

Tópicos de Eletrônica

Método de projeto de amplificador transistorizado mono-estágio

Joarez Bastos Monteiro

1a. edição ago/89

1a. revisão jul/95

1. Introdução

O presente método visa facilitar e sistematizar o cálculo de amplificadores transistorizados, permitindo estabelecer condições que possibilitem determinar os valores dos resistores R_C , R_E , R_1 e R_2 de modo a atender às principais características especificadas, tais como: *ganho*, *excursão do sinal de saída sem distorção*, *estabilidade do ponto de operação* e *consumo*. Consideram-se conhecidas a fonte (V_{CC}) e a carga (R_L).

2. Método de projeto

2.1. Topologia do circuito e retas de carga AC e DC

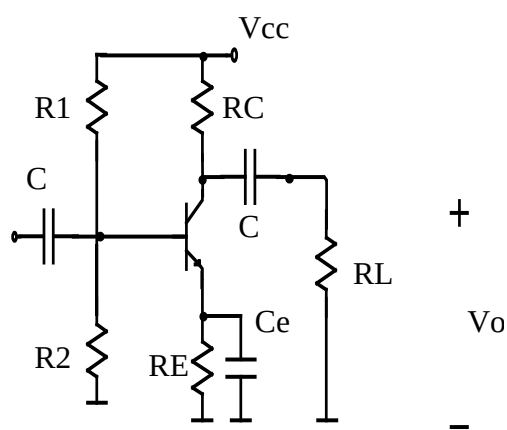


fig.1

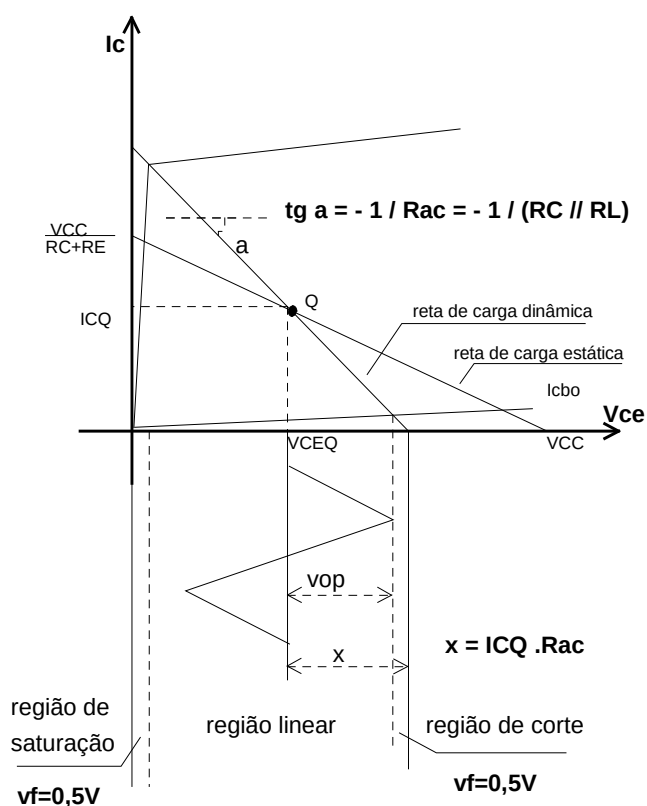


fig.2

2.2. Restrições de projeto

Deseja-se projetar um estágio transistorizado com a topologia mostrada na fig.1, de modo a atender às seguintes especificações:

- Amplitude do sinal de saída $\rightarrow v_{op}$
- Ganho de tensão $\rightarrow |A_v| \geq K$
- Variação percentual de IC_Q devido a V_{BE} $\rightarrow p_1 \%$
- Variação percentual de IC_Q devido a I_{CBO} $\rightarrow p_2 \%$
- Variação percentual de IC_Q devido a h_{fe} $\rightarrow p_3 \%$

As equações (1) a (4), abaixo, estabelecem as condições que devem ser observadas para que as especificações estáticas e dinâmicas do circuito sejam simultaneamente atendidas.

As inequações (1) e (2) são escritas a partir da simples observação da fig.2; a expressão (3) é a que exprime o ganho do amplificador e, finalmente, em (4) é estabelecida a equação da malha de coletor para atender à polarização.

Excursão de sinal:

$$V_{CEQ} \geq v_{op} + v_f \Rightarrow V_{CEQmin} \quad (1)$$

$$I_{CQ} \cdot R_{ac} \geq v_{op} + v_f, \text{ onde } R_{ac} = R_C // R_L \quad (2)$$

Ganho:

$$|A_v| = \frac{h_{fe} \cdot R_{ac}}{h_{ie}} \geq K \quad (3)$$

Polarização:

$$I_{CQ} \cdot R_c + V_{CEQ} + V_{RE} = V_{cc} \quad (4)$$

Ao se projetar o circuito é desejável que o ponto quiescente (Q) fique estável, ou seja, a corrente de coletor (I_{CQ}) não deve mudar mais que um determinado percentual (p_1), devido às variações de V_{BE} com a temperatura.

Os demais fatores que influenciam na estabilidade do ponto Q serão considerados no cálculo dos resistores de polarização de base.

Assim V_{REmin} pode ser determinado a partir da variação percentual máxima de I_{CQ} em relação a V_{BE} :

$$\left. \frac{\Delta I_{CQ}}{I_{CQ}} \right|_{V_{BE}} = - \frac{\Delta V_{BE}}{V_{RE}} \leq p_1 \Rightarrow V_{REmin} = - \frac{\Delta V_{BE}}{p_1} \quad (5)$$

Substituindo (1) e (5) em (4), vem:

$$I_{CQ} \cdot R_C + V_{CEQmin} + V_{REmin} \leq V_{cc}$$

$$I_{CQ} \leq (V_{cc} - V_{CEQmin} - V_{REmin}) \cdot \frac{1}{R_C} \quad \text{mas,} \quad \frac{1}{R_C} = G_C$$

$$I_{CQ} \leq (V_{cc} - V_{CEQmin} - V_{REmin}) \cdot G_C \quad (6)$$

De (2), podemos escrever:

$$I_{CQ} \geq (v_{op} + v_f) \cdot \frac{1}{R_{ac}}$$

$$I_{CQ} \geq (v_{op} + v_f) \cdot \left(\frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_L} \right) \quad \text{mas,} \quad \frac{1}{R_C} = G_C \text{ e } \frac{1}{R_L} = G_L$$

$$I_{CQ} \geq (v_{op} + v_f) \cdot G_C + (v_{op} + v_f) \cdot G_L \quad (7)$$

De (3), vem:

$$|A_v| = \frac{h_{fe} \cdot R_{ac}}{h_{ie}} \cong \frac{h_{fe} \cdot R_{ac}}{h_{fe} \cdot \frac{25\text{mV}}{I_{CQ}}} = \frac{I_{CQ} \cdot R_{ac}}{25\text{mV}} \geq K$$

Para I_{CQ} em mA e R_{ac} em K W, vem:

$$40 \cdot I_{CQ} \cdot R_{ac} \geq K \quad \Rightarrow \quad I_{CQ} \geq \frac{K}{40} \cdot \frac{1}{R_{ac}}$$

$$I_{CQ} \geq \frac{K}{40} \cdot G_C + \frac{K}{40} \cdot G_L \quad (8)$$

Observe que as inequações (6), (7) e (8), repetidas abaixo para melhor visualização e, a inequação (9), representam todas as restrições do projeto e estabelecem a região de validade para as variáveis I_{CQ} e G_C ($\Rightarrow R_C$).

$$I_{CQ} \leq (V_{cc} - V_{CEQmin} - V_{REmin}) \cdot G_C \quad (6)$$

$$I_{CQ} \geq (v_{op} + v_f) \cdot G_C + (v_{op} + v_f) \cdot G_L \quad (7)$$

$$I_{CQ} \geq \frac{K}{40} \cdot G_C + \frac{K}{40} \cdot G_L \quad (8)$$

$$I_{CQ} \leq I_{Cmax} \quad (\text{consumo}) \quad (9)$$

A inequação (6), se atendida, garante a validade da polarização e a excursão do sinal sem que ocorra saturação; a inequação (7) garante que não ocorrerá corte; a inequação (8) estabelece que o ganho mínimo desejado será atendido e, finalmente, a inequação (9) limita o consumo.

A solução deste sistema de inequações determina a região de escolha de I_{CQ} e R_C , onde todas as restrições serão atendidas simultaneamente.

2.3. Interpretação gráfica do método

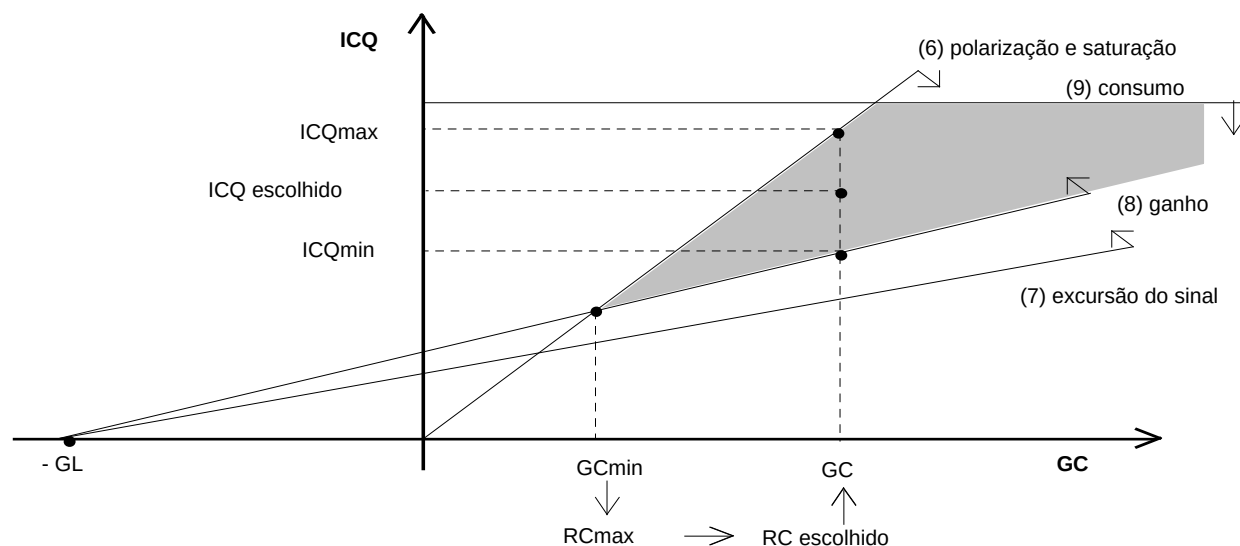


fig.3

Embora a solução gráfica do problema seja extremamente simples e útil para a compreensão do método de projeto, conforme se observa na fig.3, normalmente estamos interessados numa solução analítica de forma que se possa dispensar o uso de gráficos em escala.

2.4. Solução analítica

Observe que a região de validade tem o seu limite superior determinado pelas inequações (6) e (9) e o inferior, limitado pela inequação (7) ou (8). Por inspeção das inequações, pode-se identificar qual das duas será mais restritiva.

Para se obter a solução analítica, calcula-se a interseção das equações (6) e (7) ou (6) e (8), determinando-se o valor de GC_{min} ($\Rightarrow RC_{max}$). Escolhe-se para RC um valor comercial menor que RC_{max} .

A substituição de RC ($\Rightarrow GC$) nas equações utilizadas determinará os limites máximo e mínimo para a escolha de ICQ . Observe que a melhor escolha de ICQ será no centro desta faixa, pois permitirá a maior variação de ICQ sem sair da região de operação desejada.

A faixa de escolha de ICQ deve ter o valor máximo pelo menos 50% maior que o valor mínimo, de modo a permitir um erro de $\pm 5\%$ no ajuste do ICQ escolhido e pelo menos $\pm 15\%$ de variação devido à V_{BE} , I_{cbo} e h_{fe} ($p1+p2+p3$).

Uma vez escolhido ICQ e RC , define-se RE da seguinte forma:

$$RE \geq \frac{V_{REmin}}{ICQ} \Rightarrow \text{Escolher valor comercial para } RE$$

Assim V_{CEQ} fica definido pela equação (4), como:

$$V_{CEQ} = V_{cc} - ICQ \times (RC + RE)$$

Com a malha de coletor definida, deve-se determinar $RB = R1 // R2$ de modo a permitir a estabilidade do ponto Q em relação às variações de I_{cbo} e h_{fe} . Para isto, deve-se adotar o seguinte procedimento:

- **Determinação de RB_{max} para atender às variações de h_{fe}**

Como se sabe, a variação percentual de ICQ devido a h_{fe} obedece à seguinte expressão, onde $p3$ é o percentual máximo desejado:

$$\left. \frac{\Delta ICQ}{ICQ} \right|_{h_{fe}} = \frac{S_{I_{cbo}}}{1 + h_{fe_{max}}} \cdot \frac{\Delta h_{fe}}{h_{fe_{tip}}} \leq p3, \quad \text{onde} \quad S_{I_{cbo}} \cong 1 + \frac{RB}{RE}$$

Como são conhecidos $h_{fe_{tip}}$ e $h_{fe_{max}}$, RE e $p3$, então pode-se definir $RB_{max} \Big|_{h_{fe}}$ que é o valor máximo de RB que garante a estabilidade de ICQ com as variações de h_{fe} .

- **Determinação de RBmax para atender às variações de Icbo**

A variação percentual de ICQ devido a Icbo obedece à seguinte expressão, onde p2 é o percentual máximo desejado:

$$\left. \frac{\Delta ICQ}{ICQ} \right|_{Icbo} = \frac{RB + RE}{VRE} \cdot \Delta Icbo \leq p2$$

Como todos os elementos da expressão são conhecidos, pode-se determinar $RB_{max}|_{Icbo}$ que é o valor máximo de RB que garante a estabilidade de ICQ com as variações de Icbo.

- **Escolha de RB e cálculo de R1 e R2**

Calcula-se R1 e R2 por qualquer processo conhecido, tomando-se o cuidado de verificar se o RB encontrado é menor que $RB_{max}|_{hfe}$ e $RB_{max}|_{Icbo}$.