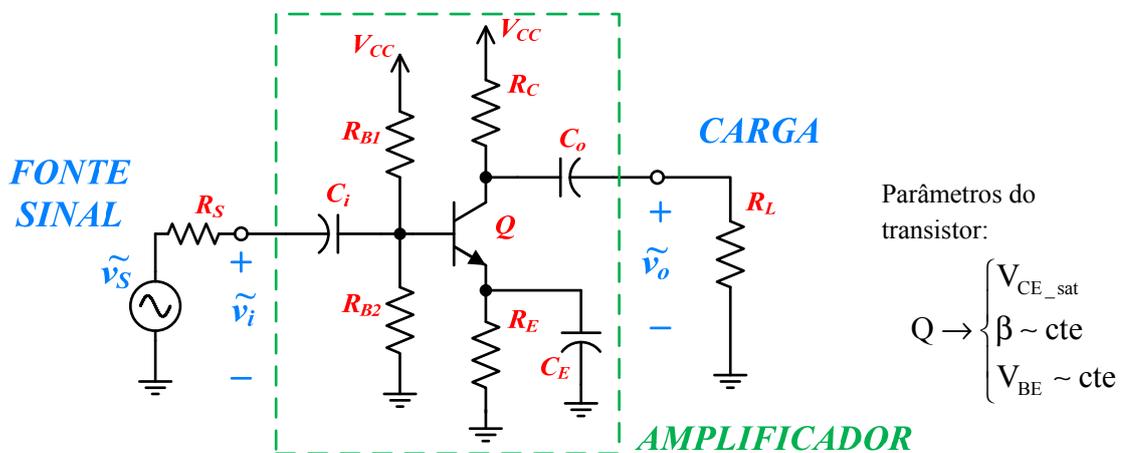


Eletrônica Analógica – CEL099 C

« Aula Prática Experimental »

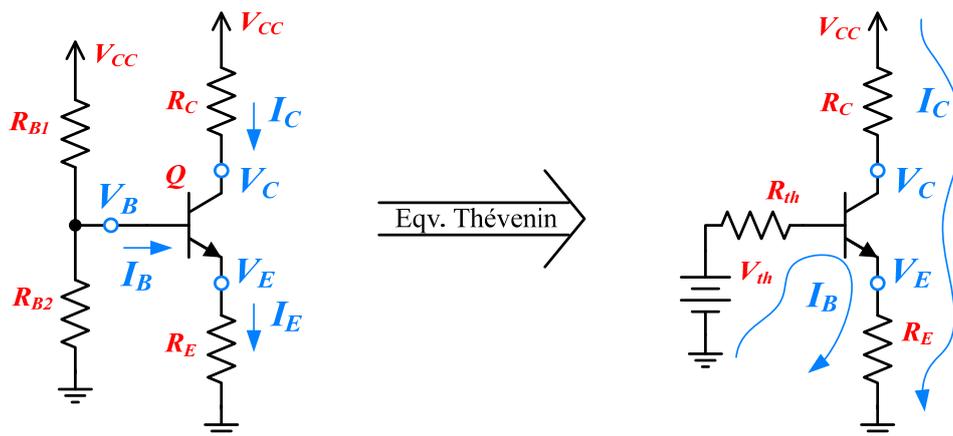
Amplificador Inversor de Pequenos Sinais com BJT

O amplificador em estudo nesta prática é a configuração “emissor comum”, empregando um BJT de pequenos sinais. O transistor Q é caracterizado por um ganho de corrente em emissor comum aproximadamente fixo (β), uma tensão base-emissor aproximadamente fixa (V_{BE}) e uma tensão mínima de saturação coletor-emissor (V_{CE_sat}). A polarização da base é feita por um divisor resistivo (R_{B1} e R_{B2}). A fonte de pequenos sinais (v_S), cuja amplitude pico-a-pico é V_S , possui uma impedância série finita (R_S) e está acoplada em corrente alternada à entrada do amplificador via o capacitor C_i . A resistência de carga também é finita (R_L) e também está acoplada em corrente alternada à saída do amplificador via o capacitor C_o .



Amplificador inversor na configuração emissor comum com polarização via divisor resistivo e resistor de degeneração de emissor

1. Ponto de trabalho do BJT (polarização) – Análise CC



MALHAS:

$$\begin{cases} V_{CC} = I_C \left(R_C + R_E \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) + V_{CE} \\ V_{th} = I_B \left(R_{th} + R_E (1 + \beta) \right) + V_{BE} \end{cases}$$

Equações do transistor:

$$\begin{aligned} \rightarrow I_C &= \beta I_B \\ \rightarrow I_C &= \alpha I_E \approx I_E \\ \rightarrow \alpha &= \frac{\beta}{(\beta + 1)} \approx 1 \end{aligned}$$

Equivalente de Thévenin do divisor:

$$\begin{cases} V_{th} = V_{CC} \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \\ R_{th} = R_{B1} \parallel R_{B2} = \frac{R_{B1} R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \end{cases}$$

Ponto de operação do amplificador:

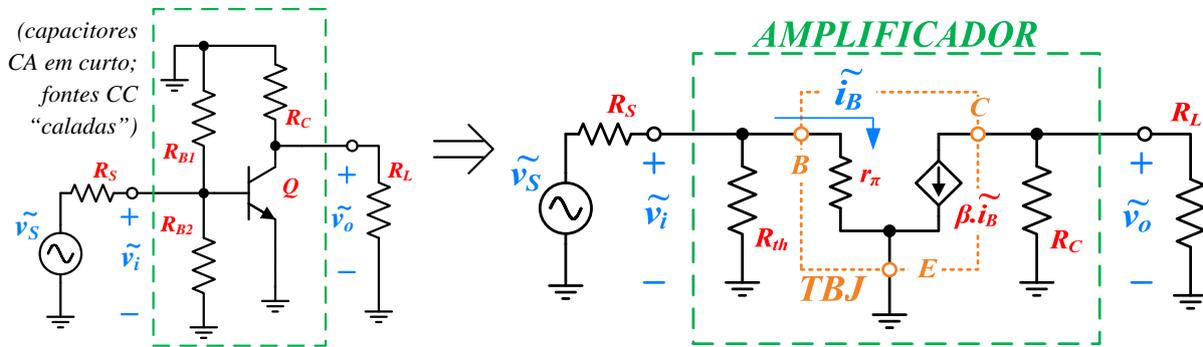
$$I_C = \frac{V_{th} - V_{BE}}{\frac{R_{th}}{\beta} + R_E} \cong \frac{V_{th} - V_{BE}}{R_E}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)) \cong V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$

- Para garantir a região ativa do BJT: $V_{CE} > V_{CE_sat}$
- Para uma polarização boa e estável: $V_{th} \gg V_{BE}$; $R_E \gg R_{th}/(\beta + 1)$; $\beta \gg 1 \rightarrow I_C \cong cte$

2. Solução via equivalente de pequenos sinais – Análise CA

Usando o modelo “pi” de **pequenos sinais** do TBJ (destacado dentro do amp, desconsiderando efeito Early):



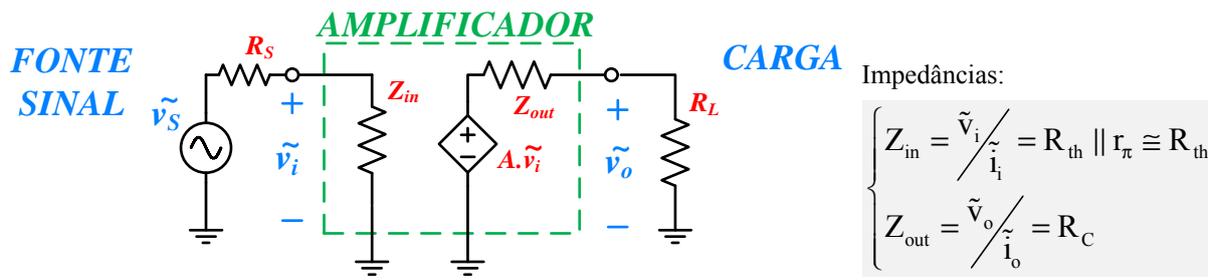
No qual: $r_{\pi} \triangleq \frac{V_T}{I_B} = \frac{V_T}{I_C} \beta = \frac{\beta}{g_m}$ (impedância de base-emissor de pequenos sinais do modelo “pi”)

MALHAS INTERNAS AO AMPLIFICADOR (abrindo-se a carga e a fonte de sinal – $R_L \rightarrow \infty$, $R_S \rightarrow \infty$):

Cálculo do **ganho de tensão em malha aberta** – note o sinal negativo do ganho (amplificador inversor, $A < 0$):

$$\begin{cases} \tilde{i}_B = \frac{\tilde{v}_i}{r_{\pi}} \\ \tilde{v}_o = -R_C \beta \tilde{i}_B = -\frac{R_C \beta}{r_{\pi}} \tilde{v}_i \end{cases} \Rightarrow A = \frac{\tilde{v}_o}{\tilde{v}_i} \Big|_{R_L \rightarrow \infty} = -\frac{R_C \beta}{r_{\pi}} = -\frac{R_C I_C}{V_T} \quad (\text{s/ carga})$$

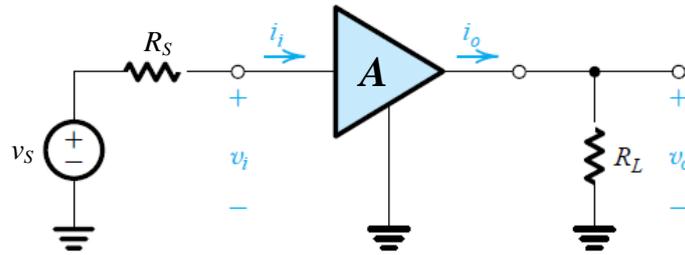
Por inspeção do circuito de pequenos sinais, é possível encontrar os demais parâmetros do **amplificador de tensão idealizado** equivalente: impedância de entrada (Z_{in}) e impedância de saída (Z_{out}).



Impedâncias:

$$\begin{cases} Z_{in} = \tilde{v}_i / \tilde{i}_i = R_{th} \parallel r_{\pi} \cong R_{th} \\ Z_{out} = \tilde{v}_o / \tilde{i}_o = R_C \end{cases}$$

AMPLIFICADOR



Para uma **carga finita** R_L e uma fonte de sinal com **impedância finita** R_S , é possível encontrar a tensão de entrada e de saída do amplificador e, portanto, o ganho efetivo:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{v}_o = A \tilde{v}_i \frac{R_L}{R_L + Z_{out}} \\ \tilde{v}_i = \tilde{v}_s \frac{Z_{in}}{R_S + Z_{in}} \end{array} \right. \Rightarrow \text{Ganho global (efetivo) – considerando carregamento do amplificador e impedância do sinal:}$$

$$A_{\text{eff}} = \left. \frac{\tilde{v}_o}{\tilde{v}_s} \right|_{R_L \neq \infty} = A \left[\frac{R_{th} \parallel r_{\pi}}{R_{th} \parallel r_{\pi} + R_S} \right] \left[\frac{R_L}{R_L + R_C} \right]$$

Os capacitores de acoplamento CA podem ser calculados para que sua reatância capacitiva em uma determinada frequência mínima (f_{\min}) seja muito menor que a impedância resistiva vista do nó onde se situam:

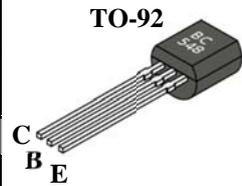
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2\pi f_{\min} C_i} \ll Z_{in} \Rightarrow C_i \gg [2\pi f_{\min} (R_{th} \parallel r_{\pi})]^{-1} \\ \frac{1}{2\pi f_{\min} C_o} \ll (R_C \parallel R_L) \Rightarrow C_o \gg [2\pi f_{\min} (R_C \parallel R_L)]^{-1} \\ \frac{1}{2\pi f_{\min} C_E} \ll R_E \Rightarrow C_E \gg [2\pi f_{\min} R_E]^{-1} \end{array} \right. \rightarrow \text{estas expressões garantem a premissa de que as capacitâncias são "infinitas" para análise CC \& CA}$$

- Critério de **pequenos sinais** do BJT: $|v_{BE}| \ll V_T$ (e.g., $|v_i| \leq 12$ mV pk-pk na prática \rightarrow erro $< 10\%$)

Parâmetros & Projeto Resultante

Parâmetros do(s) transistor(es) escolhido(s):

<i>Modelo(s)</i> <i>(part number & AMR)</i>	BC547C ou BC547B – BJT NPN, 45 V, 100 mA, 500 mW
<i>Ganho de corrente</i> <i>de emissor comum ($\beta = h_{fe}$)</i>	BC547C: 420-800 (~ 500 typ.) BC547B: 200-450 (~ 350 typ.)
<i>Tensão base-emissor (na reg. ativa)</i>	$V_{BE(on)} = 600 \text{ mV @ } I_C = 500 \mu\text{A}$
<i>Tensão coletor-emissor de saturação</i>	$V_{CE_sat} = 250 \text{ mV máx. @ } I_C = 10 \text{ mA}$



Parâmetros do circuito:

<i>Tensão de alimentação</i>	$V_{CC} = 15 \text{ V}$
<i>Fonte de sinal</i>	$V_S = 50 \text{ mV máx. (pico-a-pico)}$, $R_S = 2,2 \text{ k}\Omega$, sinal senoidal – 1 kHz
<i>Resistores de base</i>	$R_{B1} = 150 \text{ k}\Omega$, $R_{B2} = 12 \text{ k}\Omega$
<i>Resistor de coletor</i>	$R_C = 18 \text{ k}\Omega$
<i>Resistor de emissor</i>	$R_E = 1 \text{ k}\Omega$
<i>Impedância de carga nominal</i>	$R_L = 47 \text{ k}\Omega$
<i>Capacitor de entrada</i>	$C_i = 4,7 \mu\text{F} / 25 \text{ V}$
<i>Capacitor de saída</i>	$C_o = 10 \mu\text{F} / 25 \text{ V}$
<i>Capacitor de emissor</i>	$C_E = 47 \mu\text{F} / 25 \text{ V}$
<i>Frequência mínima de corte</i>	$f_{min} = 100 \text{ Hz}$

Ponto de operação (polarização):

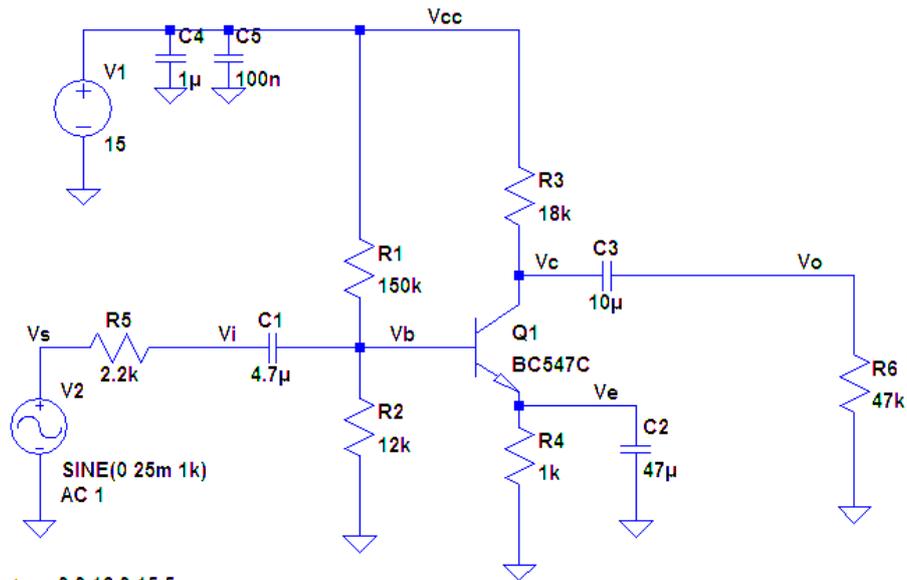
<i>Tensão de Thévenin do divisor de base</i>	$V_{th} = 1,11 \text{ V}$
<i>Resistência de Thévenin do divisor de base</i>	$R_{th} = 11,1 \text{ k}\Omega$
<i>Corrente de coletor</i>	$I_C = 499 \mu\text{A}$
<i>Tensão coletor-emissor</i>	$V_{CE} = 5,52 \text{ V}$
<i>Tensão no coletor</i>	$V_C = 6,02 \text{ V}$
<i>Tensão no emissor</i>	$V_E = 0,50 \text{ V}$

Parâmetros do modelo de pequenos sinais e do amplificador:

<i>Impedância base-emissor</i>	$r_\pi = 25,3 \text{ k}\Omega$
<i>Ganho de transcondutância</i>	$g_m = 20 \text{ mA/V}$
<i>Ganho de tensão em malha aberta (s/ carga, s/ sinal)</i>	$A = -356 \text{ V/V}$
<i>Impedância de entrada</i>	$Z_{in} = 7,7 \text{ k}\Omega$
<i>Impedância de saída</i>	$Z_{out} = 18 \text{ k}\Omega$
<i>Ganho de tensão global efetivo (c/ carga e imp. sinal)</i>	$A_{eff} = -200 \text{ V/V}$

- Medir ganho em malha aberta (A) para pequeno sinal ($V_S = 12 \text{ mV pk-pk}$, máx.), ganho global efetivo em carga nominal (A_{eff}), impedância de entrada (Z_{in}), impedância de saída (Z_{out}) e limite da amplitude do sinal (V_S , pk-pk) de entrada para: a) operação linear do amplificador (THD < 0,5%) e b) grampeamento do sinal de saída por saturação e/ou corte – utilizar os métodos expostos em laboratório. Qual a origem da diferença entre o ganho de tensão calculado e o ganho medido?
- Verificar a estabilidade do ponto de trabalho mesmo com a mudança do β (transistores de classes diferentes – B e C). Quais parâmetros do modelo de pequenos sinais e do amplificador mudam mais significativamente com o β ? Quais ficam aproximadamente constantes?
- Capturar formas de onda dos sinais de entrada e saída, e as tensões no emissor, no coletor e na base do transistor tanto para operação linear quanto para operação saturada (4 figuras no total).

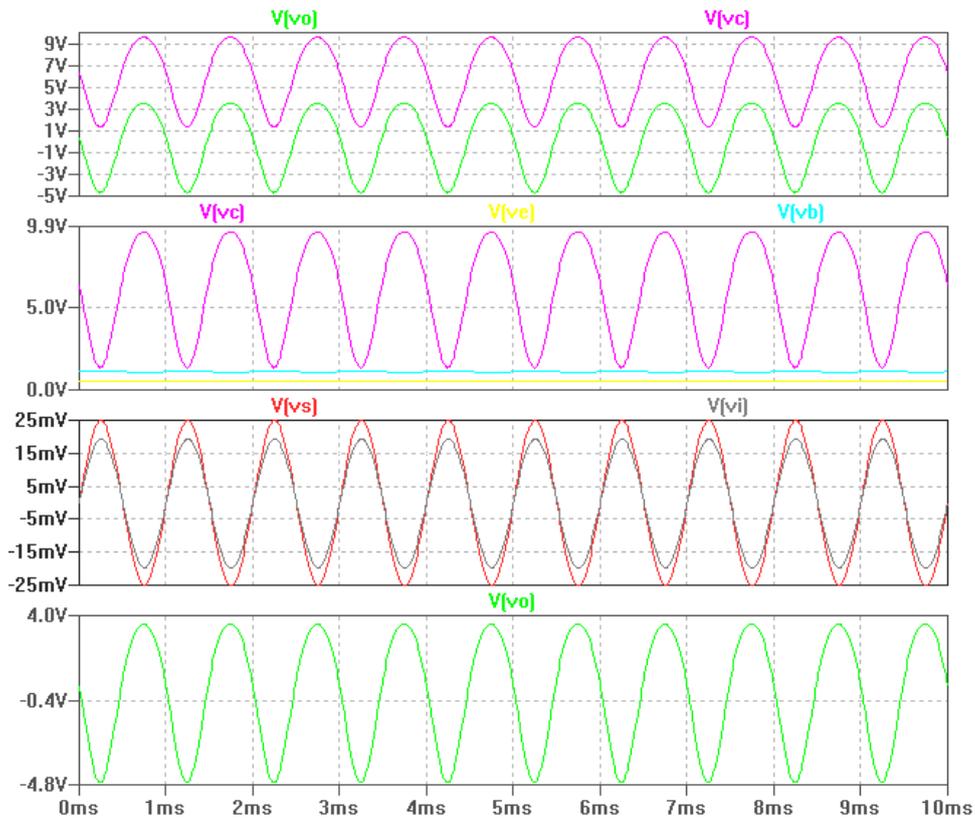
Resultados de Simulação no LTspice IV



```
.tran 0 0.16 0.15 5u
.ac dec 30 1 100k
```

--- Operating Point ---

V(vcc):	15	voltage
V(vb):	1.09996	voltage
V(vc):	6.03781	voltage
V(ve):	0.498903	voltage
Ic(Q1):	0.0004979	device_current
Ib(Q1):	1.00355e-006	device_current
Ie(Q1):	-0.000498903	device_current



Dados do transistor: **BC547C - $\beta \sim 500$**
[alt.: BC547B - $\beta \sim 350$ (70%)]

cte. físicas $T_K := 20 + 273 = 293$
 $k_B := 1.3806488 \cdot 10^{-23}$

$$V_T := \frac{k_B \cdot T_K}{q_e} = 25.249 \times 10^{-3} \quad \text{tensão térmica}$$

$$q_e := 1.60217657 \cdot 10^{-19}$$

$$V_{CE_sat} := 0.25 \quad \text{máx. @ } I_C = 10 \text{ mA} / I_B = 0.5 \text{ mA}$$

$$V_{BE} := 0.6 \quad \text{obtido a partir do grafico } V_{BE}(on), p/ I_C = 500 \mu\text{A}$$

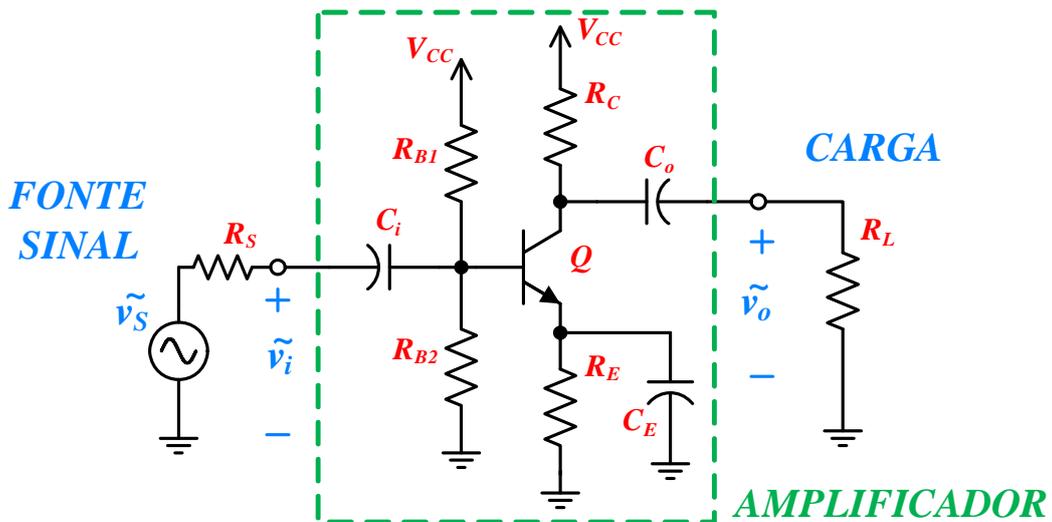
$$h_{fe} := 600 \quad (\text{small-signal } h_{fe} = 600, 1 \text{ kHz, @ } I_C = 2 \text{ mA})$$

$$\beta := 500 \quad \text{--> beta considerado pra projeto (@ } I_C = 500 \mu\text{A} / V_{CE} = 10 \text{ V)}$$

Pto operação desejado aprox.: $V_{CEQ} := 5$ $I_{CQ} := 500 \cdot 10^{-6}$

Alimentação e fonte de sinal: $V_{CC} := 15$ $V_S := 50 \cdot 10^{-3}$ (pk-pk)

ganho tensão desejado: ~ 200 --> 10 V pk-pk saída



Seleção dos componentes do circuito: $V_{CC} = 15$ $V_S = 0.05$

$$R_{B1} := 150 \cdot 10^3 \quad R_{B2} := 12 \cdot 10^3 \quad R_C := 18 \cdot 10^3 \quad R_E := 1 \cdot 10^3$$

$$R_L := 47 \cdot 10^3 \quad R_S := 2.2 \cdot 10^3$$

$$C_i := 4.7 \cdot 10^{-6} \quad C_o := 10 \cdot 10^{-6} \quad C_E := 47 \cdot 10^{-6}$$

Equações da análise CC:

equiv. de Thévenin:

$$V_{th} := V_{CC} \cdot \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} = 1.111 \quad V_{th} > V_{BE} = 1$$

$$R_{th} := \frac{R_{B1} \cdot R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} = 11.111 \times 10^3$$

análise de estabilidade: conferir se dá $\gg 1$

$$\frac{V_{th}}{V_{BE}} = 1.852 \quad \frac{R_E}{R_{th} \cdot (\beta + 1)^{-1}} = 45.09 \times 10^0$$

pto de operação:

$$I_C := \frac{V_{th} - V_{BE}}{\frac{R_{th}}{\beta} + R_E \cdot \left(\frac{\beta + 1}{\beta}\right)} = 499.024 \times 10^{-6}$$

conferido se está próximo do desejado:

$$I_{CQ} = 500 \times 10^{-6}$$

$$I_{C_aprox} := \frac{V_{th} - V_{BE}}{R_E} = 511.111 \times 10^{-6}$$

$$I_B := \frac{V_{th} - V_{BE}}{R_{th} + R_E \cdot (\beta + 1)} = 998.047 \times 10^{-9}$$

$$V_{CE} := V_{CC} - I_C \cdot \left[R_C + R_E \cdot \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right] = 5.518$$

$$V_{CE} > V_{CE_sat} = 1$$

$$V_{CEQ} = 5$$

$$V_{CE_aprox} := V_{CC} - I_C \cdot (R_C + R_E) = 5.519$$

$$V_C := V_{CC} - R_C \cdot I_C = 6.018$$

$$V_E := I_C \cdot \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \cdot R_E = 0.5$$

Equações da análise CA:

$$r_{\pi} := \frac{V_T}{I_C} \cdot \beta = 25.298 \times 10^3 \quad g_m := \frac{I_C}{V_T} = 0.02 \quad \frac{r_{\pi}}{R_{th}} = 2.277$$

Ganho em malha aberta e impedâncias do amplificador:

$$A := \frac{-R_C \cdot I_C}{V_T} = -355.757 \quad Z_{in} := \frac{r_{\pi} \cdot R_{th}}{r_{\pi} + R_{th}} = 7.72 \times 10^3 \quad Z_{out} := R_C = 1.8 \times 10^4$$

$$-(g_m \cdot R_C) = -355.757$$

Ganho efetivo:

(com carregamento)

$$A_{eff} := A \cdot \frac{Z_{in}}{Z_{in} + R_S} \cdot \frac{R_L}{Z_{out} + R_L} = -200.192$$

$$-\left(g_m \cdot \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L} \right) \cdot \frac{Z_{in}}{Z_{in} + R_S} = -200.192$$

Amplitude (pk-pk) da tensão de saída: $V_S = 0.05$

$$V_{CC} = 15 \quad V_{CE_sat} = 0.25$$

excursão do sinal:

s/ carga & s/ impedância de sinal: $V_o := |V_S \cdot A| = 17.788$

grampeia sup. & inf.
(*corte & sat.*)

$$V_C + 0.5 \cdot V_o = 14.911$$

$$V_C - 0.5 \cdot V_o = -2.876$$

c/ carga & s/ impedância de sinal: $V_{ov} := \left| V_S \cdot A \cdot \frac{R_L}{R_L + R_C} \right| = 12.862$

grampeia inf.
(*só sat.*)

$$V_C + 0.5 \cdot V_o = 12.449$$

$$V_C - 0.5 \cdot V_o = -0.413$$

c/ carga & c/ impedância de sinal: $V_{ov} := |V_S \cdot A_{eff}| = 10.01$

~ linear

$$V_C + 0.5 \cdot V_o = 11.022$$

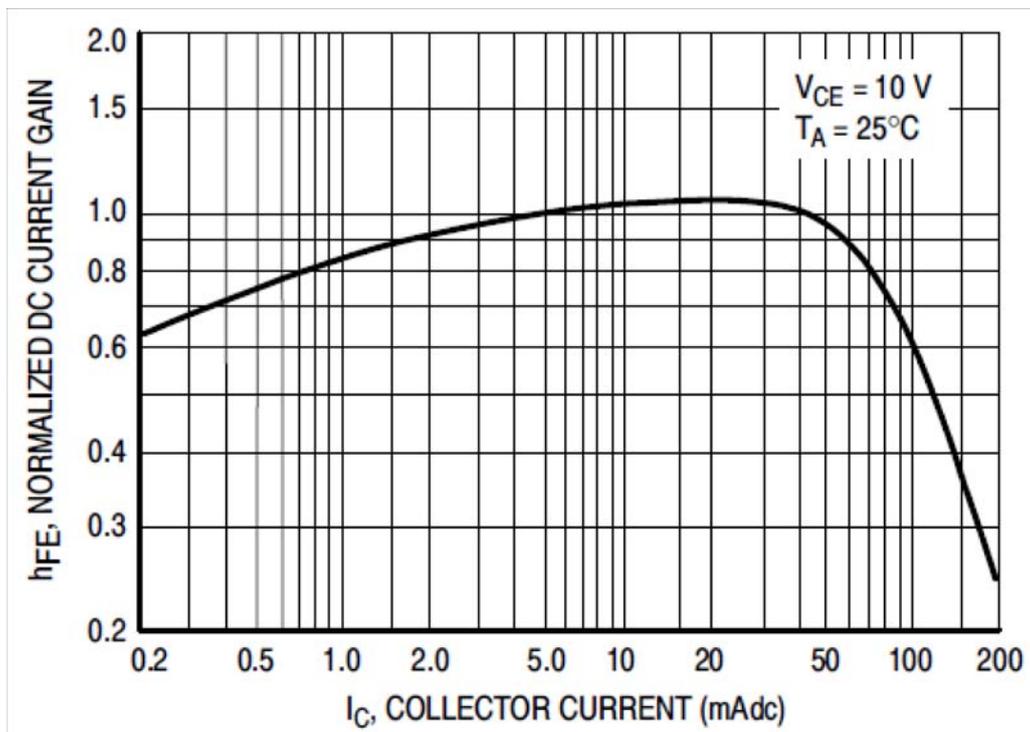
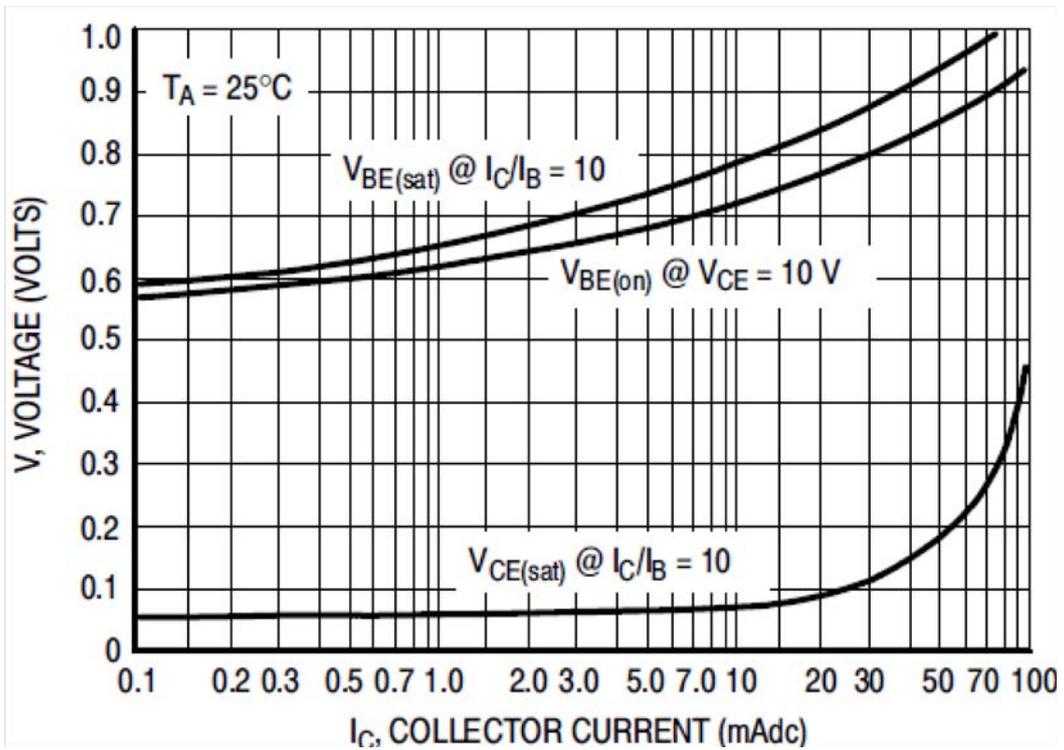
$$V_C - 0.5 \cdot V_o = 1.013$$

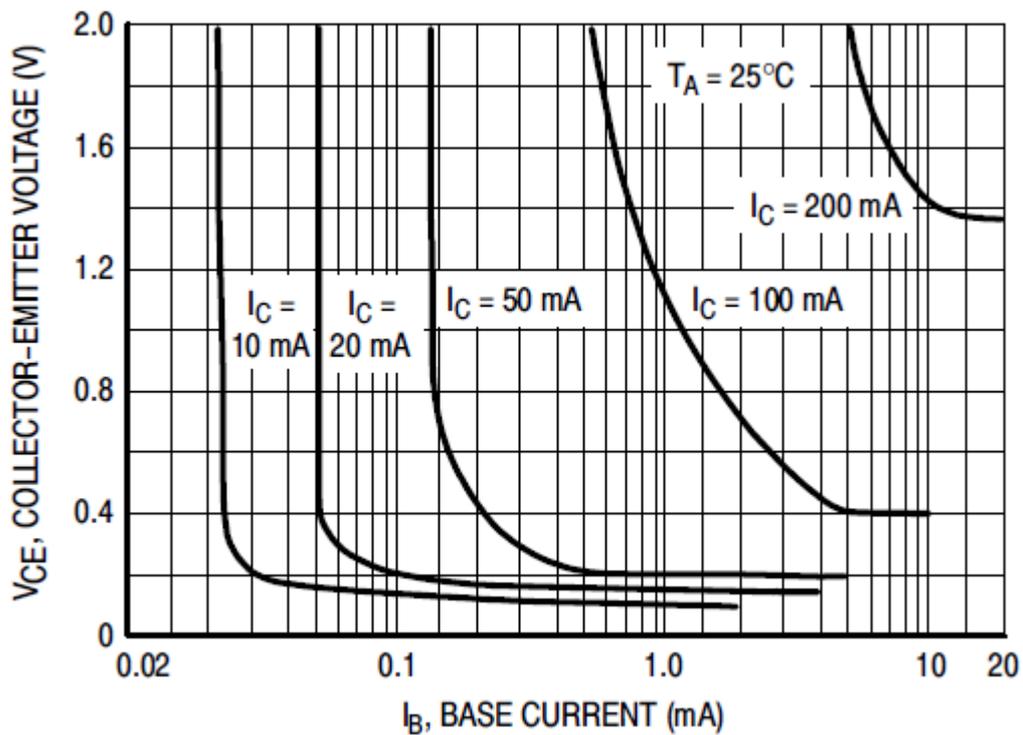
Conferindo dimensionamento dos capacitores de acoplamento:

$$f_{min} := 100$$

conferir se dá >> 1

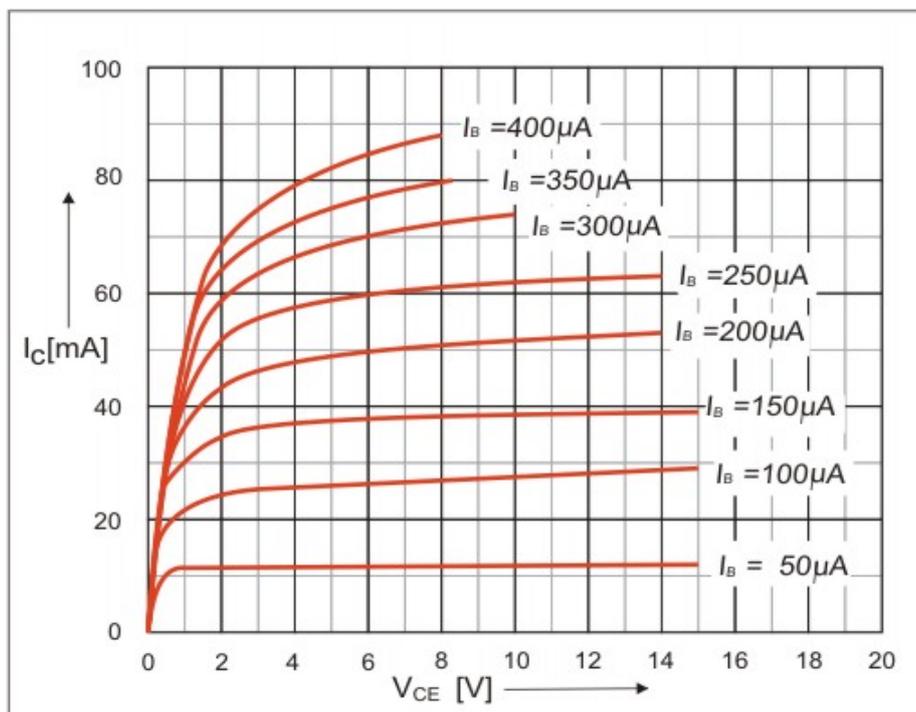
$$\frac{C_i}{(2\pi \cdot f_{min} \cdot Z_{in})^{-1}} = 22.799 \quad \frac{C_o}{\left(2\pi \cdot f_{min} \cdot \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L}\right)^{-1}} = 81.778 \quad \frac{C_E}{(2\pi \cdot f_{min} \cdot R_E)^{-1}} = 29.531$$





Aproximações do ganho via gráfico vs. valor considerado: $\beta = 500$

$$\beta_{\text{graph}} := \frac{20}{0.05} = 400 \quad \beta_{\text{graph}} := \frac{10}{0.02} = 500$$



pto de operação: $V_{CE} = 5.518$ $I_B = 998.047 \times 10^{-9}$ $I_C = 499.024 \times 10^{-6}$

Solução gráfica do pto de operação & excursão do sinal:

$$R_{CE_sat} := \frac{V_{CE_sat}}{I_C} = 500.978$$

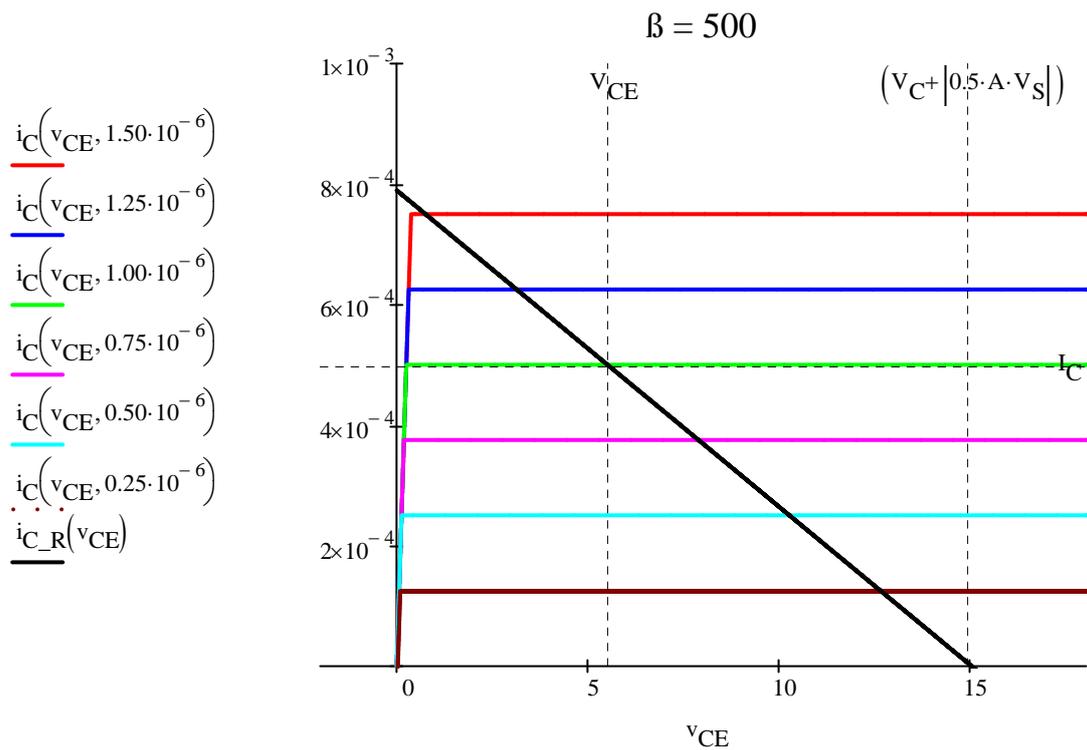
$$i_C(v_{CE}, i_B) := \begin{cases} \frac{v_{CE}}{R_{CE_sat}} & \text{if } v_{CE} < R_{CE_sat} \cdot i_B \cdot \beta \\ \beta \cdot i_B & \text{if } v_{CE} > R_{CE_sat} \cdot i_B \cdot \beta \end{cases}$$

reta de carga:

$$i_{C_R}(v_{CE}) := \frac{V_{CC} - v_{CE}}{R_C + R_E}$$

pto de operação: $V_{CE} = 5.518$ $I_B = 998.047 \times 10^{-9}$ $I_C = 499.024 \times 10^{-6}$

$v_{CE} := 0, 0.001 \dots 18$



Encontrando a impedância de entrada e saída (fazendo $R_{S2} = 2 \cdot R_S$ e $R_{L2} = 0.5 \cdot R_L$):

Given

$$\frac{V_{i1}}{V_{i2}} = \frac{\frac{R_i}{R_i + R_{S1}}}{\frac{R_i}{R_i + R_{S2}}}$$

$$\text{Find}(R_i) \rightarrow -\frac{R_{S1} \cdot V_{i1} - R_{S2} \cdot V_{i2}}{V_{i1} - V_{i2}}$$

$$V_{i1} := 3.885 \cdot 10^{-3} \quad \text{com } R_S$$

$$V_{i2} := 3.183 \cdot 10^{-3} \quad \text{com } 2 \cdot R_S$$

$$R_i := R_S \cdot \frac{2V_{i2} - V_{i1}}{V_{i1} - V_{i2}} = 7.775 \times 10^3 \quad Z_{in} = 7.72 \times 10^3$$

Given

$$\frac{V_{o1}}{V_{o2}} = \frac{\frac{R_{L1}}{R_{L1} + R_o}}{\frac{R_{L2}}{R_{L2} + R_o}}$$

$$\text{Find}(R_o) \rightarrow \frac{R_{L1} \cdot R_{L2} \cdot V_{o1} - R_{L1} \cdot R_{L2} \cdot V_{o2}}{R_{L1} \cdot V_{o2} - R_{L2} \cdot V_{o1}}$$

$$V_{o1} := 834 \cdot 10^{-3} \quad \text{com } R_L$$

$$V_{o2} := 667 \cdot 10^{-3} \quad \text{com } R_L/2$$

$$R_o := R_L \cdot \frac{V_{o1} - V_{o2}}{2V_{o2} - V_{o1}} = 15.698 \times 10^3 \quad Z_{out} = 18 \times 10^3$$

Resistência e tensão Early (baseado em medições):

$$\text{given} \quad \frac{r_o \cdot Z_{out}}{r_o + Z_{out}} = R_o$$

$$r_o := Z_{out}$$

$$r_{oa} := \text{find}(r_o) = 122.747 \times 10^3$$

portanto:

$$V_A := r_o \cdot I_C - V_{CE} = 55.736$$