

FUNDAMENTOS DO AMPLIFICADOR OPERACIONAL

BARROS, E. C.¹, NASCIMENTO, L. A. F.¹, MOURA, A. F. L.¹, EGOAVIL, C. J.²

¹Monitor (a) da disciplina de ELETRÔNICA II - DAEE, Fundação Universidade Federal de Rondônia, Sala 206 - 2C, Porto Velho, Rondônia, Brasil (e-mail: eletronicamonitoria@gmail.com)

²Professor do Curso de Engenharia Elétrica - DAEE, Fundação Universidade Federal de Rondônia, Sala 206 - 2C, Porto Velho, Rondônia, Brasil (e-mail: ciro.egoavil@unir.br)

OBJETIVOS

- Conhecer e se familiarizar com o amplificador operacional.
- Aprender a utilizar um ampop 741.
- Construir as configurações básicas do ampop.
- Perceber qual a defasagem existente entre entrada e saída de cada configuração.
- Comprovar o ganho característico de cada configuração do ampop.
- Construir osciladores através de um amplificador operacional.
- Realizar as comparações necessárias com a teoria para fins de comprovação.

I. INTRODUÇÃO TEÓRICA

Um amplificador operacional, ou ampop, é um amplificador diferencial de ganho muito alto com impedância de entrada muito alta e impedância de saída baixa. É comum o amplificador operacional ser utilizado para a obtenção de variações na tensão (amplitude e polaridade), em osciladores, filtros e diversos tipos de circuitos de instrumentação. Um ampop contém alguns estágios amplificadores diferenciais para atingir um ganho de tensão muito alto [1].

A figura 1 mostra um ampop básico com duas entradas e uma saída como resultado da utilização de um estágio de entrada de amplificador diferencial. Lembre-se que cada entrada resulta ou em uma saída de mesma polaridade (ou fase) ou em uma saída com polaridade (ou fase) oposta, dependendo do sinal: se ele está aplicado à entrada positiva (+) ou à entrada negativa (-) [1].

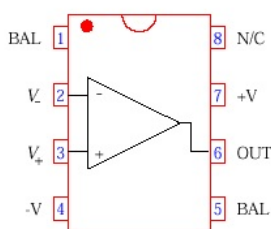


Figura 1. Distribuição de pinos AMPOP

A. COMPARADORES

Esta é uma das funções mais “clássicas” em que os ampops são aplicados. Dadas tensões nas entradas, faz a saída saturar positivamente caso a entrada positiva seja maior que a negativa e vice-versa [1].

1) Comparador com histerese: Também chamado circuito disparador de Schmitt (Schmitt Trigger), este é um circuito com realimentação positiva. Ao invés de se fazer a comparação simples entre dois sinais, acrescenta-se um limite a mais ou a menos em torno de um dos sinais. O acréscimo ou decréscimo depende do estado atual da saída.

Esse comportamento é útil quando queremos comparar dois sinais ruidosos. Se não utilizássemos a janela de histerese na comparação, o circuito chavearia o estado da saída rapidamente quando os níveis dos sinais estivessem próximos um do outro [2].

B. AMPLIFICADOR INVERSOR

O amplificador de ganho constante mais amplamente utilizado é o amplificador inversor, mostrado na figura 2. 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 [2].

$$\frac{V_0}{V_i} = -\frac{R_f}{R_i} \quad (1)$$

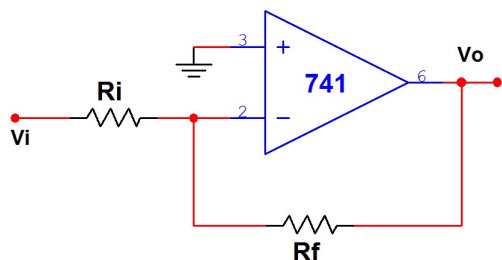


Figura 2. Amplificador Inversor

C. AMPLIFICADOR NÃO INVERSOR

A conexão da figura 3 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 [2].

$$\frac{V_0}{V_i} = 1 + \frac{R_f}{R_i} \tag{2}$$

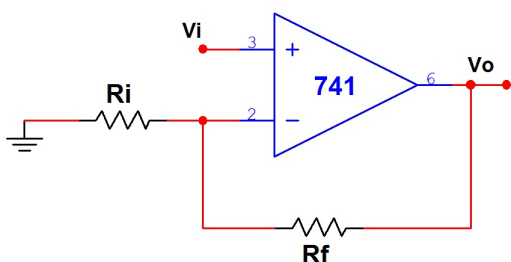


Figura 3. Amplificador Inversor

D. AMPLIFICADORES OPERACIONAIS COMO OSCILADORES

Em muitas aplicações é necessário gerar um sinal, que pode ter as mais diversas formas, retangular, senoidal, triangular, etc. Entretanto, o único sinal disponível é contínuo da própria alimentação, daí há necessidade dos osciladores, estes são de grande importância em sistemas eletrônicos [3].

Os osciladores podem ser classificados como de relaxação, que produzem sinais não lineares e senoidais que produzem sinais lineares. Estes ainda podem ser divididos nas mais diversas formas de circuitos, sendo que algumas serão detalhadas neste roteiro [3].

- Osciladores de relaxação
 - Multivibradores astveis;
 - Geradores de onda triangulares;
 - Geradores de onda dente de serra;
- Osciladores senoidais
 - Ponte de Wien;
 - Oscilador de quadratura;
 - Oscilador duplo T;

→ Oscilador Colpitt;

1) Multivibrador astável: É um gerador de onda retangular, é utilizado para produzir pulsos na saída a partir de um sinal contínuo, utilizado na alimentação. Este tipo de circuito é muito comum em circuitos digitais, onde são usados como clock [3].

$$T = 2R_f C_1 \ln\left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) \tag{3}$$

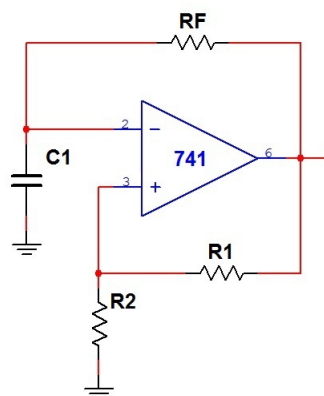


Figura 4. Exemplo de multivibrador astável

Seu funcionamento é bastante simples, o tempo de comutação é feito através da realimentação negativa, onde o capacitor carrega-se exponencialmente até atingir a referência positiva UTP, neste ponto o capacitor começa a descarregar até atingir a referência negativa LTP [2].

Observe que há uma semelhança com um comparador com histerese, onde o sinal de saída comuta quando o sinal de entrada encontra uma referência. Porém o sinal de entrada é fornecido pela carga e descarga do capacitor e as referências pelo divisor de tensão na entrada não-inversora.

2) Ponte de Wien: Se um sinal senoidal em baixas frequências for o desejado o projetista poderá recorrer a um clássico entre os osciladores, trata-se da ponte de Wien, capaz de fornecer um sinal senoidal a partir de um sinal DC com baixíssima distorção.

$$F = \frac{1}{2\pi RC} \tag{4}$$

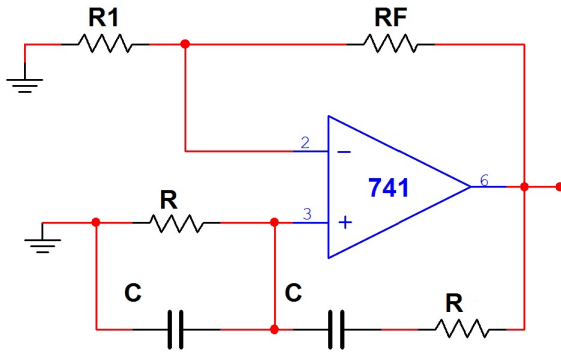


Figura 5. Exemplo de oscilador ponte wien.

Uma condição é essencial para que o circuito oscile, o ganho deve ser 3. Assim:

$$A_V = 1 + \frac{R_F}{R_1} = 3 \quad (5)$$

II. MATERIAIS UTILIZADOS

- Osciloscópio Digital Tektronix TBS 1072B
- Gerador de Função
- Gerador de Tensão
- PROTOBOARD
- 01 Resistor 1kΩ
- 01 Resistores De 2kΩ
- 02 Resistores De 10kΩ
- 02 Resistores De 15kΩ
- 02 Resistores De 20kΩ
- 02 Capacitor de 10nF
- 01 Capacitor de 100nF
- 01 Diodo 1N4148 ou similar
- 01 Ampop 741

III. PARTE EXPERIMENTAL

Antes de dar início a construção dos circuitos com ampos, familiarize-se com seu uso correto e mais prático através dos passos a seguir nos tópicos A, B e C.

A. INSTALAÇÃO DO AMPOP NO PROTOBOARD

- 1º passo: Instalar o 741 (mini DIP) no protoboard, com o pino 1 voltado para o lado esquerdo inferior (lado chanfrado no lado esquerdo).
- 2º passo: Instalar os fios da alimentação. +15V ao pino 7 do 741 (fio vermelho) e -15V ao pino 4 do 741 (fio verde) e 0V ao barramento GND do protoboard (fio preto). Manter a alimentação desligada toda vez que for montar ou modificar um circuito.
Se o protoboard possuir barramento duplo (régua estreita com dois barramentos), alimentar o primeiro barramento superior com +15V, o primeiro barramento inferior com -15V e os dois barramentos centrais com GND. Uma vez alimentado os barramentos do protoboard, alimentar o 741 através de pequenos fios (jumps), também coloridos, entre o barramento e o pino

correspondente. Desta forma conseguiremos instalar diversos Circuitos Integrados com mais organização.

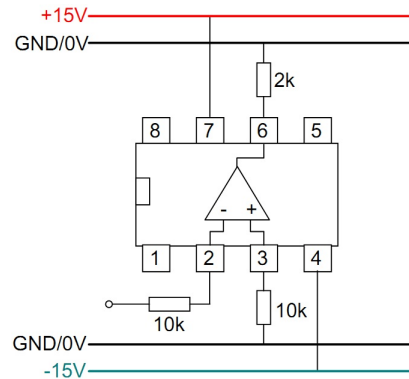


Figura 6. Representação esquemática do ampop.

Para interligar os componentes eletrônicos, utilize fios rígidos, encapados, de bitola correspondente a 22, 24 ou 26

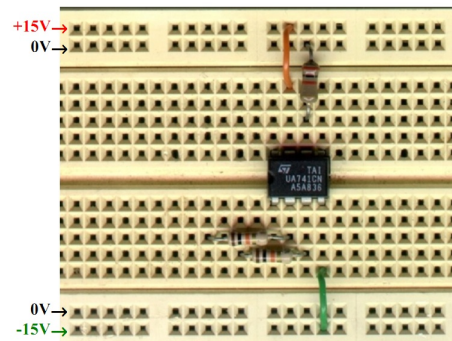


Figura 7. Representação esquemática do ampop.

AWG. Os leads dos componentes como resistores, capacitores, diodos, transistores, etc, devem apresentar a bitola correspondente. Endireitar os leads dos componentes e a parte desencapada dos fios com o alicate de bico. Não force a introdução dos leads tortos nos contatos do protoboard, se isto acontecer, os contatos do protoboard serão danificados permanentemente.

A fiação da alimentação deve ser bem feita e de modo a não atrapalhar a instalação dos demais componentes uma vez que ela permanecerá em quase todas as montagens. É boa prática não desconectar a alimentação quando for desmontar um circuito para montar outro.

- 3º passo: Planifique a construção do circuito. Esboce mentalmente um layout da montagem. Procure manter a disposição dos componentes como no diagrama esquemático.
- 4º passo: Completar o circuito conforme o diagrama esquemático utilizando o menor número de fios possível e de forma a facilitar a substituição do ampop.

B. OSCILOSCÓPIO

A análise no domínio do tempo consiste em observar simultaneamente as formas de onda de entrada e saída, $V_{i(t)}$ e $V_{O(t)}$, através de um osciloscópio de dois canais. Para facilitar a execução das experiências é comum adotar a seguinte convenção: Sinal de entrada = canal CH1. Sinal de saída = canal CH2.

Uma vez que a alimentação padrão dos circuitos a ampop é $\pm 15V$, todos os sinais estarão compreendidos dentro desta faixa. Se calibrarmos o osciloscópio em $5V/DIV$, acoplamento DC (importante), e com os traços centrados na tela, qualquer sinal será captado pelo osciloscópio dentro das seis divisões centrais da tela.

O acoplamento DC permite verificar a presença de nível contínuo e, por exemplo, medir a tensão da fonte de alimentação. Além disso, o acoplamento AC pode distorcer a forma de onda nos sinais de baixa frequência.

O sincronismo (*Trigger*) deve ser feito preferencialmente pelo sinal de entrada, CH1, modo NORMAL ou AUTO, SLOPE+. Neste tipo de ensaio o sinal de excitação pode ser senoidal, triangular ou quadrada.

C. LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS

- Se o ampop estiver saturado positivamente e não responder ao sinal de excitação, verifique a alimentação negativa (pino 4 = $-15V$). Se estiver correto verifique se o terminal da entrada não-inversora (pino 3) está corretamente conectado ao circuito.
- Se o ampop estiver saturado negativamente, verifique primeiro a alimentação positiva (pino 7 = $+15V$). Se estiver correto, verifique o terminal da entrada inversora.
- Se tudo isto estiver correto, verifique a temperatura do ampop. Em condições normais a temperatura do corpo (case) deverá ser próxima da temperatura ambiente.

D. CONFIGURAÇÕES

Com os passos anteriores já realizados e sempre levando em consideração as observações citadas, daremos início a construção de algumas configurações com o ampop. Em cada configuração a seguir, faça as observações requeridas e também obtenha dados a mais para uma comparação mais detalha com a teoria envolvida.

- Comparador inversor: 1) Ligar primeiro a fonte de alimentação de $15V$ e depois o gerador de sinais (V_1) e as pontas de prova do osciloscópio.
2) Ajustar o gerador de funções em: senoidal, $100Hz$, $4V$ pp.
3) Observe $V_i = f(t)$ e $V_O = f(t)$. Faça um posicionamento, vertical e horizontal adequado. Desenhe as formas de onda indicando o nível zero, amplitudes e tempos.

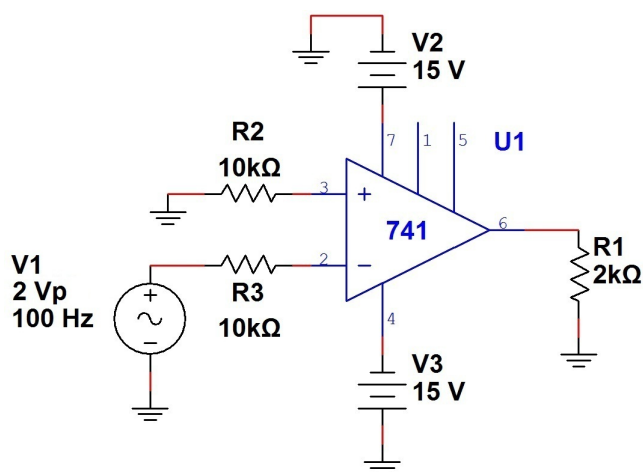


Figura 8. Comparador inversor [4].

No ampop em malha aberta o ampop estará sempre saturado (e_+ : entrada não-inversora, e_- : entrada inversora).

$$V_{sat+} = (e_+ - e_-) > 0 \quad (6)$$

$$V_{sat-} = (e_+ - e_-) < 0 \quad (7)$$

Observe no oscilograma que o ampop muda de estado quando $e_- = e_+$, neste caso igual a zero. Observe a defasagem presente no circuito.

- Mude o comando do osciloscópio para operação x-y ($x = V_i$). Desenhe a forma de onda indicando corretamente os eixos x-y (ou ponto 0-0). Você estará observando a função de transferência deste circuito. Para centrar o eixo, mude a chave AC-GND-DC de CH1 para GND. Posicione o traço horizontalmente atuando no botão HORIZONTAL POSITION. Volte esta chave para posição DC.
- Mude a chave AC - GND - DC de CH2 para posição GND. Posicione o traço verticalmente atuando no botão VERTICAL POSITION de CH2. Volte esta chave para posição DC. Observe que no eixo X o sinal ocupa duas divisões de $2V/DIV$, ou seja, $4V_{pp}$. No eixo Y o sinal varia entre V_{SAT+} e V_{SAT-} , não necessariamente simétricas. O oscilograma indica $V_{SAT+} = +14V$ e $V_{SAT-} = -13,5V$.

2) Comparador não-inversor: Observe que a saída está saturada e também que não há mais defasagem. Não desmonte o circuito. Complete o circuito conforme o diagrama esquemático do amplificador não-inversor instalando um resistor entre o terminal de saída e o terminal de entrada inversor, fechando uma realimentação negativa.

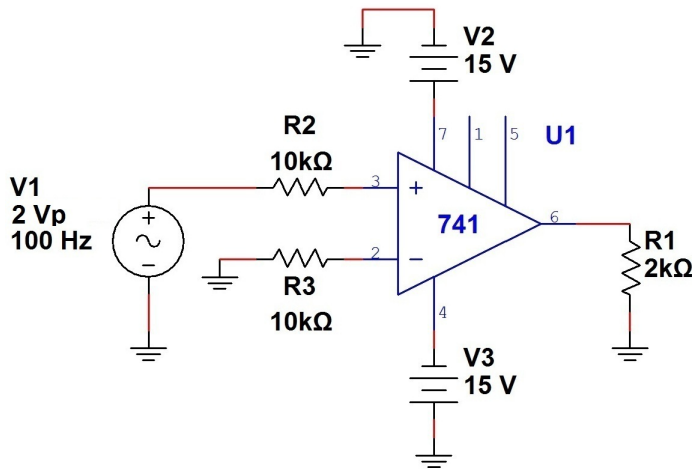


Figura 9. Comparador não-inversor [4].

3) Amplificador não-inversor: O sinal de saída não satura devido à realimentação negativa e tem a mesma polaridade do sinal de entrada porque estamos aplicando o sinal de excitação na entrada não-inversora do ampop. Observe através do osciloscópio que neste amplificador:

$$\frac{V_O}{V_i} = \frac{R_f}{R_i} + 1 = \frac{20k}{10k} + 1 = 3 \quad (8)$$

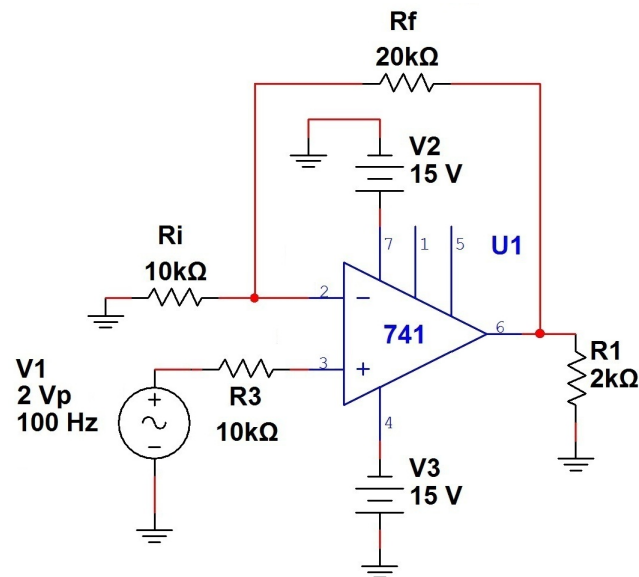


Figura 10. Amplificador não-inversor[4].

4) Amplificador inversor: O sinal de saída está invertido em relação ao sinal de entrada porque o sinal de excitação é aplicada na entrada inversora do ampop. Observe através do osciloscópio que neste amplificador:

$$\frac{V_O}{V_i} = -\frac{R_f}{R_i} = -\frac{20k}{10k} + 1 = -2 \quad (9)$$

O circuito do amplificador inversor e não-inversor é o mesmo. Muda apenas o terminal onde é aplicado o sinal de entrada.

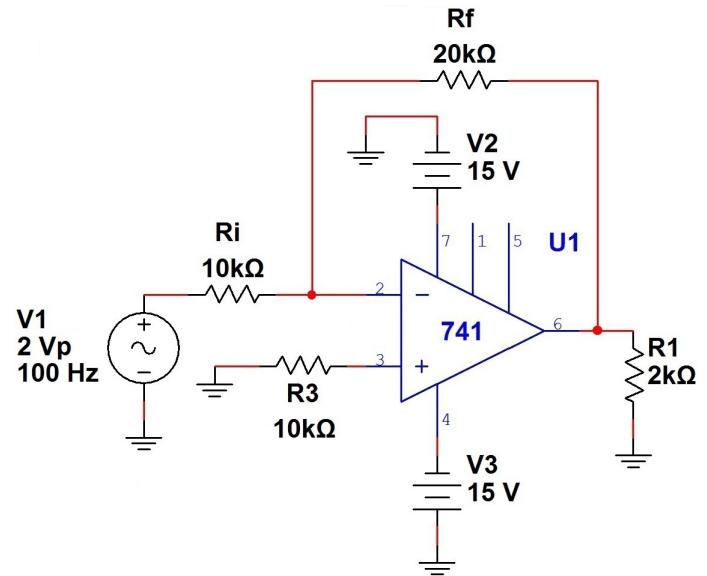


Figura 11. Amplificador inversor [4].

5) Comparador com histerese não-inversor: Observe que o sinal de saída está saturado, tem a mesma polaridade que o sinal de entrada e muda de estado em dois níveis diferentes do sinal de entrada (dois pontos de trip) formando um ciclo de histerese. Devido à realimentação positiva, a comutação é mais rápida.

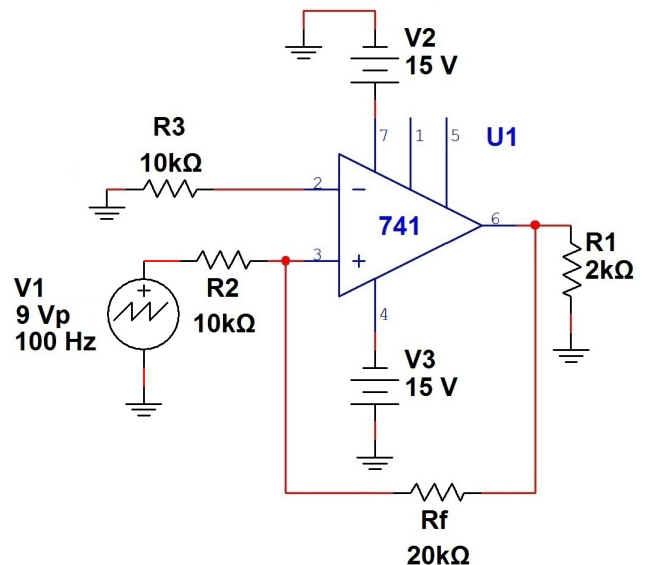


Figura 12. Comparador com histerese não-inversor [4].

6) Comparador com histerese inversor: Observe a característica inversora deste circuito e a histerese menor. Se você mudar CH2 para e+, você perceberá que o ampop muda de estado exatamente quando e=e+. O diagrama

esquemático do comparador com histerese (realimentação positiva) é muito parecido com o diagrama esquemático do amplificador (realimentação negativa). O comportamento do circuito é muito diferente devido à diferença fundamental no tipo de realimentação.

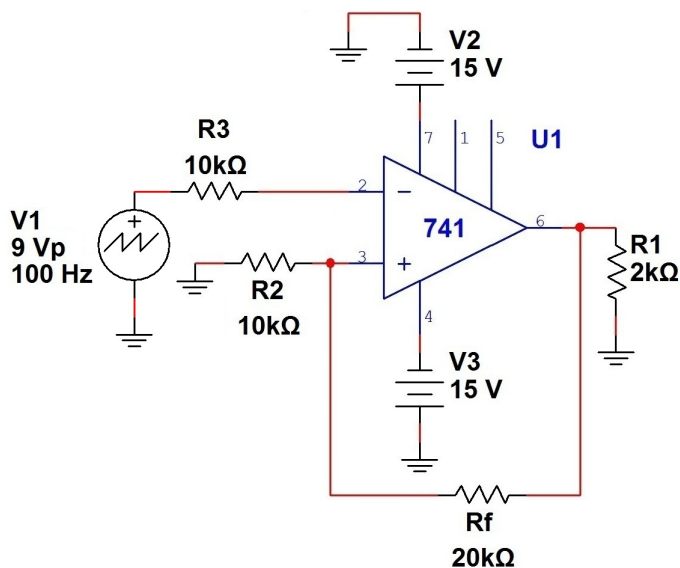


Figura 13. Comparador com histerese inversor [4].

7) Multivibrador (oscilador de relaxação): Este circuito é um oscilador e não necessita do gerador de funções para funcionar.

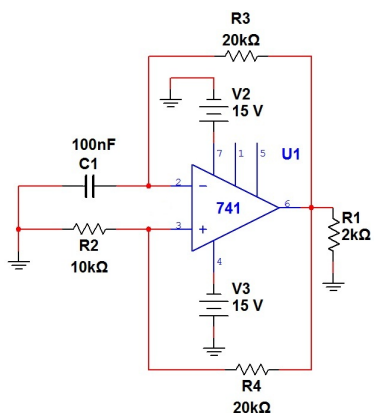


Figura 14. Multivibrador [4].

Neste circuito existem simultaneamente os dois tipos de realimentação: positiva e negativa. A instabilidade neste tipo de circuito se reflete em uma oscilação.

$$F = \text{_____} Hz \quad (10)$$

A frequência de oscilação depende do produto $R2 * C1$ e de V_{SAT} . Uma vez que V_{SAT} não é um valor preciso, esta frequência não será precisa.

- Complete o circuito adicionando um diodo 1N4148 e um resistor de 1KΩ.

- Inverta a polaridade do diodo. Verifique se a relação entre o intervalo alto e o intervalo baixo é próximo do valor entre a resistência de 20KΩ e 1KΩ.
- 8) Oscilador ponte Wien: Obs.: Se o circuito não oscilar, instale um resistor de 1MΩ em paralelo à R_i .

- Meça a amplitude e a frequência do sinal de saída. Pela teoria, a frequência de oscilação é

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi R_2 C_1} = 1,061 KHz$$

e a amplitude igual a V_{SAT} .

$$f_{osc\ medido} = \text{_____} Hz \quad (11)$$

O ganho de tensão crítico neste circuito é 3. Abaixo de 3, o circuito não oscila. Muito acima de 3 a distorção aumenta. Para aumentar o ganho de tensão, basta aumentar R_3 ou diminuir R_i .

- Instalar um resistor de 100KΩ em paralelo à R_i .

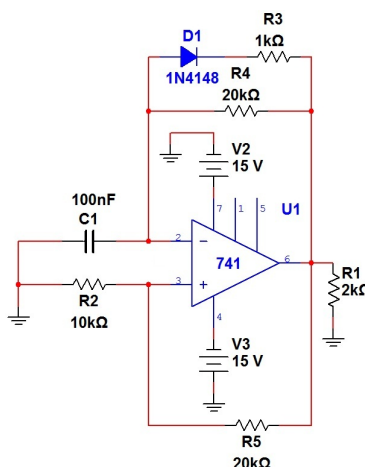


Figura 15. Multivibrador com diodo.

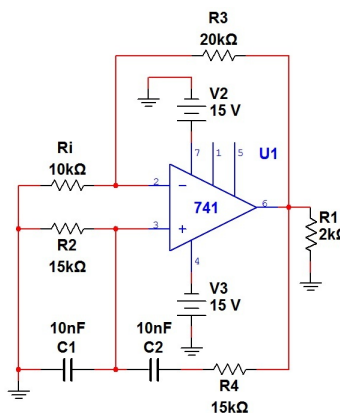


Figura 16. Oscilador ponte wien.

Referências

- [1] Boylestad, Robert L.; Nashelsky, Louis. “Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos”, 8a Edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.
- [2] “Comparadores”. <http://flip.flop.nom.br/circuitos/comparador>
- [3] Silva, Clodoaldo. “Amplificadores operacionais como osciladores”, 2007. <http://clubedaeletrotechnica.blogspot.com/>
- [4] Sedra, Adel S.; Smith, Kenneth C. “Microeletrônica”, 5a Edição. Editora Pearson Prentice Hall, RJ - 2007.