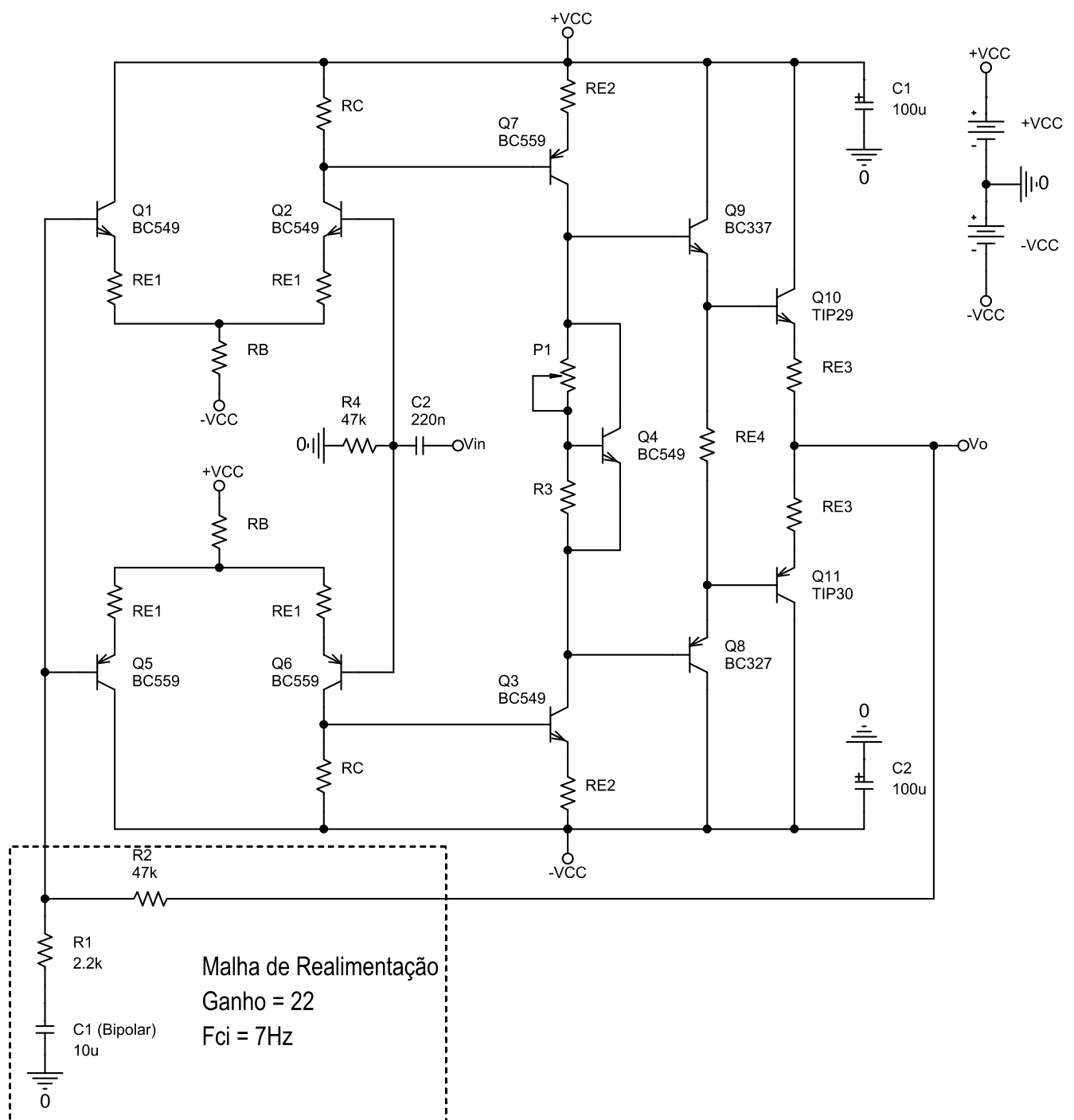


# Proposta de Trabalho

## Amplificador de Áudio

Especificações:

- Potência média máxima de saída igual a 10W
- Eficiência melhor que 55%
- Autofalante de  $8\Omega$
- Ganho em malha aberta igual a 200



## Análise do Circuito

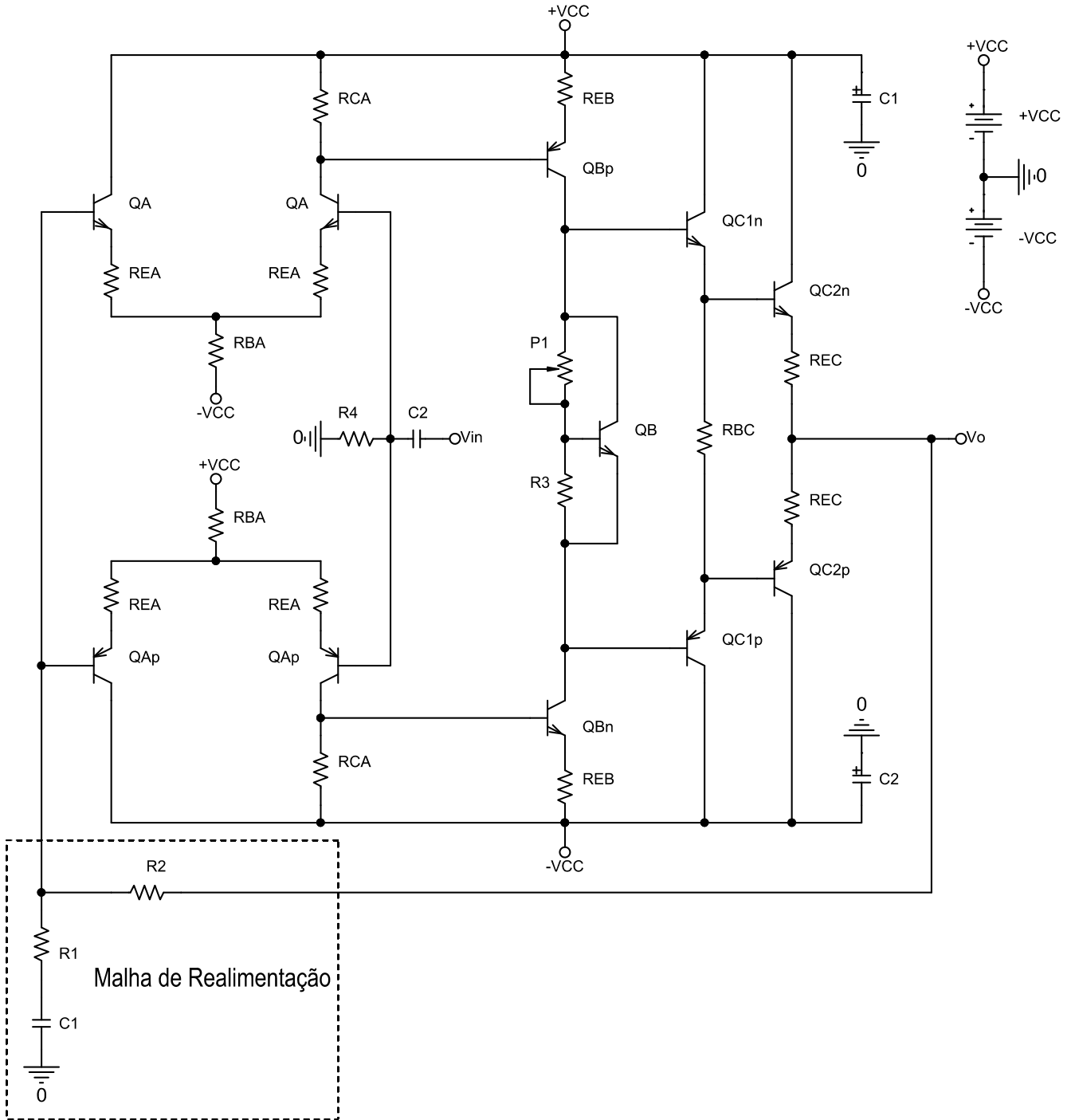


Figura 1: Amplificador de potência.

Inicialmente vamos separar o circuito em 3 blocos básicos: A, estágio de entrada; B, estágio intermediário; C, estágio de saída. O estágio de saída é um *push-pull* com transistores em configuração Darlington. Se considerarmos  $R_{EC} \ll R_L$  e o ganho aproximadamente igual a 1, podemos representá-lo como uma carga equivalente para o estágio B; com valor  $R_{Ceq} = (\beta_{C1} + 1)(\beta_{C2} + 1)R_L$ , onde  $\beta_{C1}$  e  $\beta_{C2}$  são os ganhos de corrente dos transistores. Desta forma, temos o circuito simplificado da Fig.3. Note que  $V_q$  é a tensão  $V_{BEq}$  equivalente da configuração Darlington (a soma dos  $V_{BEs}$  dos transistores). O ganho de tensão em malha aberta é dado pela multiplicação dos ganhos de cada estágio. Como o ganho de tensão do estágio de saída é aproximadamente igual a 1, temos que o ganho total é:

$$A_{OL} = A_A A_B \quad (1)$$

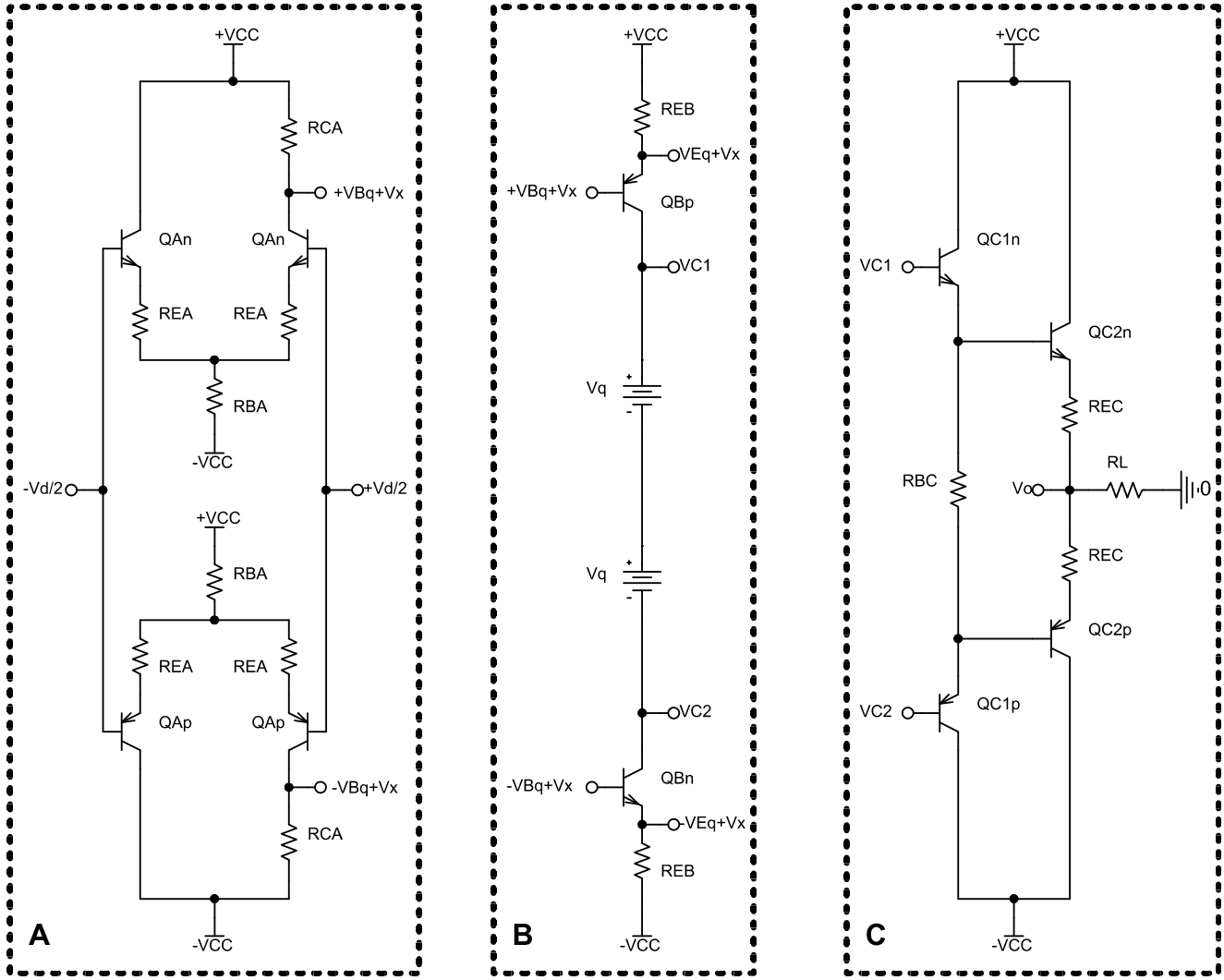


Figura 2: Amplificador de potência em blocos básicos.

Inicialmente vamos analisar o estágio B. Precisamos saber o valor da tensão de pico na saída  $V_{0MAX}$  e a tensão de alimentação  $V_{CC}$ . Podemos calcular  $V_{0MAX}$  da especificação de potência máxima de saída, ou seja:

$$V_{0MAX} = \sqrt{2R_L \bar{P}_{LMAX}} \quad (2)$$

A tensão de alimentação  $V_{CC}$  pode ser calculada da especificação de eficiência máxima, ou seja:

$$V_{CC} \leq \frac{\pi V_{0MAX}}{4\eta_{MAX}} \quad (3)$$

Voltando ao estágio B, temos que a tensão AC  $v_x$  é proveniente da saída do estágio de entrada A. Esta tensão é responsável por gerar a corrente  $i_c$  e a tensão de saída  $v_0$ . A tensão AC em cada emissor é aproximadamente igual a  $v_x$  e, desta forma,  $i_c$  pode ser dividida em duas partes iguais, uma para cada coletor, e dada por  $i_c/2 = -v_x/R_{EB}$ . Então, temos que:

$$v_0 = R_{Ceq} i_c = -\frac{2R_{Ceq}}{R_{EB}} v_x = -|A_B| v_x \quad (4)$$

Para estabelecer as condições de polarização adequadas para o funcionamento do circuito, vamos considerar somente a parte superior (o transistor PNP), pois devido à simetria podemos estender o resultado para a parte

inferior. Ao passo em que a tensão  $v_x$  varia,  $v_0$  e  $v_{C1}$  variam também. Mas não podemos permitir que a tensão entre emissor e coletor seja menor que  $V_{ECsat}$ , e nem que a tensão de emissor ultrapasse  $V_{CC}$ , pois isto implicaria em uma condição de polarização impossível.

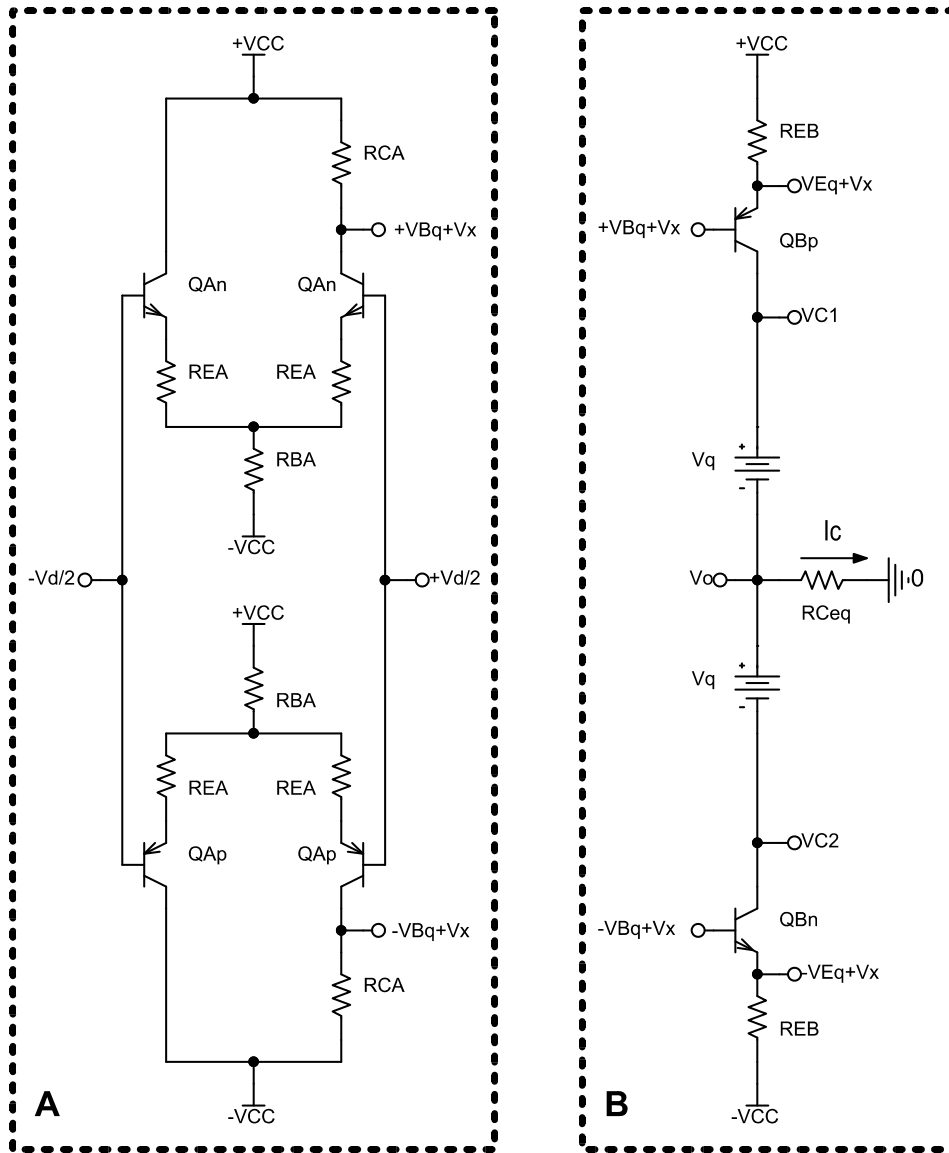


Figura 3: Modelo simplificado.

Por inspeção, verificamos que  $v_{C1} = V_q + v_0$  e a tensão  $v_{EC}$  dada por:

$$v_{EC} = V_{Eq} + v_x - v_{C1} = V_{Eq} + v_x - v_0 - V_q \quad (5)$$

Substituindo (4) em (5), temos que

$$v_{EC} = V_{Eq} - \frac{v_0}{|A_B|} - v_0 - V_q \quad (6)$$

A tensão entre emissor e coletor é mínima quando a tensão de saída  $v_0$  é máxima. Substituindo este resultado em (6), e aplicando a condição  $v_{EC} \geq V_{ECsat}$ , temos a inequação:

$$V_{Eq} \geq V_{ECsat} + V_q + \left(1 + \frac{1}{|A_B|}\right) V_{0MAX} \quad (7)$$

Já a tensão de emissor  $v_E$  é aproximadamente  $V_{Eq} + v_x$ , e  $v_x = -v_0/|A_B|$ , ou, de forma melhor,  $v_E = V_{Eq} - v_0/|A_B|$ . Notamos que  $v_E$  é máxima quando  $v_0$  é mínima, e o valor mínimo de  $v_0$  é  $-V_{0MAX}$ . Forçando a condição  $v_E \leq V_{CC}$ , temos que

$$V_{Eq} \leq V_{CC} - \frac{V_{0MAX}}{|A_B|} \quad (8)$$

Da equação (4) podemos determinar o resistor  $R_{EB}$ , e das inequações (7) e (8), podemos escolher um valor para  $V_{Eq}$  dentro do intervalo.

$$R_{EB} = \frac{2R_{Ceq}}{|A_B|} \quad (9)$$

Assumindo que  $I_{EqB} \approx I_{CqB}$ , podemos determinar  $I_{CqB}$  por:

$$I_{CqB} = \frac{V_{CC} - V_{Eq}}{R_{EB}} = \frac{(V_{CC} - V_{Eq})|A_B|}{2R_{Ceq}} \quad (10)$$

Passemos agora para o estágio de entrada A. Por inspeção, temos que  $V_{Bq} = V_{Eq} - V_{EBq}$ . Portanto, a diferença de potencial sobre o resistor  $R_C$  é  $V_{CC} - V_{Eq} + V_{EBq}$ . Neste ponto, temos a liberdade de escolher a corrente de polarização  $I_{CqA}$  dos transistores do estágio A. De posse desta corrente, temos que

$$R_{CA} = \frac{V_{CC} - V_{Eq} + V_{EBq}}{I_{CqA}} \quad (11)$$

Devido à degeneração de emissor nos amplificadores diferenciais, o ganho  $A_A$  do estágio de entrada é aproximadamente igual a  $-(R_{CA} / (h_{ieB} + (\beta_B + 1)R_{EB})) / 2R_{EA}$ , e com este valor podemos calcular o resistor  $R_{EA}$ , que é dado por:

$$R_{EA} = \frac{R_{CA} / (h_{ieB} + (\beta_B + 1)R_{EB})}{2|A_A|} \quad (12)$$

Considerando  $I_{EqA} \approx I_{CqA}$ , a corrente através de  $R_{BA}$  é igual a  $2I_{CqA}$ , e a diferença de potencial sobre o mesmo é igual a  $V_{CC} - V_{BEqA} - R_{EA}I_{CqA}$ . Temos então que

$$R_{BA} = \frac{V_{CC} - V_{BEqA} - R_{EA}I_{CqA}}{2I_{CqA}} = \frac{V_{CC} - V_{BEqA}}{2I_{CqA}} - \frac{R_{EA}}{2} \quad (13)$$

Com relação ao estágio de saída, os resistores  $R_{EC}$  são usados para garantir a estabilidade térmica. Para carga de  $8\Omega$ , normalmente usa-se valores entre  $0.2\Omega$  e  $0.47\Omega$ . O resistor  $R_{BC}$  é usado para gerar uma pequena corrente de polarização em  $Q_{C1n}$  e  $Q_{C1p}$ , de forma a mantê-los numa região onde os  $\beta$ s estejam próximos do valor máximo. Em geral utiliza-se uma corrente de polarização na ordem de 1mA.

O multiplicador de  $V_{BE}$  pode ser dimensionado com base nas equações abaixo, lembrando que neste caso o cálculo de  $V_q$  deve ser realizado considerando pouca corrente através dos transistores de saída.

$$2V_q = \left(1 + \frac{P_1}{R_3}\right) V_{BEqB} \quad (14)$$

$$R_3 \ll \frac{\beta_{Q_B} + 1}{\left( \frac{1}{V_{BEQ_B}} - \frac{1}{2V_q} \right) I_{CqB}} \quad (15)$$

$$R_3 \geq \frac{V_{BEq_B}}{I_{CqB}} \quad (16)$$

O ganho do amplificador realimentado é definido pela malha de realimentação, e é dado por:

$$A_V = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (17)$$

O capacitor  $C_I$  é calculado de forma que a frequência de corte seja pelo menos 10 vezes menor que a frequência de corte inferior do amplificador. A resistência que  $C_I$  enxerga é  $R_I$ . O valor de  $C_I$  é dado por:

$$C_I = \frac{10}{2\pi f_{CI} R_I} \quad (18)$$

O resistor  $R_4$  é usado para polarizar as bases de  $Q_{An}$  e  $Q_{Ap}$  em zero. O capacitor  $C_2$  define a frequência de corte inferior, e é dado por:

$$C_2 = \frac{1}{2\pi f_{CI} R_4} \quad (19)$$

### Exemplo de Projeto

Como exemplo de projeto, vamos dimensionar um amplificador da Figura 1 com as seguintes especificações:

- Potência média máxima de saída igual a 20W
- Eficiência melhor que 50%
- Autofalante de  $8\Omega$
- Ganho em malha aberta igual a 200
- Ganho de tensão realimentado igual a 18
- Frequência de corte inferior igual a 20Hz

### Dados:

- Para os transistores BC549 e BC559,  $\beta = 200$  e  $|V_{BE}| = 0.7V$ .
- Para os transistores BC327 e BC337,  $\beta = 100$ ,  $|V_{BE}| = 0.7V$  e  $|V_{CEsat}| \approx 0.5V$ .
- Para os transistores TIP29 e TIP30,  $\beta = 15$ ,  $|V_{BE}| = 0.7V @ I_C \leq 10mA$  e  $|V_{BE}| = 1V @ I_C \geq 1A$ .

Ao desenrolar dos cálculos, os valores dos componentes serão aproximados para os valores comerciais mais próximos.

Das equações (2) e (3), calculamos a tensão de pico na carga e a tensão de alimentação.

$$V_{0MAX} = 18V$$

$$V_{CC} = 24V$$

Vamos adotar ganhos iguais para os estágios A e B, ou seja,  $A_A = A_B = \sqrt{A_{OL}} = \sqrt{200} = 14.1$ .

Segundo os dados do manual dos transistores potência, para corrente de coletor na ordem de 1A, temos  $|V_{BE}| \approx 1V$ . Para os outros transistores adotaremos  $|V_{BE}| \approx 0.7V$ . As tensões de saturação dos transistores  $Q_{C1n}$  e  $Q_{C1p}$  são  $|V_{CEsat}| \approx 0.5V$ .

Das inequações (7) e (8), determinamos o intervalo de escolha para  $V_{Eq}$ .

$$21.5V \leq V_{Eq} \leq 22.7V$$

Vamos adotar  $V_{Eq} = 22V$ . Para  $R_{Ceq}$  temos  $R_{Ceq} = (100+1)(15+1)8 = 13k\Omega$ , e pela equação (9) obtemos o valor de  $R_{EB}$ .

$$R_{EB} = 1.8k\Omega$$

Como temos a liberdade de atribuir a corrente de polarização do estágio de entrada, adotaremos  $I_{CqA} = 1mA$ , e pela equação (11) obtemos o valor de  $R_{CA}$ .

$$R_{CA} = 2.2k\Omega$$

Para calcular  $R_{EA}$ , primeiro precisamos do valor de  $I_{CqB}$  que, pela equação (10), é igual a 1.1mA. Com este valor determinamos  $h_{ieB}$  pela fórmula  $h_{ieB} = \beta_B V_T / I_{CqB} = 4.73k\Omega$ . Assim, pela equação (12), calculamos o valor de  $R_{EA}$ .

$$R_{EA} = 68\Omega$$

Da equação (13) obtemos o valor de  $R_{BA}$ .

$$R_{BA} = 12k\Omega$$

O multiplicador de  $V_{BE}$  é dimensionado pelas equações (14), (15) e (16). De (16) obtemos  $R_3 > 636\Omega$  e de (15) obtemos  $R_3 < 170k\Omega$ , onde escolhemos  $R_3 = 3.3k\Omega$ . Finalmente de (14) obtemos  $P_1 = 10k\Omega$ .

$$R_3 = 3.3k\Omega$$

$$P_1 = 10k\Omega \rightarrow \text{potenciômetro de } 22k\Omega$$

Adotando o resistor  $R_1 = 2.2k\Omega$  sugerido no esquema do amplificador; de (17), calculamos  $R_2$  para estabelecer o ganho realimentado de 18.

$$R_2 = 37.4k\Omega$$

Este valor deve ser exato, pois define o ganho realimentado. Pode-se usar um resistor de precisão, uma associação de resistores ou um *trimpot*.

O resistor  $R_{BC}$  é calculado de forma a garantir uma pequena corrente de polarização em  $Q_{C1n}$  e  $Q_{C1p}$ , que adotaremos aproximadamente igual a 1mA. A diferença de potencial sobre  $R_{CB}$  é  $|V_{BEqC_{2n}}| + |V_{BEqC_{2p}}| = 1.4V$ . Então temos  $R_{CB} = 1.4/1mA = 1.4k\Omega$ , que aproximaremos para o valor comercial mais próximo.

$$R_{CB} = 1.5k\Omega$$

Finalmente, os capacitores  $C_1$  e  $C_2$  são calculados pelas equações (18) e (19), assumindo a frequência de corte inferior igual a 20Hz.

$$C_1 = 33\mu F$$

$$C_2 = 180nF$$

### Resultados de simulação

$$\bar{P}_L = 20W @ V_{0MAX} = 18V$$

$$THD = 0.43\% @ V_{0MAX} = 18V$$

$$\eta = 58\% @ V_{0MAX} = 18V$$

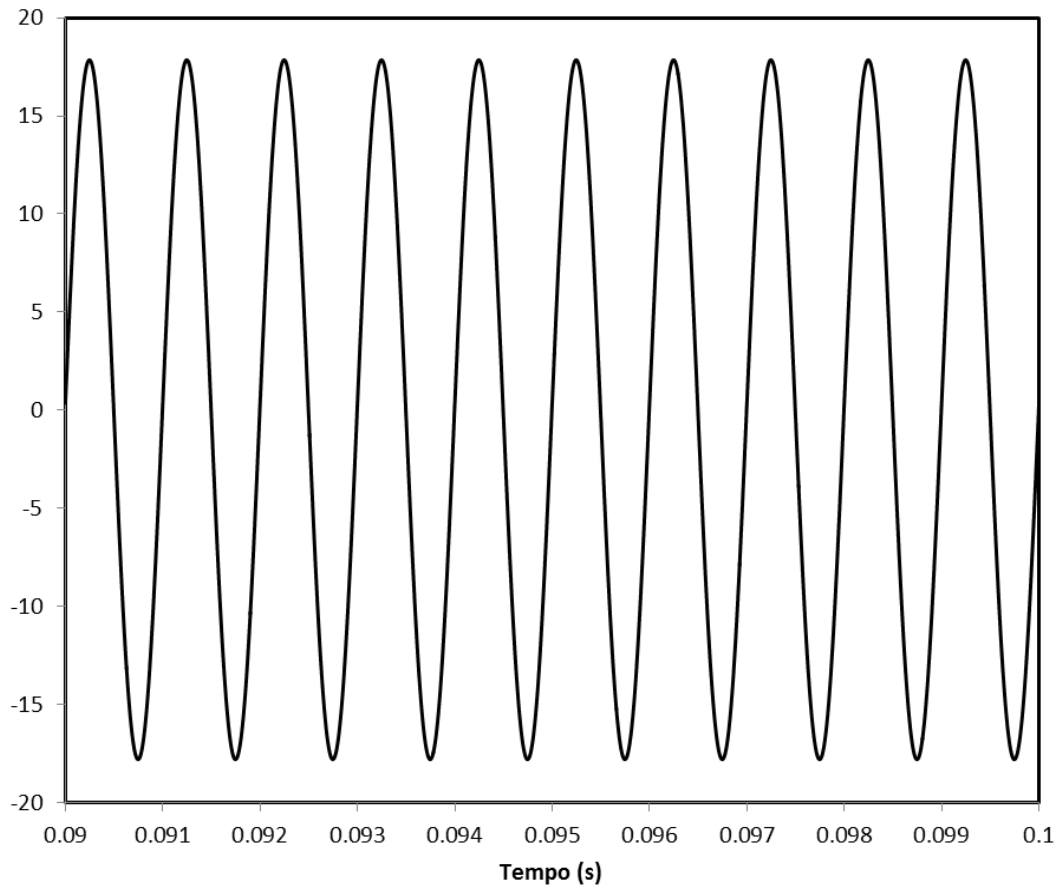


Figura 4: Gráfico da tensão de saída na frequência de 1kHz e amplitude de 18V.