

Análise de Amplificadores Transistorizados e Estabilidade Térmica de Operação

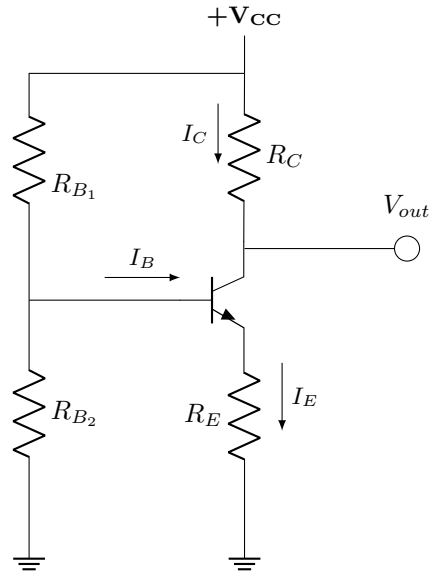
João Pedro Rey

July 2025

1 Introdução

A temperatura de operação de um Transistor Bipolar de Junção é um fator determinante no projeto de amplificadores transistorizados. O aumento na temperatura de operação do dispositivo pode mover o ponto quiescente ao longo da reta de carga. É necessário assegurar que as variações de temperatura não comprometam a operação na região ativa do transistor.

2 Polarização CC por divisor de tensão



Considere a configuração de polarização por divisor de tensão do transistor ilustrada acima. A polarização do BJT é responsável por garantir que os valores de corrente de base, corrente de coletor e tensão coletor-emissor coloquem o

transistor em sua região ativa de operação, na qual ele se comporta como um amplificador de tensão e corrente.

Neste tipo de polarização do BJT o circuito Thévenin visto pelo terminal de base é dado por:

$$R_{th} = \frac{R_{B1}R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

e

$$V_{th} = V_{CC} \times \frac{R_{B2}}{R_{B2} + R_{B1}}$$

Portanto, a corrente de base é dada por:

$$I_B = \frac{V_{th} - V_{be}}{R_{th} + (\beta + 1)R_E}$$

Onde β é o ganho CC do transistor e V_{be} é a queda de tensão típica de 0.7V do diodo da junção Base-Emissor.

Dada a corrente de base, podemos calcular a corrente de coletor I_C e a corrente de emissor I_E por meio das seguintes relações:

$$I_C = \beta I_B$$

e

$$I_E = (\beta + 1)I_B$$

Com os valores de I_C e I_E , calculamos as tensões V_C e V_E como segue:

$$V_C = V_{CC} - R_C I_C$$

e

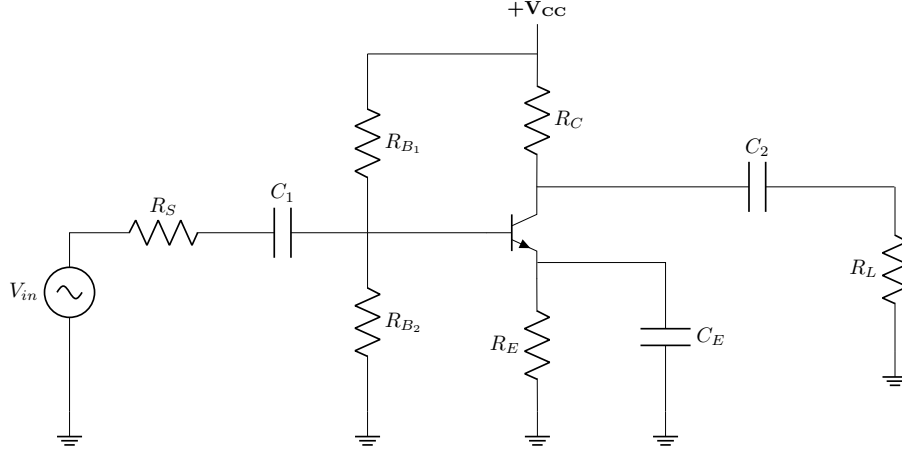
$$V_E = R_E I_E$$

Portanto, a tensão coletor-emissor que leva ao ponto quiescente de operação será:

$$V_{CEQ} = V_C - V_E$$

Com os dados de polarização do transistor obtidos através de uma análise por reta de carga, podemos determinar os valores dos resistores de polarização que levam o BJT a operar em sua região ativa, garantindo uma boa excursão do sinal de entrada.

3 Análise CA e modelo r_e de pequenos sinais do transistor



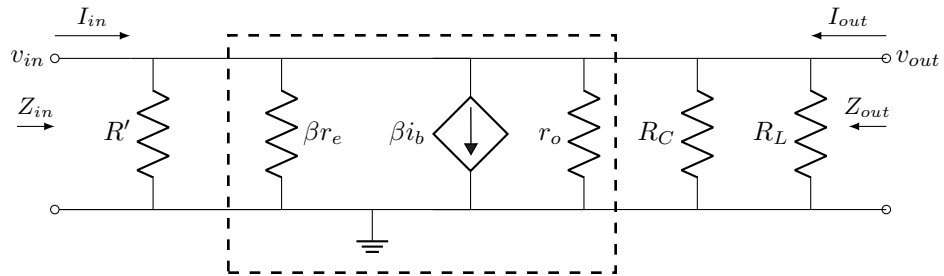
A topologia ilustrada acima é referente a um amplificador transistorizado emissor-comum, este nome é dado pois o terminal de emissor do BJT é comum tanto ao terminal de base quanto ao terminal de coletor.

Os capacitores C_1 e C_2 são capacitores de desacoplamento e têm como função isolar o offset do sinal de entrada, permitindo que apenas a componente AC do sinal seja amplificada.

O capacitor C_E é denominado de capacitor de by-pass. Para altas frequências, o capacitor de by-pass comporta-se como um curto para CA, auxiliando na estabilidade do ganho de tensão do amplificador.

O resistor R_S representa a impedância do sinal de entrada. E o resistor R_L representa a impedância de carga do amplificador.

Utilizando o modelo r_e de pequenos sinais do BJT, o amplificador emissor-comum pode ser modelado através de uma resistência r_e e uma fonte de corrente controlada por corrente da seguinte forma:



A resistência r_e representa o valor da resistência de corpo do diodo da junção base-emissor, sendo interpretada como a resistência de base do modelo de pequenos sinais. O valor de r_e é dado por:

$$r_e = \frac{V_T}{I_E}$$

Onde V_T é a tensão térmica. A tensão térmica é dependente da temperatura de operação do transistor multiplicada por uma constante, apresentando um valor típico de 25.85mV a uma temperatura de 25°C. A tensão térmica V_T é dada por:

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

Para a análise CA do transistor surge o parâmetro r_o que representa resistência de saída para pequenos sinais, sendo expressa por:

$$r_o = \frac{V_A - V_{CEQ}}{I_{CQ}}$$

A tensão Early V_A é o parâmetro que representa a variação da corrente de coletor a partir da variação da tensão de coletor-emissor. O efeito Early surge a partir da modulação da largura da região da base com o aumento da tensão V_{CE} .

A impedância de entrada Z_{in} é dada por:

$$Z_{in} = R' // \beta r_e$$

A impedância de saída Z_{out} é dada por:

$$Z_{out} = RC // r_o // R_L$$

E o ganho de tensão com carga do amplificador é dado por:

$$A_{V_L} = -\frac{RC // R_L}{r_e}$$

O sinal negativo indica o deslocamento de fase de 180° do sinal de saída com relação ao sinal de entrada típico da configuração de um amplificador em emissor-comum.

4 Análise da estabilidade térmica do transistor

A corrente de coletor de um transistor pode ser expressa por:

$$I_c = I_s \times e^{\frac{V_{be}}{V_T}}$$

Onde I_s é a corrente de saturação reversa da junção base-emissor quando a mesma está reversamente polarizada. Note que a corrente de coletor varia conforme a variação da tensão térmica, de maneira que variações de temperatura podem acarretar em variações no valores de operação do amplificador.

Tratando-se da análise de pequenos sinais do BJT, a variação de temperatura implica na variação do ganho de transcondutância g_m , sendo expresso por:

$$g_m = \frac{I_C}{V_T}$$

ou

$$g_m = \frac{1}{r_e}$$

De mesma forma, o valor de tensão V_{be} apresenta uma taxa de redução de 2mV/°C.

Nota-se que uma variação de temperatura implica em variações dos parâmetros intrínsecos do transistor.

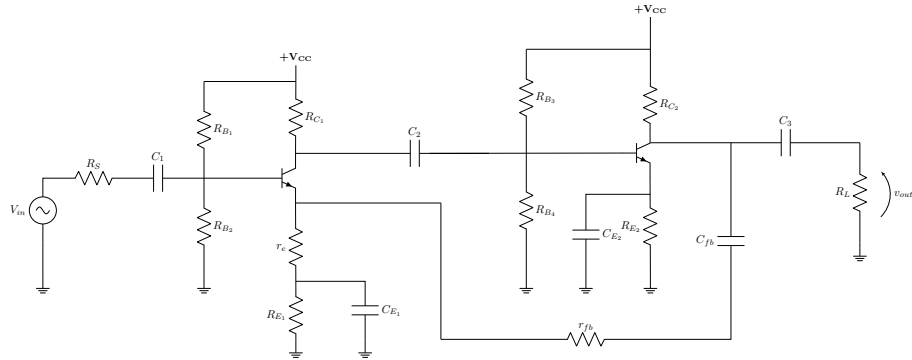
É natural avaliar por meio das equações apresentadas que um aumento de temperatura causa uma redução da tensão entre coletor e emissor dado que a corrente de coletor se eleva.

Da análise do ponto de vista CC do transistor, nota-se que o ganho β_{cc} do transistor também varia conforme a variação de temperatura, visto que as correntes de coletor e base variam conforme a elevação térmica de operação do dispositivo.

A partir da discussão anterior, torna-se importante avaliar os impactos das variações de temperatura durante a operação do transistor bem como analisar formas de mitigá-los.

5 Estabilidade térmica para a configuração realimentada de amplificadores em cascata

Considere a topologia de amplificador ilustrada abaixo, nela temos dois amplificadores configurados como emissor-comum conectados em cascata. Os capacitores presentes no circuito têm como propósito o desacoplamento do offset do sinal entre estágios. Nesta configuração, a impedância de entrada do estágio seguinte se comporta como uma impedância de carga para o estágio anterior. R_s representa a impedância do sinal de entrada e R_L representa a impedância de carga do amplificador.



Uma maneira de assegurar que a configuração do amplificador BJT mantenha boa estabilidade térmica durante a operação, é realizar a realimentação negativa parcial do sinal de tensão da saída para o emissor do primeiro estágio através de um resistor de feedback.

A partir desta configuração a própria realimentação do circuito corrige os níveis de tensão de forma que mesmo com um aumento de temperatura o transistor mantenha sua operação em uma região estável.

Supondo um aumento na temperatura, a tendência é que a tensão de saída seja maior pois a queda de tensão V_{CE} do segundo estágio tende a diminuir, no entanto, como a tensão de saída é realimentada para o emissor do primeiro estágio via r_{fb} , a tensão no mesmo aumenta. O aumento da tensão no emissor do primeiro estágio causa uma redução em V_{be1} e em V_{C1} , o que indica que a corrente de coletor do primeiro estágio e por consequência a corrente de base do segundo estágio sofrem uma redução. Com a redução da corrente de base do segundo estágio, a corrente de coletor do segundo estágio também será reduzida de forma que a tensão de saída apresente uma tendência de se estabilizar.

Portanto, a realimentação entre estágios possibilita que qualquer variação da tensão de saída devido ao aumento de temperatura seja realimentada para o primeiro estágio. A variação amplificada tende a se opor à variação original e manter a estabilidade térmica do circuito frente às variações de temperatura.

6 Ganho de tensão para a topologia com realimentação parcial

O ganho de tensão para esta configuração de amplificadores em cascata com malha de realimentação é dado por:

$$A_V = \frac{r_e}{r_{fb}} + 1$$

A resistência r_e corresponde à resistência dinâmica de pequenos sinais do transistor, sendo portanto o inverso da transcondutância g_m . Considerando o valor de r_e sendo fixo, o ganho do amplificador pode ser alterado a partir da resistência de feedback com o uso de um potenciômetro, por exemplo.

Esta configuração para amplificadores em cascata apresenta alta estabilidade térmica, sendo um recurso muito útil no desenvolvimento e análise de projetos envolvendo amplificadores transistorizados