

FILTROS ATIVOS E OSCILADORES

Eletrónica Geral

Grupo 6

Alexandre Santana (100122)
Guilherme Coimbra (102522)
Maria Fernandes (103020)

1º Trabalho de Laboratório

20 a 29 de setembro de 2023

Contents

1	Parte 1 – Secções Biquadráticas com Três Amplificadores Operacionais	2
1.1	Introdução e Objetivos	2
1.2	Secção de Biquadrática de Kerwin, Huelsman e Newcomb (KHN)	3
1.2.1	Obtenção das funções de transferência T_1, T_2 e T_3	3
1.2.2	Resposta em frequência das funções de transferência	4
1.2.3	Determinação das expressões para K , ω_0 e Q	4
1.2.4	Resposta em frequência na saída dos três AO's para sinais de diferentes frequências	5
1.2.5	Diagramas de Bode	6
1.2.6	Comparação de resultados experimentais com teóricos	7
1.3	Secção Biquadrática de Tow-Thomas	8
1.3.1	Diagrama de fluxo de sinal e funções de transferência	8
1.3.2	Diagramas de Bode teóricos	9
1.3.3	Diagramas de Bode experimentais	10
1.3.4	Características de resposta em frequência para diferentes valores de P_2	11
1.3.5	Comparação de resultados experimentais com teóricos	12
1.4	Conclusões	13
2	Parte 2 – Oscilador de Onda Retangular e Secção Biquadrática de Rauch	14
2.1	Introdução e Objetivos	14
2.2	Oscilador	15
2.2.1	Frequência de oscilação e fator de ciclo teóricos	15
2.2.2	Corrente máxima no diodo teórica	16
2.2.3	Frequência de oscilação e fator de ciclo experimentais	16
2.2.4	Corrente máxima no diodo experimental	17
2.2.5	Comparações entre valores teóricos e experimentais	17
2.3	Filtro Passa-Banda de Rauch	18
2.3.1	Função de transferência teórica	18
2.3.2	Características do filtro obtidas experimentalmente	18
2.3.3	Comparação das características teóricas e experimentais	19
2.3.4	Comparação dos sinais de saída do oscilador e do filtro	19
2.3.5	Sugestão de alteração ao filtro	20
2.4	Conclusões	20

1 Parte 1 – Secções Biquadráticas com Três Amplificadores Operacionais

1.1 Introdução e Objetivos

Na primeira parte deste trabalho, pretendemos estudar filtros ativos de segunda ordem, implementados através de secções biquadráticas, formadas por vários módulos elementares. As duas tipologias de circuitos a serem analisadas serão as secções biquadráticas de Kerwin-Huelsman-Newcomb (KHN) e de Tow-Thomas(TT).

Para a realização deste trabalho utilizaremos uma base de experimentação (TEE ou equivalente), um módulo experimental TEE-09, um osciloscópio de duplo traço, um gerador de funções com varrimento e diferentes tipos de cabos. Mais pormenores e detalhes das montagens e procedimentos encontram-se no guia do trabalho laboratorial [1]

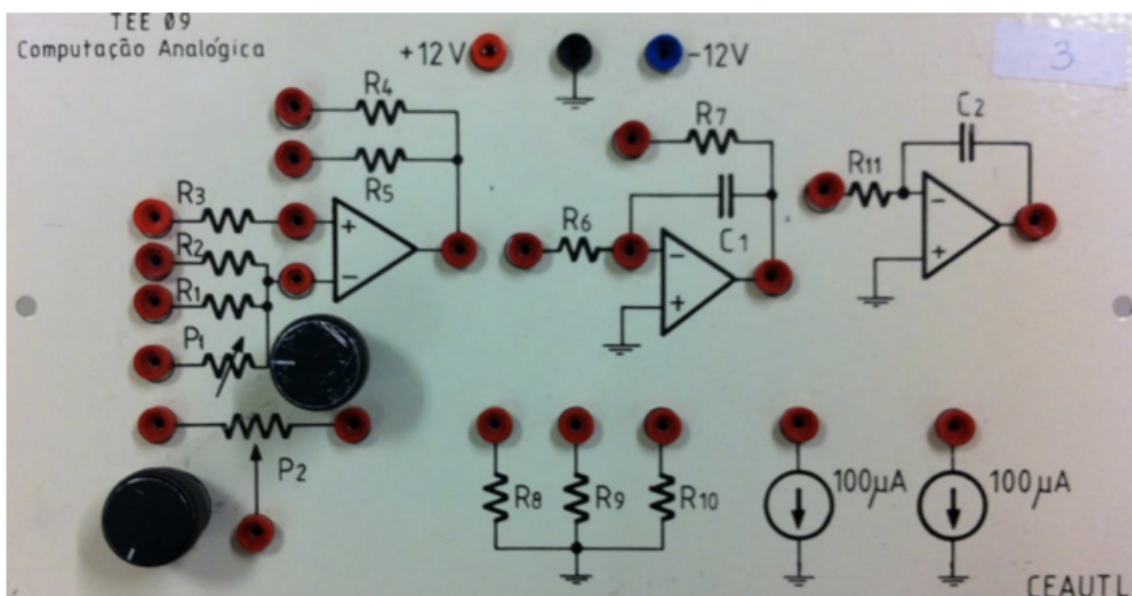


Fig. 1: Módulo experimental TEE-09 (fonte: [1])

1.2 Secção de Biquadrática de Kerwin, Huelsman e Newcomb (KHN)

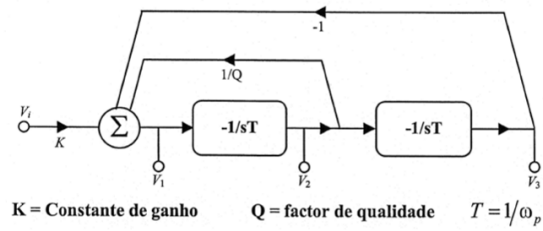
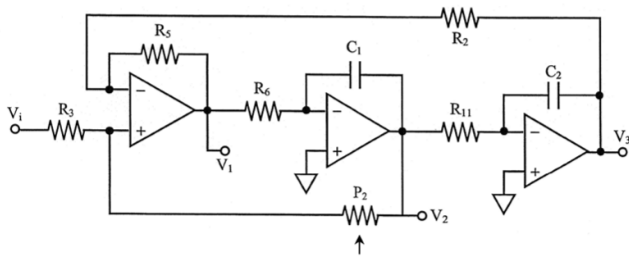


Fig. 2: Secção biquadrática de Kerwin, Huelsman e Newcomb (KHN) Fig. 3: Diagrama de fluxo de sinal correspondente à secção biquadrática KHN

1.2.1 Obtenção das funções de transferência $T_1, T_2 e T_3$

Com base do Diagrama de fluxo de sinal correspondente à secção biquadrática KHN, representado na figura 3, obtiveram-se as relações entre V_i , V_1 , V_2 e V_3 :

$$V_2 = -\frac{1}{sT}V_1 \quad (1)$$

$$V_3 = \frac{1}{s^2 T^2} V_1 \quad (2)$$

$$KV_i = (\frac{1}{s^2 T^2} + \frac{1}{sQT} + 1)V_1 \quad (3)$$

Com estas foi possível obter as funções de transferência, $T_1(s)$, $T_2(s)$ e $T_3(s)$:

$$T_1(s) = \frac{s^2 K}{\frac{1}{T^2} + \frac{s}{QT} + s^2} \quad (4)$$

$$T_2(s) = \frac{-Ks}{T(\frac{1}{T^2} + \frac{s}{QT} + s^2)} \quad (5)$$

$$T_3(s) = \frac{K}{T^2(\frac{1}{T^2} + \frac{s}{TQ} + s^2)} \quad (6)$$

1.2.2 Resposta em frequência das funções de transferência

Observando a fórmula de cada função de transferência, é possível verificar que possuem a mesma função quadrática no denominador, $D(s)$, e que, por isso, são caracterizadas por um par de polos complexos-conjugados, p_- e p_+ com a mesma frequência ω_p , e fator de qualidade Q .

$$D(s) = S^2 + \frac{S}{TQ} + \frac{1}{T^2} \quad (7)$$

$$p_- p_+ = -\frac{w_p}{2Q} \pm jw_p \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}} \quad (8)$$

Analisando as diferentes funções de transferência é possível concluir sobre as suas respostas em frequência:

- No caso de $T_1(s)$, o numerador é Ks^2 , o que significa que os zeros desta função estão localizados em zero. Como resultado, a passagem das frequências mais baixas é bloqueada, enquanto a passagem das frequências mais altas é facilitada. Isso caracteriza um filtro passa-alto com um ganho em decibéis, para altas frequências, de $20 \log |K| dB$.
- Para $T_2(s)$, o numerador é $-\frac{K}{T}$, o que significa que os zeros desta função estão localizados em zero e no infinito. Isso resulta numa dificuldade tanto na passagem das frequências mais baixas quanto das frequências mais altas. Essa característica indica que estamos a lidar com um filtro passa-banda que possui um ganho em decibéis de $20 \log | -KQ | dB$.
- Para $T_3(s)$, o numerador é $\frac{K}{T^2}$, querendo dizer que os zeros desta função estão localizados no infinito. Como resultado, a passagem das frequências mais altas é dificultada enquanto a passagem das frequências mais baixas é facilitada. Isso caracteriza um filtro passa-baixo com um ganho em decibéis, para baixas frequências, de $20 \log |\frac{K}{T^2}| dB$.

1.2.3 Determinação das expressões para K , ω_0 e Q

Interpretando o esquema da figura 2, conseguimos identificar circuitos elementares dentro do circuito complexo, sendo estes um circuito subtrator (o mais à esquerda) e dois circuitos integradores de Miller.

Com base nestes e na sua forma de funcionamento obtivemos as relações seguintes:

$$K = \frac{P_2(R_5 + R_2)}{R_2(R_3 + P_2)} \quad (9)$$

$$Q = \frac{R_2(R_3 + P_2)}{R_3(R_5 + R_2)} \quad (10)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_1 C_2 R_6 R_1}} \quad (11)$$

1.2.4 Resposta em frequência na saída dos três AO's para sinais de diferentes frequências

Após a montagem do circuito estar concluída, procuramos observar as características de resposta em frequência na saída dos três amplificadores operacionais para baixas, médias e altas frequências. Nos gráficos das figuras 4, 5 e 6, temos a amarelo o sinal de entrada, V_i , a verde, azul e magenta, respetivamente, V_1 , V_2 e V_3 .

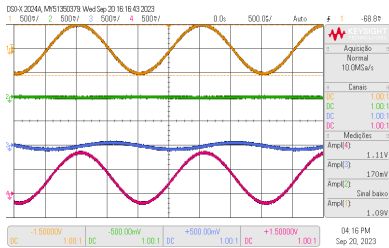


Fig. 4: Forma de onda dos três sinais com uma frequência de $500Hz$

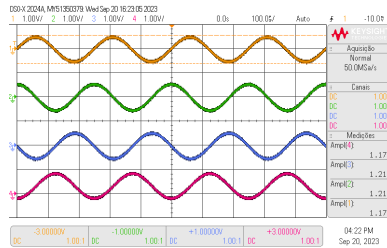


Fig. 5: Forma de onda dos três sinais com uma frequência de $4KHz$

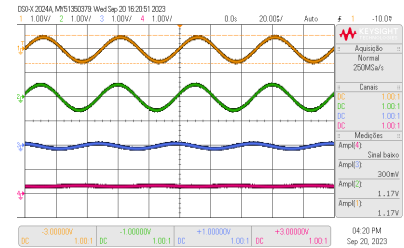


Fig. 6: Forma de onda dos três sinais com uma frequência de $20KHz$

Pela análise dos gráficos podemos verificar logo algumas características de cada filtro:

- V_1 : O sinal verde para baixas frequências tem um ganho próximo de zero, enquanto que para médias e altas frequências este sinal tem uma amplitude semelhante à do sinal de entrada. Este comportamento é característico de um filtro passa alto
- V_2 : O sinal azul para baixas e altas frequências tem uma amplitude muito inferior à de V_i e para médias uma amplitude próxima da de entrada. Sendo assim, podemos dizer que estamos perante um filtro passa banda.
- V_3 : O sinal magenta para baixas e médias frequências apresenta-se igual ao de entrada, mas para altas fica quase nulo, ou seja, estamos perante um filtro passa baixo.

1.2.5 Diagramas de Bode

Para estudar a resposta em frequência dos filtros, foram medidas as variações de fase e amplitudes para diferentes frequências. Com os dados obtidos traçaram-se os gráficos e com recurso às funções de transferência foram realizados ajustes com o objetivo de obter os valores de Q , w_0 e T experimentais.

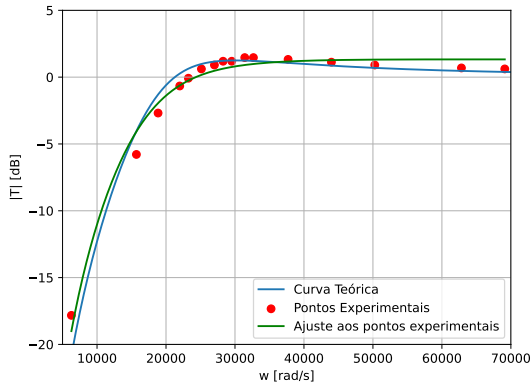


Fig. 7: Ganho em dB do sinal de saída V_1

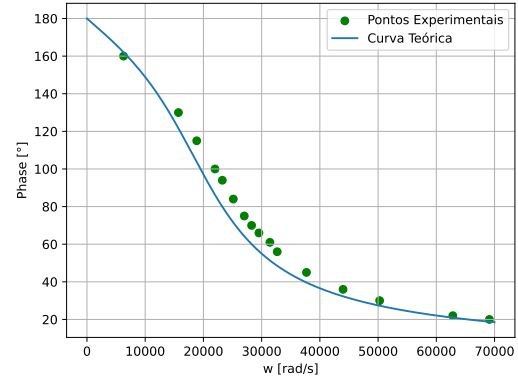


Fig. 8: Fase do sinal de saída V_1

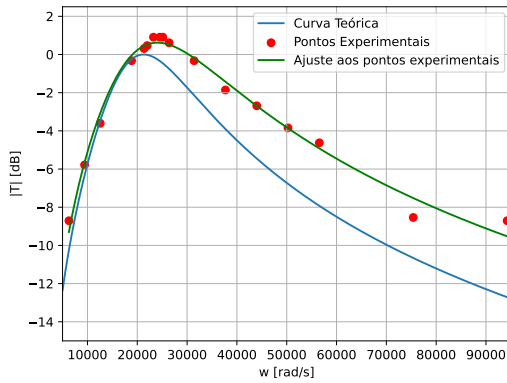


Fig. 9: Ganho em dB do sinal de saída V_2

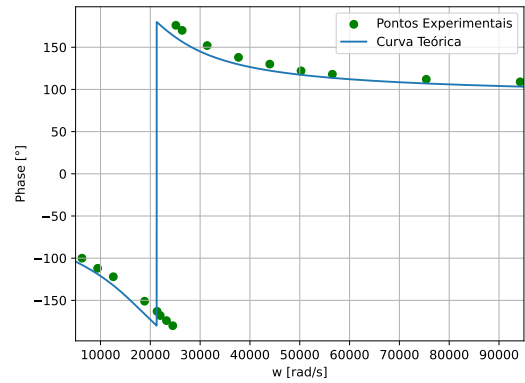


Fig. 10: Fase do sinal de saída V_2

Pelos gráficos obtidos é possível verificar que os pontos experimentais estão próximos do previsto teoricamente, mais para os gráficos da fase e para o ganho de V_1 do que para os do ganho de V_2 e V_3 que apresentam algum desvio da teoria.

Ainda que haja alguma diferença entre as curvas teóricas e experimentais, é possível observar o comportamento de cada filtro, assim como observar que todos se comportam aproximadamente como seria esperado. Ou seja, temos que T_1 , T_2 e T_3 representam, respetivamente, um filtro passa-alto, passa-banda e passa-baixo.

De certa forma vemos que, para frequências mais altas, os pontos experimentais se aproximam menos das curvas teóricas. É possível explicar isto com o facto de os componentes do circuito deixarem de ter comportamentos próximos dos ideais para altas frequências e também devido aos amplificadores operacionais estarem fora da sua zona de operação. Concluindo, podemos considerar também o facto de os componentes do circuito terem, na realidade, valores diferentes dos nominais.

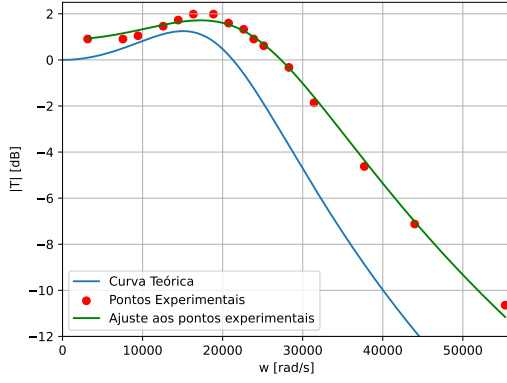


Fig. 11: Ganho em dB do sinal de saída V_3

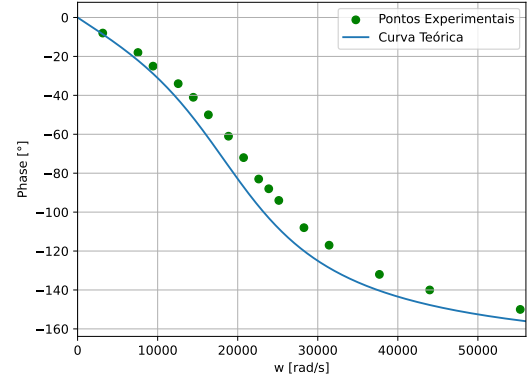


Fig. 12: Fase do sinal de saída V_3

1.2.6 Comparação de resultados experimentais com teóricos

Os dados obtidos para as variáveis K , ω_0 e Q , bem como os seus erros percentuais foram dispostos na tabela abaixo:

	$T_{teorico}$	T_1	T_2	T_3
K	1.00	1.16	1.29	1.11
$\epsilon_{rel} K [\%]$	—	15.97%	28.90%	10.69%
ω_0	21276.60	20251.58	24027.09	26620.63
$\epsilon_{rel} \omega_0 [\%]$	—	4.82%	12.93%	25.12%
Q	1.00	0.75	0.83	0.93
$\epsilon_{rel} Q [\%]$	—	25.53%	16.68%	7.27%

Tab. 1: Valores de K , ω_0 e Q e respectivos erros percentuais

Por observação da tabela é possível perceber que os valores de K experimentais são todos superiores ao valor teórico, algo previsível após observação dos diagramas de Bode obtidos. Já os valores de Q experimentais são todos inferiores ao teórico, algo justificado pela não idealidade da experiência onde o fator de qualidade dos filtros é inferior ao previsto para a idealidade da experiência.

A maioria dos erros entre valores experimentais e teóricos relacionam-se com ruído, interferências eletromagnéticas, variações de frequência e, principalmente, com o facto do valor das grandezas dos componentes poder ser diferente do nominal

1.3 Secção Biquadrática de Tow-Thomas

1.3.1 Diagrama de fluxo de sinal e funções de transferência

Para o estudo da secção biquadrática de Tow-Thomas e de modo a determinar as funções de transferência, a partir do esquema do circuito, figura 13, obteve-se o diagrama de fluxo de sinal que se encontra na figura 14.

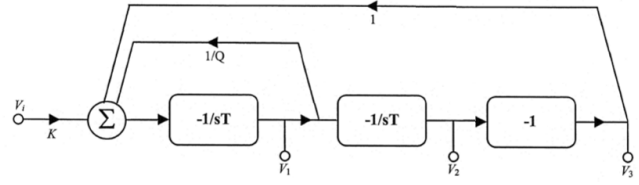
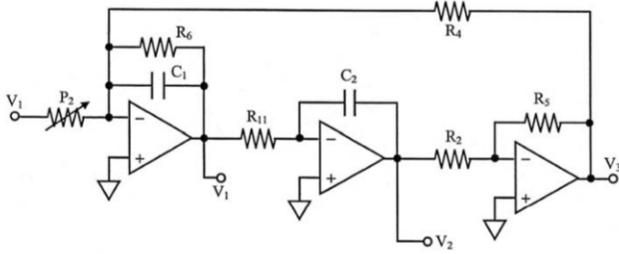


Fig. 13: Circuito da secção biquadrática de Tow-Thomas
Fig. 14: DFS da secção biquadrática de Tow-Thomas

Partindo do diagrama de fluxo de sinal é possível obter relações entre V_i , V_1 , V_2 e V_3 .

$$V_2 = -\frac{1}{sT}V_1 \quad (12)$$

$$V_3 = -V_2 = \frac{1}{sT}V_1 \quad (13)$$

$$V_1 = -\frac{1}{sT}(KV_i + V_3 + \frac{1}{Q}V_1) \quad (14)$$

Onde K e Q são a constante de ganho e o fator de qualidade, respetivamente, e T é igual a ω_0^{-1} , tal como na secção anterior.

Partindo das relações a cima é possível obter as funções de transferência T_1 , T_2 e T_3 :

$$T_1 = \frac{V_1}{V_i} = -\frac{K\omega_0 s}{s^2 + s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} \quad (15)$$

$$T_2 = \frac{V_2}{V_i} = \frac{K\omega_0^2}{s^2 + s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} \quad (16)$$

$$T_3 = \frac{V_3}{V_i} = -\frac{K\omega_0^2}{s^2 + s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} \quad (17)$$

De modo a calcular os valores de K , Q e ω_0 estabeleceram-se as relações entre V_i , V_1 , V_2 , V_3 e os componentes do circuito,

$$V_1 = -sR_{11}C_2V_2 \quad (18)$$

$$V_1 = \frac{sR_2R_{11}C_2}{R_5}V_3 \quad (19)$$

$$V_1 = -\frac{R_6}{1 + sC_1R_6}\left(\frac{V_3}{R_4} + \frac{V_i}{P_2}\right) \quad (20)$$

Após alguma álgebra, é possível obter os valores das constantes K , Q e w_0 em função dos componentes do circuito.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{R_5}{R_2 R_4 R_{11} C_1 C_2}} = 21276.60 \text{ rad/s} \quad (21)$$

$$K = \frac{1}{P_2 C_1 \sqrt{\frac{R_5}{R_2 R_4 R_{11} C_1 C_2}}} = 1 \quad (22)$$

$$Q = \omega_0 C_1 R_6 = R_6 \sqrt{\frac{C_1 R_5}{R_2 R_4 R_{11} C_2}} = 1 \quad (23)$$

1.3.2 Diagramas de Bode teóricos

Considerando as funções de transferência e os valores das constantes características, obtiveram-se os diagramas de Bode de amplitude para as 3 funções de transferência, 15, 16 e 17 (figura 15).

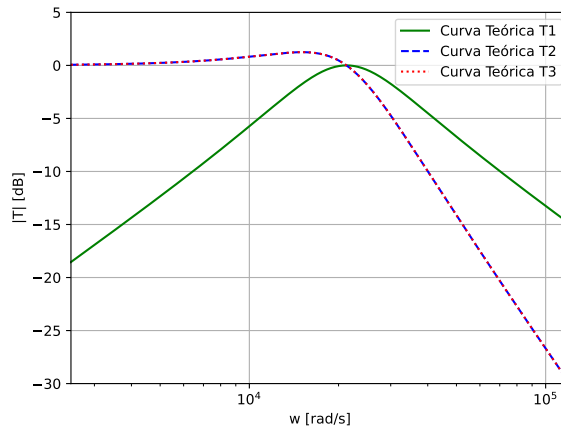


Fig. 15: Diagrama de Bode teórico para as funções de transferência da seção de TT

Através da análise das funções de transferência e dos diagramas é possível caracterizar a resposta em frequência de cada função:

- T_1 : Pela análise da função de transferência é possível verificar que esta apresenta dois zeros, um em 0 e outro no ∞ , evidenciando um comportamento de filtro passa-banda, algo corroborado pelo seu diagrama.
- T_2 e T_3 : As funções de transferência são simétricas em relação ao eixo das frequências e por isso seria de esperar que os seus diagramas do ganho em decibéis coincidissem. Para além disso, estas apresentam dois zeros no ∞ e, tal como mostra o gráfico 15, estas apresentam um comportamento de filtro passa-baixo.

1.3.3 Diagramas de Bode experimentais

Montado o circuito da figura 13 e definido o valor do potenciómetro para o seu valor máximo, $10\text{ k}\Omega$ teóricos, retiraram-se valores da amplitude e da fase para diferentes frequências para os sinais de saída da secção biquadrática. Com estes traçaram-se os diagramas das figuras 16, 17,

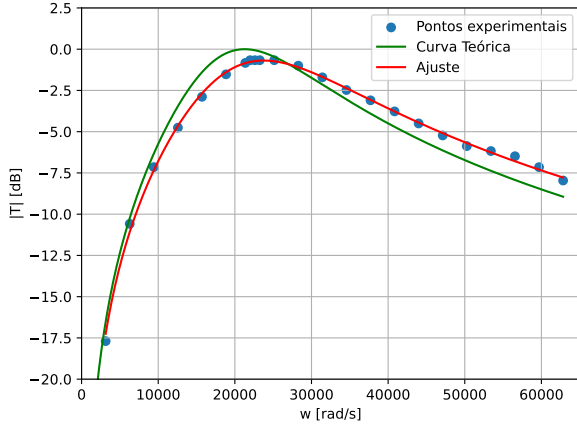


Fig. 16: Ganho em dB do sinal de saída V_1

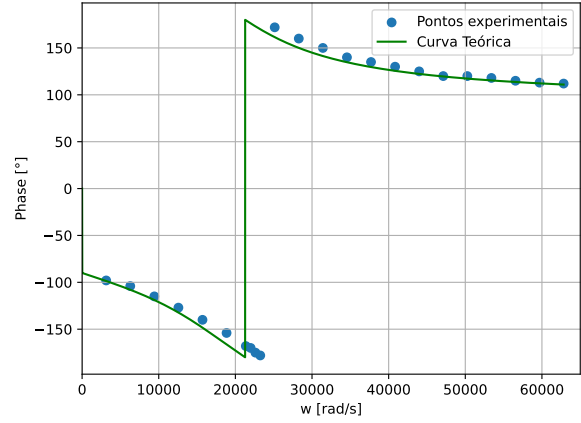


Fig. 17: Fase do sinal de saída V_1

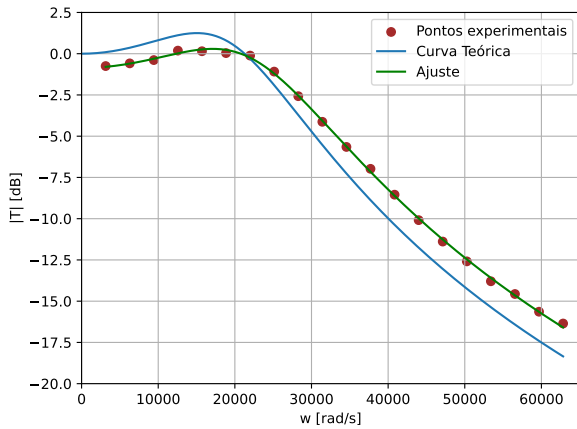


Fig. 18: Ganho em dB do sinal de saída V_2

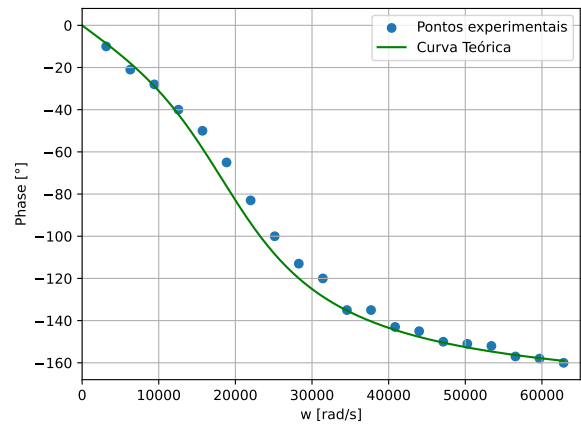


Fig. 19: Fase do sinal de saída V_2

Mais uma vez, para frequências mais altas, os pontos experimentais aproximam-se menos das curvas teóricas. O facto de isto ocorrer é análogo ao explicado em 1.2.5.

Como deduzido anteriormente, nas equações 15, 16 e 17, esperava-se que T_1 fosse um filtro passa-banda e que T_2 e T_3 fossem filtros passa-baixo. Concluimos que o gráfico do módulo de T_1 em função de ω (Fig.16) coincide com o diagrama de Bode para filtro passa-banda e que, os gráficos do módulo de T_2 e T_3 em função de ω (Figs.18 e 20) coincidem com o diagrama de Bode teórico para um filtro passa-baixo.

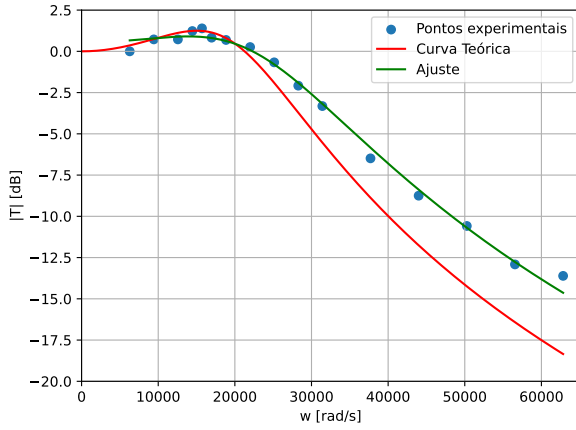


Fig. 20: Ganho em dB do sinal de saída V_3

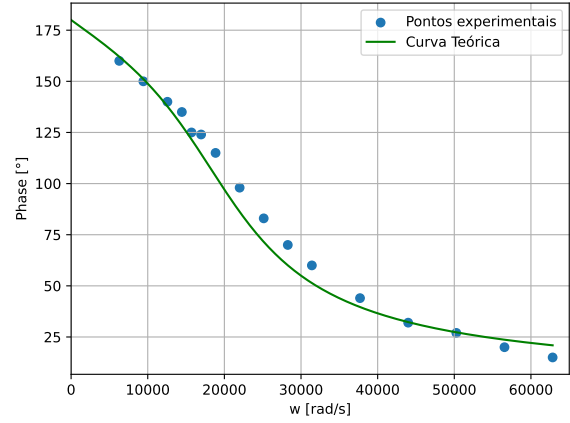


Fig. 21: Fase do sinal de saída V_3

1.3.4 Características de resposta em frequência para diferentes valores de P_2

Para o estudo da variação das características de resposta em frequência da secção TT , variaram-se os valores do potenciômetro e retiraram-se dados da amplitude e fase para diferentes frequências para o sinal de saída V_1 . Com estes dados, traçaram-se diagramas de Bode e através de ajustes obtiveram-se os valores das constantes características da resposta em frequência. Os valores obtidos encontram-se na tabela 2.

P_2	K	w_0	Q
1k	9.1287	23689.7316	0.9319
5k	1.8738	23648.6215	0.9628
10k	1.0313	23767.6328	0.8959

Tab. 2: Constantes características da resposta em frequência obtidas por ajustes aos pontos experimentais

Através dos dados da tabela 2 é possível verificar que Q e w_0 não mudam quando se varia P_2 , algo previsível pelas equações 23 e 21. Pela figura 22 podemos verificar que para os diferentes valores de P_2 as curvas do ganho apenas se deslocam na vertical, evidenciando o carácter constante de Q e de w_0 . O facto de haver deslocamento vertical evidencia uma variação de K com P_2 .

O valor de K varia inversamente à variação de P_2 . Dado isto, realizou-se um ajuste do tipo $K = a/P_2$ aos pontos de K em função dos valores de P_2 , representado na figura 23. O valor de a obtido foi de 9149.17 que apresenta um erro relativo de 8.51% relativamente ao valor teórico de 10000. Este erro obtido para o valor de a , assim como as pequenas diferenças nos valores de w_0 e Q , têm origem na não idealidade dos componentes que apresentam valores diferentes dos tabelados.

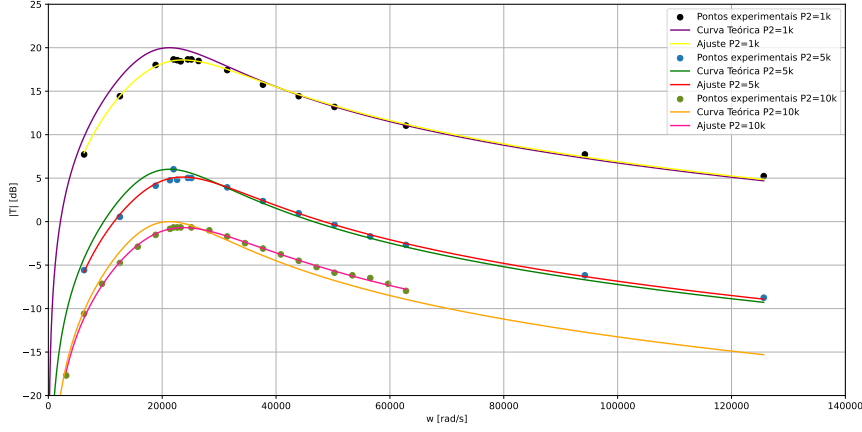


Fig. 22: Gráfico do ganho de V_1 para diferentes valores de P_2

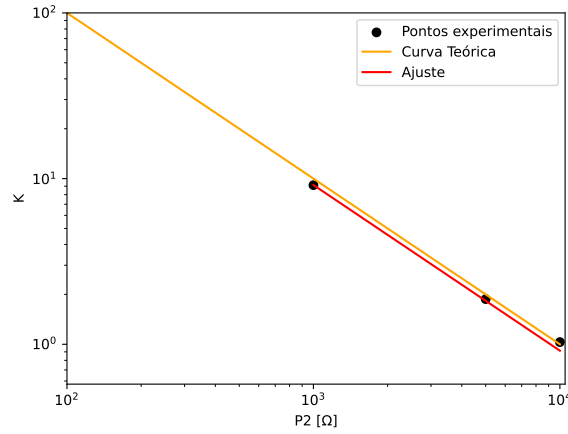


Fig. 23: Valores de K com a variação de P_2

1.3.5 Comparação de resultados experimentais com teóricos

Os dados obtidos para K , ω_0 e Q experimentais e teóricos apresentam-se abaixo, bem como os seus erros percentuais. É de notar que os valores de K , ω_0 e Q são iguais para a secção biquadrática de KNH e de TT.

Novamente, através da tabela 3, é possível verificar que os fatores de qualidade experimentais são inferiores ao teórico. Também é possível verificar que os valores de w_0 experimentais são todos maiores que o teórico. Para além disso, os diagramas de Bode obtidos apresentam características de filtros de segunda ordem, através dos declives nas zonas de atenuação e da indicação ilustrativa da localização dos zeros característicos de cada tipo de função de transferência. Os erros relativos devem-se mais uma vez ao facto dos valores de alguns componentes do circuito serem diferentes dos nominais.

	T_{terico}	T_1	T_2	T_3
K	1.00	1.03	0.91	1.06
$Erro K[\%]$	—	3.10%	11.71%	10.40%
w_0	21276.60	23767.63	24576.24	25786.77
$Erro w_0[\%]$	—	9.50%	15.51%	1.60%
Q	1.00	0.90	0.98	0.84
$Erro Q[\%]$	-	6.30%	21.20%	16.20%

Tab. 3: Comparação entre valores teóricos e experimentais obtidos no estudo da secção biquadrática de TT

1.4 Conclusões

Com a realização da primeira parte do trabalho laboratorial foi possível aprender e estudar o funcionamento de diferentes tipos de filtro RC ativos. Ficamos a compreender melhor o funcionamento das secções biquadráticas de Kerwin, Huelsman e Newcomb e de Tow-Thomas. Pudemos verificar a importância da teoria para prever os comportamentos experimentais, assim como foi possível perceber que o experimentalmente perfeito não acontece.

2 Parte 2 – Oscilador de Onda Retangular e Secção Biquadrática de Rauch

2.1 Introdução e Objetivos

O objetivo da segunda parte deste trabalho é estudar como um oscilador de onda retangular funciona. Um circuito com base na secção biquadrática passa-banda de Rauch será posteriormente, também, estudado.

Um detetor de proximidade baseado em emissão de infravermelhos pode ser feito usando os dois módulos eletrónicos juntos para formar um circuito mais complexo. A proximidade de um obstáculo ao emissor pode ser determinada pela relação entre a amplitude do sinal refletido e emitido.

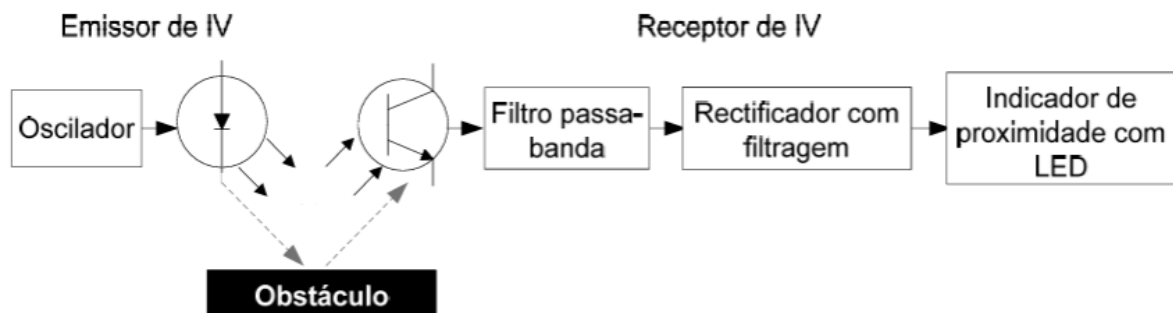


Fig. 24: Diagrama de blocos do circuito Park-Aid (fonte: [1])

Nesta parte utilizaremos uma base de experimentação (TEE ou equivalente), uma placa de Bread-Board, um osciloscópio de duplo traço, um gerador de funções com varrimento, diferentes tipos de cabos, resistências, condensadores, dois Amplificadores Operacionais uA741, um temporizador NE555 e um diodo SIR333. Mais detalhes no guia do trabalho [1].

2.2 Oscilador

2.2.1 Frequência de oscilação e fator de ciclo teóricos

Para o estudo do oscilador consultou-se o datasheet do Temporizador [citar!!!] e procurou-se compreender o modo de funcionamento do circuito. Resumidamente, a tensão no terminal 2 do temporizador, tensão do condensador 1, vai oscilar entre 4 V e 8 V, sendo que, quando esta variação é decrescente, o condensador está a descarregar e o sinal V_M é mínimo. Já quando o condensador carrega, a tensão V_M é máxima. Os gráficos da evolução temporal da tensão $V_M(t)$ e $C_1(t)$ encontram-se na figura 25

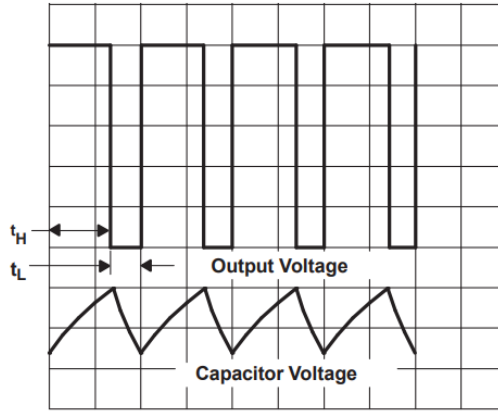


Fig. 25: Ilustração dos gráficos da evolução temporal de V_M (Output Voltage) e V_{C_1} (Capacitor Voltage) (fonte: [2])

Temos assim que:

- quando C_1 carrega

$$\begin{cases} V_M(t) = 12V \\ C_1(t) = 12 - 8e^{\frac{-(t-t_0)}{\tau_c}} \end{cases} \quad (24)$$

, onde t_0 é o instante do início do ciclo de carregamento e τ_c é a constante de tempo de carregamento do condensador. Como o condensador carrega por R_1 e R_2 , $\tau_c = (R_1 + R_2) \cdot C_1$

- quando C_1 descarrega

$$\begin{cases} V_M(t) = 0V \\ C_1(t) = 8e^{\frac{-(t-t_0)}{\tau_d}} \end{cases} \quad (25)$$

, onde t_0 é o instante do início do ciclo de descarregamento e τ_d é a constante de tempo de descarregamento do condensador. Como o condensador descarrega apenas por R_2 , $\tau_d = R_2 \cdot C_1$

Através das equações de $C_1(t)$ em 24 e 40 é possível obter as expressões dos tempos de carregamento, t_h , e de descarregamento, t_l . Com estas calculamos o período dos sinais, a frequência de oscilação e o fator de ciclo.

$$t_h = (R_1 + R_2) \cdot C_1 \cdot \ln(2) = 588.90\mu s \quad (26)$$

$$t_l = R_2 \cdot C_1 \cdot \ln(2) = 486.59\mu s \quad (27)$$

$$T = t_h + t_l = 1075.49\mu s \quad (28)$$

$$f = T^{-1} = 929.81Hz \quad (29)$$

$$duty - cycle = t_h \cdot T^{-1} = 54.76\% \quad (30)$$

2.2.2 Corrente máxima no díodo teórica

A corrente no díodo é máxima quando V_m é mínimo. Através da consulta dos datasheets do temporizador NE555 e do díodo SIR333, podemos retirar os valores da tensão de operação do díodo, V_F , que é igual a $1.4V$, e do valor mínimo de V_M , que é de $0.3V$. Com estes valores é possível calcular a corrente máxima que atravessa o díodo:

$$I_{D_{max}} = \frac{V_{cc} - V_M - V_F}{R_3} = 68.67mA \quad (31)$$

Dado que o valor máximo de corrente que pode percorrer o díodo, estabelecido no seu datasheet, é de $100mA$, o valor mínimo de R_3 é de

$$R_{3_{min}} = \frac{12 - 1.4 - 0.3}{0.1} = 103\Omega \quad (32)$$

2.2.3 Frequência de oscilação e fator de ciclo experimentais

Com o circuito montado, retiraram-se os sinais dos terminais do condensador C_1 , e do pino 3 do temporizador, V_M , a verde e a amarelo na figura 26, respetivamente.

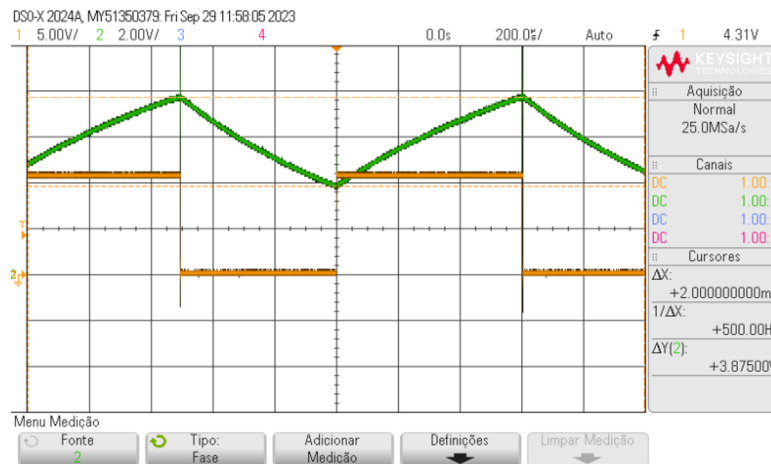


Fig. 26: Gráfico de $V_M(t)$ e $C_1(t)$ obtido no osciloscópio

Através das funcionalidades do osciloscópio, retiraram-se os valores de t_h e t_l que permitiram obter a frequência de oscilação e o fator de ciclo.

$$t_h = 606.00\mu s \quad (33)$$

$$t_l = 508.00\mu s \quad (34)$$

$$T = t_h + t_l = 1114.00\mu s \quad (35)$$

$$f = T^{-1} = 897.67Hz \quad (36)$$

$$duty - cycle = t_h \cdot T^{-1} = 54.40\% \quad (37)$$

2.2.4 Corrente máxima no díodo experimental

De modo a calcular a corrente máxima que percorria o díodo, utilizamos o multímetro como voltímetro e medimos as tensões nos dois terminais do díodo para determinar V_F , tendo-se obtido um valor de $0.95V$. O valor de V_M mínimo determinou-se utilizando o osciloscópio, de onde se obteve um valor de $0.35V$. Os valores de V_{cc} e R_3 foram obtidos utilizando o multímetro. Sendo assim a corrente máxima que atravessava o díodo era de

$$I_{D_{max}} = \frac{11.94 - 0.35 - 0.95}{147.8} = 71.99mA \quad (38)$$

2.2.5 Comparações entre valores teóricos e experimentais

Tendo em conta os valores teóricos calculados e os experimentais obtidos é possível calcular os erros relativos entre estes.

	<i>Terico</i>	<i>Experimental</i>	<i>Erro relativo</i> [%]
$t_h [\mu s]$	588.90	606.00	2.90%
$t_l [\mu s]$	486.59	508.00	4.40%
$T [\mu s]$	1075.49	1114.00	3.58%
$f [Hz]$	929.81	897.67	3.46%
<i>duty - cycle</i>	54.76	54.40	0.66%
$I_{D_{max}} [mA]$	68.67	71.99	4.83%

Tab. 4: Comparação de valores teóricos e experimentais

Através da tabela 5 podemos verificar que os valores experimentais obtidos estão relativamente próximos dos teóricos calculados. Algo a destacar é o facto de o duty-cycle experimental ser quase igual ao teórico, o que mostra que, mesmo existindo uma diferença entre os valores de t_h e t_l teóricos e experimentais, o sinal se comporta da mesma maneira. Os pequenos erros têm origem nas imperfeições da eletrónica utilizada e no facto de os componentes não terem os respetivos valores nominais.

2.3 Filtro Passa-Banda de Rauch

2.3.1 Função de transferência teórica

De modo a determinar a função de transferência de um filtro passa-banda de *Butterworth* de segunda ordem com as seguintes características:

- frequência central, f_0 , igual a $1kHz$
- largura de banda igual a $250Hz$
- ganho na frequência central igual a $24dB$
- Ap igual a $3dB$

partiu-se de $T(S) = \frac{1}{S+1}$, onde se aplicou a transformação $S = \frac{s^2+w_0^2}{Bs}$ e tendo em conta as características do filtro obteve-se

$$T(s) = \frac{kBs}{s^2 + Bs + w_0^2}, \quad (39)$$

onde

$$\begin{cases} w_0 = 6283.19 \text{ rad s}^{-1} \\ B = 1570.80 \text{ rad s}^{-1} \\ k = 15.85 \end{cases} \quad (40)$$

2.3.2 Características do filtro obtidas experimentalmente

De modo a obter as características do filtro experimentalmente, montou-se o circuito e retiraram-se dados da amplitude e fase do sinal de saída em função do sinal de entrada. O sinal de entrada tinha uma amplitude pico a pico de $0.51mV$ e um offset de $0.5V$. Variando a frequência do sinal tiram-se pontos de modo a traçar gráficos do ganho e da fase em função da frequência. Estes gráficos encontram-se nas figuras 27 e 28.

Através da análise dos gráficos e dos ajustes obtidos aos seus pontos, podemos obter os valores para a frequência central do filtro, para o ganho neste ponto e para a largura de banda.

- w_0 : para a frequência central do filtro obtiveram-se os valores de $5799.47rad/s$, pelo ajuste ao gráfico da fase e de $5652.93rad/s$ pelo ajuste ao gráfico do ganho em decibéis
- B : para a largura de banda obtiveram-se os valores de $1955.35rad/s$ e $1438.79 rad/s$, respetivamente pelos ajustes aos gráficos do ganho e da fase

Através do gráfico do ganho é possível também obter um valor para k de 15.02 que se traduz num ganho em decibéis para a frequência central de $23.53dB$. Para frequências superiores a $10^4rad/s$ podemos observar uma variação do ganho de $-10dB$ por meia década o que equivale a uma variação de $-20dB/dec$. Assumindo simetria, estamos perante um filtro com uma variação do ganho, em módulo, de $20dB/dec$ e com zeros em 0 e no ∞ , características de um filtro passa-banda de segunda ordem.

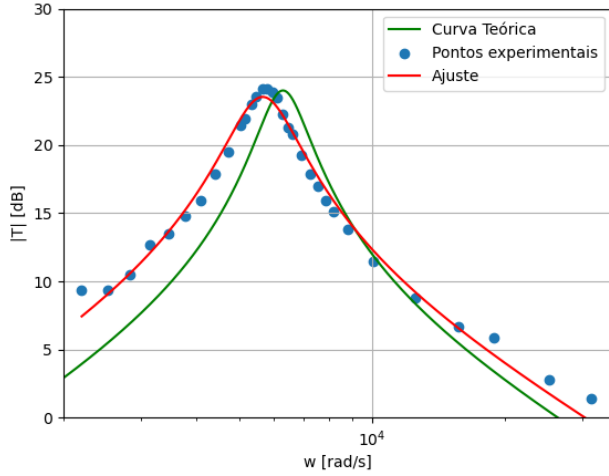


Fig. 27: Diagrama de Bode do Ganho para o filtro de Rauch

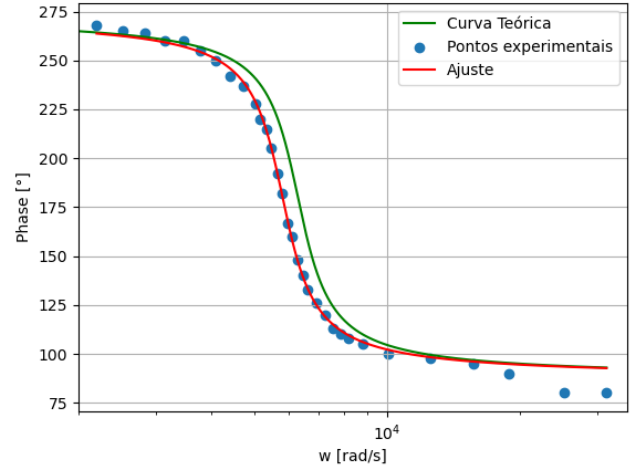


Fig. 28: Diagrama de Bode da Fase para o filtro de Rauch

2.3.3 Comparação das características teóricas e experimentais

	Teórico	Ajuste à fase	Erro relativo [%]	Ajuste ao ganho	Erro relativo [%]
w_0	6283.19	5652.93	10.03 %	5799.47	7.70%
B	1570.80	1955.35	24.48%	1438.79	8.40%
$G_{w_0}[dB]$	24	23.53	1.96%	-	-

Tab. 5: Comparação dos valores teóricos e experimentais

Através da tabela 5 podemos observar que os parâmetros obtidos experimentalmente por ajuste aos dados da fase apresentam um menor erro relativo aos teóricos, isto já era esperado, devido ao ajuste do diagrama de Bode da fase se adequar melhor aos pontos e estar mais próximo da curva teórica em comparação ao que acontece no outro diagrama de Bode.

Novamente, as diferenças entre valores teóricos e experimentais tem origem na não idealidade dos componentes do circuito nem dos dispositivos utilizados, assim como ruído ou outras interferências.

2.3.4 Comparação dos sinais de saída do oscilador e do filtro

Tendo em vista a comparação dos sinais de saída do oscilador e do filtro, ligou-se o circuito do oscilador ao atenuador e este, por sua vez, ao filtro. Regulou-se o potenciômetro para os $82.46k\Omega$ e obteve-se o gráfico dos sinais. Na figura 29, a amarelo temos o gráfico de V_M e a verde a tensão de saída do filtro.

É possível observar que o sinal retangular que sai do oscilador é transformado num sinal sinusoidal com um desfasamento cerca de 180 graus. O sinal de saída tem uma frequência próxima do sinal de entrada uma vez que a frequência deste se encontra na banda de passagem do filtro. Verifica-se, também, que o sinal de saída não é uma senoide perfeita, este apresenta distorção harmónica, pois o filtro não deixa passar apenas a frequência fundamental.

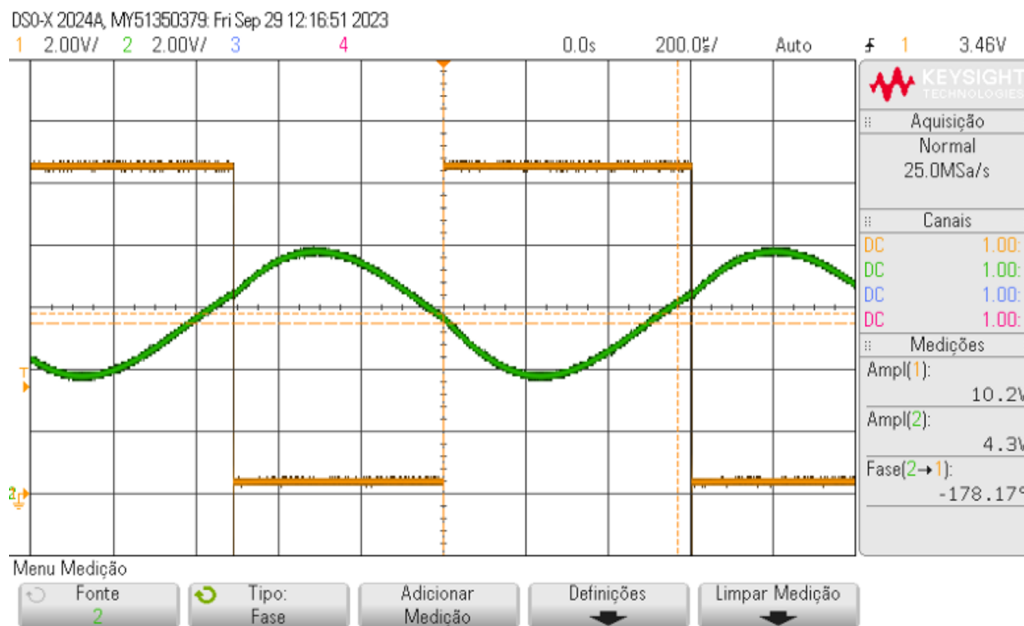


Fig. 29: Sinais de saída do oscilador e do filtro obtidos no osciloscópio

2.3.5 Sugestão de alteração ao filtro

Para que se obtenha um melhor sinal à saída, isto é, um sinal sinusoidal perfeito correspondente à frequência fundamental do sinal de entrada, é necessário que o filtro atenue de uma forma mais acentuada as frequências que se encontram na sua zona de atenuação. Para aumentar esta atenuação poderíamos deslocar a frequência central do filtro para a esquerda e diminuir a largura de banda, uma vez que $Q = \omega_0/B$ e temos de manter o fator de qualidade do filtro. Um inconveniente desta alteração seria, por exemplo, a possibilidade de existir maior ruído na faixa de frequências passantes.

2.4 Conclusões

Com a realização da segunda parte do trabalho experimental pudemos observar e estudar o funcionamento de um oscilador de onda retangular e de uma secção biquadrática passa-banda de Rauch. Foi possível aprender o modo de operação de um temporizador NE555 e, também, verificar experimentalmente a transformação de um sinal retangular periódico num sinal sinusoidal. Para além disto, este trabalho permitiu desenvolver capacidades de trabalho de grupo e de montagem e compreensão de circuitos.

NOTA: Os dados e programas desenvolvidos para o tratamento de dados deste trabalho laboratorial encontram-se disponíveis no seguinte repositório: <https://github.com/C3NOUR4S/Eletronics.git>

References

- [1] J. Gerald and P. Vitor. *1º TRABALHO DE LABORATÓRIO: FILTROS ATIVOS E OSCILADORES*. ELETRÔNICA GERAL, setembro 2023.
- [2] TEXAS INSTRUMENTS. *xx555 Precision Timers*.