

# Terceiro Relatório de Lab de Eletrônica 1

Henrique da Silva  
henrique.pedro@ufpe.br

2 de setembro de 2023

## Sumário

### 1 Introdução

### 2 Análise preliminar

2.1	O circuito . . . . .	
2.2	Análise simbólica . . . . .	
2.2.1	Restrições . . . . .	
2.2.2	Estado 1: Amp Op ligado e diodo polarizado diretamente . . . . .	
2.2.3	Estado 2: Amp Op desligado e diodo polarizado inversamente . . . . .	
2.2.4	Estado 3: Amp Op ligado e diodo polarizado inversamente . . . . .	
2.2.5	Estado 4: Amp Op desligado e diodo polarizado diretamente . . . . .	
2.2.6	Parametros A e B . . . . .	
2.2.7	Resistencias . . . . .	
2.3	Projetando o circuito . . . . .	
2.3.1	Exemplo 1 . . . . .	
2.3.2	Exemplo 2 . . . . .	

### 3 Medições em laboratório

3.1	Exemplo 1 . . . . .	
3.1.1	Componentes . . . . .	
3.1.2	$V_o(t)$ . . . . .	
3.1.3	$V_c(t)$ . . . . .	
3.1.4	$V_{R5}(t)$ . . . . .	
3.2	Exemplo 2 . . . . .	
3.2.1	Componentes . . . . .	
3.2.2	$V_o(t)$ . . . . .	
3.2.3	$V_c(t)$ . . . . .	
3.2.4	$V_{R5}(t)$ . . . . .	

### 4 Análise dos resultados

4.1	Exemplo 1 . . . . .	
4.2	Exemplo 2 . . . . .	

### 5 Conclusões

# 1 Introdução

Neste relatório, é explorado o comportamento não linear de um oscilador astável construído com um amplificador operacional. Utilizam-se componentes passivos para criar uma oscilação contínua de carga e descarga, resultando em uma forma de onda de saída característica. A não linearidade desse processo é evidenciada pela oscilação da tensão de saída a partir de uma tensão de entrada constante, ilustrando a interação complexa entre componentes e a amplificação do amplificador operacional.

Todos arquivos utilizados para criar este relatório, e o relatório em si estão em: [https://github.com/Shapis/ufpe\\_ee/tree/main/6thsemester/Eletronica1/](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, é considerado o comportamento do circuito em quatro estados distintos, nos quais são examinadas diferentes combinações de amplificador operacional ligado/desligado e diodo ligado/desligado. É determinado que, dentre esses quatro estados, apenas dois são possíveis. Com base nessas conclusões, as equações diferenciais resultantes são resolvidas para se compreender o comportamento da saída do circuito. Essa abordagem possibilita uma análise das interações entre os elementos do circuito.

### 2.1 O circuito

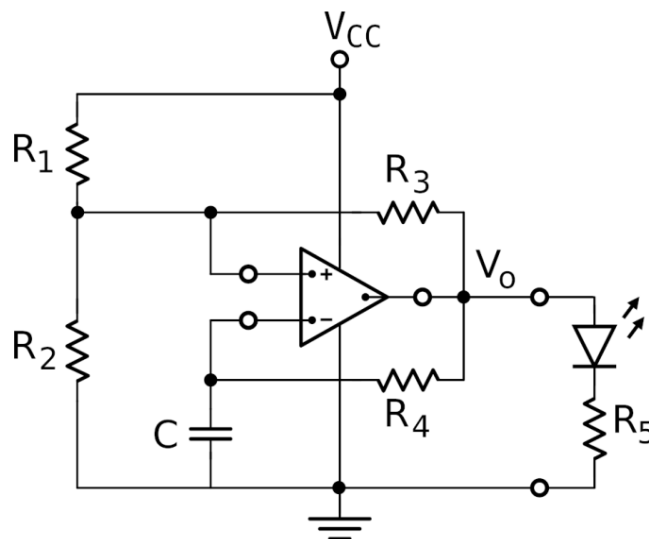


Figura 1: Oscilador astável com LED.

## 2.2 Análise simbólica

A análise é conduzida, examinando-se combinação de estados do diodo e do amp op separadamente. O processo tem início com o diodo polarizado diretamente, seguido pelo diodo polarizado reversamente.

### 2.2.1 Restrições

A análise é conduzida ao examinar a combinação de estados do diodo e do amp op separadamente. O processo tem início com o diodo polarizado diretamente, seguido pelo diodo polarizado reversamente.

$$V_{m1} < V_{D0} < V_{m2} \quad (1)$$

Também, quando o LED está polarizado diretamente, tem-se que:

$$\begin{aligned} I_L &> 0 \\ V_d &= V_{D0} \end{aligned} \quad (2)$$

Quando o LED está polarizado inversamente:

$$\begin{aligned} I_L &= 0 \\ V_d &< V_{D0} \end{aligned} \quad (3)$$

### 2.2.2 Estado 1: Amp Op ligado e diodo polarizado diretamente

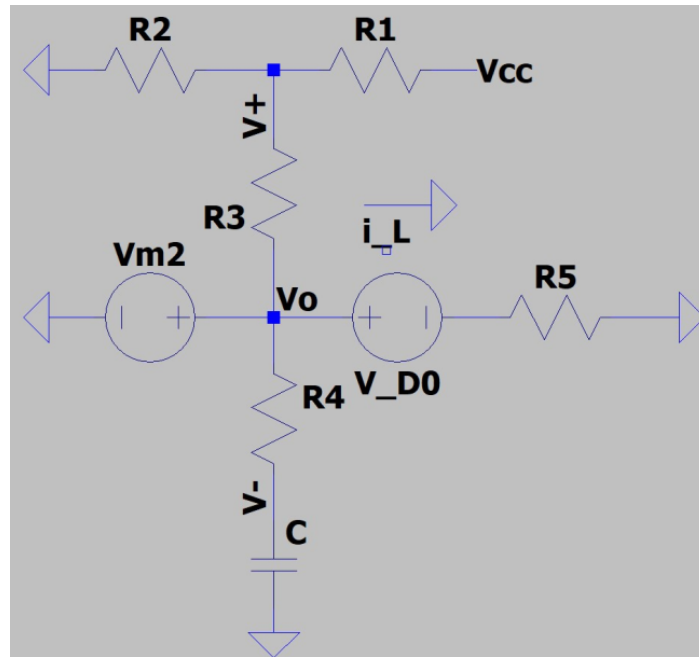


Figura 2: Amp op ligado, diodo polarizado diretamente.

Neste estado, ambos LED e amp op estão ligados e tem-se a seguinte análise:

$$\begin{aligned} \frac{V_{m2} - V_{D0}}{R_5} &= I_L \\ V_{m2} &> V_{D0} \\ I_L &> 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Como pode-se observar, a análise não contradiz as restrições, logo este estado é possível. Entao o analisaremos e resolveremos as equacoes diferenciais que vem dele.

$$\begin{aligned}
\frac{-V_o + V_+}{R_3} + \frac{V_+}{R_2} + \frac{-V_{CC} + V_+}{R_1} &= 0 \\
C \frac{d}{dt} V_c + V_c - V_{m2} &= 0 \\
V_o &= V_{m2}
\end{aligned} \tag{5}$$

Resolvemos a primeira expressão acima isolando  $V_+$  e a segunda expressão por Laplace isolando o  $V_c$  e obtemos:

$$\begin{aligned}
V_+ = V_2 &= \frac{R_1 R_2 V_{m2} + R_2 R_3 V_{CC}}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3} \\
V_c &= u(t) \left( V_{m2} + (V_{C0} - V_{m2}) e^{\frac{-t}{R_4 C}} \right)
\end{aligned} \tag{6}$$

Como visto, o  $V_c$  se comporta como um circuito  $RC$  em resposta forçada. Logo, a nossa constante de tempo é:

$$\tau = RC = R_4 C \tag{7}$$

### 2.2.3 Estado 2: Amp Op desligado e diodo polarizado inversamente

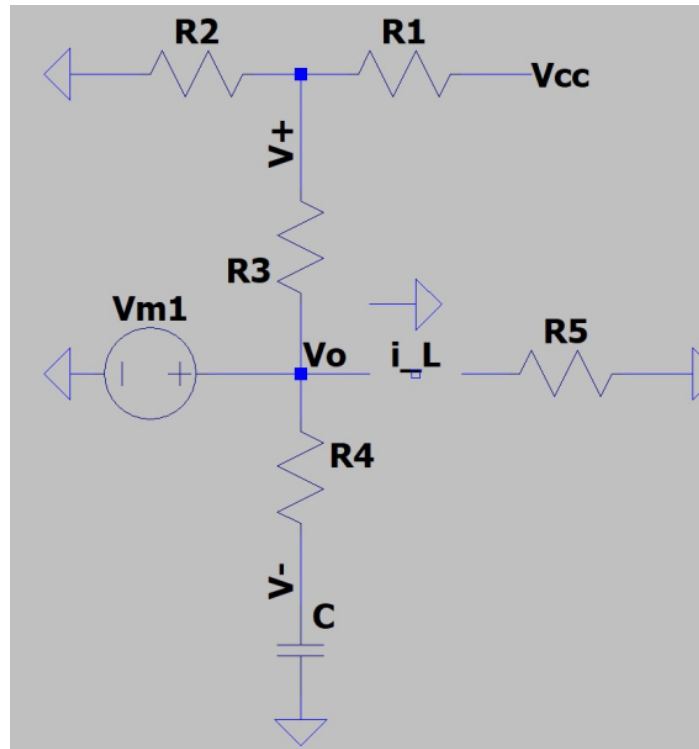


Figura 3: Amp op desligado, diodo polarizado inversamente.

Neste estado, ambos LED e amp op estão desligados e tem-se a seguinte análise:

$$\begin{aligned}
\frac{V_{m1} - V_{D0}}{R_5} &= I_L \\
I_L &= 0 \\
V_{m1} &= V_{D0} \\
V_{m1} &< V_{D0} \\
V_D &< V_{D0}
\end{aligned} \tag{8}$$

Como pode-se observar, a análise não contradiz as restrições, logo este estado é possível.

Então, o analisaremos e resolveremos as equações diferenciais que vêm dele.

$$\begin{aligned}\frac{V_+ - V_o}{R_3} + \frac{V_+ - VCC}{R_1} + \frac{V_+}{R_2} &= 0 \\ C \frac{d}{dt} V_c + V_c - V_{m1} &= 0 \\ V_o &= V_{m1}\end{aligned}\tag{9}$$

Resolvemos a primeira expressão acima isolando  $V_+$  e a segunda expressão, por Laplace, isolando o  $V_c$ , e obtemos:

$$\begin{aligned}V_+ = V_1 &= \frac{R_1 R_2 V_{m1} + R_2 R_3 VCC}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3} \\ V_c &= u(t) \left( V_{m1} + (V_{C0} - V_{m1}) e^{\frac{-t}{R_4 C}} \right)\end{aligned}\tag{10}$$

Como visto, o  $V_c$  comporta-se como um circuito  $RC$  em resposta forçada, logo a nossa constante de tempo é:

$$\tau = RC = R_4 C\tag{11}$$

#### 2.2.4 Estado 3: Amp Op ligado e diodo polarizado inversamente

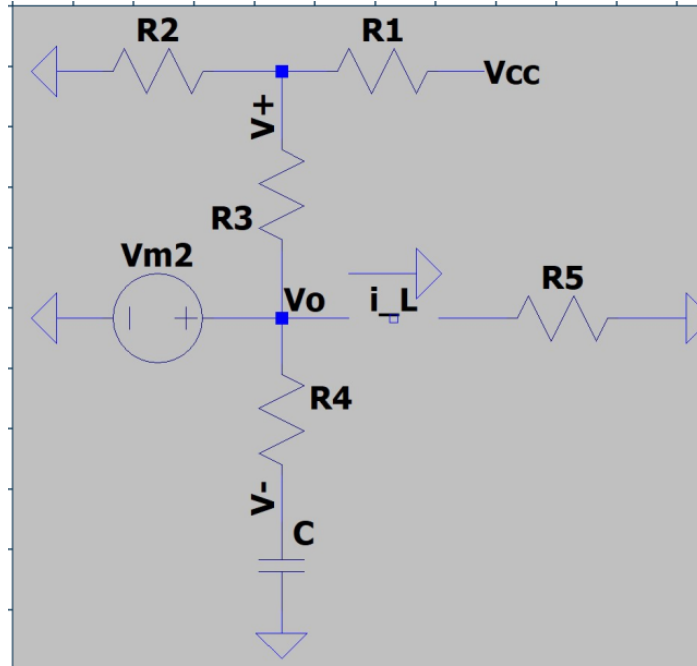


Figura 4: Amp op ligado, diodo polarizado inversamente.

Neste estado, o LED está desligado e o amp op está ligado, e tem-se a seguinte análise:

$$\begin{aligned}\frac{V_{m2} - V_D}{R_5} &= I_L \\ I_L &= 0 \\ V_{m2} &= V_D \\ V_{m2} &> V_{D0} \\ V_D &> V_{D0}\end{aligned}\tag{12}$$

Como pode-se observar, a análise contradiz a restrição 1, logo este estado é impossível.

### 2.2.5 Estado 4: Amp Op desligado e diodo polarizado diretamente

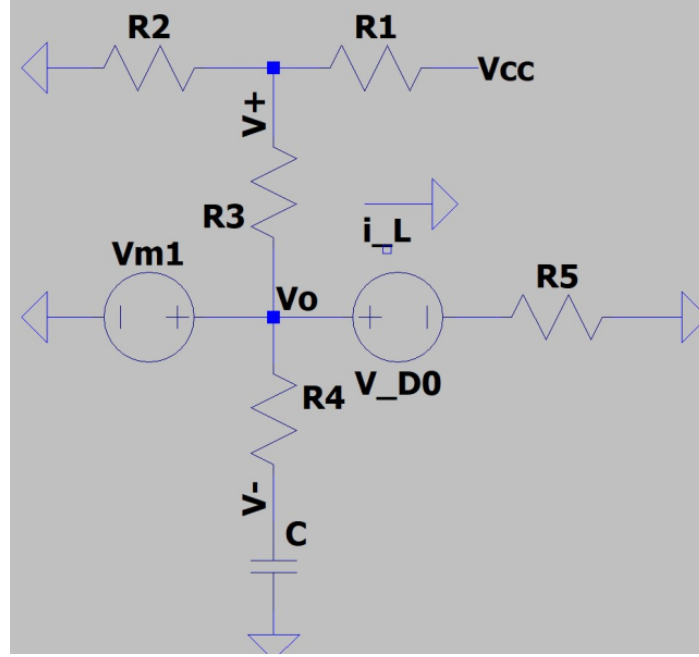


Figura 5: Amp op ligado, diodo polarizado inversamente.

Neste estado, o LED está ligado e o amp op está desligado, e tem-se a seguinte análise:

$$\begin{aligned} \frac{V_{m1} - V_D}{R_5} &= I_L \\ V_{m1} &< V_{D0} \\ I_L &< 0 \end{aligned} \quad (13)$$

Como pode-se observar, a análise contradiz a restrição 2, logo este estado é impossível.

### 2.2.6 Parametros A e B

Utilizaremos as equacoes (6) e (10) onde encontramos  $V_1$  e  $V_2$ , e faremos as substituicoes de  $A = e^{\frac{-kT}{\tau}}$  e  $B = e^{\frac{-(1-k)T}{\tau}}$ .

Fazendo estas substituicoes obtemos:

$$\begin{aligned} A &= \frac{V_2 - V_{m2}}{V_1 - V_{m2}} \\ B &= \frac{V_1 - V_{m1}}{V_2 - V_{m1}} \end{aligned} \quad (14)$$

Para obter o  $T$  e o  $k$  fazemos:

$$\begin{aligned} AB &= e^{-\frac{T}{\tau}} \Rightarrow T = -\tau \ln(AB) \\ \frac{A}{B} &= e^{\frac{-kT}{\tau} + T - \frac{-kT}{\tau}} \Rightarrow k = e^{\frac{-2kT}{\tau} + T} \end{aligned} \quad (15)$$

Com isto podemos resolver numericamente para  $T$  e  $k$  e obtemos:

$$\begin{aligned} T &= -\log \left( \frac{(V_1 - V_{m1})(V_2 - V_{m2})}{(V_2 - V_{m1})(V_1 - V_{m2})} \right) \tau \\ k &= \frac{\log \left( \frac{V_2 - V_{m2}}{V_1 - V_{m2}} \right) - \log(b)}{2 \log \left( \frac{(V_1 - V_{m1})(V_2 - V_{m2})}{(V_2 - V_{m1})(V_1 - V_{m2})} \right)} + \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (16)$$

Para obter  $V_1$  e  $V_2$  podemos dar solve nas equacoes (14):

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{V_{m2}AB - V_{m2}B + V_{m1}B - V_{m1}}{AB - 1} \\ V_2 &= \frac{A (V_{m1}B + V_{m2} - V_{m1}) - V_{m2}}{AB - 1} \end{aligned} \quad (17)$$

### 2.2.7 Resistencias

Utilizando as equações (6) e (10), podemos resolver  $R_1$  e  $R_2$ .

$$\begin{aligned} R_1 &= - \left( \frac{R_3 V_{cc} v_2 - R_3 V_{cc} v_1}{V_{m1} v_2 - V_{m2} v_1} \right) \\ R_2 &= \frac{R_3 V_{cc} v_2 - R_3 V_{cc} v_1}{(V_{m1} - V_{cc}) v_2 + (V_{cc} - V_{m2}) v_1 + V_{cc} V_{m2} - V_{cc} V_{m1}} \end{aligned} \quad (18)$$

Utilizando (7) obtemos  $R_3$ :

$$R_4 = \frac{\tau}{C} \quad (19)$$

Utilizando (4) obtemos  $R_5$ :

$$R_5 = \frac{V_o - V_{d0}}{i_L} \quad (20)$$

## 2.3 Projetando o circuito

Com a análise teórica feita, analisaremos dois exemplos. Em ambos os exemplos, teremos os seguintes parâmetros:

$$\begin{aligned} V_{CC} &= 11V \\ V_{D0} &= 2V \\ V_{m1} &= 0.3V \\ V_{m2} &= 9.2V \\ I_L &= 12mA \end{aligned} \quad (21)$$

### 2.3.1 Exemplo 1

Utilizando os dados acima para o exemplo 1 obtemos:

$$\begin{aligned} A &= 0.7788 \\ B &= 0.7788 \\ V_1 &= 4.1966V \\ V_2 &= 5.3034V \\ R_1 &= 15.45k\Omega \\ R_2 &= 11.47k\Omega \\ R_3 &= 47k\Omega \\ R_4 &= 100k\Omega \\ R_5 &= 600\Omega \\ C &= 10\mu F \end{aligned} \quad (22)$$

### 2.3.2 Exemplo 2

Utilizando os dados acima para o exemplo 2 obtemos:

$$\begin{aligned}A &= 0.2636 \\B &= 0.1353 \\V_1 &= 1.22V \\V_2 &= 7.01V \\R_1 &= 124.9k\Omega \\R_2 &= 47k\Omega \\R_3 &= 17.6k\Omega \\R_4 &= 20k\Omega \\R_5 &= 600\Omega \\C &= 100nF\end{aligned}\tag{23}$$



### 3 Medições em laboratório

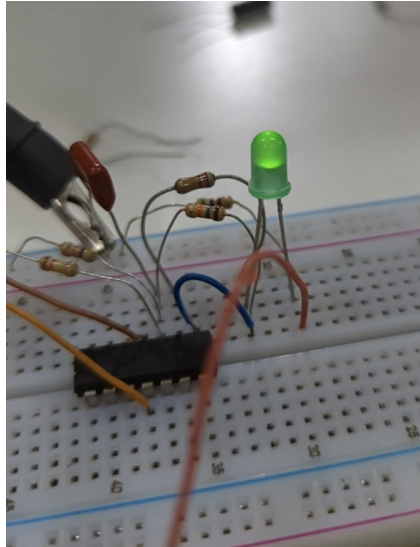


Figura 6: Imagem do circuito montado em laboratório.

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.

#### 3.1 Exemplo 1

##### 3.1.1 Componentes

$$R_1 = 14890\Omega$$

$$R_2 = 11758\Omega$$

$$R_3 = 46890\Omega$$

$$R_4 = 100380\Omega$$

$$R_5 = 551.1\Omega$$

$$C = 10.4nF$$

(24)

### 3.1.2 $V_o(t)$

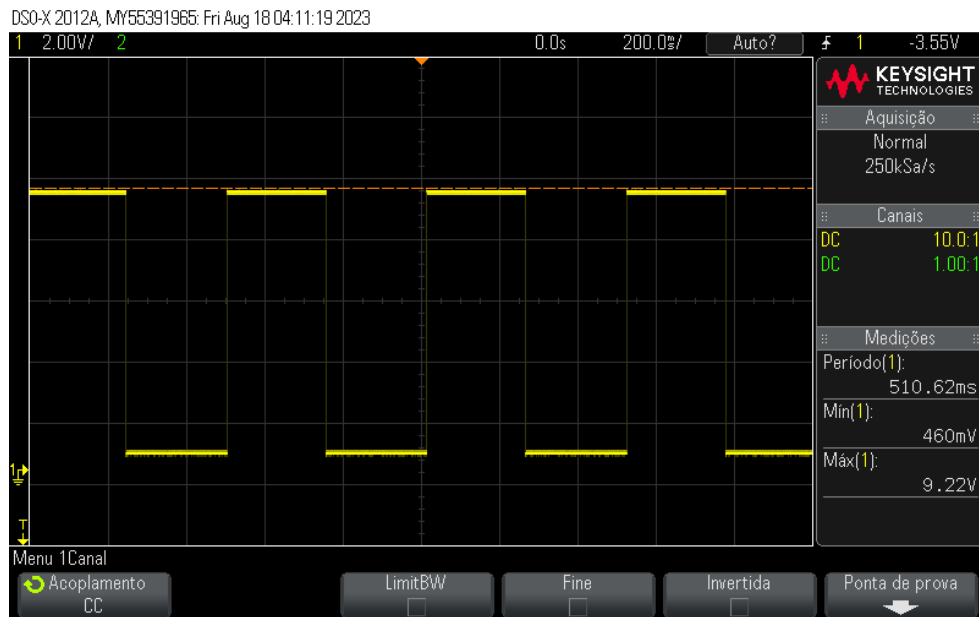


Figura 7: Medição de  $V_o(t)$  vista no osciloscópio para três períodos.

Da imagem obtemos os seguintes dados:

$$\begin{aligned}
 V_{m1} &= 460mV \\
 V_{m2} &= 9.22V \\
 T &= 510.62ms \\
 kT &= 255.31ms
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

### 3.1.3 $V_c(t)$

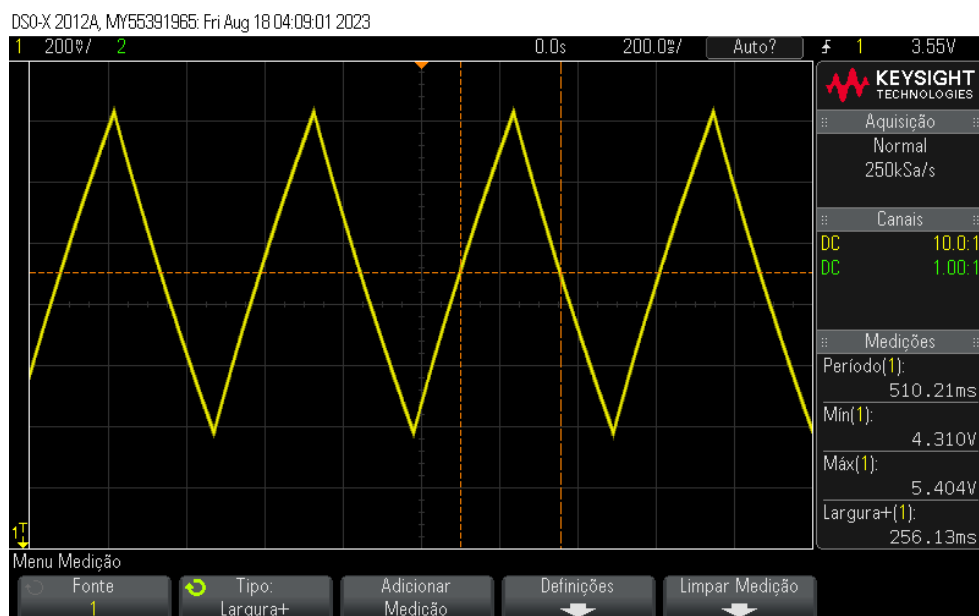


Figura 8: Medição de  $V_c(t)$  vista no osciloscópio para três períodos.

Da imagem obtemos os seguintes dados:

$$\begin{aligned}
V_{m1} &= 4.31V \\
V_{m2} &= 5.404V \\
T &= 510.21ms \\
kT &= 256.13ms
\end{aligned}
\tag{26}$$

### 3.1.4 $V_{R5}(t)$

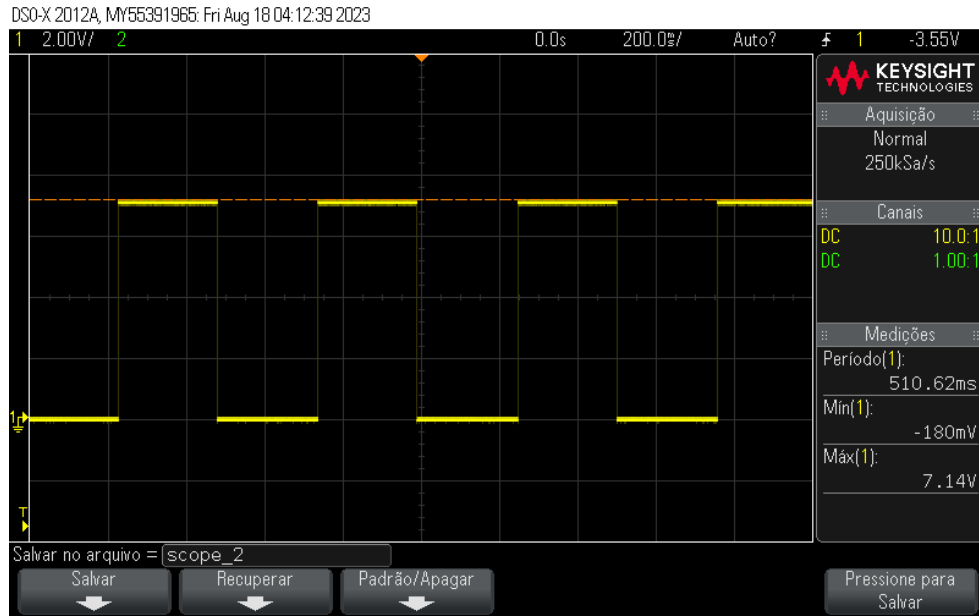


Figura 9: Medição de  $V_{R5}(t)$  vista no osciloscópio para três períodos.

Da imagem obtemos os seguintes dados:

$$\begin{aligned}
V_{m1} &= -180mV \\
V_{m2} &= 7.14V \\
T &= 510.61ms \\
kT &= 255.3ms
\end{aligned}
\tag{27}$$

## 3.2 Exemplo 2

### 3.2.1 Componentes

$$\begin{aligned}
R_1 &= 118950\Omega \\
R_2 &= 46890\Omega \\
R_3 &= 17752\Omega \\
R_4 &= 21914\Omega \\
R_5 &= 551.1\Omega \\
C &= 101.16nF
\end{aligned}
\tag{28}$$

### 3.2.2 $V_o(t)$

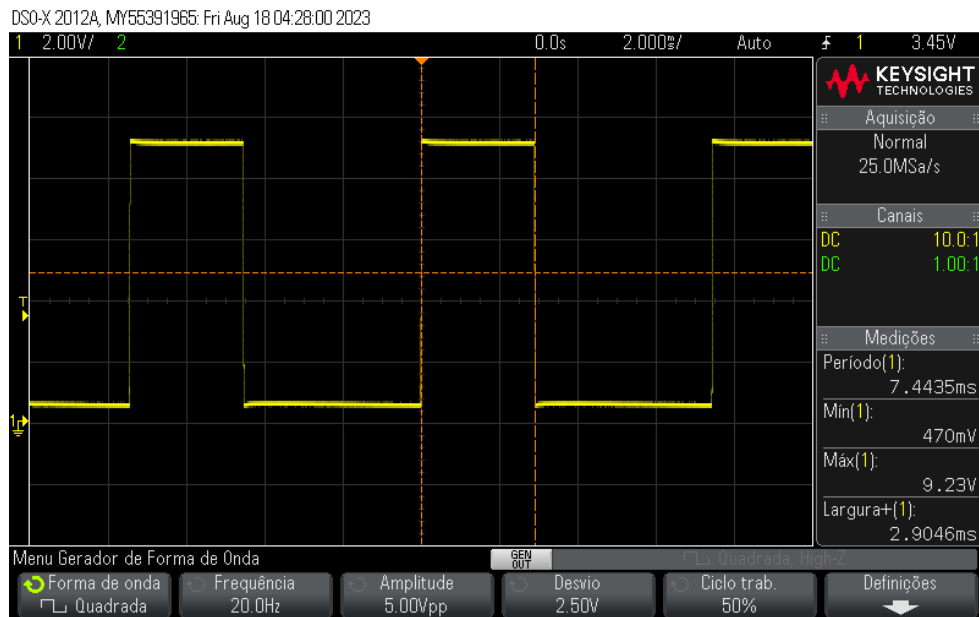


Figura 10: Medição de  $V_o(t)$  vista no osciloscópio para três períodos.

Da imagem obtemos os seguintes dados:

$$V_{m1} = 470mV$$

$$V_{m2} = 9.23V$$

$$T = 7.4435ms$$

$$kT = 2.9ms$$

(29)

### 3.2.3 $V_c(t)$

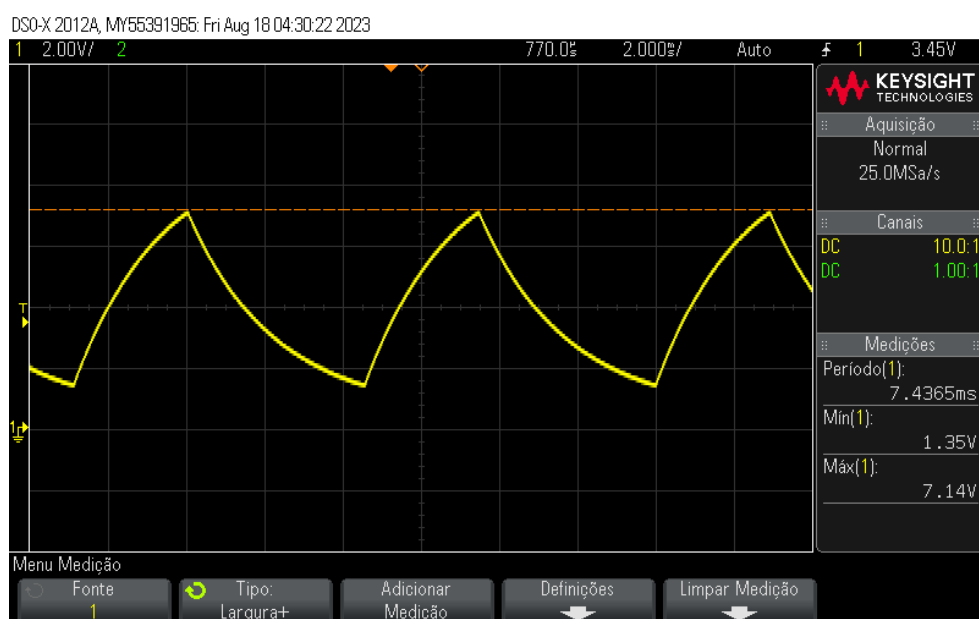


Figura 11: Medição de  $V_c(t)$  vista no osciloscópio para três períodos.

Da imagem obtemos os seguintes dados:

$$\begin{aligned}
V_{m1} &= 1.35V \\
V_{m2} &= 7.14V \\
T &= 7.4365ms \\
kT &= 2.91ms
\end{aligned}
\tag{30}$$

O valor do  $kT$  foi obtido a partir de uma imagem que não se encontra aqui no relatório, ela está na pasta "images" que foi enviada junto com o relatório.

#### 3.2.4 $V_{R5}(t)$

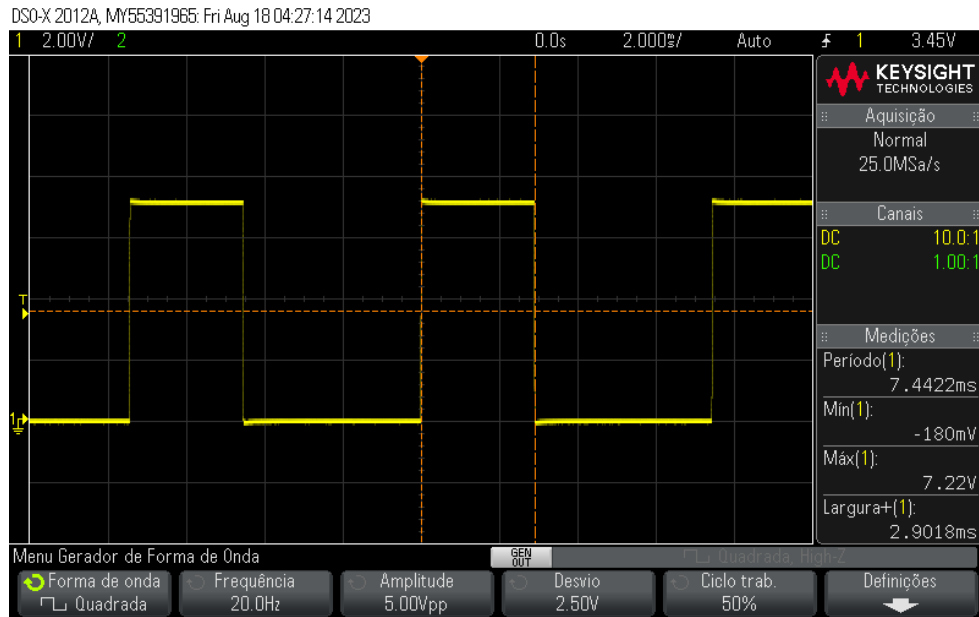


Figura 12: Medição de  $V_{R5}(t)$  vista no osciloscópio para três períodos.

Da imagem obtemos os seguintes dados:

$$\begin{aligned}
V_{m1} &= -180mV \\
V_{m2} &= 7.22V \\
T &= 7.4422ms \\
kT &= 2.9018ms
\end{aligned}
\tag{31}$$

## 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 Exemplo 1

No Exemplo 1, obtemos o  $V_{D0}$  medindo as tensões sobre  $R_5$  e  $V_o$  no caso em que o LED está ligado, ou seja:

$$V_{D0} = V_{om2} - V_{R5m2} = 9.22V - 7.14V = 2.08V \quad (32)$$

Utilizando os valores de  $V_{m1}$ ,  $V_{m2}$  e o novo  $V_{D0}$ , procedemos ao recálculo dos seguintes parâmetros:

- $T = 515.8ms$
- $k = 0.501$
- $V_1 = 4.313V$
- $V_2 = 5.39V$
- $I_L = 12.95mA$

Com esses dados em mãos, é possível realizar uma comparação com os valores obtidos experimentalmente:

Medidas	Experimental	Numerico
$T$	$510.62ms$	$515.8ms$
$k$	$0.5$	$0.501$
$V_1$	$4.31V$	$4.313V$
$V_2$	$5.4V$	$5.39V$
$I_L$	$12.95mA$	$12.95mA$

Ao analisar os resultados, é notável que os valores obtidos após o recálculo se aproximam consideravelmente dos valores obtidos por meio de experimentação prática. Essa proximidade indica que a montagem do circuito foi executada de forma consistente e precisa, demonstrando a integridade das medições realizadas.

### 4.2 Exemplo 2

No Exemplo 1, obtemos o  $V_{D0}$  medindo as tensões sobre  $R_5$  e  $V_o$  no caso em que o LED está ligado, ou seja:

$$V_{D0} = V_{om2} - V_{R5m2} = 9.23V - 7.22V = 2.01V \quad (33)$$

Utilizando os valores de  $V_{m1}$ ,  $V_{m2}$  e o novo  $V_{D0}$ , procedemos ao recálculo dos seguintes parâmetros:

- $T = 6.6ms$
- $k = 0.398$
- $V_1 = 1.38V$
- $V_2 = 7.12V$
- $I_L = 13.1mA$

Com esses dados em mãos, é possível realizar uma comparação com os valores obtidos experimentalmente:

Medidas	Experimental	Numerico
$T$	$7.4422ms$	$6.6ms$
$k$	0.39	0.398
$V_1$	$1.35V$	1.38
$V_2$	$7.14V$	7.12
$I_L$	$13.1mA$	$13.1mA$

Ao analisar os resultados, é notável que os valores obtidos após o recálculo se aproximam consideravelmente dos valores obtidos por meio de experimentação prática. Essa proximidade indica que a montagem do circuito foi executada de forma consistente e precisa, demonstrando a integridade das medições realizadas.

## 5 Conclusões

Conclui-se que o experimento foi realizado com sucesso, pois os resultados obtidos experimentalmente foram compatíveis com os resultados obtidos numericamente. Além disso, foi possível observar o funcionamento do circuito e a influência dos componentes na forma de onda de saída.

No decorrer deste experimento, a principal dificuldade manifestou-se na análise teórica, particularmente na resolução de equações diferenciais. Ademais, a montagem do circuito também foi ligeiramente dificultada pela falta de familiaridade com a identificação de componentes problemáticos, o que acabou limitando o tempo de montagem efetiva.