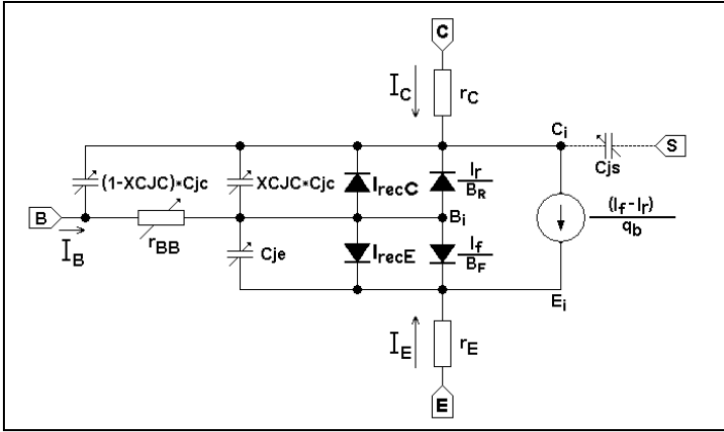
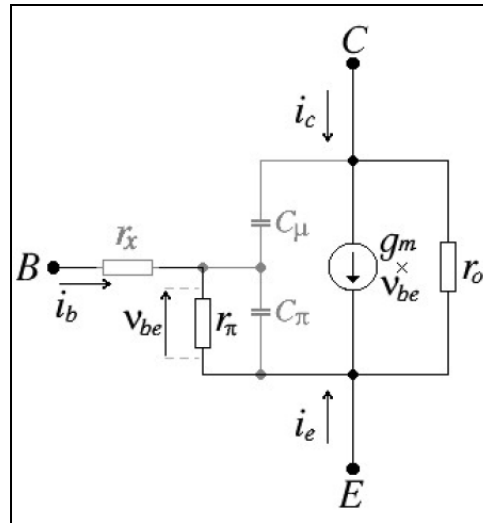
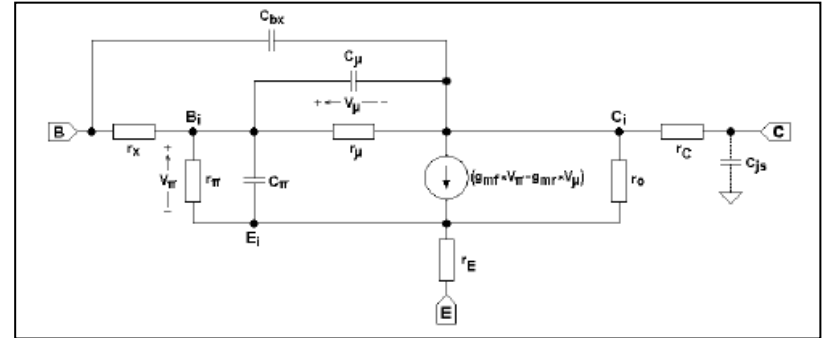


Análise AC de Circuitos com BJT

Recordação

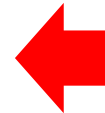


Modelo de Gummel – Poon Completo
(Grandes Sinais)
(4 Regiões de Operação)

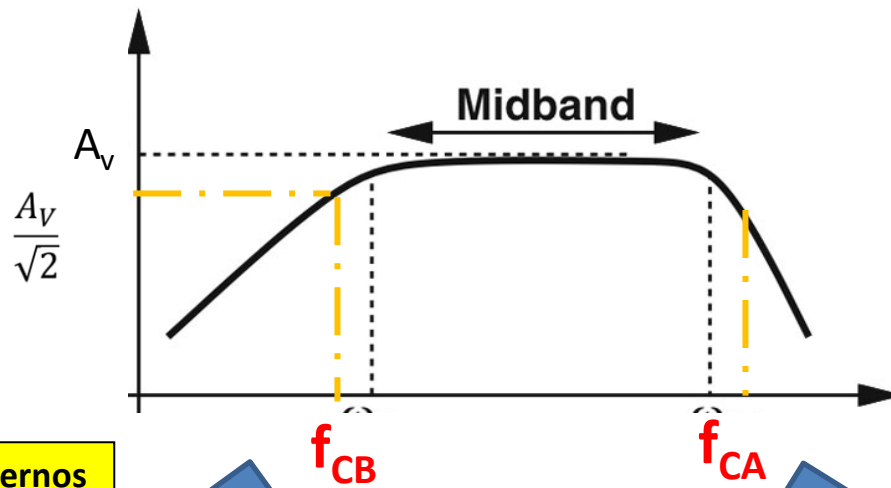
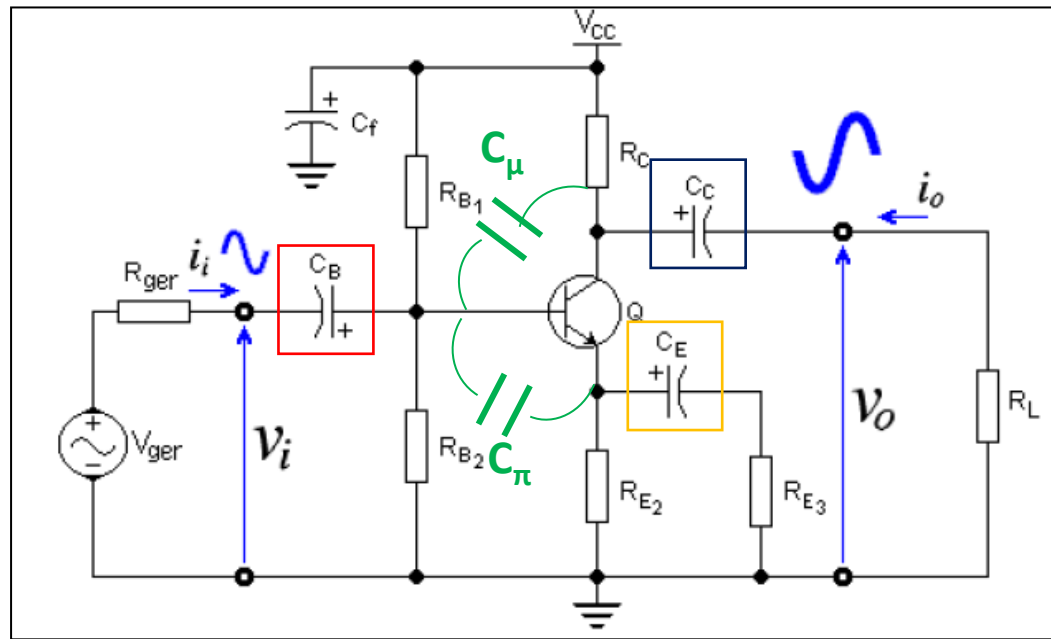


Modelo de Gummel – Poon Simplificado
(Pequenos Sinais)
(Região Ativa)

$$\begin{aligned}
 C_{bx} &= C_{js} = r_C = \\
 r_E &= r_x = 0 \\
 r_\mu &\rightarrow \infty \\
 g_{mf} &= g_m, g_{mr} = 0 \\
 e \ v_\pi &= v_{BE}
 \end{aligned}$$



Resposta em Frequência

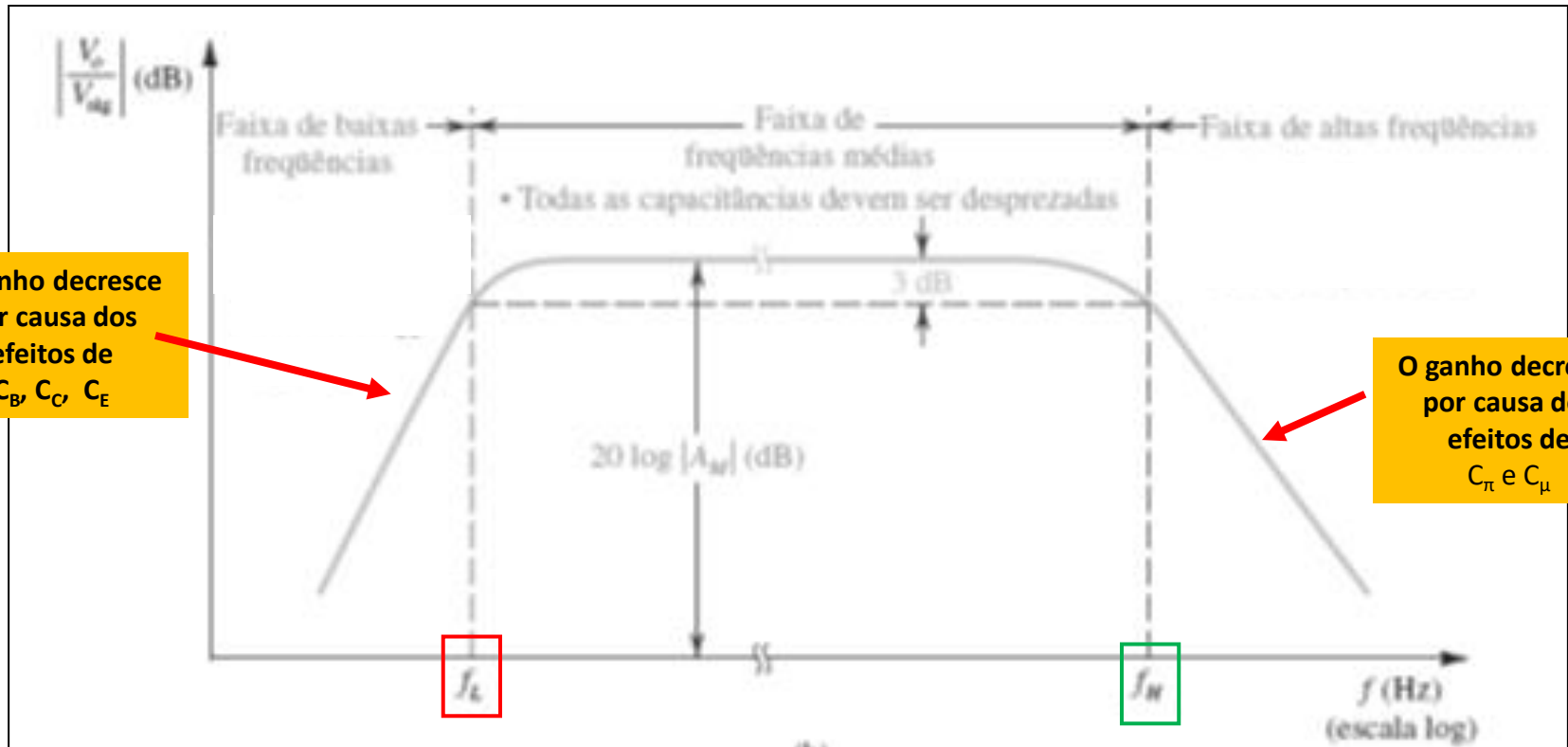


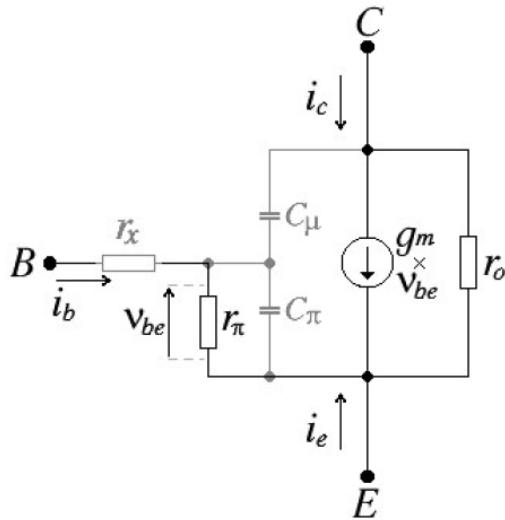
os capacitores externos C_B , C_C , C_E influenciam a resposta em baixa frequência !

os capacitores internos (C_π , C_μ , trilhas de protoboard) influenciam a resposta em alta frequência !!

Resposta em Frequência

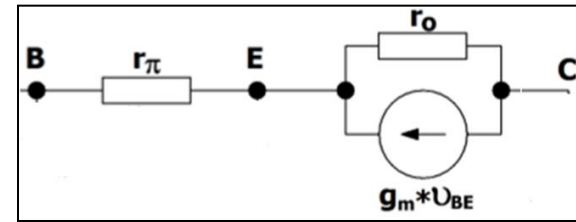
A influência das capacitâncias de acoplamento e intrínsecas do BJT no desempenho de um amplificador são ilustradas na figura abaixo !





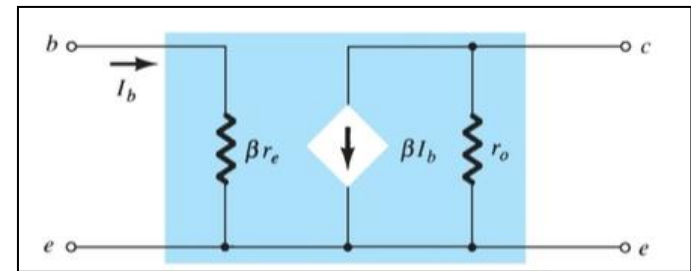
Este modelo é utilizado para a determinação das frequências de corte baixa e alta de um amplificador !

As equações são descritas nas apostilas “**Polarização e Amplificação**” (Paulo R Veronese, 2015). e “**BJT – Resumo da Teoria**” (Paulo R Veronese, 2012).



Este modelo é utilizado para a determinação das equações na banda de passagem de um amplificador.

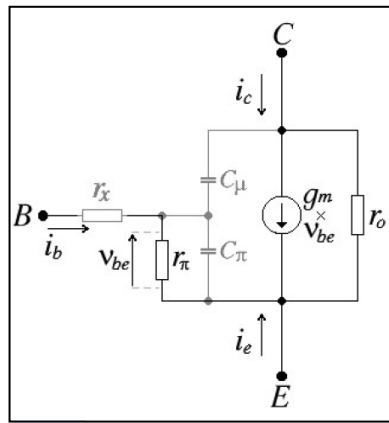
As equações são descritas na apostila “**Amplificadores Básicos com BJT**” (Paulo R Veronese, 2016).



Modelo r_e para EC

Este modelo é utilizado para a determinação das equações na banda de passagem de um amplificador !

As equações são descritas no Capítulo 5 “**BJT AC Analysis**” do livro “Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos” (Boylestad / Nashelsky, 2013)



Modelo simplificado
para a dedução das
equações de
desempenho de
circuitos com BJT.

Na investigação sobre o uso do modelo simplificado para a dedução das equações de desempenho de circuitos com BJT foram utilizados os seguintes transistores comerciais **com β s muito diferentes**:

NPN: BC548A, BC548B e BC548C

PNP: BC558A, BC558B e BC558C

Os parâmetros dos transistores anteriores foram alterados gerando transistores modelados a partir do modelo completo de Gummel-Poon com **37 parâmetros** :

NPN - **BC548Av, BC548Bv e BC548BCv**

PNP - **BC558Av, BC558Bv e BC558Cv**

Os parâmetros dos transistores anteriores foram alterados gerando transistores modelados a partir do modelo completo de Gummel-Poon com **16 parâmetros** :

NPN - **QnA, QnB e QnC**

PNP - **QpA, QpB e QpC**

Parâmetros dos transistores npn QnB E BC547B

.model QnB NPN

(16 parâmetros)

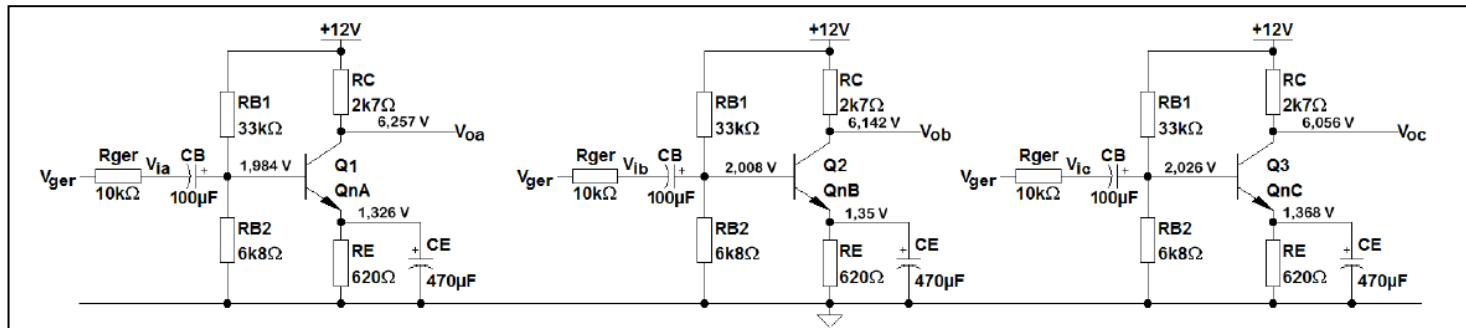
IS=19.22105f BF=272.7546 VAF=66.4
XTB=.3 NF=1.0022 BR=10 NR=1 XTI=5.98
CJC=6.517p VJC=0.6148 MJC=0.3362
CJE=12.5p VJE=.6 MJE=.55 TF=820p
Vceo=45 Icrating=100m mfg=Veronese

.model BC547Bv NPN

(37 parâmetros)

IS=2.39E-14 NF=1.008 ISE=3.545E-15
NE=1.541 BF=294.3 IKF=0.1357 VAF=63.2
NR=1.004 ISC=6.272E-14 NC=1.243
BR=7.946 IKR=0.1144 VAR=25.9 RB=1
IRB=1.00E-06 RBM=1 RE=0.4683 RC=0.85
XTB=0 EG=1.11 XTI=3 CJE=1.358E-11
VJE=0.65 MJE=0.3279 TF=4.391E-10
XTF=120 VTF=2.643 ITF=0.7495 PTF=0
CJC=3.728E-12 VJC=0.3997 MJC=0.2955
XCJC=0.6193 TR=1.00E-32 CJS=0 VJS=0.75
MJS=0.333 FC=0.9579 Vceo=45
Icrating=100m mfg=NXP

Na investigação sobre o uso do modelo simplificado para a dedução das equações de desempenho de circuitos com BJT foram utilizados os amplificadores EC da figura abaixo com a mesma polarização.



O desempenho destes amplificadores foi investigado utilizando os transistores **QnA, QnB e QnC** e **BC548A, BC548B e BC548C**.

A tabela abaixo mostra que os resultados da análise DC e AC são pouco afetados.

	QnA	QnB	QnC	BC548A	BC548B	BC548C
I_B [μ A]	11,80	7,49	4,26	11,70	7,44	4,24
I_C [mA]	2,13	2,17	2,20	2,13	2,17	2,20
V_{BE} [V]	0,658	0,658	0,659	0,658	0,658	0,659
V_{BC} [V]	-4,27	-4,13	-4,03	-4,27	-4,13	-4,03
V_{CE} [V]	4,93	4,79	4,69	4,93	4,79	4,69
β_{DC}	180	290	517	181	292	520
g_m [A/V]	82,0 m	83,7 m	84,9 m	80,5 m	82,2 m	82,5 m
r_π [k Ω]	2,20	3,46	6,08	2,46	3,80	6,65
r_o [k Ω]	53,9	32,5	17,0	52,2	30,5	15,0
r_X [Ω]	0	0	0	37,7	106	285
C_π [pF]	96,8	99,0	101	65,1	65,5	65,4
C_μ [pF]	3,25	3,28	3,30	3,25	3,28	3,30
β_{AC}	180	290	517	198	312	549
f_T [MHz]	131	130	130	188	190	191
A_{vr} [V/V]	-28,805	-36,836	-44,763	-30,029	-37,117	-42,850
R_i [k Ω]	1,582	2,146	2,928	1,738	2,314	3,115
R_o [k Ω]	2,571	2,493	2,330	2,568	2,481	2,289
f_{CB} [Hz]	10,64	13,42	16,17	11,06	13,52	15,50
f_{CA} [kHz]	148,14	114,87	93,71	145,91	115,00	94,23

ANÁLISE DC

ANÁLISE AC
(Parâmetros
da Análise)

ANÁLISE AC
(Resultados)

**Análise AC de Circuitos
com BJT
(Banda de Passagem)**

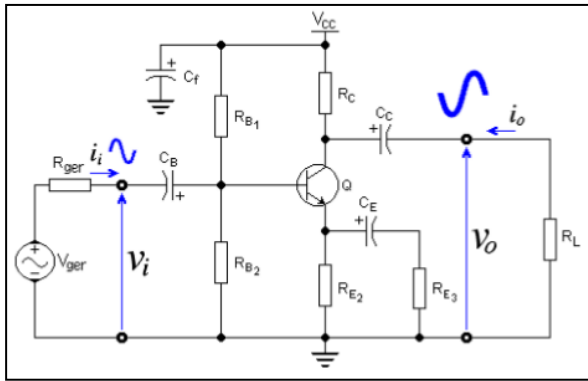
SEL-EESC-USP

Amplificadores Básicos com BJT

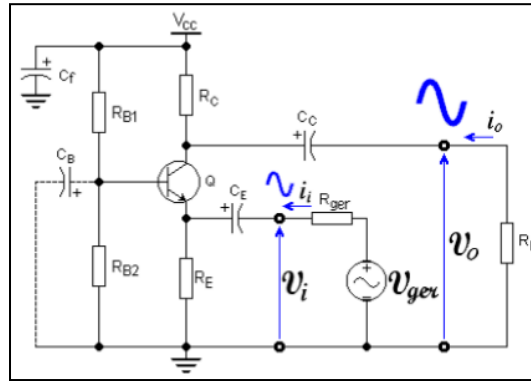
Equações Básicas

P. R. Veronese
2016

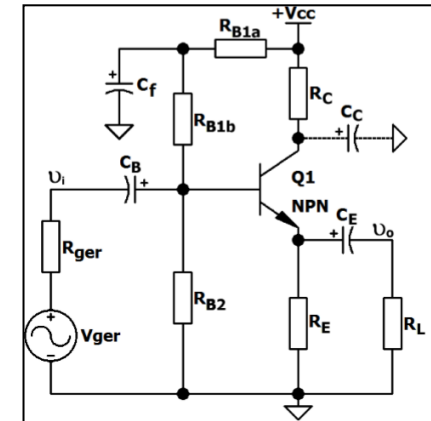
As seguintes equações de polarização e de parâmetros incrementais são válidas para os amplificadores analisados a seguir:



Amplificador Emissor Comum Genérico



Amplificador Base Comum Genérico



Amplificador Coletor Comum Genérico

Ponto de Polarização

$$I_{CQ} = \frac{\left(\frac{V_{CC}}{R_{B1}} - \frac{V_{BEQ}}{R_B}\right) \times R_B \times \beta}{R_B + r_x + (\beta + 1) \times R_E} + S \times I_{CBO}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - \left(R_C + \frac{\beta + 1}{\beta} R_E\right) \times I_{CQ}$$

Parâmetros Incrementais

Transcondutância

$$g_m = \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} = \frac{I_{CQ}}{N_F V_t} \quad [\text{A/V}]$$

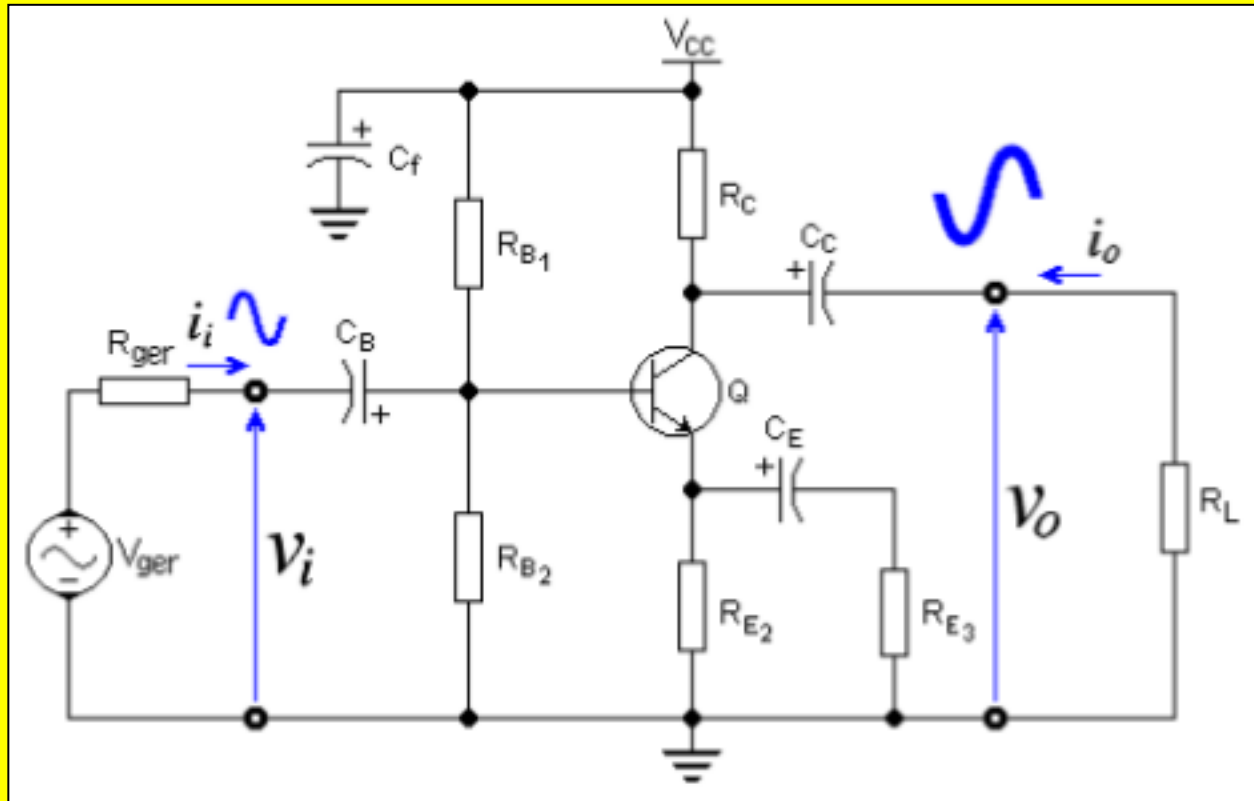
Resistência Incremental de Entrada

$$r_\pi = \frac{\partial V_{BE}}{\partial I_B} = \frac{\beta_{AC}}{g_m} \quad [\Omega]$$

Resistência Incremental de Saída

$$r_o = \frac{\partial V_{CE}}{\partial I_C} = \frac{V_{AF} + V_{CEQ} - V_{BEQ}}{I_{CQ}} \quad [\Omega]$$

Emissor Comum



Amplificador Emissor Comum Genérico

Observações:

1

As equações dessa configuração, deduzidas a seguir, descrevem o **desempenho do amplificador na banda de passagem calculando os seguintes parâmetros: ganho de tensão (A_v), resistência de entrada (R_i) e resistência de saída (R_o).**

2

Neste modelo não constam a resistência r_μ (muito alta), as capacitâncias de acoplamento (C_B , C_C , C_E) e as capacitâncias intrínsecas do BJT (C_π e C_μ).

3

A inclusão das capacitâncias C_B , C_C e C_E permite determinar o **desempenho do amplificador em baixa frequência: frequência de corte baixa (f_{CB}).**

4

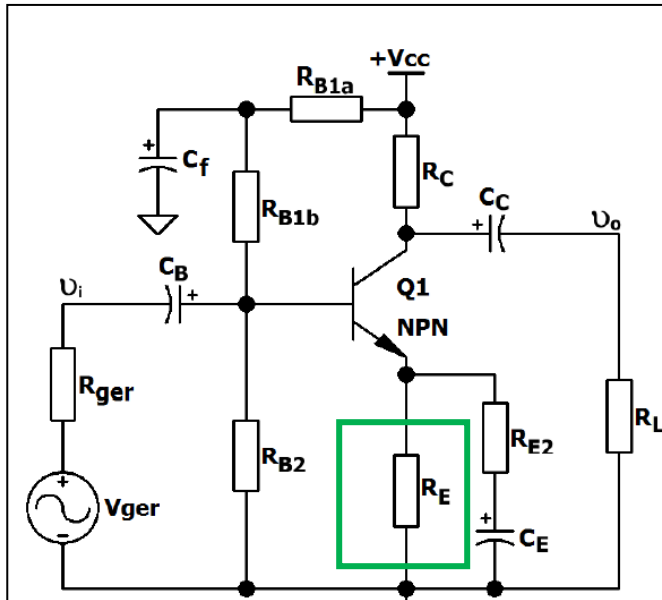
A inclusão das capacitâncias C_π e C_μ permite determinar o **desempenho do amplificador em alta frequência: frequência de corte alta (f_{CA}).**

5

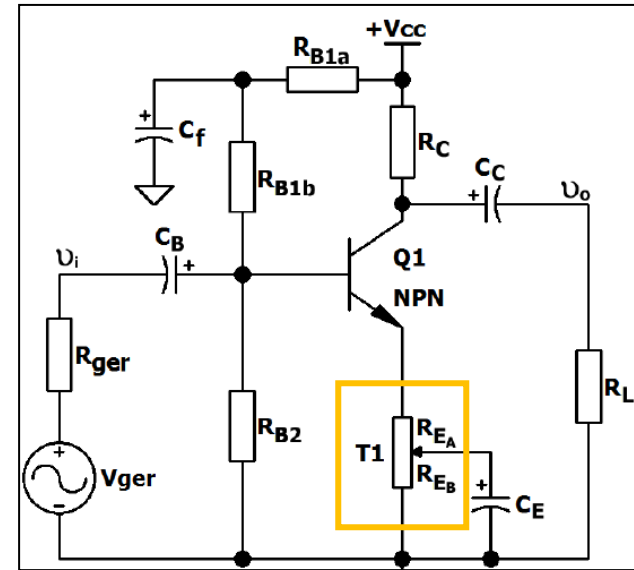
A análise incluindo os capacitores está descrita na apostila “BJT – Resumo da Teoria”, Paulo R Veronese, 2012.

Emissor Comum

O **emissor-comum** é o mais importante e mais usado amplificador bipolar de eletrônica analógica.



Amplificador EC Genérico
(Ganho de Tensão Fixo)

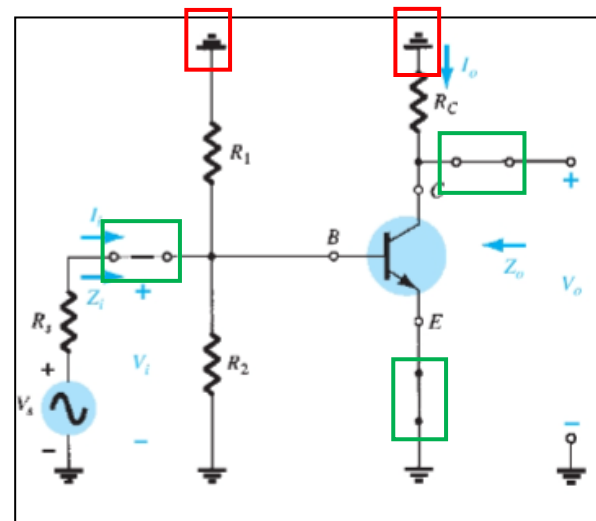
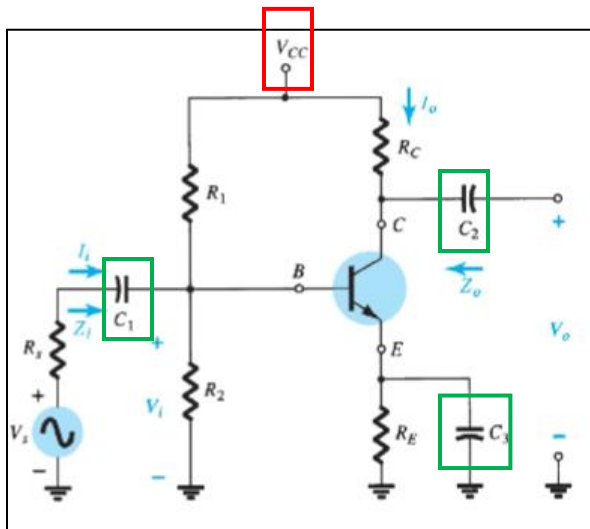
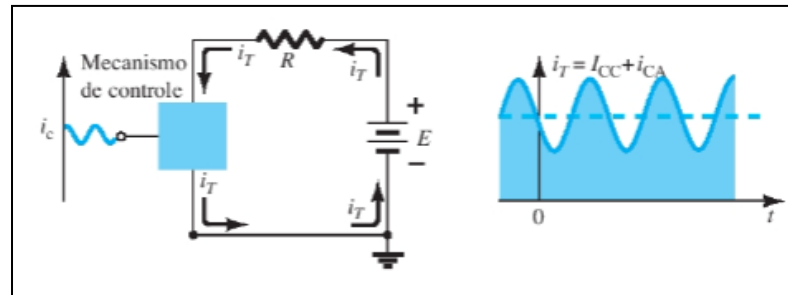


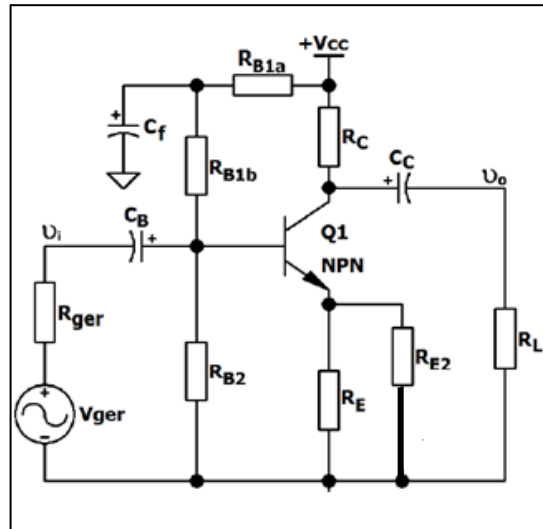
Amplificador EC Genérico
(Ganho de Tensão Variável)

Análise AC

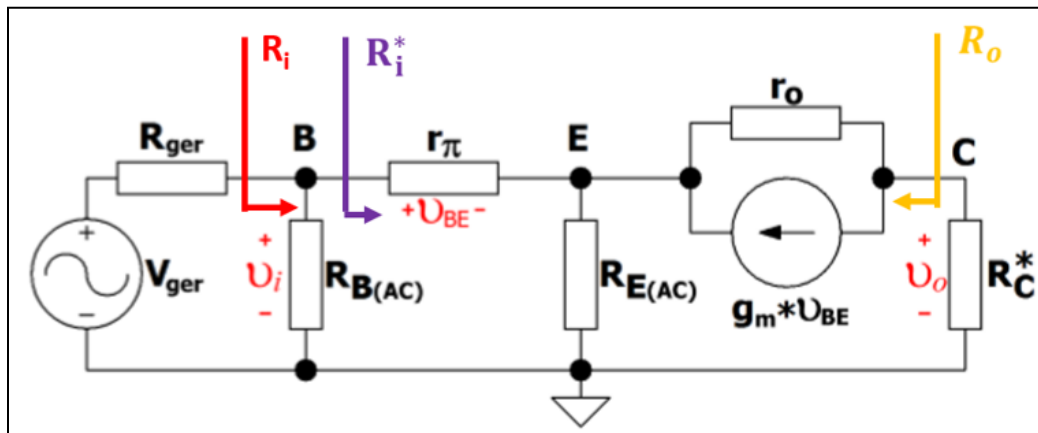
Na análise AC:

- 1) As fontes DC são curto-circuitadas porque o interesse é apenas a resposta AC.
- 2) Os capacitores de acoplamento são curto circuitados porque apresentam baixa reatância capacitiva.





O circuito abaixo representa o modelo linearizado de um amplificador EC genérico com o resitor R_E não desacoplado, ou seja, presente no circuito.



$$R_i = \frac{v_i}{i_i}$$

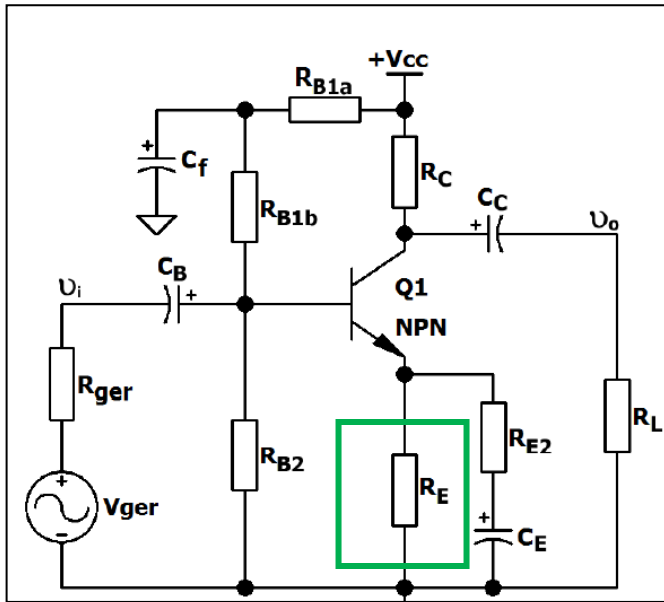
$$R_o = \frac{v_o(\text{vazio})}{i_o(\text{curto})}$$

$$R_C^* = \frac{R_C \times R_L}{R_C + R_L}$$

$$R_{B(AC)} = \frac{R_{B1} \times R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

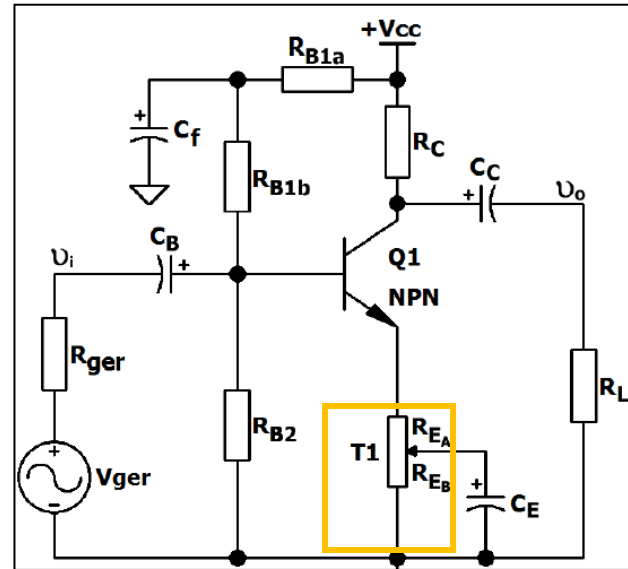
Resistência de Entrada (R_i)

Amplificador EC Genérico (Ganho de Tensão Fixo)



$$R_{E(AC)} = \frac{R_E R_{E2}}{R_E + R_{E2}}$$

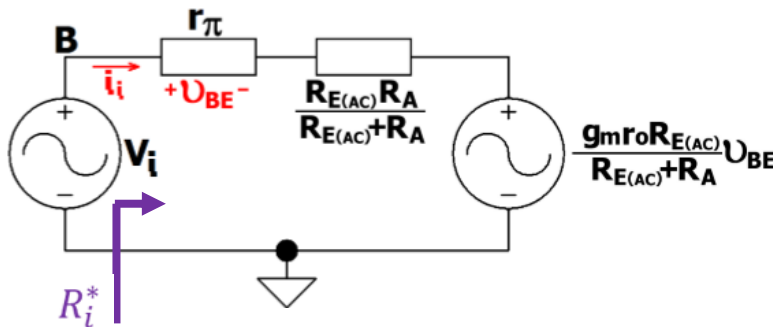
Amplificador EC Genérico (Ganho de Tensão Variável)



$$R_{E(AC)} = R_{EA}$$

1

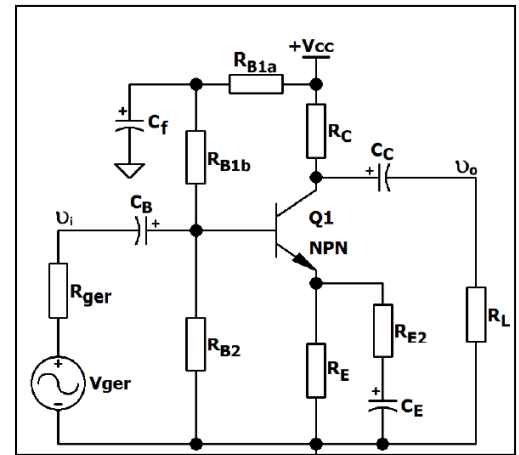
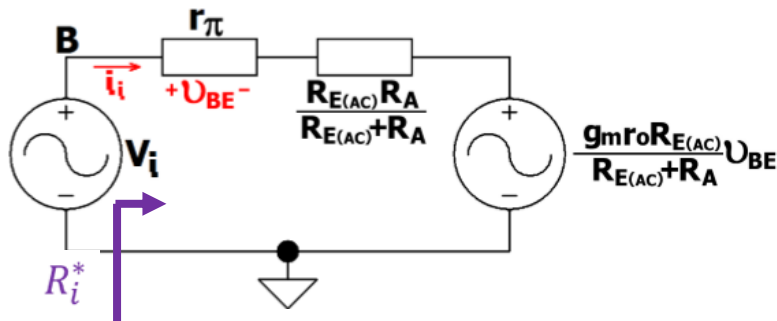
Aplicando-se os Teoremas de Norton e de Thévenin ao amplificador EC genérico pode-se, **a partir da saída**, reduzir o circuito a seguinte malha:



$$R_A = r_o + R_C^*$$

$$R_C^* = \frac{R_C R_L}{R_C + R_L}$$

Resistência de Entrada (R_i)



2

Mostra-se que:

$$i_i = \frac{[R_{E(AC)} + R_A] \vartheta_i}{R_{E(AC)} R_A + r_\pi [R_A + (1 + g_m r_o) R_{E(AC)}]}$$

$$R_i^* = r_\pi + \frac{r_o + R_C + g_m r_\pi r_o}{r_o + R_C + R_{E(AC)}} \times R_{E(AC)}$$

Se $R_L \rightarrow \infty \rightarrow R_i^* \approx r_\pi + \beta_{AC} R_{E(AC)}$

3

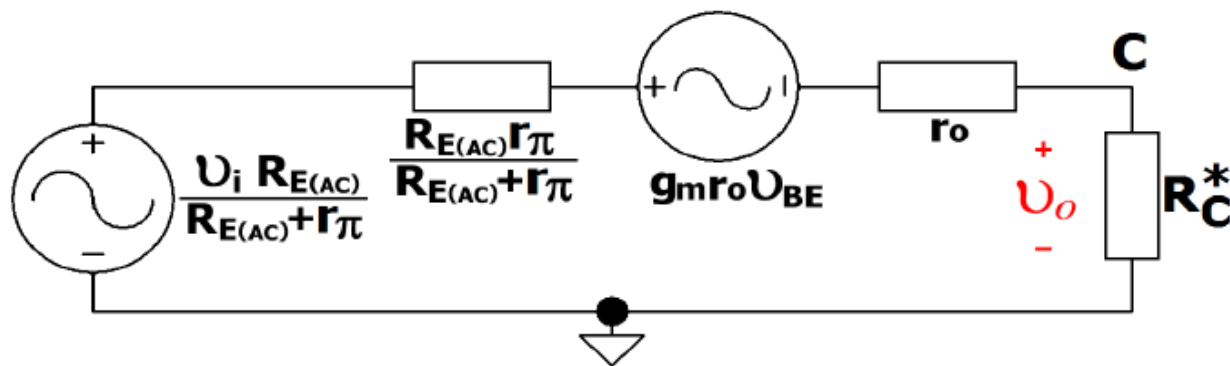
$$R_i = \frac{v_i}{i_i} \rightarrow R_i = \frac{R_{B(AC)} R_i^*}{R_{B(AC)} + R_i^*} \quad R_{B(AC)} = \frac{R_{B2} R_{B1b}}{R_{B2} + R_{B1b}}$$

4

$$v_{BE} = r_\pi i_i \rightarrow \vartheta_{BE} = \frac{[R_{E(AC)} + R_A] r_\pi}{R_{E(AC)} R_A + r_\pi [R_A + (1 + g_m r_o) R_{E(AC)}]} \vartheta_i$$

Ganho de Tensão (A_v)

Aplicando-se os Teoremas de Norton e de Thévenin ao amplificador EC genérico pode-se, **a partir da entrada**, reduzir o circuito a uma malha apenas.



Mostra-se que a tensão de saída do circuito calculada através da corrente de malha é dada por:

$$v_o = \frac{[R_{E(AC)} - g_m r_\pi r_o] R_C^*}{[R_{E(AC)} + r_o + R_C^*] r_\pi + [R_C^* + (1 + g_m r_\pi) r_o] R_{E(AC)}} \times v_i$$

$$\rightarrow A_\theta = \frac{[R_{E(AC)} - g_m r_\pi r_o] R_C^*}{[R_{E(AC)} + r_o + R_C^*] r_\pi + [R_C^* + (1 + g_m r_\pi) r_o] R_{E(AC)}} \quad [V/V]$$

$$\rightarrow A_v \cong - \frac{R_C}{R_{E(AC)}}$$

Resistência de Saída (R_o)

Se o circuito estiver em vazio, isto é, se $R_L \rightarrow \infty$, então $R_C^* = R_C$ e $\vartheta_o = \vartheta_{o(\text{vazio})}$. Assim:

$$\vartheta_o = \frac{[R_{E(AC)} - g_m r_\pi r_o] R_C^*}{[R_{E(AC)} + r_o + R_C^*] r_\pi + [R_C^* + (1 + g_m r_\pi) r_o] R_{E(AC)}} \times \vartheta_i \rightarrow \vartheta_{o(\text{vazio})} = \frac{[R_{E(AC)} - g_m r_\pi r_o] R_C}{[R_{E(AC)} + r_o + R_C] r_\pi + [R_C + (1 + g_m r_\pi) r_o] R_{E(AC)}} \times \vartheta_i$$

Se, no entanto, o circuito estiver com a saída em curto-circuito, então $R_L = 0$, $R_C^* = 0$, $\vartheta_o = \vartheta_{o(\text{vazio})} = 0$.

$$i_o = \frac{v_o}{R_C^*} \rightarrow i_{o(\text{curto})} = \lim_{R_L \rightarrow 0} \frac{v_o}{R_C^*}$$

$$\rightarrow i_{o(\text{curto})} = \frac{R_{E(AC)} - g_m r_\pi r_o}{[R_{E(AC)} + r_o] r_\pi + (1 + g_m r_\pi) r_o R_{E(AC)}} \times \vartheta_i$$

$$R_o = \vartheta_{o(\text{vazio})} / i_{o(\text{curto})}$$

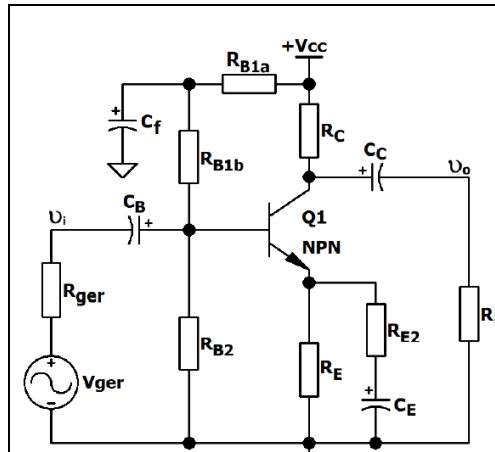
$$R_o = \frac{[(R_{E(AC)} + r_o) r_\pi' + (1 + g_m r_\pi) r_o R_{E(AC)}] R_C}{[R_{E(AC)} + r_o + R_C] r_\pi' + [R_C + (1 + g_m r_\pi) r_o] R_{E(AC)}} \quad [\Omega]$$

$$R_o \approx \frac{r_o R_C}{r_o + R_C}$$

$$r_\pi' = r_\pi + \frac{R_{ger} R_{B(AC)}}{R_{ger} + R_{B(AC)}}$$

A grandeza r_π' agrega todas as resistências que estão ligadas na entrada do amplificador (r_π ; $R_{B(AC)}$ e R_{ger}).

Ganho de Tensão em Relação ao Gerador (A_{vg})



$$A_{vg} = \frac{R_i}{R_{ger} + R_i} \times A_{\theta}$$

Análise DC

Ponto de Polarização

$$I_{CQ} = \frac{\left(\frac{V_{CC}}{R_{B1}} - \frac{V_{BEQ}}{R_B}\right) \times R_B \times \beta}{R_B + r_x + (\beta + 1) \times R_E} + S \times I_{CB0}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - \left(R_C + \frac{\beta + 1}{\beta} R_E\right) \times I_{CQ}$$

Parâmetros Incrementais

Transcondutância

$$g_m = \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} = \frac{I_{CQ}}{N_F V_t} \quad [A/V]$$

Resistência Incremental de Entrada

$$r_\pi = \frac{\partial V_{BE}}{\partial I_B} = \frac{\beta_{AC}}{g_m} \quad [\Omega]$$

Resistência Incremental de Saída

$$r_o = \frac{\partial V_{CE}}{\partial I_C} = \frac{V_{AF} + V_{CEQ} - V_{BEQ}}{I_{CQ}} \quad [\Omega]$$

Análise AC

$$R_i = \frac{R_{B(AC)} R_i^*}{R_{B(AC)} + R_i^*}$$

$$R_i^* = r_\pi + \frac{r_o + R_C + g_m r_\pi r_o}{r_o + R_C + R_{E(AC)}} \times R_{E(AC)}$$

Se $R_L \rightarrow \infty$ $R_i^* \approx r_\pi + \beta_{AC} R_{E(AC)}$

$$R_o = \frac{[(R_{E(AC)} + r_o) r_\pi' + (1 + g_m r_\pi) r_o R_{E(AC)}] R_C}{[R_{E(AC)} + r_o + R_C] r_\pi' + [R_C + (1 + g_m r_\pi) r_o] R_{E(AC)}}$$

$$R_o \approx \frac{r_o R_C}{r_o + R_C} \quad r_\pi' = r_\pi + \frac{R_{ger} R_{B(AC)}}{R_{ger} + R_{B(AC)}}$$

$$A_\theta = \frac{[R_{E(AC)} - g_m r_\pi r_o] R_C^*}{[R_{E(AC)} + r_o + R_C^*] r_\pi + [R_C^* + (1 + g_m r_\pi) r_o] R_{E(AC)}} \quad [V/V]$$

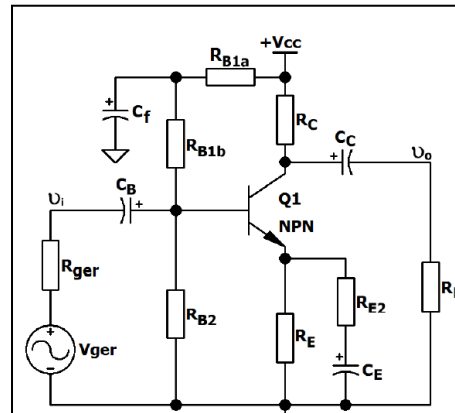
$$A_v \cong - \frac{R_C}{R_{E(AC)}}$$

$$A_{\theta g} = \frac{R_i}{R_{ger} + R_i} \times A_\theta$$

**Exemplo de
Análise DC e AC
em Amplificador
Emissor Comum**

O amplificador EC com ganho de tensão fixo abaixo foi polarizado com as seguintes grandezas:

$V_{CC} = +30 \text{ V}$, $R_{B1a} = 20 \text{ k}\Omega$, $R_{B1b} = 180 \text{ k}\Omega$, $R_{B2} = 33 \text{ k}\Omega$, $R_C = 6,8 \text{ k}\Omega$ e $R_E = 1,5 \text{ k}\Omega$,
 $R_{E2} = 1,08 \text{ k}\Omega$ e $R_{ger} = 1,0 \text{ k}\Omega$.



a.) Sabendo-se que o transistor Q_1 possui $\beta_{AC} = \beta = 102,2$; $V_{BE} = 0,7 \text{ V}$ e $V_{AF} = \infty$, calcular R_i , R_o , A_{ϑ} e $A_{\vartheta g}$, **em vazio**, para pequenos sinais na faixa de passagem. Considerar todos os capacitores como curtos-circuitos em AC e $r_o = \infty$.

b.) Avaliar se o circuito foi bem polarizado e se o fator de estabilidade do ponto quiescente (S) esta adequado.

c.) Calcular a porcentagem de erro se a equação compacta de ganho de tensão for utilizada.

$$A_{\vartheta} = -\frac{R_C}{R_{E(AC)}}$$

a

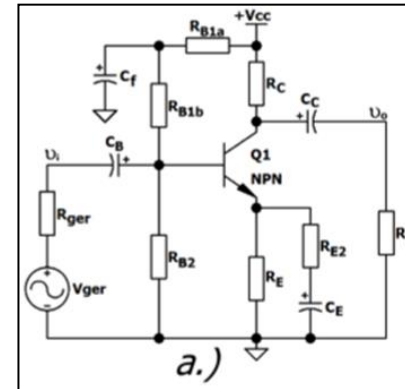
1

Análise DC

$$R_{B1} = 20k + 180k = 200k$$

$$R_B = \frac{200k \times 33k}{200k + 33k} = 28,3262k$$

$$R_E = 1,5k$$



$$I_{CQ} = \frac{\left(\frac{V_{CC}}{R_{B1}} - \frac{V_{BEQ}}{R_B}\right) \times R_B \times \beta}{R_B + r_x + (\beta + 1) \times R_E} + \underbrace{S \times I_{CBO}}_{\cong 0} \rightarrow I_{CQ} = \frac{\left(\frac{30}{200k} - \frac{0,7}{28,3262k}\right) 102,2 \times 28,3262k}{28,3262k + 103,2 \times 1,5k} = 1,9806 \text{ mA}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - \left(R_C + \frac{\beta + 1}{\beta} R_E\right) \times I_{CQ} \rightarrow V_{CEQ} = 30 - \left[6,8k + \frac{103,2}{102,2} \times 1,5k\right] \times 1,9806 \text{ mA} = 13,532 \text{ V}$$

2

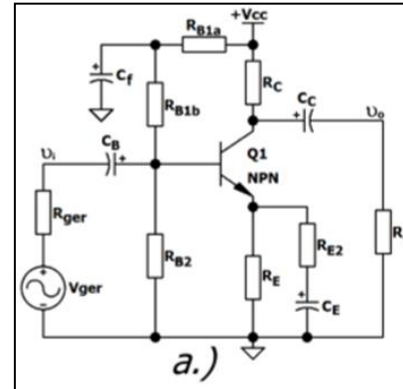
Cálculo dos Parâmetros Incrementais

$$g_m = \frac{I_{CQ}}{N_F V_t} \rightarrow g_m = \frac{1,9806 \text{ m}}{25,865 \text{ m}} = 76,5748 \text{ mA/V}$$

$$r_{\pi} = \frac{\beta_{AC}}{g_m} \rightarrow r_{\pi} = \frac{102,2}{76,5748 \text{ m}} = 1,3346 \text{ k}\Omega$$

$$r_o = \infty$$

$$R_{B1a}=20 \text{ k}\Omega, R_{B1b}=180 \text{ k}\Omega, \\ R_{B2}=33 \text{ k}\Omega, R_C=6,8 \text{ k}\Omega \text{ e } R_E=1,5 \text{ k}\Omega, \\ R_{E2}=1,08 \text{ k}\Omega \text{ e } R_{ger}=1,0 \text{ k}\Omega$$



$$R_{B(AC)} = \frac{180k \times 33k}{180k + 33k} = 27,8873 \text{ k}\Omega$$

$$R_{E(AC)} = \frac{1,5k \times 1,08k}{1,5k + 1,08k} = 627,907 \Omega$$

$$A_{\theta} = \frac{[R_{E(AC)} - g_m r_{\pi} r_o] R_C^*}{[R_{E(AC)} + r_o + R_C^*] r_{\pi} + [R_C^* + (1 + g_m r_{\pi}) r_o] R_{E(AC)}} \quad [V/V]$$

Se $R_L = \infty$ $\rightarrow R_C^* = R_C$
 $r_o = \infty$

$$A_V = \frac{-g_m r_{\pi} R_C}{(R_{E(AC)} + R_C) r_{\pi} + (1 + g_m r_{\pi}) R_{E(AC)}} = \frac{-\beta R_C}{(R_{E(AC)} + R_C) r_{\pi} + (1 + \beta) R_{E(AC)}}$$

$$A_{\theta} = \frac{-102,2 \times 6,8k}{[627,907 + 6,8k] 1,3346k + 103,2 \times 627,907} \rightarrow A_{\theta} = -10,5083 \text{ V/V}$$

4

$$R_i^* = r_\pi + \frac{R_C^* + (1 + g_m r_\pi) r_o}{R_C^* + r_o + R_{E(AC)}} \times R_{E(AC)}$$

Se $R_L = \infty \rightarrow R_i^* = r_\pi + (\beta + 1)R_E \rightarrow R_i^* = 1,3346k + 103,2 \times 1,5k = 66,1346 k\Omega$

$$R_i = \frac{R_i^* R_{B(AC)}}{R_i^* + R_{B(AC)}} \rightarrow R_i = \frac{66,1346k \times 27,8873k}{66,1346k + 27,8873k} \rightarrow R_i = 19,6158 k\Omega$$

5

$$A_{\theta g} = \frac{R_i}{R_i + R_{ger}} \times A_\theta = -\frac{19,6158k}{20,6158k} \times 10,50826 = -9,9985 V/V$$

b

O circuito foi razoavelmente bem polarizado porque o fator de estabilização do ponto quiescente é $S = (1 + R_B / R_C) = 1 + 28,3262k / 1,5k = 19,88$. Foi utilizado um filtro contra ruídos na polarização de base (R_{b1a} e C_f), o que melhora o desempenho do circuito.

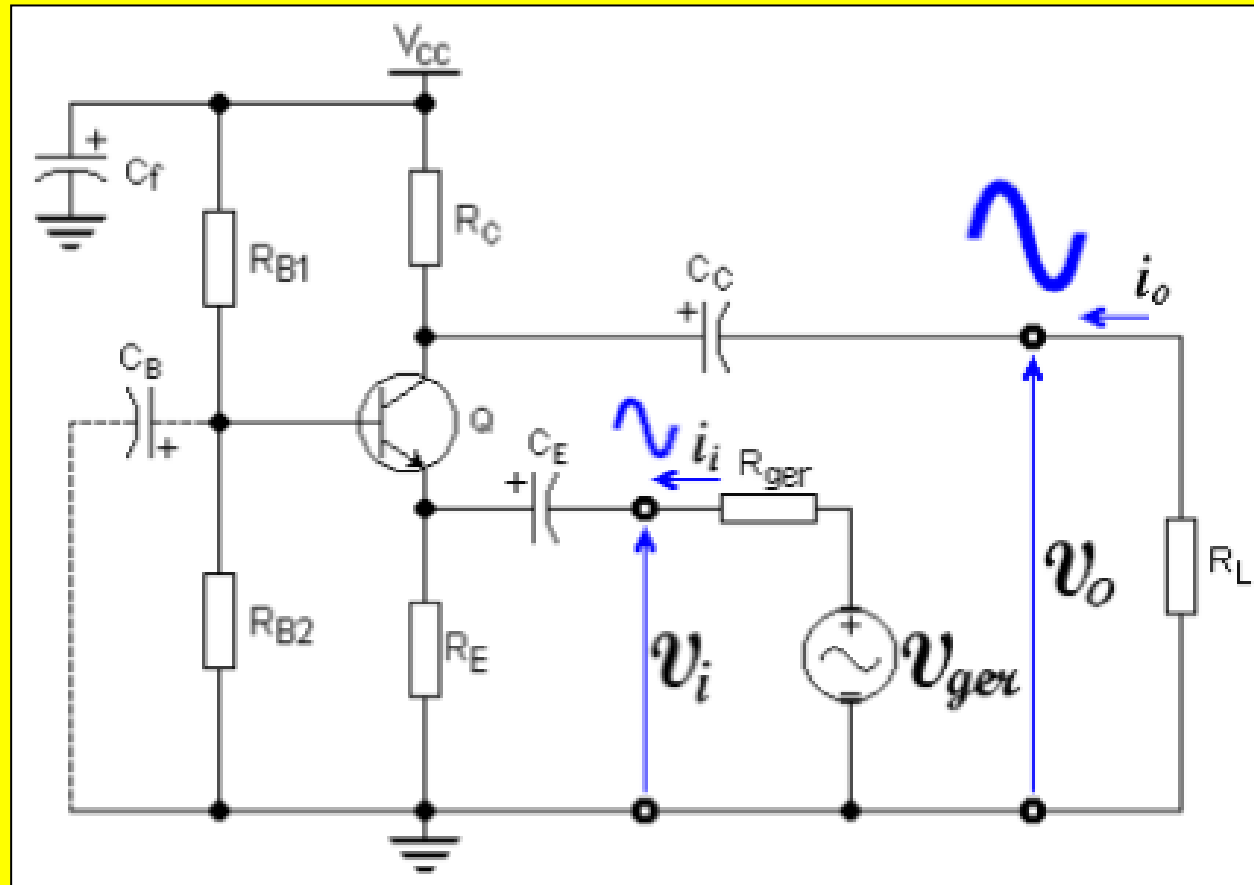
c

Cálculo de A_v pela equação compacta:

$$A_\theta = -\frac{R_C}{R_{E(AC)}} \rightarrow A_\theta = -\frac{6,8k}{627,907} = -10,83 V/V$$

O valor do ganho de tensão tem um erro de 3,06 % em relação ao valor calculado com exatidão.

Base Comum



Amplificador Base Comum Genérico

Observações:

1

As equações dessa configuração, deduzidas a seguir, descrevem o **desempenho do amplificador na banda de passagem calculando os seguintes parâmetros: ganho de tensão (A_v), resistência de entrada (R_i) e resistência de saída (R_o).**

2

Neste modelo não constam a resistência r_μ (muito alta), as capacitâncias de acoplamento (C_B , C_C , C_E) e as capacitâncias intrínsecas do BJT (C_π e C_μ).

3

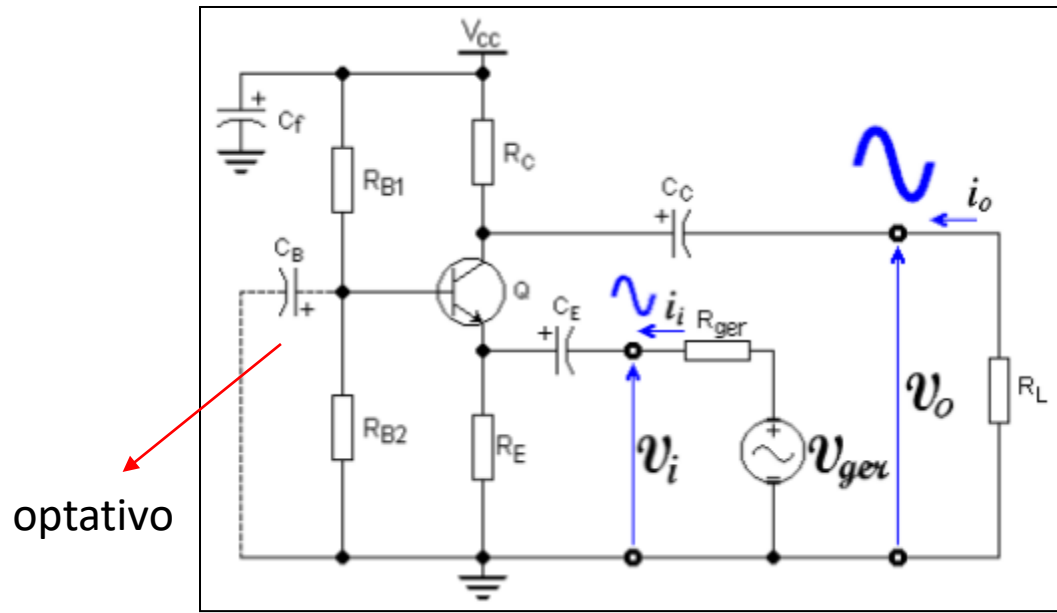
A inclusão das capacitâncias C_B , C_C e C_E permite determinar o **desempenho do amplificador em baixa frequência: frequência de corte baixa (f_{CB}).**

4

A inclusão das capacitâncias C_π e C_μ permite determinar o **desempenho do amplificador em alta frequência: frequência de corte alta (f_{CA}).**

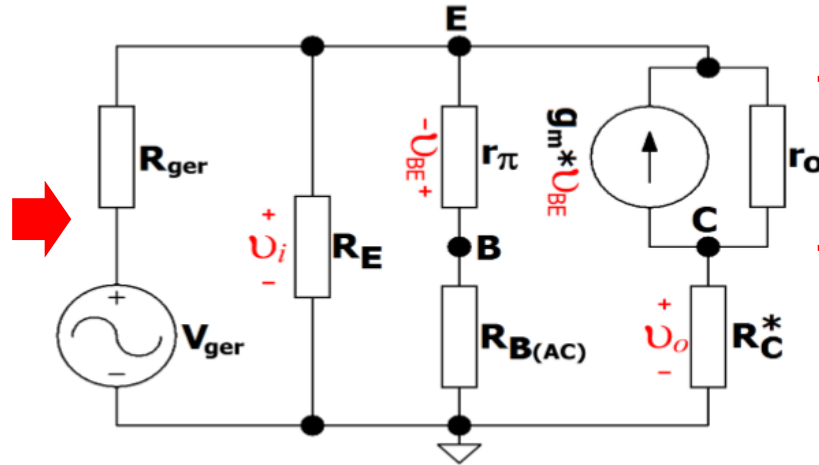
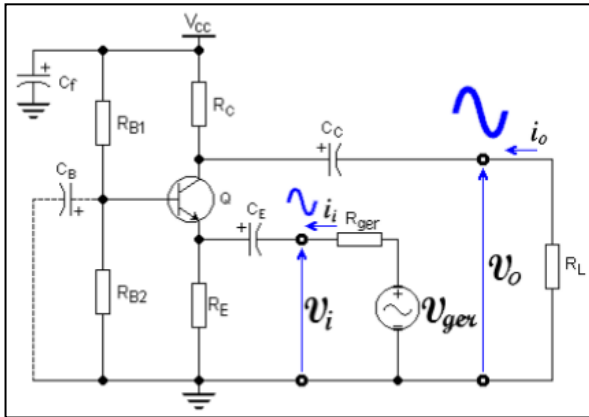
5

A análise incluindo os capacitores está descrita na apostila “BJT – Resumo da Teoria”, Paulo R Veronese, 2012.



Amplificador BC genérico

1



É transformado em fonte de tensão por Thevenin !

Modelo linearizado, para **pequenos sinais** de um **amplificador BC genérico**, com o resistor **R_B acoplado**.

2

$$R_C^* = \frac{R_C \times R_L}{R_C + R_L}$$

Se $C_B = 0$ então $R_{B(AC)} = R_B$ \longrightarrow **R_B acoplado**

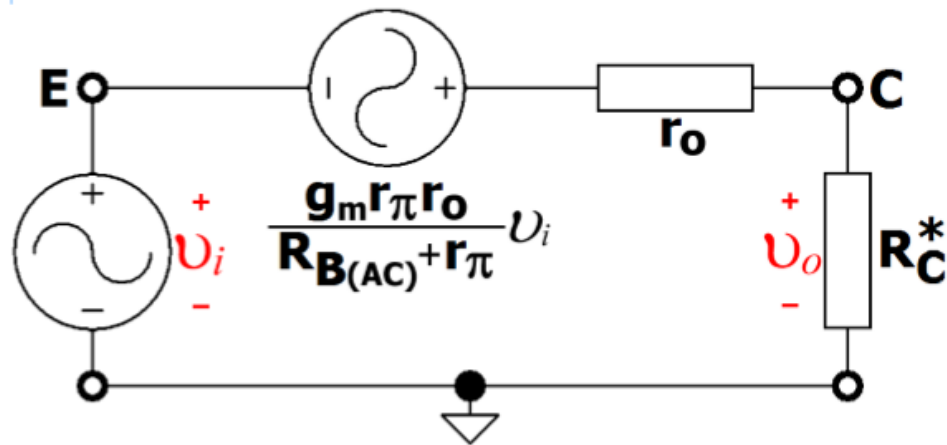
Se $C_B \neq 0$ então $R_{B(AC)} = 0$ \longrightarrow **R_B desacoplado**

3

No circuito acima: $\vartheta_{BE} = -\frac{r_\pi}{R_{B(AC)} + r_\pi} \times \vartheta_i$

4

Aplicando-se os Teoremas de Norton e de Thévenin no circuito anterior pode-se, **a partir da saída**, reduzir o circuito a uma malha apenas:



5

Utilizando-se a equação de v_{BE} e o circuito acima, mostra-se que:

$$v_{BE} = -\frac{r_{\pi}}{R_{B(AC)} + r_{\pi}} \times v_i \quad \rightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} i_o = \frac{\left(1 + \frac{g_m r_{\pi} r_o}{R_{B(AC)} + r_{\pi}}\right)}{r_o + R_C^*} \times v_i \\ v_o = \frac{[R_{B(AC)} + r_{\pi} + g_m r_{\pi} r_o] R_C^*}{[R_{B(AC)} + r_{\pi}](r_o + R_C^*)} \times v_i \end{array} \right.$$

Ganho de Tensão (A_v)

$$v_o = \frac{[R_{B(AC)} + r_\pi + g_m r_\pi r_o] R_C^*}{[R_{B(AC)} + r_\pi] (r_o + R_C^*)} \times v_i$$

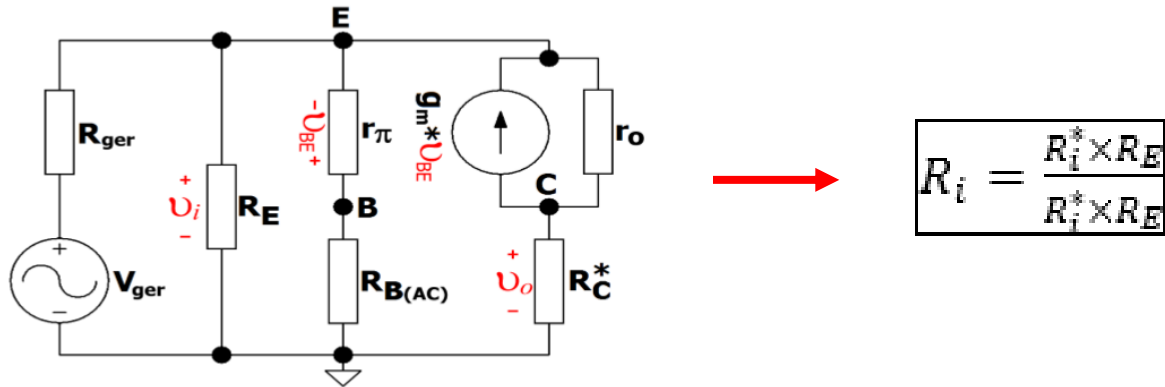


$$A_v = \frac{[R_{B(AC)} + r_\pi + g_m r_\pi r_o] R_C^*}{[R_{B(AC)} + r_\pi] (r_o + R_C^*)}$$

$$A_v \cong g_m R_L^*$$

Resistência de Entrada (R_i)

7



8 No circuito acima a corrente de entrada no emissor, vale:

$$i_i = \frac{v_i}{r_\pi + R_{B(AC)}} + i_o$$

$$i_o = \frac{\left(1 + \frac{g_m r_\pi r_o}{R_{B(AC)} + r_\pi}\right)}{r_o + R_C^*} \times v_i$$

$$i_i = \frac{v_i}{r_\pi + R_{B(AC)}} + \frac{R_{B(AC)} + r_\pi + g_m r_\pi r_o}{(R_{B(AC)} + r_\pi)(r_o + R_C^*)} \times v_i$$

$$= \frac{r_o + R_C^* + R_{B(AC)} + r_\pi + g_m r_\pi r_o}{(R_{B(AC)} + r_\pi)(r_o + R_C^*)} \times v_i$$

A resistência de entrada, vista no emissor $R_i^* = v_i/i_i$, vale, portanto:

$$R_i^* = \frac{(R_{B(AC)} + r_\pi)(r_o + R_C^*)}{R_C^* + R_{B(AC)} + r_\pi + (1 + g_m r_\pi)r_o} \longrightarrow R_i = \frac{R_i^* \times R_E}{R_i^* + R_E} \longrightarrow R_i \cong \frac{R_E}{1 + g_m R_E} \quad [\Omega]$$

Com $R_{B(AC)}$ desacoplada por C_B resulta:

$$R_i^* = \frac{r_\pi}{(1 + g_m r_\pi)} \longrightarrow R_i \cong \frac{1}{g_m}$$

Resistência de Saída (R_o)

$$A_{\theta} = \frac{[R_{B(AC)} + r_{\pi} + g_m r_{\pi} r_o] R_C^*}{[R_{B(AC)} + r_{\pi}](r_o + R_C^*)}$$

Pela Equação de A_v a tensão de saída em vazio é:

$$v_{o(vazio)} = \frac{[R_{B(AC)} + r_{\pi} + g_m r_{\pi} r_o] R_C}{[R_{B(AC)} + r_{\pi}](r_o + R_C)} \times v_i \quad R_L = 0, R_{C^*} = R_L$$

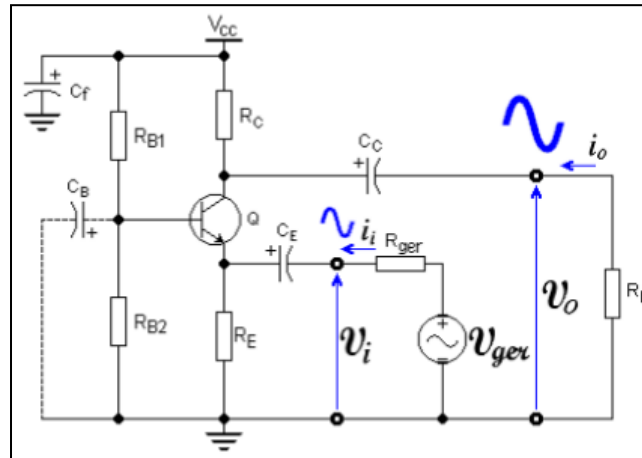
A corrente de saída em curto-circuito vale:

$$i_o = \frac{v_o}{R_C^*} \rightarrow i_{o(curto)} = \lim_{R_L \rightarrow 0} \frac{v_o}{R_C^*} \rightarrow i_{o(curto)} = \lim_{R_L \rightarrow 0} \frac{[R_{B(AC)} + r_{\mu} + g_m r_{\mu} r_o]}{[R_{B(AC)} + r_{\mu}](r_o + R_C^*)} v_i$$

$$\rightarrow i_{o(curto)} = \frac{[R_{B(AC)} + r_{\pi} + g_m r_{\pi} r_o]}{[R_{B(AC)} + r_{\pi}] r_o} \times v_i$$

Então a resistência de saída, $R_o = v_{o(vazio)} / i_{o(curto)}$, vale: $R_o = \frac{r_o \times R_C}{r_o + R_C} \rightarrow R_o \cong R_C \quad [\Omega]$

Ganho de Tensão em Relação ao Gerador (A_{vg})



$$A_{vg} = \frac{R_i}{R_i + R_{ger}} \times A_v$$

Comparação EC x BC

1 Em linhas gerais, se polarizados no mesmo ponto quiescente, **os amplificadores EC e BC possuem o mesmo ganho de tensão, em módulo.**

O EC é, no entanto, um amplificador inversor e o BC não é inversor.

2 **A resistência de entrada do amplificador BC é muito baixa,** enquanto que a resistência de entrada do EC é média ou alta.

3 **As resistências de saída dos dois amplificadores possuem a valores muito próximas e altas,** sendo que a do BC é, geralmente, levemente superior.

Resumo

Análise DC

Ponto de Polarização

$$I_{CQ} = \frac{\left(\frac{V_{CC}}{R_{B1}} - \frac{V_{BEQ}}{R_B}\right) \times R_B \times \beta}{R_B + r_x + (\beta + 1) \times R_E} + S \times I_{CBo}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - \left(R_C + \frac{\beta + 1}{\beta} R_E\right) \times I_{CQ}$$

Parâmetros Incrementais

Transcondutância

$$g_m = \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} = \frac{I_{CQ}}{N_F V_t} \quad [A/V]$$

Resistência Incremental de Entrada

$$r_\pi = \frac{\partial V_{BE}}{\partial I_B} = \frac{\beta_{AC}}{g_m} \quad [\Omega]$$

Resistência Incremental de Saída

$$r_o = \frac{\partial V_{CE}}{\partial I_C} = \frac{V_{AF} + V_{CEQ} - V_{BEQ}}{I_{CQ}} \quad [\Omega]$$

Análise AC

$$R_i = \frac{R_i^* \times R_E}{R_i^* + R_E}$$

$$R_C^* = \frac{R_C \times R_L}{R_C + R_L}$$

$$R_i^* = \frac{(R_{B(AC)} + r_\pi)(r_o + R_C^*)}{R_C^* + R_{B(AC)} + r_\pi + (1 + g_m r_\pi)r_o}$$

Com $R_{B(AC)}$ desacoplada por C_B :

$$R_i^* = \frac{r_\pi}{(1 + g_m r_\pi)} \longrightarrow R_i^* \cong \frac{1}{g_m}$$

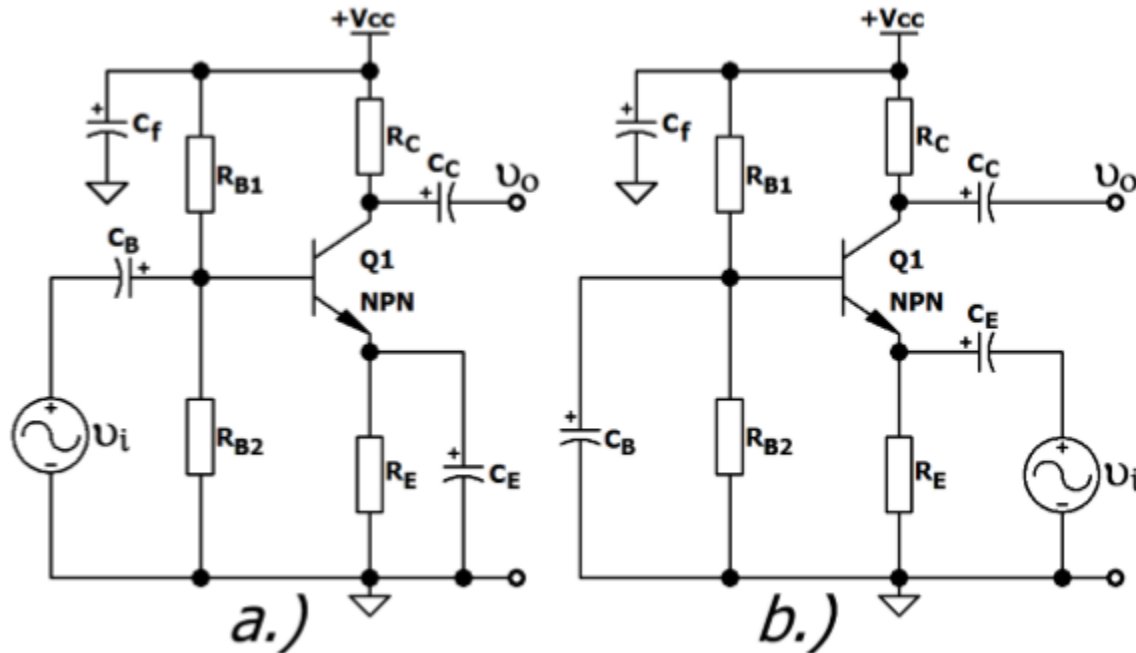
$$R_o = \frac{r_o \times R_C}{r_o + R_C} \longrightarrow R_o \cong R_C$$

$$A_\theta = \frac{[R_{B(AC)} + r_\pi + g_m r_\pi r_o] R_C^*}{[R_{B(AC)} + r_\pi](r_o + R_C^*)}$$

$$A_v \cong g_m R_L^*$$

**Exemplo de
Análise DC e AC
em Amplificador
Base Comum**

Comparar os valores das grandezas elétricas de pequenos sinais (R_i , R_o e A_v) dos amplificadores abaixo. As resistências de polarização valem: $R_{B1} = 200 \text{ k}\Omega$, $R_{B2} = 33 \text{ k}\Omega$, $R_C = 6,8 \text{ k}\Omega$ e $R_E = 1,5 \text{ k}\Omega$. A fonte de alimentação é $V_{CC} = +30 \text{ V}$ e o transistor, tipo Q_{sedra} , possui $\beta_{AC} = \beta = 102,2$; $V_{BE} = 0,7 \text{ V}$ e $V_{AF} = \infty$, $r_o = \infty$. Considerar todos os capacitores com curto circuitos em AC.



Amplificadores Básicos:

a.) Amplificador EC com R_E desacoplado; b.) Amplificador BC com R_{B2} desacoplado.

Os pontos de polarização nos dois circuitos são idênticos ao do circuito com configuração EC analisado anteriormente. Os parâmetros incrementais também são iguais.

1 Análise DC

$$R_B = \frac{R_{B1}R_{B2}}{R_{B1}+R_{B2}} \longrightarrow R_B = \frac{200k \times 33k}{200k+33k} = 28,3262k$$

$$I_{CQ} = \frac{\left(\frac{V_{CC}}{R_{B1}} - \frac{V_{BE}}{R_B}\right)\beta R_B}{R_B + (\beta+1)R_E} \longrightarrow I_{CQ} = \frac{\left(\frac{30}{200k} - \frac{0,7}{28,3262k}\right)102,2 \times 28,3262k}{28,3262k + 103,2 \times 1,5k} = 1,9806 \text{ mA}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - \left(R_C + \frac{\beta+1}{\beta}R_E\right) \times I_{CQ} \longrightarrow V_{CEQ} = 30 - \left[6,8k + \frac{103,2}{102,2} \times 1,5k\right] \times 1,9806 \text{ mA} = 13,532 \text{ V}$$

2 Cálculo das grandezas incrementais:

$$g_m = \frac{I_{CQ}}{N_F V_t} \longrightarrow g_m = \frac{1,9806 \text{ mA}}{25,865 \text{ mV}} = 76,5748 \text{ mA/V}$$

$$r_{\pi} = \frac{\beta_{AC}}{g_m} \longrightarrow r_{\pi} = \frac{102,2}{76,5748 \text{ mA/V}} = 1,3346 \text{ k}\Omega$$

$$r_o = \infty$$

3

Análise AC (Circuito EC)

Ganho de Tensão (A_v)

$$A_{v(EC)} = -g_m R_C = -76,5748 \text{mA/V} \times 6,8 \text{k}\Omega \rightarrow \boxed{A_{v(EC)} = -520,7086 \text{V/V}}$$

Resistência de Entrada (R_i)

$$R_{B(AC)} = \frac{R_{B1} \times R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \rightarrow R_{B(AC)} = \frac{200 \text{k}\Omega \times 33 \text{k}\Omega}{200 \text{k}\Omega + 33 \text{k}\Omega} = 28,3262 \text{k}\Omega$$

$$R_{E(AC)} = 0$$

$$\text{Se } R_L \rightarrow \infty \rightarrow R_i^* \approx r_\pi + \beta_{AC} R_{E(AC)} \rightarrow R_i^* = r_\pi = 1,3346 \text{k}\Omega$$

$$R_i = \frac{R_{B(AC)} \times R_i^*}{R_{B(AC)} + R_i^*} \rightarrow R_i = \frac{1,3346 \text{k}\Omega \times 28,3262 \text{k}\Omega}{1,3346 \text{k}\Omega + 28,3262 \text{k}\Omega} = 1,2746 \text{k}\Omega$$

Resistência de Saída (R_o)

$$R_o \approx \frac{r_o R_C}{r_o + R_C}$$

$$r_o = \infty$$

$$R_o = R_C = 6,8 \text{k}\Omega$$

4 Análise AC

Ganho de Tensão (A_v)

$$A_{v(BC)} = g_m R_C = 76,5748 \text{mA/V} \times 6,8 \text{k}\Omega \rightarrow A_{v(BC)} = 520,7086 \text{ V/V}$$

Resistência de Entrada (R_i)

$$R_i^* = \frac{r_\pi}{(1 + g_m r_\pi)} = \frac{1,3346 \text{k}\Omega}{103,2} = 12,9326 \Omega \quad \longrightarrow \quad R_i = \frac{R_i^* \times R_E}{R_i^* + R_E} = \frac{12,9326 \times 1,5 \text{k}\Omega}{12,9326 + 1,5 \text{k}\Omega} = 12,822 \Omega$$

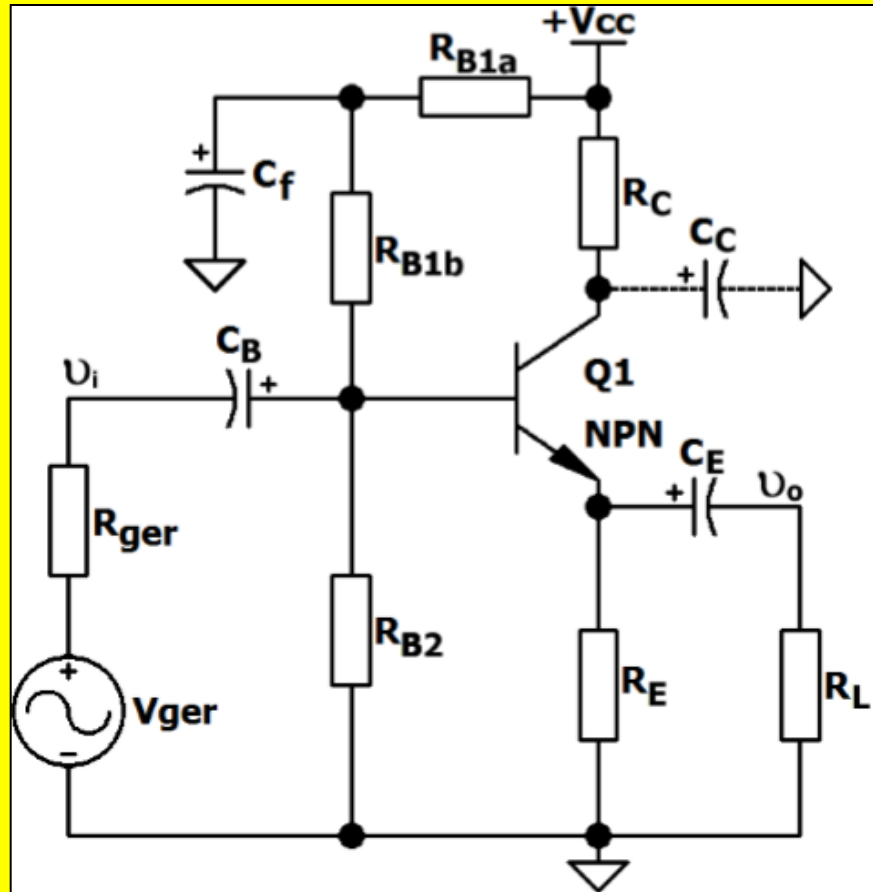
Resistência de Saída (R_o)

$$R_o = R_C = 6,8 \text{ k}\Omega$$

Os amplificadores EC e BC possuem resistências de saída e ganhos de tensão idênticos em módulo.

As resistências de entrada, no entanto, são bem diferentes, sendo da faixa média/alta para o EC e muito baixa para o BC.

Coletor Comum



Amplificador Coletor Comum Genérico

Observações:

1

As equações dessa configuração, deduzidas a seguir, descrevem o **desempenho do amplificador na banda de passagem calculando os seguintes parâmetros: ganho de tensão (A_v), resistência de entrada (R_i) e resistência de saída (R_o).**

2

Neste modelo não constam a resistência r_μ (muito alta), as capacitâncias de acoplamento (C_B , C_C , C_E) e as capacitâncias intrínsecas do BJT (C_π e C_μ).

3

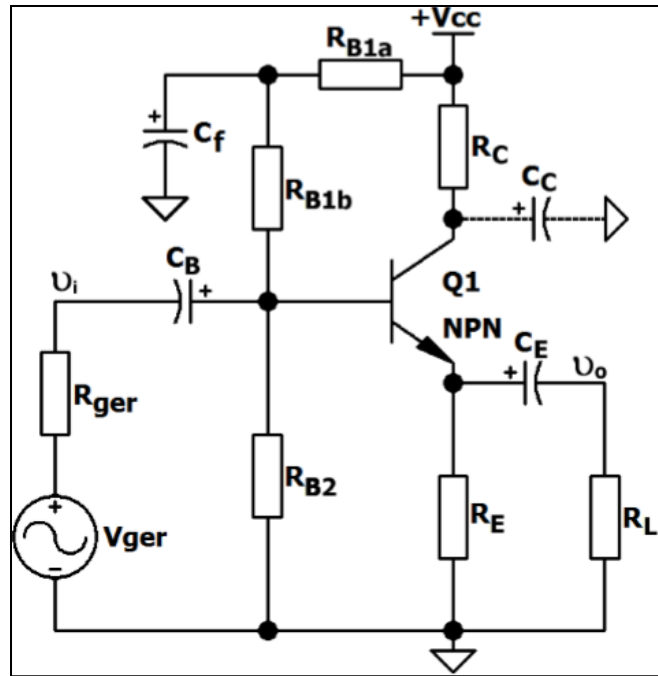
A inclusão das capacitâncias C_B , C_C e C_E permite determinar o **desempenho do amplificador em baixa frequência: frequência de corte baixa (f_{CB}).**

4

A inclusão das capacitâncias C_π e C_μ permite determinar o **desempenho do amplificador em alta frequência: frequência de corte alta (f_{CA}).**

5

A análise incluindo os capacitores está descrita na apostila “BJT – Resumo da Teoria”, Paulo R Veronese, 2012.



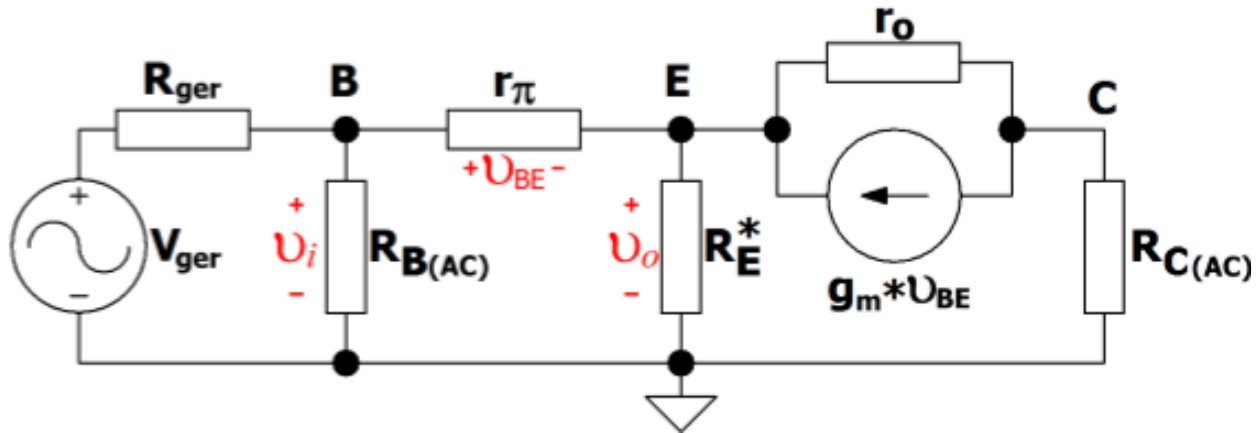
Amplificador CC Genérico

O **amplificador CC** é conhecido pelo fato de possuir **ganho de tensão muito próximo da unidade e de ter sua saída no emissor**. A fase do sinal de saída é a mesma da tensão de emissor (**seguidor de emissor**). O resistor R_C foi deixado no circuito para torná-lo o mais genérico possível.

Se $C_C = 0$, então $R_{C(AC)} = R_C$. Se $C_C \neq 0$, então $R_{C(AC)} = 0$.

Normalmente, $R_C = 0$, tanto para AC, quanto para DC.

1

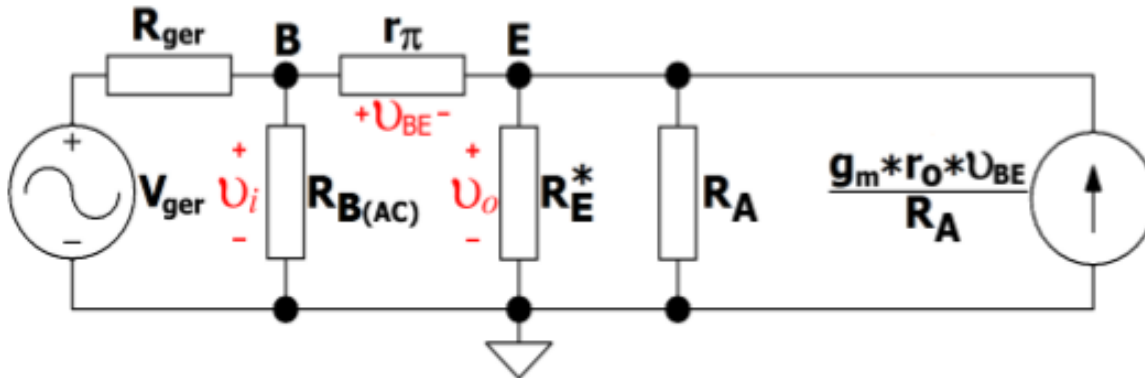


$$R_E^* = R_E // R_L$$

Modelo Linearizado para Pequenos Sinais do Amplificador Coletor-Comum.

2

Um circuito equivalente é mostrado abaixo:



$$R_A = r_o + R_{C(AC)}$$

$$\vartheta_{BE} = \vartheta_i - \vartheta_o$$

Equacionando-se o circuito por cálculo de tensões de nós, tem-se que:

$$\vartheta_o = \frac{\frac{\vartheta_i}{r_\pi} + \frac{g_m r_o \vartheta_{BE}}{R_A}}{\frac{1}{r_\pi} + \frac{1}{R_E^*} + \frac{1}{R_A}} = \frac{\frac{\vartheta_i}{r_\pi} + \frac{g_m r_o \vartheta_i}{r_o + R_{C(AC)}} + \frac{g_m r_o \vartheta_o}{r_o + R_{C(AC)}}}{\frac{1}{r_\pi} + \frac{1}{R_E^*} + \frac{1}{r_o + R_{C(AC)}}$$

$$\rightarrow \vartheta_o = \frac{\left(\frac{r_o + R_{C(AC)}}{r_o} + g_m r_\pi\right) r_o R_E^*}{\left(\frac{r_o + R_{C(AC)}}{r_o} + g_m r_\pi\right) r_o R_E^* + (r_o + R_{C(AC)} + R_E^*)} \times \vartheta_i$$

$$\rightarrow A_\vartheta = \frac{[R_{C(AC)} + (1 + g_m r_\pi) r_o] R_E^*}{[R_{C(AC)} + (1 + g_m r_\pi) r_o] R_E^* + (r_o + R_{C(AC)} + R_E^*) r_\pi}$$

Ganho de tensão em vazio ($A_{v(NL)}$)

$$\vartheta_o = \frac{\left(\frac{r_o + R_{C(AC)}}{r_o} + g_m r_\pi\right) r_o R_E^*}{\left(\frac{r_o + R_{C(AC)}}{r_o} + g_m r_\pi\right) r_o R_E^* + (r_o + R_{C(AC)} + R_E^*)} \times \vartheta_i$$

$$R_E^* = R_E \quad \rightarrow \quad \vartheta_{o(vazio)} = \frac{\left(\frac{r_o + R_{C(AC)}}{r_o} + g_m r_\pi\right) r_o R_E}{\left(\frac{r_o + R_{C(AC)}}{r_o} + g_m r_\pi\right) r_o R_E + (r_o + R_{C(AC)} + R_E)} \times \vartheta_i$$

$$\rightarrow \quad A_{v(NL)} = \frac{\left(\frac{r_o + R_{C(AC)}}{r_o} + g_m r_\pi\right) r_o R_E}{\left(\frac{r_o + R_{C(AC)}}{r_o} + g_m r_\pi\right) r_o R_E + (r_o + R_{C(AC)} + R_E)}$$

$$r_o = \infty \quad \rightarrow \quad A_{v(NL)} = \frac{(1 + g_m r_\pi) R_E}{r_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E}$$

Resistência de Saída (R_o)

$$\vartheta_o = \frac{\left(\frac{r_o + R_{C(AC)}}{r_o} + g_m r_\pi\right) r_o R_E^*}{\left(\frac{r_o + R_{C(AC)}}{r_o} + g_m r_\pi\right) r_o R_E^* + (r_o + R_{C(AC)} + R_E^*)} \times \vartheta_i$$

$$R_L = 0 \quad \longrightarrow \quad i_{o(\text{curto})} = \frac{[R_{C(AC)} + (1 + g_m r_\pi) r_o]}{[r_o + R_{C(AC)}] r_\pi} \times \vartheta_i$$

$R_o = \vartheta_{o(\text{vazio})} / i_{o(\text{curto})}$ e agregando-se todas as resistências que estão ligadas na entrada do amplificador, tem-se que a resistência de saída é igual à:


$$R_o = \frac{[r_o + R_{C(AC)}] R_E r'_\pi}{[R_{C(AC)} + (1 + g_m r_\pi) r_o] R_E + (r_o + R_{C(AC)} + R_E) r'_\pi}$$

$$r'_\pi = r_\pi + \frac{R_{ger} \times R_{B(AC)}}{R_{ger} + R_{B(AC)}}$$

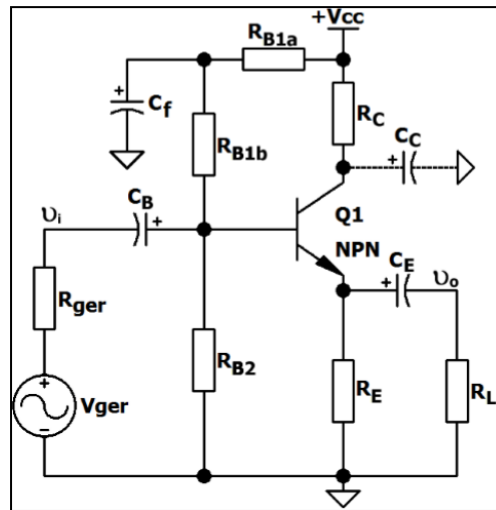
Resistência de Entrada (R_i)

A resistência de entrada, vista na base do transistor, é calculada de maneira idêntica a do amplificador EC com R_E não desacoplado:

$$R_i^* = r_\pi + \frac{R_{C(AC)} + (1 + g_m r_\pi) r_o}{R_E^* + r_o + R_{C(AC)}} \times R_E^*$$


$$R_i = \frac{R_{B(AC)} \times R_i^*}{R_{B(AC)} + R_i^*}$$

Ganho de Tensão em Relação ao Gerador (A_{vg})



$$A_{\theta g} = \frac{R_i}{R_{ger} + R_i} \times A_{\theta}$$

Resumo

Análise AC

Análise DC

Ponto de Polarização

$$I_{CQ} = \frac{\left(\frac{V_{CC}}{R_{B1}} - \frac{V_{BEQ}}{R_B}\right) \times R_B \times \beta}{R_B + r_x + (\beta + 1) \times R_E} + S \times I_{CBo}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - \left(R_C + \frac{\beta + 1}{\beta} R_E\right) \times I_{CQ}$$

Parâmetros Incrementais

Transcondutância

$$g_m = \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} = \frac{I_{CQ}}{N_F V_t} \quad [A/V]$$

Resistência Incremental de Entrada

$$r_\pi = \frac{\partial V_{BE}}{\partial I_B} = \frac{\beta_{AC}}{g_m} \quad [\Omega]$$

Resistência Incremental de Saída

$$r_o = \frac{\partial V_{CE}}{\partial I_C} = \frac{V_{AF} + V_{CEQ} - V_{BEQ}}{I_{CQ}} \quad [\Omega]$$

$$R_i = \frac{R_{B(AC)} \times R_i^*}{R_{B(AC)} + R_i^*}$$

$$R_i^* = r_\pi + \frac{R_{C(AC)} + (1 + g_m r_\pi) r_o}{R_E^* + r_o + R_{C(AC)}} \times R_E^*$$

$$R_o = \frac{[r_o + R_{C(AC)}] R_E r_\pi'}{[R_{C(AC)} + (1 + g_m r_\pi) r_o] R_E + (r_o + R_{C(AC)} + R_E) r_\pi'}$$

$$r_\pi' = r_\pi + \frac{R_{ger} \times R_{B(AC)}}{R_{ger} + R_{B(AC)}}$$

$$A_\theta = \frac{[R_{C(AC)} + (1 + g_m r_\pi) r_o] R_E^*}{[R_{C(AC)} + (1 + g_m r_\pi) r_o] R_E^* + (r_o + R_{C(AC)} + R_E^*) r_\pi}$$

(ganho de tensão com carga)

$$A_{v(NL)} = \frac{\left(\frac{r_o + R_{C(AC)}}{r_o} + g_m r_\pi\right) r_o R_E}{\left(\frac{r_o + R_{C(AC)}}{r_o} + g_m r_\pi\right) r_o R_E + (r_o + R_{C(AC)} + R_E)}$$

$$r_o = \infty \rightarrow A_{v(NL)} = \frac{(1 + g_m r_\pi) R_E}{r_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E}$$

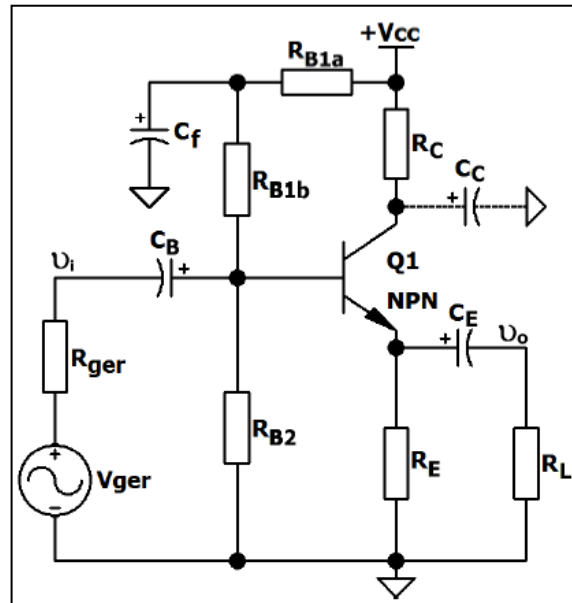
(ganho de tensão sem carga)

$$A_{\theta g} = \frac{R_i}{R_{ger} + R_i} \times A_\theta$$

**Exemplo de
Análise DC e AC
em Amplificador
Coletor Comum**

Calcular os valores das grandezas elétricas AC, de pequenos sinais (R_i ; R_o e A_v) do amplificador CC, em vazio. As grandezas de polarização valem:

$V_{CC} = +30 \text{ V}$, $R_{B1a} = 20 \text{ k}\Omega$, $R_{B1b} = 180 \text{ k}\Omega$, $R_{B2} = 33 \text{ k}\Omega$, $R_C = 6,8 \text{ k}\Omega$, $R_E = 1,5 \text{ k}\Omega$ e $R_{ger} = 1,0 \text{ k}\Omega$. O transistor possui $\beta_{AC} = \beta = 102,2$; $V_{BE} = 0,7 \text{ V}$ e $V_{AF} = \infty$. Considerar todos os capacitores, inclusive CC, como curtos-circuitos em AC.



Amplificadores CC Genérico

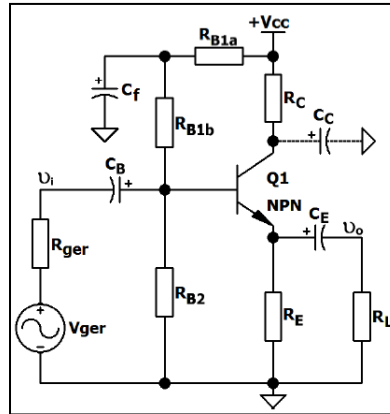
1

$$R_{B1a} = 20 \text{ k}\Omega, R_{B1b} = 180 \text{ k}\Omega,$$

$$R_{B2} = 33 \text{ k}\Omega, R_C = 6,8 \text{ k}\Omega,$$

$$R_E = 1,5 \text{ k}\Omega \text{ e } R_{ger} = 1,0 \text{ k}\Omega.$$

Análise DC



$$R_{B1} = 20k + 180k = 200k;$$

$$R_B = \frac{200k \times 33k}{200k + 33k} = 28,3262k$$

$$R_E = 1,5k$$

$$I_{CQ} = \frac{\left(\frac{V_{CC}}{R_{B1}} - \frac{V_{BEQ}}{R_B}\right) \times R_B \times \beta}{R_B + (\beta + 1) \times R_E} \rightarrow I_{CQ} = \frac{\left(\frac{30}{200k} - \frac{0,7}{28,3262k}\right) 102,2 \times 28,3262k}{28,3262k + 103,2 \times 1,5k} = 1,9806 \text{ mA}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - \left(R_C + \frac{\beta + 1}{\beta} \times R_E\right) \times I_{CQ}$$

$$\rightarrow V_{CEQ} = 30 - [6,8k + 103,2 \times 1,5k] \times 1,9806m = 13,532 \text{ V}$$

2

Cálculo dos Parâmetros Incrementais

$$g_m = \frac{1,9806m}{25,865m} = 76,5748 \text{ mA/V}; \quad r_o = \infty$$

$$r_{\pi} = \frac{102,2}{76,5748m} = 1,3346 \text{ k}\Omega$$

$$5 \quad R_{B(AC)} = \frac{180k \times 33k}{180k + 33k} = 27,8873 \text{ k}\Omega$$

$$R_{C(AC)} = 0 \Omega$$

$$R_E^* = R_E = 1,5 \text{ k}\Omega$$

6 **Cálculo do ganho de tensão (A_v)**

$$A_v = \frac{(1 + g_m r_\pi) R_E}{r_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E} = \frac{103,2 \times 1,5k}{1,3346k + 103,2 \times 1,5k} \rightarrow \boxed{A_v = 0,99145 \text{ V/V}}$$

7 **Cálculo da impedância de entrada (R_i)**

$$R_i^* = r_\pi + \frac{R_{C(AC)} + (1 + g_m r_\pi) r_o}{R_E^* + r_o + R_{C(AC)}} \times R_E^*$$

Se $R_L = \infty \rightarrow R_i^* = r_\pi + (\beta + 1) R_E \rightarrow R_i^* = 1,3346k + 103,2 \times 1,5k = 156,1346 \text{ k}\Omega$

$$\boxed{R_i = \frac{R_{B(AC)} \times R_i^*}{R_{B(AC)} + R_i^*}} \rightarrow R_i = \frac{136,1346k \times 27,8873k}{136,1346k + 27,8873k} \rightarrow \boxed{R_i = 23,6612 \text{ k}\Omega}$$

8 Cálculo da impedância de saída (R_o)

$$r'_\pi = r_\pi + \frac{R_{ger} \times R_{B(AC)}}{R_{ger} + R_{B(AC)}} = 1,3346k + \frac{1k \times 27,8873k}{1k + 27,8873k} = 2,3k$$

$$R_o = \frac{R_E r'_\pi}{r'_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E} = \frac{1,5k \times 2,3k}{2,3k + 103,2 \times 1,5k} \rightarrow \boxed{R_o = 21,96 \Omega}$$

0 Cálculo de A_{vg}

$$A_{\theta g} = \frac{R_i}{R_i + R_{ger}} \times A_\theta = -\frac{19,6158k}{20,6158k} \times 0,9915 \rightarrow A_{vg} = 0,95$$