

Terceiro Relatório de Lab de Eletrônica 1

Henrique da Silva
henrique.pedro@ufpe.br

27 de agosto 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	
4.1.1	Gráficos	
4.1.2	Mínimos e máximos	
4.2	Exemplo 2	
4.2.1	Gráficos	
4.2.2	Mínimos e máximos	

5 Conclusões

6 Apêndice

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/

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

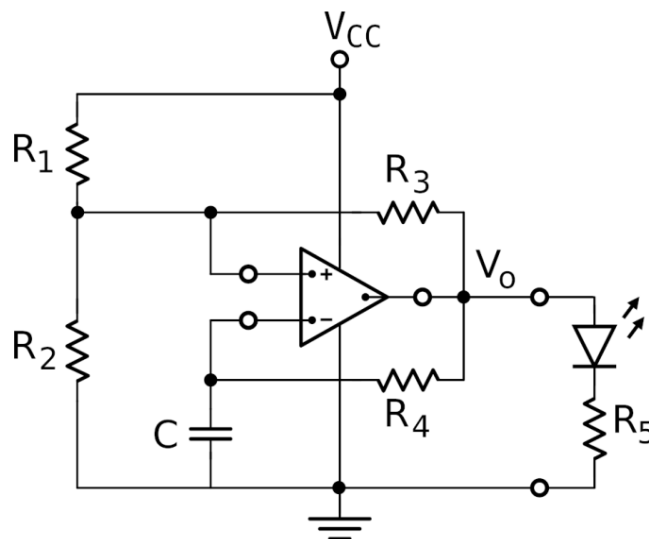


Figura 1: Oscilador astável com LED.

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

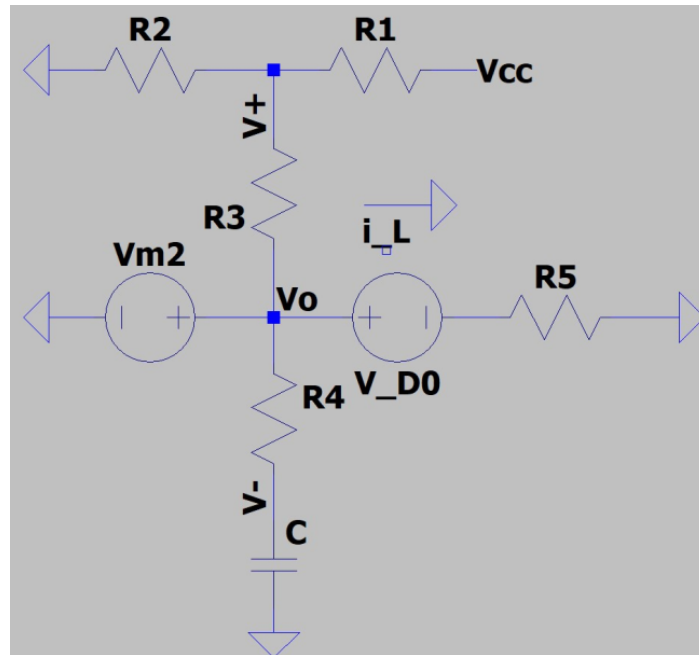


Figura 2: Amp op ligado, diodo polarizado diretamente.

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. Então o analisaremos e resolveremos as equações 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

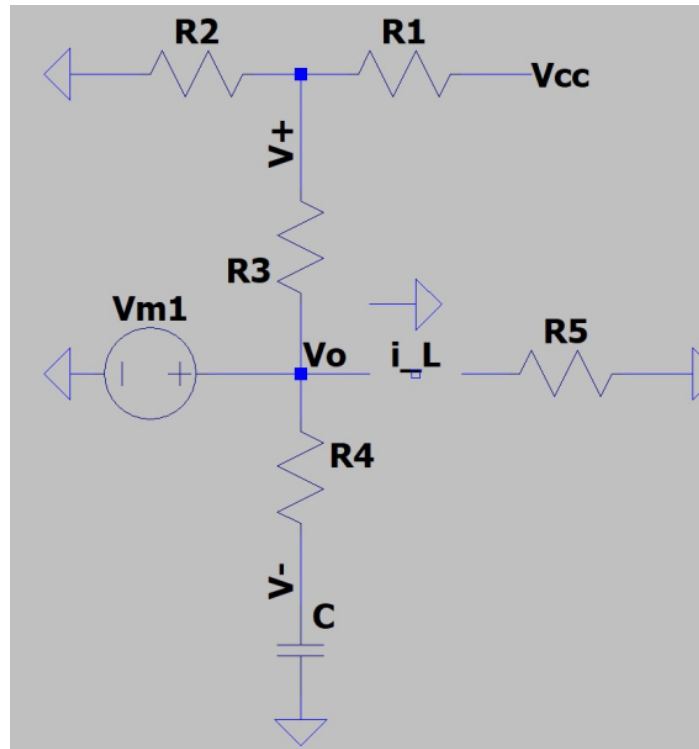


Figura 3: Amp op desligado, diodo polarizado inversamente.

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

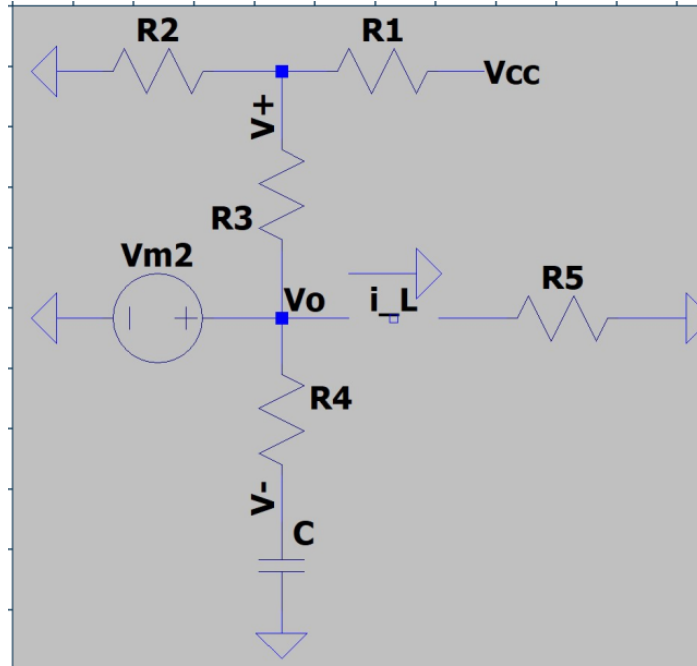


Figura 4: Amp op ligado, diodo polarizado inversamente.

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

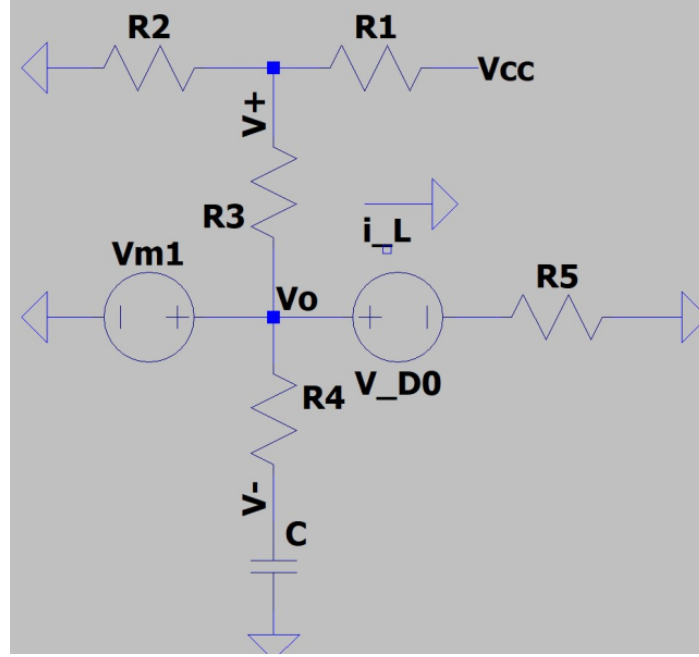


Figura 5: Amp op ligado, diodo polarizado inversamente.

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:

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

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

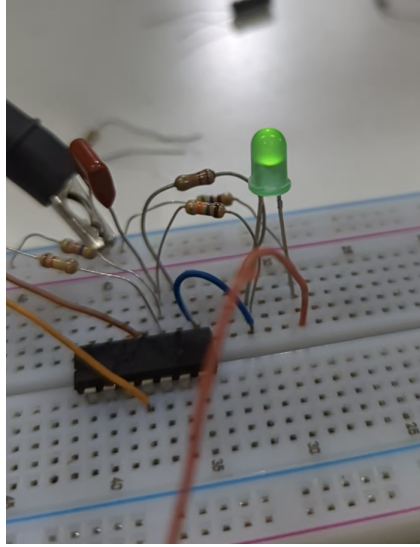


Figura 6: Imagem do circuito montado em laboratório.

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

$$\begin{aligned}R_1 &= 14890\Omega \\R_2 &= 11758\Omega \\R_3 &= 46890\Omega \\R_4 &= 100380\Omega \\R_5 &= 551.1\Omega \\C &= 10.4nF\end{aligned}\tag{24}$$

3.1.2 $V_o(t)$

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 $V_c(t)$

Da imagem obtemos os seguintes dados:

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

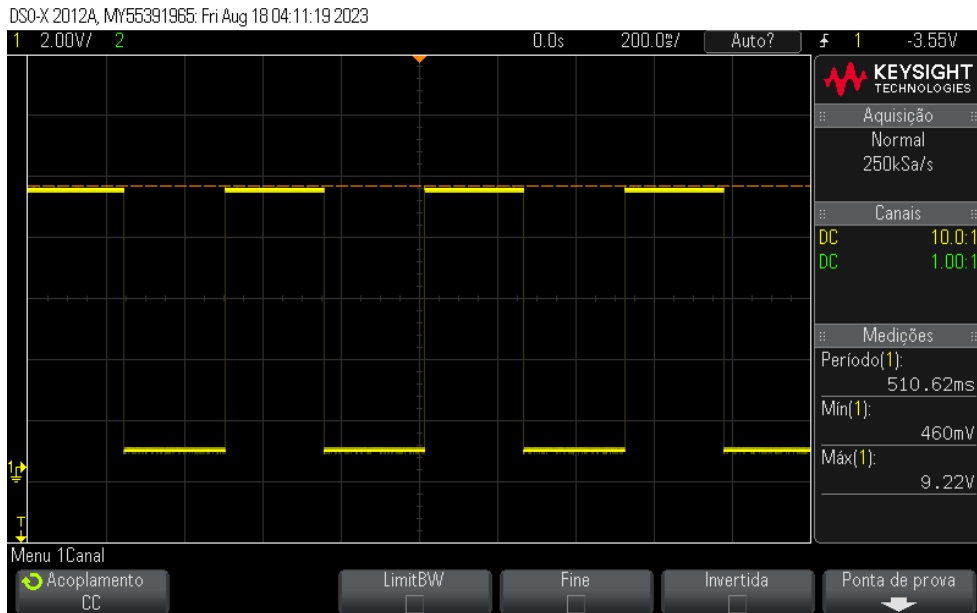


Figura 7: Medição de $V_o(t)$ vista no osciloscópio para três períodos.

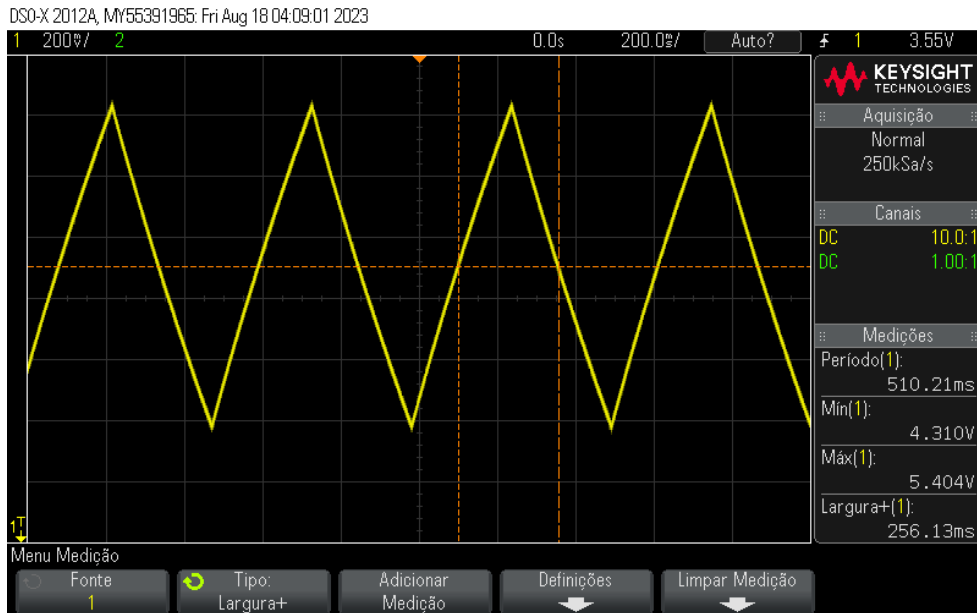


Figura 8: Medição de $V_c(t)$ vista no osciloscópio para três períodos.

3.1.4 $V_{R5}(t)$

Da imagem obtemos os seguintes dados:

$$V_{m1} = -180mV$$

$$V_{m2} = 7.14V$$

$$T = 510.61ms$$

$$kT = 255.3ms$$

(27)

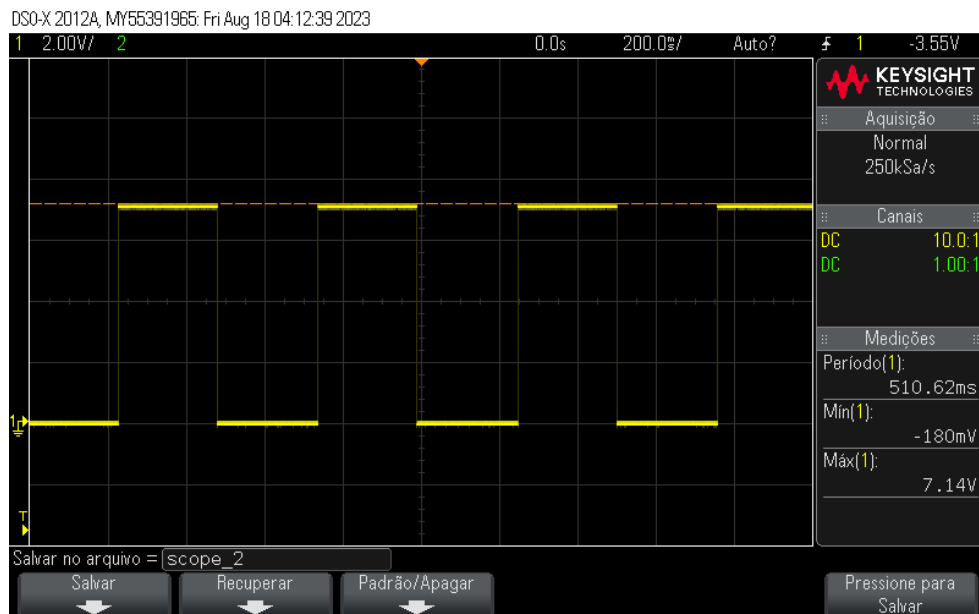


Figura 9: Medição de $V_{R5}(t)$ vista no osciloscópio para três períodos.

3.2 Exemplo 2

3.2.1 Componentes

$$R_1 = 118950\Omega$$

$$R_2 = 46890\Omega$$

$$R_3 = 17752\Omega$$

$$R_4 = 21914\Omega$$

$$R_5 = 551.1\Omega$$

$$C = 101.16nF$$

(28)

3.2.2 $V_o(t)$

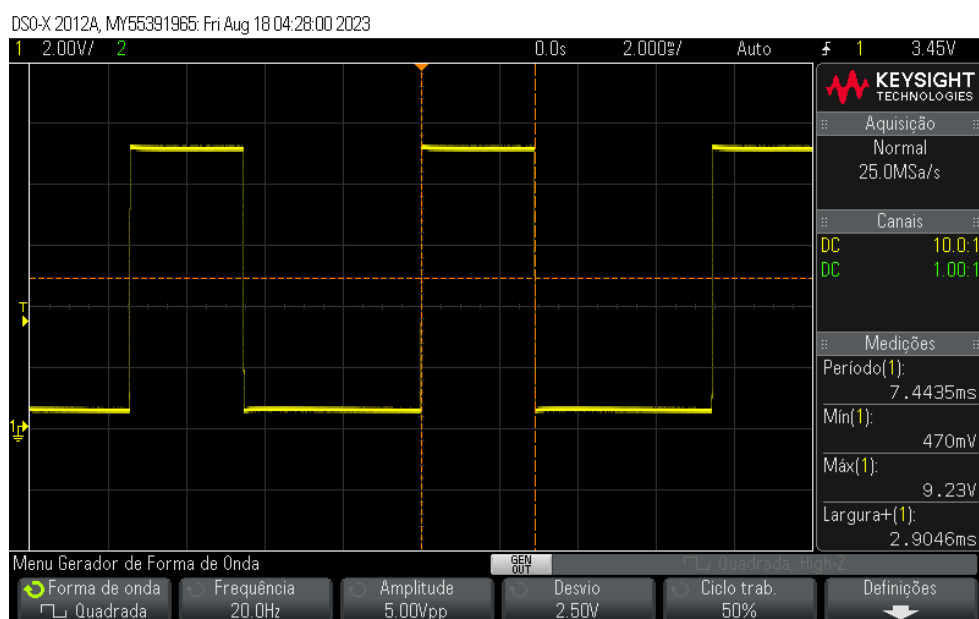


Figura 10: Medição de $V_o(t)$ vista no osciloscópio para três períodos.

Da imagem obtemos os seguintes dados:

$$\begin{aligned}
V_{m1} &= 470mV \\
V_{m2} &= 9.23V \\
T &= 7.4435ms \\
kT &= 2.9ms
\end{aligned}
\tag{29}$$

3.2.3 $V_c(t)$

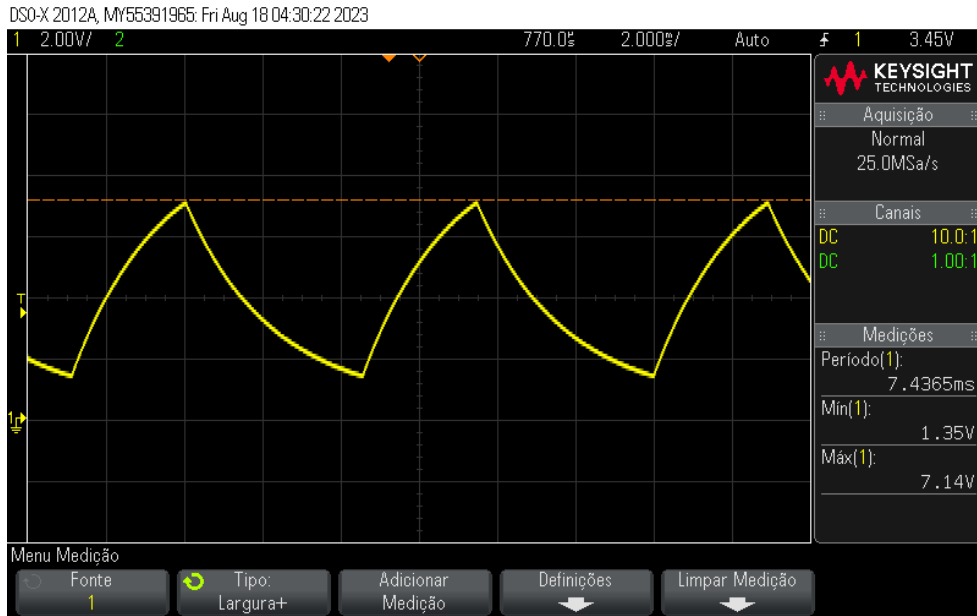


Figura 11: Medição de $V_c(t)$ vista no osciloscópio para três períodos.

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 $V_{R5}(t)$

Da imagem obtemos os seguintes dados:

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

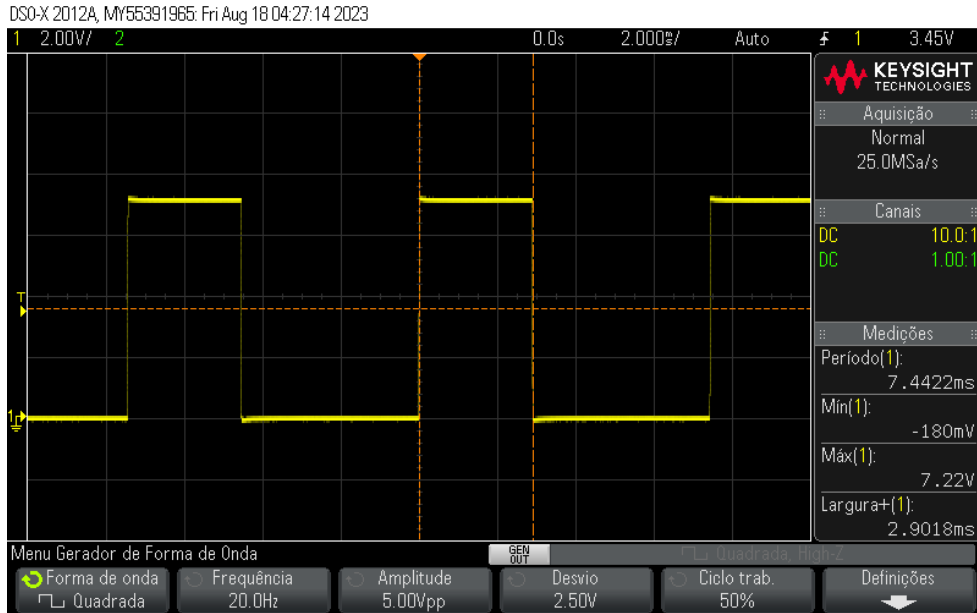


Figura 12: Medição de $V_{R5}(t)$ vista no osciloscópio para três períodos.

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 $V_{D0} = V_{o_{m2}} - V_{R5_{m2}} = 9.22V - 7.14V = 2.08V$. $a = 0.77880078307$, $b = 0.77880078307$

$$\begin{aligned} V_1 &= 4.29533385224041V \\ V_2 &= 5.384666147759594V \\ I_L &= 12.95mA \\ T &= \\ k &= \end{aligned} \quad (32)$$

4.1.1 Gráficos

Ao comparar os gráficos do exemplo 1 experimental (Figura ??) com o exemplo 1 numérico (Figura ??), observa-se notáveis semelhanças. Em ambos os casos, a tensão mínima é grampeada aproximadamente na tensão de polarização do diodo, enquanto a tensão máxima permanece fixa em cerca de $9.5V$, resultando em uma forma de onda quadrada. Essa concordância entre os resultados experimental e numérico indica que o circuito se comporta conforme o previsto, fortalecendo a validade das análises teóricas.

4.1.2 Mínimos e máximos

Ao comparar os valores de tensão mínima e máxima obtidos experimentalmente (Figura ??) com os valores obtidos numericamente (??), é possível observar que os valores são bastante semelhantes, porém não exatamente iguais. Essa diferença pode ser atribuída a fatores como variações nos valores dos componentes utilizados no experimento em relação aos valores simulados, presença de ruídos no sinal de saída provenientes de interferências eletromagnéticas ou erros de medição. Além disso, é importante considerar que a tensão de polarização do diodo pode ter apresentado ligeiras variações ao longo do experimento, o que também contribui para a discrepância entre os valores de tensão máxima observados.

4.2 Exemplo 2

O exemplo 2 foi analisado com a presença do resistor $R = 4.7K\Omega$.

4.2.1 Gráficos

Ao comparar os gráficos do exemplo 2 experimental (Figura 3.1.2) com o exemplo 1 numérico (Figura ??), observa-se notáveis semelhanças. Em ambos os casos, a tensão mínima é grampeada aproximadamente na tensão de polarização do diodo, enquanto a tensão máxima permanece fixa em cerca de $9.5V$, resultando em uma forma de onda quadrada. Essa concordância entre os resultados experimental e numérico indica que o circuito se comporta conforme o previsto, fortalecendo a validade das análises teóricas.

4.2.2 Mínimos e máximos

Ao comparar os valores de tensão mínima e máxima obtidos experimentalmente (Figura ??) com os valores obtidos numericamente (?? e ??), é possível observar que os valores são bastante semelhantes, porém não exatamente iguais. Essa diferença pode ser atribuída a fatores como variações nos valores dos componentes utilizados no experimento em relação aos valores simulados, presença de ruídos no sinal de saída provenientes de interferências eletromagnéticas ou erros de medição. Além disso, é importante considerar que a tensão de polarização do diodo pode ter apresentado ligeiras variações ao longo do experimento, o que também contribui para a discrepância entre os valores de tensão máxima observados.

5 Conclusões

Conclui-se que, ao analisar os resultados obtidos, o primeiro exemplo, em que se utilizou um resistor R , apresentou um comportamento consistente com o de um grampeador de tensão. Isso foi evidenciado pela limitação da amplitude da tensão de saída mínima a um valor pré-determinado, independentemente das variações na tensão de entrada. Por outro lado, no segundo exemplo, em que se simulou uma resistência infinita, o circuito não se comportou como um grampeador de tensão, uma vez que não houve a limitação da amplitude mínima da tensão de saída. Essa análise reforça a importância do componente resistivo na operação de um grampeador de tensão e destaca a influência desse elemento na funcionalidade do circuito.

Também é importante mencionar que o experimento foi realizado com êxito, graças às ferramentas de análise disponíveis. As medições em laboratório e as simulações numéricas forneceram resultados confiáveis e contribuíram significativamente para a compreensão do comportamento do circuito.

6 Apêndice

Abaixo se encontra o código utilizado para a análise numérica do circuito.

```
import matplotlib.pyplot as plt
import sympy as smp
from sympy import *
import numpy as np

# j = smp.symbols('j', imaginary=True)

# Vo, Vi, Vm, V_CO, V_DO, R_m, C, t, R, Vc = smp.symbols(
#     'V_o V_i V_m V_CO V_DO R_m C t R V_c', real=True)

def updateEqs(Vm, V_CO, V_DO, R_m, C, t, R):
    Vo1 = ((V_CO + Vm + V_DO) * np.exp(-t/(R_m * C))) - V_DO
    Vc1 = (V_CO + Vm + V_DO) * np.exp(-t/(R_m * C)) - Vm - V_DO
    Vo2 = (V_CO + Vm) * np.exp(-t/(R * C))
    Vc2 = (V_CO + Vm) * np.exp(-t/(R * C)) - Vm
    return Vo1, Vc1, Vo2, Vc2

# Vo1, Vc1, Vo2, Vc2 = updateEqs(Vm, V_CO, V_DO, R_m, C, t, R)

# estado 1: Vm + Vc0 < - Vd0
# estado 2: Vm + Vc0 > - Vd0

# Exemplo 2

R = float("inf")
# R = 4.7E3
Vm = 5

# Dados
V_DO = 0.5
C = 100E-9
R_m = 330
V_CO = 0

Ts = 500E-6
step = 1E-7
temp = 0

intervalos_tempo = np.arange(0, 10*Ts + step, step)
valores_de_Vo = []
valores_de_Vc = []

for t in intervalos_tempo:
    temp += step
    if temp >= Ts/2:
        Vm = -Vm
        temp = 0

Vo1, Vc1, Vo2, Vc2 = updateEqs(Vm, V_CO, V_DO, R_m, C, step, R)

if (Vm + V_CO) < -V_DO: # estado 1
    Vo = Vo1
    Vc = Vc1
else: # estado 2
    Vo = Vo2
    Vc = Vc2
```

```

valores_de_Vo.append(Vo)
valores_de_Vc.append(Vc)
V_CO = Vc

# smp.pprint(Vo)

# Plotando os graficos

plotH1 = valores_de_Vo
plotH2 = valores_de_Vc

fig, ax = plt.subplots()

ax.plot(intervalos_tempo, plotH1, color='blue', label='Exemplo 1')
ax.plot(intervalos_tempo, plotH2, color='orange', label='Exemplo 2')
ax.legend(['Vo', 'Vc'])
plt.xlabel('Tempo (s)')
plt.ylabel('Tensao (V)')
plt.title('Grafico de $V_o(t)$ no intervalo de 0 a $10 \cdot T_s$')
plt.show()

print(min(valores_de_Vo))
print(max(valores_de_Vo))

```