

Capítulo

3

NOTAS DE AULA, REV 2.0 – UERJ 2024 – FLÁVIO ALENCAR DO RÊGO BARROS

Eletrônica 1

Transistores – Análise AC

© Flávio Alencar do Rego Barros
Universidade do Estado do Rio de Janeiro
E-mail: falencarb@gmail.com

Estas notas de aulas se destinam a reduzir o trabalho de cópia do aluno durante as aulas, mas também oferecer material de apoio na forma de exercícios propostos (sempre em anexo ao final de cada capítulo teremos a lista de exercícios) e referências onde o aluno poderá complementar seu estudo. É importante perceber que este material NÃO esgota o que o aluno deve ler durante o curso, nem mesmo substitui a participação em sala de aula, devendo ser encarado apenas como material de apoio. Neste sentido, é fortemente indicado que cada aluno mantenha sua cópia em papel do assunto que se abordará em cada aula.

Neste Capítulo 3 o Anexo C é a lista de exercícios.

A estas notas de aula se somam os guias de laboratório, estes fornecidos em arquivos à parte.

Índice do capítulo 3:

Conteúdo

3.1. Modelo de Pequenos Sinais e Análise AC	67
3.1.1 Parâmetros híbridos e outras montagens	71
3.2 Seguidor de Emissor	72
Análise de impedância (vista da base).....	72
Análise de ganho	74
Impedância de saída.....	74
SE - Projeto completo.....	75
Anexo C - 3 ^a . LISTA	i

Cap.3 – Amplificadores com Transistores

Um amplificador completo tem o seguinte aspecto:

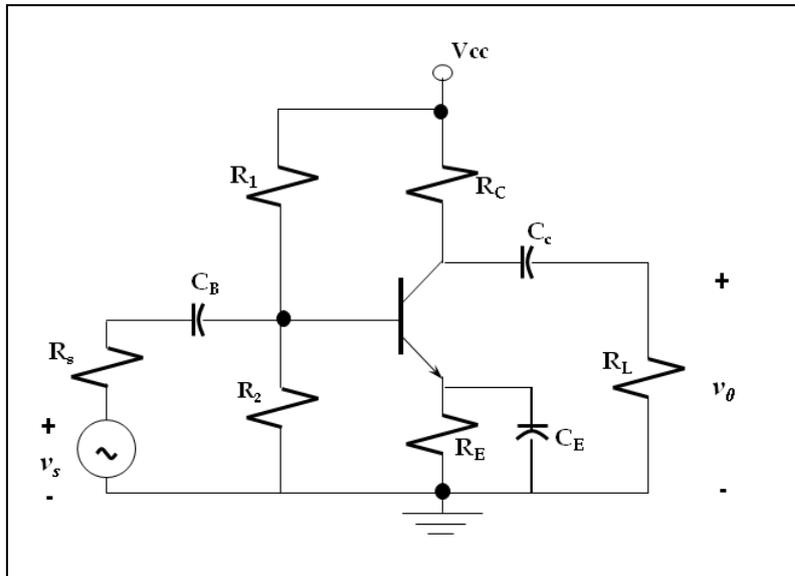


Figura 107- Amplificador completo

Os capacitores C_B e C_C se prestam a desacoplar, respectivamente, fonte de sinal e carga. O capacitor C_E é o capacitor de *bypass*,

responsável por “curtar” em AC o elemento R_E , que, se estivesse presente, reduziria o ganho obtido. O resistor R_E serve para compartilhar com R_C a tarefa de selecionar um ponto P conveniente, mas ele deve ser retirado da análise AC, pois comprometeria o ganho. A idéia geral é que os capacitores “fechem” com AC e “abram” com DC.

3.1. Modelo de Pequenos Sinais e Análise AC

Para a montagem mais popular, a montagem emissor comum (EC), o modelo de

pequenos sinais é descrito em termos de seus parâmetros híbridos, onde h_{fe} é o parâmetro β do transistor que já analisamos.

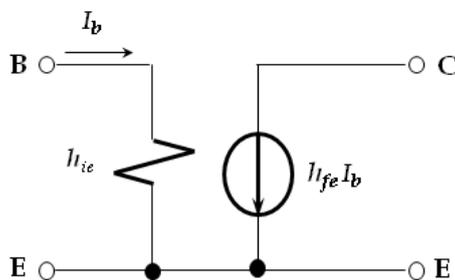
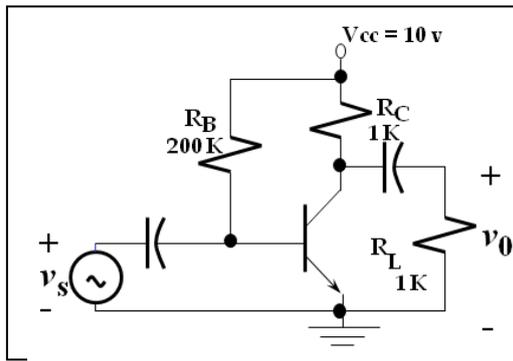


Figura 108- Modelo EC pequenos sinais simplificado

Exemplo: Para o circuito abaixo:



Calcule o ponto P ($\beta = 100$)

a) Trace a reta AC e ache o ganho, usando o modelo para pequenos sinais.

b) Desenhe $v_o(t)$ se:

i) $v_s = 25\text{ mV}$

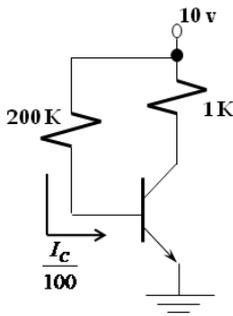
ii) $v_s = 50\text{ mV}$ (senóide)

Figura 109- Amplificador autopolarização

Obs: Desconsidere resistência da fonte e $V_{BEATIVA}$ e considere $h_{ie} = 0.5\text{ K}\Omega$.

Resp.:

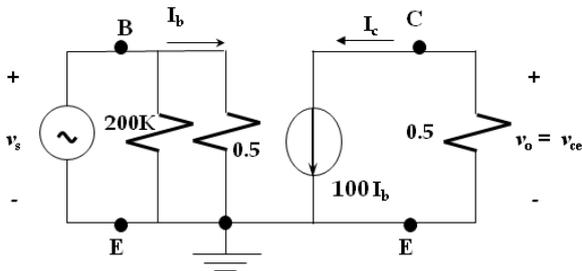
a)



$$10 = 200 \cdot \frac{I_C}{100} \Rightarrow I_C = 5\text{mA} \Rightarrow V_{CE} = 5\text{volts (ponto P)}$$

Figura 110- Autopolarização – ponto P

b)



$$v_s = 0.8I_b \quad v_o = -100I_b \cdot 0.5 \quad \therefore$$

$$v_o = -100 \cdot \frac{v_s}{0.5} \cdot 0.5 \quad \therefore A_{V_s} = \frac{v_o}{v_s} = -100$$

Figura 111- Autopolarização – ganho

Reta AC: $v_{ce} = -i_c (R_C // R_L) = -0.5K i_c$. Graficamente:

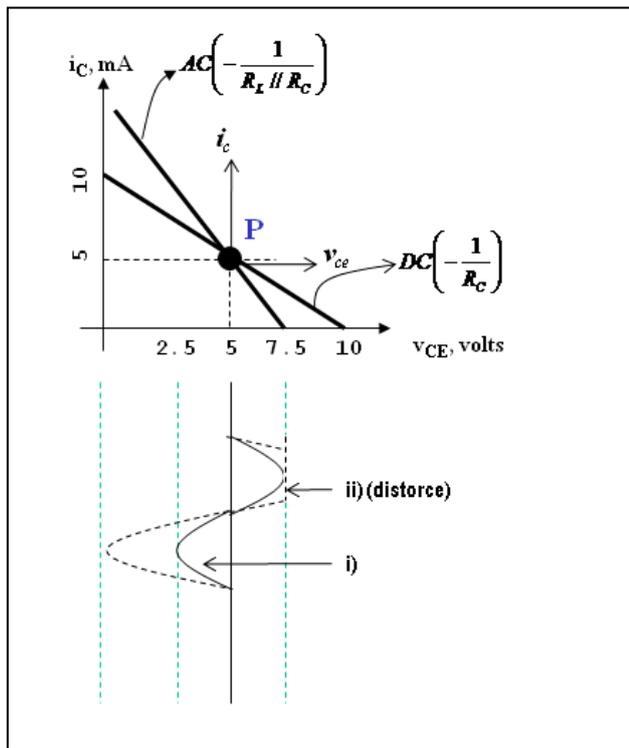


Figura 112- Autopolarização – gráficos

Se $i_c = -5 \text{ mA}$:

$$v_{ce} = -0.5K(-5 \cdot 10^{-3}) = 2.5v, \text{ então:}$$

$$V_{CE} = v_{ce} + V_{CE} = 2.5 + 5.0 = 7.5v$$

c) i) $v_s = 25mV \Rightarrow v_o = 2.5v$ (pico)

ii) $v_s = 50mV \Rightarrow v_o = 5v$ (pico)

Observe também que em primeira aproximação o valor de h_{ie} pode ser calculado

por: $h_{ie} = \frac{h_{fe} V_T}{I_C}$, onde $V_T = 25 \text{ mV}$, I_C corrente de polarização. Neste caso:

$$h_{ie} = \frac{100 \cdot 25}{5} = 500\Omega$$

□

Observe ainda que o ponto P ótimo agora se dá no meio do caminho entre saturação ($V_{CE} \cong 0$) e a interceptação do eixo horizontal com a reta AC (e não DC, como sugerido anteriormente!). Alternativamente, o ponto P ótimo poderá ser calculado assim:

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC_{total}}}{R_{DC} + R_{AC}}$$

Exemplo: Achar a polarização ótima. (V_{BE} e $V_{CESAT} = 0$; $\beta = 100$)

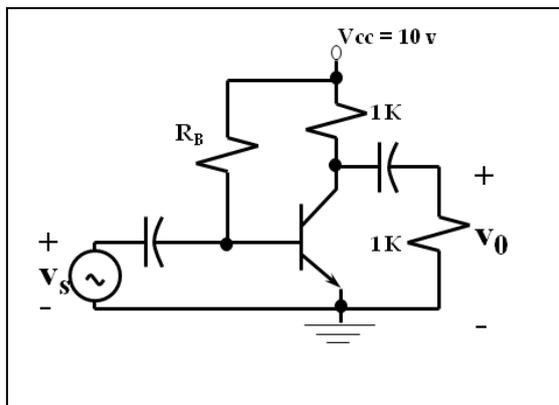


Figura 113- Polarização ótima

$$\text{Resp.: } I_{CQ} = \frac{20}{3} \text{ mA} \quad V_{CEQ} = \frac{10}{3} \text{ volts}$$

Este método pode ajudar na hora de escolher β mais adequado em circuitos mais complexos. Perceba que com I_{CQ} , temos o valor de h_{ie} .

Nesta altura você deve perceber que o conceito de um “bom” ponto P mudou, desde o capítulo de análise DC até aqui. Perceba que importa para sua escolha saber qual é a carga utilizada! Em última análise, é a reta de carga AC, e não a DC, que determina o bom ponto P. Perceba ainda que SEMPRE a inclinação da reta AC é maior que a da reta DC, significando que a excursão de sinal com a carga será mais restrita do que sem carga.

3.1.1 Parâmetros híbridos e outras montagens

As montagens BC e CC são menos freqüentes, mas igualmente podem ser descritas em termos de parâmetros híbridos. Valores típicos de parâmetros híbridos:

Parâmetro	EC	CC	BC
h_i	1K Ω	1K Ω	20K Ω
h_r	2.5×10^{-4}	1	3.0×10^{-4}
h_f	50	-50	-0.98
h_o	25 μ A/V	25 μ A/V	0.5 μ A/V
$1/h_o$	40K Ω	40K Ω	2M Ω

EC e BC, via de regra, desprezíveis

Algumas vezes considerado aberto

Dependência dos parâmetros com temperatura:

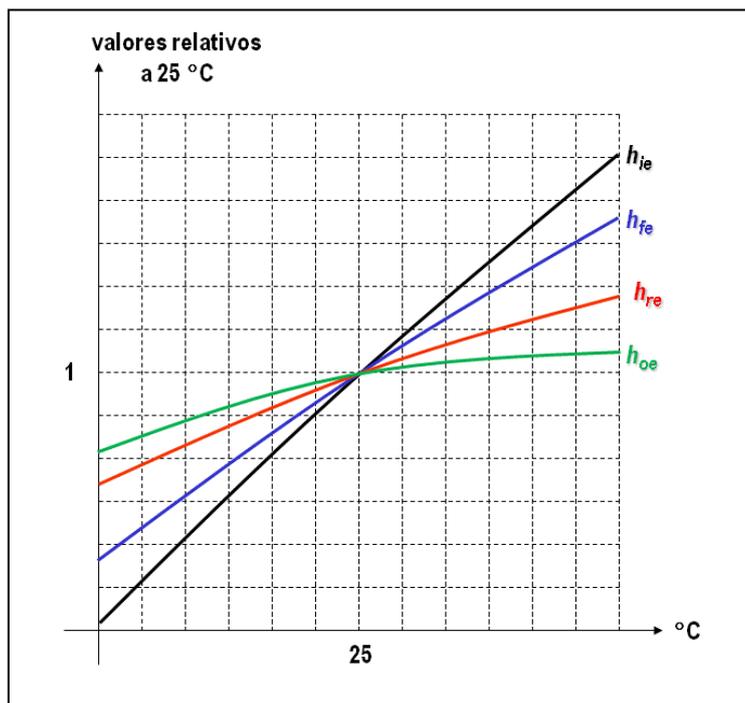
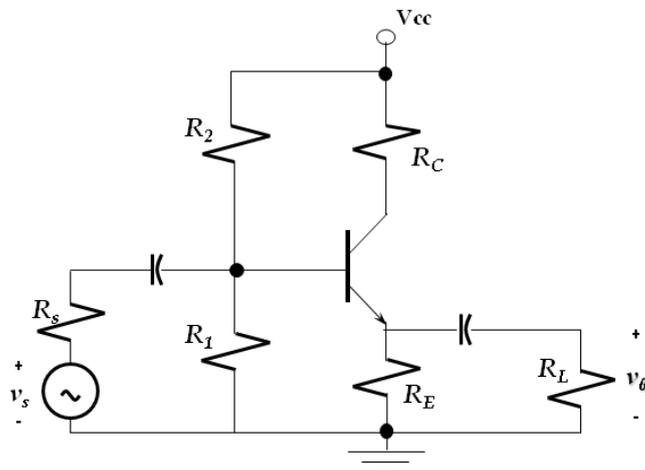


Figura 114- Parâmetros híbridos

3.2 Seguidor de Emissor

A configuração CC é a mais útil na aplicação seguidor de emissor. É um dos poucos circuitos a BJT onde a saída é colhida no emissor.



Pode ou não existir R_C . Este não faz nenhuma diferença. Por simplicidade faremos em aula o circuito SEM R_C . Também por simplicidade, consideraremos fonte ideal, sem R_S .

Ganho ≈ 1 sem inversão.

Alta impedância de entrada.

Figura 115- Seguidor de emissor

Análise de impedância (vista da base)

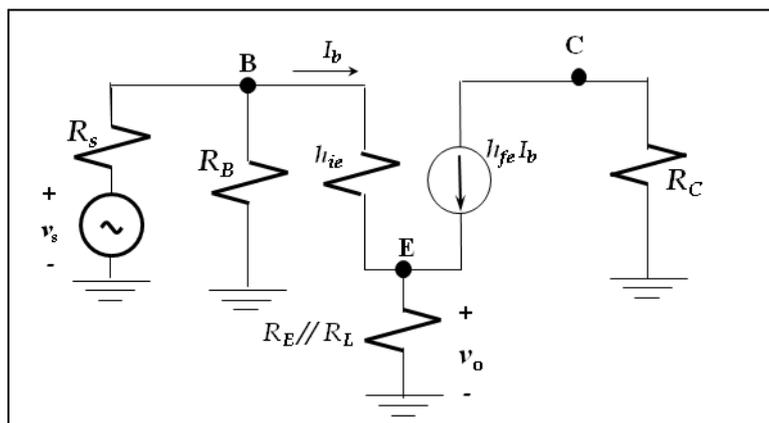
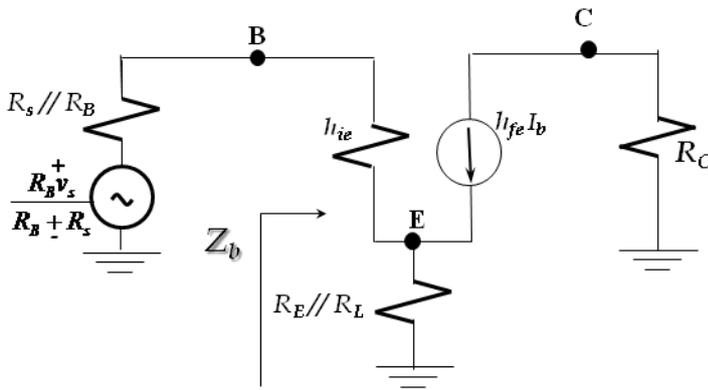


Figura 116- SE – modelo AC



Aplicando Thevenin na Base:

Figura 117- SE – modelo AC (cont.)

$$Z_b = h_{ie} + R_E // R_L (1 + h_{fe})$$

eleva significativamente a impedância de base

Se usarmos valores típicos: $\left\{ \begin{matrix} h_{ie} = 1K\Omega \\ h_{fe} = 99 \\ R_E = R_L = 1K\Omega \end{matrix} \right\} \Rightarrow Z_b = 51K\Omega$, ou seja, usamos aqui um

truque. Dividimos a corrente por $(\beta + 1)$ e multiplicamos a resistência pelo mesmo valor. Por quê? Porque passamos a ter a mesma corrente i_b passando em h_{ie} e na resistência multiplicada por $(\beta + 1)$. Na prática ...

“passamos de 1 KΩ para 51 KΩ”

Observe que a impedância de entrada (sem fonte) fica:

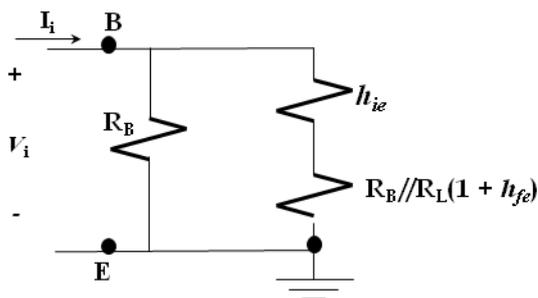


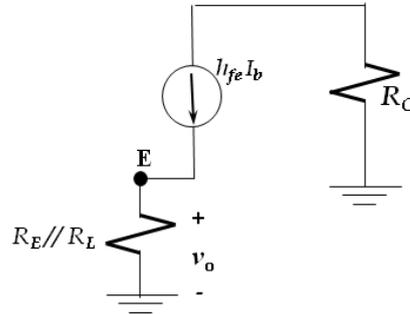
Figura 118- SE – Impedância de entrada

$Z_{in} = R_B // [h_{ie} + R_E // R_L (1 + h_{fe})]$ que será sempre menor que R_B !

Ou seja, aumentar a impedância de base pode não produzir um correspondente aumento na impedância de entrada. Para tratar desta questão existem técnicas como *bootstrapping* (mas não trataremos disto aqui).

Análise de ganho

Figura 119- SE – análise de ganho



$$v_o = (R_E // R_L)(1 + h_{fe})I_b$$

observe que ter ou não ter R_C não é relevante aqui!

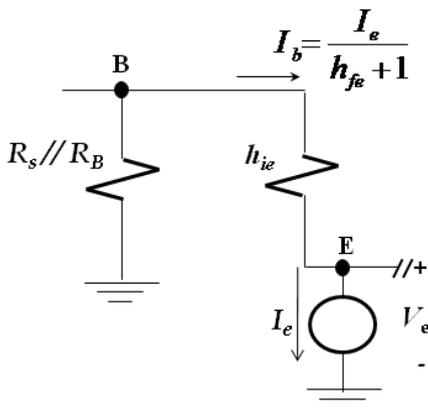
$$V_b = I_b [h_{ie} + R_E // R_L](1 + h_{fe}) \quad e$$

$$V_b = \frac{R_B v_s}{R_s + R_B} - R_s // R_B I_b \quad \therefore$$

$$A_V = \frac{R_B}{R_s + R_B} \cdot \frac{1}{1 + \underbrace{\frac{R_s // R_B + h_{ie}}{R_E // R_L (1 + h_{fe})}}_{\text{tende a zero por causa de } h_{fe}}}$$

Como, via de regra, $R_B \gg R_s$, então: $A_V \approx 1$

Impedância de saída



$$Z_e \equiv \frac{V_e}{I_e} \Big|_{v_s=0}$$

$$V_e = \frac{I_e}{h_{fe} + 1} [R_s // R_B + h_{ie}] \quad \therefore$$

$$Z_e = \frac{R_s // R_B + h_{ie}}{h_{fe} + 1}, \text{ muito baixo devido a } h_{fe}.$$

$$Z_{out} \left(\text{sem carga} \right) = R_E // R_L$$

Figura 120- SE – impedância de saída

Se usarmos valores típicos: $Z_{out} = \underbrace{R_E}_1 // \left[\frac{\overbrace{R_s}^{0.05} // R_B + \overbrace{h_{ie}}^1}{\underbrace{h_{fe} + 1}_{100}} \right] \approx 0.01 \Rightarrow Z_{out} \approx \mathbf{10 \Omega}$

SE - Projeto completo

(na aula faremos uma análise mais simples, mas fica aqui registrado aqui os passos de projeto)

Exemplo: Projetar um seguidor de emissor que satisfaça às especificações:

- $A_v \geq 0.9$ para pequenos sinais
- Tensão de pico de 4 volts na entrada
- $R_s = 100 \Omega$
- R_L (com acoplamento AC) = 50Ω
- $100 \leq h_{fe} \leq 200$ (continua)
- $V_{cc} = 15$ volts
- $V_{CESAT} = 1$ volt

Solução:

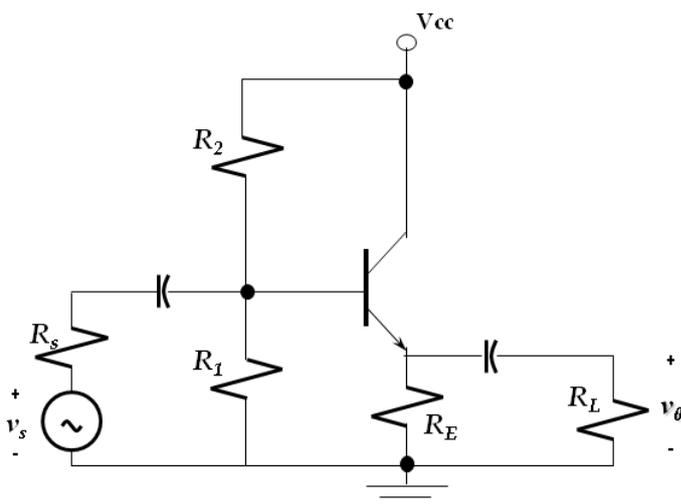
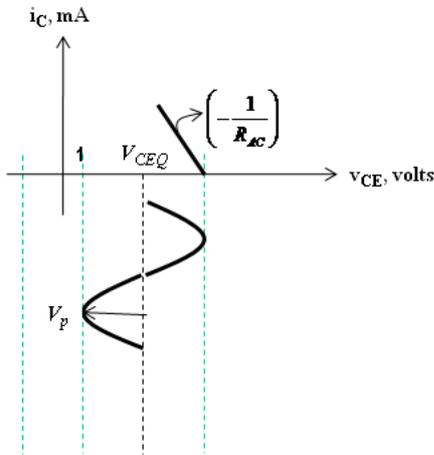


Figura 121- SE – projeto completo

$$R_{AC} = R_E // 0.05$$

Para ponto P ótimo:

1) Excursão máxima:



excursão máxima =

$$= R_{AC} I_{CQ} = V_p + 1 = 4 \therefore I_{CQ} \cdot \frac{0.05 R_E}{R_E + 0.05} = 4$$

$$\Rightarrow R_E = \frac{0.2}{0.05 I_{CQ} - 4} \Rightarrow I_{CQ} > 80 \text{ mA}$$

Figura 122- SE – excursão de sinal

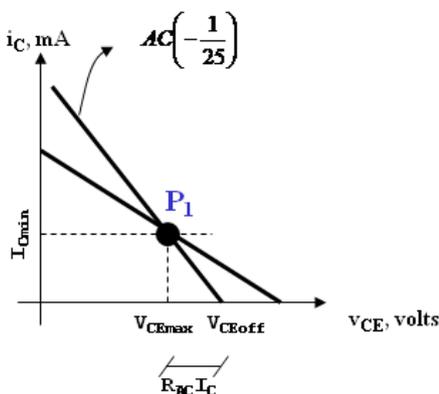
Tabela correspondente:

I_C (mA)	R_E (K Ω)	$R_E I_C$	V_{cc}
90	0.4	36	40
100	0.2	20	24
120	0.1	12	16
130	0.08	10.4	14.4
150	0.057	8.6	12.6

} pouco provável

Escolho $R_E = 50 \Omega \Rightarrow R_{AC} = 25 \Omega$

2) 1º. extremo: perto do corte; $V_{cc} = 15$ volts



DC: $15 = V_{CE} + \underbrace{R_E}_{0.05} I_C$

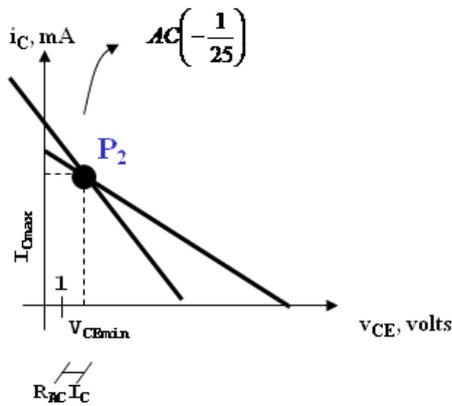
AC: $4 = R_{AC} I_C = 0.025 I_C \Rightarrow I_{C_{MIN}} = 160 \text{ mA}$

$\Rightarrow V_{CE_{MAX}} = 15 - 8 = 7 \text{ V}$

$V_{CE_{OFF}} = 4 + 7 = 11 \text{ V}$

Figura 123- SE – extremo do corte

3) 2º. extremo: perto da SAT



$$\Rightarrow V_{CEMIN} = 5 \Rightarrow I_{CMAX} = 200 \text{ mA}$$

uma escolha razoável é: $I_C = 180 \text{ mA}$

Figura 124- SE – extremo da saturação

4) limites de h_{fe} :

Entrada:

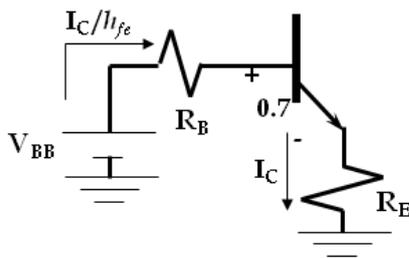


Figura 125- SE – dimensionamento de R_B

$$\Rightarrow I_C = \frac{V_{BB} - 0.7}{\frac{R_B}{h_{fe}} + R_E}$$

i) $h_{fe} \geq 100$: $160 \leq \frac{V_{BB} - 0.7}{\frac{R_B}{100} + 0.05}$ (1)

ii) $h_{fe} \leq 200$: $200 \geq \frac{V_{BB} - 0.7}{\frac{R_B}{200} + 0.05}$ (2)

(I_{CMAX})

(1) + (2): $R_B \leq 3.3 \text{ K}\Omega$

5) $A_v \geq 0.9$:

Vimos que $A_V = \frac{R_B}{R_s + R_B} \cdot \frac{1}{\frac{R_s // R_B + \widehat{h_{ie}}}{R_E // R_L (1 + h_{fe})}}$

não tenho, mas posso calcular!

varia entre 100 e 200

$$h_{ie} = \frac{h_{fe} V_T}{I_C} \Rightarrow \begin{cases} h_{feMIN} : & h_{ie} = 14\Omega \\ h_{feMAX} : & h_{ie} = 28\Omega \end{cases}$$

se $R_B = 2.5 \text{ K}\Omega \Rightarrow A_{V_s} \approx 0.92$ (OK!)

usando (1): $V_{BB} \geq 12.7\text{v}$

usando (2): $V_{BB} \leq 13.2\text{v} \Rightarrow$ escolho $V_{BB} = 13\text{v} \Rightarrow \begin{cases} R_2 = 2.9\text{K}\Omega \\ R_1 = 19\text{K}\Omega \end{cases}$

Usando valores comerciais: $R_2 = 2.7 \text{ K}\Omega$; $R_1 = 18 \text{ K}\Omega$

6) Verificação da qualidade da solução:

(refazendo as contas)

$R_B = 2.35 \text{ K}\Omega \Rightarrow A_{V_s} \approx 0.916$ (OK!)

Escolhendo $h_{fe} = 150$, circuito final:

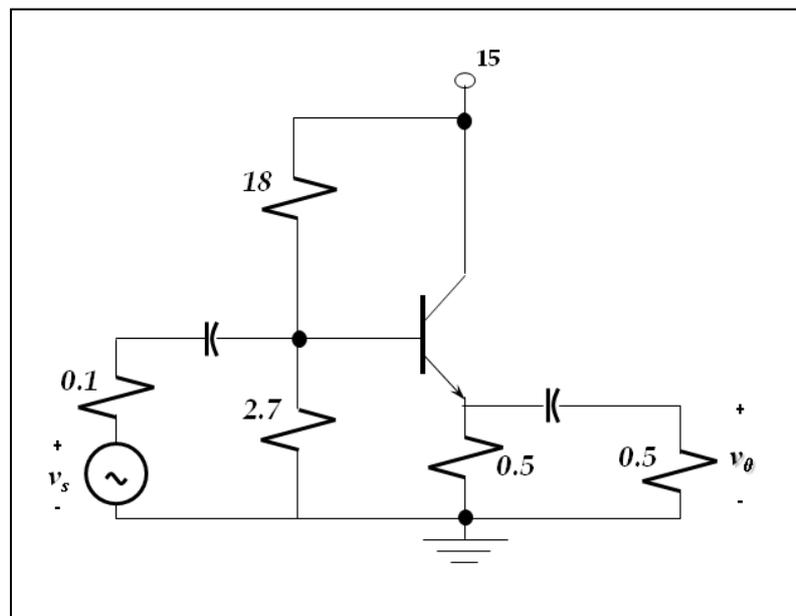


Figura 126- SE – circuito completo

Ponto P (extremos):

$$12.3 = \frac{2.35}{200} I_C + 0.05 I_C \quad \Rightarrow \quad I_C = 198 \text{ mA} \quad (\text{OK})$$

$$12.3 = \frac{2.35}{100} I_C + 0.05 I_C \quad \Rightarrow \quad I_C = 167 \text{ mA} \quad (\text{OK})$$

Ponto P (típico):

$$12.3 = \frac{2.35}{150} I_C + 0.05 I_C \quad \Rightarrow \quad I_C = 187 \text{ mA} \quad V_{CE} = 5.6 \text{ volts}$$

excursão máxima para CORTE: $R_{AC} I_C = 4.7\text{v} \quad (\text{OK})$

excursão máxima para SAT: $5.6 - 1 = 4.6\text{v} \quad (\text{OK})$ □

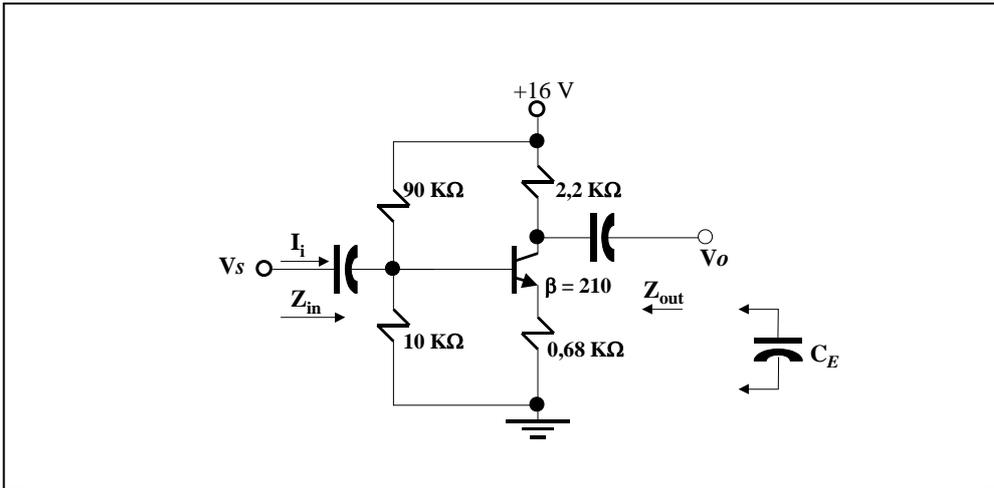
Anexo C - 3ª. LISTA

(Assunto: Transistores e Amplificadores)

3.1

No circuito abaixo, também considere ter de ser satisfeita a condição ($\beta R_E > 10 R_2$).

Ache Z_{in} , Z_{out} , A_V e A_I .



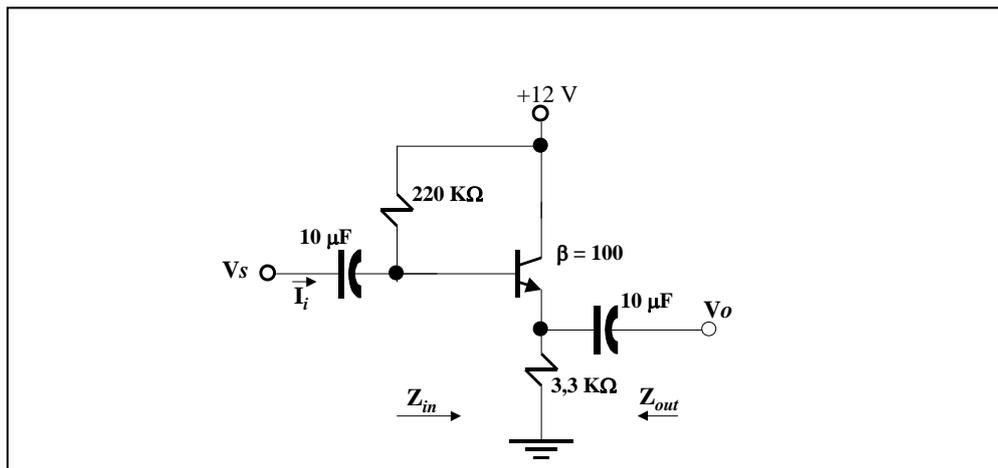
3.2

Modifique o circuito anterior colocando C_E do emissor para a terra e refaça os cálculos.

3.3

O circuito dado abaixo é o conhecido (e útil!) seguidor de emissor. Ache Z_{in} , Z_{out} , A_V e

A_I .



3.4.

Use o modelo híbrido aproximado e determine:

(a) Z_{in} ;

(b) Z_{out} ;

(c) A_v

(d) A_I

