

CAPÍTULO 7 Circuitos com Amplificadores Operacionais - Parte II

André Prado Procópio - 2022055556

Lucas Ribeiro da Silva - 2022055564

Mariana Pinho Barroso Sousa - 2022055793

7.1 Introdução

Os amplificadores operacionais possuem este nome porque podem ser usados como operadores matemáticos entre duas ou mais entradas. Para isso, o AmpOP deve estar trabalhando na região linear. Entre os tipos básicos de circuitos que podem ser construídos, incluem-se: o amplificador inversor, o somador, o amplificador não-inversor, o seguidor de tensão, o amplificador diferencial, o integrador, o diferenciador, dentre outros. Nesta prática, serão estudados os circuitos inversor e somador inversor.

Na Figura 7.1, apresenta-se o circuito amplificador inversor. A tensão de saída é dada pela equação

$$V_{out} = - \frac{R_f}{R_1} V_{in} \quad (7.1)$$

onde a razão entre o resistor de realimentação e o resistor de entrada é o fator de multiplicação, ou ganho, do amplificador.

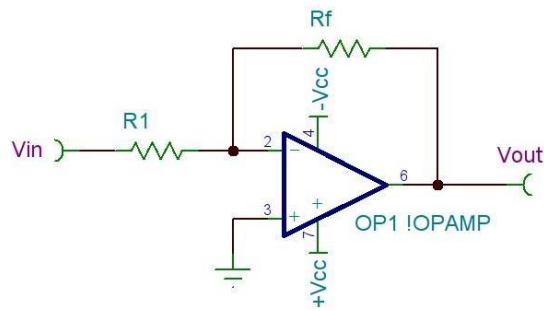


Figura 7.1: Amplificador inversor.

Na Figura 7.2 apresenta-se um circuito amplificador somador inversor. A tensão de saída é dada pela seguinte equação:

$$V_{out} = - \left(\frac{R_f}{R_1} V_1 + \frac{R_f}{R_2} V_2 + \frac{R_f}{R_3} V_3 \right), \quad (7.2)$$

onde o ganho de cada entrada é dado pela razão entre os resistores de realimentação e de entrada.

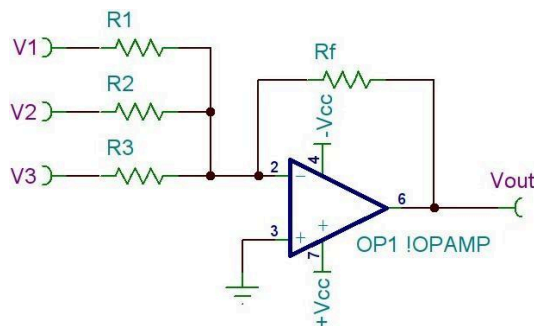


Figura 7.2: Amplificador somador inversor.

Um maior detalhamento sobre o assunto pode ser visto no Capítulo 5 do livro texto, seções 3 e 4.

Pré-relatório: Elabore uma introdução teórica sobre o amplificador operacional (AmpOp) com realimentação.

O AmpOp é um componente eletrônico com alta impedância de entrada, baixa impedância de saída e ganho muito elevado. Embora tenha ganho teórico quase infinito em malha aberta (10^5 - 10^6), raramente é usado assim.

A realimentação negativa é o conceito-chave que transforma o AmpOp em um dispositivo controlável, permitindo:

- Estabilizar o circuito
- Reduzir distorções

- *Aumentar largura de banda*
- *Definir o ganho precisamente através de componentes externos*

Dois princípios fundamentais para análise:

1. *Em operação linear com realimentação negativa, as tensões nos terminais de entrada se igualam (terra virtual)*
2. *Praticamente não há corrente nos terminais de entrada devido à alta impedância*

Com diferentes circuitos de realimentação, o AmpOp pode realizar diversas funções como amplificação, filtragem, integração e comparação. A maior vantagem é que o comportamento do circuito passa a depender principalmente dos componentes externos e não das características internas do AmpOp.

Objetivos

1. Utilização do amplificador operacional, na sua região de funcionamento linear, em algumas configurações básicas.

7.2 Materiais e Métodos

7.2.1 Pré-relatório: Memória de Cálculo e Simulação

Parte A - Amplificador inversor

1. Construa no LTspice o circuito do amplificador inversor mostrado na Figura 7.1 com ganho $A = 10$. Use $R_f = 1,2k\Omega$ e calcule o valor de R_i . Não se esqueça de inserir as fontes de sinal, de alimentação e o aterramento.
2. Faça uma simulação de transferência DC (“DC sweep”), variando a tensão de entrada de -2V a +2V com intervalos de 0,01V. Identifique as regiões de saturação e linear, comparando esta curva com a obtida na prática anterior. (Apresente o gráfico discuta o resultado obtido na seção de “Resultados e Discussão”).
3. Aplique uma onda senoidal de 1kHz na entrada, com amplitudes de 0,5V_p, 1V_p e 2V_p. Faça simulações de transitório (“Transient”) durante 10ms. (Apresente os gráficos e discuta-os na seção de “Resultados e Discussão”).

OBS: 1V de pico ($1V_P$) é o mesmo que 2V pico a pico ($2V_{PP}$), ou seja, correspondem a uma onda que vai de -1V até +1V.

Parte B - Somador inversor

1. Construa no LTspice o circuito somador inversor mostrado na Figura 7.2, utilizando os seguintes parâmetros:

- Ganhos $A_1 = 10$, $A_2 = 2$ e $A_3 = 1$. Utilize $R_f = 1,2k\Omega$ e calcule os valores de R_1 , R_2 e R_3 .
- Entrada V_1 : senoide de $0,5V_P$ e frequência de 1kHz.
Entrada V_2 : onda quadrada com $0,5V_P$, frequência de 1kHz e *Duty Cycle* de 50%.
- Entrada V_3 : tensão contínua de $-2V$.

2. Faça uma simulação de transitório (“Transient”) durante 10ms. (Apresente o gráfico e discuta o resultado obtido na seção de “Resultados e Discussão”).

3. Eleve o valor do ganho A_3 para 5, recalculando o valor de R_3 . Refaça a simulação. (Apresente o gráfico e discuta o resultado obtido na seção de “Resultados e Discussão”).

7.2.2 Parte prática

Material necessário: Circuito integrado LM741 ou TL071, gerador de sinais, osciloscópio, multímetro, resistores, capacitor e potenciômetro.

Parte A - Amplificador Inversor

1. Monte um amplificador inversor (Figura 7.3) com ganho $A = 10$. Use $R_f = 1,2k\Omega$ e calcule R_1 .

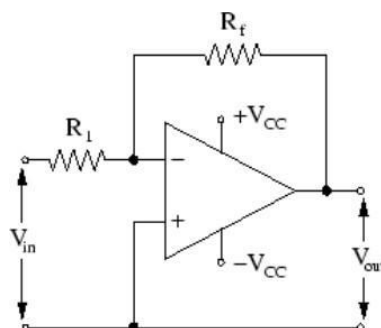


Figura 7.3: Amplificador Inversor

- (a) Levante a função de transferência $V_{out} \times V_{in}$ deste circuito, usando o mesmo procedimento da prática anterior (ver Figura 6.5).
- (b) Aplique uma onda senoidal de 1kHz na entrada V_{in} . Meça as formas de onda V_{in} e V_{out} com o osciloscópio para $V_{in}=0,5V_p$, $1V_p$ e $2V_p$. (Apresente os gráficos e discuta-os na seção de “Resultados e Discussão”).
- (c) Com $V_{in} = 1V_p$, aumente a frequência da onda para 5kHz, 10kHz e 100kHz, registrando as formas de ondas de V_{in} e V_{out} . (Apresente os gráficos e discuta-os na seção de “Resultados e Discussão”).

Parte B - Amplificador Somador

1. Monte um amplificador inversor operando como somador, como mostrado na Figura 7.4. Projete o ganho $A_1 = 10$, para a entrada V_1 , e $A_2 = 1$, para a entrada V_2 .

- (a) Aplique uma senóide com $1V_{pp}$ e frequência de 1kHz na entrada V_1 , e ajuste o potenciômetro até obter um valor de $V_2 = 0V$. Meça as formas de onda de entrada. (Apresente os gráficos e discuta-os na seção de “Resultados e Discussão”).

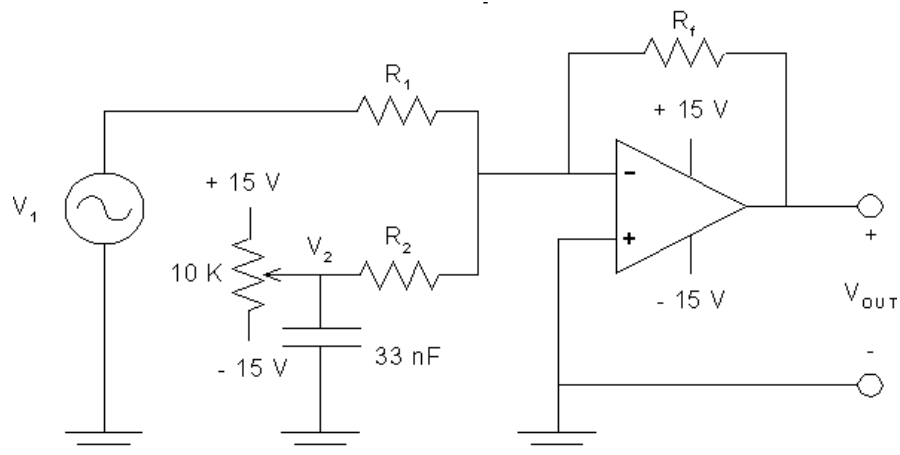


Figura 7.4: Amplificador Somador Inversor

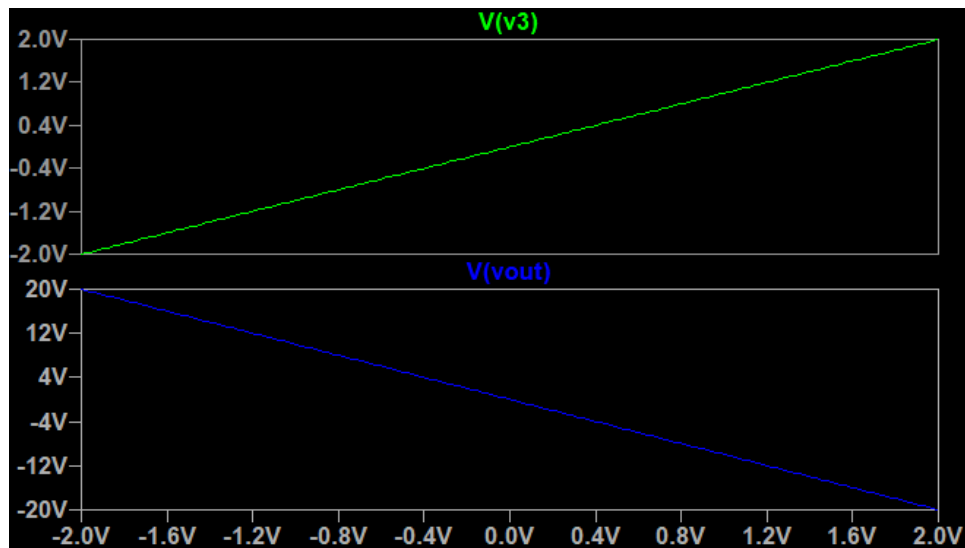
- (b) Ajuste o potenciômetro até o limite da não saturação de V_{out} , para valores de V_2 positivo e negativo. Quais são os valores correspondentes de V_2 ? (Registre os valores de V_2 , apresente os gráficos das formas de onda de V_{in} e V_{out} e discuta-os na seção de “Resultados e Discussão”).
- (c) Ajuste o potenciômetro de modo a obter V_2 máximo (15V) e mínimo (-15V) e meça as formas de onda de entrada e saída resultantes. (Apresente os gráficos das formas de onda de V_{in} e V_{out} e discuta-os na seção de “Resultados e Discussão”).

7.3 Resultados e Discussão

7.3.1 Simulação

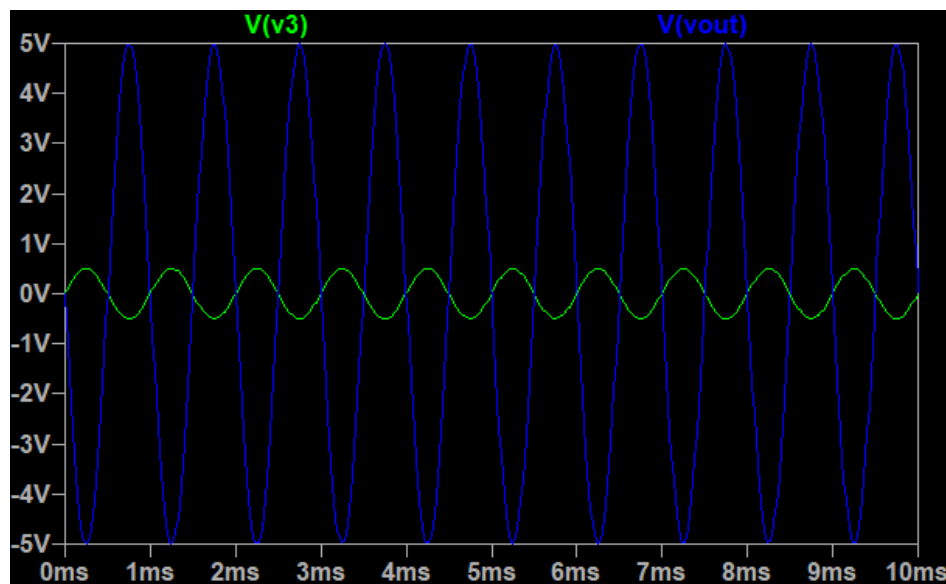
Parte A - Amplificador inversor

Gráfico da Função de Transferência do AmpOP obtida por simulação.



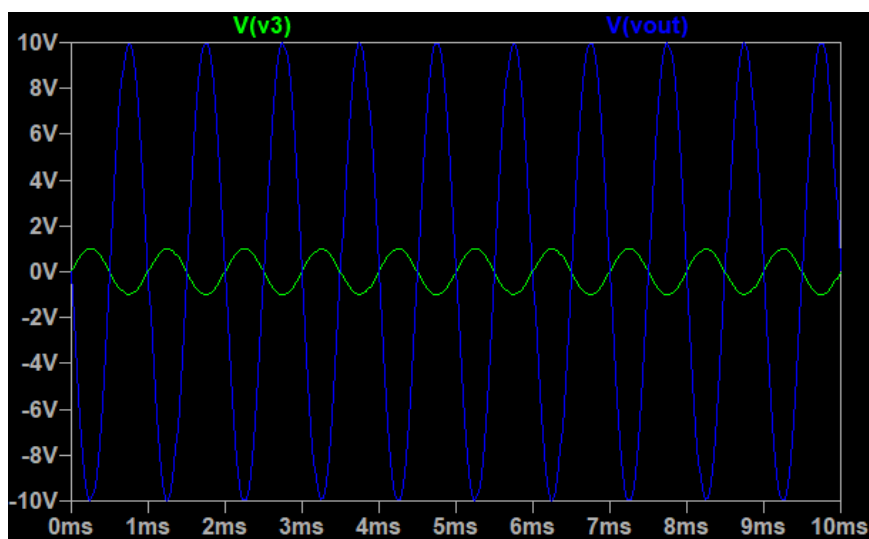
O amplificador inverteu a tensão de entrada com o ganho $A=-10$, o que era esperado da simulação.

Gráfico de V_{in} e V_{out} para senoide de 1kHz e $V_{in} = 0,5V_p$ obtido por simulação.



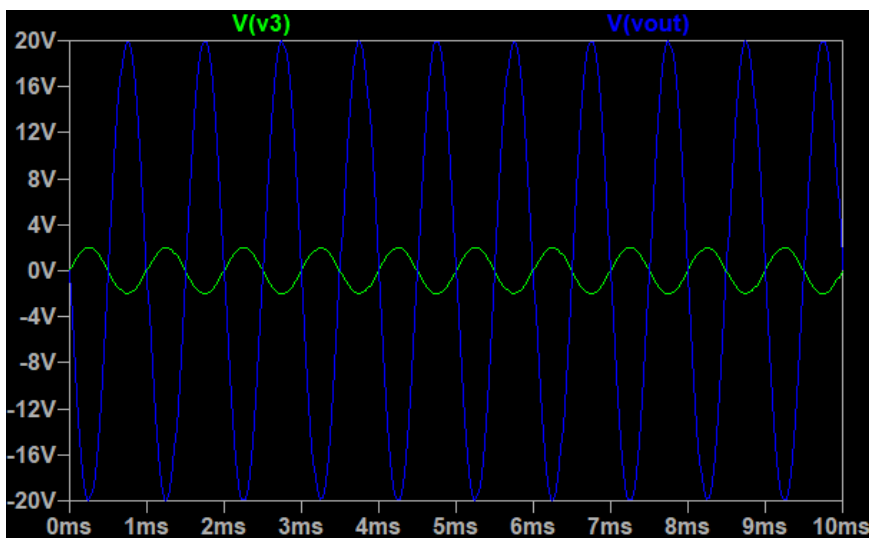
O amplificador inverteu a tensão de entrada senoidal com o ganho $A=-10$, o que era esperado da simulação com V_{out} variando de -5V a 5V a partir de V_{in} com -0,5V e 0,5V.

Gráfico de V_{in} e V_{out} para senoide de 1kHz e $V_{in} = 1V_p$ obtido por simulação.



O amplificador inverteu a tensão de entrada senoidal com o ganho $A=-10$, o que era esperado da simulação com V_{out} variando de $-10V$ a $10V$ a partir de V_{in} com $-1V$ e $1V$.

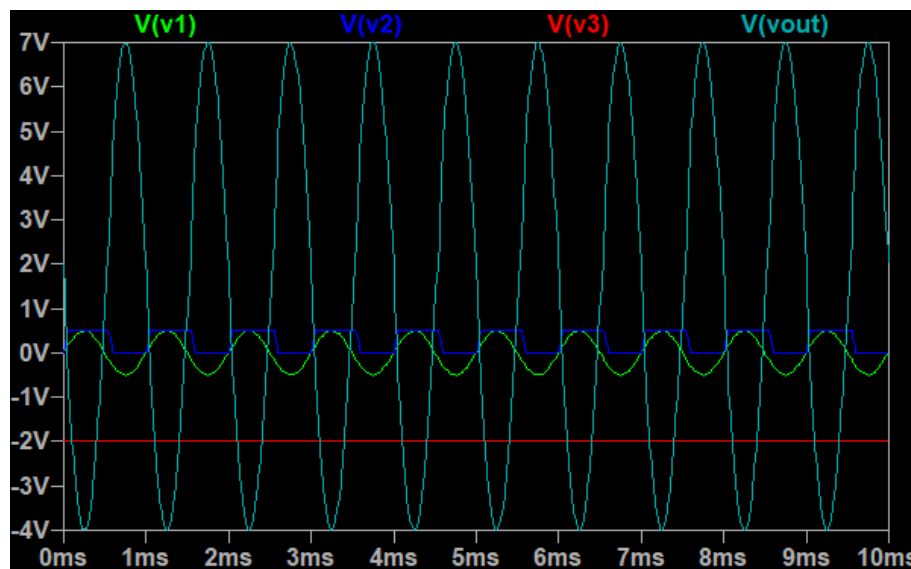
Gráfico de V_{in} e V_{out} para senoide de 1kHz e $V_{in} = 2V_p$ obtido por simulação.



O amplificador inverteu a tensão de entrada senoidal com o ganho $A=-10$, o que era esperado da simulação com V_{out} variando de $-20V$ a $20V$ a partir de V_{in} com $-2V$ e $2V$.

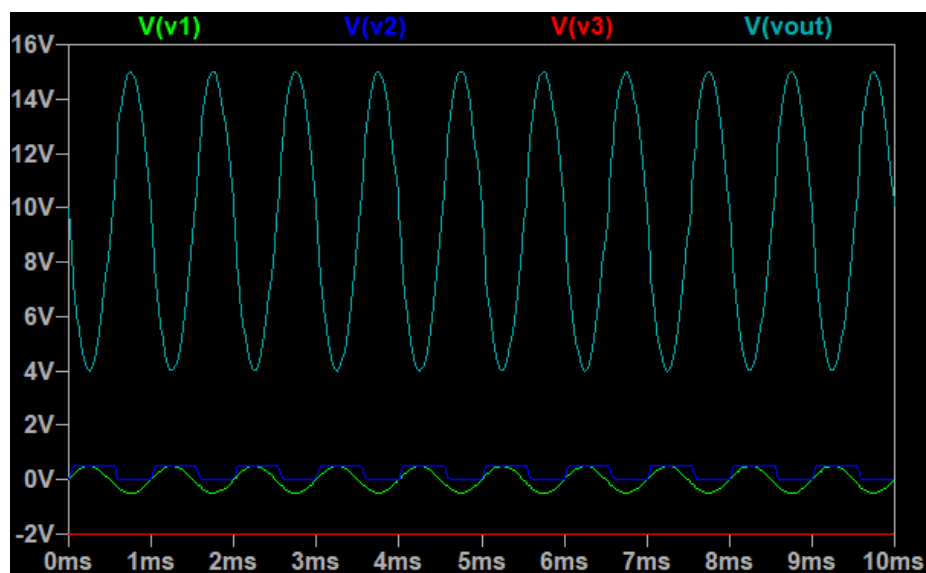
Parte B - Somador inversor

Gráfico da simulação 1 do amplificador inversor.



O amplificador inverteu cada tensão de entrada com seu respectivo ganho e formato de onda e fez a posterior soma dos valores calculados para cada onda e seu formato, o que era esperado.

Gráfico da simulação 2 do amplificador inversor.



Com o ganho reorganizado para $A_3 = 5$, observa-se um deslocamento da função V_{out} no eixo horizontal, com a tensão V_3 deslocando em 8V positivos a função V_{out} calculada no item anterior.

7.3.2 Parte prática

Parte A - Amplificador inversor

Gráfico de V_{in} e V_{out} para senoide de 1kHz e $V_{in} = 0,5V_P$ obtido por medição.

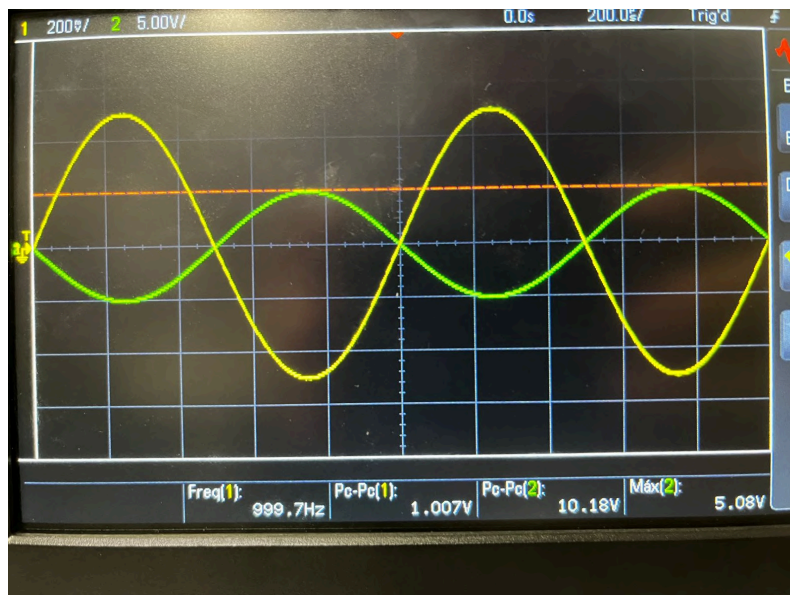


Gráfico da função obtida em sala de aula para $1V_{pp}$, consistente com a simulação e com o esperado.

Gráfico de V_{in} e V_{out} para senoide de 1kHz e $V_{in} = 1V_P$ obtido por medição.

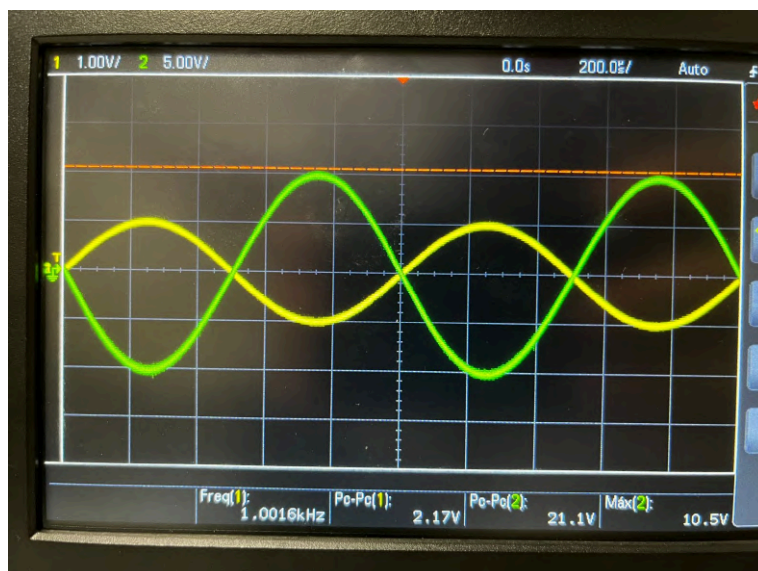


Gráfico da função obtida em sala de aula para $2V_{pp}$, consistente com a simulação e com o esperado.

Gráfico de V_{in} e V_{out} para senoide de 1kHz e $V_{in} = 2V_P$ obtido por medição.

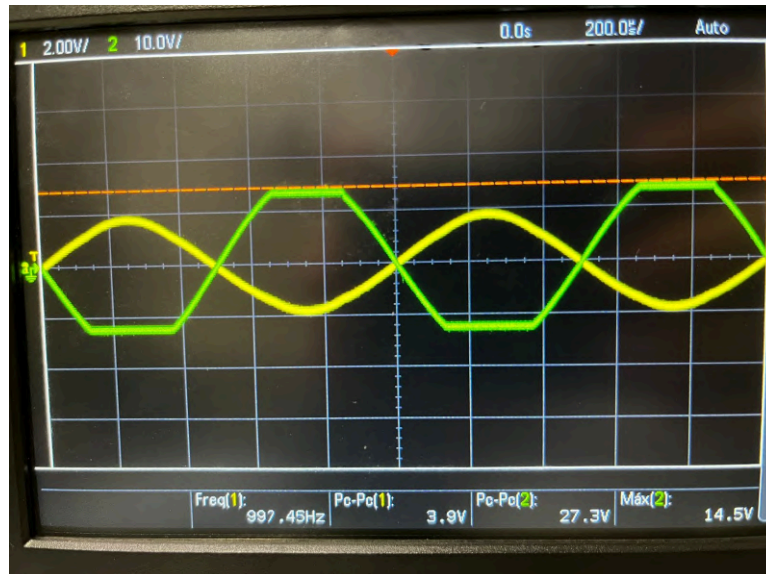


Gráfico da função obtida em sala de aula para $4V_{pp}$, de certa forma consistente com a simulação e com o esperado, nesse caso, observa-se os limites de saturação de $-15V$ e $+15V$ para os valores da onda V_{out} . Isso acontece porque quando a amplitude de V_{in} aumenta, a tensão de saída V_{out} , resultado da multiplicação de V_{in} pelo ganho $A=10$ ultrapassa os limites de operação do amplificador operacional na sua região linear. Como o ganho inversor foi calculado para ser igual a 10 a saída ultrapassa o limite da saturação de $15V$ para valores de $1,5V_{in}$.

Gráfico de V_{in} e V_{out} para 5kHz e $V_{in} = 1$

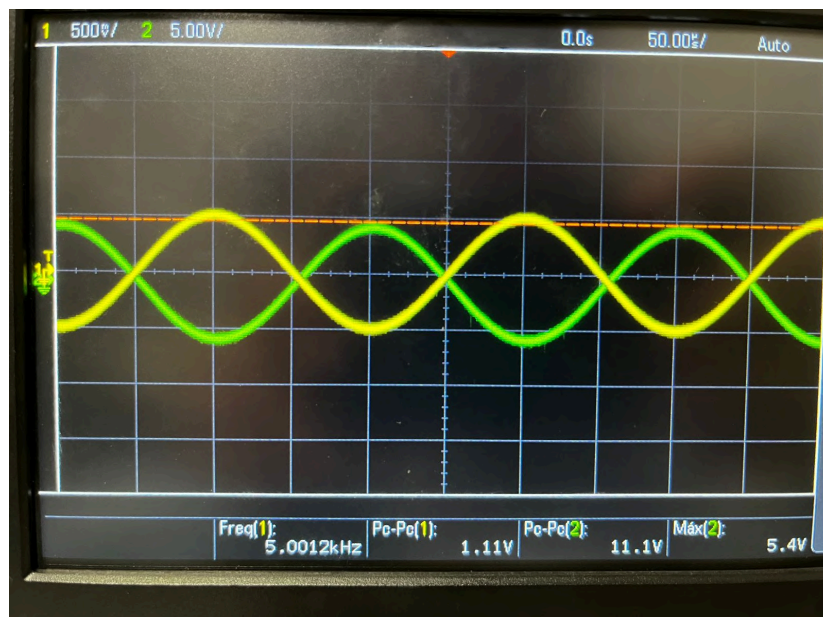


Gráfico da função obtida para 5kHz, consistente com o esperado.

Gráfico de V_{in} e V_{out} para 10kHz.

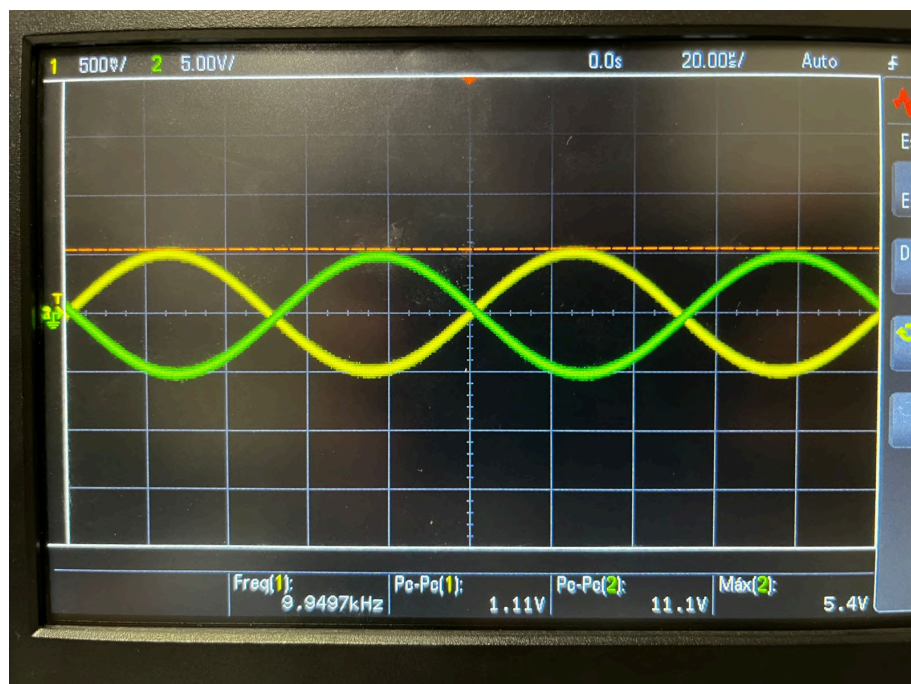
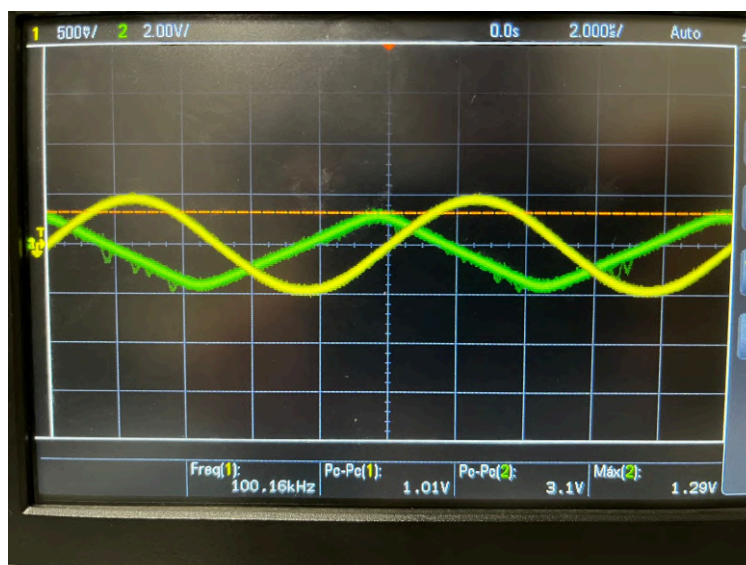


Gráfico da função obtida para 10kHz, consistente com o esperado.

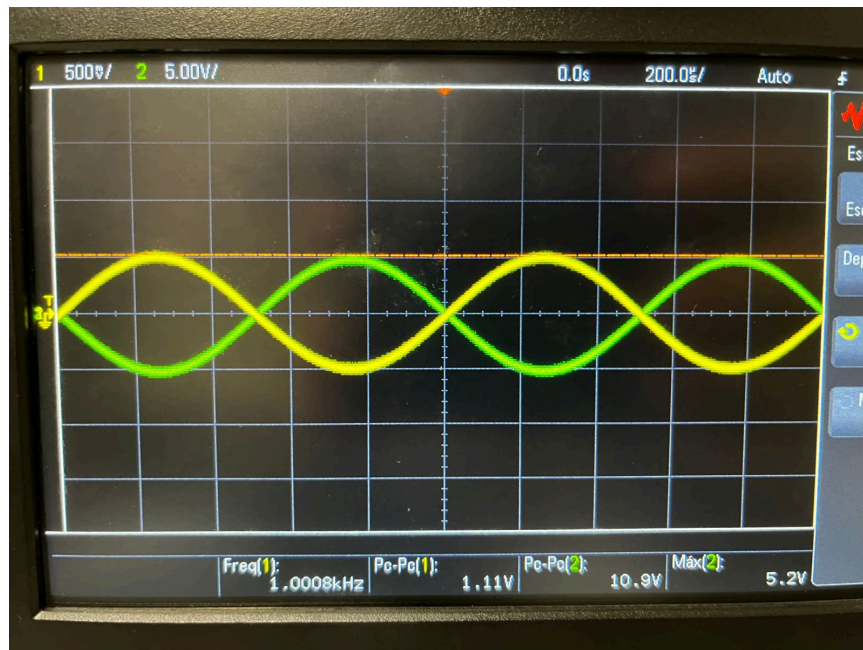
Gráfico de V_{in} e V_{out} para 100kHz.



Neste caso, foram observadas distorções significativas da onda para 100kHz, isto acontece porque o amplificador possui uma taxa de frequência limitada, o que torna seu funcionamento insatisfatório para valores de entrada de altas frequências e consequentemente as distorções visualizadas no formato da onda.

Parte B - Somador inversor

Gráfico de V_{in} e V_{out} para $V_2 = 0V$.



Como a função somada V_2 é nula, seu impacto na saída final V_{out} é o resultado da multiplicação $V_2 \cdot A = 0$, o resultado é, portanto, apenas a inversão com o ganho da função

$$V_{in}.$$

Gráfico de V_{in} e V_{out} para V_2 configurado para o limite da não-saturação positiva.

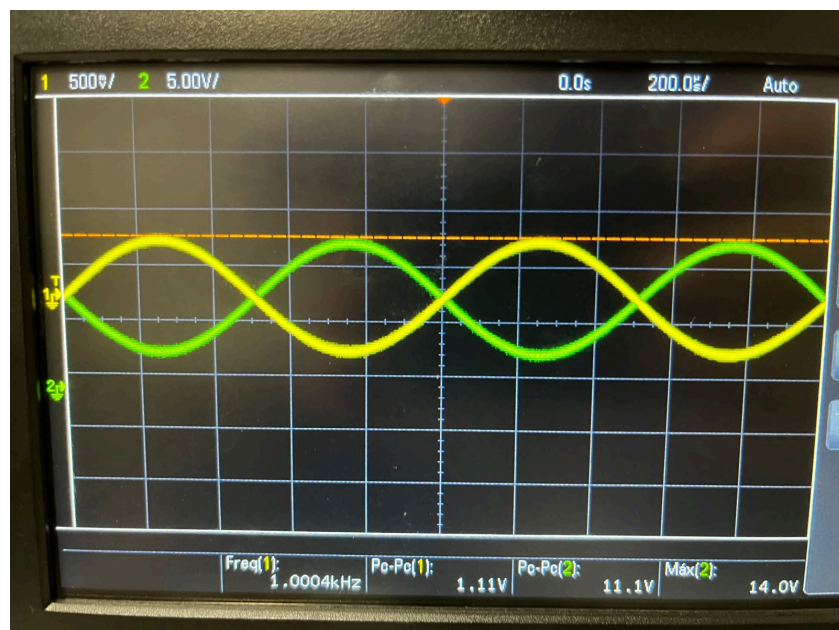


Gráfico configurado para o limitada não saturação positiva $V_2 = -3,5V$

Gráfico de V_{in} e V_{out} para $V_2 = -15V$.

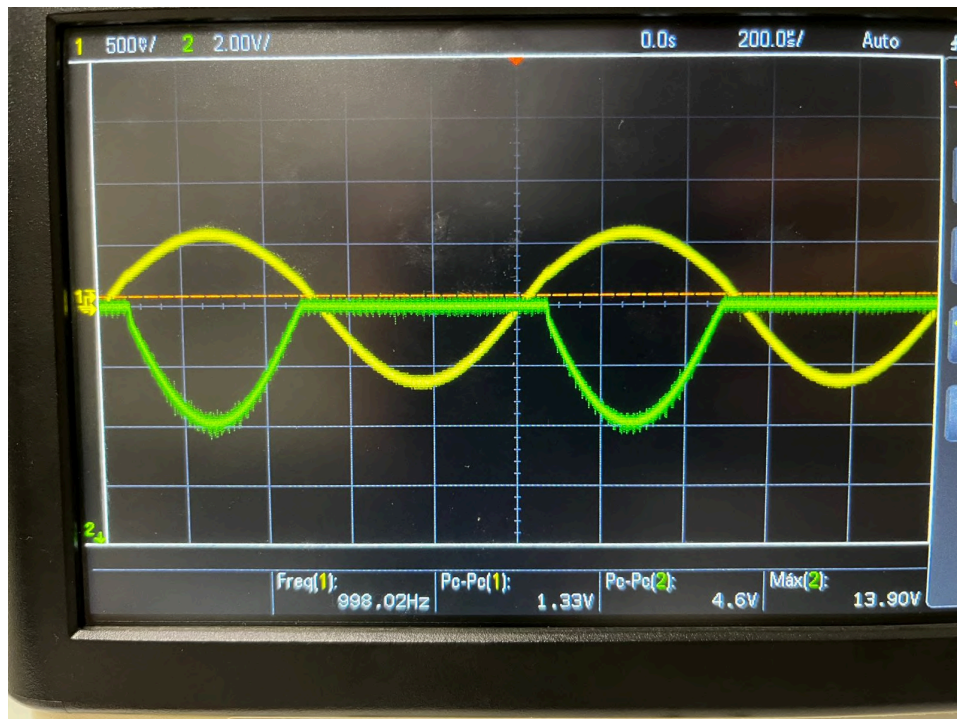


Gráfico configurado para $V_2 = -15V$, sendo observada a saturação negativa.

Gráfico de V_{in} e V_{out} para V_2 configurado para o limite da não-saturação negativa.

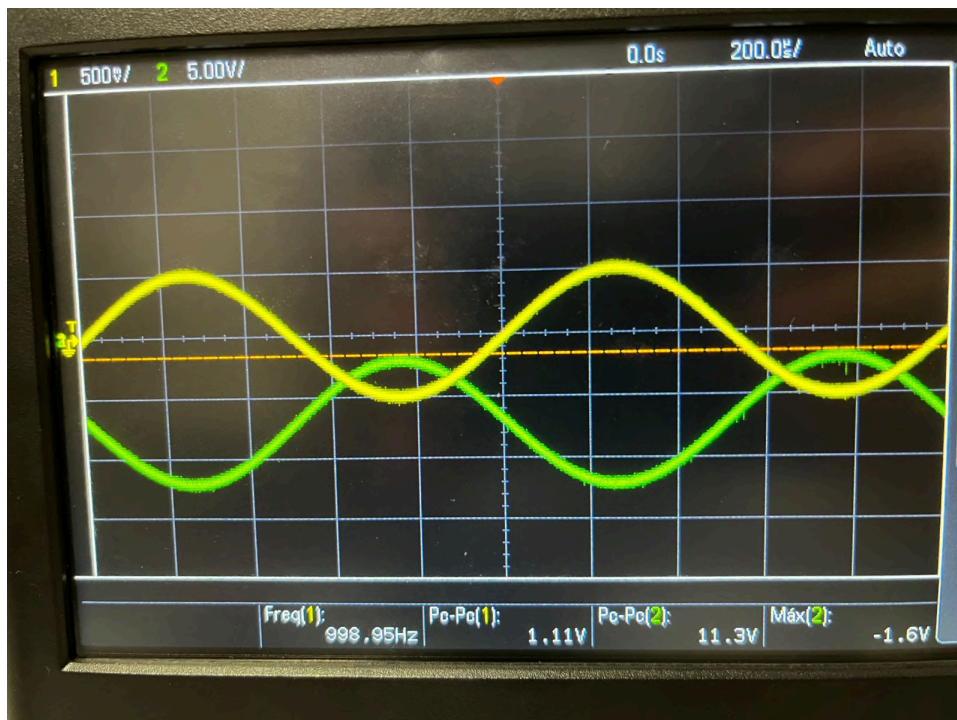


Gráfico configurado para o limitada não saturação positiva $V_2 = +6V$

Gráfico de V_{in} e V_{out} para $V_2=+15V$.

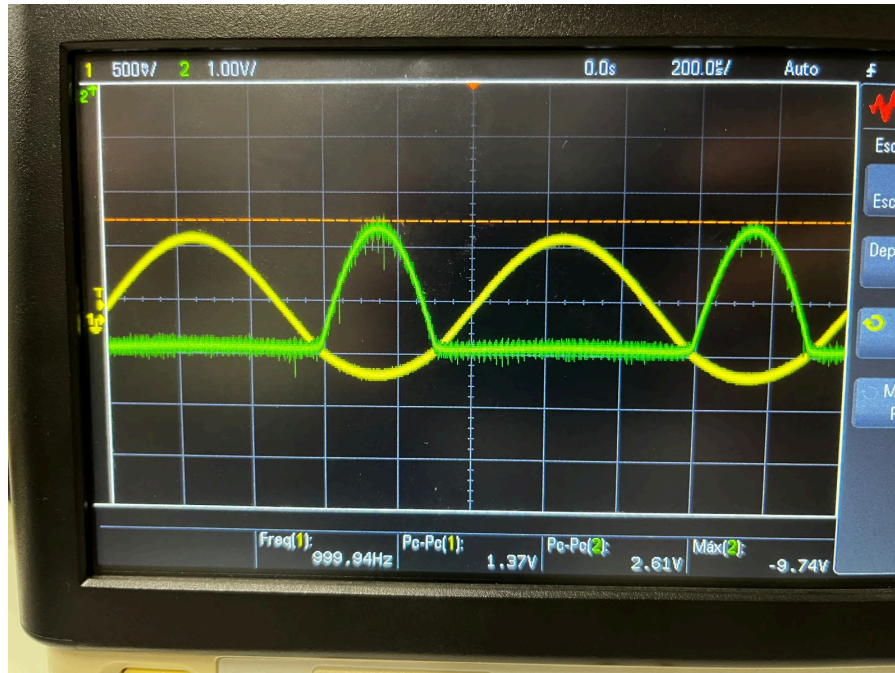


Gráfico configurado para $V_2 = +15V$, sendo observada a saturação negativa.

1. O que aconteceu quando foram aplicados valores elevados de V_{in} na Parte 1, letra B? Explique.

São observados os limites de saturação de $-15V$ e $+15V$ para os valores da onda V_{out} . Isso acontece porque quando a amplitude de V_{in} aumenta, a tensão de saída V_{out} , resultado da multiplicação de V_{in} pelo ganho $A=10$ ultrapassa os limites de operação do amplificador operacional na sua região linear. Como o ganho inversor foi calculado para ser igual a 10 a saída ultrapassa o limite da saturação de $15V$ para valores de $1,5V_{in}$.

2. Explique os resultados obtidos na Parte 1, letra C.

Foram observadas distorções significativas da onda para $100kHz$, isto acontece porque o amplificador possui uma taxa de frequência limitada, o que torna seu funcionamento insatisfatório para valores de entrada de altas frequências e consequentemente as distorções visualizadas no formato da onda.

3. Explique os resultados obtidos na Parte 2, letras B e C.

Como os limites de saturação operam em $+15V$ e $-15V$, quaisquer valores que ultrapassem esses valores serão saturados e aproximados por estes valores, isso pode ser observado pelos gráficos de $V_2 = 15V$ e $-15V$, onde os limites de saturação ficam bem aparentes ao serem adicionados a onda de amplitude $10V$ configurada por V_{in} e o seu ganho. Os valores de saturação de V_2 para que V_{out} foram medidos para os gráficos de limite de saturação e configuraram um limite entre $-3,5 < V_2 < 6$.

7.4 Pinagem dos Amplificadores Operacionais 741 e 071

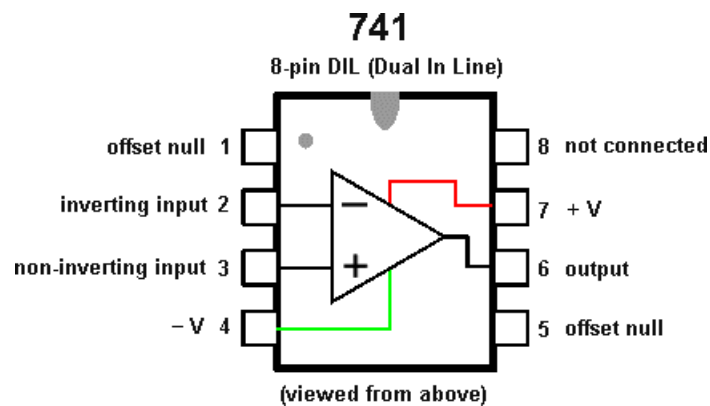


Figura 7.5: Pinagem dos Amplificadores Operacionais LM741 e TL071.