

# COMPARADORES (COMUTADORES)

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

## I. OBJETIVOS

- Observar na prática o funcionamento do diversos tipos de comparadores.
- Realizar as comparações necessárias com a teoria para constatação.

## II. INTRODUÇÃO

A excursão máxima da tensão de saída é limitada pelos valores de saturação do ampop (portanto, pela tensão de alimentação do mesmo  $\Rightarrow \pm V_{CC}$ ). Assim sendo, podemos dizer que um comparador de tensão converte sinais de forma analógica em sinais de forma binária ou quadrada, o que pode ser feito, como o nome indica, comparando um sinal de entrada analógico com uma tensão de referência normalmente fixa.

O 741 utilizado com ganho total (100000), somente tem aplicação como comparador de tensão. Neste caso, uma pequena diferença de tensão entre as entradas (+) e (-) é amplificada 100000 vezes, levando a tensão de saída a um valor próximo da tensão de alimentação positiva ou negativa, dependendo do sinal da diferença e da configuração do circuito como inversor ou não-inversor.

Os tipos básicos de comparadores são:

- Detector de nível zero, com e sem inversão e sem histerese;
- Detector de nível zero, com e sem inversão e com histerese;
- Detector de nível, com e sem inversão e sem histerese;
- Detector de nível, com e sem inversão e com histerese.

## III. MATERIAIS UTILIZADOS

- Gerador de Tensão DC Instrutherm FA - 3030;
- Gerador de funções ICEL GV - 2002;
- Osciloscópio Minipa MO - 1262;
- Protoboard;
- Resistores de  $470\Omega(1)$ ,  $1k\Omega(1)$ ,  $2k\Omega(1)$ ,  $10k\Omega(4)$ ,  $20k\Omega(1)$ ,  $100k\Omega(4)$ ,  $200k\Omega(1)$  e  $1M\Omega(2)$ ;
- Potenciômetros ou trimpots de  $4k7\Omega(1)$  e  $10k\Omega(1)$ ;
- Capacitor de  $100nF(1)$ ;
- Diodos 1N4148(2) e zener 1N758A(1);
- Ampop 741.

## IV. PARTE EXPERIMENTAL

A função do comparador é indicar se um sinal ( $V_i$ ) é maior ou menor que outro tomado como referência ( $V_{ref}$ ).

Neste tipo de circuito o ampop trabalha em malha aberta (sem realimentação) ou com realimentação positiva e estará sempre saturado.

$$V_O = V_{sat+} \Leftrightarrow e_+ > e_- \text{ ou } (e_+ - e_-) > 0$$

$$V_O = V_{sat-} \Leftrightarrow e_+ < e_- \text{ ou } (e_+ - e_-) < 0$$

Uma vez que a saída do ampop estará sempre saturada, o objetivo da análise nestes circuitos é determinar qual o valor (ou valores) de  $V_i$  que provocam a mudança de estado no comparador. Este valor (ou valores) é denominado Ponto de Trip (TP - Trip Point).

### A. Comparador simples

O comparador mais simples utiliza as duas entradas do ampop. Numa das entradas é aplicado o sinal a ser comparado,  $V_i$ , e na outra entrada, o sinal de referência,  $V_{ref}$ . Neste circuito, o ponto de trip é:

$$V_{iTrip} = V_{ref}$$

O sinal de entrada  $V_i$  (variável entre  $-10... 0... +10V$ ) será obtido através de um potenciômetro de  $4,7k\Omega$  ou através de um gerador de funções.

A tensão de referência,  $V_{ref} = -5V$  ou  $+5V$ , será obtida através de um divisor resistivo.

Na saída do ampop instalaremos uma carga sinalizadora, um resistor em série com dois diodos emissores de luz (LED) ligados em antiparalelo de forma que indiquem:

Vermelho = Positivo.

Verde = Negativo.

Para testar o sinalizador:

- 1) Alimente a carga com  $+15V$ ; o LED vermelho deverá acender, se não acender, mude a polaridade do LED vermelho; o LED verde deverá estar apagado.
- 2) Mude a alimentação para  $-15V$ ; o LED verde deverá acender e o LED vermelho apagar.

Não desmonte estes divisores e a carga sinalizadora porque eles serão utilizados em várias experiências.

**PRIMEIRO PASSO** - Montar o circuito da figura 1.  $V_2 = V_i$ ,  $V_1 = V_R = +5V$ .

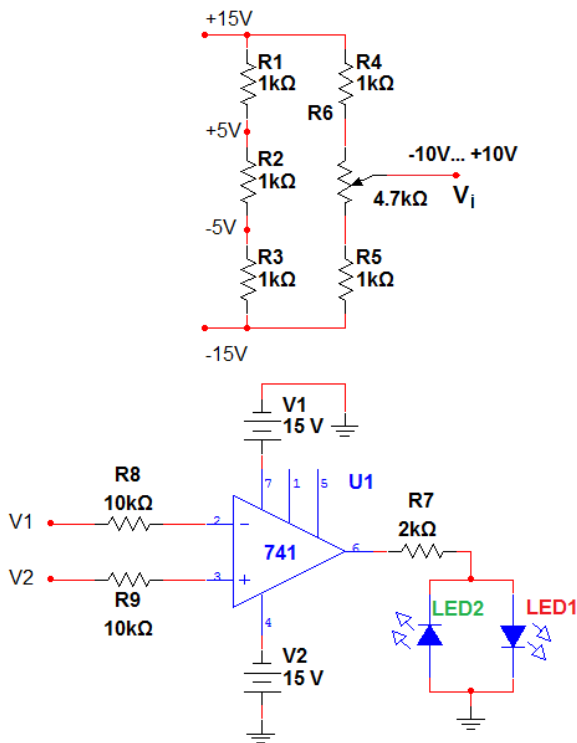


Figura 1. Esquema: Comparador simples.

Variar  $V_i$  de  $-10$  a  $+10V$  e voltar para  $-10V$ . Medir o valor de  $V_{REF}$  e  $V_i$  que provoca o *trip*.

$$V_{REF}(Medido) = \text{_____}V$$

$$V_{iTRIP} = \text{_____}V$$

Observe que o ampop muda de estado quando o sinal de entrada  $V_i$  for exatamente igual ao valor de referência e tem característica não-inversora.

$$V_i > V_{TRIP} \Rightarrow V_O = V_{SAT+} \Rightarrow \text{VERMELHO}$$

$$V_i < V_{TRIP} \Rightarrow V_O = V_{SAT-} \Rightarrow \text{VERDE}$$

**SEGUNDO PASSO** - Comparador inversor:  $V_1 = V_i$  e  $V_2 = V_{REF}$ .

Se invertermos  $V_i$  com  $V_{REF}$ , obteremos o mesmo valor  $V_{iTRIP} = V_{REF}$ , porém, com característica inversora:

$$V_i > V_{TRIP} \Rightarrow V_O = V_{SAT-} \Rightarrow \text{VERDE}$$

$$V_i < V_{TRIP} \Rightarrow V_O = V_{SAT+} \Rightarrow \text{VERMELHO}$$

**TERCEIRO PASSO** - Substituir  $V_i$  por um gerador de funções. Onda triangular com  $9V$  de pico e  $100Hz$ .

Observe  $V_O(t)$  e  $V_i(t)$ . Em seguida observe  $V_O = f(V_i)$  através do osciloscópio no modo X-Y. Os dois canais CH1 e CH2 em  $5V/DIV-DC$ .

Repita a experiência diminuindo a frequência para menos de  $1Hz$ .

Não desmonte os divisores ( $V_i$  e  $V_{ref}$ ) e nem a carga sinalizadora.

### B. Comparador com entrada tipo somador (Inversor)

Este comparador utiliza apenas uma das entradas do ampop. Os dois sinais são aplicados através de um divisor resistivo.

$$V_{iTRIP} = -\frac{R_i}{R_{ref}}V_{ref}$$

$$V_{iTRIP} = -V_{ref} p/ R_i = R_{ref}$$

Uma vez que o sinal de entrada é aplicada na entrada inversora, o circuito terá característica inversora.

$$V_i < V_{REF} \Rightarrow V_O = V_+ = +9V$$

$$V_i > V_{REF} \Rightarrow V_O = V_- = -0,7V$$

$V_i$  e  $V_{REF}$  devem ser fontes de tensão firmes (saída de ampop por exemplo). Se isto não for possível, os resistores  $R_i$  e  $R_f$  devem apresentar resistência elevada.

**PRIMEIRO PASSO** - Montar o circuito da figura 2, sem o diodo zener de  $10V$  (1N758A).

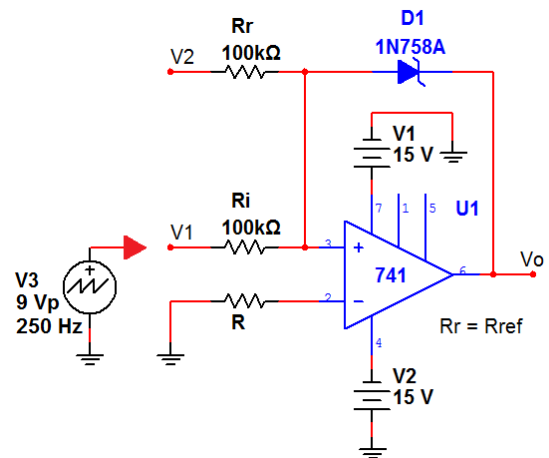


Figura 2. Esquema: Comparador somador.

Medir  $V_{ref}$ . Variar  $V_i$  e medir esta tensão quando ocorrer o *trip*.

$$V_{REF} = \text{_____}V$$

$$V_{iTRIP} = \text{_____}V$$

Resultado: Se  $V_{REF} = +5V$ , obteremos  $V_{iTRIP} = -5V$  (polaridade oposta). Se  $V_{REF} = -5V$ , obteremos  $V_{iTRIP} = +5V$ .

Medir o potencial da entrada inversora  $e_-$  exatamente no instante que ocorrer o *trip*. Esta tensão deverá ser  $0V$ , exatamente o potencial da entrada não-inversora.

OBS: Faremos esta medição somente em caráter didático, desobedecendo a recomendação de nunca tocar os terminais de entrada do ampop.

$$trip e_- = \text{_____}V$$

Não desmonte este circuito. Instale o diodo Zener.

**SEGUNDO PASSO** - Comparador com limitador da tensão de saída.

No caso particular de termos a entrada não-inversora aterrada, podemos utilizar Zener no elo de realimentação negativa para limitar a tensão de saída e consequentemente garantir terra virtual.

Proceder como no item anterior. Observe que o ponto de *trip* não alterou, porém, a tensão de saída está limitada em  $-0,7V / +9V$  (medir com multímetro). Observe ainda que o potencial  $e_-$  permanece igual a zero em toda faixa de  $V_i$ , ou seja, a entrada inversora do ampop funciona como terra virtual.

$$\begin{aligned} V_{REF} &= \text{_____} V \\ V_{iTrip} &= \text{_____} V \\ e_- &= \text{_____} V \end{aligned}$$

**TERCEIRO PASSO** - Substituir  $V_i$  pelo gerador de funções (TRIANGULAR,  $9V_p$ ,  $250Hz$ ).

Observe  $V_i(t)$  e  $V_O(t)$  através do osciloscópio. CH1= $V_i(t)$  e CH2= $V_O(t)$ .

CH1=5V/DIV, DC, POS CENTRAL  
CH2=5V/DIV, DC, POS CENTRAL  
BASE DE TEMPO= 1mS/DIV  
TRIGGER=CH1, SLOPE+, AUTO

Mude o comando do osciloscópio para o MODO X-Y.

Posicione o ponto 0 – 0 no centro da tela. Com a chave AC-GND-DC do CH1 na posição GND, atuar na HORIZ. POS. Com CH2 na posição GND atuar na VERT. POS. de CH2. Em seguida volte a chave para posição DC para os dois canais.

Repita a experiência com um sinal de baixíssima frequência (menor que  $1Hz$ ).

### C. Comparador com histerese

Através da realimentação positiva provocamos duas alterações no comportamento do comparador:

- A transição de uma saturação para outra é muito mais rápida e abrupta. Não existe indecisão ao mudar de estado.
- Existirão dois pontos de *trip*: o *trip* superior UTP e o *trip* inferior LTP formando um ciclo de HISTERESE.

O comparador com histerese convencional, apresentado na figura 3, pode ser utilizado como comparador inversor e não-inversor mas o valor da histerese não é o mesmo para os dois circuitos.

Para contornar este problema a entrada deste circuito é modificada para trabalhar no modo diferencial (semelhante ao amplificador diferencial). Desta forma o comparador pode trabalhar como comparador inversor, não-inversor e diferencial, apresentando a mesma histerese nas três configurações.

Além desta modificação utilizaremos o método padrão de ajuste para ajustar a histerese. Um divisor de tensão instalado na saída do ampop como mostra a figura 4. Este divisor proporcionará uma faixa de ajuste na histerese de aproximadamente  $[(R_p/R_O) + 1] : 1 = 11 : 1$ .

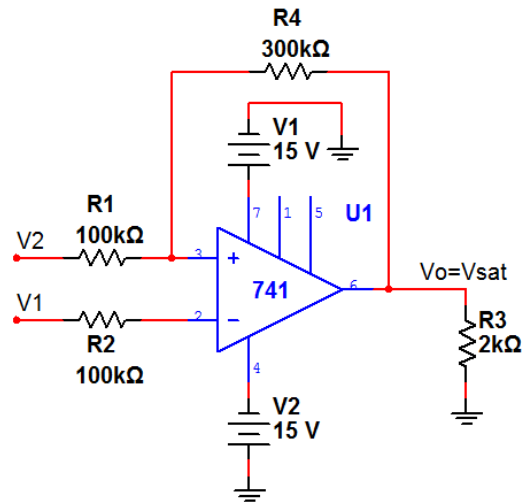


Figura 3. Esquema: Comparador com histerese convencional.

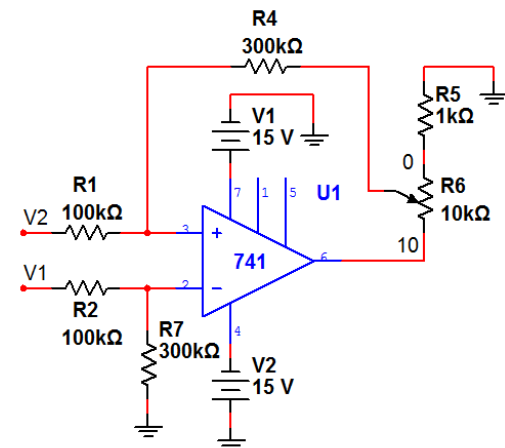


Figura 4. Esquema: Comparador com histerese de entrada diferencial e histerese ajustável.

### FORMULÁRIO:

$$\begin{aligned} e_- &= \frac{n}{1+n} V_1 \\ e_+ &= \frac{n}{1+n} V_2 + \frac{\alpha}{1+n} V_O \\ \frac{n}{1+n} V_1 &= \frac{n}{1+n} V_2 + \frac{\alpha}{1+n} V_O \end{aligned}$$

- UTP= *Trip* superior.
- LTP= *Trip* inferior.
- Histerese.

$$\begin{aligned} V_1 &= V_2 + \frac{\alpha}{n} V_O \Rightarrow \begin{cases} UTP = V_2 + \frac{\alpha}{n} V_{sat+} \\ LTP = V_2 + \frac{\alpha}{n} V_{sat-} \end{cases} \\ V_2 &= V_1 - \frac{\alpha}{n} V_O \Rightarrow \begin{cases} UTP = V_1 - \frac{\alpha}{n} V_{sat+} \\ LTP = V_1 - \frac{\alpha}{n} V_{sat-} \end{cases} \\ H &= \frac{\alpha}{n} (V_{sat+} - V_{sat-}) \end{aligned}$$

#### D. Não-inversor

- Montar o circuito da figura 4. Preste muita atenção na instalação do potenciômetro; a histerese deve aumentar ao girarmos o potenciômetro no sentido horário (posição "10").

$$V_2 = V_i = \text{Gerador de Funções}(GF)$$

(2)

$$V_1 = V_{REF} = 0V$$

- Ajustes iniciais do osciloscópio:  
CH1=5V/DIV, DC, POS CENTRAL  
CH2=5V/DIV, DC, POS CENTRAL  
BASE DE TEMPO= 1mS/DIV  
TRIGGER=CH1, SLOPE+, AUTO  
 $X = V_i$ ;  $Y = V_o$ .

- Gerador de funções: TRIANGULO;  $9V_p$ ;  $100Hz$ .

Observe que o sinal de saída tem característica não-inversora e muda de estado quando o sinal de entrada cruza o valor  $UTP = +5V$  no sentido ascendente e quando cruza o valor  $LTP = -5V$  no sentido descendente.

Estes dois valores de *trip* não são precisos pois dependem da saturação do ampop, e como sabemos, a tensão de saturação varia de exemplar para exemplar e com a carga. Retire a carga sinalizadora momentaneamente e observe que o ponto de *trip* altera.

Mude o comando do osciloscópio para o modo X-Y.

Estamos observando a curva de transferência deste circuito onde podemos verificar claramente o ciclo de histerese. A histerese deve ser aproximadamente  $9V$ .

Ajustando o potenciômetro para a posição "0", a histerese deve diminuir para aproximadamente  $1V$ . Para medir esta histerese com maior precisão ajuste o canal X para  $0,5V/DIV$ . O *trip* deve ocorrer em  $+0,5V$  e em  $-0,5V$ . (Atenção: verificar STEP BALANCE; ajuste a posição "0" horizontal se necessário.

$$H_{MAX} = \text{_____}V$$

$$H_{MIN} = \text{_____}V$$

#### SEGUNDO PASSO - $V_{REF} = +5V$ .

- Mude  $V_{REF} = +5V$ .
- Ajuste o canal X para  $5V/DIV-DC$  e posicione corretamente o "0 horizontal".
- Ajuste a histerese para  $5V$ .  
 $UTP \cong 7,5V$  e  $LTP \cong 2,5V$ .

Observe que o valor de referência permanece aproximadamente no meio da histerese; não fica exatamente no meio devido à diferença entre  $V_{SAT+}$  e  $V_{SAT-}$ .

#### TERCEIRO PASSO - $V_{REF} = -5V$ .

- Mude  $V_{REF}$  para  $-5V$ .  
Observe que a histerese se deslocou para a esquerda e mantém o valor de  $5V$ .  $UTP \cong -2,5V$  e  $LTP \cong -7,5V$ .

- Inverta as entradas do comparador:  $V_1 = V_i = GF$  e  $V_2 = V_{REF} = -5V$ .

A histerese deve continuar com  $5V$ , igual ao da última etapa, porém terá característica inversora. Mude  $V_{REF}$  para  $0V$  e em seguida para  $-5V$ .

#### E. Comparador Inversor com Histerese Ajustável e Trip Preciso - Entrada tipo somador

*Trip* preciso, que não dependa da saturação do ampop, é muito importante nos sistemas de proteção (relê estático por exemplo).

O circuito apresentado na figura 5 proporciona boa precisão em um dos *trips* apenas, o *trip* superior, que é determinado por  $V_{REF}$ .

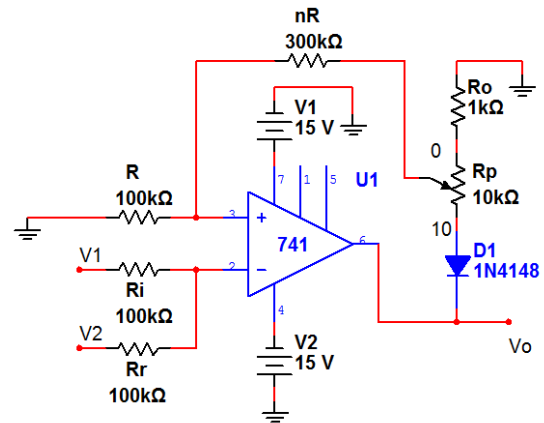


Figura 5. Esquema: Comparador com histerese ajustável e *trip* preciso.

Se invertermos a polaridade do diodo o *trip* inferior será preciso.

Em ambos os casos, o comparador terá característica inversora e o *trip* preciso terá o valor de  $-V_{REF}$  (com sinal trocado).

#### Formulário:

$$e_- = \frac{R_r}{R_r + R_i} V_i + \frac{R_i}{R_r + R_i} V_r$$

$$e_+ = \frac{\alpha}{1+n} V_o^*$$

$$V_{iTrip} = -\left(\frac{R_i}{R_r}\right) V_r + \left(\frac{R_i}{R_r} + 1\right) \frac{\alpha}{(1+n)} V_o^*$$

$$\begin{cases} V_o = V_{sat+} \Rightarrow V_o^* = 0 \\ V_o = V_{sat-} \Rightarrow V_o^* = V_{sat-} + V_f \end{cases}$$

$$\begin{cases} UTP = -\frac{R_i}{R_r} V_r \Rightarrow \text{Trip preciso} \\ LTP = -\frac{R_i}{R_r} + \left(\frac{R_i}{R_r} + 1\right) \frac{\alpha}{(1+n)} (V_{sat-} - V_f) \end{cases}$$

$$H = \left(\frac{R_i}{R_r} + 1\right) \frac{\alpha}{(1+n)} (V_{sat-} - V_f)$$

Para  $R_i = R_r$ , teremos:

$$\begin{cases} UTP = -V_r \Rightarrow \text{Trip preciso} \\ LTP = -V_r + \frac{2\alpha}{(1+n)} (V_{sat-} + V_f) \end{cases}$$

$$H = \frac{2\alpha}{(1+n)} (V_{sat-} - V_f)$$

**PRIMEIRO PASSO** - Montar o circuito conforme o diagrama esquemático da figura 5 com  $V_{REF} = -5V$ . Um dos *trips* ocorrerá quando o sinal de entrada passar por exatamente  $+5V$ . Ajustar o potenciômetro de  $10k\Omega$  na posição “10” (H máximo).

**SEGUNDO PASSO** - Ajustes iniciais.

- Osciloscópio no modo X-Y.  
CH1=5V/DIV, DC, POS CENTRAL  
CH2=5V/DIV, DC, POS CENTRAL
- $V_i=GF=$ triângulo,  $100Hz$  e  $9V_p$ .

**TERCEIRO PASSO** -  $V_{REF} = -5V$ .

Variar o potenciômetro de ajuste da histerese. Observe que o trip superior (UTP) não muda e é determinado por  $V_{REF}$ . Segundo a teoria  $UTP = +5V$  para  $V_{REF} = -5V$ .

Ainda segundo a teoria a histerese pode ser ajustada entre 0.665 a 6,65V considerando  $V_{SAT-} = -14V$  e  $V_F = 0,7V$ . Mas como  $V_{SAT}$  depende da carga e do ampop, o valor da histerese não é preciso.

$$V_{REF}(medido) = \text{_____} V$$

$$UTP = \text{_____} V$$

$$H_{MAX} = \text{_____} V$$

$$H_{MIN} = \text{_____} V$$

**QUARTO PASSO** -  $V_{REF} = +5V$  e  $0V$ .

Mude  $V_{REF}$  para  $+5V$  e depois para  $0V$ . Observe que o UTP tem exatamente o mesmo valor de  $V_{REF}$  porém com sinal oposto.

$$V_{REF}(medido) = \text{_____} V$$

$$UTP = \text{_____} V$$

$$V_{REF}(medido) = \text{_____} V$$

$$UTP = \text{_____} V$$

Atue no potenciômetro de ajuste da histerese. Você perceberá que o trip preciso não se desloca.

**QUINTO PASSO** - LTP preciso. Inverta a polaridade do diodo e varie o potenciômetro de batente a batente. Observe que o trip inferior não muda (é determinado por  $V_{REF}$ ) e não depende de  $V_{SAT}$ .

#### F. Comparador Janela

Comparadores janela implementado com apenas um ampop não são muito precisos porque o ponto de trip depende da queda de tensão do diodo retificador (que varia com a temperatura e com o valor da corrente).

Para obter *trips* precisos são necessários dois ampops ou dois comparadores (como LM311).

Nos circuitos com diodos instalados na saída do ampop, a carga  $R_L$  deve ser ligada ao terra para evitar flutuações quando os dois diodos estiverem bloqueados.

#### G. Ampop sem compensação interna

Em malha aberta ou com realimentação positiva os ampops sem compensação de fase interna como o 748 ou o LM301 podem ser utilizados sem o risco de provocar oscilações. Estes

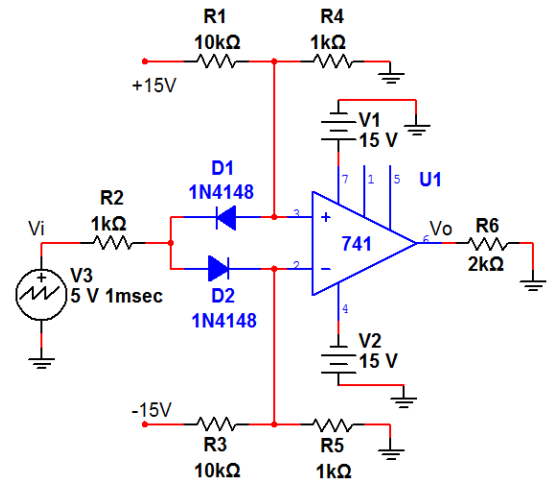


Figura 6. : Comparador janela.

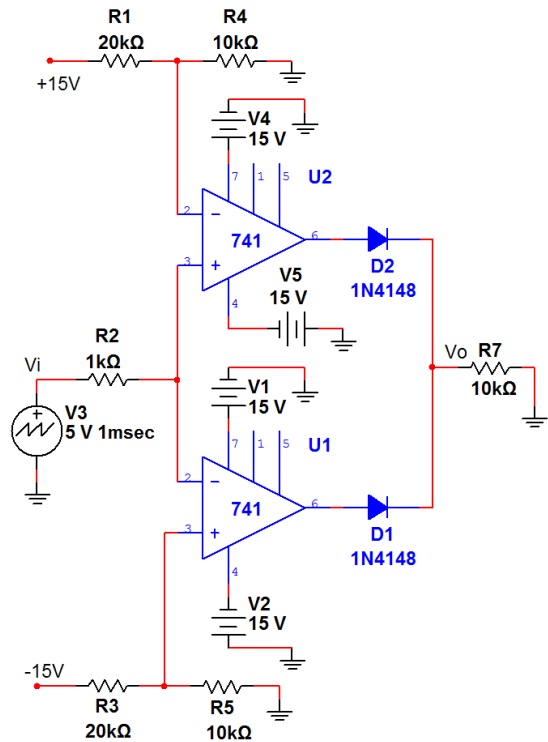


Figura 7. Esquema: Comparador janela com trip preciso.

ampops apresentam *slew rate* de  $40V/\mu s$  contra os  $0,5V/$  do 741C. Estes dois amp op's são compatíveis pino-a-pino com o 741 (a menos do ajuste de *offset*).

#### REFERÊNCIAS

[1] Luis J. “AMPLIFICADORES OPERACIONAIS (2) - COMPARADORES”. Março de 2008.  
<http://www.docstoc.com/docs/2655918/ampops—comparadores>

[2] “Amplificadores Operacionais”.  
<http://www.centelhas.com.br/biblioteca/amplificadores.pdf>