

Circuito de Comutação com Transístor

Tiago de Sousa Pimenta Catarino

Grupo 5, Turma PL2

*Departamento de Física e Astronomia
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto*

Abril de 2023

Resumo

Nesta experiência estudamos o comportamento de um circuito de comutação/circuito inversor em cada modo do transístor bipolar que compõe o circuito, além de obtermos experimentalmente o ganho de corrente β do transístor usado.

Conteúdo

1	Objetivos	2
2	Introdução Teórica	2
2.1	Modo de Corte	2
2.2	Modo Ativo	2
2.3	Modo de Saturação	3
3	Procedimento Experimental	4
3.1	Pré-Requisitos	4
3.2	Procedimento	4
4	Resultados Experimentais e Discussão	5
4.1	Primeira Resistência	6
4.2	Segunda Resistência	9
5	Conclusão	11

1 Objetivos

- Verificar que o sinal de entrada é amplificado no modo ativo.
- Estimar o valor de β analisando a diferença de potencial de saída V_{out} em um osciloscópio.

2 Introdução Teórica

O circuito de comutação é um circuito básico composto por um transistor bipolar e duas resistências, útil por permitir usar uma corrente fraca na base para definir a corrente elevada emitida pelo transistor, e também útil em eletrônica digital por realizar a operação de um inversor (onde se chama convenientemente de circuito inversor).

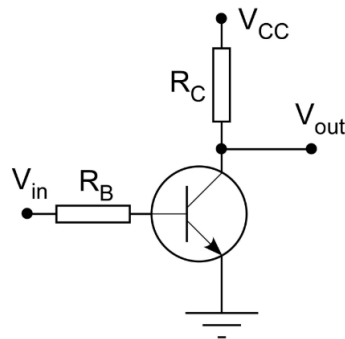


Figura 1: Circuito de comutação

Para melhor entender-mos este circuito irei demonstrar o seu comportamento para cada fase do transistor:

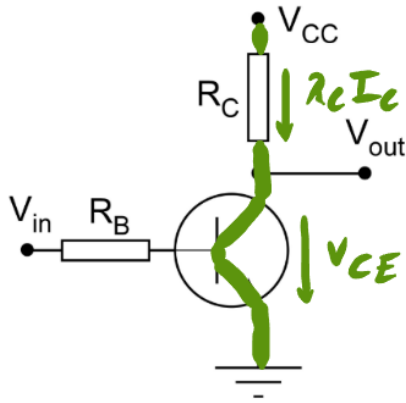
2.1 Modo de Corte

O transistor entra em corte quando a corrente I_B é nula, fazendo com que a corrente I_C também seja nula e, por consequência, não haja queda de potencial na resistência R_C , logo:

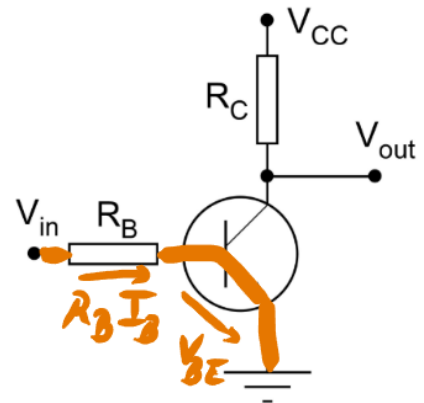
$$V_{out} = V_{CC}$$

2.2 Modo Ativo

Quando o transistor está no modo ativo, temos uma relação linear entre a corrente na base e a corrente emitida, dada por $I_C = \beta I_B$, em que β é o ganho de corrente do transistor. Aplicando a lei das malhas de Kirchhoff conseguimos as seguintes equações:



(a) Malha 1



(b) Malha 2

Figura 2: Malhas onde aplicámos a lei das malhas de Kirchhoff

$$\begin{aligned} \text{Malha 1} &\rightarrow V_{CC} - R_C I_C - V_{CE} = 0 \\ &\Rightarrow V_{CC} - R_C \beta I_B - V_{CE} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Malha 2} &\rightarrow V_{in} - R_B I_B - V_{BE} = 0 \\ &\Rightarrow I_B = \frac{V_{in} - V_{BE}}{R_B} \end{aligned} \quad (2)$$

Substituindo o resultado da equação (2) na equação (1), obtemos a seguinte igualdade:

$$V_{CC} - \beta \frac{R_C}{R_B} (V_{in} - V_{BE}) - V_{CE} = 0$$

E como o potencial $V_{CE} = V_{out}$, então temos que:

$$\boxed{V_{out} = V_{CC} - \beta \frac{R_C}{R_B} (V_{in} - V_{BE})} \quad (3)$$

2.3 Modo de Saturação

O modo de saturação acontece quando a corrente no coletor I_C se torna alta o suficiente que o transístor passa a conduzir totalmente corrente entre o coletor e o emissor, apenas com uma descida de potencial de $V_{CE_{sat}} \approx 0,2V$. Logo:

$$\boxed{V_{out} = V_{CE_{sat}} = 0,2V}$$

3 Procedimento Experimental

3.1 Pré-Requisitos

- O transistor que usamos é o BC547, ao qual fornecemos o datasheet [1]. O ganho de corrente β deste transistor é de ≈ 300 a temperatura ambiente e $V_{BE} \approx 0,7V$.
- A fonte de tensão contínua $V_{CC} = 5V$.
- Para que o transistor não esteja sempre em saturação temos de garantir que I_C não chega à corrente de saturação, como foi mencionado na secção 2.3. Para o nosso transistor a corrente de saturação é de $\approx 100mA$, logo queremos estar longe desse limite, em por exemplo $I_C < 10mA$. Substituindo a equação (1) na inequação anterior obtemos a seguinte condição:

$$R_C > \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{0,01}$$

Que nas nossas condições traduz para $R_C > 480\Omega$.

3.2 Procedimento

1. Montar o circuito na figura 1, em que V_{in} é uma onda triangular de 0V a $\sim 4V$. Na realização da experiência usamos um gerador de ondas para obter esta onda triangular.
2. Analisando o sinal V_{out} em um osciloscópio, e guardar os dados em formato excel.
3. Obter o ganho de corrente β experimentalmente, começando por fazer um gráfico de V_{out} em função de $(V_{in} - V_{BE})$. De acordo com a equação (3) temos que, ao fazer um ajuste linear desse gráfico:

$$m = -\beta \frac{R_C}{R_B} \Rightarrow \boxed{\beta = -m \frac{R_B}{R_C}} \quad (4)$$

$$\boxed{V_{CC} = b} \quad (5)$$

4. Repetir os pontos 2 e 3 para diferentes valores de R_C e R_B .

Nota: Na nossa realização da experiência usamos os valores $R_C = 1k\Omega, 1.5k\Omega$ e $R_B = 470\Omega, 10k\Omega, 33k\Omega, 1M\Omega$.

4 Resultados Experimentais e Discussão

Após termos montado o circuito com $R_C = 1\text{k}\Omega$ e $R_B = 470\Omega$, ligamos um osciloscópio aos canais V_{in} e V_{out} , ao qual observamos o seguinte:

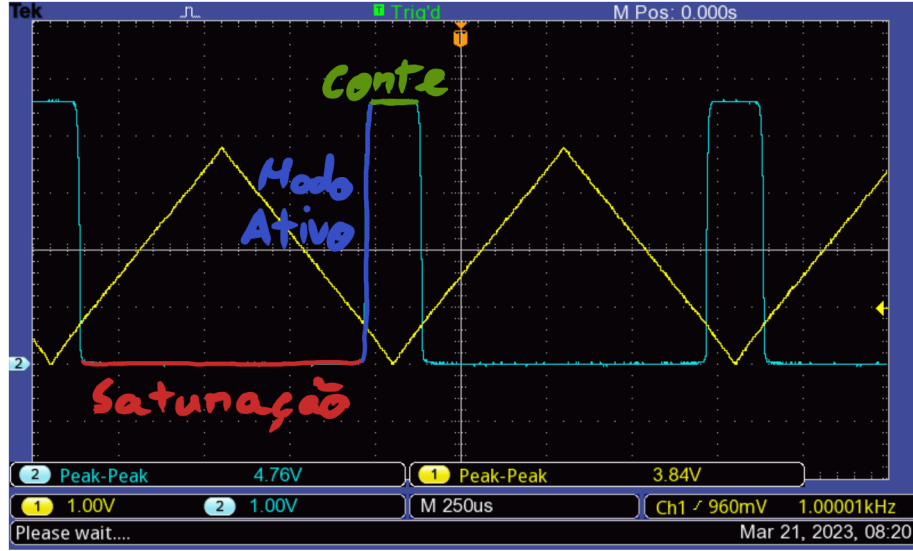


Figura 3: Comportamento de V_{out} com uma onda triangular como entrada em V_{in}

É evidente que o fator de ampliação do sinal é tão grande no modo linear que o sinal de saída parece mais uma linha vertical do que a onda triangular que temos de entrada. E podemos calcular este fator de ampliação a partir da equação (3), que nos diz que o sinal de saída deve ter um offset de $V_{CC} + \beta \frac{R_C}{R_B} V_{BE}$ e um fator de ampliação de:

$$A = -\beta \frac{R_C}{R_B}$$

O que, neste caso, traduz para um fator de ampliação de:

$$A = -(300) \frac{(1000\Omega)}{(470\Omega)} \approx 638,3$$

O que justifica a transição tão rápida entre o modo ativo, mas como o nosso objetivo é estudar o comportamento no modo ativo, então devemos priorizar valores de R_B maiores, de forma a que o fator de ampliação seja pequeno o suficiente que nos permita ter uma boa quantidade de pontos no modo ativo.

Podemos também observar na figura 3 que o potencial pico-a-pico $V_{pp} = 4,76\text{V}$, e, sabendo que o potencial na saturação é de $0,2\text{V}$, então o potencial em corte terá de ser $4,76\text{V} + 0,2\text{V} = 4,96\text{V} = V_{CC}$, o que nos indica que o circuito está a funcionar como esperávamos.

Para o cálculo experimental de β , dividimos a experiência em duas partes referentes às duas resistências de R_C que usámos.

4.1 Primeira Resistência

Para obter os pontos no modo ativo, usamos o osciloscópio, ajustando a imagem para focar no modo ativo do transistor, como demonstrado na seguinte figura:



Figura 4: Exemplo para obtenção dos pontos ($R_C = 1k\Omega$ e $R_B = 33k\Omega$)

E, ligando uma PEN Drive no osciloscópio, este tem uma funcionalidade de guardar todos os pontos na imagem em ficheiros de formato CSV, que podem ser copiados para uma folha de excel, onde realizámos a análise dos dados.

Após a conversão dos dados para a folha excel, encarámo-nos com uma limitação do nosso osciloscópio, que é mais evidente quando observamos a tabela de dados e o gráfico da análise:

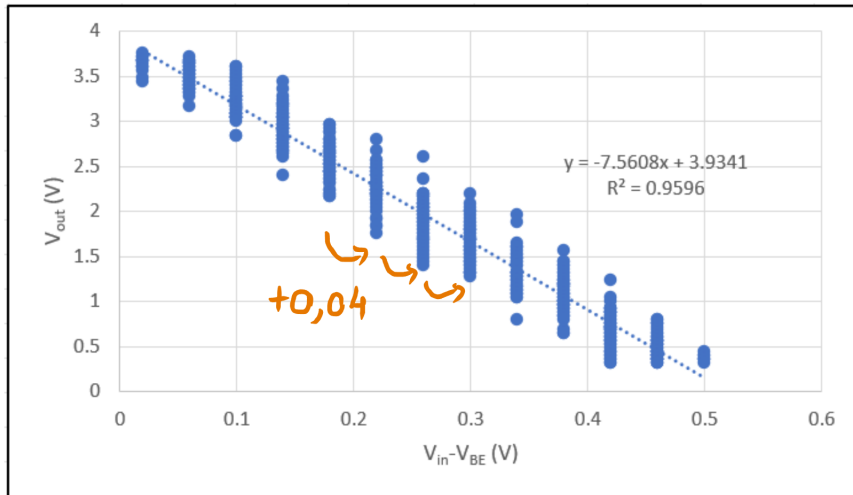


Figura 5: Gráfico de $R_C = 1k\Omega$ e $R_B = 33k\Omega$

t (s)	V _{in} (V)	V _{out} (V)	V _{in} -V _{BE} (V)
-8.5E-05	0.76	4.56	0.06
-8.5E-05	0.76	4.6	0.06
-8.5E-05	0.72	4.6	0.02
-8.5E-05	0.8	4.56	0.1
-8.5E-05	0.76	4.6	0.06
-8.4E-05	0.76	4.56	0.06
-8.4E-05	0.76	4.6	0.06
-8.4E-05	0.8	4.56	0.1
-8.4E-05	0.8	4.52	0.1
-8.4E-05	0.84	4.52	0.14
-8.3E-05	0.8	4.56	0.1
-8.3E-05	0.8	4.6	0.1
-8.3E-05	0.8	4.56	0.1
...

Tabela 1: Pontos obtidos para $R_C = 1k\Omega$ e $R_B = 33k\Omega$

Como é sugerido pela tabela 1 e a figura 5, o osciloscópio apenas fornece valores com intervalos de 0,04 , o que nos deixa com estes grandes intervalos sem pontos no gráfico. Por esta limitação não podemos usar os dados das resistências $R_B = 470\Omega$, $10k\Omega$, $33k\Omega$ sendo que os valores dos pontos vão diminuindo proporcionalmente com R_B , logo teríamos valores ainda menos fiáveis, e, como acabamos de ver, fazer um ajuste linear deste gráfico deixar-nos-ia com valores não fiáveis. Optamos então por fazer a análise apenas a $R_B = 1M\Omega$.

E após substituir-mos R_B por $1M\Omega$, obtivemos o seguinte sinal de saída:

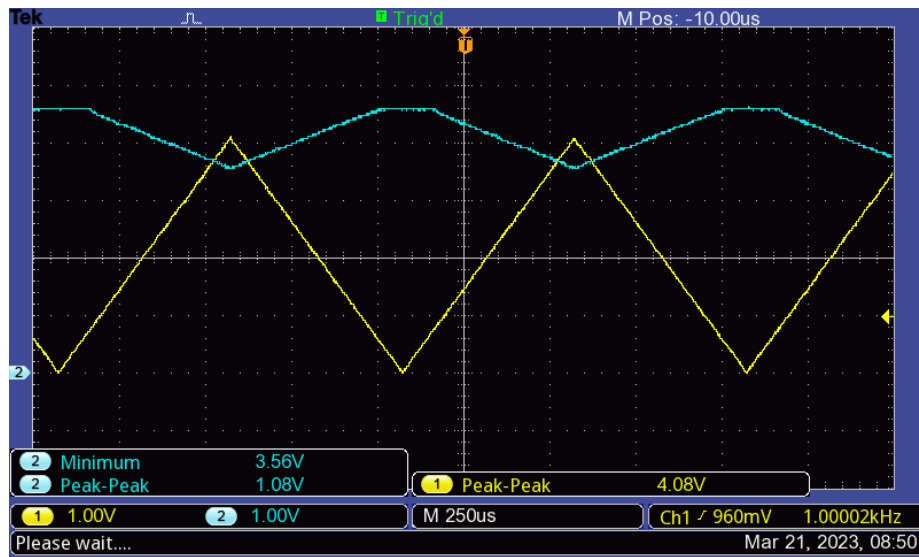


Figura 6: Sinal de saída para $R_C = 1k\Omega$ e $R_B = 1M\Omega$

É interessante ver que neste caso nunca temos saturação no transistor, e também que a

amplitude do sinal de saída é muito menor do que a onda triangular, o que significa que o nosso fator de ampliação é menor que 1, e, calculando o fator de ampliação:

$$A = -(300) \frac{(1000\Omega)}{(1000000\Omega)} = -0,3$$

O que nos diz que, como o nosso sinal de entrada tem um potencial de pico-a-pico de $V_{pp} = 4,08V$, então o sinal de saída terá de ter $V_{pp} = 0,3 \times 4,08V = 1,22V$, o que se verifica sendo que, com corte, o nosso sinal tem $V_{pp} = 1,08V$.

Tirando então os dados para $R_B = 1M\Omega$, obtemos o seguinte gráfico:

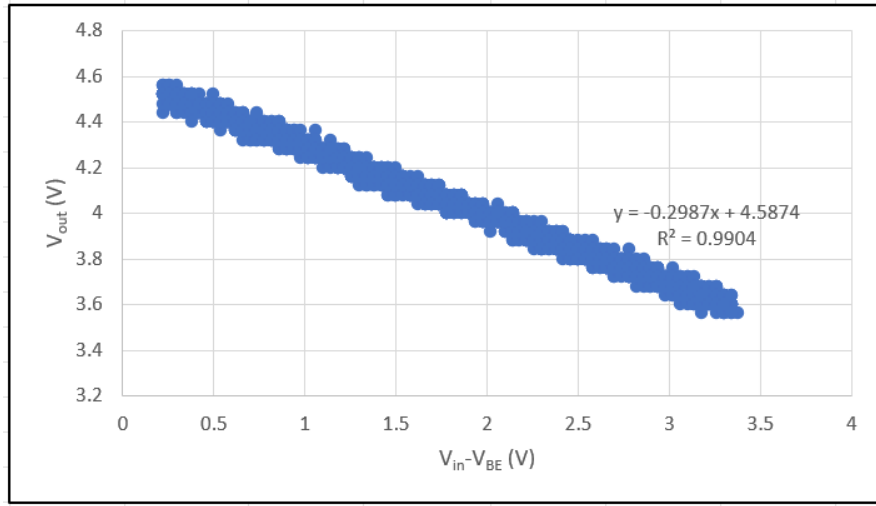


Figura 7: Gráfico de $R_C = 1k\Omega$ e $R_B = 1M\Omega$

Sendo que a resistência R_B é tão grande, os valores de $V_{in} - V_{BE}$ variam entre 0 e 3,5, em contraste com os valores obtidos para $R_B = 33k\Omega$, que variam entre 0 e 0,5, logo as medições em intervalos de 0,04 não influenciam tão intensivamente os pontos para resistências grandes o suficiente.

Podemos então prosseguir para o cálculo experimental do ganho de corrente β , do potencial V_{CC} e as suas incertezas, que, a partir da propagação de incertezas aplicada às equações (4) e (5), são dadas por:

$$u(\beta) = \sqrt{\left(\frac{R_B}{R_C}u(m)\right)^2 + \left(\frac{m}{R_C}u(R_B)\right)^2 + \left(m\frac{R_B}{(R_C)^2}u(R_C)\right)^2} \quad (6)$$

$$u(V_{CC}) = u(b) \quad (7)$$

E, fazendo um ajuste linear ao gráfico 7, obtemos os seguintes valores:

Ajuste Linear			
m	-0.29865	4.58737	b
u(m)	0.00067	0.00135	u(b)
r^2	0.990	0.02658	sy

Tabela 2: Ajuste Linear de $R_C = 1k\Omega$ e $R_B = 1M\Omega$

Para diminuir a incerteza nos valores experimentais, decidimos medir as resistências em um multímetro, caso contrário as incertezas das resistências seriam de 5% do seu valor, e para a resistência de $1M\Omega$, isso significaria uma incerteza de $u(R_B) = 50k\Omega$. E, após termos medido os valores das resistências, conseguimos então calcular β e V_{CC} :

$R_C (\Omega)$	$u(R_C) (\Omega)$	$R_B (\Omega)$	$u(R_B) (\Omega)$
1001	1	1007000	1000

Tabela 3: Valores medidos para as resistências $R_C = 1k\Omega$ e $R_B = 1M\Omega$

	β	V_{CC}
x	300.443	4.58737
u(x)	0.797	0.00135
Erro (%)	0.148	-8.25261

Tabela 4: Valores de β e V_{CC} para $R_C = 1k\Omega$ e $R_B = 1M\Omega$

Em que os erros relativos foram calculados comparando os valores obtidos experimentalmente com $\beta = 300$ e $V_{CC} = 5V$. Podemos ver que o resultado de β é particularmente satisfatório considerando o erro relativo de 0,15%, mas o valor de V_{CC} por outro lado já apresenta um erro relativo de 8,25%, o que se pode ter dado por aquecimento da fonte de tensão, ou mesmo aquecimento do transistor. Uma maneira de evitar a influência do aquecimento dos componentes seria captar os dados no osciloscópio apenas momentos depois de ligar o circuito, de forma a diminuir o efeito de Joule.

4.2 Segunda Resistência

A análise dos dados obtidos com $R_C = 1,5k\Omega$ é idêntica à análise feita na seção 4.1, logo é altamente recomendável ler esta seção apenas tendo feito a leitura da seção anterior, sendo que essa serve para explicar os passos todos da análise (além de discutir os resultados de $R_C = 1k\Omega$), enquanto esta seção apenas apresenta e discute os resultados de $R_C = 1,5k\Omega$.

E então, substituindo R_C por $1,5k\Omega$, e, ainda usando $R_B = 1M\Omega$, obtemos o seguinte sinal de saída:

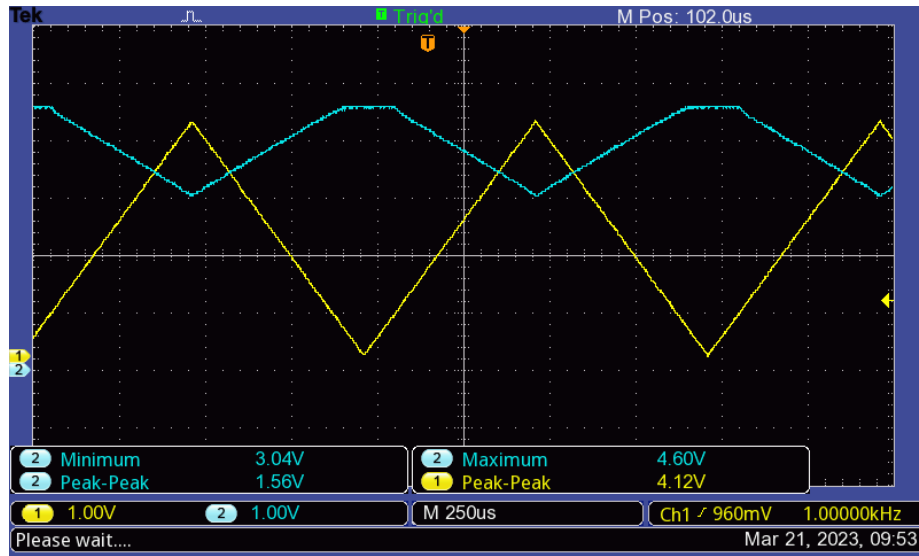


Figura 8: Sinal de saída para $R_C = 1,5k\Omega$ e $R_B = 1M\Omega$

Tal como na figura 6, podemos ver que o transístor nunca entra em saturação, e que o fator de ampliação é também menor que 1, embora maior que no caso anterior, mais especificamente:

$$A = -(300) \frac{(1500\Omega)}{(1000000\Omega)} = -0,45$$

Podemos também calcular o potencial pico-a-pico do sinal de saída, que nos deixa com $V_{pp} = 0,45 \times 4,12V = 1,85V$, o que também se verifica com o valor obtido no osciloscópio de $V_{pp} = 1,56V$, tendo em conta que neste caso temos corte ainda mais cedo, sendo que a amplitude é maior.

Tirando os dados no osciloscópio obtemos o seguinte gráfico:

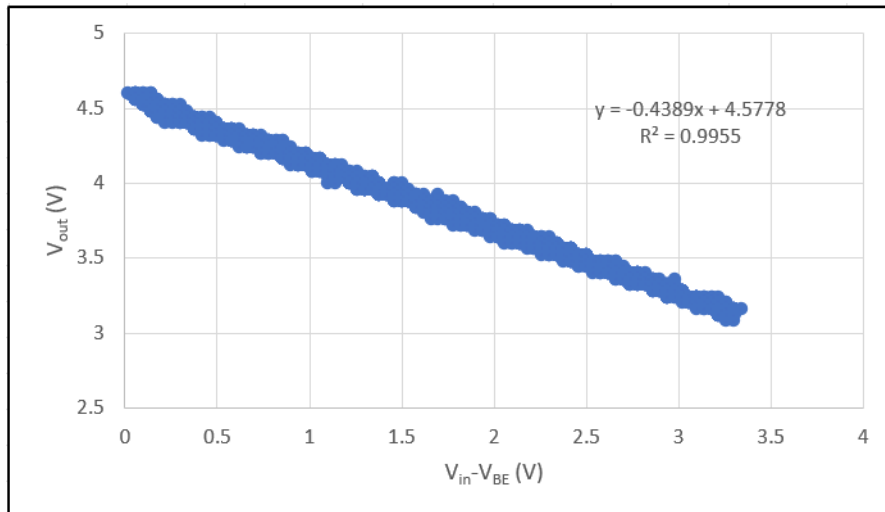


Figura 9: Gráfico de $R_C = 1,5k\Omega$ e $R_B = 1M\Omega$

O gráfico tem a forma de uma reta como esperávamos, e, após ter feito o ajuste linear, obtivemos os seguintes valores:

Ajuste Linear			
m	-0.43894	4.57783	b
u(m)	0.00066	0.00128	u(b)
r^2	0.996	0.02745	sy

Tabela 5: Ajuste Linear de $R_C = 1,5k\Omega$ e $R_B = 1M\Omega$

Da mesma maneira que fizemos na análise anterior, medimos os valores das resistências usando um multímetro, de forma a diminuir as incertezas dos resultados. E, após ter sido feita esta medição, usamos as equações (4) e (5) para calcular β e V_{CC} , e as suas incertezas usando as equações (6) e (7), e dessa maneira obtemos os seguintes resultados:

$R_C (\Omega)$	$u(R_C) (\Omega)$	$R_B (\Omega)$	$u(R_B) (\Omega)$
1481	1	1007000	1000

Tabela 6: Valores medidos para as resistências $R_C = 1,5k\Omega$ e $R_B = 1M\Omega$

	β	V_{CC}
x	298.455	4.57783
u(x)	0.575	0.00128
Erro (%)	-0.515	-8.44349

Tabela 7: Valores de β e V_{CC} para $R_C = 1,5k\Omega$ e $R_B = 1M\Omega$

E, vendo os erros na tabela 7, obtemos um erro no ganho de corrente β de 0,51%, o que é maior do que o erro obtido na tabela 4 mas é extremamente próximo, e o valor de V_{CC} apresenta um erro de 8,44% , o que é também muito próximo do erro obtido na tabela 4 de 8,25%, o que nos pode indicar que a nossa fonte de tensão tinha defeito e fornecia $\approx 4,58V$ em vez dos 5V desejados. Uma forma de verificar tal hipótese seria medir a tensão que sai da fonte usando um voltímetro.

5 Conclusão

Na realização da experiência conseguimos verificar que a onda triangular era amplificada no modo ativo do transistor, além de ganhar um offset.

Encontramos uma limitação do osciloscópio que usamos, o que nos levou a rejeitar os pontos medidos para $R_B = 470\Omega$, $10k\Omega$ e $33k\Omega$.

Conseguimos também obter experimentalmente o valor de β , tendo obtido os valores $\beta = 300,4 \pm 0,8$ e $\beta = 298,5 \pm 0,6$, com erros relativos de 0,15% e 0,51%, respetivamente.

Bibliografia

- [1] Fairchild Semiconductor. *Datasheet do transistor BC547*. URL: https://drive.google.com/file/d/1w_qGp1EIWKDT-f8mSy9xA804TKNTM35q/view?usp=sharing.
- [2] Docentes da disciplina. *T4B Circuito de comutação com transistor*. 2022/2023. URL: <https://drive.google.com/file/d/12eoBgN9fSMztzz1Xa9F1dwch4C17fIsH/view?usp=sharing>.
- [3] Docentes da cadeira. *Material de apoio aulas eletrónica*. 2022/2023, pp. 49–66. URL: https://drive.google.com/file/d/1ved8jgPbVdTNiJr_0l3NEKM_QvRtaMqU/view?usp=sharing.
- [4] Tiago Catarino. *Folha de excel para $R_C = 1k\Omega$ e $R_B = 1M\Omega$* . URL: <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1ELw-J6XyPDFrgWj7wHY5IV530PoUqG-N/edit?usp=sharing&ouid=107126778624527136491&rtpof=true&sd=true>.
- [5] Tiago Catarino. *Folha de excel para $R_C = 1,5k\Omega$ e $R_B = 1M\Omega$* . URL: https://docs.google.com/spreadsheets/d/1dWToipb7dEKsexflzcXj_Iv0QaTGOMov/edit?usp=sharing&ouid=107126778624527136491&rtpof=true&sd=true.