

TRABALHO COMPUTACIONAL 2

TRANSISTOR TBJ OPERANDO COMO AMPLIFICADOR

Marcos Vinícius da Silva

1. INTRODUÇÃO

O transistor bipolar de junção (TBJ) é um dispositivo semicondutor de três terminais (base, coletor e emissor) que revolucionou a eletrônica moderna. Seu princípio de funcionamento baseia-se na capacidade de um terminal, a base, controlar o fluxo de corrente entre os outros dois terminais, o coletor e o emissor. Uma corrente de pequena magnitude injetada na base permite o fluxo de uma corrente de magnitude muito superior entre o coletor e o emissor.

Devido a essa característica de controle, o TBJ pode operar em três regiões distintas (corte, saturação ou ativa), o que lhe confere duas aplicações fundamentais: atuar como uma chave eletrônica (chaveamento) ou como um dispositivo amplificador.

Este trabalho foca na análise da segunda aplicação: a amplificação de sinais, através de um amplificador de pequenos sinais na configuração emissor-comum (EC). Esta topologia é a mais difundida em projetos eletrônicos, pois é a única configuração de TBJ capaz de prover ganhos significativos tanto de tensão quanto de corrente. Para assegurar que o transistor opere corretamente na região ativa, o circuito emprega a configuração de polarização por divisor de tensão. Este método de polarização CC é amplamente preferido por garantir que o ponto de operação quiescente (Ponto Q) do transistor permaneça estável, mesmo diante de variações na temperatura ou no ganho β do componente.

O objetivo deste relatório é validar o comportamento do amplificador proposto através de uma metodologia mista. Primeiramente, será realizada a análise teórica, determinando o Ponto Q e calculando o ganho de tensão (A_v) através do modelo de pequenos sinais π -híbrido. Em seguida, será realizada uma simulação computacional utilizando o software LTspice para verificar experimentalmente os parâmetros do circuito. Finalmente, os resultados teóricos e simulados serão comparados para atestar a validade dos modelos teóricos e a correta implementação do projeto.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Analisar o desempenho de um amplificador de pequenos sinais na configuração emissor-comum (EC), validando os modelos teóricos de análise através de simulação computacional.

2.2. Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, os seguintes passos serão executados:

- Realizar a análise teórica do circuito:
 - Calcular o ponto de operação quiescente (Ponto Q) do transistor através da análise CC;
 - Determinar os parâmetros do modelo de pequenos sinais \$pi\$-híbrido (g_m , r_{π} , r_o);
 - Calcular o ganho de tensão global (A_v) do amplificador através da análise CA.
- Implementar e simular o circuito utilizando o software LTspice:
 - Obter as formas de onda de entrada (V_i) e saída (V_o);
 - Medir os valores de tensão pico-a-pico ($V_{i(p-p)}$ e $V_{o(p-p)}$) e calcular o ganho simulado;
 - Analisar o efeito dos componentes de emissor (R_E e C_E).
- Comparar e analisar os resultados, confrontando os valores teóricos calculados com os valores obtidos na simulação.

3. METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos, este trabalho foi dividido em duas etapas: uma análise teórica e uma simulação computacional.

3.1. Análise teórica

A análise teórica do amplificador foi realizada seguindo o princípio da superposição, separando a análise de polarização CC da análise de sinal CA. Foram considerados um sinal de entrada senoidal de amplitude $V_i = 50 \text{ mV}$ (pico a pico), frequência $f = 10 \text{ kHz}$ e o circuito abaixo:

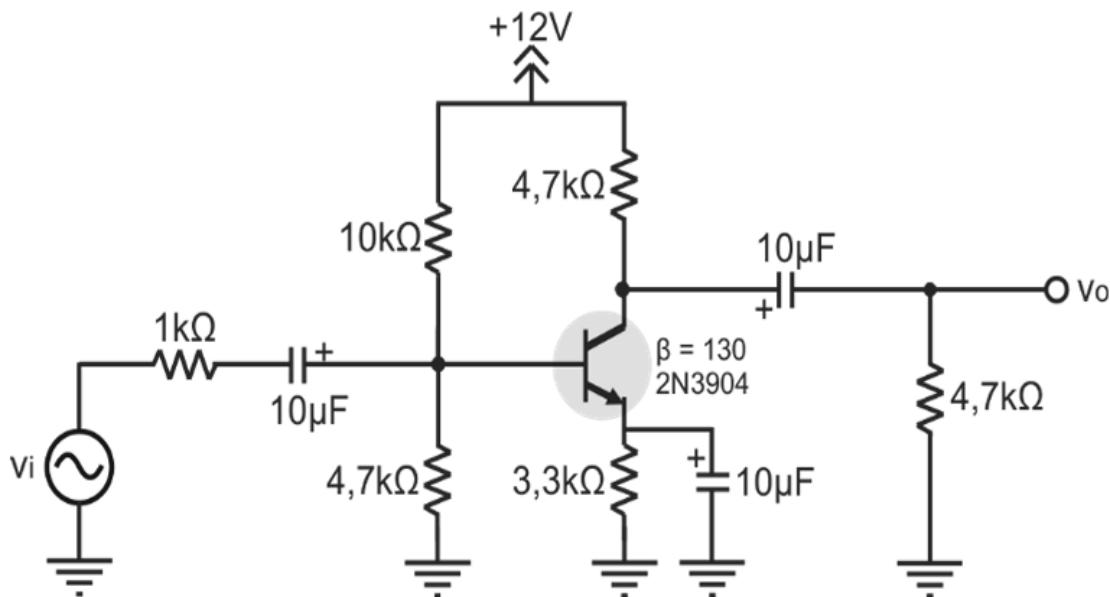


Figura 1: Amplificador com TBJ em emissor-comum.

Para a Análise CC (ponto Q) os capacitores do circuito (C_1, C_2, C_E) foram modelados como circuitos abertos, isolando os estágios de polarização. O circuito de polarização por divisor de tensão na base (R_1, R_2) foi simplificado utilizando o Teorema de Thévenin, para encontrar a tensão (V_{BB}) e a resistência (R_{BB}) equivalentes. A Lei das Tensões de Kirchhoff (LTK) foi aplicada à malha base-emissor para determinar a corrente quiescente de base (I_B). As correntes I_C e I_E , e as tensões V_C e V_E , foram então calculadas para definir o ponto de operação quiescente (Ponto Q) do transistor.

Para a Análise CA (ganho de tensão) as fontes de tensão CC (V_{CC}) foram aterradas e os capacitores (C_1, C_2, C_E) foram modelados como curtos-circuitos. Foi utilizado o modelo de pequenos sinais π -híbrido para representar o transistor em CA. Os parâmetros do modelo (g_m, r_π, r_o) foram calculados com base nos valores do Ponto Q (especificamente I_C e V_A). O ganho de tensão global (A_v) foi calculado em duas partes: a atenuação na entrada (devido a R_S) e o ganho do estágio amplificador ($-g_m * R_{C,\text{total}}$).

3.2. Simulação

O circuito da figura 1 foi implementado no LTspice, com os mesmos componentes e valores especificados. Foi usado o transistor TBJ 2N3904, porém foi criada uma diretiva SPICE (.model) para definir um modelo customizado do 2N3904 (nomeado 2N3904a) com o parâmetro β_f ajustado para 130.

Foi realizada então uma análise transitória (.tran) com duração de 500 μ s para visualizar 5 ciclos do sinal de entrada de 10kHz. Para obter resultados precisos, foram utilizadas diretivas de medição (.meas) para calcular automaticamente os valores de tensão pico-a-pico (PP) de V(vi) e V(vo), cujos dados foram lidos no “SPICE Output Log”.

4. RESULTADOS

Foram obtidos os seguintes resultados após a realização da análise teórica e da simulação computacional:

4.1. Resultados teóricos

4.1.1. Ponto de polarização CC (ponto Q)

A análise do circuito em corrente contínua (CC) resultou nos seguintes valores de polarização (ponto Q):

- Corrente de base: $I_B \approx 7,20\mu A$
- Corrente de coletor: $I_C \approx 0,936mA$
- Corrente de emissor: $I_E \approx 0,944mA$
- Tensão de emissor: $V_E \approx 3,115V$
- Tensão de coletor: $V_C \approx 7,601V$
- Tensão coletor-emissor: $V_{CE} = V_C - V_E \approx 4,486V$

Como $V_{CE} > 0$, o transistor opera corretamente na região ativa.

4.1.2. Parâmetros do modelo π -híbrido

Com base na corrente de coletor (I_C) e assumindo $V_T = 26mV$ e $V_A = 100V$, os parâmetros de pequenos sinais são:

- Transcondutância: $g_m \approx 36mA/V$
- Resistência de entrada π : $r_\pi \approx 3,61\Omega$
- Resistência de saída r_o : $r_o \approx 106,8\Omega$

4.1.3. Ganho de tensão teórico

Considerando a atenuação de entrada (R_s e R_{in}) e a carga CA total no coletor ($R_C \parallel R_L \parallel r_o$), o ganho de tensão global teórico (A_v) é $\approx -52.06V/V$.

4.2. Resultados da simulação

4.2.1. Formas de onda

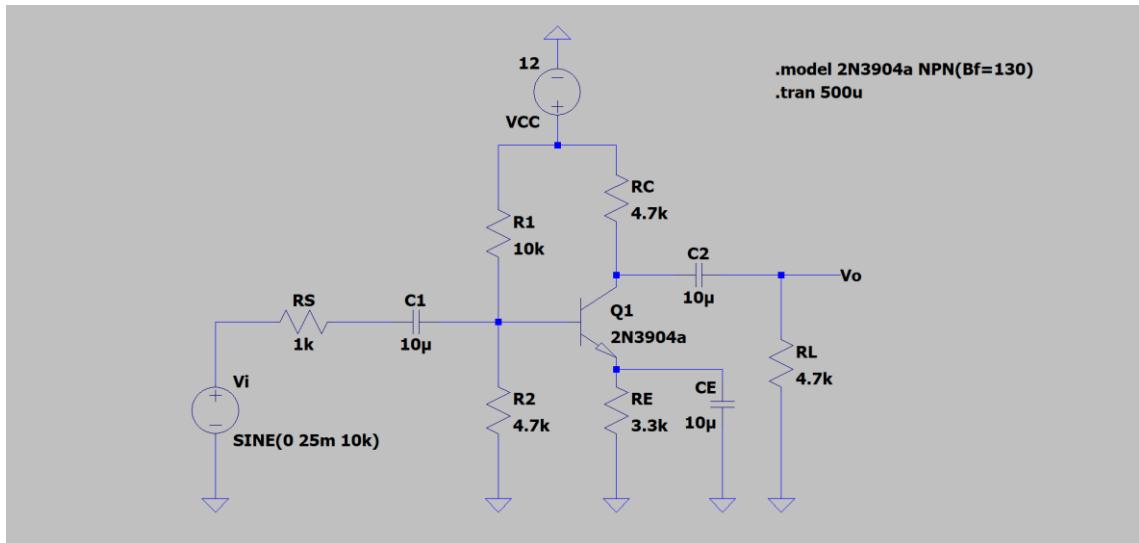


Figura 2: Esquemático da simulação

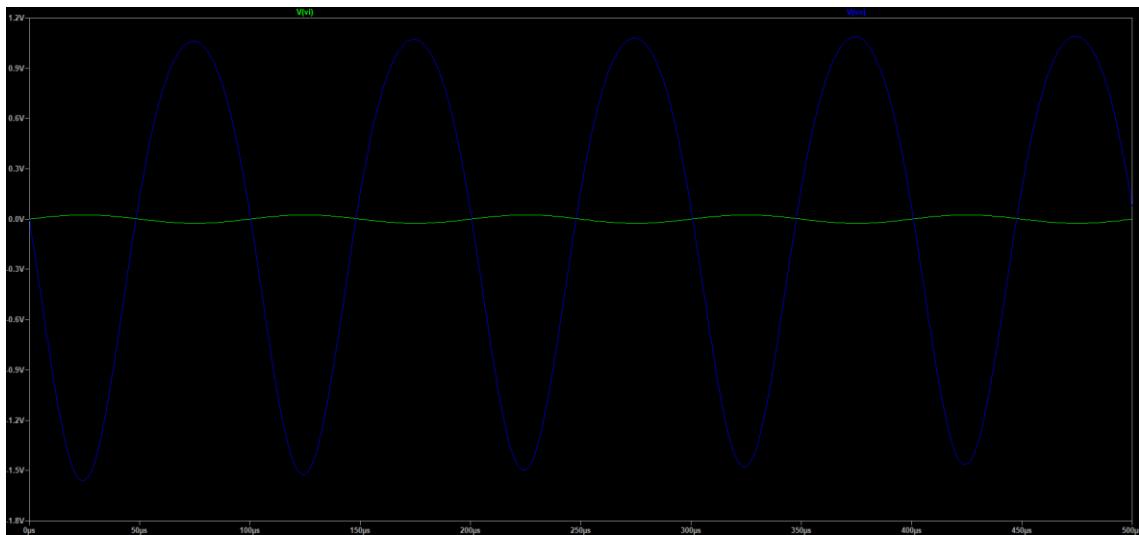


Figura 3: Formas de onda de entrada e saída

A análise visual do gráfico da figura 3 confirma duas características: o sinal de saída $V(v_o)$ (azul) possui uma amplitude muito maior que o sinal de entrada $V(v_i)$ (verde) e o sinal de saída está em oposição de fase (180°) em relação à entrada, conforme esperado do amplificador emissor-comum.

4.2.2. Medições de tensão e ganho

Utilizando a diretiva .meas no LTspice, os valores precisos de pico-a-pico (PP) foram extraídos do log da simulação:

- Tensão de entrada: $V_{i(p-p)} = 0,049967645336V \approx 49,97mV$
- Tensão de saída: $V_{o(p-p)} = 2,65124972989 \approx 2,651V$

Com base nesses valores, o ganho de tensão simulado é:

$$A_v = \frac{V_{o(p-p)}}{V_{i(p-p)}} \approx \frac{2,651}{0,04997} \approx 53,05V/V$$

O ganho é, portanto, $\approx -53,05V/V$, onde o sinal negativo é atribuído pela inversão de fase observada no gráfico.

4.2.3. Efeito dos componentes de emissor

A análise do circuito e sua função permite determinar o papel dos componentes R_E e C_E :

- Efeito de R_E : o resistor de emissor é o principal responsável pela estabilidade da polarização CC do circuito, tornando o ponto Q menos suscetível a variações de β e temperatura.
- Efeito de C_E : o capacitor de emissor atua como um capacitor de desvio. Ele cria um "curto-circuito" para o sinal CA no emissor, eliminando a realimentação negativa de R_E e permitindo que o amplificador atinja seu ganho de tensão máximo.

5. CONCLUSÃO

Comparando os cálculos teóricos e a simulação é possível ver que os resultados obtidos em ambas as metodologias convergiram, confirmando a precisão dos modelos de análise. O ponto central da análise, o ganho de tensão (A_v), apresentou alta correlação entre as duas abordagens, sendo o resultado teórico de $-52,06\text{V/V}$ e o resultado simulado de $-53,05\text{V/V}$, uma diferença de apenas, aproximadamente, 1,87%. Esta pequena discrepância é esperada e é atribuída às aproximações do cálculo teórico (como os valores fixos de V_T e V_A) em contraste com o modelo de dispositivo mais complexo e detalhado que o LTspice disponibiliza.

Além da validação numérica do ganho, a simulação também confirmou visualmente as características operacionais essenciais do amplificador EC, dando destaque à inversão de fase de 180° entre a entrada e a saída. A análise também demonstrou o papel duplo dos componentes de emissor: R_E para a estabilidade CC e C_E para o desacoplamento CA, garantindo o ganho máximo.

Em suma, os resultados da simulação fornecem uma verificação experimental robusta para os cálculos teóricos, atestando o correto funcionamento e a previsibilidade do circuito amplificador projetado.

6. REFERÊNCIAS

Boylestad. R. L. e Nashelsky, L. Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos.
11^a ed. Pearson (2013).