



Instituto Politécnico do Cávado e do Ave  
Escola Superior de Tecnologia

**Engenharia Eletrotécnica e de Computadores**

# Amplificadores Operacionais

Telmo Fernandes 15868

# Resumo

Este documento tem como objetivo descrever a resolução da primeira parte prática relativa ao tema Amplificadores Operacionais, no âmbito da cadeira Eletrónica II, do curso Licenciatura em Engenharia Eletrotécnica.

De geral forma este projeto recai sobre três vertentes principais: A resolução dos conceitos teóricos, como cálculos matemáticos e análise de circuitos, a realização de simulações utilizando softwares específicos para a modelagem de circuitos e por fim validação e comparação em contexto real.

É feito o estudo de **amplificadores operacionais** (AmpOps) com foco na análise teórica, simulação e prática experimental destes dispositivos.

Principais tecnologias e conceitos:

## **Amplificadores Operacionais:**

- Foram estudadas várias configurações, como por exemplo amplificadores somadores, derivadores, inversores.

## **Simulação com Software:**

- Softwares como o **Multisim** e o **LTS spice** foram utilizados para simular o comportamento dos circuitos. Isso permitiu comparar os resultados teóricos com os práticos, e ajudou a validar o funcionamento dos circuitos antes da montagem experimental.

## **Funções de Transferência:**

- Foram deduzidas funções de transferência para os diferentes circuitos, utilizando ferramentas como a **Transformada de Laplace** e as **Leis de Kirchhoff**. Estas funções descrevem a relação entre os sinais de entrada e de saída dos circuitos.

---

### **Análise de Polos Dominantes e Ganho em Malha Aberta/Fechada:**

- Foi realizado um estudo sobre o comportamento dos amplificadores em **malha aberta** e **malha fechada**, onde o foco foi o ganho e a frequência de operação máxima. A análise envolveu a determinação dos polos dominantes, que limitam a resposta em alta frequência dos amplificadores.

### **Comparação entre Amplificadores (UA741 vs TL081):**

- Comparação de desempenho entre os amplificadores UA741 e TL081, levando em consideração características como a **largura de banda** e o **slew rate**.

### **Estudo da Resposta em Frequência:**

- A resposta dos amplificadores operacionais em diferentes frequências foi estudada, utilizando **diagramas de Bode** para ilustrar a relação entre o ganho e a frequência. Esta análise ajudou a determinar a frequência de corte e a diminuição do ganho em frequências elevadas.

### **Slew Rate (Taxa de Variação):**

- Foi analisado o impacto da limitação da **slew rate** no desempenho dos amplificadores. Foi observada distorção nos sinais de saída quando a frequência do sinal de entrada excedia a capacidade do amplificador, especialmente no **UA741**, que tem um slew rate mais baixo em comparação com o **TL081**.

### **Filtros Ativos:**

- Foram estudados circuitos que utilizam amplificadores operacionais para criar **filtros passa-baixa** e **passa-alta**, permitindo manipular sinais dentro de determinadas faixas de frequência.

# Índice

<i>Resumo .....</i>	<i>iii</i>
<i>Índice .....</i>	<i>v</i>
<i>Índice de Figuras .....</i>	<i>ix</i>
<i>Índice de Tabelas .....</i>	<i>xi</i>
<b>1.1      Enquadramento .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2      Apresentação do projeto .....</b>	<b>1</b>
1.2.1    Planeamento de projeto .....	2
1.2.2    Reuniões de acompanhamento .....	2
<b>1.3      Tecnologias utilizadas .....</b>	<b>2</b>
<b>3.1      Dados técnicos .....</b>	<b>5</b>
<b>3.2      Amplificador Somador Inversor .....</b>	<b>7</b>
3.2.1    Função de transferência .....	8
3.2.2    Dimensionamento de resistências do circuito para que o mesmo realize a seguinte expressão matemática: $v_o(t) = -1K(V_a(t)2.2k + V_b(t)1k + V_c(t)2.2k)$ .....	9
3.2.3 Escolha um conjunto de sinais de entrada que lhe permitam comprovar o funcionamento do circuito. Represeñe em ordem ao tempo os sinais de entrada e de saída. ....	10
3.2.4    Simule o comportamento do circuito através do Multisim (ou outro software). Compare os sinais obtidos com os da alínea c). .....	12
3.2.5    Realização Experimental .....	14
<b>3.3      Amplificador Derivador .....</b>	<b>18</b>
3.3.1    Função de transferência .....	19
3.3.2    Considere que excita o circuito com um sinal de onda triangular variando entre + 2V e - 2 V e com frequência de 2 kHz. Represeñe em ordem ao tempo, o sinal de saída do circuito quando $R_1=2.2\text{ k}\Omega$ e $C_1=10\text{nF}$ .....	20
3.3.3    Realização Experimental .....	22
<b>3.4      Estudo da resposta em Frequência do Amplificador .....</b>	<b>23</b>
3.4.1    Função de Transferência .....	23

---

3.4.2	Elabore uma tabela do produto Ganho x Largura de Banda para os AmpOps $\mu$ A741 e TL081. Considere o funcionamento do AmpOp em malha aberta. Explique o que significa. ....	24
3.4.3	Determine, para os dois AmpOps, a frequência máxima de operação devido ao polo dominante <sup>2</sup> , para ganho em malha fechada ( $A_f$ ) de $A_f = 20$ dB e $A_f = 60$ dB. Considere o funcionamento do AmpOp em malha fechada, circuito apresentado na figura anterior. ....	25
3.4.4	Desenhe um gráfico que ilustre a relação Ganho(frequência) (diagrama de Bode3), para cada um dos ampops dos dados recolhidos das tabelas b) e c). Expressse o ganho em dB e a frequência em Hz .....	27
3.4.5	Realização Experimental .....	28
3.4.5.1	Dimensione o circuito de modo que este apresente um ganho de 20 dB. Varie a frequência do sinal de entrada e observe os valores da amplitude do sinal de saída. Registe o valor da frequência para a qual a amplitude cai 3dB. ....	28
3.4.5.2	Modifique o circuito de modo que este apresente um ganho de 40 dB. Varie a frequência do sinal de entrada e observe os valores da amplitude do sinal de saída. Registe o valor da frequência para a qual a amplitude cai 3dB. ....	29
3.4.6	Substitua o $\mu$ A741 pelo TL081 e repita o procedimento das alíneas a) e b). ....	30
<b>3.5</b>	<b>ESTUDO DA TAXA DE VARIAÇÃO DE SAÍDA .....</b>	<b>32</b>
3.5.1	Determine, para os dois AmpOps, a frequência máxima de operação que não origina distorção devido a características não ideais introduzida pelo slew-rate, quando a amplitude do sinal da entrada é de 1V, para $A_f = 20$ dB e $A_f = 60$ dB. ....	32
3.5.2	Considere a montagem do amplificador inversor, analisada anteriormente, com $A_f$ de 20 dB. Excite o circuito com um sinal de onda sinusoidal com 1V de amplitude e frequência 1kHz. ....	33
3.5.2.1	Varie a frequência do sinal de entrada até verificar a distorção da onda. Observe e compare os sinais de entrada e de saída do circuito. Registe o valor de frequência para a qual se verifica distorção do sinal de saída. ....	33
3.5.2.2	Substitua o $\mu$ A741 pelo TL081 e repita o procedimento da alínea a). ....	34
3.5.2.3	Para as duas situações anteriores, compare e comente, justificando os resultados obtidos. ....	35
3.5.2.4	Aplique agora uma onda quadrada de igual amplitude, faça o mesmo teste, o que verifica? ....	36
3.5.3	Realização Experimental .....	38
<b>3.6</b>	<b>CIRCUITO PARA ANÁLISE .....</b>	<b>40</b>
3.6.1	Explique o funcionamento do circuito seguinte e apresente a sua função de transferência. ....	40



# Índice de Figuras 4

<i>Figura 1 Circuito Amplificador Inversor Somador</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2 Função de Transferência</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3 Definição das tensões de entrada e respetivas -Resistências</i>	<i>15</i>
<i>Figura 4 Representação dos Sinais em ordem ao tempo</i>	<i>16</i>
<i>Figura 5 1 Volts Amplitude, frequência de 1KHz</i>	<i>17</i>
<i>Figura 6 2 Volts Amplitude, frequência de 1KHz</i>	<i>17</i>
<i>Figura 7 3 Volts Amplitude, frequência de 1KHz</i>	<i>18</i>
<i>Figura 8 Simulação saída LTspice</i>	<i>18</i>
<i>Figura 9 Sinal de entrada 10KHz 1 Volt de Amplitude de Pico(2Vpp).</i>	<i>20</i>
<i>Figura 10 Função de Transferência 10Khz 1 Volt de Amplitude</i>	<i>21</i>
<i>Figura 11 Circuito Somador Inversor UA741</i>	<i>22</i>
<i>Figura 12 Sinal de Saída do amplificador</i>	<i>22</i>
<i>Figura 13 Circuito Amplificador Inversor Somador</i>	<i>24</i>
<i>Figura 14 Função de Transferência</i>	<i>25</i>
<i>Figura 15 Representação sinal de saída</i>	<i>26</i>

## Índice de Tabelas

<i>Tabela 1 Dados Técnicos</i>	6
<i>Tabela 2 Tabela Ganho x Largura</i>	24
<i>Tabela 3 Frequência Máxima / Polo Dominante</i>	25

# 1 Introdução

## 1.1 Enquadramento

Este relatório descreve todas as atividades desenvolvidas ao longo da primeira parte pratica relativo à cadeira de Eletrónica II recorrente no âmbito do curso de Licenciatura em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Tudo descrito passa pela análise dos circuitos amplificadores operacionais, dispositivos semicondutores aplicados em circuitos integrados.

Ao longo da pratica foram analisados tipos de montagens usados os amplificadores operacionais convidando os alunos a fazerem analyses críticas levando assim a uma melhor compreensão destes dispositivos quanto ao seu funcionamento.

## 1.2 Apresentação do projeto

O objetivo da realização deste trabalho práctico, como já mencionado, foi uma melhor compreensão dos circuitos com amplificadores operacionais.

Para tal, foi necessário estudar detalhadamente algumas especificações destes dispositivos, como o cálculo de funções de transferência em diferentes configurações (Amplificador Somador, Inversor, Diferencial, entre outros), aplicando assim os conceitos abordados em aula, como a Transformada de Laplace e as Leis de Kirchhoff, que foram fundamentais para alcançar a solução final.

Este trabalho tinha como propósito a consulta de dados técnicos com base nas especificações fornecidas pelos fabricantes para cada modelo de amplificador, bem como a simulação através de softwares como o Multisim e o LTSpice. O estudo em frequências dos amplificadores operacionais permite comparar os resultados obtidos em situações reais e experimentais com as simulações virtuais, incentivando assim a crítica e discussão dos elementos do grupo em relação aos resultados esperados.

Outro dos objetivos era o desenvolvimento de diagramas de Bode com base nas análises realizadas, ou seja, a partir das funções de transferência obtidas.

### **1.3 Tecnologias utilizadas**

As tecnologias utilizadas passaram por maioritariamente pela utilização de softwares de simulação no que toca as partes virtuais de forma que depois na prática fosse uma referência e um ponto de comparação, relativamente à prática ou seja tudo que seja realizações experimentais em aula foram usadas várias tecnologias como por exemplo o manuseamento de placas de montagens as chamadas breadboards, digital lab, multímetros digitais, osciloscópio e um gerador de frequências.

## 3 Descrição técnica

### 3.1 Dados técnicos

Este capítulo refere-se à primeira tarefa do trabalho, que consistia em consultar o datasheet específico de cada amplificador. Esta etapa é de extrema importância sempre que lidamos com qualquer dispositivo eletrónico. É através desta consulta que adquirimos uma percepção clara das limitações do dispositivo em questão, neste caso, dos amplificadores operacionais que utilizamos, como o UA741 e o TL081.

Nos datasheets, podemos encontrar informações cruciais, como grandezas específicas, valores médios, faixas de operação, temperaturas, tolerâncias, e o valor nominal dos componentes. Estas especificações são fundamentais para trabalharmos de forma adequada, garantindo a integridade física dos dispositivos e evitando a sua danificação.

Ao consultar os datasheets, é possível entender melhor o funcionamento do dispositivo, permitindo-me fazer cálculos com base nas suas reais especificações, garantindo assim um caminho mais confiável para o desenvolvimento do projeto. Em alguns casos, os dados técnicos também permitem analisar gráficos que mostram o comportamento dos componentes em função de variáveis como tensão, corrente, frequência e temperatura, oferecendo uma visão mais completa do desempenho do dispositivo em diferentes condições.

Tabela 1 Dados Técnicos

	uA741I			TL081C		
Parâmetro	Valor	Unidade	Obs.	Valor	Unidade	Obs.
Tensões de Alimentação	$\pm 15$	Volt(v)		$\pm 18$	Volt(v)	
Temperaturas de Operação	-40 / 105	Celsius(°C)	*Operating free air temperature range	0 / 70	Celsius(°C)	*Operating Ambient Temperature
Tensões diferencial de entrada	$\pm 12$	Volt(v)		$\pm 30$	Volt(v)	
Tensão de desvio de entrada	1	Milivolt(mV)	RS $\leq$ 50 Ω TA = 25°C	3	Milivolt(mV)	
Corrente de desvio de entrada	2	Nanoampère (nA)	TA = 25°C	5	Picoampère (pA)	
Corrente de polarização de entrada	10	Nanoampère (nA)	TA = 25°C	20	Picoampère (pA)	
Fator de rejeição de modo comum (CMRR)	90	Decibel(dB)	RS $\leq$ 50 Ω, VCM = $\pm 12$ V	86	Decibel(dB)	
Ganho x Banda	1	Megahertz(Mhz)	VI = 10 mV, RL = 2 kΩ, CL = 100 pF, f = 100 kHz	4	Megahertz(Mhz)	
Resistência de saída	75	Ohm(Ω)	TA = 25°C			
Corrente de saída em curto-círcuito	40	Miliampère(mA)	TA = 25°C	40	Miliampère(mA)	Tamb = 25°C Tmin. Tamb Tmax.
Taxa de variação de saída	0.5	Volt/microsegundo(V/us)		16	Volt/microsegundo(V/us)	Vin = 10V, RL = 2kΩ, CL = 100pF,
Ganho em malha aberta	200	Volt/ Milivolt(V/mV)	VS = $\pm 20$ V, VO = $\pm 15$ V, RL $\geq$ 2 K Ω TA = 25°C	150	Volt/ Milivolt(V/mV)	
Polo dominante						
Resistência de entrada	2	Megaohm(MΩ)	TA = 25°C, VS = $\pm 20$ V	$10^{12}$	Ohm(Ω)	

### 3.2 Amplificador Somador Inversor

Este capítulo refere-se à segunda tarefa, análise de uma das várias configurações utilizando amplificadores operacionais, neste caso, o Amplificador Somador Inversor. O amplificador somador é um circuito numa configuração que permite realizar a soma de dois ou mais sinais, sendo uma variação do amplificador inversor.

A semelhança entre ambos o circuito é evidente, principalmente no sinal de saída, que apresenta uma polaridade invertida em relação aos sinais de entrada. No caso analisado, múltiplas tensões de entrada foram aplicadas ao amplificador, especificamente três tensões variáveis no tempo, conhecidas como sinusoides. O resultado na saída foi uma soma amplificada dessas tensões, com a característica de estarem invertidas em relação aos sinais de entrada.

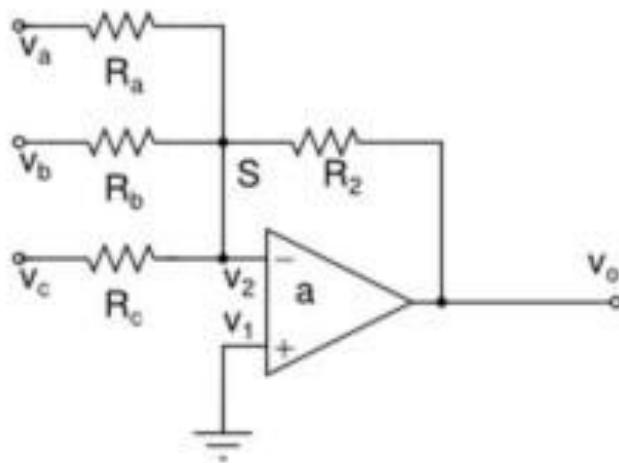
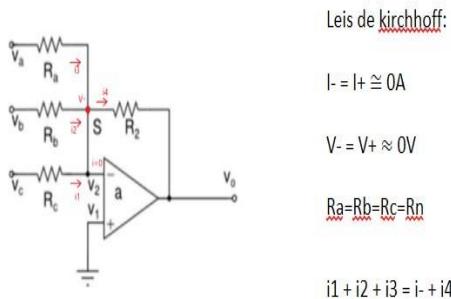


Figura 1 Circuito Amplificador Inversor Somador

### 3.2.1 Função de transferência



$$\left\{ \frac{URc}{Rc} + \frac{URb}{Rb} + \frac{URa}{Ra} = \frac{UR2}{R2} \quad \left\{ \frac{Vc - (v_-)}{Rc} + \frac{Vb - (v_-)}{Rb} + \frac{Va - (v_-)}{Ra} = \frac{(v_-) - V_o}{R2} \quad \left\{ \frac{Vc}{Rc} + \frac{Vb}{Rb} + \frac{Va}{Ra} = -\frac{V_o}{R2} \quad \left\{ -\left(\frac{R2}{Rc} * Vc + \frac{R2}{Rb} * Vb + \frac{R2}{Ra} * Va\right) = V_{out} \right. \right. \right. \right.$$

$$\left\{ -R2\left(\frac{1}{Rc} * Vc + \frac{1}{Rb} * Vb + \frac{1}{Ra} * Va\right) = V_{out} \quad \left\{ -R2\left(\frac{Vc}{Rc} + \frac{Vb}{Rb} + \frac{Va}{Ra}\right) = V_{out} \right. \right. \right.$$

Figura 2 Função de Transferência

Para a analise das funções de transferência foram usados os seguintes métodos:

1. Arbitragem das correntes;
2. Consideração de umas das características mais importantes do amplificador operacional, ou seja, a alta impedância de entrada nos amplificadores teoricamente impedância infinita, com isto vem a conclusão de que  $V_- = V_+ \cong 0$  Volts sendo que consequentemente  $I_- = I_+ \cong 0$  Amperes.
3. Considerar um ganho de tensão onde o Ganho =  $\frac{V_{out}}{V_{in}}$  que desta maneira nos leva à função de transferência.
4. Considerar a primeira lei de Kirchhoff define que: A soma algébrica das correntes que entram e saem de uma região, chamada nó, é igual a zero. Ou seja, a soma das correntes que entram em um nó deve ser igual à soma das correntes que saem do nó.

### 3.2.2 Dimensionamento de resistências do circuito para que o mesmo realize a seguinte expressão matemática:

$$V_o(t) = -1K \left( \frac{v_a(t)}{2.2k} + \frac{v_b(t)}{1k} + \frac{v_c(t)}{2.2k} \right)$$

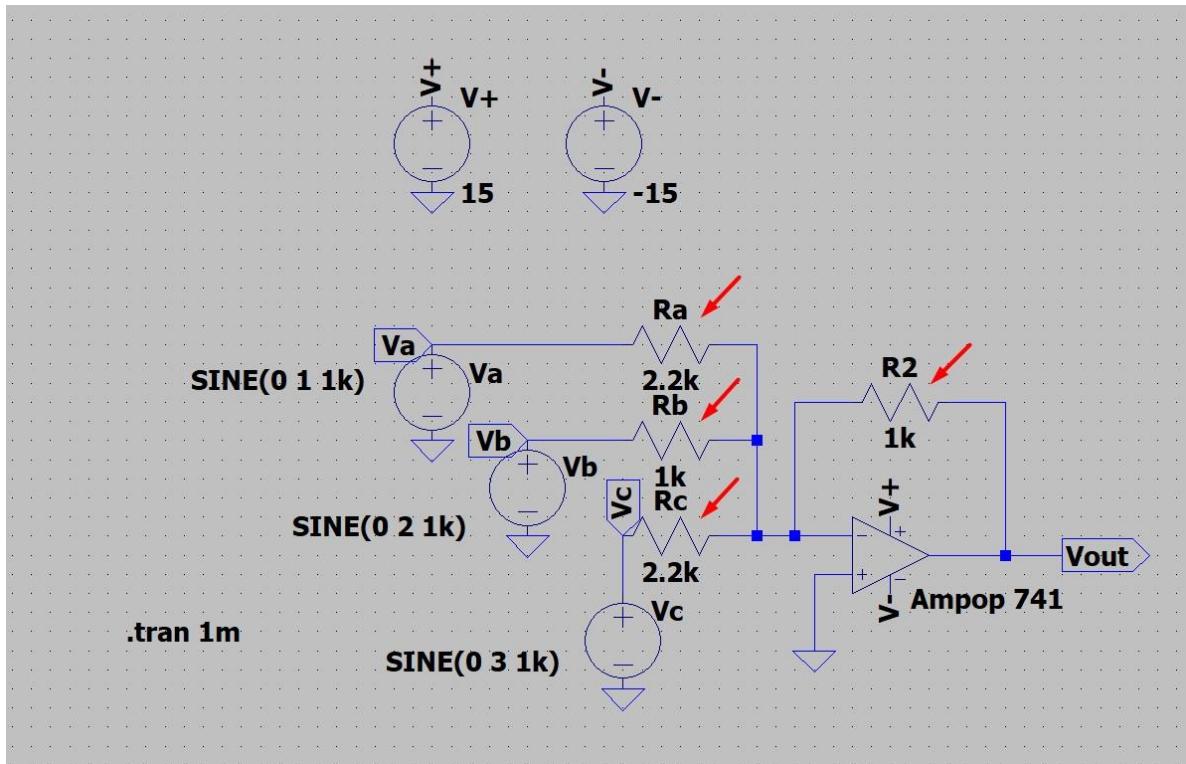


Figura 3 Definição das tensões de entrada e respetivas -Resistências

Seguindo a configuração do circuito apresentado em cima temos que a nossa função de transferência final:

$$V_o(t) = -1K \left( \frac{v_a(t)}{2.2k} + \frac{v_b(t)}{1k} + \frac{v_c(t)}{2.2k} \right)$$

**3.2.3 Escolha um conjunto de sinais de entrada que lhe permitam comprovar o funcionamento do circuito. Represente em ordem ao tempo os sinais de entrada e de saída.**

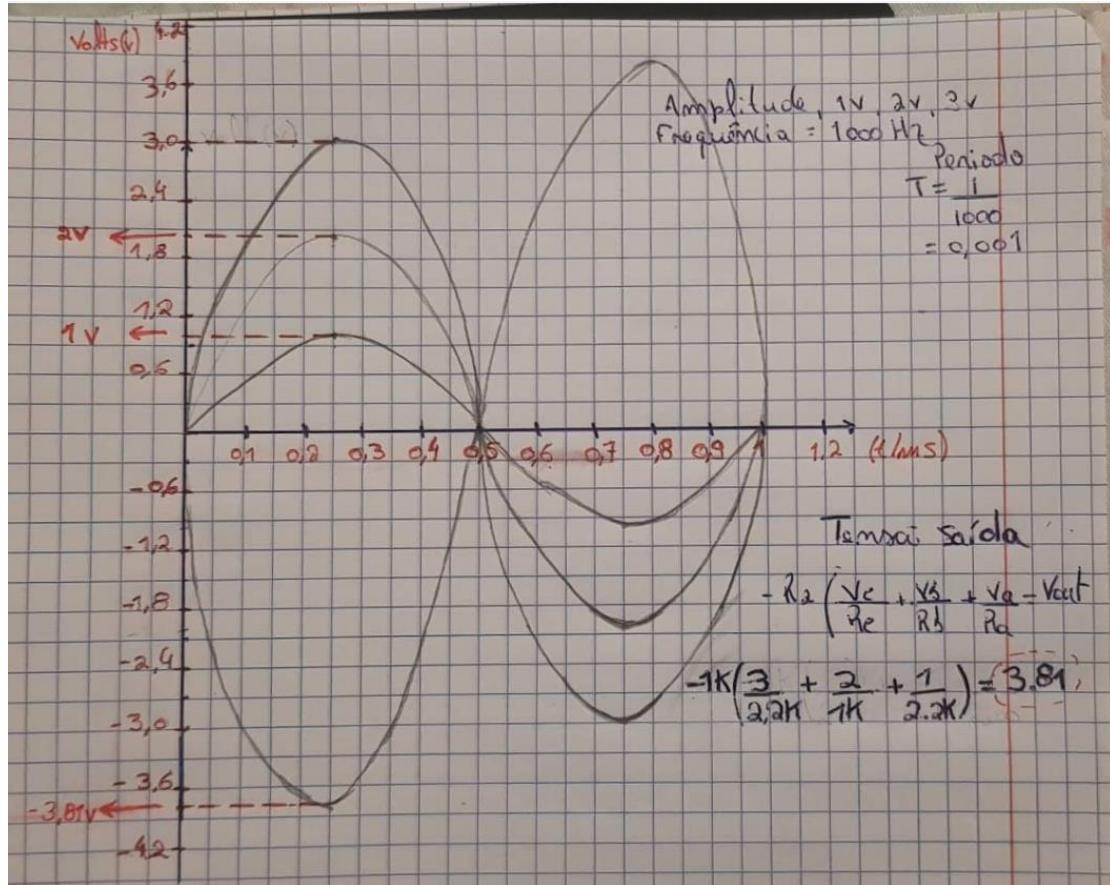
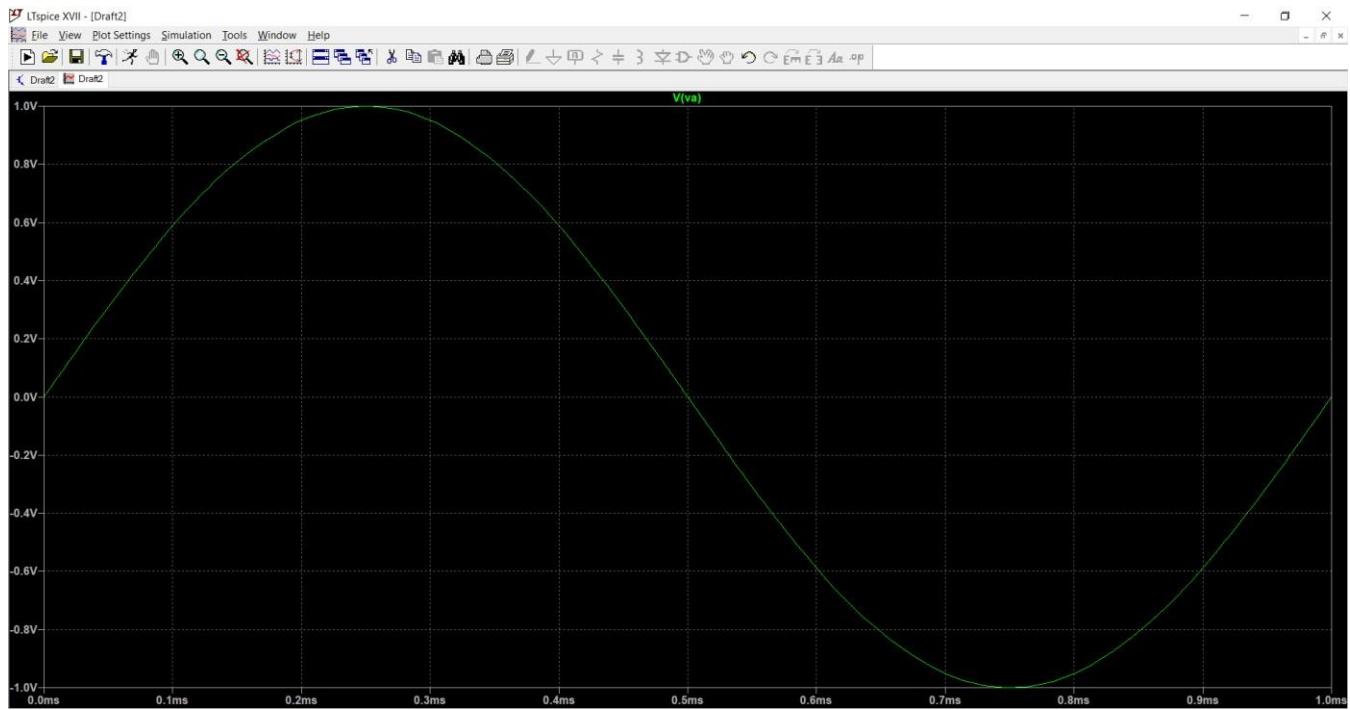


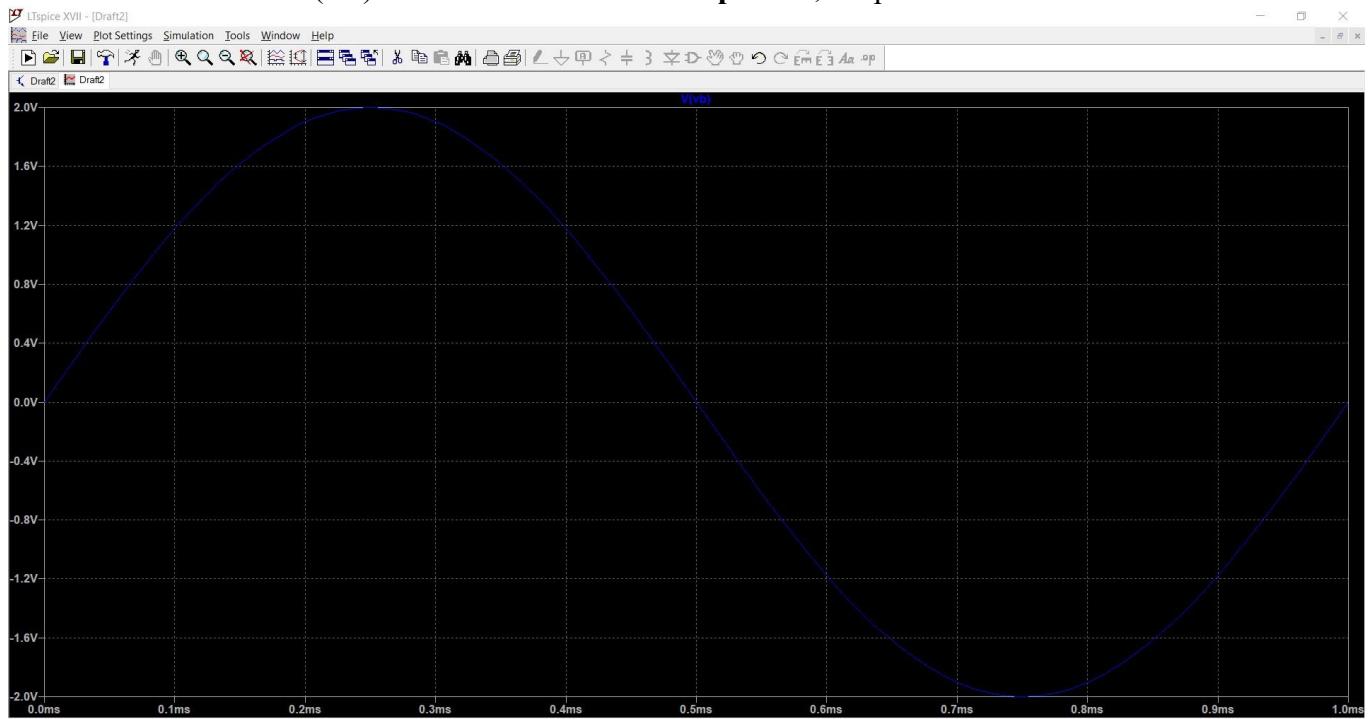
Figura 4 Representação dos Sinais em ordem ao tempo

Sinal de Entrada (Va) Sinal senoidal **1 Volts Amplitude**, frequência de 1KHz



*Figura 5 1 Volts Amplitude, frequência de 1KHz*

Sinal de Entrada (Vb) Sinal senoidal **2 Volts Amplitude**, frequência de 1KHz



*Figura 6 2 Volts Amplitude, frequência de 1KHz*

Sinal de Entrada ( $V_b$ ) Sinal senoidal 3 Volts Amplitude, frequência de 1KHz

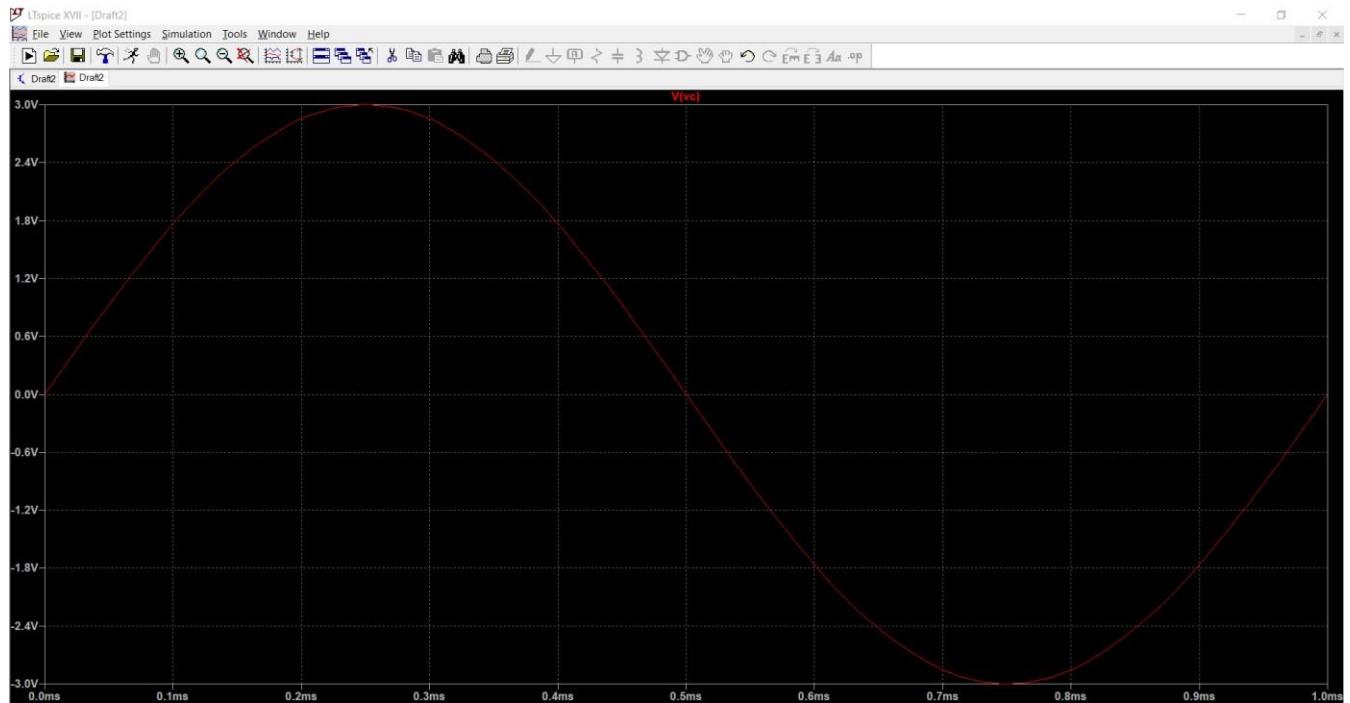


Figura 7 3 Volts Amplitude, frequência de 1KHz

**3.2.4 Simule o comportamento do circuito através do Multisim (ou outro software). Compare os sinais obtidos com os da alínea c).**

Simulação do circuito LTspice.



Figura 8 Simulação saída LTspice

Deduzindo a função de transferência chegamos à conclusão que:

$$- R_2 \left( \frac{V_c}{R_c} + \frac{V_b}{R_b} + \frac{V_a}{R_a} \right) = V_{out}$$



$$- 1K \left( \frac{1V(t)}{2.2K} + \frac{2V(t)}{1K} + \frac{3V(t)}{2.2K} \right) = 3.818$$

De modo a comparar os valores entre os valores obtidos pela simulação e os cálculos teóricos, podemos constatar que há uma ligeira diferença muito pequena entre os dois, nos valores teóricos obtemos um valor de output na ordem dos 3.818(V)Volts, enquanto que na simulação obtemos um valor de output na ordem dos 3.82 (V)Volts, uma vez que na simulação foram usadas resistências com tolerância na ordem dos 5%, esta poderá ser a uma das causa da diferença entre os valores calculados teóricos e práticos(simulação).

### 3.2.5 Realização Experimental

Em laboratório verificamos que com os instrumentos disponibilizados, neste caso gerador de sinais, não nos era possível simular as 3 sinusoides de entrada ao qual nos tivemos que adaptar, a ideia passou por colocar as três entradas ou seja v(a), v(b) e v(c) em paralelo com um único sinal de entrada.

O sinal de entrada tinha como parâmetros 10KHz de frequência (10KHz) com amplitude de pico de 1 volt.

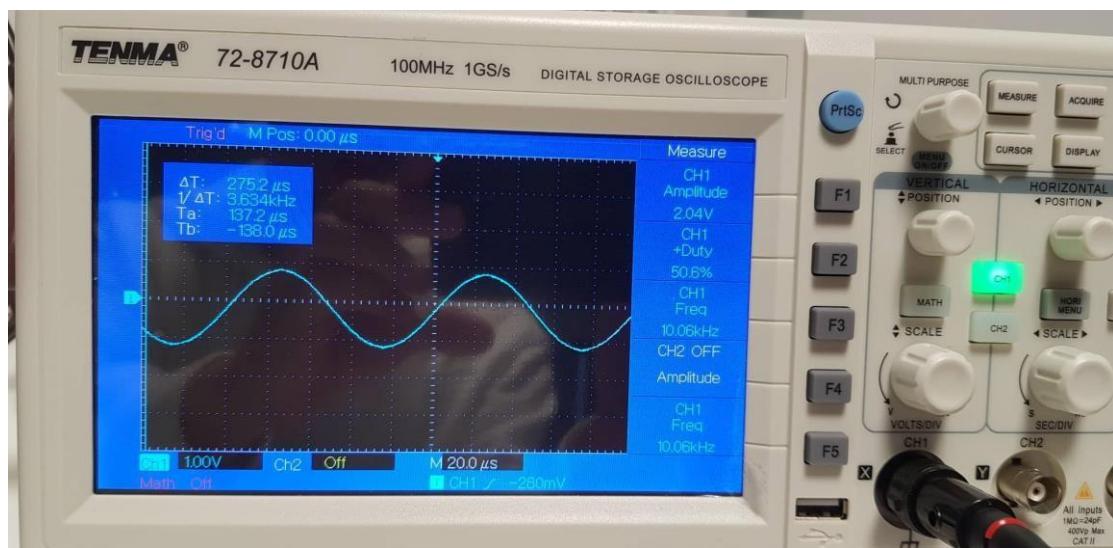


Figura 9 Sinal de entrada 10KHz 1 Volt de Amplitude de Pico(2Vpp).

Ao longo da aula pratica verificou-se que para os valores de simulação foram aplicados valores errados, aplicando assim na fórmula do cálculo de transferência valores de tensão como sinais contínuos e não valores de tensão alternados(sinusoide) como deveria de ser, assim sendo e uma vez detetado o erro foi tempo de o corrigir para a simulação pratica.

Neste caso os valores de entrada foram calculados em função da fórmula:

$$y(t) = A_{\max} * \sin(2\pi ft)$$

em que:

- $A_{\max}$  = Amplitude máxima de pico.
- $f$  = Frequência, o número de oscilações (ciclos) que ocorrem cada segundo de tempo.
- $t$  = Tempo em segundos.

Posto isto foi ainda necessário calcular o período, de forma a saber quanto tempo(segundos) demora a nossa onda a dar uma volta completa quando sujeito a uma frequência de 10Khz.

Assim sendo o nosso período é calculado em função de:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{10\text{Khz}} = 0,0001\text{s}$$

Ou seja, desta maneira concluímos que o nosso sinal de entrada representado por uma onda sinusoidal demora cerca de 0.1ms (Milissegundo) a completar uma volta.

Desta maneira foi possível calcular a função de transferência corretamente:

Função de transferência

$$\approx \frac{R_2}{R_1} \left( \frac{V_a(t)}{R_a} + \frac{V_b(t)}{R_b} + \frac{V_c(t)}{R_c} \right)$$

$$\approx 1000 \left( \frac{V_a(t)}{2200} + \frac{V_b(t)}{1000} + \frac{V_c(t)}{2200} \right)$$

$$\approx 1000 \left( \frac{A}{2200} + \frac{A}{1000} + \frac{A}{2200} \right)$$

$$\approx 1000 \left( \frac{1}{2200} + \frac{1}{1000} + \frac{1}{2200} \right)$$

$$\approx 1000 \left( 1,90 \times 10^{-3} \right) = 1,90\text{V}$$

Amplitude do Pico

Figura 10 Função de Transferência 10Khz 1 Volt de Amplitude

Depois de calcular a função de transferência, a montagem do circuito com o amp op UA741:

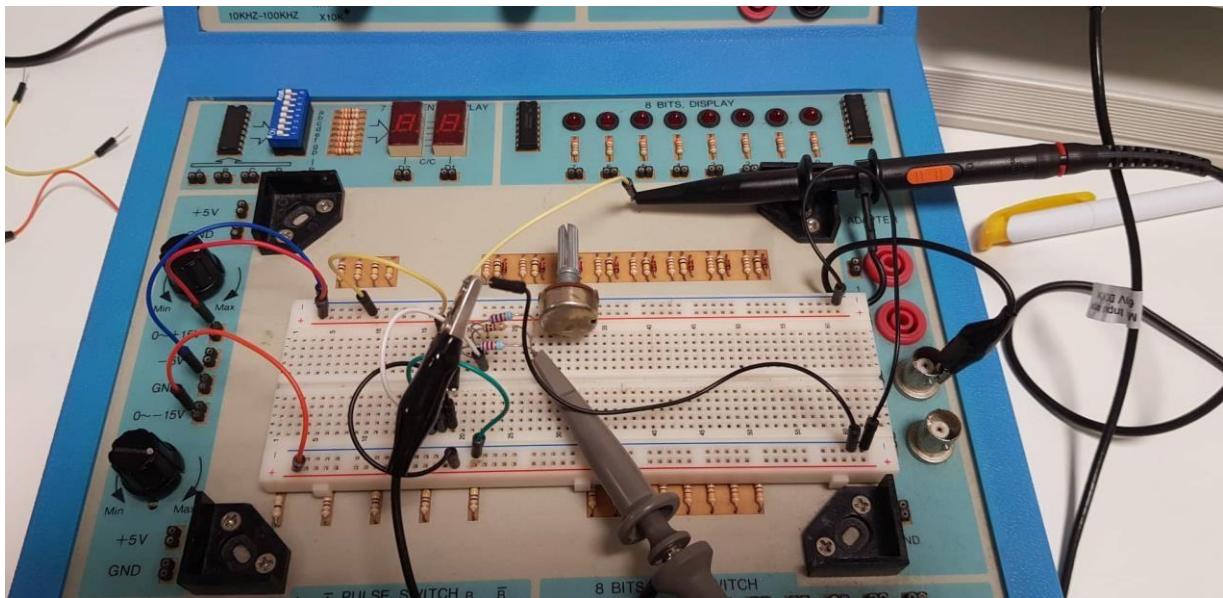


Figura 11 Circuito Somador Inversor UA741

Uma vez montado o circuito aplicamos o sinal de entrada nas resistências 2.2K, 1K e 2.2K, sinal com entrada 10KHz 1 Volt de Amplitude de Pico.

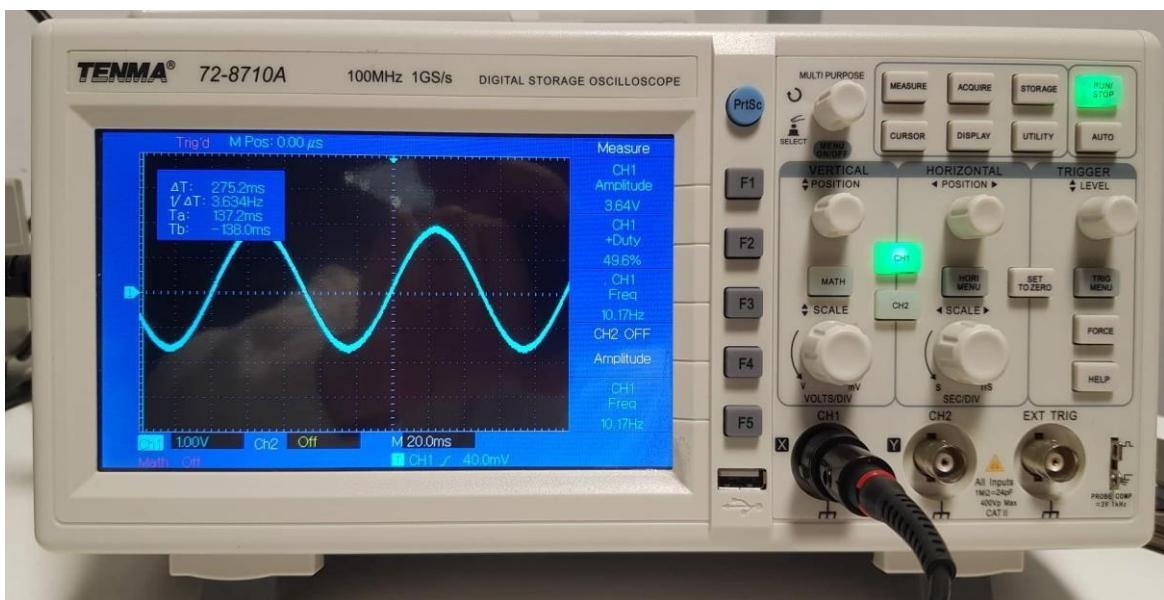


Figura 12 Sinal de Saída do amplificador

Como podemos observar temos um sinal de saída com 10KHz e aproximadamente 1.82 volts de amplitude pico ( $\frac{3.64V}{2V} = 1.82V$ ) o que é muito próximo daquilo que foi calculado nos valores teóricos de aproximadamente 1.90 Volts valor pico.

### 3.3 Amplificador Derivador

Este subcapítulo refere-se à terceira questão do enunciado do trabalho prático, que consiste, mais uma vez, na análise de uma das várias configurações com amplificadores operacionais, neste caso, o Amplificador Derivador.

O amplificador derivador é um circuito com AMPOP que permite calcular a derivada da tensão de saída em função do sinal de entrada. Este amplificador funciona também como um inverter, mas com a particularidade de que uma das resistências é substituída por um condensador, que neste caso tem o valor de 10nF.

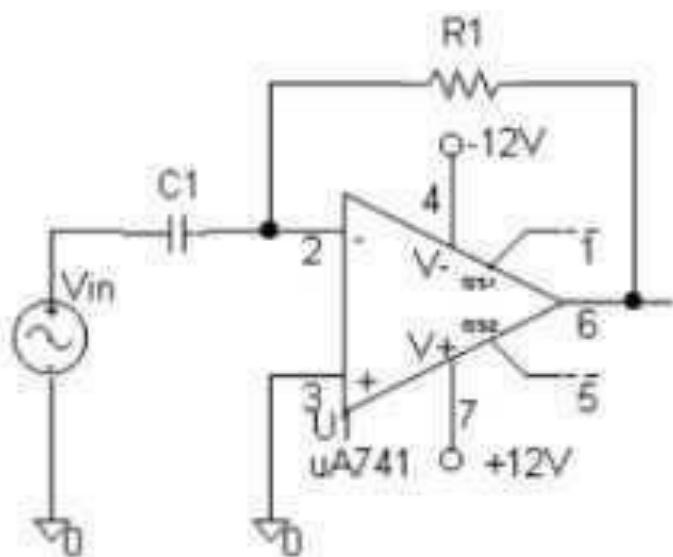


Figura 13 Circuito Amplificador Inversor Somador

### 3.3.1 Função de transferência

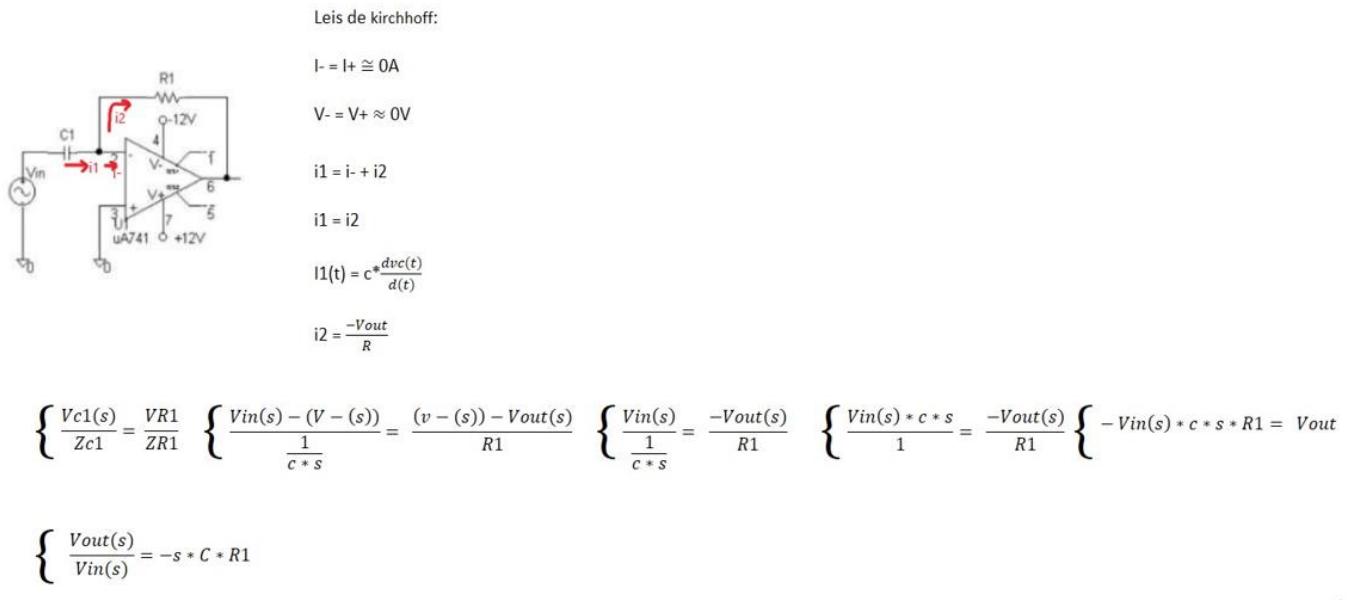


Figura 14 Função de Transferência

Para a analise das funções de transferência foram usados os seguintes métodos:

1. Arbitragem das correntes;
2. Consideração de umas das características mais importantes do amplificador operacional, ou seja, a alta impedância de entrada nos amplificadores teoricamente impedância infinita, com isto vem a conclusão de que  $V_- = V_+ \cong 0$  Volts sendo que consequentemente  $I_- = I_+ \cong 0$  Amperes.
3. Considerar que como vamos trabalhar com **impedâncias aplicar as leis de Laplace e assim sendo no domínio da frequência.**
4. E por fim considerar a primeira lei de Kirchhoff define que: A soma algébrica das correntes que entram e saem de uma região, chamada nó, é igual a zero. Ou seja, a soma das correntes que entram em um nó deve ser igual à soma das correntes que saem do nó.

**3.3.2 Considere que excita o circuito com um sinal de onda triangular variando entre + 2V e -2 V e com frequência de 2 kHz. Represente em ordem ao tempo, o sinal de saída do circuito quando  $R1=2.2\text{ k}\Omega$  e  $C1=10\text{nF}$**

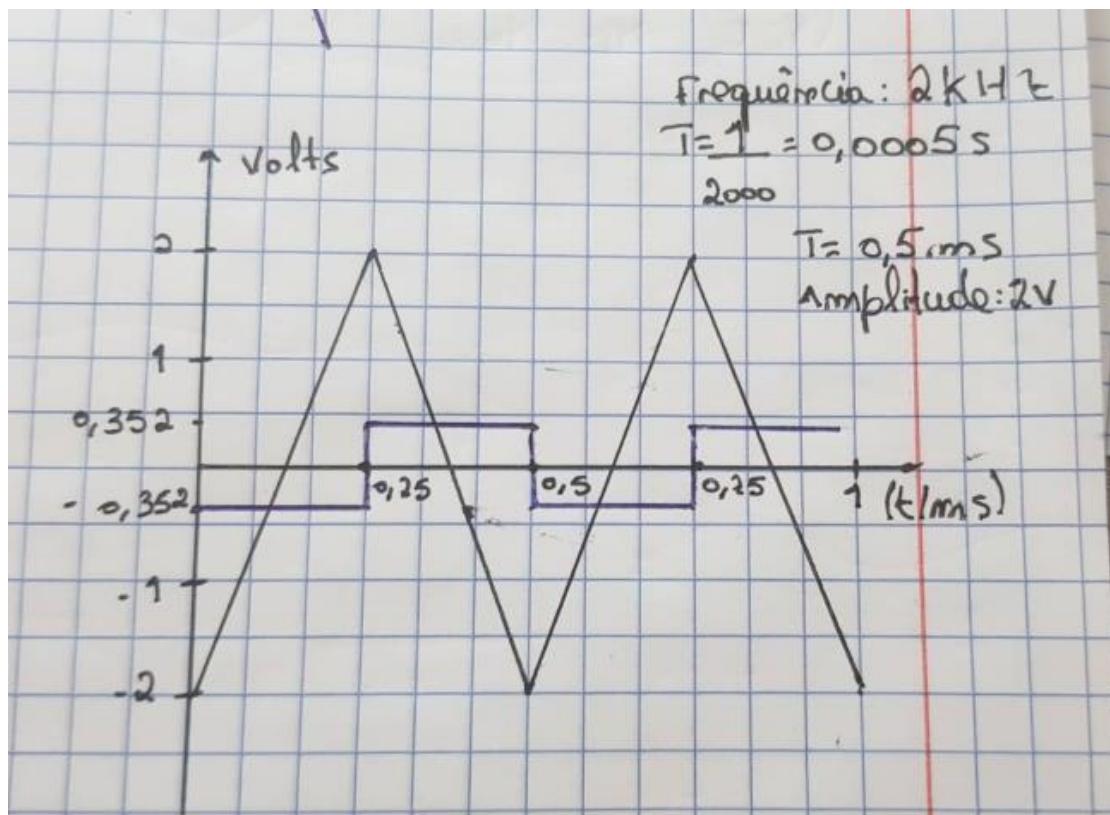


Figura 15 Representação sinal de saída

Para calcular o sinal de saída foi utilizado a seguinte formula, formula esta deduzida através da função de transferência

$$V_{out} = -V_{in}(s) * c * s * R1$$

$$V_{out} = -R * c * \frac{dV_{in}(t)}{dt}$$

Em que o declive do sinal de entrada para cada “ramo” é calculado através da expressão

$m = \frac{y_2 - y_1}{x_1 - x_2}$  ou seja num intervalo por exemplo de [0 , 0.25ms] temos um declive

de  $\frac{2v - (-2v)}{0.00025\text{seg} - (-0\text{seg})} = 16000$ , ( $\frac{4V}{0.25\text{ms}} = 16 * 1000 = 16000V/\text{s}$  ou

seja é equivalente a dizer que temos uma variação de 16000 V/s, ( em que se escrevermos em ordem a uma expressão teremos então os  $16000t$  em que t é representado em segundos.

$$V_{out} = -(2200) * (0.01 * 10^{-6}) * \frac{dV_{in}(16000t)}{dt}$$

$$V_{out} = -0.352 \text{ V}$$

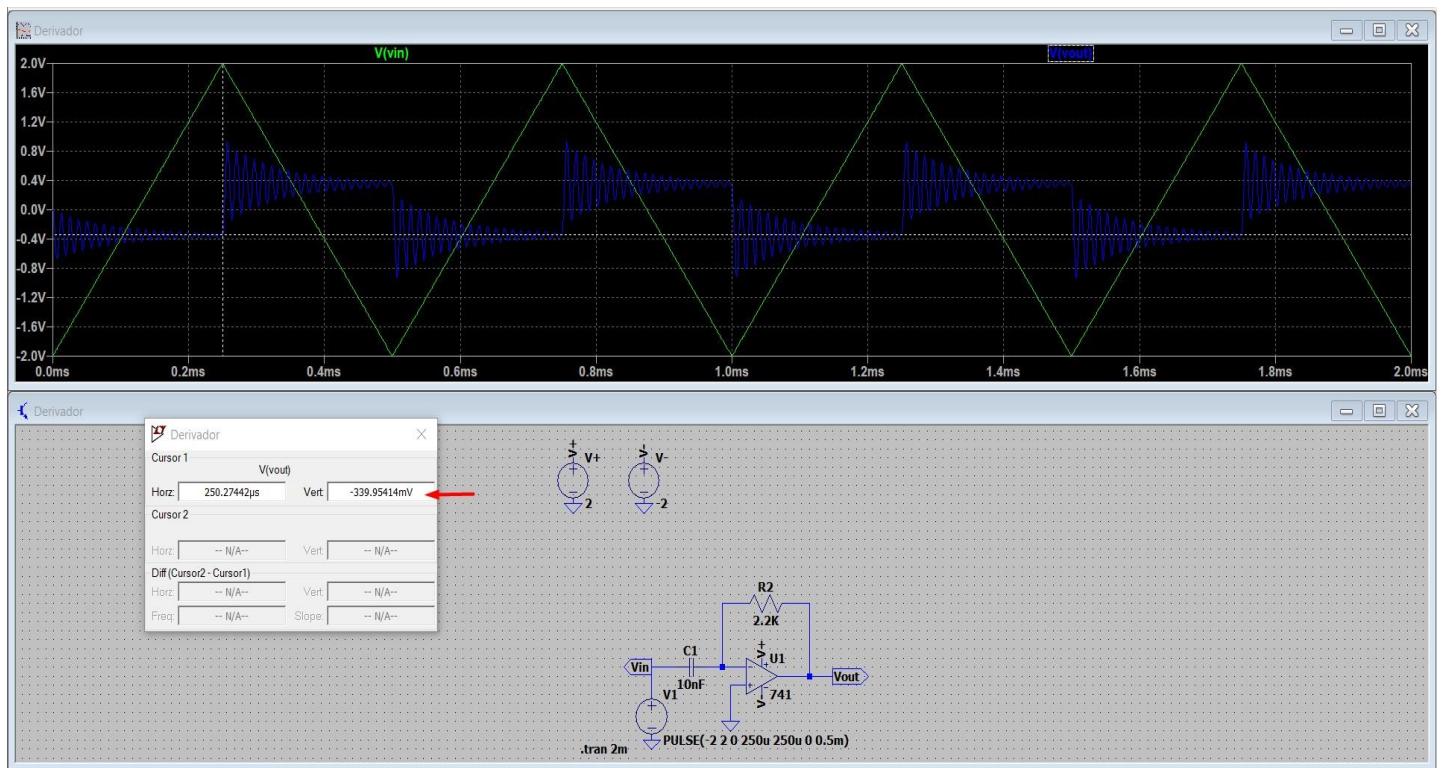
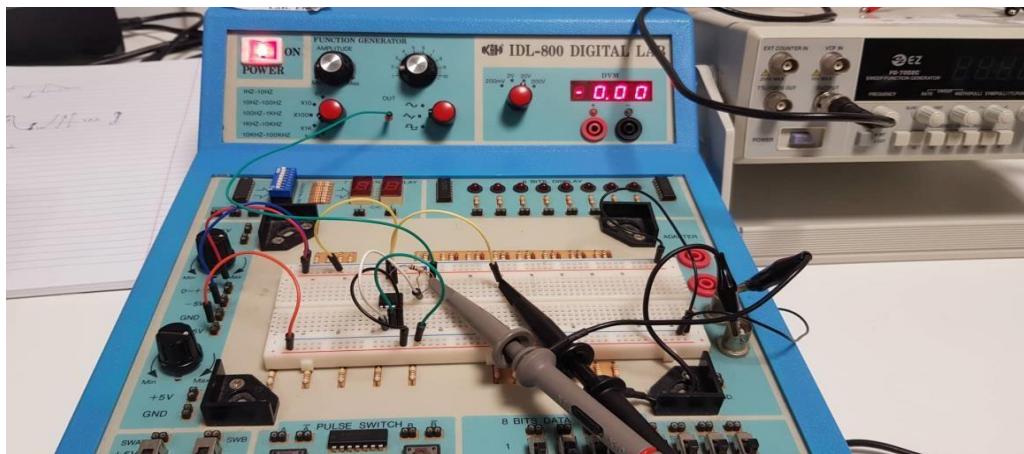


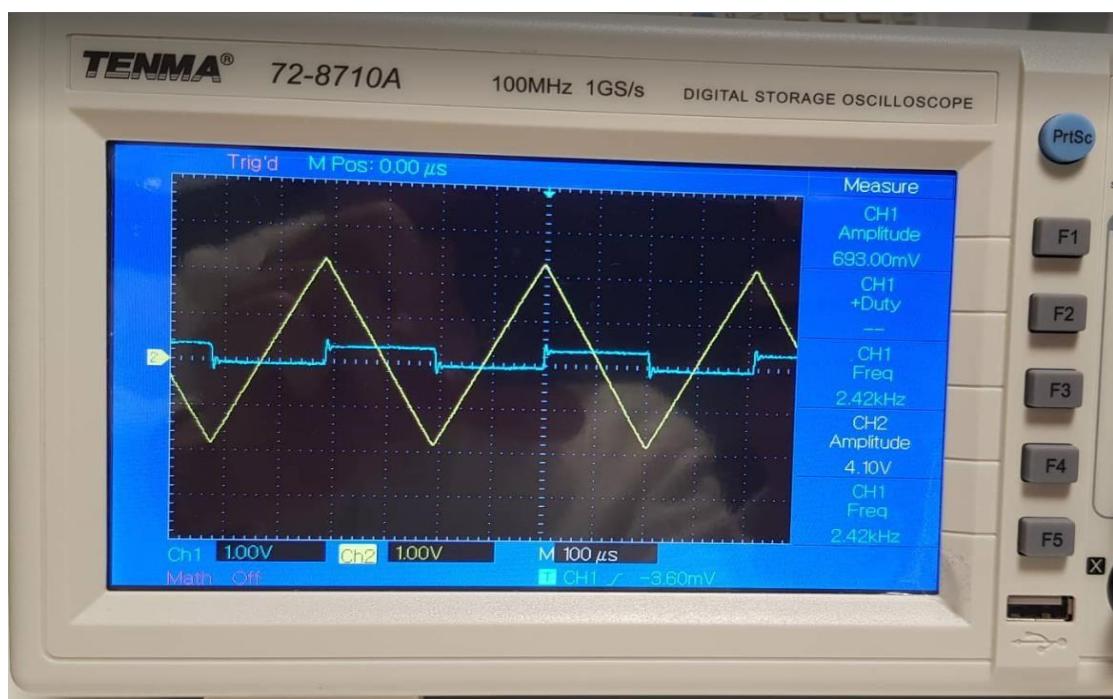
Figure 16 Sinal de saída Amplificador Diferenciador

### 3.3.3 Realização Experimental

Na realização experimental obtemos valores relativamente próximos daquilo que era o esperado comparativamente com a simulação.



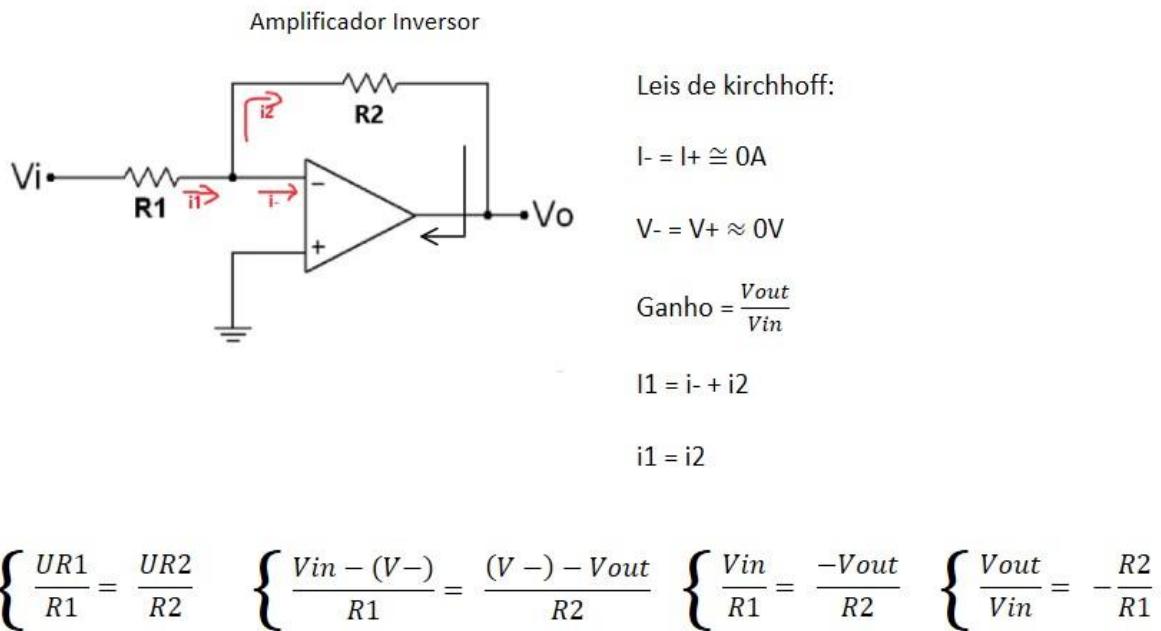
Na montagem do circuito Diferenciador usamos o Digital Lab para gerar a frequência desejada neste caso 2KHz.



Como podemos observar através dos parâmetros apresentados pelo osciloscópio podemos concluir que a amplitude de saída do nosso amplificador está próxima daquilo que era esperado, ou seja é apresentado um valor de amplitude vpp, na ordem dos 693mV ao que se dividirmos este valor por 2 apresentado assim o valor de pico temos um resultado de 346mV o que vai de encontro á simulação e aos cálculos teóricos.

## 3.4 Estudo da resposta em Frequência do Amplificador

### 3.4.1 Função de Transferência



Para a analise das funções de transferência foram usados os seguintes métodos:

1. Arbitragem das correntes;
2. Consideração de umas das características mais importantes do amplificador operacional, ou seja, a alta impedância de entrada nos amplificadores teoricamente impedância infinita, com isto vem a conclusão de que  $V_- = V_+ \cong 0(V)$  Volts sendo que consequentemente  $I_- = I_+ \cong 0 (A)$ Amperes.
3. Considerar um ganho de tensão onde o Ganho =  $\frac{V_{out}}{V_{in}}$  que desta maneira nos leva à determinação da função de transferência.
4. E por fim considerar a primeira lei de Kirchhoff define que: A soma algébrica das correntes que entram e saem de uma região, chamada nó, é igual a zero. Ou seja, a soma das correntes que entram em um nó deve ser igual à soma das correntes que saem do nó.

**3.4.2 Elabore uma tabela do produto Ganho x Largura de Banda para os AmpOps  $\mu A741$  e  $TL081$ . Considere o funcionamento do AmpOp em malha aberta. Explique o que significa.**

	GBP	Ganho	Largura de Banda
$\mu A741$	1 MHz	200 V/mV – (3dB)	7 Hz
$TL081C$	4 MHz	150 V/mv – (3db)	37.7 Hz

Tabela 2 Tabela Ganho x Largura

$\mu A741$

$$200 \text{ V/mV} \rightarrow 20\log(200000) = 106 \text{ dB}$$

$$141.253 \text{ V/mV} \leftarrow 10^{\frac{103}{20}} = 103 \text{ dB}$$

-3dB (Calcular Frequência de corte)

$$\text{Bandwidth} = \frac{\text{Gain}}{\text{Gain}} \text{ (}) \text{ Bandwidth} = \frac{103}{141.253 \text{ V/mV}} \text{ }^{1\text{MHz}} = 7\text{Hz}$$

Como podemos observar a Frequência (Freq corte) em malha aberta do ampop ocorre numa frequência muito baixa, podemos concluir que até esta frequência de aproximadamente (7Hz) o ampop vai usufruir de um ganho extremamente alto na ordem dos  $> 100K$ . A partir da frequência de corte este ganho vai ser sujeito a uma queda constante de 20db/década em que o amplificador se vai comportar praticamente como um filtro, e à medida que a frequência aumenta o ganho diminui consideravelmente.

TL081C

$$150 \text{ V/mV} \rightarrow 20\log(150000) = 103.52 \text{ dB}$$

$$106.169 \text{ V/mV} < 10^{\frac{103.52}{20}} = 100.52 \text{ dB}$$

-3dB (Calcular Frequência de corte)

$$\text{Bandwidth} = \frac{GBP}{Gain} (=) \text{ Bandwidth} = \frac{4\text{MHz}}{106.169 \text{ V/mV}} = 37.7 \text{ Hz}$$

Mais uma vez como podemos observar a Frequência (Freq corte) em malha aberta do ampop neste caso do TL081 é muito baixa, podemos concluir que até esta frequência de aproximadamente (37.7Hz) o ampop vai usufruir de um ganho extremamente alto. A partir da frequência de corte este ganho vai ser sujeito a uma queda constante de 20db/década.

**3.4.3 Determine, para os dois AmpOps, a frequência máxima de operação devido ao polo dominante<sup>2</sup>, para ganho em malha fechada (Af) de Af =20 dB e Af= 60 dB. Considere o funcionamento do AmpOp em malha fechada, circuito apresentado na figura anterior.**

	Af=20	Af=60	Af=40
uA741	141442Hz (≈141.5Khz)	1412Hz (≈1.4Khz)	14144.27Hz (≈14Khz)
TL081C	565770Hz (≈566Khz)	5650Hz (5.6Khz)	565787Hz (56.5Khz)

Tabela 3 Frequência Máxima / Polo Dominante

$$20\log(A_f) = 20 - (3\text{dB}) \rightarrow 10^{\frac{17}{20}} = 7.07$$

$$20\log(A_f) = 60 - (3\text{dB}) \rightarrow 10^{\frac{57}{20}} = 707.94$$

uA741 Gain Bandwidth Product = 1MHz

TL081 Gain Bandwidth Product = 4MHz

20dB:

A741:

GBP= Gain x Bandwidth

$$\text{Bandwidth} = \frac{\text{GBP}}{\text{Gain}} (=) \text{ Bandwidth} = \frac{1\text{MHz}}{7.07} = 141442\text{Hz}$$

20dB:

TL081:

GBP= Gain x Bandwidth

$$\text{Bandwidth} = \frac{\text{GBP}}{\text{Gain}} (=) \text{ Bandwidth} = \frac{4\text{MHz}}{7.07} = 565770\text{Hz}$$

60dB:

A741:

GBP= Gain x Bandwidth

$$\text{Bandwidth} = \frac{\text{GBP}}{\text{Gain}} (=) \text{ Bandwidth} = \frac{1\text{MHz}}{707.94} = 1412\text{Hz}$$

60dB:

TL081:

GBP= Gain x Bandwidth

$$\text{Bandwidth} = \frac{\text{GBP}}{\text{Gain}} (=) \text{ Bandwidth} = \frac{4\text{MHz}}{707.94} = 5650\text{Hz}$$

TL081C

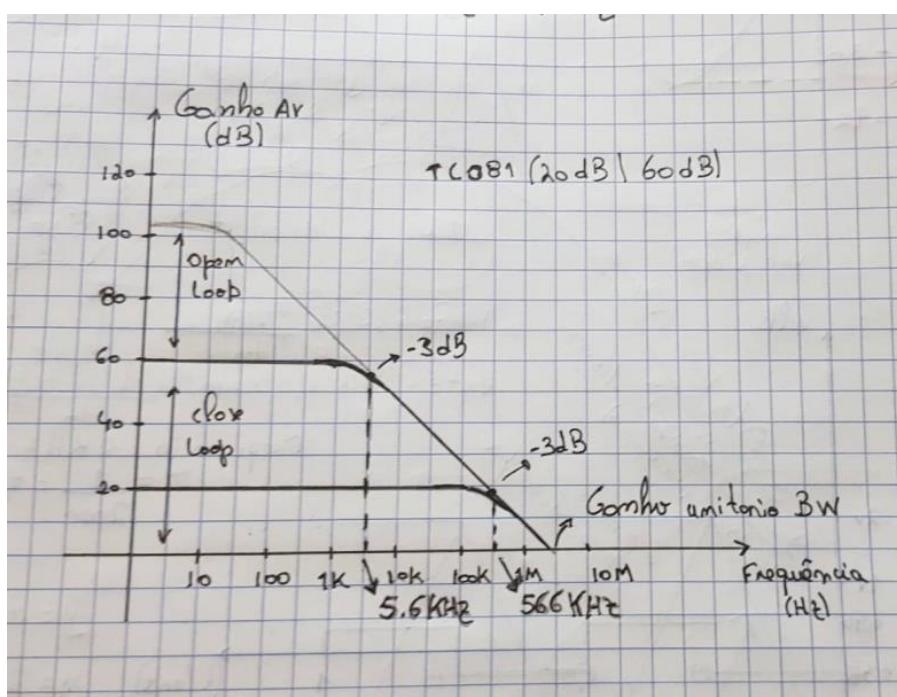
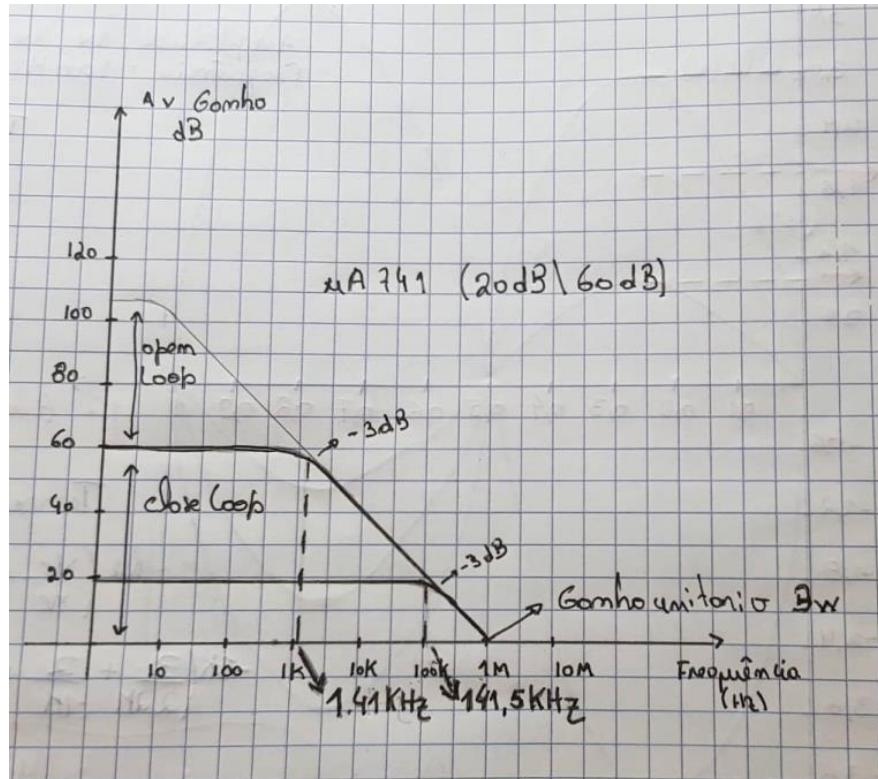
$$150 \text{ V/mV} \rightarrow 20\log(150000) = 103.52 \text{ dB}$$

$$106.169 \text{ V/mV} \leftarrow 10^{\frac{100.52}{20}} = 100.52 \text{ dB}$$

-3dB ( Calcular Frequência de corte)

$$\text{Bandwidth} = \frac{\text{GBP}}{\text{Gain}} (=) \text{ Bandwidth} = \frac{4\text{MHz}}{106.169 \text{ V/mV}} = 37.7\text{Hz}$$

**3.4.4 Desenhe um gráfico que ilustre a relação Ganho(frequência) (diagrama de Bode3), para cada um dos ampops dos dados recolhidos das tabelas b) e c). Expresse o ganho em dB e a frequência em Hz**



### 3.4.5 Realização Experimental

Realize a montagem do circuito do amplificador inversor com o  $\mu$ A741. Excite o circuito com um sinal sinusoidal de  $v_i=0,01 \text{ sen}(\omega t)$ .

3.4.5.1 Dimensione o circuito de modo que este apresente um ganho de 20 dB. Varie a frequência do sinal de entrada e observe os valores da amplitude do sinal de saída. Registe o valor da frequência para a qual a amplitude cai 3dB.

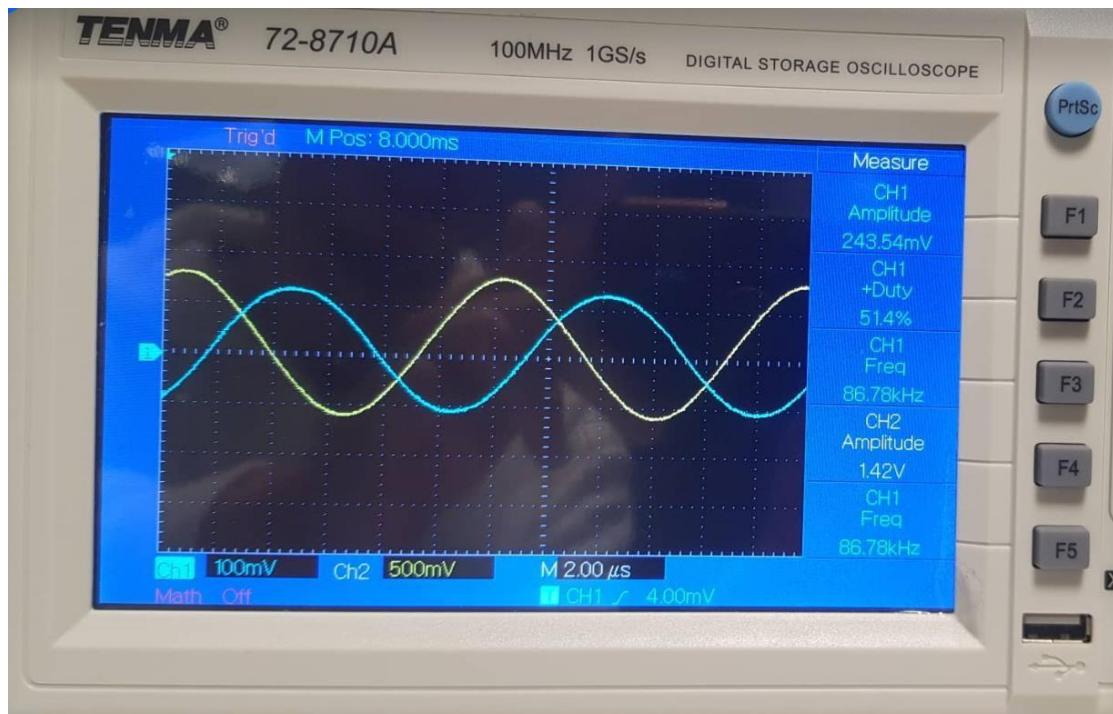


Figure 2 -3db (Ganho 20db) uA741

Como podemos constatar temos uma frequência de corte na ordem dos 86.7khz, isto pelo facto de termos um valor de amplitude Vpp 1.40 Volts ou seja 0.707 da nossa amplitude de máxima 2Volts Vpp. (Amplitude máxima proporcionada pelo ganho). Podemos concluir que a partir desta frequência, o amplificador vai ter uma queda do ganho na ordem dos -20db por década.

3.4.5.2 Modifique o circuito de modo que este apresente um ganho de 40 dB. Varie a frequência do sinal de entrada e observe os valores da amplitude do sinal de saída. Registe o valor da frequência para a qual a amplitude cai 3dB.

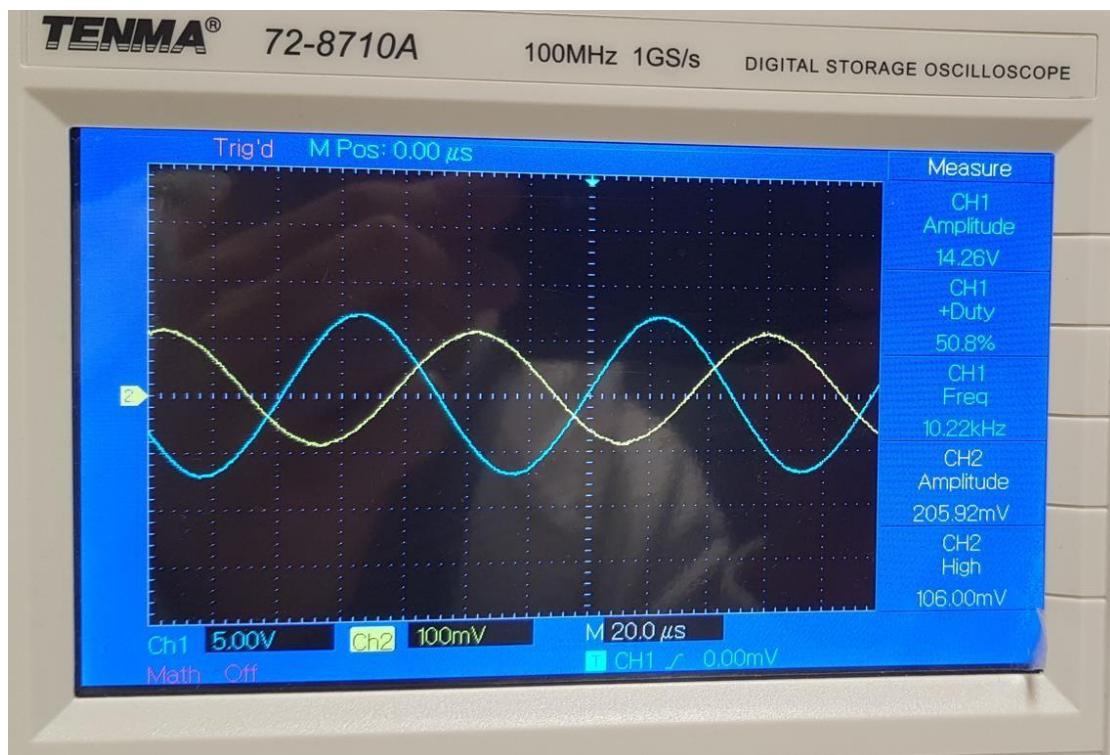


Figure 3 -3db (Ganho 40db) uA741

Mais uma vez podemos concluir e como seria de esperar, uma frequência de corte mais baixa com 40db do que com 20dB, ou seja na ordem dos 10KHz, isto devido ao polo dominante, ou seja temos um valor de amplitude Vpp 14 Volts ou seja 0.707 da nossa amplitude de máxima 20 Volts Vpp. (Amplitude máxima proporcionada pelo ganho).

**3.4.6 Substitua o  $\mu$ A741 pelo TL081 e repita o procedimento das alíneas a) e b).**

**Substituindo o Ampop uA741 pelo TL081:**

Para um Ganho de 20dB:

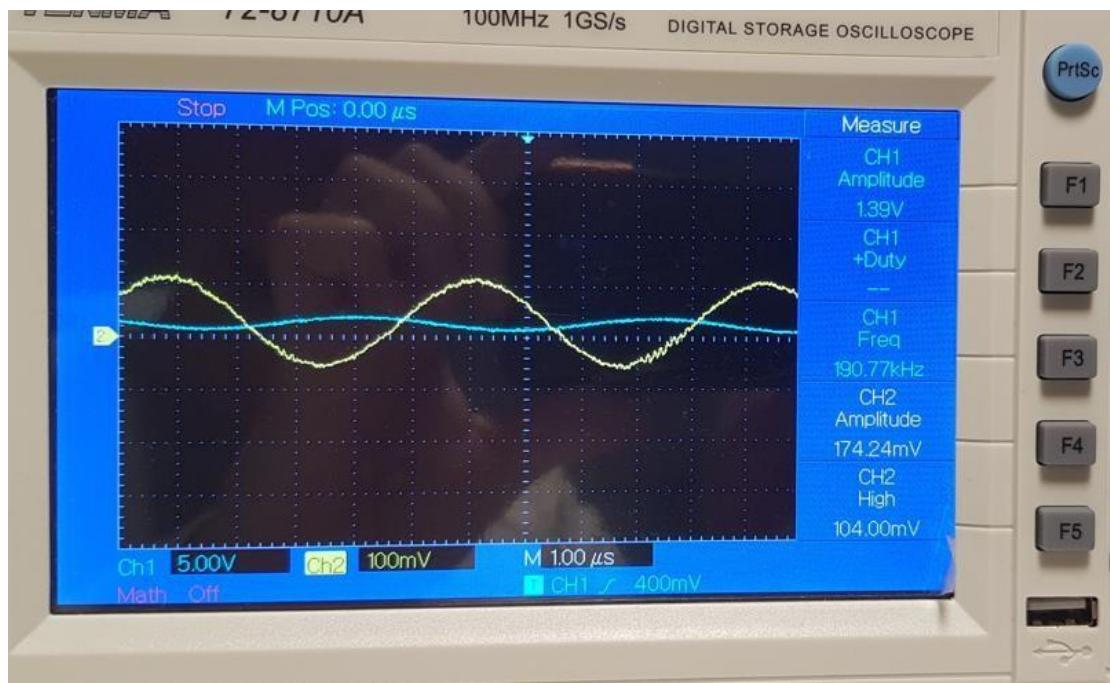


Figure 4 -3db (Ganho 20db) TL081

Para o TL081 temos a frequência de corte a acontecer em frequência mais altas, como podemos ver na ordem dos 190Khz, isto deve-se pelo facto de que o TL081 tem uma largura de banda superior a largura de banda do uA741, em comparação temos 4 vezes mais largura de banda no TL081 em relação ao uA741(4Mhz TL081, 1Mhz 741).

Para um Ganho de 40dB:

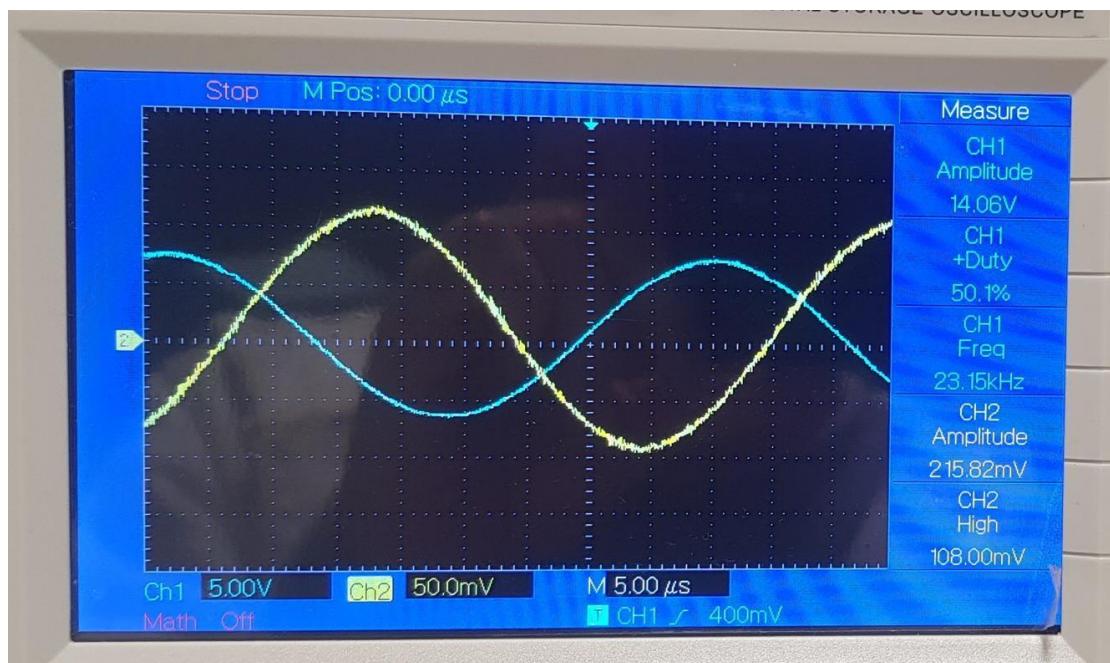


Figure 5-3db (Ganho 40db) TL081

Mais uma vez e como explicado anteriormente temos uma frequência de corte a acontecer em valores mais altos do que comparativamente e com as mesmas condições do uA741 o que seria de esperar devido a diferença de largura de banda entre os dois Ampops, ou seja, temos uma diferença de 13KHz entre os dois amplificadores quando sujeitos ao mesmo ganho, (10KHz Freq corte u741/ 23KHz Freq corte TL081 com ganho de mesmas condições, 40db).

### 3.5 ESTUDO DA TAXA DE VARIAÇÃO DE SAÍDA

3.5.1 Determine, para os dois AmpOps, a frequência máxima de operação que não origina distorção devido a características não ideais introduzida pelo slew-rate, quando a amplitude do sinal da entrada é de 1V, para Af=20 dB e Af=60 dB.

	Af=20	Af=60
uA741	7.9KHz	5.3KHz
TL081C	207KHz	137KHz

Ampop 741

Slew Rate = 0.5 V/μs

$$20\log(Af) = 20 \rightarrow 10^{\frac{20}{20}} = 10$$

$$\text{Freq.máx} = \frac{SR}{2 * \pi * Vp} \quad (=) \quad \text{Freq. máx} = \frac{0.5 * 10^6}{2 * \pi * 10} = 7.9KHz$$

Ampop 741

Slew Rate = 0.5 V/μs

$$20\log(Af) = 60 \rightarrow 10^{\frac{60}{20}} = 1000$$

Considerando Ampop ideal sabemos que a saturação ocorre no Valor máximo de  $\pm Vcc$

$$\text{Freq.máx} = \frac{SR}{2 * \pi * Vp} \quad (=) \quad \text{Freq. máx} = \frac{0.5 * 10^6}{2 * \pi * (15 \text{ valor max } vcc)} = 5.3KHz$$

Ampop TL081

Slew Rate = 13 V/μs

$$20\log(Af) = 20 \rightarrow 10^{\frac{20}{20}} = 10$$

$$\text{Freq.máx} = \frac{SR}{2 * \pi * Vp} \quad (=) \quad \text{Freq. máx} = \frac{13 * 10^6}{2 * \pi * 10} = 207KHz$$

Ampop TL081

Slew Rate = 13 V/μs

$$20\log(Af) = 60 \rightarrow 10^{\frac{60}{20}} = 1000$$

Novamente, considerando Ampop ideal sabemos que a saturação ocorre no Valor máximo de  $\pm Vcc$

$$\text{Freq.máx} = \frac{SR}{2 * \pi * Vp} \quad (=) \quad \text{Freq. máx} = \frac{0.5 * 10^6}{2 * \pi * (15 \text{ valor max } vcc)} = 137KHz$$

3.5.2 Considere a montagem do amplificador inversor, analisada anteriormente, com  $A_f$  de 20 dB. Excite o circuito com um sinal de onda sinusoidal com 1V de amplitude e frequência 1kHz.

3.5.2.1 Varie a frequência do sinal de entrada até verificar a distorção da onda. Observe e compare os sinais de entrada e de saída do circuito. Registe o valor de frequência para a qual se verifica distorção do sinal de saída.

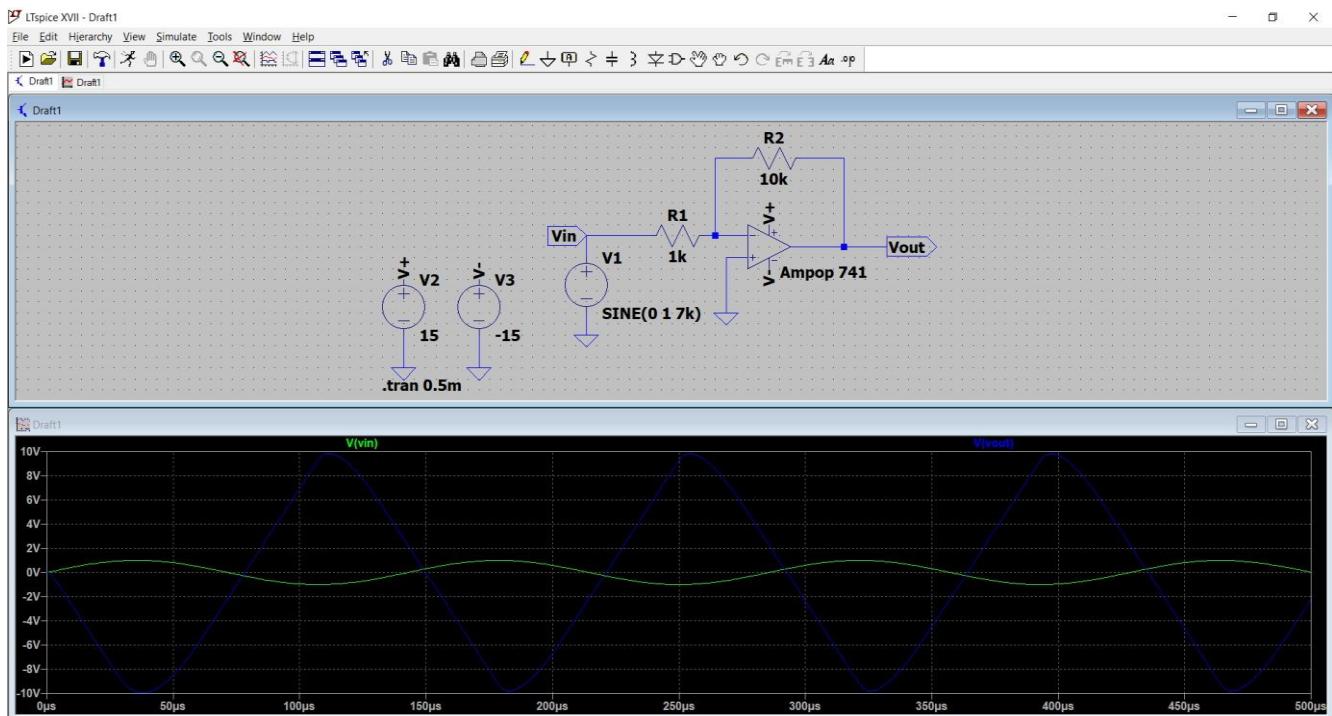


Figure 6 Simulação LTSpice

Para o Ampop 741 variando a frequência do sinal de entrada, podemos concluir que a partir de aproximadamente  $\pm 7\text{kHz}$  o sinal de saída começa a ficar distorcido ao ponto de obtermos uma onda triangular na saída à medida que aumentamos a frequência do sinal de entrada, e em consequência desse aumento o ganho fica sujeito a alterações de maneira que este diminuía com o aumento da frequência.

Para observarmos melhor o que se está a acontecer ao sinal de saída, multiplicamos o sinal de entrada por  $V(Vin)*(-10)$ , desta maneira conseguimos sobrepor o sinal de entrada com o de saída.

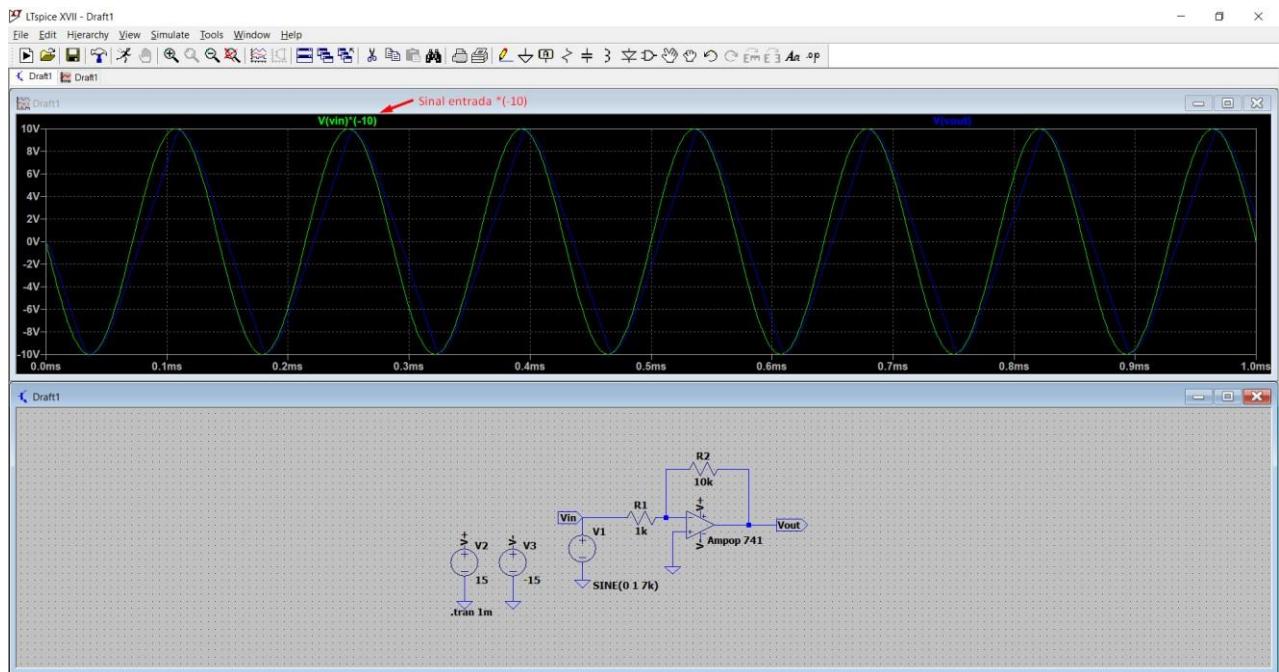
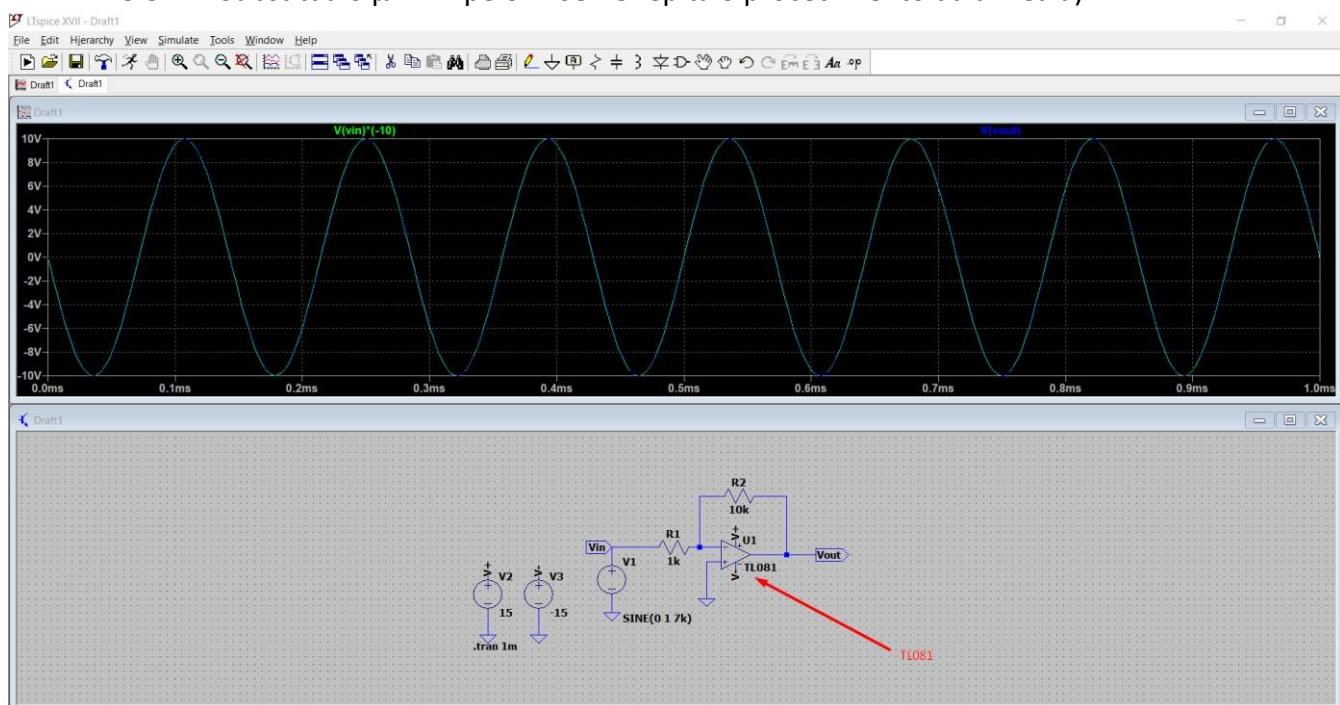


Figure 7 simulação Sinal Saída Invertido

Desta maneira é possível ver alguma distorção no sinal de saída, tornando assim o sinal de saída cada vez mais triangular e atenuado à medida que a frequência aumenta devido ao fator slew rate.

### 3.5.2.2 Substitua o $\mu$ A741 pelo TL081 e repita o procedimento da alínea a).



Podemos observar que para 7KHz o Ampop TL081 não apresenta qualquer distorção ao sinal saída.

Variando frequência do sinal de entrada vemos que há uma distorção no sinal de saída quando sujeito a uma frequência de  $\pm 50\text{kHz}$ .

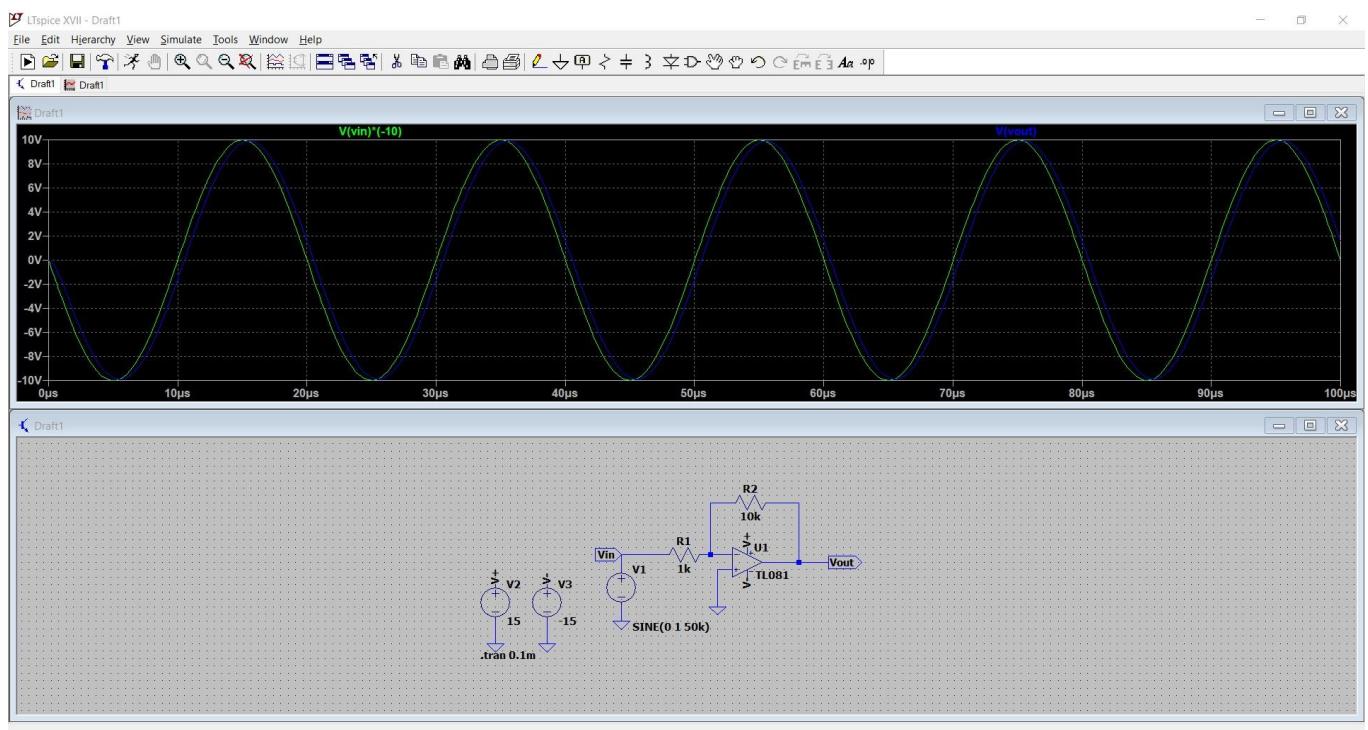


Figure 8 Simulação LTSpice TL081 simulação Sinal Saída Invertido

3.5.2.3 Para as duas situações anteriores, compare e comente, justificando os resultados obtidos.

De maneira a comparar os sinais entre os dois amplificadores podemos observar que realmente há diferenças, isto deve se as velocidades de resposta de cada amplificador a variação de tensão na entrada (Slew Rate).

O Amplificador uA741 tem um Slew Rate muito inferior ao Slew Rate do TL081 o que explica uma melhor resposta à variação da frequência do sinal de entrada. altas/máximas do TL081.

### 3.5.2.4 Aplique agora uma onda quadrada de igual amplitude, faça o mesmo teste, o que verifica?

Com uma onda de entrada quadrada de igual amplitude podemos concluir que ao fim de variar a frequência de entrada em aproximadamente 12KHz, esta apresenta na saída uma onda completamente destorcida, ou seja uma onda triangular.

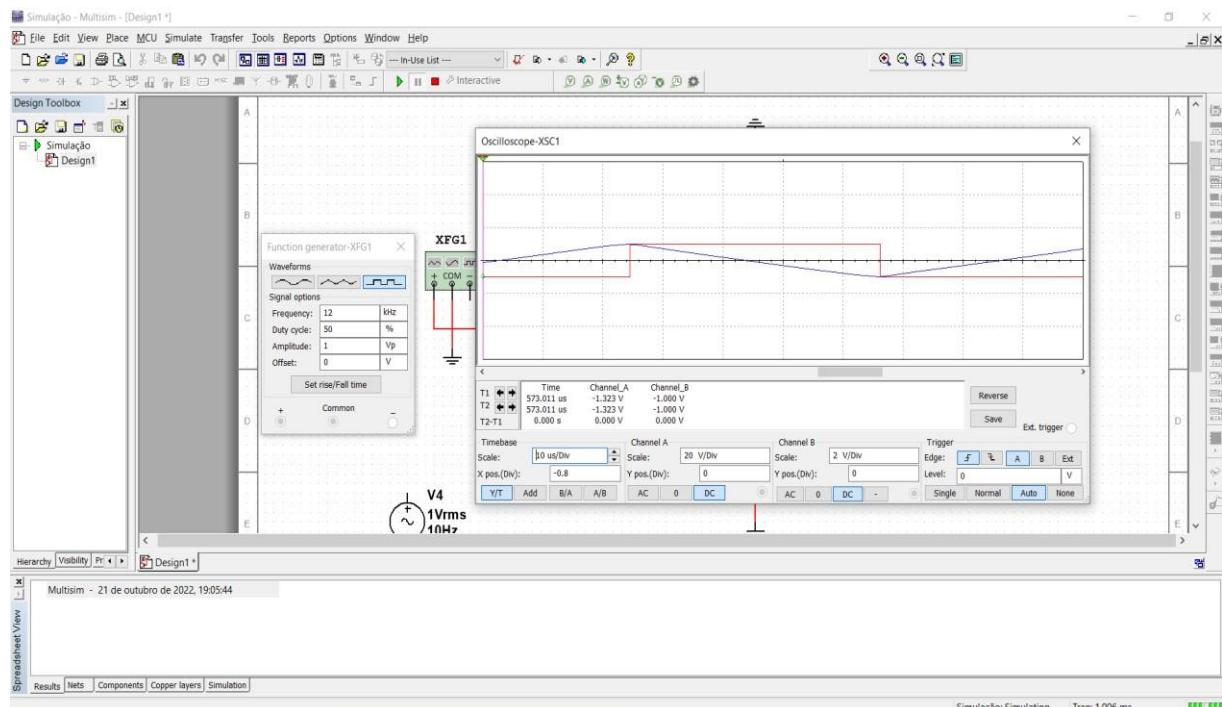


Figure 9 Simulação Multisim Onda Quadrática uA741

Em relação ao TL081 concluímos que um aumento da frequência do sinal de entrada em aproximadamente 150KHz leva a que o sinal de saída seja distorcido, mais uma vez originando uma onda triangular à medida que a frequência aumenta.

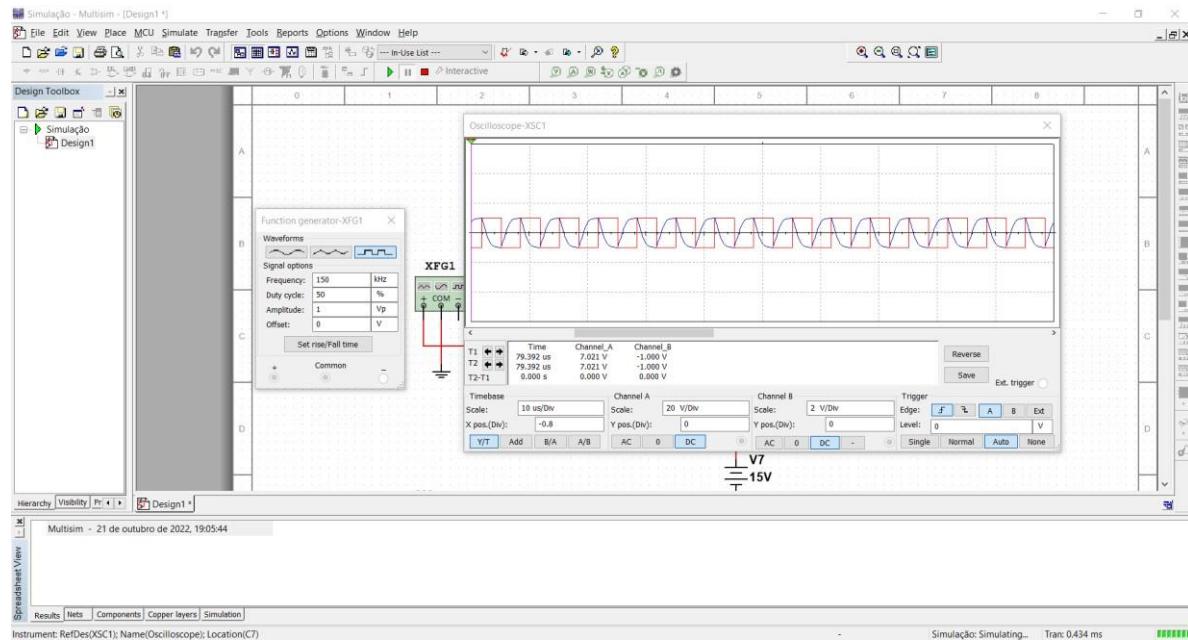
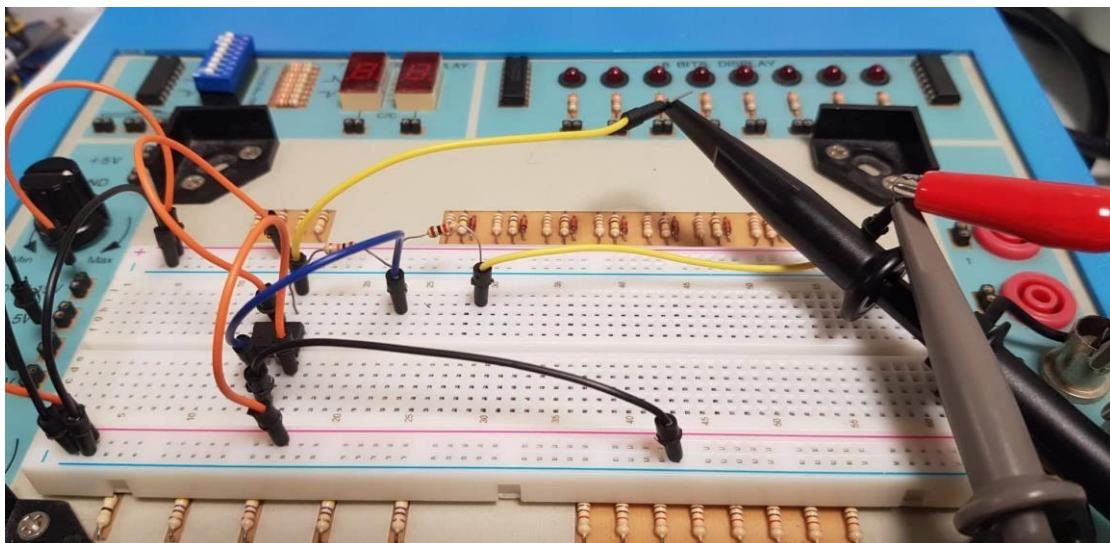


Figure 10 Onda Quadrática Multisim TL081

### 3.5.3 Realização Experimental

Foi feita uma parte experimental para comprovar parte dos resultados obtidos na simulação e nos cálculos teóricos.

Na sequência da montagem inversora foi feita a montagem do circuito:



*Figure 11 Montagem Ampop Inversor*

Um sinal de entrada foi aplicado com 1Volt Vp de amplitude com uma frequência inicial na ordem dos 1Khz.

A partir desta frequência base o valor desta foi aumentada até o sinal de saída ficar distorcido.

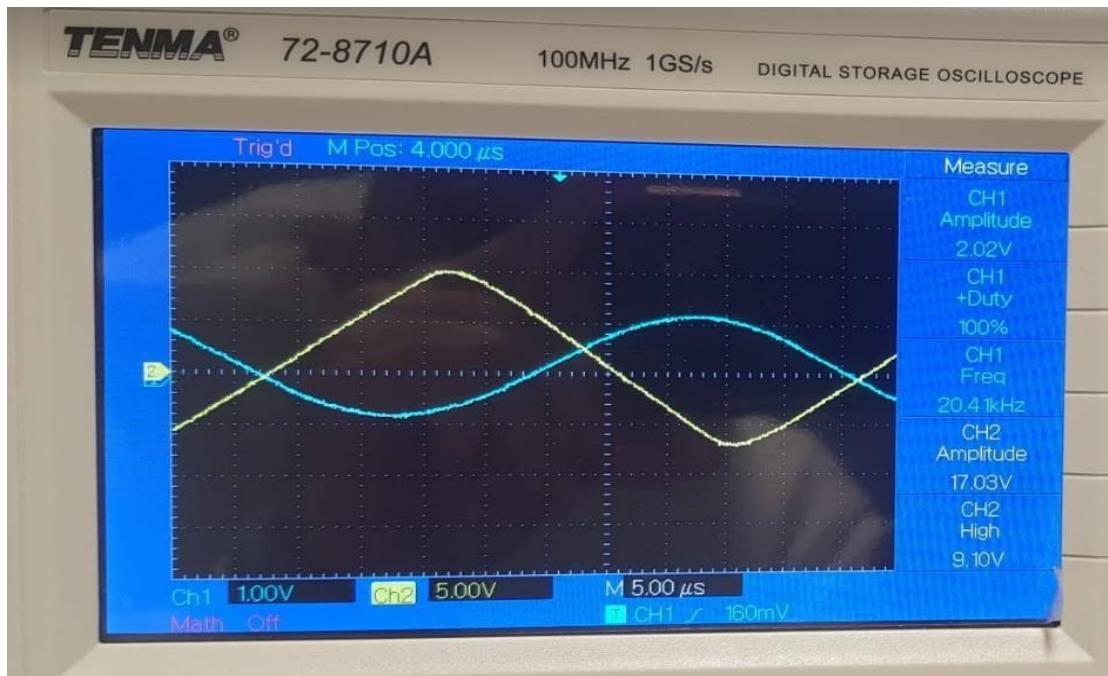


Figure 12 Sinal entrada e Sinal de Saída

Ao ritmo que a frequência foi aumentada observamos uma distorção do sinal de saída de tal forma que nos aproximamos de uma onda triangular, esta distorção é visível a olhos “nus” a uma frequência de 20Khz, mas acreditamos que a frequência de distorção ocorre em torno dos 8Khz tal como apresentado na simulação.

## 3.6 CIRCUITO PARA ANÁLISE

3.6.1 Explique o funcionamento do circuito seguinte e apresente a sua função de transferência.

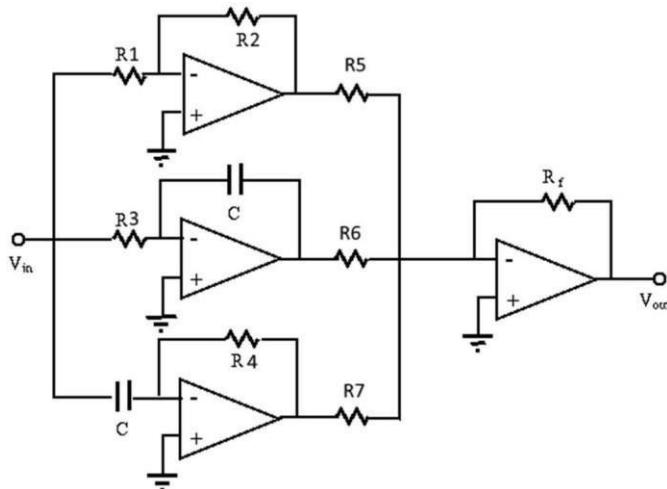


Figure 13 Circuito para Analise

Para a Analise seguiram-se os seguintes passos:

1. Arbitragem das correntes;
2. Consideração de umas das características mais importantes do amplificador operacional, ou seja, a alta impedância de entrada nos amplificadores teoricamente impedância infinita, com isto vem a conclusão de que  $V_- = V_+ \cong 0(V)$  Volts sendo que consequentemente  $I_- = I_+ \cong 0(A)$  Amperes.
3. Considerar que como vamos trabalhar também com impedâncias aplicar as leis de Laplace e assim sendo no domínio da frequência.
4. E por fim considerar a primeira lei de Kirchhoff define que: A soma algébrica das correntes que entram e saem de uma região, chamada nó, é igual a zero. Ou seja, a soma das correntes que entram em um nó deve ser igual à soma das correntes que saem do nó.

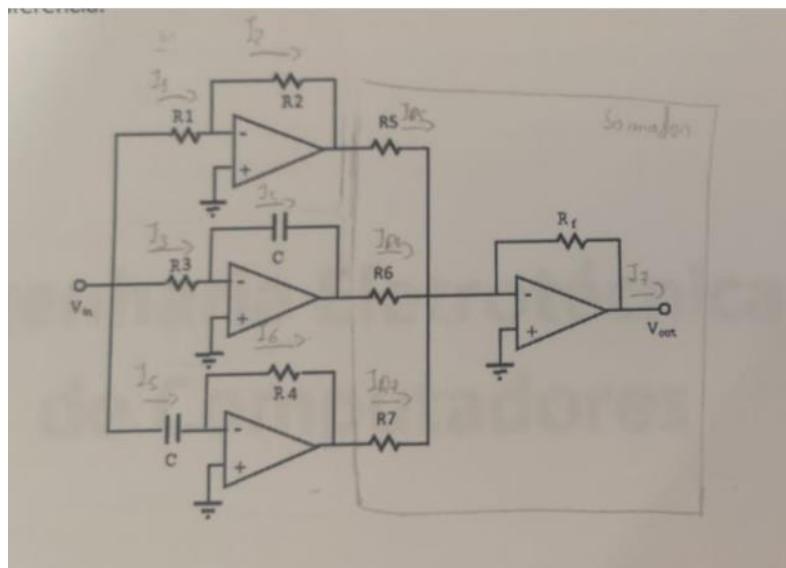


Figure 14 Arbitragem das correntes

6- ①  $I_3 = I_2 + \frac{V}{R_2} \Leftrightarrow I_3 = I_2 \Leftrightarrow \frac{V_{R_3}}{R_3} = \frac{V_{R_2}}{R_2} \Leftrightarrow V_{in} - \frac{V}{R_2} = \frac{V}{R_2} - V_{out} \Leftrightarrow V_{in} = \frac{V_{out}}{R_2} \Leftrightarrow$   
 $\Leftrightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_2}{R_3} // \Leftrightarrow V_{out} = V_{in} \times \frac{R_2}{R_3} //$

②  $I_5 = I_4 + \frac{V}{R_4} \Leftrightarrow \frac{V_{R_3}(s)}{2C} = \frac{V}{R_4} \Leftrightarrow V_{in}(s) - \frac{V}{R_4} = \frac{V}{R_4} - V_{out}(s) \Leftrightarrow V_{in}(s) = -V_{out}(s) \times 0.5 \Leftrightarrow$   
 $\Leftrightarrow V_{out}(s) = -V_{in}(s) \times \frac{1}{R_3 \times 0.5}$

③  $I_5 = I_6 + \frac{V}{R_6} \Leftrightarrow I_5 = I_6 \Leftrightarrow \frac{V_6}{2C} = \frac{V_{R_4}}{R_6} \Leftrightarrow V_{in}(s) - \frac{V}{R_4} = \frac{V}{R_4} - V_{out}(s) \Leftrightarrow \frac{V_{in}(s)}{R_4} = -\frac{V_{out}(s)}{R_4} \Leftrightarrow$   
 $\Leftrightarrow V_{in}(s) \times 0.5 = -V_{out} \Leftrightarrow V_{out} = -V_{in} \times 0.5 \times R_4 //$

④  $I_7 = I_{R_5} + I_{R_6} + I_{R_7} \Leftrightarrow \frac{V_{R_7}}{R_7} = \frac{V_{R_5}}{R_5} + \frac{V_{R_6}}{R_6} + \frac{V}{R_7} \Leftrightarrow \frac{V}{R_7} - V_{out} = V_{out} - \frac{V}{R_7} + \frac{V_{R_5}}{R_5} - \frac{V}{R_7} + \frac{V_{R_6}}{R_6} - \frac{V}{R_7} \Leftrightarrow$   
 $\Leftrightarrow -V_{out} = \frac{V_{R_5}}{R_5} + \frac{V_{R_6}}{R_6} + \frac{V_{R_7}}{R_7} \Leftrightarrow V_{out} = -\left(\frac{R_5}{V_{R_5}} + \frac{R_6}{V_{R_6}} + \frac{R_7}{V_{R_7}}\right) \Leftrightarrow$   
 $\Leftrightarrow V_{out} = -R_7 \times \left(\frac{V_{R_5}}{R_5} + \frac{V_{R_6}}{R_6} + \frac{V_{R_7}}{R_7}\right) \Leftrightarrow V_{out} = -R_7 \times \left(\frac{V_{in} \times \frac{R_2}{R_1}}{R_5} + \frac{V_{in} \times 0.5 \times R_4}{R_6} + \frac{(-V_{in}) \times R_5}{R_7}\right) \Leftrightarrow$   
 $\Leftrightarrow V_{out} = -R_7 \times \left(\frac{-V_{in} \times R_2}{R_1 \times R_5} + \frac{V_{in}}{R_3 \times R_6} - \frac{V_{in} \times R_5}{R_7}\right) //$

Explicação:

Este circuito realiza uma **filtragem e soma ponderada** de múltiplos sinais de entrada, passando por diferentes estágios de filtragem e amplificação. O uso de condensadores no primeiro estágio de amplificadores sugere que é usado para filtrar sinais de alta frequência, enquanto o amplificador somador final combina esses sinais filtrados.

## 4 Conclusões

Em jeito de conclusão, considero que esta atividade foi, sem dúvida, muito enriquecedora para os meus conhecimentos. É extremamente gratificante ver como a teoria, quando aplicada na prática, pode conduzir a conclusões assertivas e a resultados esperados.

Sinto que atingi a maior parte dos objetivos propostos, aprofundando o meu entendimento sobre o tema dos amplificadores operacionais. Foi também possível observar a potencialidade destes dispositivos num contexto prático e real, compreendendo melhor as suas inúmeras aplicações. Este tema teve um impacto muito positivo, levando-me a investir várias horas em pesquisa e análise, para garantir que os conceitos eram corretamente aplicados, resultando em conclusões sólidas. No entanto, encontrei algumas limitações, como a dificuldade em encontrar datasheets com informações completas, devido à variedade de fabricantes e modelos de amplificadores operacionais, cada um com características específicas



## Bibliografia

- [1] Material de apoio da cadeira.
- [2] <https://training.ti.com/introduction-op-amps?context=1139747-1139745-14685-1138796>
- [3] <https://training.ti.com/ti-precision-labs-op-amps-slew-rate-introduction>
- [4] <https://professoreletrico.com/posts/teoria/realimentacao-feedback/>.
- [5] <https://ti.com/op-amps-bandwidth-theory?context=1139747-1139745-14685-1138800>
- [6] <http://cadeiras.iscte.pt/cse/Folhas/AMPOPs/AMPOPs.htm>, <consultado a 12-12-2011>
- [7] [https://www.lsi.usp.br/~roseli/www/psi2307\\_2004-Teoria-7-AmpOp.pdf](https://www.lsi.usp.br/~roseli/www/psi2307_2004-Teoria-7-AmpOp.pdf)