

Experimento 2: Imperfeições AC dos Amplificadores Operacionais

Aluno 1

231012826@aluno.unb.br

231012826

Turma T02

Objetivo

O objetivo deste experimento é compreender as diferentes imperfeições presentes nos amplificadores operacionais reais, distinguindo-as do modelo ideal estudado em aulas teóricas. Busca-se, ainda, verificar o funcionamento prático de circuitos com amplificadores operacionais, utilizando o modelo LM741, de modo a analisar suas limitações em corrente contínua (DC) e em corrente alternada (AC). Dessa forma, pretende-se relacionar os conceitos teóricos às características observadas experimentalmente, destacando o impacto dessas imperfeições no desempenho do circuito.

1. Introdução

Entre as principais imperfeições em corrente contínua (DC) dos amplificadores operacionais destacam-se a tensão de offset de entrada, as correntes de polarização de entrada e a tensão de saturação de saída. Tais efeitos influenciam diretamente a precisão do circuito, podendo introduzir erros sistemáticos em medições e no ganho estático.

No domínio em corrente alternada (AC), o desempenho dos amplificadores operacionais é limitado pela largura de banda finita, pelo produto ganho-banda passante (GBW), pela taxa de variação máxima da tensão de saída (*slew rate*) e pela resposta em frequência não ideal. Esses fatores determinam a faixa útil de operação do dispositivo em altas frequências e restringem sua capacidade de amplificar sinais rápidos ou de alta amplitude.

O presente experimento busca caracterizar algumas dessas imperfeições, em especial aquelas relacionadas ao comportamento em AC. Para tanto, analisam-se diferentes configurações de amplificadores não-inversores, variando-se o ganho e verificando como o aumento deste impacta a frequência de corte e, conseqüentemente, o produto ganho-banda passante.

2. Fundamentação Teórica

O modelo ideal de um amplificador operacional considera:

1. Ganho de malha aberta infinito;
2. Impedância de entrada infinita (corrente de entrada nula);
3. Impedância de saída nula;
4. Resposta em frequência ilimitada;
5. Ausência de ruído e imperfeições.

Na prática, entretanto, essas condições não se verificam. As imperfeições em DC incluem:

- **Tensão de offset de entrada (V_{OS}):** pequena diferença de tensão necessária entre as entradas para que a saída seja nula.
- **Correntes de polarização (I_B):** correntes que fluem pelas entradas do op-amp, devidas à polarização dos transistores internos.
- **Corrente de offset (I_{OS}):** diferença entre as correntes de polarização das duas entradas.
- **Saturação da saída:** o sinal de saída não consegue ultrapassar valores próximos às tensões de alimentação, ficando limitado a uma faixa menor que V_{CC} .

As imperfeições em AC relacionam-se principalmente à resposta em frequência:

- **Ganho em malha aberta dependente da frequência:** o ganho $A_{OL}(f)$ decai a partir de uma determinada frequência de pólo dominante.
- **Produto ganho-banda (GBW):** define a frequência em que o ganho de malha fechada cai para a unidade.

Para qualquer configuração não inversora, vale aproximadamente:

$$f_c \approx \frac{GBW}{A_{CL}},$$

onde A_{CL} é o ganho de malha fechada e f_c a frequência de corte.

- **Slew rate (SR):** taxa máxima de variação da tensão de saída, que limita a resposta a sinais senoidais de alta frequência ou grande amplitude.

No caso do experimento realizado, o interesse está em observar como a redução da banda passante acompanha o aumento do ganho em configurações não inversoras. Assim, demonstra-se experimentalmente que, apesar das diferenças entre modelos ideais e reais, o produto $A_{CL} \cdot f_c$ tende a permanecer aproximadamente constante e próximo ao GBW especificado para o amplificador operacional utilizado (no caso, o LM741).

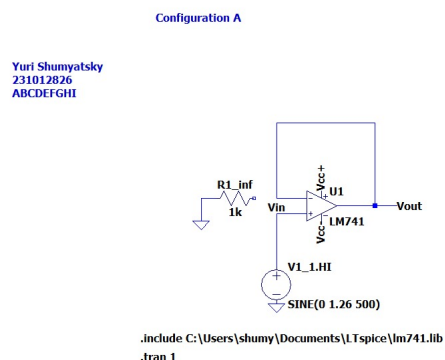
3. Simulações

3.1. Buffer

Primeiro o circuito é montado com $R_1 = \infty$ e $R_2 = 0$, fazendo da configuração não inversora um circuito Buffer (ou seguidor de tensão).

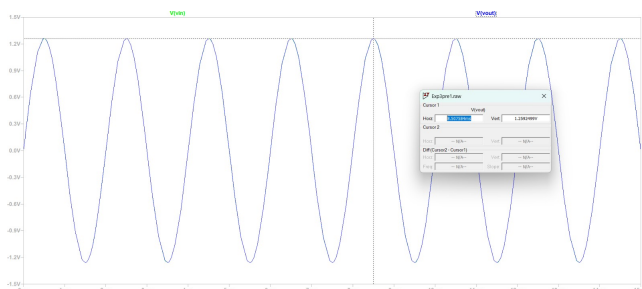
A saída deve ter amplitude de 1.26V, mas como o ganho é unitário, a entrada também deve ter amplitude de 1.26V.

Figura 1. Circuito não inversor (buffer)



Segue o plot das tensões de entrada e saída.

Figura 2. Entrada e saída circuito buffer



Para encontrar a frequência de corte, foi utilizada uma análise AC para encontrar a frequência em que a amplitude cai para $(0.71)(1.26V)$. Isso é feito ao verificar que deve ser subtraído $20\log(\sqrt{2})$ da amplitude em dB, o que equivale a subtrair 3dB pois a tensão é constante.

Como pode ser observado, a f_c encontrada é de 1.557MHz.

Em seguida, é plotado o ganho do circuito em seu bode plot.

O produto ganho \times banda passante do ampop nesse circuito é $A \cdot f_c$, sendo A o ganho em frequências baixas (menores que f_c). Como nesse circuito $A = 1$ e $f_c = 1.557MHz$, o produto tem valor de $1.557 \cdot 10^6$, como pode ser observado no seguinte gráfico.

Figura 3. Análise da frequência de corte

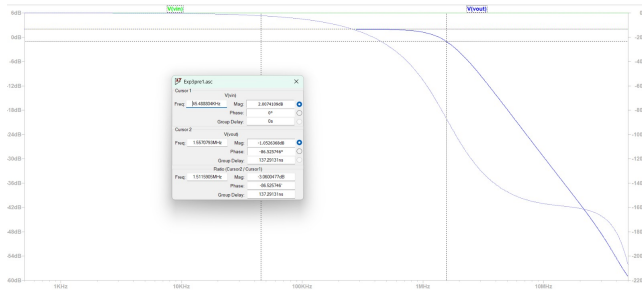


Figura 4. Plot do ganho do circuito

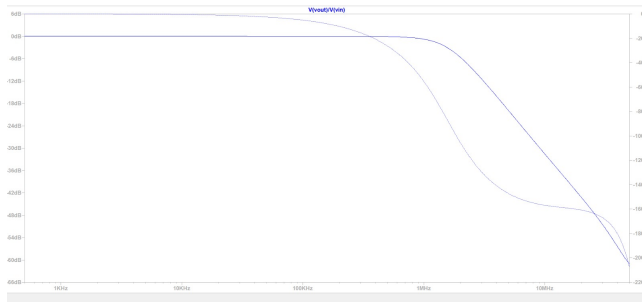


Figura 5. GBW

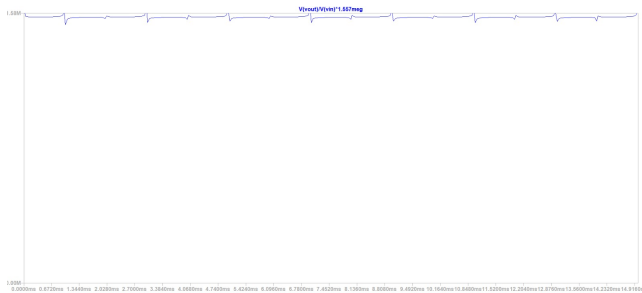


Figura 6. Circuito com ganho baixo

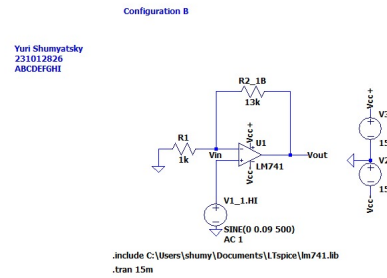


Figura 7. Entrada e saída circuito com ganho baixo

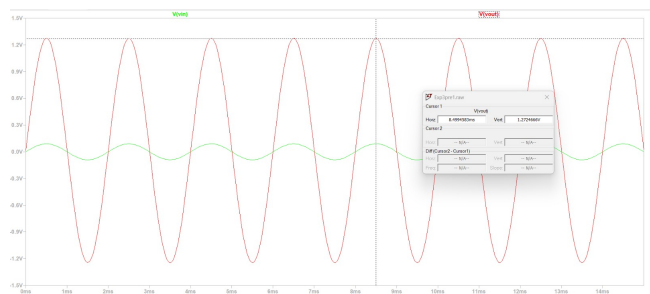
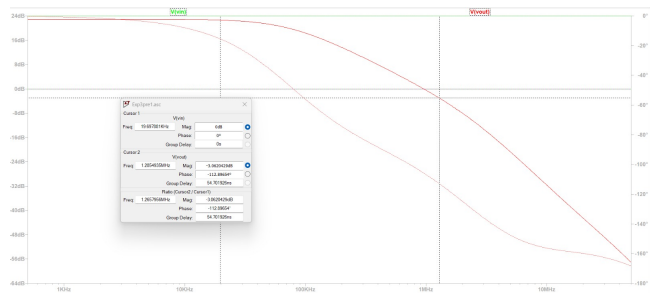


Figura 8. Análise frequência de corte (circuito 2)



3.2. Não inversor com ganho baixo

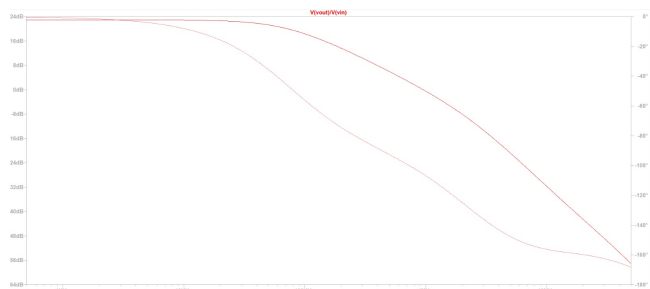
O circuito agora é montado com $R_1 = 1k\Omega$ e $R_2 = 13k\Omega$. O ganho do circuito é 14, então para que a tensão de saída possua amplitude de 1.26V a tensão de entrada deve ter amplitude de 0.09V.

Seguem as tensões de entrada e saída.

O procedimento para encontrar a frequência de corte é análogo, tendo como resultado $f_c = 1.285\text{MHz}$

Segue o bode plot do ganho do circuito.

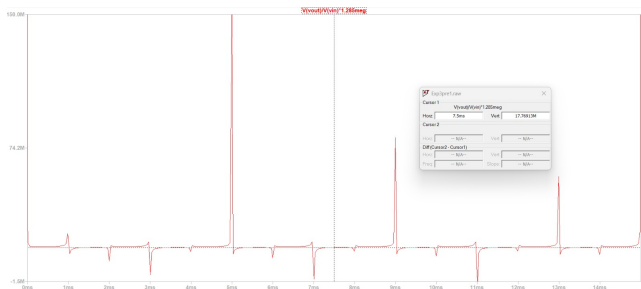
Figura 9. Bode plot ganho (circuito 2)



O produto ganho \times banda passante do ampop nesse cir-

cuito é $A \cdot f_c$, sendo portanto $GBW = 14 \cdot 1.285 \cdot 10^6 = 17.99 \cdot 10^6$

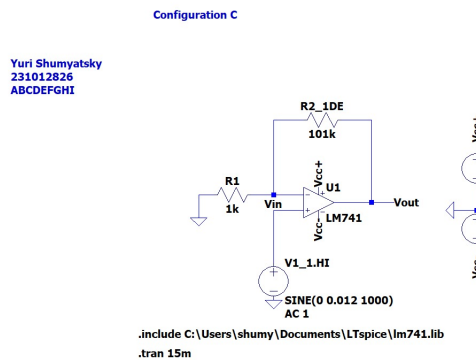
Figura 10. GBW (circuito 2)



3.3. Circuito não inversor de ganho alto

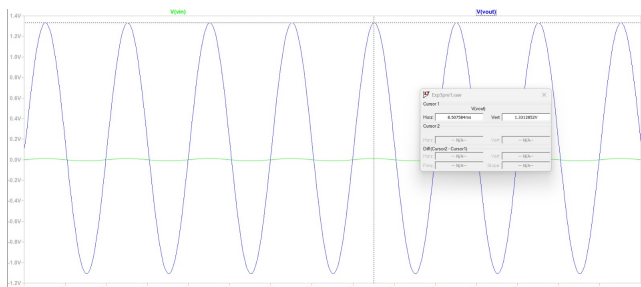
O circuito agora é remontado com $R_1 = 1k\Omega$ e $R_2 = 101k\Omega$. Assim, o ganho é de 102, o que faz com que para que a saída possua amplitude de 1.26V, a entrada deve ter 0.012V.

Figura 11. Circuito 3



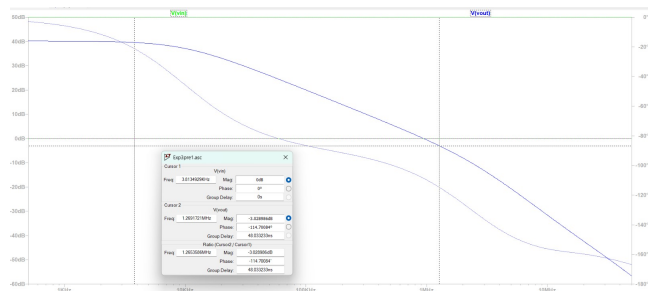
Seguem a entrada e saída plotadas.

Figura 12. Tensões de entrada e saída (circuito 3)



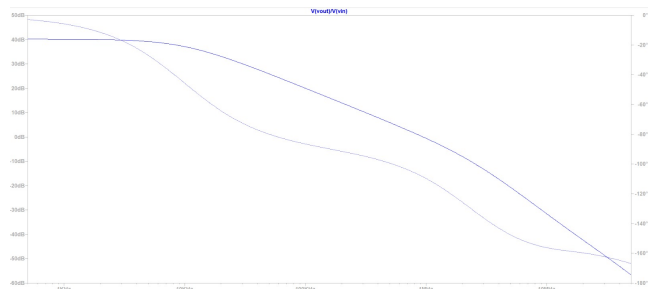
Encontrar a frequência de corte novamente é análogo, resultando em $f_c = 1.269\text{MHz}$.

Figura 13. Análise frequência de corte (circuito 3)



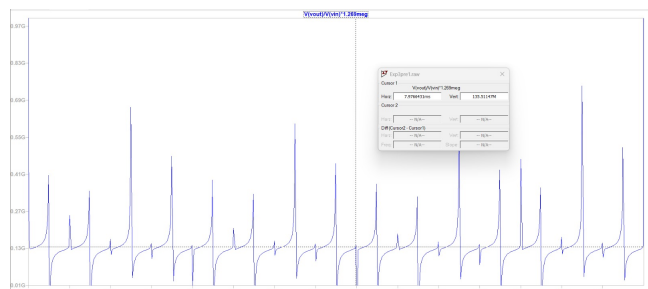
A figura 14 é o bode plot do ganho do circuito.

Figura 14. Bode plot do ganho (circuito 3)



O produto $\text{ganho} \times \text{banda passante}$ do ampop nesse circuito continua sendo $A \cdot f_c$, sendo portanto $GBW = 102 \cdot 1.269 \cdot 10^6 = 129.4 \cdot 10^6$. O analisado bate com o razoável, porém com certa margem de erro.

Figura 15. GBW (circuito 3)



Referências

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