

# **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  $\beta$  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  $\pi$ -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 ( $g_m$ ,  $r_{\pi}$ ,  $r_o$ );
  - 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  $V_i = 50$  mV (pico a pico), frequência  $f = 10$  kHz e o circuito abaixo:

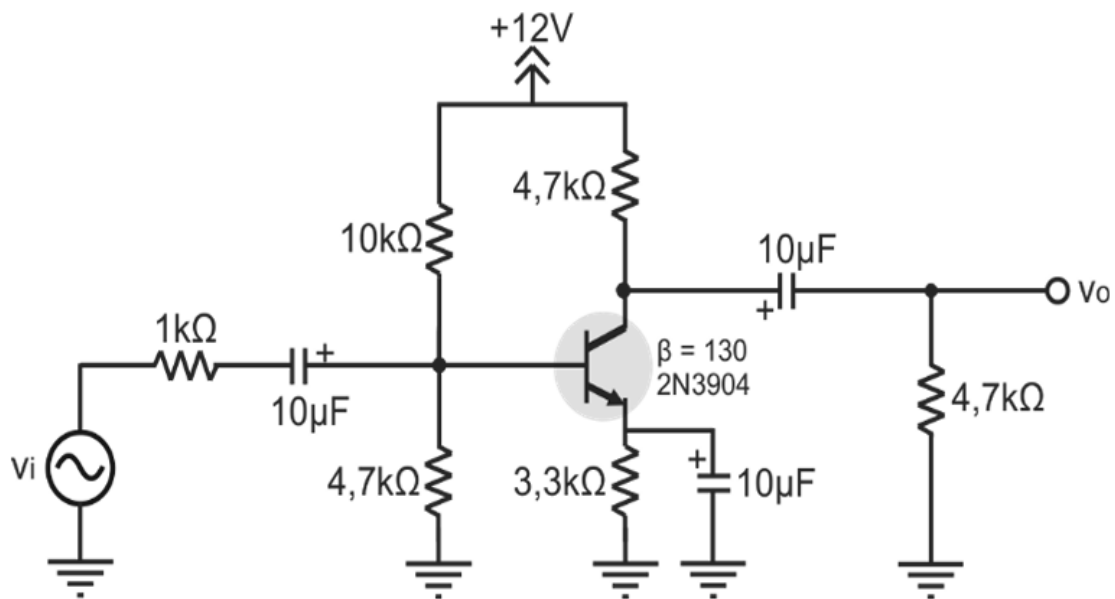


Figura 1: Amplificador com TBJ em emissor-comum.

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  $\pi$ -híbrido para representar o transistor em CA. Os parâmetros do modelo ( $g_m$ ,  $r_{\pi}$ ,  $r_o$ ) 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 ( $-g_m * R_{C,total}$ ).

#### 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  $\beta_f$  ajustado para 130.

Foi realizada então uma análise transitória (.tran) com duração de 500 $\mu$ 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  $V(v_i)$  e  $V(v_o)$ , 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:  $I_B \approx 7,20\mu\text{A}$
- Corrente de coletor:  $I_C \approx 0,936\text{mA}$
- Corrente de emissor:  $I_E \approx 0,944\text{mA}$
- Tensão de emissor:  $V_E \approx 3,115\text{V}$
- Tensão de coletor:  $V_C \approx 7,601\text{V}$
- Tensão coletor-emissor:  $V_{CE} = V_C - V_E \approx 4,486\text{V}$

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

#### 4.1.2. Parâmetros do modelo $\pi$ -híbrido

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

- Transcondutância:  $g_m \approx 36\text{mA/V}$
- Resistência de entrada  $\pi$ :  $r_{\pi} \approx 3,61\Omega$
- 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  $\approx -52.06\text{V/V}$ .

### 4.2. Resultados da simulação

#### 4.2.1. Formas de onda

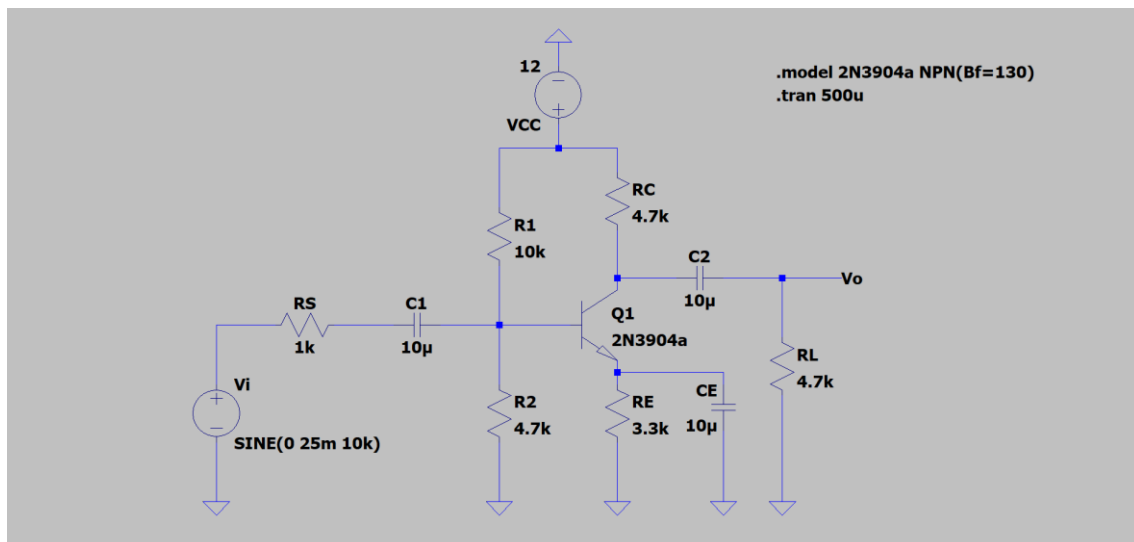


Figura 2: Esquemático da simulação

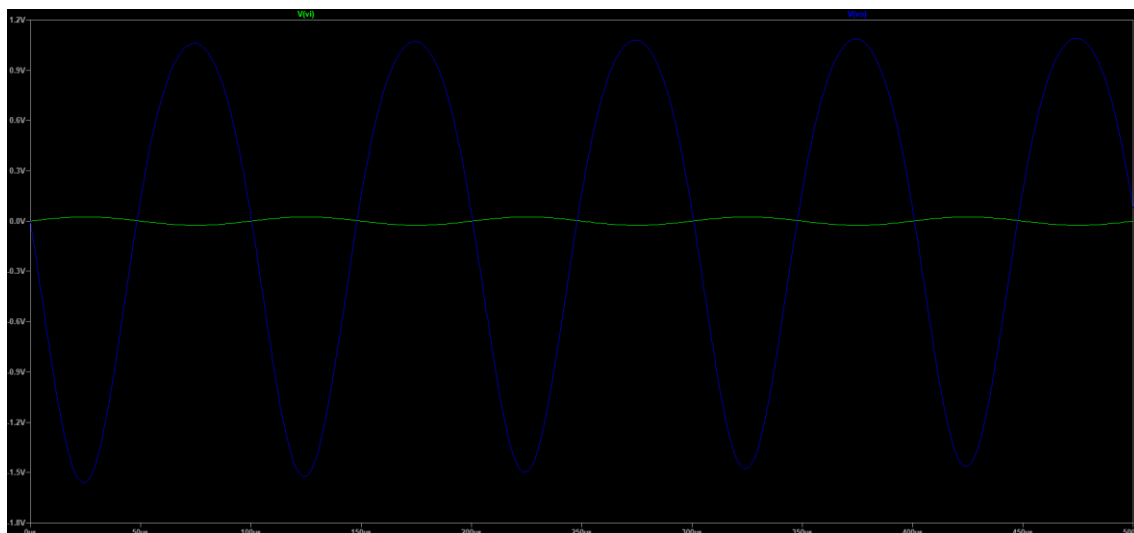


Figura 3: Formas de onda de entrada e saída

A análise visual do gráfico da figura 3 confirma duas características: o sinal de saída  $V_o$  (azul) possui uma amplitude muito maior que o sinal de entrada  $V_i$  (verde) e o sinal de saída está em oposição de fase ( $180^\circ$ ) 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  $\beta$  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  $-52,06V/V$  e o resultado simulado de  $-53,05V/V$ , 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  $180^\circ$  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<sup>a</sup> ed. Pearson (2013).