

## Experimento 2: Simulações com Amplificadores Operacionais

Yuri Shumyatsky

231012826@aluno.unb.br

231012826

Turma T02

### Objetivo

O experimento tem por objetivo difundir o entendimento sobre como funcionam os amplificadores operacionais e suas diversas configurações, como a não inversora, a inversora, buffer e diferencial. Além disso, os circuitos foram simulados no software LTspice de forma a demonstrar que todos os conceitos estudados (curto virtual, a necessidade de alimentação externa, entre outros) são válidos.

### 1. Introdução

Os amplificadores operacionais (amps. ops.) são dispositivos eletrônicos fundamentais na área de eletrônica analógica, amplamente utilizados em diversas aplicações como amplificação de sinais, filtros ativos, circuitos matemáticos e instrumentação. Devido à sua alta versatilidade, permitem a implementação de uma grande variedade de configurações, cada uma com propriedades específicas de ganho, impedância e resposta em frequência.

Neste experimento, buscou-se explorar algumas das configurações mais comuns de amplificadores operacionais, a saber: inversora, não inversora, buffer (seguidor de tensão), integradora e amplificadora de diferença. Além de observar experimentalmente os efeitos de cada uma dessas configurações, também foi possível verificar fenômenos intrínsecos ao funcionamento dos amps. ops., como a existência do curto virtual, a saturação da saída quando a tensão excede os limites de alimentação e as propriedades de impedância de entrada e saída.

A simulação foi realizada no software LTspice, que possibilita analisar de forma prática e visual o comportamento dos circuitos, reforçando a teoria estudada em sala de aula. Os resultados obtidos permitem compreender não apenas o funcionamento ideal dos amps. ops., mas também os efeitos não ideais inerentes aos modelos reais utilizados.

### 2. Fundamentação teórica

O amplificador operacional ideal é um dispositivo de ganho infinito, com impedância de entrada infinita e impedância de saída nula. Na prática, esses valores são limitados, mas ainda suficientemente elevados para que os conceitos básicos de projeto se mantenham válidos.

A seguir, são apresentadas as configurações estudadas:

- **Amplificador inversor:** Nesta configuração, a entrada é aplicada ao terminal inversor através de um resistor  $R_1$ , enquanto o resistor  $R_2$  faz a realimentação negativa. O ganho é dado por:

$$G = -\frac{R_2}{R_1}$$

A saída é defasada de  $180^\circ$  em relação à entrada.

- **Amplificador não inversor:** A entrada é aplicada ao terminal não inversor, enquanto o divisor resistivo ( $R_1$  e  $R_2$ ) faz a realimentação no terminal inversor. O ganho é:

$$G = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

A saída está em fase com a entrada e apresenta elevada impedância de entrada.

- **Buffer (seguidor de tensão):** É o caso particular do amplificador não inversor com  $R_1 \rightarrow \infty$  e  $R_2 = 0$ , resultando em ganho unitário ( $G = 1$ ). Sua principal utilidade é isolar estágios de circuito, devido à alta impedância de entrada e baixa impedância de saída.
- **Integrador:** Obtido substituindo  $R_2$  por um capacitor  $C$  no circuito inversor. A saída passa a ser proporcional à integral da entrada:

$$V_{out}(t) = -\frac{1}{R_1 C} \int V_{in}(t) dt$$

Por exemplo, para uma entrada quadrada, a saída será uma forma de onda triangular.

- **Amplificador de diferença:** Essa configuração amplifica a diferença entre dois sinais de entrada, sendo sua equação:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1)$$

quando os resistores estão devidamente casados. Essa configuração é base para amplificadores de instrumentação e sistemas de rejeição de ruído em modo comum.

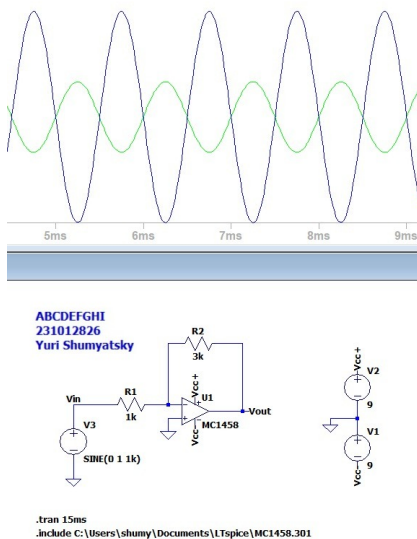
Além dessas configurações, o estudo também permite observar fenômenos importantes como a **saturação**, que ocorre quando  $V_{out}$  tenta ultrapassar os limites impostos pelas tensões de alimentação do amp. op., e o **curto virtual**, conceito essencial em que os terminais de entrada (inversor e não inversor) apresentam praticamente o mesmo potencial em regime linear, devido ao ganho elevado do dispositivo.

### 3. Simulações

#### 3.1. Importação de Componentes

Foi feita a importação do modelo SPICE do amp. op. **MC1458** e montado com ele um amplificador inversor, com  $R_1 = 1k\Omega$  e  $R_2 = 3k\Omega$ , valores escolhidos para que o ganho seja  $|G| = 3$ . Como sabemos, para essa configuração o ganho é de  $G = -\frac{R_2}{R_1}$ .

Figura 1. Circuito inversor com MC1458



#### 3.2. Circuito inversor

Foi montado o circuito inversor com  $R_1 = 31k\Omega$ ,  $R_2 = 1k\Omega$  e alimentado por tensões de  $\pm 20V$ . Primeiro, a entrada é dada como uma senoide de 28Hz e amplitude de 0.26V

Figura 2. Circuito inversor com LM741

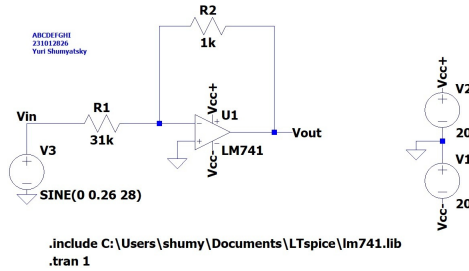
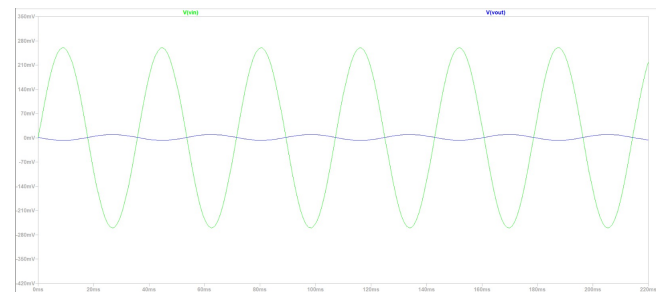


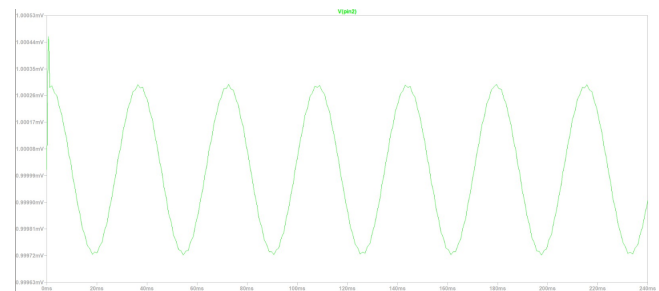
Figura 3. Saída do circuito inversor



Como esperado, de fato o ganho é baixo, de -0.0322.

Foram medidas as tensões nos pinos 2 e 3, no entanto o pino 3 está conectado diretamente ao GND e portanto não sua tensão não pôde ser plotada.

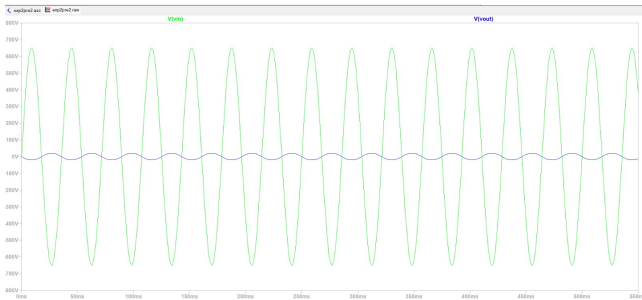
Figura 4. Tensão pino 2



A tensão é baixa, tendo amplitude máxima de aproximadamente 1mV. De fato, o esperado é que  $V+$  e  $V-$  sejam iguais para que haja o curto virtual, mas como o componente não é ideal, esse é o resultado.

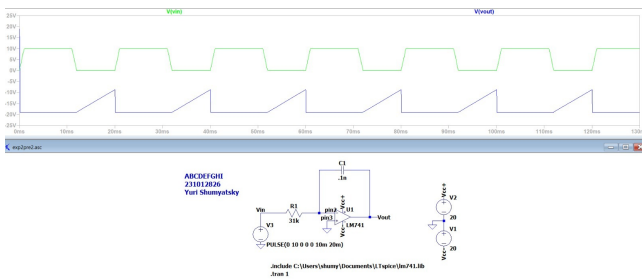
Aumentando a tensão gradualmente, nada acontece até  $V_{out}$  chegar em 20V de amplitude (a tensão de  $V_{cc}$ ), em que a saturação começa a fazer efeito. Isso acontece com  $V_{in}$  tendo amplitude de 620V.

Figura 5. Saturação



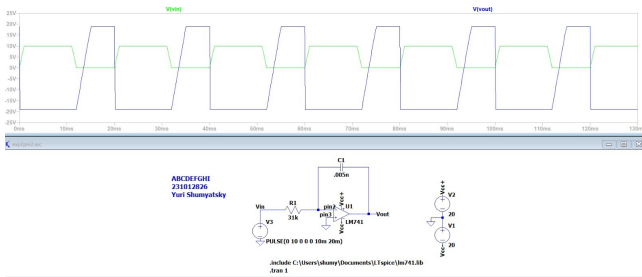
Substituindo  $R_2$  por um capacitor e a entrada por uma onda quadrada de amplitude 10V e período de 20ms, obtemos a seguinte curva:

Figura 6. Substituição para onda quadrada e capacitor



Essa configuração é conhecida como integrador, e de fato a integral deve ser uma onda triangular. Essa simulação foi realizada com 0.1nF. Diminuindo a capacitância para 0.005nF, obtemos a seguinte curva saturada:

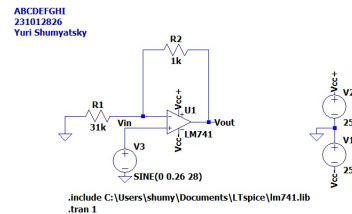
Figura 7. Diminuição da capacitância



### 3.3. Amplificador Não-Inversor

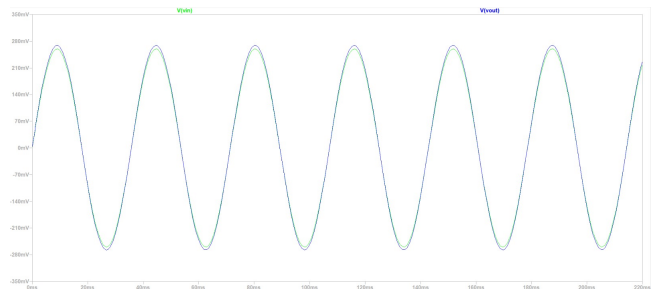
A configuração do circuito agora muda:

Figura 8. Circuito Não-Inversor



Usamos  $R_1 = 31k\Omega$ ,  $R_2 = 1k\Omega$ , o amplificador operacional é alimentado por fontes de  $\pm 25V$ . Com uma entrada senoidal de 28Hz e amplitude de 0.26V, obtemos as seguintes plotagens para a entrada e saída:

Figura 9. Tensões Não-Inversor

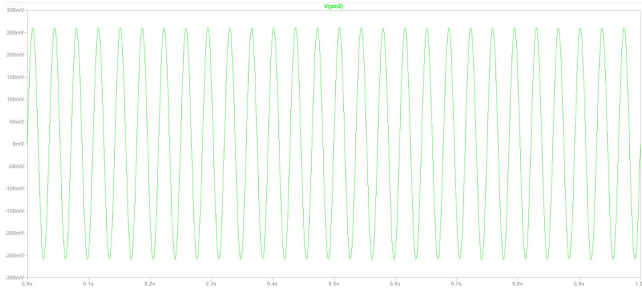


Como esperado, o ganho é de 1.0322, e portanto as tensões são muito próximas.

Para verificar que a impedância de entrada é alta, foi adicionado uma resistência de  $1k\Omega$  entre a  $V_{in}$  e a entrada não inversora do amp. op., e a corrente nessa resistência é medida, tendo um valor extremamente baixo, comprovando assim a hipótese.

Medindo as tensões dos pinos 2 e 3 para comprovar o curto virtual, obtemos novamente que um dos pinos está conectado no GND e por isso não é possível plotar a sua tensão, enquanto a outra tensão apresenta amplitude baixa.

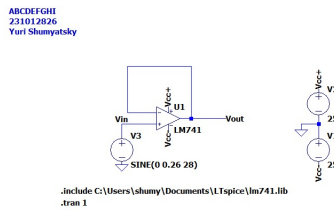
Figura 10. Tensões Pinos amp. op.



### 3.4. Buffer

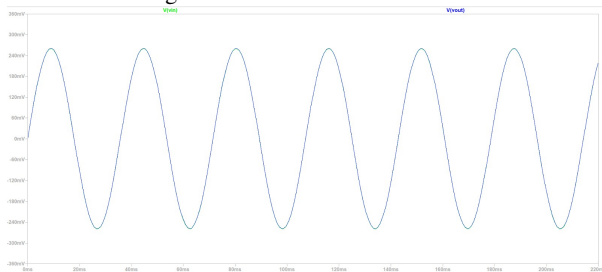
Novamente a configuração é alterada, dessa vez sem resistências mas com entrada senoidal de frequência 28Hz e amplitude 0.26V.

Figura 11. Circuito Buffer



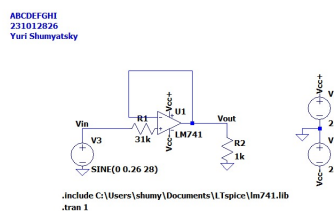
Como o ganho é unitário, espera-se que a saída seja igual à entrada, o que de fato ocorre na simulação:

Figura 12. Entrada e Saída Buffer



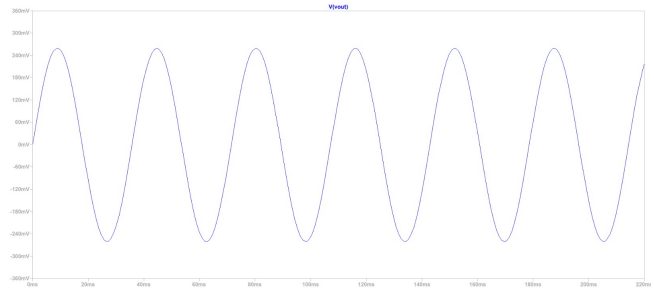
Adicionando resistências de  $31k\Omega$  e  $1k\Omega$ ,

Figura 13. Buffer com resistências



Espera-se que a dissipação de tensão de  $R_2$  seja a mesma de caso  $R_1$  fosse igual a 0, na situação em que  $R_1$  e  $R_2$  estivessem em série. Isso é comprovado pela simulação, que mostra a amplitude de 260mV esperada.

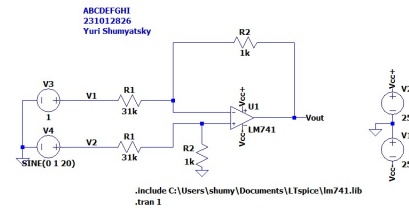
Figura 14. Saída Buffer



### 3.5. Amplificador de Diferença

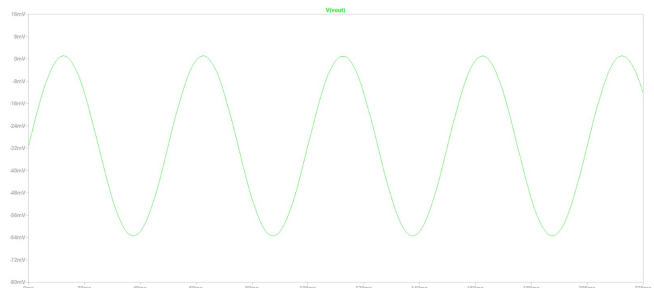
O circuito é montado com  $R_1 = 31k\Omega$ ,  $R_2 = 1k\Omega$ ,  $V_1 = 1$  e  $V_2 = \sin(40\pi t)$ , i.e. frequência de 20 Hz.

Figura 15. Amplificador de Diferença



Como esperado, a saída é proporcional a  $V_1 - V_2$ .

Figura 16. Saída Amplificador de Diferença



### Referências

- Razavi, B. Fundamentos de Microeletrônica, 2ª Edição, LTC, 2014.