

AMPLIFICADORES

Fundação Universidade Federal de Rondônia
Núcleo de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica - DEE
Disciplina de Eletrônica II

I. OBJETIVOS

- Observar na prática o funcionamento dos diversos tipos de amplificadores com ampop.
- Realizar as comparações necessárias com a teoria para constatação.
- Entender na prática o conceito de “ajuste de span e zero”.

II. INTRODUÇÃO

O ampop pode ser conectado a uma grande variedade de circuitos estabelecendo várias possibilidades operacionais. A seguir, são abordados alguns dos circuitos mais comuns.

A. Amplificador não-inversor

A conexão da figura 1 mostra um circuito com ampop que trabalha como um amplificador não-inversor ou multiplicador de ganho constante. Observe que a conexão amplificador inversor é mais amplamente utilizada por ter melhor estabilidade em frequência.

$$\frac{V_O}{V_i} = 1 + \frac{R_f}{R_i} \quad (1)$$

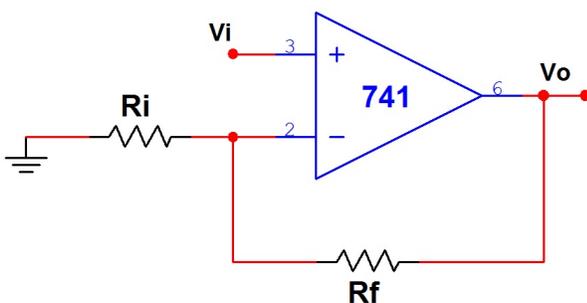


Figura 1. Amplificador não-inversor.

B. Seguidor Unitário

O circuito seguidor-unitário, mostrado na figura 2, fornece um ganho unitário (1) sem inversão de polaridade ou fase. Do circuito equivalente (veja figura 3) é claro que:

$$V_0 = V_i \quad (2)$$

E que a saída tem a mesma polaridade e amplitude da entrada. O circuito opera como um circuito seguidor de emissor ou de fonte, exceto que o ganho é exatamente um.

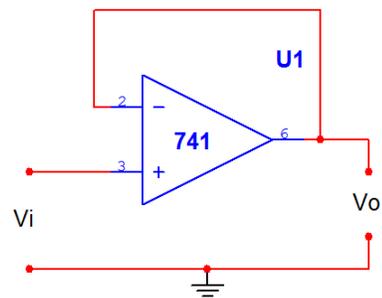


Figura 2. Seguidor Unitário.

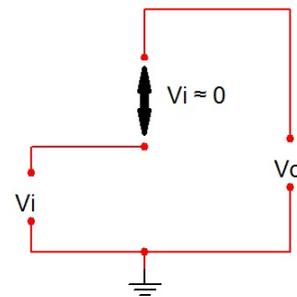


Figura 3. Circuito equivalente com terra virtual do seguidor unitário.

C. Amplificador inversor

O amplificador de ganho constante mais amplamente utilizado é o amplificador inversor, mostrado na figura 4. A saída é obtida pela multiplicação da entrada por um ganho fixo ou constante, fixado pelo resistor de entrada (R_i) e o resistor de realimentação (R_f). Essa saída também é invertida em relação à entrada.

$$\frac{V_O}{V_i} = -\frac{R_f}{R_i} \quad (3)$$

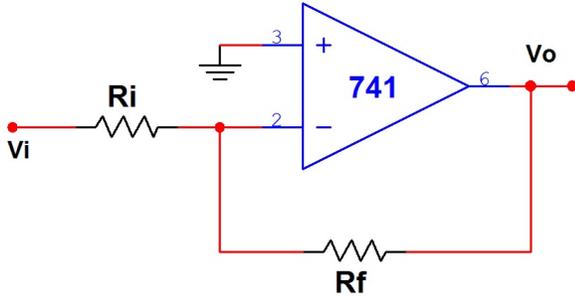


Figura 4. Amplificador inversor.

D. Amplificador Somador

Provavelmente, o mais usado dos circuitos ampops é o circuito amplificador somador mostrado na figura 5. O circuito mostra um circuito amplificador somador de três entradas, o qual fornece um meio de somar algebricamente (adicionando) três tensões, cada uma multiplicada por um fator de ganho constante. Usando a representação equivalente, mostrada na figura 6, a tensão de saída pode ser expressada em termos das entradas como:

$$V_0 = - \left(\frac{R_f}{R_1} V_1 + \frac{R_f}{R_2} V_2 + \frac{R_f}{R_3} V_3 \right) \quad (4)$$

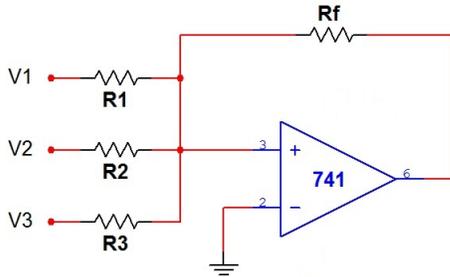


Figura 5. Amplificador somador.

Em outras palavras, cada entrada adiciona uma tensão à saída, multiplicado pelo seu correspondente fator de ganho. Se mais entradas são usadas, cada qual acrescenta uma componente adicional à saída.

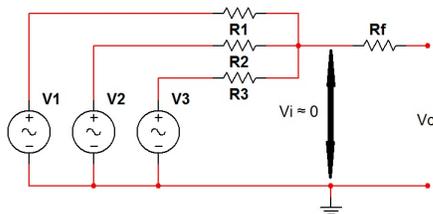


Figura 6. Circuito equivalente com terra virtual do amplificador somador.

E. Amplificador Diferencial

Dois sinais podem ser subtraídos um do outro de várias maneiras. A figura 7 mostra um ampop empregado para realizar a subtração de dois sinais nas entradas. A saída resultante é dada por:

$$v_0 = \frac{R_3}{R_1 + R_3} \frac{R_2 + R_4}{R_2} V_1 - \frac{R_4}{R_2} V_2 \quad (5)$$

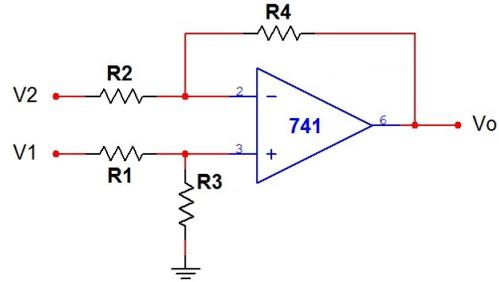


Figura 7. Circuito diferencial.

III. MATERIAIS UTILIZADOS

- Gerador de Tensão DC Instrutherm FA - 3030;
- Gerador de funções ICEL GV - 2002;
- Osciloscópio Minipa MO - 1262;
- Protoboard;
- Resistores de 470Ω(1), 1kΩ(2), 2kΩ(1), 10kΩ(4), 20kΩ(1), 30kΩ(1), 100kΩ(4), 200kΩ(1) e 1MΩ(2);
- Potenciômetro de 10kΩ(1);
- Capacitor de 100nF(1);
- Diodos 1N4148(2) e zener 10V(1);
- Ampop 741(2).

IV. PARTE EXPERIMENTAL

Nesta experiência analisaremos os amplificadores escalares, circuitos lineares que modificam apenas a amplitude do sinal.

Todos os amplificadores, não-inversor, inversor e diferencial, e outros que derivam destes, buffer e somador, contêm apenas resistores no circuito de realimentação.

Algumas características do desempenho destes amplificadores são comuns a todos e dependem da taxa de realimentação $B = e_- / V_O$.

$$B = \frac{R_i}{R_f + R_i}$$

$$V_{OS} = \frac{V_{IO}}{B}$$

$$R_{out} = \frac{r_o}{1 + AB}$$

$$BW = B \cdot GBP$$

A. Amplificador não-inversor

No amplificador não-inversor o sinal de excitação é aplicado na entrada não-inversora do ampop. Isto significa que o sinal de saída tem a mesma polaridade que o sinal de entrada.

As principais características deste amplificador são:

- Alta resistência de entrada.
- Baixa resistência de saída.
- Ganho de tensão igual ou maior que 1.

Formulário:

$$A_V = \frac{V_O}{V_i} = \frac{R_f}{R_i} + 1$$

$$R_{in} = (1 + AB) \cdot r_i / 2 \cdot r_{icm}$$

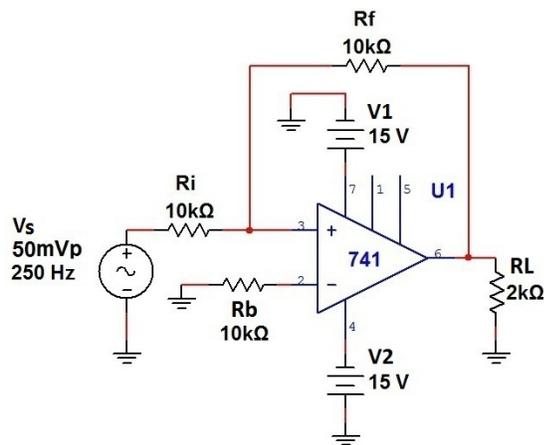


Figura 8. Esquema: Amplificador não-inversor.

PRIMEIRO PASSO - Ajustes iniciais.

- Todos comandos do osciloscópio na posição calibrado.
CH1=50mV/DIV-DC, POS. CENTRAL.
CH2=50mV/DIV-DC, POS. CENTRAL.
TIME BASE: 1ms/DIV.
TRIGGER: CH1, NORMAL, SLOPE+;
- Gerador de funções:
Seno, 50mV_p (obter com um divisor de tensão), 250Hz.

Ao ajustar o gerador de funções, através do CH1 do osciloscópio; observaremos dois ciclos e meio e a amplitude ocupando duas divisões pico-a-pico.

SEGUNDO PASSO - Inicie a montagem com $R_L = 2k\Omega$, $R_i = 10k\Omega$, $R_f = 10k\Omega$ e $R_b = 10k\Omega$.

Observando o sinal de saída através de CH2, a amplitude deste sinal será o dobro do sinal de entrada.

R_f	T	V_{op}	A_V	BW	M	V_{op}	A_V	BW
10k	E	0.1	2	500	E			
20k	Ó	0.15	3	333	D			
100k	R	0.55	11	90.9	I			
200k	I	1.05	21	47.6	D			
1M	C	5.05	101	9.90	O			
Ω	O	V_{pp}	-	kHz		V_{pp}	-	kHz

Tabela I
Resultados: Amplificador não-inversor.

B. Buffer

Um caso particular do amplificador não-inversor é o amplificador de ganho unitário, conhecido como BUFFER. Consiste em fazer $R_f = 0\Omega$ e $R_i = \infty$, resultando em $A_V = (1 + R_f/R_i) = 1$.

A grande utilidade deste amplificador de ganho unitário, é fazer o casamento de impedância. A resistência de entrada do circuito é maior que a resistência de entrada intrínseca do ampop.

PRIMEIRO PASSO - Montar o circuito da figura 9 com a chave J1 fechada.

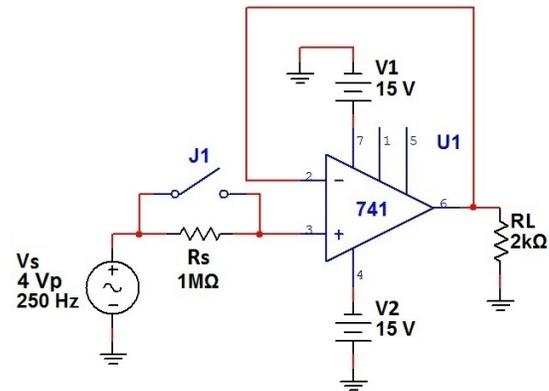


Figura 9. Esquema: Buffer.

SEGUNDO PASSO - Ajustes.

- Osciloscópio:
CH1=1V/DIV; DC; POS CENTRAL
CH2=1V/DIV; DC; POS CENTRAL
BASE DE TEMPO = 1ms/DIV
- Gerador de funções:
SENO, 4V_p, 250Hz.

TERCEIRO PASSO - Resistência de entrada. Para medir a resistência de entrada do buffer adicionamos uma resistência de 1MΩ em série com o circuito e verificaremos a atenuação provocada por este resistor. Para maior precisão na leitura, ocuparemos toda tela do osciloscópio. O sinal de saída deve ser igual ao sinal de entrada e deve ocupar toda a tela (8V_{pp}).

Abrindo a chave J1, a tensão de saída pico-a-pico deveria diminuir devido à queda de tensão em R_S . Quanto menor for a resistência de entrada do circuito, maior será a queda de tensão e, conseqüentemente, menor será a tensão de saída. Podemos calcular a resistência de entrada medindo as tensões de entrada e de saída do buffer.

$$R_{in} = \frac{R_S}{\frac{V_{ipp}}{V_{opp}} - 1}$$

Provavelmente estaremos observando nenhuma atenuação, ou seja, $V_{opp} \cong V_{ipp}$. Isto significa que $R_{in} \gg R_S$, ou $R_{in} \gg 1M\Omega$. Em um ensaio mais aprimorado encontramos $R_{in} \cong 80M\Omega$.

Infelizmente, esta elevadíssima resistência de entrada não pode ser aproveitada plenamente devido ao *offset* provocado

por I_{b+} ao circular através de R_S . Você deve ter notado que a tensão de saída, observada através de CH2, está deslocada para baixo. Você perceberá este deslocamento fechando e abrindo a chave J1.

Além disso, tem o efeito da capacitância de entrada. Esta capacitância pode ser estimada se determinarmos a frequência de corte. Aumente a frequência até que a amplitude do sinal de saída atenuie $3dB$ (5,6 DIV pico-a-pico).

$$C_{in} = 1/(2\pi f_c \cdot R)$$

QUARTO PASSO - Medição incorreta. Voltar a frequência para $250Hz$ e mudar CH2 para e_+ (pino 3 do ampop).

O sinal observado por CH2 caiu pela metade, aproximadamente $2V_p$. Se aplicarmos a Equação de R_{in} acima, acharemos $R_{in} = 1M\Omega$. Este valor corresponde ao valor da resistência de entrada do osciloscópio e não do buffer. (Se estivéssemos utilizando ponta de prova atenuadora $x10$ encontraremos $R_{in} = 10M\Omega$).

Esta experiência mostrou que em circuitos de alta impedância é necessário o emprego de um buffer uma vez que a resistência de entrada do osciloscópio, ou multímetro, pode alterar o comportamento do circuito.

C. Amplificador inversor

Utilizando os mesmos componentes e o mesmo circuito do amplificador não-inversor, construiremos o amplificador inversor. Conforme o diagrama esquemático da figura 10. A diferença está no terminal onde o sinal de excitação será aplicado. O sinal de entrada será aplicado na entrada inversora através de R_i .

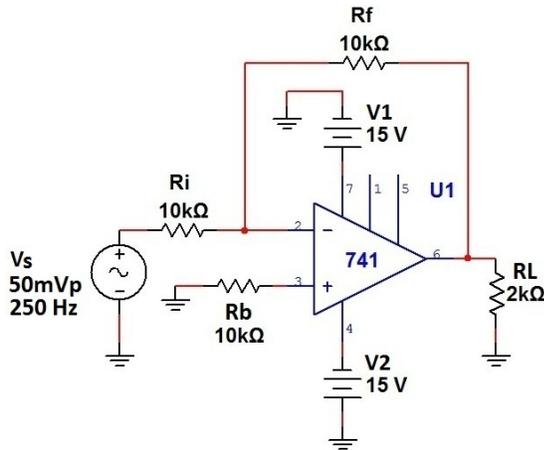


Figura 10. Esquema: Amplificador inversor.

As principais características do amplificador inversor são:

- Inversão de polaridade.
- Resistência de entrada definida por um resistor.
- Ampop trabalha sem tensão de modo comum ($e_- = e_+ = 0$).
- Possibilidade de instalar diodos zener para limitar sinal de saída.
- Ganho de tensão pode ser ajustado desde zero.

$$A_V = \frac{V_O}{V_i} = -\frac{R_f}{R_i}$$

$$R_{in} = R_i$$

A precisão deste amplificador será de $\pm 10\%$, uma vez que utilizamos resistores de $\pm 5\%$. No pior caso teríamos $R_f + 5\%$ e $R_i - 5\%$, ou $R_f - 5\%$ e $R_i + 5\%$, resultando.

$$A_V = -\frac{R_f}{R_i} \left(\frac{0,95}{1,05} \text{ a } \frac{1,05}{0,95} \right)$$

$$A_V = \frac{R_f}{R_i} (0,904 \text{ a } 1,105)$$

$$A_V = A_v(\text{nominal}) \pm 10\%$$

PRIMEIRO PASSO - Inicie a montagem com $R_i = R_f = R_b = 10k\Omega$ e complete a tabela II.

R_f	T	V_{opp}	A_V	BW	M	V_{opp}	A_V	BW
10k	E	0.1	-1	500k	E			
20k	Ó	0.2	-2	333k	D			
100k	R	1	-10	90.9k	I			
200k	i	2	-20	47.6k	D			
1M	C	10	-100	9.9k	O			
Ω	O	V_{pp}	-	Hz		V_{pp}	-	kHz

Tabela II

Resultados: Amplificador inversor.

A largura de banda não é um valor muito preciso porque depende do GBP do ampop.

D. Somador

O amplificador somador inversor é um amplificador de múltiplas entradas onde cada entrada (n) possui ganho de tensão $A_v(n)$ e resistência de entrada $R_{in}(n)$:

$$A_{V(n)} = -\frac{R_f}{R_{i(n)}}$$

$$R_{in(n)} = R_{i(n)}$$

$$offset = \frac{V_{IO}}{B_{\Sigma dc}}$$

$$BW = B_{\Sigma ac+dc} \cdot GBP$$

$$B_{\Sigma} = \frac{1}{1 + \sum |A_{v(n)}|}$$

OBS: Quanto maior for o número de entradas “utilizadas” maior será o erro dc (offset) e menor será a resposta em frequência (BW). Devemos distinguir $B_{\Sigma dc}$ e $B_{\Sigma ac}$.

Para demonstrar a grande utilidade do amplificador de múltiplas entradas, necessitaremos de dois geradores de funções. Mas como isso é difícil, criaremos o nosso próprio gerador de onda quadrada.

O ampop U1, é um multivibrador que gera onda quadrada com amplitude igual a V_{sat} .

O amplificador somador U2, possui duas entradas (poderia ter mais). Na entrada de $30k\Omega$, que apresenta ganho $-R_f/R_{i1} = -1/3$, será aplicada a onda quadrada. A outra

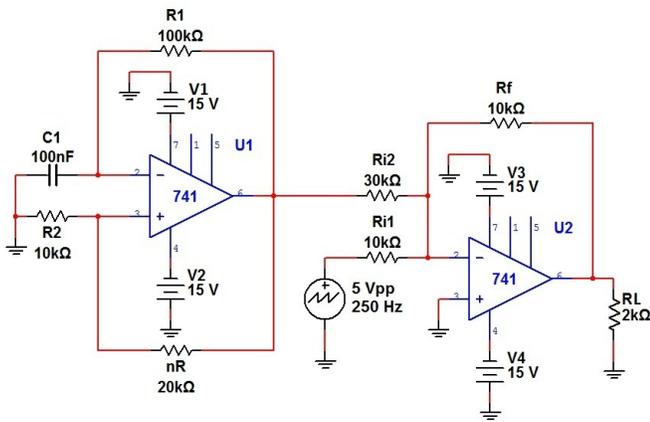


Figura 11. Esquema: Amplificador somador.

entrada, de $10k\Omega$ que possui ganho unitário, será aplicada uma onda triangular de $250Hz$ e $5V_{pp}$.

PRIMEIRO PASSO - Ajustes.

- Osciloscópio:
CH1=5V/DIV; DC; POS. SUPERIOR
CH2=5V/DIV; DC; POS. INFERIOR
BASE DE TEMPO = 2mS/DIV
MODO = CHOPPER
TRIGGER = CH2, AUTO, SLOPE+.
- Gerador de funções: (GF)
TRIANGULAR; $5V_{pp}$; $250Hz$.

SEGUNDO PASSO - Variar um pouco a frequência. do gerador de funções de forma a sincronizar com a onda quadrada.

Se diminuirmos o sinal do GF, observaremos apenas a onda quadrada com amplitude de $5V_p$. Aumentando gradativamente a onda triangular do GF, ela aparecerá na saída do somador sobreposta à onda retangular.

Diminuir a frequência do GF para menos que $1Hz$. A onda quadrada é deslocada para cima e para baixo. O somador pode ser utilizado para ajustar o nível DC de um sinal.

TERCEIRA ETAPA(opcional) - Batimento . Substituir o gerador de onda quadrada por um segundo gerador com onda senoidal de $1kHz$ e $9V$ de pico. Mudar a forma de onda do primeiro gerador de funções para senoidal de $1kHz$ e com amplitude ajustável.

Ajustando corretamente a base de tempo do osciloscópio, podemos medir a frequência do “batimento” que é exatamente a diferença de frequência entre os dois sinais.

Este circuito é muito utilizado nos sistemas de controle industrial para detecção de erro. Em uma das entradas é aplicado o sinal de referência para ser “comparado” com o sinal de realimentação (Feedback) aplicado na outra entrada. Outra aplicação deste circuito é o misturador de áudio usado em karaokê.

E. Amplificador diferencial(opcional)

O amplificador diferencial é muito útil para medir (ou amplificar) sinais flutuantes, principalmente em circuitos tipo

ponte. Ele pode ser utilizado também como amplificador inversor e como não-inversor.

Formulário:

$$R_i = R_1 = R$$

$$R_f = R_2 = m.R$$

$$A_V = \frac{V_O}{(V_2 - V_1)} = m$$

$$R_{in} = R_i$$

O circuito apresentado na figura 12 foi projetado para medir apenas a diferença de temperatura entre os dois sensores $D1$ e $D2$.

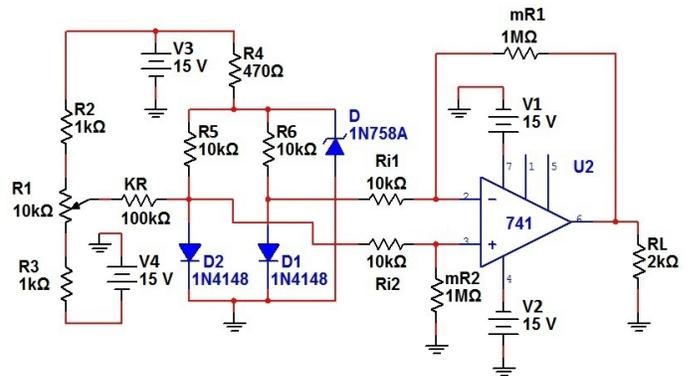


Figura 12. Esquema: Amplificador diferencial.

Para corrente de polarização de $1mA$, a queda de tensão no diodo é $600mV$ e varia com a temperatura na taxa de $2mV/^\circ C$. Como o amplificador diferencial apresenta ganho de 100 (ou $40dB$), a sensibilidade deste sistema será $200mV/^\circ C$.

O sistema de balanceamento da ponte, potenciômetro $P1$ em conjunto com o resistor KR^* , é utilizado para o ajuste de zero.

PRIMEIRO PASSO -

- Ajuste $R1$ até zera a tensão de saída.
- Aqueça $D1$, com o dedo por exemplo, e mantenha $D2$ na temperatura ambiente.

Como a queda de tensão no diodo diminui com o aumento da temperatura, $V1$ diminuirá. Consequentemente $(V2 - V1)$ será positivo. A tensão de saída será positiva e devera variar entre $1V$ e $2V$, o que corresponde uma diferença de temperatura entre o dedo e o ambiente de $5^\circ C$ a $10^\circ C$.

SEGUNDO PASSO -

- Aqueça $D2$ e mantenha $D1$ na temperatura ambiente.

A tensão de saída será negativa uma vez que $V2$ ficará menor que $V1$. Como o diodo é do mesmo tipo, a tensão de saída devera variar entre $1V$ e $2V$ como na etapa anterior.

Podemos inverter a polaridade da tensão de saída simplesmente invertendo as entradas $V1$ e $V2$ do amplificador.

F. Amplificador de ganho ajustável

Sabemos que o ganho dos amplificadores depende apenas da relação entre duas resistências.

Para construir um amplificador de ganho ajustável bastaria substituir uma das resistências por potenciômetro.

Esta solução no entanto, nos obrigaria manter potenciômetros de vários valores em estoque para atender cada projeto, contrariando a tendência atual de padronização e minimização do estoques (em outras palavras, evitar dinheiro parado).

A solução que será apresentada em seguida é adotada pela maioria dos fabricantes de equipamentos e, curiosamente, pouco mencionado nos livros didáticos. Para maiores detalhes consulte “Ajuste de Span e Zero”.

Para demonstrar a grande utilidade do método utilizado, construiremos três amplificadores diferentes com faixa de ajuste do ganho numa relação de 10 : 1 a) 0,1 a 1 b) 1 a 10 e c) 10 a 100. A resistência de entrada foi definida como $10k\Omega$

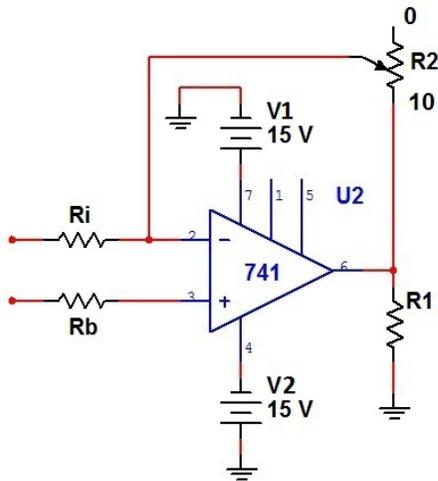


Figura 13. Esquema: Método convencional.

O método convencional nos obrigaria a utilizar três valores de potenciômetro no lugar de R_f : a) $10k\Omega$ b) $100k\Omega$ e c) $1M\Omega$.

O método padrão utiliza um potenciômetro de $4,7k\Omega$ em série com um resistor de 470Ω instalado na saída do ampop, proporcionando uma faixa de ajuste de 11 : 1.

A faixa de ganho é determinado apenas pelo resistor de realimentação R_f : a) $1,0k\Omega$ b) $10k\Omega$ e c) $100k\Omega$.

Com este método precisaremos ter em estoque apenas resistores, muito mais fácil e barato do que manter potenciômetros. Além desta grande vantagem, evitamos a utilização de valores altos de resistência. Valores altos de resistência são mais susceptíveis à ruídos e interferências.

PRIMEIRO PASSO -

- Montar o circuito conforme o diagrama esquemático da figura 14 com $R_f = 1,0k\Omega$. Por não haver no laboratório potenciômetros de $4,7k\Omega$, utilize um potenciômetro de $10k\Omega$ para fins de constatação, observando que as relações de ganho máximo e mínimo não serão mais as mesmas.

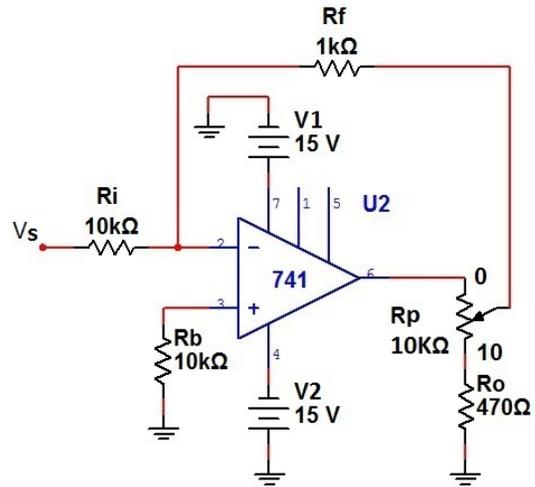


Figura 14. Esquema: Método padrão de ajuste.

- Ajustar o gerador de funções em triangular ou senoidal, $100Hz$, $2V$ de pico ($4V_{pp}$).
- Ajustar o potenciômetro na posição 10 e medir o ganho máximo desta faixa.
- Ajustar o potenciômetro na posição 0, medir a tensão de saída e calcular o ganho mínimo desta faixa.

$$A_{Vmax} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$A_{Vmin} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$A_{Vmax}/A_{Vmin} = \underline{\hspace{2cm}}$$

SEGUNDO PASSO - Substituir R_f para $10k\Omega$ e diminuir a tensão de entrada para $50mV_{pp}$ (usar um divisor de tensão). Repetir a experiência.

$$A_{Vmax} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$A_{Vmin} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$A_{Vmax}/A_{Vmin} = \underline{\hspace{2cm}}$$

TERCEIRO PASSO - Substituir R_f para $100k\Omega$. Repetir a experiência.

$$A_{Vmax} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$A_{Vmin} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$A_{Vmax}/A_{Vmin} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Observamos que a faixa de ajuste é de aproximadamente 11 : 1, exatamente a relação $[(R_p/R_o) + 1] : 1$. Nos casos onde $R_f \gg R_{span}$, esta relação é satisfatoriamente precisa; somente para o caso de $R_f = 1k\Omega$ esta relação deixa de ser precisa.

QUARTO PASSO - Substitua R_O para $10k\Omega$ e repita a experiência.

$$A_{Vmax} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$A_{Vmin} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$A_{Vmax}/A_{Vmin} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Observações finais: O potenciômetro de $4,7k\Omega$ é mais utilizado no circuito de ajuste porque proporciona baixa resistência equivalente do divisor de saída (span) sem sobrecarregar muito o ampop. Podemos considerar este circuito com dois atenuadores (divisores resistivos) em cascata como mostra a figura 15.

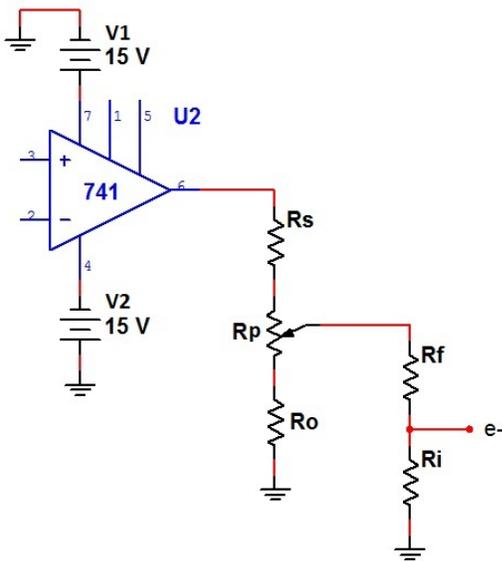


Figura 15. Esquema: Atenuadores em cascata.

REFERÊNCIAS

- [1] Sedra, Adel S.; Smith, Kenneth C. "Microeletrônica", 5ª Edição. Editora Pearson Prentice Hall, RJ - 2007.
- [2] Boylestad, Robert L.; Nashelsky, Louis. "Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos", 8ª Edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.