

Segundo Relatório de Lab de Eletrônica 1

Henrique da Silva
henrique.pedro@ufpe.br

16 de julho de 2023

Sumário

1 Introdução

2 Análise preliminar

2.1	O circuito	
2.2	Análise simbólica	
2.2.1	Estado 1: Polarização direta	
2.2.2	Estado 2: Polarização reversa	
2.3	Análise numérica	
2.4	Exemplo 1	
2.4.1	Regime permanente	
2.4.2	Mínimos e máximos.	
2.4.3	Gráfico	
2.5	Exemplo 2	
2.5.1	Regime permanente	
2.5.2	Mínimos e máximos	
2.5.3	Gráfico	

3 Medições em laboratório

3.1	Buffer de corrente	
3.2	Componentes	
3.3	Exemplo 1	
3.3.1	Gráfico de $V_o(t)$	
3.3.2	Mínimos e máximos.	
3.4	Exemplo 2	
3.4.1	Gráfico de $V_o(t)$	
3.4.2	Mínimos e máximos.	

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, descreveremos o experimento realizado para analisar um circuito conhecido como "grampeador de tensão". O circuito utiliza um diodo e um capacitor para fixar o valor mínimo de tensão em 0 V. Realizamos uma análise teórica e simulações computacionais, seguidas pela montagem prática do circuito em uma protoboard e medições de tensão de saída. O objetivo é aprofundar nosso conhecimento sobre circuitos com diodos e aplicar técnicas de análise teórica e prática em eletrônica.

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, considera-se o comportamento não linear do diodo e a capacidade de armazenamento do capacitor. Determina-se as equações que descrevem a relação entre a tensão de entrada e a tensão de saída do circuito, levando em conta os parâmetros do diodo e do capacitor. Com essas equações permite-se compreender como o circuito "grampeia" a tensão mínima em 0 V e como a forma e amplitude da onda de entrada afetam a tensão de saída.

2.1 O circuito

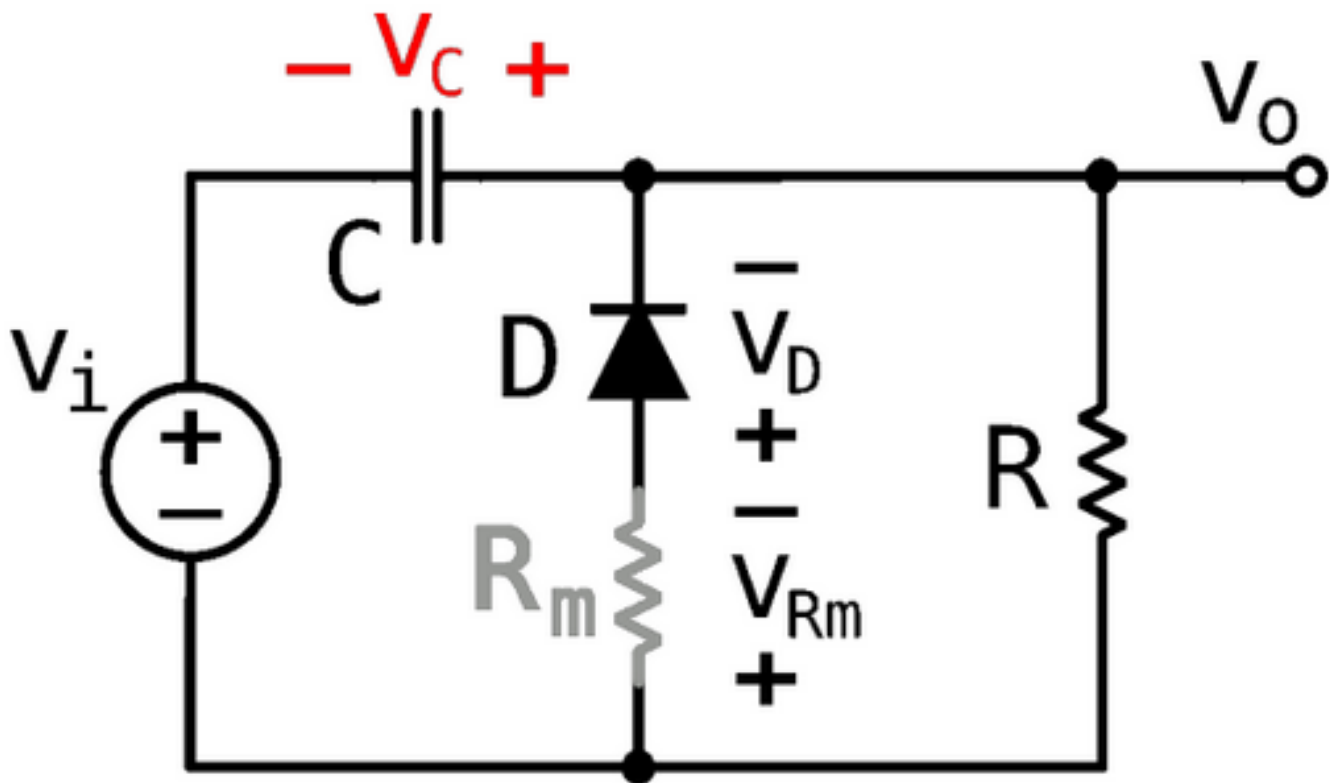


Figura 1: Circuito com diodo em configuração de grampeador.

2.2 Análise simbólica

A análise é conduzida, examinando-se cada estado do diodo separadamente. O processo tem início com o diodo polarizado diretamente, seguido pelo diodo polarizado reversamente.

2.2.1 Estado 1: Polarização direta

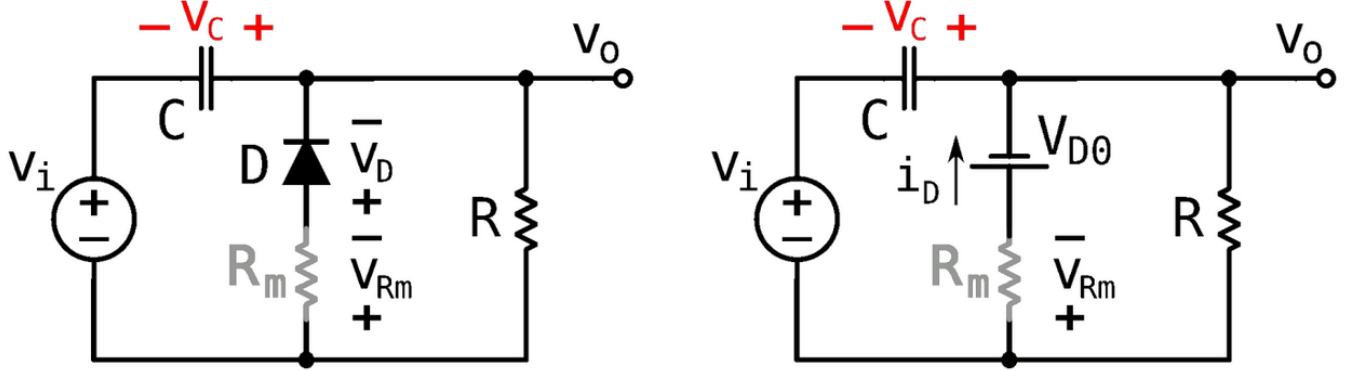


Figura 2: Circuito grampeador de tensão em configuração de polarização direta.

Esse estado é alcançado quando o diodo está "ligado".
Nesse caso, existem restrições.

$$\begin{aligned} I_d &> 0 \\ V_d &= V_{D0} \end{aligned} \quad (1)$$

A lei de Kirchhoff é aplicada ao nó denominado V_o .

$$\frac{V_o}{R} + \frac{V_o - (-V_{D0})}{R_m} + C \frac{dV_c}{dt} = 0 \quad (2)$$

Observa-se que:

$$V_c = V_o - V_i \quad (3)$$

$$\frac{dV_c}{dt} + \left(\frac{1}{R_m} + \frac{1}{R} \right) \frac{V_o}{C} = -\frac{V_{D0}}{R_m C} \quad (4)$$

A equação é rearranjada:

$$\frac{dV_c}{dt} + \left(\frac{1}{R_m} + \frac{1}{R} \right) \frac{V_o}{C} = -\frac{V_{D0}}{R_m C} \quad (5)$$

Como V_c é igual a $V_o - V_i$, obtém-se:

$$\frac{dV_o}{dt} + \frac{1}{C} \left(\frac{1}{R_m} + \frac{1}{R} \right) V_o = \frac{dV_i}{dt} - \frac{V_{D0}}{R_m C} \quad (6)$$

A condição inicial para V_o em função de $V_{C0} = v(t=0)$ é dada por $V_o(0) = V_{C0} + V_i$.

Nesta prática, são feitas duas premissas:

- $R_m \ll R$.
- V_i é uma onda quadrada com amplitude $\pm V_m$ e período T_s .

A partir da primeira premissa, obtém-se:

$$\frac{1}{R_m} + \frac{1}{R} \approx \frac{1}{R_m} \quad (7)$$

E da segunda premissa, durante as transições entre $\pm V_m$, tem-se:

$$\frac{dV_i}{dt} = 0 \quad (8)$$

Pode-se então simplificar a equação 6 da seguinte forma:

$$\frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{R_m C} = - \frac{V_{D0}}{R_m C} \quad (9)$$

Com a condição inicial: $V_o(t = 0^+) = V_{C0} \pm V_m$.

A solução da equação diferencial 9 é dada pela soma da solução particular e da solução homogênea, como segue:

$$\frac{dV_{oH}}{dt} + \frac{dV_{oH}}{dR_m C} = 0 \quad \text{Parte homogenea}$$

$$V_{oH}(t) = K e^{-\frac{t}{R_m C}} \quad \text{Solucao generica}$$

Com K determinado pelas condições iniciais.

Por substituição, determina-se que uma solução particular pode ser obtida por:

$$V_{oP}(t) = -V_{D0} \quad (10)$$

Assim, tem-se a solução completa como:

$$V_o(t) = K e^{-\frac{t}{R_m C}} - V_{D0} \quad \text{Solucao completa}$$

Como a condição inicial é $V_o(0) = V_{C0} \pm V_m$, a solução completa é dada por:

$$V_o(t) = (V_{C0} \pm V_m + V_{D0}) e^{-\frac{t}{R_m C}} - V_{D0} \quad (11)$$

Como $V_c = V_o - V_i$, temos a seguinte solução para $V_c(t)$:

$$V_c(t) = (V_{C0} \pm V_m + V_{D0}) e^{-\frac{t}{R_m C}} \mp V_m - V_{D0} \quad (12)$$

Dessa forma, obtém-se a constante de tempo $\tau_1 = R_m C$.

Das restrições desse estado, tem-se que:

$$I_D = \frac{V R_m}{R_m} = - \frac{V_i + V_c + V_{D0}}{R_m} > 0 \quad (13)$$

Logo:

$$V_i + V_c < -V_{D0} \quad (14)$$

Com base nisso, as equações que regem as tensões V_c (Equação 12) e V_o (Equação 11) no estado 1 são obtidas.

2.2.2 Estado 2: Polarização reversa

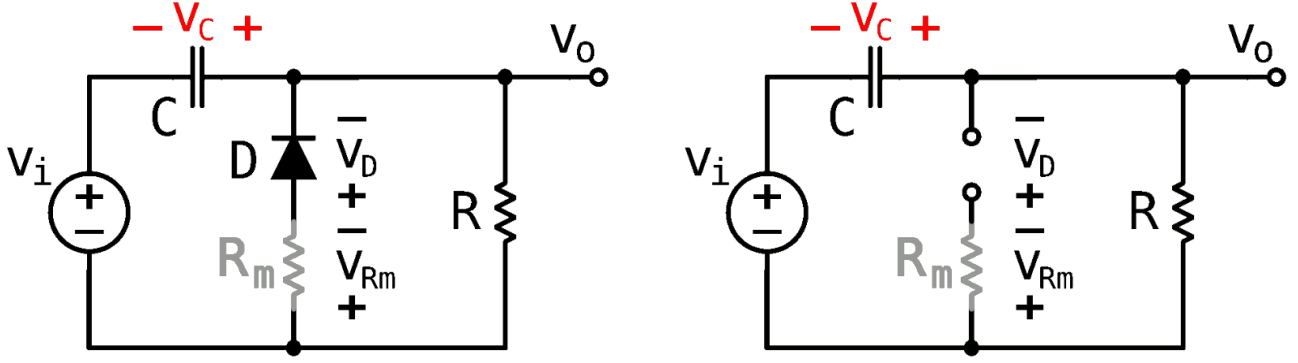


Figura 3: Circuito grampeador de tensão em configuração de polarização reversa.

Esse estado é alcançado quando o diodo está "desligado".
Nesse caso, existem restrições.

$$\begin{aligned} V_D &< V_{D0} \\ I_D &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

Nesse estado, observa-se que é um simples circuito RC com a tensão de saída medida sobre o resistor R.

Observa-se que $V_r = -R_{ic} = -RC \frac{dV_c}{dt}$, e a equação que governa o circuito é dada por:

$$V_i + V_c + RC \frac{dV_c}{dt} = 0 \quad (16)$$

Considerando que $V_c = V_o - V_i$, podemos concluir que:

$$V_o = -RC \left(\frac{dV_o}{dt} - \frac{dV_i}{dt} \right) \quad (17)$$

Isso pode ser rearranjado em:

$$\frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{RC} = \frac{dV_i}{dt} \quad (18)$$

A entrada V_i é uma onda quadrada, o que implica que $\frac{dV_i}{dt} = 0$, simplificando assim a equação para:

$$\frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{RC} = 0 \quad (19)$$

A condição inicial é $V_o(t = 0^+) = \pm V_m + V_{C0}$.

Portanto, a solução para V_o é:

$$V_o(t) = (\pm V_m + V_{C0}) e^{\frac{-t}{RC}} \quad (20)$$

Como $V_c = V_o - V_i$, temos a seguinte solução para $V_c(t)$:

$$V_c(t) = (\pm V_m + V_{C0}) e^{\frac{-t}{RC}} \mp V_m \quad (21)$$

Dessa forma, obtém-se a constante de tempo $\tau_2 = RC$.

Como $R_m \ll R$, pode-se observar que $\tau_1 \ll \tau_2$.

Considerando a restrição do estado 2, tem-se que:

$$V_D = -V_i - V_c < -V_{D0} \quad (22)$$

Logo:

$$V_i + V_c > -V_{D0} \quad (23)$$

Isso nos leva a concluir que o comportamento nesse estado é aproximadamente:

$$V_o(t) = (\pm V_m + V_{C0})e^{\frac{-t}{RC}} \quad (24)$$

O circuito estará nesse estado se:

$$V_i + V_c > -V_{D0} \quad (25)$$

Dessa forma, são estabelecidas as duas equações que regem esse estado, representadas por 21 e 24.

2.3 Análise numérica

Utilizando as equações 11, 12, 21 e 24, foi desenvolvida uma simulação do comportamento do circuito em Python. O código correspondente está apresentado no apêndice 6.

No código, as equações que regem o circuito são alteradas de acordo com o estado da tensão de entrada. Em seguida, é feita uma iteração ao longo de um intervalo de tempo especificado, com os resultados sendo armazenados em listas. Isso permite gerar gráficos que ilustram o comportamento do capacitor e a saída do circuito ao longo do tempo. Essa abordagem permite uma análise mais detalhada e visual do circuito em diferentes condições e configurações.

Com base nisso, foram analisados dois circuitos que possuem os mesmos valores de capacitância ($C = 100nF$), resistência de carga reversa ($R_m = 330\Omega$) e tensão de ruptura do diodo ($V_D = 0.5V$). Esses circuitos foram submetidos a uma entrada no formato de onda quadrada, com amplitude de $\pm 5V$ e período de 0.5 segundos.

A única diferença entre os exemplos é o valor da resistência (R).

2.4 Exemplo 1

Neste exemplo, o circuito utiliza um resistor R com resistência infinita, ou seja um circuito aberto. Assume-se que o capacitor está inicialmente descarregado e que a tensão de entrada V_i começa com um valor de 5V.

2.4.1 Regime permanente

Para obter as expressões para $V_o(t)$, faz-se a análise do comportamento do circuito quando t tende ao infinito em cada estado.

$$V_o = -V_{D0} \quad \text{Estado 1}$$

$$V_o = V_{C0} + V_m \quad \text{Estado 2}$$

2.4.2 Mínimos e máximos.

Esses valores foram obtidos por meio de análise numérica e são apresentados na Tabela 26.

$$\begin{aligned} \text{Minimo} &= -0.5V \\ \text{Maximo} &= 9.5V \end{aligned} \quad (26)$$

2.4.3 Gráfico

O circuito em análise funciona como um grampeador de tensão, limitando a amplitude da tensão de saída mínima a um valor pré-determinado, independentemente das variações na tensão de entrada.

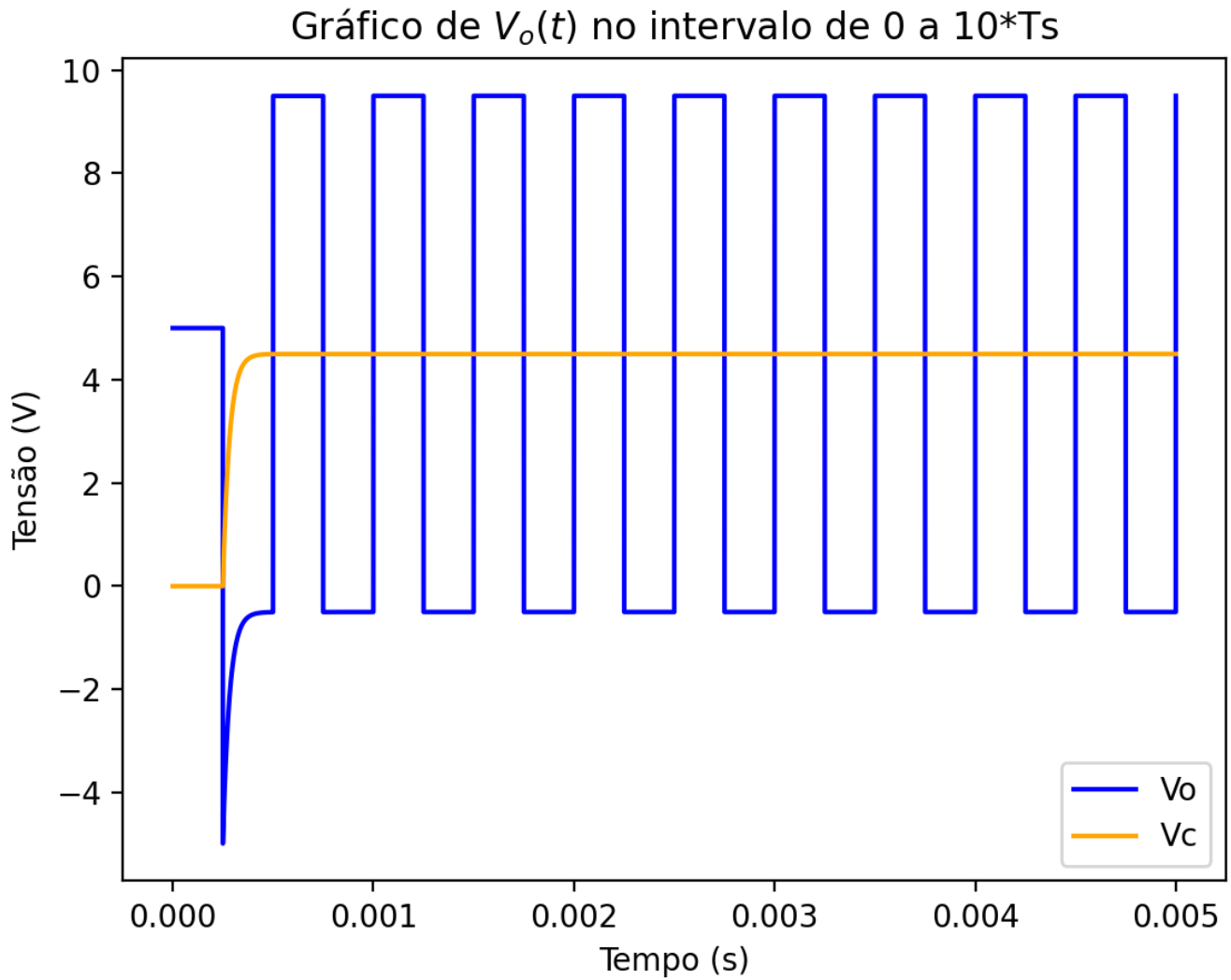


Figura 4: Gráfico que representa as curvas de tensão de saída V_o e do capacitor V_c do Exemplo 1.

2.5 Exemplo 2

Neste exemplo, o circuito utiliza um resistor R com resistência $4.7K\Omega$. Assume-se que o capacitor está inicialmente descarregado e que a tensão de entrada V_i começa com um valor de $5V$.

2.5.1 Regime permanente

Para obter as expressões para $V_o(t)$, faz-se a análise do comportamento do circuito quando t tende ao infinito em cada estado.

$$V_o = -V_{D0} \quad \text{Estado 1}$$

$$V_o = 0 \quad \text{Estado 2}$$

2.5.2 Mínimos e máximos

Esses valores foram obtidos por meio de análise numérica e são apresentados na Tabela Estado 1 e Estado 2.

$$\begin{aligned} \text{Minimo} &= -4.41V \\ \text{Maximo} &= -0.55V \end{aligned} \quad \text{Estado 1}$$

$$Minimo = 5.58V$$

$$Maximo = 9.5V$$

Estado 2

2.5.3 Gráfico

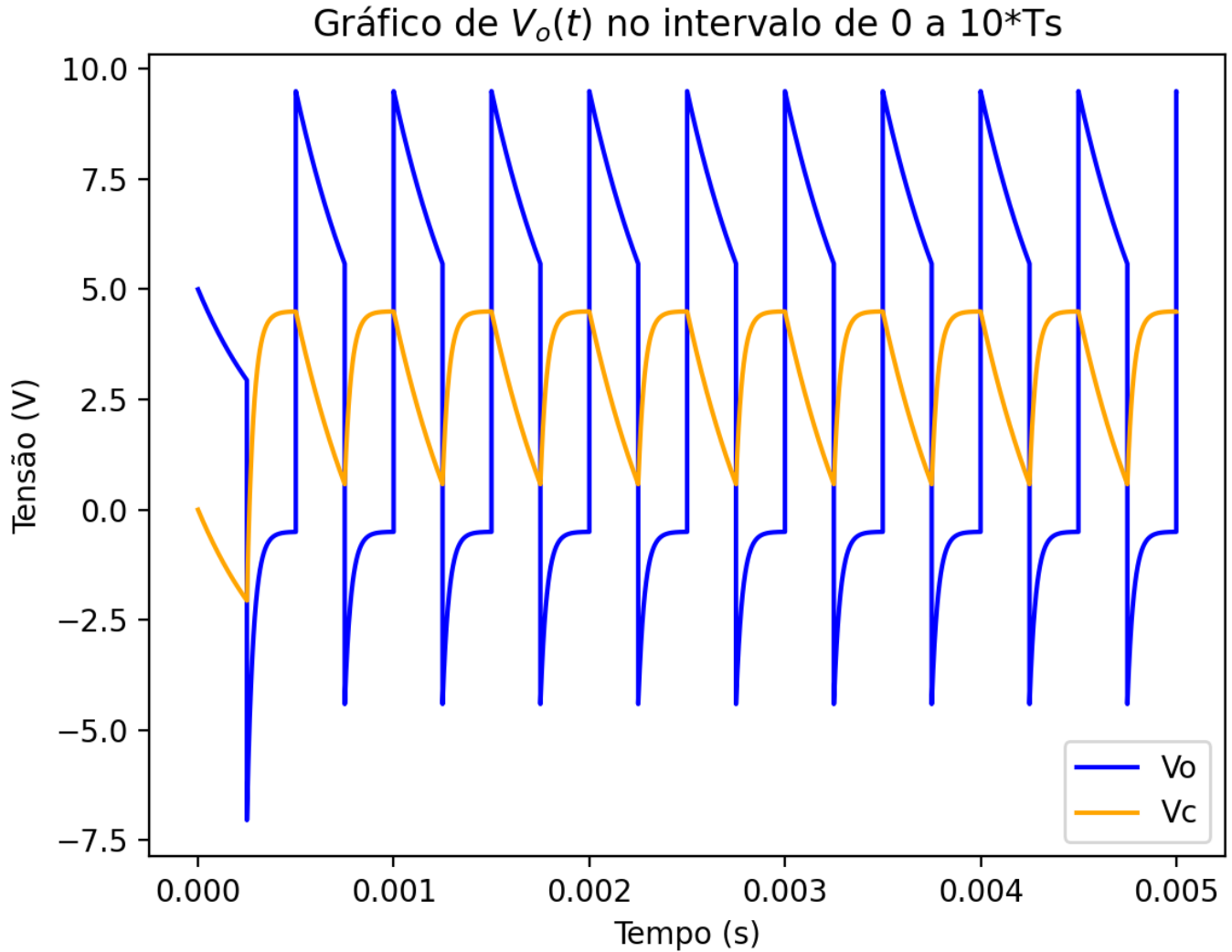


Figura 5: Gráfico que representa as curvas de tensão de saída V_o e do capacitor V_c do Exemplo 2.

O circuito em questão não se comporta como um grampeador de tensão, pois não limita a tensão mínima a zero, o que significa que a tensão de saída pode atingir valores negativos ou permanecer em níveis não desejados durante certas condições de operação.

3 Medições em laboratório

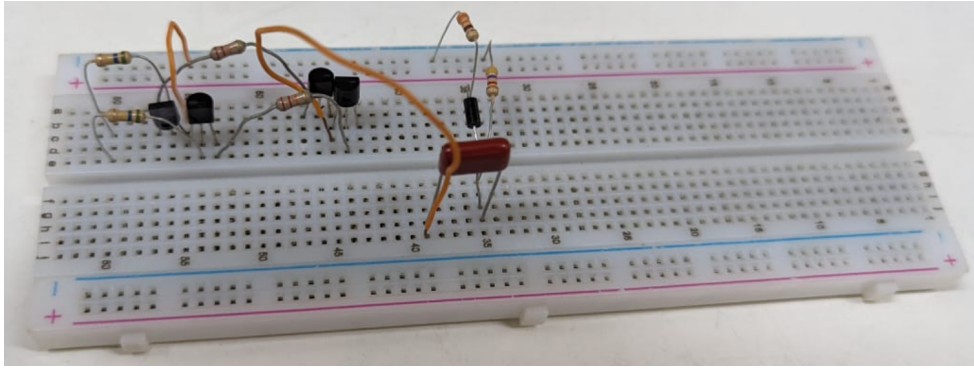


Figura 6: Imagem do circuito montado em laboratório.

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 Buffer de corrente

Nesse caso, a corrente necessária para o circuito é maior do que a corrente máxima que o gerador de sinais pode fornecer. Portanto, será necessário utilizar um buffer de corrente. O buffer de corrente é um dispositivo eletrônico que amplifica e fornece a corrente necessária para o circuito de carga, permitindo que o sinal de entrada seja adequadamente amplificado e transmitido sem comprometer a integridade do sinal.

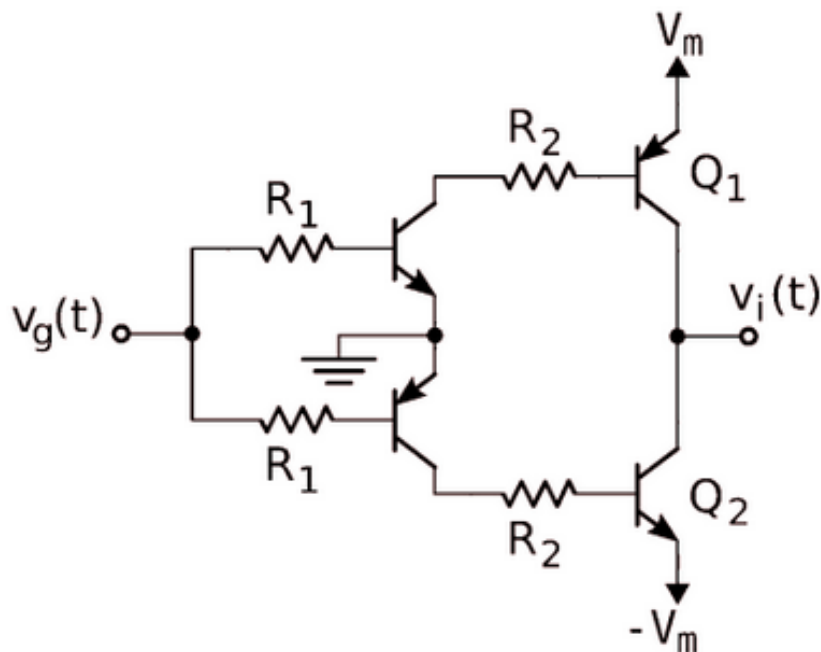


Figura 7: Representação esquemática do buffer de corrente utilizado.

3.2 Componentes

3.3 Exemplo 1

Neste exemplo montamos sem o resistor R , para simular a situação de resistência infinita.

	Nominal (Ω/nF)	Medido (Ω/nF)
C	100	108.18
R	4700	4664
Rm	330	323.85
R1	560000	545100
R1 (')	560000	552600
R2	22000	21823
R2 (')	22000	21902

Figura 8: Representação esquemática do buffer de corrente utilizado.

3.3.1 Gráfico de $V_o(t)$

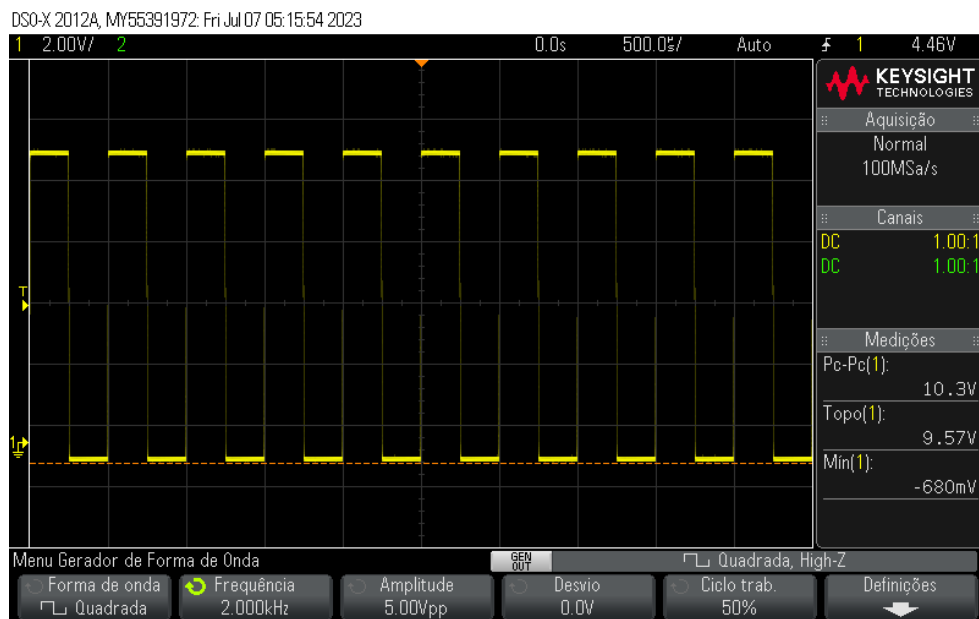


Figura 9: Medição de $V_o(t)$ vista no osciloscópio para $0 < t < 5T_s$.

3.3.2 Mínimos e máximos.

$V_o(t)$	Valor
Max	9.57
Min	-0.68

Figura 10: Tabela de mínimos e máximos do exemplo 1.

3.4 Exemplo 2

Neste exemplo montamos com um resistor de $4.7K\Omega$.

3.4.1 Gráfico de $V_o(t)$

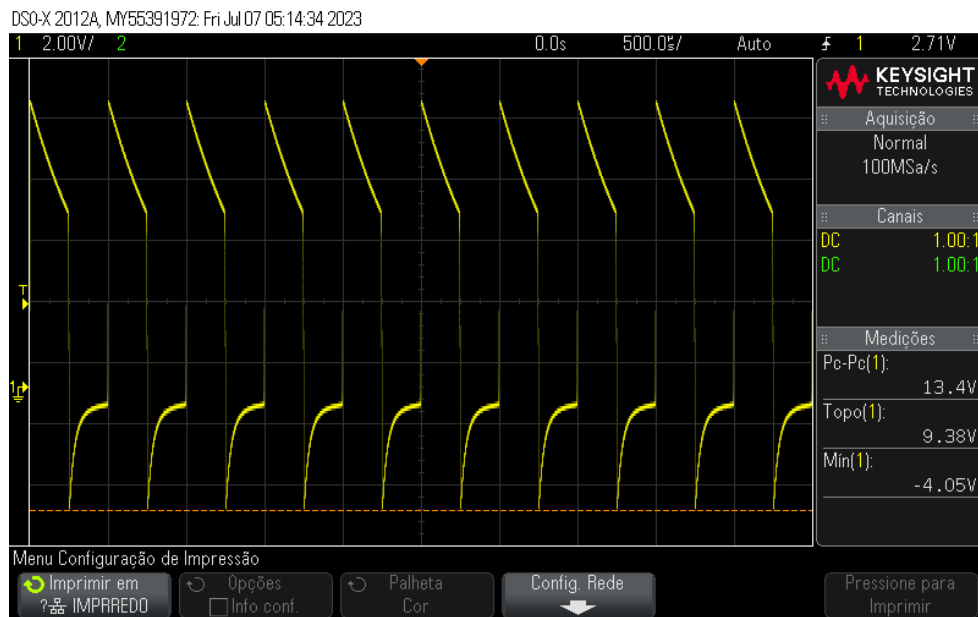


Figura 11: Medição de $V_o(t)$ vista no osciloscópio para $0 < t < 5T_s$.

3.4.2 Mínimos e máximos.

$V_o(t)$	Valor (estado 1)	Valor (estado 2)
Max	-0.55	5.6
Min	-4	9.4

Figura 12: Tabela de mínimos e máximos do exemplo 2.

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

O exemplo 1 foi analisado sem a presença do resistor R com o objetivo de simular a situação de uma resistência infinita.

4.1.1 Gráficos

Ao comparar os gráficos do exemplo 1 experimental (Figura 3.3.1) com o exemplo 1 numérico (Figura 2.4.3), 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 3.3.2) com os valores obtidos numericamente (26), 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 3.4.1) com o exemplo 1 numérico (Figura 2.5.3), 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 3.4.2) com os valores obtidos numericamente (Estado 1 e Estado 2), 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))

```