



Laboratório de Dispositivos e Circuitos Eletrônicos – 2017/02

Experiência Nº 01: Amplificadores operacionais - Imperfeições CC e não-linearidades

I - Objetivos

O objetivo deste experimento é examinar experimentalmente as características não-ideais de um amplificador operacional.

Maiores informações acerca dos amplificadores operacionais a serem utilizados neste experimento podem ser encontradas em:

- Datasheet do amplificador operacional LM741: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm741.pdf>
- Apostila preparada pelo prof. Humberto Gamba sobre amplificadores operacionais para o curso de eletrônica básica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná:
http://paginapessoal.utfpr.edu.br/humberto/atividade-de-ensino/labeltronica/inicio/lab-notes/Op_Amp_Parte_1.pdf
- Apostilas preparada pelo prof. Fabiano Fruett sobre o amplificador operacional para o curso de Eletrônica Básica da Unicamp:

Parte I: <http://www.dsif.fee.unicamp.br/~fabiano/EE530/PDF/Aula%208A%20Amplificador%20Operacional.pdf>

Parte II: <http://www.dsif.fee.unicamp.br/~fabiano/EE530/PDF/Aula%208B%20Amplificador%20Operacional%20II.pdf>

- Apostila de laboratório da University of North Carolina at Charlotte com explicação detalhada dos parâmetros “gain-bandwidth product” e “slew-rate” de um amplificador operacional, disponível em: <http://ece.uncc.edu/sites/ece.uncc.edu/files/media/labs/3156/5-GBPandSlew.pdf>.
- Apostila da Texas Instruments sobre os diversos parâmetros dos amplificadores operacionais: “Chapter 11 – Understanding Op Amp Parameters”, disponível em <http://www.ti.com/lit/ml/sloa083/sloa083.pdf>.
- Apostila bastante detalhada (464 páginas) da Texas Instruments sobre amplificadores operacionais: “Op Amps for Everyone”, disponível em <http://www.ee.nmt.edu/~anders/courses/ee322s10/op-amp-slod006a.pdf>.
- Livro texto do curso.

II – Preparação para o laboratório

Sugestão de leitura prévia: Para responder às perguntas propostas, consulte o capítulo do livro texto referente a amplificadores operacionais (capítulo 2 na 4ª edição do livro do Sedra e Smith), além dos datasheets e das apostilas sugeridas acima.

Pré-relatório - INDIVIDUAL

O pré-relatório consistirá na resposta às perguntas propostas. Suas respostas serão baseadas na leitura do livro texto, das apostilas sugeridas e de outras fontes que encontrarem, **mas não devem ser diretamente copiadas de nenhuma fonte**. Isso é considerado plágio e é muito sério. Leia este post na página do curso de Laboratório de Circuitos 1:

<https://sites.google.com/site/labcircuitos1unb/classroom-news/introducaoteoricacuidadocomplagio>

1. (1,0 pt) Leia o datasheet do amplificador operacional LM741 e complete com o valor dos seguintes parâmetros:
Corrente de compensação de entrada (*input offset current*):
Tensão de compensação de entrada (*input offset voltage*):
Corrente de polarização de entrada (*input bias current*):
Resistência de entrada (*input resistance*):
Razão de rejeição em modo comum (CMRR - *Common-Mode Rejection ratio*):
Largura de banda (*bandwidth*):
Taxa de variação (*slew rate*):
Potência consumida:
Corrente de saída em curto-circuito (*output short circuit current*):
Razão de rejeição da fonte de alimentação (PSRR – *power supply voltage rejection ratio*):
2. (2,0 pt) Com base na leitura do livro texto e da apostila do prof. Humberto Gamba listada acima, responda aos itens a seguir: **(a)** O que é o *signal de modo comum* (ou *common mode signal*) v_c ? ; **(b)** O que é o *ganho no modo diferencial* (A_d)? **(c)** Qual a relação entre o ganho no modo comum A_c , o ganho no modo diferencial A_d e a tensão de saída v_o ? **(d)** O que é a razão de rejeição no modo comum (ou *common mode rejection ratio* – CMRR)?
3. (0,5 pt) Porque se diz que há um *curto circuito virtual* entre os dois terminais de entrada de um amplificador operacional ideal?
4. (1,0 pt) Com base no conceito de curto virtual, determine para o circuito mostrado na Figura A: **(a)** a expressão da corrente i_1 em termos de v_I e das resistências; **(b)** a expressão da corrente i_2 em termos de v_I e das resistências; **(c)** a expressão do ganho v_o / v_I em termos das resistências.

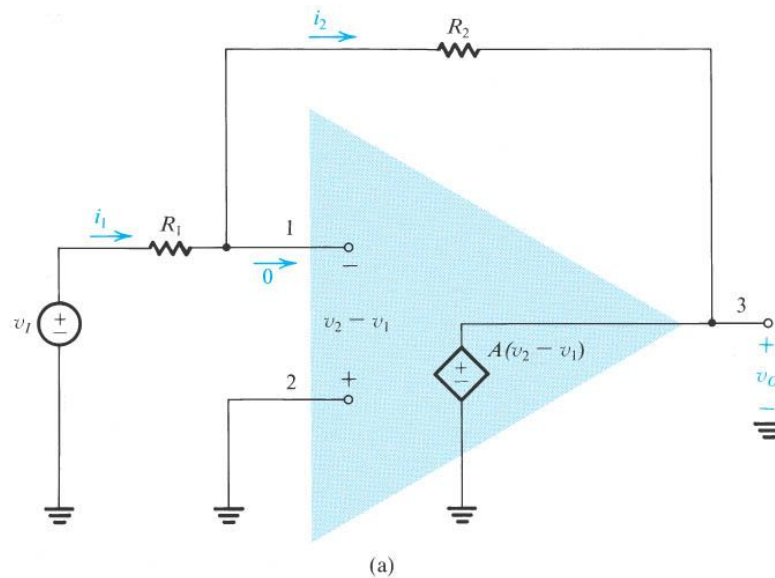


Figura A: Modelo do amplificador operacional ideal

O circuito seguidor de tensão, mostrado na Figura B, é bastante útil. Ele tem um ganho de tensão unitário, com uma elevada resistência de entrada R_{in} e uma baixa resistência de saída R_{out} .

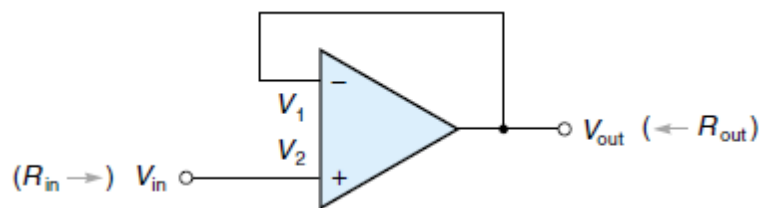


Figura B: Circuito seguidor de tensão

A partir da equação básica do amplificador operacional: $V_{out} = A(V_2 - V_1)$. Mas V_{out} está conectado a V_1 . Assim, tem-se que $V_{out} = V_1$. Substituindo na equação básica: $V_{out} = (AV_2) - (AV_{out})$. Resolvendo para V_{out} , obtém-se:

$$V_{out} = \frac{AV_2}{1 + A} \approx V_2$$

Lembre-se que o ganho de malha aberta A do amplificador operacional tem valor bastante elevado ($A \gg 1$).

5. (2,0 pts) Com base nestas expressões, determine a tensão nos terminais do resistor de $1\text{k}\Omega$ dos circuitos (a) e (c) da figura C. Por que as tensões são diferentes? Qual a vantagem em se utilizar o amplificador operacional para alimentar a carga de $1\text{k}\Omega$ (circuito c), em comparação com o circuito (a) ?

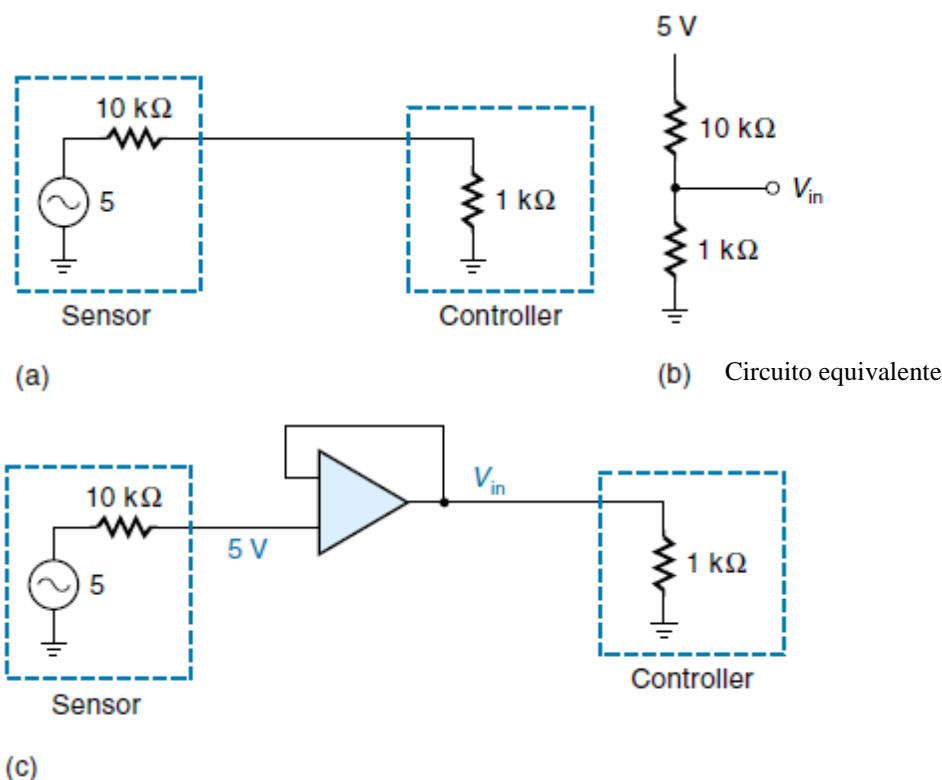


Figura C: Comparação de circuito divisor de tensão e seguidor de tensão

6. (2,0 pt) Com base na leitura do livro texto e da apostila do prof. Humberto Gamba listada acima, responda aos itens a seguir: **(a)** O que é a taxa máxima de variação da tensão de saída (*slew-rate*) e como ela pode ser calculada?; **(b)** O que é a tensão de compensação de entrada (*input offset voltage*)? ; **(c)** O que é a corrente de compensação de entrada (*input offset current*)? **(c)** O que é a corrente de polarização de entrada (*input bias current*) e como ela pode ser calculada a partir das correntes de base dos transistores do estágio diferencial do op amp?
7. (2,0 pt) O circuito da figura 6 da parte experimental (página 14) é um seguidor de tensão, no qual espera-se que $v_s(t) = v_E(t)$. No entanto, essa relação não é válida em circuitos com corrente alternada devido ao modelo de primeira ordem $A(s)$ do amplificador operacional e à taxa máxima de variação de saída (SR). Sendo v_E uma onda quadrada de valores mínimo e máximo $-a$ e a , respectivamente: **(a)** determine a forma esperada para $v_s(t)$ em um período de $v_E(t)$ considerando apenas a ação do SR. **(b)** Sendo $a = 1V$, determine o tempo necessário para $v_s(t)$ seguir $v_E(t)$ após cada transição de $v_E(t)$ considerando um amplificador operacional LM741 (vide o manual do dispositivo). Suponha que o meio período do sinal $v_E(t)$ seja suficientemente grande de forma a se ter $v_s(t) = v_E(t)$ ainda dentro do meio período.
8. (0,5 pt) Inclua as referências bibliográficas utilizadas para responder as perguntas acima, incluindo o livro texto, e quaisquer outras fontes utilizadas, incluindo outros livros consultados e fontes pesquisadas na internet, **sempre seguindo as normas da ABNT**. A biblioteca possui as normas impressas para consulta.



Resumos das normas da ABNT podem ser encontrados em diferentes locais, como:
[http://www.seufuturonapratica.com.br/portal/fileadmin/user_upload/MANUAL PARA CITACOES BIBLIOGRAFICAS.pdf](http://www.seufuturonapratica.com.br/portal/fileadmin/user_upload/MANUAL_PARA_CITACOES_BIBLIOGRAFICAS.pdf)

Lembrem-se: o pré-relatório é individual. Questões respondidas “em grupo” terão sua pontuação devidamente descontadas.

As respostas a estas perguntas devem ser enviadas ao professor de laboratório por email, em arquivo **pdf**, com nome, matrícula, data, e título do experimento, com o enunciado das perguntas, além de suas respostas, **até as 23:59 do dia imediatamente anterior ao primeiro dia deste experimento para sua turma.**

Pré-relatórios não recebidos até este prazo não serão considerados.

Laboratório de Dispositivos e Circuitos Eletrônicos

Experiência Nº 01: Amplificadores operacionais – imperfeições CC e não-linearidades – 2017/02

Turma: _____ Data: _____

Alunos: _____ Matrícula: _____

_____ Matrícula: _____

III - Procedimento Experimental

Material necessário

1 amplificador operacional LM741

2 resistores de $100\ \Omega$ / 0,25W

1 resistor de $1\ k\Omega$ / 0,25W

2 resistores de $100\ k\Omega$ / 0,25W

2 resistores de $220\ k\Omega$ / 0,25W

1 potenciômetro

Equipamentos: osciloscópio de dois canais, fonte de alimentação, gerador de sinais

Experiências

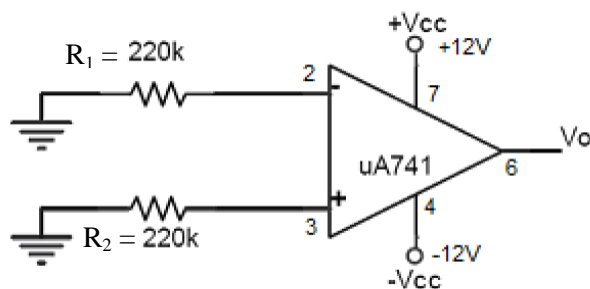


Figura 1. Circuitos de caracterização da corrente de polarização de entrada (*input bias current*) e da corrente de compensação de entrada (*input offset current*) de amplificadores operacionais.

Experiência 1: Corrente de compensação de entrada (*input bias current*) e corrente de polarização de entrada (*input offset current*)

- Construa o circuito ilustrado na figura 1. Se não encontrar uma resistência de $220\ k\Omega$, pode utilizar resistores de $100\ k\Omega$ em série para um total de $200\ k\Omega$ para R_1 e R_2 .
- Meça a tensão DC nos terminais inversor (V^-) e não-inversor (V^+) do amp-op.
- Calcule a corrente de compensação de entrada (*input bias current*) com a fórmula dada ao final do roteiro. Para determinar as correntes I_B^- e I_B^+ , utilize a lei de Ohm e o valor medido das resistências R_1 e R_2 .

220 (ou 200) $k\Omega$ nominal: R_1 medido = _____ Ω , R_2 medido = _____ Ω (**As resistências devem estar desconectadas do circuito para sua medição com ohmímetro!**)



(d) Calcule a diferença entre as correntes de compensação para determinar a corrente de polarização (*offset current*).

Repita os passos acima com resistores de **100 k Ω** e, a seguir, com resistores de **100 Ω** . Reporte e comente os resultados obtidos. Lembre-se de colocar as unidades corretas nos dados de todas as tabelas.

100 k Ω nominal: R_1 medido = _____ Ω , R_2 medido = _____ Ω

100 Ω nominal: R_1 medido = _____ Ω , R_2 medido = _____ Ω

Tabela 1: Correntes de compensação (bias) e de polarização (offset) de entrada

Resistores (valores nominais)	Resistores (valores medidos)	Tensão DC no terminal inversor (V^-), Volts	Tensão DC no terminal não- inversor (V^+), Volts	Input bias current, I_B^-	Input bias current, I_B^+	Input bias current, I_B	Input offset current, I_{os}

Cálculos, anotações e comentários:

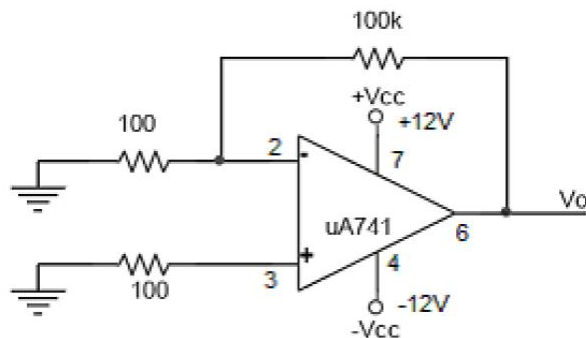


Figura 2. Circuito para medida das tensões de compensação de entrada e saída (*input e output offset voltage*).

Experiência 2. Tensão de polarização (*offset*) de entrada e saída

- Construa o circuito ilustrado na Figura 2.
- Meça a tensão DC de saída. Essa é a tensão de polarização de saída. Explique em seu relatório as razões que levam v_o a não ser nulo, mesmo as entradas 2 e 3 estando ligadas ao terra por meio dos resistores de $100\ \Omega$.
- Calcule a tensão de polarização (*offset*) de entrada. As fórmulas ao final deste roteiro podem ser úteis, assim como fórmulas nas referências utilizadas para a elaboração do pré-relatório.

Substitua o resistor de **100k Ω** por um resistor de **200k Ω** e repita os passos acima. Reporte os seus resultados.

Repita os passos acima com um resistor de **1 k Ω** e comente os resultados.

Preencha a tabela 2 e comente os resultados obtidos.

Tabela 2: Tensões *offset* de entrada e saída para o amplificador operacional LM741.

	Resistor	Tensão DC de saída (<i>output offset</i>), V_o , Volts	Tensão de <i>offset</i> de entrada, V_{os} , mV
Primeiro CI LM741	100 k Ω		
	200 k Ω		
	1 k Ω		

Cálculos, anotações e comentários:

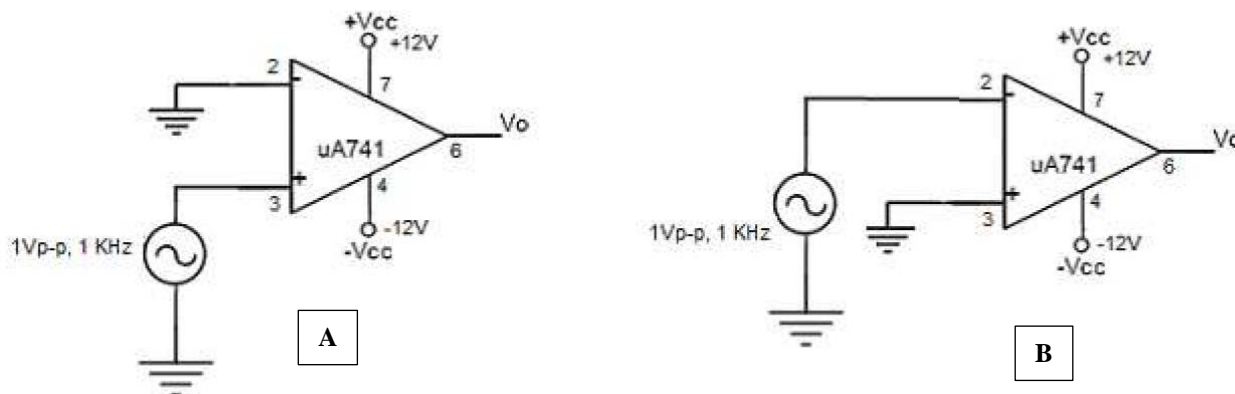


Figura 3. Circuitos para medição das tensões de saturação.

Experiência 3. Tensões de saturação

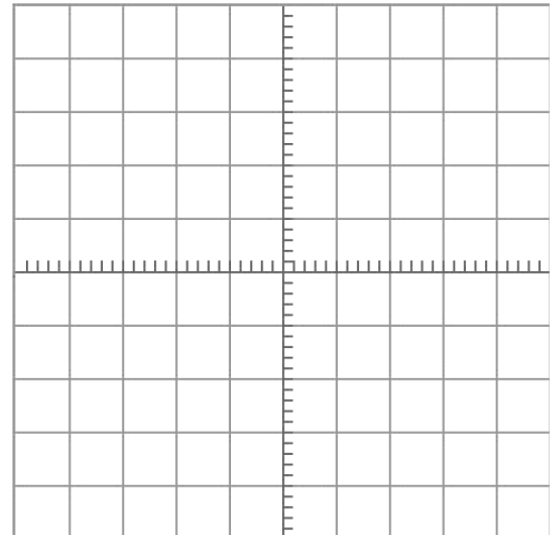
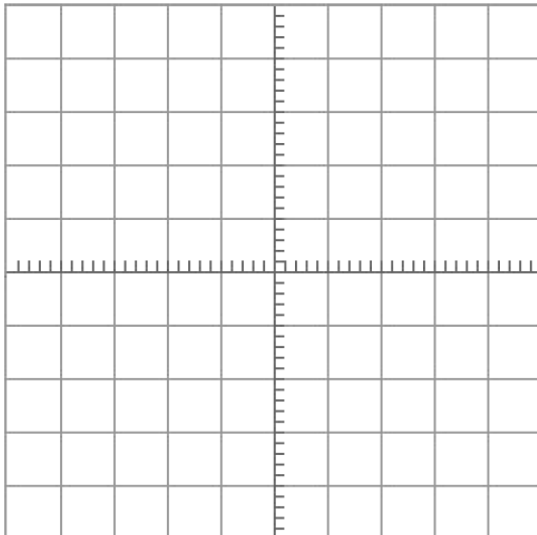
- Construa o circuito mostrado na figura 3A, com a entrada AC ligada à entrada não-inversora.
- Meça a tensão de saída no osciloscópio para uma tensão senoidal de entrada de 1 Vpp, 1kHz aplicada ao terminal não-inversor. Ajuste o osciloscópio de modo a visualizar apenas a componente AC das ondas de entrada e saída. Anote a forma de onda nos gráficos fornecidos, incluindo a forma de onda das tensões de entrada e saída, **indicando as unidades e marcações utilizadas em cada eixo, conforme visualizado no osciloscópio. Chame o instrutor para dar um visto em suas figuras!**
- Repita os passos acima para a mesma tensão senoidal, agora aplicada ao terminal inversor, aterrando-se a entrada não-inversora, como mostrado na Figura 3B.

Anote os dados obtidos e comente os resultados. O que explica os gráficos obtidos nas saídas dos circuitos? Observe a defasagem entre as ondas de entrada e saída em cada caso. Há diferenças ao se aplicar a senóide na saída inversora ou não-inversora? Por que não se observa uma senóide na saída?

Tabela 3: Tensões de saturação

	Tensão AC pico-a-pico de entrada, V_i , Volts	Tensão AC pico-a-pico de saída, V_o , V
Figura 3A		
Figura 3B		

Anotações e comentários:



Anotações e comentários (continuação):

Experiência 4. Intervalos de tensões de entrada e saída

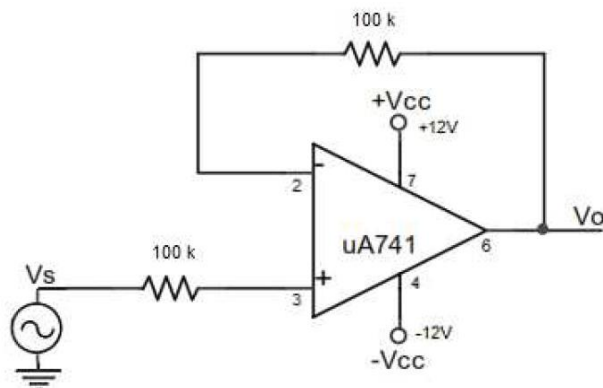


Figura 4.1. Medição da faixa de tensões de entrada.

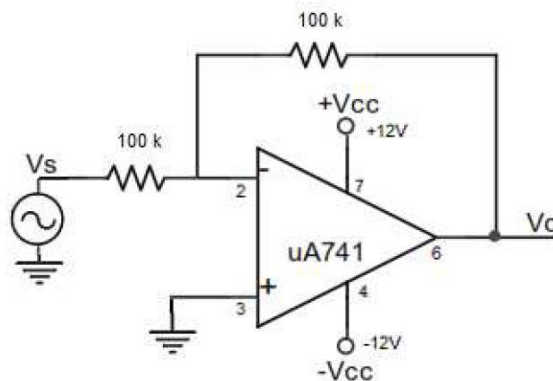


Figura 4.2. Medição dos intervalos da tensão de saída

- Construa o circuito mostrado na **Figura 4.1**.
- Aplice uma entrada senoidal de 5V de amplitude e 100Hz de frequência.
- Observe as tensões na entrada e saída simultaneamente no osciloscópio, devidamente alinhadas em relação ao eixo vertical. Lembre-se de ajustar o osciloscópio para visualização apenas do componente AC dos sinais.
- Aumente a amplitude do sinal de entrada até observar uma distorção nos valores de pico (positivo e/ou negativo) da saída. Se não for observado uma distorção para o valor máximo de amplitude possível em V_s , diminua as tensões $+V_{CC}$ e $-V_{CC}$ **do mesmo valor** até **começar** a obter uma distorção nos valores de pico (positivo e/ou negativo) da saída. Para que valor de $+V_{CC}/-V_{CC}$ isso ocorre? Compare esse valor com a amplitude máxima atingida pela onda de saída. Por que isso acontece? Qual a relação entre a amplitude máxima da onda de saída e as tensões de polarização $+V_{CC}/-V_{CC}$?
- Meça os valores de pico positivo e negativo da tensão de entrada. Esse é o intervalo da tensão de entrada do amp-op para a tensão $\pm V_{CC}$ utilizada. Observe que este valor depende da tensão de alimentação $\pm V_{CC}$ utilizada.

Modifique o circuito como mostrado na **Figura 4.2**. Repita os passos acima e meça agora os valores de pico positivo e negativo da tensão de saída. Isso fornece o intervalo da tensão de saída do amp-op.

Comente os resultados obtidos e quaisquer outras informações que achar pertinentes. Compare os resultados obtidos nas duas montagens. O que mudou em termos de saturação da onda de saída?

Nestes circuitos a saída é senoidal? Qual a diferença entre os circuitos das figuras 4 e 5 que explicam as diferenças observadas nas saídas?



Tabela 4: Intervalo das tensões de entrada e saída

	Intervalo da tensão de entrada (<i>input voltage range</i>), Volts	Intervalo da tensão de saída (<i>output voltage range</i>), Volts
LM741		

Anotações e comentários:

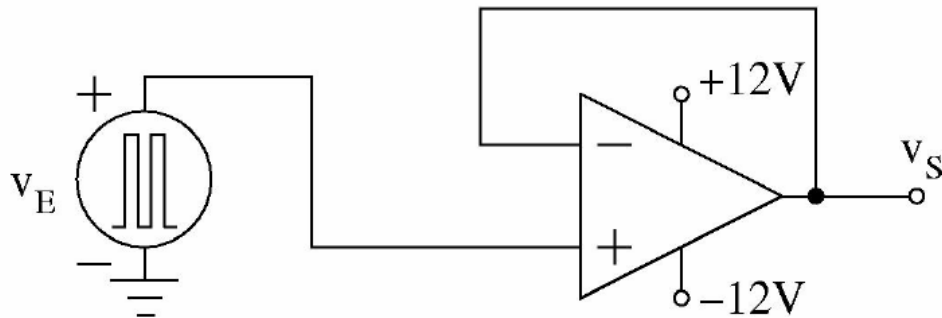


Figura 5. Circuito seguidor de tensão

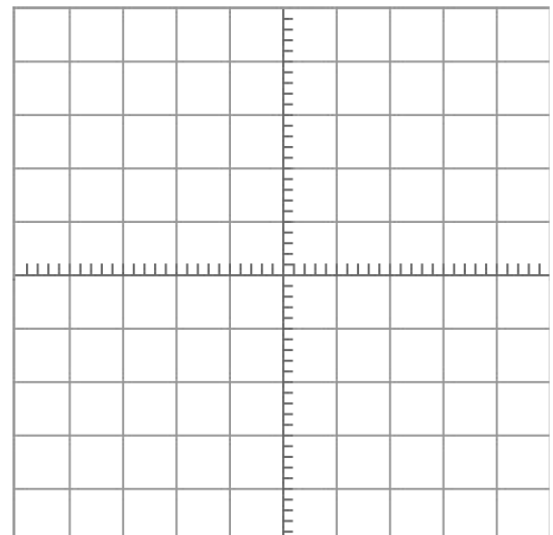
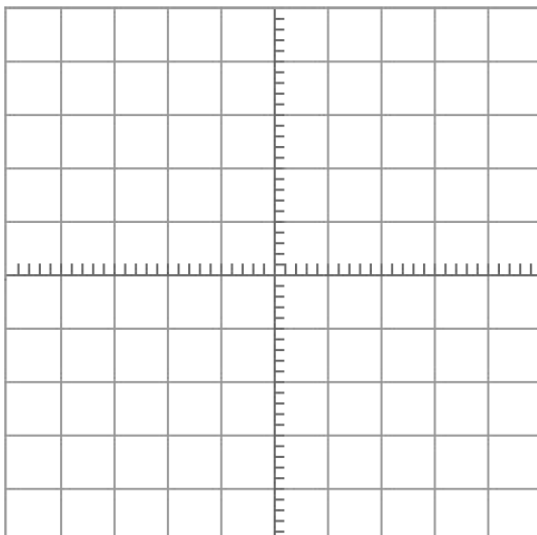
Experiência 5. Circuito seguidor de tensão

- (a) Para o circuito da figura 5, sendo $v_E(t)$ uma onda quadrada de valores mínimo e máximo $-1V$ e $1V$, respectivamente, trace a forma de onda de saída $v_S(t)$ para o amplificador LM741. Estime o SR e compare com os valores especificados pelo fabricante. Explique os fenômenos adversos observados.

Observe e plote as formas de onda das tensões AC de entrada e saída.

Chame o instrutor para dar um visto em suas figuras!

Comente os resultados observados, descrevendo o funcionamento desta configuração. Compare os resultados obtidos com os resultados esperados, previamente calculados no pré-relatório. Comente as diferenças/semelhanças observadas.



Anotações e comentários:

4. Fórmulas

Corrente de compensação de entrada (*input bias current*): $I_B = \frac{I_B^+ + I_B^-}{2}$

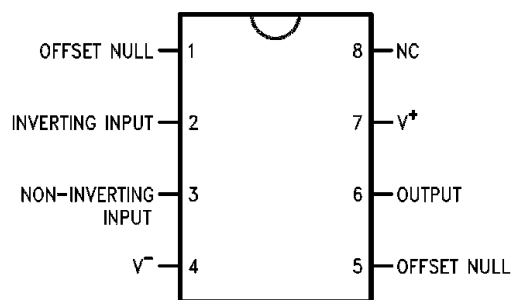
Corrente de polarização de entrada (*input offset current*): $|I_{OS}| = I_B^+ - I_B^-$

Tensão de polarização de entrada (*input offset voltage*): $V_{OS} = V_O \frac{R_i}{R_f + R_i}$

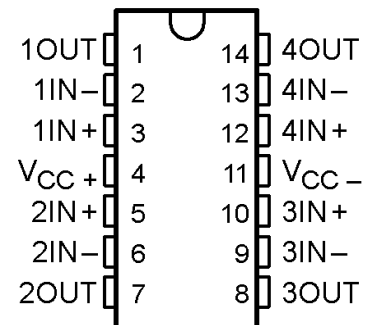
Taxa de variação (*Slew rate*):
$$\begin{cases} \text{Para entrada senoidal: } SR = \frac{2\pi f V_m}{10^6} \text{ V} / \mu\text{s} \\ \text{Para entrada quadrada: } SR = \frac{\Delta V_O}{\Delta t} \text{ V} / \mu\text{s} \end{cases}$$

Razão de rejeição em modo comum (*CMRR*): $\rho = \frac{V_i}{V_O} \frac{R_f}{R_i}$; em dB: $20\log(\rho)$ dB

5. Encapsulamentos



LM741 (amplificador operacional)



TL074 (quádruplo amplificador operacional)