



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CURSO DE TELECOMUNICAÇÕES
Área de Conhecimento: Eletrônica I

AMPLIFICADORES A TRANSISTOR

Professor:
Pedro Armando da Silva Jr.

São José, junho de 2013.

1. AMPLIFICADORES

1.1 - INTRODUÇÃO

Os *AMPLIFICADORES*, em geral, são circuitos capazes de aumentar em amplitude uma determinada grandeza, seja ela tensão ou corrente. Por exemplo, veja as situações, onde sinais elétricos são introduzidos num amplificador e o resultado obtido.

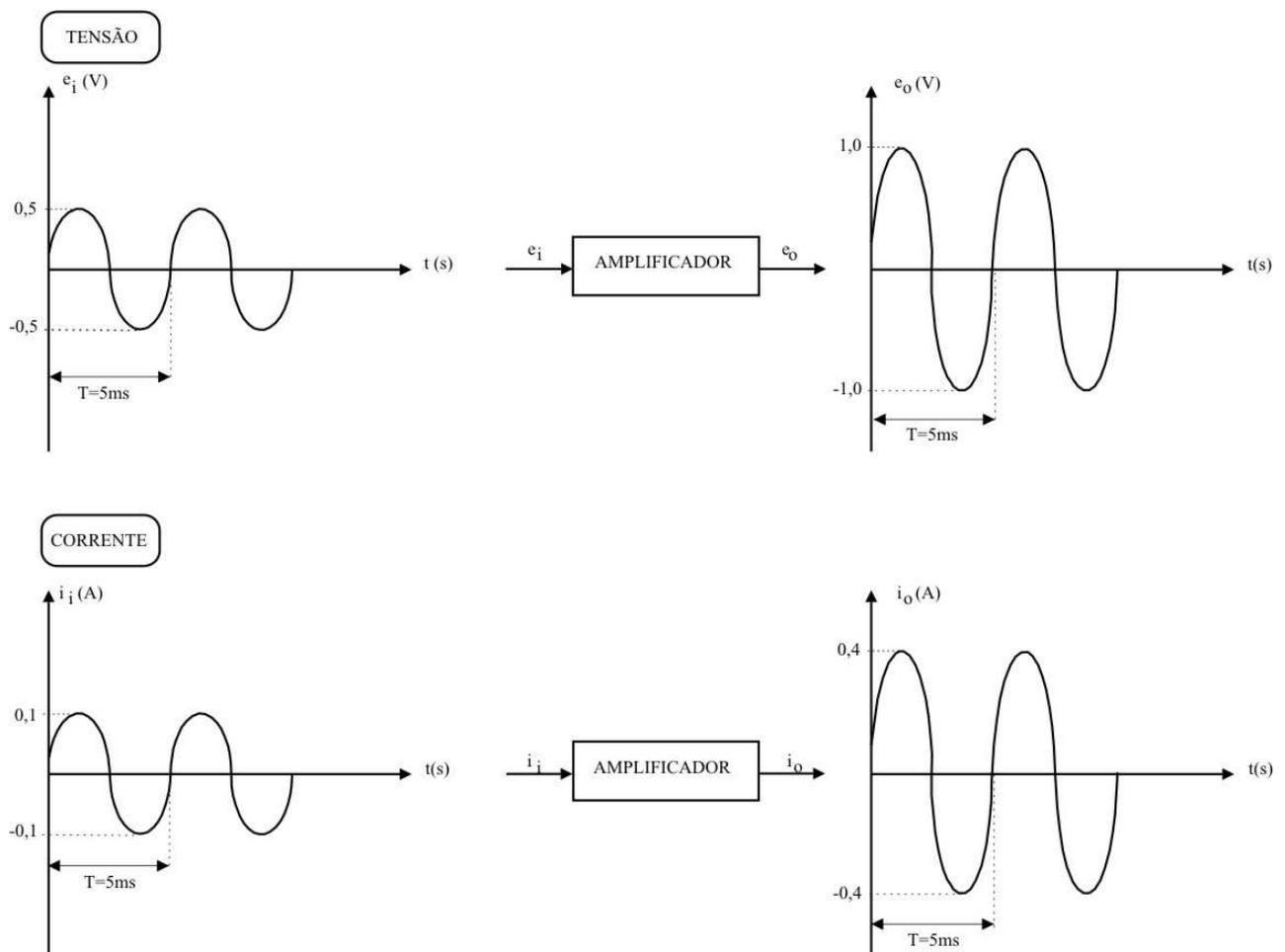


Figura 1.1. Circuito amplificador

A seguir, vamos analisar algumas características presentes nos amplificadores e que são importantes para a sua análise e entendimento dos circuitos que os constituem.

1.2 - LINEARIDADE

A *LINEARIDADE* é uma característica muito importante em qualquer componente eletrônico. Um amplificador é considerado linear, quando:

- ele não modifica a forma do sinal a ser amplificado;
- o sinal de entrada está relacionado com o sinal de saída por uma constante ($A = \text{ganho}$).

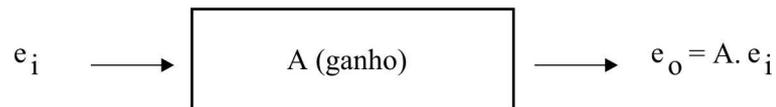


Figura 1.2. Amplificador linear

Em um *AMPLIFICADOR LINEAR*, pode-se aplicar o Teorema da superposição dos circuitos lineares, assim fica mais fácil sua análise e projeto.

1.3 - TEOREMA DA SUPERPOSIÇÃO EM CIRCUITOS LINEARES

O *TEOREMA DA SUPERPOSIÇÃO* estabelece que a resposta (tensão ou corrente), em qualquer ponto de um circuito linear que tenha mais de uma fonte independente, pode ser obtida pela soma das respostas individuais para cada fonte. Para se verificar a influência de uma determinada fonte (de tensão ou corrente) sobre o circuito, deve-se eliminar todas as outras.

Exemplo:

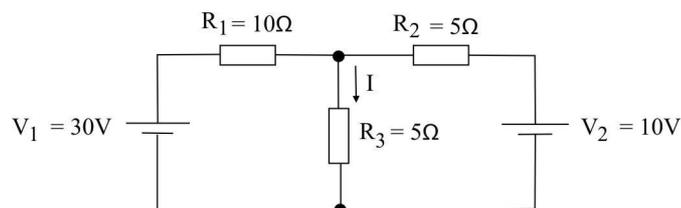


Figura 1.3. Circuito exemplo para cálculo do teorema da superposição

$$I = I_{V_1} + I_{V_2} = 1,2 + 0,8 = 2,0A \quad (1.1)$$

Assim, para estudar-se um circuito amplificador pode-se:

- analisar a parte da polarização (CC) e determinar o ponto quiescente (Q);
- analisar a parte de amplificação (CA) e determinar o circuito equivalente para a análise da parte alternada do sinal.

Assim:

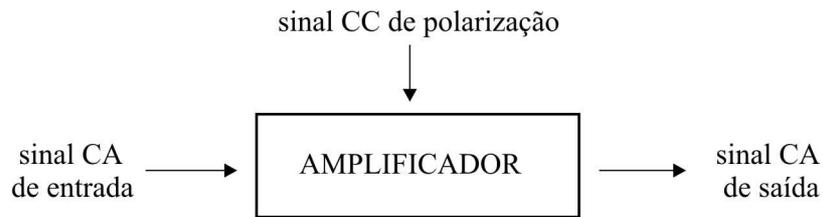


Figura 1.4. Fluxograma dos sinais elétricos no amplificador.

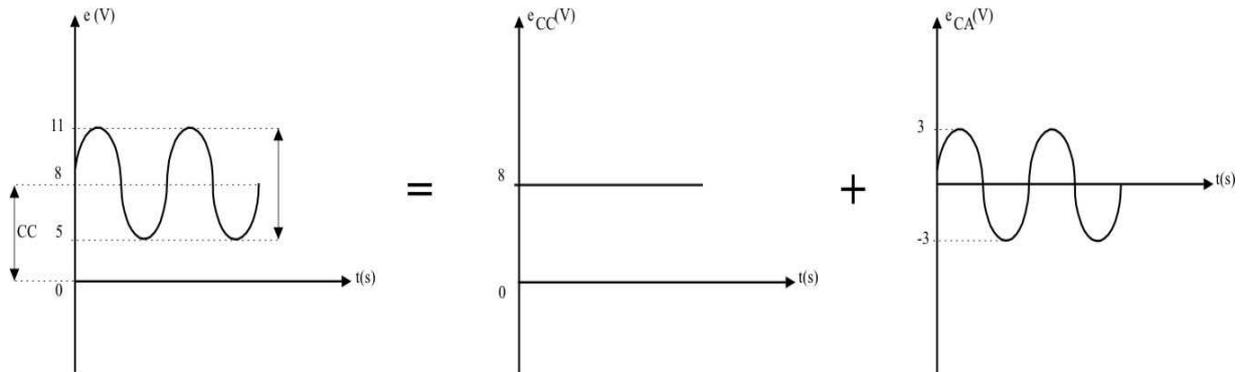


Figura 1.5. Composição de um sinal qualquer.

1.4 - PARÂMETROS DE UM AMPLIFICADOR

Em geral, pode-se modelar a parte CA do amplificador como:

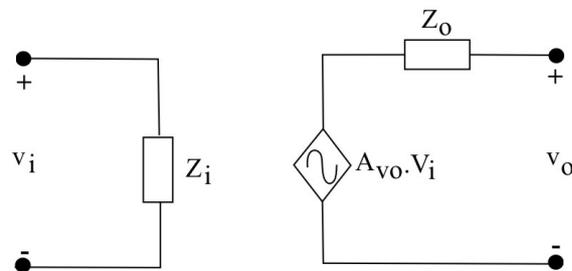


Figura 1.6. Modelo do amplificador.

onde: v_i = tensão de entrada;

v_o = tensão de saída;

A_{vo} = ganho de tensão sem carga;

Z_i = impedância de entrada do amplificador;

Z_o = impedância de saída do amplificador.

Sem carga tem-se que a tensão de saída é dada por:

$$v_o = A_{vo} \cdot v_i \quad (1.2)$$

Na prática, na saída do circuito amplificador tem-se uma carga (R_L) e a fonte de alimentação possui uma resistência série (R_S):

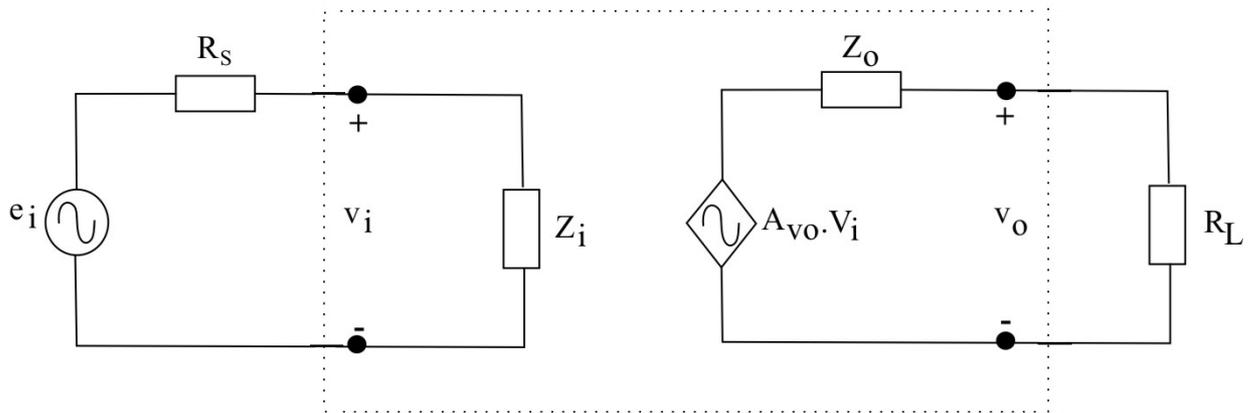


Figura 1.7. Modelo do amplificador com fonte de alimentação e carga.

Assim, a tensão de saída (v_o) é expressa por:

$$v_o = \frac{R_L}{R_L + Z_o} \cdot A_{vo} \cdot v_i = A_{vc} \cdot v_i \quad (1.3)$$

onde:

$$A_{vc} = \frac{R_L}{R_L + Z_o} \cdot A_{vo} = \text{ganho de tensão com carga} \quad (1.4)$$

A tensão de entrada (v_i) é dada por:

$$v_i = \frac{Z_i}{Z_i + R_S} \cdot e_i \quad (1.5)$$

Substituindo-se a equação (1.5) na equação (1.3), obtém-se:

$$v_o = \frac{Z_i}{Z_i + R_S} \cdot A_{vc} \cdot e_i \quad (1.6)$$

Idealmente:

$$Z_i \rightarrow \infty \Rightarrow v_o \cong A_{vc} \cdot e_i \Rightarrow v_i \cong e_i \Rightarrow \frac{Z_i}{Z_i + R_S} \rightarrow 1 \quad (1.7)$$

$$Z_o \rightarrow 0 \Rightarrow v_o \cong A_{vc} \cdot e_i \Rightarrow \frac{R_L}{R_L + Z_o} \rightarrow 1 \quad (1.8)$$

2 . AMPLIFICADOR EMISSOR COMUM

2.1 – DEFINIÇÃO

O amplificador emissor comum recebe este nome porque todas as *tensões aplicadas* são escritas em *relação* ao *emissor*. Assim, o emissor torna-se a *referência* na amplificação (CA). Outra forma de se verificar o tipo de configuração é analisando onde é obtido o sinal de saída. Se o sinal de saída for tomado no coletor do transistor, então o circuito é um emissor comum.

2.2 - POLARIZAÇÃO E RETA DE CARGA

Dado o circuito abaixo pode-se determinar um ponto Q em função de V_{CC} , R_1 , R_2 , R_C e R_E . Este ponto, geralmente, está localizado o mais centralizado possível na reta de carga, para que haja o melhor aproveitamento do circuito amplificador. Abaixo temos a localização do ponto quiescente sobre a reta de carga.

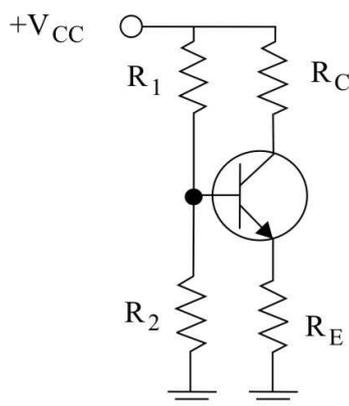


Figura 2.1. Circuito de polarização com divisor de tensão.

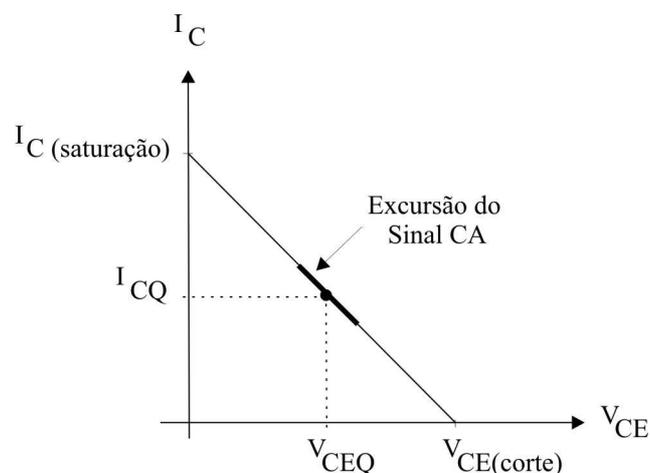


Figura 2.2. Reta de carga CC.

2.3 - SINAL CA

Pode-se acoplar à base do circuito da Figura 2.1, um pequeno sinal CA que produzirá flutuações na corrente de coletor de mesma forma e frequência (linearidade). A linearidade na reta de carga CC é limitada por $I_{C(SAT)}$ e $V_{CE(CORTE)}$.

Para acoplar-se o sinal CA e a carga, utilizam-se capacitores de acoplamento e derivação.

2.3.1 - Capacitores de Acoplamento e Derivação

Os *capacitores de acoplamento* são utilizados para acoplar o sinal CA e a carga a um estágio amplificador a transistor, sem alterar a polarização CC. Portanto, os capacitores de acoplamento transportam o sinal CA de um ponto ao outro.

Os *capacitores de derivação* acoplam um ponto não aterrado a um ponto aterrado, ou seja, faz a passagem de um sinal CA para o terra.

Assim, tem-se o circuito apresentado na Figura 2.3.

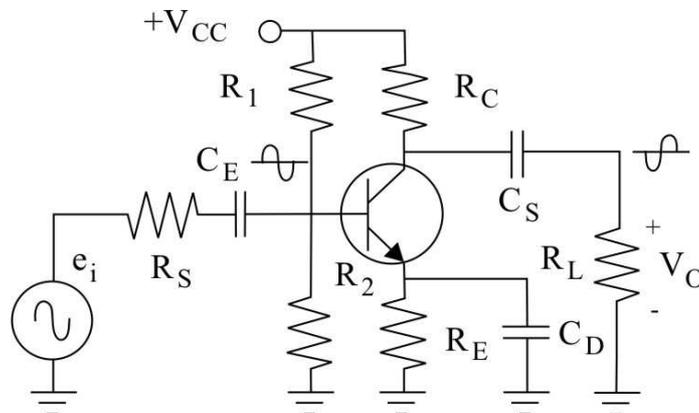


Figura 2.3. Amplificador emissor comum completo (polarização + sinal CA).

A Figura 2.3 mostra um amplificador emissor comum. Como emissor é derivado para o terra, este amplificador às vezes é chamado *amplificador com emissor aterrado*. Isto significa que, o emissor está ligado ao terra CA e não ao terra CC. É colocada uma pequena onda senoidal à base. Isto produz variações na corrente de base (i_b). Por causa de β , a corrente de coletor é uma onda senoidal amplificada de mesma frequência ($i_c = \beta \cdot i_b$). Esta corrente senoidal de coletor, flui através da resistência de coletor e produz uma tensão de saída amplificada.

2.4 – ANÁLISE DO AMPLIFICADOR

Num amplificador a transistor, a fonte CC estabelece correntes e tensões quiescentes. A fonte CA produz, então, as flutuações nessas correntes e tensões. A maneira mais simples de analisar-se o circuito é dividindo-se a análise em duas partes: uma análise CC e uma análise CA. Em outras palavras, pode-se usar o *teorema da superposição* quando se analisa amplificadores a transistor.

Notação:

Para manter o CC diferente do CA é comum empregar-se índices e letras maiúsculas para as quantidades CC. Por exemplo:

⇒ I_E, I_C, I_B para as correntes CC;

⇒ V_E, V_C, V_B para as tensões CC em relação ao terra;

⇒ V_{BE}, V_{CE}, V_{CB} para as tensões CC entre os terminais do transistor.

Da mesma forma, utiliza-se índices e letras minúsculas para as tensões e correntes CA:

⇒ i_e, i_c, i_b para as correntes CA;

⇒ v_e, v_c, v_b para as tensões CA em relação ao terra;

⇒ v_{be}, v_{ce}, v_{cb} para as tensões CA entre os terminais do transistor.

2.4.1 – Análise CC

Para fazer a análise CC de um amplificador é necessário:

1) colocar a fonte CA a zero:

fonte de tensão → torna-se um curto-circuito;

fonte de corrente → torna-se um circuito aberto;

2) substituir os capacitores de acoplamento e derivação por circuitos abertos;

3) determinar o ponto de operação (Q).

Assim, o circuito equivalente para a análise CC do amplificador emissor comum torna-se:

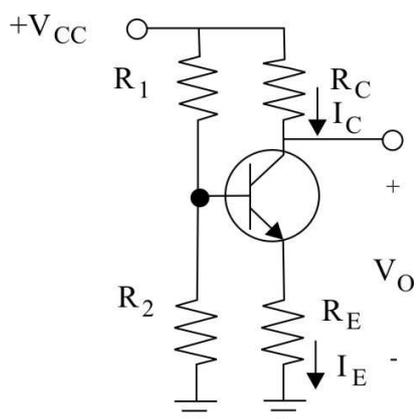


Figura 2.4. Circuito para a análise CC do amplificador emissor comum.

2.4.2 – Análise CA

Para fazer a análise CA de um amplificador é necessário:

1) colocar a fonte CC a zero:

fonte de tensão → torna-se um curto-circuito;

fonte de corrente → torna-se um circuito aberto;

2) substituir os capacitores de acoplamento e derivação por curto-circuitos.

Logo, o circuito equivalente para a análise CA do amplificador emissor comum torna-se:

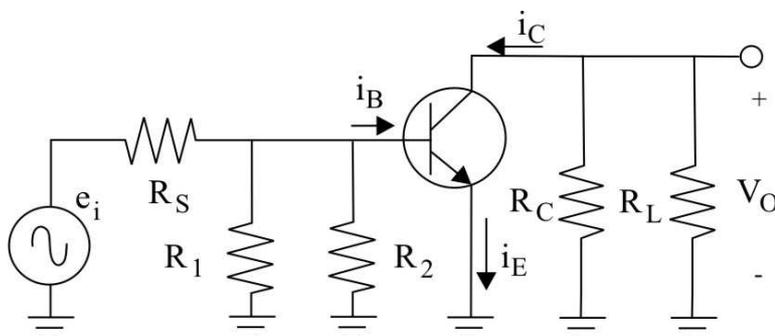


Figura 2.5. Circuito para a análise CA do amplificador emissor comum.

2.5 – MODELO DE EBERS-MOLL

A Figura 2.6(c) mostra o modelo CA de Ebers-Moll. É este modelo que será usado para a análise do circuito equivalente CA de um amplificador. Neste modelo, o diodo base-emissor é substituído pela resistência CA do emissor (r'_e).

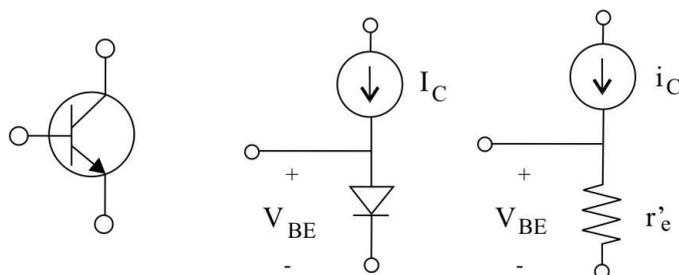


Figura 2.6. (a) Transistor.

(b) Modelo CC de Ebers-Moll. (c) Modelo CA de Ebers-Moll.

2.5.1 – Resistência CA do Emissor

Na curva $I_E \times V_{BE}$, Figura 2.7, quando o sinal CA é nulo, o transistor funciona no ponto Q (polarização) e $V_{BE} \approx 0,7V$ (diodo base-emissor). Se for aplicado um pequeno sinal, de tal forma que o arco A-B seja praticamente uma linha reta (linear), as variações de tensão e corrente serão aproximadamente proporcionais. Assim, o diodo base-emissor, no que se refere ao sinal CA, comporta-se como se fosse uma resistência. Portanto:

$$r'_e = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_E} = \frac{V_{be}}{i_e} \quad (2.1)$$

onde: r'_e = resistência CA do emissor;

ΔV_{BE} = pequena variação na tensão base-emissor;

ΔI_E = variação correspondente na corrente de emissor;

v_{be} = tensão CA através dos terminais base-emissor;

i_c = corrente CA através do emissor.

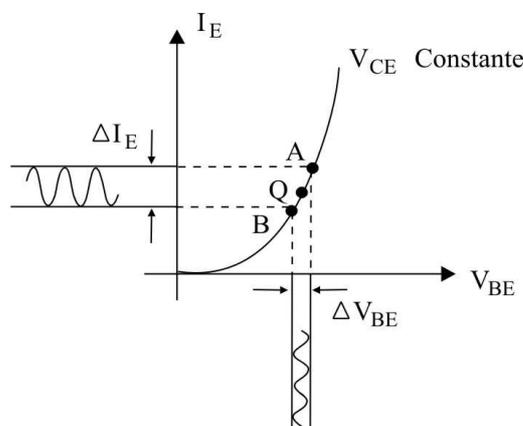


Figura 2.7. Variações na tensão base-emissor produzem variações na corrente de emissor.

Na prática, pode-se calcular r'_e através da expressão:

$$r'_e = \frac{25mV}{I_E(mA)} [\Omega] \quad (2.2)$$

2.6 – EFEITOS DE UM SINAL CA GRANDE

Suponha que a variação na junção base-emissor seja senoidal, como na Figura 2.7. Se o sinal for pequeno, as variações na corrente do emissor, também, serão senoidais. Mas, quando o sinal de entrada for grande, a corrente do emissor não será mais senoidal devido a não linearidade da curva do diodo. Quando o sinal for grande demais, a corrente do emissor ficará alongada no meio ciclo positivo e comprimida no meio ciclo negativo, como apresentado na Figura 2.8. Uma onda distorcida, como esta, não soa como sinal de entrada quando introduzido num alto-falante.

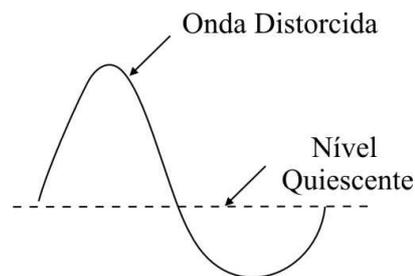


Figura 2.8. Distorção do sinal CA grande.

2.6.1 – Beta CA (β_{CA})

A Figura 2.9 mostra um gráfico típico de $I_C \times I_B$. β_{CC} é a razão entre a corrente CC do coletor (I_C) e a corrente CC da base (I_B). Como o gráfico não é linear, β_{CC} depende da localização do ponto Q. É por isso, que as folhas de dados especificam o valor de β_{CC} para um valor específico de I_C .

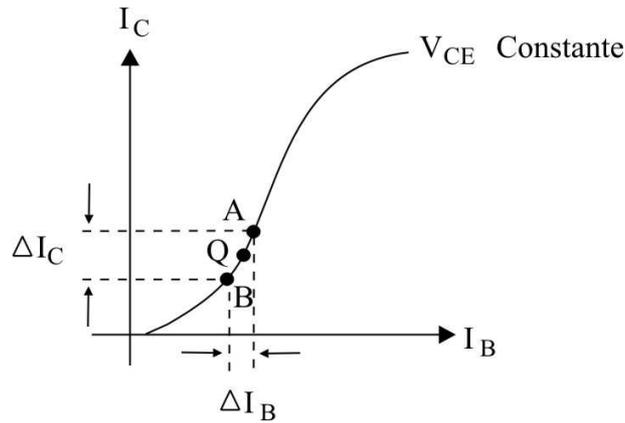


Figura 2.9. A curva da corrente CC de coletor versus a corrente CC da base não é linear.

O beta CA (chamado β_{CA}) é uma quantidade de pequeno sinal que depende da localização do ponto Q. Na Figura 2.9, β é definido da seguinte forma:

$$\beta_{CA} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad (2.3)$$

ou, como as correntes são iguais às variações nas correntes totais:

$$\beta_{CA} = \frac{i_c}{i_b} \quad (2.4)$$

Graficamente, β_{CA} é a inclinação da curva no ponto Q. Por esta razão, ele tem valores diferentes em diferentes posições do ponto Q.

Nas folhas de dados:

$$\beta_{CA} = \beta = h_{fe} = \frac{i_c}{i_b} \quad \beta_{CC} = h_{FE} = \frac{I_C}{I_B} \quad (2.5)$$

2.7 – PARÂMETROS DO AMPLIFICADOR EMISSOR COMUM

2.7.1 - Ganho de Tensão sem Carga

O ganho de tensão de um amplificador é a razão da tensão CA de saída pela tensão CA de entrada. Portanto:

$$A_V = \frac{v_o}{v_i} \quad (2.6)$$

Para a determinação do ganho de tensão do amplificador emissor comum, utiliza-se o circuito equivalente CA mostrado na Figura 2.10.

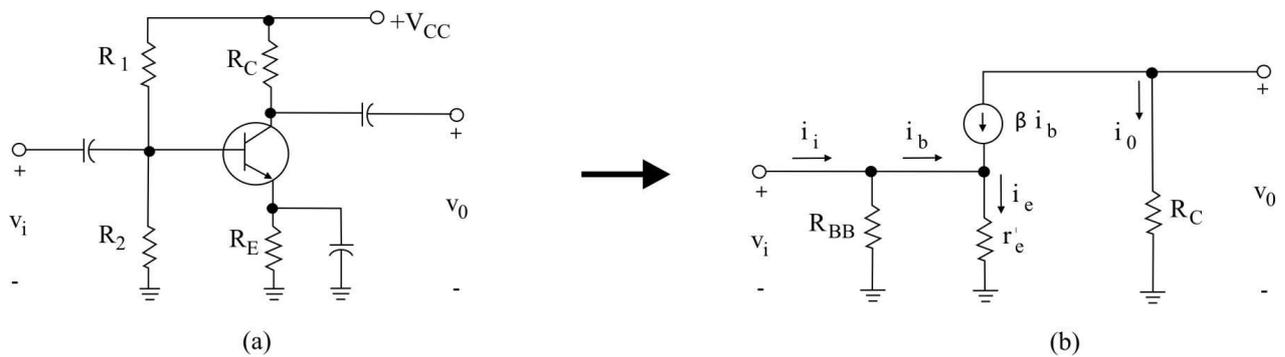


Figura 2.10. (a) Amplificador emissor comum sem carga. (b) Circuito equivalente CA.

A corrente de emissor na Figura 2.10(b) é dada por:

$$i_e = \frac{v_i}{r'_e}$$

Mas: $i_e = i_b + i_c \rightarrow i_c = \beta \cdot i_b \rightarrow i_e = i_b + \beta \cdot i_b = (\beta + 1) \cdot i_b$

Logo: $v_i = r'_e \cdot (\beta + 1) \cdot i_b$

Como a tensão de saída é expressa por: $v_o = -R_C \cdot \beta \cdot i_b$

O ganho de tensão sem carga será: $A_{V0} = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_C \cdot \beta \cdot i_b}{r'_e \cdot (\beta + 1) \cdot i_b}$

Como $\beta \gg 1$:

$$A_{V0} \cong -\frac{R_C}{r'_e} \quad (2.7)$$

2.7.2 – Impedância de Entrada

A fonte CA que aciona um amplificador, tem que fornecer a corrente alternada ao amplificador. Geralmente, quanto menos corrente o amplificador consome da fonte, melhor. A impedância de entrada de um amplificador determina a quantidade de corrente que o amplificador retira da fonte CA.

Na faixa de frequência normal de um amplificador, onde os capacitores de acoplamento e derivação comportam-se como curtos em CA e todas as outras reatâncias podem ser desprezados, a impedância CA de entrada é definida assim:

$$Z_i = \frac{v_i}{i_i} \quad (2.8)$$

onde v_i e i_i são valores de pico, de pico a pico ou eficazes (rms).

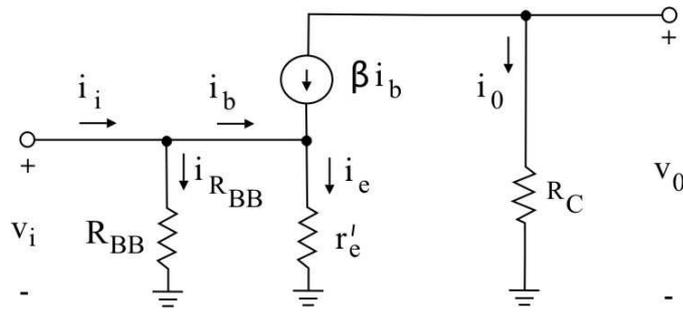


Figura 2.11. Impedâncias de entrada e de saída.

Da figura 2.11, tem-se que a tensão de entrada é dada por:

$$v_i = r'_e \cdot i_e = r'_e \cdot (\beta + 1) \cdot i_b$$

$$\text{Logo: } i_b = \frac{v_i}{r'_e \cdot (\beta + 1)}$$

$$\text{Assim, a corrente de entrada será: } i_i = i_{R_{BB}} + i_b = \frac{v_i}{R_{BB}} + \frac{v_i}{(\beta + 1) \cdot r'_e}$$

$$\text{onde: } R_{BB} = R_1 // R_2$$

$$\text{Portanto: } \frac{i_i}{v_i} = \frac{1}{R_{BB}} + \frac{1}{(\beta + 1) \cdot r'_e} = \frac{R_{BB} + (\beta + 1) \cdot r'_e}{R_{BB} \cdot (\beta + 1) \cdot r'_e}$$

A impedância de entrada, então, será:

$$Z_i = \frac{v_i}{i_i} = \frac{R_{BB} \cdot (\beta + 1) \cdot r'_e}{R_{BB} + (\beta + 1) \cdot r'_e} = R_{BB} // (\beta + 1) \cdot r'_e$$

$$\text{Mas, como } \beta \gg 1: \quad Z_i = R_{BB} // \beta \cdot r'_e \quad (2.9)$$

2.7.3 – Impedância de Saída

A impedância de saída de um amplificador é a impedância vista pela carga, um auto-falante por exemplo, que este amplificador alimenta.

$$\text{Por definição: } Z_0 = \frac{v_0}{i_0} \quad (2.10)$$

Da Figura 2.11, a corrente de saída (i_0) é dada por: $i_0 = -\beta \cdot i_b$

A tensão de saída, Figura 2.11, é expressa por: $v_0 = R_C \cdot i_0 = -R_C \cdot \beta \cdot i_b$

Assim, a impedância de saída será: $Z_0 = \frac{-R_C \cdot \beta \cdot i_b}{-\beta \cdot i_b} \Rightarrow Z_0 = R_C$ (2.11)

2.7.4 – Ganho de Corrente sem Carga

Por definição: $A_{i0} = \frac{i_0}{i_i}$

Da Figura 2.11, tem-se que: $i_0 = -\beta \cdot i_b$

$$v_i = r'_e \cdot (\beta + 1) \cdot i_b \rightarrow \beta \gg 1$$

$$i_i = i_{R_{BB}} + i_b = \frac{v_i}{R_{BB}} + i_b = \frac{r'_e \cdot \beta \cdot i_b}{R_{BB}} + i_b = i_b \cdot \left(\frac{R_{BB} + r'_e \cdot \beta}{R_{BB}} \right)$$

Logo, o ganho de corrente sem carga será:

$$A_{i0} = \frac{-\beta \cdot i_b}{i_b \cdot \left(\frac{R_{BB} + \beta \cdot r'_e}{R_{BB}} \right)} \Rightarrow A_{i0} = \frac{-\beta \cdot R_{BB}}{R_{BB} + \beta \cdot r'_e}$$

Se $R_{BB} \gg \beta \cdot r'_e$ $i_i \cong i_b \therefore A_{i0} = -\beta$ (2.12)

2.8 – MODELO CA SIMPLIFICADO

A Figura 2.12 resume o que foi dito sobre as impedâncias de entrada e de saída de um amplificador emissor comum. Nesta Figura, vê-se uma impedância de entrada de $R_1 // R_2 // \beta \cdot r'_e = R_{BB} // \beta \cdot r'_e$. Isto é o que a fonte CA de entrada também vê. No lado da saída, vê-se uma fonte de tensão CA $A_{v0} \cdot v_i$ em série com uma impedância de saída R_C . Uma vez acostumando-se a usá-lo, este modelo simplificado de um amplificador emissor comum, permite analisar rapidamente os estágios em cascata.

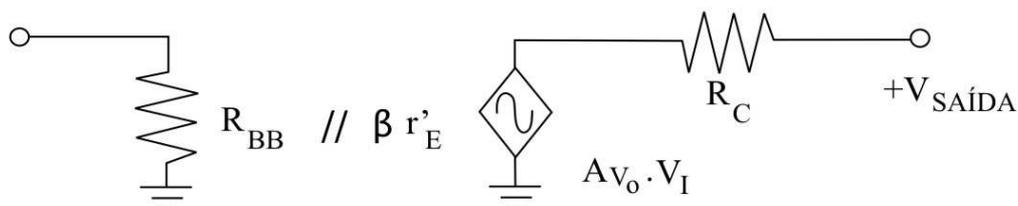
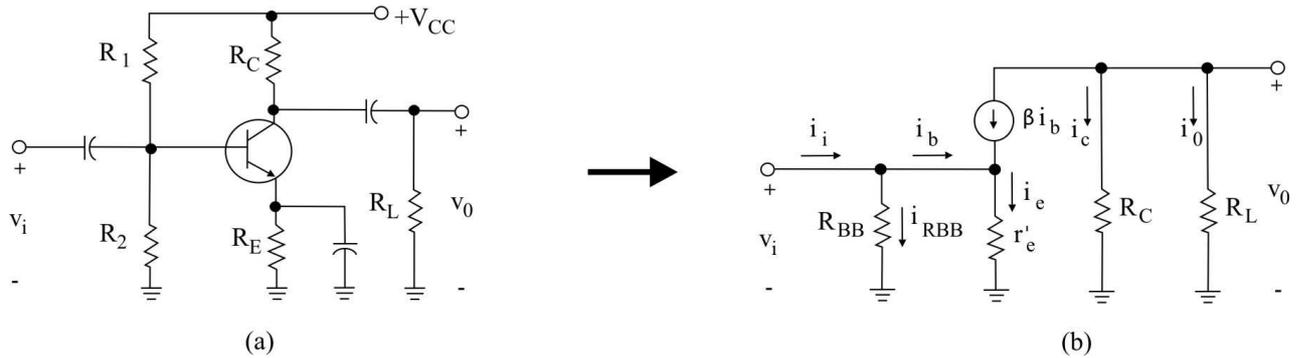


Figura 2.12. Modelo CA simplificado de um amplificador emissor comum.

2.9 – GANHO DE TENSÃO, CORRENTE E POTÊNCIA COM CARGA

Ao acoplar-se uma carga (R_L) a um amplificador, tem-se o circuito apresentado na Figura 2.13(a). Para a determinação do ganho de tensão, de corrente e de potência com carga (A_{VC} , A_{ic} e A_{pC} , respectivamente), utiliza-se o circuito equivalente CA apresentado na Figura 2.13(b).



**Figura 2.13. (a) Amplificador emissor comum com carga.
(b) Circuito equivalente CA.**

2.9.1 – Ganho de Tensão com Carga

Para a Figura 2.13(b), a tensão de entrada é: $v_i = r'_e \cdot i_e = r'_e \cdot (\beta + 1) \cdot i_b$

Já a tensão de saída será: $v_o = -\beta \cdot i_b \cdot (R_C // R_L)$

Assim, o ganho de tensão com carga será: $A_{VC} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-\beta \cdot i_b \cdot (R_C // R_L)}{r'_e \cdot (\beta + 1) \cdot i_b}$

Desde que $\beta \gg 1$:

$$A_{VC} = -\frac{R_C // R_L}{r'_e} \quad (2.13)$$

2.9.2 – Ganho de Corrente com Carga

Também da Figura 2.13(b), tem-se que:

$$i_i = i_b + i_{RBB} = i_b + \frac{r'_e \cdot (\beta + 1) \cdot i_b}{R_{BB}} = i_b \cdot \left(\frac{R_{BB} + r'_e \cdot (\beta + 1)}{R_{BB}} \right)$$

$$\beta \cdot i_b + i_c + i_0 = 0 \Rightarrow i_0 = -\beta \cdot i_b - i_c = -\beta \cdot i_b - \frac{v_o}{R_C} = -\beta \cdot i_b - \frac{R_L \cdot i_0}{R_C}$$

$$i_0 + \frac{R_L \cdot i_0}{R_C} = -\beta \cdot i_b \Rightarrow i_0 \cdot \left(\frac{R_C + R_L}{R_C} \right) = -\beta \cdot i_b \therefore i_0 = -\beta \cdot i_b \cdot \left(\frac{R_C}{R_C + R_L} \right)$$

Logo, o ganho de corrente com carga será:
$$A_{iC} = \frac{i_0}{i_i} = \frac{-\beta i_b \cdot \left(\frac{R_C}{R_C + R_L} \right)}{i_b \cdot \left[\frac{R_{BB} + r'_e \cdot (\beta + 1)}{R_{BB}} \right]}$$

Considerando-se que $\beta \gg 1$:
$$A_{iC} = \frac{\beta \cdot \frac{R_C}{R_C + R_L}}{\frac{R_{BB} + \beta \cdot r'_e}{R_{BB}}} \therefore A_{iC} = \frac{\beta \cdot R_C \cdot R_{BB}}{(R_C + R_L) \cdot (R_{BB} + \beta \cdot r'_e)}$$

Se $R_{BB} \gg r'_e$ $i_i \cong i_0 \therefore A_{iC} = -\frac{\beta \cdot r'_e}{R_C + R_L}$ **(2.14)**

2.9.3 – Ganho de Potência com Carga

Por definição: $A_{pC} = A_{vC} \cdot A_{iC}$ Logo:

$$A_{pC} = \frac{R_C // R_L}{r'_e} \times -\frac{\beta \cdot R_C \cdot R_{BB}}{(R_C + R_L) \times (R_{BB} + \beta \cdot r'_e)} = \frac{R_C \cdot R_L}{(R_C + R_L) \cdot r'_e} \times \frac{\beta \cdot R_C \cdot R_{BB}}{(R_C + R_L) \times (R_{BB} + \beta \cdot r'_e)}$$

$$A_{pC} = \frac{\beta \cdot R_C^2 \cdot R_{BB} \cdot R_L}{(R_C + R_L)^2 \times r'_e \cdot (R_{BB} + \beta \cdot r'_e)}$$
 (2.15)

2.10 – RETAS DE CARGA DO AMPLIFICADOR EMISSOR COMUM

A reta de carga representa os pontos possíveis da curva característica $I_C \times V_{CE}$ do circuito, sendo que para um transistor polarizado, duas retas são definidas: uma para corrente contínua (reta CC) e outra para corrente alternada (reta CA). O ponto quiescente (Q) corresponde à intersecção destas duas retas, caso elas não sejam coincidentes.

Assim, para o circuito amplificador emissor comum da Figura 2.14, tem-se as retas de carga CC e CA apresentadas nas Figuras 2.15 e 2.17, respectivamente.

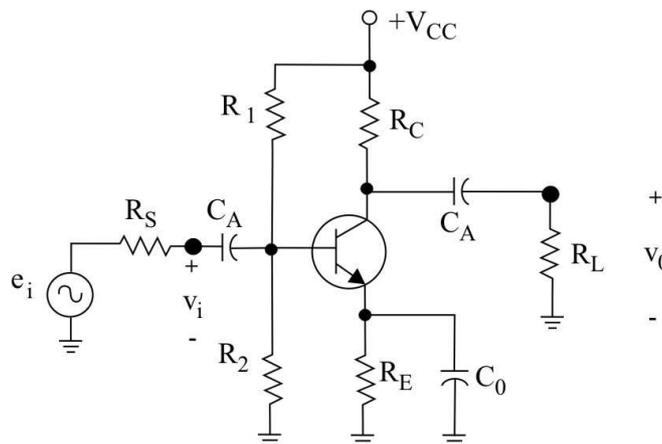


Figura 2.14. Amplificador emissor comum com carga.

2.10.1 – Análise CC

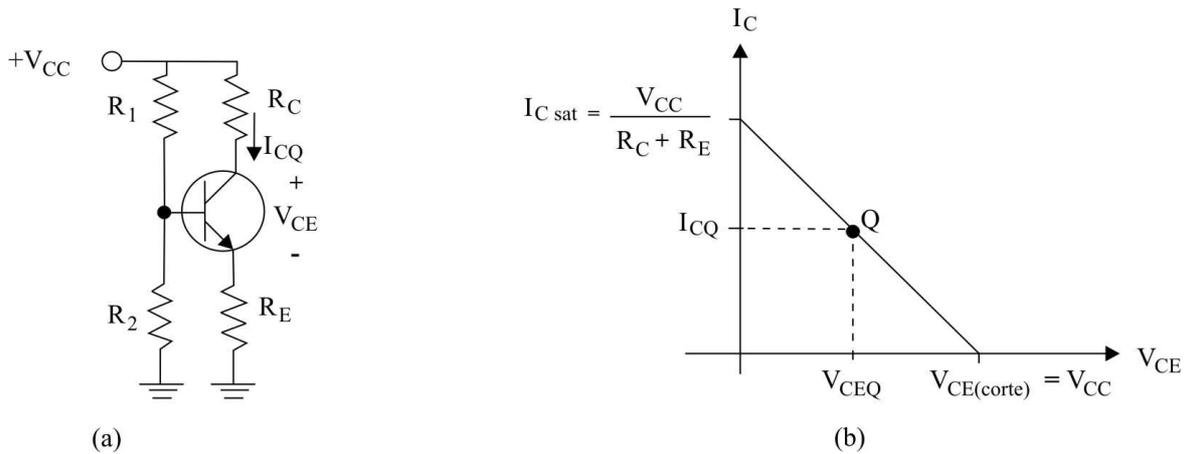


Figura 2.15. (a) Circuito equivalente para a análise CC. (b) Retas de carga CC.

2.10.2 – Análise CA

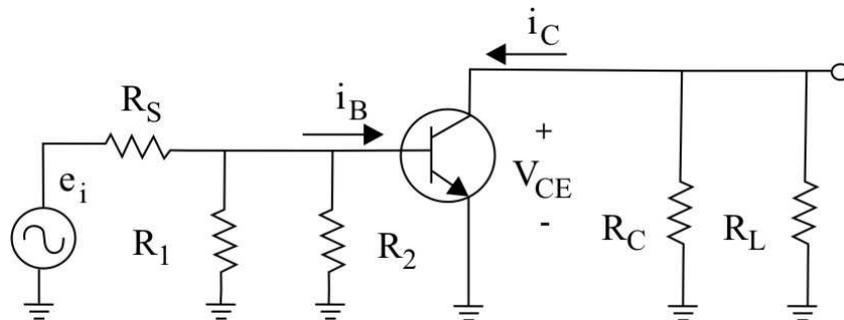


Figura 2.16. Circuito equivalente CA.

Como já visto, um sinal alternado é a composição de um sinal CC e de um sinal CA, ou seja:

$$Sinal = Sinal_{CC} + Sinal_{CA}$$

Assim: $I = i + I_{CQ}$ e $V_{CE} = v_{ce} + V_{CEQ}$

Da Figura 2.16, tem-se que: $+v_{ce} + r_c \cdot i_c = 0 \Rightarrow i_c = -\frac{v_{ce}}{r_c}$

Onde: $r_c = R_C // R_L$

Logo: $I_C = -\frac{v_{ce}}{r_c} + I_{CQ}$

Como: $v_{ce} = V_{CE} - V_{CEQ}$

Tem-se que:
$$I_C = \frac{V_{CEQ} - V_{CE}}{r_c} + I_{CQ} \quad (2.16)$$

Portanto, se: $V_{CE} = 0 \Rightarrow I_C = \frac{V_{CEQ}}{r_C} + I_{CQ}$ (2.17)

$$I_C = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CEQ} + I_{CQ} \cdot r_C$$

Assim, a reta de carga CA será:

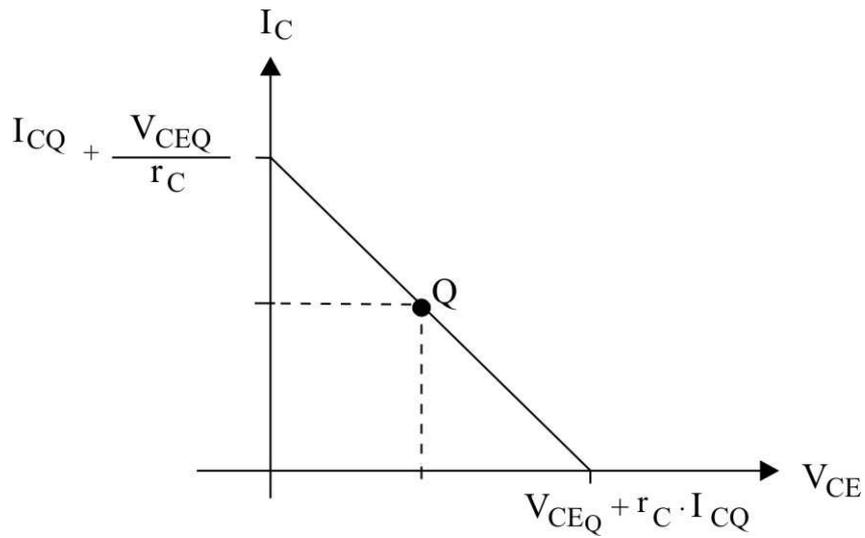


Figura 2.17. Reta de carga CA.

Combinando-se, então, a reta de carga CC com a reta de carga CA, obtém-se:

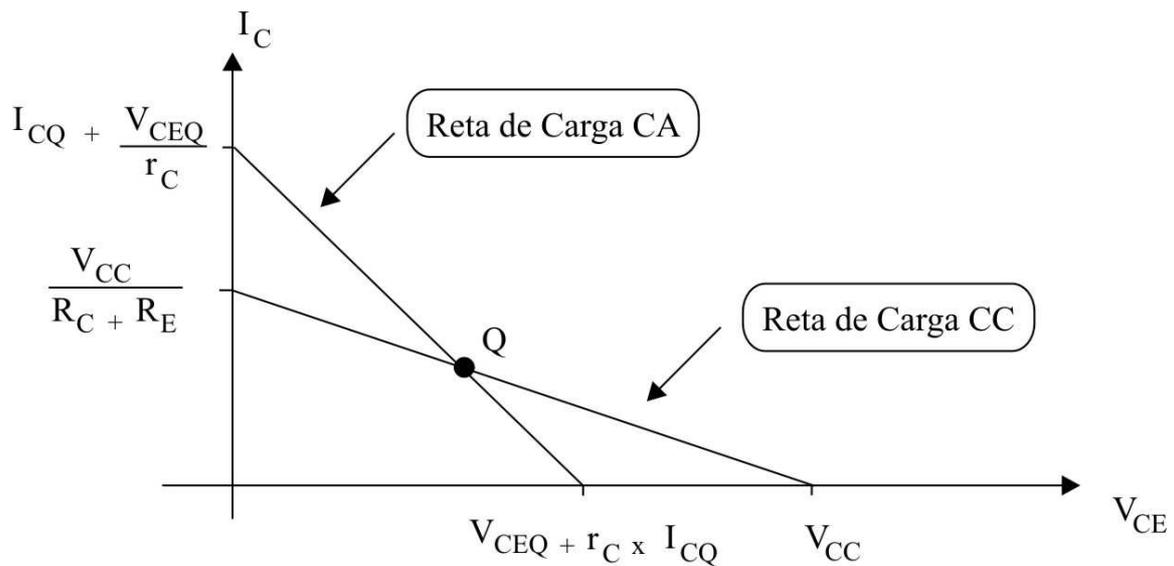


Figura 2.18. Retas de carga CC e CA.

2.10.3 – Máxima Excursão de Sinal (Complância CA de saída)

Compliance CA de saída (PP) é a tensão máxima CA de pico a pico não ceifada, que um amplificador pode produzir.

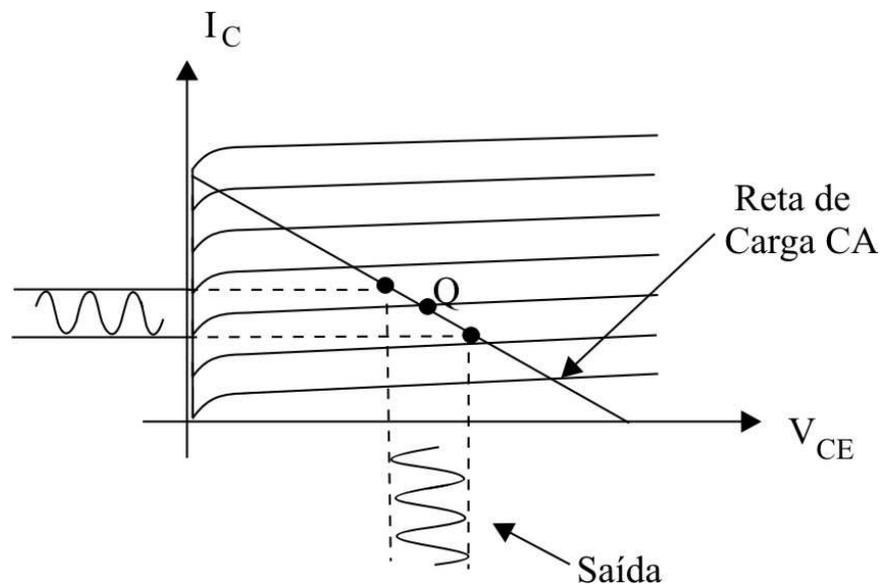


Figura 2.19. Complância CA de saída.

$$\text{Excursão: } \left. \begin{array}{l} \text{positiva} \rightarrow r_C \cdot I_{CQ} \\ \text{negativa} \rightarrow V_{CEQ} \end{array} \right\} PP = 2 \times \min[r_C \cdot I_{CQ}, V_{CEQ}] \quad (2.18)$$

2.11 – CARACTERÍSTICAS DO AMPLIFICADOR EMISSOR COMUM

1) Devido às flutuações CA na corrente do coletor (i_c), a tensão de saída (v_o) oscila senoidalmente acima e abaixo da tensão quiescente. Observa-se que a tensão de saída está invertida em relação à tensão CA de entrada (v_i), significando que ela está defasada de 180° com a entrada. Durante o semiciclo positivo da tensão de entrada, a corrente de base (i_b) aumenta, fazendo crescer a corrente de coletor. Portanto, a tensão de coletor (v_c) diminui e obtém-se o primeiro semiciclo negativo da tensão de saída. Analogamente, no semiciclo negativo da tensão de entrada, flui uma corrente menor de coletor e a queda de tensão através do resistor de coletor (R_C) diminui. Por esta razão, a tensão do coletor ao terra aumenta e obtém-se o semi-ciclo positivo da tensão de saída;

2) A impedância de entrada (Z_i) possui um valor médio;

3) A impedância de saída (Z_o) depende do valor do resistor de coletor (R_C).

Assim, se o valor de R_C for pequeno, o ganho de tensão sem carga (A_{V0}) também será pequeno;

4) Possui um ganho de tensão elevado;

5) Variações de r'_e tem efeito direto no ganho;

6) Distorções para grandes sinais provocada pela não linearidade do diodo emissor.

Faixa de freqüências de operação do amplificador ca simples

O comportamento de um amplificador é diferente para cada valor de freqüência do sinal que estiver sendo amplificado, podendo chegar ao extremo de, numa dada freqüência, anulá-lo completamente. Uma forma de descrever este comportamento é determinar a **faixa de freqüências** de operação do amplificador.

A faixa de freqüências de operação de um amplificador possui duas freqüências limite: freqüência de corte inferior (fci) e freqüência de corte superior (fcs).

A freqüência de corte inferior pode ser determinada matematicamente de forma simples, calculando-se os valores das freqüências mínimas capazes de atravessar cada um dos três capacitores utilizados no amplificador. A freqüência de corte inferior será a maior dentre as três.

$$f_{ci} = \frac{1}{2 \cdot \pi C \cdot R_{eq}}$$

A determinação matemática da freqüência de corte superior não é tão trivial, de modo que será suprimida neste momento. Sua determinação pode ser feita praticamente, mantendo-se a amplitude do sinal de entrada à medida que se aumenta sua freqüência. A amplitude da saída deverá permanecer constante até o momento que começa a declinar. A freqüência de corte superior é aquela na qual a amplitude do sinal de saída cai a 70% do valor da região plana.

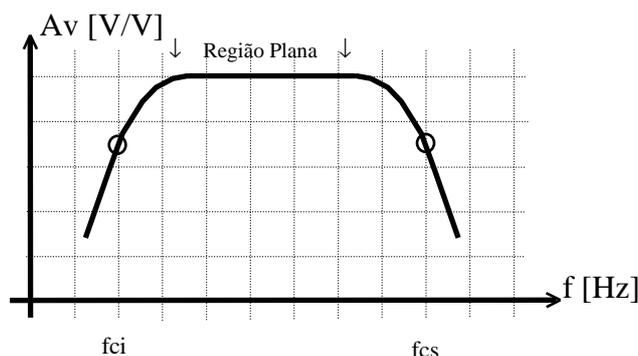


Figura - Curva do comportamento típico do ganho de um amplificador

2.12 – AMPLIFICADOR EMISSOR COMUM LINEARIZADO

O valor de r'_e varia com a temperatura e com o tipo de junção. Por isso, o ganho de um amplificador emissor comum pode variar dependendo da temperatura e do transistor utilizado.

Para diminuir a dependência do ganho em relação a r'_e , coloca-se um resistor de linearização (r_E) em série com o emissor, como apresentado na Figura 2.20.

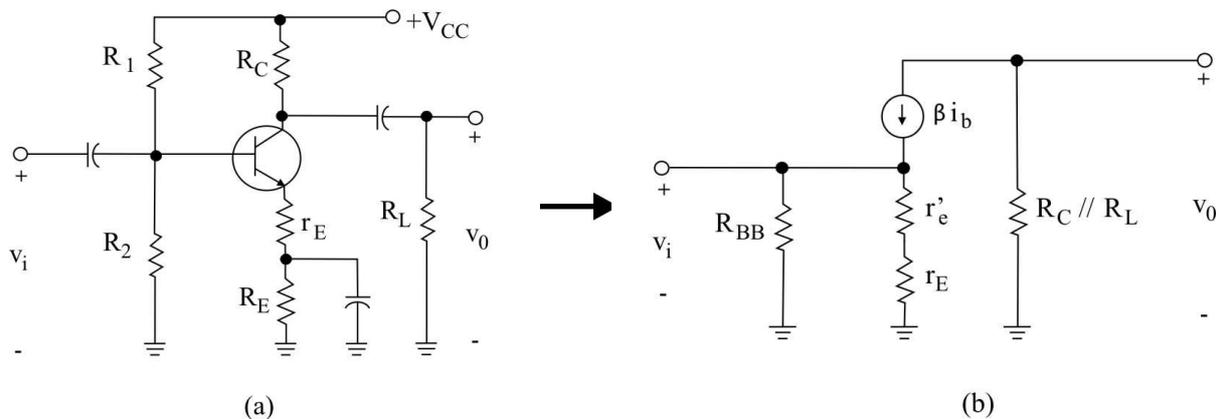


Figura 2.20. (a) Amplificador emissor comum linearizado.
(b) Circuito equivalente CA.

2.12.1 – Realimentação Parcial

Na Figura 2.20(a), emissor não está mais no potencial do terra CA. Por isso, a corrente CA do emissor flui através de r_E e produz uma tensão CA no emissor. Se r_E for muito maior do que r'_e , praticamente todo o sinal CA de entrada aparecerá no emissor, ou seja, o emissor estará amarrado à base tanto em CA quanto em CC.

A figura 2.20(b), mostra o circuito equivalente CA. Como r_E está em série com r'_e , a resistência total é $r_E + r'_e$. A entrada CA aparece através desta resistência e produz uma corrente CA de emissor de:

$$i = \frac{v_i}{r_E + r'_e} \quad (2.19)$$

2.12.2 – Parâmetros do Amplificador Linearizado

Ganho de tensão com carga:
$$A_{VC} = -\frac{R_C // R_L}{(r'_e + r_E)} \quad (2.20)$$

Se $r_E \gg r'_e$, podemos escrever apenas:
$$A_{VC} = -\frac{R_C // R_L}{r_E} \quad (2.21)$$

Portanto, o ganho passa a ser independente de r'_e e muito mais confiável.

Impedância de entrada:
$$Z_i = R_{BB} // \beta(r'_e + r_E) \quad (2.22)$$

Impedância de saída:
$$Z_o = R_C \quad (2.23)$$

2.12.3 – Modelo CA do Amplificador Linearizado

A Figura 2.21, mostra o modelo CA de um amplificador emissor comum linearizado. A impedância de entrada é a associação em paralelo de R_1, R_2 e $\beta(r'_e + r_E)$. O ganho de tensão com carga, iguala-se a $-(R_C // R_L)/(r'_e + r_E)$. A impedância de saída é R_C . Com este modelo CA, pode-se analisar amplificadores linearizados dentro de um amplificador com múltiplos estágios.

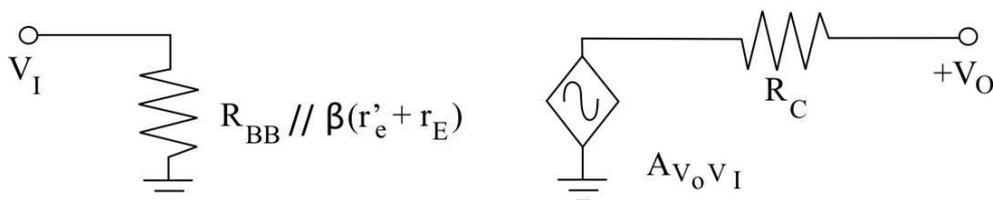


Figura 2.21. Modelo CA do amplificador emissor comum linearizado.

2.12.4 – Características do Amplificador Linearizado

- 1) Resistor de linearização reduz o ganho de tensão e as variações de r'_e têm menos efeito sobre o ganho de tensão (estabilidade);
- 2) A impedância de entrada é muito mais alta;
- 3) A realimentação parcial do diodo emissor, reduz a distorção. É a não linearidade do diodo emissor que produz a distorção em amplificadores de grande sinal. Como $r'_e = 25mV / I_E$, qualquer variação significativa em I_E produz uma variação perceptível em r'_e . Num amplificador de grande sinal sem realimentação

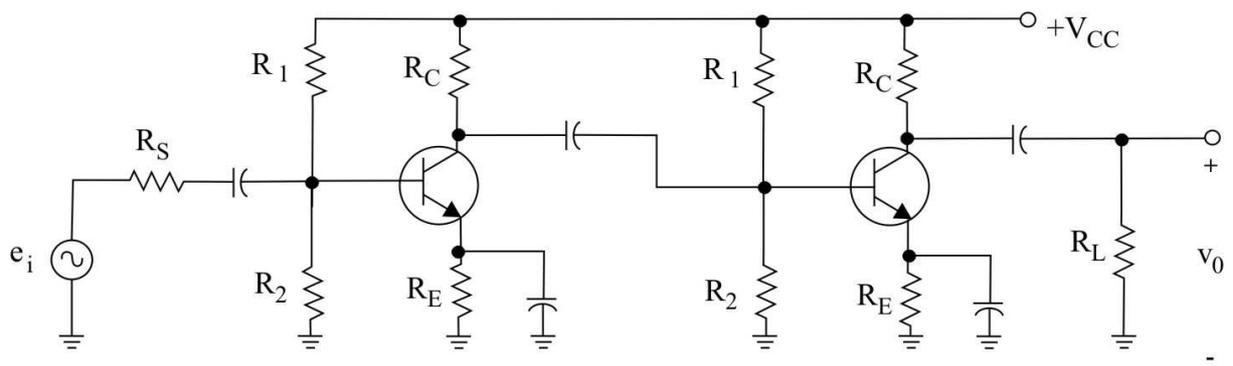
parcial, isto significa que o ganho de tensão varia ao longo de todo o ciclo porque r'_e está variando. O ganho de tensão variável, resulta num sinal de saída distorcido. É por isso, que um amplificador com realimentação parcial utiliza somente uma pequena parte da reta de carga, para evitar a distorção excessiva do sinal. Num amplificador fortemente realimentado pelo resistor de emissor, praticamente todo o sinal senoidal de entrada aparece através do resistor de linearização (r_E). Isto quer dizer que a corrente de coletor será senoidal e permanecerá senoidal, mesmo que seja usada a maior parte da reta de carga. Logo, realimentar o diodo emissor, reduz grandemente a distorção produzida pelo diodo emissor porque a maior parte do sinal CA aparece através do resistor de linearização. Como este resistor é um dispositivo linear, pode-se usar praticamente toda a reta de carga e, ainda, obter-se somente uma pequena quantidade de distorção.

2.13 – ESTÁGIOS EM CASCATA

Para a análise de estágios em cascata, a idéia é de utilizar a saída amplificada de um estágio como a entrada para outro estágio. Dessa forma, pode-se montar um amplificador de múltiplos estágios com um ganho de tensão total muito grande.

A Figura 2.22(a), mostra um amplificador de dois estágios utilizando circuitos na configuração emissor comum. Uma fonte CA com uma resistência de fonte R_S , aciona a entrada do amplificador. O estágio emissor comum amplifica o sinal que, então, é acoplado ao próximo estágio emissor comum. A seguir, o sinal é amplificado mais uma vez para fornecer uma saída final que seja, consideravelmente, maior do que o sinal da fonte.

Na Figura 2.22(b), tem-se o modelo CA para o amplificador de dois estágios. Cada estágio tem uma impedância de entrada, dada pela associação paralela de R_1, R_2 e $\beta r'_e$. Cada estágio tem, também, um ganho de tensão sem carga de $-R_C/r'_e$ e uma impedância de saída de R_C . Portanto, a análise é direta e resume-se ao cálculo de Z_i, A_{V0} e Z_o para cada estágio. Em seguida, analisando-se a fonte e os efeitos da carga, pode-se calcular a tensão final de saída. A mesma aproximação pode ser aplicada a qualquer número de estágios, alguns dos quais podem ser amplificadores emissor comum linearizados.



(a)

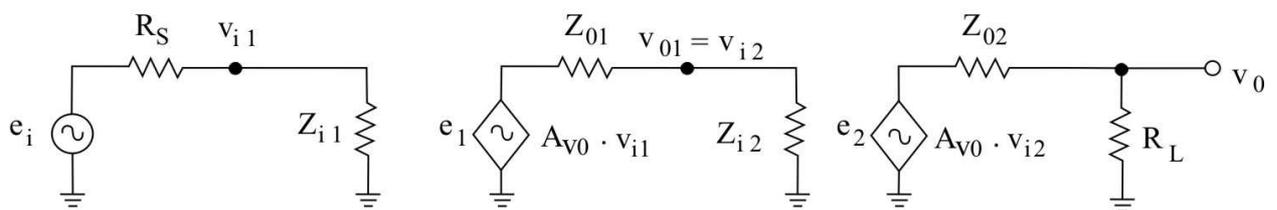


Figura 2.22. (a) Amplificador de dois estágios com estágios de emissor comum. (b) Circuito equivalente CA.

Da figura 2.22: $Z_{i1} = Z_{i2} = R_{BB} // \beta \cdot r'_e = R_1 // R_2 // \beta \cdot r'_e$ (2.25)

$$A_{v01} = A_{v02} = A_{v0} = -R_C / r'_e$$
 (2.26)

$$v_{i1} = \frac{Z_{i1}}{Z_{i1} + R_S} \cdot e_i$$
 (2.27)

$$v_{01} = v_{i2} = \frac{Z_{i2}}{Z_{i2} + Z_{01}} \times A_{v0} \cdot v_{i1}$$
 (2.28)

$$v_0 = v_{02} = \frac{R_L}{R_L + Z_{02}} \times A_{v0} \cdot v_{i2}$$
 (2.29)

3 . AMPLIFICADOR COLETOR COMUM

3.1 – DEFINIÇÃO

A Figura 3.1 mostra um circuito chamado amplificador com *coletor comum* (CC). Como R_C é zero, o coletor está no terra CA. É por isso que o circuito, também, é chamado amplificador com o coletor aterrado. Quando uma tensão contínua V_i aciona a base, aparece uma tensão CC V_0 através do resistor de emissor.

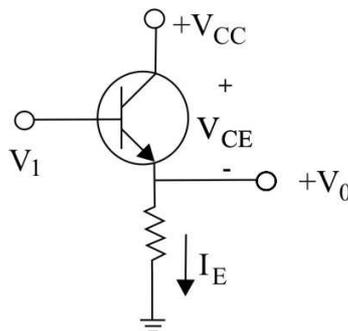


Figura 3.1. Amplificador coletor comum.

Um amplificador CC é como um emissor comum fortemente linearizado, com o resistor de coletor em curto, a saída é retirada do emissor e não do coletor. Como o emissor está amarrado à base, a tensão de saída CC será:

$$V_0 = V_i - V_{BE} \quad (3.1)$$

O circuito, também, é chamado de seguidor de emissor porque a tensão CC do emissor segue a tensão CC da base. Isto quer dizer que, as variações em V_0 estão em fase com as variações de V_i .

3.2 – RETA DE CARGA CC

Somando-se as tensões ao longo da malha do coletor na Figura 3.1, tem-se que:

$$V_{CE} + R_E \cdot I_E - V_{CC} = 0 \quad (3.2)$$

Como $I_C \cong I_E$, obtém-se equação da reta de carga CC, mostrada na Figura 3.2:

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_E} \quad (3.3)$$

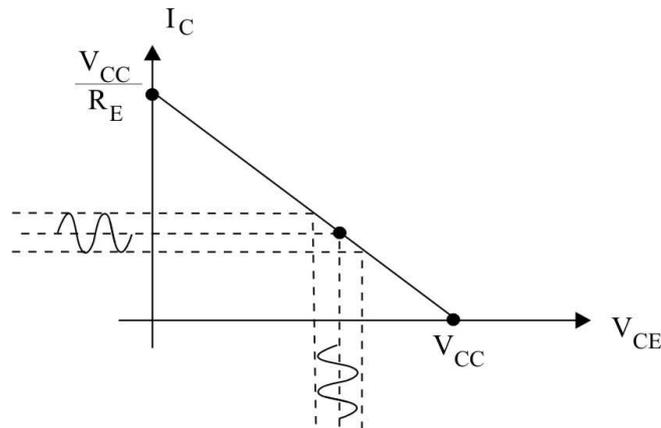


Figura 3.2. Reta de carga CC do amplificador seguidor de emissor (coletor comum).

Quando a tensão de entrada contiver uma componente CA bem como uma componente CC, a reta de carga CA é a mesma reta de carga CC, porque I_C e V_{CE} apresentam a flutuação senoidal apresentada na Figura 3.2. Se o sinal de entrada for suficientemente grande para usar toda a reta de carga CA, o transistor atingirá a saturação e o corte nos picos. Isto limita a excursão da tensão de saída (Complância CA de saída – PP), para um valor de pico a pico de V_{CC} .

3.3 – MODELO CA DE UM SEGUIDOR DE EMISSOR

3.3.1 – Ganho de Tensão sem Carga

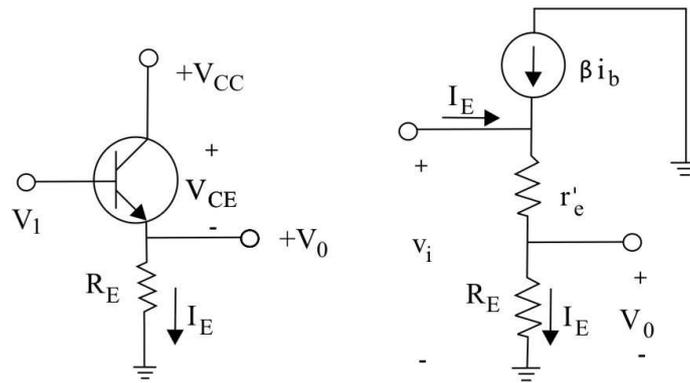
A figura 3.3(a), mostra um seguidor de emissor acionado por uma pequena tensão CA. A figura 3.3(b), mostra o circuito equivalente CA.

A tensão CA de saída é igual a: $V_0 = R_E \cdot i_e$

Como a tensão de entrada é: $V_i = (R_E + r'_e) \cdot i_e$

O ganho de tensão sem carga será: $A_{V0} = \frac{v_0}{v_i} = \frac{R_E}{R_E + r'_e} \quad (3.4)$

Porém, na maioria dos circuitos seguidores de emissor $R_E \gg r'_e$. Logo, o ganho de tensão será $A_{V0} \cong 1$.

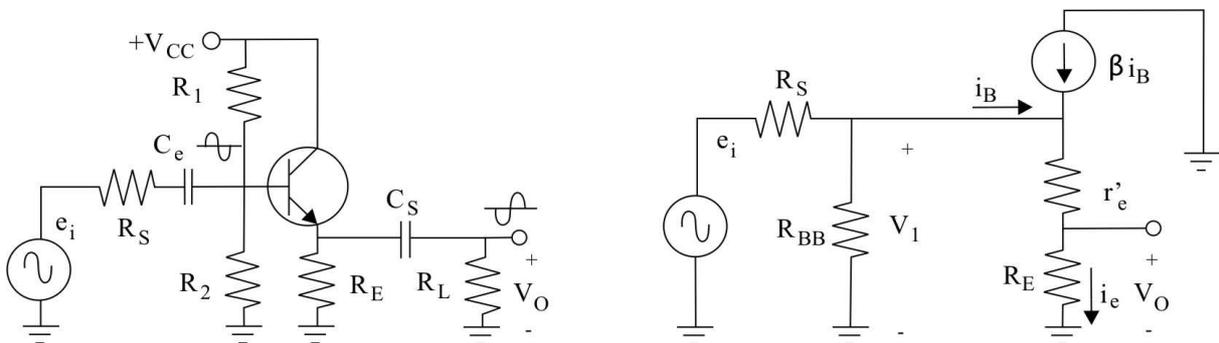


**Figura 3.3 - (a) Circuito seguidor de emissor.
(b) Circuito equivalente CA.**

3.3.2 – Impedância de Entrada

Uma fonte CA com uma resistência R_S , aciona o seguidor de emissor da Figura 3.4(a). A partir do circuito equivalente CA apresentado na Figura 3.4(b), obtém-se uma impedância de entrada de:

$$Z_i = R_1 // R_2 // \beta \cdot (R_E + r'_e) \quad (3.5)$$



**Figura 3.4. (a) Seguidor de emissor com divisor de tensão na base.
(b) Circuito equivalente CA.**

3.3.3 – Impedância de Saída

Da Figura 3.4(b) pode-se, também, obter a impedância de saída do amplificador seguidor de emissor:

$$Z_0 = R_E // \left(r'_e + \frac{R_S // R_1 // R_2}{\beta} \right) \therefore Z_0 = R_E // \left(r'_e + \frac{R_S // R_{BB}}{\beta} \right) \quad (3.6)$$

3.3.4 – Ganho de Corrente sem Carga

O ganho de corrente é dado por: $A_{i0} = \frac{i_0}{i_i}$

Analisando-se o circuito equivalente CA do amplificador seguidor de emissor, tem-se que:

$$A_{i0} = \beta \quad (3.7)$$

3.3.5 – Modelo CA

A Figura 3.5 mostra o modelo CA para um amplificador seguidor de emissor. Ele tem uma impedância de entrada Z_i , uma fonte de saída $A_{v0} \cdot v_i$ e uma impedância de saída Z_o . Este modelo CA é suficientemente preciso para a maioria das verificações de defeitos e projetos.

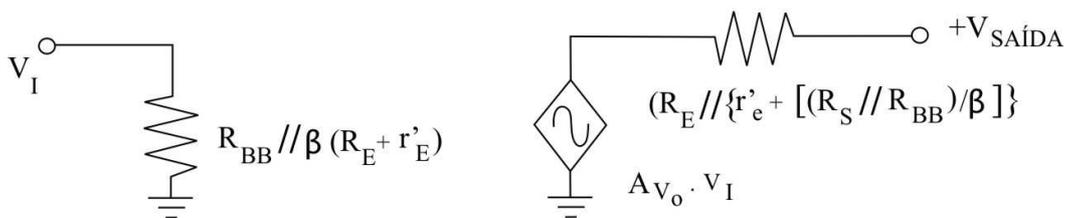


Figura 3.5. Modelo CA do seguidor de emissor.

3.4 – AMPLIFICADOR DARLINGTON

É formado por seguidores de emissor em cascata, tipicamente um par como o da figura 3.6. Possui uma alta impedância de entrada, baixa impedância de saída e alto ganho de corrente. Porém, como já visto no seguidor de emissor, o ganho de tensão é próximo de 1.

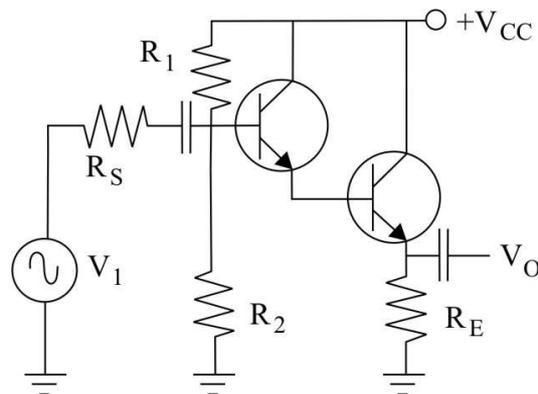


Figura 3.6. Amplificador Darlington.

3.4.1 – Análise CC

A Figura 3.7, mostra o circuito equivalente para a análise CC do amplificador Darlington.

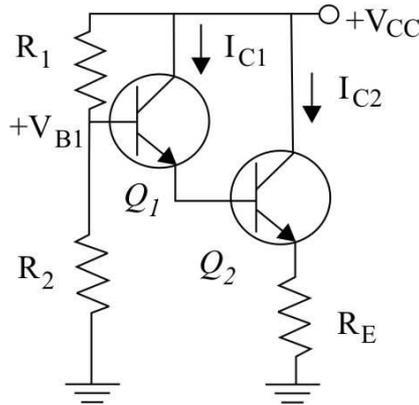


Figura 3.7. Circuito equivalente CC do amplificador Darlington.

A tensão na base do transistor Q_1 é dada por: $V_{BB} = V_{B1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC}$ **(3.7)**

Da malha de entrada tem-se que: $I_{C2} = \frac{V_{BB} - 2 \cdot V_{BE}}{R_E}$ **(3.8)**

A corrente na base do transistor Q_2 , é igual a corrente de emissor do transistor Q_1 . Como $I_C \cong I_E$, tem-se que: $I_{C1} \cong \frac{I_{C2}}{\beta_2}$ **(3.9)**

3.4.2 – Análise CA

O circuito equivalente CA do amplificador Darlington, é apresentado na Figura 3.8.

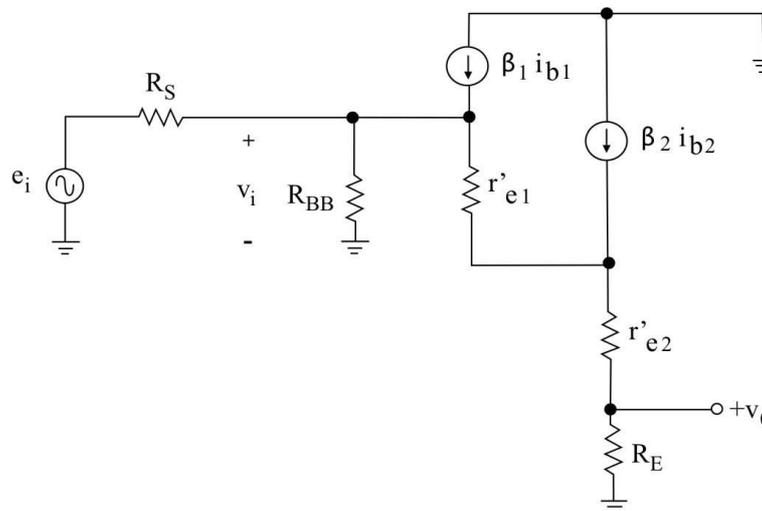


Figura 3.8. Circuito equivalente CA do amplificador Darlington.

No circuito de único transistor:

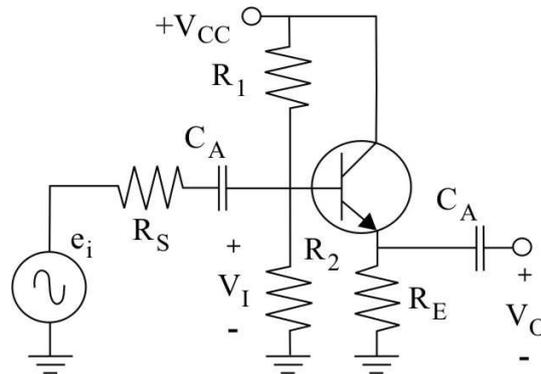


Figura 3.9 Circuito CC e suas equações para os parâmetros do amplificador.

Por extensão, para o amplificador Darlington tem-se:

$$Z_i = R_{BB} // \beta_1 \cdot [r'_e + \beta_2 \cdot (R_E + r'_{e2})]$$

Impedância de Entrada e Saída:

$$Z_0 = R_E // \left(r'_{e2} + \frac{r'_{e1}}{\beta_2} + \frac{R_S // R_{BB}}{\beta_1 \cdot \beta_2} \right)$$

Como $R_E \gg r'_{e1}$ e r'_{e2} : $Z_i = R_{BB} // \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot R_E \quad \therefore \quad Z_i = R_{BB}$ (3.10)

$$Z_0 = r'_{e2} + \frac{r'_{e1}}{\beta_2} + \frac{R_S // R_{BB}}{\beta_1 \cdot \beta_2}$$
 (3.11)

Ganho de Tensão: $A_{V_0} \cong 1$ (3.12)

Ganho de Corrente: $A_{I_0} = \beta_1 \cdot \beta_2$ (3.13)

Elaboração: Prof. Pedro Armando da Silva Jr. – Dezembro de 2004.

Referências Bibliográficas:

- MILLMAN, J., HALKIAS, C. **Eletrônica – Dispositivos e Circuitos.** Vol. 1, São Paulo, MacGraw-Hill, 1981.
- SEDRA, A. S., SMITH, K. C. **Microeletrônica.** São Paulo, MAKRON Books, 2000.
- MALVINO, A. P. **Eletrônica.** Vol. 2. 4ª Ed, São Paulo, MAKRON Books, 1995.
- KAUFMAN, M., WILSON, J. A. **Eletrônica Básica.** São Paulo, Schaum, McGraw-Hill, 1984.