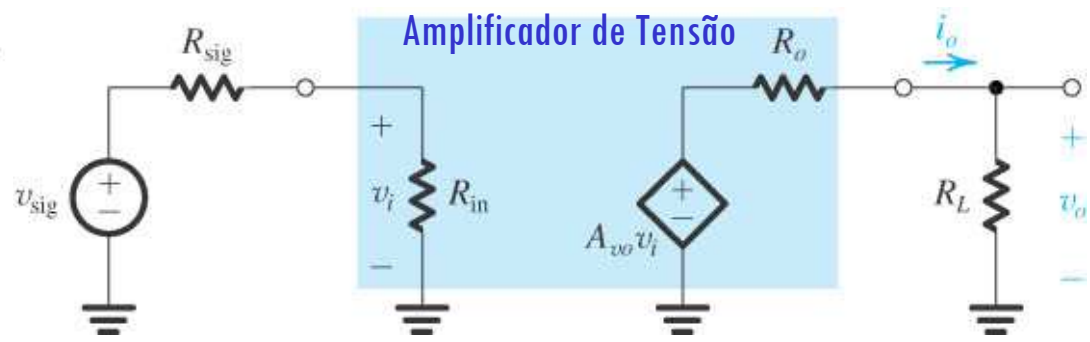
O Amplificador TBJ Emissor Comum com R_e (EC)

Análise Pequenos Sinais



$$R_{in} = \frac{v_i}{i_i} \Big|_{\text{Carga}=R_L}$$

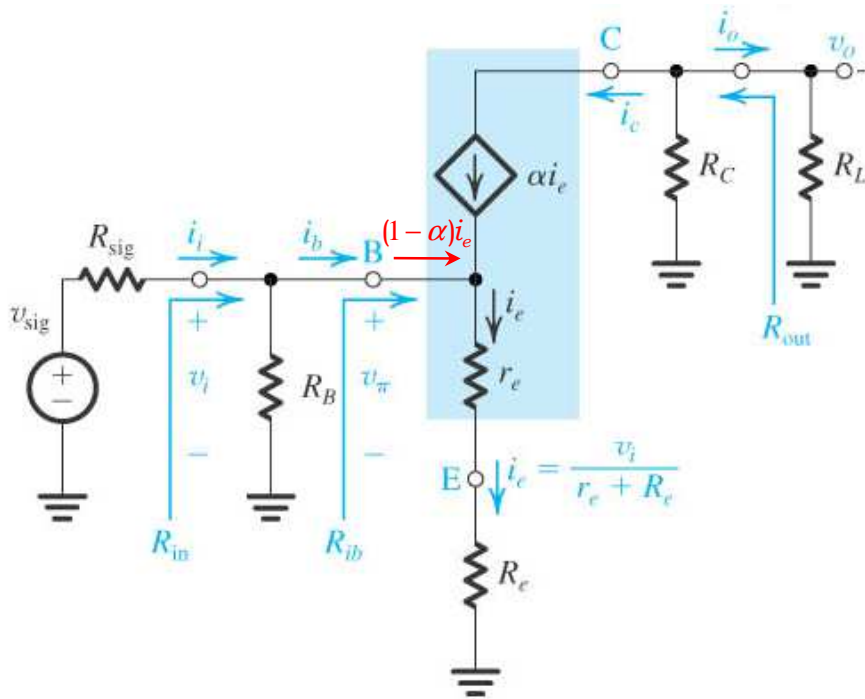
$$"R_{in}" = R_{ib} \equiv \frac{v_i}{i_b} = \frac{v_i}{i_i = i_b} \Big|_{\text{Carga}=R_L}$$



$$R_{in} = \frac{v_i}{i_i} \Big|_{\text{Carga}=R_L} = R_B \parallel R_{ib}$$

O Amplificador TBJ Emissor Comum com R_e (EC)

Análise Pequenos Sinais

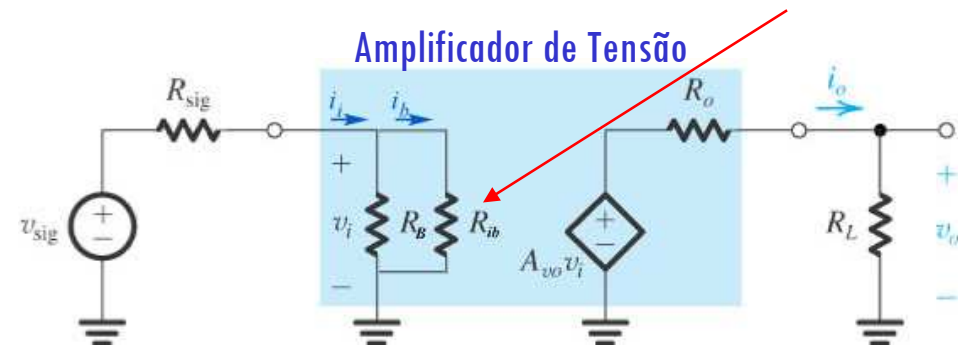


$$R_{ib} \equiv \frac{v_i}{i_b} \rightarrow i_b = (1 - \alpha)i_e = \frac{i_e}{\beta + 1}$$

$$R_{ib} = \frac{v_i (\beta + 1)}{i_e} \rightarrow i_e = \frac{v_i}{r_e + R_e}$$

$$R_{ib} = \frac{v_i (\beta + 1)}{i_e} = \frac{v_i (\beta + 1)}{v_i / (r_e + R_e)} = (\beta + 1)(r_e + R_e)$$

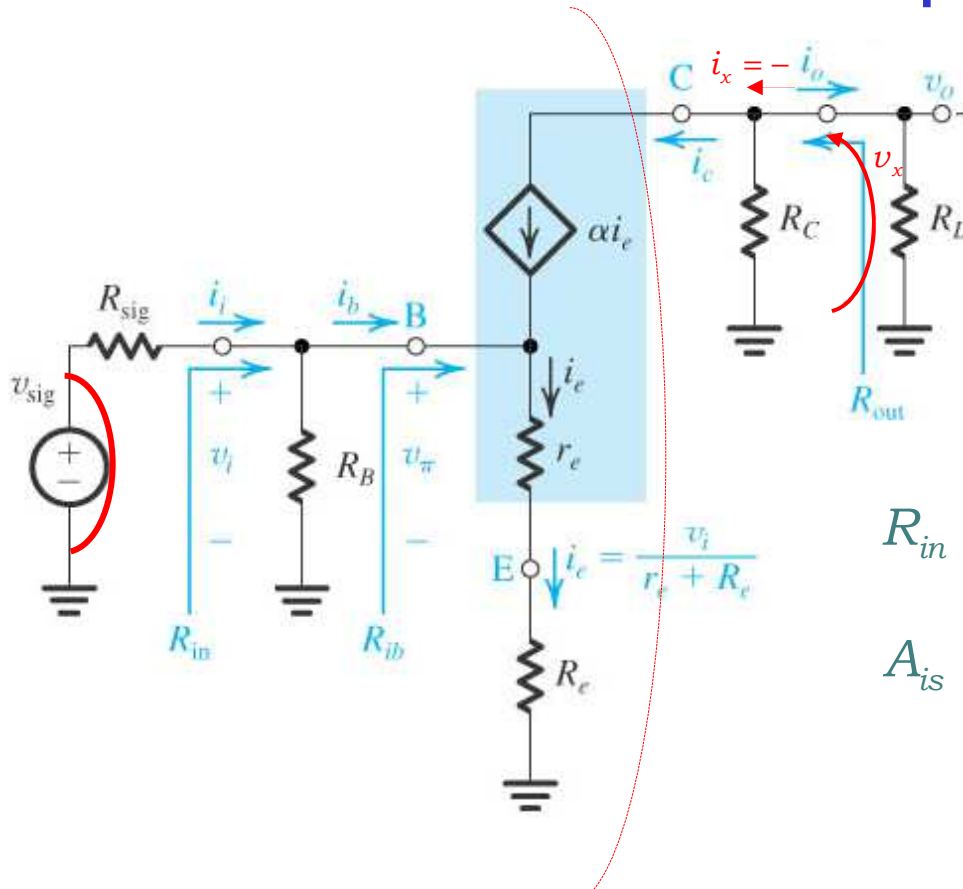
resistência refletida na entrada



$$R_{in} = R_B \parallel R_{ib} = R_B \parallel [R_{ib} = (\beta + 1)(r_e + R_e)]$$

O Amplificador TBJ Emissor Comum com R_e (EC)

Análise Pequenos Sinais



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

$$R_{out} = R_C$$

$$A_{is} = \left. \frac{i_{os}}{i_i} \right|_{\text{Carga = curto}}$$

$$i_{os} = -\alpha i_e$$

$$i_i = v_i / R_{in}$$

$$R_{in} = R_B \parallel R_{ib} = R_B \parallel [R_{ib} = (\beta + 1)(r_e + R_e)]$$

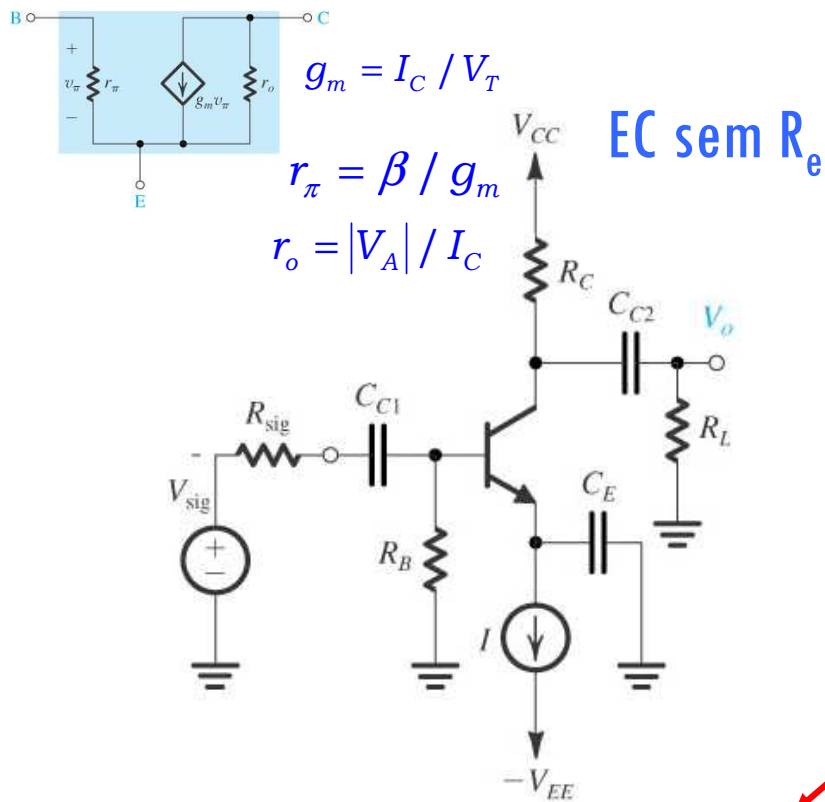
$$A_{is} = -\frac{\alpha R_{in} i_e}{v_i} \quad i_e = \frac{v_i}{R_e + r_e}$$

$$A_{is} = -\frac{\alpha (R_B \parallel R_{ib})}{r_e + R_e}$$

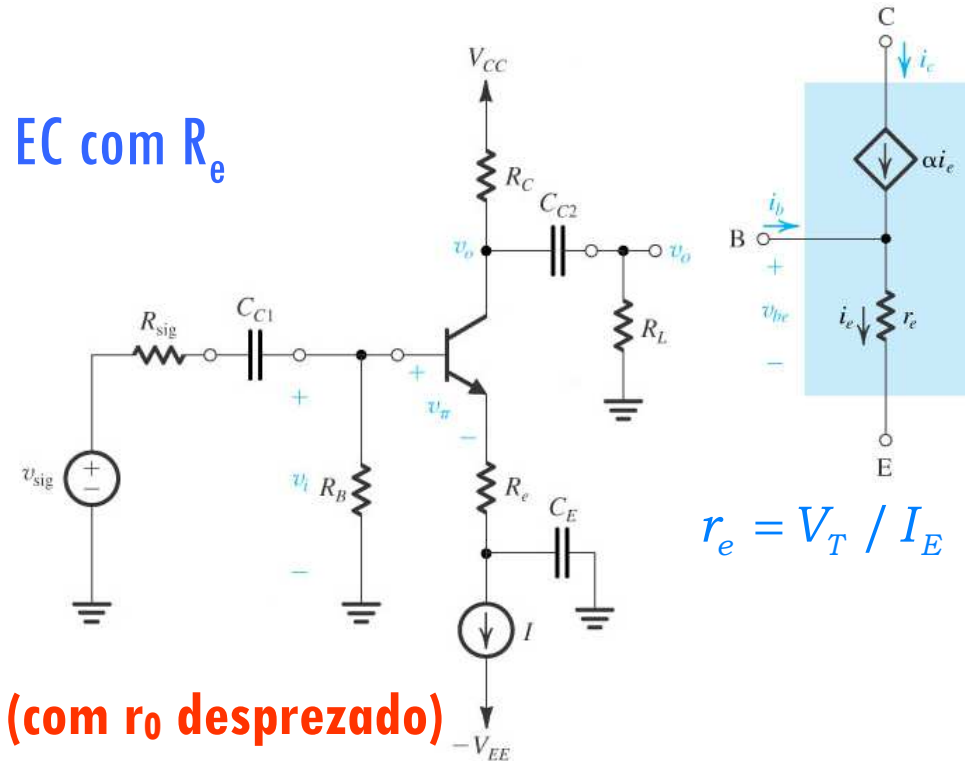
$$\text{se } R_B \gg R_{ib} \rightarrow A_{is} = -\frac{\alpha (\beta + 1)(r_e + R_e)}{r_e + R_e} = -\beta$$

$$\frac{v_\pi}{v_i} = \frac{r_e}{R_e + r_e} \cong \frac{1}{1 + g_m R_e}$$

Os Amplificadores TBJ Emissor Comum com e sem R_e



EC com R_e



$$A_v = -g_m (r_o \parallel R_C \parallel R_L) \approx \alpha \cdot (R_C \parallel R_L) / r_e$$

$$R_{in} = R_B \parallel r_\pi$$

$$R_{out} = (r_o \parallel R_C)$$

$$A_{is} \approx -g_m r_\pi = -\beta$$

(com r_o desprezado)

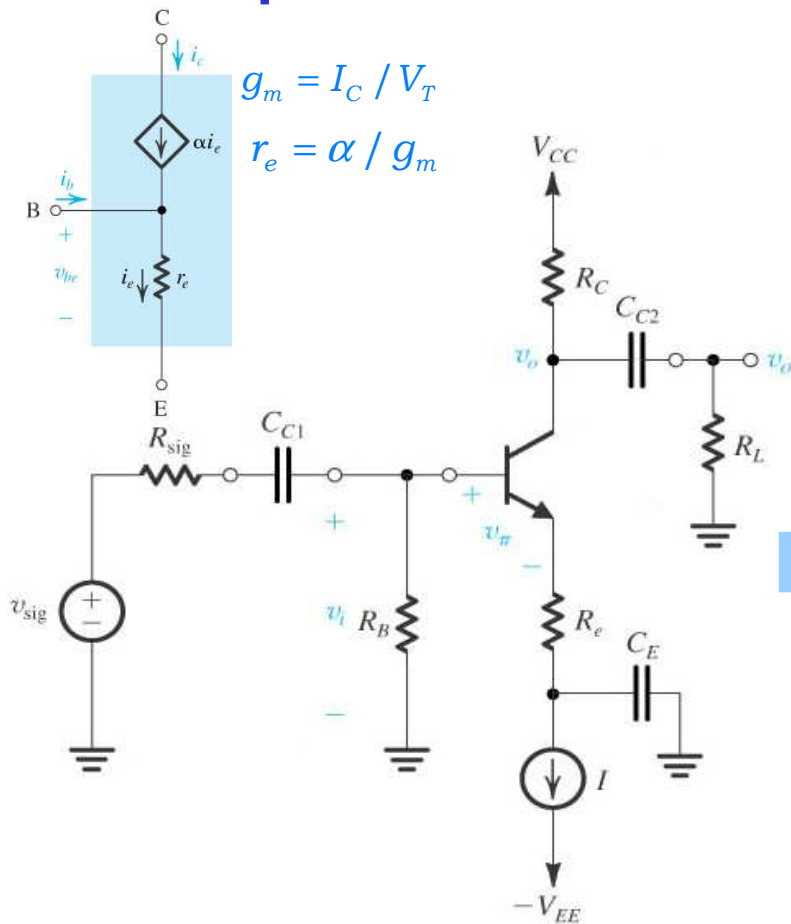
$$A_v = -\frac{\alpha (R_C \parallel R_L)}{r_e + R_e} \cong -\frac{R_C \parallel R_L}{r_e + R_e}$$

$$R_{in} = R_B \parallel R_{ib} = R_B \parallel [R_{ib} = (\beta + 1)(r_e + R_e)]$$

$$R_{out} = R_C$$

$$A_{is} = -\frac{\alpha (R_B \parallel R_{ib})}{r_e + R_e} \approx -\beta$$

O Amplificador TBJ Emissor Comum com R_e (EC): Análise Pequenos Sinais



1. A resistência de entrada R_{ib} aumenta do fator $(1 + g_m R_e)$
2. O ganho de tensão da base para o coletor (A_v) é reduzido do mesmo fator
3. Para a mesma distorção (não linear) o sinal v_i pode ser aumentado do mesmo fator
4. O ganho G_v é menos dependente do valor de β
5. A resposta em altas frequências melhora significativamente (veremos na segunda parte do curso)

$$A_v = \left. \frac{v_o}{v_i} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$

$$R_{in} = \left. \frac{v_i}{i_i} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$

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

$$A_{is} = \left. \frac{i_{os}}{i_i} \right|_{\text{Carga}=\text{curto}}$$

$$G_v = \left. \frac{v_o}{v_{sig}} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$

$$G_v = \left. \frac{v_o}{v_{sig}} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$

$$G_v = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{sig}} A_{vo} \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

O Amplificador TBJ Emissor Comum com R_e (EC)

Exercício 5.44 Considere o circuito EC com degeneração de emissor da Figura 5.61 quando polarizado como no Exercício 5.41. Em particular, recorra a Figura E5.41 para consultar as correntes de polarização e os valores dos elementos do modelo TBJ no ponto de polarização. Suponha que o amplificador seja alimentado a partir de uma fonte que tem $R_{sig} = 5k\Omega$, e admita $R_L = 5k\Omega$. Determine o valor de R_e que resulte em $R_{in} = 20k\Omega$. Com o valor de R_e obtido ache A_{vo} , R_{out} , A_v , G_v e A_{is} . Se v_p for limitado a 5 mV, qual é o valor máximo que v_{sig} pode ter com e sem R_e presente. Encontre o valor correspondente de v_o .

Resposta 225Ω ; -32 V/V ; $8 \text{ k}\Omega$; $-12,3 \text{ V/V}$; $-9,8 \text{ V/V}$; $-79,2 \text{ A/A}$; $62,5 \text{ mV}$; 15 mV ; $0,6 \text{ V}$

Se: $R_{sig} = 5k\Omega$, $R_L = 5k\Omega$
 $R_{in} = 4 \times R_{sig} = 20k\Omega$

① $R_{in} = R_B \parallel R_{ib} = 100k \parallel R_{ib}$
 for $R_{in} = 20k \rightarrow R_{ib} = 25k\Omega$
 $R_{ib} = (\beta + 1)(r_e + R_e)$
 $25k \approx 100 \times (25 + R_e)$
 $\rightarrow R_e = 225\Omega$

② $A_{vo} = \frac{-g_m \cdot R_C}{1 + g_m R_e} = \frac{-40 \times 8}{1 + 40 \times 0.225}$
 $A_{vo} = \underline{\underline{-32 \text{ V/V}}}$

③ $R_{out} = R_C = \underline{\underline{8k\Omega}}$

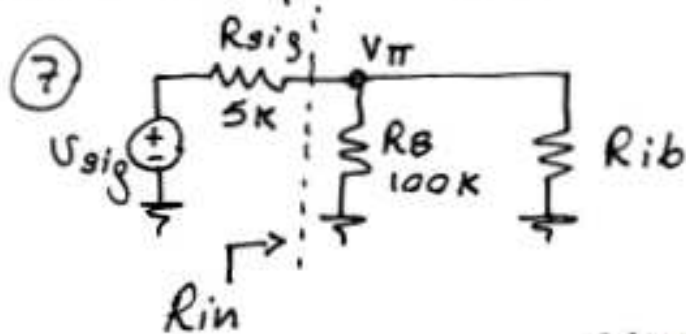
④ $A_v \approx -\frac{R_C \parallel R_L}{r_e + R_e} = -\frac{(8k \parallel 5k)}{25 + 225}$
 $= \underline{\underline{-12.3 \text{ V/V}}}$

⑤ $G_v = \frac{-\beta (R_C \parallel R_L)}{R_{sig} + (\beta + 1)(r_e + R_e)}$
 $= \frac{-100 \times (8k \parallel 5k)}{5k + 101 \times (25 + 225)} = \underline{\underline{-9.9 \text{ V/V}}}$

O Amplificador TBJ Emissor Comum com R_e (EC)

- Continuação do Exerc. 5.44

⑥ $A_{is} = -\beta = -100$



$$R_{ib} = (\beta + 1)(r_e + R_e) \begin{matrix} \nearrow 25K \text{ com } R_e \\ \searrow 2.5K \text{ sem } R_e \end{matrix}$$

$$R_{in} = 100K \parallel R_{ib} \begin{matrix} \nearrow 20K \text{ com } R_e \\ \searrow 2.4K \text{ sem } R_e \end{matrix}$$

$$V_{\pi} = V_{sig} \cdot \frac{R_{in}}{R_{sig} + R_{in}}$$

$$\Rightarrow \hat{V}_{sig} = \hat{V}_{\pi} \cdot \frac{(R_{in} + R_{sig})}{R_{in}}$$

if $\hat{V}_{\pi} = 5m \Rightarrow \hat{V}_{sig} \rightarrow \begin{matrix} 6.25mV \\ \text{(com } R_e) \\ \searrow \\ 15mV \\ \text{(sem } R_e) \end{matrix}$

⑧
$$\begin{aligned} \hat{V}_o &= \alpha \hat{i}_e \cdot (R_C \parallel R_L) \\ &= \alpha \frac{\hat{V}_{\pi}}{r_e + R_e} \cdot (R_C \parallel R_L) \\ &= 0.99 \times \left(\frac{5m}{25 + 225} \right) \cdot (8K \parallel 5K) \\ \hat{V}_o &= 0.06 \text{ pico} \end{aligned}$$

Note que: $1 + g_m R_e$
 $= 1 + 40m \times 225$
 $= 10$

que é o fator pelo qual o ganho é reduzido com respeito ao Exercício 5.43



CAPITULO 5

Amplificadores com Transistores

Aula 5

PSI 2306 – Eletrônica

Programação para a Primeira Prova

Aula	Matéria	Capítulo/ página (inglês)
1 ^a	Revisão de transistor bipolar de junção - TBJ (funcionamento interno e expressões básicas) - Exemplo 5.4 O TBJ como amplificador para pequenos sinais (as condições c.c., a corrente de coletor e a transcondutância)	Sedra, Cap. 5, p. 235-240 (277-285); p. 263-264 (421-423); p. 275-276 (443-445).
2 ^a	A corrente de base e a resistência de entrada da base, a resistência de entrada do emissor. Ganho de tensão, Exemplo 5.38, modelos equivalentes (modelos π -híbrido e T)	Sedra, Cap. 5, p. 276-279 (445-450)
3 ^a	Aplicação dos modelos equivalentes para pequenos sinais, Efeito Early, Exemplo 5.14 O amplificador emissor comum (EC) - Exercício 5.43	Sedra, Cap. 5 p. 290-293 (467-470)
4 ^a	O amplificador em emissor comum com resistência de emissor. Exercício 5.44	Sedra, Cap. 5 p. 293-296 (470-474)
5 ^a	O amplificador em base comum. O Amplificador em coletor comum. Exercício 5.47	Sedra, Cap. 5 p. 296-301 (475-484)
6 ^a	Resposta em frequência dos circuitos RC Pólos e zeros, funções de primeira ordem, curvas de Bode (pólo simples, zero simples). Exemplo E.1, exemplo E.2	Sedra, Apend. D, p. 823-825 (D6-D9) Sedra, Apend. E, p.830-833 (E1-E6)
7 ^a	Teorema de Miller. Exemplo 6.7 Resposta em alta frequência do Emissor Comum Exemplo 5.18	Sedra, Cap. 6, p. 363-364 (578-580) Sedra, Cap. 5, p. 306-310 (491-497)
8 ^a	Resposta em baixa frequência do Emissor Comum Exemplo 5.19	Sedra, Cap. 5, p. 310-314 (497-503)
9 ^a	Resposta em alta e baixa frequência do Fonte Comum Exemplo 4.12	Sedra, Cap. 4, p. 202-208 (326-335)
10 ^a	Aula de Exercícios	
1^a. Semana de provas Data:		

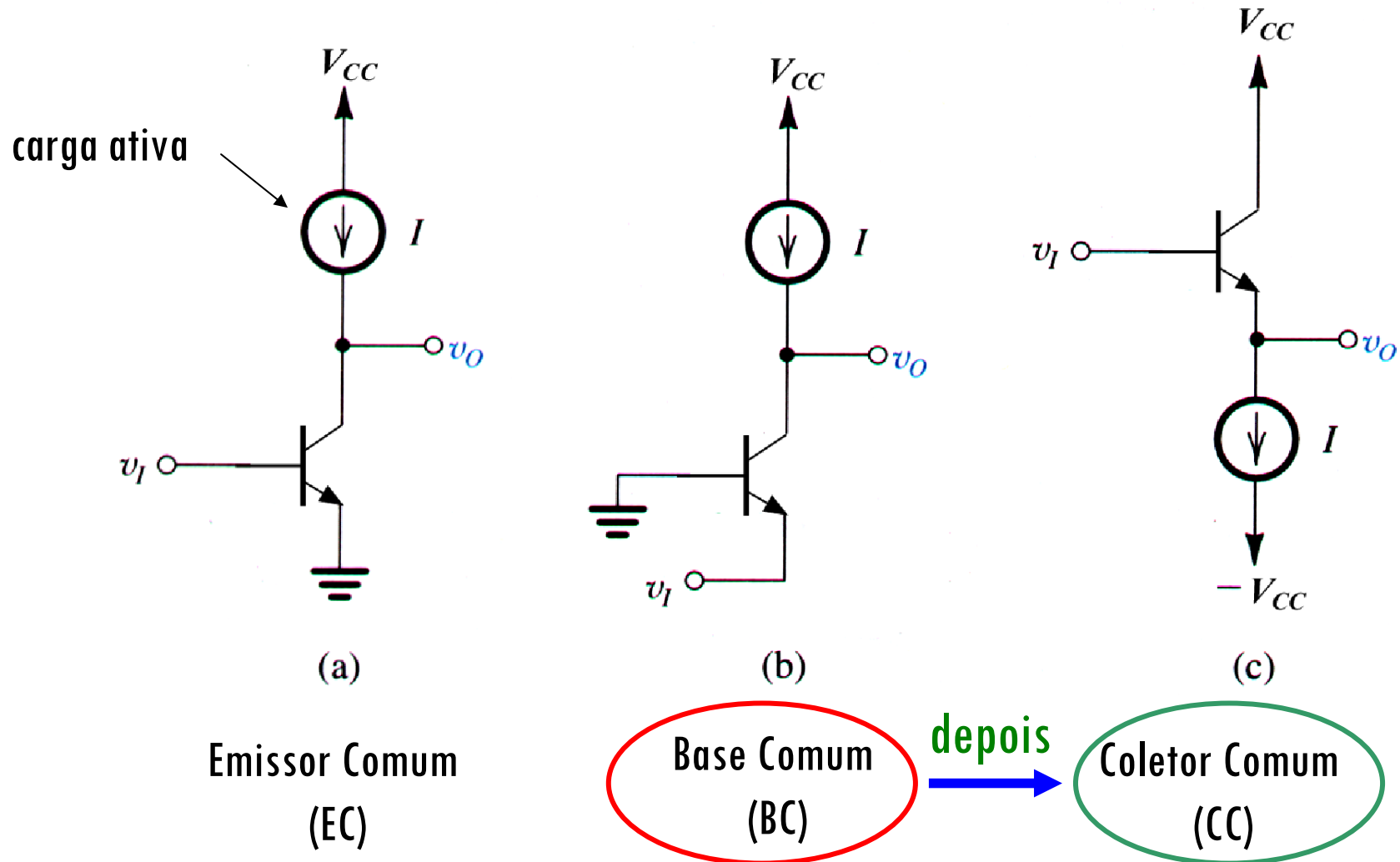
5ª Aula:

Parte 1: Estudo do Amplificador Base Comum

Ao final desta aula você deverá estar apto a:

- **Discorrer sobre as diferentes características de amplificação das configurações de amplificadores mais comuns**
- **Determinar o tipo de configuração de amplificador a ser utilizada dependendo das especificações solicitadas (ganhos, impedâncias, resposta em frequência)**

Configurações Básicas de Amplificadores TBJ em CIs



Revisão dos parâmetros e sua relação entre eles de um TBJ

Tabela 5.3 RELAÇÕES ENTRE OS PARÂMETROS DO MODELO PARA PEQUENOS SINAIS DO TBJ

Parâmetros do Modelo em Termos das Correntes de Polarização cc :

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \qquad r_e = \frac{V_T}{I_E} = \alpha \left(\frac{V_T}{I_C} \right)$$
$$r_\pi = \frac{V_T}{I_B} = \beta \left(\frac{V_T}{I_C} \right) \qquad r_o = \frac{V_A}{I_C}$$

Em termos de g_m :

$$r_e = \frac{\alpha}{g_m} \qquad r_\pi = \frac{\beta}{g_m}$$

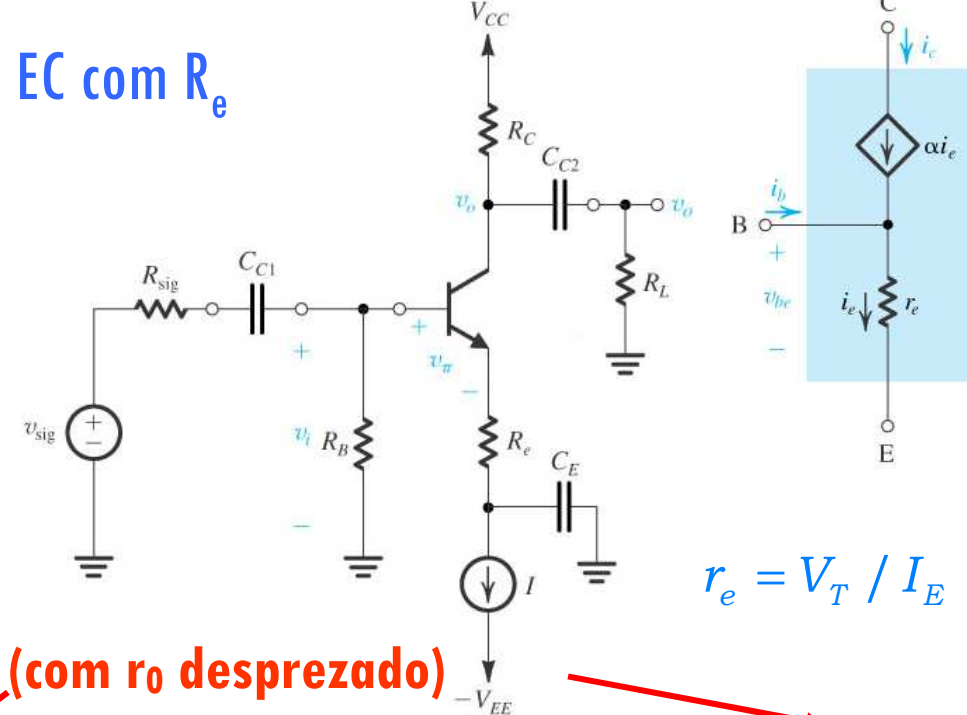
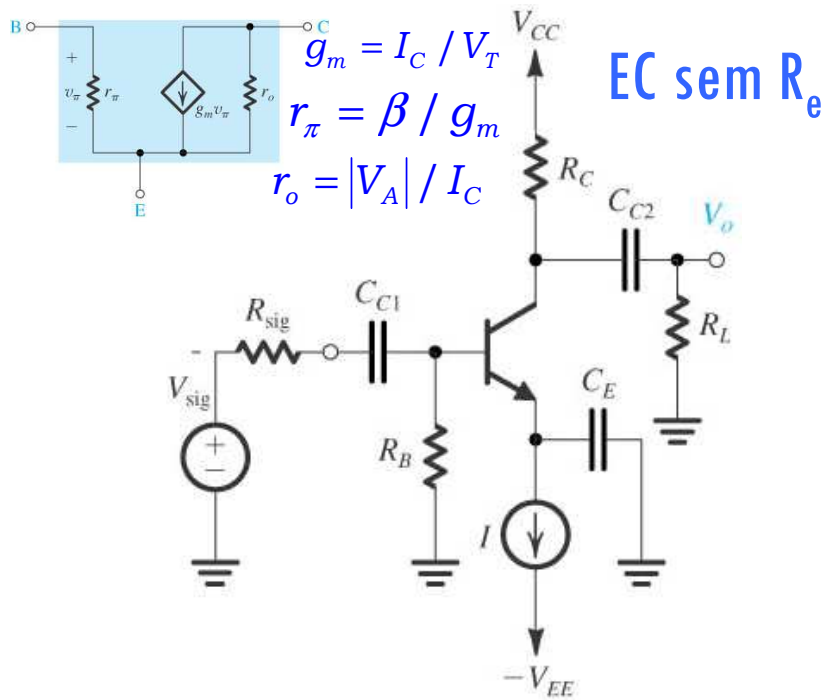
Em termos de r_e :

$$g_m = \frac{\alpha}{r_e} \qquad r_\pi = (\beta + 1)r_e \qquad g_m + \frac{1}{r_\pi} = \frac{1}{r_e}$$

Relações entre α e β :

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \qquad \alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \qquad \beta + 1 = \frac{1}{1 - \alpha}$$

Os Amplificadores TBJ Emissor Comum com e sem R_e : **recapitulando**



$A_v = -g_m (r_o \parallel R_C \parallel R_L) \approx \alpha \cdot (R_C \parallel R_L) / r_e$

$R_{in} = R_B \parallel r_\pi$

$R_{out} = (r_o \parallel R_C)$

$A_{is} \approx -g_m r_\pi = -\beta$

$G_v = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{sig}} A_{vo} \frac{R_L}{R_L + R_o}$

(com r_o desprezado)

$A_v = -\frac{\alpha (R_C \parallel R_L)}{r_e + R_e} \cong -\frac{R_C \parallel R_L}{r_e + R_e}$

$R_{in} = R_B \parallel R_{ib} = R_B \parallel [R_{ib} = (\beta + 1)(r_e + R_e)]$

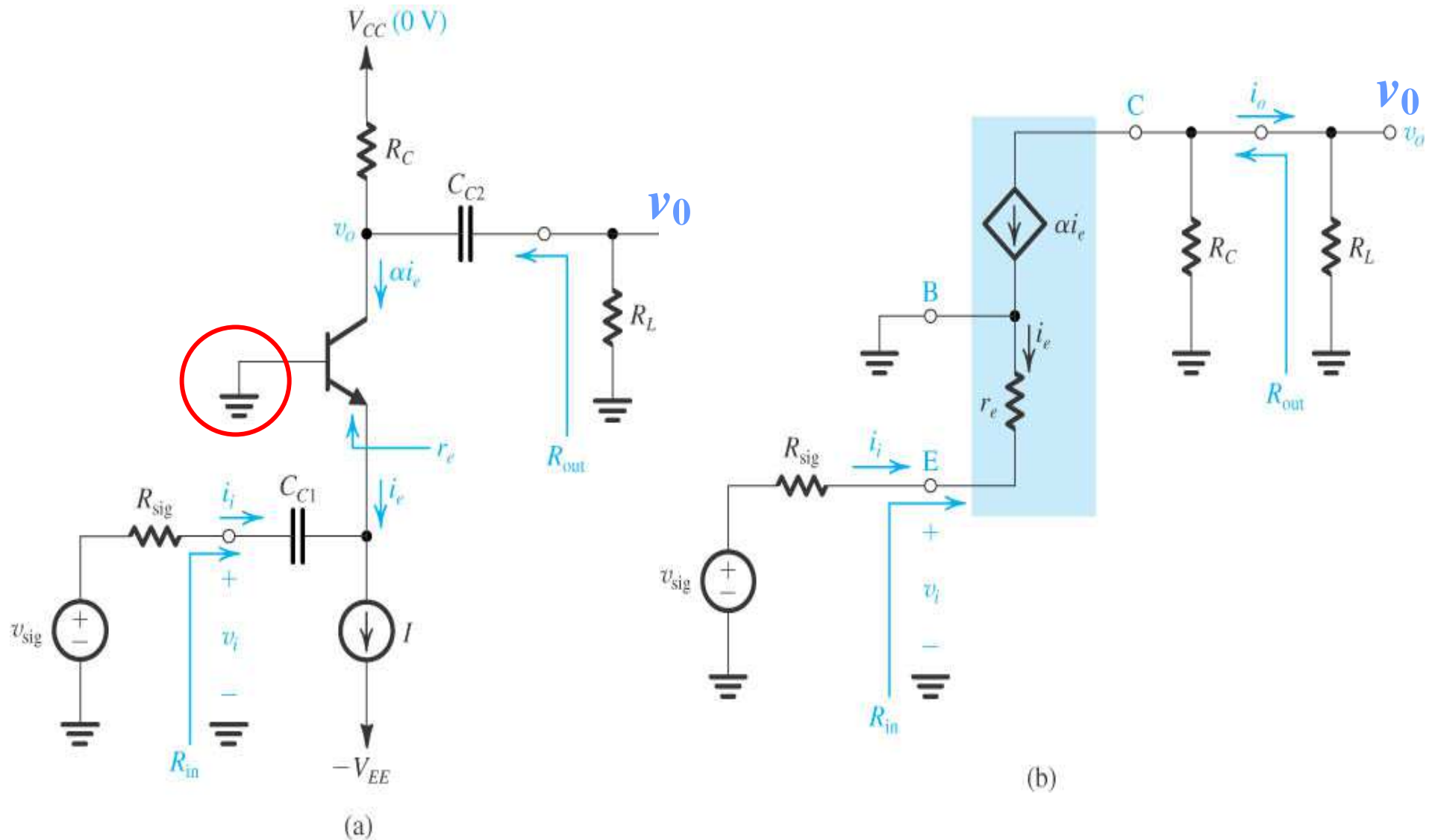
$R_{out} = R_C$

$A_{is} = -\frac{\alpha (R_B \parallel R_{ib})}{r_e + R_e} \approx -\beta$

$G_v = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{sig}} A_{vo} \frac{R_L}{R_L + R_o}$

O Amplificador TBJ Base Comum

Análise para Pequenos Sinais



O Amplificador TBJ Base Comum

Análise para Pequenos Sinais

$$R_{in} ? (= v_i / i_i =) \boxed{R_{in} = r_e}$$

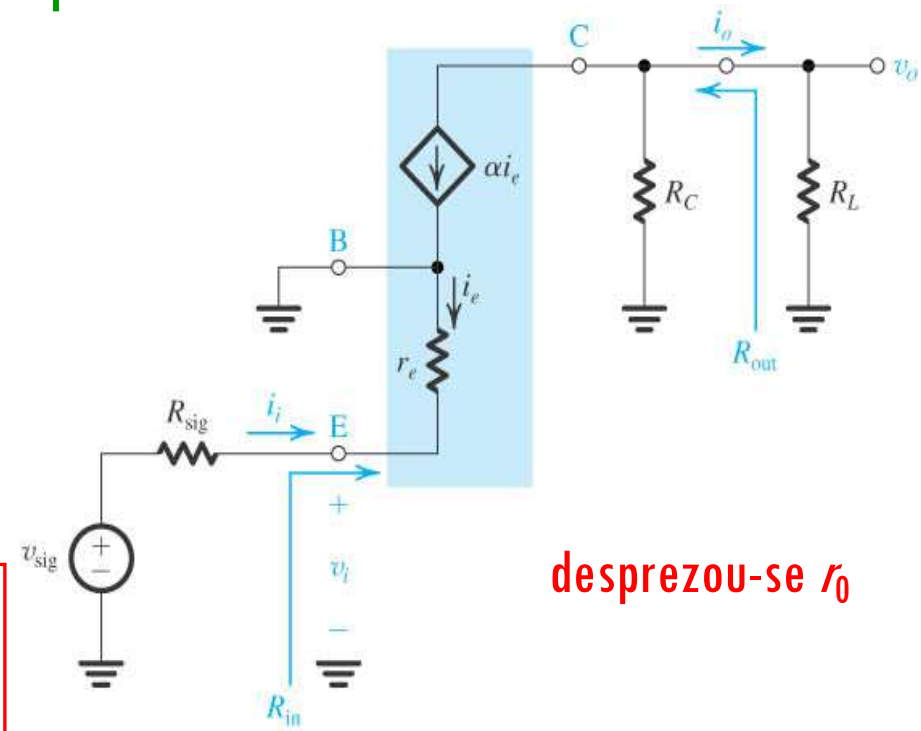
$$A_v ? \quad v_o = -\alpha i_e (R_C \parallel R_L)$$

$$i_e = -\frac{v_i}{r_e} \quad (= -i_i)$$

$$\boxed{A_v = \frac{\alpha}{r_e} (R_C \parallel R_L) = g_m (R_C \parallel R_L)}$$

$$\boxed{A_{vo} = g_m R_C} \quad R_{out} ? \quad \boxed{R_{out} = R_C}$$

$$A_{is} ? \quad \boxed{A_{is}} = -\frac{-\alpha i_e}{i_i} = +\frac{-\alpha i_e}{i_e} \quad \boxed{= -\alpha}$$



$$G_v ? (= v_o / v_{sig}) \quad \frac{v_i}{v_{sig}} = \frac{r_e}{r_e + R_{sig}}$$

$$G_v = \frac{r_e}{r_e + R_{sig}} g_m (R_C \parallel R_L)$$

$$\boxed{G_v = \frac{\alpha (R_C \parallel R_L)}{r_e + R_{sig}}}$$

PSI 2306 – Eletrônica

Programação para a Primeira Prova

Aula	Matéria	Capítulo/ página (inglês)
1 ^a	Revisão de transistor bipolar de junção - TBJ (funcionamento interno e expressões básicas) - Exemplo 5.4 O TBJ como amplificador para pequenos sinais (as condições c.c., a corrente de coletor e a transcondutância)	Sedra, Cap. 5, p. 235-240 (277-285); p. 263-264 (421-423); p. 275-276 (443-445).
2 ^a	A corrente de base e a resistência de entrada da base, a resistência de entrada do emissor. Ganho de tensão, Exemplo 5.38, modelos equivalentes (modelos π -híbrido e T)	Sedra, Cap. 5, p. 276-279 (445-450)
3 ^a	Aplicação dos modelos equivalentes para pequenos sinais, Efeito Early, Exemplo 5.14 O amplificador emissor comum (EC) - Exercício 5.43	Sedra, Cap. 5 p. 290-293 (467-470)
4 ^a	O amplificador em emissor comum com resistência de emissor. Exercício 5.44	Sedra, Cap. 5 p. 293-296 (470-474)
5 ^a	O amplificador em base comum. O Amplificador em coletor comum. Exercício 5.47	Sedra, Cap. 5 p. 296-301 (475-484)
6 ^a	Resposta em frequência dos circuitos RC Pólos e zeros, funções de primeira ordem, curvas de Bode (pólo simples, zero simples). Exemplo E.1, exemplo E.2	Sedra, Apend. D, p. 823-825 (D6-D9) Sedra, Apend. E, p.830-833 (E1-E6)
7 ^a	Teorema de Miller. Exemplo 6.7 Resposta em alta frequência do Emissor Comum Exemplo 5.18	Sedra, Cap. 6, p. 363-364 (578-580) Sedra, Cap. 5, p. 306-310 (491-497)
8 ^a	Resposta em baixa frequência do Emissor Comum Exemplo 5.19	Sedra, Cap. 5, p. 310-314 (497-503)
9 ^a	Resposta em alta e baixa frequência do Fonte Comum Exemplo 4.12	Sedra, Cap. 4, p. 202-208 (326-335)
10 ^a	Aula de Exercícios	
1^a. Semana de provas		
Data:		

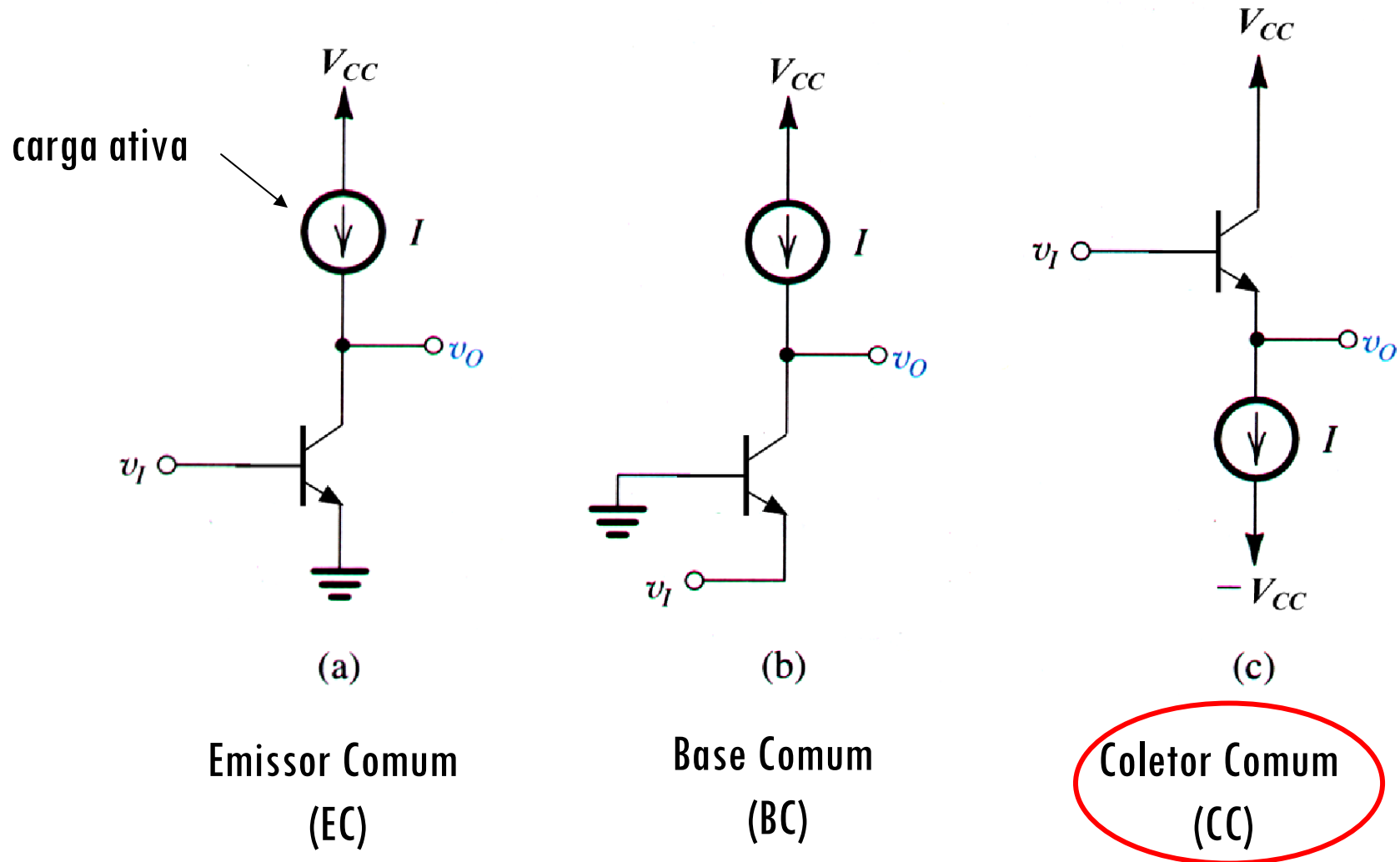
5ª Aula - continuação:

Parte 2: Estudo do Amplificador Coletor Comum, ou Seguidor de Emissor

Ao final desta aula você deverá estar apto a:

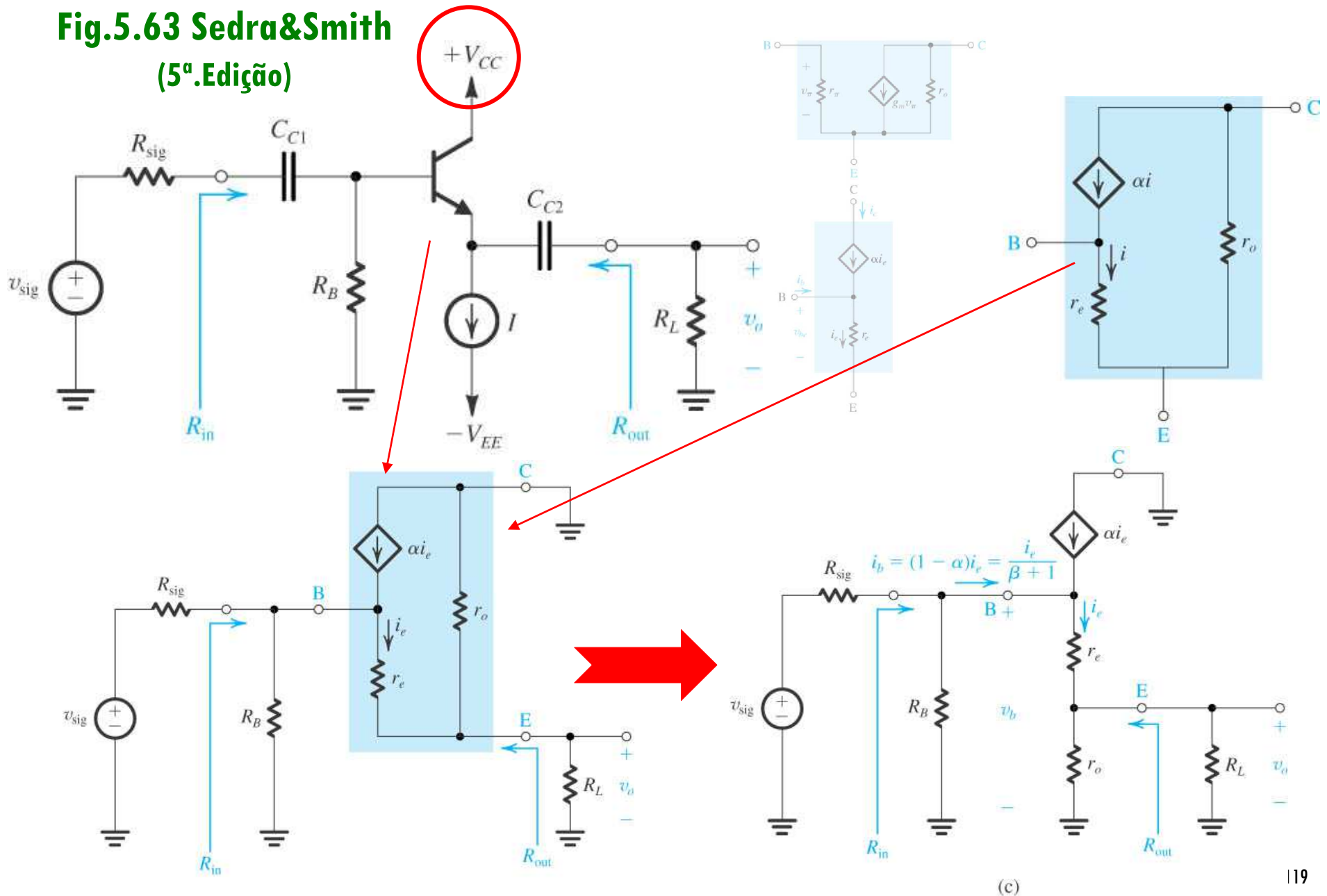
- **Discorrer sobre as diferentes características de amplificação das configurações de amplificadores mais comuns**
- **Determinar o tipo de configuração de amplificador a ser utilizada dependendo das especificações solicitadas (ganhos, impedâncias, resposta em frequência)**

Configurações Básicas de Amplificadores TBJ em CIs

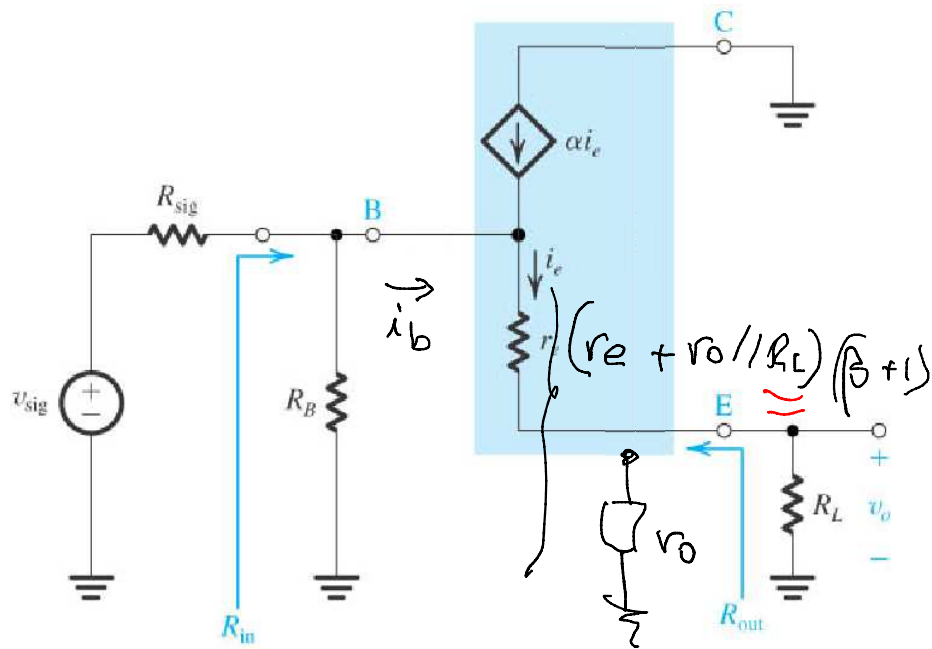


O Amplificador TBJ Coletor Comum, ou Seguidor de Emissor

Fig.5.63 Sedra&Smith
(5ª.Edição)

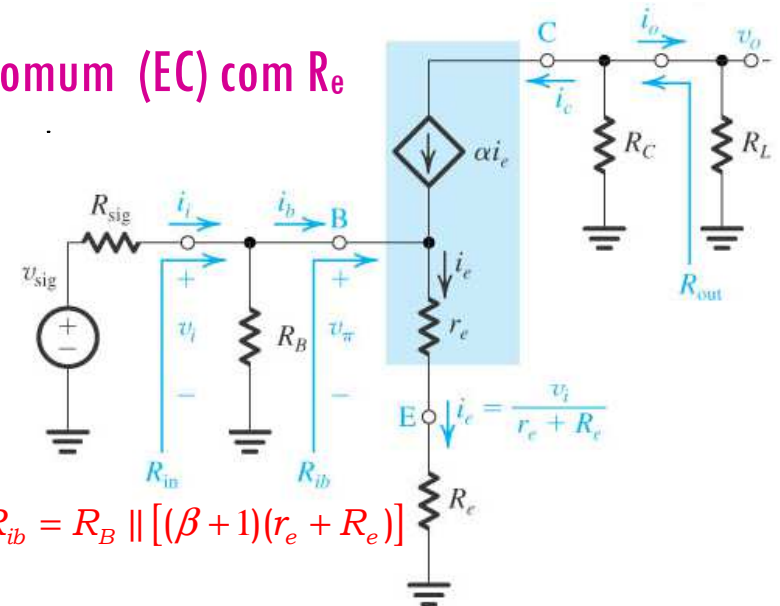


O Amplificador TBJ Coletor Comum



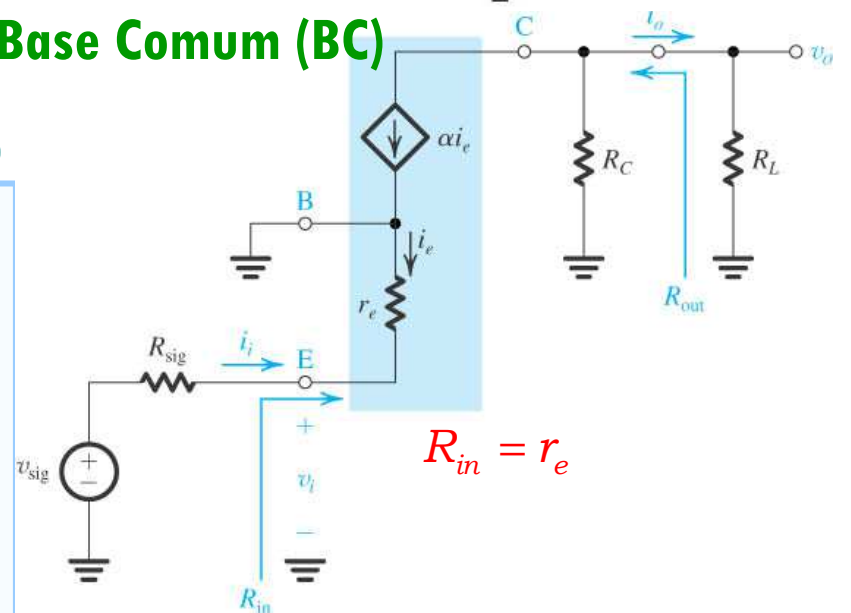
Coletor Comum (CC)

Emissor Comum (EC) com R_e



$$R_{in} = R_B \parallel R_{ib} = R_B \parallel [(\beta + 1)(r_e + R_e)]$$

Base Comum (BC)

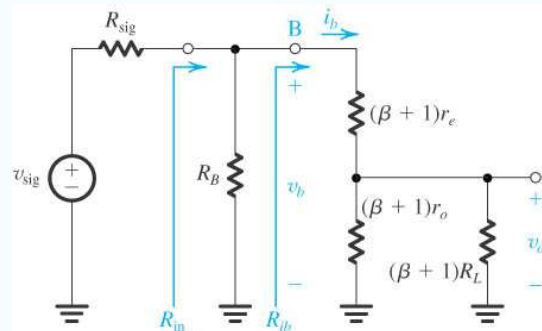


$$R_{in} = r_e$$

(b)

Amplificador Bilateral (saída influencia na entrada)

$$R_{in} = \frac{v_i}{i_i} \Big|_{\text{Carga}=R_L}$$



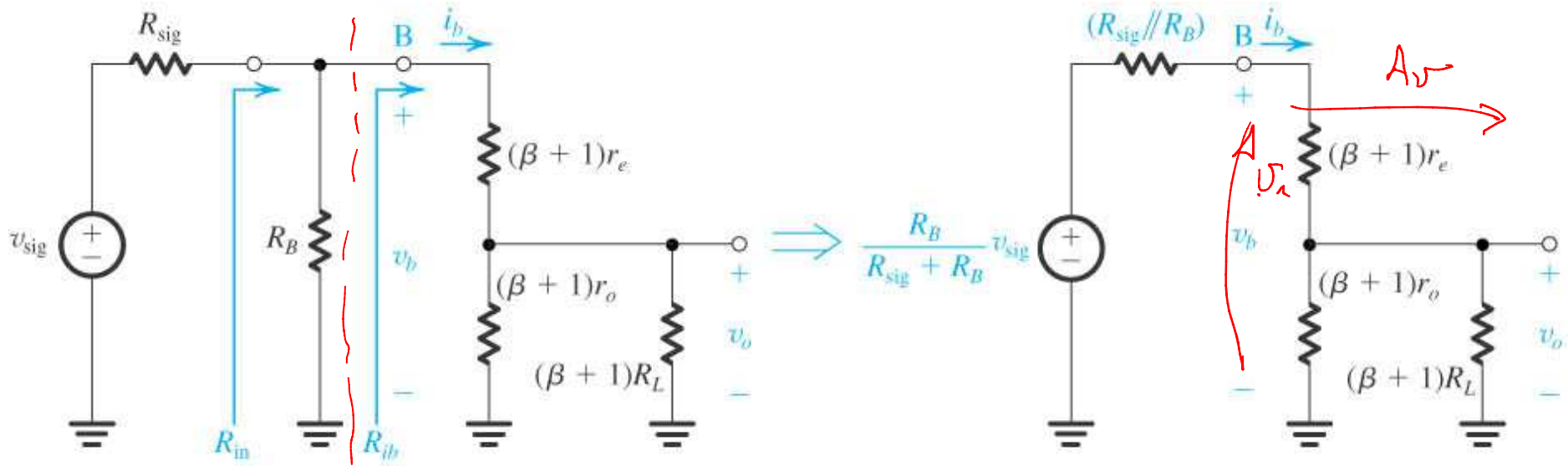
$$R_{in} = R_B \parallel R_{ib} = R_B \parallel [(\beta + 1)(r_e + r_o \parallel R_L)]$$

O Amplificador TBJ Coletor Comum

$$R_{in} = \frac{v_i}{i_i} \Big|_{\text{Carga}=R_L}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \Big|_{\text{Carga}=R_L}$$

$$G_v = \frac{v_o}{v_{sig}} \Big|_{\text{Carga}=R_L}$$



$$R_{in} = R_B // (\beta + 1)[r_e + (r_o // R_L)]$$

$$G_v = \frac{v_o}{v_{sig}} = \frac{R_B}{R_{sig} + R_B} \frac{(\beta + 1)(r_o // R_L)}{(R_{sig} // R_B) + (\beta + 1)[r_e + (r_o // R_L)]}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_i \frac{(\beta + 1)(r_o // R_L)}{(\beta + 1)r_e + (\beta + 1)(r_o // R_L)}}{v_i} = \frac{(r_o // R_L)}{r_e + (r_o // R_L)}$$

O Amplificador TBJ Coletor Comum

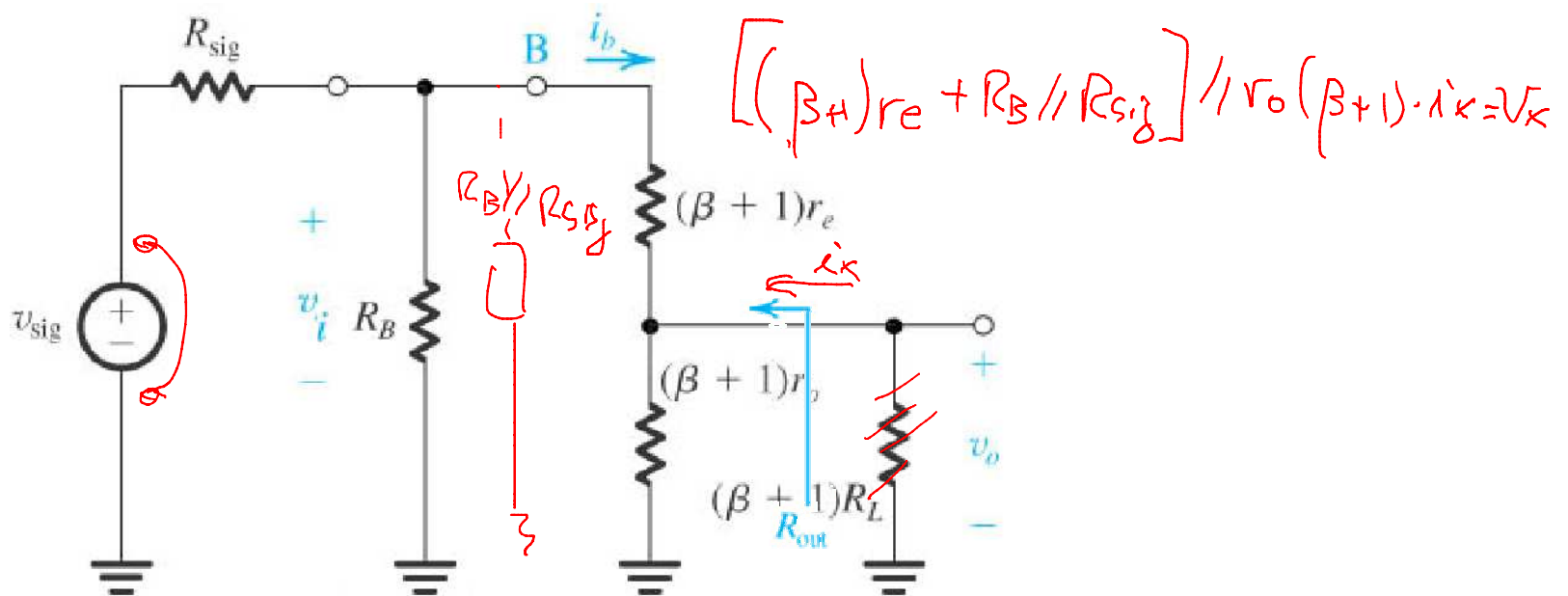
$$R_{in} = \frac{v_i}{i_i} \Big|_{\text{Carga}=R_L}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \Big|_{\text{Carga}=R_L}$$

$$G_v = \frac{v_o}{v_{sig}} \Big|_{\text{Carga}=R_L}$$

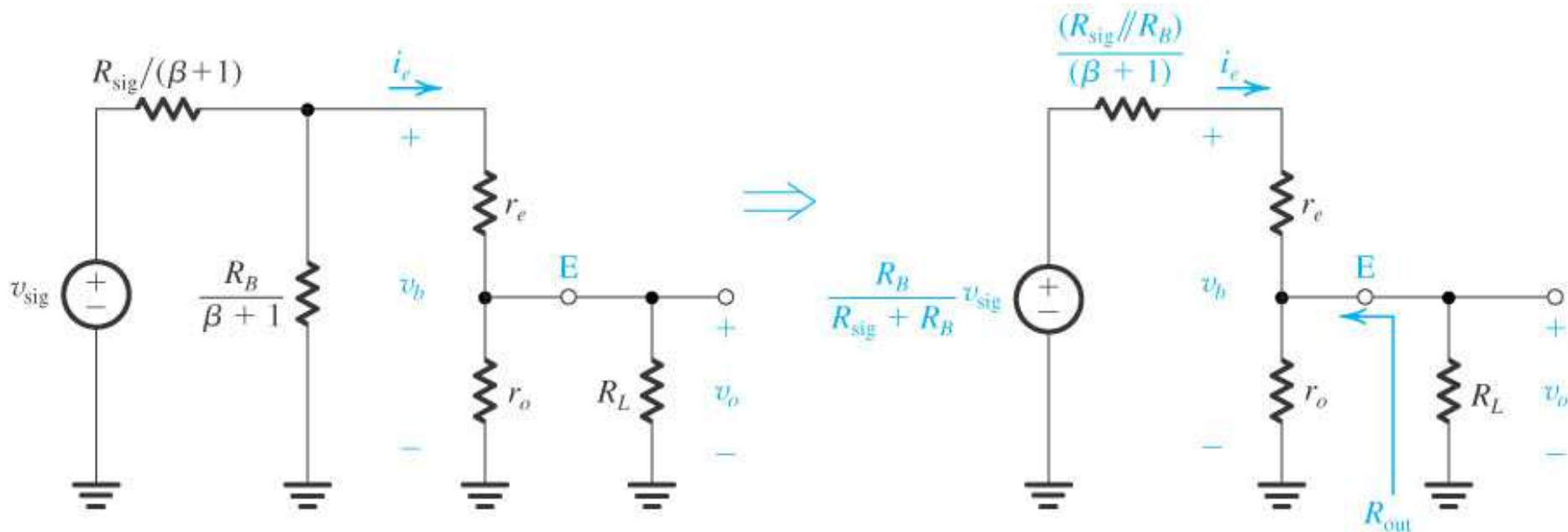
$$R_{out} = \frac{v_x}{i_x} \Big|_{v_{sig}=0}$$

resistência
de saída



$$\underline{R_{out}} = r_o \parallel \left(r_e + \frac{R_{sig} \parallel R_B}{\beta + 1} \right) \cong r_e + \frac{R_{sig} \parallel R_B}{\beta + 1}$$

~25Ω

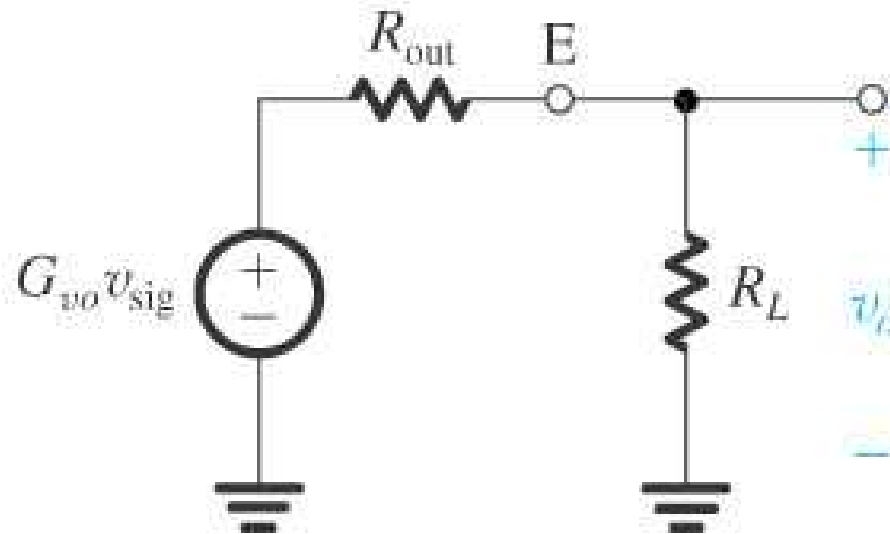


$$G_v = \frac{v_o}{v_{sig}} = \frac{R_B}{R_{sig} + R_B} \frac{(r_o // R_L)}{\frac{(R_{sig} // R_B)}{\beta + 1} + r_e + (r_o // R_L)}$$

(a)

(b)

Figura 5.65 (a) Um circuito **equivalente alternativo** do seguidor de emissor obtido por **refletindo todas as resistências do circuito-base para o lado do emissor**. (b) O circuito em (a) após a aplicação do teorema de Thévenin ao circuito de entrada composto por v_{sig} , $R_{sig}/(\beta + 1)$ e $R_B/(\beta + 1)$.



$$G_{vo} = \frac{R_B}{R_{sig} + R_B} \frac{r_o}{\frac{(R_{sig} // R_B)}{(\beta + 1)} + r_e + r_o}$$

$$R_{out} = r_o // \left(r_e + \frac{R_{sig} // R_B}{\beta + 1} \right)$$

Daí, o ganho total
pode ser calculado por
 $G_v = G_{vo} \cdot R_L / (R_{out} + R_L)$

Figura 5.66 Circuito equivalent de Thévenin da saída do seguidor de emissor da Fig. 5.63(a). Este circuito pode ser usado para achar o v_o e também o **ganho de tensão global** v_o/v_{sig} **para qualquer carga** R_L .

O Amplificador TBJ Coletor Comum

$$R_{in} = \frac{v_i}{i_i} \Big|_{\text{Carga}=R_L}$$

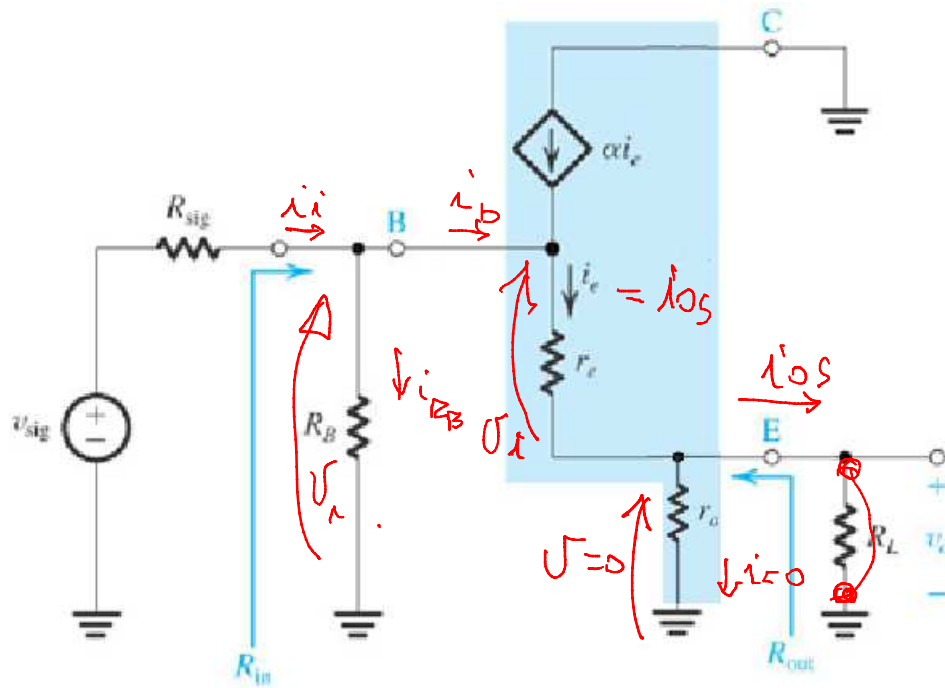
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \Big|_{\text{Carga}=R_L}$$

$$G_v = \frac{v_o}{v_{sig}} \Big|_{\text{Carga}=R_L}$$

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

$$A_{is} = \frac{i_{os}}{i_i} \Big|_{\text{Carga}=\text{curto}}$$

(max A_i)



Ganho de corrente em curto-circuito

$$i_{os} = i_e$$

$$i_i = i_b + i_{R_B}$$

$$i_{R_B} = \frac{v_i}{R_B} = \frac{i_e r_e}{R_B}$$

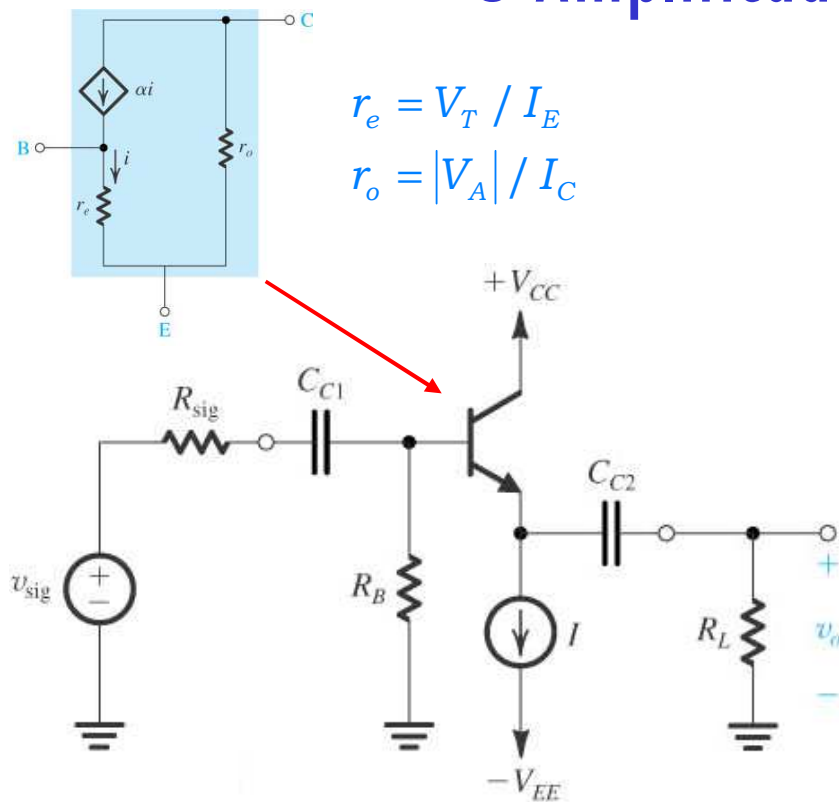
$$i_i = \frac{i_e}{\beta + 1} + \frac{i_e r_e}{R_B}$$

$$i_i = i_{os} \left(\frac{1}{\beta + 1} + \frac{r_e}{R_B} \right)$$

$$\frac{i_{os}}{i_i} = \frac{1}{\frac{1}{\beta + 1} + \frac{r_e}{R_B}} = \frac{(\beta + 1) R_B}{R_B + r_e (\beta + 1)} = \frac{\beta + 1}{1 + \frac{r_e}{R_B} (\beta + 1)}$$

$$A_{is} \cong \beta + 1$$

O Amplificador TBJ Coletor Comum



$$r_e = V_T / I_E$$

$$r_o = |V_A| / I_C$$

Amplificador Isolador (Buffer) ou Seguidor de Emissor

$$A_v \cong \frac{(r_o \parallel R_L)}{r_e + (r_o \parallel R_L)} \quad G_v = \frac{R_B}{R_{sig} + R_B} A_v$$

$$A_{is} \cong \beta + 1$$

$$R_{in} = R_B \parallel [(\beta + 1)(r_e + r_o \parallel R_L)]$$

$$R_{out} \cong r_e + \frac{R_{sig} \parallel R_B}{\beta + 1}$$

Qual a excursão máxima do sinal na entrada?

● Para cima, tende a saturar o transistor: $v_{e \max} = v_{o \max} = V_{CC} - 0,2V$

● Para baixo, tende a cortar o transistor: $v_{o \min} = -R_L \times I$

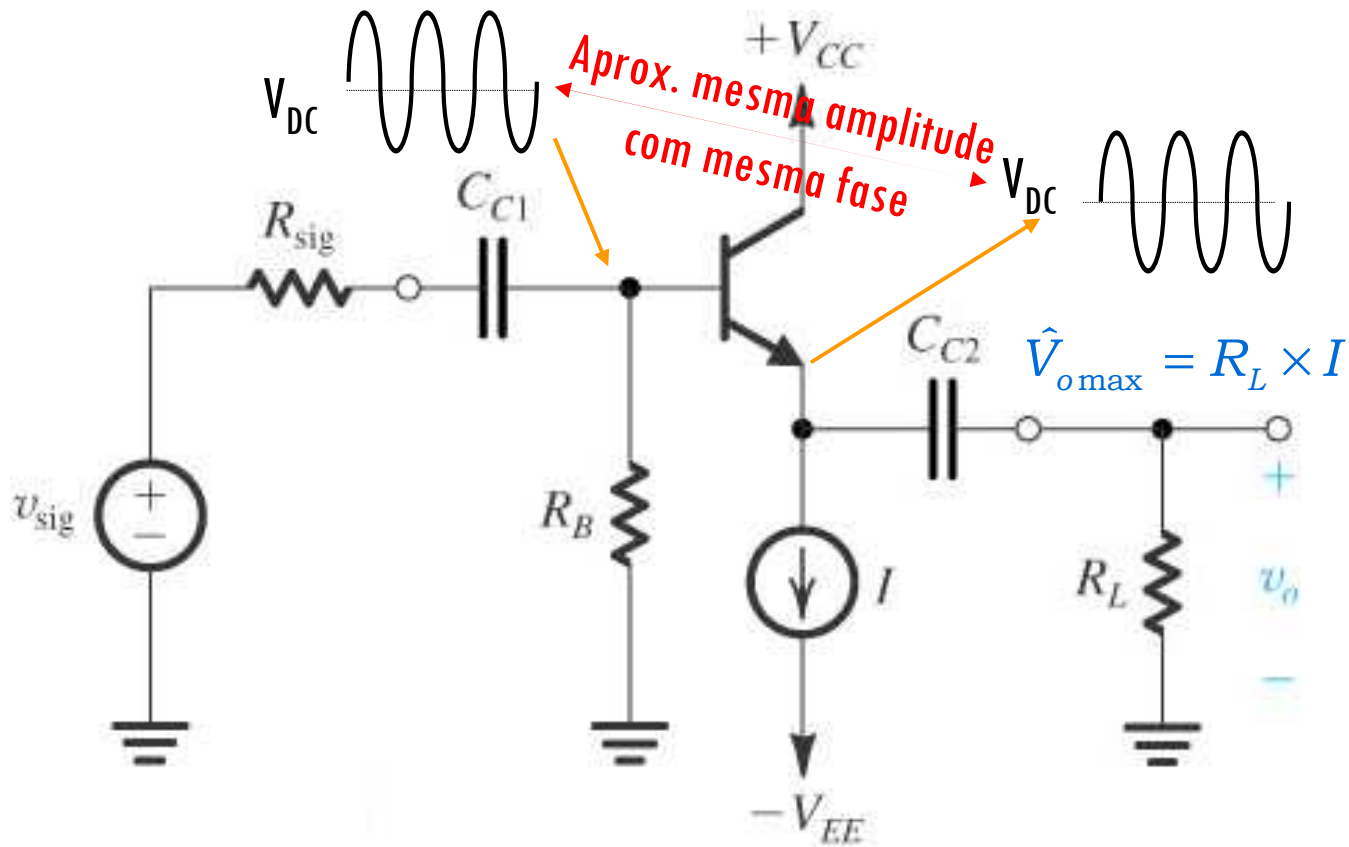
daí, amplitude associado na entrada será:

$$\hat{V}_{sig \min} = \frac{-R_L \times I}{G_v}$$

$$\hat{V}_{o \max} = R_L \times I$$

O Amplificador TBJ Coletor Comum

Amplificador isolador (buffer)
ou Seguidor de Emissor



$$V_{CC} = 12V$$

$$-V_{EE} = -12V$$

$$I = 1mA$$

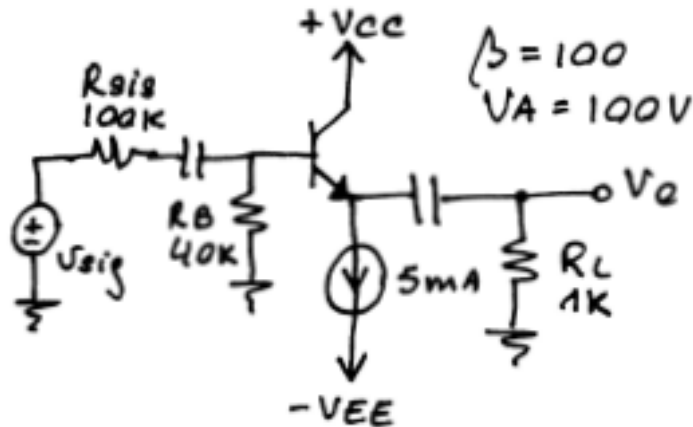
$$\beta = 100$$

$$R_L = 10k\Omega$$

$$R_B = 100k\Omega$$

Exercício 5.47 O seguidor de emissor da Figura 5.63(a) é utilizado para conectar uma fonte com $R_{sig} = 10\text{ k}\Omega$ em uma carga $R_L = 1\text{ k}\Omega$. O transistor é polarizado com $I = 5\text{ mA}$, utiliza uma resistência $R_B = 40\text{ k}\Omega$ e possui $\beta = 100$ e $V_A = 100\text{ V}$. Determine R_{ib} , R_{in} , G_v , G_{vo} e R_{out} . Qual a máxima amplitude de pico de uma senóide de saída que pode ser obtida sem que ocorra o corte do transistor? Se, para limitar a distorção não-linear, o sinal de emissor-base é limitado a 10 mV de pico, qual a correspondente amplitude na saída? Qual o ganho global de tensão se R_L for mudado para $2\text{ k}\Omega$? E para $500\ \Omega$?

Resposta $96,7\text{ k}\Omega$; $28,3\text{ k}\Omega$, $0,735\text{ V/V}$; $0,8\text{ V/V}$; $84\ \Omega$; 5 V ; $1,9\text{ V}$; $0,768\text{ V/V}$; $0,685\text{ V/V}$



$$I_C \approx I_E \rightarrow I_C = 5\text{ mA}$$

$$r_o = \frac{V_A}{I_C} = \frac{100\text{ V}}{5\text{ mA}} = 20\text{ k}\Omega$$

$$r_e = \frac{V_T}{I} = \frac{25\text{ mV}}{5\text{ mA}} = 5\ \Omega$$

$$\begin{aligned} \textcircled{1} R_{ib} &= (\beta + 1) [r_e + (r_o \parallel R_L)] \\ &= 101 \cdot [5 + (20\text{ k}\Omega \parallel 1\text{ k}\Omega)] \\ &= \underline{96.7\text{ k}\Omega} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \textcircled{2} R_{in} &= R_B \parallel R_{ib} = 40\text{ k}\Omega \parallel 96.7\text{ k}\Omega \\ &= \underline{28.3\text{ k}\Omega} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \textcircled{3} G_v &= \frac{R_B}{R_{sig} + R_B} \cdot \frac{(\beta + 1)(r_o \parallel R_L)}{(\beta + 1)(r_e + r_o \parallel R_L)} \\ &= \frac{40}{10 + 40} \cdot \frac{101 \times (20\text{ k}\Omega \parallel 1\text{ k}\Omega)}{101(5 + 20\text{ k}\Omega \parallel 1\text{ k}\Omega)} \\ &\Rightarrow G_v = \underline{0.735\text{ V/V}} \end{aligned}$$

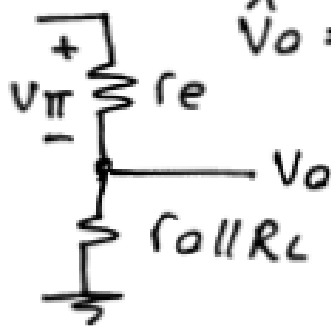
$$\begin{aligned} \textcircled{4} G_{vo} &= \frac{R_B}{R_{sig} + R_B} \cdot \frac{r_o}{\frac{R_{sig} \parallel R_B}{\beta + 1} + r_e + r_o} \\ &= \frac{40}{10 + 40} \cdot \frac{20\text{ k}\Omega}{\frac{10\text{ k}\Omega \parallel 40\text{ k}\Omega}{101} + 5 + 20\text{ k}\Omega} \\ &= \underline{0.8\text{ V/V}} \end{aligned}$$

Cont. Exercício 5.47

$$\begin{aligned}
 \textcircled{5} \quad R_{out} &= r_o \parallel \left(r_e + \frac{(R_{sig} \parallel R_B)}{\beta + 1} \right) \\
 &= 20K \parallel \left(5 + \frac{(10K \parallel 40K)}{\beta + 1} \right) \\
 &= 20K \parallel 84 \\
 &= \underline{\underline{84\Omega}}
 \end{aligned}$$

$$\textcircled{6} \quad \hat{V}_o = I \cdot R_L = 5mA \times 1K\Omega = \underline{\underline{5V}}$$

$$\begin{aligned}
 \textcircled{7} \quad \hat{V}_o &= \hat{V}_\pi \times \frac{(R_L \parallel r_o)}{r_e} \\
 \hat{V}_\pi &= .10mV \\
 \Rightarrow \hat{V}_o &= \underline{\underline{1.9V}}
 \end{aligned}$$



$$\textcircled{8} \quad G_V = 0.8 \times \frac{101 (20K \parallel R_L)}{8K + 101 (5 + 20K \parallel R_L)}$$

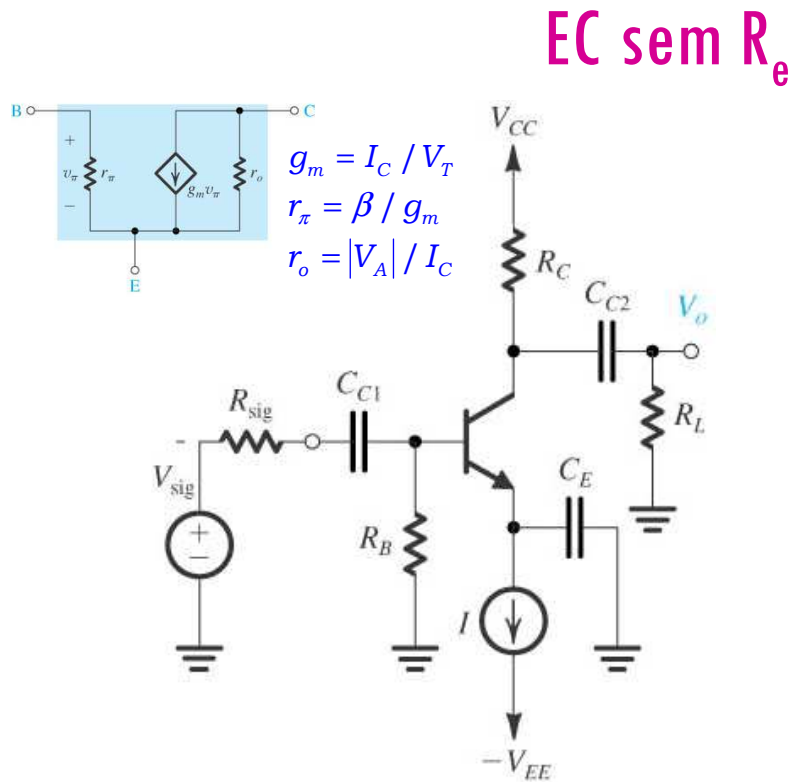
$$R_L = 2K \rightarrow G_V = \underline{\underline{0.768 V/V}}$$

$$R_L = 500 \rightarrow G_V = \underline{\underline{0.685 V/V}}$$

$$(= i_e \cdot r_o \parallel R_L)$$

$$i_e = \hat{V}_\pi / r_e$$

Os Amplificadores TBJ Emissor Comum sem e com R_e

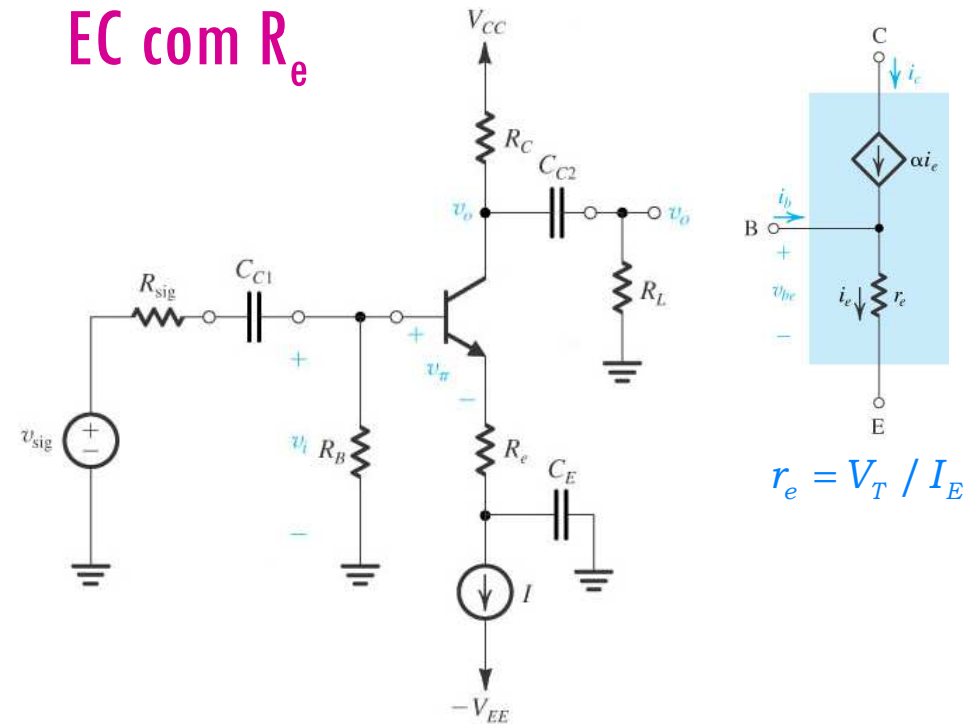


$$A_v = -g_m (r_o \parallel R_C \parallel R_L)$$

$$R_{in} = R_B \parallel r_\pi$$

$$R_{out} = (r_o \parallel R_C)$$

$$A_{is} \approx -g_m r_\pi = -\beta$$



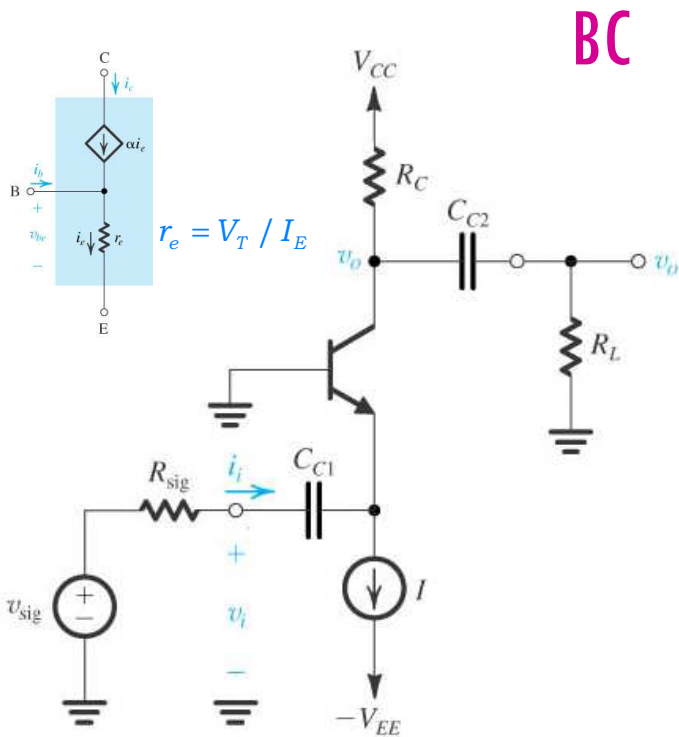
$$A_v = -\frac{\alpha(R_C \parallel R_L)}{r_e + R_e} \cong -\frac{g_m(R_C \parallel R_L)}{1 + g_m R_e}$$

$$R_{in} = R_B \parallel R_{ib} = R_B \parallel [R_{ib} = (\beta + 1)(r_e + R_e)]$$

$$R_{out} = R_C$$

$$A_{is} = -\frac{\alpha(R_B \parallel R_{ib})}{r_e + R_e} \approx -\beta$$

Os Amplificadores TBJ Base Comum e Coletor Comum



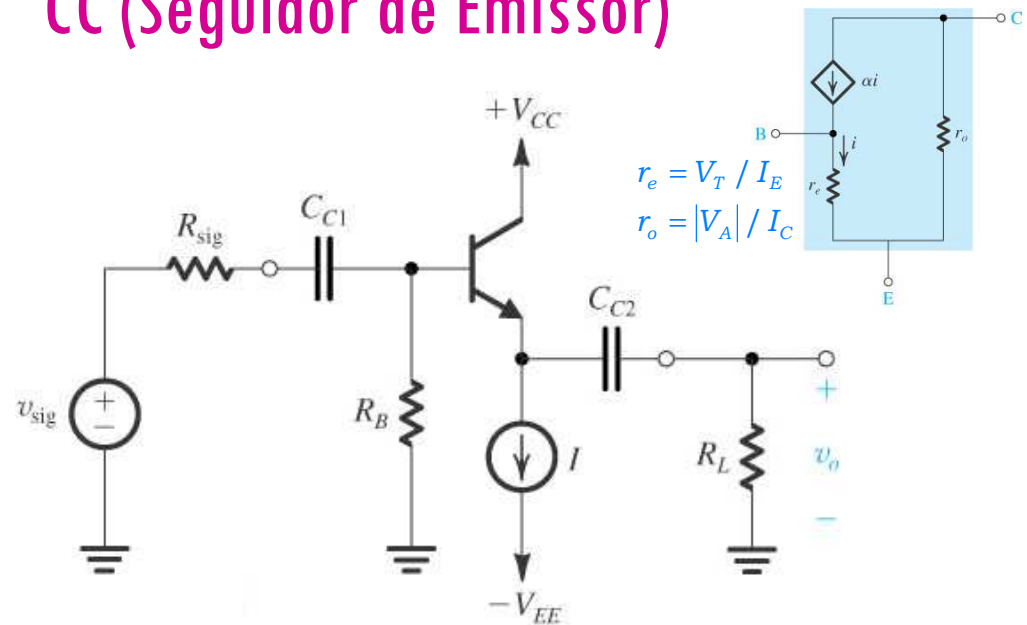
$$A_v = g_m (R_C \parallel R_L) \quad A_{v_o} = g_m R_C$$

$$R_{in} = r_e$$

$$R_{out} = R_C \quad G_v = \frac{\alpha (R_C \parallel R_L)}{r_e + R_{sig}}$$

$$A_{is} \cong \alpha$$

CC (Seguidor de Emissor)



$$A_v \cong \frac{(r_o \parallel R_L)}{r_e + (r_o \parallel R_L)} \quad G_v = \frac{R_B}{R_{sig} + R_B} A_v$$

$$R_{in} = R_B \parallel [(\beta + 1)(r_e + r_o \parallel R_L)]$$

$$R_{out} \cong r_e + \frac{R_{sig} \parallel R_B}{\beta + 1}$$

$$A_{is} \cong \beta + 1$$

Comparação entre as montagens de amplificadores TBJ EC sem/com R_e , BC e CC (Seguidor de Emissor)

1. A configuração **emissor comum** oferece um ganho geral melhor que as outras. Se o ganho a ser obtido for muito elevado, considere utilizar mais que um estágio.
2. A inclusão de um resistor R_e na montagem **EC** introduz melhoras na impedância de entrada e resposta em frequência **mas reduz o ganho**.
3. A montagem **BC** possui baixa impedância de entrada e por isso é utilizada em poucas aplicações. Por outro lado, como possui uma resposta em frequência muito boa, é muito utilizada em amplificadores de alta frequência.
4. O Seguidor de Emissor (**CC**) é um isolador de tensão, conectando fontes de elevada resistência a cargas de baixa resistência, sendo adequada a estágios de saída de amplificadores.



CAPITULO 5

Amplificadores com Transistores: análise no domínio da frequência

Aula 6

PSI 2306 – Eletrônica

Programação para a Primeira Prova

Aula	Matéria	Capítulo/ página (inglês)
1 ^a	Revisão de transistor bipolar de junção - TBJ (funcionamento interno e expressões básicas) - Exemplo 5.4 O TBJ como amplificador para pequenos sinais (as condições c.c., a corrente de coletor e a transcondutância)	Sedra, Cap. 5, p. 235-240 (277-285); p. 263-264 (421-423); p. 275-276 (443-445).
2 ^a	A corrente de base e a resistência de entrada da base, a resistência de entrada do emissor. Ganho de tensão, Exemplo 5.38, modelos equivalentes (modelos π -híbrido e T)	Sedra, Cap. 5, p. 276-279 (445-450)
3 ^a	Aplicação dos modelos equivalentes para pequenos sinais, Efeito Early, Exemplo 5.14 O amplificador emissor comum (EC) - Exercício 5.43	Sedra, Cap. 5 p. 290-293 (467-470)
4 ^a	O amplificador em emissor comum com resistência de emissor. Exercício 5.44	Sedra, Cap. 5 p. 293-296 (470-474)
5 ^a	O amplificador em base comum. O Amplificador em coletor comum. Exercício 5.47	Sedra, Cap. 5 p. 296-301 (475-484)
6 ^a	Resposta em frequência dos circuitos RC Pólos e zeros, funções de primeira ordem, curvas de Bode (pólo simples, zero simples). Exemplo E.1, exemplo E.2	Sedra, Apend. D, p. 823-825 (D6-D9) Sedra, Apend. E, p.830-833 (E1-E6)
7 ^a	Teorema de Miller. Exemplo 6.7 Resposta em alta frequência do Emissor Comum Exemplo 5.18	Sedra, Cap. 6, p. 363-364 (578-580) Sedra, Cap. 5, p. 306-310 (491-497)
8 ^a	Resposta em baixa frequência do Emissor Comum Exemplo 5.19	Sedra, Cap. 5, p. 310-314 (497-503)
9 ^a	Resposta em alta e baixa frequência do Fonte Comum Exemplo 4.12	Sedra, Cap. 4, p. 202-208 (326-335)
10 ^a	Aula de Exercícios	
1^a. Semana de provas Data:		

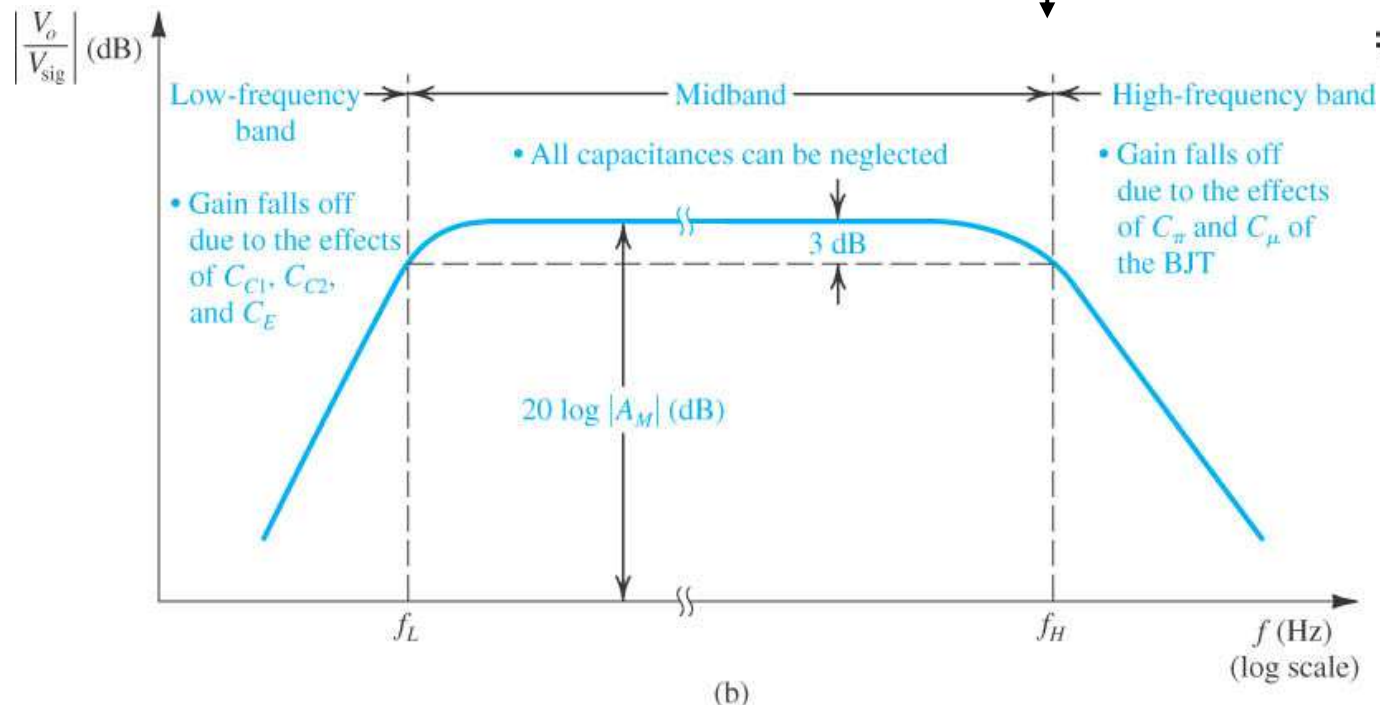
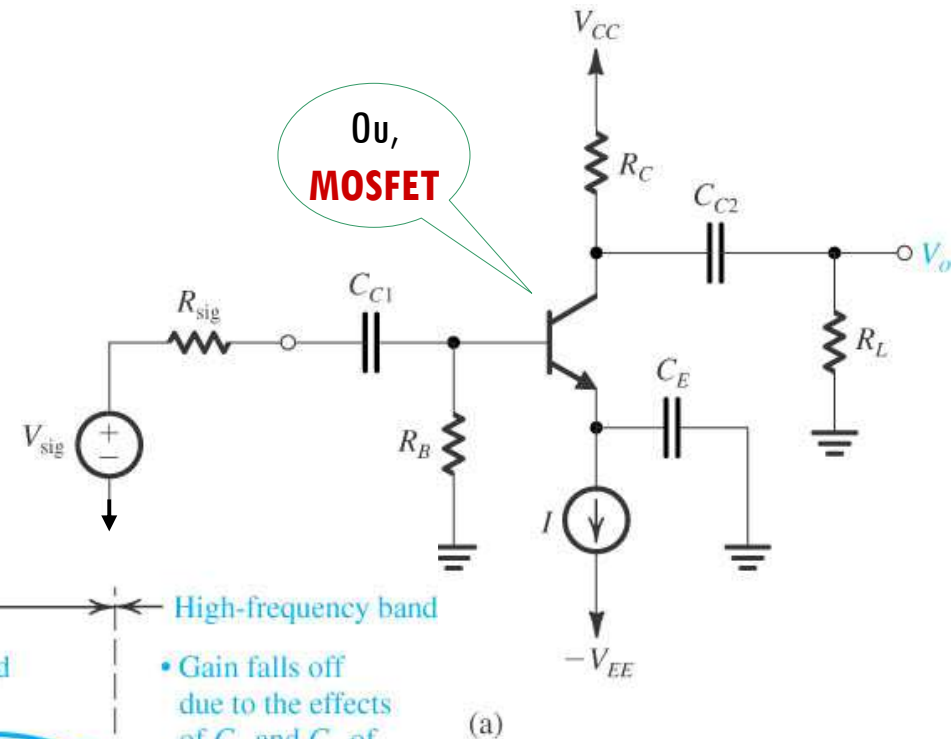
6ª Aula:

Revisão de Filtros e Diagramas de Bode

Ao final desta aula você deverá estar apto a:

- Esboçar a resposta em frequência (módulo e fase) de circuitos amplificadores com BJT e FET**
- Traçar curvas de Bode (resposta em frequência) para circuitos com função de transferência de 1ª ordem**

4/5.9.2 A resposta em frequência de um amplificador com MOSFET ou TBJ



Amplificador: (a) Capacitivamente acoplado EC ou FC. (b) Diagrama da magnitude do ganho de amplificador EC/FC versus frequência. O gráfico delinea de faixas de frequência relevantes para determinação da resposta em frequência.

Análise em Frequência: Circuitos de 1ª ordem (CTS)

Lembrando dos componentes passivos R, C, L:

$$Z_R = R$$

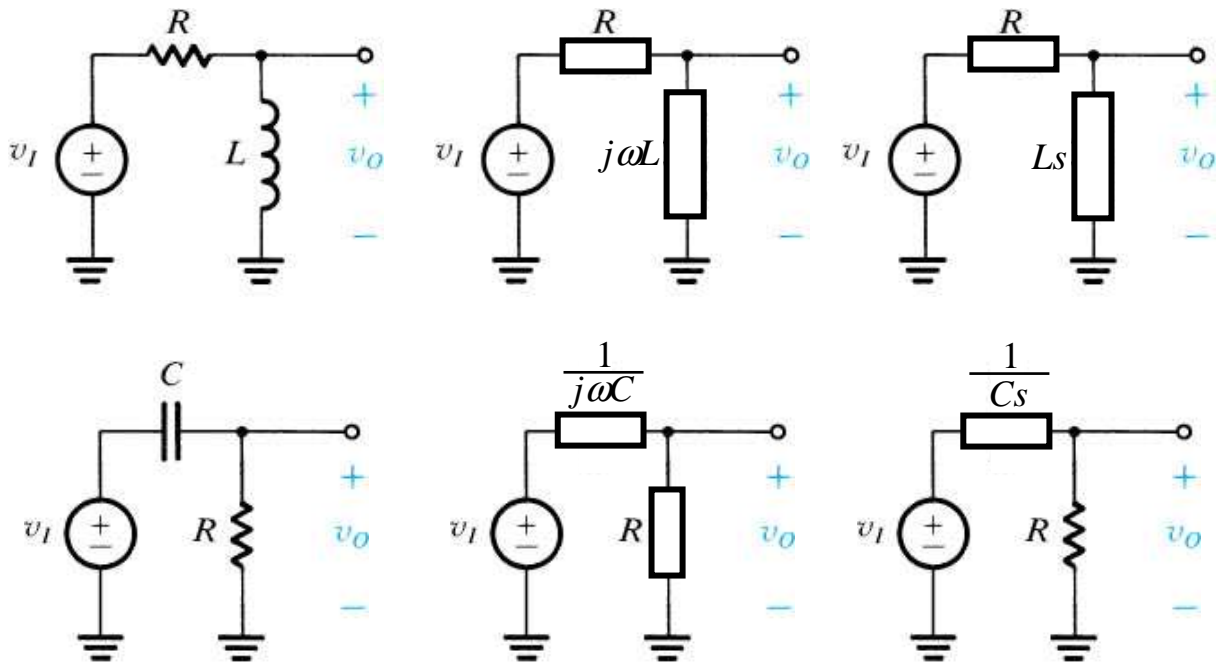
$$\rightarrow \left| \frac{V}{I} \right| = R \text{ e } \angle V/I = 0^\circ$$

$$Z_L = sL = j\omega L$$

$$\rightarrow \left| \frac{V}{I} \right| = \omega L \text{ e } \angle V/I = 90^\circ$$

$$Z_C = \frac{1}{sC} = \frac{1}{j\omega C}$$

$$\rightarrow \left| \frac{V}{I} \right| = \frac{1}{\omega C} \text{ e } \angle V/I = -90^\circ$$



$$\tau = CR \text{ ou } \tau = L/R$$

Análise em Frequência: Circuitos de 1ª ordem (CTS)

Determinando a constante de tempo (τ) em circuitos CTS

Para um circuito CTS podemos determinar sua constante de tempo (τ) aplicando os seguinte procedimento:

- Reduza as excitações a zero (curte fontes de tensão e abra fontes de corrente não vinculadas)
- “Peque” os dois terminais do componente reativo (capacitância ou indutância) OU do componente resistivo — o que tiver apenas um no circuito - e calcule a impedância equivalente vista pelo componente
- A constante de tempo será $\tau = L/R_{eq}$ ou $\tau = CR_{eq}$

NOTA: A tensão (ou corrente) aplicada ao circuito assim determinado é aquela obtida pelo equivalente Thévenin/Norton olhando-se pelos terminais do componente reativo

Introdução:

Na análise da resposta em frequência de um amplificador, a maior parte do trabalho envolve achar o ganho de tensão como uma função de transferência em termos da variável complexa s . Na análise no domínio s , a capacitância C é substituída por uma admitância sC , ou uma impedância $1/sC$, que é equivalente, e uma indutância L é substituída por uma impedância sL . Logo, usando a técnica usual de análise de circuito, deduzimos a função de transferência da tensão $T(s) \equiv V_o(s)/V_i(s)$.

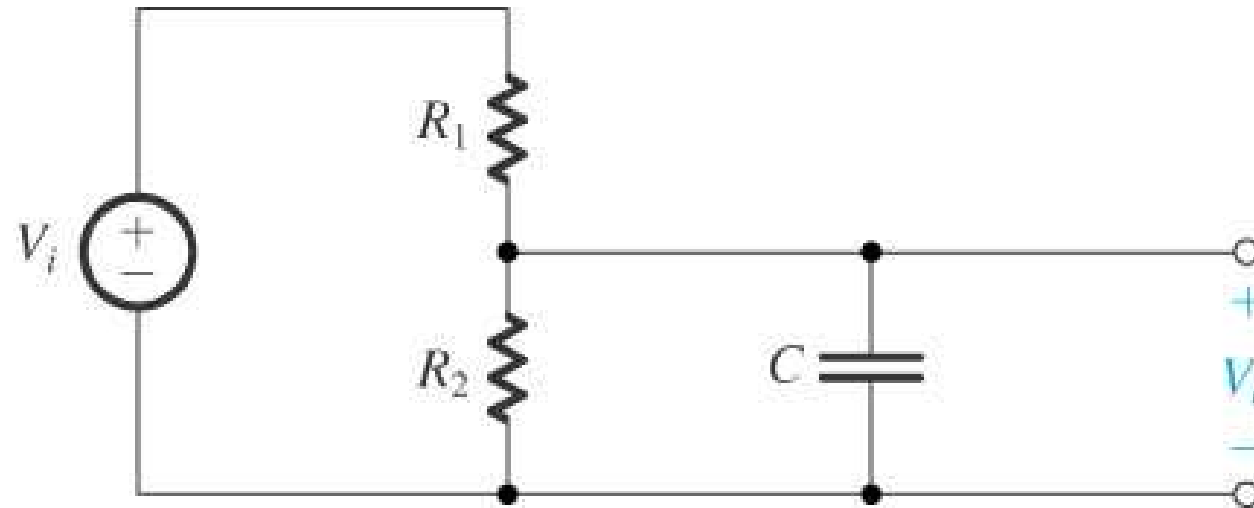


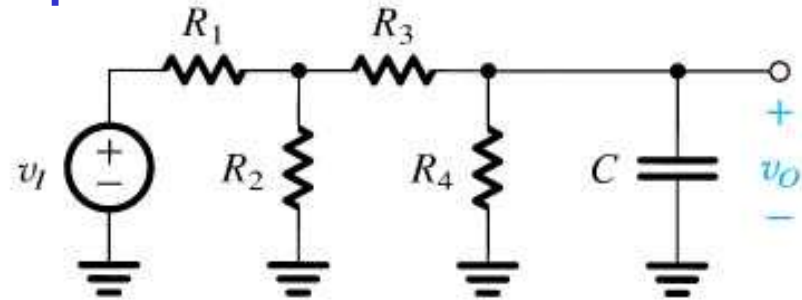
Figura EE.1

Resp.

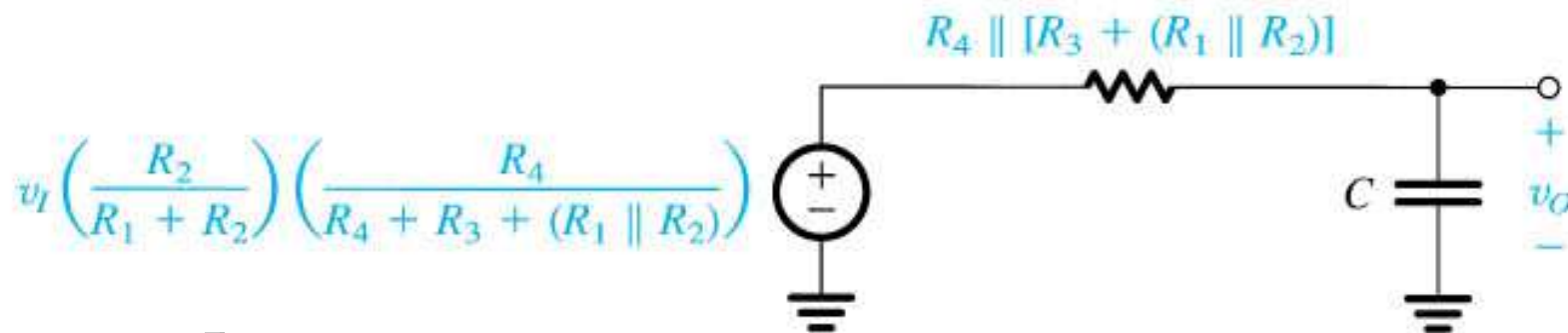
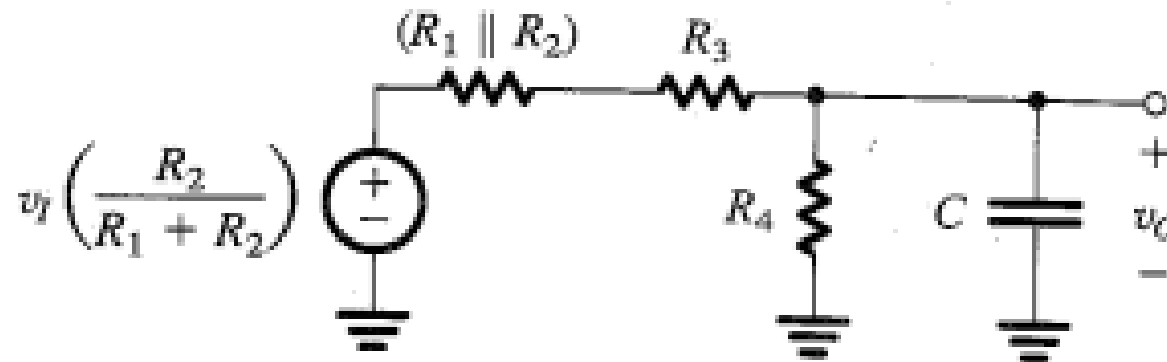
$$T(s) = \frac{1/CR_1}{s + 1/C(R_1 // R_2)}$$

Análise em Frequência: Circuitos de 1ª ordem

Exemplo 1: Qual a constante de tempo?



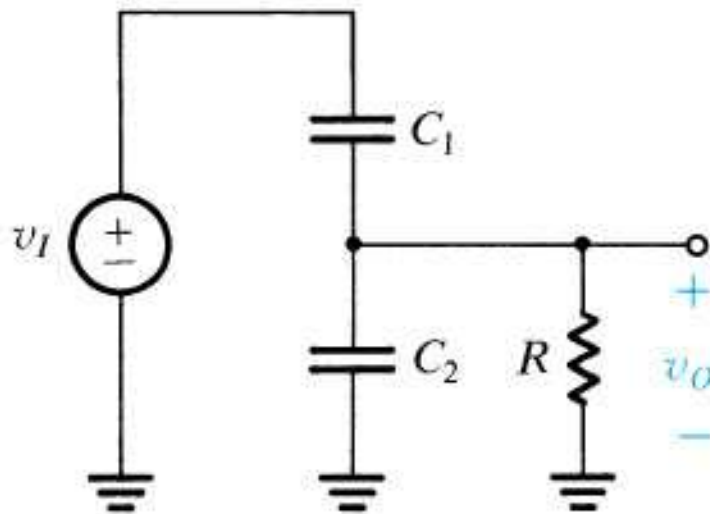
Solução



$$\tau = C R_4 \parallel [R_3 + (R_2 \parallel R_1)]$$

Análise em Frequência: Circuitos de 1ª ordem

Exemplo 2: Qual a constante de tempo?



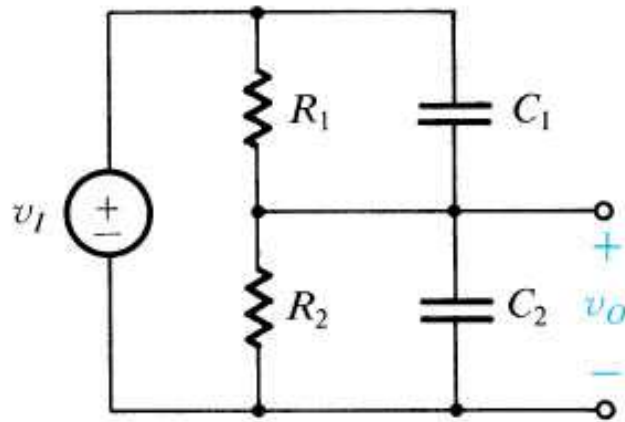
Solução:

Após reduzir a excitação para zero por curto-circuitando a fonte, notamos que a resistência “vê” um capacitor equivalente de $C_1 + C_2$. Portanto, a constante de tempo é dada por:

$$\tau = (C_1 + C_2)R$$

Análise em Frequência: Circuitos de 1ª ordem

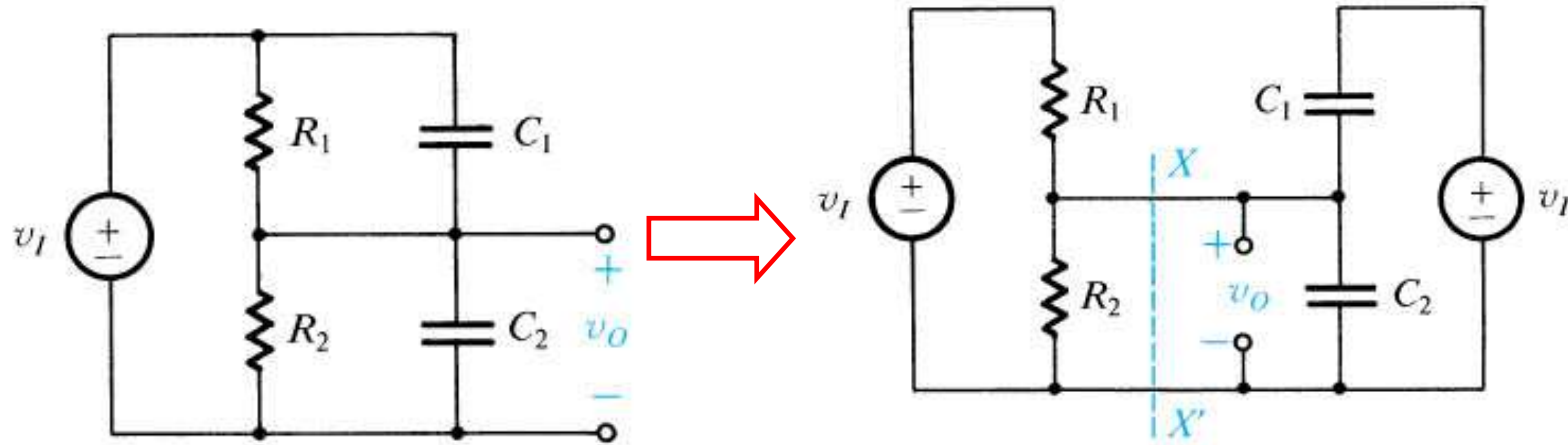
Exemplo 3: Qual a constante de tempo?



Análise em Frequência: Circuitos de 1ª ordem

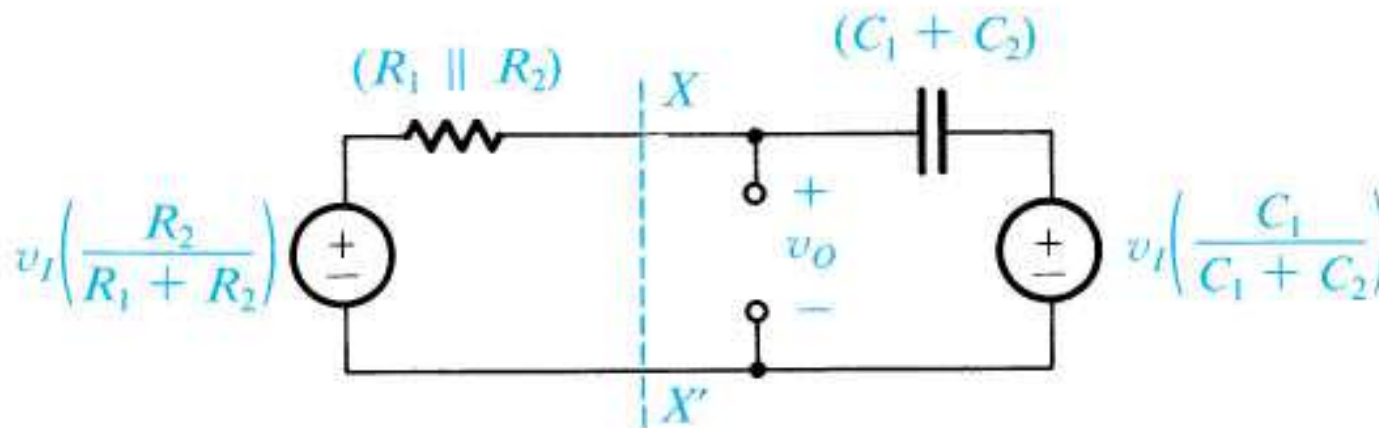
Exemplo 3: Qual a constante de tempo?

Solução



(a) Circuito dado;

(b) circuito intermediário



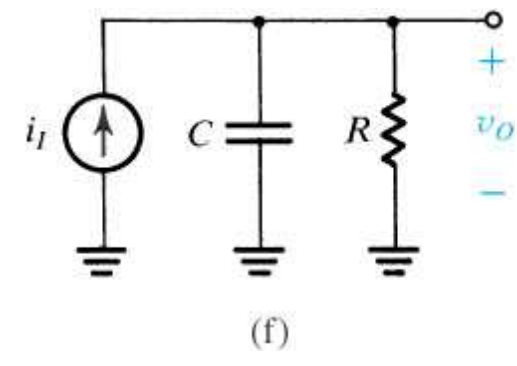
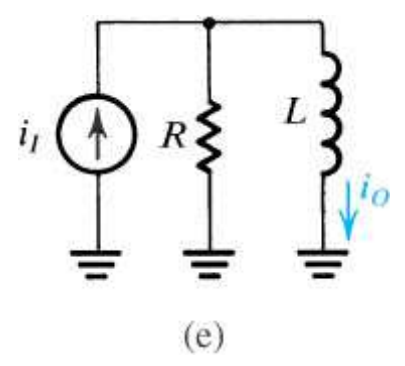
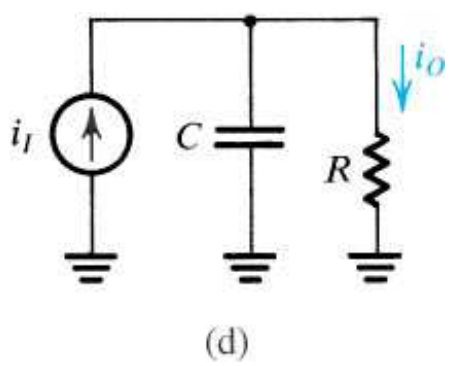
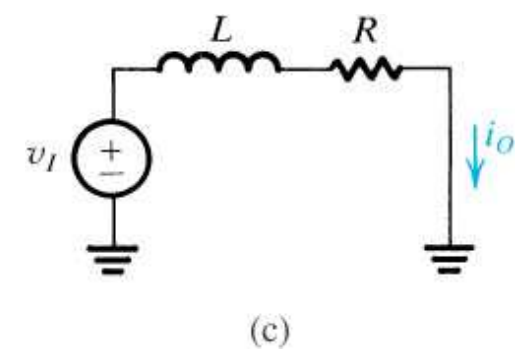
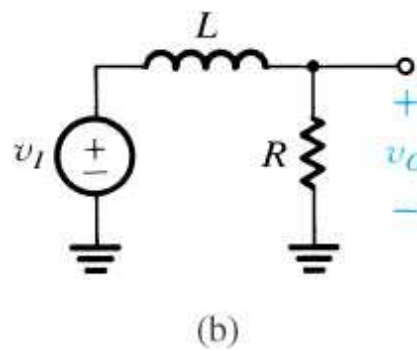
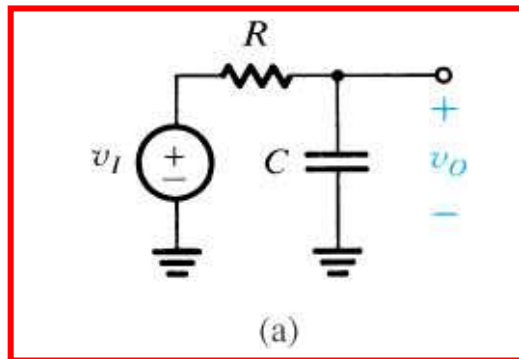
(c) aplicando-se Thévenin, e assim, obtendo-se a constante de tempo pode ser dada por

$$\tau = (C_1 + C_2)(R_1 // R_2)$$

Circuitos (filtros) Passa Baixas (PB)

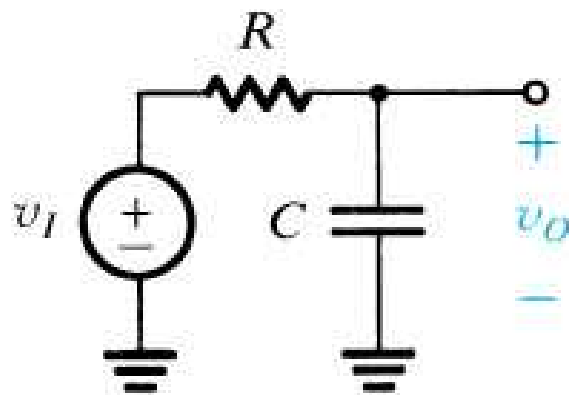
$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{sC} \quad \left\{ \begin{array}{l} \omega = 0 \Rightarrow Z_C = \infty \text{ (aberto)} \\ \omega \rightarrow \infty \Rightarrow Z_C = 0 \text{ (curto)} \end{array} \right.$$

$$Z_L = j\omega L = sL \quad \left\{ \begin{array}{l} \omega = 0 \Rightarrow Z_L = 0 \text{ (curto)} \\ \omega \rightarrow \infty \Rightarrow Z_L = \infty \text{ (aberto)} \end{array} \right.$$



Circuitos (filtros) Passa Baixas (PB)

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{sC} \begin{cases} \omega = 0 \Rightarrow Z_C = \infty \text{ (aberto)} \\ \omega \rightarrow \infty \Rightarrow Z_C = 0 \text{ (curto)} \end{cases}$$



$$\omega = 0 \Rightarrow v_o = v_i \rightarrow \frac{v_o}{v_i} = 1$$

$$\omega \rightarrow \infty \Rightarrow v_o \rightarrow 0 \Rightarrow \frac{v_o}{v_i} \rightarrow 0$$

$$v_o = v_i \frac{\frac{1}{j\omega C}}{\frac{1}{j\omega C} + R} \rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{1}{1 + CRj\omega} = \frac{1}{1 + \tau j\omega}$$

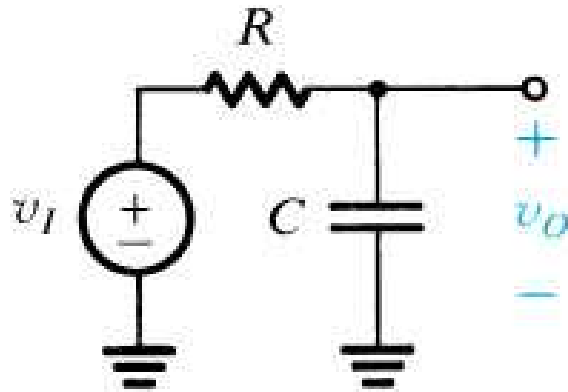
$$\text{se } \frac{1}{\tau} = \frac{1}{CR} = \omega_0 \rightarrow A_v = \frac{1}{1 + j\omega/\omega_0} \quad T(s) = \frac{1}{1 + (s/\omega_0)}$$

Se.

$$\omega = 0 \Rightarrow \frac{v_o}{v_i} = 1$$

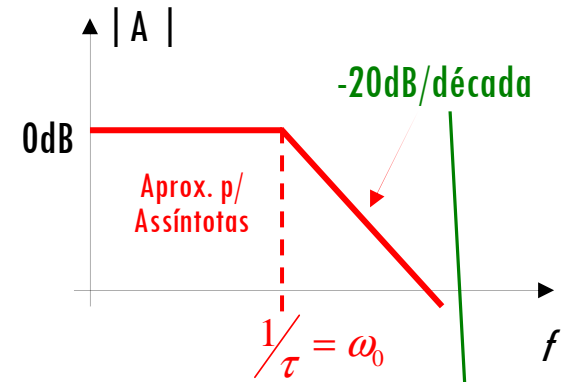
$$\omega \rightarrow \infty \Rightarrow \frac{v_o}{v_i} \rightarrow 0$$

Circuitos (filtros) Passa Baixas (PB)



$$A_v = \frac{1}{1 + j\omega/\omega_0} \quad \text{com} \quad 1/\tau = \omega_0$$

se $R = 1k\Omega$ e $C = 1\mu F$
 $\tau = CR = 1\mu F \times 1k\Omega = 0,001\text{seg}$
 $\rightarrow 1/\tau = 1k \text{ rad/s}$



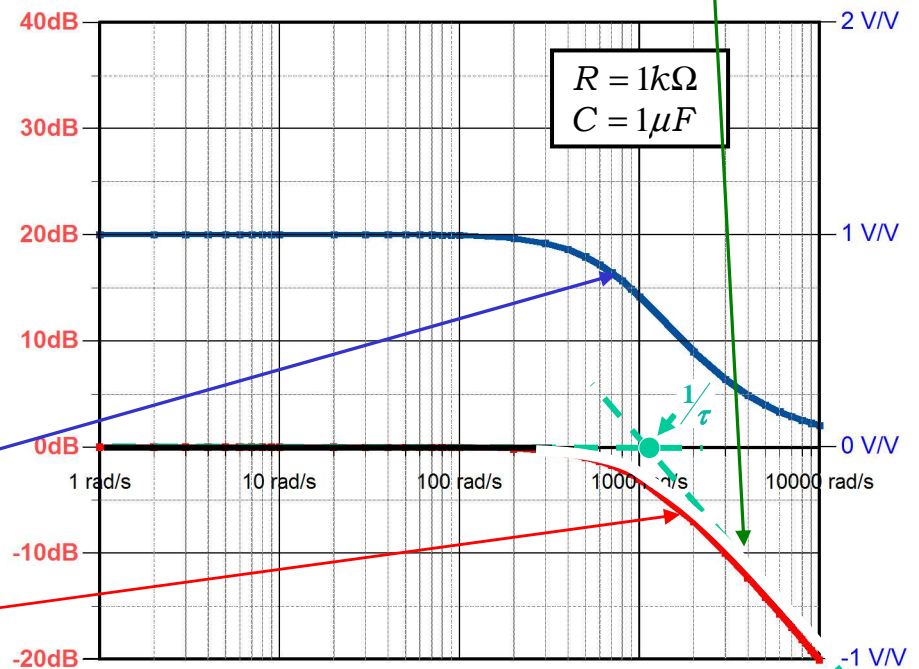
Da matemática de números complexos:

$$|A_v| = \sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2} \quad 1/\tau = \omega_0 \quad (\text{rad/seg})$$

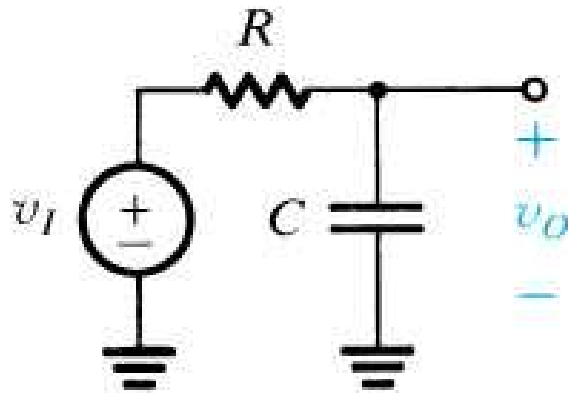
$$|A_v| = \frac{1^2}{\sqrt{1^2 + \left(\frac{\omega}{1/\tau}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1^2 + (\omega\tau)^2}} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{\sqrt{1^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}$$

$$|A_v| = \frac{1}{\sqrt{1^2 + (\omega\tau)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1^2 + (\omega CR)^2}}$$

$$|A_v| \text{ (dB)} = 20 \log |A_v|$$

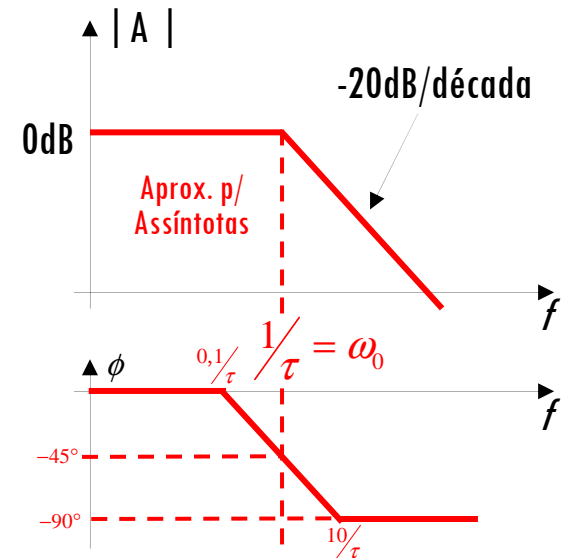


Circuitos (filtros) Passa Baixas (PB)



$$A_v = \frac{1}{1 + j\omega/\omega_0} \quad \text{com} \quad 1/\tau = \omega_0$$

se $R = 1k\Omega$ e $C = 1\mu F$
 $\tau = CR = 1\mu F \times 1k\Omega = 0,001\text{seg}$
 $\rightarrow 1/\tau = 1k \text{ rad/s}$

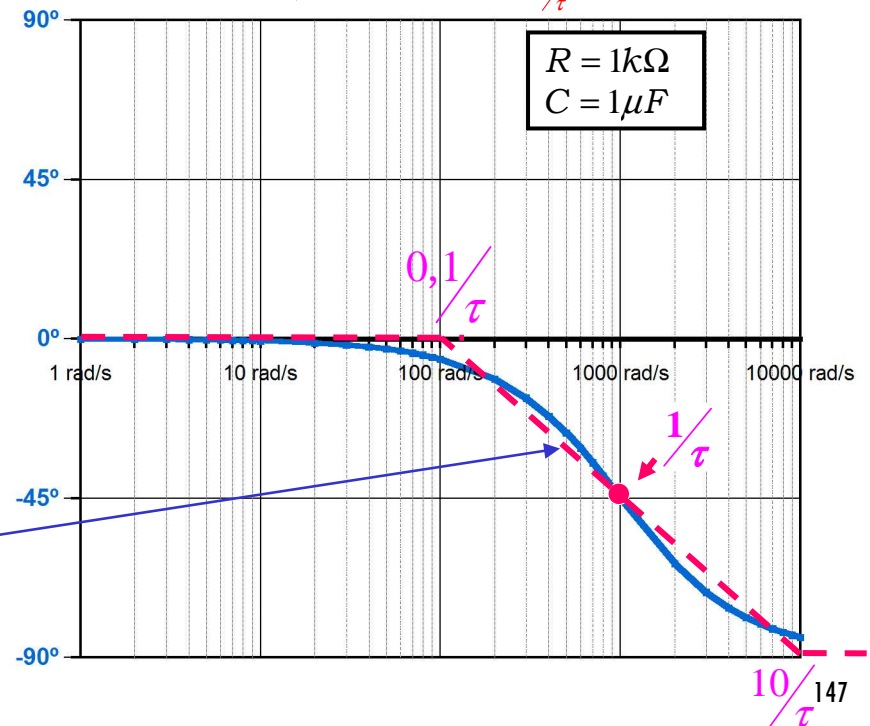


Da matemática de números complexos:
 a fase pode ser dada por:

$$\phi = \arctan \left[\frac{\text{Im}}{\text{Re}} \right] \quad 1/\tau = \omega_0 \quad (\text{rad/seg})$$

$$\phi = \arctan \left[\frac{0}{1} \right] - \arctan \left[\frac{\omega/\omega_0}{1} \right] = -\arctan \left[\omega/\omega_0 \right]$$

$$\phi = -\arctan \left[\frac{\omega}{\omega_0} \right] = -\arctan [CR\omega]$$



Resposta em Frequência de um PB

$$A_v = \frac{1}{1 + j\omega/\omega_0} \text{ com } 1/\tau = \omega_0$$

$$T(s) = \frac{K}{1 + (s/\omega_0)}$$

$$T(j\omega) = \frac{K}{1 + j(\omega/\omega_0)}$$

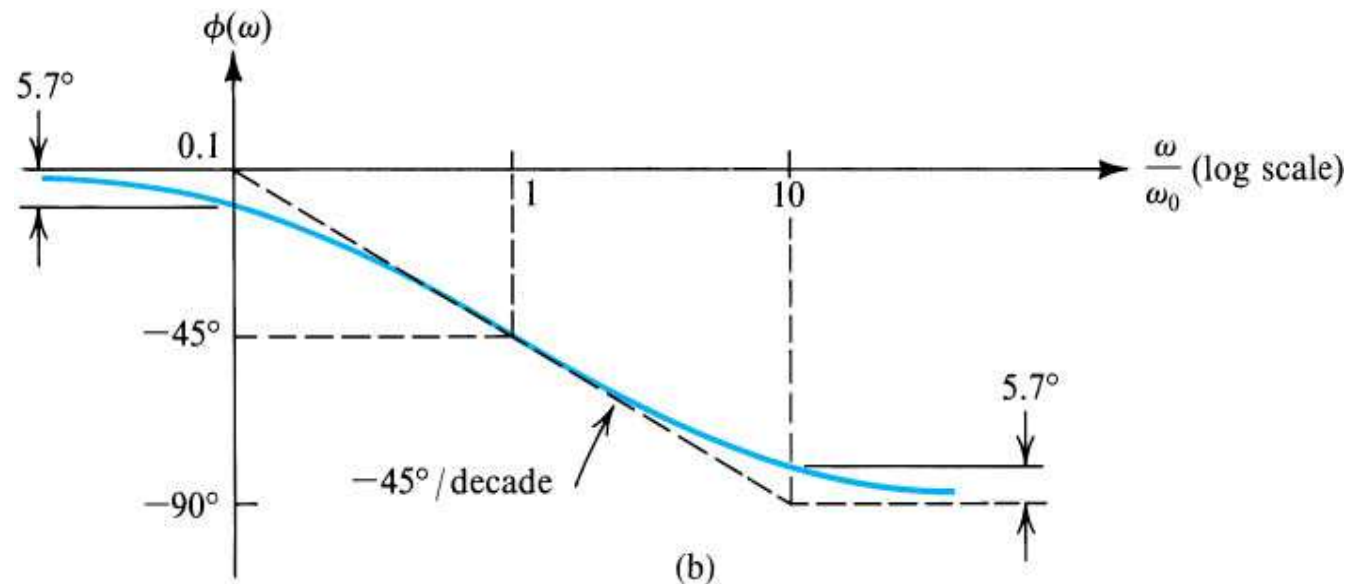
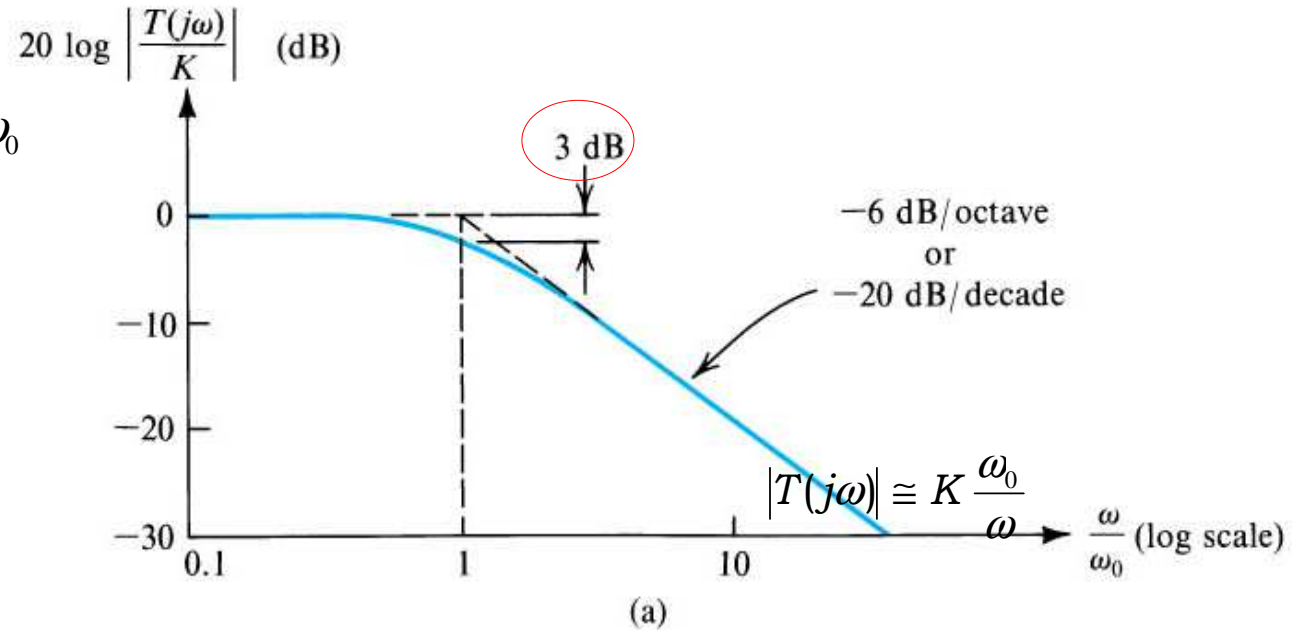
$$|T(j\omega)| = \frac{K}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_0)^2}}$$

$$\phi(\omega) = -\text{tg}^{-1}(\omega/\omega_0)$$

Na freq. de corte:

$$|T(j\omega)|_{fc} = K/\sqrt{2}$$

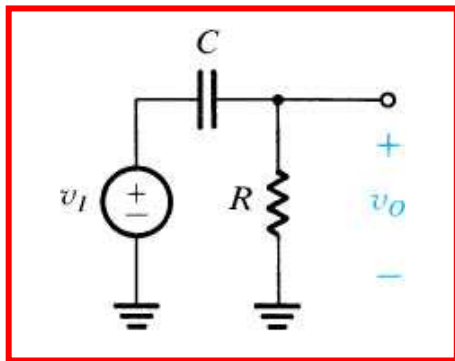
$$\phi(\omega)_{fc} = -45^\circ$$



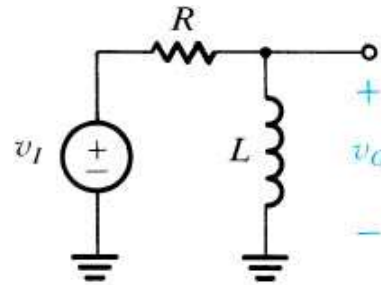
Circuitos (filtros) Passa Altas (PA)

$$Z_L = j\omega L = sL \quad \left\{ \begin{array}{l} \omega = 0 \Rightarrow Z_L = 0 \text{ (curto)} \\ \omega \rightarrow \infty \Rightarrow Z_L = \infty \text{ (aberto)} \end{array} \right.$$

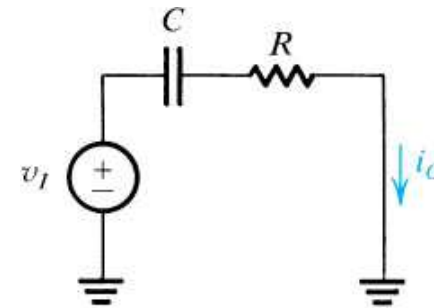
$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{sC} \quad \left\{ \begin{array}{l} \omega = 0 \Rightarrow Z_C = \infty \text{ (aberto)} \\ \omega \rightarrow \infty \Rightarrow Z_C = 0 \text{ (curto)} \end{array} \right.$$



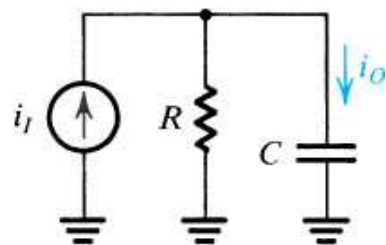
(a)



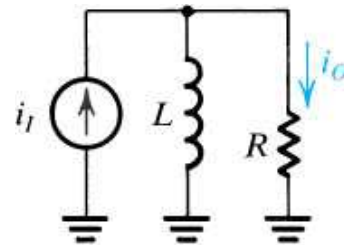
(b)



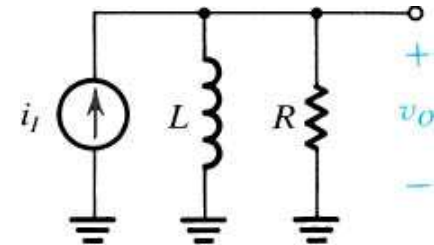
(c)



(d)

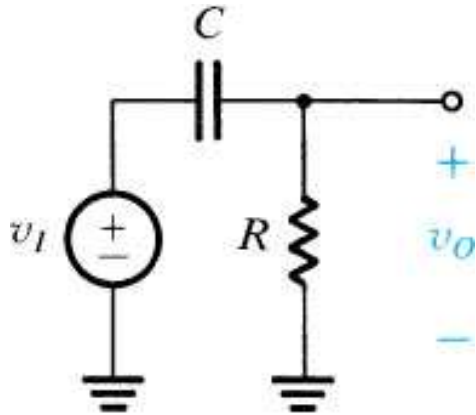


(e)



(f)

Circuitos (filtros) Passa Altas (PA)



$$A_v = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 - j\frac{\omega_0}{\omega}} \text{ com } \frac{1}{\tau} = \omega_0$$

$$T(s) = \frac{s}{s + \omega_0}$$

se $R = 1k\Omega$ e $C = 1\mu F$
 $\tau = CR = 1\mu F \times 1k\Omega = 0,001\text{seg}$
 $\rightarrow 1/\tau = 1k \text{ rad/s}$

Da matemática de números complexos:

$$|A_v| = \sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2}$$

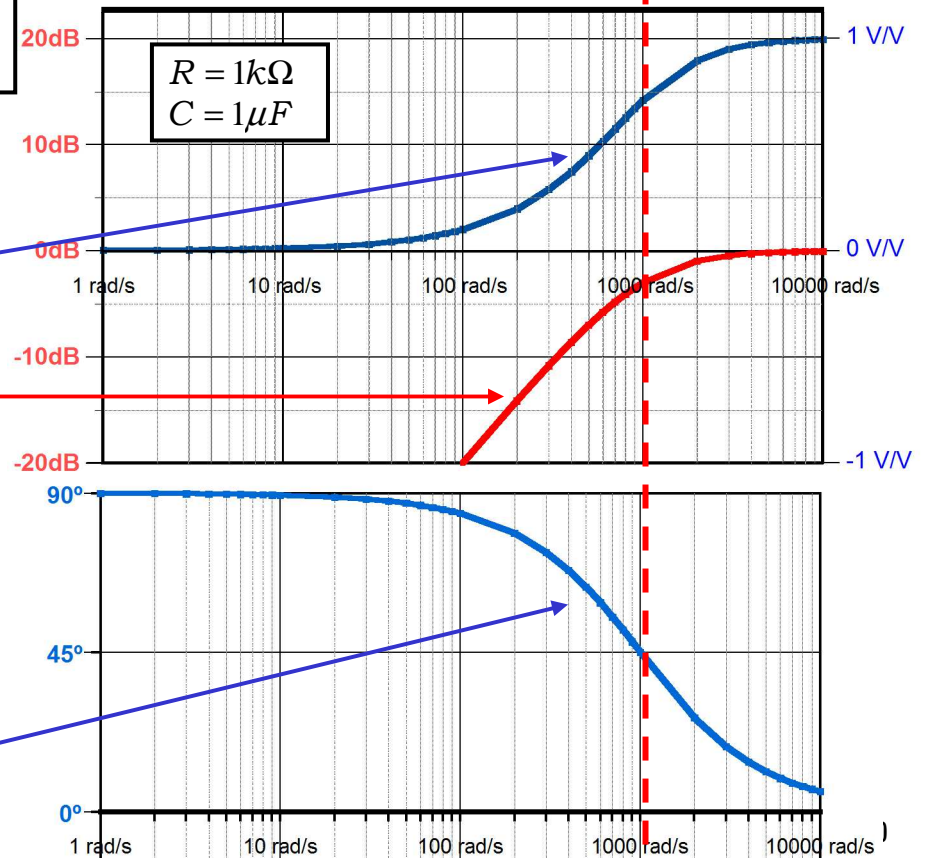
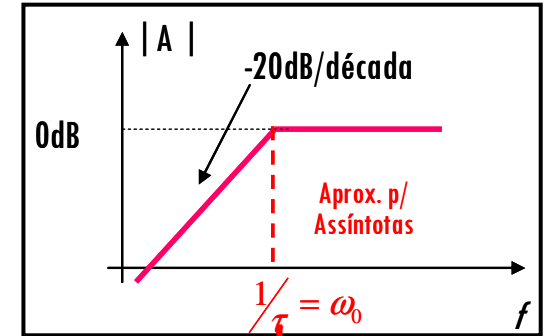
$$\frac{1}{\tau} = \omega_0 \text{ (rad/seg)}$$

$$|A_v| = \frac{1^2}{\sqrt{1^2 + \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}}$$

$$|A_v| \text{ (dB)} = 20 \log |A_v|$$

$$\phi = \arctan \left[\frac{\text{Im}}{\text{Re}} \right]$$

$$\phi = \arctan \left[\frac{0}{1} \right] - \arctan \left[\frac{-\omega_0/\omega}{1} \right] = +\arctan \left[\frac{\omega_0}{\omega} \right]$$



Resposta em Frequência de um PA

$$A_v = \frac{1}{1 - j\omega_0/\omega} \text{ com } \frac{1}{\tau} = \omega_0$$

$$T(s) = \frac{Ks}{s + \omega_0} \quad |T(j\omega)| \cong K \frac{\omega}{\omega_0}$$

$$T(j\omega) = \frac{K}{1 - j\omega_0/\omega}$$

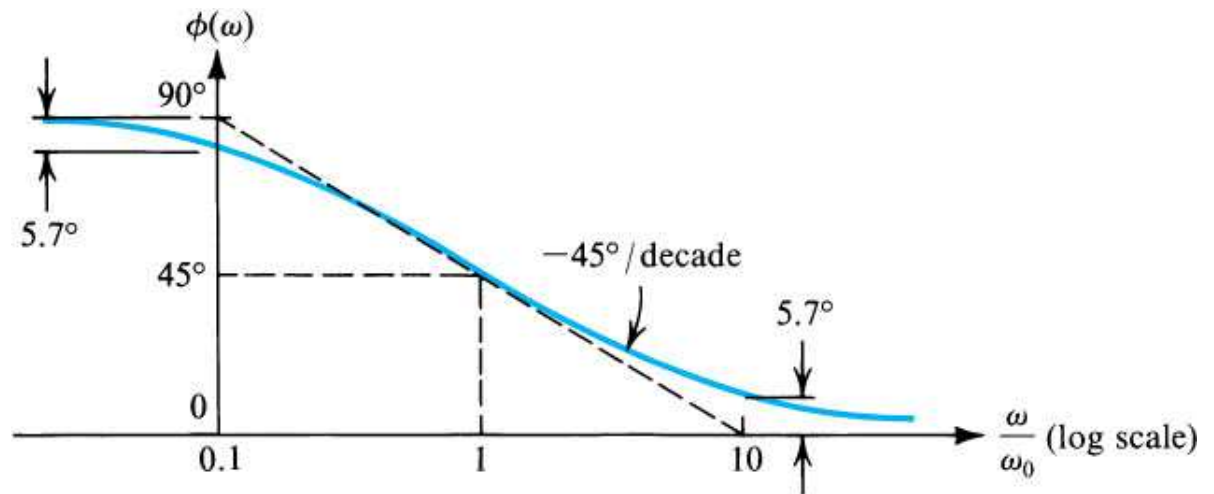
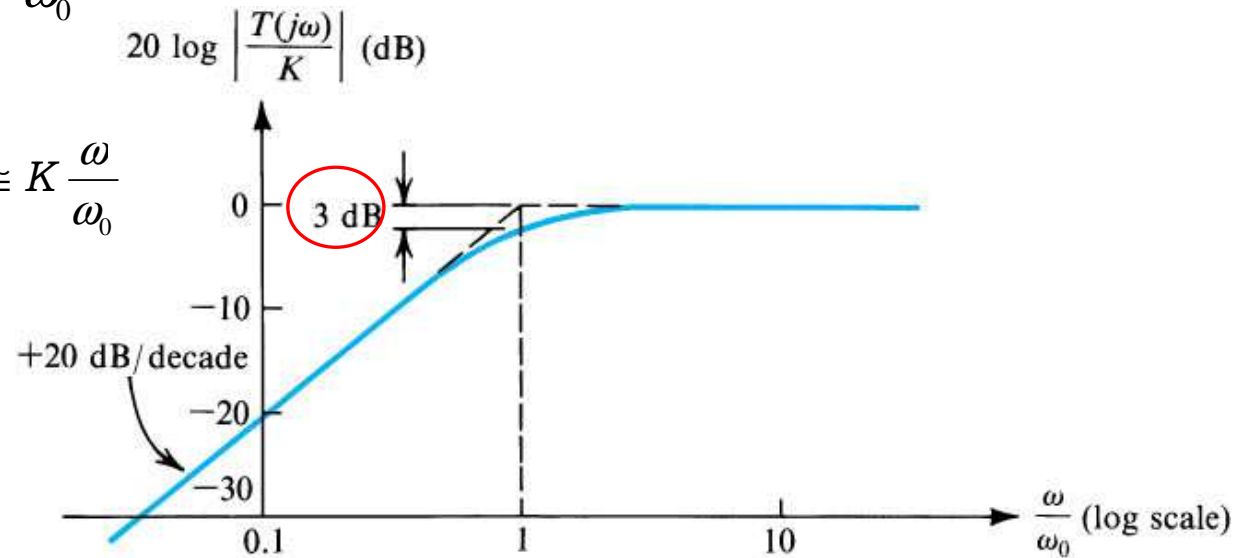
$$|T(j\omega)| = \frac{K}{\sqrt{1 + (\omega_0/\omega)^2}}$$

$$\phi(\omega) = \text{tg}^{-1}(\omega_0/\omega)$$

Na freq. de corte:

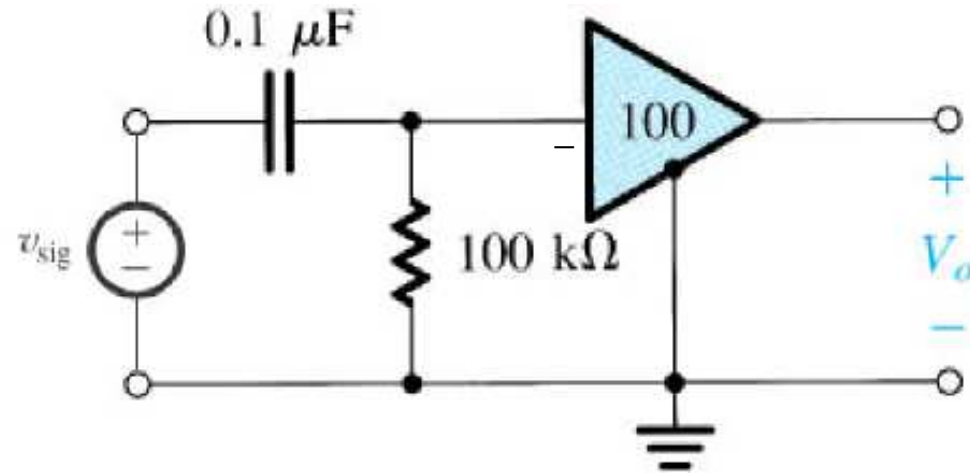
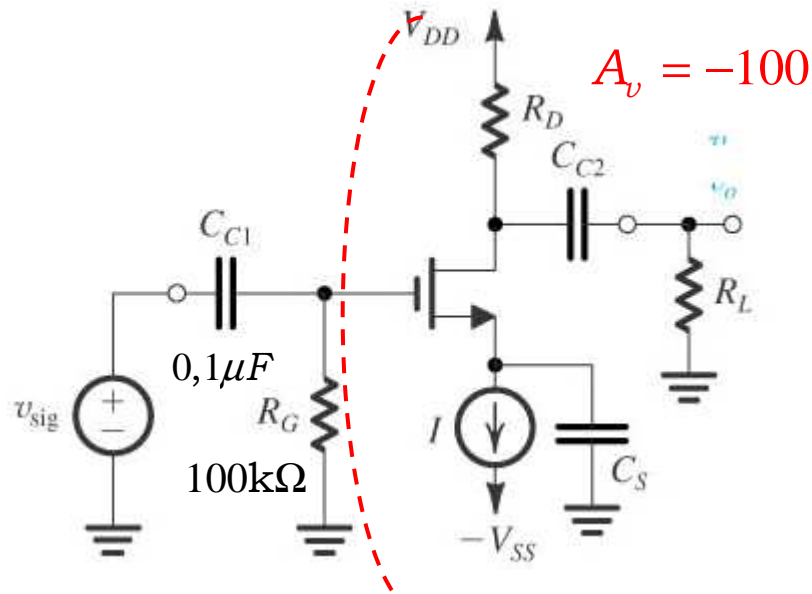
$$|T(j\omega)|_{fc} = K/\sqrt{2}$$

$$\phi(\omega)_{fc} = 45^\circ$$



(b)

Exercício D4: Determine o módulo do ganho em altas frequências (em dB), a frequência (em Hz) de corte (3dB) e o módulo do ganho para $f = 1\text{Hz}$ para o amplificador abaixo (suponha que C_{c2} e C_s não influenciam neste caso). Considere que o ganho é -100 entre a porta e a saída.



$$\frac{V_o}{V_{sig}} = \frac{V_o}{V_i} \frac{V_i}{V_{sig}} = A_v \frac{V_i}{V_{sig}} = A_v \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{-100}{1 - j\frac{\omega_0}{\omega}} \text{ com } \frac{1}{\tau} = \frac{1}{CR} = \omega_0$$

-em altas frequências, $|G| = 100$, ou em dB, $20 \log(100) = 40 \text{ dB}$

-freq corte: $\omega_0 = 1/CR = 1/(0,1 \times 10^{-6}) \times (100 \times 10^3) = 1/0,01 = 100 \text{ rad/seg}$

$$2\pi f = 100 \rightarrow f \cong 15,92\text{Hz}$$

- ganho em 1Hz:

$$\omega = 2\pi f = 6,28 \text{ rad/seg} \quad |T(j\omega)| = \left| \frac{K}{\sqrt{1 + (\omega_0/\omega)^2}} \right| = \left| \frac{-100}{\sqrt{1 + (100/6,28)^2}} \right| = 6,27 = 15,9\text{dB} \quad (\angle 180^\circ)$$

Apêndice E: Função de transferência Complexa:

Na análise da resposta em frequência de um amplificador, o maior trabalho é achar o ganho de tensão em função da frequência complexa s . Na análise no domínio da frequência a capacitância C é substituída por uma admitância sC ou impedância $1/sC$, e uma indutância L por uma impedância sL . Então, usando técnicas comuns de análise circuital, obtém-se a função de transferência de tensão, como $T(s) = V_o(s) / V_i(s)$.

Como traçar resposta em frequência de uma maneira eficiente?

O domínio de Laplace, associado às técnicas desenvolvidas por H. Bode, nos permitem fazer isso de maneira razoavelmente simples.

Neste Curso estaremos lidando com funções de transferência de 1ª ordem e circuitos estáveis (que não geram sinais por si próprios)

Neste caso basta sabermos:

a função de transferência $T(s)$ do circuito

- a constante de tempo τ do circuito
- lembre-se que $\omega_0 = 1/\tau = 1/CR$ para circuitos RC de primeira ordem

Apêndice E: Traçando Respostas em Frequência de uma maneira simples

Em muitos casos não precisamos substituir s por $j\omega$ para compreender o comportamento do circuito. Em geral, para os circuitos que estaremos estudando, $T(s)$ pode ser expressa na forma:

$$T(s) = \frac{a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \dots + a_0}{s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_0}$$

onde $m \leq n$ (ordem da função) e as raízes do denominador são **números reais negativos**. Nesse caso especial, é conveniente expressar $T(s)$ na forma:

$$T(s) = a_m \frac{(s - Z_1)(s - Z_2) \cdots (s - Z_m)}{(s - P_1)(s - P_2) \cdots (s - P_n)}$$

onde a_m é uma constante multiplicativa (não é o ganho, como veremos), Z_m são os zeros da função e P_n são os pólos da função, sendo $p_n = -\omega_n$. Se conhecermos a_m , os zeros e os pólos (em nosso curso números negativos reais), usando a técnica de Bode, podemos desenhar a resposta em frequência do circuito.

Para os nossos Circuitos

Funções de transferência de 1ª ordem com pólos e zeros sempre reais, portanto na forma geral:

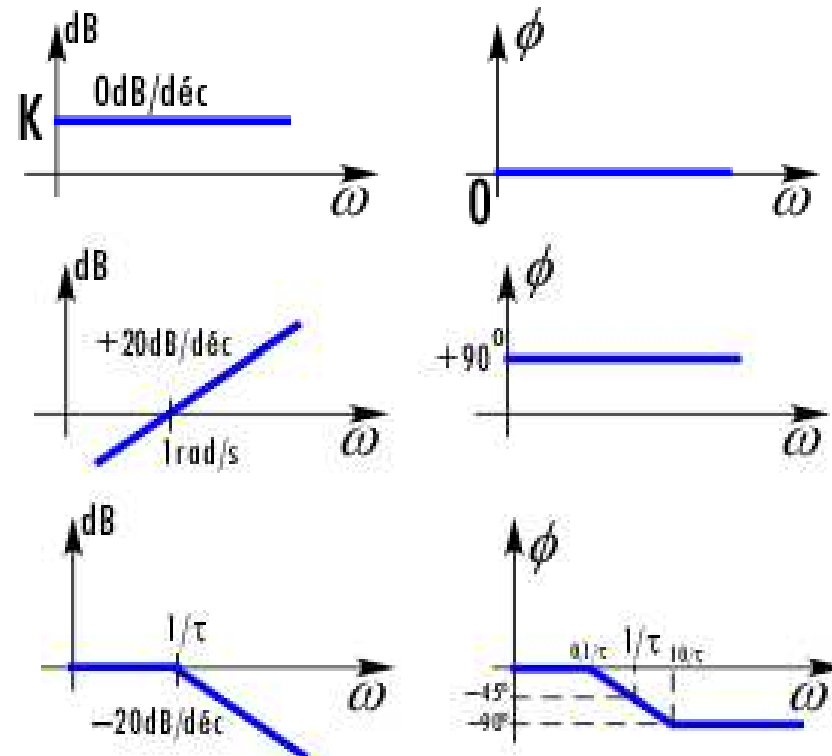
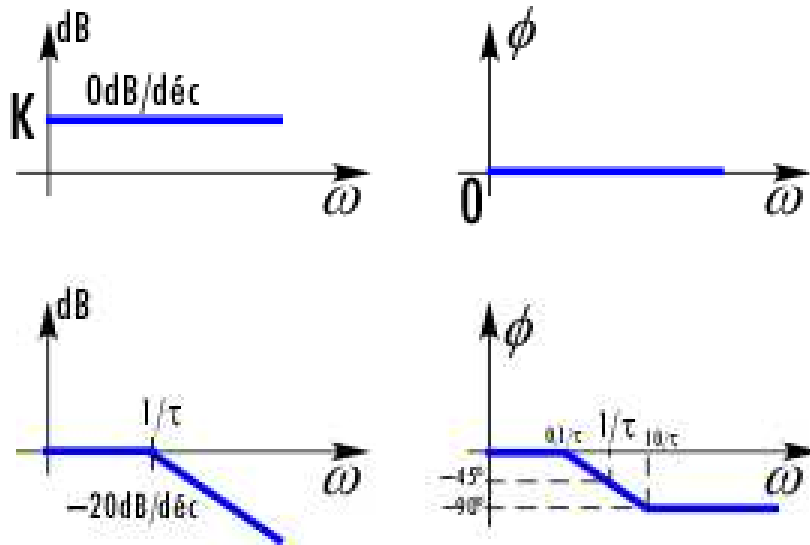
$$T(s) = \frac{a_1 s + a_0}{s + \omega_0}$$

PB ($a_1=0$)

PA ($a_0=0$)

$$T(s) = \frac{a_0}{s + \omega_0} = \frac{a_0}{\omega_0} \frac{1}{s / \omega_0 + 1}$$

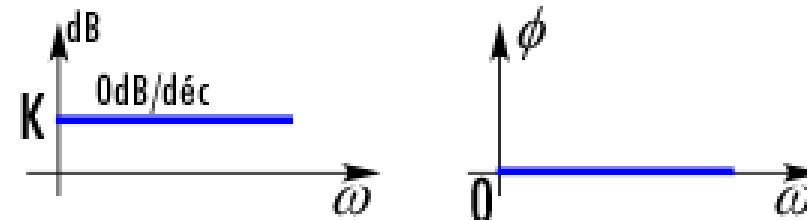
$$T(s) = \frac{a_1 s}{s + \omega_0} = \frac{a_1}{\omega_0} s \frac{1}{s / \omega_0 + 1}$$



Resumo das Respostas em Frequência de Circuitos CTS

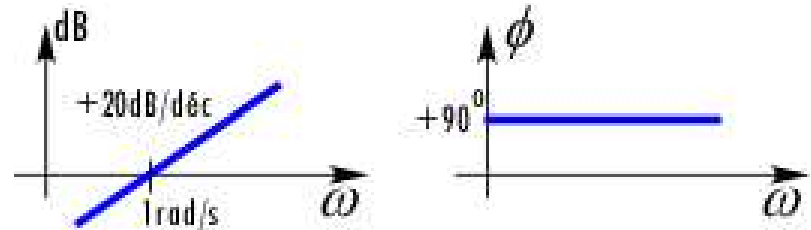
$$T(s) = K$$

K Ganho K
 $T(s) = K$
 $|T(s)| \text{ (dB)} = 20 \log K$
 Fase = 0°



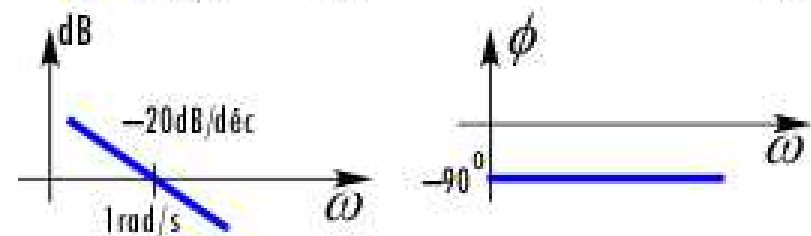
$$T(s) = s$$

Dif $T(s) = s$
 $+20\text{dB/dec}$
 Fase = 90°



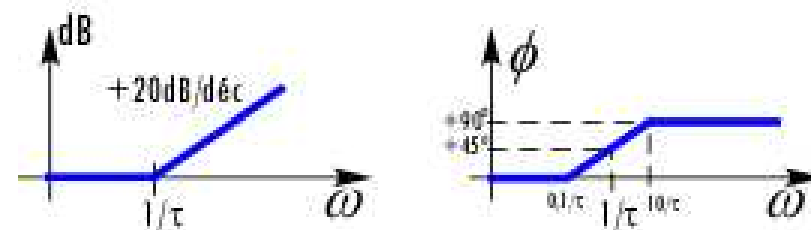
$$T(s) = \frac{1}{s}$$

Int $T(s) = 1/s$
 -20dB/dec
 Fase = -90°



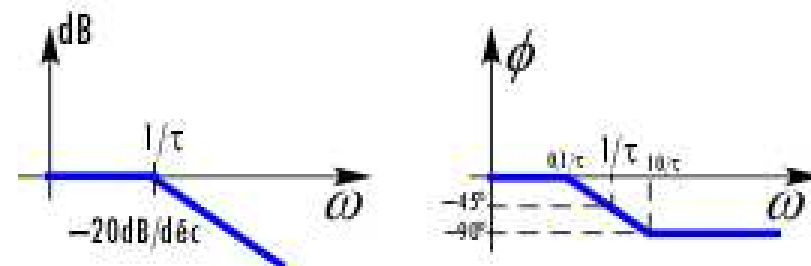
$$T(s) = 1 + s / \omega_0$$

$T(s) = 1 + s/\omega_0$
 freq corte (f_c): $1/\tau$
 $+20\text{dB/dec}$
 Fase = $+45^\circ$ em f_c



$$T(s) = \frac{1}{1 + (s/\omega_0)}$$

$T(s) = 1/(1 + s/\omega_0)$
 freq corte (f_c): $1/\tau$
 -20dB/dec
 Fase = -45° em f_c



Resumo das Respostas em Frequência de Circuitos CTS

$$T(s) = K$$

1. The K_o constant term.

We saw how to draw the frequency response of constant terms in Section 13.4.1. Essentially constant terms result in horizontal lines on the magnitude plot and have a phase of zero.

$$T(s) = s$$

2. The s terms.

Terms of the form s and $1/s$ (if l is negative) were also plotted in Section 13.4.1. We saw that each of these terms result in lines of $+1$ or -1 slope on the log magnitude plot and contribute to a phase of 90° or -90° , respectively.

$$T(s) = \frac{1}{s}$$

3. Terms of the form $(s + a)$.

Section 13.4.2 addressed terms of the form $(s + a)$. We showed that the magnitude part of the frequency response of these terms is approximated by two straight lines corresponding to the low and high frequency asymptotes meeting at the break frequency a . Accordingly, Bode plots result in a series of straight line segments attached together at the break frequencies.

$$T(s) = 1 + s\omega_0$$

$$T(s) = \frac{1}{1 + (s/\omega_0)}$$

The phase plot also uses low- and high-frequency asymptotes and passes through 45° at the break frequency a . For more accuracy, the phase curve can be approximated by a straight line that passes through 45° at the

Procedimentos para construir Curvas de Bode

1. Obtenha a função de transferência $H(s)$.
2. Reescreva a função fazendo tanto o menor termo do numerador como do denominador serem unitários.
3. Separe a função em seus termos básicos.
4. Identifique a constante, os zeros e o polos da função.
5. Desenhe as curvas de Bode para cada um dos termos.
6. Desenhe a curva de Bode global, começando da esquerda para a direita e somando a influência dos termos em cada ponto.

Uma Grande Ferramenta: Diagramas de Bode

Uma técnica simples para construir a função de transferência (módulo e fase) quando temos polos e zeros reais

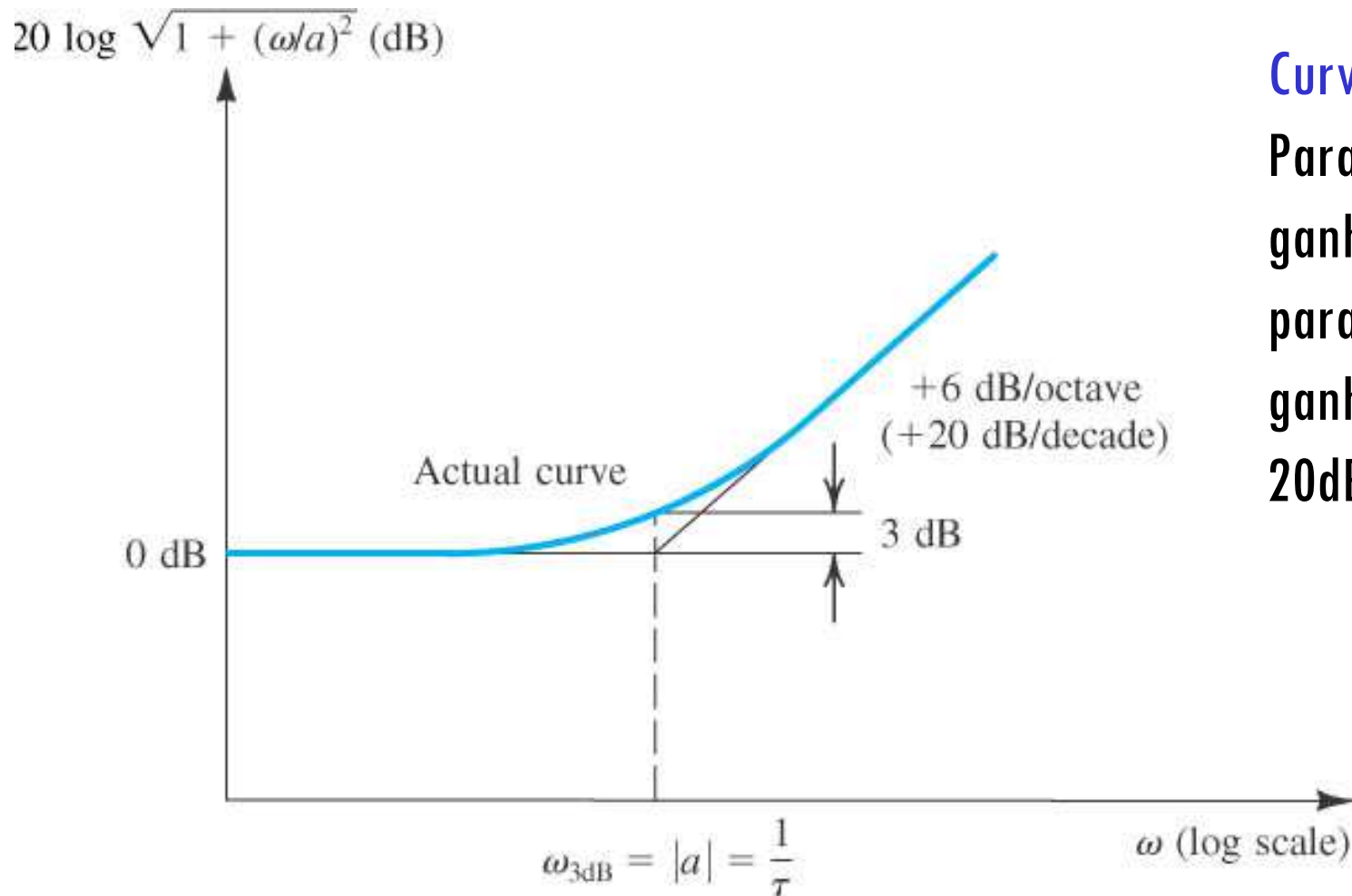
$$T(s) = a_m \frac{(s - Z_1)(s - Z_2) \cdots (s - Z_m)}{(s - P_1)(s - P_2) \cdots (s - P_n)}$$

em dB, $20 \log |T(s)|$, cada termo $(s+a)$ equivale a:

- em módulo : $20 \log \sqrt{a^2 + \omega^2}$ ou $20 \log \sqrt{1 + (\omega/a)^2}$

- em fase: $tg^{-1}(\omega/a)$

Recomenda-se esta, pois para
 $\omega \leq \omega_0 \rightarrow 20 \log |1 + s/\omega_0| \sim 0$
e, $\omega > \omega_0 \rightarrow$ cresce com 20dB/dec



Curva de Bode:
 Para $w \leq |a|$,
 ganho ~ 0 , e
 para $w > |a|$ o
 ganho cresce
 20dB/dec

Figura E.1 Curvas de Bode para o termo magnitude típico. A curva mostrada se aplica para o caso de um zero. Para um pólo, a assíntota para alta frequência deve ser desenhada com uma inclinação de -6 dB/oitava, ou -20 dB/dec.

OBS: recomenda-se escrever cada termo na forma: $(1 + s/a)$ na função de transferência $T(s)$, que facilita desenhar o diagrama de Bode.

Exemplo E.1

$$T(s) = \frac{10s}{(1 + s/10^2)(1 + s/10^5)}$$

A função já está na forma $(1 + s/w_0)$.

zeros: $s = 0$ e $s = \infty$!! **Obs: normalmente se ignora este na análise.**

pólos: $s = -10^2$ e -10^5

constante multiplicativa = 10

Exemplo E.1

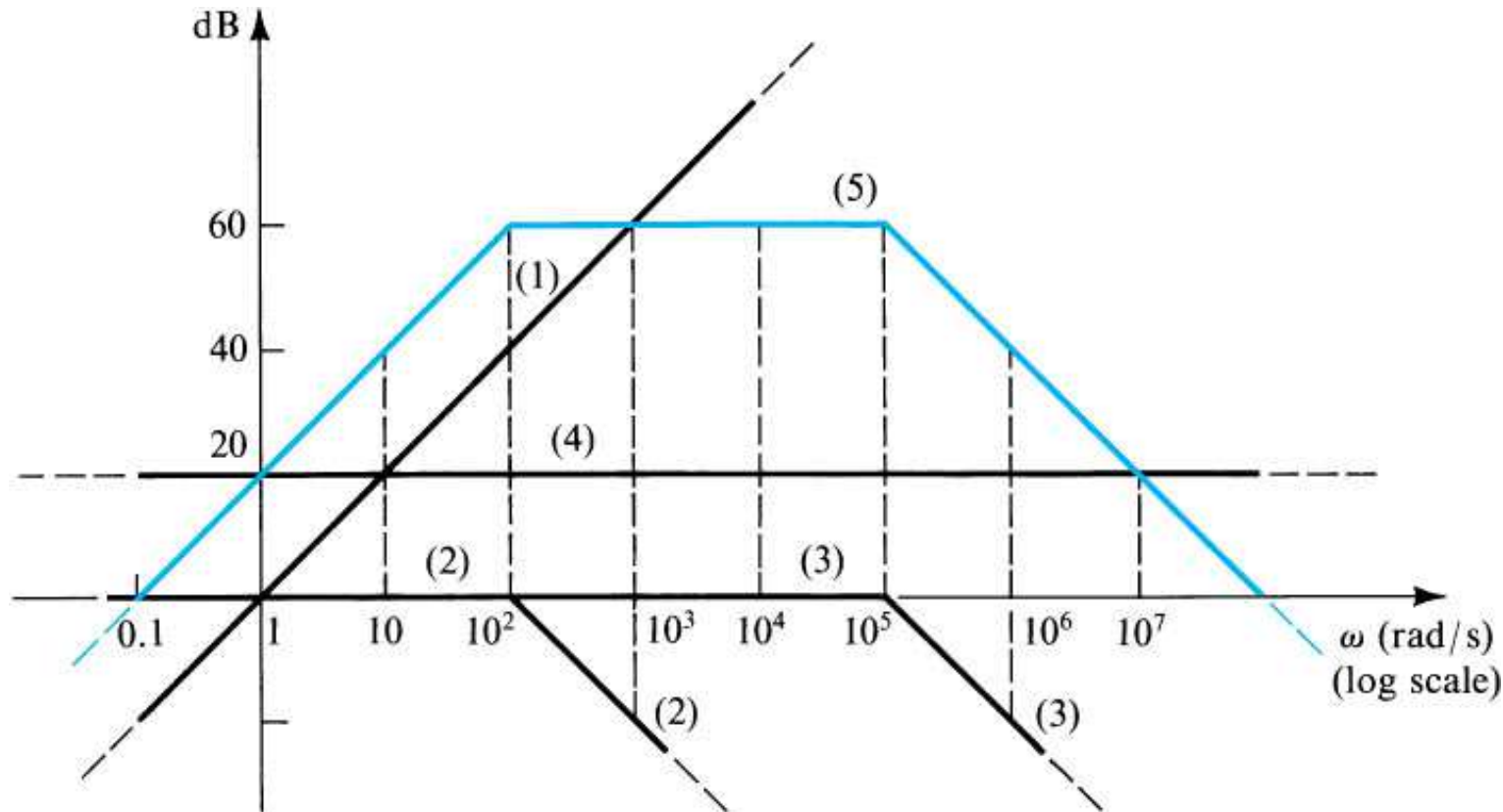


Figura E.2 Curvas de Bode para o Exemplo E.1.

$$W_{c_inf} = 100 \text{ rad/s}$$

$$W_{c_sup} = 100.000 \text{ rad/s}$$

ω	Approximate Gain	Exact Gain
10	40 dB	39.96 dB
10^3	60 dB	59.96 dB
10^6	40 dB	39.96 dB

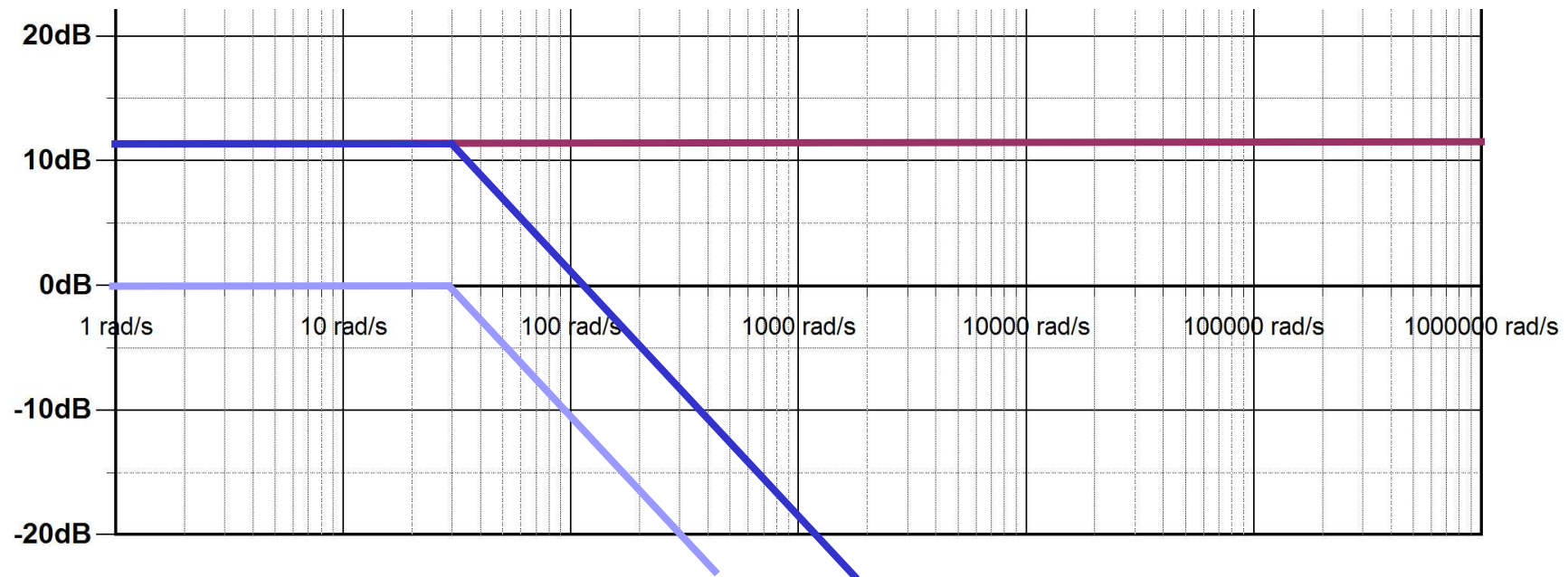
Exemplo 1: Trace o Diagrama de Bode para a função: $H(s) = \frac{100}{s + 30}$

1. Obtenha a função de transferência $H(s)$
2. Reescreva a função fazendo tanto o menor termo do numerador como do denominador serem unitários.
3. Separe a função em seus termos básicos
4. Identifique a constante, os zeros e o polos da função
5. Desenhe as curvas de Bode para cada um dos termos
6. Desenhe a curva de Bode global, começando da esquerda para a direita e somando a influência dos termos em cada ponto

$$H(s) = \frac{100}{30} \frac{1}{\frac{s}{30} + 1} = 3.3 \frac{1}{\frac{s}{30} + 1}$$

(1) $K = 3,3$ e fase 0° ($= 10,4\text{dB}$)

(2) Pólo em 30 rad/s e fase -45° no polo
(0° em $1/10$ do pólo e -90° em $10x$ o pólo)

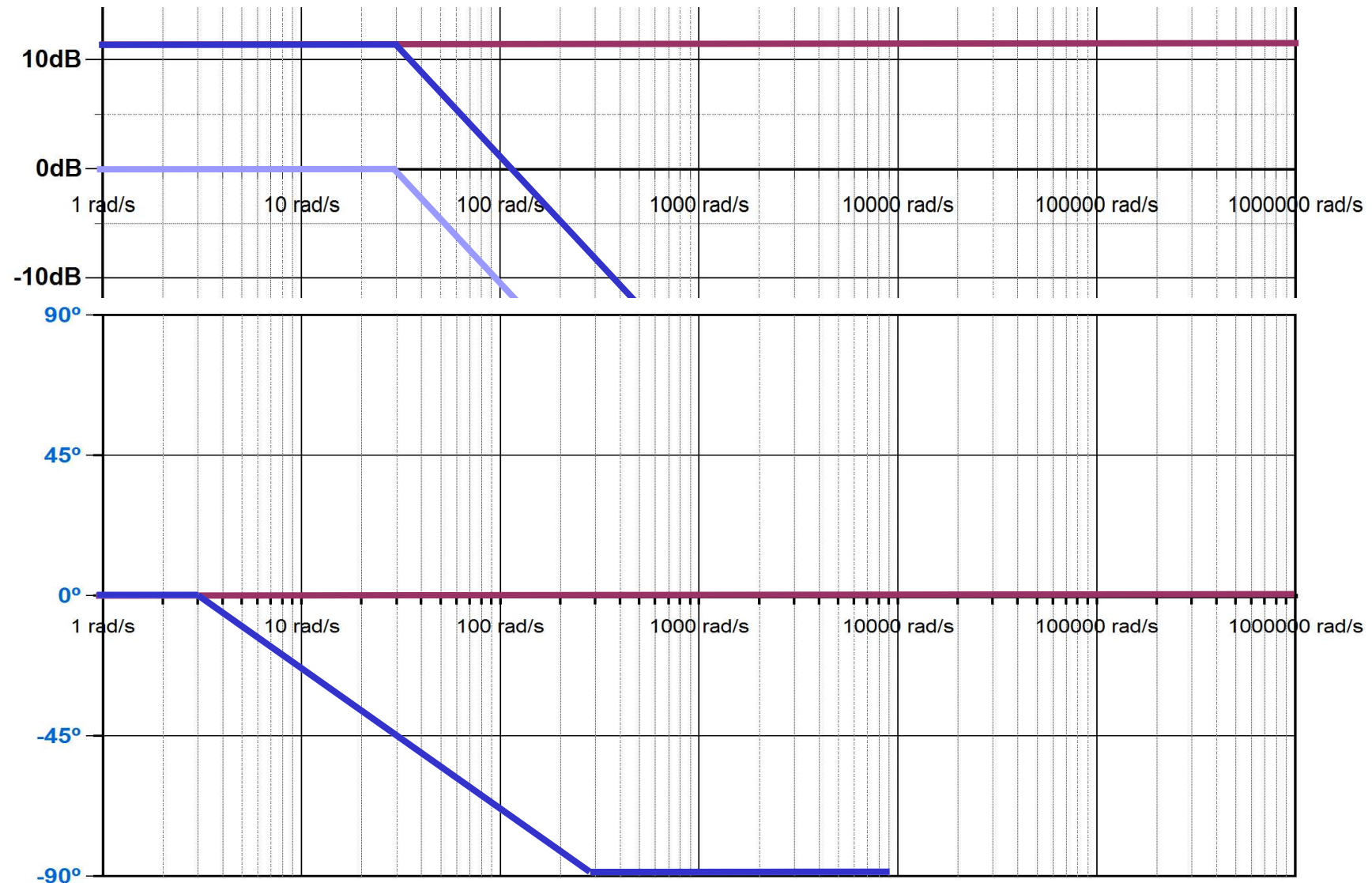


Exemplo 1: Trace o Diagrama de Bode para a função : $H(s) = \frac{100}{s + 30}$

E a fase?

(1) $K = 3,3$ e fase 0° ($= 10,4\text{dB}$)

(2) Polo em 30 rad/s e fase -45° no polo (0° em $1/10$ do polo e -90° em $10x$ o polo)



Exemplo 2: Trace o Diag. de Bode para a função: $H(s) = 100 \frac{(s+1)}{(s+10)(s+100)}$

1. Obtenha a função de transferência $H(s)$;
2. Reescreva a função fazendo tanto o menor termo do numerador como do denominador serem unitários;
3. Separe a função em seus termos básicos
4. Identifique a constante, os zeros e os pólos da função;
5. Desenhe as curvas de Bode para cada um dos termos;
6. Desenhe a curva de Bode global, começando da esquerda para a direita e somando a influência dos termos em cada ponto.

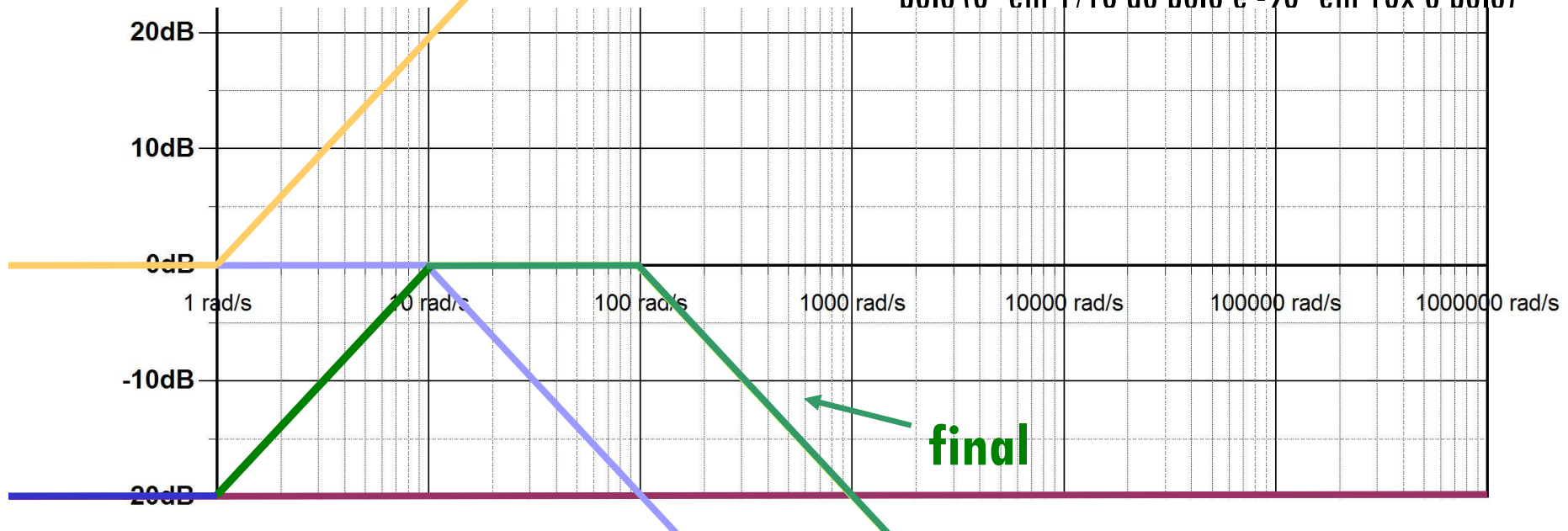
$$H(s) = \frac{100}{10 \cdot 100} \frac{\frac{s}{1} + 1}{\left(\frac{s}{10} + 1\right)\left(\frac{s}{100} + 1\right)} = 0.1 \frac{\frac{s}{1} + 1}{\left(\frac{s}{10} + 1\right)\left(\frac{s}{100} + 1\right)}$$

(1) $K = 0,1$ e fase $0^\circ (= -20\text{dB})$

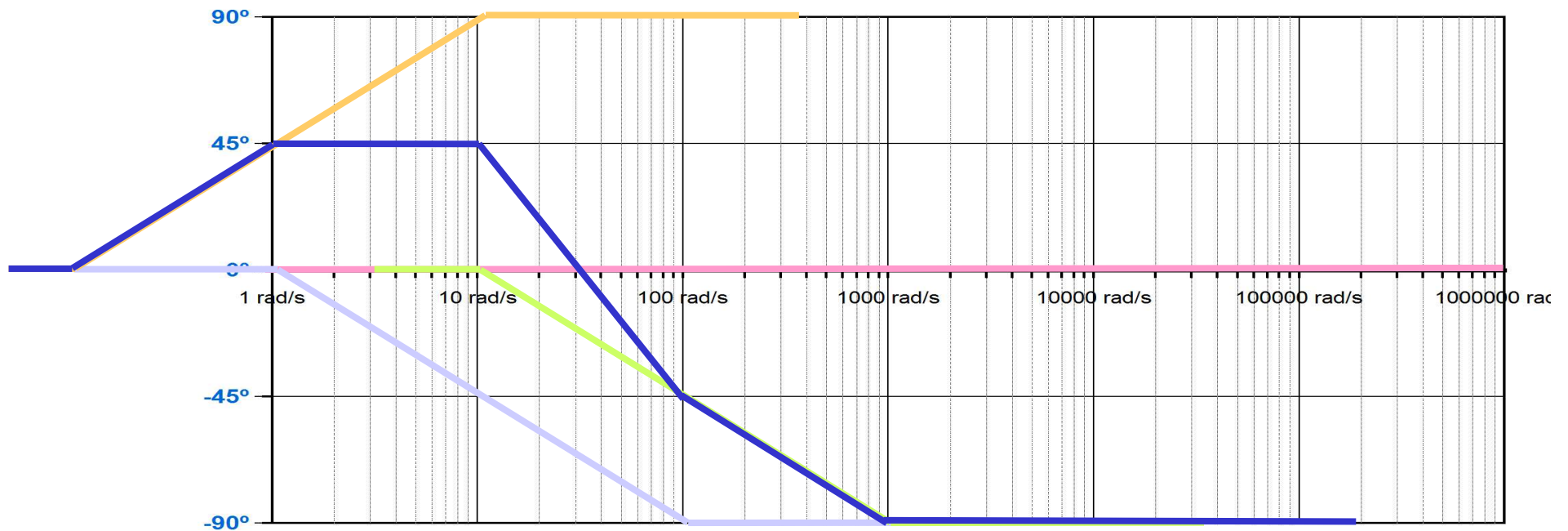
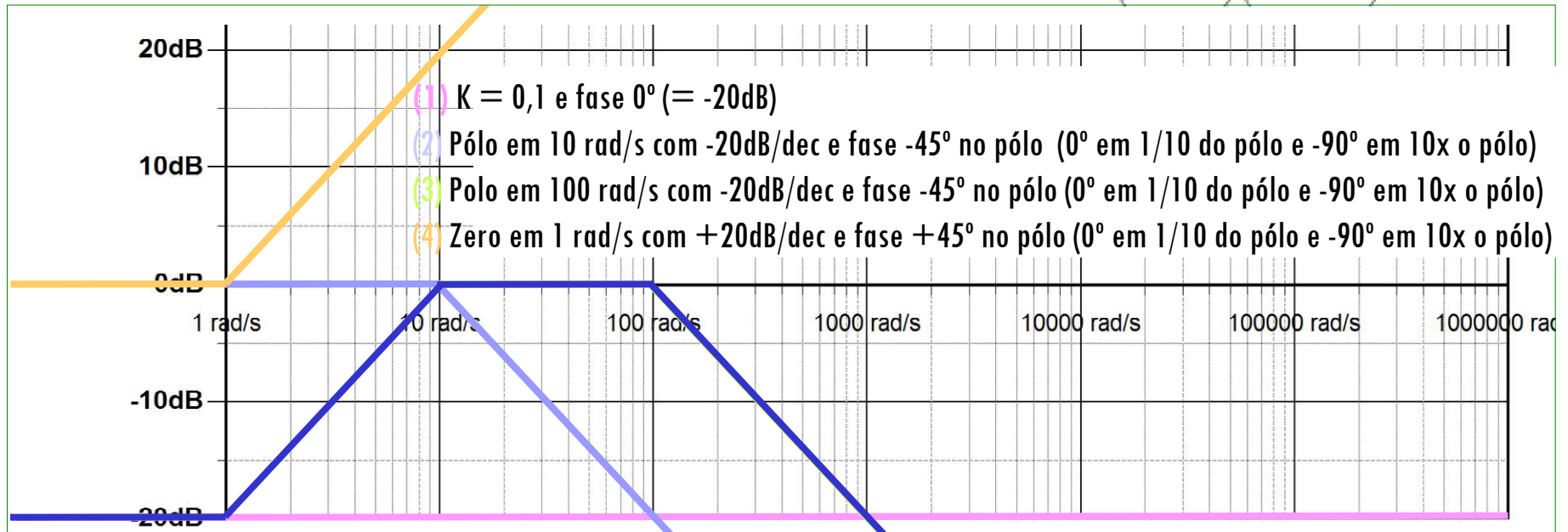
(2) Pólo em 10 rad/s com -20dB/dec e fase -45° no pólo (0° em $1/10$ do pólo e -90° em $10x$ o pólo)

(3) Pólo em 100 rad/s com -20dB/dec e fase -45° no pólo (0° em $1/10$ do pólo e -90° em $10x$ o pólo)

(4) Zero em 1 rad/s com $+20\text{dB/dec}$ e fase $+45^\circ$ no pólo (0° em $1/10$ do pólo e -90° em $10x$ o pólo)



Exemplo 2: Trace o Diag. de Bode para a função: $H(s) = 100 \frac{(s+1)}{(s+10)(s+100)}$



Análise da fase — curva de Bode

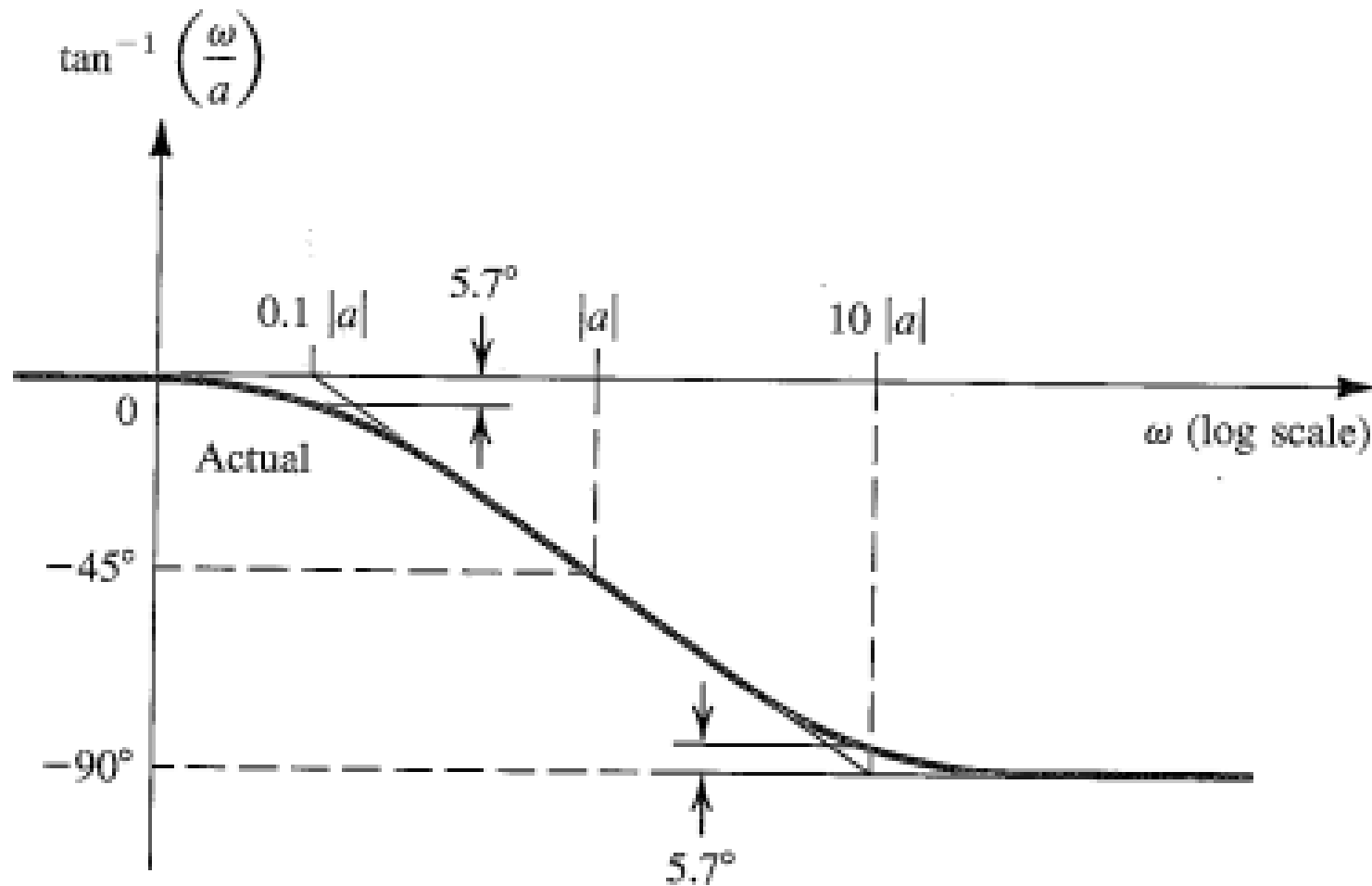


FIGURE E.3 Bode plot of the typical phase term $\tan^{-1}(\omega/a)$ when a is negative, para pólo.

Caso for zero: $(s + a)$, a fase crescerá com inclinação de $45^\circ/\text{dec}$.

Exemplo

$$T(s) = \frac{10s}{(1 + s/10^2)(1 + s/10^5)}$$

$$\phi_1 = 90$$

$$\phi_2 = -\tan^{-1} \frac{\omega}{10^2}$$

$$\phi_3 = -\tan^{-1} \frac{\omega}{10^5}$$

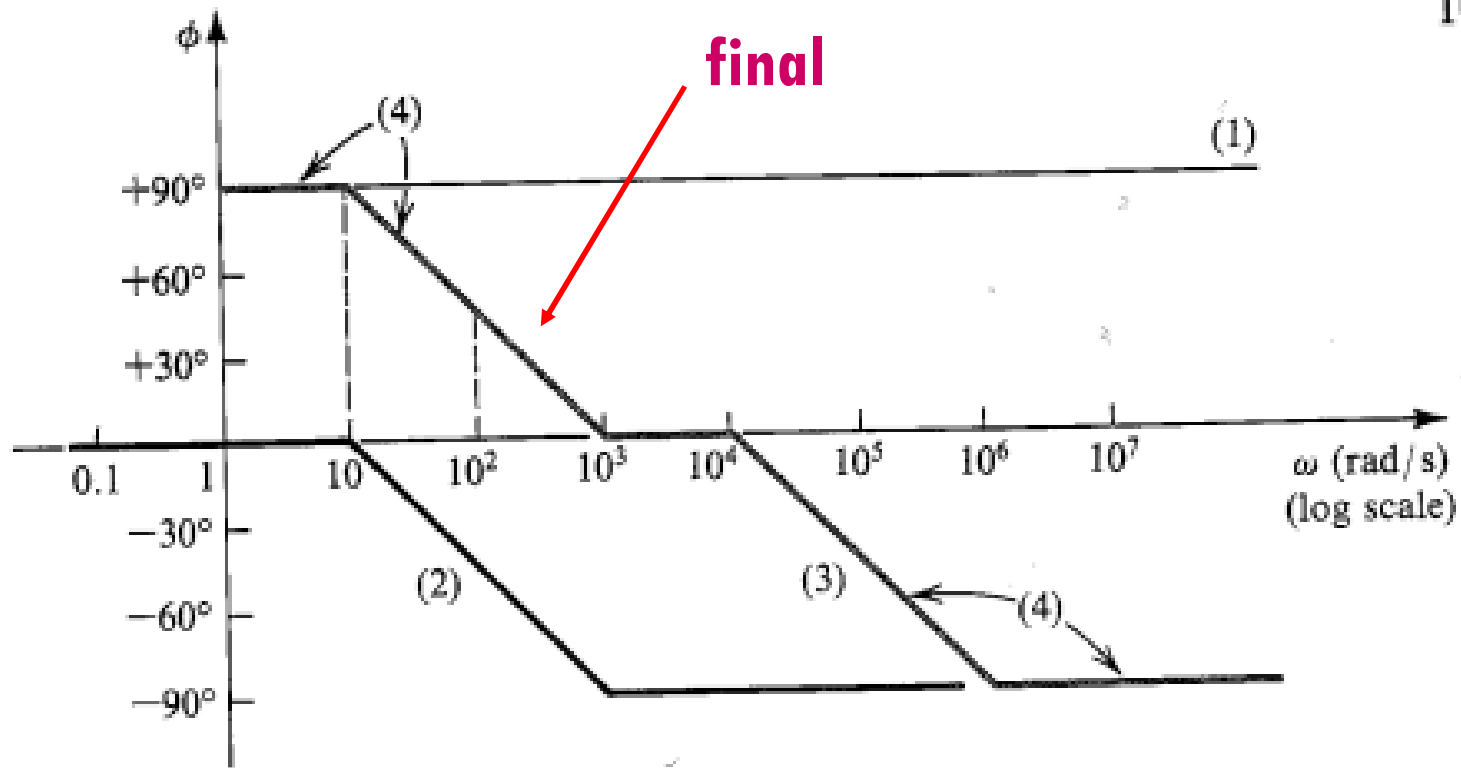


FIGURE E.4 Phase plots for Example E.2.

Fase de $w_{c_inf} = 100 \text{ rad/s} \rightarrow +45^\circ$

Fase de $w_{c_sup} = 100.000 \text{ rad/s} \rightarrow -45^\circ$



CAPITULO 5

Amplificadores com Transistores

Aula 7

PSI 2306 – Eletrônica

Programação para a Primeira Prova

Aula	Matéria	Capítulo/ página (inglês)
1 ^a	Revisão de transistor bipolar de junção - TBJ (funcionamento interno e expressões básicas) - Exemplo 5.4 O TBJ como amplificador para pequenos sinais (as condições c.c., a corrente de coletor e a transcondutância)	Sedra, Cap. 5, p. 235-240 (277-285); p. 263-264 (421-423); p. 275-276 (443-445).
2 ^a	A corrente de base e a resistência de entrada da base, a resistência de entrada do emissor. Ganho de tensão, Exemplo 5.38, modelos equivalentes (modelos π -híbrido e T)	Sedra, Cap. 5, p. 276-279 (445-450)
3 ^a	Aplicação dos modelos equivalentes para pequenos sinais, Efeito Early, Exemplo 5.14 O amplificador emissor comum (EC) - Exercício 5.43	Sedra, Cap. 5 p. 290-293 (467-470)
4 ^a	O amplificador em emissor comum com resistência de emissor. Exercício 5.44	Sedra, Cap. 5 p. 293-296 (470-474)
5 ^a	O amplificador em base comum. O Amplificador em coletor comum. Exercício 5.47	Sedra, Cap. 5 p. 296-301 (475-484)
6 ^a	Resposta em frequência dos circuitos RC Pólos e zeros, funções de primeira ordem, curvas de Bode (pólo simples, zero simples). Exemplo E.1, exemplo E.2	Sedra, Apend. D, p. 823-825 (D6-D9) Sedra, Apend. E, p.830-833 (E1-E6)
7 ^a	Teorema de Miller. Exemplo 6.7 Resposta em alta frequência do Emissor Comum Exemplo 5.18	Sedra, Cap. 6, p. 363-364 (578-580) Sedra, Cap. 5, p. 306-310 (491-497)
8 ^a	Resposta em baixa frequência do Emissor Comum Exemplo 5.19	Sedra, Cap. 5, p. 310-314 (497-503)
9 ^a	Resposta em alta e baixa frequência do Fonte Comum Exemplo 4.12	Sedra, Cap. 4, p. 202-208 (326-335)
10 ^a	Aula de Exercícios	
1^a. Semana de provas Data:		

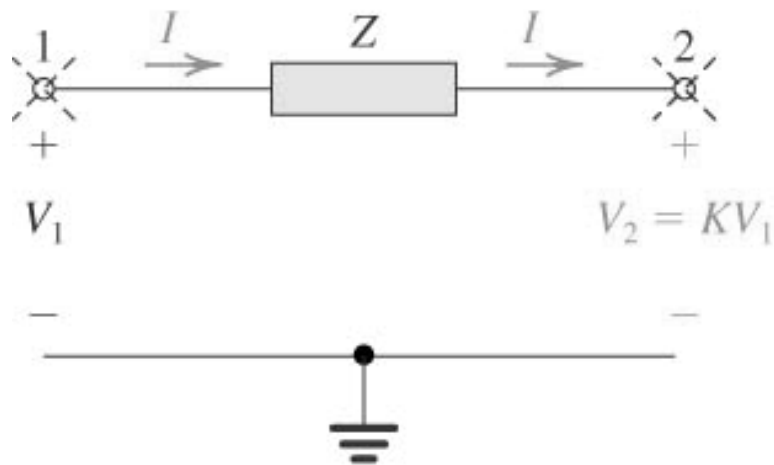
7ª Aula:

Parte 1: Teorema de Miller

Ao final da 7ª aula você deverá estar apto a:

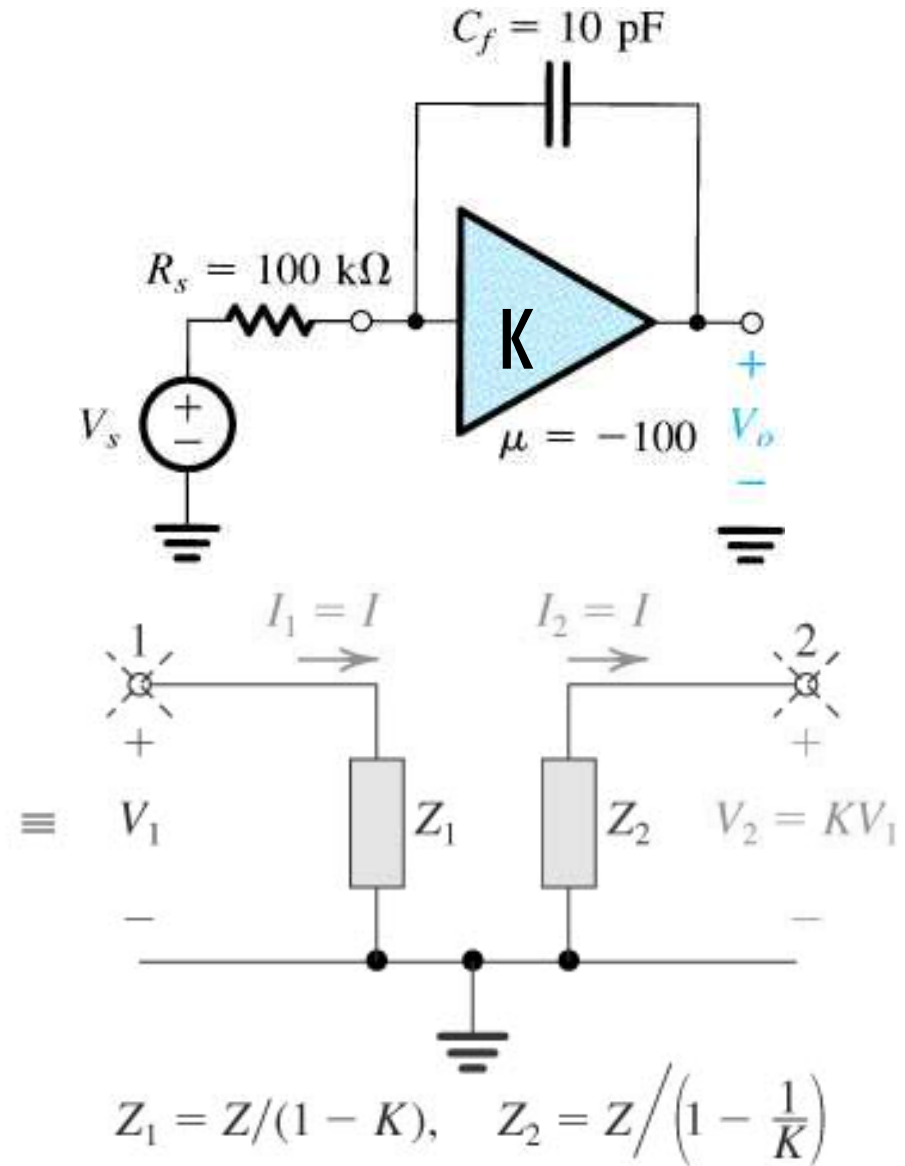
- **Estabelecer o circuito para pequenos sinais para análise em frequências**
- **Traçar curvas de Bode (resposta em frequência) para circuitos amplificadores BJT e FET**

Uma Ferramenta Adicional: o Teorema de Miller

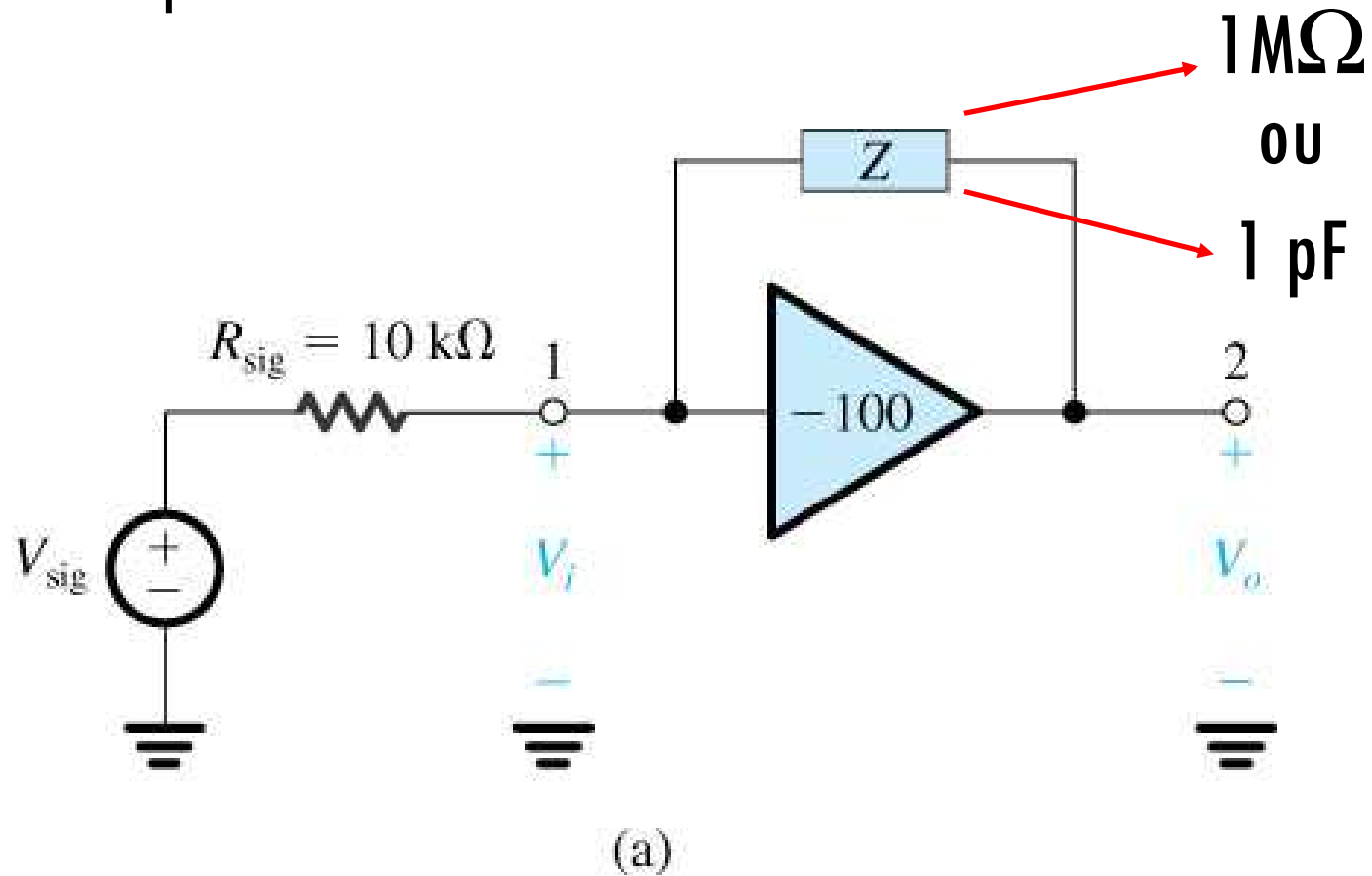


$$I_1 = \frac{V_1}{Z_1} = I = \frac{V_1 - KV_1}{Z}$$

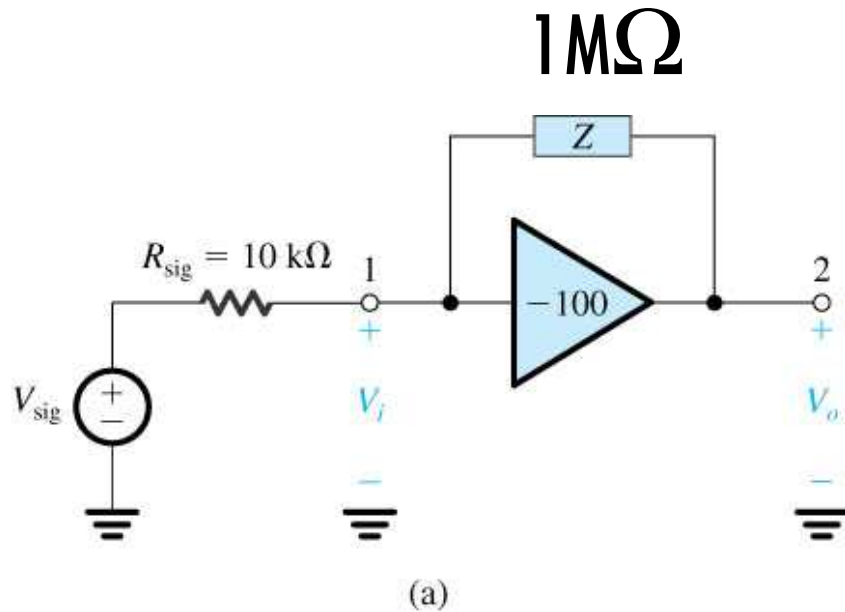
$$I_2 = \frac{0 - V_2}{Z_2} = \frac{0 - KV_1}{Z_2} = I = \frac{V_1 - KV_1}{Z}$$



Exemplo 6.7: Encontre o circuito equivalente de Miller para $Z=1\text{M}\Omega$ e para $Z = 1\text{ pF}$.



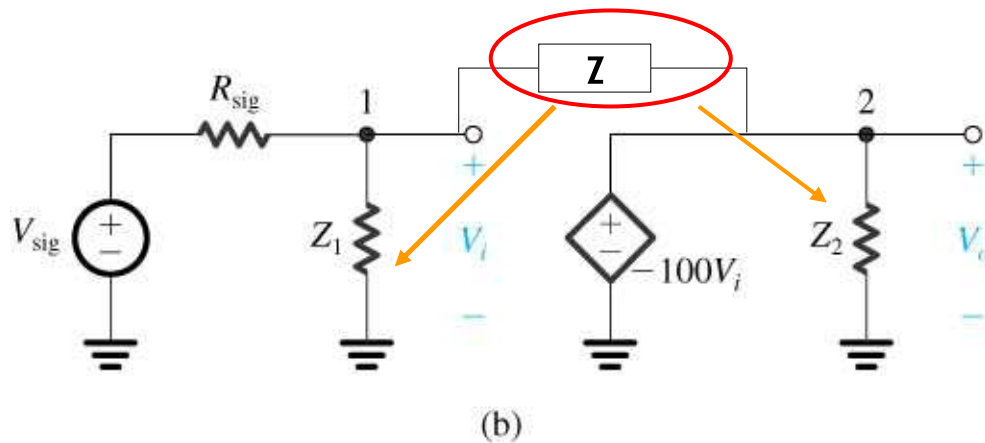
Exemplo 6.7: Encontre o circuito equivalente de Miller para $Z=1\text{M}\Omega$ e para $Z = 1\text{ pF}$.



$$Z_1 = \frac{Z}{1 - K} = \frac{1\text{M}\Omega}{1 + 100} = 9,9\text{k}\Omega$$

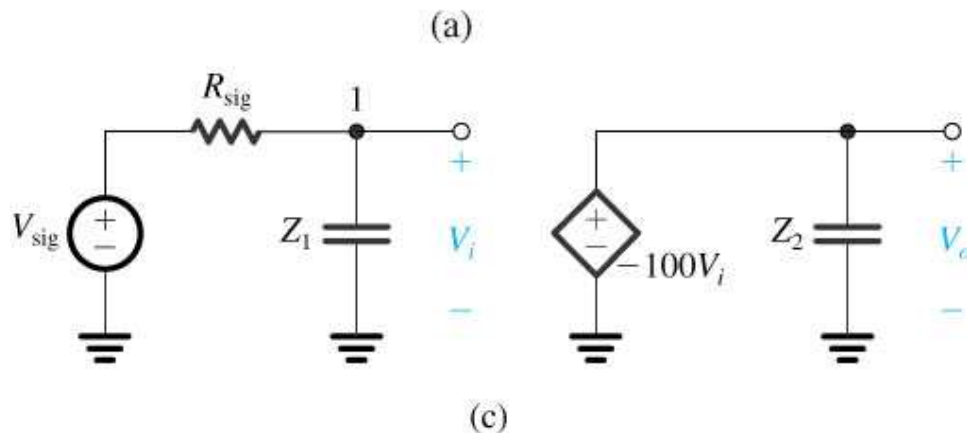
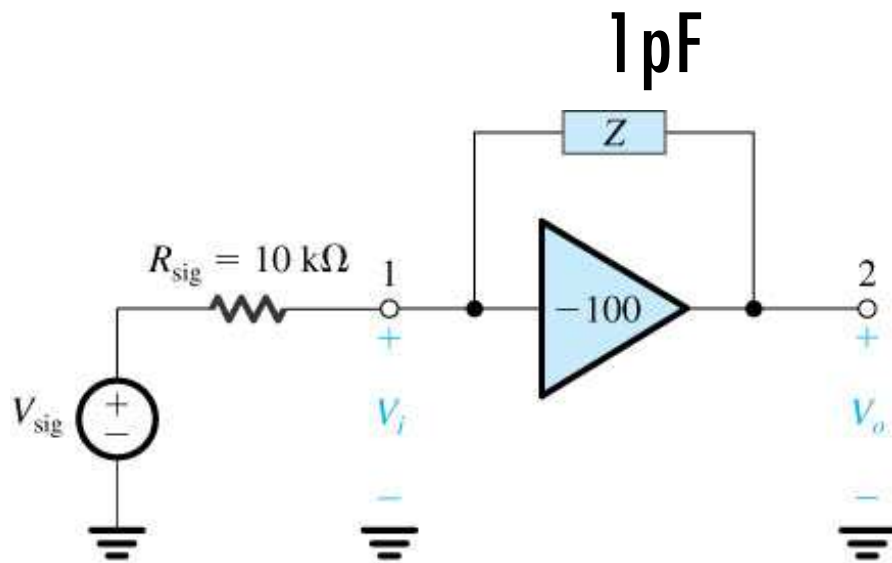
$$Z_2 = \frac{Z}{1 - 1/K} = \frac{1\text{M}\Omega}{1 + 1/100} = 0,99\text{M}\Omega$$

$$\frac{V_o}{V_{sig}} = \frac{V_o}{V_i} \frac{V_i}{V_{sig}} = -100 \frac{Z_1}{Z_1 + R_{sig}}$$



$$\frac{V_o}{V_{sig}} = -100 \frac{9,9}{9,9 + 10} = -49,7\text{ V/V}$$

Exemplo 6.7: Encontre o circuito equivalente de Miller para $Z=1\text{M}\Omega$ e para $Z = 1\text{ pF}$.



$$Z_1 = \frac{Z}{1 - K} = \frac{1 / sC}{1 + 100} = 1 / s(101C)$$

$$Z_2 = \frac{Z}{1 - 1/K} = \frac{1}{1,01} \frac{1}{sC} = \frac{1}{s(1,01C)}$$

$$\frac{V_o}{V_{sig}} = \frac{V_o}{V_i} \frac{V_i}{V_{sig}} = -100 \frac{1 / sC_1}{1 / sC_1 + R_{sig}}$$

$$\frac{V_o}{V_{sig}} = \frac{-100}{1 + sC_1 R_{sig}} = \frac{-100}{1 + s \times 1,01 \times 10^{-6}}$$

$$f_{3dB} = \frac{1}{2\pi \times 1,01 \times 10^{-6}} = 157,6\text{Hz}$$



CAPITULO 5

Amplificadores com Transistores MOS

Aula 9

PSI 2306 – Eletrônica

Programação para a Primeira Prova

Aula	Matéria	Capítulo/ página (inglês)
1 ^a	Revisão de transistor bipolar de junção - TBJ (funcionamento interno e expressões básicas) - Exemplo 5.4 O TBJ como amplificador para pequenos sinais (as condições c.c., a corrente de coletor e a transcondutância)	Sedra, Cap. 5, p. 235-240 (277-285); p. 263-264 (421-423); p. 275-276 (443-445).
2 ^a	A corrente de base e a resistência de entrada da base, a resistência de entrada do emissor. Ganho de tensão, Exemplo 5.38, modelos equivalentes (modelos π -híbrido e T)	Sedra, Cap. 5, p. 276-279 (445-450)
3 ^a	Aplicação dos modelos equivalentes para pequenos sinais, Efeito Early, Exemplo 5.14 O amplificador emissor comum (EC) - Exercício 5.43	Sedra, Cap. 5 p. 290-293 (467-470)
4 ^a	O amplificador em emissor comum com resistência de emissor. Exercício 5.44	Sedra, Cap. 5 p. 293-296 (470-474)
5 ^a	O amplificador em base comum. O Amplificador em coletor comum. Exercício 5.47	Sedra, Cap. 5 p. 296-301 (475-484)
6 ^a	Resposta em frequência dos circuitos RC Pólos e zeros, funções de primeira ordem, curvas de Bode (pólo simples, zero simples). Exemplo E.1, exemplo E.2	Sedra, Apend. D, p. 823-825 (D6-D9) Sedra, Apend. E, p.830-833 (E1-E6)
7 ^a	Teorema de Miller. Exemplo 6.7	Sedra, Cap. 6, p. 303-304 (578-580)
8 ^a	Resposta em alta frequência do Emissor Comum Exemplo 5.18	Sedra, Cap. 5, p. 306-310 (491-497)
9 ^a	Resposta em baixa frequência do Emissor Comum Exemplo 5.19	Sedra, Cap. 5, p. 310-314 (497-503)
10 ^a	Resposta em alta e baixa frequência do Fonte Comum Exemplo 4.12	Sedra, Cap. 4, p. 202-208 (326-335)
10 ^a	Aula de Exercícios	
1^a. Semana de provas		
Data:		

9ª Aula:

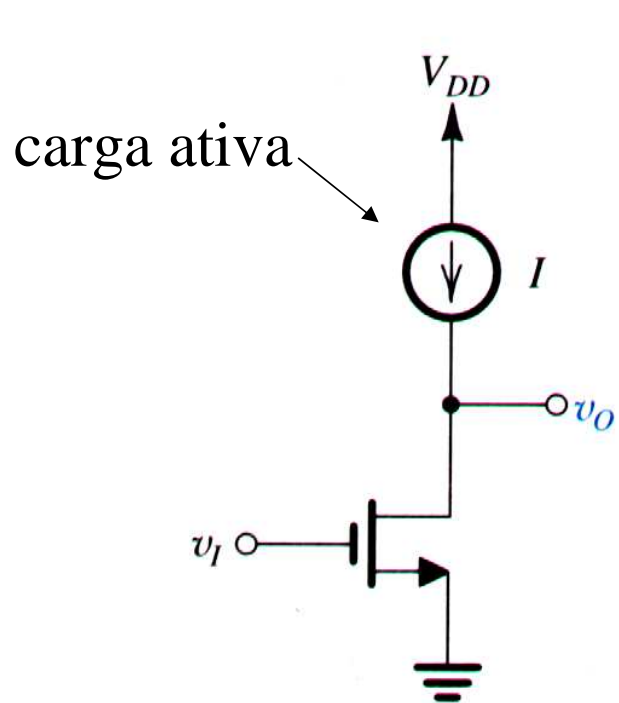
Estudo do Amplificador Fonte Comum

Ao final desta aula você deverá estar apto a:

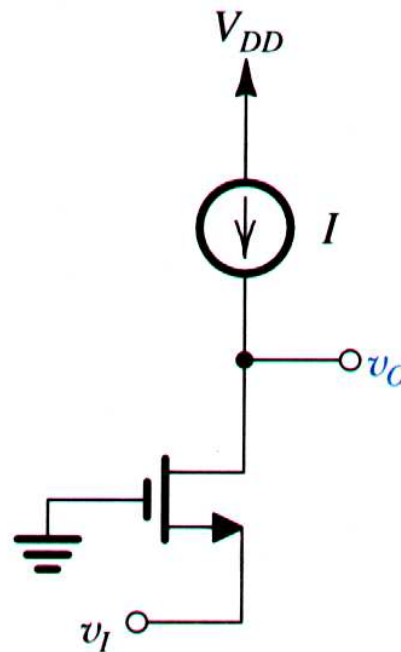
- **Analisar a resposta em frequência do Amplificador Fonte Comum**
- **Comparar o desempenho em frequência de Amplificadores com transistores Bipolares e FETs**
- **Decidir qual a melhor configuração de amplificação e qual tipo de transistor utilizar para uma determinada aplicação**

Configurações Básicas de Amplificadores MOS em CIs

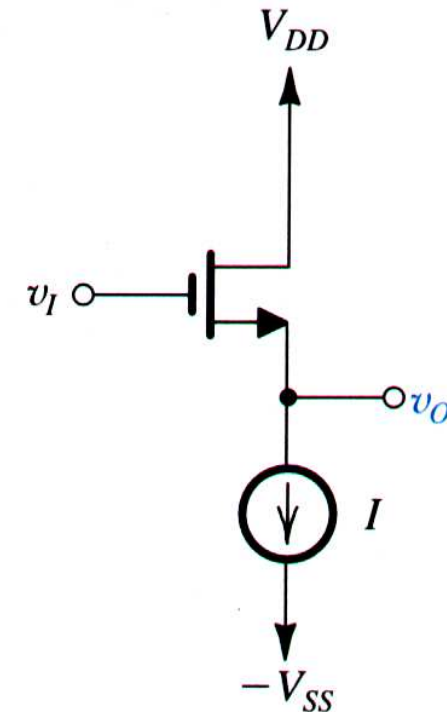
* Recapitulação *



Fonte Comum
(FC)



Porta Comum
(PC)

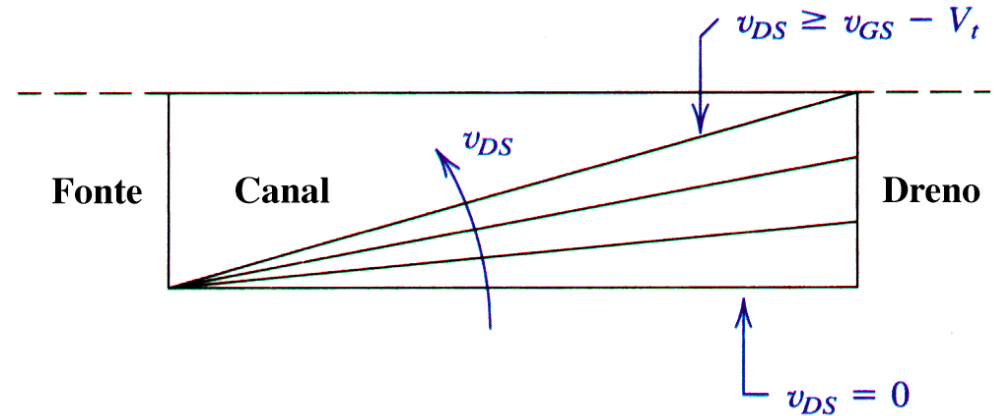
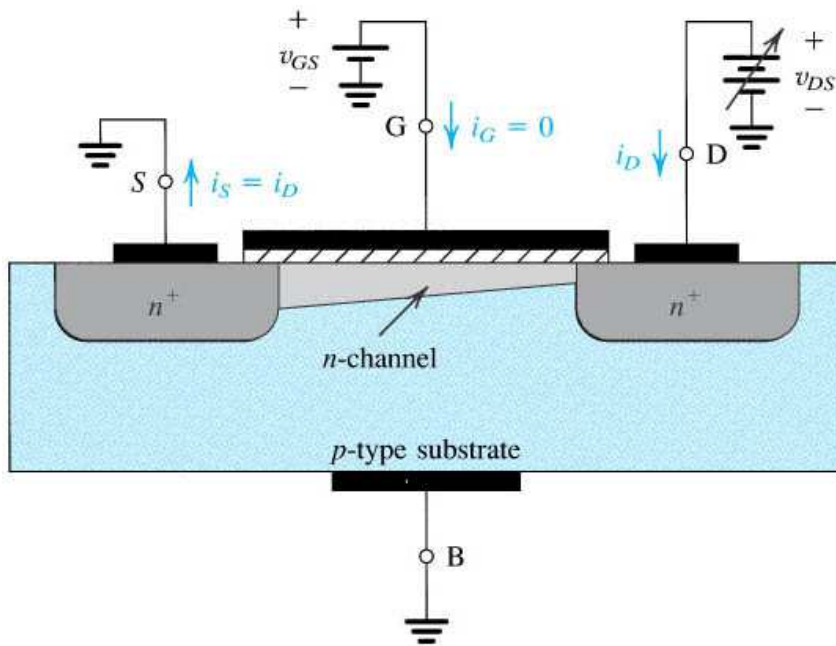


Dreno Comum
(DC ou seguidor
de fonte)

Como Amplificador o MOS opera na região de saturação

* Recapitulação *

$$V_{DS} > V_{GS} - V_t$$



I_D praticamente constante e igual a I_D quando $v_{DS} \geq v_{GS} - V_t$

NMOSFET

Equações de $I_D = f(V_{GS}, V_{DS})$ de 1ª Ordem

- Região Triodo: $0 < V_{DS} \leq V_{GS} - V_t$

Parabólica

$$I_D = k'_n \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_t) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

Linear (se $V_{DS} \ll V_{GS} - V_t$)

$$I_D \approx \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t) v_{DS}$$
$$r_{DS} = 1 / \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)$$

- Região de Saturação: $0 < V_{GS} - V_t \leq V_{DS}$

$$I_D = k'_n \frac{W}{L} \frac{(V_{GS} - V_t)^2}{2}$$

onde $k'_n = \frac{\mu_n \epsilon_{ox}}{X_{ox}} = \mu_n \cdot C_{ox}$

(Parâmetro de Transcondutância do processo [A/V²])

- Região de Corte: $V_{GS} \leq V_t$ ou $V_{GS} - V_t \leq 0$

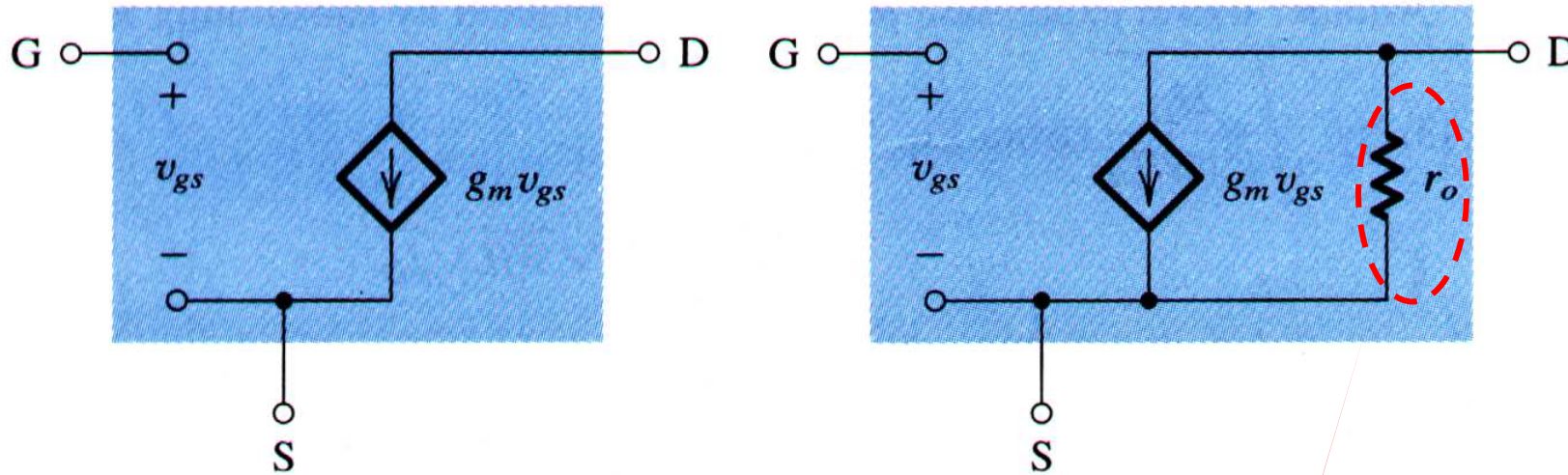
$$I_D = 0$$

Modelos Equivalentes de Circuitos (Região de Saturação)

Pequenos Sinais

Pequenos Sinais!

$$v_{GS} \ll 2(V_{GS} - V_t)$$



$$I_D = k'_n \frac{W}{L} \frac{(V_{GS}^{(a)} - V_t)^2}{2}$$

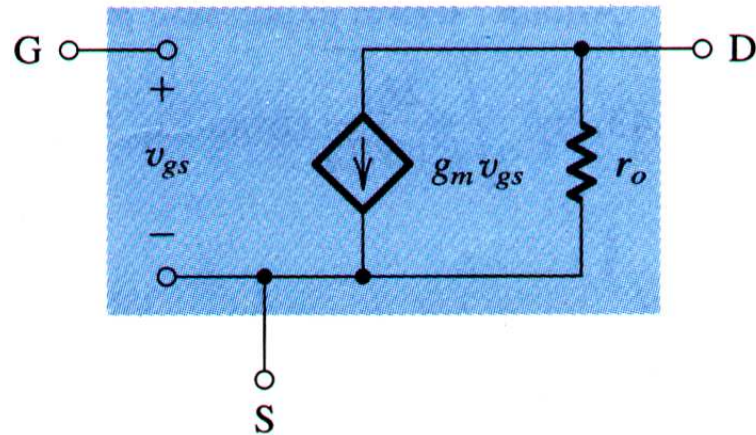
$$g_m = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} = k'_n \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_t)$$

(b)

$$r_o \cong \frac{V_A}{I_D}$$

Modelos Equivalentes de Circuitos (Região de Saturação)

Pequenos Sinais



Pequenos Sinais!

$$v_{GS} \ll 2(V_{GS} - V_t)$$

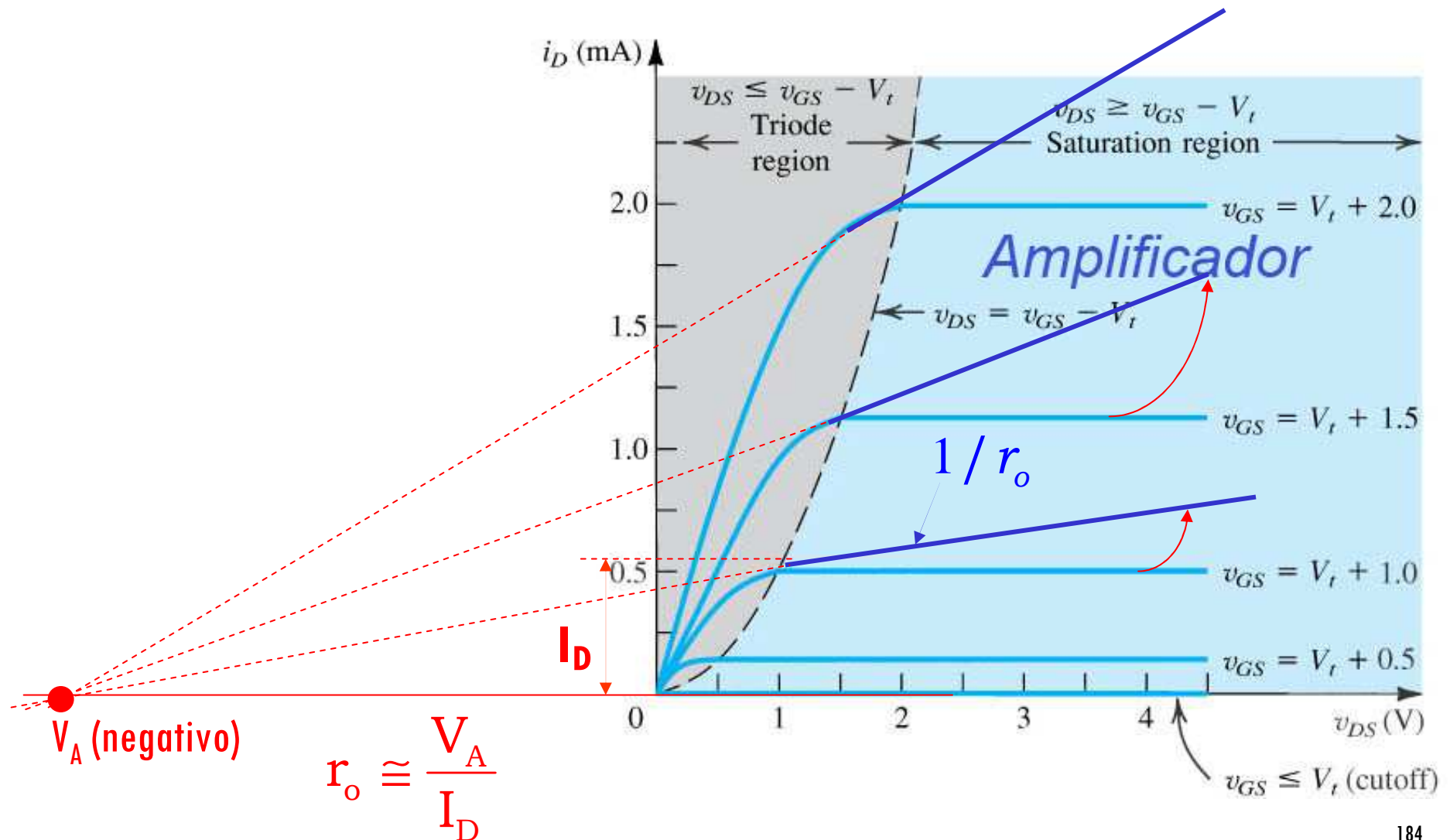
- $g_m = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} = k'_n \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_t)$
- $r_o \cong \frac{V_A}{I_D}$

Outras maneiras de expressar g_m

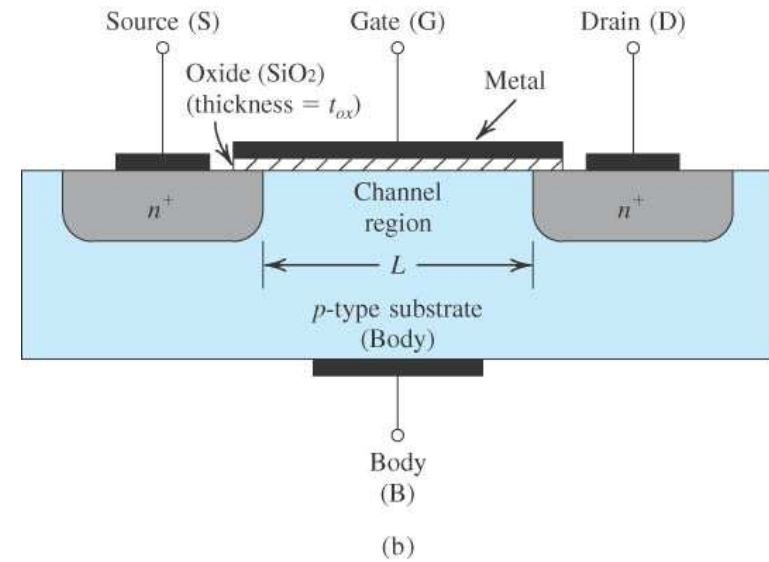
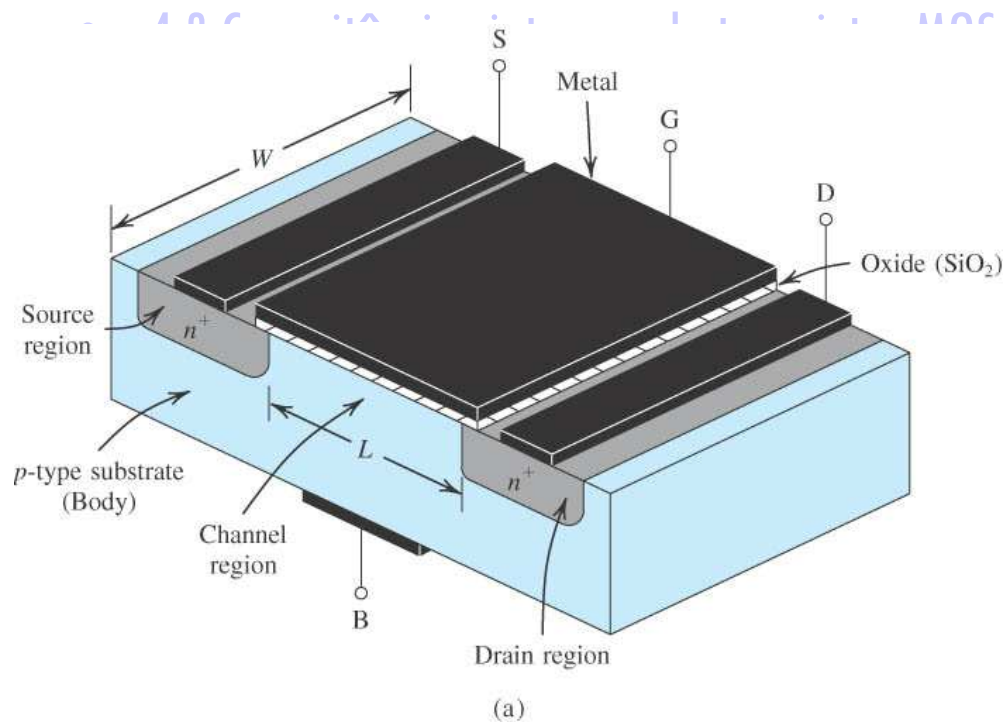
- $g_m = \sqrt{2k'_n} \cdot \sqrt{\frac{W}{L}} \cdot \sqrt{I_D}$
- $g_m = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_t}$

Modelos Equivalentes de Circuitos (Região de Saturação)

Pequenos Sinais



Estudo do amplificador com MOS: resposta em baixas e altas frequências



Há capacitância de porta e de junções que dependem do ponto de operação, e resistências da fonte e dreno (não consideradas nesta análise, SPICE levará em conta)

4.8.1 Modelo para altas frequências

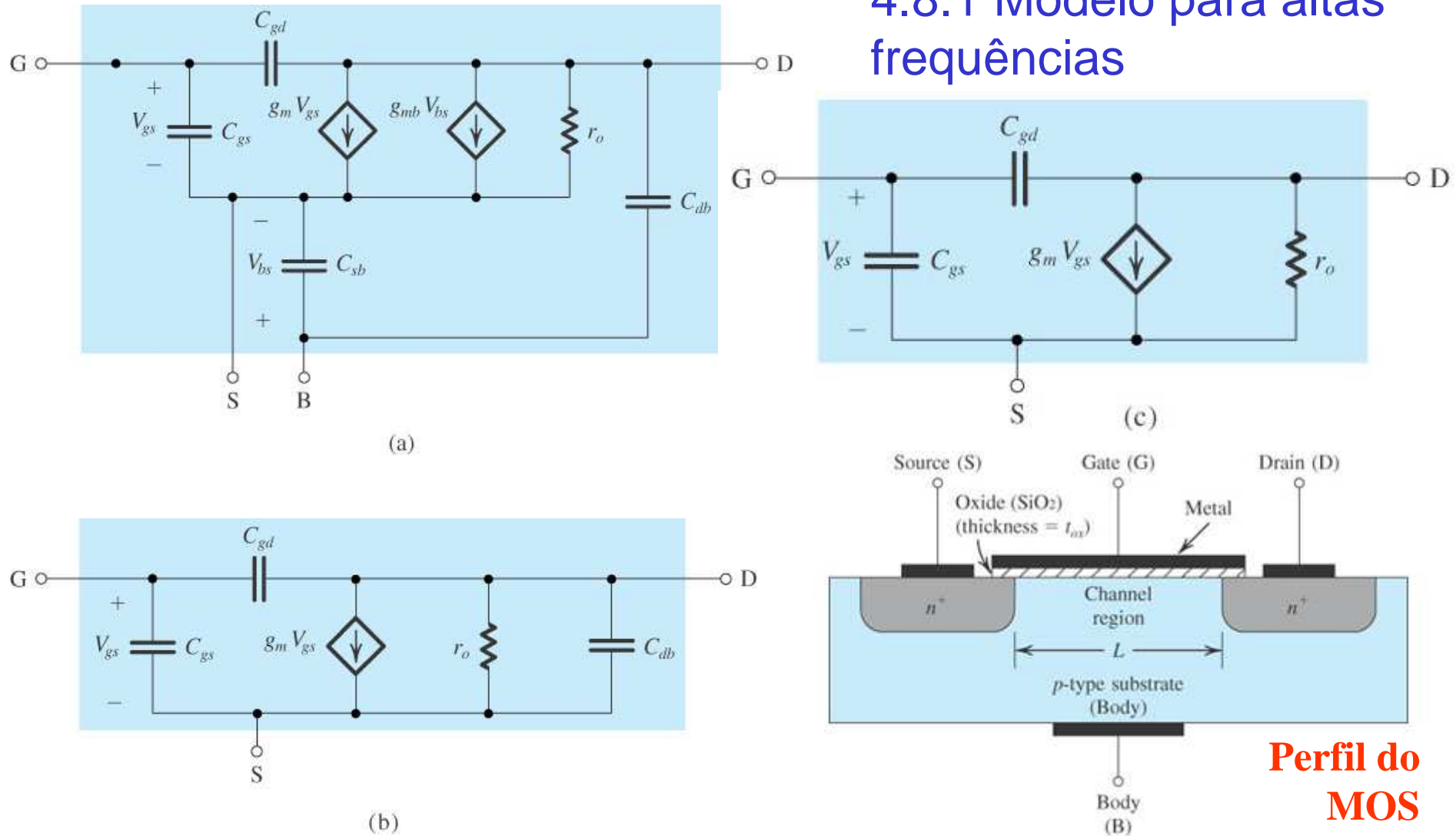


Figure 4.47 (a) Modelo de circuito equivalente para alta frequência do MOSFET. (b) O circuito equivalente para o caso em que a fonte está ligada ao substrato (corpo). (c) O modelo de circuito equivalente de (b) com C_{db} negligenciada (para simplificar a análise).

4.8.4 A FREQUÊNCIA DE GANHO UNITÁRIO DO MOSFET (f_T)

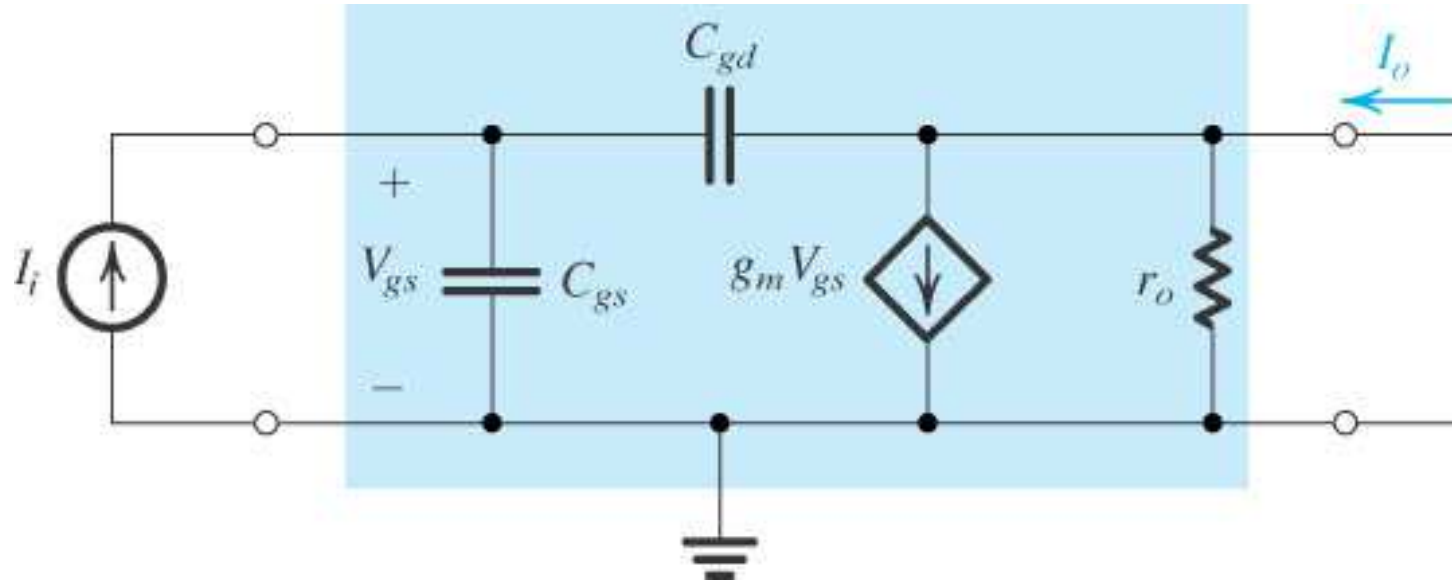


Figure 4.48 Diagrama para determinar o ganho de curto-circuito, I_o/I_i .

$$\frac{I_o}{I_i} = \frac{g_m}{s(C_{gs} + C_{gd})} \quad \omega_T = g_m / (C_{gs} + C_{gd}) \quad f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})}$$

ω_T frequência angular para módulo de ganho unitário.

4.8.5 SUMÁRIO DO MODELO DE PEQUENOS SINAIS DO TRANSISTOR MOS

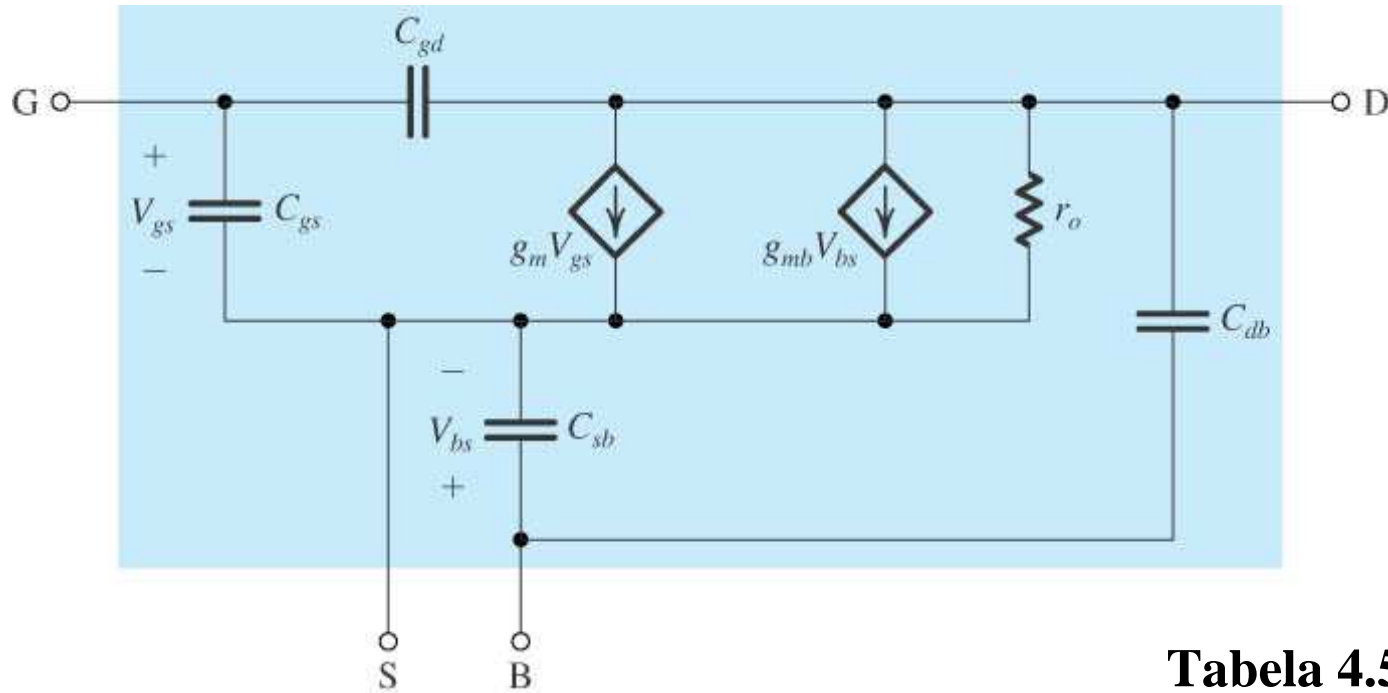


Tabela 4.5

$$g_m = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} V_{OV} = \sqrt{2\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} I_D} = \frac{2I_D}{V_{OV}}$$

$$g_{mb} = \chi g_m = \frac{\gamma}{2\sqrt{2\phi_f + V_{SB}}} g_m$$

$$r_o = V_A / I_D$$

$$C_{gs} = \frac{2}{3} W L C_{ox} + W L_{ov} C_{ox}$$

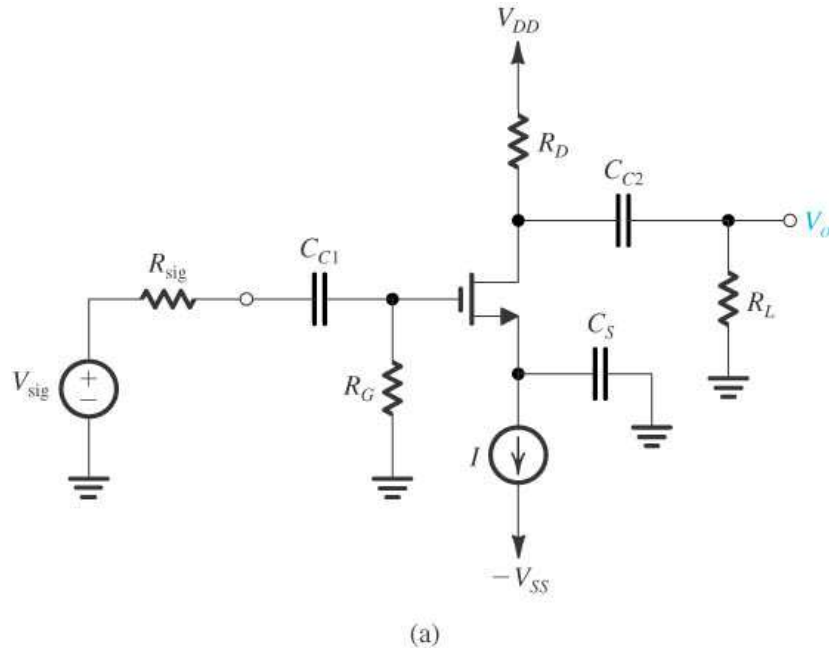
$$C_{gd} = W L_{ov} C_{ox}$$

$$C_{sb} = \frac{C_{sb0}}{\sqrt{1 + \frac{V_{SB}}{V_0}}}$$

$$C_{db} = \frac{C_{db0}}{\sqrt{1 + \frac{V_{DB}}{V_0}}}$$

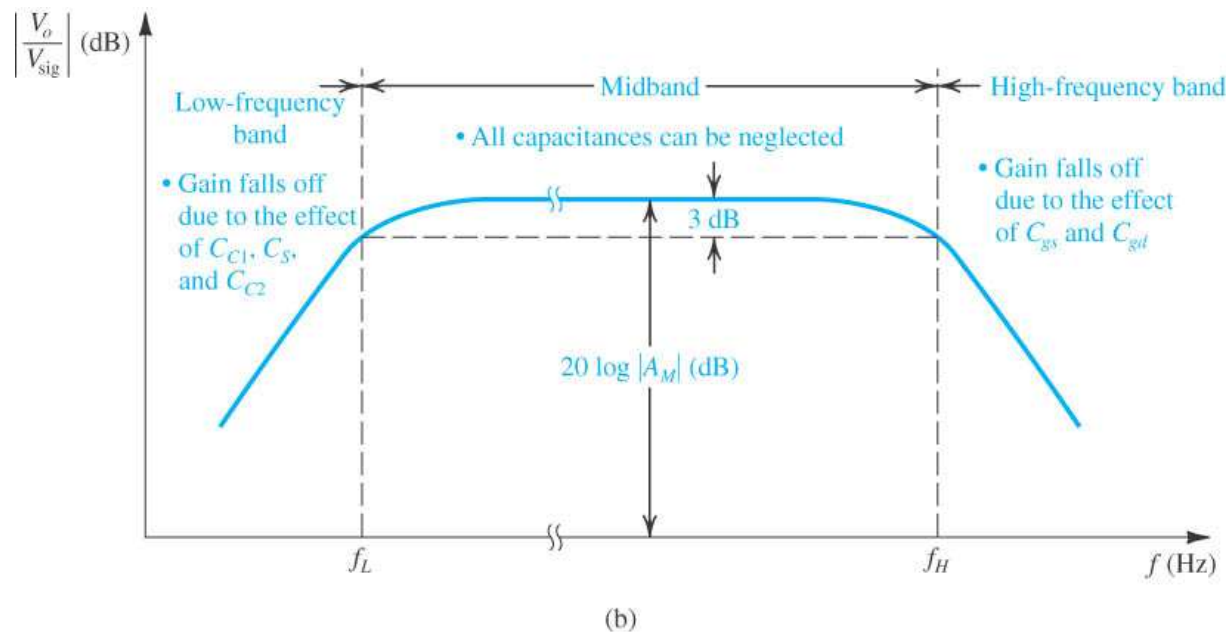
$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})}$$

4.9.



4.9 Resposta em frequência do Amplificador FC

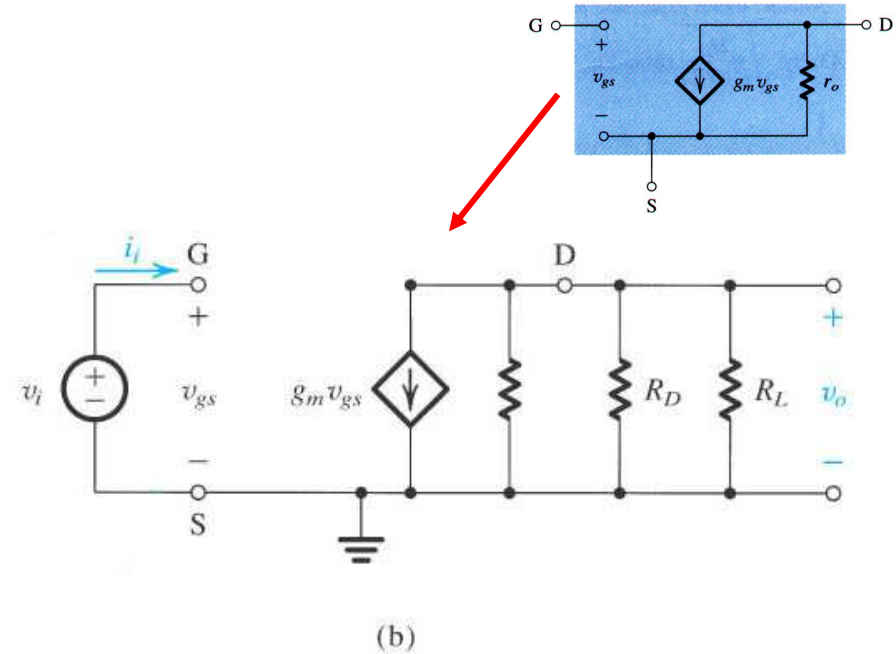
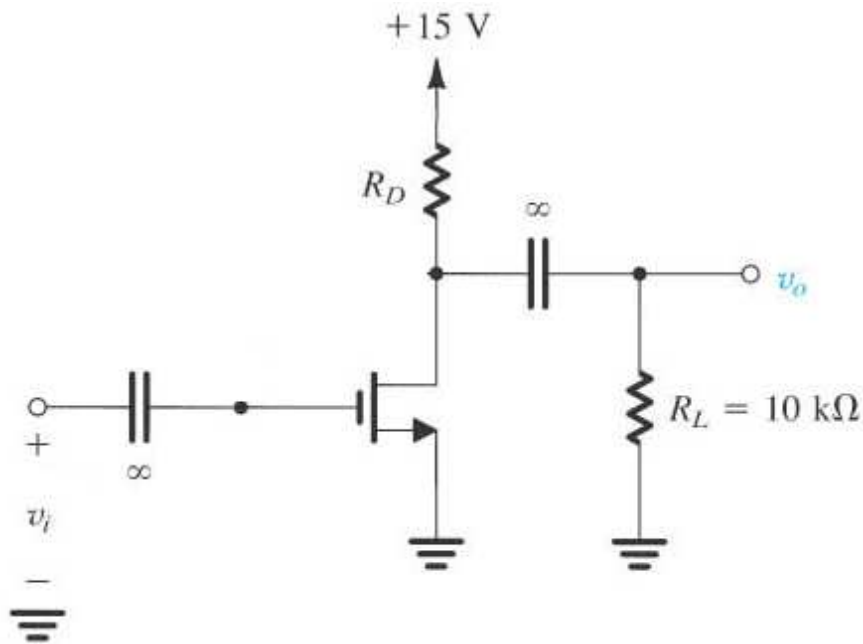
Figure 4.49 (a)
Amplificador Fonte-Comum Capacitivamente acoplado.



(b) Diagrama da resposta em frequência do amplificador delineado em (a) mostrando as três faixas de frequência de interesse.

Modelos Equivalentes de Circuitos (Região de Saturação)

Pequenos Sinais - frequências médias - recapitulação



Ganho de Tensão

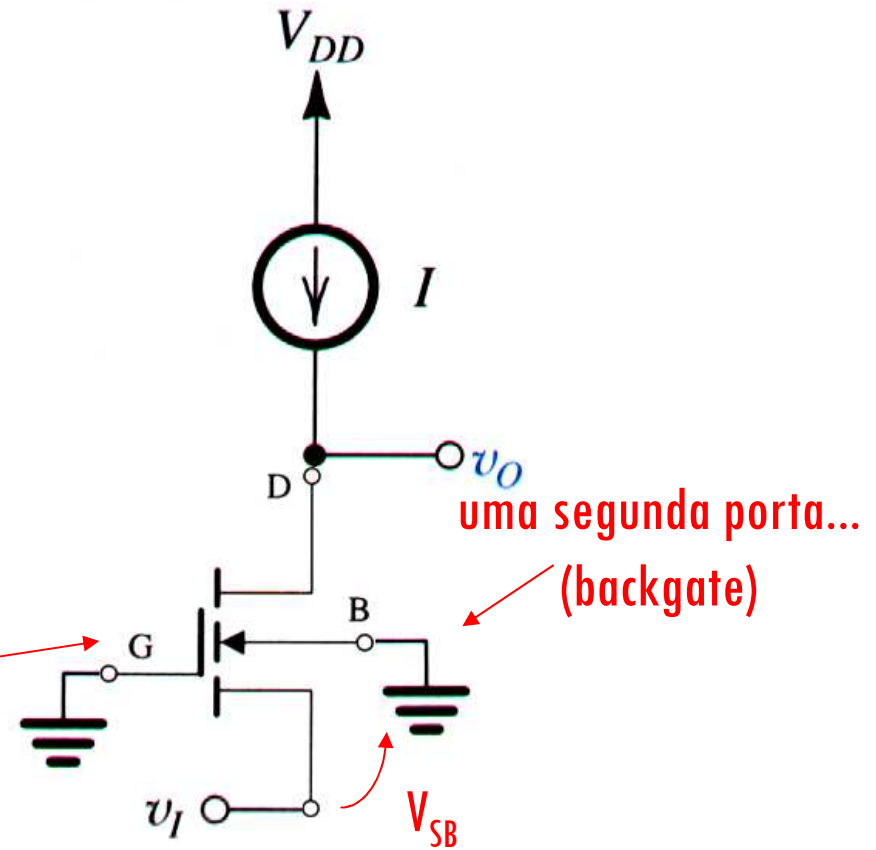
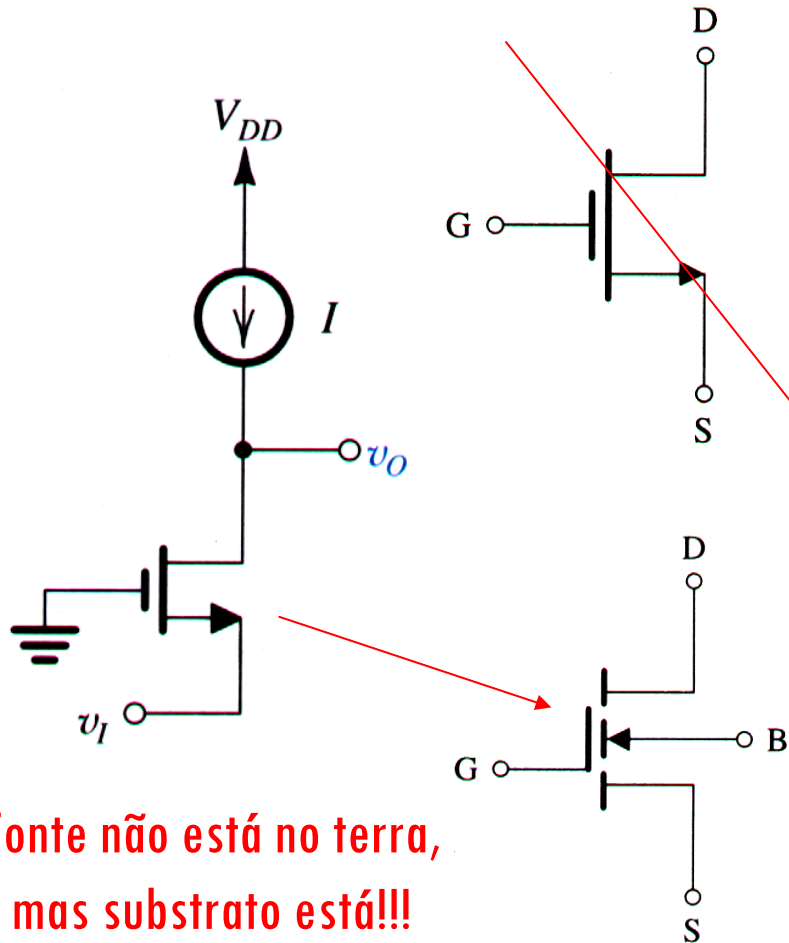
$$A_V = \frac{v_d}{v_{gs}} = -g_m (R_D // r_o // R_L)$$

$$g_m = k'_n \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_t)$$

$$r_o \cong \frac{V_A}{I_D}$$

Modelagem do Efeito de Corpo

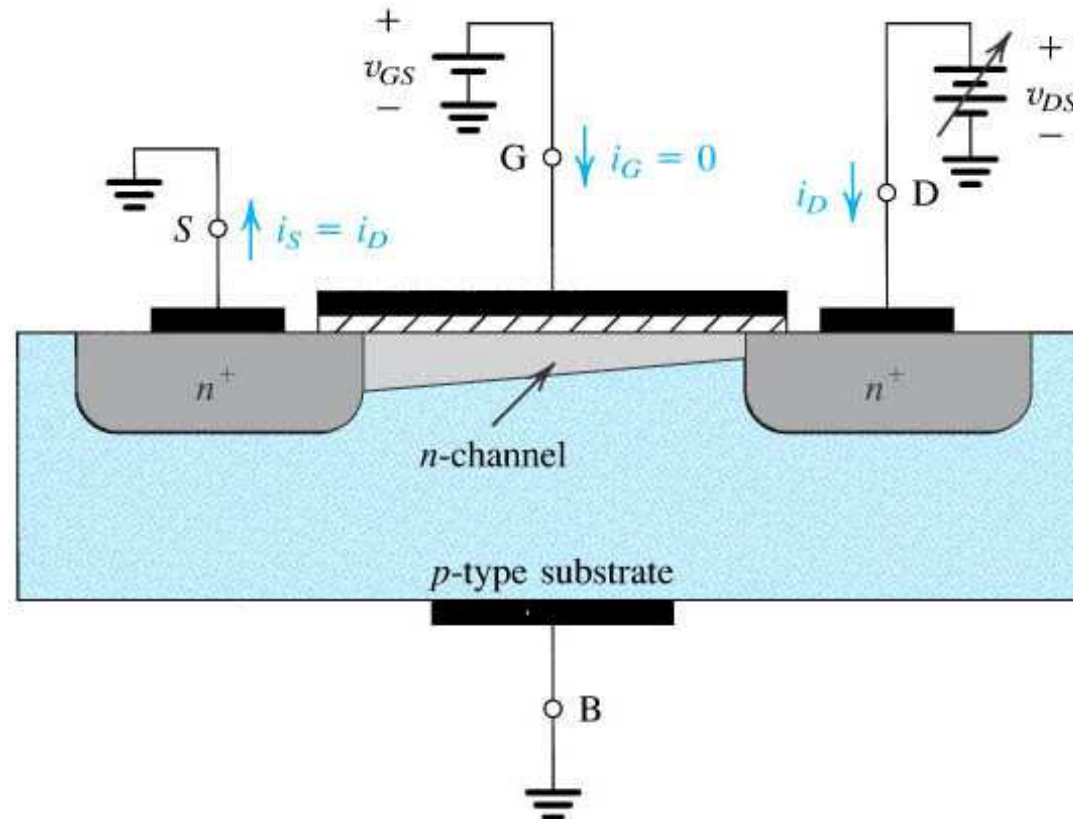
(Usando como explo. Amplif. Porta Comum)



$$I_D = k'_n \frac{W}{L} \frac{(V_{GS} - V_t)^2}{2} \quad ???$$

Efeito da Polarização do Substrato nas Equações da Região de Saturação

$$V_{DS} > V_{GS} - V_t$$



uma segunda porta...
(backgate)

Como modelar o Efeito de Corpo?

$$I_D = k'_n \frac{W}{L} \frac{(V_{GS} - V_t)^2}{2} \quad V_t = V_{t0} + \gamma [\sqrt{2 \cdot \phi_f + V_{SB}} - \sqrt{2 \cdot \phi_f}]$$

$$I_D = k'_n \frac{W}{L} \frac{(V_{GS} - \{V_{t0} + \gamma [\sqrt{2 \cdot \phi_f + V_{SB}} - \sqrt{2 \cdot \phi_f}]\})^2}{2}$$

Linearizando:

**Transcondutância
(V_{GS}):**

$$g_m = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} = k'_n \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_t)$$

**Transcondutância
de corpo (V_{SB}):**

$$g_{mb} = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{BS}} = k'_n \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_t) \cdot \left(\frac{\partial V_t}{\partial V_{BS}} \right) = g_m \cdot (\chi)$$

$$\frac{\partial V_t}{\partial V_{BS}} = \chi = \frac{\gamma}{2 \cdot \sqrt{2 \cdot \phi_f + V_{BS}}}, \quad \text{onde } \gamma = \frac{\sqrt{2qN_A \epsilon_s}}{C_{ox}} \quad \text{e } 0,1 \leq \chi \leq 0,3$$

Modelagem do Efeito de Corpo

Resumindo

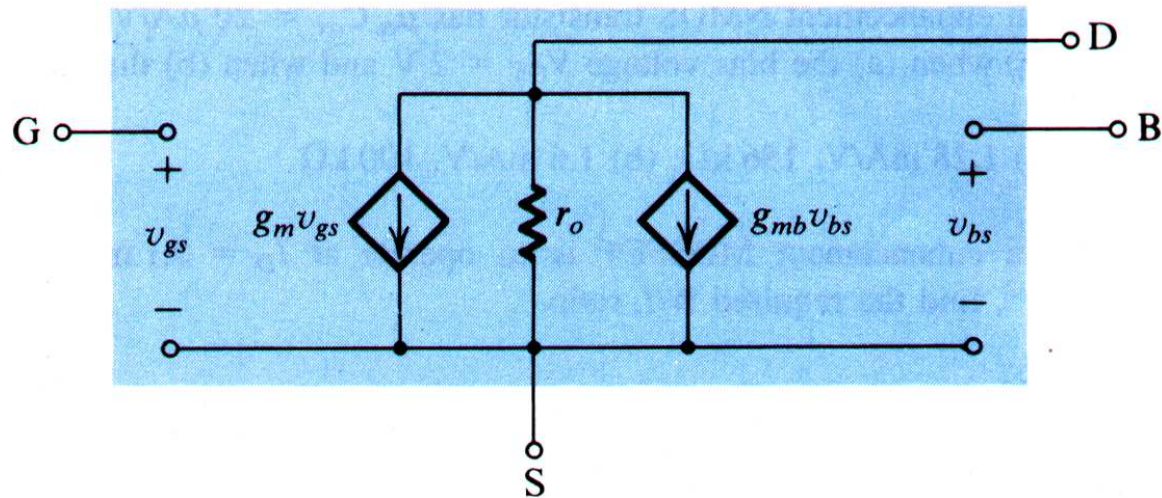
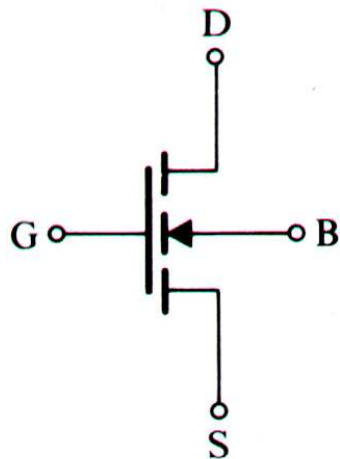
$$i_d = k'_n \frac{W}{L} \frac{(v_{GS} - v_t)^2}{2}$$

$$g_m = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} = k'_n \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_t) \rightarrow i_{ds1} = g_m v_{gs}$$

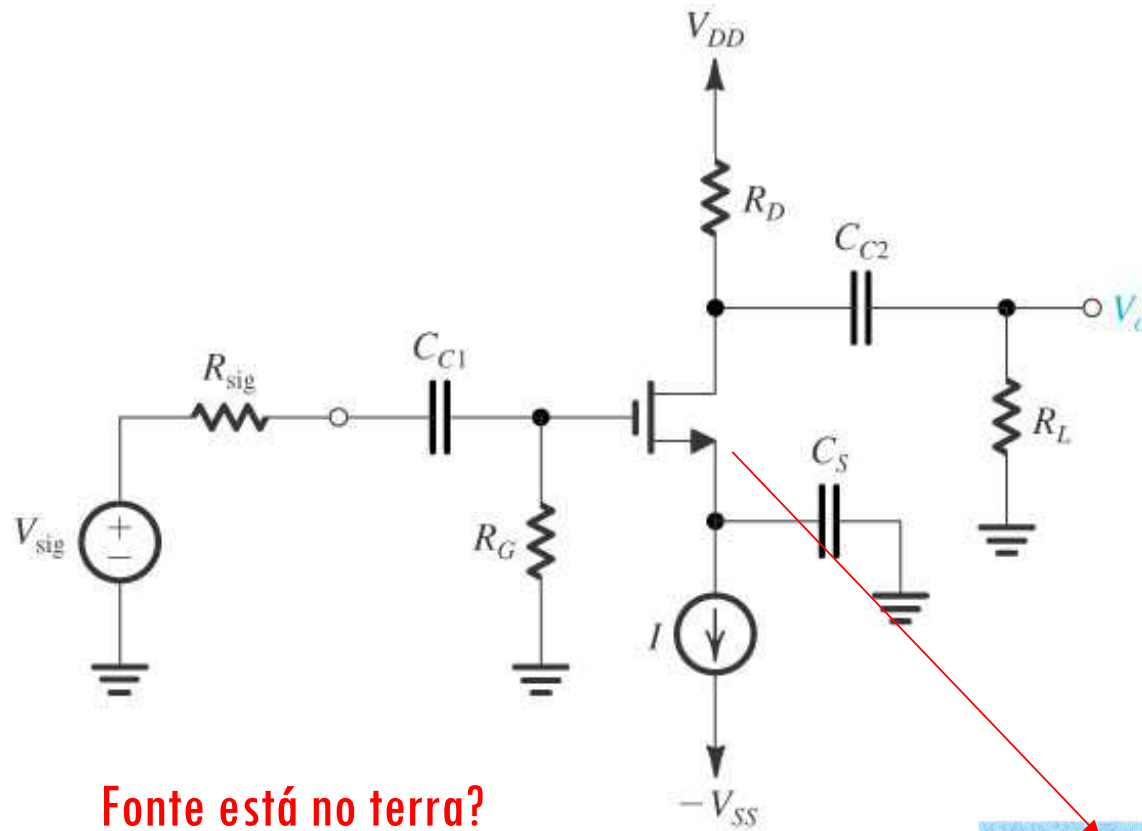
$$i_d = i_{d1}(v_{GS}) + i_{d2}(v_t)$$

$$g_{mb} = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{BS}} = g_m \cdot (\chi) \rightarrow i_{ds2} = g_{mb} v_{bs}$$

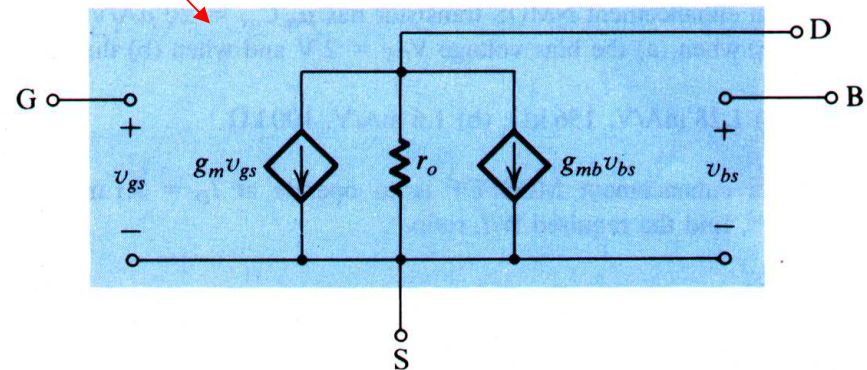
$$\chi = \frac{\gamma}{2\sqrt{2\phi_f + V_{BS}}}, \quad \gamma = \frac{\sqrt{2qN_A \epsilon_s}}{C_{ox}}$$



Amplificador Fonte Comum

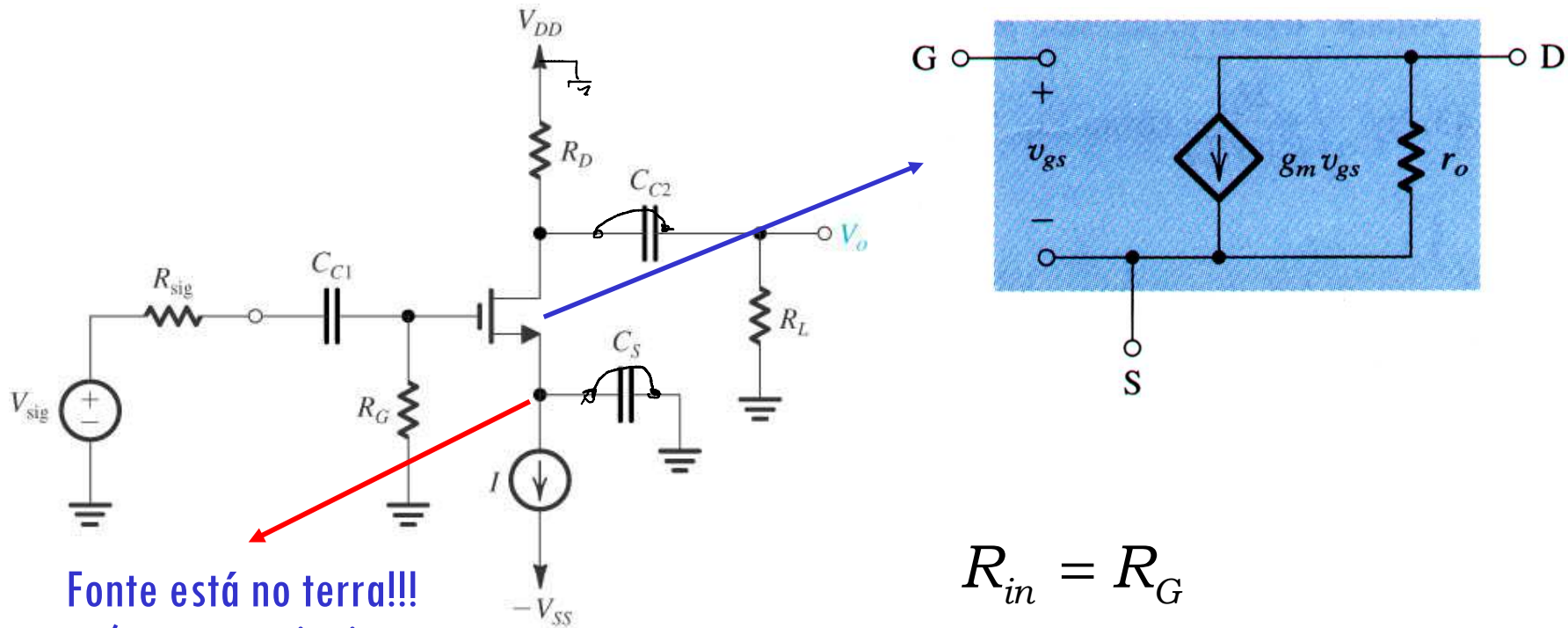


- Fonte está no terra?
- se freq. médias, sim
 - se baixas ou altas freq, não.



Amplificador Fonte Comum

Análise em Freq. Médias



Fonte está no terra!!!
(para peq sinais
em freq. médias)

$$R_{in} = R_G$$

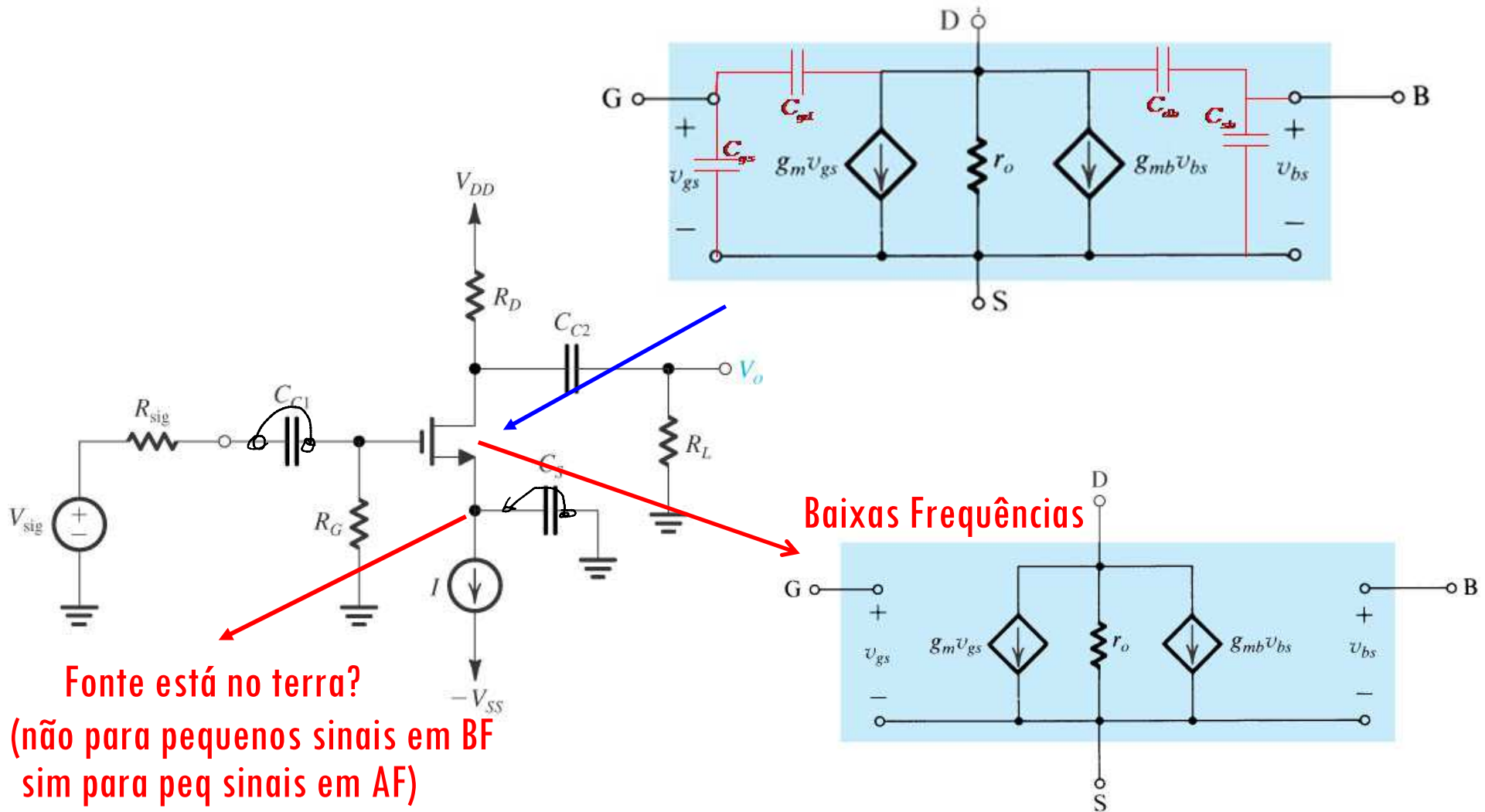
$$R_{out} = R_D \parallel r_o$$

$$A_v = -g_m (R_D \parallel r_o \parallel R_L)$$

Amplificador Fonte Comum

Análise em Baixas e Altas Frequências?

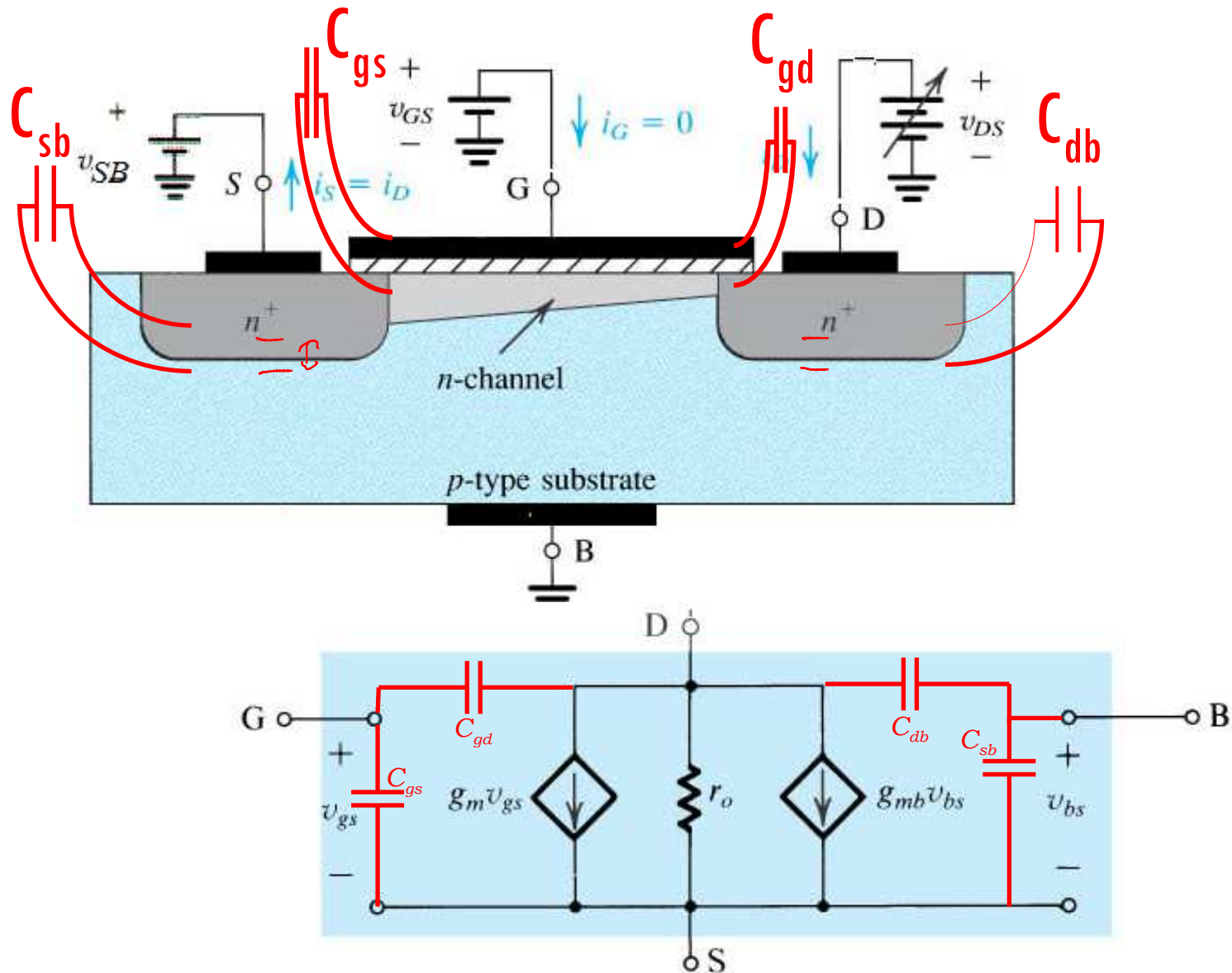
Altas Frequências



Mas e as capacitâncias internas?

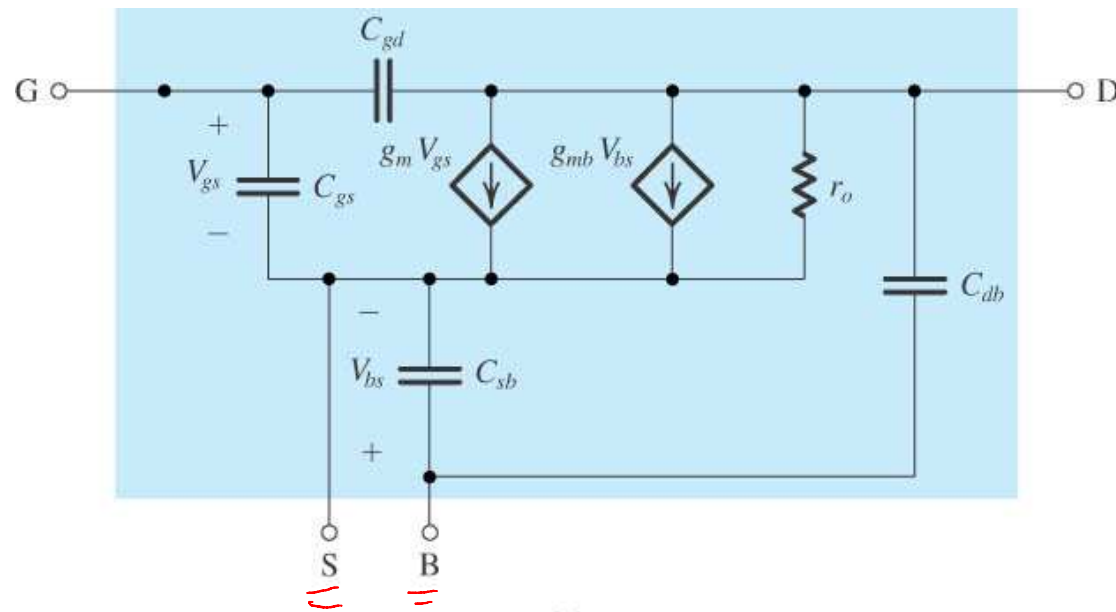
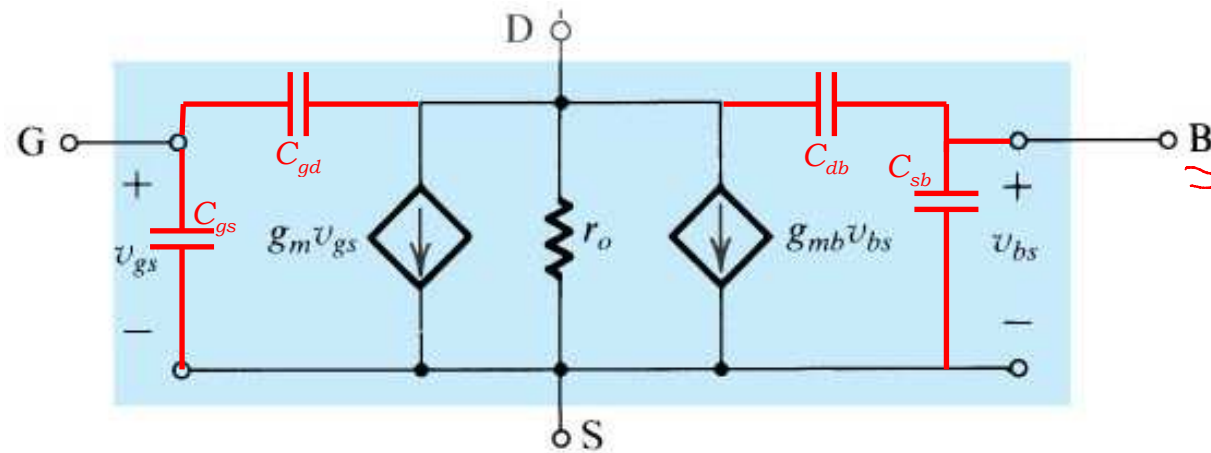
Amplificador Fonte Comum

Análise em Baixas e Altas Frequências: Capacitâncias Internas



Amplificador Fonte Comum

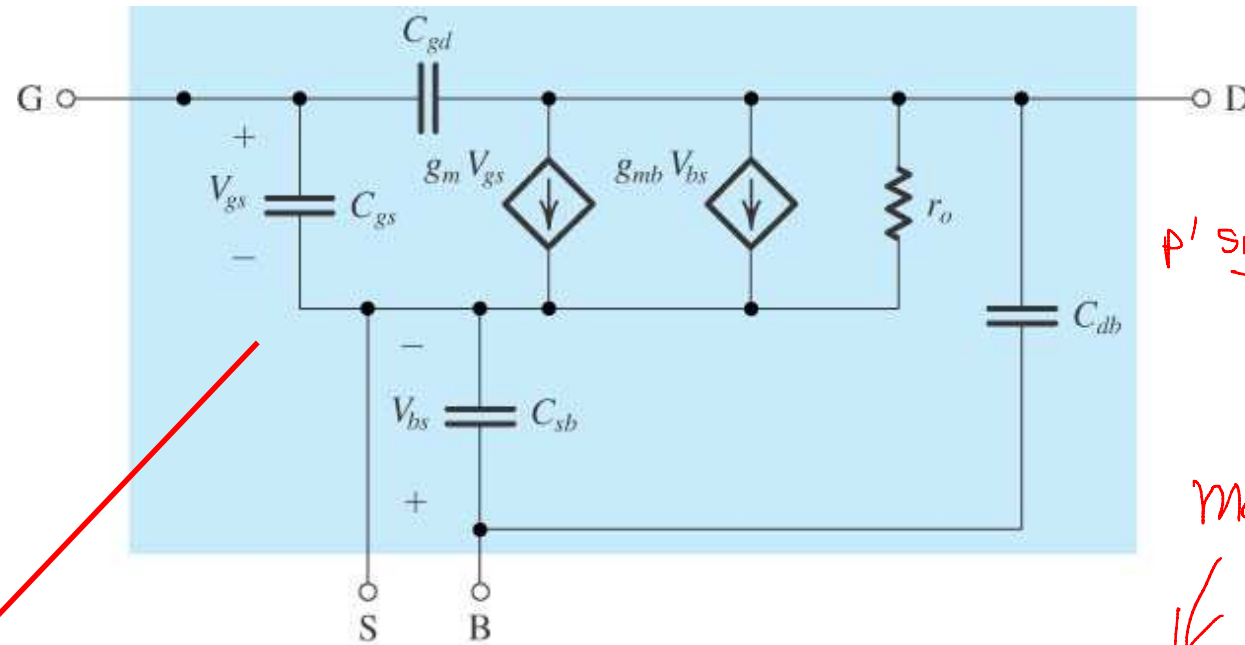
Análise em Baixas e Altas Frequências: Capacitâncias Internas



(a)

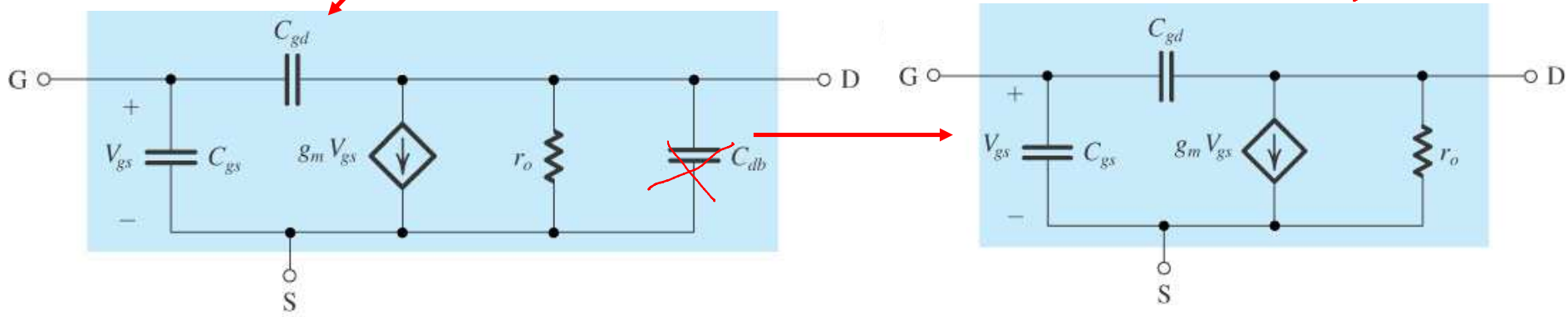
Amplificador Fonte Comum

Análise em Baixas e Altas Frequências: Capacitâncias Internas



p/ simulação

Manual

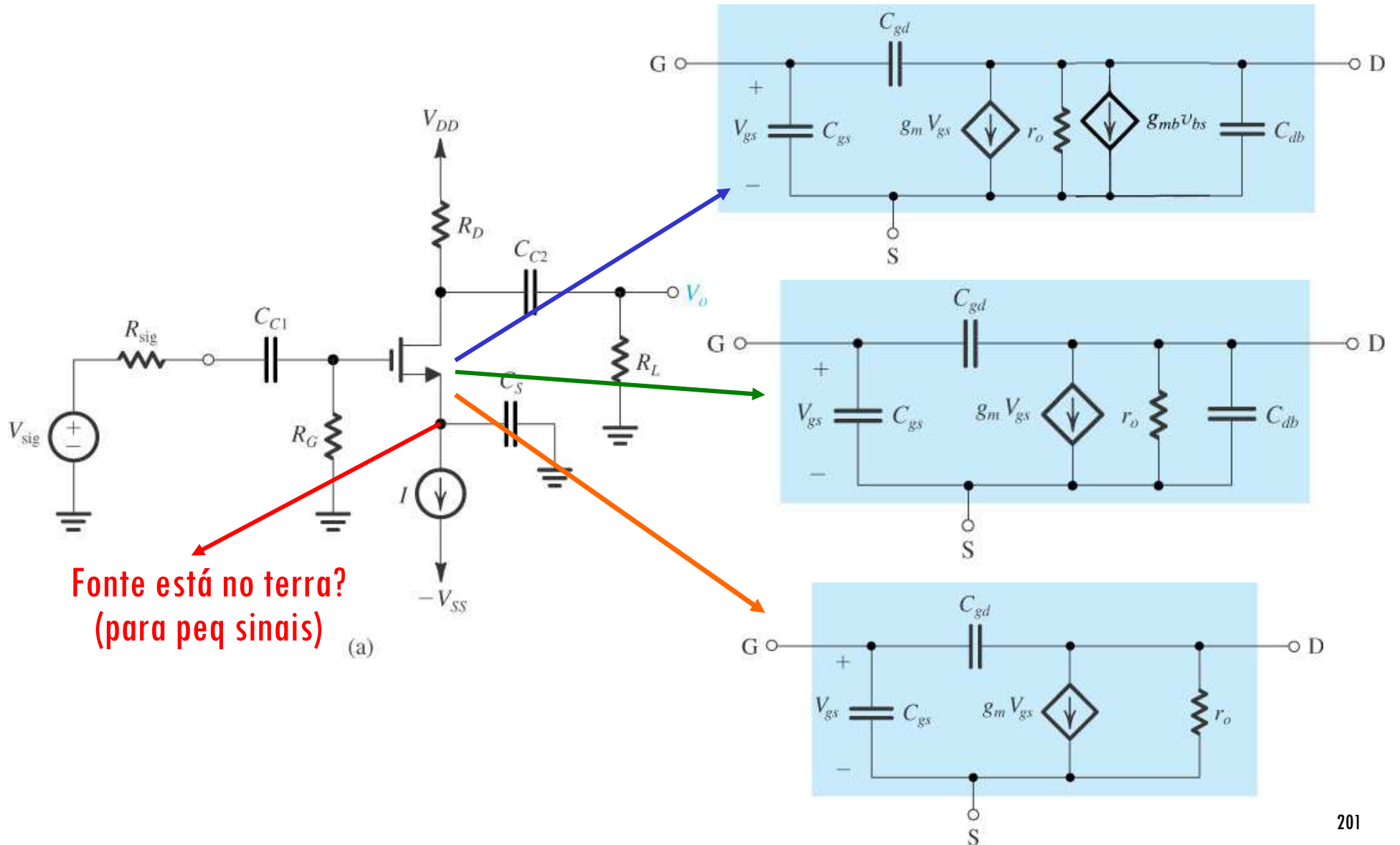


(b)

(c)

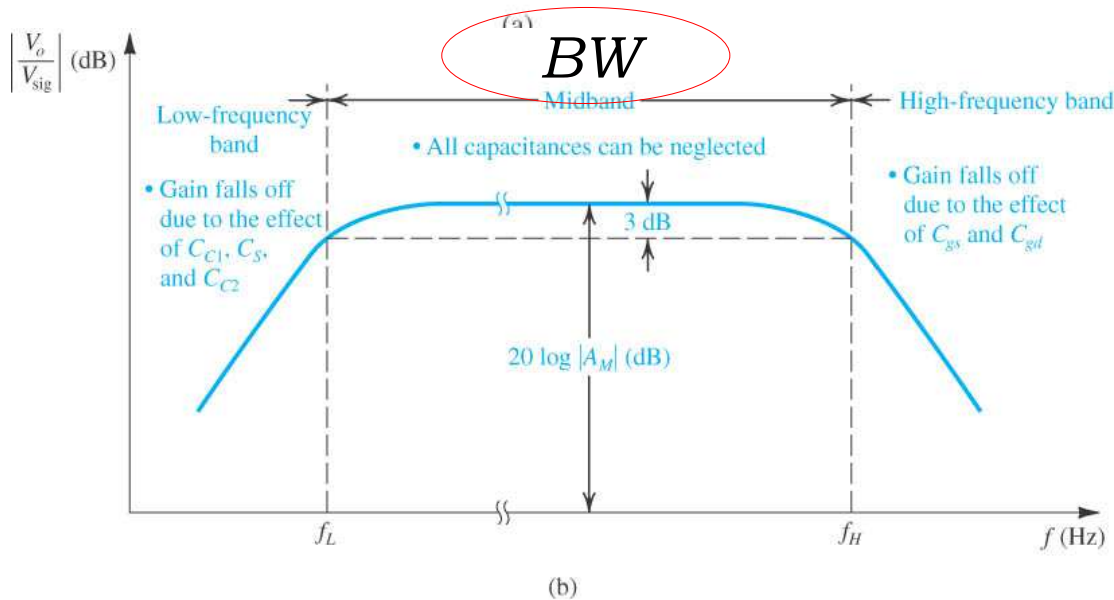
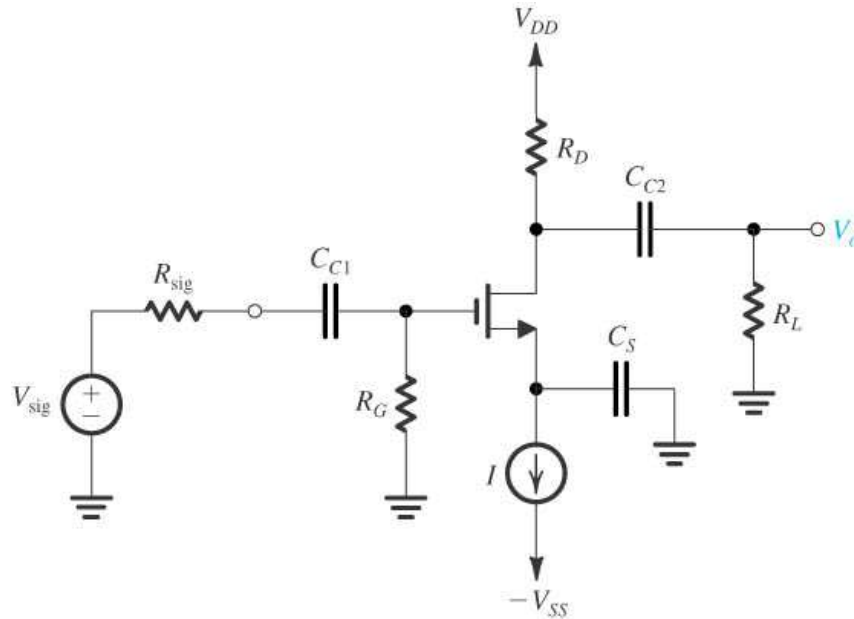
Amplificador Fonte Comum

Análise em Baixas e Altas Frequências?



Amplificador Fonte Comum

Análise em Baixas e Altas Frequências?

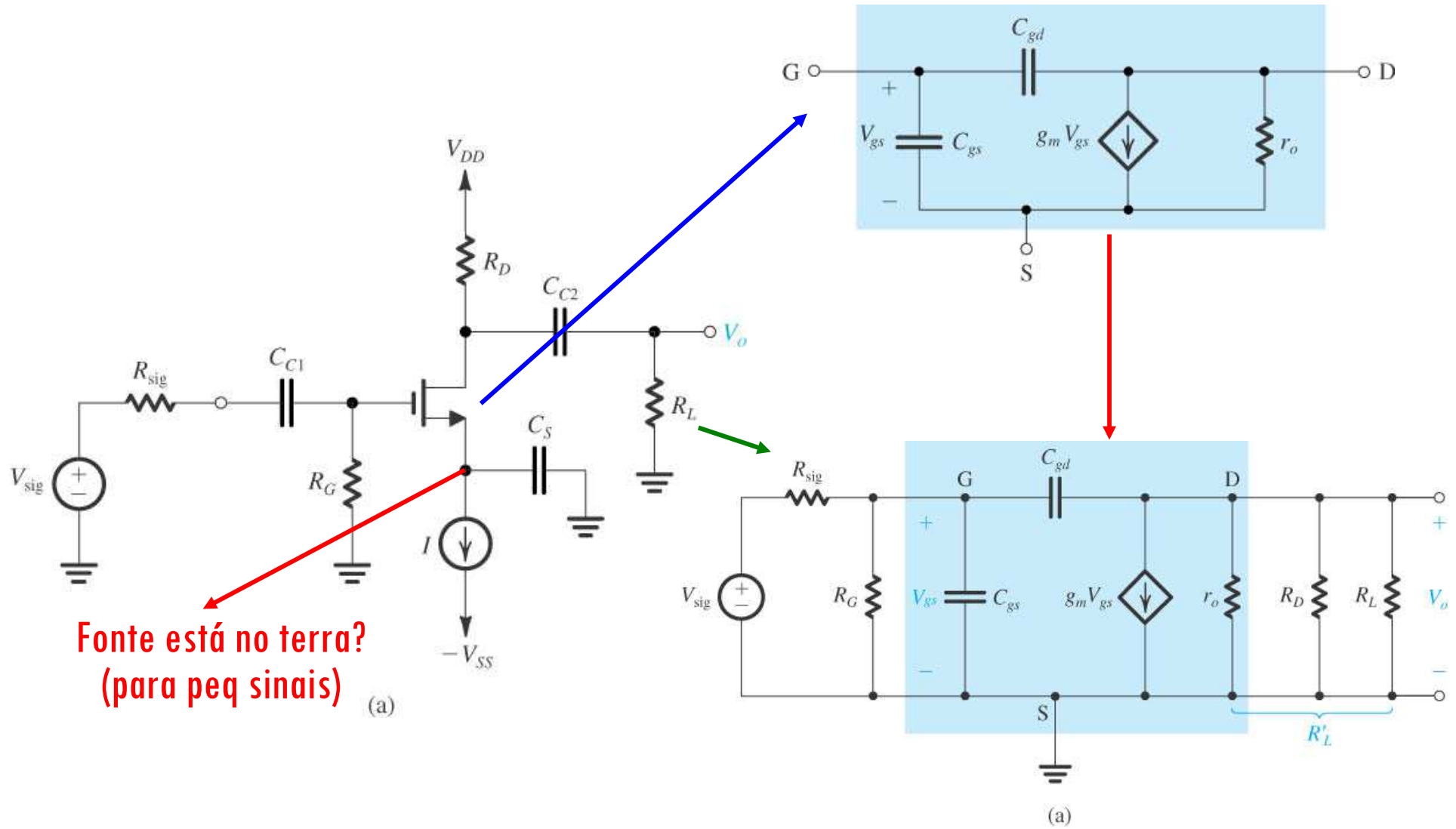


$$BW \equiv f_H - f_L$$

$$BW \cong f_H$$

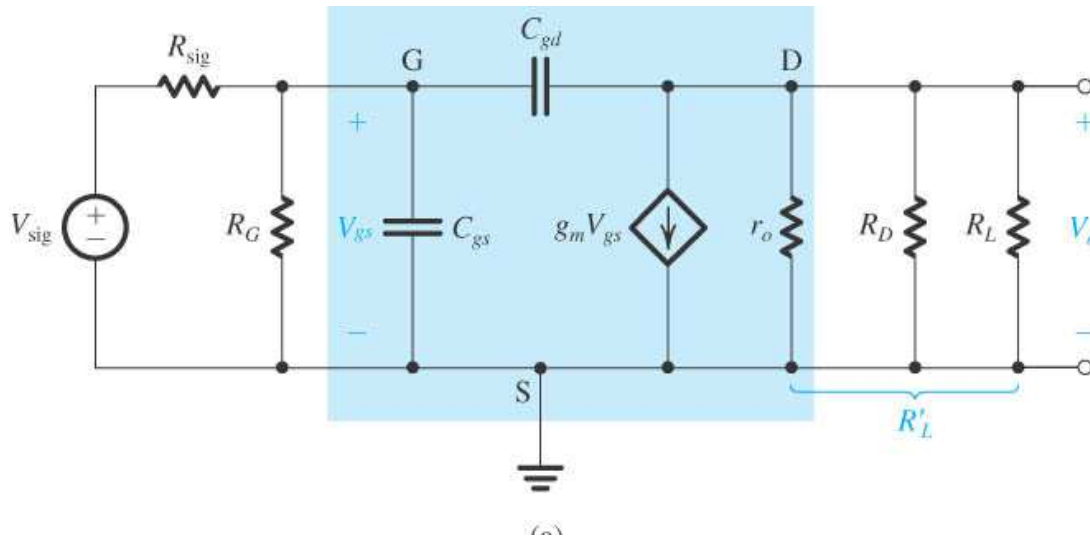
Amplificador Fonte Comum

Resposta em Altas Frequências



Amplificador Fonte Comum

Resposta em Altas Frequências



f médias e em f_H , $I_{gb} \ll g_m V_{gs}$

$$\Rightarrow V_O \cong -g_m R'_L V_{gs}$$

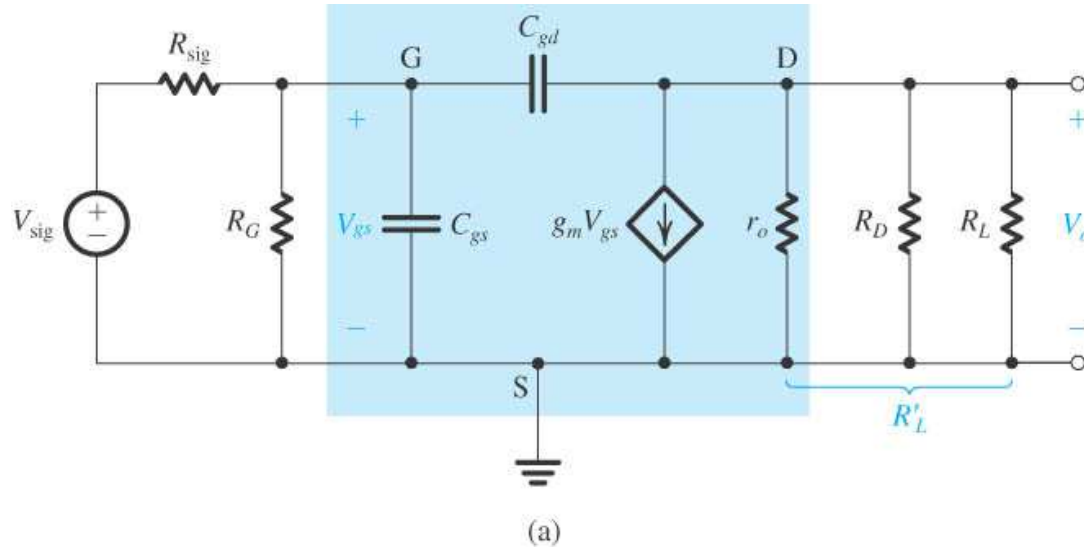
$$I_{gd} = sC_{gd}(V_{gs} - V_o)$$

$$= sC_{gd} [V_{gs} - (-g_m R'_L V_{gs})]$$

$$= sC_{gd}(1 + g_m R'_L)V_{gs}$$

Amplificador Fonte Comum

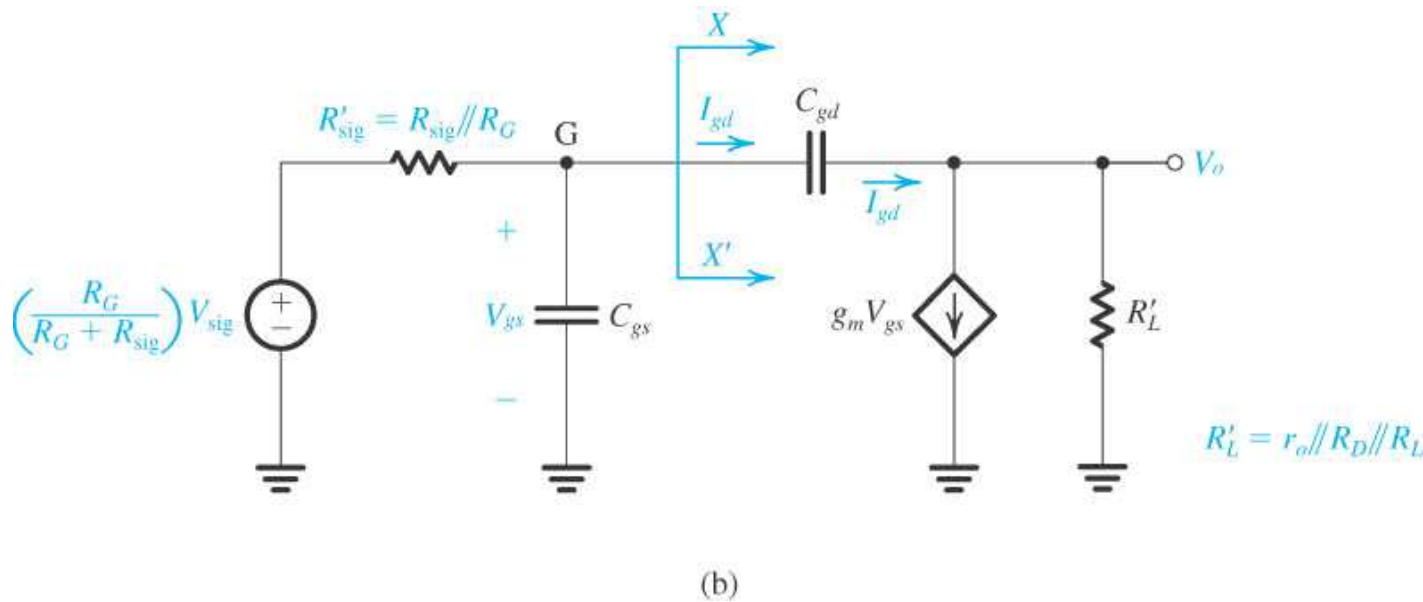
Resposta em Altas Frequências



f médias e em f_H , $I_{gb} \ll g_m V_{gs}$

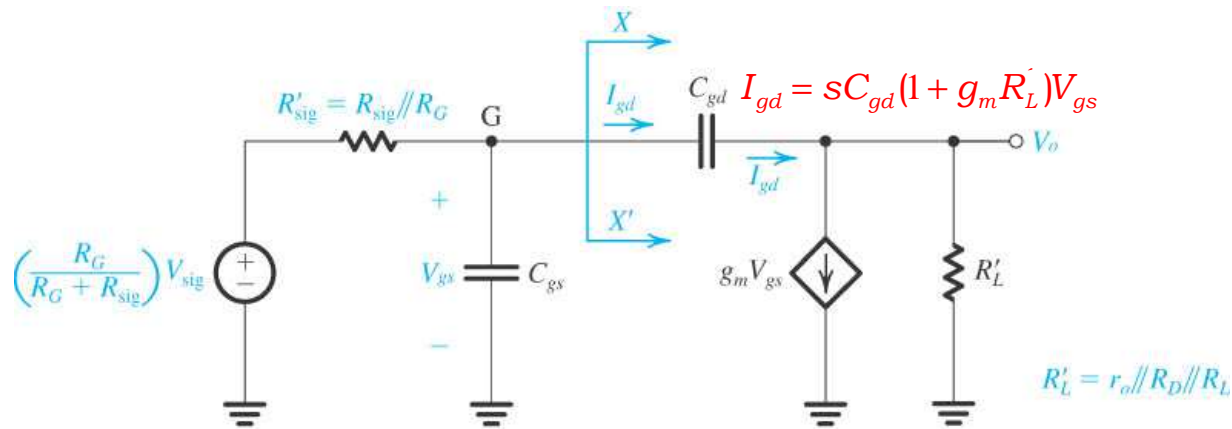
$$\Rightarrow V_O \cong -g_m R'_L V_{gs}$$

$$\begin{aligned} I_{gd} &= sC_{gd}(V_{gs} - V_o) \\ &= sC_{gd} [V_{gs} - (-g_m R'_L V_{gs})] \\ &= sC_{gd}(1 + g_m R'_L)V_{gs} \end{aligned}$$

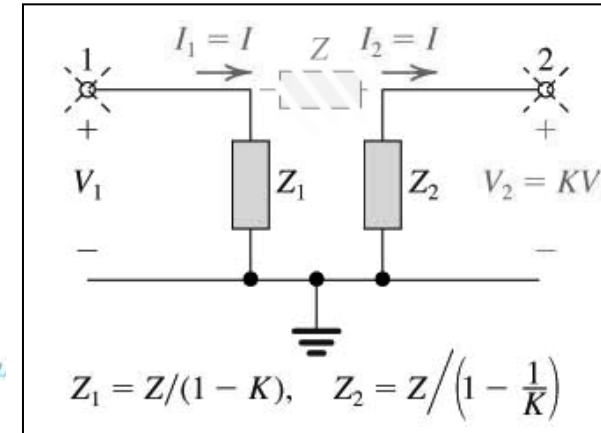


Amplificador Fonte Comum

Resposta em Altas Frequências – aplicando teorema de Miller



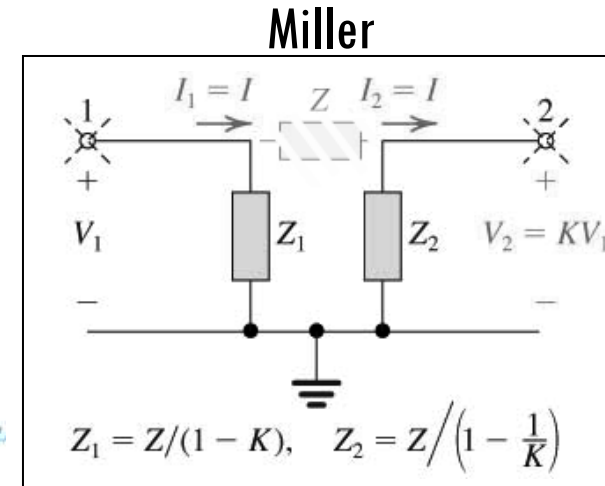
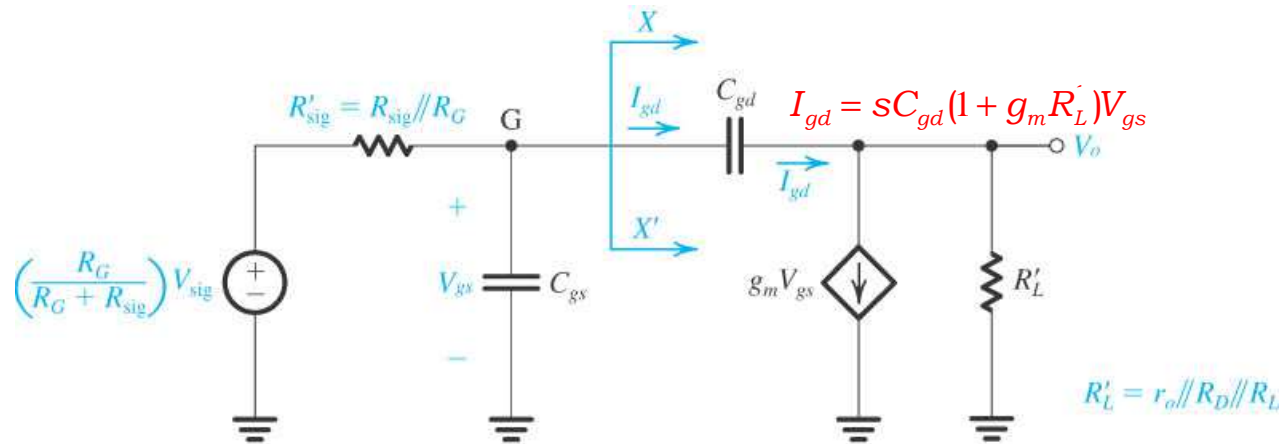
Miller



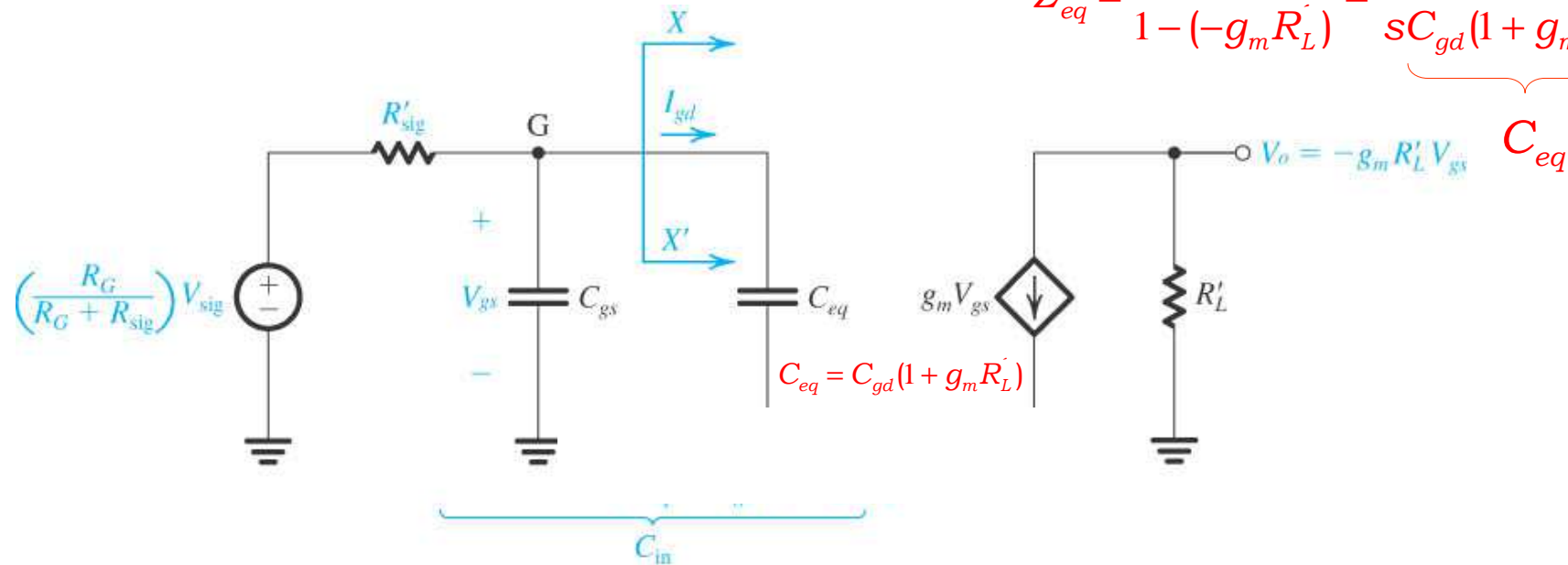
$$Z_{eq} = \frac{1/sC_{gd}}{1 - (-g_m R'_L)} = \frac{1}{sC_{gd}(1 + g_m R'_L)} = \frac{1}{C_{eq}}$$

Amplificador Fonte Comum

Resposta em Altas Frequências - aplicando teorema de Miller



$$Z_{eq} = \frac{1/sC_{gd}}{1 - (-g_m R'_L)} = \frac{1}{sC_{gd}(1 + g_m R'_L)}$$



Resposta em Frequência de um PB

$$A_v = \frac{1}{1 + j\omega/\omega_0} \quad \text{com} \quad 1/\tau = \omega_0$$

$$T(s) = \frac{K}{1 + (s/\omega_0)}$$

$$T(j\omega) = \frac{K}{1 + j(\omega/\omega_0)}$$

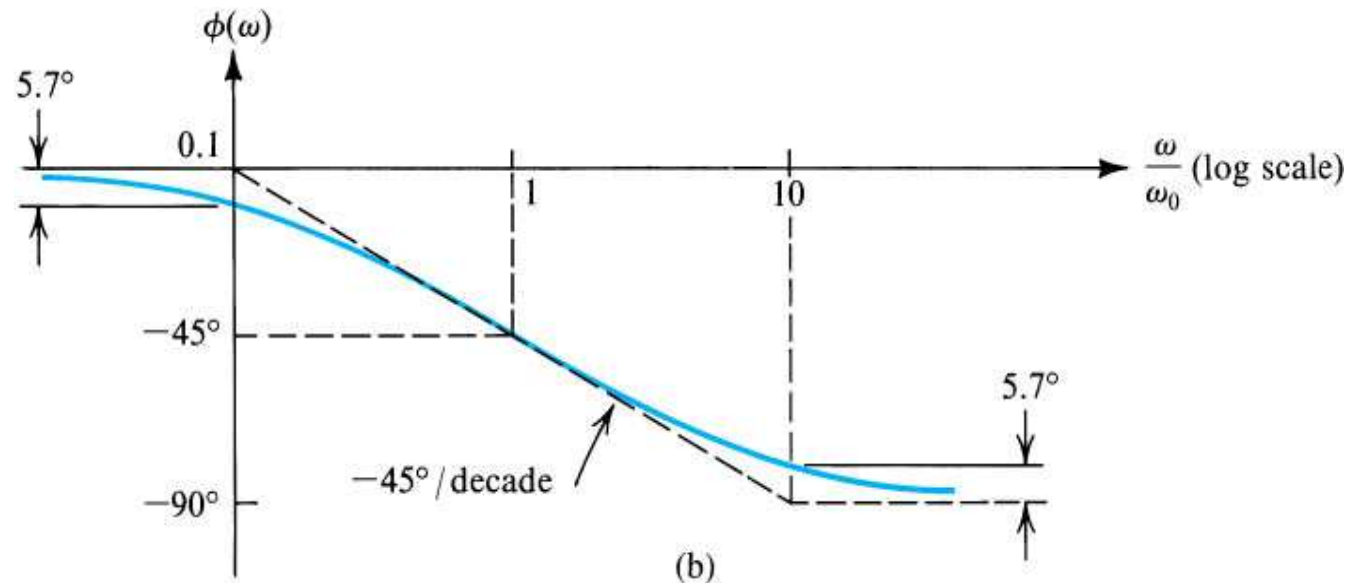
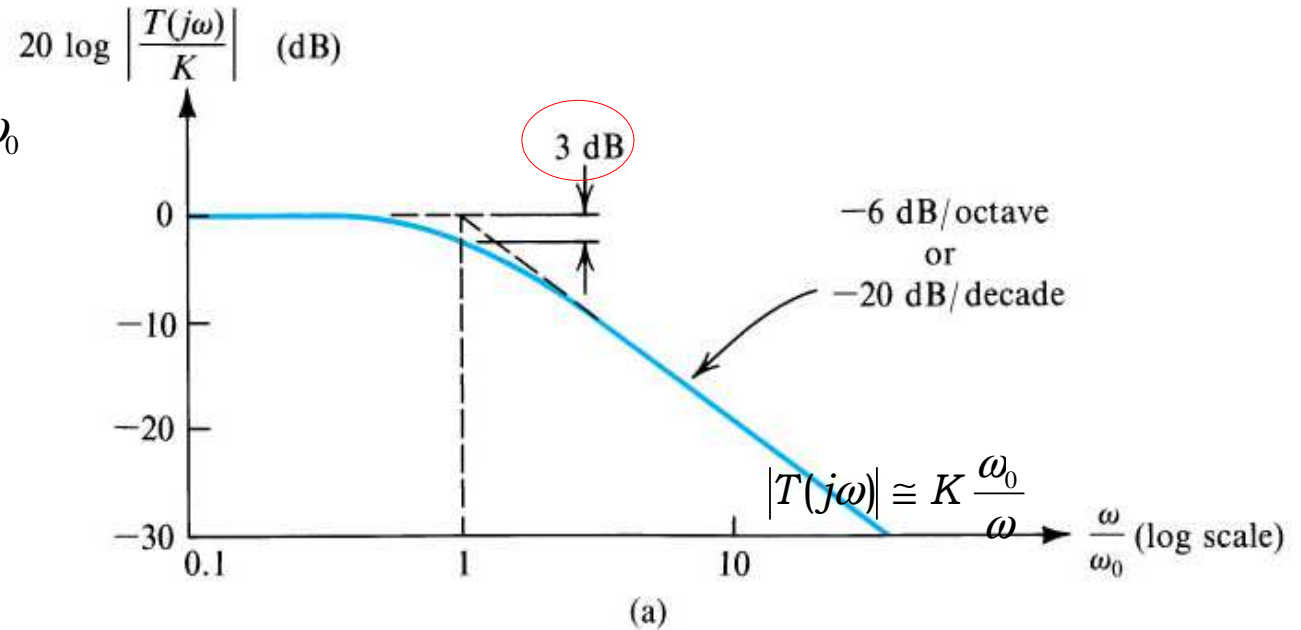
$$|T(j\omega)| = \frac{K}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_0)^2}}$$

$$\phi(\omega) = -\text{tg}^{-1}(\omega/\omega_0)$$

Na freq. de corte:

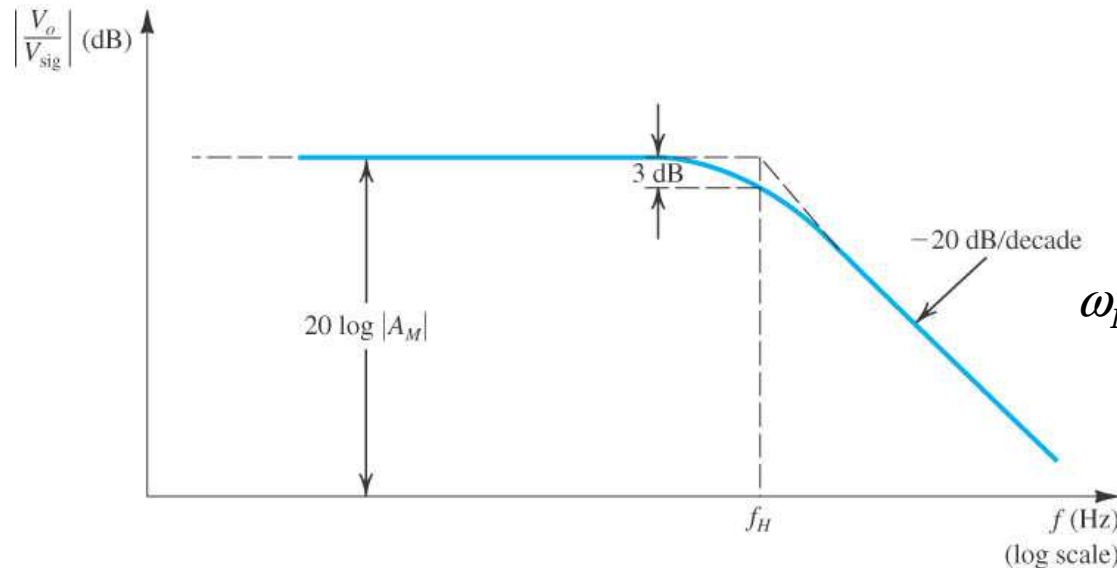
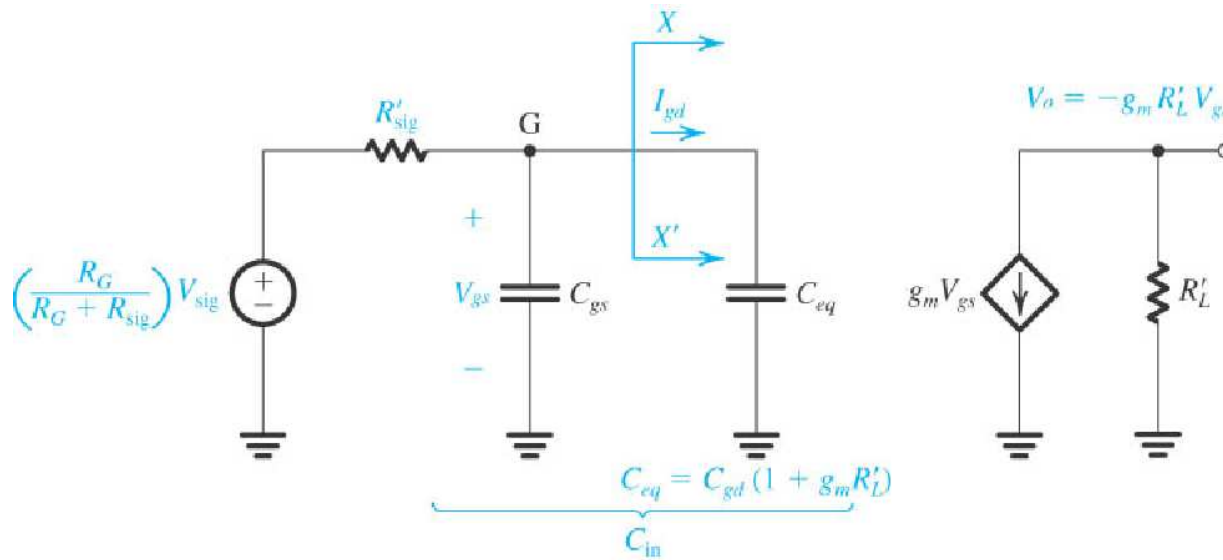
$$|T(j\omega)|_{fc} = K/\sqrt{2}$$

$$\phi(\omega)_{fc} = -45^\circ$$



Amplificador Fonte Comum

Resposta em Altas Frequências - aplicando teorema de Miller



$$T(s) = A_M \frac{1}{1 + s / \omega_H}$$

$$A_M = \frac{R_G}{R_G + R_{sig}} g_m R'_L$$

$$\omega_H = \frac{1}{R_{sig} C_{in}} \left\{ \begin{array}{l} C_{in} = C_{gs} + C_{gd}(1 + g_m R'_L) \\ R_{sig} = R_{sig} \parallel R_G \end{array} \right.$$

$$f_H = \frac{\omega_H}{2\pi} = \frac{1}{2\pi C_{in} (R_G \parallel R_{sig})}$$

Amplificador Fonte Comum - Resposta em ALTAS Frequências

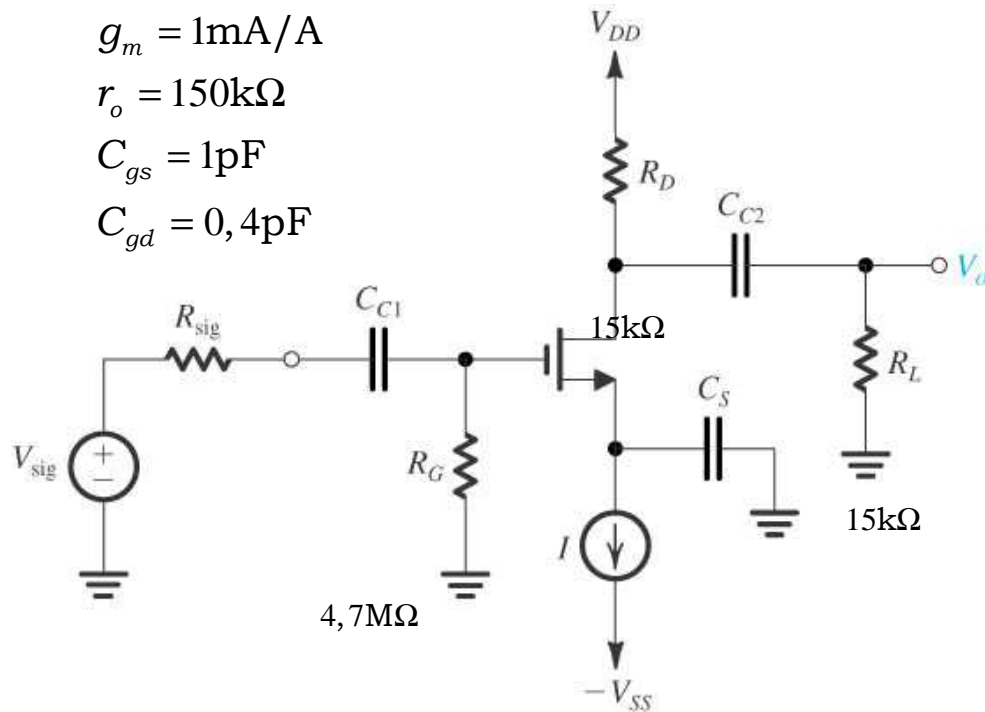
Exemplo 4.12: Calcule o ganho em frequências médias A_M e a frequência de corte superior f_H para o amplificador FET fonte comum abaixo. Considere que a fonte de sinal tem uma resistência interna $R_{sig} = 100\text{k}\Omega$. $R_G = 4.7\text{ M}\Omega$, $R_D = R_L = 15\text{ k}\Omega$

$$g_m = 1\text{mA/A}$$

$$r_o = 150\text{k}\Omega$$

$$C_{gs} = 1\text{pF}$$

$$C_{gd} = 0,4\text{pF}$$



Solução:

$$A_M = -\frac{R_G}{R_G + R_{sig}} g_m R'_L \quad \text{onde:}$$

$$R'_L = r_o \parallel R_D \parallel R_L = 150 \parallel 15 \parallel 15 = 7.14\text{ k}\Omega.$$

$$g_m R'_L = 1 \times 7.14 = 7.14\text{ V/V}$$

$$\text{Então: } A_M = -\frac{4.7}{4.7 + 0.1} \times 7.14 = -7\text{ V/V}$$

A capacitância equivalente pode ser

$$\begin{aligned} \text{dada por: } C_{eq} &= (1 + g_m R'_L) C_{gd} \\ &= (1 + 7.14) \times 0.4 = 3.26\text{ pF} \end{aligned}$$

A capacitância total de entrada pode ser dada por: $C_{in} = C_{gs} + C_{eq} = 1 + 3.26 = 4.26\text{ pF}$

E a frequência de corte superior pode ser dada por:

$$f_H = \frac{1}{2\pi C_{in} (R_{sig} \parallel R_G)} = \frac{1}{2\pi \times 4.26 \times 10^{-12} (0.1 \parallel 4.7) \times 10^6} = 382\text{ kHz}$$

PSI 2306 – Eletrônica

Programação para a Primeira Prova

Aula	Matéria	Capítulo/ página (inglês)
1 ^a	Revisão de transistor bipolar de junção - TBJ (funcionamento interno e expressões básicas) - Exemplo 5.4 O TBJ como amplificador para pequenos sinais (as condições c.c., a corrente de coletor e a transcondutância)	Sedra, Cap. 5, p. 235-240 (277-285); p. 263-264 (421-423); p. 275-276 (443-445).
2 ^a	A corrente de base e a resistência de entrada da base, a resistência de entrada do emissor. Ganho de tensão, Exemplo 5.38, modelos equivalentes (modelos π -híbrido e T)	Sedra, Cap. 5, p. 276-279 (445-450)
3 ^a	Aplicação dos modelos equivalentes para pequenos sinais, Efeito Early, Exemplo 5.14 O amplificador emissor comum (EC) - Exercício 5.43	Sedra, Cap. 5 p. 290-293 (467-470)
4 ^a	O amplificador em emissor comum com resistência de emissor. Exercício 5.44	Sedra, Cap. 5 p. 293-296 (470-474)
5 ^a	O amplificador em base comum. O Amplificador em coletor comum. Exercício 5.47	Sedra, Cap. 5 p. 296-301 (475-484)
6 ^a	Resposta em frequência dos circuitos RC Pólos e zeros, funções de primeira ordem, curvas de Bode (pólo simples, zero simples). Exemplo E.1, exemplo E.2	Sedra, Apend. D, p. 823-825 (D6-D9) Sedra, Apend. E, p.830-833 (E1-E6)
7 ^a	Teorema de Miller. Exemplo 6.7 Resposta em alta frequência do Emissor Comum Exemplo 5.18	Sedra, Cap. 6, p. 363-364 (578-580) Sedra, Cap. 5, p. 306-310 (491-497)
8 ^a	Resposta em baixa frequência do Emissor Comum Exemplo 5.19	Sedra, Cap. 5, p. 310-314 (497-503)
9 ^a	Resposta em alta e baixa frequência do Fonte Comum Exemplo 4.12	Sedra, Cap. 4, p. 202-208 (326-335)
10 ^a	Aula de Exercícios	
1^a. Semana de provas Data:		

9ª Aula:

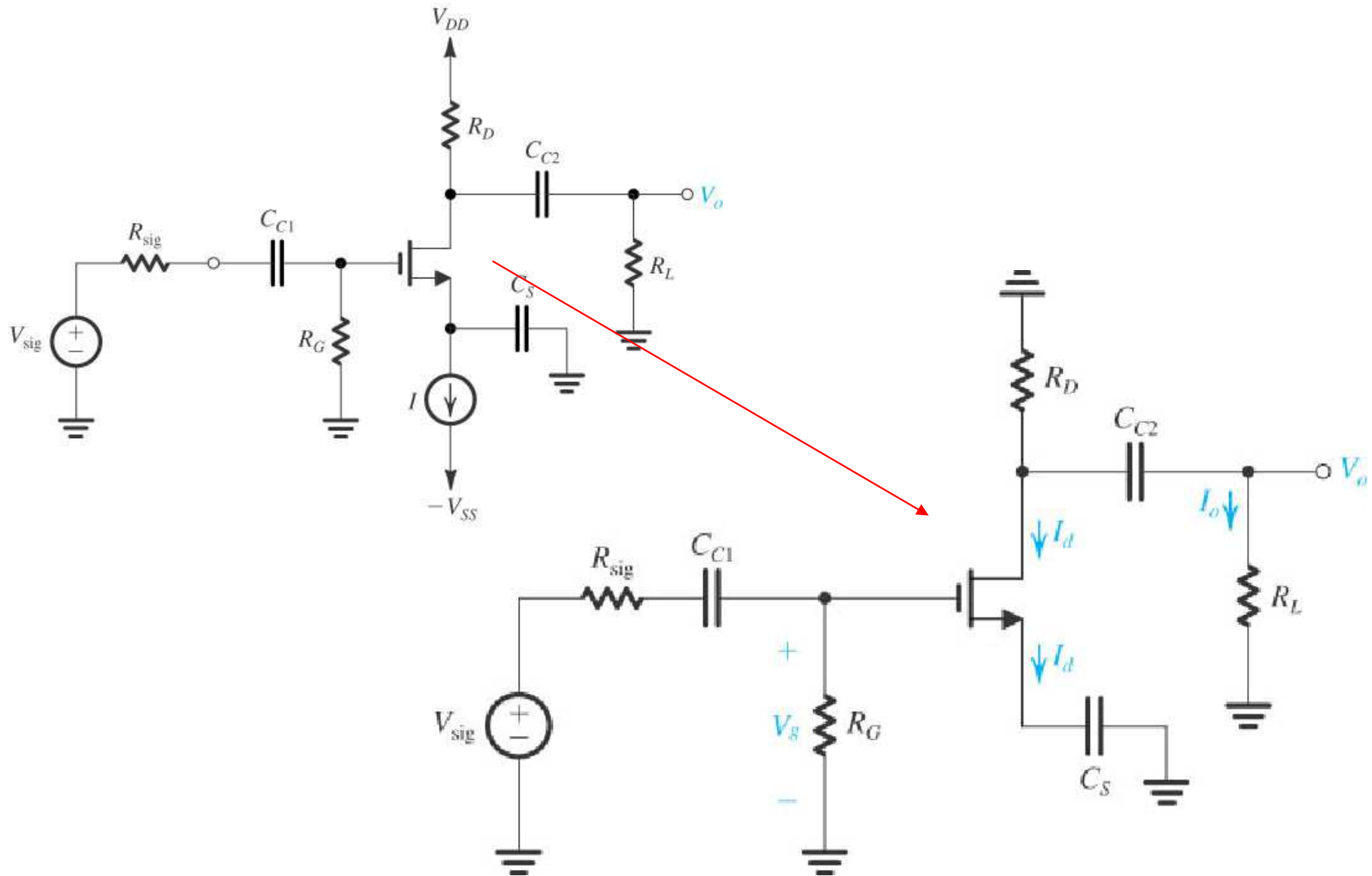
Estudo do Amplificador Fonte Comum

Ao final desta aula você deverá estar apto a:

- **Analisar a resposta em frequência do Amplificador Fonte Comum**
- **Comparar o desempenho em frequência de Amplificadores com transistores Bipolares e FETs**
- **Decidir qual a melhor configuração de amplificação e qual tipo de transistor utilizar para uma determinada aplicação**

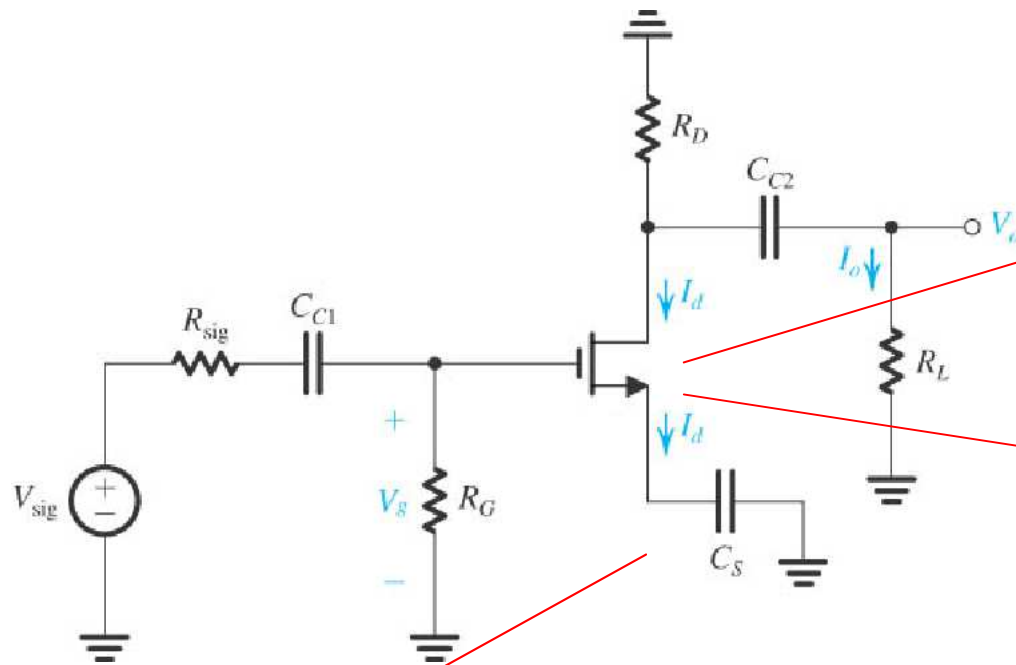
Amplificador Fonte Comum

Resposta em BAIXAS Frequências

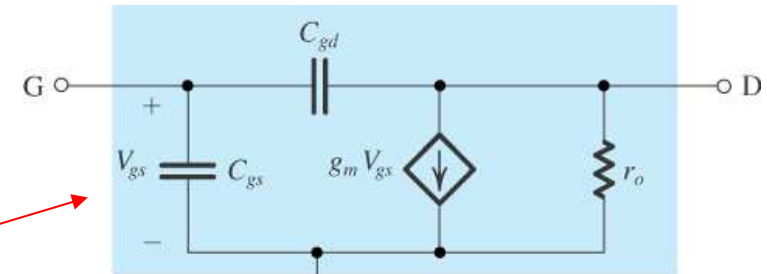


Amplificador Fonte Comum

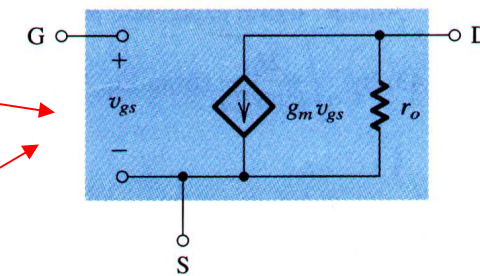
Resposta em BAIXAS Frequências



Baixas Frequências



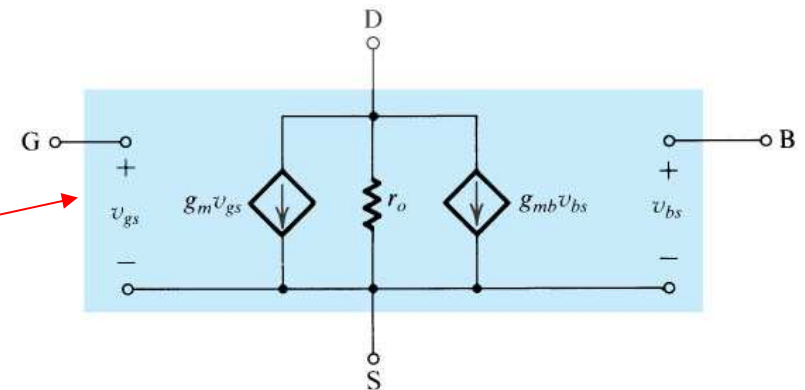
Baixas Frequências



Fonte está no terra?

Se analisarmos C_{C1} , C_{C2} e C_S separadamente:

- Para C_{C1} e para C_{C2} está
- Para C_S não está



Resposta em Frequência de um PA

$$A_v = \frac{1}{1 - j\omega_0/\omega} \text{ com } 1/\tau = \omega_0$$

$$T(s) = \frac{Ks}{s + \omega_0}$$

$$T(j\omega) = \frac{K}{1 - j\omega_0/\omega}$$

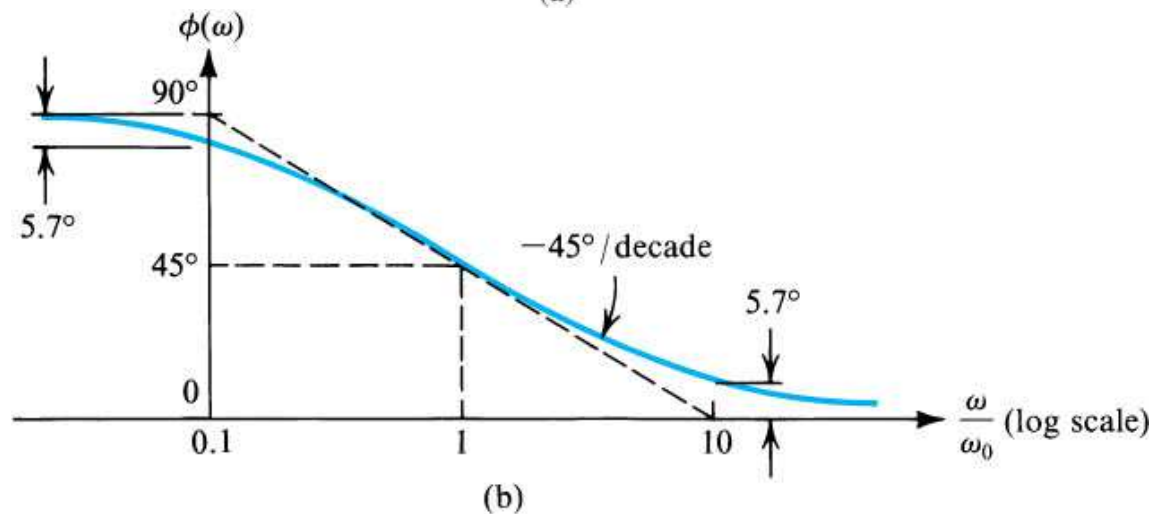
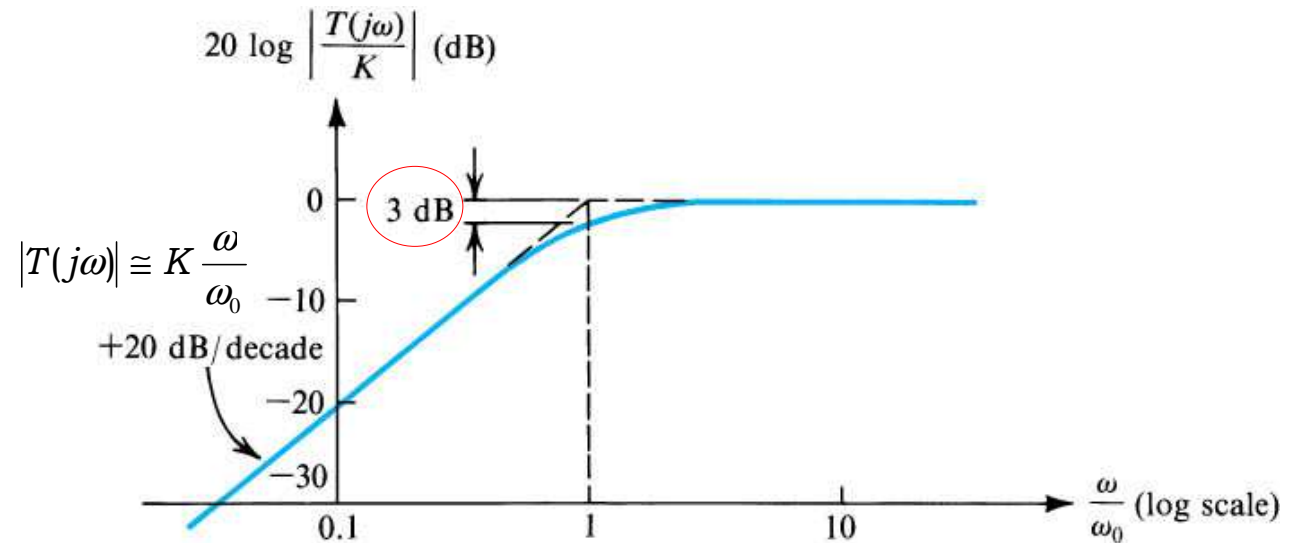
$$|T(j\omega)| = \frac{K}{\sqrt{1 + (\omega_0/\omega)^2}}$$

$$\phi(\omega) = \text{tg}^{-1}(\omega_0/\omega)$$

Na freq. de corte:

$$|T(j\omega)|_{fc} = K/\sqrt{2}$$

$$\phi(\omega)_{fc} = 45^\circ$$

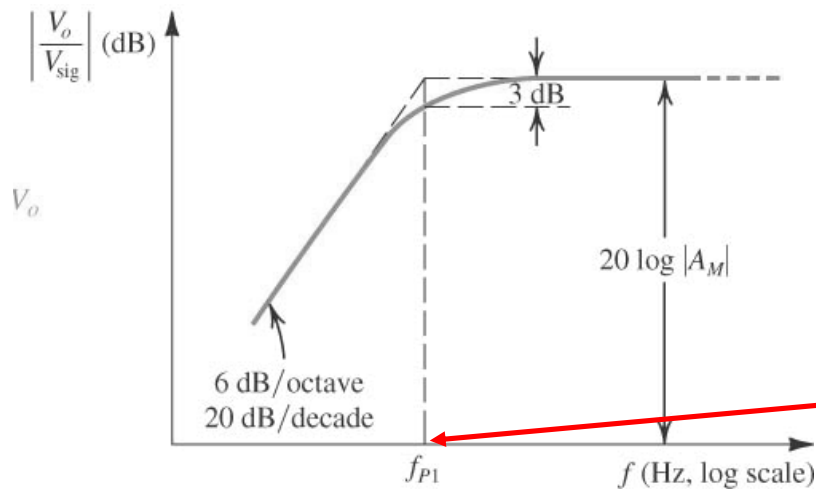
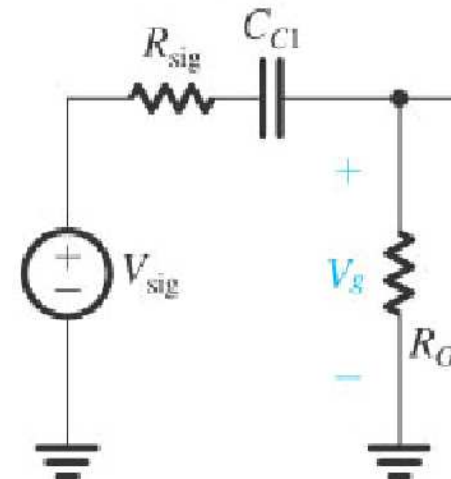
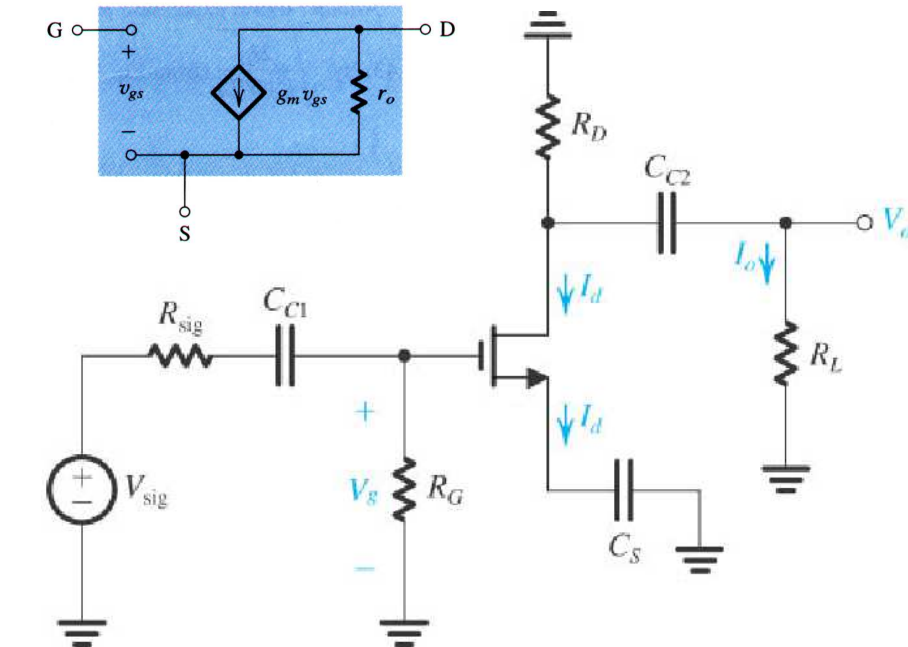


Cada capacitor introduz um termo do tipo: $\frac{S}{S + \omega_{0i}}$

Amplificador Fonte Comum

Resposta em BAIXAS Frequências: efeito isolado de C_{C1}

Vamos fazer a análise diretamente no circuito:
considera-se C_{C2} e C_S curto-circuitados.



$$V_g = V_{sig} \frac{R_G}{R_G + R_{sig}} \frac{s}{s + \frac{1}{C_{C1}(R_G + R_{sig})}}$$

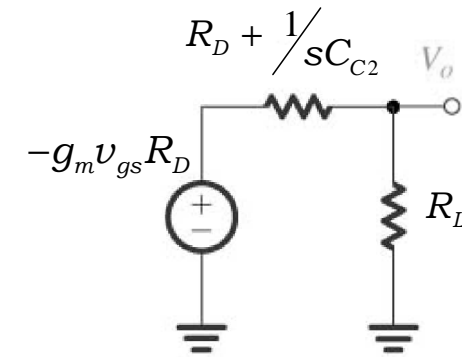
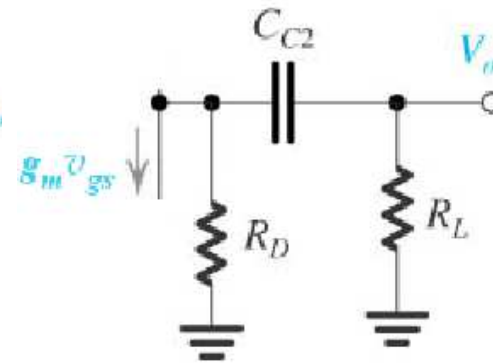
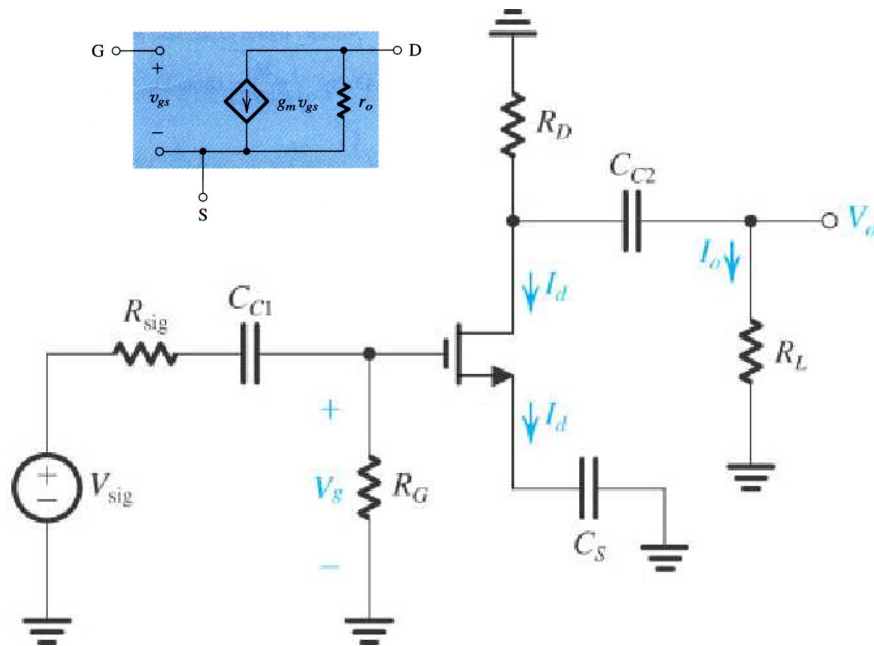
$$\omega_{P1} = \omega_0 = \frac{1}{C_{C1}(R_G + R_{sig})}$$

$$f_{P1} = \frac{1}{2\pi C_{C1}(R_G + R_{sig})}$$

Amplificador Fonte Comum

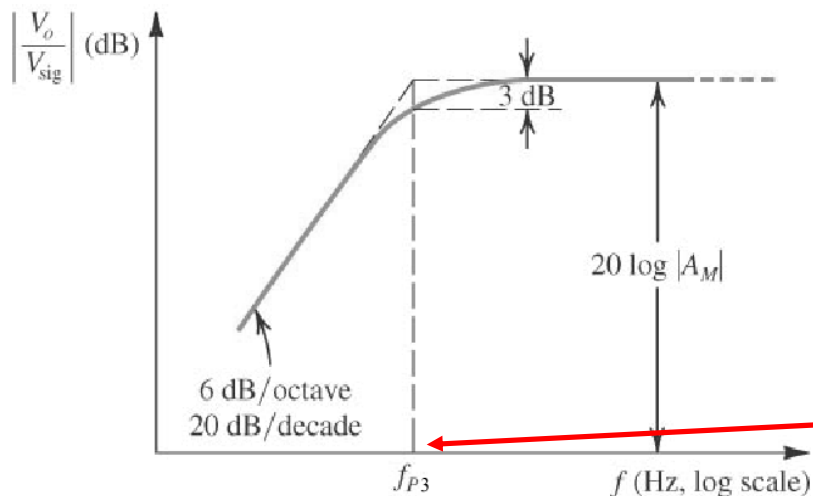
Resposta em BAIXAS Frequências: efeito isolado de C_{C2}

Vamos fazer a análise diretamente no circuito:
considera-se C_{C1} e C_S curto-circuitados.



$$V_o = -g_m v_{gs} R_D \frac{R_L}{R_L + R_D + \frac{1}{sC_{C2}}}$$

$$V_o = -g_m v_{gs} \frac{R_D R_L}{R_D + R_L} \frac{s}{s + \frac{1}{C_{C2}(R_D + R_L)}}$$



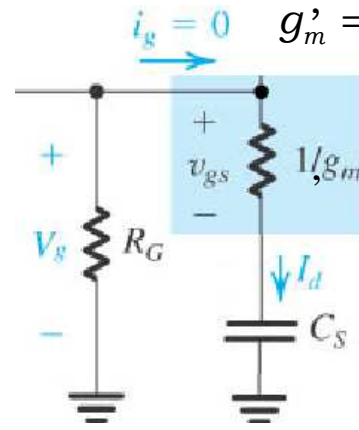
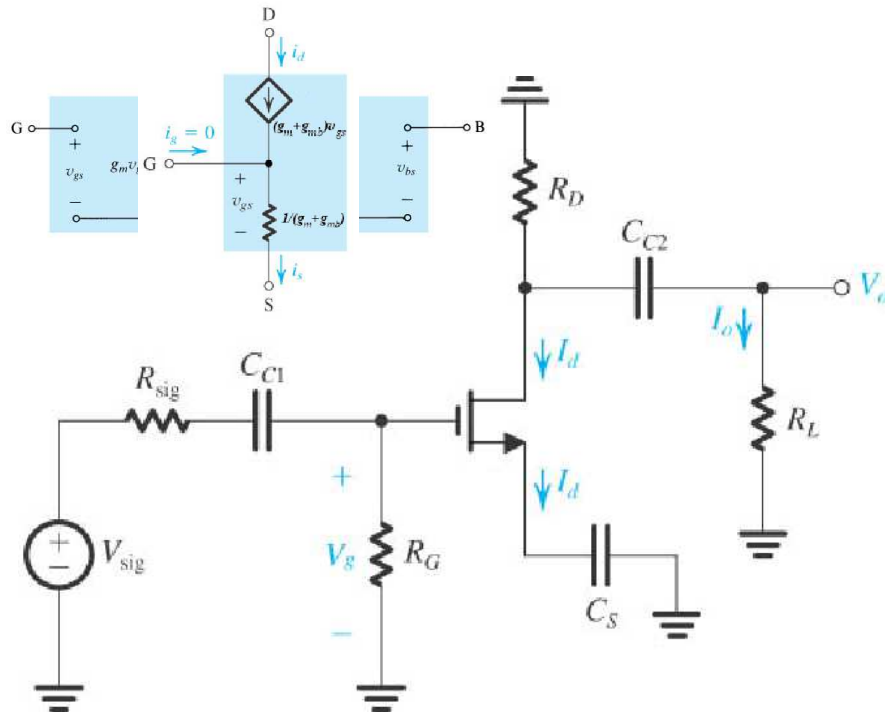
$$f_{P3} = \frac{1}{2\pi C_{C2}(R_D + R_L)}$$

Amplificador Fonte Comum

Resposta em BAIXAS Frequências: efeito isolado de C_s

Vamos fazer a análise diretamente no circuito:

considera-se C_{C1} e C_{C2} curto-circuitados.



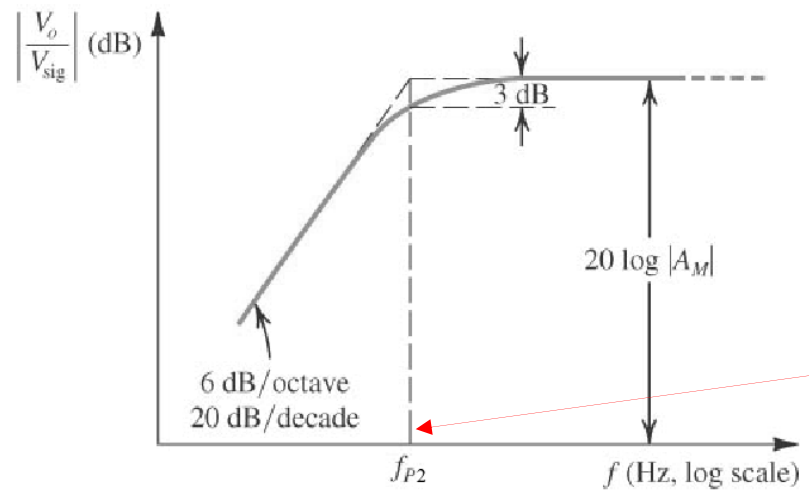
$$i_d = \frac{V_g}{\frac{1}{g'_m} + \frac{1}{sC_s}}$$

$$i_d = V_g g'_m \frac{s}{s + \frac{g'_m}{C_s}}$$

$$V_o = -i_d (R_D \parallel R_L)$$

$$\frac{V_o}{V_{sig}} = -\frac{R_G}{R_G + R_{sig}} g'_m (R_D \parallel R_L) \frac{s}{s + \frac{g'_m}{C_s}}$$

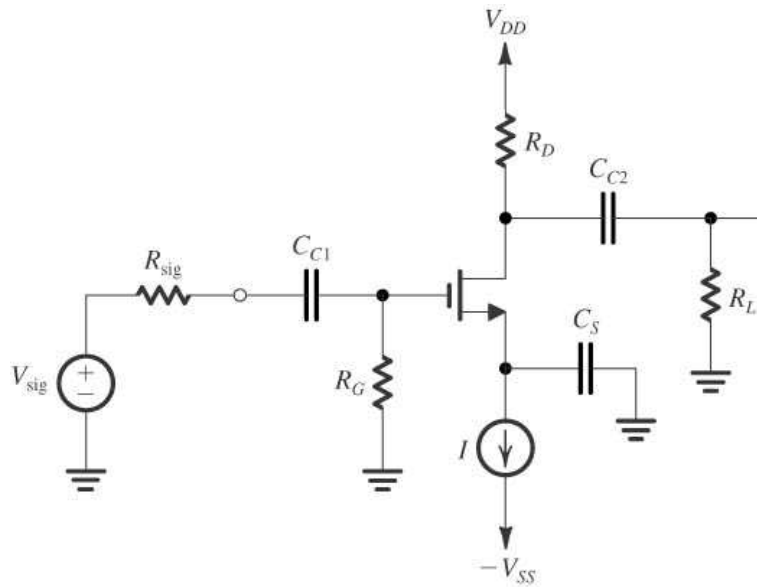
$$f_{P2} = \frac{1}{2\pi (g'_m / C_s)}$$



Amplificador Fonte Comum

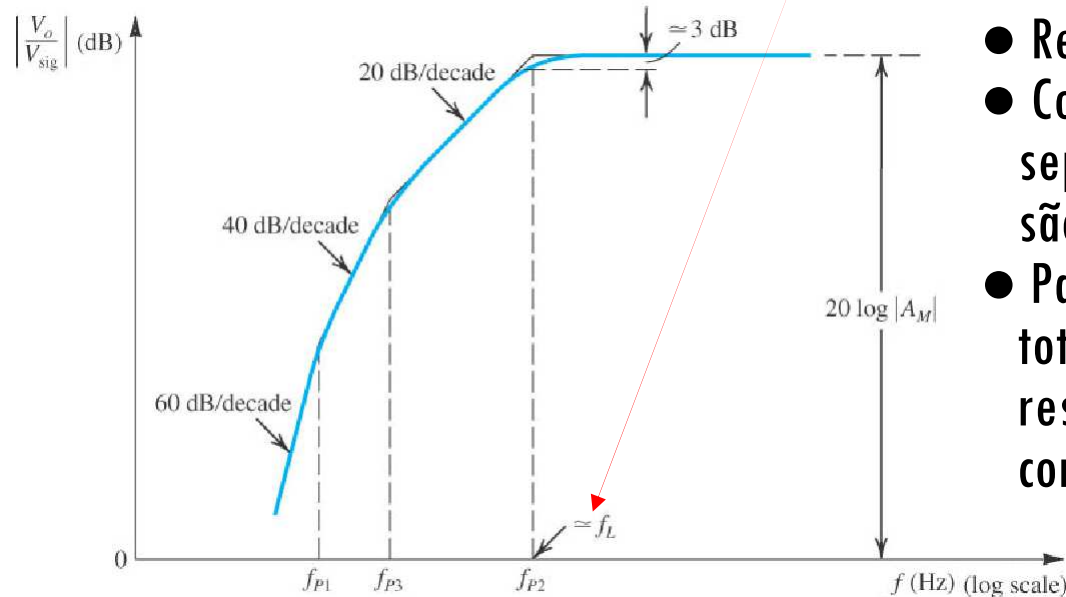
Resposta em BAIXAS Frequências considerando C_{C1} , C_{C2} e C_S

Considerando a ação dos polos independentes:



$$\frac{V_o}{V_{sig}} = \left(\frac{R_G}{R_G + R_{sig}} \right) \left[-g_m (R_D \parallel R_L) \right] \left(\frac{s}{s + \omega_{P1}} \right) \left(\frac{s}{s + \omega_{P2}} \right) \left(\frac{s}{s + \omega_{P3}} \right)$$

Note que novamente consideramos o polo em C_S como o mais importante



Dicas para determinar os polos e f_L em circuitos:

- Reduza V_{sig} a zero
- Considere o efeito de cada capacitor separadamente, ou seja os outros caps são curtos
- Para cada capacitor ache a resistência total vista entre seus terminais. Essa resistência multiplicada pelo “C” dá a constante de tempo do circuito

PSI 2306 – Eletrônica

Programação para a Primeira Prova

Aula	Matéria	Capítulo/ página (inglês)
1 ^a	Revisão de transistor bipolar de junção - TBJ (funcionamento interno e expressões básicas) - Exemplo 5.4 O TBJ como amplificador para pequenos sinais (as condições c.c., a corrente de coletor e a transcondutância)	Sedra, Cap. 5, p. 235-240 (277-285); p. 263-264 (421-423); p. 275-276 (443-445).
2 ^a	A corrente de base e a resistência de entrada da base, a resistência de entrada do emissor. Ganho de tensão, Exemplo 5.38, modelos equivalentes (modelos π -híbrido e T)	Sedra, Cap. 5, p. 276-279 (445-450)
3 ^a	Aplicação dos modelos equivalentes para pequenos sinais, Efeito Early, Exemplo 5.14 O amplificador emissor comum (EC) - Exercício 5.43	Sedra, Cap. 5 p. 290-293 (467-470)
4 ^a	O amplificador em emissor comum com resistência de emissor. Exercício 5.44	Sedra, Cap. 5 p. 293-296 (470-474)
5 ^a	O amplificador em base comum. O Amplificador em coletor comum. Exercício 5.47	Sedra, Cap. 5 p. 296-301 (475-484)
6 ^a	Resposta em frequência dos circuitos RC Pólos e zeros, funções de primeira ordem, curvas de Bode (pólo simples, zero simples). Exemplo E.1, exemplo E.2	Sedra, Apend. D, p. 823-825 (D6-D9) Sedra, Apend. E, p.830-833 (E1-E6)
7 ^a	Teorema de Miller. Exemplo 6.7 Resposta em alta frequência do Emissor Comum Exemplo 5.18	Sedra, Cap. 6, p. 363-364 (578-580) Sedra, Cap. 5, p. 306-310 (491-497)
8 ^a	Resposta em baixa frequência do Emissor Comum Exemplo 5.19	Sedra, Cap. 5, p. 310-314 (497-503)
9 ^a	Resposta em alta e baixa frequência do Fonte Comum Exemplo 4.12	Sedra, Cap. 4, p. 202-208 (326-335)
10 ^a	Aula de Exercícios	
1^a. Semana de provas		
Data:		

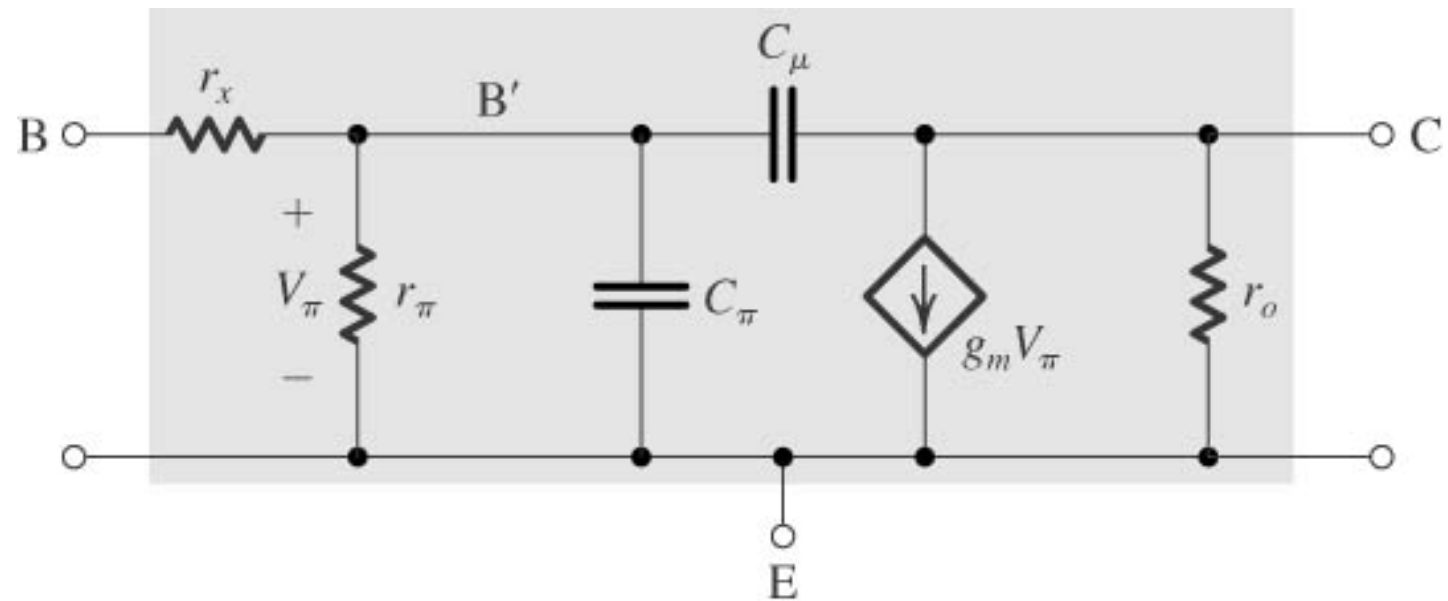
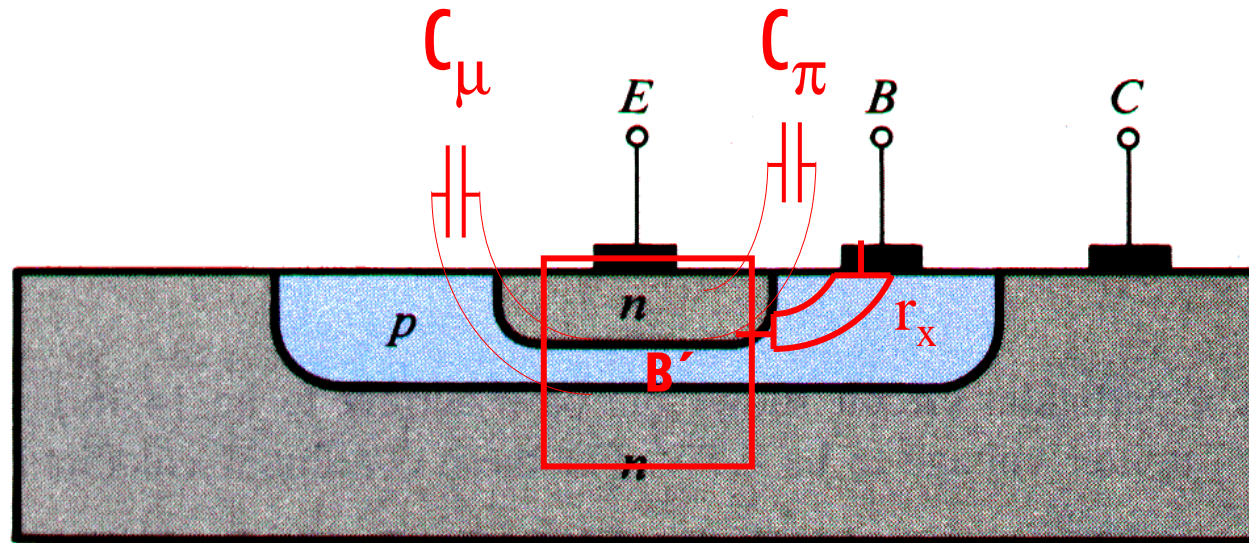
7ª Aula:

Parte 2 : Resposta em Altas Frequências de Amplificadores TBJ - EC

Ao final da 7ª aula você deverá estar apto a:

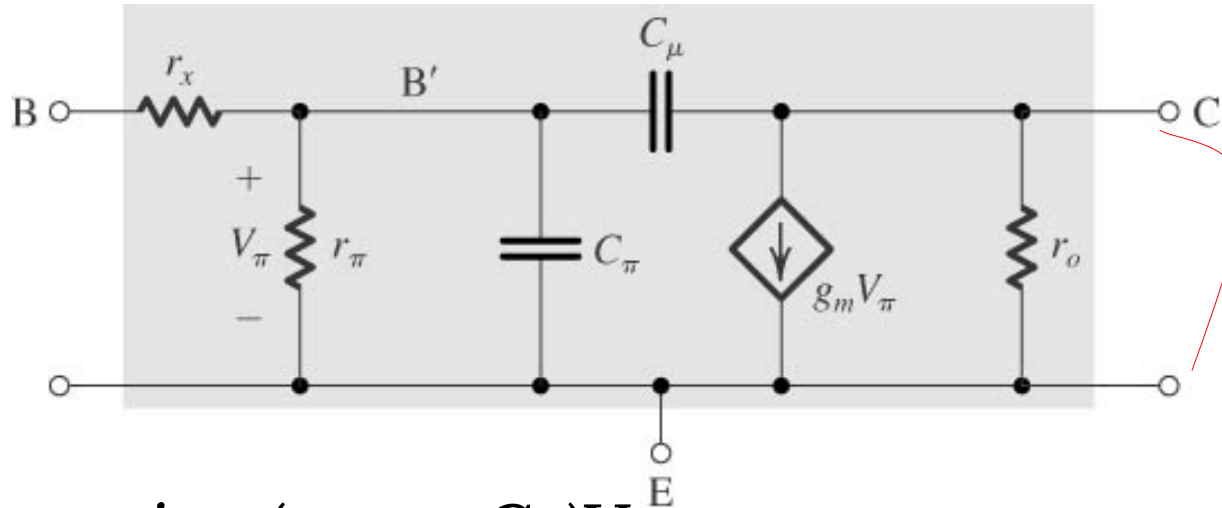
- Explicar o comportamento em frequência de amplificadores envolvendo transistores (TBJ e FET)**
- Explicar o comportamento do TBJ em altas frequências**
- Traçar a resposta em frequência do Amplificador TBJ – EC na faixa de altas frequências, determinando a frequência de corte superior de operação**

Capacitâncias no TR Bipolar de Junção



Modelo π -híbrido do TBJ para altas frequências

Ganho de Corrente no TBJ considerando f



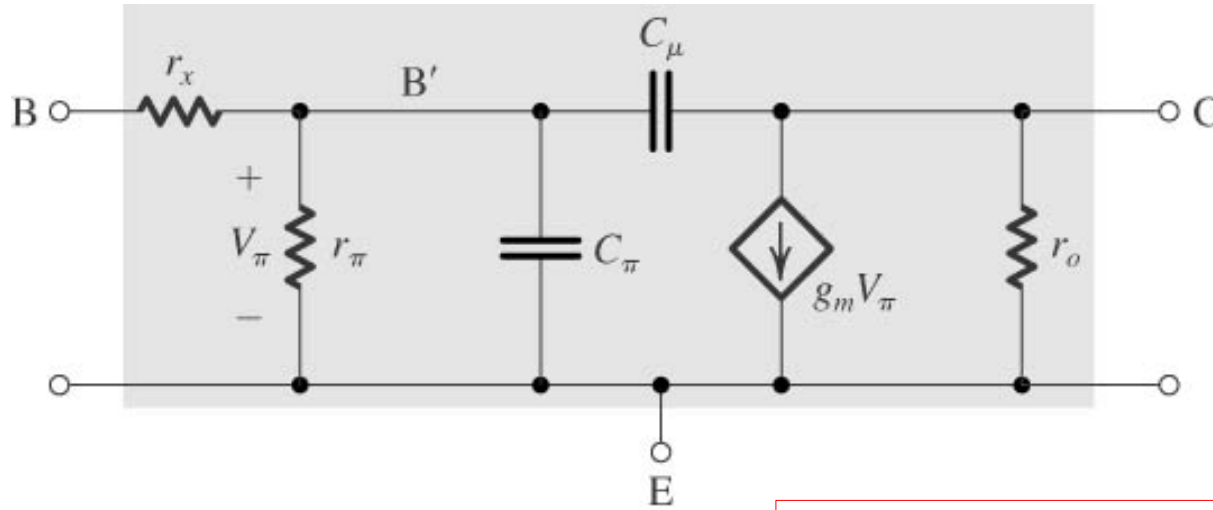
$$A_{is} = \frac{i_c}{i_b} \quad i_c = (g_m - sC_\mu)V_\pi$$

$$V_\pi = i_b (r_\pi // C_\pi // C_\mu) = \frac{i_b}{1/r_\pi + sC_\pi + sC_\mu}$$

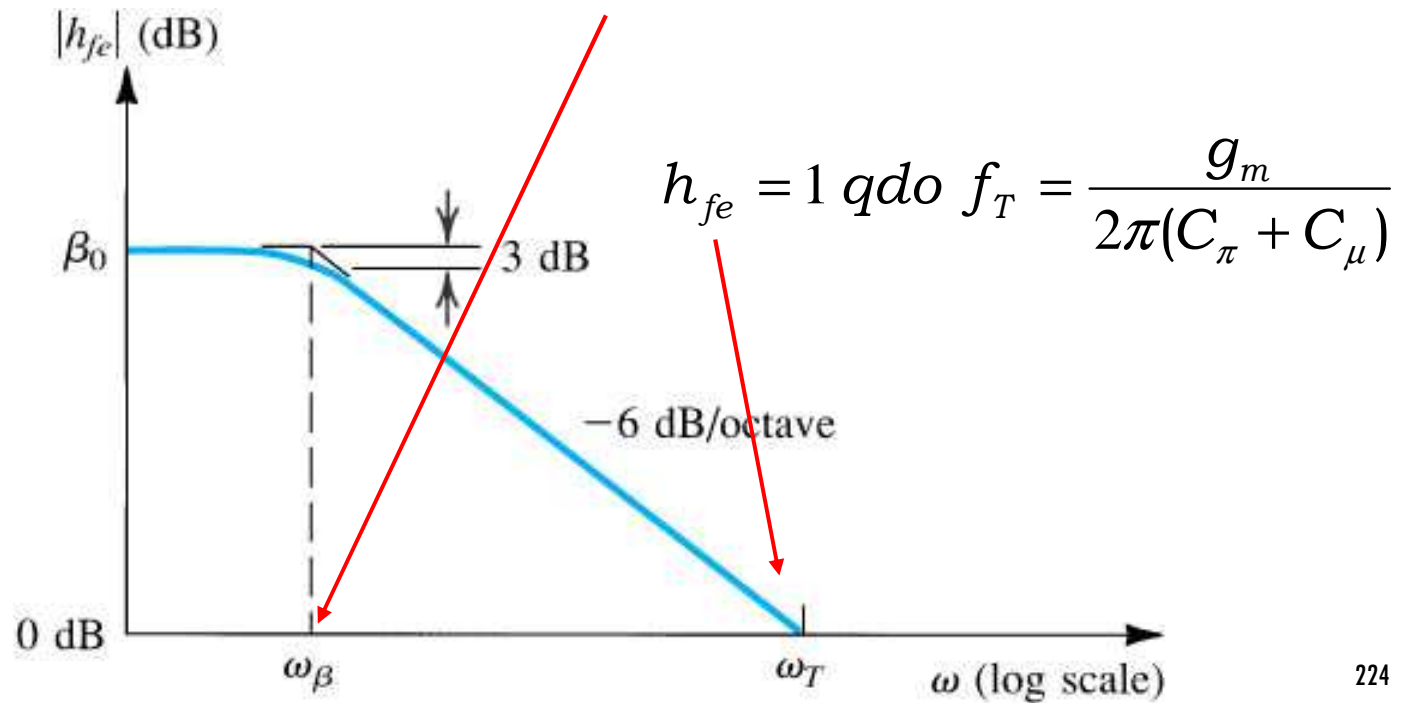
$$A_{is} = \frac{i_c}{i_b} = \frac{g_m - sC_\mu}{1/r_\pi + s(C_\pi + C_\mu)} \cong \frac{g_m}{1/r_\pi + s(C_\pi + C_\mu)} \text{ qdo } g_m \gg sC_\mu$$

$$A_{is} \cong h_{fe} = \frac{g_m r_\pi}{1 + s(C_\pi + C_\mu)r_\pi} = \frac{\beta_0}{1 + s(C_\pi + C_\mu)r_\pi}$$

Ganho de Corrente no TR Bipolar considerando f



$$A_{is} \equiv h_{fe} = \frac{g_m r_\pi}{1 + s(C_\pi + C_\mu)r_\pi} = \frac{\beta_0}{1 + s(C_\pi + C_\mu)r_\pi}$$



PSI 2306 – Eletrônica

Programação para a Primeira Prova

Aula	Matéria	Capítulo/página
1 ^a	Revisão de transistor bipolar de junção - TBJ (funcionamento interno e expressões básicas) - Exemplo 5.4. O TBJ como amplificador para pequenos sinais (as condições c.c., a corrente de coletor e a transcondutância)	Sedra, Cap. 5, p. 235-240; p. 263-264; p. 275-276.
2 ^a	A corrente de base e a resistência de entrada da base, a resistência de entrada do emissor. Ganho de tensão, Exemplo 5.38, modelos equivalentes (modelos π -híbrido e T)	Sedra, Cap. 5, p. 276-279
3 ^a	Aplicação dos modelos equivalentes para pequenos sinais, Efeito Early, Exemplo 5.14 O amplificador emissor comum (EC) - Exercício 5.43	Sedra, Cap. 5 p. 290-293
4 ^a	O amplificador em emissor comum com resistência de emissor. Exercício 5.44	Sedra, Cap. 5 p. 293-296
5 ^a	O amplificador em base comum. O Amplificador em coletor comum. Exercício 5.47	Sedra, Cap. 5 p. 296-301
6 ^a	Resposta em frequência dos circuitos RC: Pólos e zeros, funções de primeira ordem, curvas de Bode (pólo simples, zero simples). Exemplo E.1, exemplo E.2	Sedra, Ap. D, p. 823-825 Sedra, Ap. E, p. 830-833
7 ^a	Teorema de Miller. Exemplo 6.7	Sedra, Cap. 6, p. 363-364
	Resposta em alta frequência do Emissor Comum. Exemplo 5.18	Sedra, Cap. 5, p. 306-310
8 ^a	Resposta em baixa frequência do Emissor Comum Exemplo 5.19	Sedra, Cap. 5, p. 310-314
9 ^a	Resposta em alta e baixa frequência do Fonte Comum Exemplo 4.12	Sedra, Cap. 4, p. 202-206
10 ^a	Aula de Exercícios	
1^a. Semana de provas		

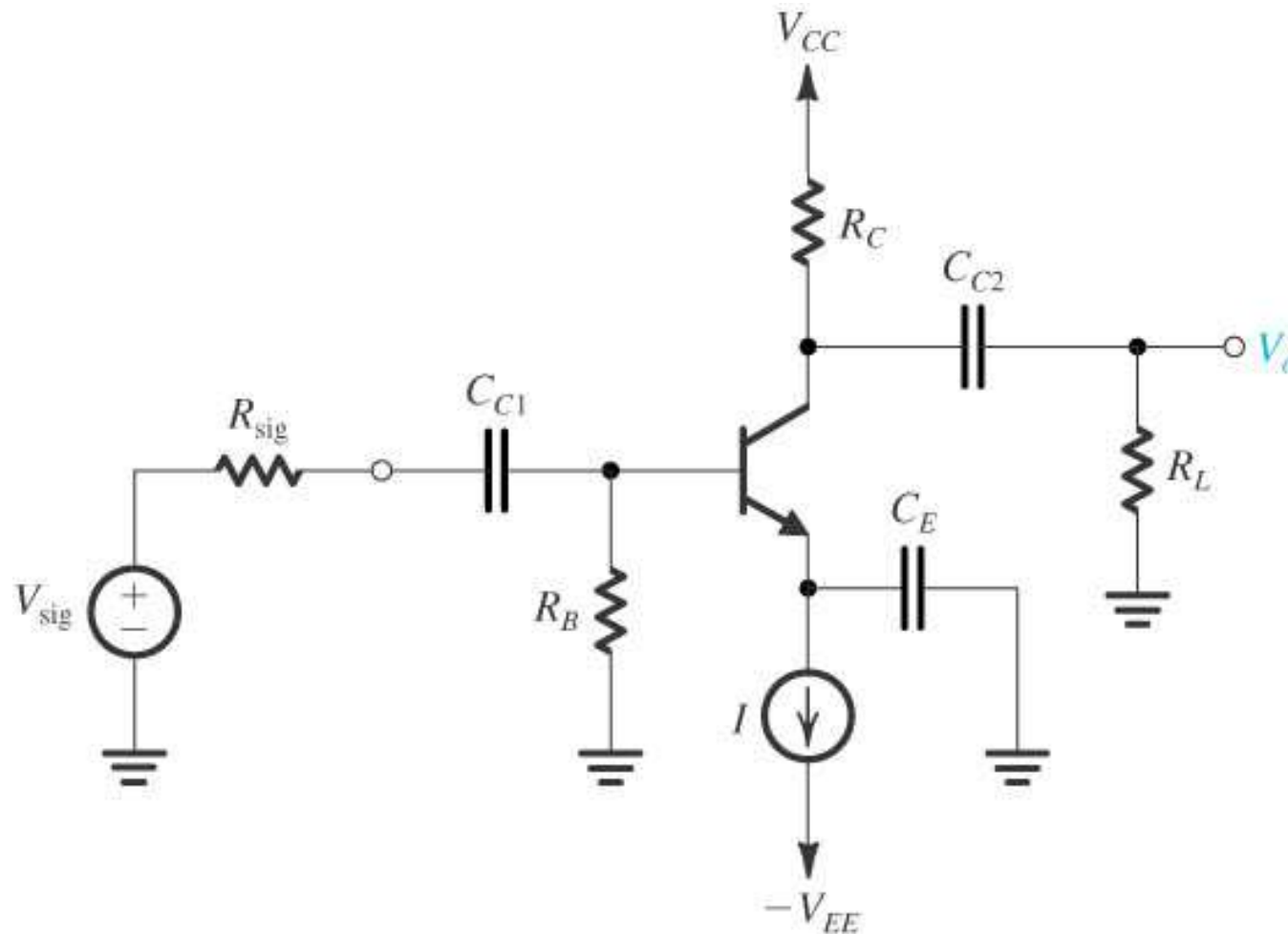
7ª Aula:

Parte 2 : Resposta em Altas Frequências de Amplificadores TBJ - EC

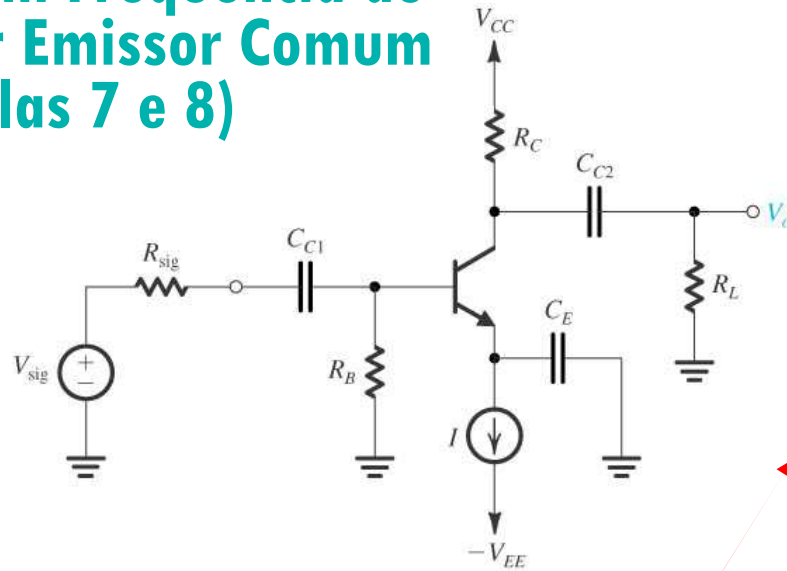
Ao final da 7ª aula você deverá estar apto a:

- **Explicar o comportamento em frequência de amplificadores envolvendo transistores (TBJ e FET)**
- **Explicar o comportamento do TBJ em altas frequências**
- **Traçar a resposta em frequência do Amplificador TBJ – EC na faixa de altas frequências, determinando a frequência de corte superior de operação**

Resposta em frequência do Amplificador Emissor Comum



Resposta em Frequência do Amplificador Emissor Comum (Aulas 7 e 8)



$$R_{in} = R_B \parallel r_{\pi} = R_B \parallel (\beta + 1)r_e$$

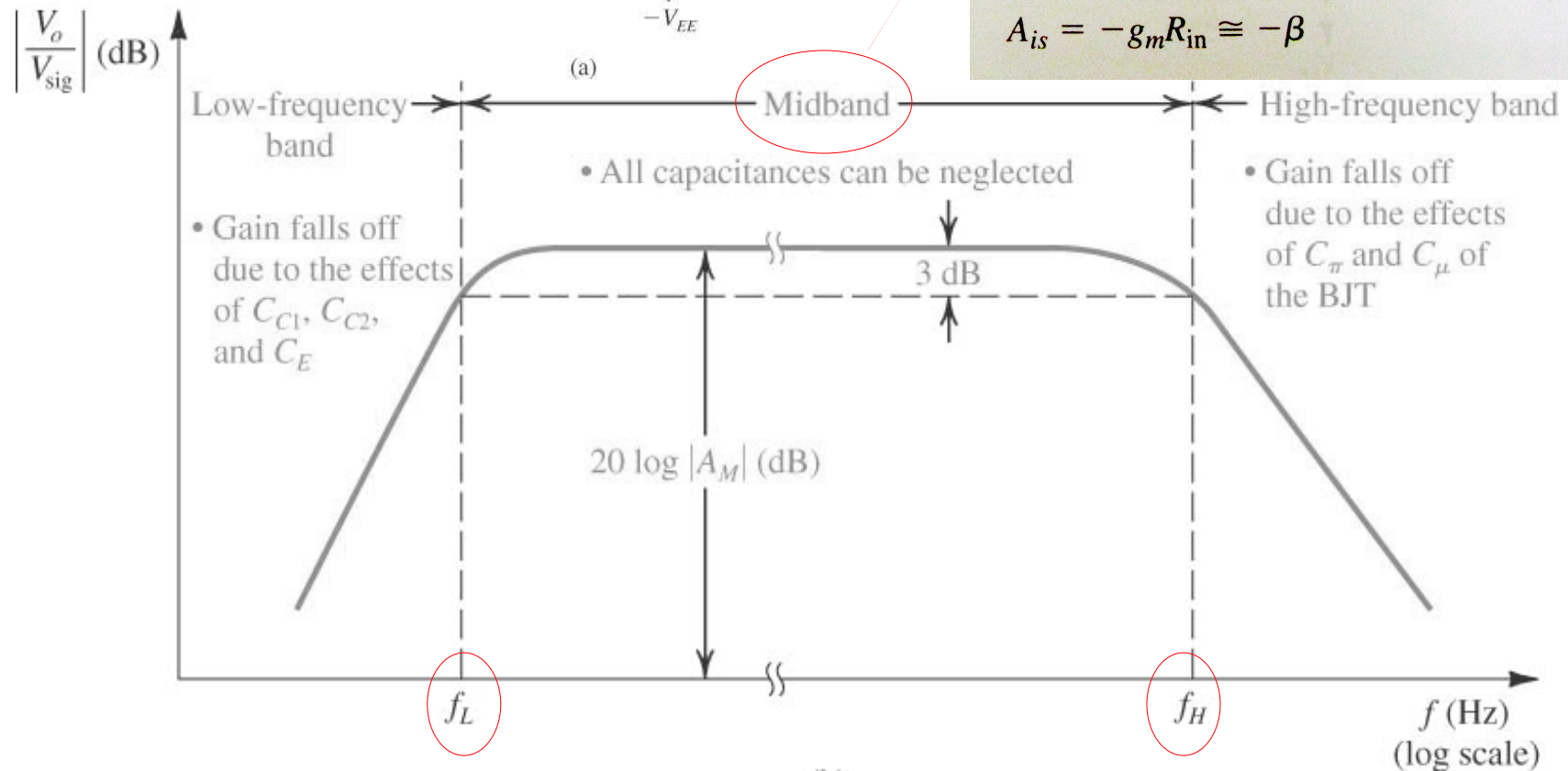
$$A_v = -g_m(r_o \parallel R_C \parallel R_L)$$

$$R_{out} = r_o \parallel R_C$$

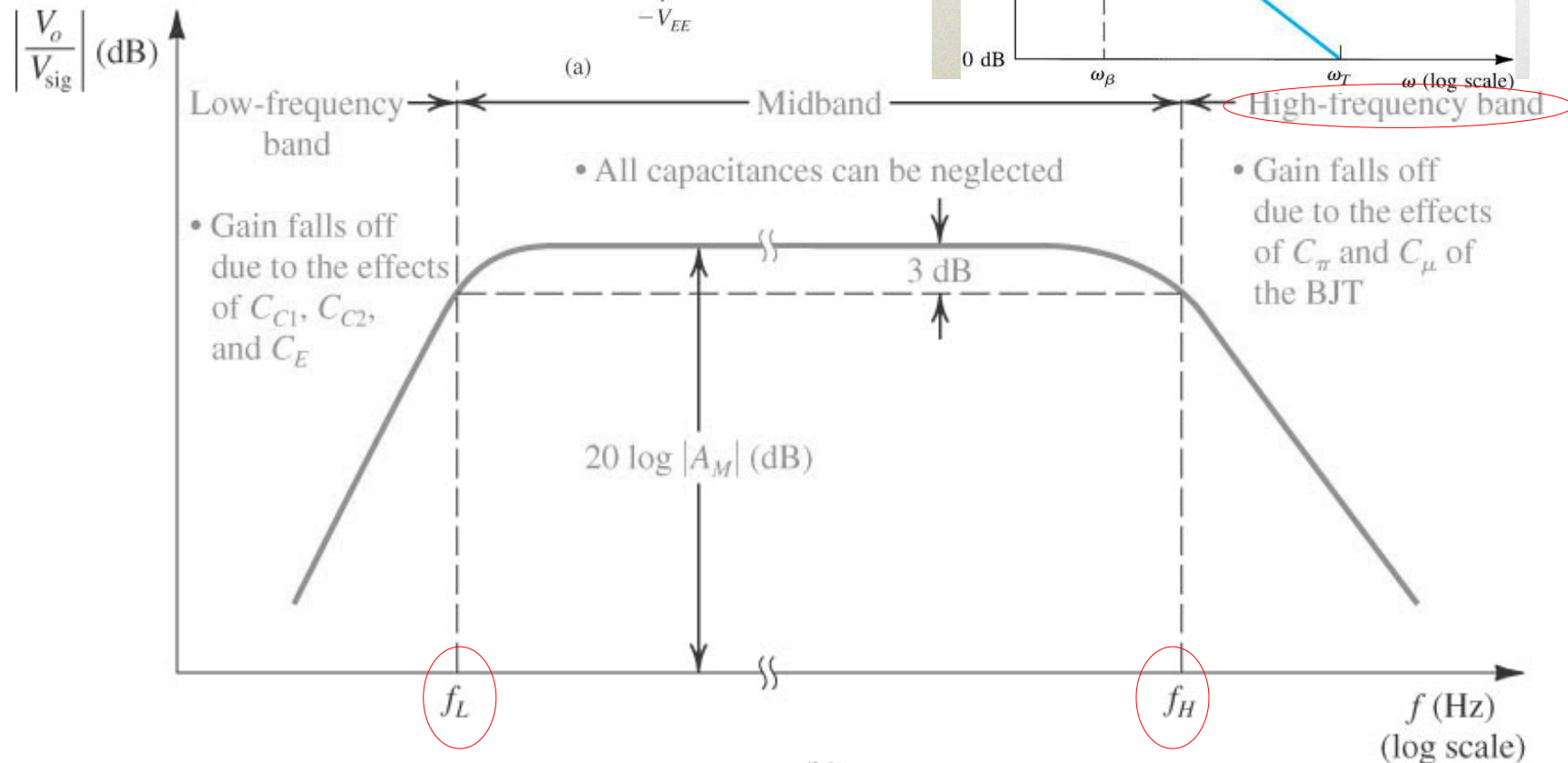
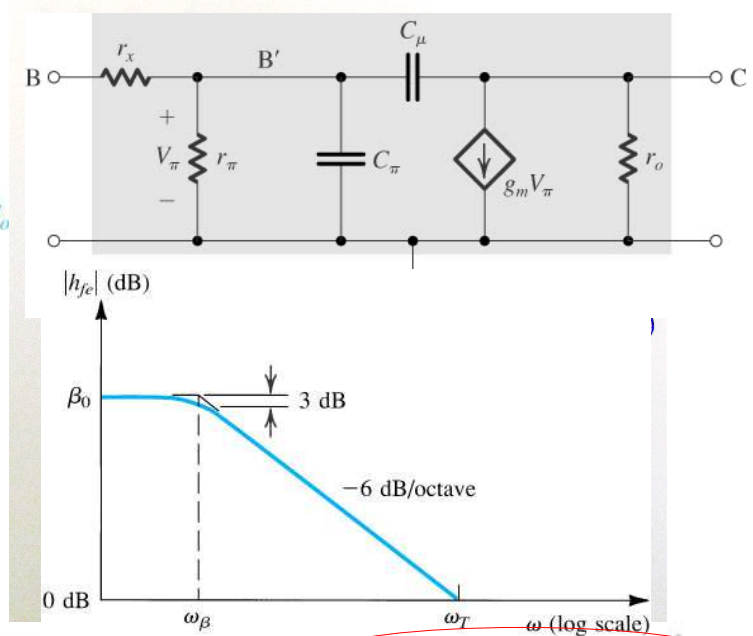
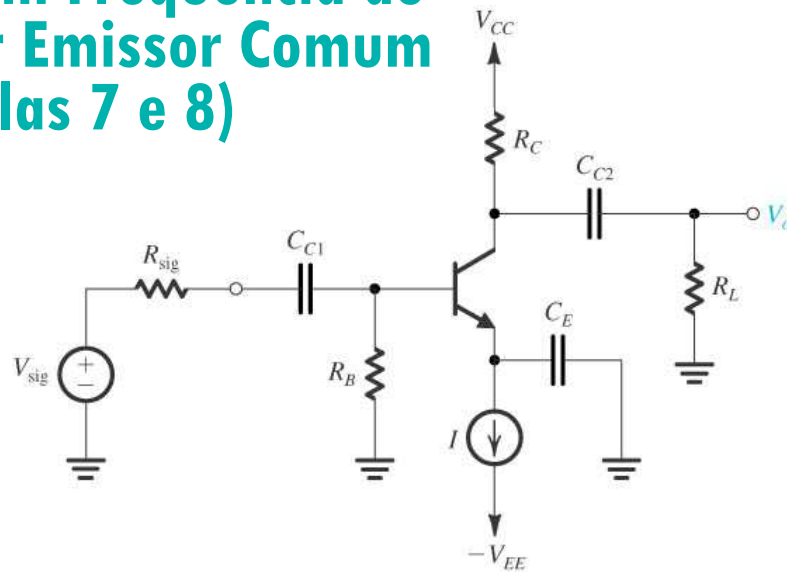
$$G_v = -\frac{(R_B \parallel r_{\pi})}{(R_B \parallel r_{\pi}) + R_{sig}} g_m(r_o \parallel R_C \parallel R_L)$$

$$\cong -\frac{\beta(r_o \parallel R_C \parallel R_L)}{r_{\pi} + R_{sig}}$$

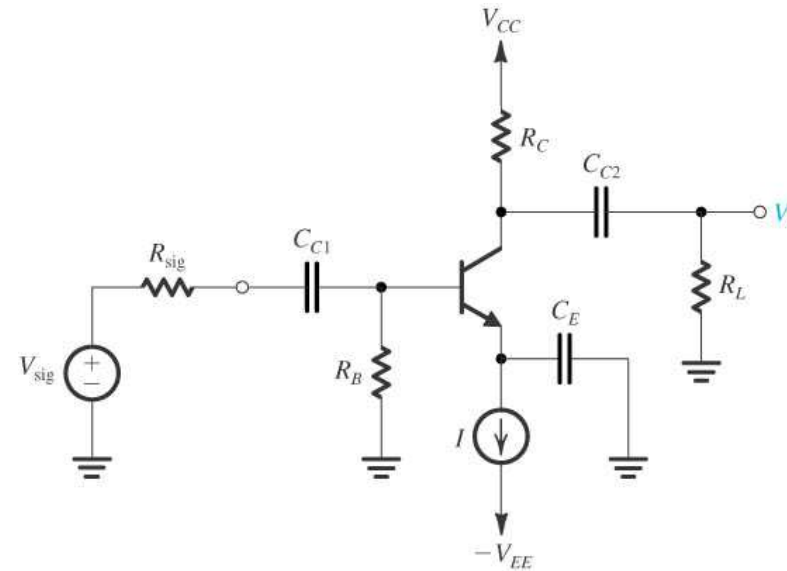
$$A_{is} = -g_m R_{in} \cong -\beta$$



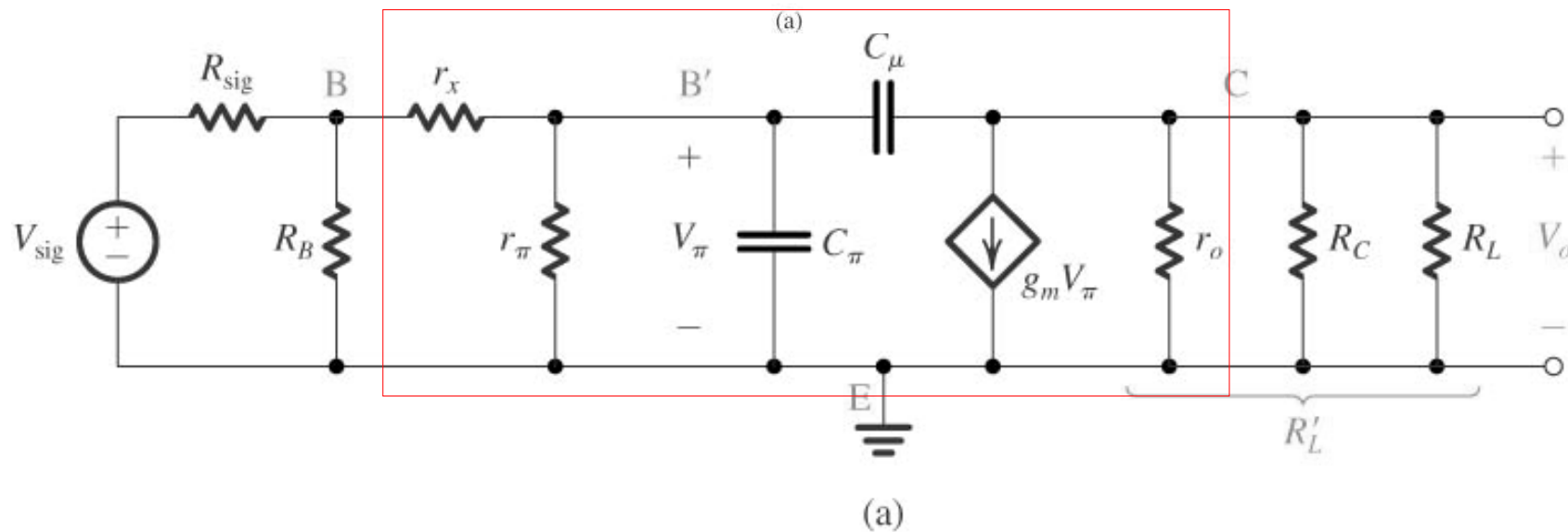
Resposta em Frequência do Amplificador Emissor Comum (Aulas 7 e 8)



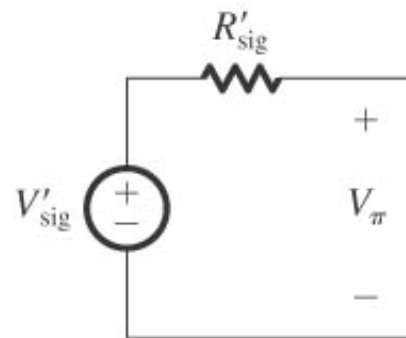
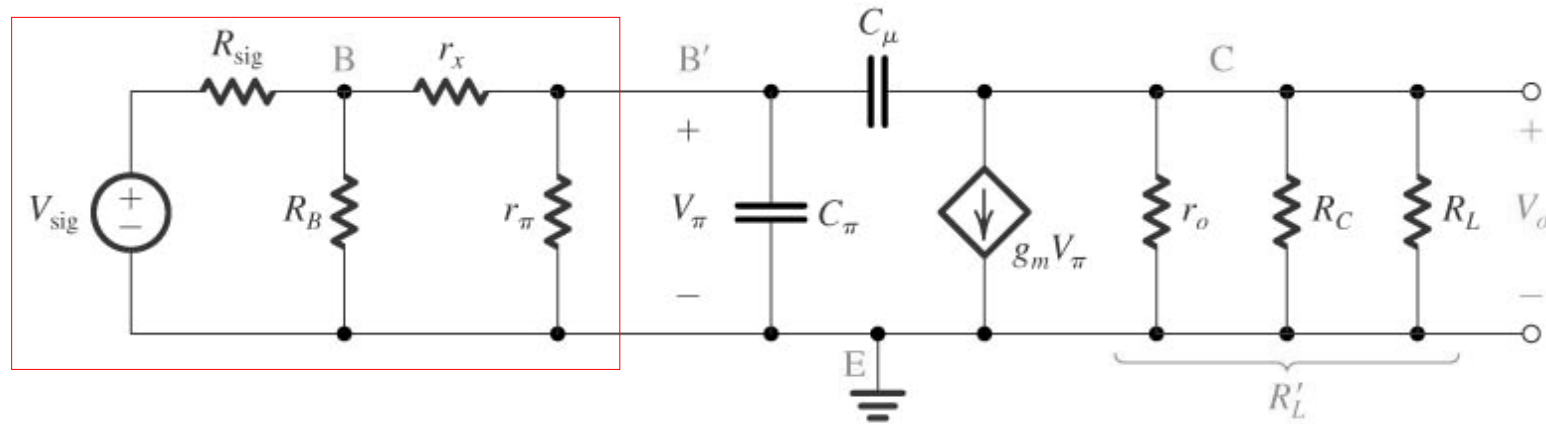
Resposta em frequência do Amplificador Emissor Comum em Altas Frequências



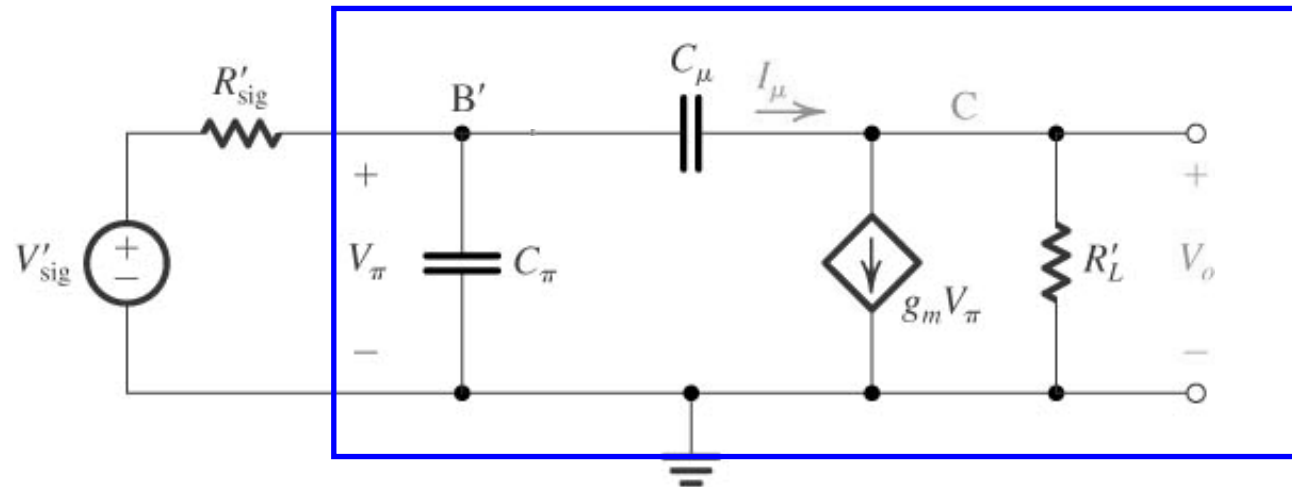
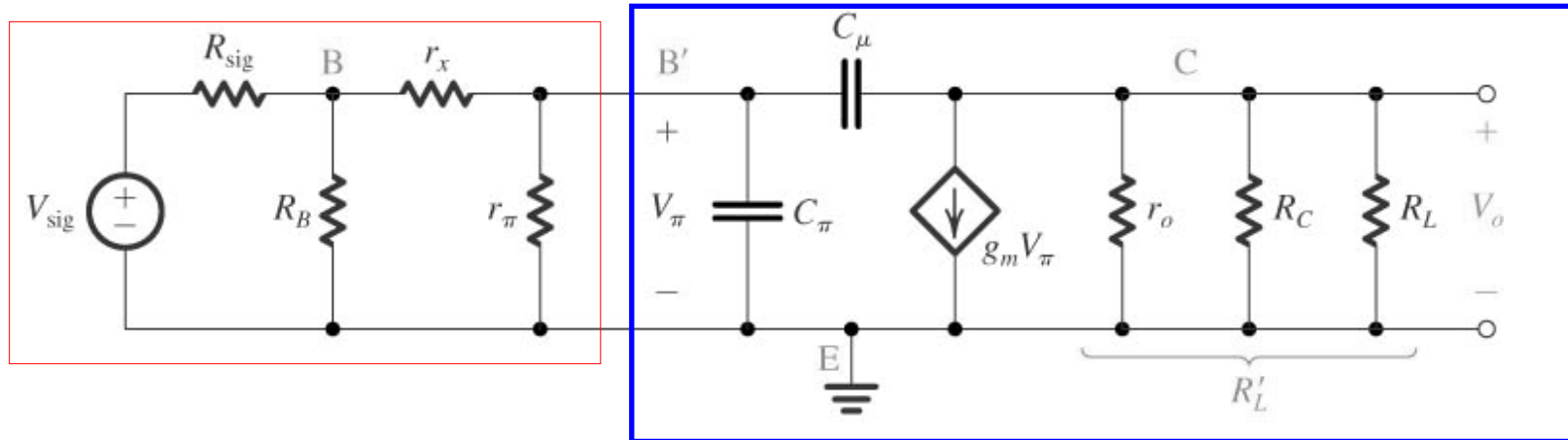
Qual o Ganho de Tensão?



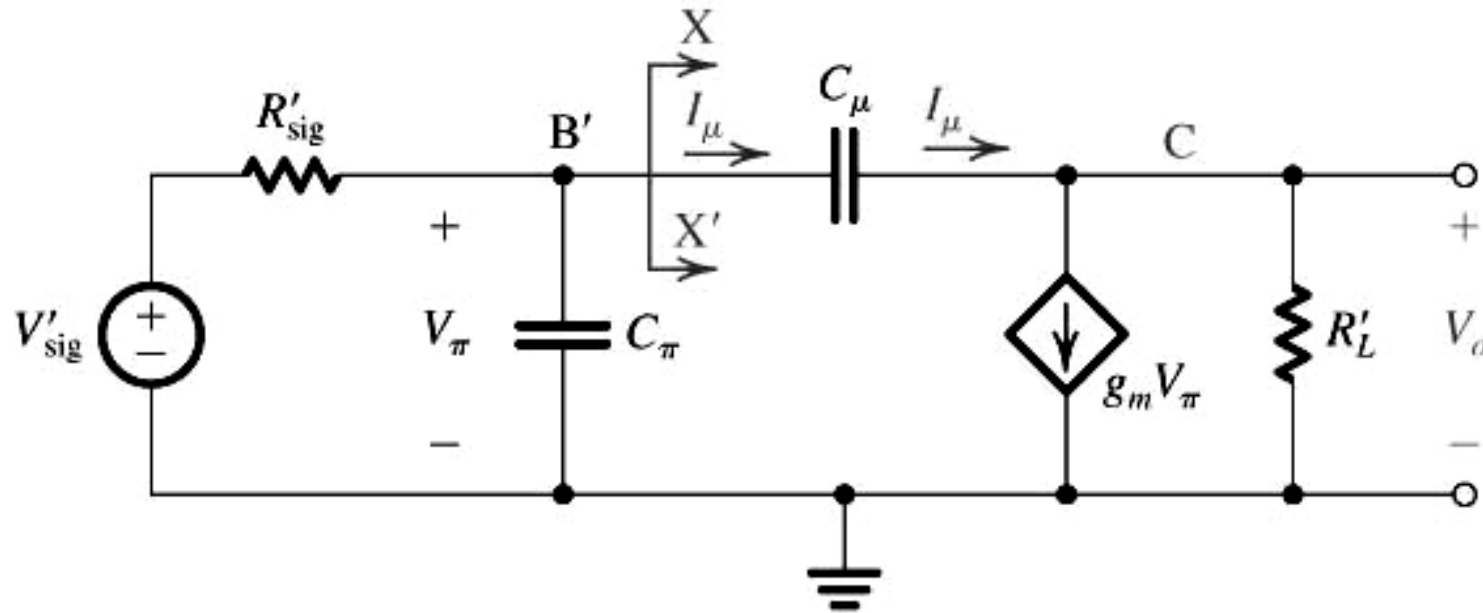
Resposta em frequência do Amplificador Emissor Comum em Altas Frequências



Resposta em frequência do Amplificador Emissor Comum em Altas Frequências



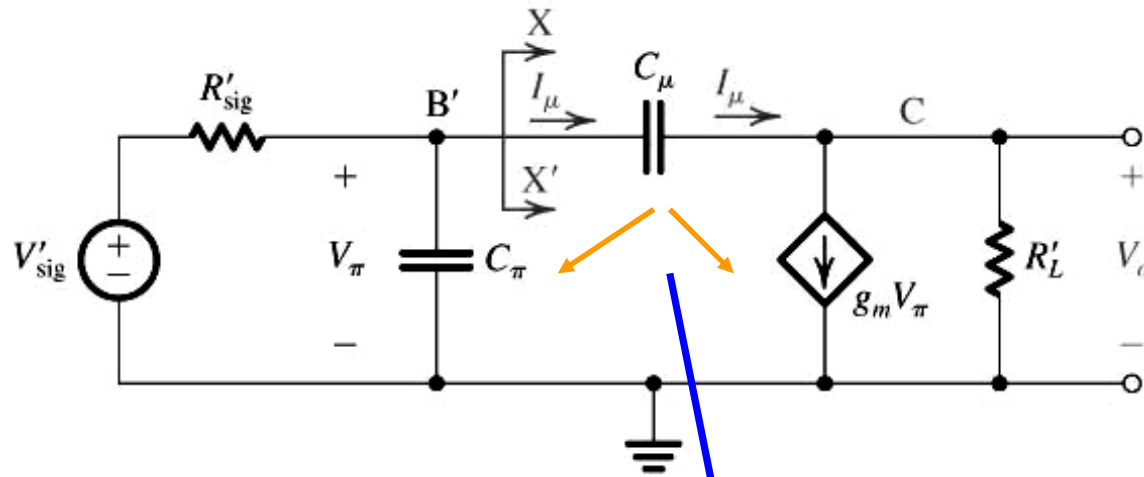
Resposta em frequência do Amplificador Emissor Comum em Altas Frequências



f médias e em f_H , $I_\mu \ll g_m V_\pi \Rightarrow V_O \cong -g_m R'_L V_\pi$

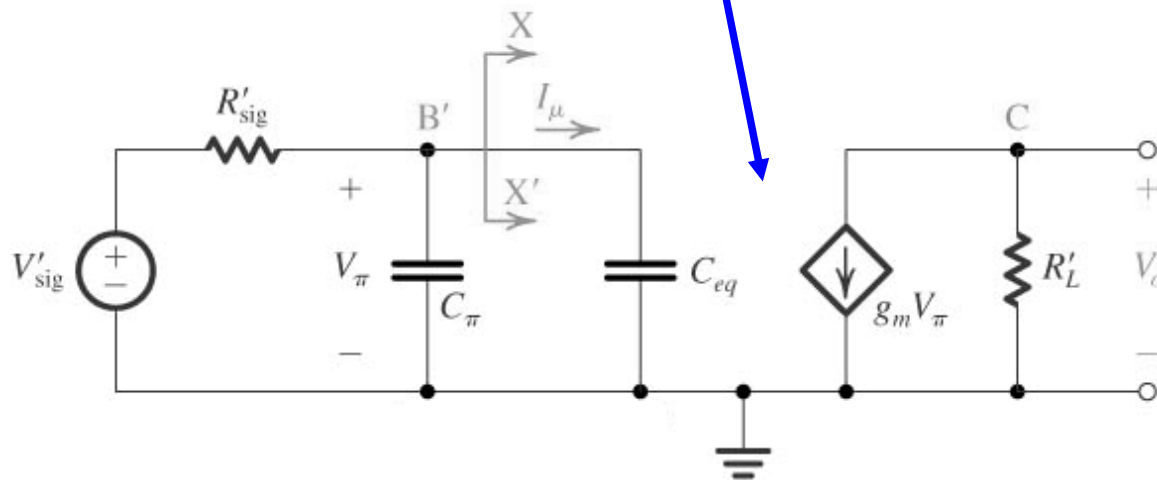
Para determinar o ganho de tensão, qual a relação entre V_π e V'_{sig} ?

Resposta em frequência do Amplificador Emissor Comum em Altas Frequências



$$V_o \cong -g_m R'_L V_\pi$$

$$\rightarrow K = -g_m R'_L$$



$$C_{in} = C_\pi + C_{eq}$$

$$= C_\pi + C_\mu(1 + g_m R'_L)$$

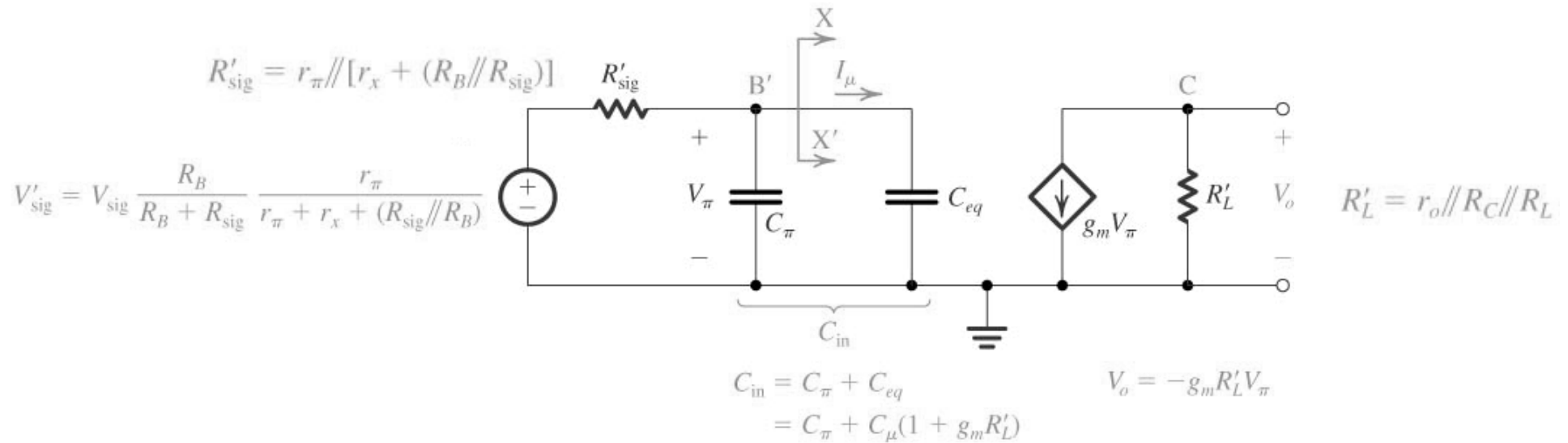
$$V_o = -g_m R'_L V_\pi$$

$$Z_1 = Z_{eq} = \frac{1/sC_\mu}{(1 - (-g_m R'_L))} = \frac{1}{sC_\mu(1 + g_m R'_L)}$$

$$C_{eq} = C_\mu(1 + g_m R'_L)$$

(c)

Resposta em frequência do Amplificador Emissor Comum em Altas Frequências



$$V_{\pi} = V'_{sig} \frac{1}{1 + s / \omega_0} = V'_{sig} \frac{1}{1 + s C_{in} R'_{sig}}$$

$$V'_{sig} = V_{sig} \frac{R_B}{R_B + R_{sig}} \frac{r_{\pi}}{r_{\pi} + r_x + (R_{sig} // R_B)} \quad e \quad V_o = -g_m R'_L V_{\pi}$$

$$\frac{V_o}{V_{sig}} = \left[\frac{R_B}{R_B + R_{sig}} \frac{r_{\pi} \cdot g_m R'_L}{r_{\pi} + r_x + (R_{sig} // R_B)} \right] \frac{1}{1 + s C_{in} R'_{sig}}$$

Resposta em frequência do Amplificador Emissor Comum em Altas Frequências

$$\frac{V_O}{V_{sig}} = \left[\frac{R_B}{R_B + R_{sig}} \frac{r_\pi \cdot g_m R'_L}{r_\pi + r_x + (R_{sig} // R_B)} \right] \frac{1}{1 + s C_{in} R'_{sig}}$$

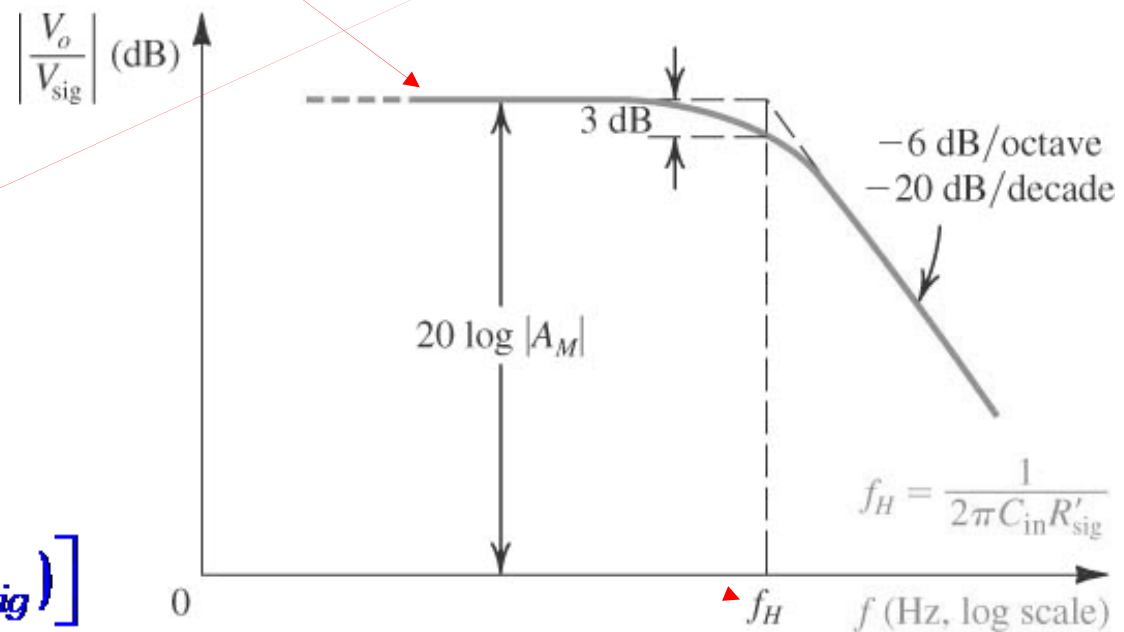
A_M (dB)

$$f_H = \frac{1}{2\pi C_{in} R'_{sig}}$$

$$C_{in} = C_\pi + C_\mu (1 + g_m R'_L)$$

$$R'_{sig} = r_\pi // [r_x + (R_B // R_{sig})]$$

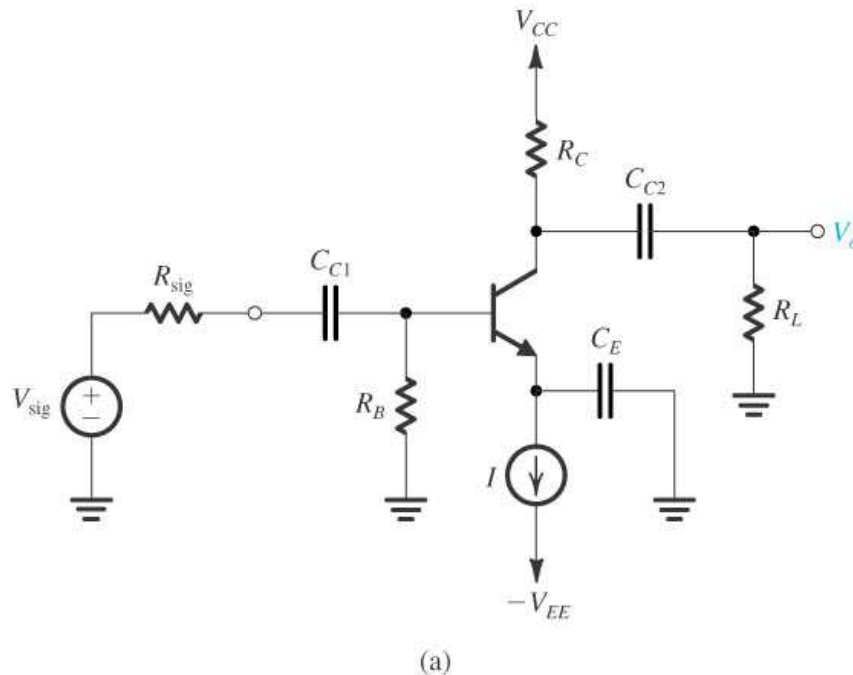
$$R'_L = [r_o // R_C // R_L]$$



(d)

Resposta em frequência do Amplificador Emissor Comum

Exemplo 5.18 (p.309)



$$R_C = 8\text{k}\Omega$$

$$R_B = 100\text{k}\Omega$$

$$R_L = 5\text{k}\Omega$$

$$R_{sig} = 5\text{k}\Omega$$

$$\beta_0 = 100$$

$$V_{CC} = V_{EE} = 10\text{V}$$

$$I = 1\text{mA}$$

$$r_x = 50\Omega$$

$$f_T = 800\text{MHz}$$

$$V_A = 100\text{V}$$

$$C_\mu = 1\text{pF}$$

$$A_M ?$$

$$f_H ?$$

Exemplo 5.18 Resolução

- O transistor está polarizado com $I_C \cong 1 \text{ mA}$. Portanto, os valores de seus parâmetros para o modelo ρ -híbrido são

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{1 \text{ mA}}{25 \text{ mV}} = 40 \text{ mA/V} \quad C_{\pi} + C_{\mu} = \frac{g_m}{\omega_T} = \frac{40 \times 10^{-3}}{2\pi \times 800 \times 10^6} = 8 \text{ pF}$$

$$r_{\pi} = \frac{\beta_0}{g_m} = \frac{100}{40 \text{ mA/V}} = 2.5 \text{ k}\Omega \quad C_{\mu} = 1 \text{ pF}$$

$$r_o = \frac{V_A}{I_C} = \frac{100 \text{ V}}{1 \text{ mA}} = 100 \text{ k}\Omega \quad C_{\pi} = 7 \text{ pF}$$

$$r_x = 50 \text{ }\Omega$$

O ganho de tensão em frequências médias é $A_M = -\frac{R_B}{R_B + R_{\text{sig}}} \frac{r_{\pi}}{r_{\pi} + r_x + (R_B \parallel R_{\text{sig}})} g_m R'_L$

Com $R'_L = r_o \parallel R_C \parallel R_L \cong (100 \parallel 8 \parallel 5) \text{ k}\Omega = 3 \text{ k}\Omega$

Portanto, $g_m R'_L = 40 \times 3 = 120 \text{ V/V}$ e, $A_M = -\frac{100}{100 + 5} \times \frac{2.5}{2.5 + 0.05 + (100 \parallel 5)} \times 120$
 $= -39 \text{ V/V}$ ou, $20 \log |A_M| = 32 \text{ dB}$

Para determinar f_H primeiro devemos encontrar C_{in} : $C_{\text{in}} = C_{\pi} + C_{\mu} (1 + g_m R'_L)$
 $= 7 + 1(1 + 120) = 128 \text{ pF}$

e, a resistência efetiva de fonte R'_{sig} :

$$R'_{\text{sig}} = r_{\pi} \parallel [r_x + (R_B \parallel R_{\text{sig}})] = 2.5 \parallel [0.05 + (100 \parallel 5)] = 1.65 \text{ k}\Omega$$

Portanto, $f_H = \frac{1}{2\pi C_{\text{in}} R'_{\text{sig}}} = \frac{1}{2\pi \times 128 \times 10^{-12} \times 1.65 \times 10^3} = 754 \text{ kHz}$



CAPITULO 5

Amplificadores com Transistores TBJs

Aula 8

PSI 2306 – Eletrônica

Programação para a Primeira Prova

Aula	Matéria	Capítulo/ página (inglês)
1 ^a	Revisão de transistor bipolar de junção - TBJ (funcionamento interno e expressões básicas) - Exemplo 5.4 O TBJ como amplificador para pequenos sinais (as condições c.c., a corrente de coletor e a transcondutância)	Sedra, Cap. 5, p. 235-240 (277-285); p. 263-264 (421-423); p. 275-276 (443-445).
2 ^a	A corrente de base e a resistência de entrada da base, a resistência de entrada do emissor. Ganho de tensão, Exemplo 5.38, modelos equivalentes (modelos π -híbrido e T)	Sedra, Cap. 5, p. 276-279 (445-450)
3 ^a	Aplicação dos modelos equivalentes para pequenos sinais, Efeito Early, Exemplo 5.14 O amplificador emissor comum (EC) - Exercício 5.43	Sedra, Cap. 5 p. 290-293 (467-470)
4 ^a	O amplificador em emissor comum com resistência de emissor. Exercício 5.44	Sedra, Cap. 5 p. 293-296 (470-474)
5 ^a	O amplificador em base comum. O Amplificador em coletor comum. Exercício 5.47	Sedra, Cap. 5 p. 296-301 (475-484)
6 ^a	Resposta em frequência dos circuitos RC Pólos e zeros, funções de primeira ordem, curvas de Bode (pólo simples, zero simples). Exemplo E.1, exemplo E.2	Sedra, Apend. D, p. 823-825 (D6-D9) Sedra, Apend. E, p.830-833 (E1-E6)
7 ^a	Teorema de Miller. Exemplo 6.7 Resposta em alta frequência do Emissor Comum Exemplo 5.18	Sedra, Cap. 6, p. 363-364 (578-580) Sedra, Cap. 5, p. 306-310 (491-497)
8 ^a	Resposta em baixa frequência do Emissor Comum Exemplo 5.19	Sedra, Cap. 5, p. 310-314 (497-503)
9 ^a	Resposta em alta e baixa frequência do Fonte Comum Exemplo 4.12	Sedra, Cap. 4, p. 202-208 (326-335)
10 ^a	Aula de Exercícios	
1^a. Semana de provas		
Data:		

8ª Aula:

Resposta em Baixas Frequências de Amplificadores TBJ - EC

Ao final da 8ª aula você deverá estar apto a:

- Traçar a resposta em frequência do Amplificador TBJ – EC na faixa de baixas frequências, determinando a frequência de corte inferior de operação**
- Empregar a análise para baixas frequências em outras configurações de amplificador (com transistores e amplificadores operacionais)**

Resposta em frequência do Amplificador Emissor Comum em Baixas Frequências

