

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA – IFSC
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA
SISTEMAS ELETRÔNICOS

AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

MARCELO BRANCALHÃO GASPAR
MATHEUS AUGUSTO MARTIM

FLORIANÓPOLIS
JUNHO DE 2013

SUMÁRIO

I – Introdução.....	3
II - Objetivos.....	4
III – Introdução Teórica.....	5
1. Função de Transferencia (F.T.).....	5
2. Amplificação e Atenuação.....	5
3. Decibéis.....	7
4. Amplificadores Operacionais.....	7
5. Saturação.....	9
6. Métodos de Polarização.....	9
7. Curto circuito Virtual e Terra Virtual.....	10
8. Circuito utilizando Ampop.....	11
IV – Desenvolvimento.....	12
V – Análise Teórica.....	12
VI – Simulação	13
VII – Montagens e Resultados.....	18
VIII – Considerações Finais.....	23
IX – Referências Bibliográficas	24
X – Anexos.....	25

I – INTRODUÇÃO

O Amplificador Operacional também conhecido como AMPOP é um amplificador de tensão com **entrada diferencial**, cujas entradas se aproximam das de um amplificador ideal.

Neste trabalho, apresentaremos estudos de casos com dois Ampops, LM741 e LM324, onde os mesmos trabalharão em corrente contínua, alternada senoidal e triangular, e também como amplificadores inversores.

II – OBJETIVOS

- Definir requisitos para o circuito de amplificação
- Calcular parâmetros de amplificação
- Analisar, projetar e montar os amplificadores operacionais
- Verificar os resultados obtidos teóricamente e compará-los com os valores práticos
- Compreender a saturação e corte dos Ampops

III – INTRODUÇÃO TEÓRICA

1. Função de Transferência (F.T)

É uma equação matemática literal, que relaciona uma saída e uma entrada de um sistema linear.

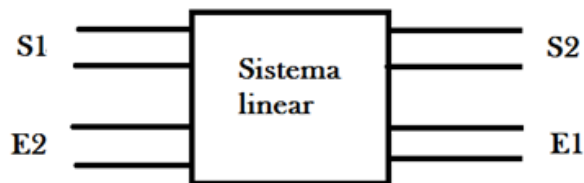


Figura 1 - Função de Transferência de um Sistema Linear

Do sistema linear anterior, podemos definir as F.T's:

$$F.T1 = S1/E1 \quad F.T2 = S1/E2$$

$$F.T3 = S2/E2 \quad F.T4 = S2/E1$$

$$F.T5 = S2/S1$$

2. Amplificação e Atenuação (Ganho)

De acordo com o valor numérico da F.T, tem-se o que se chama de amplificação ou atenuação.

$$\text{Amplificação} \rightarrow |F.T| > 1 \rightarrow |\text{Ganho}| > 1$$

$$\text{Atenuação} \rightarrow |F.T| < 1 \rightarrow |\text{Ganho}| < 1$$

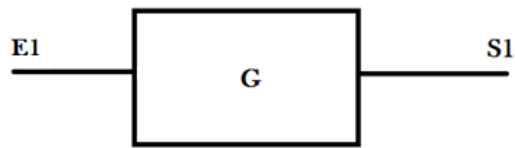


Figura 2 - Sistema de ganho e atenuação

O ganho pode relacionar quaisquer grandezas em um circuito.

Os mais utilizados são:

Ganho de Tensão

Ganho de V= $GV=VS/VE$

Ganho de Corrente

Ganho de I= $GI=Is/Ie$

Ganho de Potência

Ganho de W= $Gp=Ps/Pe$

3. Decibéis

O Decibel representa em escala logarítmica o valor do Ganho.

$$Gp(dB) = 10 \log . Ps/Pe$$

$$Gv(dB) = 20 \log . Vs/Ve$$

$$G(\text{dB}) = 20 \log \cdot I_s/I_e$$

$$G > 1 \rightarrow G(\text{dB}) > 0$$

$$G = 1 \rightarrow G(\text{dB}) = 0$$

$$G < 1 \rightarrow G(\text{dB}) < 0$$

4. AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

O Ampop é um amplificador de tensão com entrada diferencial cujas características se aproximam das de um amplificador ideal.

Características:

- Resistência de entrada infinita ($R_e \rightarrow \text{Infinito}$)
- Resistência de saída nula ($R_s \rightarrow 0$)
- Resposta da frequência infinita (C.C \rightarrow Infinito HZ)
- Estável com variação da temperatura

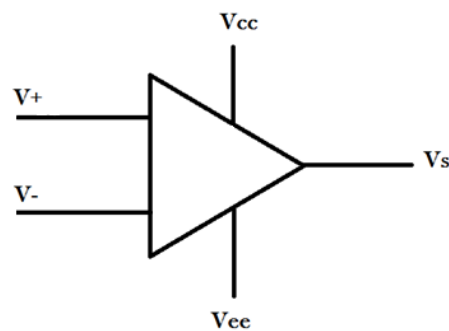


Figura 3 – Simbologia do Amplificador Operacional

V_+ \rightarrow Entrada não Inversora

V_- \rightarrow Entrada Inversora

V_s \rightarrow Saída

V_{cc}, V_{ee} \rightarrow Tensão de Alimentação

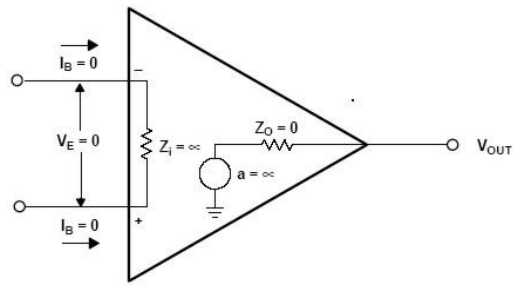


Figura 4 - Modelo Interno do Amplificador Operacional

$G_v \rightarrow$ Ganho de Malha Aberta

$R_e \rightarrow$ Resistência de Entrada

$R_s \rightarrow$ Resistência de Saída

$V_d = V_+ - V_- \rightarrow$ Diferença das Tensões de Entrada

$G_v.V_d \rightarrow$ Amplificação da Diferença

Como:

$G_v \rightarrow \infty$

$G_v.V_d \rightarrow + \text{ ou } - \infty$

$V_s = G_v.V_d - R_s.i_s$

$R_s \rightarrow 0$

$V_s \Rightarrow G_v.V_D$

$V_s \rightarrow \infty$

Assim, conclui-se teóricamente que não existe limite para a tensão de saída, porém veremos a seguir em Saturação que as características do componente limitam o ganho assim limitando a Tensão de Saída " V_s ".

5. SATURAÇÃO

Sendo ideal,

$V_s = G_v.V_d$

$V_s = G_v.(V_+ - V_-)$

$$\begin{array}{llllll}
 \text{Se,} & V_+ > V_- & \rightarrow & V_D > 0 & \rightarrow & V_S = +\infty \rightarrow V_S = V_{CC} \\
 \text{Se,} & V_+ < V_- & \rightarrow & V_D < 0 & \rightarrow & V_S = -\infty \rightarrow V_S = V_{EE}
 \end{array}$$

Portanto comprova-se que a saturação de um amplificador operacional ocorre nas tensões de alimentação “Vcc” ou “Vee”.

6. MÉTODOS DE REALIMENTAÇÃO

Ao associarmos aos ampop's outros dispositivos (R,L,C, Transistores, Diodos) concebe-se circuitos com características próprias de funcionamento.

Basicamente estes circuitos podem ser classificados em lineares e não lineares.

Podemos realimentar o Amplificador Operacional de 3 maneiras: sem realimentação, realimentação positiva e Realimentação negativa.

- ✓ Sem Realimentação – Conhecida como operação em malha aberta, pois não se tem o controle da amplificação, utiliza-se os dados do fabricante.

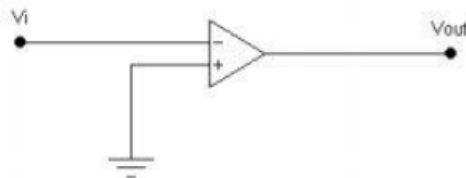


Figura 5 – Amplificador Operacional sem Realimentação

- ✓ Realimentação Positiva – Denomina-se este modelo como operação em malha fechada. O valor do ganho é definido em projeto e assim o amplificador não poderá trabalhar para amplificar outros sinais, pois a configuração impede-o.

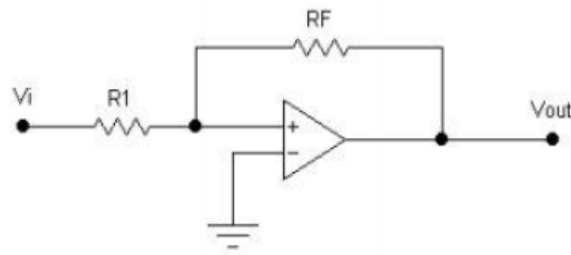


Figura 6 – Amplificador Operacional com Realimentação Positiva

- ✓ Realimentação Negativa – Este circuito é amplamente utilizado em circuitos com Ampops. Nele a saída realimenta a entrada inversora através de R_F .

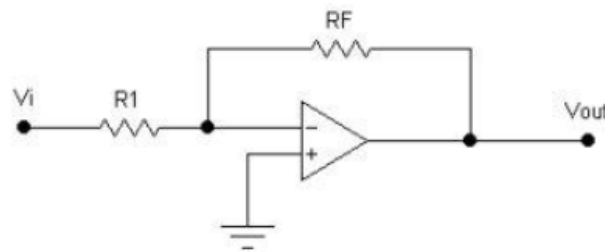


Figura 7– Amplificador Operacional com Realimentação Negativa

7. CURTO CIRCUITO E TERRA VIRTUAL

O ampop com realimentação negativa é considerado um curto virtual devido a sua alta impedância de entrada e ao seu ganho de malha aberta tender ao infinito. Portanto como a tensão entre as duas entradas é nula (curto circuito), mas apesar disso a corrente é nula, por causa disso dizemos que entre as duas entradas existe um "curto circuito" virtual e que na entrada inversora temos um terra virtual.

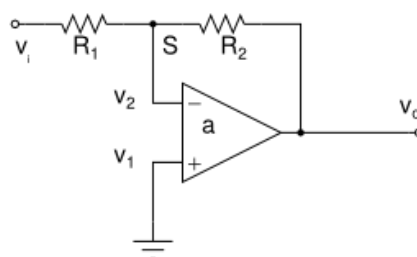


Figura 8 – Amplificador Operacional com Realimentação Negativa e Terra Virtual

8. CIRCUITOS UTILIZANDO AMPOP

- ✓ **Amplificador Inversor** – No circuito do amplificador inversor verifica-se um sinal de saída defasado 180° em relação ao sinal de entrada, por isso denomina-se Amplificador Inversor.

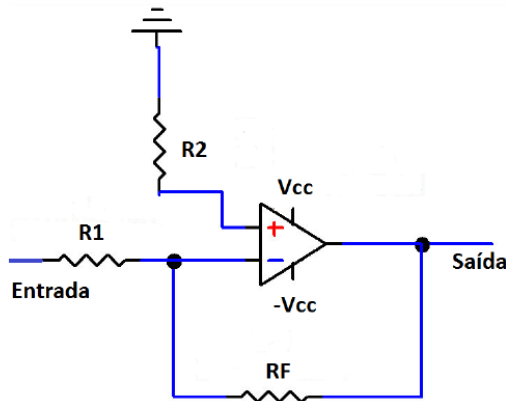


Figura 9 – Amplificador Inversor

Dele obtemos a expressão de Ganho:

$$G = - R_F / R_1$$

Onde $G \leq 0$.

- ✓ **Amplificador não Inversor** – o amplifica não inversor não possui defasagem, portanto só visualizamos em sua saída a amplificação sem inversão.

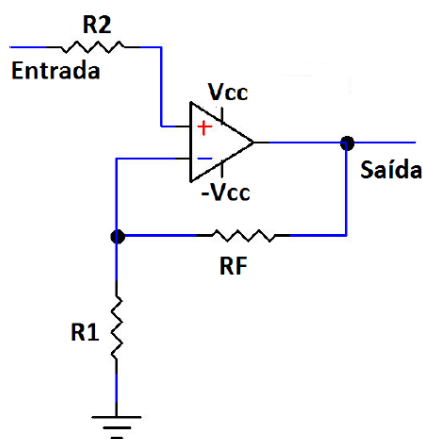


Figura 10 – Amplificador não Inversor

Dele obtemos a expressão de Ganho:

$$G = 1 + (R_F / R_1)$$

Onde $G \geq 1$.

IV – DESENVOLVIMENTO

Para a realização de todo o experimento realizamos os seguintes passos:

1. Calcular os valores dos resistores para obter-se o ganho como desejado, utilizando valores comerciais.
2. Simular os circuitos obtidos no simulador PROTEUS.
3. Montar os circuitos na matriz de contatos e verificar os valores com o osciloscópio, analisando os resultados práticos.

Materiais Utilizados:

1. Fonte de Tensão CC Regulável – ICELmanaus PS-5000;
2. Osciloscópio Digital – TDS 1001C – EDU;
3. Gerador de função – MFG – 4201ª;
4. Cabos banana-jacaré;
5. Matriz de contatos;
6. Cabos do tipo “jumpers” para interligação dos componentes;
7. Resistores: 1k, 2.2K, 22K, 10k, 5k, 19k;
8. Ampop 741 e 324;

V – ANÁLISE TEÓRICA

Utilizando as fórmulas de ganho:

$$G = - R_F / R_1 \text{ (Inversor)}$$

$$G = 1 + (R_F / R_1) \text{ (não Inversor)}$$

1. Ampop LM741. Com alimentação de $V_{cc} = 10 \text{ V}$ e $V_{ee} = -10 \text{ V}$;

a. Inversor

$$V_{ent} = 1 \text{ V}_{cc}$$

$$G = -2$$

$$R_2 = 2k\Omega \text{ e } R_1 = 1K$$

$$G = -20$$

$$R_2 = 22k\Omega \text{ e } R_1 = 1K$$

b. Inversor

Vent = 1 Vpp (Tensão alternada senoidal)

$$G = -2$$

R2 = 2k2 e R1 = 1K

$$G = -20$$

R2 = 22k e R1 = 1K

c. Não Inversor

Vent = 1 Vcc

$$G = 2$$

R2 = 10k e R1 = 10K

$$G = 20$$

R2 = 40k e R1 = 2K2

d. Não Inversor

Vent = 1 Vpp (Tensão alternada triangular)

$$G = 2$$

R2 = 10k e R1 = 10K

$$G = 20$$

R2 = 40k e R1 = 2K2

VI – SIMULAÇÃO

1. Ampop LM741. Com alimentação de Vcc = 10 V e Vee = -10 V;

a. Inversor

Vent = 1 Vcc

$$G = -2$$

R2 = 2k2 e R1 = 1K

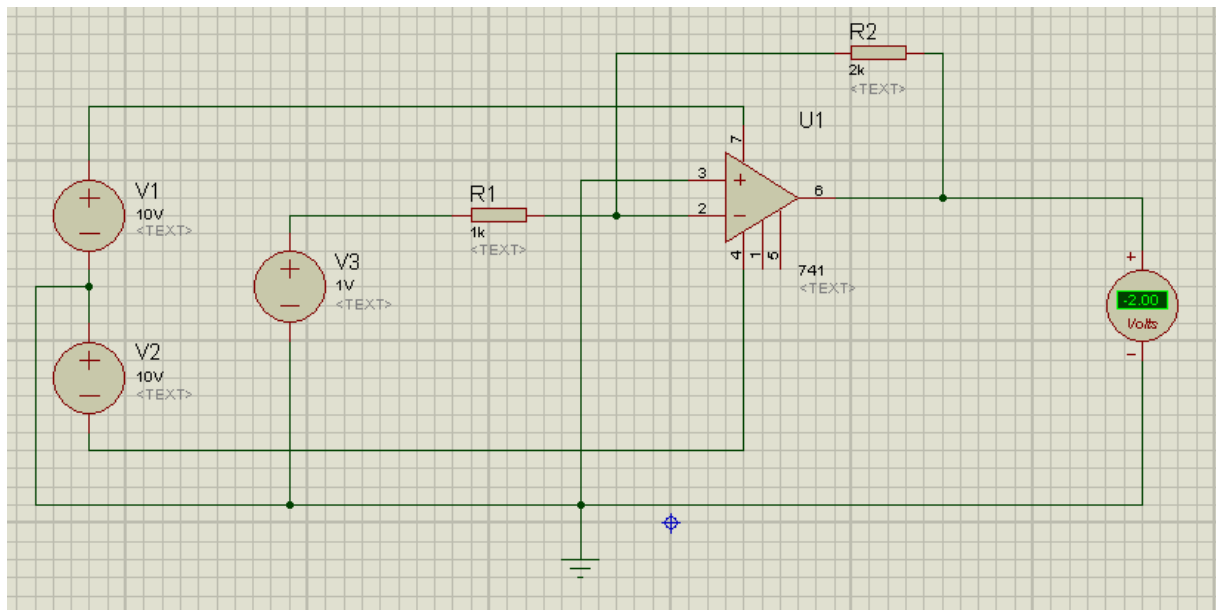


Figura 11 – Simulação do Ampop 741, Inversor com ganho -2

$$G = -20$$

$$R2 = 22k \text{ e } R1 = 1K$$

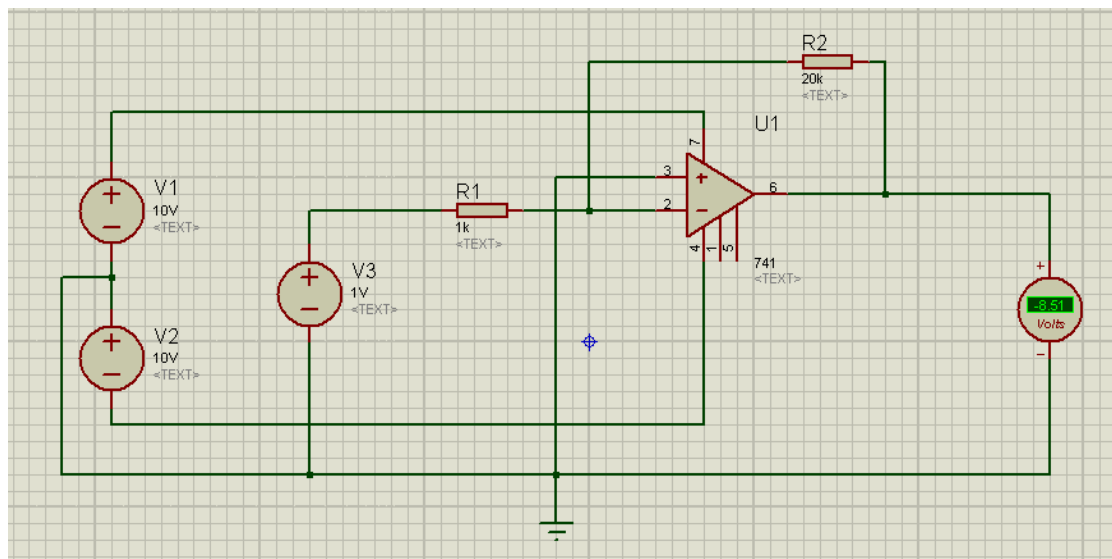


Figura 12 – Simulação do Ampop 741, Inversor com ganho -20

b. Inversor

Vent = 1 Vpp (Tensão alternada senoidal)

$$G = -2$$

$$R2 = 2k2 \text{ e } R1 = 1K$$

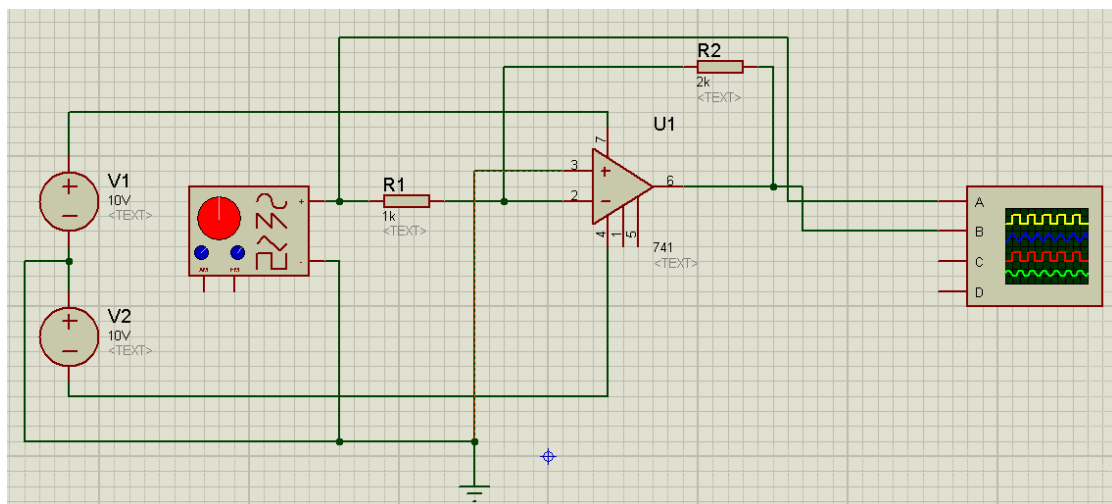


Figura 13 – Simulação do Ampop 741, Inversor com ganho -2, com entrada senoidal

Entrada do sinal senoidal ($V_p=1V$), em amarelo

Saida do sinal amplificado, em azul

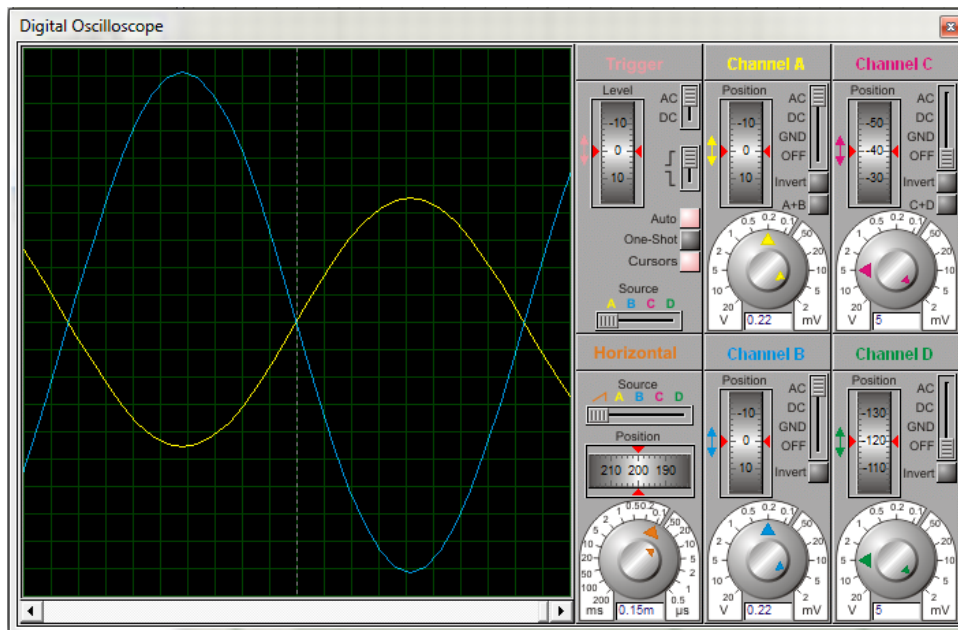


Figura 14 – Comparação do sinal de entrada e de saída no Ampop 741, Inversor com ganho -2

$$G = -20$$

$$R_2 = 22k \text{ e } R_1 = 1K$$

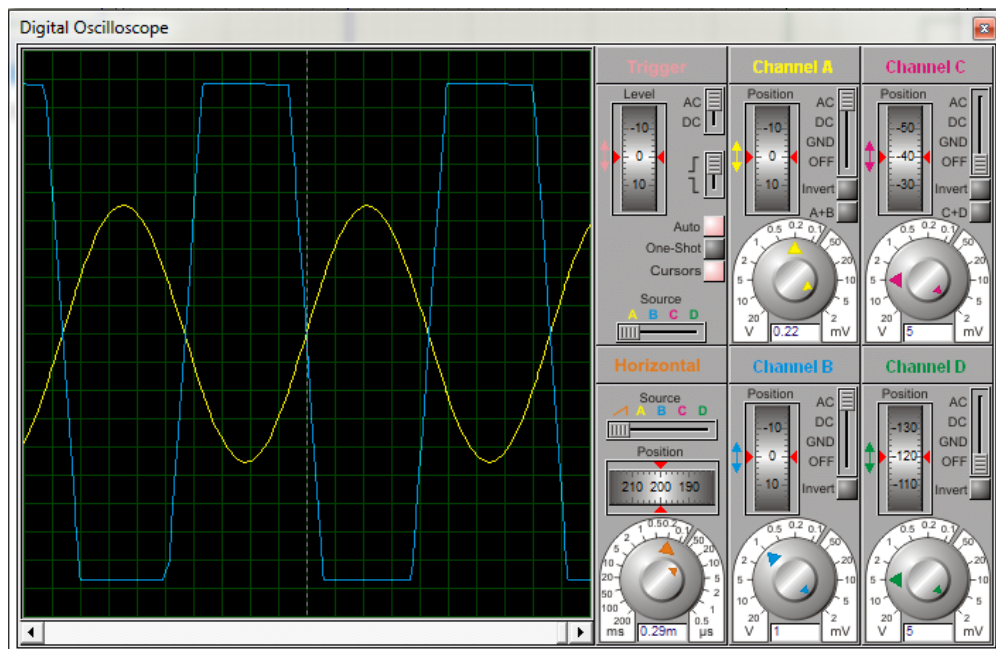


Figura 15 – Comparação do sinal de entrada e de saída no Ampop 741, Inversor com ganho -20

Observa que o Ampop 741 satura em 8,8V e em -8,6V no simulador PROTEUS 7.0.

c. Não Inversor

$V_{ent} = 1\text{ Vcc}$

$G = 2$

$R_2 = 10\text{ k}$ e $R_1 = 10\text{ K}$

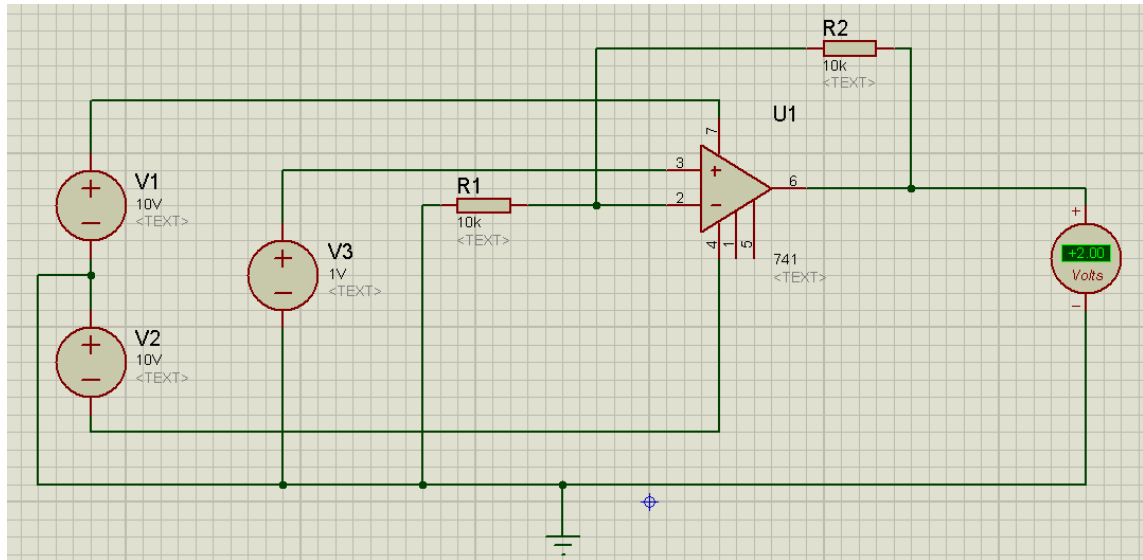


Figura 16 – Simulação do Ampop 741, Não inversor com ganho 2

$G = 20$

$R_2 = 40\text{ k}$ e $R_1 = 2\text{ K}$

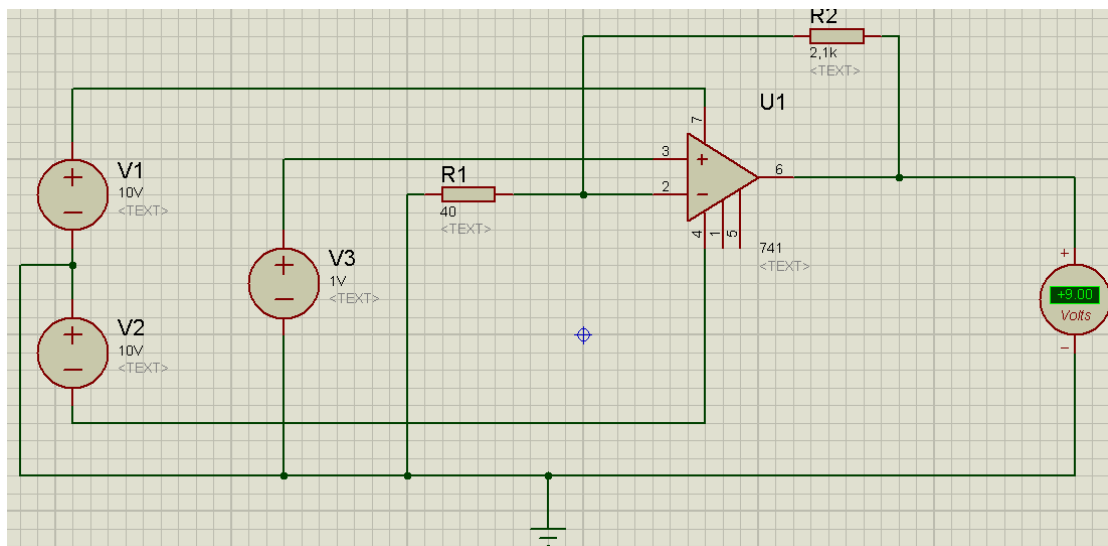


Figura 16 – Simulação do Ampop 741, Não inversor com ganho 20

Observa que em corrente contínua o Ampop 741 satura em 9Vcc.

d. Não Inversor

$V_{ent} = 1 \text{ Vpp}$ (Tensão alternada triangular)

$G = 2$

$R_2 = 10k$ e $R_1 = 10K$

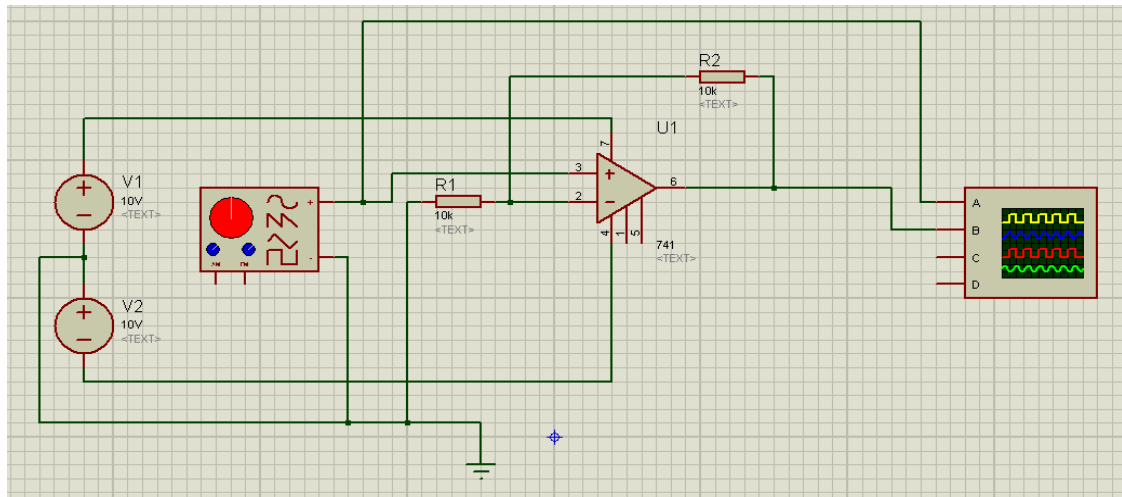


Figura 17 – Simulação do Ampop 741, Não inversor com ganho 2, com tensão alternada triangular

Entrada do sinal alternado triangular ($V_p=1V$), em amarelo



Saída do sinal amplificado, em azul

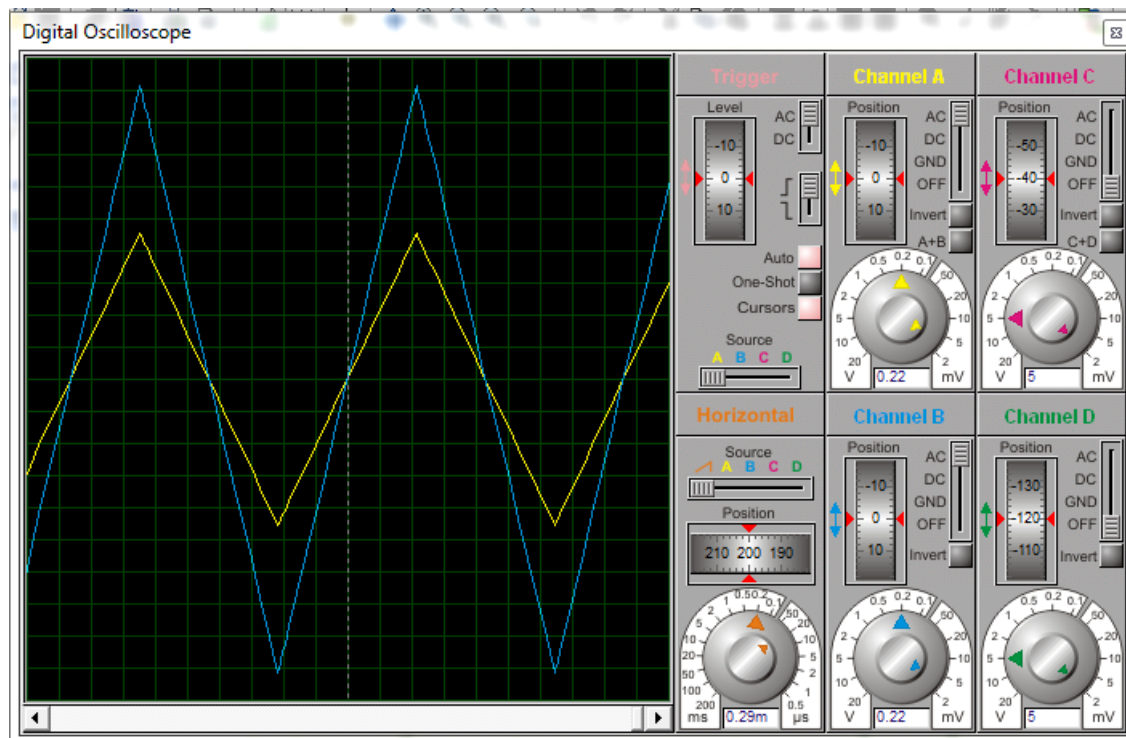


Figura 16 – Comparação do sinal de entrada e de saída no Ampop 741, não inversor com ganho 2

$$G = 20$$

$$R2 = 40k \text{ e } R1 = 2K2$$

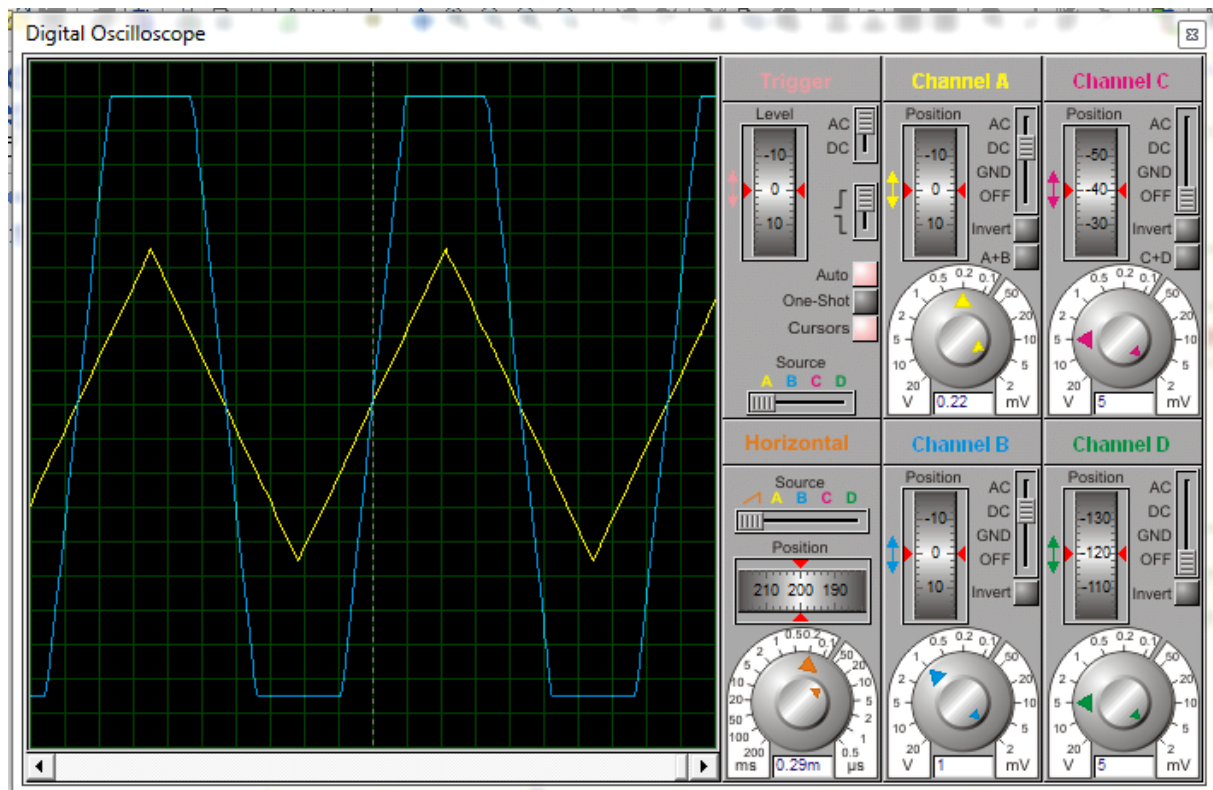


Figura 17 – Comparação do sinal de entrada e de saída no Ampop 741, não inversor com ganho 20

Observa que o Ampop 741 satura em 9V e em -8,5V no simulador PROTEUS 7.0.

VII – MONTAGENS E RESULTADOS

1. Ampop LM741. Com alimentação de $V_{cc} = 10 \text{ V}$ e $V_{ee} = -10 \text{ V}$;

a. Inversor

$$V_{ent} = 1 \text{ V}_{cc}$$

$$G = -2$$

$$R2 = 2k2 \text{ e } R1 = 1K$$

Entrada do sinal DC, em amarelo

Saída do sinal amplificado, em azul

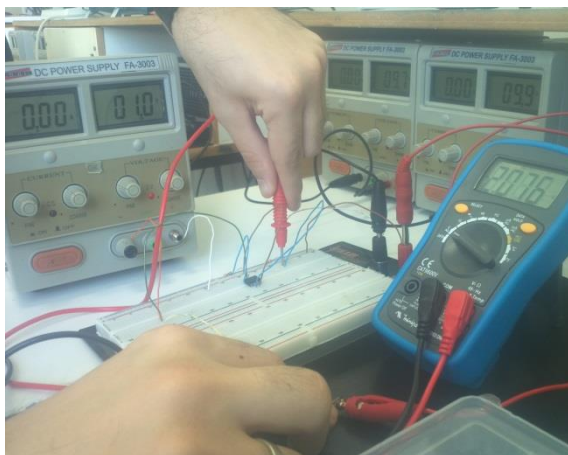


Figura 18 – Montagem do Ampop 741, com ganho -2

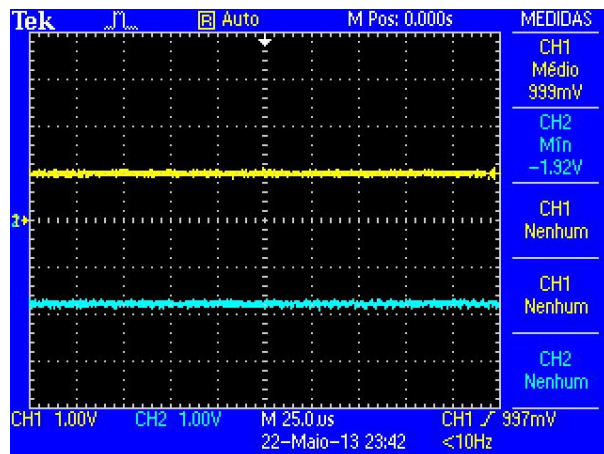


Figura 19 – Sinais de entrada e saída medidos no 741, com ganho -2

Para $G = -20$

$R2 = 22k$ e $R1 = 1K$

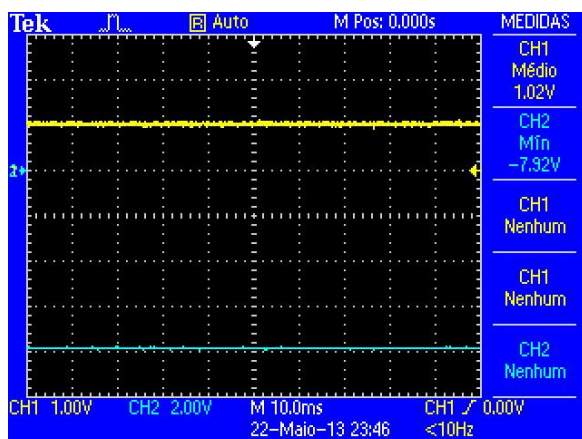


Figura 20 – Sinais medidos no 741, com ganho -20

Obtivemos um valor de V_s de -7,9 Vcc, o que mostra que na prática temos um valor de saturação inferior ao que realmente simulamos no PROTEUS, e que o componente satura em valores não ideais como teóricamente imaginamos.

b. Inversor

$V_{ent} = 1 V_{pp}$ (Tensão alternada senoidal)

$G = -2$

$R2 = 2k2$ e $R1 = 1K$



Figura 21 – Montagem do Ampop 741, com ganho -2 e entrada senoidal

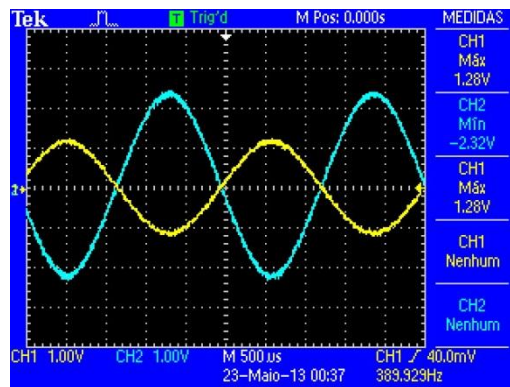


Figura 22 – Sinais de entrada e saída medidos no 741, com ganho -2 e entrada senoidal

$$G = -20$$

$$R2 = 22k \text{ e } R1 = 1K$$

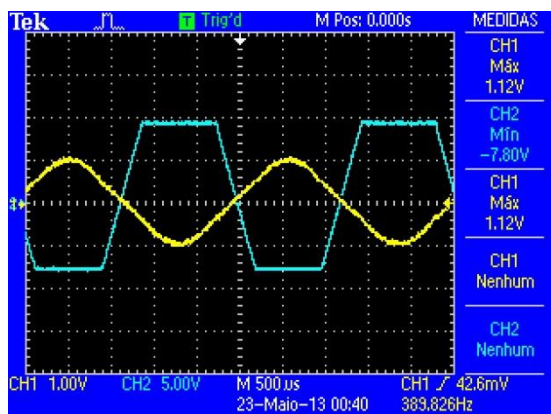


Figura 23 – Sinais de entrada e saída medidos no 741, com ganho -20 e entrada senoidal

Observa-se a Saturação em 9V e -7,80Vca do AMPOP LM741.

c. Não Inversor

$$V_{ent} = 1 V_{cc}$$

$$G = 2$$

$$R2 = 10k \text{ e } R1 = 10K$$

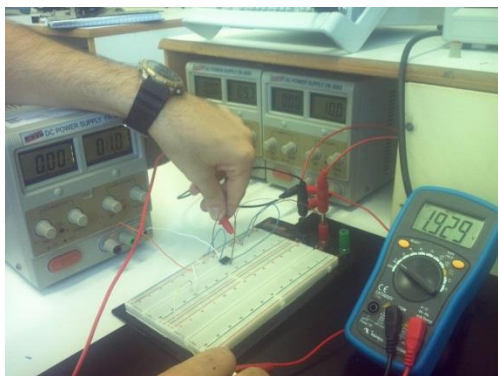


Figura 24 – Montagem do Ampop 741, com ganho 2

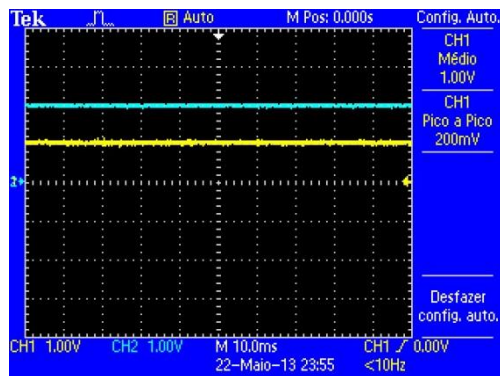


Figura 25 – Sinais medidos no 741, com ganho 2

$$G = 20$$

$$R2 = 40k \text{ e } R1 = 2K2$$

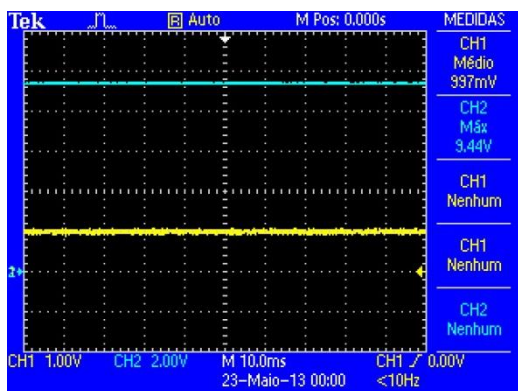


Figura 26 – Sinais medidos no 741, com ganho 20

Observa-se a saturação em 9,44Vcc.

d. Não Inversor

Vent = 1 Vpp (Tensão alternada triangular)

$$G = 2$$

$$R2 = 10k \text{ e } R1 = 10K$$

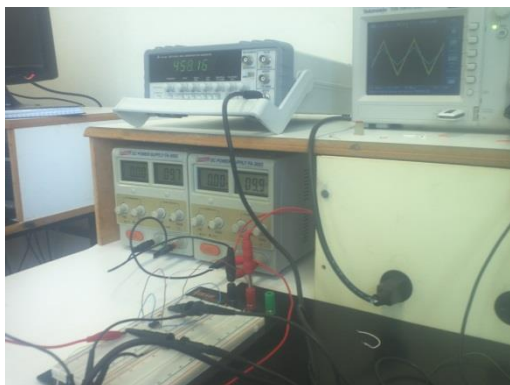


Figura 27 – Montagem do Ampop 741, com ganho 2

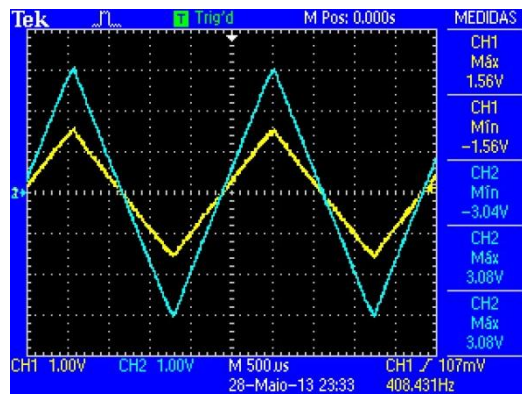


Figura 28 – Sinais de entrada e saída medidos no 741, com ganho 2 e entrada alternada triangular

$G = 20$

$R_2 = 40k$ e $R_1 = 2K2$

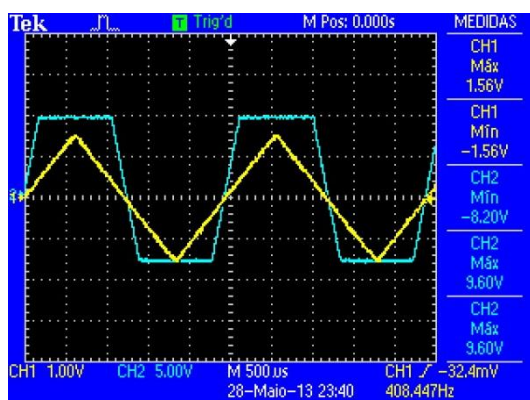


Figura 29 – Sinais de entrada e saída medidos no 741, com ganho 20 e entrada alternada triangular

Observa-se saturação em 9,60V e -8,20V, lembrando que a tensão é alternada triangular.

COMPARANDO RESULTADOS

Observou durante o experimento a diferença que há entre os valores obtidos teoricamente, na simulação e na prática. Na teoria o Ampop tem uma resistência de entrada infinita, uma resistência de saída nula e ganho infinito. Na prática percebemos

que a entrada possui uma resistência muito alta, mas não infinita, uma resistência baixa de saída, mas não nula e um alto ganho, mas não infinito.

O simulador Proteus aproxima do que esperamos encontrar na prática, mas também pode-se perceber diferenças, uma delas é a saturação.

Em teoria os Ampops deveriam saturar na tensão de alimentação. Observamos que nem na simulação e nem na prática isso aconteceu, devido às perdas do circuito.

De acordo com as simulações e práticas demonstradas aqui nesse relatório, pudemos fazer uma tabela comparativa de valores teóricos (calculados), simulados e práticos (medidos).

Ampop 741			Ampop 741		
Ganho em -2 e Corrente Continua			Ganho em -20 e Corrente Continua		
Teoria	Simulação	Prática	Teoria	Simulação	Prática
-2V	-2V	-1,92V	-20V	-8,51V	-7,92V

Ampop 741			Ampop 741		
Ganho em -2 e Corrente Alternada			Ganho em -20 e Corrente Alternada		
Teoria	Simulação	Prática	Teoria	Simulação	Prática
-2V	-2V	-1,92V	-20V	-8,51V	-7,92V

Ampop 741			Ampop 741		
Ganho em 2 e Corrente Continua			Ganho em 20 e Corrente Continua		
Teoria	Simulação	Prática	Teoria	Simulação	Prática
2V	2V	-1,92V	20V	9V	9,44V

Ampop 741			Ampop 741		
Ganho em 2 e Corrente Alternada Triangular			Ganho em 20 e Corrente Alternada Triangular		
Teoria	Simulação	Prática	Teoria	Simulação	Prática
2V	2V	3,08V	20V	9V	9,6V

VIII – CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os objetivo traçados no início do experimento, pudemos nos organizar de modo a relatar da melhor maneira toda a prática. Assim o entendimento se tornou mais fácil uma vez que passamos por etapas: 1º análise teorica, 2º simulações e por fim a própria montagem física e validação dos resultados obtidos.

Essas etapas nos mostrou que os Ampop são circuitos que se aproximam muito do que teoricamente simulamos e calculamos, porém algumas imperfeições são encontradas, tais como impedância de entrada e saída, o que justifica o componente não ser “ideal”.

Cabe ressaltar, que os amplificadores operacionais tericamente apresentam resistência de entrada infinita, resistência de saída nula e ganho de tensão infinito, porém na prática, a resistência de entrada é grande, entre $10M\Omega$, a resistência de saída é aproximadamente 75Ω , o ganho de tensão não é infinito.

IX – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anotações em sala de aula do Professor Luiz Carlos Martinhago Schlichiting

Relatório seguido como exemplo da aluna Jéssika Melo de Andrade

UNICAMP. Introdução ao AmpOp. Disponível em:

http://www.ifi.unicamp.br/~kleinke/f540/e_amp1.htm Acesso em 28 de junho de 2013

INSTITUTO SUPERIOR DE CIÊNCIAS DO TRABALHO E DA EMPRESA. Apontameto sobre Circuitos com Amplificadores Operacionais. Disponível em:

<http://cadeiras.iscte.pt/cse//Folhas/AMPOPs/AMPOPs.htm> Acesso em 28 de junho de 2013