

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, consequentemente, 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).

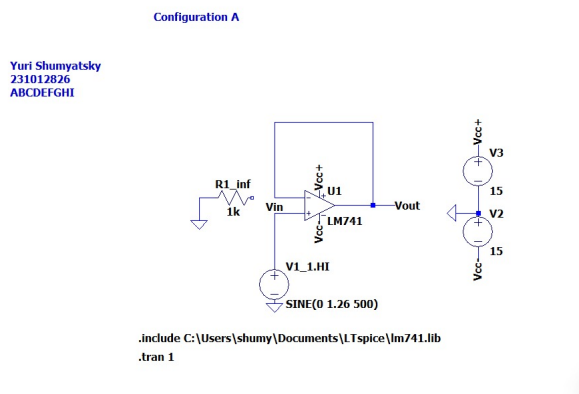
3. Simulações

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).

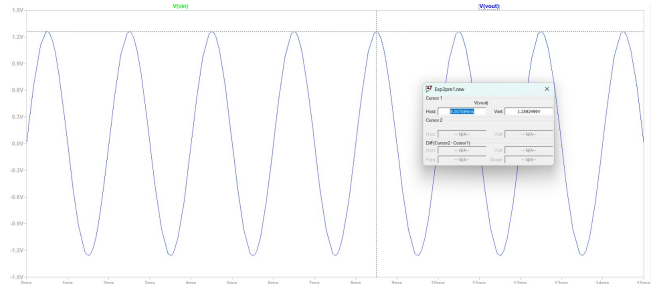
A saída deve ter amplitude de 1.26V, mas como o ganho é unitário, a entrada também deve ter amplitude de 1.26V.

Figura 1. Circuito não inversor (buffer)



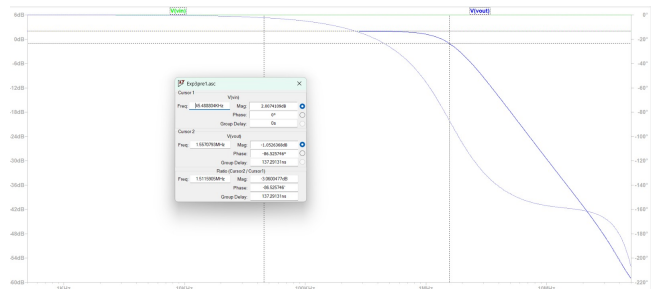
Segue o plot das tensões de entrada e saída.

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.

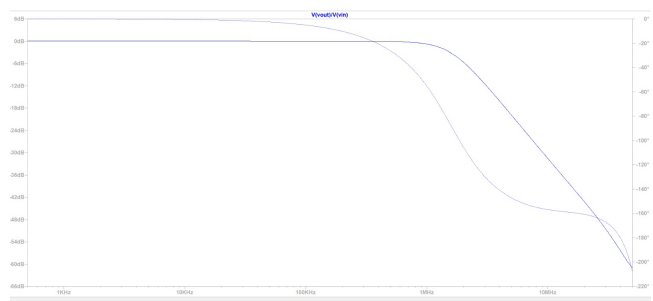
Figura 3. Análise da frequência de corte



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

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

Figura 4. Plot do ganho do circuito



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 5. GBW

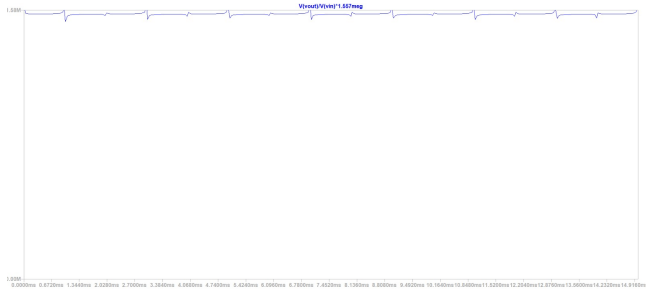
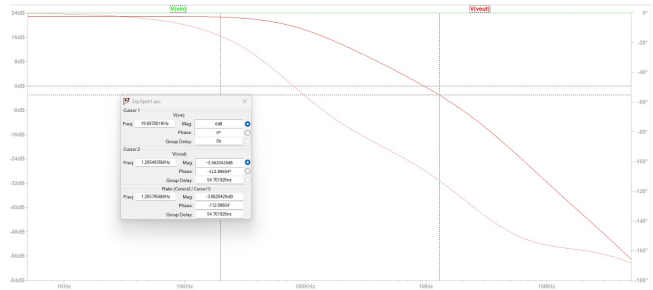
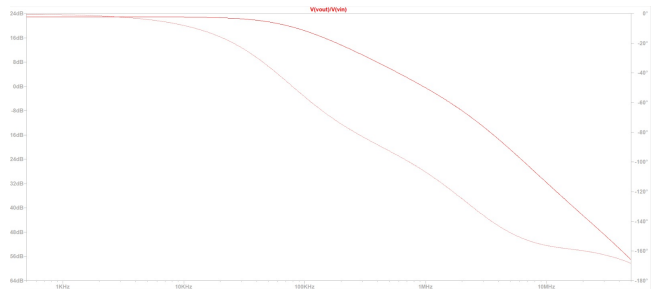


Figura 8. Análise frequência de corte (circuito 2)



Segue o bode plot do ganho do circuito.

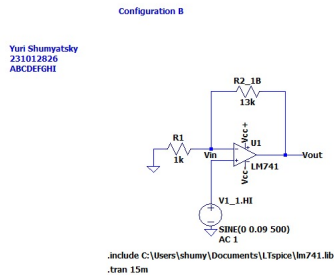
Figura 9. Bode plot ganho (circuito 2)



3.2. Não inversor com ganho baixo

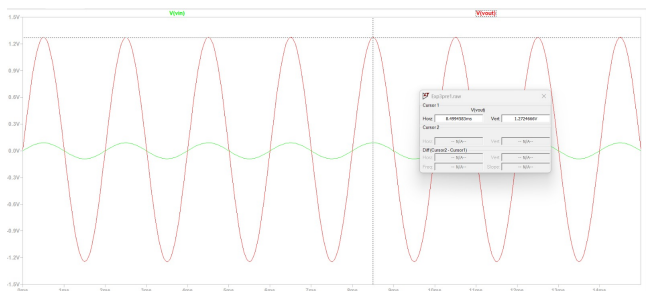
O circuito agora é montado com $R_1 = 1k\Omega$ e $R_2 = 13k\Omega$. O ganho do circuito é 14, então para que a tensão de saída possua amplitude de $1.26V$ a tensão de entrada deve ter amplitude de $0.09V$.

Figura 6. Circuito com ganho baixo



Seguem as tensões de entrada e saída.

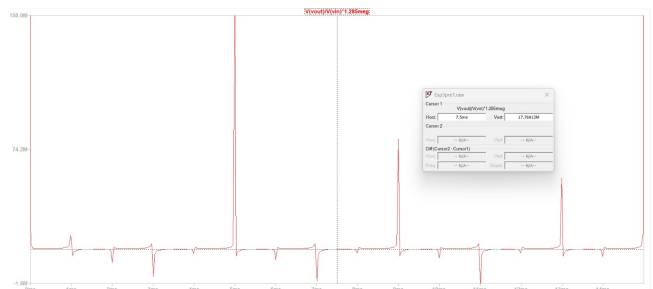
Figura 7. Entrada e saída circuito com ganho baixo



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

O produto ganho \times banda passante do ampop nesse circuito é $A \cdot f_c$, sendo portanto $GBW = 14 \cdot 1.285 \cdot 10^6 = 17.99 \cdot 10^6$

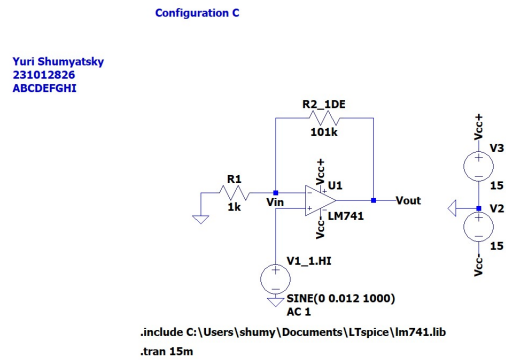
Figura 10. GBW (circuito 2)



3.3. Circuito não inversor de ganho alto

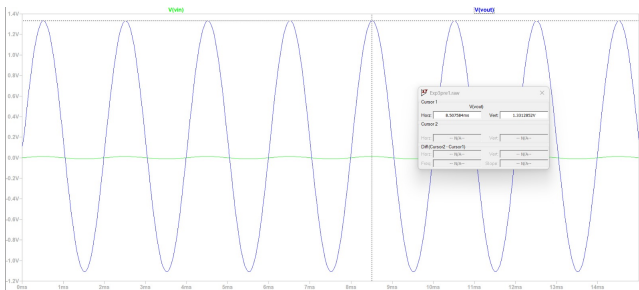
O circuito agora é remontado com $R_1 = 1k\Omega$ e $R_2 = 101k\Omega$. Assim, o ganho é de 102, o que faz com que para que a saída possua amplitude de $1.26V$, a entrada deve ter $0.012V$.

Figura 11. Circuito 3



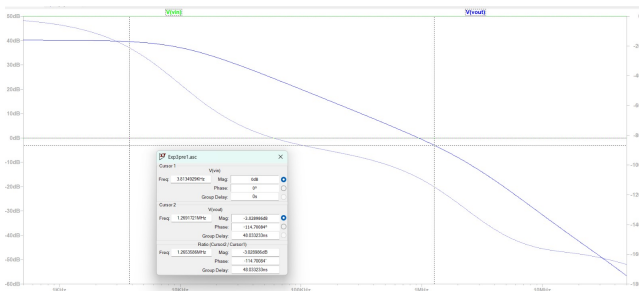
Seguem a entrada e saída plotadas.

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



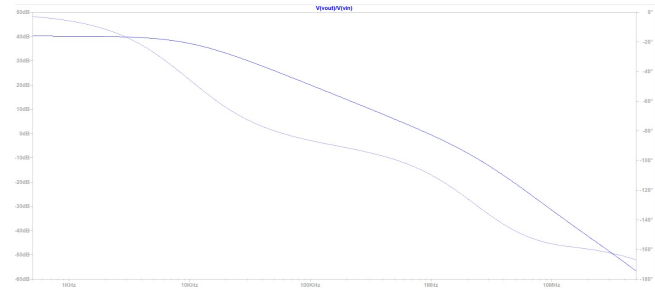
Encontrar a frequência de corte novamente é análogo, resultando em $f_c = 1.269\text{MHz}$.

Figura 13. Análise frequência de corte (circuito 3)



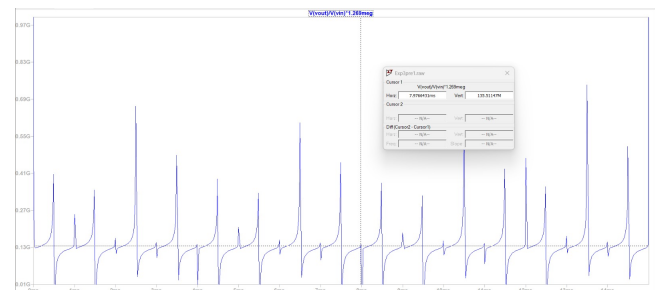
A figura 14 é o bode plot do ganho do circuito.

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.