

Quarto Relatório de Lab de Eletrônica 1

Henrique da Silva
henrique.pedro@ufpe.br

6 de setembro de 2023

Sumário

1 Introdução

2 Análise preliminar

2.1	Análise simbólica grandes sinais	
2.1.1	Restrições	
2.1.2	Análise nodal do circuito	
2.1.3	Solução das tensões e correntes	
2.2	Análise simbólica pequenos sinais	
2.2.1	Análise nodal do circuito	
2.2.2	Ganho de tensão	
2.2.3	Resistência de entrada	
2.2.4	Resistência de Thevenin	
2.2.5	Tensão de Thevenin	
2.2.6	Constante de proporcionalidade	
2.3	Projeto do circuito	
2.3.1	Componentes	
2.3.2	Aproximações para valores comerciais	
2.3.3	Tensão para grandes sinais	
2.3.4	Tensão para pequenos sinais	

3 Medições em laboratório

3.1	Componentes	
3.2	Medições de grandes sinais	
3.3	Medições de pequenos sinais	
3.3.1	V_{be}	
3.3.2	V_o	
3.3.3	V_o	
3.3.4	V_L	
3.3.5	Tensões sobre potenciômetro e R_L	

4 Análise dos resultados

4.1	Cálculo do ganho β	
-----	------------------------------------	--

5 Conclusões

1 Introdução

Neste relatório, é explorado o comportamento de um transistor TBJ em um circuito amplificador emissor de base comum com fontes simétricas de tensão. Uma análise numérica do circuito será realizada e o comportamento do mesmo será observado tanto para pequenos quanto para grandes sinais. Além disso, os resultados obtidos serão comparados com os valores medidos em laboratório.

Todos arquivos utilizados para criar este relatório, e o relatório em si estão em: https://github.com/Shapis/ufpe_ee/tree/main/6thsemester/Eletronica1/

O código utilizado para a análise numérica também se encontra no anexo ao final do relatório.

2 Análise preliminar

Na análise teórica, o comportamento do circuito é considerado tanto para os grandes sinais quanto para os pequenos sinais. São utilizados modelos diferentes para cada um desses casos, conforme detalhado a seguir.

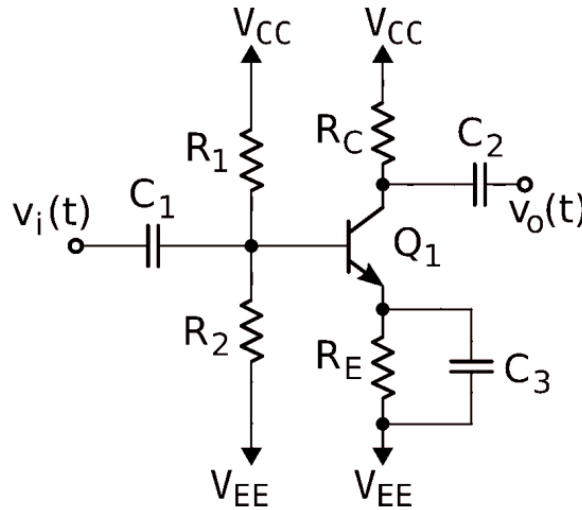


Figura 1: Circuito amplificador emissor de base comum.

2.1 Análise simbólica grandes sinais

A análise é conduzida, examinando-se as restrições de polarização do transistor e as equações de nós do circuito.

Utiliza-se o modelo 2 para analisar o TBJ quando submetido para grandes sinais.

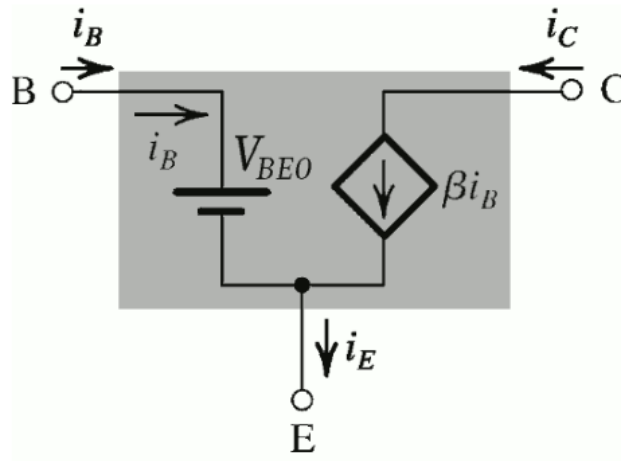


Figura 2: Modelo TBJ para grandes sinais.

Com este modelo, é possível fazer a substituição no circuito. Para grandes sinais, os capacitores do circuito se comportarão como circuito em aberto, o que permite removê-los na análise, resultando no circuito mostrado na figura 3.

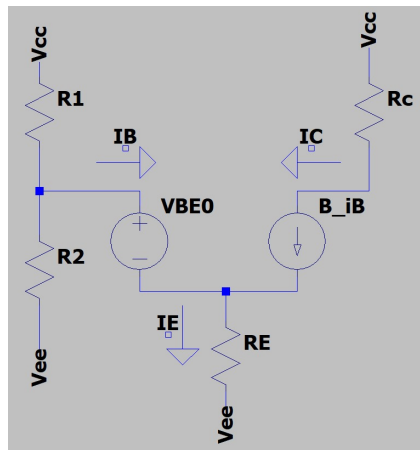


Figura 3: Circuito com substituições para grandes sinais.

2.1.1 Restrições

Para que o transistor esteja na região ativa, é necessário que sejam satisfeitas as seguintes condições.

$$\begin{cases} V_{BE} = 0.7V \\ V_{CE} > 0.2V \\ I_C = \beta I_B \\ I_E = I_C + I_B \end{cases} \quad (1)$$

2.1.2 Análise nodal do circuito

Utiliza-se a lei de Kirchhoff das correntes para derivar as equações nodais seguintes.

$$\begin{aligned} I_b + \frac{V_b - V_{ee}}{R_2} + \frac{V_b - V_{cc}}{R_1} &= 0 \\ \frac{-V_e + V_{ee}}{R_e} &= I_e \\ \frac{-V_c + V_{cc}}{R_c} &= I_c \end{aligned} \quad (2)$$

2.1.3 Solução das tensões e correntes

Utiliza-se as restricoes 1 e as equacoes do circuito 2 e resolvemos simbolicamente para V_b , V_c , V_e , I_b , I_c e I_e .

As equações foram resolvidas utilizando a biblioteca Sympy, e o código correspondente está no apêndice. As soluções das variáveis tornaram-se muito extensas para serem representadas no formato de equações. Portanto, estamos apresentando somente as figuras que ilustram os resultados de cada variável.

$$\frac{10.0 \cdot B \cdot R_1 \cdot R_e \cdot V_{ee} - 7.0 \cdot B \cdot R_1 \cdot R_e + 10.0 \cdot B \cdot R_2 \cdot R_e \cdot V_{cc} - 7.0 \cdot B \cdot R_2 \cdot R_e - 10.0 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot V_{ee} + 10.0 \cdot R_1 \cdot R_e \cdot V_{ee} - 7.0 \cdot R_1 \cdot R_e + 10.0 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot V_{cc} - 10.0 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_e - 10.0 \cdot R_1 \cdot R_2 + 10.0 \cdot R_1 \cdot R_e + 10.0 \cdot R_2 \cdot R_e}{0 \cdot R_2 \cdot R_e \cdot V_{cc} - 7.0 \cdot R_2 \cdot R_e}$$

Figura 4: Tensão no nó V_e .

$$\frac{10.0 \cdot B \cdot R_1 \cdot R_e \cdot V_{ee} + 10.0 \cdot B \cdot R_2 \cdot R_e \cdot V_{cc} - 10.0 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot V_{ee} - 7.0 \cdot R_1 \cdot R_2 + 10.0 \cdot R_1 \cdot R_e \cdot V_{ee} + 10.0 \cdot R_2 \cdot R_e \cdot V_{cc}}{10.0 \cdot B \cdot R_1 \cdot R_e + 10.0 \cdot B \cdot R_2 \cdot R_e - 10.0 \cdot R_1 \cdot R_2 + 10.0 \cdot R_1 \cdot R_e + 10.0 \cdot R_2 \cdot R_e}$$

Figura 5: Tensão no nó V_b .

$$\frac{-7.0 \cdot B \cdot R_1 \cdot R_c + 10.0 \cdot B \cdot R_1 \cdot R_e \cdot V_{cc} + 10.0 \cdot B \cdot R_2 \cdot R_c \cdot V_{cc} - 10.0 \cdot B \cdot R_2 \cdot R_c \cdot V_{ee} - 7.0 \cdot B \cdot R_2 \cdot R_c + 10.0 \cdot B \cdot R_2 \cdot R_e \cdot V_{cc} - 10.0 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot V_{cc} + 10.0 \cdot R_1 \cdot R_e \cdot V_{cc} + 10.0 \cdot R_2 \cdot R_e \cdot V_{cc}}{10.0 \cdot B \cdot R_1 \cdot R_e + 10.0 \cdot B \cdot R_2 \cdot R_e - 10.0 \cdot R_1 \cdot R_2 + 10.0 \cdot R_1 \cdot R_e + 10.0 \cdot R_2 \cdot R_e}$$

Figura 6: Tensão no nó V_c .

$$\frac{7.0 \cdot B \cdot R_1 - 10.0 \cdot B \cdot R_2 \cdot V_{cc} + 10.0 \cdot B \cdot R_2 \cdot V_{ee} + 7.0 \cdot B \cdot R_2 + 7.0 \cdot R_1 - 10.0 \cdot R_2 \cdot V_{cc} + 10.0 \cdot R_2 \cdot V_{ee} + 7.0 \cdot R_2}{10.0 \cdot B \cdot R_1 \cdot R_e + 10.0 \cdot B \cdot R_2 \cdot R_e - 10.0 \cdot R_1 \cdot R_2 + 10.0 \cdot R_1 \cdot R_e + 10.0 \cdot R_2 \cdot R_e}$$

Figura 7: Corrente I_e .

$$\frac{7.0 \cdot R_1 - 10.0 \cdot R_2 \cdot V_{cc} + 10.0 \cdot R_2 \cdot V_{ee} + 7.0 \cdot R_2}{10.0 \cdot B \cdot R_1 \cdot R_e + 10.0 \cdot B \cdot R_2 \cdot R_e - 10.0 \cdot R_1 \cdot R_2 + 10.0 \cdot R_1 \cdot R_e + 10.0 \cdot R_2 \cdot R_e}$$

Figura 8: Corrente I_b .

$$\frac{7.0 \cdot B \cdot R_1 - 10.0 \cdot B \cdot R_2 \cdot V_{cc} + 10.0 \cdot B \cdot R_2 \cdot V_{ee} + 7.0 \cdot B \cdot R_2}{10.0 \cdot B \cdot R_1 \cdot R_e + 10.0 \cdot B \cdot R_2 \cdot R_e - 10.0 \cdot R_1 \cdot R_2 + 10.0 \cdot R_1 \cdot R_e + 10.0 \cdot R_2 \cdot R_e}$$

Figura 9: Corrente I_c .

2.2 Análise simbólica pequenos sinais

Na análise de pequenos sinais, adotamos a simplificação de considerar que os capacitores se comportam como curtos-circuitos. Além disso, assumimos que todas as fontes de tensão contínua (DC) estão devidamente aterradas.

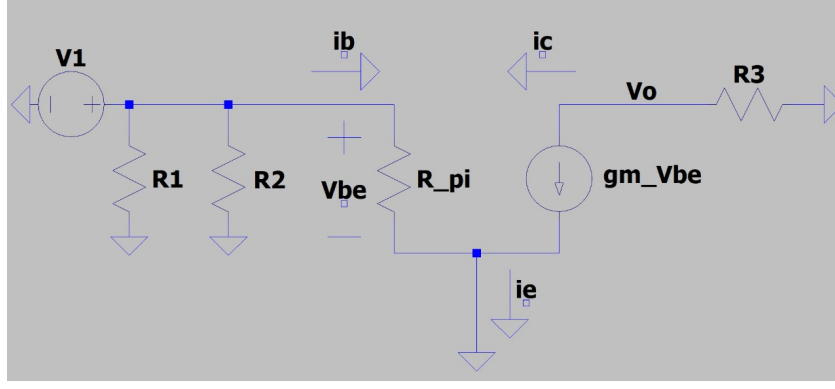


Figura 10: Circuito com substituições para pequenos sinais.

2.2.1 Análise nodal do circuito

Utiliza-se a lei de Kirchhoff das correntes para derivar as equações nodais seguintes.

$$\begin{aligned}
 -I_b + \frac{V_i}{R_{pi}} &= 0 \\
 I_c + \frac{V_o}{R_c} &= 0 \\
 I_c - V_{be}gm &= 0 \\
 -I_b - I_c + I_e &= 0 \\
 I_b R_\pi - V_{be} &= 0
 \end{aligned} \tag{3}$$

2.2.2 Ganho de tensão

Para analisar o ganho de tensão, foi realizada uma solução numérica para V_o e V_i , utilizando as equações 3. Os resultados obtidos são os seguintes:

$$A = -gmR_c \tag{4}$$

2.2.3 Resistência de entrada

Para analisar a resistência de entrada, foi realizada uma solução numérica para V_i e I_i , utilizando as equações 3. Os resultados obtidos são os seguintes:

$$R_{in} = R_\pi // R_1 // R_2 \tag{5}$$

2.2.4 Resistência de Thevenin

Ao anular as fontes de tensão independentes, a tensão através de R_π se torna zero, o que faz com que V_{be0} seja igual a zero, desativando assim a fonte de corrente dependente.

Isso leva à conclusão de que a resistência de Thévenin é igual a R_c .

2.2.5 Tensão de Thevenin

Analisa-se a tensão que está sendo aplicada sobre R_c e com isso obtemos que $V_{th} = V_o = V_c$.

2.2.6 Constante de proporcionalidade

Ao considerar $K = V_{th}/V_i$ e $V_{th} = V_o$, podemos afirmar que K é igual ao ganho de tensão que calculamos anteriormente.

$$K = A = -gmR_c \tag{6}$$

2.3 Projeto do circuito

Para projetar o circuito, é necessário atender aos requisitos especificados no projeto e utilizar números n derivados da combinação dos *CPFs* dos integrantes da equipe. No caso da equipe, todos os valores de n foram $n_1 = n_2 = n_3 = n_4 = 1$. Assumindo valores como $V_{BE0} = 0,7V$, $\beta = 350$, e $nV_r = 40mV$, ao atender aos requisitos, é possível calcular os componentes, tensões e correntes esperadas no circuito.

2.3.1 Componentes

Utilizando os requisitos especificados no projeto, procede-se ao cálculo dos componentes do circuito. Esses componentes são determinados com base nas restrições e critérios estabelecidos, garantindo que o circuito atenda aos parâmetros desejados e funcione conforme o previsto.

$$\begin{aligned} V_{cc} - \frac{V_{cc}}{4} &= (100 + 50n_1)nV_t \\ V_{cc} &= 8 \\ V_{ee} &= -8 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{(V_{cc} - V_b)10}{I_c} = 11k\Omega \\ R_2 &= \frac{-V_{cc} - V_b}{I_c} = 2.25k\Omega \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} R_c &= \frac{(V_{cc} - \frac{V_{cc}}{4})}{2(n_2 + 5)} = 500\Omega \\ R_e &= \frac{V_e + V_{cc}}{I_e} = 167\Omega \end{aligned} \tag{9}$$

2.3.2 Aproximações para valores comerciais

Neste ponto do projeto, são realizadas as seguintes aproximações para os valores dos resistores, considerando as opções disponíveis no mercado de componentes eletrônicos.

Componente	Teorico	Comercial
R_1	$11k\Omega$	$12k\Omega$
R_2	$2.25k\Omega$	$2.2k\Omega$
R_c	500Ω	470Ω
R_e	167Ω	180Ω

2.3.3 Tensão para grandes sinais

Ao empregarmos os valores comerciais disponíveis, obtem-se os seguintes dados referentes às tensões e correntes de polarização que percorrem o circuito.

$$\begin{aligned} V_b &= -5.57V \\ V_c &= 3.5V \\ V_e &= -6.27V \\ I_b &= -2.7 * 10^{-5}A \\ I_c &= 10mA \\ I_e &= 10mA \end{aligned} \tag{10}$$

Obtem-se V_{Rc} e V_{Re} utilizando a lei de Ohm sobre os resistores R_c e R_e .

$$\begin{aligned} V_{Rc} &= 4.7V \\ V_{Re} &= 1.8V \end{aligned} \tag{11}$$

Ao alinharmos os valores das resistências com os disponíveis no mercado, constatamos que as correntes de polarização sofrem variações significativas. Essas oscilações acabam por comprometer a consecução dos requisitos previamente estipulados, desencadeando desafios adicionais no contexto do projeto do circuito.

Para contornar esse desafio, é imperativo efetuar uma modificação na resistência R_2 , com o objetivo de amplificar a corrente I_e . Essa medida se faz indispensável para garantir o cumprimento dos requisitos de desempenho do circuito, pois apenas assim será possível alcançar os valores ideais de tensão e corrente de polarização necessários para o correto funcionamento do sistema.

2.3.4 Tensão para pequenos sinais

Como visto nas subseções 2.2.4 e 2.2.5, tem-se que:

$$\begin{aligned} V_{th} &= V_c = -4.5V \\ R_{th} &= R_c = 470\Omega \end{aligned} \quad (12)$$

Para determinar a constante de proporcionalidade, representada por K , empregamos a equação 6. E utiliza-se a relação:

$$gm = \frac{I_c}{nV_t} \quad (13)$$

A partir destas, podemos calcular K como sendo igual a -117.5 .

Creio que este K ficou distante do esperado -150 , pois o valor de I_c achado de $10mA$ ficou diferente do esperado de $12mA$.

Se tivesse sido usado $I_c = 12mA$, teríamos $K = -141$.

Com isto temos uma onda de saída sem carga de

$$V_o = KV_i \quad (14)$$

Para um V_i de $V_{pp} 50mV$ temos:

$$V_o = -117.5 * 50mV = -5.875V \quad (15)$$

3 Medições em laboratório

Nesta seção, são apresentados os detalhes e resultados das medições realizadas no experimento, com o objetivo de obter dados quantitativos para análise e validação dos resultados teóricos previamente obtidos.

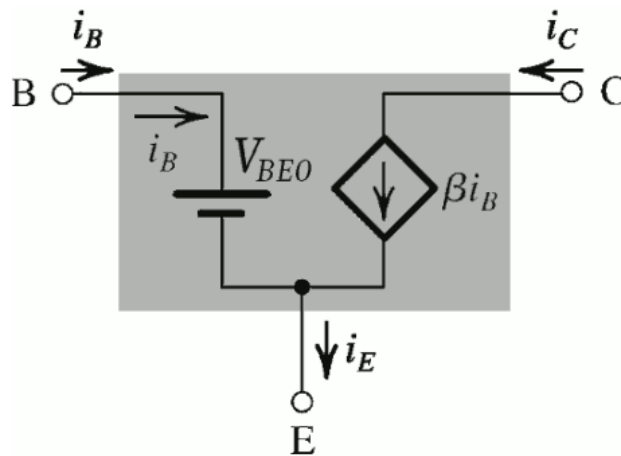


Figura 11: Circuito montado em laboratório.

3.1 Componentes

Os seguintes valores foram medidos para os componentes que foram empregados no circuito:

$$\begin{aligned}R_1 &= 11743 \\R_2 &= 2650 \\R_c &= 470 \\R_e &= 178.4 \\R_L &= 145.5 \\C_1 &= 10.245\mu F \\C_2 &= 107.25\mu F \\C_3 &= 106\mu F \\Potenciometro &= 10.3k\end{aligned}\tag{16}$$

3.2 Medições de grandes sinais

Para grandes sinais considera-se que os capacitores estão em aberto. Logo, na prática isto implica em remover os capacitores do circuito e realizar as medições. Os resultados obtidos estão apresentados a seguir:

$$\begin{aligned}V_{cc} &= 8.006V \\V_{ee} &= -8.006V \\V_b &= -5.12V \\V_e &= -5.7V \\V_c &= 2.14V \\V_{rc} &= 5.87V\end{aligned}\tag{17}$$

3.3 Medições de pequenos sinais

No contexto de pequenos sinais, é comum considerar que os capacitores atuam como componentes de baixa impedância, funcionando praticamente como curtos-circuitos. Portanto, na aplicação prática, essa premissa implica na inclusão dos capacitores no circuito para, em seguida, efetuarmos as medições necessárias. Nossa configuração envolve uma tensão de entrada, denotada por V_i , com uma amplitude de $50mV_{pp}$ e frequência de $10kHz$.

3.3.1 V_{be}

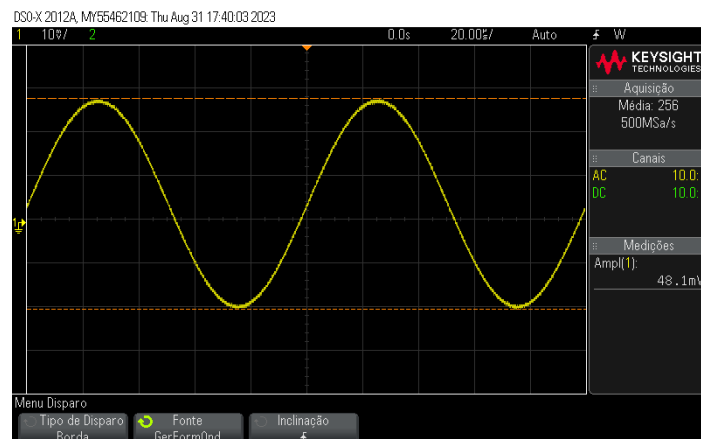


Figura 12: Tensão sobre V_{be} .

3.3.2 V_o

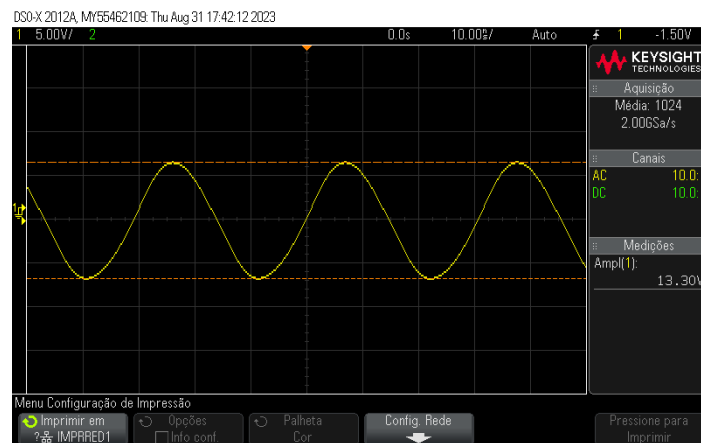


Figura 13: Tensão sobre V_o .

3.3.3 V_o

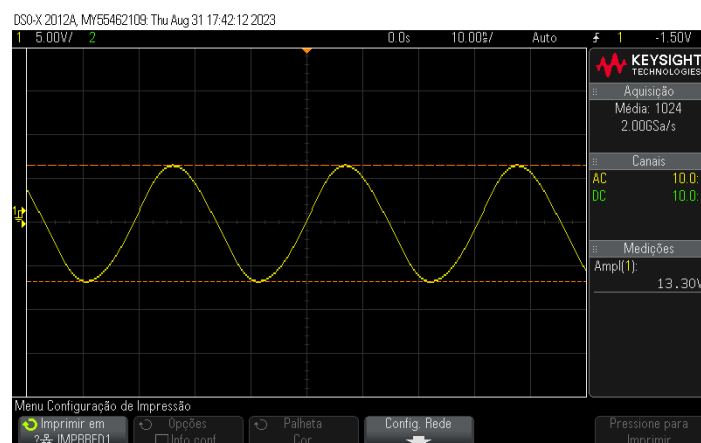


Figura 14: Tensão sobre V_o .

3.3.4 V_L

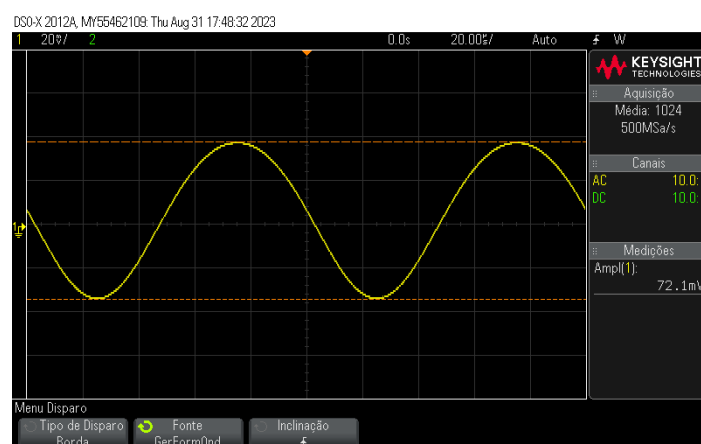


Figura 15: Tensão sobre V_L .

3.3.5 Tensões sobre potenciômetro e R_L

Aqui mede-se cinco pontos de tensão sobre o potenciômetro e R_L para diferentes valores de resistência do potenciômetro. Os resultados obtidos estão apresentados a seguir:

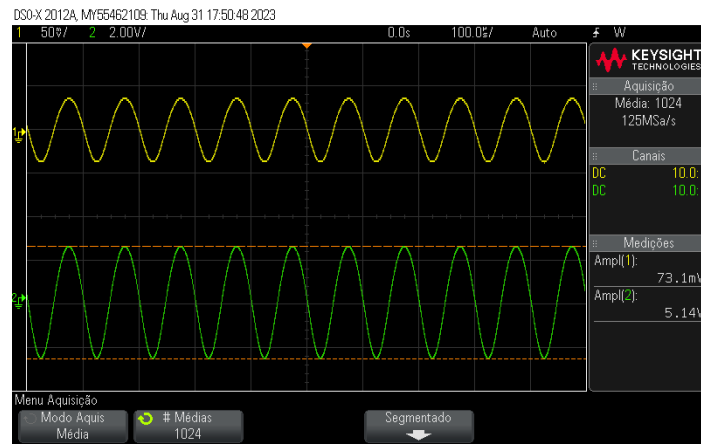


Figura 16: Tensão sobre R_L e o potenciômetro em seu máximo.

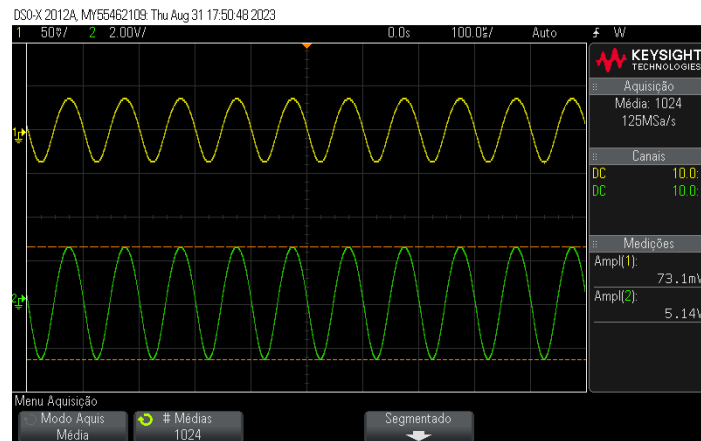


Figura 17: Tensão sobre R_L e o potenciômetro em 75% de seu máximo.

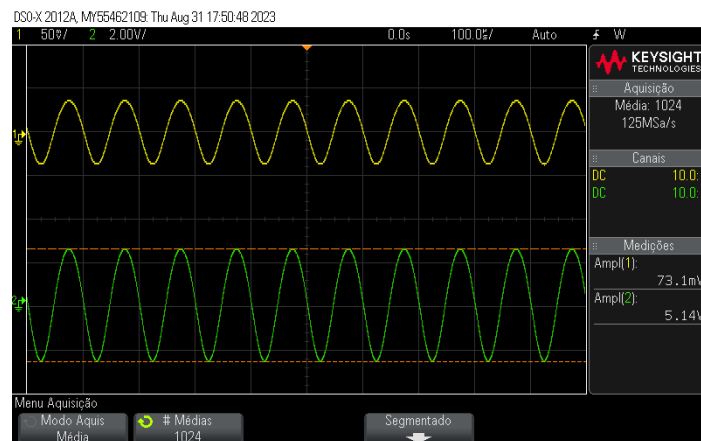


Figura 18: Tensão sobre R_L e o potenciômetro em 50% de seu máximo.

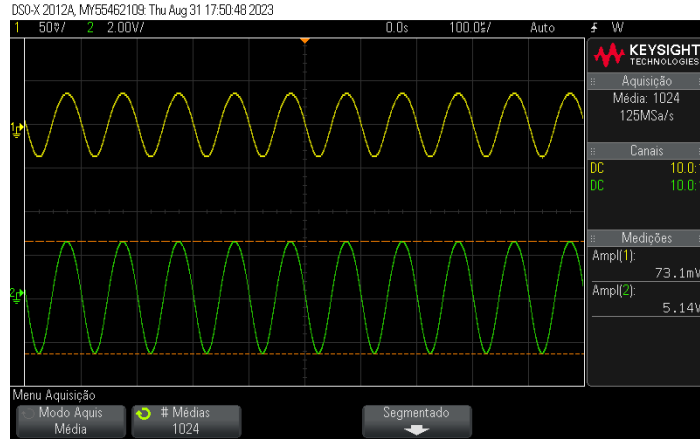


Figura 19: Tensão sobre R_L e o potenciômetro em 25% de seu máximo.

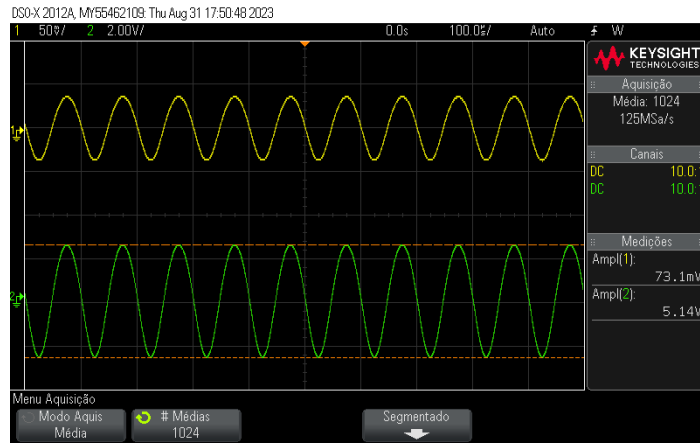


Figura 20: Tensão sobre R_L e o potenciômetro em seu mínimo.

4 Análise dos resultados

Os principais resultados obtidos a partir das medições e simulações realizadas no experimento foram analisados, incluindo comparações com os resultados numéricos e as conclusões relevantes.

4.1 Cálculo do ganho β

Calcula-se o I_c a partir de:

$$I_c = \frac{V_{rc}}{R_c} = \frac{5.87}{470} = 12.5mA \quad (18)$$

Com isto calcula-se o I_e :

$$I_e = \frac{(V_e - V_{ee})}{R_e} = \frac{(-5.7 - (-8.006))}{178.4} = 12.9mA \quad (19)$$

E temos $I_b = I_e - I_c = 0.04mA$.

E por fim o β :

$$\beta = \frac{I_c}{I_b} = \frac{12.5}{0.04} = 31.25 \quad (20)$$

Acredito que a medição do parâmetro β não tenha sido precisa o suficiente, e suspeito que a fonte do problema esteja centralizada na aferição de V_{rc} .

5 Conclusões

Conclui-se que o experimento foi conduzido com sucesso em grande parte, obtendo resultados que se aproximaram das expectativas. No entanto, um ponto crítico que merece atenção é a medição do parâmetro β , a qual não alcançou o nível de precisão desejado. Esse desvio provavelmente se deve a erros de medição relacionados ao v_{rc} .

Essa imprecisão na determinação de β acabou por inviabilizar uma análise coerente do circuito nas atividades laboratoriais. Isso ocorreu, pois todos os requisitos e cálculos posteriores dependiam diretamente do valor de β .

Portanto, em futuras abordagens experimentais, é crucial aprimorar os procedimentos de medição e garantir uma avaliação mais precisa do β para uma análise mais completa e confiável do desempenho do circuito.