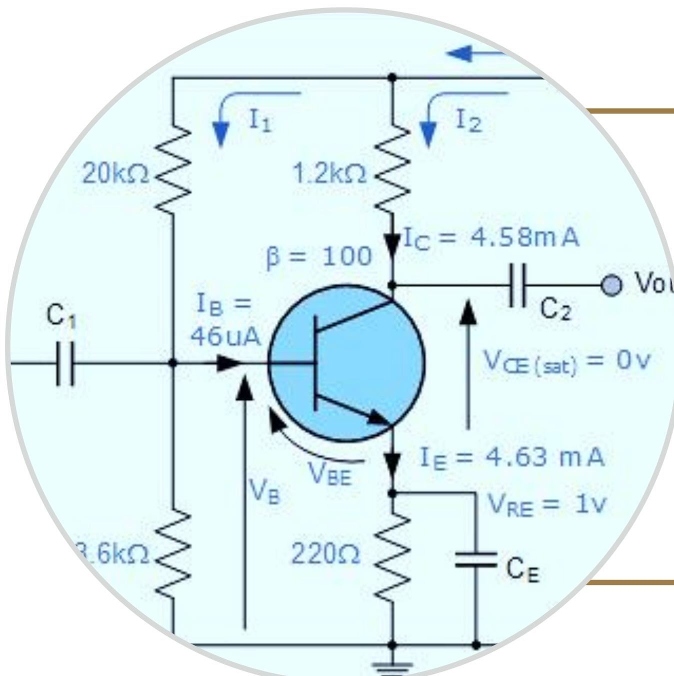
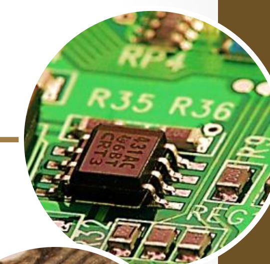
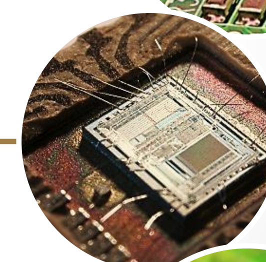
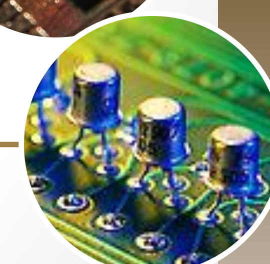
ELETRÔNICA ANALÓGICA

CEL099









Prof. Pedro S. Almeida

pedro.almeida@ufjf.edu.br

Universidade Federal de Juiz de Fora

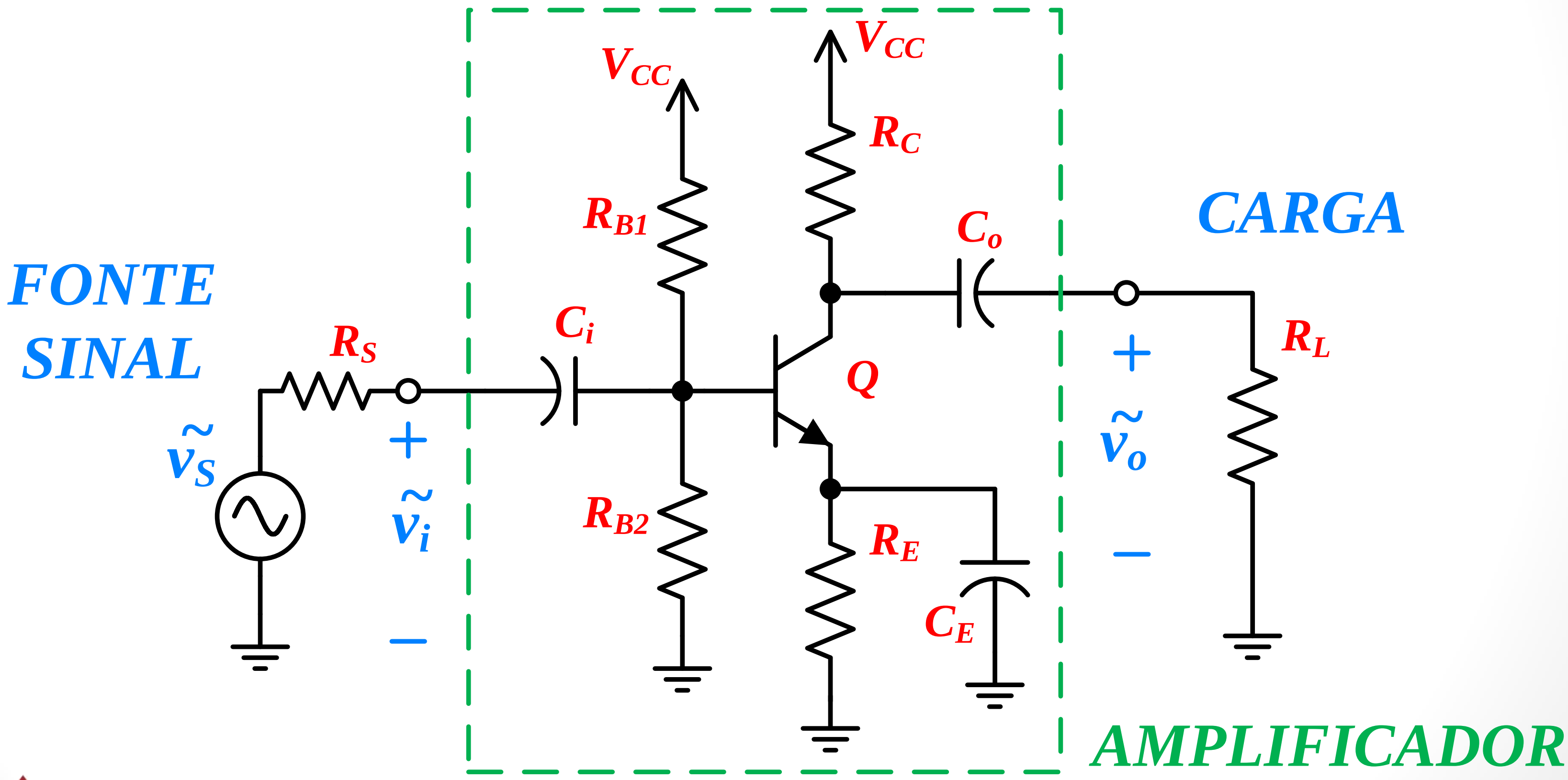
Aula Experimental:

Amplificador Discreto Emissor Comum

Universidade Federal de Juiz de Fora

Circuito

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



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA

BJT empregado

- BC547C
- BC548B

BC546B, BC547A, B, C, BC548B, C

Amplifier Transistors

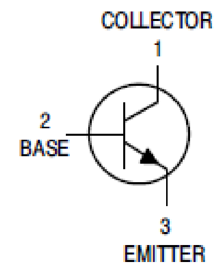
NPN Silicon

Features

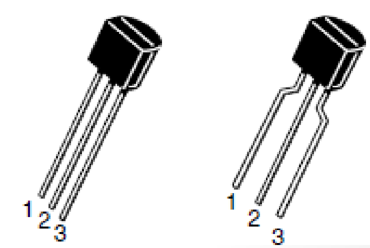
- Pb–Free Packages are Available*

ON Semiconductor®

http://onsemi.com



TO–92
CASE 29
STYLE 17



MAXIMUM RATINGS

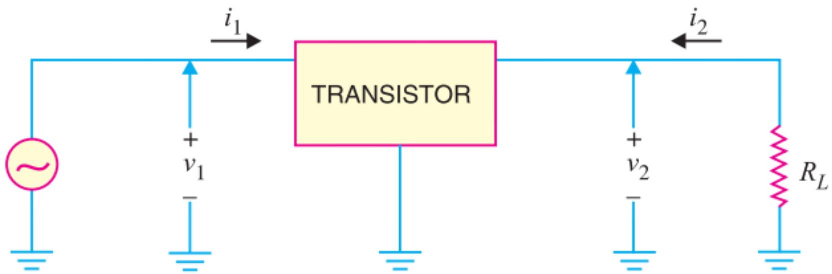
Rating		Symbol	Value	Unit
Collector - Emitter Voltage	BC546 BC547 BC548	V_{CEO}	65 45 30	Vdc
Collector - Base Voltage	BC546 BC547 BC548	V_{CBO}	80 50 30	Vdc
Emitter - Base Voltage		V_{EBO}	6.0	Vdc
Collector Current – Continuous		I_C	100	mAdc
Total Device Dissipation @ T_A = 25°C Derate above 25°C		P_D	625 5.0	mW mW/°C

BJT empregado

- BC547C
- BC548B

Encontrando o β do BJT:
→ h_{FE}

Parâmetros híbridos – "h" (quadripolos):



$$\begin{cases} v_1 = h_{11} i_1 + h_{12} v_2 \\ i_2 = h_{21} i_1 + h_{22} v_2 \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} h_{11} \rightarrow \Omega \\ h_{12} \rightarrow V/V \\ h_{21} \rightarrow A/A \\ h_{22} \rightarrow \Omega^{-1} \end{bmatrix}$$

Characteristic		Symbol	Min	Typ	Max	Unit
DC Current Gain		h_{FE}				–
(I_C = 10 μA, V_{CE} = 5.0 V)	BC547A		–	90	–	
	BC546B/547B/548B		–	150	–	
	BC548C		–	270	–	
(I_C = 2.0 mA, V_{CE} = 5.0 V)	BC546		110	–	450	
	BC547		110	–	800	
	BC548		110	–	800	
	BC547A		110	180	220	
	BC546B/547B/548B		200	290	450	
	BC547C/BC548C		420	520	800	
(I_C = 100 mA, V_{CE} = 5.0 V)	BC547A/548A		–	120	–	
	BC546B/547B/548B		–	180	–	
	BC548C		–	300	–	

Na config. emissor comum:

Universidade Federal de Juiz de Fora

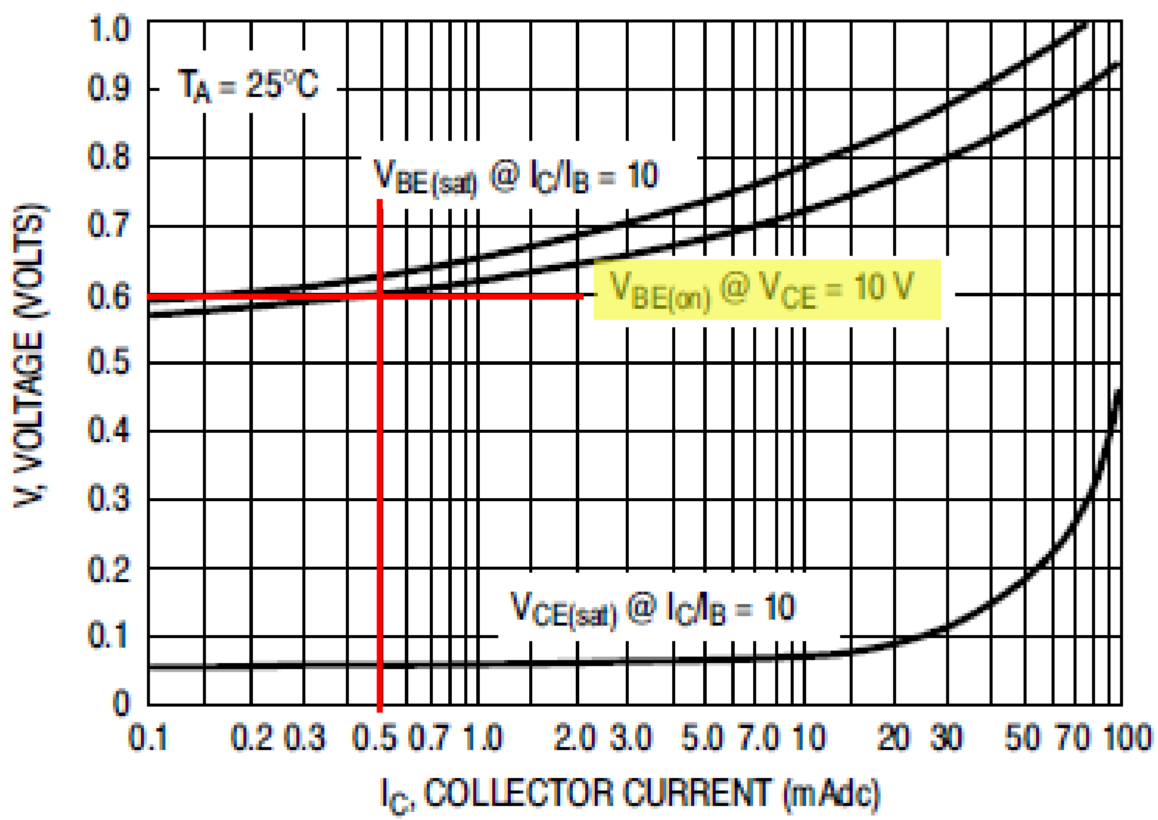
BJT empregado

- BC547C
- BC548B

Encontrando o V_{BE} do BJT:

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Base – Emitter On Voltage	$V_{BE(on)}$				V
(I_C = 2.0 mA, V_{CE} = 5.0 V)		0.55	–	0.7	
(I_C = 10 mA, V_{CE} = 5.0 V)		–	–	0.77	

V_{BE} = 0,6 V
@ I_C = 500 µA



Universidade Federal de Juiz de Fora

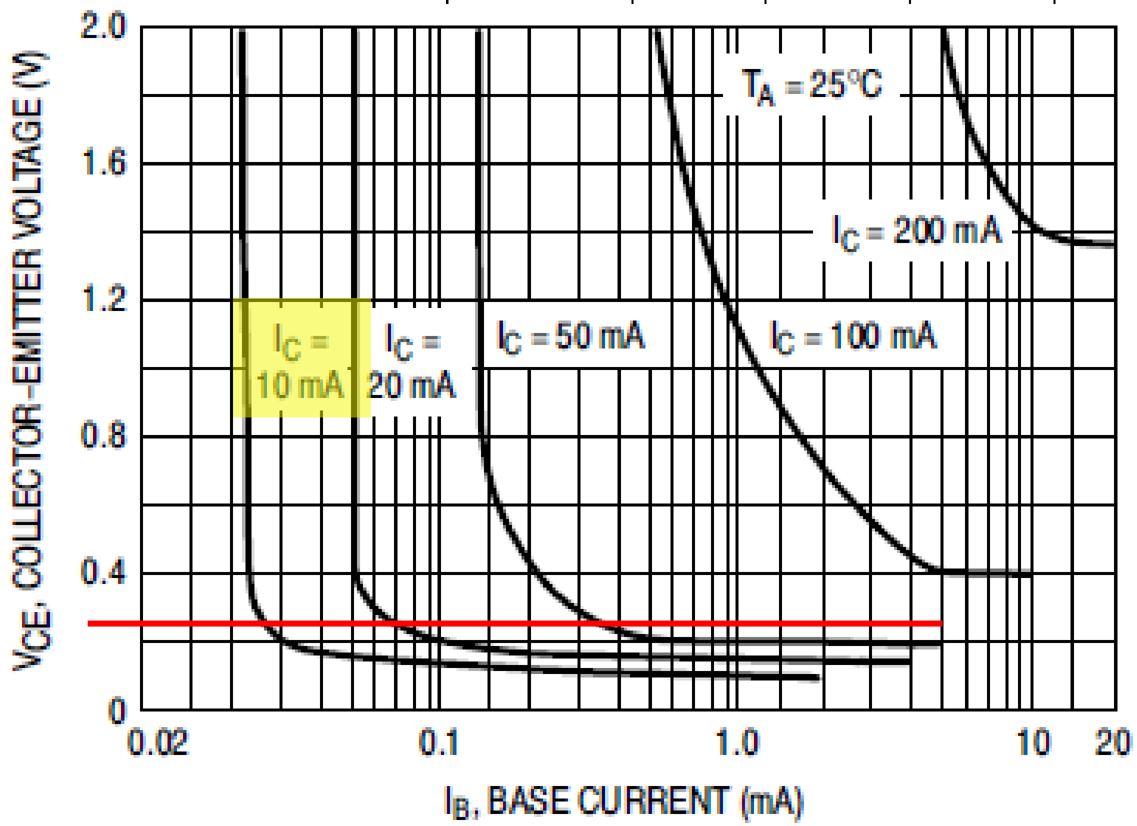
BJT empregado

- BC547C
- BC548B

Encontrando o $V_{CE\ sat}$ do BJT:

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Collector – Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(sat)}$				V
(I_C = 10 mA, I_B = 0.5 mA)		–	0.09	0.25	
(I_C = 100 mA, I_B = 5.0 mA)		–	0.2	0.6	
(I_C = 10 mA, I_B = See Note 1)		–	0.3	0.6	

V_{CE_sat} < 0,25 V (máx.)
@ I_C >> 500 µA
@ I_B >> 5 µA
(pior caso de ß)



Universidade Federal de Juiz de Fora

Rotina de projeto

Dados do transistor: **BC547C - ß ~ 500**
[alt.: BC547B - ß ~ 350 (70%)]

cte. físicas

$T_K := 20 + 273 = 293$

$k_B := 1.3806488 \cdot 10^{-23}$

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

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

$V_{CE\_sat} := 0.25$ máx. @ IC = 10 mA / IB = 0.5 mA

$V_{BE} := 0.6$ obtido a partir do grafico VBE(on), p/ IC = 500 µA

$h_{fe} := 600$ @ IC = 500 µA / VCE = 10 V
(small-signal hfe = 600, 1 kHz, 2 mA)

$\beta := 500$ --> beta considerado pra projeto

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

Rotina de projeto

Itera-se nos valores dos componentes até o projeto desejado:
(segundo as eqs. de análise → síntese)

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

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

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

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

Observa-se:

I_C, V_{CE}, A, A_{eff}, etc.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA

Rotina de projeto

Equações da análise CC:

equiv. de Thévenin:

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

$$V_{th} > V_{BE} = 1$$

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

análise de estabilidade: conferir se dá >> 1

$$\frac{V_{th}}{V_{BE}} = 1.852$$

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

Universidade Federal de Juiz de Fora

Rotina de projeto

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:

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

Equações da análise CC:

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

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

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

$$V_{CE} > V_{CE\_sat} = 1$$

$$V_{CEQ} = 5$$

$$V_{CE\_aprox} := V_{CC} - I_C \cdot \left(R_C + R_E\right) = 5.519$$

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

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

Universidade Federal de Juiz de Fora

Rotina de projeto

Equações da análise CA:

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

Ganho em malha aberta e impedâncias do amplificador:

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

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

Ganho efetivo:
(com carregamento)

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

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

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA

Rotina de projeto

Amplitude (pk-pk) da tensão de saída: $V_S = 0.05$ $V_{CC} = 15$ $V_{CE\_sat} = 0.25$

excursão do sinal:

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

$V_C + 0.5 \cdot V_o = 14.911$

$V_C - 0.5 \cdot V_o = -2.876$

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

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

$V_C + 0.5 \cdot V_o = 12.449$

$V_C - 0.5 \cdot V_o = -0.413$

grampeia só inf.
(só sat.)

c/ carga & c/ impedância de sinal: $V_o := \left|V_S \cdot A_{eff}\right| = 10.01$

$V_C + 0.5 \cdot V_o = 11.022$

$V_C - 0.5 \cdot V_o = 1.013$

~ linear

Conferindo dimensionamento dos capacitores de acoplamento: $f_{min} := 100$

conferir se dá >> 1

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

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA

Rotina de projeto

Solução gráfica:

$$R_{CE\_sat} := \frac{V_{CE\_sat}}{I_C} = 500.978$$

pto de operação:

$I_B = 998.047 \times 10^{-9}$

$I_C = 499.024 \times 10^{-6}$

$V_{CE} = 5.518$

reta de carga:

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

$i_C(v_{CE}, 1.50 \cdot 10^{-6}, \beta)$

$i_C(v_{CE}, 1.25 \cdot 10^{-6}, \beta)$

$i_C(v_{CE}, 1.00 \cdot 10^{-6}, \beta)$

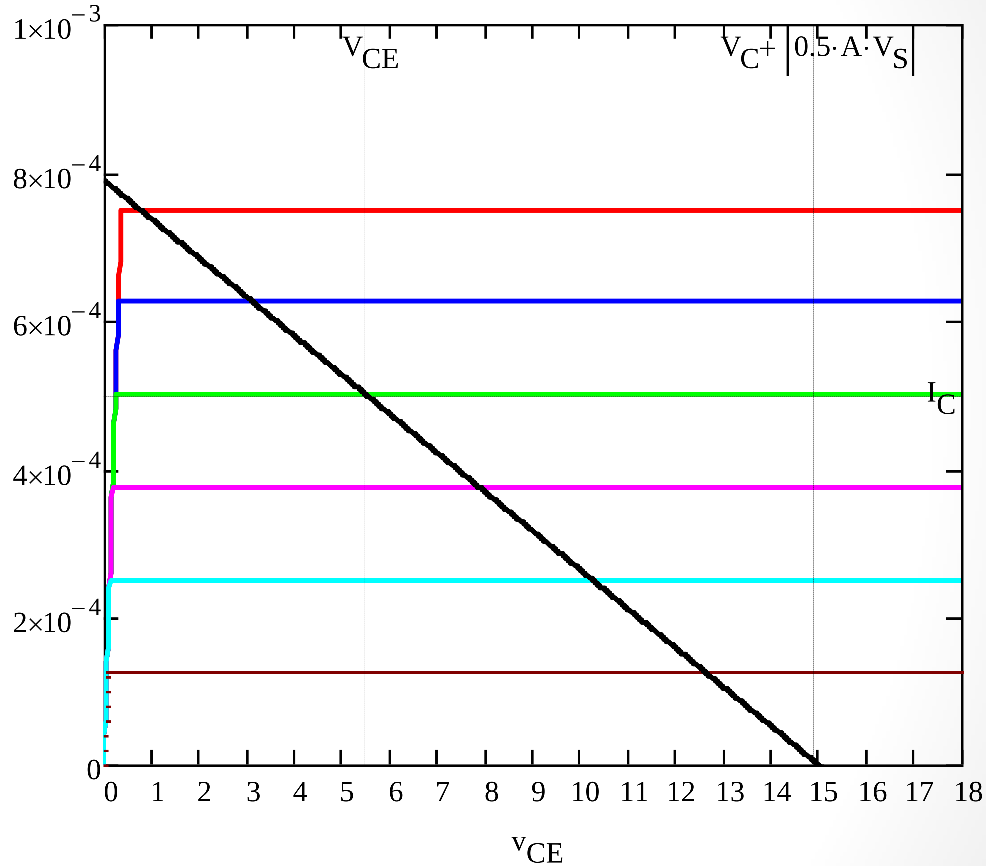
$i_C(v_{CE}, 0.75 \cdot 10^{-6}, \beta)$

$i_C(v_{CE}, 0.50 \cdot 10^{-6}, \beta)$

$i_C(v_{CE}, 0.25 \cdot 10^{-6}, \beta)$

$i_{C\_R}(v_{CE})$

ß = 500



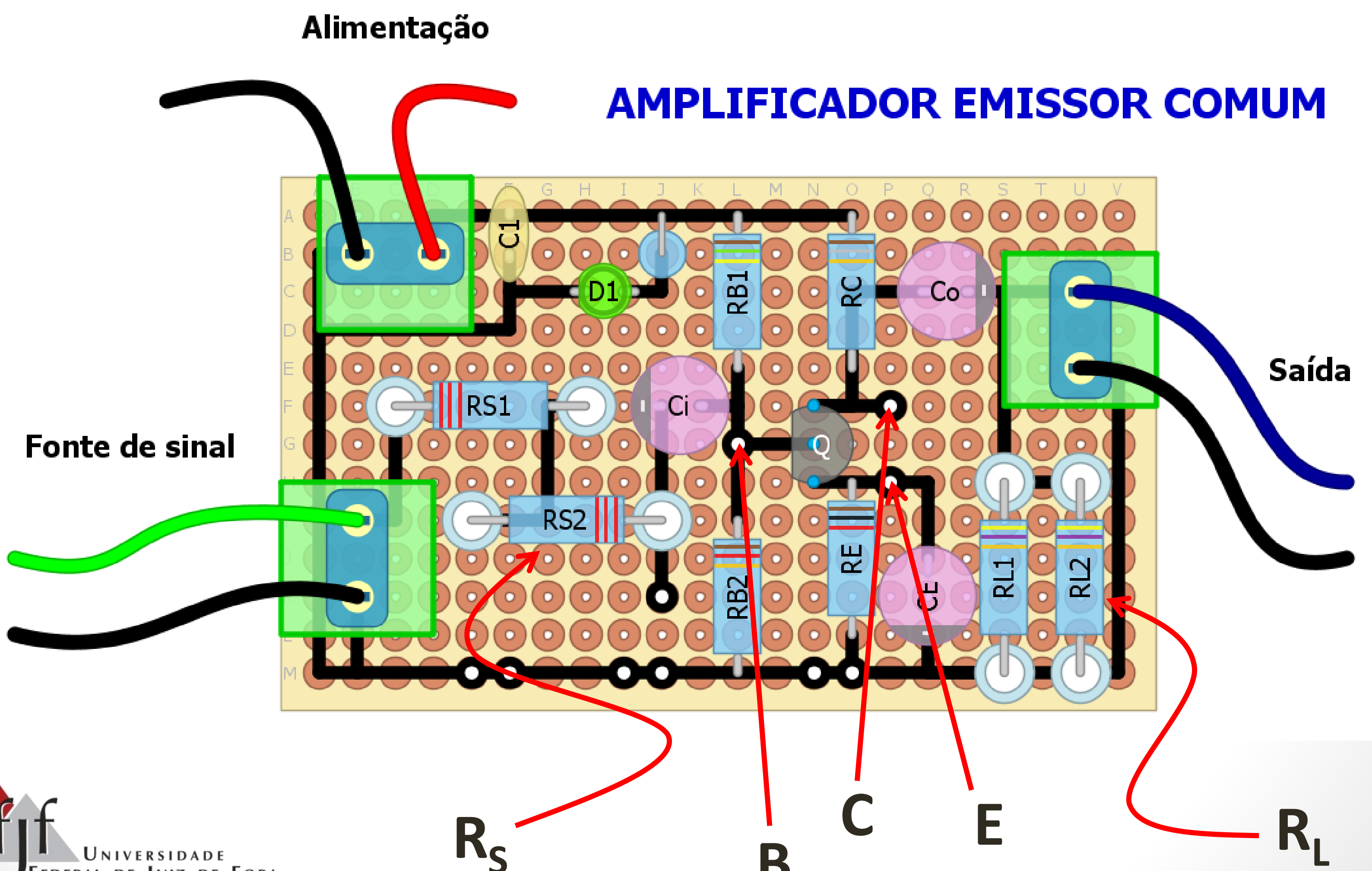
eq. do BJT:

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

Universidade Federal de Juiz de Fora

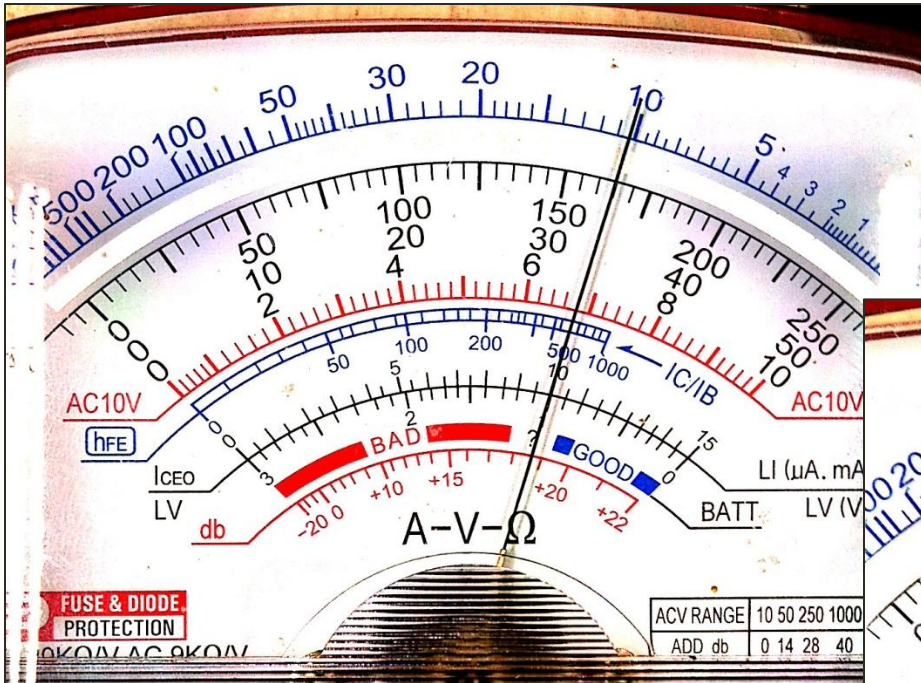
Placa de circuito

Circuito construído em placa ilhada perfurada (*perfboard*):



Universidade Federal de Juiz de Fora

Medição do ganho de corrente dos BJTs

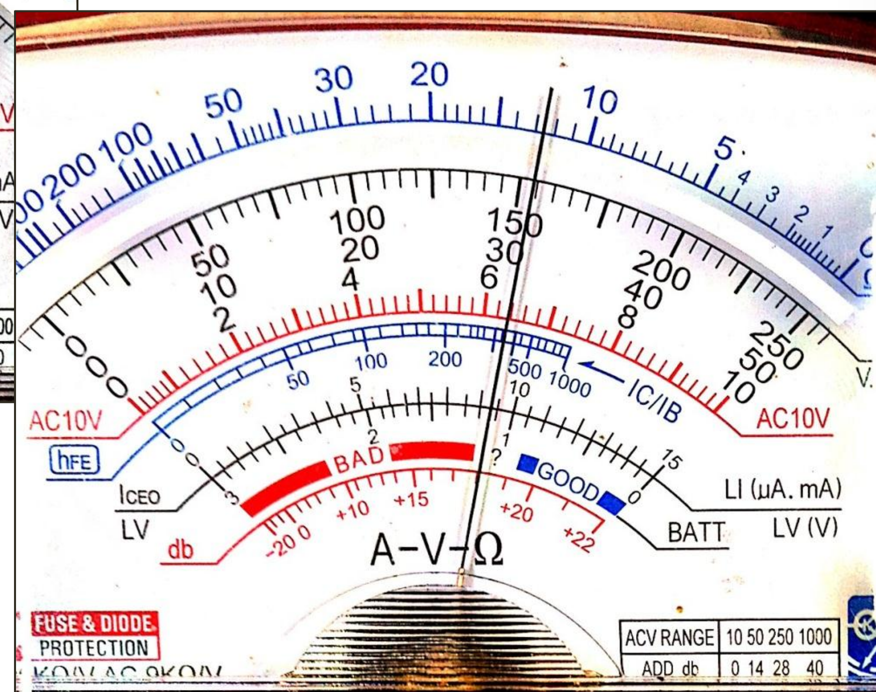


$$h_{FE} = \beta = 500$$

classe C (BC547C)

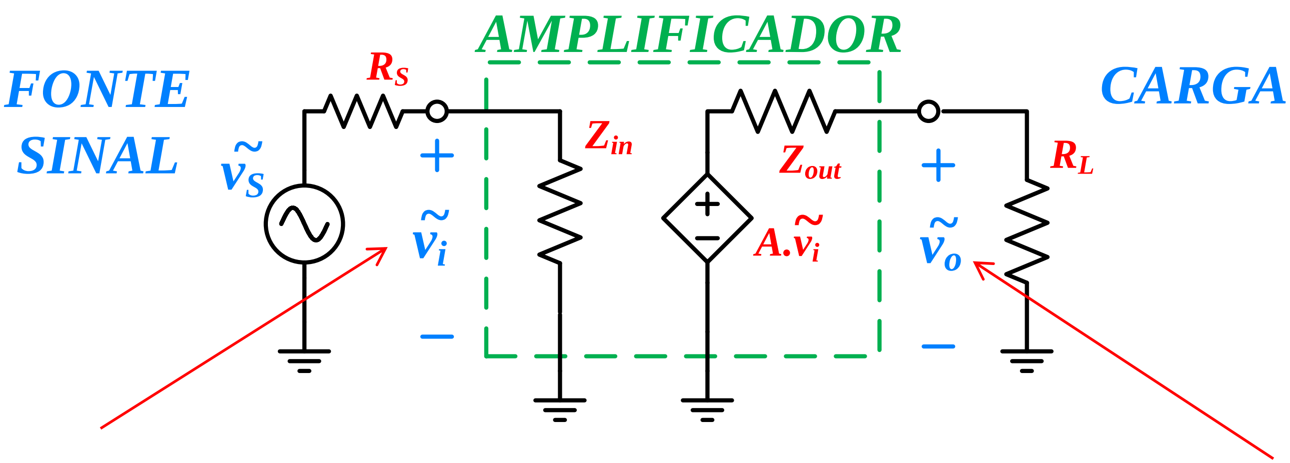
classe B (BC548B)

$$h_{FE} = \beta = 350$$



Universidade Federal de Juiz de Fora

Metodologia de medição das impedâncias de entrada & saída



Para obter Z_{in}:

1. Meça v_i c/ $\mathbf{R_S}$ nominal → $\mathbf{v_{i1}}$
2. Meça v_i c/ $\mathbf{R_S = 2.R_S}$ → $\mathbf{v_{i2}}$
3. Use a relação entre as tensões:

$$V_{i1} > V_{i2}$$

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

Para obter Z_{out}:

1. Meça v_o c/ $\mathbf{R_L}$ nominal → $\mathbf{v_{o1}}$
2. Meça v_o c/ $\mathbf{R_L = R_L / 2}$ → $\mathbf{v_{o2}}$
3. Use a relação entre as tensões:

$$V_{o1} > V_{o2}$$

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

ufjf Universidade Federal de Juiz de Fora