

T3B&4A - Amplificadores operacionais

Maria Helena Nunes da Silva

Abril 2023

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

Resumo

Verificou-se a resposta em frequência de três montagens com amplificador operacional de realimentação negativa: Configuração Não-Inversora, Inversora e circuito Diferenciador. Observou-se, para os dois primeiros circuitos referidos, que o op-amp tem largura de banda finita logo o ganho diminui com o aumento da frequência e para o circuito Diferenciador viu-se que o ganho atinge um máximo para uma dada frequência, não tendo a relação linear esperada.

1 Objetivos

- Verificar as características de funcionamento de circuitos de amplificação com realimentação negativa, nomeadamente a resposta do ganho em frequência;
- Verificar as diferenças e semelhanças entre montagem Inversora e Não-Inversora;
- Verificar as características do circuito Diferenciador relativamente ao ganho e para diferentes ondas de entrada.

2 Introdução

Um amplificador operacional (op-amp) tem como função amplificar um sinal, sendo que neste trabalho estuda-se apenas um op-amp de tensão, nomeadamente o 741. Os op-amps podem ser representados pelo seguinte esquema:

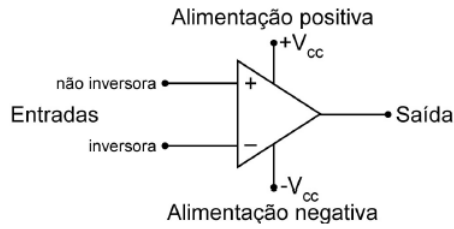


Figura 1: Terminais do amplificador operacional.

Sendo $V_+ - V_-$ a diferença de tensão nos terminais de entrada e V_{out} a tensão à saída, tem-se que o ganho intrínseco do amplificador (em malha aberta) é dado por:

$$A = \frac{V_{out}}{V_+ - V_-}$$

Um op-amp ideal tem:

- resistência entre os terminais de entrada infinita;
- resistência de saída nula;
- largura de banda (intervalo de frequências no qual o amplificador funciona com as suas características nominais, ou pouco se afasta delas) infinita.

No entanto, um op-amp real tem largura de banda finita, isto é, o ganho está dependente da frequência:

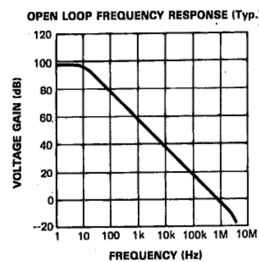


Figura 2: Gráfico do ganho em malha aberta em função da frequência para o op-amp UA741 (informação da *datasheet* do componente). Vê-se que a largura de banda é de aproximadamente 10 Hz e há um ganho de tensão de 100 000 V (100 dB).

No entanto, num circuito com um op-amp, um ganho tão alto pode não ser possível. O valor da tensão de saída está limitado pelas fontes de alimentação (tensão de entrada), ou seja, de modo a que um amplificador operacional tenha funcionamento linear e não atinja a saturação, é necessário que a variação de tensão permitida à entrada ($V_+ - V_-$) seja muito pequena.

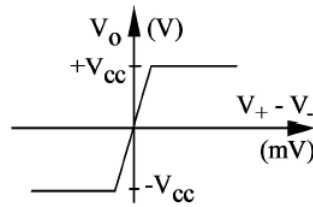


Figura 3: Característica do op-amp ideal: tensão de saída em função da tensão de entrada, mostrando saturação em V_{cc} . Num amplificador real a saturação ocorre para valores inferiores e pode ficar assimétrica.

2.1 Realimentação negativa (*negative feedback*)

Referiu-se anteriormente o ganho em malha aberta do op-amp; no entanto, é possível, através de um circuito externo, controlar o ganho efetivo do circuito global (op-amp + circuito externo), utilizando **realimentação negativa**: reintroduz-se parte do sinal de saída no sinal de entrada no terminal (-), diminuindo a diferença de potencial nos terminais de entrada e consequentemente diminuindo a tensão de saída. Assim, o circuito atinge um ponto de estabilidade em que há tensão suficiente à saída para manter a diferença de potencial certa à entrada que será amplificada para gerar o sinal de saída, de tal forma que o op-amp funcionará no modo **linear** (isto é, não atinge a saturação).

Em circuitos lineares (recorrem a realimentação negativa), dado o elevado ganho do op-amp, podemos considerar que a diferença de potencial nos terminais de entrada é nula ($V_+ \approx V_-$), logo o ganho em regime linear é dado por:

$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (1)$$

Com realimentação negativa, o ganho efetivo (em malha fechada), apesar de significativamente menor, é praticamente independente do ganho individual do amplificador e há melhoria da resposta em frequência do op-amp (isto é, há um aumento da largura de banda). Nas secções seguintes esquematizam-se os circuitos lineares estudados neste trabalho.

2.1.1 Configuração Não-Inversora

Nesta configuração, o sinal de entrada é aplicado ao terminal não inversor (+), pelo que a tensão de saída e, consequentemente, o ganho, se tornam "positivos". Parte do sinal de saída é conectada ao terminal inversor (-) (para obter a realimentação negativa).

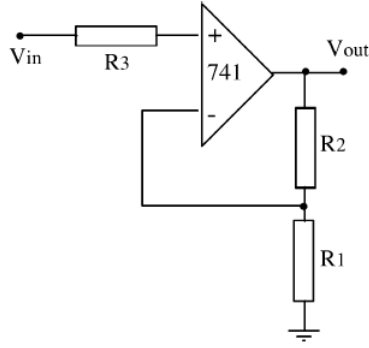


Figura 4: Esquema da configuração Não-Inversora.

Note-se que o valor das resistências R_1 e R_2 deve ser igual ou superior a $1k\Omega$ para limitar a corrente a valores compatíveis com o amplificador. Além disso, R_3 não é relevante para o dimensionamento do circuito uma vez que a corrente nos terminais de entrada é idealmente nula (resistência de entrada idealmente infinita); contudo, esta resistência deve ser colocada para diminuir a assimetria do circuito e o seu valor deve ser aproximadamente igual à resistência vista do terminal inversor (isto é, $R_1 || R_2$).

Face ao exposto, podemos então considerar que:

$$V_{in} = V_+$$

e, sendo I a corrente que passa em R_1 e R_2 ,

$$I = \frac{V_{out}}{R_1 + R_2}$$

e

$$V_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{out}$$

Considerando $V_+ \approx V_-$:

$$V_{in} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{out}$$

Sabendo que em regime linear aplica-se a equação (1), tem-se que o ganho é dado por:

$$\boxed{A = 1 + \frac{R_2}{R_1}} \quad (2)$$

Para um ganho de 11, tem-se então, por exemplo:

$$R_1 = 1k\Omega$$

$$R_2 = 10k\Omega$$

$$R_3 = 1k\Omega$$

E para um ganho de 101:

$$R_1 = 10k\Omega$$

$$R_2 = 1M\Omega$$

$$R_3 = 10k\Omega$$

Buffer

Considerando a montagem Não-Inversora, se fossem retiradas todas as resistências, pela equação (2) teríamos que o ganho do circuito seria 1. Assim, toda a tensão de saída é inserida no terminal inversor (-) (realimentação negativa), e estando o sinal de entrada ligado ao terminal não-inversor (+), tem-se que a tensão de saída será igual à tensão de entrada. Este circuito é denominado amplificador *buffer*.

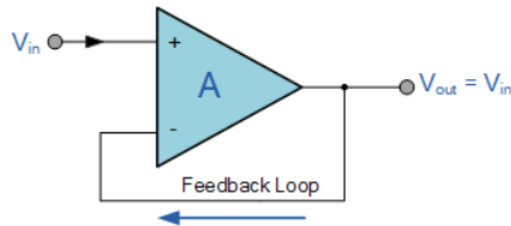


Figura 5: Esquema de um circuito *buffer*.

Dado que a impedância de entrada do *buffer* é muito elevada (pois corresponde ao produto da resistência de entrada com o ganho em malha aberta), a corrente de entrada será muito baixa, logo este amplificador não precisará de muita corrente proveniente da fonte de tensão, pelo que a potência desta não será afetada, ao contrário do que aconteceria se se ligasse esta fonte a componentes com baixa impedância (e que por sua vez exigiriam uma corrente elevada). Assim, um *buffer* é útil como um isolador de circuitos, visto que reproduz o sinal recebido sem permitir distúrbios à fonte de tensão.

2.1.2 Configuração Inversora

Nesta configuração, o sinal de entrada é aplicado ao terminal inversor (-), pelo que a tensão de saída e, conseqüentemente, o ganho, se tornam "negativos". Mais uma vez, parte do sinal de saída é conectada ao terminal inversor (-) (para obter a realimentação negativa).

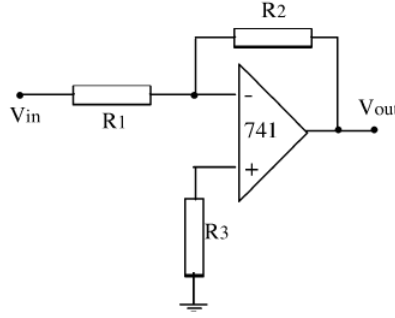


Figura 6: Esquema da configuração Inversora.

Tal como visto na configuração Não-Inversora, o valor das resistências R_1 e R_2 deve ser igual ou superior a $1k\Omega$ para limitar a corrente a valores compatíveis com o amplificador. Para além disso, R_3 não é relevante para o dimensionamento do circuito pois não é percorrida por corrente, não afetando o potencial; contudo, de forma semelhante à configuração Não-Inversora, esta resistência deve ser colocada para diminuir a assimetria do circuito e o seu valor deve ser aproximadamente igual à resistência vista do terminal inversor (isto é, $R_1 || R_2$).

Sendo I_1 e I_2 as correntes que passam nas resistências R_1 e R_2 respetivamente e sabendo que $V_- \approx V_+ = 0$:

$$I_1 = \frac{V_{in} - 0}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{0 - V_{out}}{R_2}$$

A resistência nos terminais de entrada é idealmente infinita, pelo que a corrente nos terminais de entrada será nula e, por isso, $I_1 = I_2$, logo, considerando mais uma vez a equação 1:

$$\boxed{A = -\frac{R_2}{R_1}} \quad (3)$$

Para um ganho de -10, tem-se então, por exemplo:

$$R_1 = 1k\Omega$$

$$R_2 = 10k\Omega$$

$$R_3 = 1k\Omega$$

2.1.3 Circuito Diferenciador

Este circuito permite fazer a derivada do sinal de entrada.

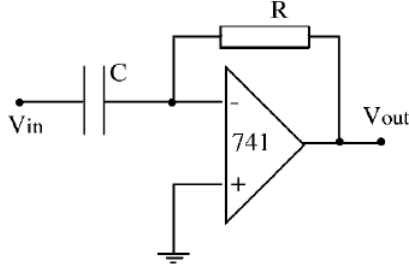


Figura 7: Esquema do circuito Diferenciador.

Seja I_f a corrente que passa na resistência R . Considerando mais uma vez $V_- \approx V_+ = 0$:

$$I_f = \frac{0 - V_{out}}{R}$$

Seja I_{in} a corrente de carga do condensador de capacidade C . Sabendo que $Q = CV_{in}$ (V_{in} é a tensão nos terminais do condensador pois $V_- \approx V_+$):

$$I_{in} = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dV_{in}}{dt}$$

A corrente nos terminais de entrada é (idealmente) nula, por isso considera-se $I_{in} = I_f$ e consequentemente obtém-se a expressão que descreve a tensão de saída em função do sinal de entrada:

$$\boxed{V_{out} = -RC \frac{dV_{in}}{dt}} \quad (4)$$

Pela equação acima conclui-se que a operação de diferenciação da tensão de entrada tem constante de proporcionalidade $-RC$, ou seja, há inversão de polaridade (a tensão de saída e o ganho serão "negativos"). Se considerarmos uma onda de entrada sinusoidal, sendo a frequência angular $\omega = 2\pi f$ e ϕ a sua fase:

$$V_{in}(t) = V_{in} \sin(2\pi ft + \phi)$$

temos que a onda de saída é dada por

$$V_{out}(t) = V_{out} \cos(2\pi ft + \phi) = V_{out} \sin\left(2\pi ft + \phi - \frac{\pi}{2}\right)$$

Derivando V_{in} em função do tempo, substituindo este e $V_{out}(t)$ na equação (4) e recorrendo à equação (1) obtém-se um ganho de referência:

$$A_{referência} = -2\pi fRC \quad (5)$$

A reatância do condensador é dada por $X_c = \frac{1}{2\pi fC}$, ou seja, é inversamente proporcional à frequência, sendo que o ganho também pode ser dado pela expressão $\frac{R}{X_c}$ (valor absoluto).

3 Método Experimental

3.1 Material

- Amplificador UA741;
- Duas resistências de $1k\Omega$, duas resistências de $10k\Omega$ e uma resistência de $1M\Omega$;
- Gerador de sinais;
- Osciloscópio;
- Duas fontes de tensão contínua;
- Amperímetro;
- Condensador de $100\mu F$ (por lapso, utilizou-se um condensador errado, deveria-se ter usado um condensador com capacidade de $100nF$);
- Placa de montagem;
- Cabos de ligação.

3.2 Procedimento

3.2.1 Configuração Não-Inversora

1. Montou-se o circuito abaixo utilizando R_1 , R_2 e R_3 de modo a obter um ganho de 11, aplicando $V_{cc} = \pm 15V$ na fonte de tensão contínua e usando, através do gerador de sinais, um sinal de entrada sinusoidal com frequência de 1 kHz e tensão pico-a-pico (V_{pp}) de 1 V;

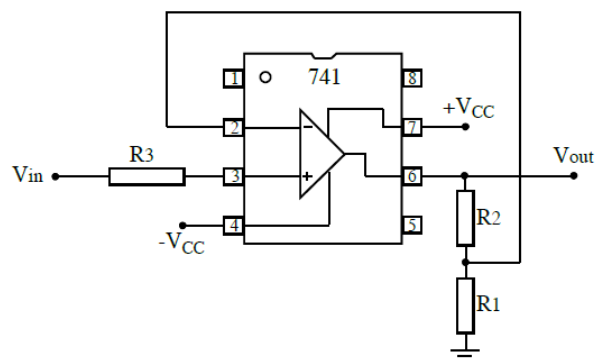


Figura 8: Esquema de montagem da configuração Não-Inversora do op-amp 741.

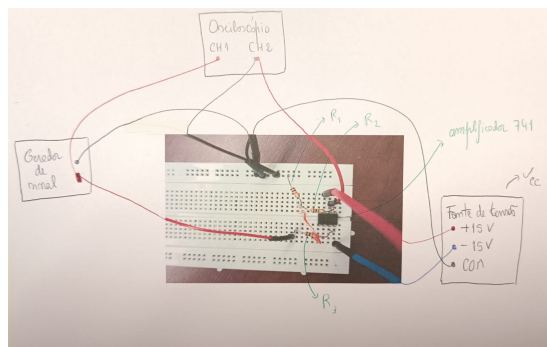


Figura 9: Montagem da configuração Não-Inversora.

2. Observou-se no osciloscópio os sinais de entrada e de saída e, medindo o máximo de cada onda (função *Max* do osciloscópio), calculou-se o ganho do amplificador através da equação (1);
3. Variou-se a frequência no gerador de sinais no intervalo [1, 100] kHz, registou-se para cada frequência as tensões de entrada e de saída apresentadas no osciloscópio e posteriormente calculou-se o ganho, traçando o gráfico do ganho em função da frequência;
4. Para duas frequências relativamente elevadas (50 e 100 kHz), variou-se a tensão V_{pp} no gerador de sinais (1, 3 e 5 V) e observou-se os dois sinais no osciloscópio, de modo a estudar a dependência da distorção do sinal da amplitude;
5. Com a intenção de determinar a resistência de entrada do circuito, mediu-se a corrente I_{med} ao substituir o gerador de sinais por um fonte de tensão contínua a 5 V e colocando um amperímetro em série com R_3 , como se observa na imagem abaixo;

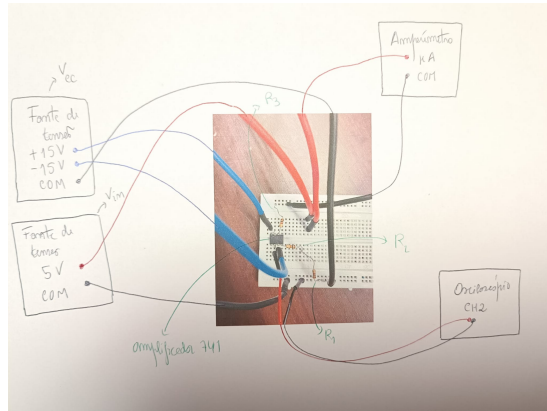


Figura 10: Montagem da configuração Não-Inversora com fonte de tensão contínua e amperímetro. O posicionamento dos cabos está ligeiramente diferente ao do apresentado na figura 9 pois este passo do procedimento não foi realizado no mesmo dia.

6. Repetiu-se os passos 1 a 3 para um ganho de 101 com $V_{pp} = 100$ mV.

3.2.2 Configuração Inversora

1. Montou-se o circuito abaixo utilizando R_1 , R_2 e R_3 de modo a obter um ganho de -10, aplicando $V_{cc} = \pm 15V$ na fonte de tensão contínua e usando, através de um gerador de sinais, um sinal de entrada sinusoidal com frequência de 1 kHz e tensão pico-a-pico (V_{pp}) de 1 V;

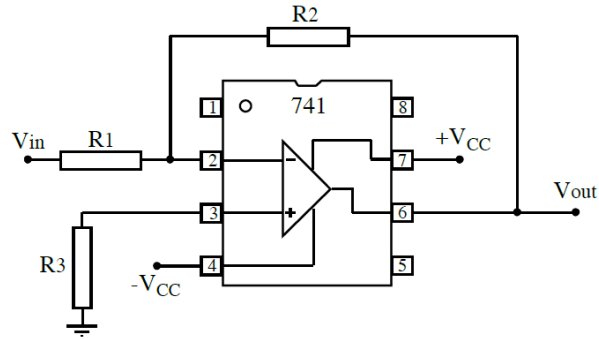


Figura 11: Esquema de montagem da configuração Inversora do op-amp 741.

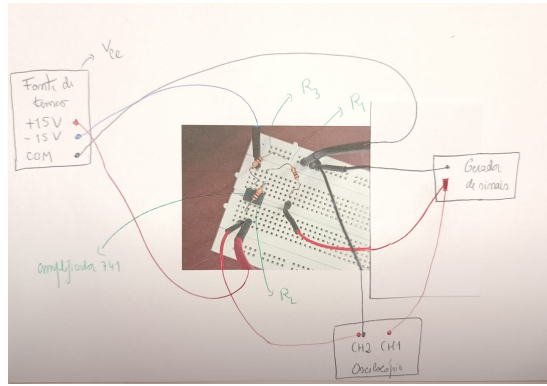


Figura 12: Montagem da configuração Inversora.

2. Observou-se no osciloscópio os sinais de entrada e de saída e, medindo o máximo de cada onda, calculou-se o ganho do amplificador através da equação (1);
3. Variou-se a frequência no gerador de sinais no intervalo $[1, 100]$ kHz, registou-se para cada frequência as tensões de entrada e de saída apresentadas no osciloscópio e posteriormente calculou-se o ganho, traçando o gráfico do ganho em função da frequência;
4. Com a intenção de determinar a resistência de entrada do circuito, mediu-se a corrente I_{med} ao substituir o gerador de sinais por um fonte de tensão contínua a 5 V e colocando um amperímetro em série com R_1 , como se observa na imagem abaixo;

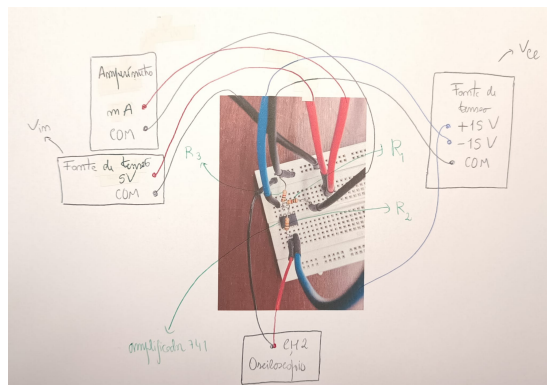


Figura 13: Montagem da configuração Inversora com fonte de tensão contínua e amperímetro. Mais uma vez o posicionamento dos cabos está ligeiramente diferente ao do apresentado na figura 12 pois este passo do procedimento não foi realizado no mesmo dia.

3.2.3 Circuito Diferenciador

1. Montou-se o circuito abaixo utilizando uma resistência R de $1k\Omega$ e um condensador de $100\mu F$ (mais uma vez, este é o condensador errado, deveria-se ter utilizado um com capacidade de $100nF$). No gerador de sinais aplicou-se um sinal de entrada sinusoidal com frequência de 10 kHz e tensão pico-a-pico (V_{pp}) de 50 mV;

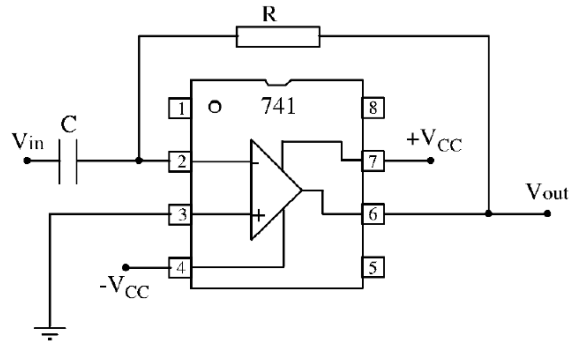


Figura 14: Esquema de montagem do circuito Diferenciador do op-amp 741.

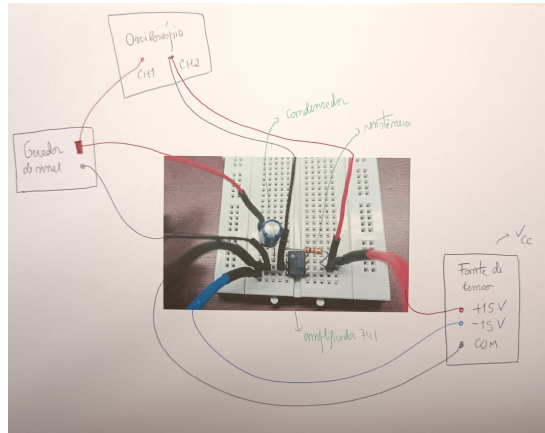


Figura 15: Montagem do circuito Diferenciador.

2. Observou-se no osciloscópio os sinais de entrada e de saída e mediu-se o máximo de cada onda e a diferença de fase entre as ondas (função *Phase* do osciloscópio);
3. Variou-se a frequência no gerador de sinais no intervalo $[0, 100]$ kHz, registou-se para cada frequência as tensões de entrada e de saída apresentadas no osciloscópio e posteriormente calculou-se o ganho pela equação (1), traçando o gráfico do ganho em função da frequência (nota: registaram-se mais valores na gama $[0, 1]$ kHz) e comparando-o, através de um ajuste linear, com os valores do ganho de referência;

4. No gerador de sinais voltou a escolher-se $f = 10 \text{ kHz}$ e alterou-se a forma do sinal de entrada para quadrado, observando-se no osciloscópio as duas ondas (V_{pp} foi ajustado para a melhor visualização possível);
5. Repetiu-se o passo anterior para um sinal triangular.

4 Análise e discussão de Resultados

4.1 Configuração Não-Inversora

4.1.1 Ganho de 11



Figura 16: Sinais de entrada e saída observados no osciloscópio para uma frequência de 1 kHz (a escalas diferentes). Apesar de na imagem fotografada V_{in} ter o valor de 0.9800 V, considerou-se 1.000 V pois o osciloscópio acabou por estabilizar nesse valor.

Conclui-se da imagem acima que o sinal de entrada está em fase com o sinal de saída, o que é o esperado para a configuração Não-Inversora (não há inversão da polaridade do sinal de entrada).

Observando a figura 35 (tabela em anexo), temos para $f = 1 \text{ kHz}$

$$V_{in} = (1.000 \pm 0.001)V$$

e

$$V_{out} = (11.00 \pm 0.01)V$$

logo, pela equação (1), o ganho obtido é

$$A = (11.00 \pm 0.01)$$

ou seja, o seu valor é idêntico ao ganho esperado para o circuito.

Nota: A incerteza foi calculada pela expressão seguinte (aplica-se a todos os valores do ganho nas tabelas em anexo):

$$u(A) = \sqrt{\left(\frac{1}{V_{in}} \cdot u(V_{out})\right)^2 + \left(-\frac{V_{out}}{V_{in}^2} \cdot u(V_{in})\right)^2}$$

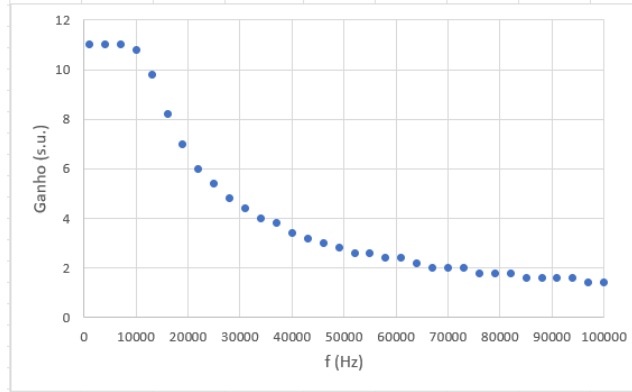


Figura 17: Gráfico do ganho em função da frequência.

Observando o gráfico acima, até aproximadamente 10 kHz, o ganho mantém-se constante e praticamente igual a 11, o ganho esperado dado o dimensionamento do circuito. No entanto, para frequências mais elevadas, o ganho diminui significativamente, convergindo para um valor relativamente baixo (aproximadamente 2) para as frequências mais altas. Tal ocorre devido às limitações dos componentes do amplificador (um op-amp real tem uma largura de banda finita). Ainda assim, comparando este gráfico com o gráfico equivalente para ganho em malha aberta (figura 2), conclui-se que como referido, a realimentação negativa resulta num menor ganho mas uma maior largura de banda (aproximadamente 10 kHz).

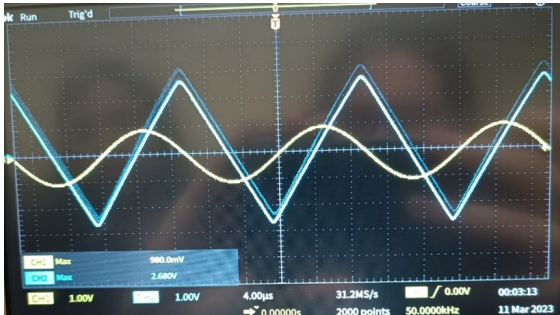


Figura 18: Sinais de entrada e de saída para $f = 50$ kHz e $V_{pp} = 1$ V.



Figura 19: Sinais de entrada e de saída para $f = 100$ kHz e $V_{pp} = 1$ V.



Figura 20: Sinais de entrada e de saída para $f = 50 \text{ kHz}$ e $V_{pp} = 3 \text{ V}$.

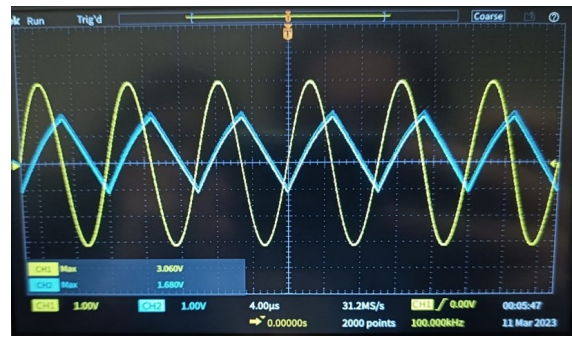


Figura 21: Sinais de entrada e de saída para $f = 100 \text{ kHz}$ e $V_{pp} = 3 \text{ V}$.

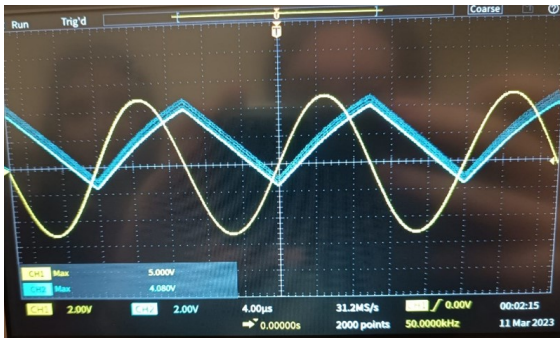


Figura 22: Sinais de entrada e de saída para $f = 50 \text{ kHz}$ e $V_{pp} = 5 \text{ V}$.

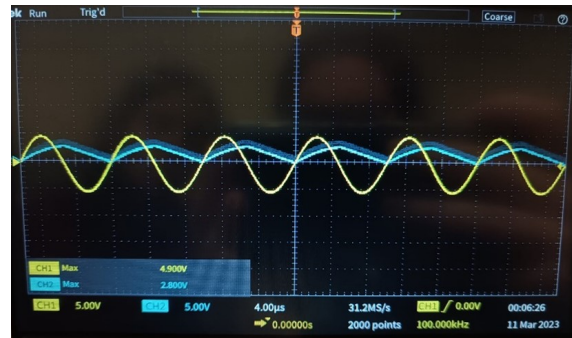


Figura 23: Sinais de entrada e de saída para $f = 100 \text{ kHz}$ e $V_{pp} = 5 \text{ V}$.

Pelas figuras 17 a 22 conclui-se que, para altas frequências, quanto maior for a amplitude do sinal de entrada (V_{pp}), maior é a distorção do sinal de saída. Como tal, quando se ouve música, o som emitido tem maior fidelidade com o volume de entrada mais baixo, pois o sinal de saída do amplificador tem mais qualidade.

Após montar o circuito da figura 10 (substituir gerador por fonte de tensão contínua e colocar amperímetro em série com R_3), a corrente de entrada medida foi $I_{med} = 0.0000000 \text{ A}$ (registou-se $0.0 \mu\text{A}$ no amperímetro), logo a resistência de entrada é infinita, como idealmente esperado.

4.1.2 Ganho de 101

Trocou-se os valores das resistências (de forma a redimensionar o circuito para este ganho) e fez-se uma análise semelhante à da secção anterior.

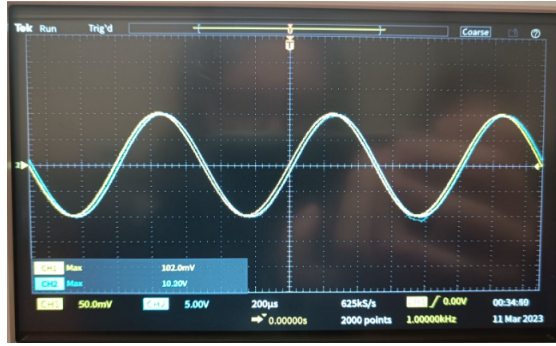


Figura 24: Sinais de entrada e saída observados no osciloscópio para uma frequência de 1 kHz (a escalas diferentes). Apesar de na imagem fotografada V_{in} ter o valor de 0.1020 V, considerou-se 0.1000 V pois o osciloscópio acabou por estabilizar nesse valor.

Observando a figura 36 (tabela em anexo), temos para $f = 1$ kHz

$$V_{in} = (0.1000 \pm 0.0001)V$$

e

$$V_{out} = (10.20 \pm 0.01)V$$

logo, pela equação (1), o ganho obtido é

$$A = (102.0 \pm 0.1)$$

ou seja, tem um erro de cerca de 1% em relação ao valor esperado, o que é muito baixo, além de ser um valor preciso.

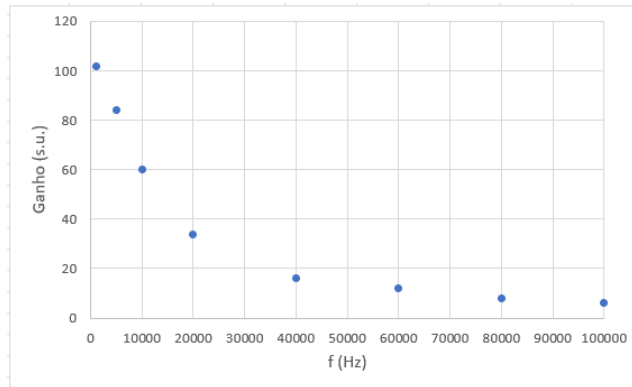


Figura 25: Gráfico do ganho em função da frequência.

No gráfico acima, observa-se a mesma tendência do ganho (diminuir significativamente com o aumento da frequência) que no gráfico para o ganho de 11 (figura 17) o que se deve, mais uma vez, a limitações do op-amp; no entanto, para um ganho de 101 há uma pior resposta do ganho em frequência, uma vez que o ganho não é constante para uma gama significativa de frequências.

4.2 Configuração Não-Inversora (ganho de -10)

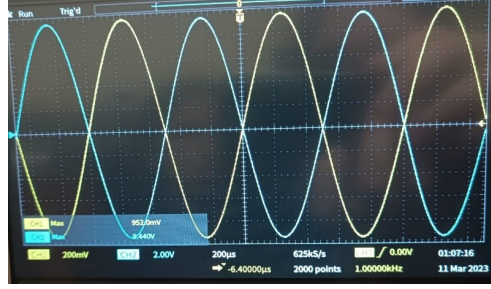


Figura 26: Sinais de entrada e saída observados no osciloscópio para uma frequência de 1 kHz (a escalas diferentes).

Conclui-se da imagem acima que o sinal de entrada e o sinal de saída têm uma diferença de fase aproximadamente 180° , o que é o esperado para a configuração Inversora (há inversão da polaridade do sinal de entrada).

Observando a figura 37 (tabela em anexo), temos para $f = 1$ kHz

$$V_{in} = (0.9600 \pm 0.0001)V$$

e

$$V_{out} = (-9.400 \pm 0.001)V$$

logo, pela equação (1), o ganho obtido é

$$A = (-9.833 \pm 0.001)$$

ou seja, tem um erro de cerca de 1.7% em relação ao valor esperado, o que é muito baixo, além de ser um valor preciso.

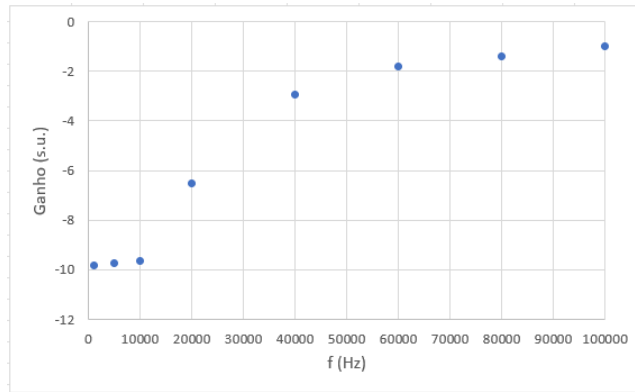


Figura 27: Gráfico do ganho em função da frequência.

Observando o gráfico acima, até aproximadamente 10 kHz, o ganho mantém-se constante e praticamente igual a -10, o ganho esperado dado o dimensionamento do circuito. No entanto, com o aumento da frequência, o valor absoluto do ganho diminui significativamente, convergindo para aproximadamente -1 nas frequências mais altas. Assim, este gráfico é uma representação aproximadamente simétrica do gráfico para o ganho de 11 (figura 17), sendo, mais uma vez, explicado pelas limitações do amplificador.

Após montar o circuito da figura 13 (substituir gerador por fonte de tensão contínua e colocar amperímetro em série com R_1), a corrente de entrada medida foi $I_{med} = 3.29$ mA, logo considerando que $V_{in} = 5$ V temos, pela Lei de Ohm,

$$R_{in} = \frac{V_{in}}{I_{med}} \approx 1.520 k\Omega$$

Teoricamente, a resistência de entrada deveria ser equivalente a $R_1 = 1 k\Omega$, logo há um erro de 52% relativamente ao valor esperado.

4.3 Circuito Diferenciador



Figura 28: Sinais de entrada e saída para uma onda sinusoidal de 10 kHz (a escalas diferentes).

Como registado na imagem acima, o sinal de entrada e o sinal de saída têm uma diferença de fase de aproximadamente 90° , o que é o esperado para o circuito diferenciador, dado que a onda sinusoidal de saída é a derivada da onda sinusoidal de entrada.

Variando-se a frequência, registou-se V_{out} e V_{in} e calculou-se o respetivo ganho (tabela da figura 38 em anexo):

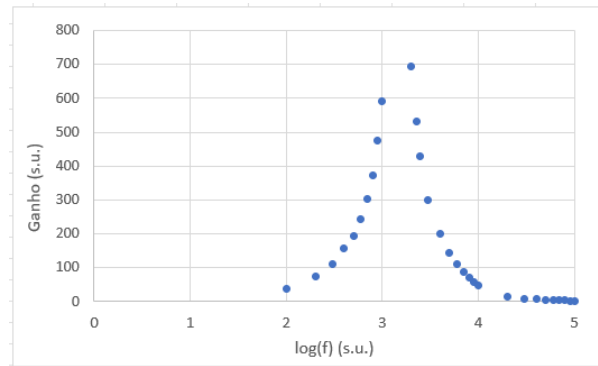


Figura 29: Gráfico do ganho em função da frequência. Utilizou-se a escala logarítmica de base 10 para a frequência para uma melhor visualização dos dados.

Tendo em conta o gráfico acima, escolheu-se a gama da frequência até $\log(5000) \approx 3.70$ para comparar o ganho experimental com o ganho de referência.

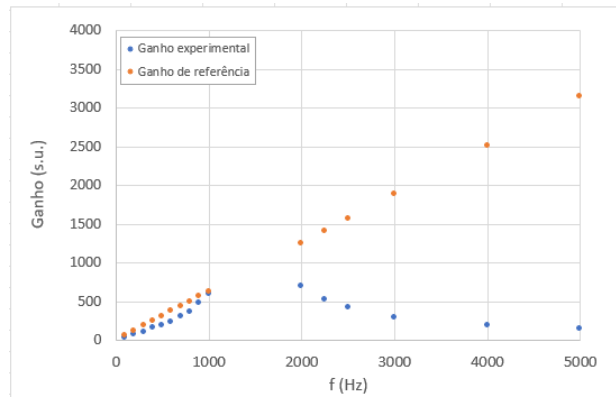


Figura 30: Gráfico do ganho experimental em função da frequência em comparação com o ganho de referência. Tomou-se o valor absoluto do ganho de referência, $2\pi fRC$, pois o ganho experimental foi considerado como positivo.

Observa-se acima que até 1 kHz, a tendência do ganho experimental é semelhante à do ganho de referência, principalmente na gama até 500 Hz (primeiros 5 pontos). Como tal, escolheu-se estes 5 pontos para realizar um ajuste linear e comparar os dois ganhos.

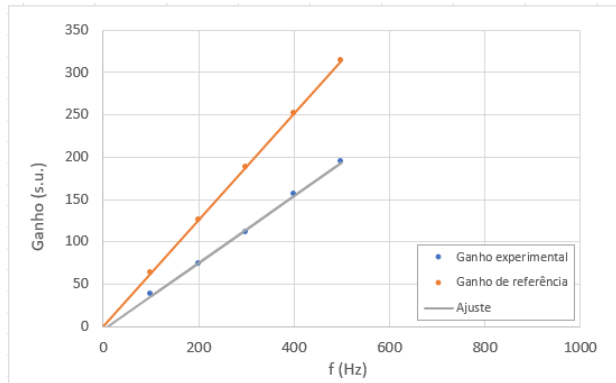


Figura 31: Gráfico da linearização do ganho experimental em função da frequência em comparação com o ganho de referência. As barras de erro não são visíveis na escala utilizada.

m	0.395	-4.009	b
s(m)	0.010	3.229	s(b)
r^2	0.998	3.079	s(y)

Figura 32: Parâmetros do ajuste linear realizado ao ganho experimental.

Dado que foram escolhidos poucos pontos para o ajuste, não é possível concluir sobre a qualidade deste a partir dos resíduos (figura 39 em anexo). No entanto, vemos pela figura 32 que $r^2 \approx 1$, pelo que o ajuste será adequado. O declive do ajuste tem um

erro de cerca de 37% em relação ao declive de referência ($2\pi RC \approx 0.628$) e a ordenada na origem é diferente de zero, logo a relação do ganho experimental com a frequência não é exatamente igual ao esperado.

Voltando à figura 30, pode-se explicar o comportamento do ganho. Até 1 kHz, o aumento da frequência causa a diminuição da reatância do condensador, pelo que há mais corrente a passar pela resistência e por sua vez, mais tensão de saída e maior ganho. Como se referiu, o comportamento experimental já se afasta um pouco da referência, o que pode ser explicado por ter sido usado, por lapso, um condensador com 1000 vezes mais capacidade do que o suposto. Para frequências maiores, o circuito torna-se instável e começa a oscilar, além de ser mais suscetível a ruído que consequentemente será mais amplificado do que o sinal de entrada, logo seria de esperar um pico no ganho que coincidiria com a frequência de ressonância. Apesar de se observar uma tendência para um pico (principalmente na figura 29), deveriam ter sido registados mais dados na gama [1,2] kHz para efetivamente mostrá-lo. A partir de 2 kHz, ao contrário do esperado, o ganho começa a diminuir, o que pode ser explicado pelas limitações do op-amp relativamente à resposta em frequência.

Voltando à frequência de 10 kHz e alterando o tipo de onda no gerador:

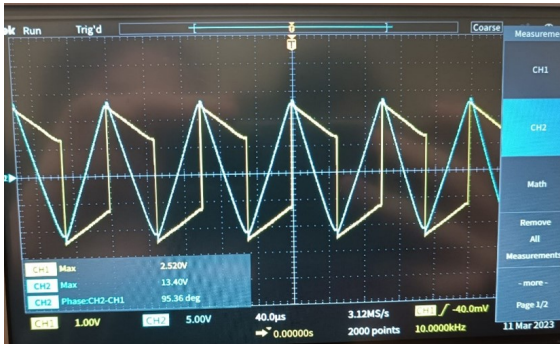


Figura 33: Sinais de entrada e de saída de uma onda quadrada num circuito diferenciador (escalas diferentes).

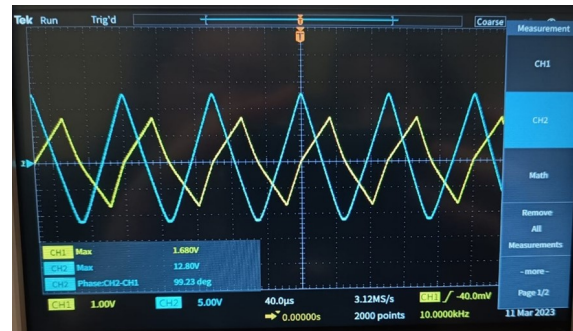


Figura 34: Sinais de entrada e de saída de uma onda quadrada num circuito diferenciador (escalas diferentes).

Dada a função do circuito diferenciador (produz um sinal de saída que é a derivada do sinal de entrada), seria de esperar que, introduzindo uma onda quadrada no circuito, o sinal de saída fosse impulsos, e introduzindo uma onda triangular, o sinal de saída fosse uma onda quadrada. No entanto, isso não é o observado nas figuras acima, o que pode ser explicado por um problema no gerador (já que os sinais de entrada estão também distorcidos) e, além disso, como já foi referido, a capacidade do condensador ser 1000 vezes maior do que o suposto. Tal aumenta significativamente o tempo característico de carga e descarga do condensador, RC , o que pode distorcer o sinal de saída.

5 Conclusão

- Determinou-se o ganho esperado para a configuração Não-Inversora e determinou-se o ganho esperado para a configuração Inversora com um erro de cerca de 1.7%;
- Tanto para a configuração Não-Inversora como para a Inversora se verificou que o op-amp tem uma largura de banda finita, pois o ganho apenas é constante para uma dada gama de frequências (até 10 kHz, para ganhos de 11 e -10), diminuindo significativamente para frequências mais altas, e para a configuração Não-Inversora observou-se que para um maior ganho, há uma pior resposta em frequência (não foi possível identificar uma gama de frequências para a largura de banda);
- Para a configuração Não-Inversora verificou-se que o sinal de saída e de entrada têm a mesma fase, enquanto para a Inversora há uma diferença de fase de 180° ;
- Confirmou-se que o aumento da amplitude do sinal de entrada aumenta a distorção do sinal de saída;
- Verificou-se que a resistência de entrada da configuração Não-Inversora é infinita mas não foi possível determinar com grande exatidão a resistência de entrada esperada para a configuração Inversora;
- Verificou-se que para o circuito Diferenciador, a resposta do ganho em frequência não é linear como esperado dado que o declive do ajuste ao ganho experimental tem um erro de 37% em relação ao declive do ganho de referência; observou-se também que se deveriam ter obtido mais dados na gama [1,2] kHz, de modo a demonstrar o pico do ganho na frequência de ressonância;
- Demonstrou-se o funcionamento do Diferenciador para onda de entrada sinusoidal dada a diferença de fase de 90° em relação à onda de saída; contudo, para ondas de entrada quadrada e triangular, não se obteve o resultado esperado, uma vez que o gerador distorceu o sinal e o condensador usado tinha capacidade 1000 vezes superior à suposta.

Referências

- [1] Responsáveis pela unidade curricular Laboratório de Física II. *Trabalho 3B&4A - Amplificadores operacionais*.
- [2] Responsáveis pela unidade curricular Laboratório de Física II. *Material de apoio ao Laboratório -114*.
- [3] Responsável pela unidade curricular Eletrônica. *Powerpoints de Eletrônica*.

- [4] <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/25580/stmicroelectronics/ua741cp.html>.
- [5] <https://www.electronics-tutorials.ws/category/opamp>.
- [6] <http://www.learningaboutelectronics.com/articles/unity-gain-buffer>.
- [7] <https://en.wikipedia.org/wiki/differentiator>.

A Anexo

A.1 Configuração Não-Inversora

A.1.1 Ganho de 11

f (Hz)	V _{in} ± 0.001 V	V _{out} (V)	u(V _{out}) (V)	Ganho (s.u.)	u(Ganho) (s.u.)
1000	1.000	11.00	0.01	11.00	0.01
4000	1.000	11.00	0.01	11.00	0.01
7000	1.000	11.00	0.01	11.00	0.01
10000	1.000	10.80	0.01	10.80	0.01
13000	1.000	9.800	0.001	9.80	0.01
16000	1.000	8.200	0.001	8.20	0.01
19000	1.000	7.000	0.001	7.00	0.01
22000	1.000	6.000	0.001	6.00	0.01
25000	1.000	5.400	0.001	5.40	0.01
28000	1.000	4.800	0.001	4.800	0.005
31000	1.000	4.400	0.001	4.400	0.005
34000	1.000	4.000	0.001	4.000	0.004
37000	1.000	3.800	0.001	3.800	0.004
40000	1.000	3.400	0.001	3.400	0.004
43000	1.000	3.200	0.001	3.200	0.003
46000	1.000	3.000	0.001	3.000	0.003
49000	1.000	2.800	0.001	2.800	0.003
52000	1.000	2.600	0.001	2.600	0.003
55000	1.000	2.600	0.001	2.600	0.003
58000	1.000	2.400	0.001	2.400	0.003
61000	1.000	2.400	0.001	2.400	0.003
64000	1.000	2.200	0.001	2.200	0.002
67000	1.000	2.000	0.001	2.000	0.002
70000	1.000	2.000	0.001	2.000	0.002
73000	1.000	2.000	0.001	2.000	0.002
76000	1.000	1.800	0.001	1.800	0.002
79000	1.000	1.800	0.001	1.800	0.002
82000	1.000	1.800	0.001	1.800	0.002
85000	1.000	1.600	0.001	1.600	0.002
88000	1.000	1.600	0.001	1.600	0.002
91000	1.000	1.600	0.001	1.600	0.002
94000	1.000	1.600	0.001	1.600	0.002
97000	1.000	1.400	0.001	1.400	0.002
100000	1.000	1.400	0.001	1.400	0.002

Figura 35: Valores de V_{in} e V_{out} registados para as diferentes frequências e respetivo cálculo do ganho.

A.1.2 Ganho de 101

f (Hz)	V _{in} ± 0.0001 V	V _{out} (V)	u(V _{out}) (V)	Ganho (s.u.)	u(Ganho) (s.u.)
1000	0.1000	10.20	0.01	102.0	0.1
5000	0.1000	8.400	0.001	84.0	0.1
10000	0.1000	6.000	0.001	60.0	0.1
20000	0.1000	3.400	0.001	34.0	0.04
40000	0.1000	1.600	0.001	16.0	0.02
60000	0.1000	1.200	0.001	12.0	0.02
80000	0.1000	0.8000	0.0001	8.0	0.01
100000	0.1000	0.6000	0.0001	6.0	0.01

Figura 36: Valores de V_{in} e V_{out} registrados para as diferentes frequências e respectivo cálculo do ganho.

A.2 Configuração Inversora (ganho de -10)

f (Hz)	V _{in} (V)	u(V _{in}) (V)	V _{out} ± 0.001 V	Ganho (s.u.)	u(Ganho) (s.u.)
1000	0.9600	0.0001	-9.440	-9.833	0.001
5000	0.9600	0.0001	-9.360	-9.750	0.001
10000	0.9600	0.0001	-9.280	-9.667	0.001
20000	0.9600	0.0001	-6.240	-6.500	0.001
40000	1.008	0.001	-2.960	-2.937	0.003
60000	1.000	0.001	-1.800	-1.800	0.002
80000	1.000	0.001	-1.400	-1.400	0.002
100000	1.000	0.001	-1.000	-1.000	0.001

Figura 37: Valores de V_{in} e V_{out} registrados para as diferentes frequências e respectivo cálculo do ganho.

A.3 Circuito Diferenciador

f (Hz)	V _{in} (V)	u(V _{in}) (V)	V _{out} ± 0.001 V	Ganho (s.u.)	u(Ganho) (s.u.)	Ganho referência (s.u.)	Ajuste linear	Resíduos
100	0.2260	0.0001	8.520	37.70	0.02	62.8	35.50	2.20
200	0.1260	0.0001	9.320	74.0	0.1	125.7	75.0	-1.0
300	0.08600	0.00001	9.500	110.47	0.02	188.5	114.52	-4.05
400	0.06200	0.00001	9.700	156.45	0.03	251.3	154.03	2.43
500	0.05000	0.00001	9.700	194.00	0.04	314.2	193.53	0.47
600	0.04000	0.00001	9.700	242.5	0.1	377.0		
700	0.03200	0.00001	9.700	303.1	0.1	439.8		
800	0.02600	0.00001	9.700	373.1	0.1	502.7		
900	0.02040	0.00001	9.700	475.5	0.2	565.5		
1000	0.01640	0.00001	9.700	591.5	0.4	628.3		
2000	0.01400	0.00001	9.700	692.9	0.5	1256.6		
2250	0.01840	0.00001	9.800	532.6	0.3	1413.7		
2500	0.02240	0.00001	9.600	428.6	0.2	1570.8		
3000	0.03240	0.00001	9.700	299.4	0.1	1885.0		
4000	0.04880	0.00001	9.700	198.77	0.05	2513.3		
5000	0.06800	0.00001	9.700	142.65	0.03	3141.6		
6000	0.08800	0.00001	9.700	110.23	0.02	3769.9		
7000	0.1100	0.0001	9.700	88.2	0.1	4398.2		
8000	0.1340	0.0001	9.500	70.9	0.1	5026.5		
9000	0.1620	0.0001	9.500	58.64	0.04	5654.9		
10000	0.1940	0.0001	9.320	48.04	0.03	6283.2		
20000	0.4080	0.0001	5.800	14.216	0.004	12566.4		
30000	0.4480	0.0001	3.880	8.661	0.003	18849.6		
40000	0.4640	0.0001	2.940	6.336	0.003	25132.7		
50000	0.4720	0.0001	2.390	5.064	0.002	31415.9		
60000	0.4760	0.0001	1.990	4.181	0.002	37699.1		
70000	0.4880	0.0001	1.700	3.484	0.002	43982.3		
80000	0.4880	0.0001	1.500	3.074	0.002	50265.5		
90000	0.4880	0.0001	1.300	2.664	0.002	56548.7		
100000	0.4960	0.0001	1.180	2.379	0.002	62831.9		

Figura 38: Valores de V_{in} e V_{out} registados para as diferentes frequências e respetivo cálculo do ganho experimental. Valores do ganho de referência e valores do ajuste linear e respetivos resíduos para a gama dos valores de ganho experimental escolhida.

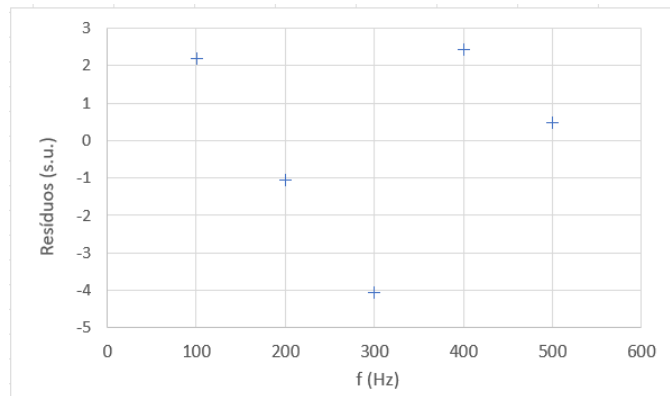


Figura 39: Resíduos do ajuste linear realizado ao ganho experimental.