

UNIVERSIDADE DO VALE DO ITAJAÍ

ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

FABIO IVO PEREIRA DE OLIVEIRA JUNIOR

ELETRÔNICA APLICADA – RELATORIOS M2

Relatório apresentado como requisito parcial  
para a obtenção da M2 da disciplina de  
Eletrônica Aplicada do curso de Engenharia de  
Computação pela  
Universidade do Vale do Itajaí da Escola  
Politécnica.

Prof. Walter Antonio Gontijo

Itajaí  
2024

## **1) OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho é aplicar os conhecimentos obtidos durante as aulas presenciais, através de cálculos teóricos e simulações para termos uma melhor compreensão do funcionamento e operação dos componentes a serem apresentados, assim como quais suas aplicações e limites.

Através do simulador MultiSim serão implementados os mais diversos tipos de amplificadores e filtros e terão seus resultados validados através do método teórico.

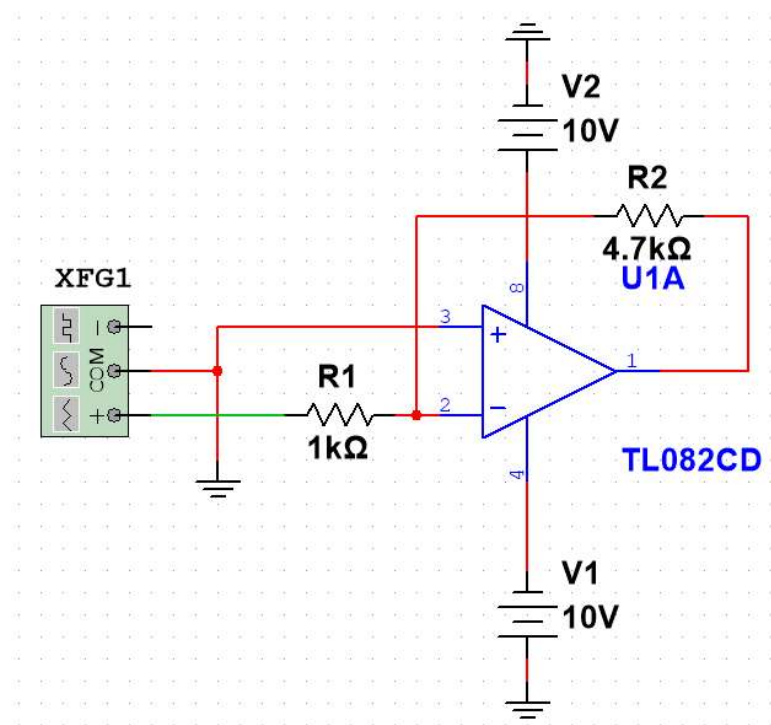
## 2) DESENVOLVIMENTO

### 2.1) Amplificador inversor

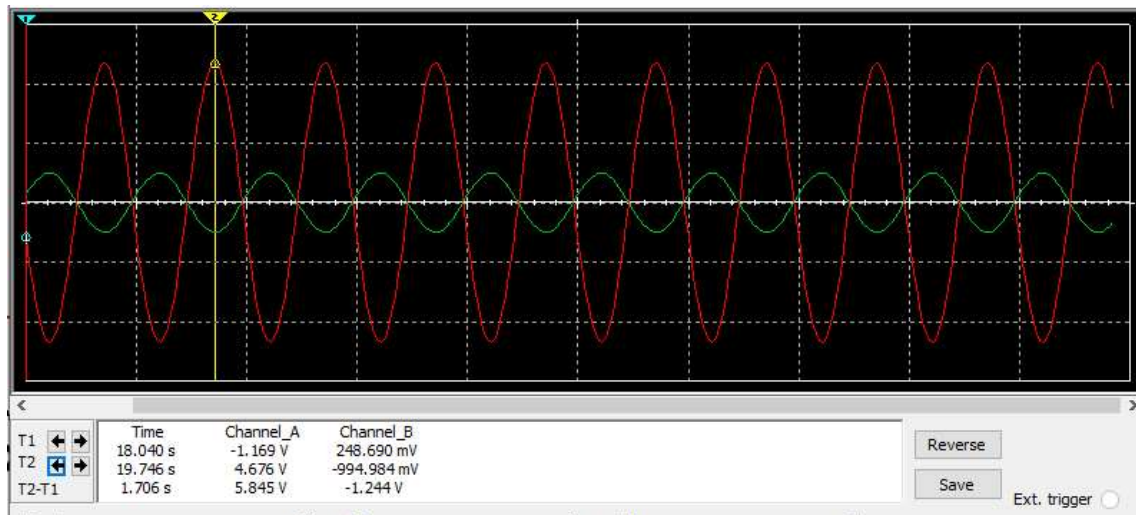
A) Projete um circuito com ganho 4.7 usando resistores  $\geq 1K$

$$Ganho = A_f = \frac{R_f}{R_i}$$

Podemos utilizar  $R_f = 4.7K$  e  $R_i = 1K$ , dando o ganho de 4.7. Assim foi simulado o circuito utilizando uma entrada de 1Vp e frequência de 1KHz em conjunto de um AMP-OP TL082CD.



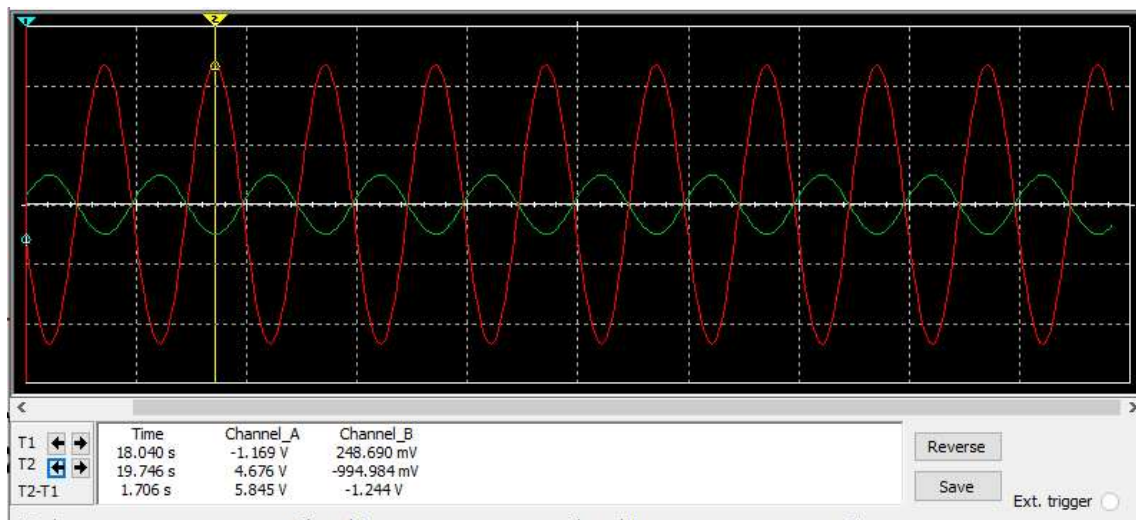
Analizando a forma de onda, sendo verde a entrada e vermelho a saída:



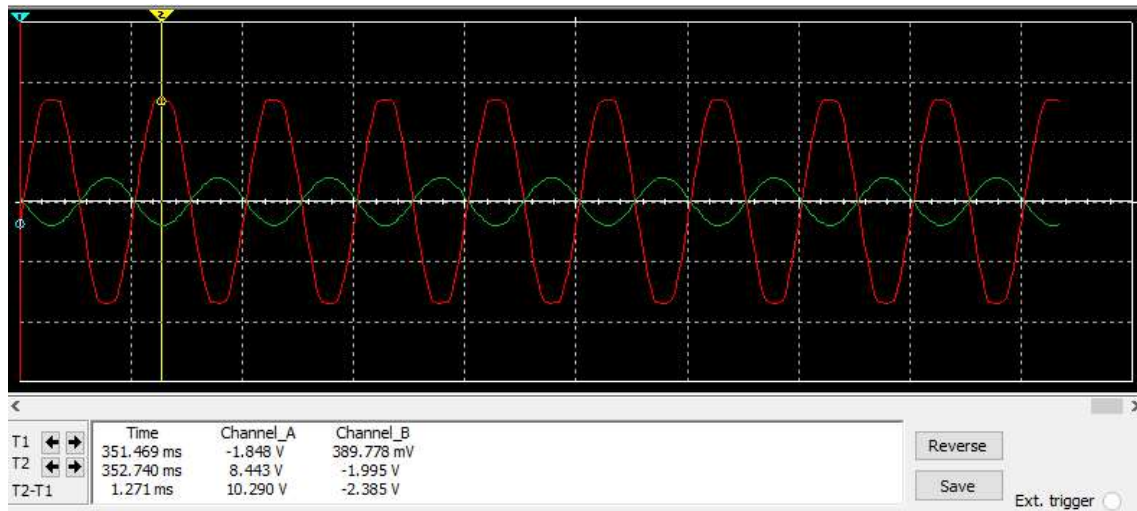
$$Vf = \frac{4.676}{0.994} = 4.7$$

B) Repita o exercício anterior utilizando  $V_i = 1V$  e  $2V$

1V)



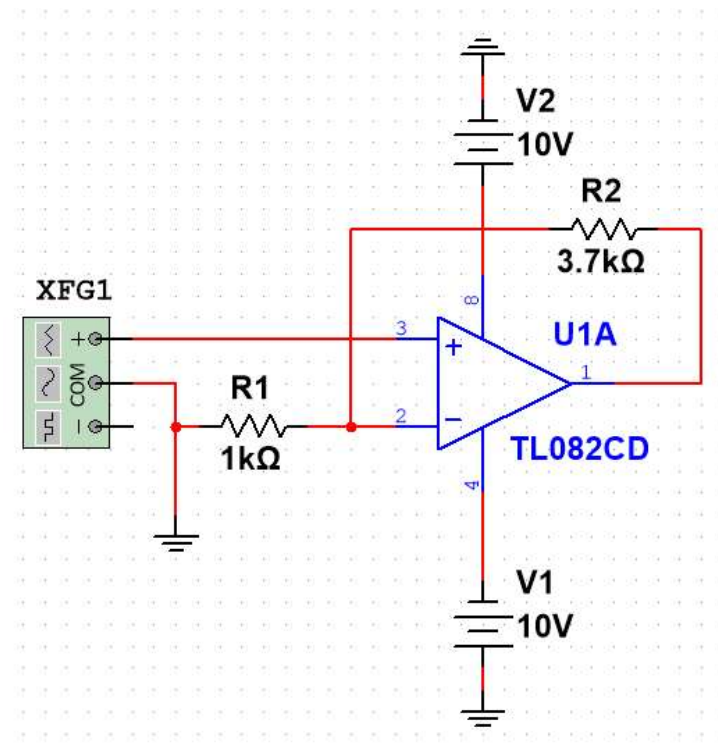
2V)



Ao dar uma entrada de 2V podemos ver que o amplificador esta cortando uma porção da onda de saída por estar saturando, dando uma saída de 8.4V onde deveria ter 9.4V.

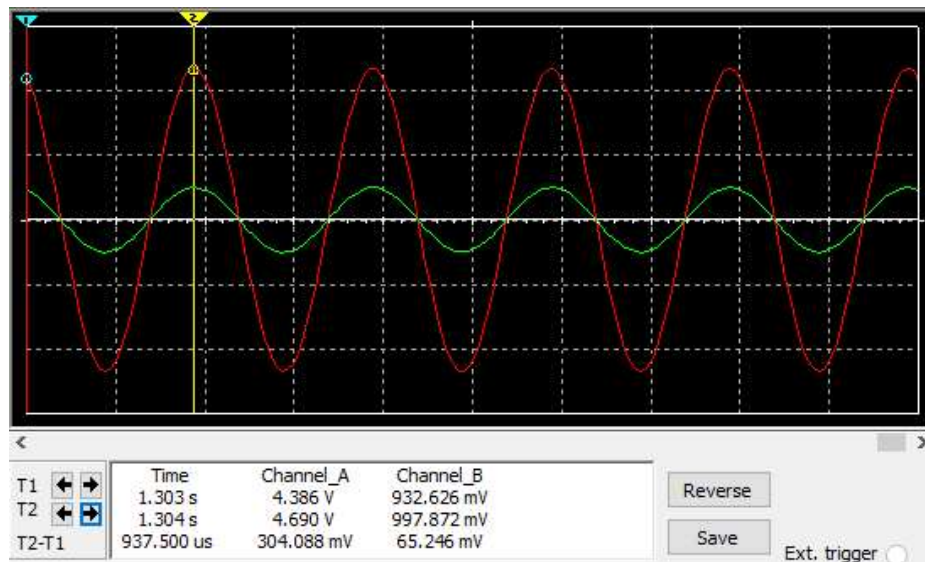
2.2) Repita o exercício anterior utilizando um circuito não inversor.

Sendo o ganho para um circuito não inversor  $Af = \frac{R_f}{R_i} + 1$ , para ter um ganho de 4.7 podemos utilizar  $R_f = 3.7\text{K}$  e  $R_i = 1\text{K}$ .



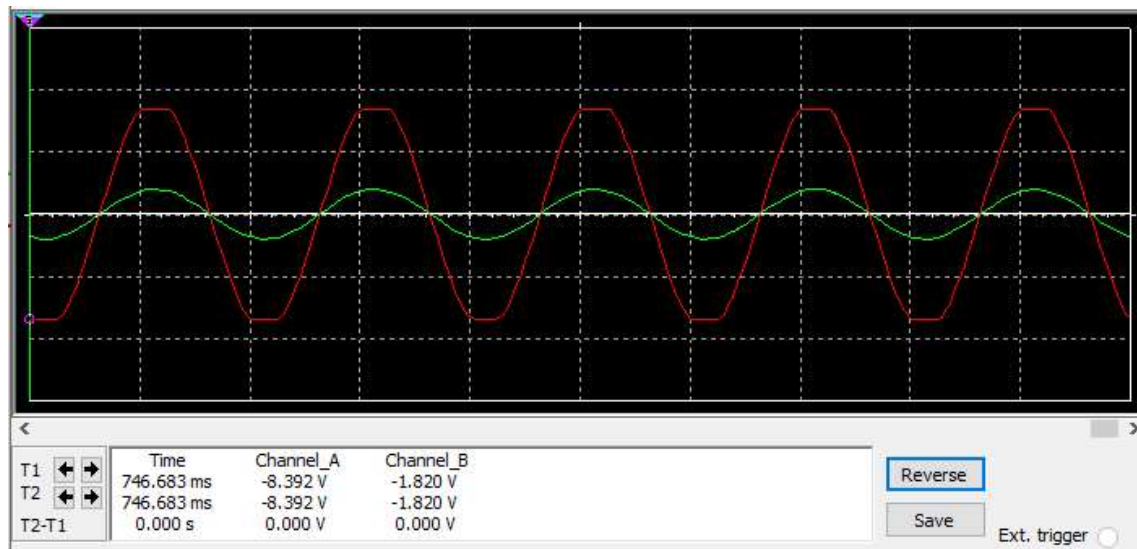
Ao analisar as formas de onda, sendo verde a entrada e vermelho a saída:

1Vp)



$$Af = \frac{4.69}{0.997} = 4.7$$

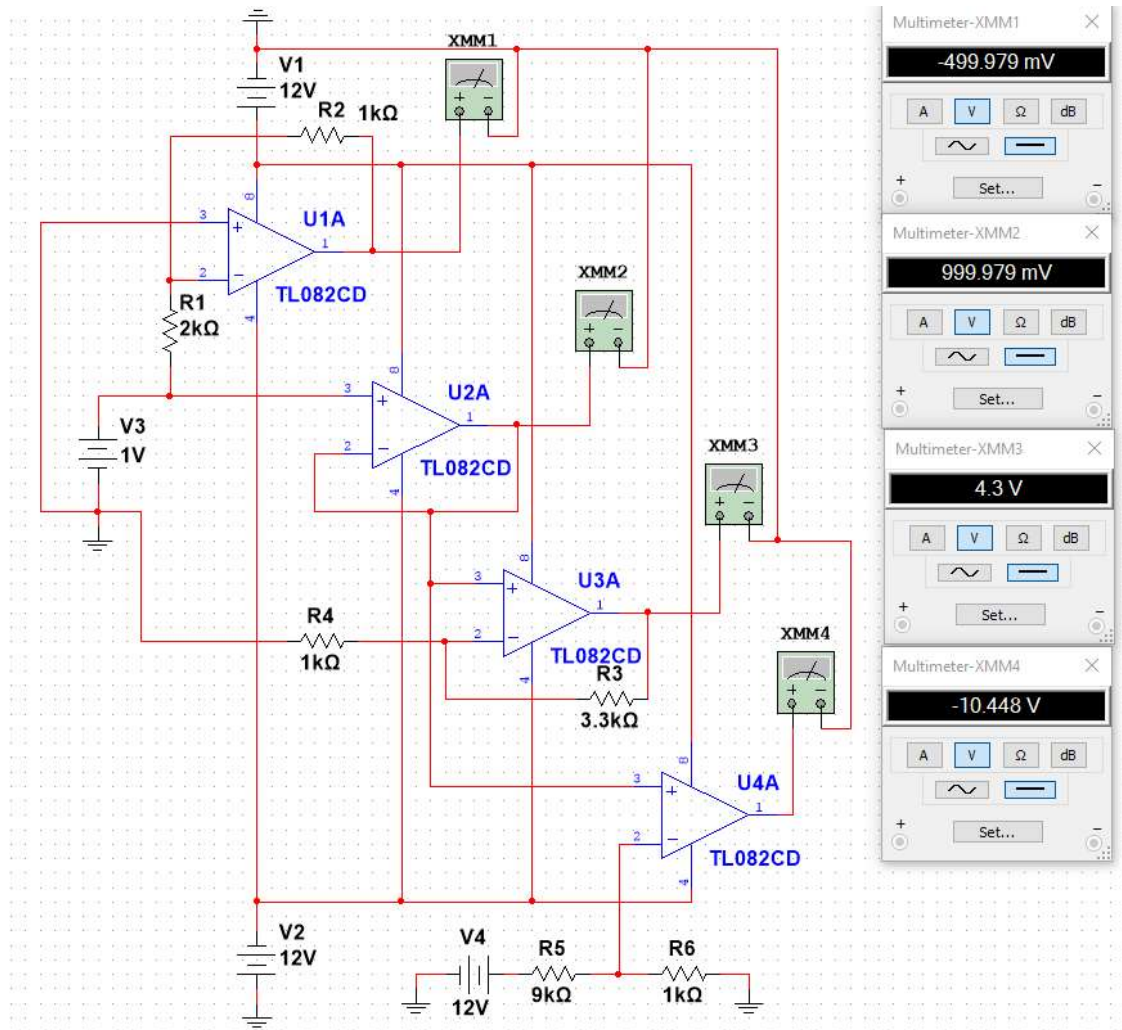
2Vp)



Podemos ver a mesma situação de saturação do circuito inversor.

2.3)

Para  $V_i = 1V$ :



$$v1 = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_f}{R_i} = \frac{1k}{2k} = 0.5V$$

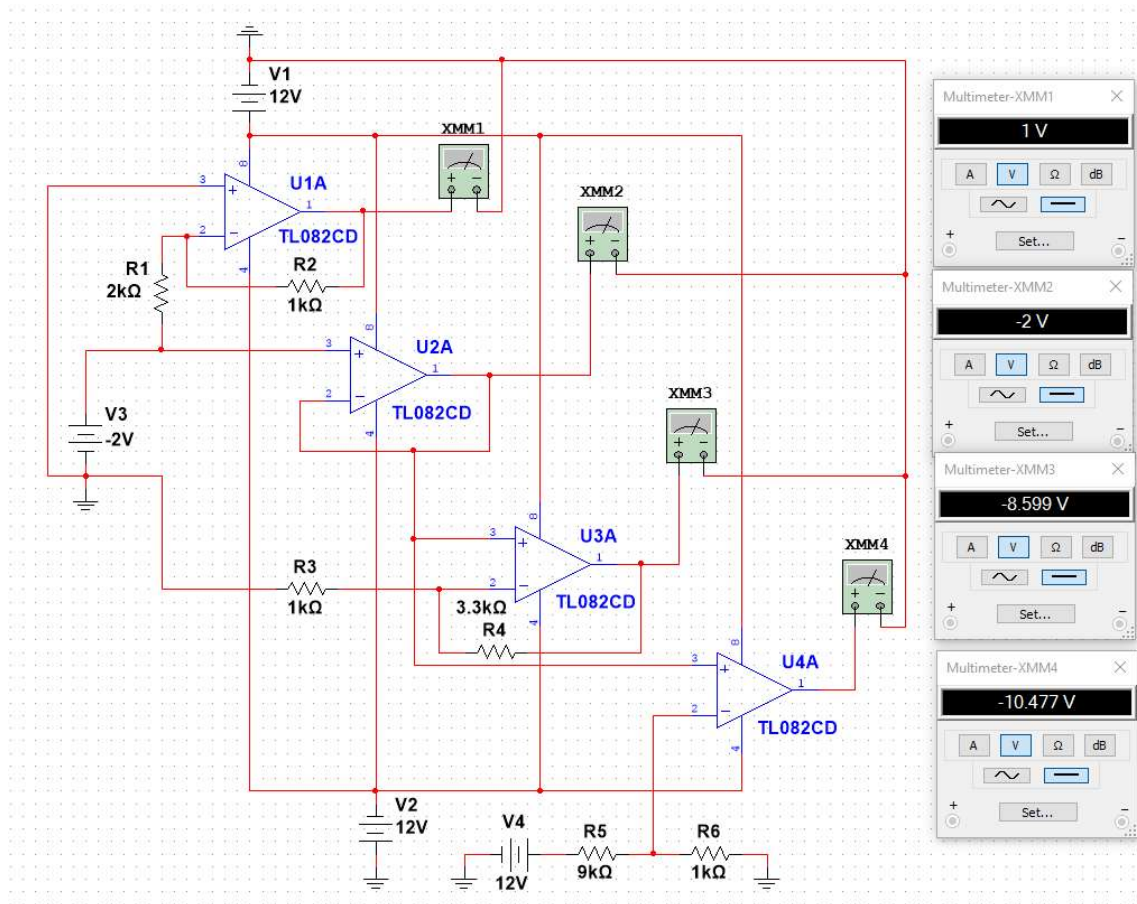
$$v2 = \text{Buffer} \rightarrow V_o = V_i \rightarrow 1V$$

$$v3 \rightarrow \text{n\~{a}o inversor} \rightarrow \frac{R_f}{R_i} + 1 = \frac{3.3k}{1k} + 1 = 4.3V$$

$$v4 \text{ in-} = 12V * \frac{1k}{10k} = 1.2V = \text{saida deve saturar em } -12V$$



Para  $V_i = -2V$ :

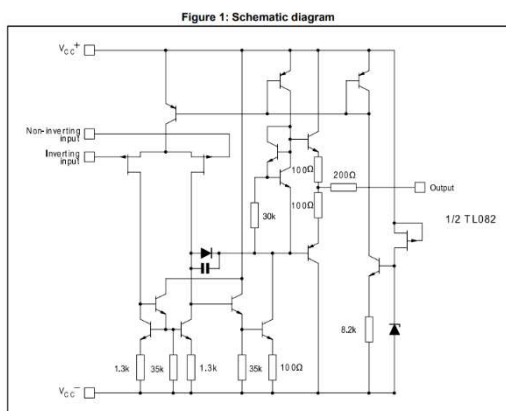


$$v_1 = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_f}{R_i} = \frac{1k}{2k} = -0.5 * -2 = 1V$$

$$v_2 = \text{Buffer} \rightarrow V_o = V_i \rightarrow -2V$$

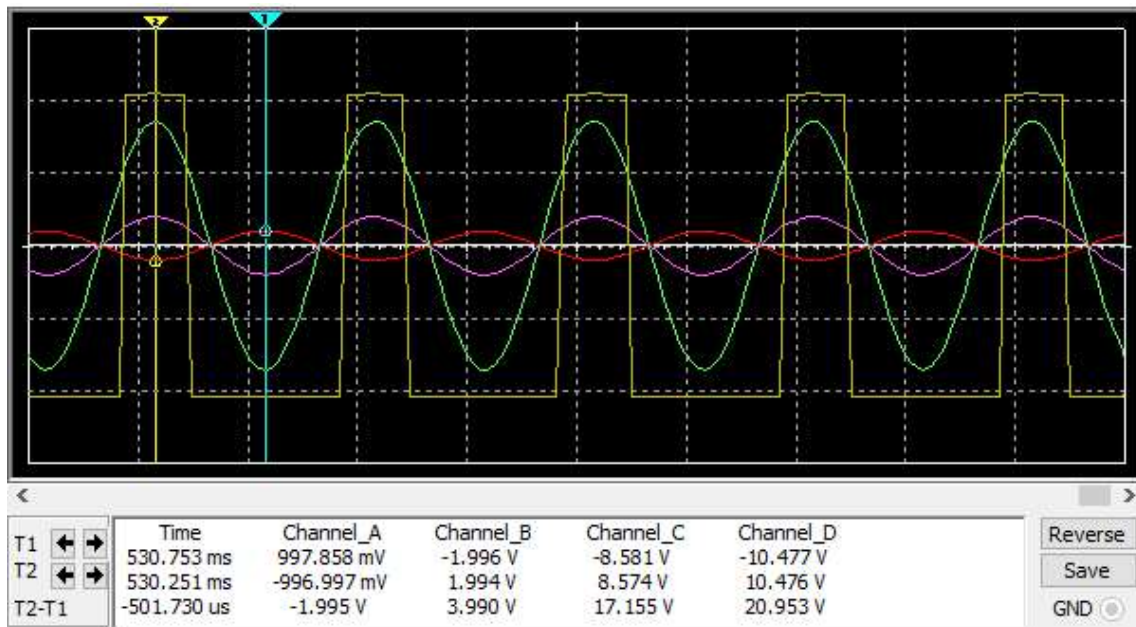
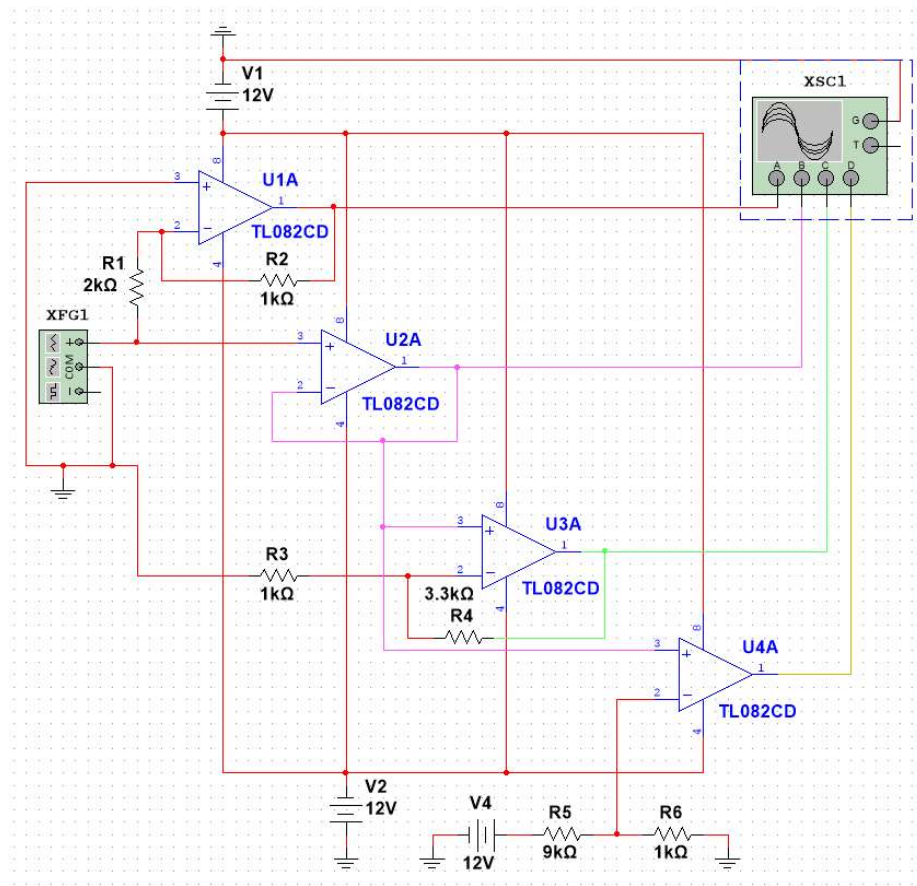
$$v_3 \rightarrow \text{n\~{o} inversor} \rightarrow \frac{R_f}{R_i} + 1 = \frac{3.3k}{1k} + 1 = 4.3 * -2 = -8.6V$$

$$v_4 \text{ in} = 12V * \frac{1k}{10k} = 1.2V = \text{saida deve saturar em } -12V$$



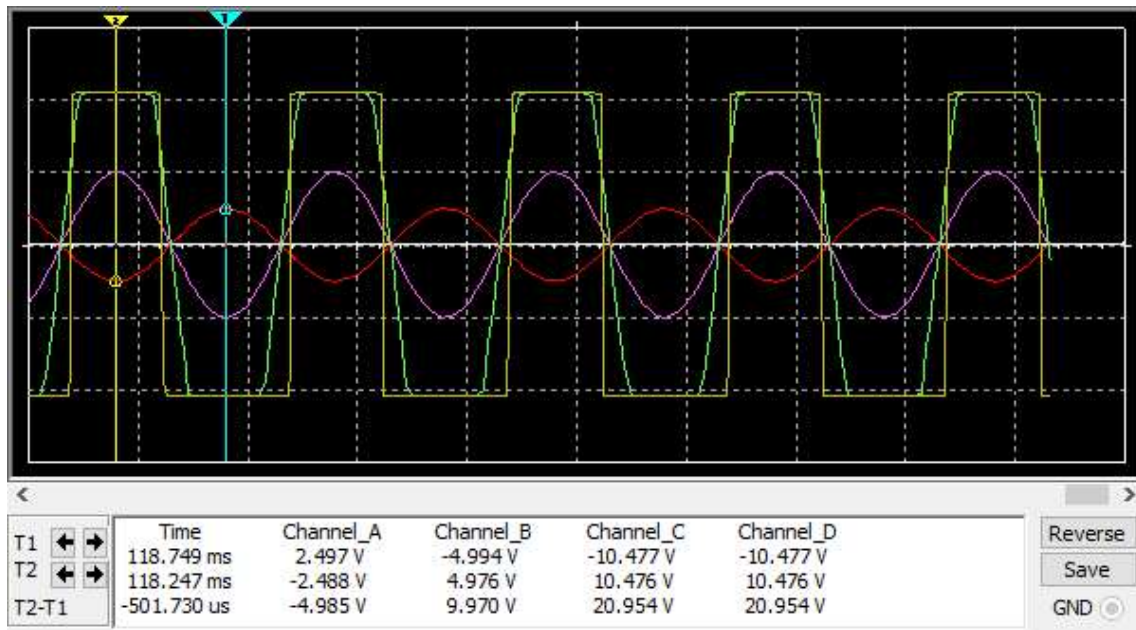
Por conta da natureza dos componentes utilizados no amplificador TL082, a saturação não ocorre exatamente nos 12V, um pouco da tensão é perdida internamente no componente.

Para  $V_i = 2V_p$  a 1KHz:

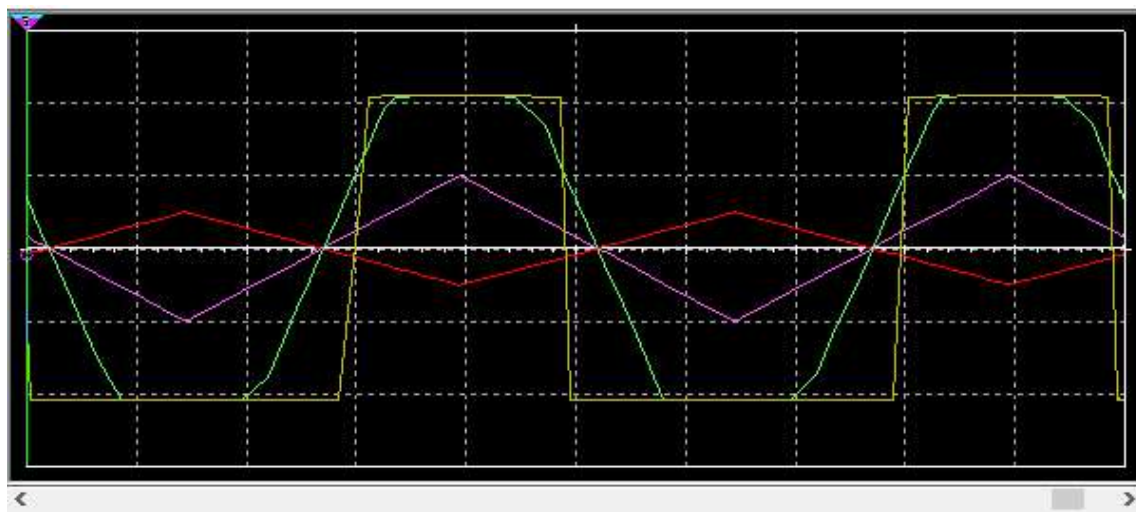


Já que V2 é um buffer, sua saída é igual a entrada  $V_i$  (canal B com pico de 2V, cor roxa), podemos ver também V1 (vermelho) com ganho de 0.5 dando uma saída de 1V. V3 (verde) apresenta um ganho real de 4.29, próximo ao 4.3 calculado, por fim podemos ver V4 (amarelo) saturando conforme esperado.

Para  $V_i = 5\text{vp}$  a 1KHz:



Com uma tensão maior de entrada podemos ver os mesmos comportamentos, mas dessa vez a saída de V3 em verde também esta saturando, porem de maneira muito mais suave que V4.



O mesmo ocorre ao utilizar um sinal triangular.

#### 2.4) Amplificadores diferenciais.

Considerando a entrada positiva do AMP-OP como V2 e a entrada negativa como V1

A) Para  $V1 \neq 0$  e  $V2 = 0$  :

$$Vo1 = -\frac{Rb}{Ra} * V1$$

B) Para  $V1 = 0$  e  $V2 \neq 0$  :

$$Vo = Vo1 + Vo2$$

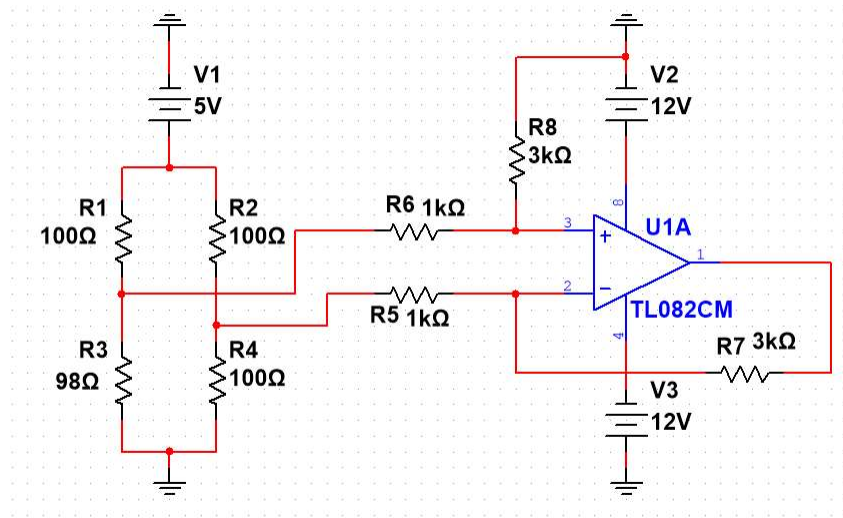
$$Vo2 = \frac{Rd}{Rc + Rd} * V2 * \left(\frac{Rb}{Ra} + 1\right)$$

$$Vo = \frac{Rd}{Rc + Rd} * V2 * \left(\frac{Rb}{Ra} + 1\right) - \frac{Rb}{Ra} * V1$$

Caso  $Ra = Rc$  e  $Rb = Rd$ :

$$Vo = \frac{Rb}{Ra} * (V2 - V1)$$
$$\frac{Rb}{Ra} = \frac{Rd}{Rc} = K$$

Ex: Calcule os valores de V1 e V2 para os valores de Rs



Para  $R_s = R_3 = 98$ :

$$V_1 = V_{in} * \frac{100}{100 + 100} = 2.5V$$

$$V_2 = V_{in} * \frac{98}{100 + 98} = 2.47V$$

$$V_o = \frac{R_b}{R_a} * (V_2 - V_1) = \frac{1k}{3k} * (2.47 - 2.5) = -0.01V$$

Ao realizar esse cálculo para todos os  $R_s$  e obter os dados de simulação chegamos a seguinte tabela:

$R_s$	Teórico			Simulado		
	V1	V2	$V_o$	V1	V2	$V_o$
98	2.5V	2.47V	-0.01V	2.468V	2.44V	-0.051V
99	2.5V	2.48V	-0.0066V	2.469V	2.45V	-0.016V
100	2.5V	2.5V	0V	2.469V	2.469V	0.02V
101	2.5V	2.51V	0.003V	2.47V	2.481V	0.054V
102	2.5V	2.52V	0.0066V	2.468V	2.49V	0.089V

## 2.5) Amplificador somador

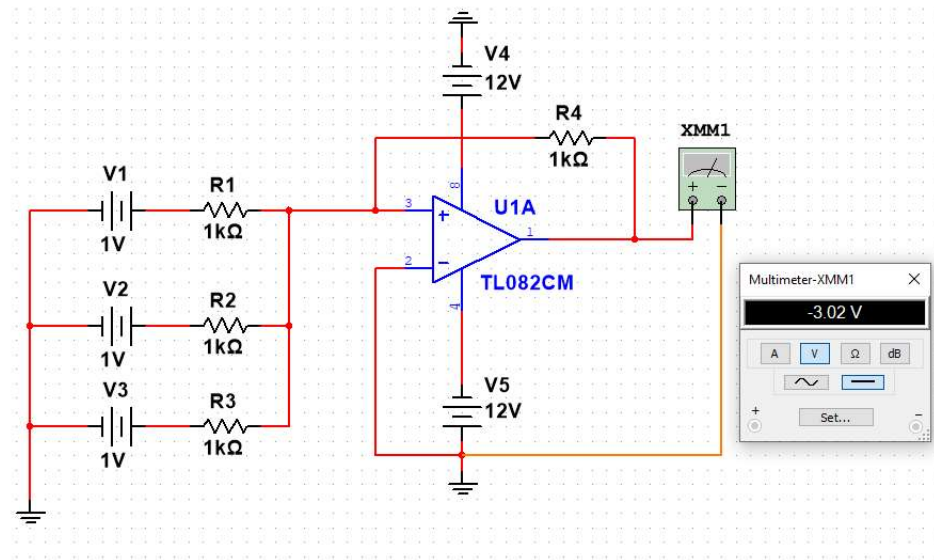
Caso 1)

$$V_{oa} = -\frac{1k}{1k} * 1 = -1$$

$$V_{ob} = -\frac{1k}{1k} * 1 = -1$$

$$V_{oc} = -\frac{1k}{1k} * 1 = -1$$

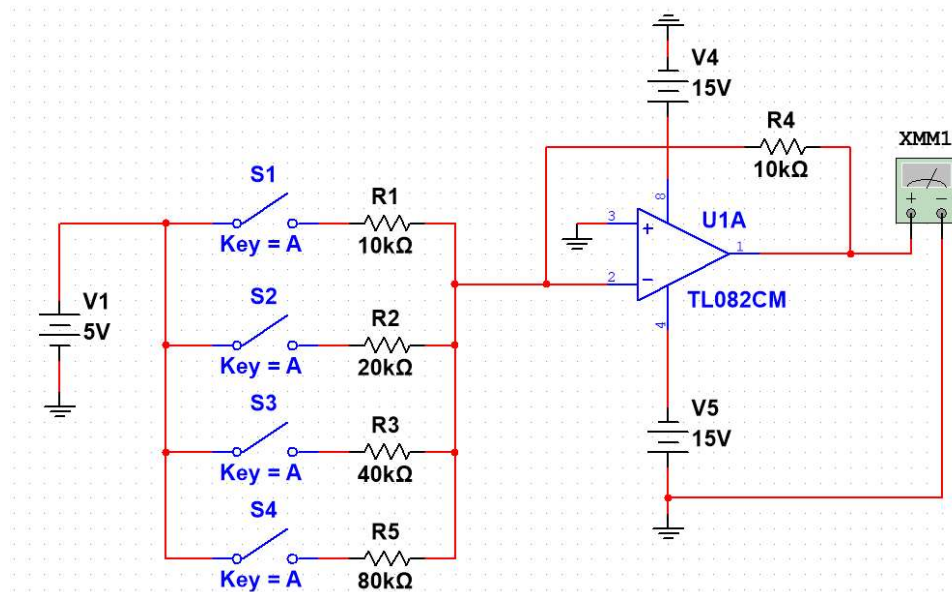
$$V_o = -1 -1 -1 = -3V$$



	Calculado	Simulado
v <sub>o</sub>	-3V	-3,02 V



## Caso 2) Simulador de conversor AD



Sendo  $S1 = D0$ ,  $S2 = D1$ ,  $S3 = D2$  e  $S4 = D3$ , sendo que  $Sx$  pode assumir valor 0 ou 1 (aberto ou fechado):

$$V_o = -\left(\frac{R_f}{R_0} * D0 + \frac{R_f}{R_1} * D1 + \frac{R_f}{R_2} * D2 + \frac{R_f}{R_3} * D3\right) * V_i$$

Entradas				Teórico	Simulação
D0	D1	D2	D3	$V_o$	$V_o$
0	0	0	0	0 V	0.005 V
1	0	0	0	-5 V	-4.99 V
0	1	0	0	-2.5 V	-2.49 V
0	0	1	0	-1.25 V	-1.24 V
0	0	0	1	-0.625 V	-0.619 V
1	1	1	1	-9.375 V	-9.36 V

## 2.6) Somador não inversor

EX1)

$$R_f = R_i = 1K$$

$$R_a = 1K$$

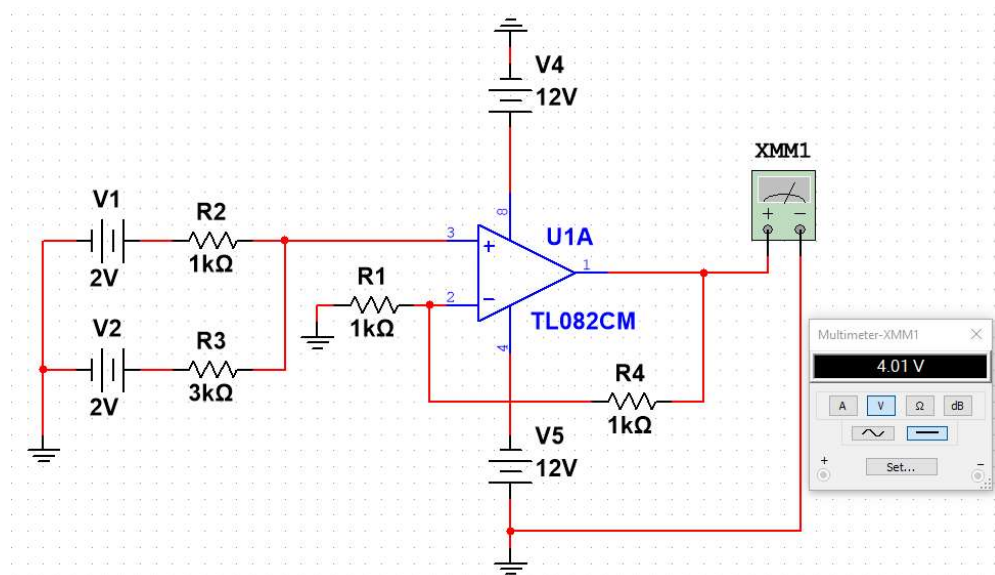
$$R_b = 3K$$

$$V_a = V_b = 2V$$

$$V_{oa} = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) * \frac{R_b}{R_a + R_b} * V_a = 2 * \frac{3}{4} * 2 = 3V$$

$$V_{ob} = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) * \frac{R_a}{R_a + R_b} * V_b = 2 * \frac{1}{4} * 2 = 1V$$

$$V_o = V_{oa} + V_{ob} = 4V$$

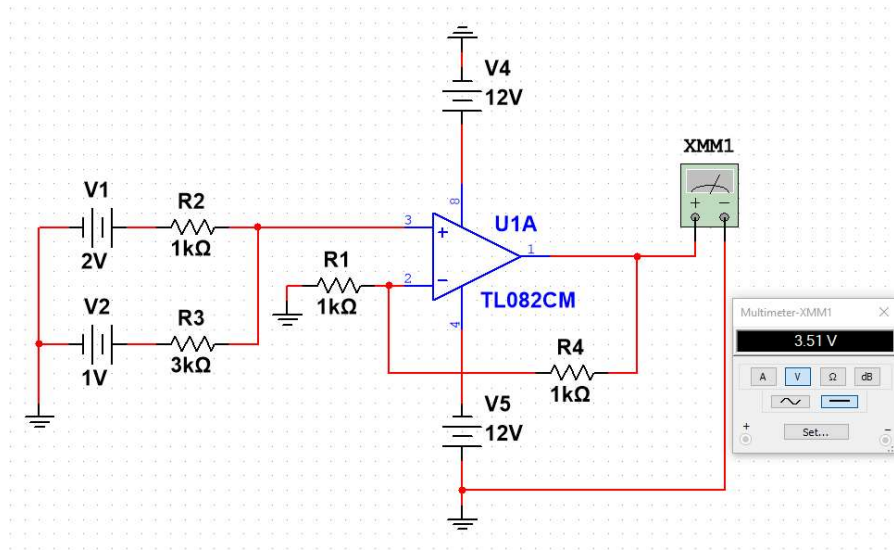


	Teórico	Simulação
$V_o$	4 V	4.01 V



Ex2) Obtenha a tensão de saída no circuito anterior para as seguintes entradas:

A)  $V_a = 2$ ,  $V_b = 1$

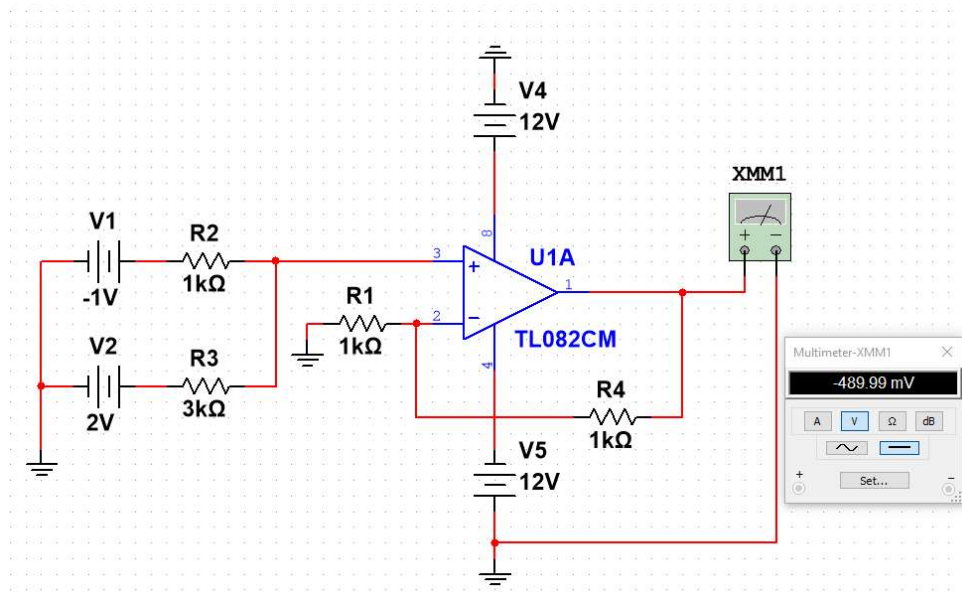


$$V_{oa} = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) * \frac{R_b}{R_a + R_b} * V_a = 2 * \frac{3}{4} * 2 = 3V$$

$$V_{ob} = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) * \frac{R_a}{R_a + R_b} * V_b = 2 * \frac{1}{4} * 1 = 0.5V$$

$$V_o = V_{oa} + V_{ob} = 3.5V$$

B)  $V_a = -1, V_b = 2$

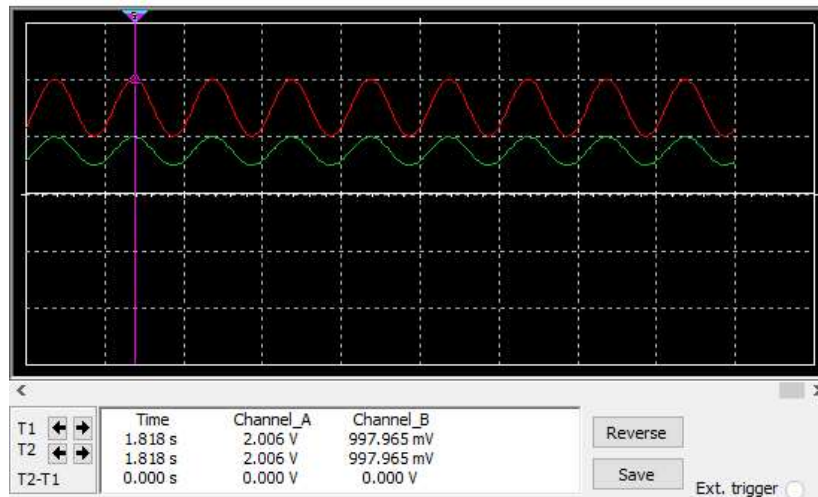
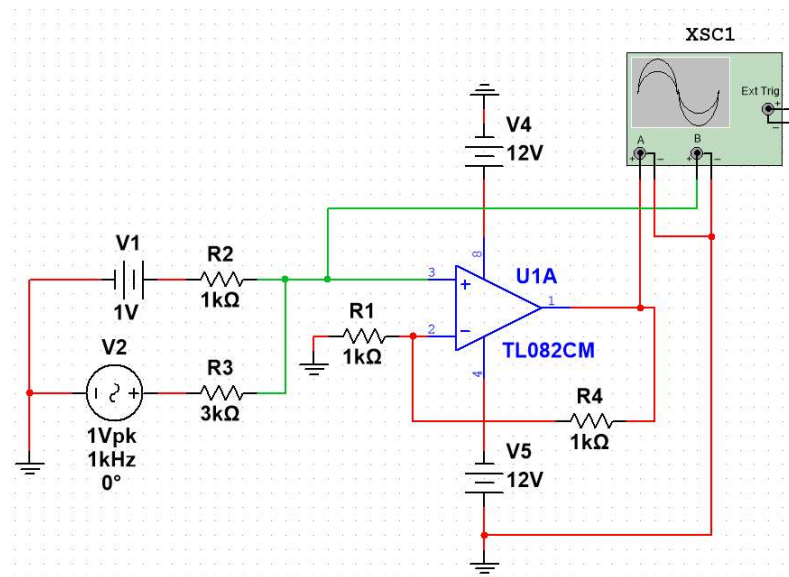


$$V_{oa} = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) * \frac{R_b}{R_a + R_b} * V_a = 2 * \frac{3}{4} * -1 = -1.5V$$

$$V_{ob} = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) * \frac{R_a}{R_a + R_b} * V_b = 2 * \frac{1}{4} * 2 = 1V$$

$$V_o = V_{oa} + V_{ob} = -0.5V$$

C)  $V_a = 1$ ,  $V_b = 1V_p$  a 1KHz



$$V_{oa} = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) * \frac{R_b}{R_a + R_b} * V_a = 2 * \frac{3}{4} * 1 = 1.5V$$

$$V_{ob} = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) * \frac{R_a}{R_a + R_b} * V_b = 2 * \frac{1}{4} * 1 = 1V$$

$$V_{po} = V_{oa} + V_{ob} = 2V$$

Ex3) Adicione o gerador Vc na entrada negativa do AMP-OP:

A)

$$V_{oa} = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) * \frac{R_b}{R_a + R_b} * V_a$$

$$V_{ob} = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) * \frac{R_a}{R_a + R_b} * V_b$$

$$V_{oc} = -\frac{R_f}{R_i} * V_c$$

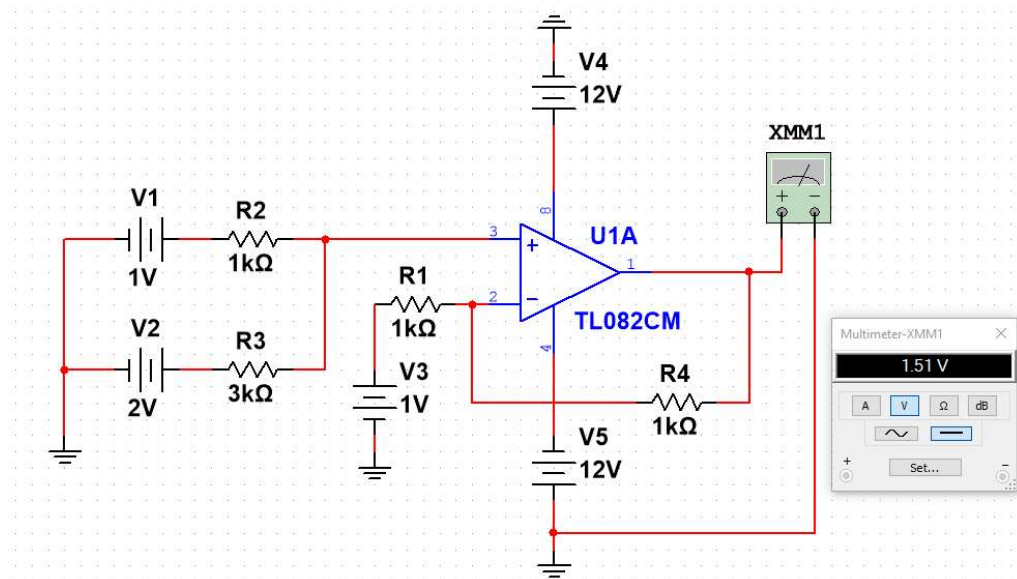
$$V_o = V_{oa} + V_{ob} + V_{oc}$$

b) Obtenha Vo para Va=Vc=1V e Vb=2V, Va=Vc=2V e Vb=-1V

Para Va=Vc=1V e Vb=2V:

$$V_o = 2 * \frac{3}{4} * 1V + 2 * \frac{1}{4} * 2V - \frac{1k}{1k} * 1V$$

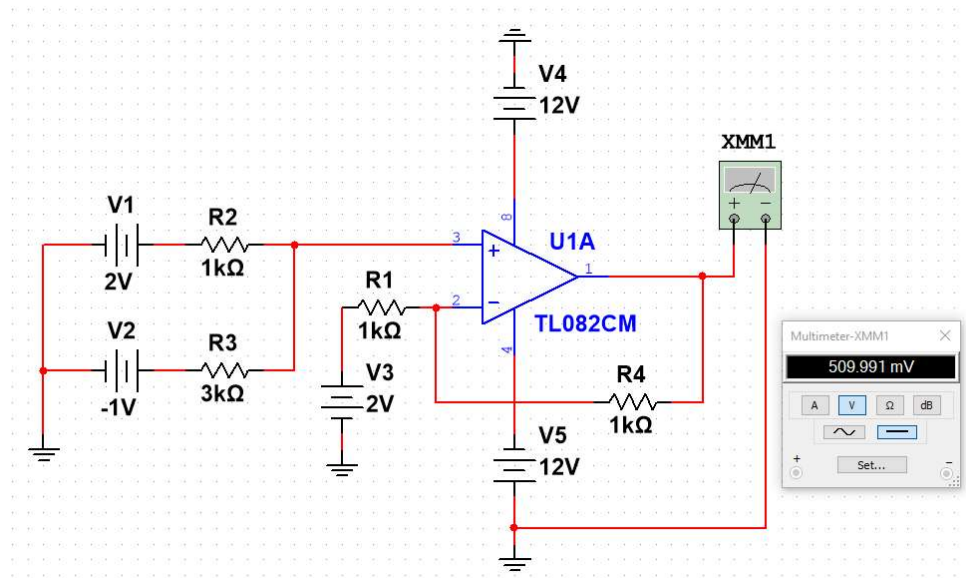
$$V_o = 1,5 + 1 - 1 = 1,5V$$



Para  $V_a=V_c=2V$  e  $V_b=-1V$ :

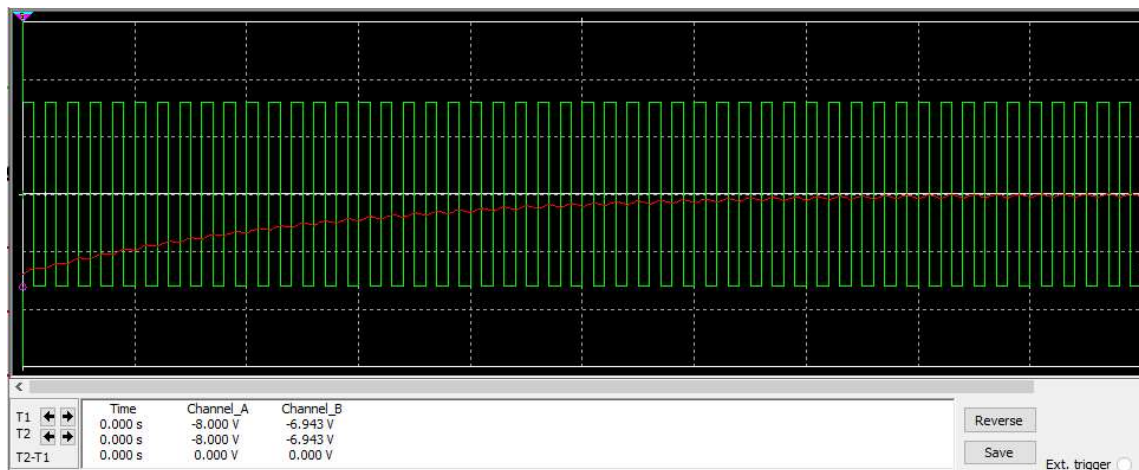
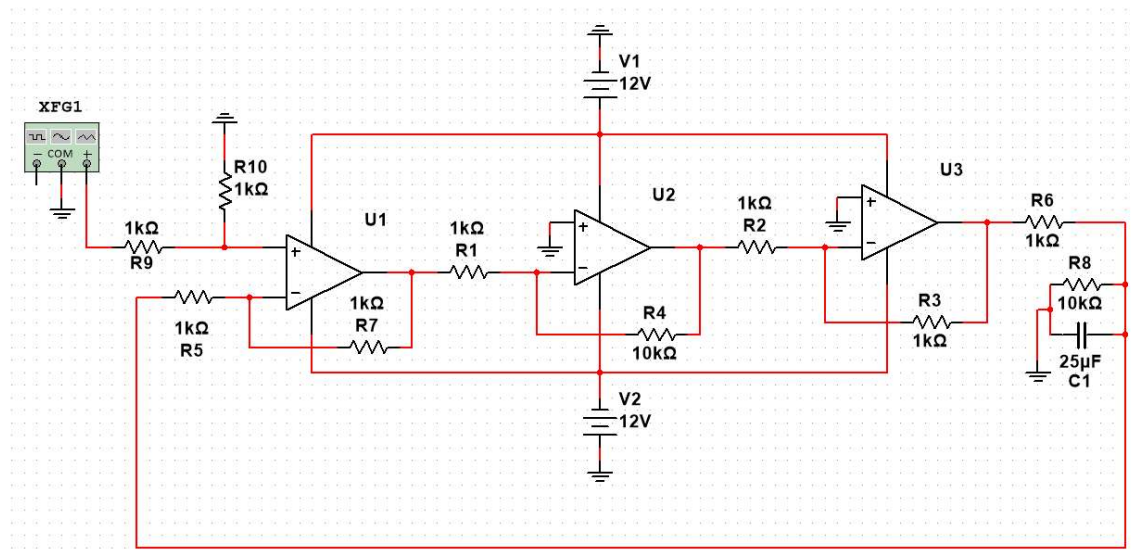
$$V_o = 2 * \frac{3}{4} * 2V + 2 * \frac{1}{4} * -1 - \frac{1k}{1k} * 2V$$

$$V_o = 3 - 0.5 - 2 = 0.5V$$



## 2.7) Aplicação de AMP-OP em sistemas de controle

Uma das formas mais comuns de controle em malha fechada é o sistema de PID, serve para minimizar erros e dar mais estabilidade e robustez a um sistema. Em sala foi demonstrado uma aplicação de PID utilizando AMP-OPs:



## 2.8) Filtro passa-baixa

Os filtros passa-baixa são circuitos que permitem a passagem de frequências até certo ponto, definido pelo desenvolvedor.

$$AT = Bode = \frac{a}{s + a} = \frac{a}{j * w + a} \rightarrow |AT| = \frac{a}{\sqrt{w^2 + a^2}}$$

$$Fc = \frac{1}{2 * \pi * R * C}$$

Ex) Desenvolva filtro de corte para 100Hz:

10Hz:

Capacitor escolhido: 10nF

$$R = \frac{1}{2 * \pi * 10 * 100 * 10^{-9}} = 159K\Omega$$

$$a = \frac{1}{159k * 10 * 10^{-9}} = 629$$

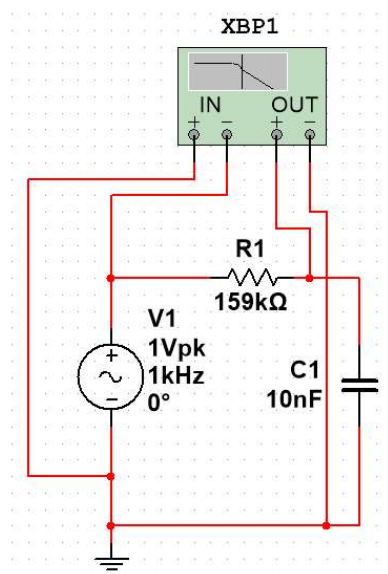
$$w = 2 * \pi * frequencia$$

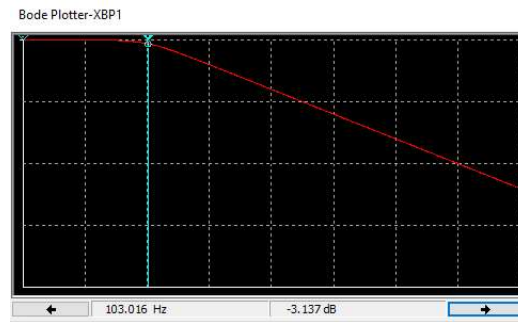
$$|AT|(100Hz) = \frac{629}{\sqrt{629^2 + 629^2}} = 0.707$$

$$|AT|(1000Hz) = \frac{629}{\sqrt{629^2 + (2 * \pi * 1000)^2}} = 0.09$$

$$Vo = Vi * AT = 1.414V$$

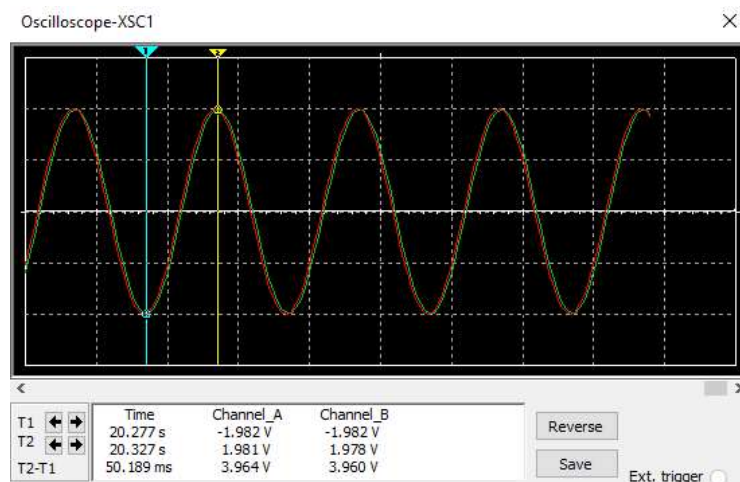
$$ATdB = 20 * \log(AT) = -3dB$$



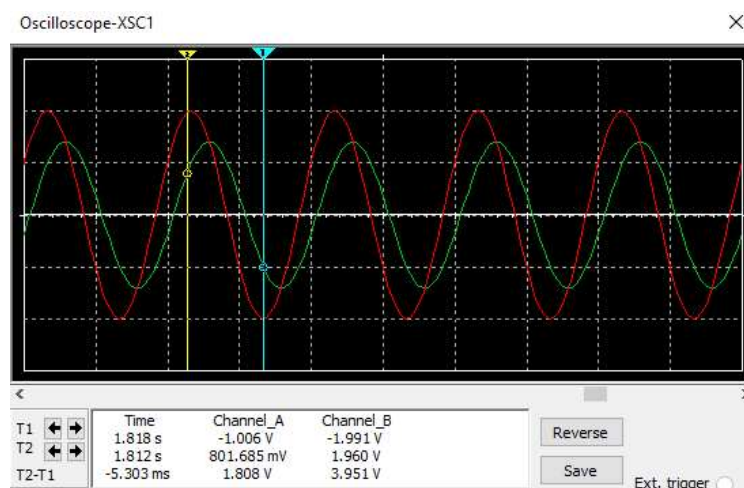


Utilizando o Bode Plotter podemos ver um ganho de -3dB a 100Hz.

Relação entrada (vermelho) e saída (verde) a 10Hz

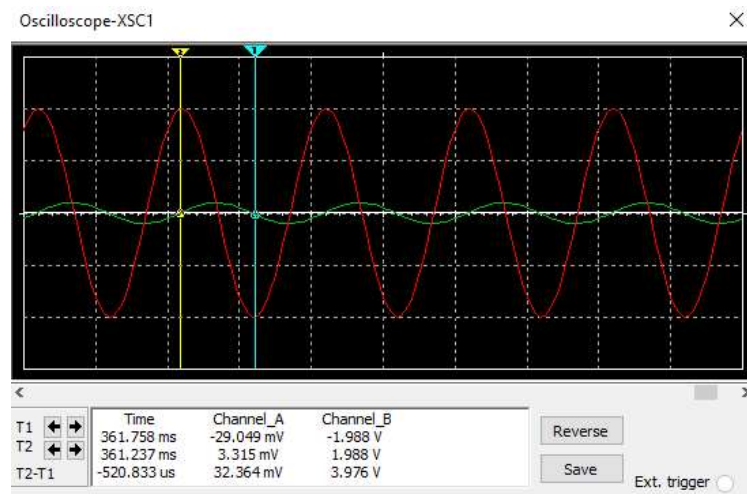


Relação entrada (vermelho) e saída (verde) a 100Hz



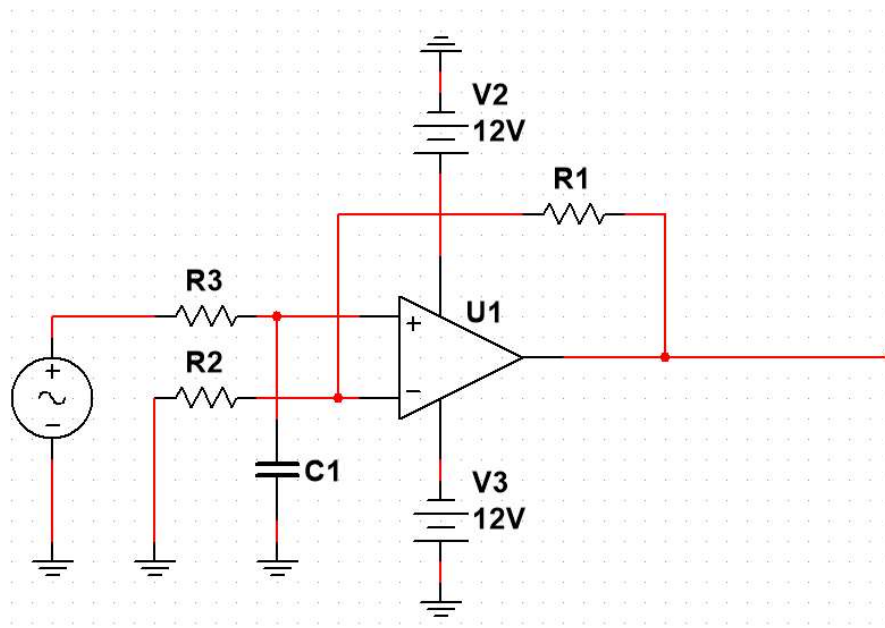


Relação entrada (vermelho) e saída (verde) a 1000Hz



Teórico			Simulado		
Hz	Vi	Vo	Vi	Vo	AT dB
10	2 V	2 V	2	1.98 V	-0.04
100	2 V	1.414 V	2	1.41 V	-3
1000	2 V	0.18 V	2	275 mV	-20

2.9) Ex passa baixa: Projete um filtro PB de 1° ordem com  $F_c=1\text{KHz}$  e ganho de 20 Db,  $R > 1\text{K}$



Definido capacitor =  $20\mu\text{F}$

$$R = \frac{1}{2 * \pi * F_c * C} = 8\text{K}$$

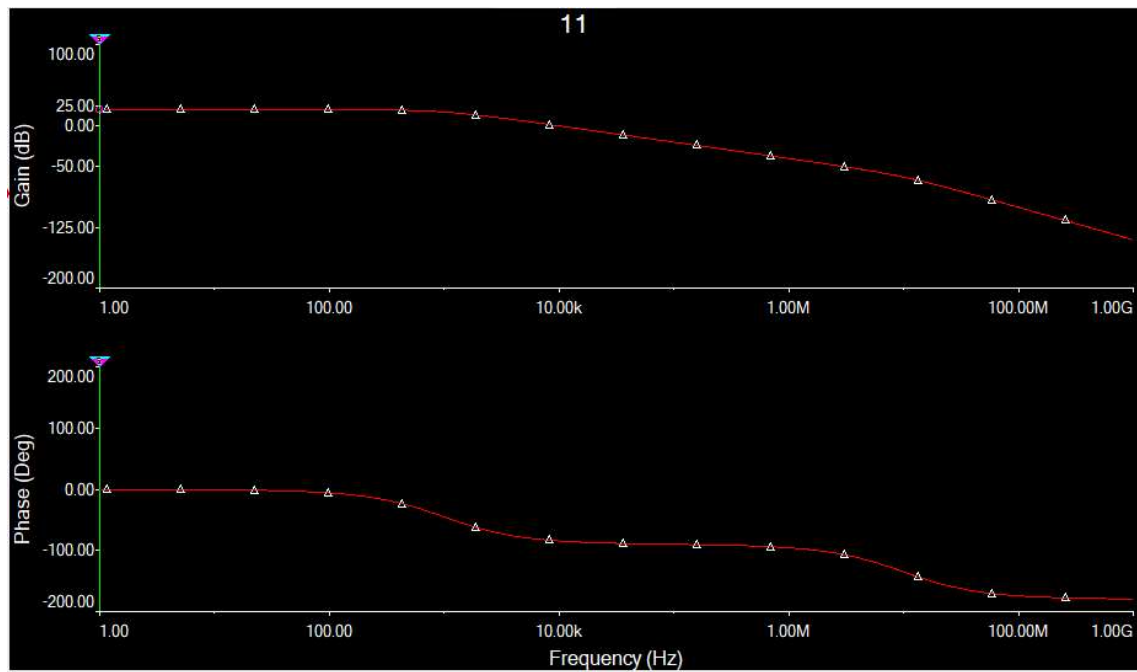
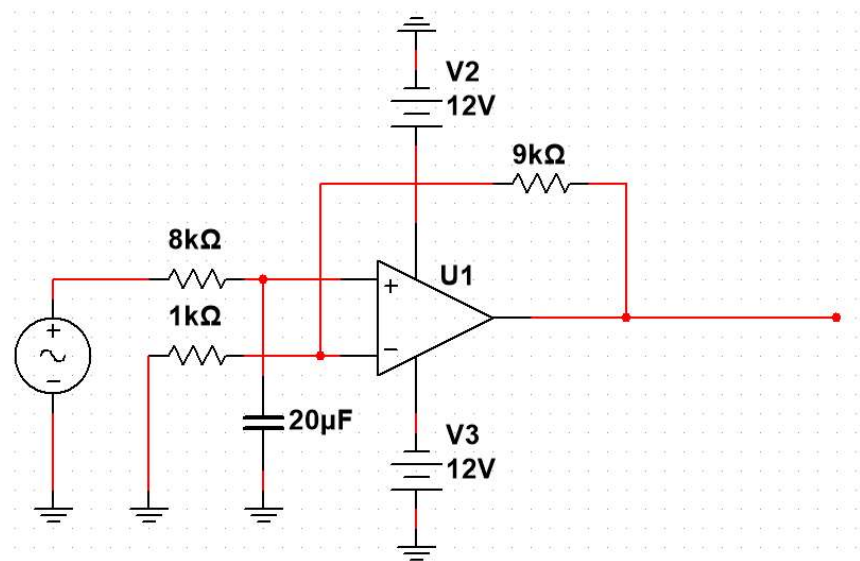
Transformar ganho em dB para ganho real:

$$AT = \frac{V_o}{V_i}$$

$$AT_{dB} = 20 * \log(AT) \rightarrow 20 = 20 * \log\left(\frac{V_o}{V_i}\right) \rightarrow 1 = \log\left(\frac{V_o}{V_i}\right) \rightarrow v_i = \frac{V_o}{10}$$

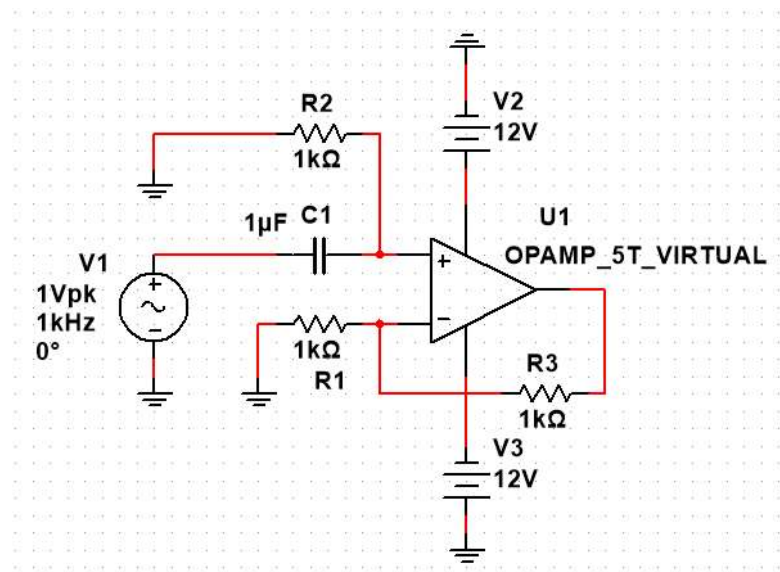
$$ganho = 1 + \frac{r_2}{r_3} \rightarrow 10 = 1 + \frac{r_2}{r_3} \rightarrow r_2 = 9 * r_3$$

$R_2=1\text{K}$  e  $R_3 = 9\text{K}$



## 2.10) Filtro passa-alta

Ex: Projete um filtro PA com  $F_c = 200 \text{ Hz}$  e ganho de  $6 \text{ dB}$ ,  $R > 1K$



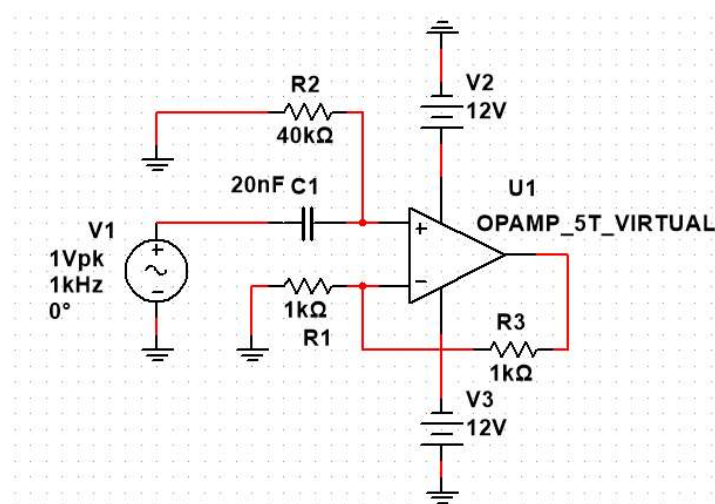
$$C = 20 \text{ nF}$$

$$R = \frac{1}{2 * \pi * 200 * 20 * 10^{-9}} = 39788 \Omega$$

$$6 \text{ dB} = 20 \log(V_o/V_i)$$

$$0.3 = \log\left(\frac{V_o}{V_i}\right) \rightarrow 10^{0.3} = \frac{v_o}{v_i} \rightarrow v_o = 2 * V_i$$

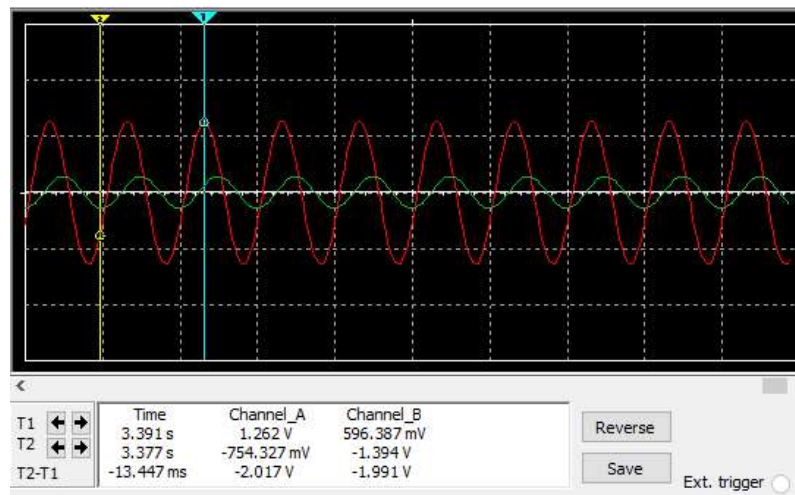
$$\text{ganho} = 1 + \frac{R_2}{R_3} \rightarrow 2 = 1 + \frac{R_2}{R_3} \rightarrow R_2 = R_3 = 1K$$



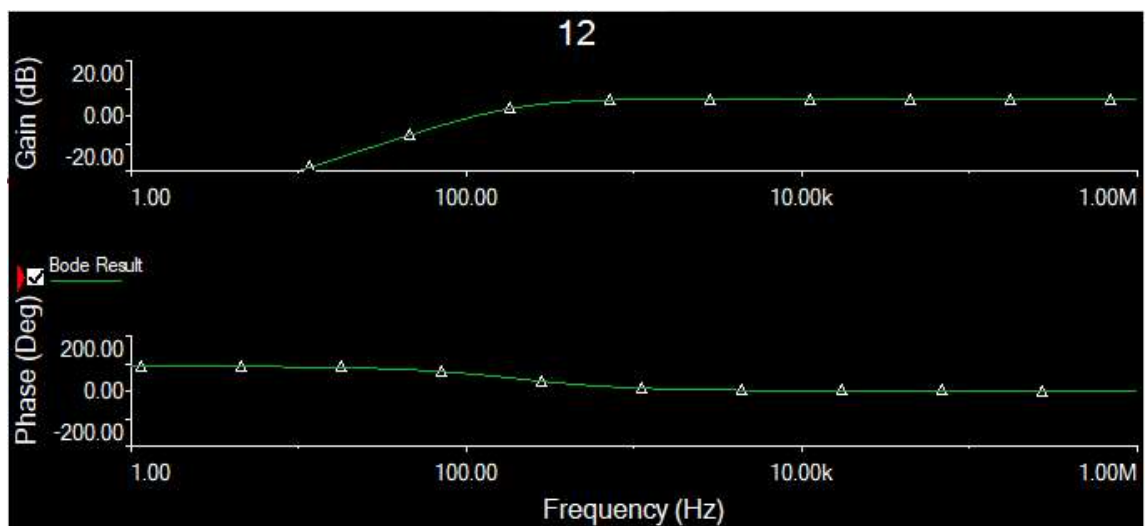
Saída (vermelho) e entrada (verde) do sistema a 1KHz:



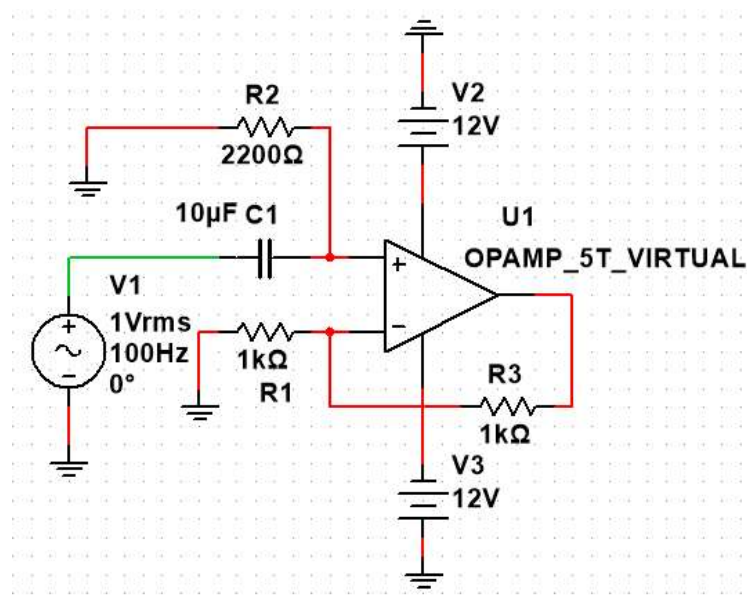
Saída do sistema a 100Hz:



Bode:

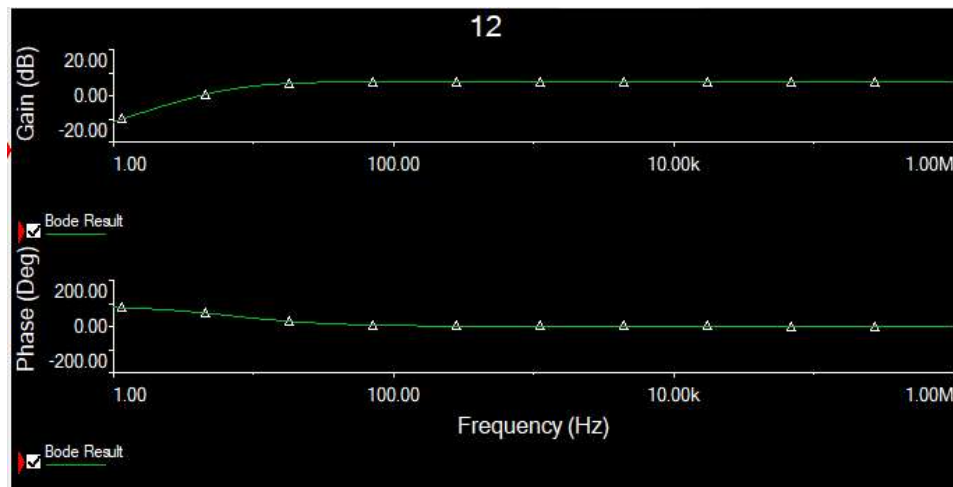


2.11) Calcule a FC do filtro apresentado e plote sua resposta na frequência:

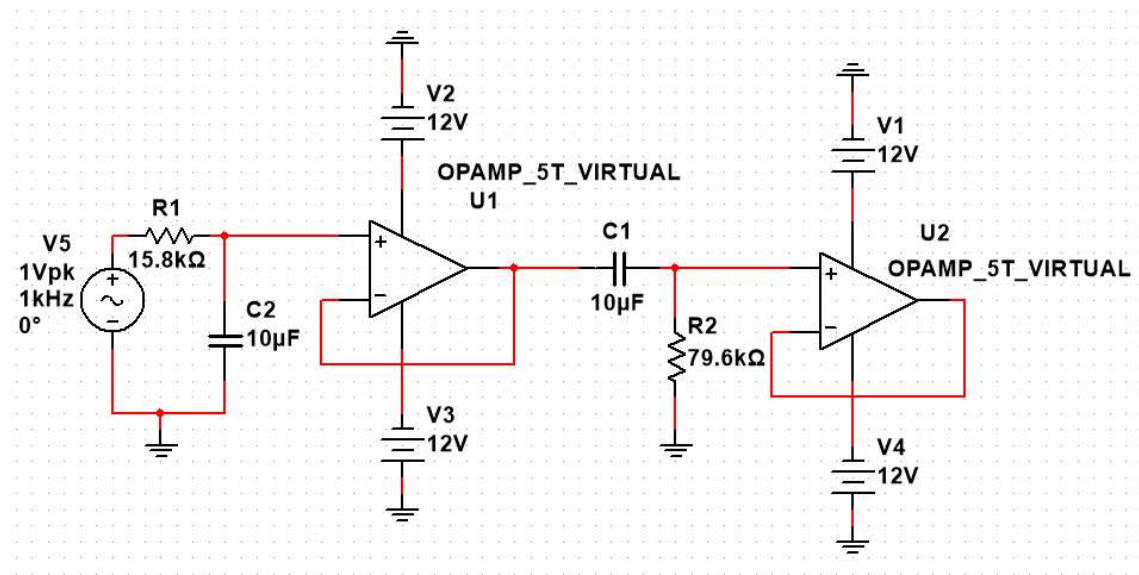


$$F_c = \frac{1}{2 * \pi * 2200 * 10 * 10^{-6}} = 7,23 \rightarrow 7\Omega$$

Resposta na frequência:

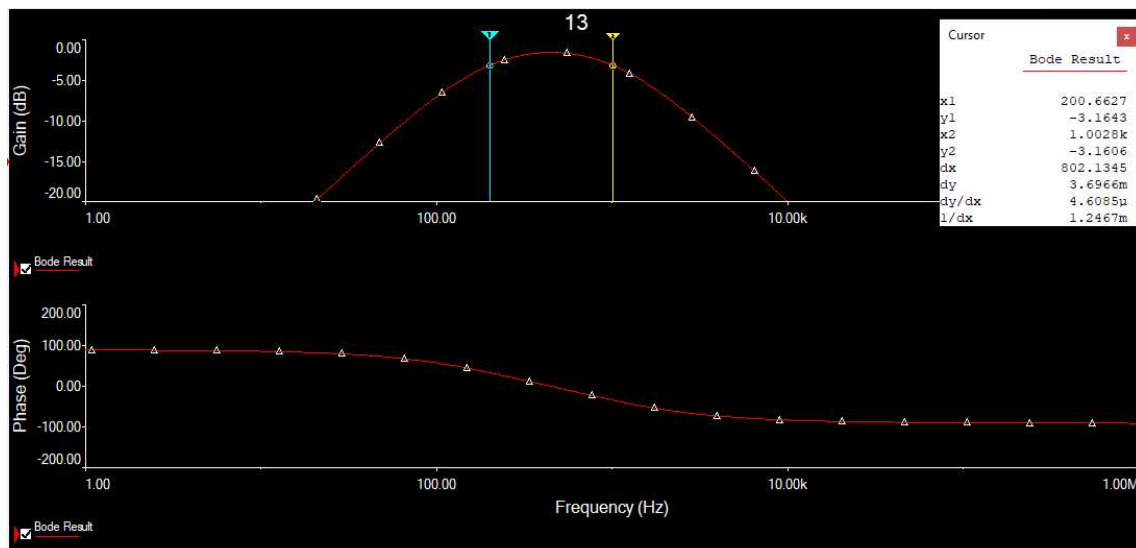


2.12) Calcule as frequências de corte dos filtros PA e PB:



$$\text{Filtro 1} = \text{PB} \rightarrow F_{c1} = \frac{1}{2 * \pi * 15800 * 10 * 10^{-9}} = 1007 \text{ Hz}$$

$$\text{Filtro 2} = \text{PA} \rightarrow F_{c1} = \frac{1}{2 * \pi * 79600 * 10 * 10^{-9}} = 200 \text{ Hz}$$



### 2.13) ButterWorth

Ex) Projete um filtro PB de 2° ordem “BT”, ganho unitário com  $F_c=1\text{KHz}$

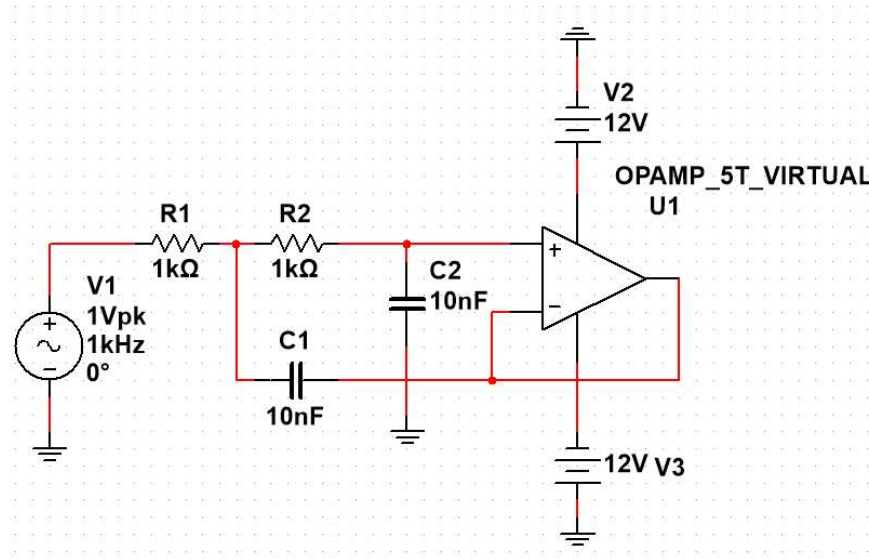


Table 16–5. Butterworth Coefficients

n	i	$a_i$	$b_i$	$k_i = \frac{f_{ci}}{f_c}$	$Q_i$
1	1	1.0000	0.0000	1.000	—
2	1	1.4142	1.0000	1.000	0.71

$$C1 = 10nF$$

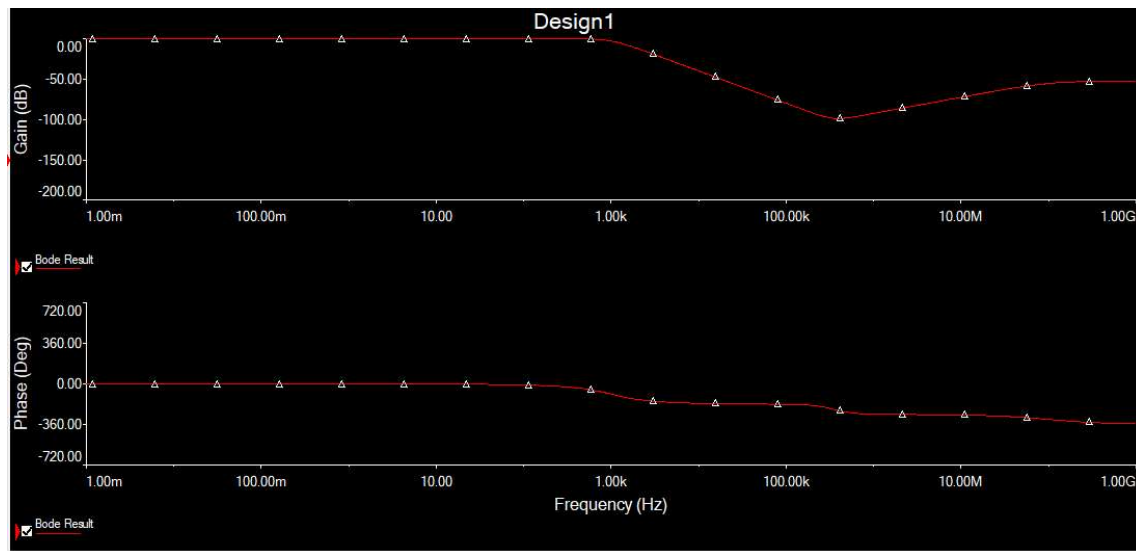
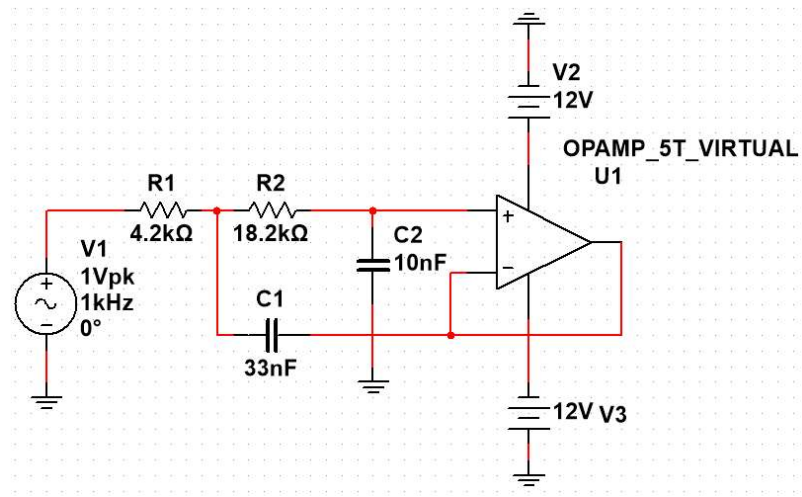
$$C2 > \frac{4 * 1}{1.41^2} = 2 * C1 = 20nF \rightarrow C2 = 33nF$$

$$R1,2 = \frac{Ai * C2 \pm \sqrt{Ai^2 * C2^2 - 4 * B1 * C1 * C2}}{4 * \pi * Fc * C1 * C2}$$

$$R1 = \frac{Ai * C2 - \sqrt{Ai^2 * C2^2 - 4 * B1 * C1 * C2}}{4 * \pi * Fc * C1 * C2} = 4.2K$$

$$R2 = \frac{Ai * C2 + \sqrt{Ai^2 * C2^2 - 4 * B1 * C1 * C2}}{4 * \pi * Fc * C1 * C2} = 18.2K$$





2.14) Repita o exemplo anterior para aproximação Chebyshev com 1 dB na faixa de passagem.

*Table 16–7. Tschescheff Coefficients for 1-dB Passband Ripple*

n	i	a <sub>i</sub>	b <sub>i</sub>	k <sub>i</sub> = f <sub>ci</sub> / f <sub>c</sub>	Q <sub>i</sub>
1	1	1.0000	0.0000	1.000	—
2	1	1.3022	1.5515	1.000	0.96

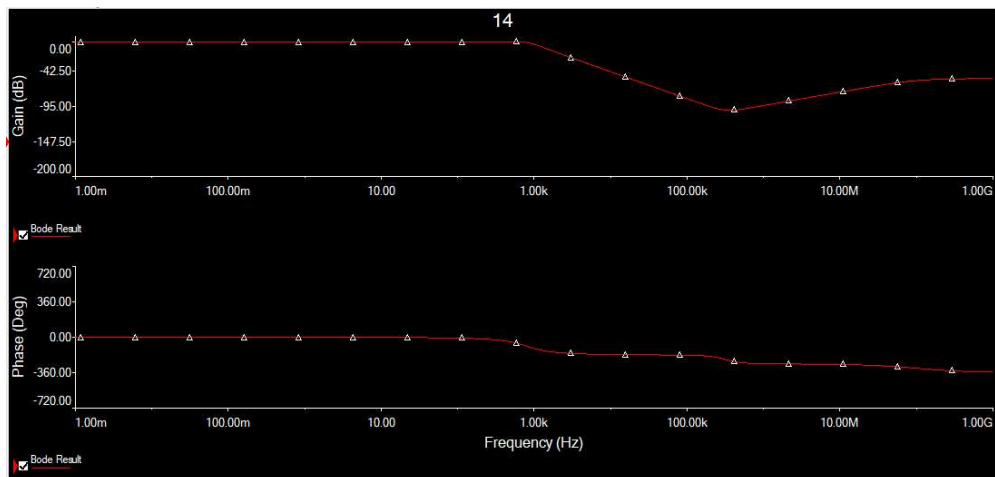
$$C1 = 10nF$$

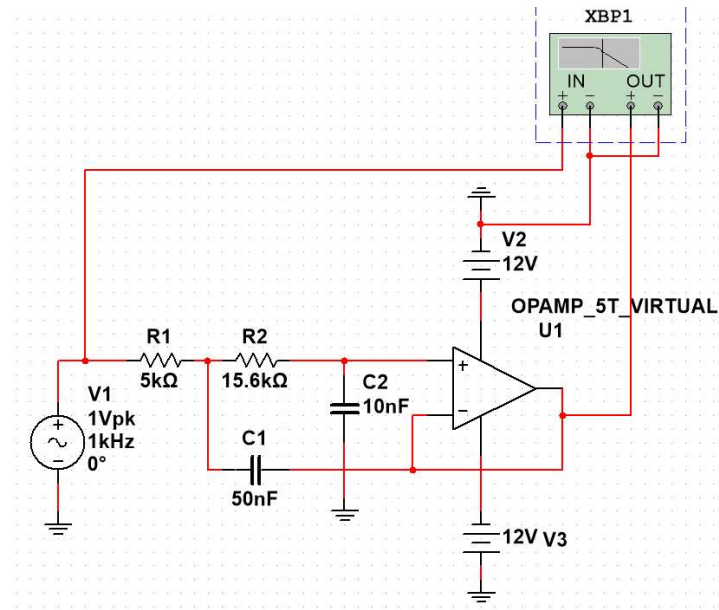
$$C2 > \frac{4 * 1.55}{1.4^2} = 3.66 * C1 = 36nF \rightarrow C2 = 50nF$$

$$R1,2 = \frac{Ai * C2 \pm \sqrt{Ai^2 * C2^2 - 4 * B1 * C1 * C2}}{4 * \pi * Fc * C1 * C2}$$

$$R1 = \frac{Ai * C2 - \sqrt{Ai^2 * C2^2 - 4 * B1 * C1 * C2}}{4 * \pi * Fc * C1 * C2} = 5K$$

$$R2 = \frac{Ai * C2 + \sqrt{Ai^2 * C2^2 - 4 * B1 * C1 * C2}}{4 * \pi * Fc * C1 * C2} = 15.6K$$





2.15) ButterWorth de 5° ordem:

Se dá pela utilização de 2 filtros de 2° ordem e um de 1°:



$$A1 = 1.61 \mid B1 = 1$$

$$A2 = 0.61 \mid B2 = 1$$

$$A3 = 1.00 \mid B3 = 0$$

1°)

$$C1 = 10nF$$

$$C2 > \frac{4 * 1}{1.61^2} = 1.54 * C1 = 15nF \rightarrow C2 = 30nF$$

$$R_{1,2} = \frac{Ai * C2 \pm \sqrt{Ai^2 * C2^2 - 4 * B1 * C1 * C2}}{4 * \pi * Fc * C1 * C2}$$

$$R1 = \frac{Ai * C2 - \sqrt{Ai^2 * C2^2 - 4 * B1 * C1 * C2}}{4 * \pi * Fc * C1 * C2} = 3.8K$$

$$R2 = \frac{Ai * C2 + \sqrt{Ai^2 * C2^2 - 4 * B1 * C1 * C2}}{4 * \pi * Fc * C1 * C2} = 21.7K$$

2°)

$$C1 = 10nF$$

$$C2 > \frac{4 * 1}{0.61^2} = 10.74 * C1 = 107nF \rightarrow C2 = 120nF$$

$$R_{1,2} = \frac{Ai * C2 \pm \sqrt{Ai^2 * C2^2 - 4 * B1 * C1 * C2}}{4 * \pi * Fc * C1 * C2}$$

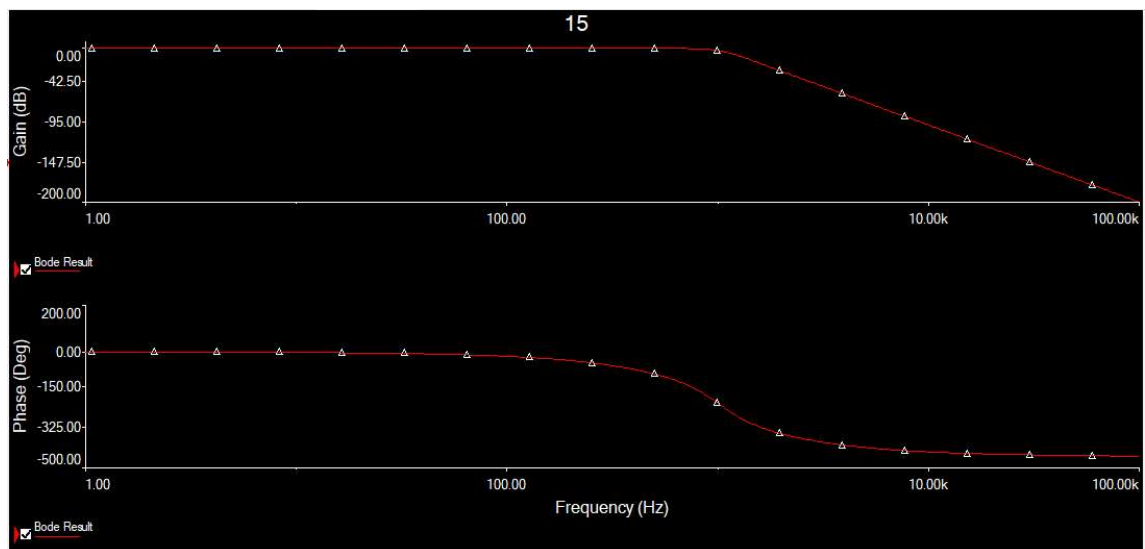
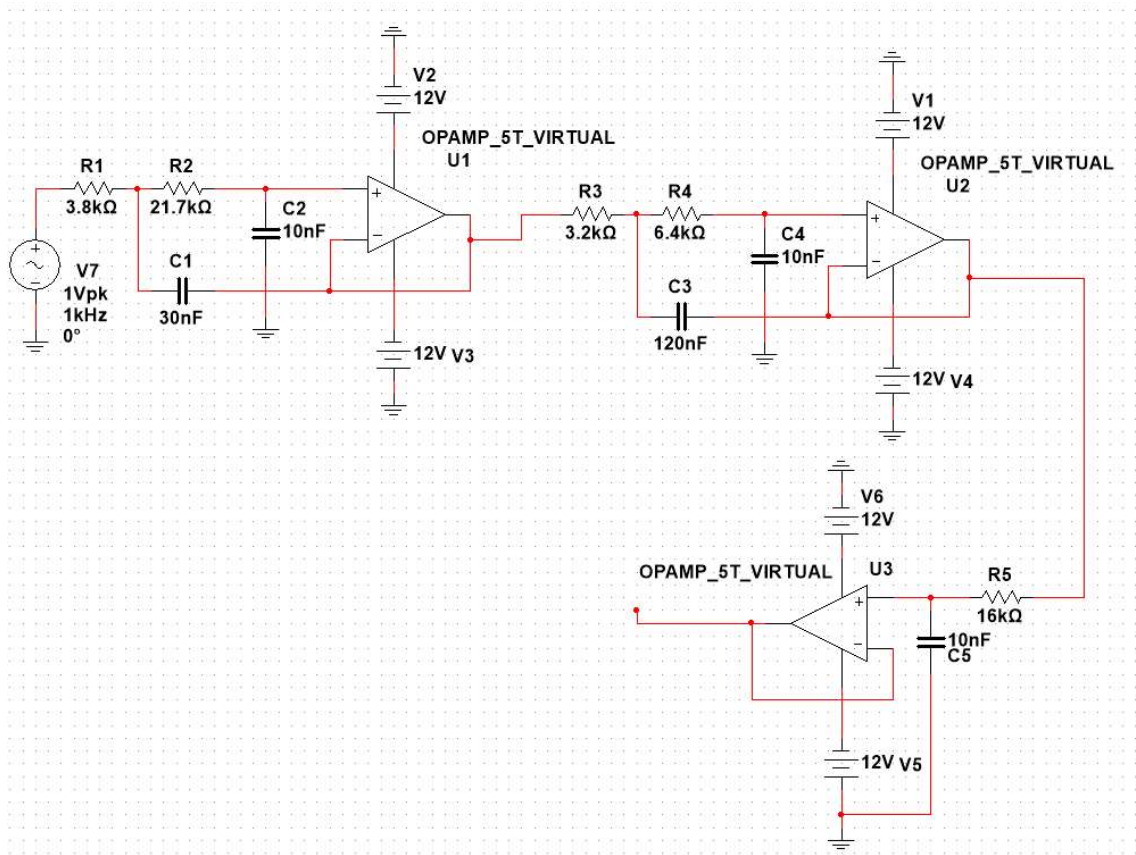
$$R1 = \frac{Ai * C2 - \sqrt{Ai^2 * C2^2 - 4 * B1 * C1 * C2}}{4 * \pi * Fc * C1 * C2} = 3.2K$$

$$R2 = \frac{Ai * C2 + \sqrt{Ai^2 * C2^2 - 4 * B1 * C1 * C2}}{4 * \pi * Fc * C1 * C2} = 6.4K$$

3°)

$$C1 = 10nF$$

$$R = \frac{1}{2 * \pi * 1000 * 10nF} = 16K$$



2.16) Projeto PA:

$$a1 = \frac{2}{\omega c * R1 * C}$$

$$b1 = \frac{1}{\omega c^2 * R1 * R2 * C^2}$$

$$R1 = \frac{2}{a1 * \omega c * c}$$

$$R2 = \frac{1}{\omega c^2 * b1 * R1 * c^2}$$

Para  $f_c = 1\text{kHz}$  e  $C1 = 10\text{ nF}$ :

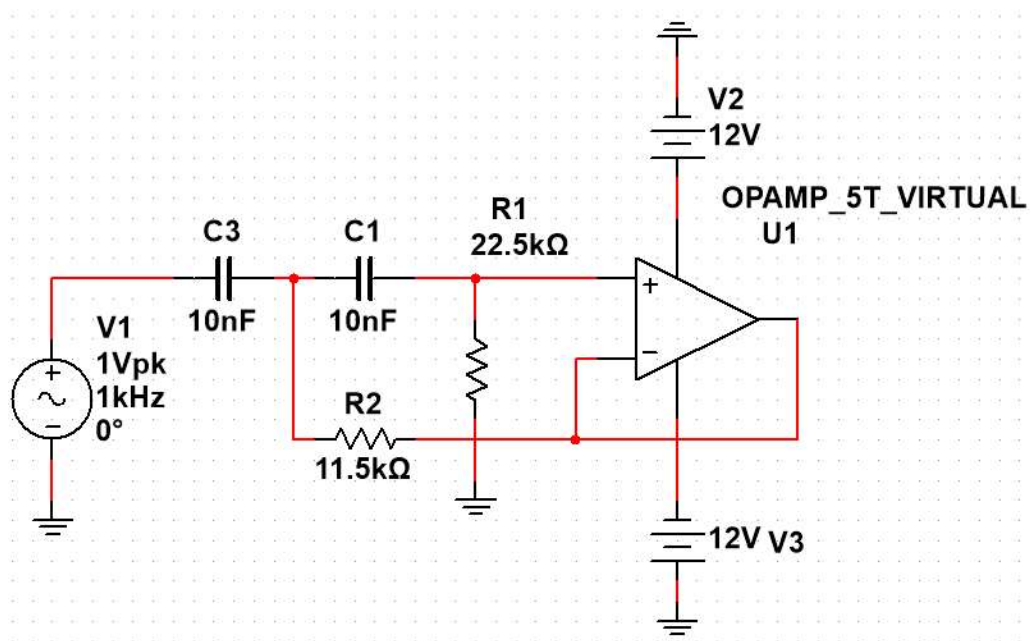
$$a1 = 1,4142$$

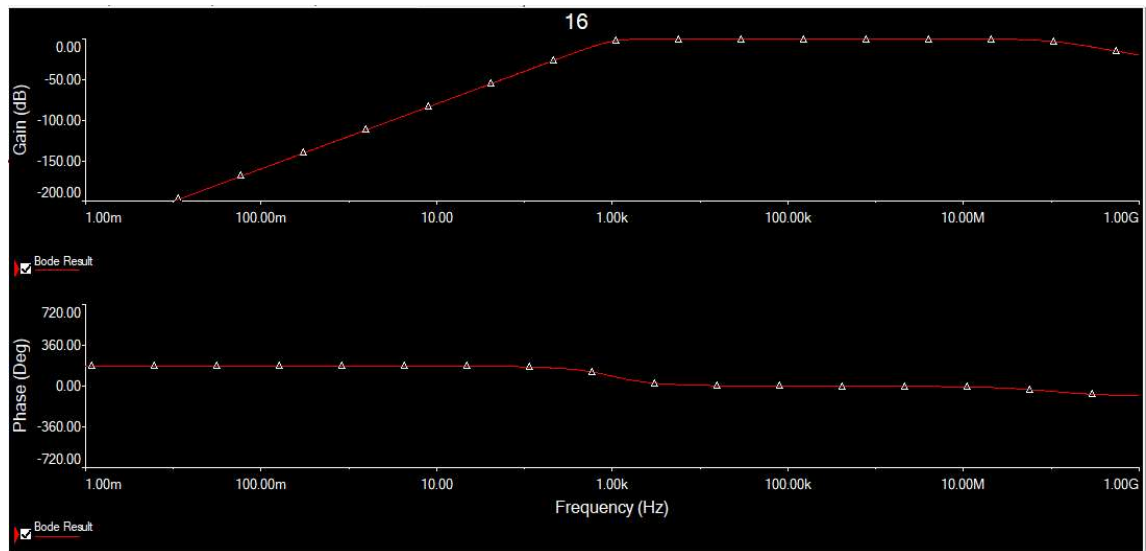
$$b1 = 1$$

$$R1 = \frac{2}{1,4142 * 2 * \pi * f_c * 10\text{nF}} \rightarrow \frac{1}{4,443 \times 10^{-5}} = 22\text{k}500$$

$$R2 = \frac{1}{(2 * \pi * f_c)^2 * 1 * 22\text{k} * 10\text{nF}} \rightarrow \frac{1}{868,525 \times 10^{-13}}$$

$$R2 = 11\text{k}5$$





### 3) Conclusão

Com este trabalho foi possível reforçar todos os conhecimentos obtidos em sala de aula e realmente poder experimentar com componentes e circuitos estudados. Sendo possível analisar as grandes mudanças que pequenas alterações podem ocasionar e entender como melhor desenvolver um circuito, tendo em vista as propriedades e comportamentos de componentes específicos.