

Capitulo 3 – Amplificador Operacional – Aplicações Não Lineares

Neste capítulo são apresentados os circuitos comparadores. Quando usado como comparador um Am Op usa realimentação positiva ou sem realimentação. Embora possamos usar o 741 como comparador ele é otimizado para operar na região linear. Os comparadores dedicados, como o LM311, são significativamente mais rápidos do que os amplificadores operacionais. Um amplificador operacional tende a aquecer quando saturado, podendo queimar enquanto um comparador dedicado opera facilmente nessa região. Essas diferenças são por causa do circuito de saída

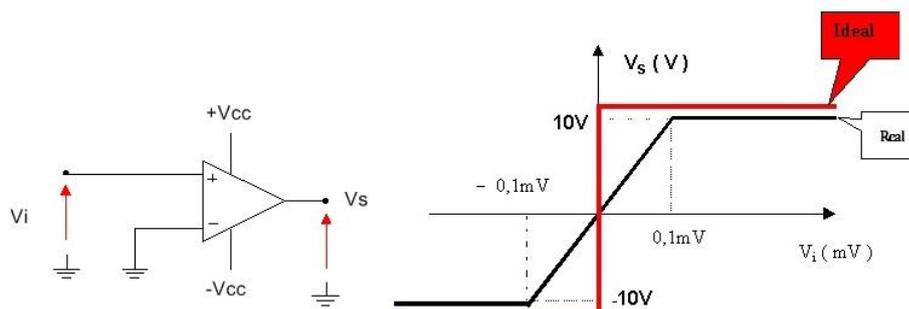
Os circuito usados neste capitulo podem ser construído com AmOp Op [741](#) ou com comparador dedicado como o [LM311](#).

3.1. Circuitos comparadores

São circuitos onde duas tensões são aplicadas nas entradas do AmOp em malha aberta ou com realimentação positiva, resultando uma saída em $+V_{cc}$ ou $-V_{cc}$ em função do resultado da comparação.

3.1.1. Comparadores de zero

Quando em **malha aberta** o AmpOp tem um ganho muito alto, de forma que quando duas tensões são aplicadas entre as entradas, por menor que seja a diferença (mV) entre as tensões, a saída do AmpOp satura ou positivamente ou negativamente. A explicação para isso está na **curva característica de transferência**. A Figura 3.1 mostra a curva característica de transferência típica de um AO, em malha aberta (sem realimentação), isto é. $V_s \times V_e$.



(a)

(b)

Figura 3.1 – (a) AO em malha aberta (b) Curva característica de transferência

Comparador de zero não inversor

Na curva característica do AO em malha aberta da Figura 3.1 pode-se observar que a saída (V_s) varia linearmente com a entrada (V_i) se esta se mantiver no intervalo entre $-0,1$ mV e $0,1$ mV. Fora deste intervalo o AmpOp satura. Na prática, se os valores da tensão de entrada forem, em módulo, muito maiores do que $0,1$ mV a curva característica de transferência se aproxima da ideal. Observe que isso implica em mudar a escala. No gráfico da Figura 3.2 onde está o valor $0,1$ mV? Em zero com certeza!! Isto é, na prática, quando trabalhamos com valores muito maiores do que $0,1$ mV, o comportamento do nosso AO real é "próximo do ideal".

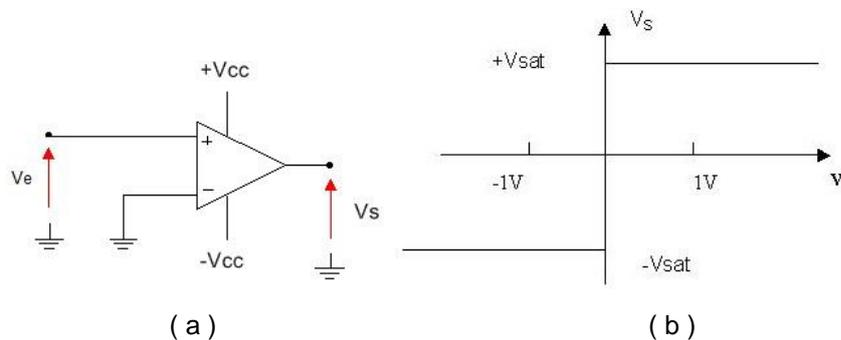


Figura 3.1 – (a) Comparador de zero não inversor (b) Curva característica de transferência

O circuito da Figura 3.2a muitas vezes é chamado de comparador de zero ou detector de zero não inversor porque quando a tensão de entrada passar por zero a saída muda de $+V_{Sat}$ para $-V_{Sat}$ ou vice versa. Por exemplo, se $V_e = 4 \cdot \text{sen} \omega t (V)$ no circuito da Figura 3.2a a saída será uma onda quadrada de mesma frequência e **em fase** com a senoide de entrada. A Figura 3.3 mostra as formas de onda de entrada, V_e , e saída V_s .

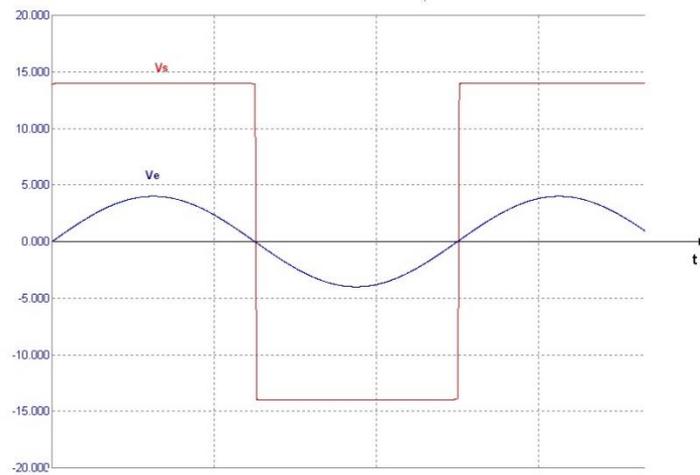


Figura 3.3 – Formas de onda de entrada (V_e) e saída (V_s) do comparador de zero não inversor da figura 3.1a

<https://www.multisim.com/content/excuhmibADMnVKnc7oRNBQ/cursoaocomparadorzerofigura3-3/open>

Comparador de zero inversor

É semelhante ao não inversor, porém o sinal é aplicado na entrada inversora, Figura 3.4a.

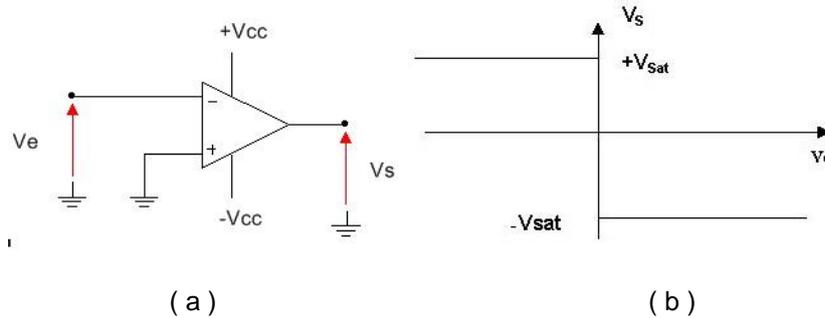


Figura 3.4 – (a) Comparador de zero inversor (b) Curva característica de transferência

Se for aplicado um sinal senoidal como $V_e = 4 \cdot \text{sen} \omega t (\text{V})$ na entrada do circuito da figura 3.4a, a saída será uma onda quadrada de mesma frequência, mas **defasada** de 180° em relação à entrada, Figura 3.5.

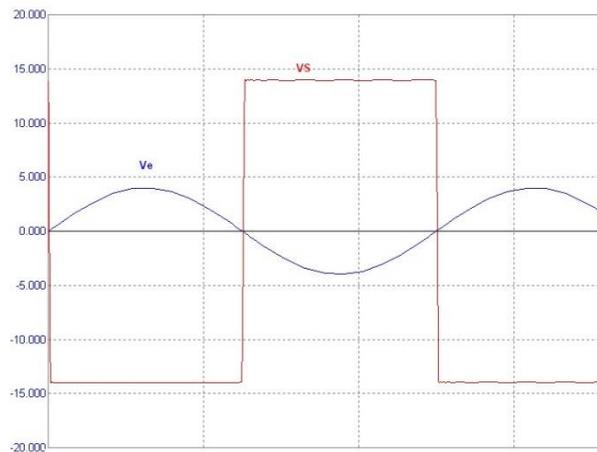


Figura 3.5 – Formas de onda de tensão de entrada e saída no comparador inversor
https://www.multisim.com/content/Gtdim2rYnZNDwC8sQ8w9rC/cursoaocomparador-inversorfigura3_5/open

Comparador Inversor com Histerese

Por causa do alto ganho os circuitos comparadores anteriores são sensíveis à ruídos. Quando a entrada está passando por zero, se aparecer um ruído na entrada a saída oscilará entre $+V_{sat}$ e $-V_{sat}$ até que a amplitude do sinal supere a do ruído. O circuito ligado na saída entenderá que o sinal na entrada do comparador passou

várias vezes por zero, quando na realidade foi o ruído que provocou as mudanças na saída.

Para evitar isso deve ser colocada uma imunidade contra ruído chamada de Histerese, que em termos de característica de transferência resulta no gráfico da Figura 3.6.

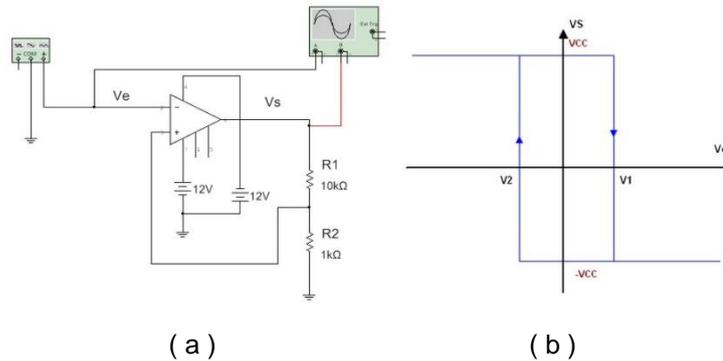


Figura 3.6 – (a) Comparador de zero inversor com Histerese (b) curva de transferência
https://www.multisim.com/content/E7NjUh3QBY5TSQeLnccBUt/cursoaocomparador-inversorhisterese/figura3_6/open

Observe no circuito da Figura 3.6a que a realimentação é **positiva**, (se as entradas fossem invertidas o circuito seria um amplificador não inversor, atenção portanto !!!).

A realimentação positiva faz com que a mudança de $+V_{Sat}$ para $-V_{Sat}$ ou vice versa seja mais rápida (só é limitada pelo *slew rate* do AmpOp). Os valores das tensões que provocam a mudança da saída são calculados por:

$$V_1 = + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{sat} \quad V_2 = - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{sat}$$

O valor da Histerese = $V_1 - V_2$

Para mudar de $+V_{Sat}$ para $-V_{Sat}$ a amplitude do sinal deve ser maior do que V_1 e para mudar de $-V_{Sat}$ para $+V_{Sat}$ a amplitude do sinal deve ser menor do que $-V_{Sat}$.

A Figura 3.7 mostra a entrada e a saída de um comparador de zero inversor com histerese.

3.1.2. Comparadores de Nível

Os comparadores de nível comparam a uma tensão com outra que pode representar uma tensão obtida de um divisor de tensão com um sensor (de temperatura, nível, etc.), portanto é possível construir um sistema detetor de temperatura.

Comparador de Nível Inversor

Num comparador de nível a tensão de entrada, V_e , é comparada com uma tensão de referência V_R , Figura 3.7. Se $V_e > V_R$ a saída será $-V_{sat}$ e se $V_e < V_R$ a saída mudará para $+V_{sat}$. Teoricamente se $V_e = V_R$ então a saída será nula, porém devido ao altíssimo ganho do AO basta que V_e seja alguns décimos de mV maior ou menor que V_R para a saída mudar para $-V_{sat}$ ou para $+V_{sat}$.

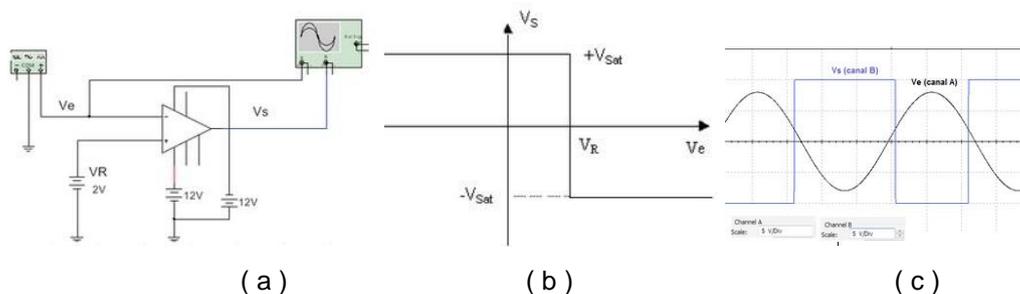


Figura 3.7 – (a) Comparador de nível inversor (b) curva característica de transferência (c) formas de onda de entrada e saída

[CursoAOComparadorNivelFigura3_7 \(multisim.com\)](#)

3.1.3. Comparador de janela

Este circuito também é chamado de comparador de faixa ou detetor de faixa, e dá uma tensão negativa ou nula na saída quando a entrada estiver dentro de uma determinada faixa de valores, e uma saída positiva quando fora da faixa, Figura 3.8.

Na prática pode-se associar, através de transdutores, um valor de tensão à uma grandeza física (nível, temperatura, pressão, luz, etc), desta forma é possível construir um circuito que detecta se a temperatura de um determinado processo se encontra dentro de uma faixa pré estabelecida.

Por exemplo, se a grandeza a ser comparada é temperatura, a tensão V_e é obtida num divisor de tensão que tem um termistor (PTC ou NTC). Enquanto

a temperatura estiver dentro de uma determinada faixa a saída será zero e nada acontece, porém se a temperatura sair da faixa, a saída muda para nível alto e um alarme soa.

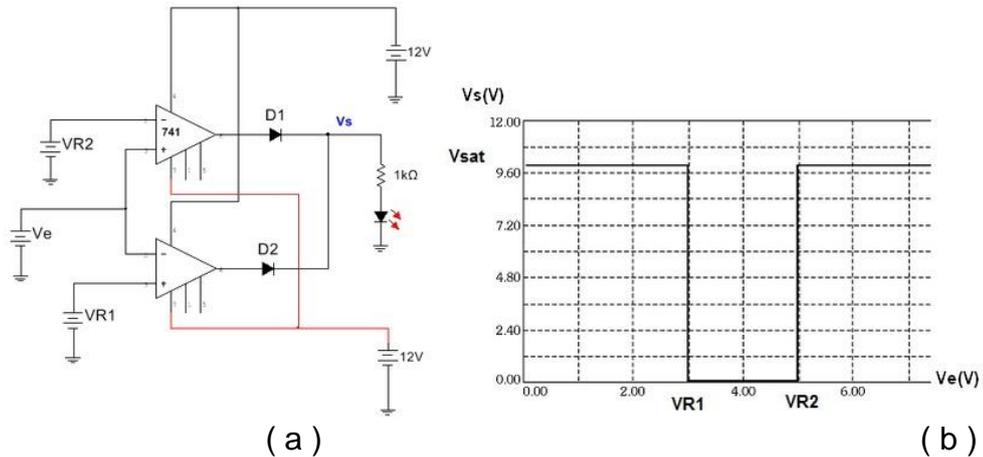


Figura 3.8 – Comparador de janela (a) circuito (b) gráfico da saída em função da entrada https://www.multisim.com/content/gRScmpNhbSpzbC6Y3uk72j/cursoaocomparadorjanelafigura3_8/open

O processo de como funciona o comparador de janela é melhor compreendido se a entrada for senoidal. A Figura 3.9a mostra o circuito e a Figura 3.9b as formas de onda de entrada (V_e) e de saída (V_s).

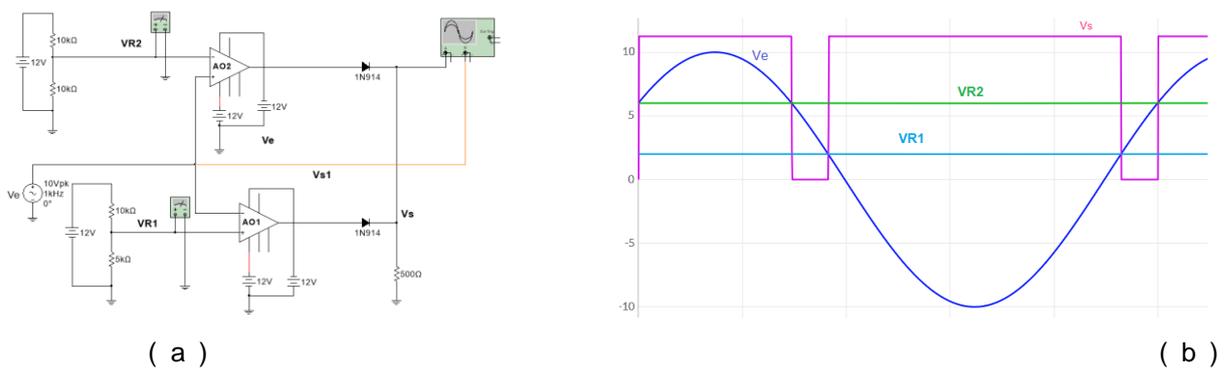


Figura 3.9 – Comparador de janela com entrada senoidal (a) Circuito (b) Formas de onda https://www.multisim.com/content/LHwunpFXjPQcDvH43hKPLR/cursoaocompjanelafigura3_9/open

3.2. Multivibradores

Circuitos multivibradores são circuitos com realimentação positiva. Se classificam em Multivibrador Biestável, Multivibrador Monoestável e Multivibrador Astável.

Multivibrador Monoestável

Em um circuito monoestável existem dois estados, o estado estável (E.E) e um estado instável (E.I). Quando o circuito é ligado a primeira vez, o circuito vai para o estado estável (+Vcc) e permanece nesse estado indefinidamente até que uma ação externa provoque a mudança para estado instável (-Vcc), em geral um pulso de disparo provoca essa mudança, quando então a saída muda para outro valor (-Vcc), ficando nessa condição durante um certo tempo (T_i) ao final do qual o circuito volta sozinho para a condição estável. A principal aplicação é em circuitos temporizadores (Timers).

Na Figura 3.10a a condição estável é a saída em $V_s = +V_{cc}$ pois nessa condição é realimentado para a entrada não inversora (+) uma parcela de Vcc, por exemplo metade. Como o capacitor tenderá a se carregar com Vcc, o diodo conduzirá impondo 0,7 V na entrada inversora (-). Logo como $V_{cc}/2 > 0,7$ V isso impõe Vcc na saída, sendo portando uma condição estável.

Se a chave CH na Figura 3.10a for pressionada momentaneamente, na entrada + é aplicada uma tensão negativa forçando a saída para - VCC, o que faz com que seja realimentado agora para a entrada + uma tensão negativa o que mantém a saída em - VCC. O capacitor C começa a se carregar com polaridade contrária, o que corta o diodo D. Quando a tensão em C for mais negativa que a tensão na entrada + a saída voltará para + VCC. O capacitor C voltará a se carregar com valor positivo fazendo o diodo conduzir grampeando a tensão em C em 0,7 V, e o circuito voltará para a condição estável novamente.

A Figura 3.10b mostra o comportamento gráfico das tensões na saída, V_s e no capacitor, V_c .

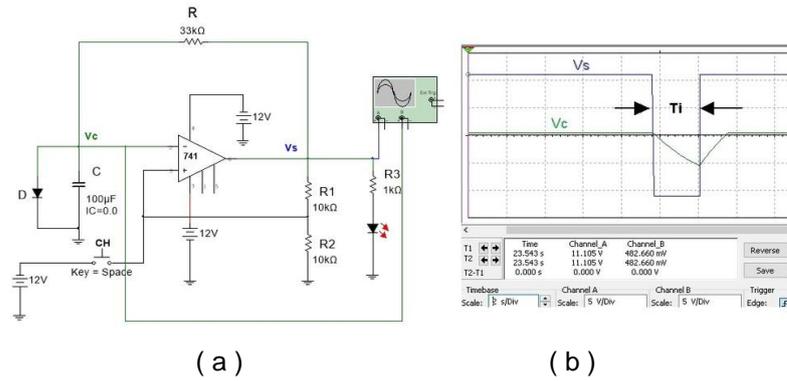


Figura 3.10 – Multivibrador monoestavel (a) Circuito (b) Formas de onda na saída e capacitor

https://www.multisim.com/content/ADYTstvPdwXCdi63RaNTfy/cursoaomonoestavelfigura3_10/open

Após o circuito ter voltado ao estado estável ainda demora um tempo para que o circuito possa dar início a um novo ciclo, isto porque apesar da saída ser $+V_{cc}$ o capacitor ainda está se carregando, tendendo para $+V_{cc}$, no caso através de R, o que pode levar a tempos de recuperação (trec) da mesma ordem de grandeza de T_i .

Para diminuir o tempo de recuperação do circuito, a carga de C deve ser feita através de outra resistência, no caso da Figura 3.11 a resistência de 1 kΩ é colocada em paralelo com a resistência de temporização de 33 kΩ, resultando em uma recuperação mais rápida, isto é, como o diodo Drec conduz, o capacitor se carregará através de 1 kΩ// 33 kΩ, praticamente 1 kΩ. Observe que durante a temporização o diodo Drec estará cortado, e assim que a saída mudar para +12 V o diodo conduzirá fazendo o capacitor se carregar através do resistor de 1 kΩ.

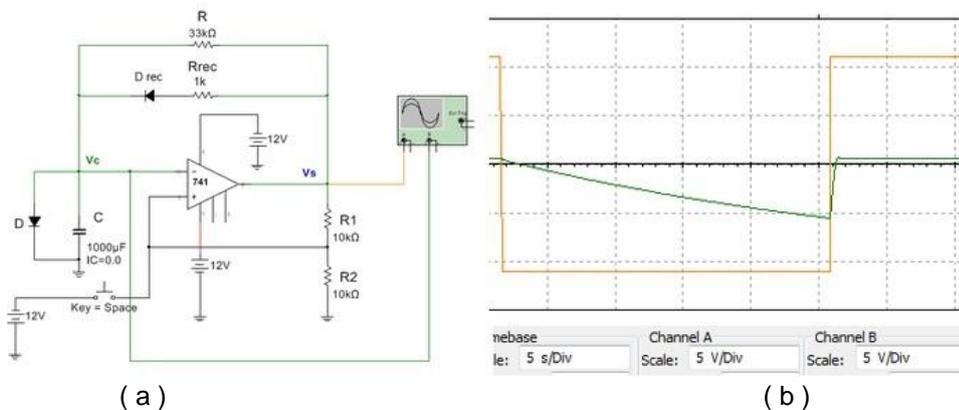


Figura 3.11 – Monoestavel de recuperação rápida (a) circuito (b) Formas de onda

https://www.multisim.com/content/Dn2eE7ywBhvE2cS6owfau6/cursoaomonoestavelfigura3_11/open

O monoestavel pode ser disparado através de pulsos negativos aplicados à entrada não inversora. Na Figura 3.12a, o gerador de funções fornece uma onda quadrada de frequência 50 Hz Figura 3b. O circuito constituído do capacitor de 10 nF e o resistor de 10 kΩ são um diferenciador. O diodo D3 deixa passar somente os pulsos negativos que são usados para disparar o monoestavel. A saída, V_s fica, durante o tempo T_i , em nível baixo, em seguida voltará para $+V_{cc}$.

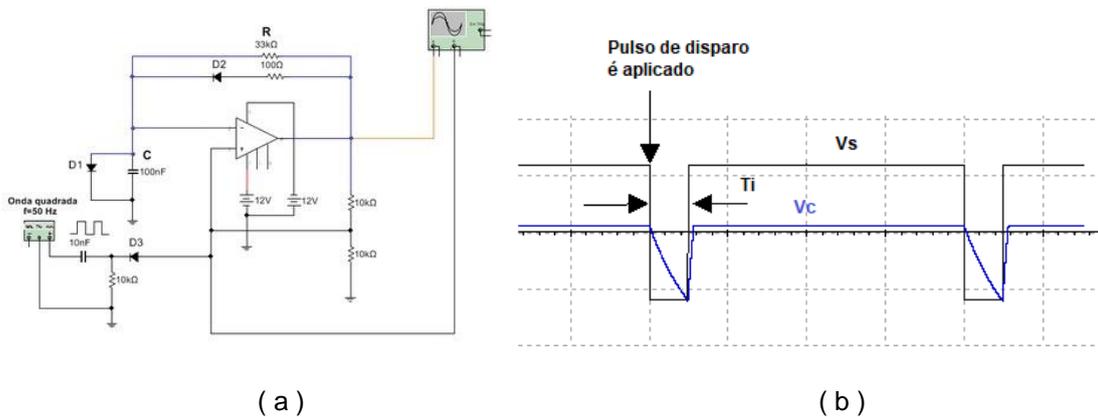
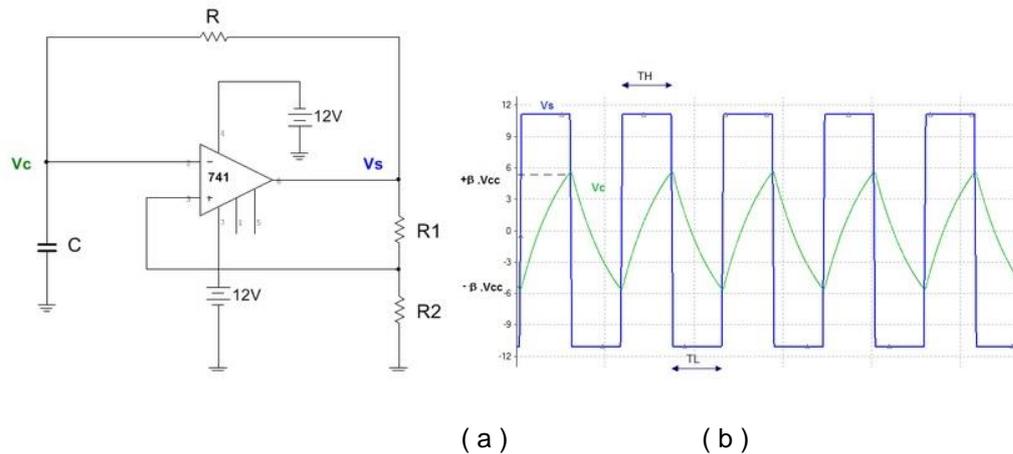


Figura 3.12 – Monoestavel disparado por pulso (a) circuito (b) Formas de onda de saída e capacitor
https://www.multisim.com/content/DNY7tXDyRTkuzYfAzdEDMf/cursoaomonoestavelfigura3_12/open

Multivibrador Astavel

Um circuito astavel tem dois estados instáveis, isto é, é um oscilador do tipo relaxação (carga e descarga de capacitor). No circuito da Figura 3.13 a saída V_s oscilará entre $+V_{cc}$ e $-V_{cc}$ em função da comparação entre V_+ e V_- . Se $V_+ > V_-$ a saída será igual a $+V_{cc}$ caso contrário será $-V_{cc}$. Se a saída for $+V_{cc}$, o capacitor se carregará através de R tendendo para $+V_{cc}$, desta forma V_c aumentará, quando $V_+ < V_-$ nesse instante a saída mudará para $-V_{cc}$ e o capacitor começará a se carregar através de R tendendo a tensão agora para $-V_{cc}$. Quando a tensão no capacitor for mais negativa que a tensão na entrada V_+ a saída voltará para $+V_{cc}$ e assim sucessivamente.



(a) (b)
 Figura 3.13 – Astavel com AO (a) circuito (b) formas de onda de saída e capacitor
https://www.multisim.com/content/XKHUFA6yNLFDx7V7AkPXjh/astavel-simetricofigura3_13/open

O período das oscilações é calculado por:

$$T = 2 \cdot R \cdot C \cdot \ln \frac{1 + \beta}{1 - \beta}$$

E

$$\beta = \frac{R2}{R1 + R2}$$

Observar que o tempo que a saída permanece em nível alto ($TH = T/2$) é igual ao tempo que a saída permanece em nível baixo ($TL = T/2$), isso porque a carga do capacitor se dá pelo mesmo caminho da descarga, através de R.

Astavel Assimétrico

Se a carga do capacitor se der por um caminho e a descarga por outro, pode-se construir um circuito no qual o tempo alto (TH) será diferente do tempo baixo (TL), Figura 3.14a.

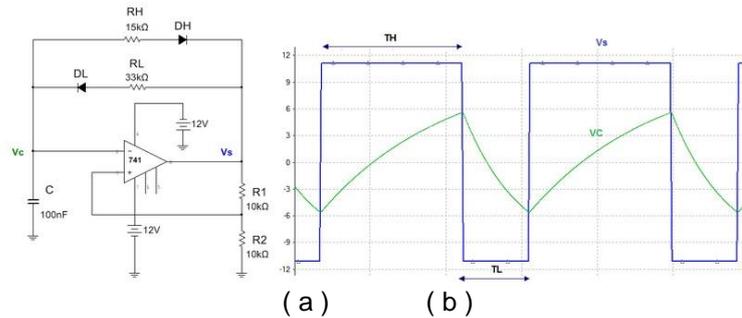


Figura 3.14 – Astavel assimétrico (a) circuito (b) formas de onda na saída e capacitor
https://www.multisim.com/content/KhDBN7aZsM6dQ9E7pD4wrJ/astavel-assimetricofigura3_14/open/

O funcionamento do circuito é essencialmente o mesmo do circuito da Figura 3.13, Astavel Simétrico, a diferença é que, o capacitor se carrega para +Vcc através do diodo DH e RH e se descarrega para -Vcc através do diodo DL e RL.

A equação que dá o cálculo dos tempos é basicamente a mesma do circuito simétrico, sendo que os tempos são calculados separadamente:

$$T_H = R_H.C.\ln(1+\beta)/(1+\beta) \quad \text{e} \quad T_L = R_L.C.\ln(1+\beta)/(1+\beta)$$

sendo o valor de β dado pela mesma expressão já vista no astavel simétrico, isto é:

$$\beta = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

No caso da Figura 3.14 $T_H > T_L$. E se quiséssemos o contrário como deveria ser o circuito?

Obs: T_H (High = alto em inglês) T_L (Low = baixo em inglês)

Exercícios

- 1) Para que valores de R_v o LED acende?

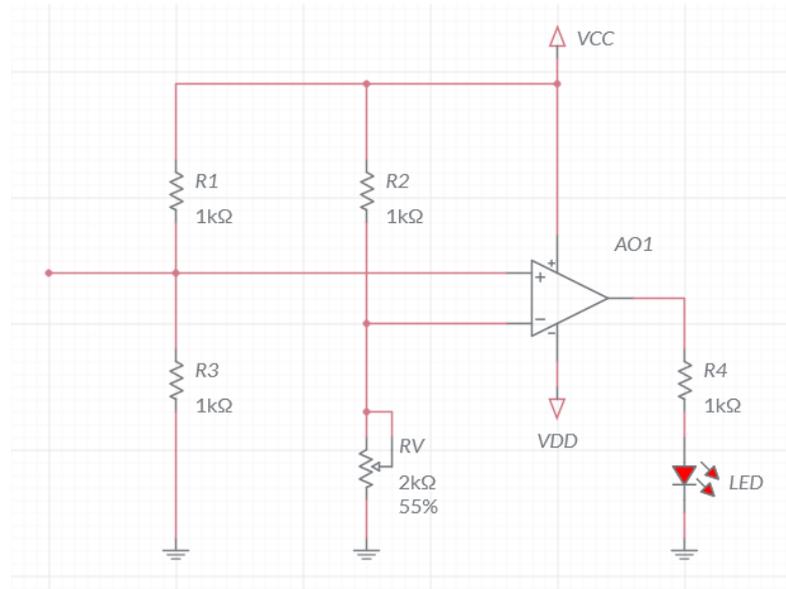


Figura 3.15 - Circuito para exercício proposto 1

https://www.multisim.com/content/jt3asgFtXtFwfJhTehyBKC/comparador_figura15/open/

Resposta: $V_+ = V_{R3}$ e $V_{R3} = \frac{R_3}{R_1 + R_3} \cdot 12V = 6V$ $V_- = V_{Rv}$ e $V_{R3} = \frac{R_v}{R_1 + R_v} \cdot 12V$

Para acender o LED $V_- < V_+$ isto é, $\frac{R_v}{R_v + 1k} \cdot 12V < 6V$ ou $R_v < 1k$

- 2) Um LDR no claro apresenta uma resistência de aproximadamente 200 ohms, e no escuro de 100 k. Explique a operação do circuito. Para que serve a chave CH2? Considerar $V_{CC} = 12V$ e $V_{DD} = -12V$

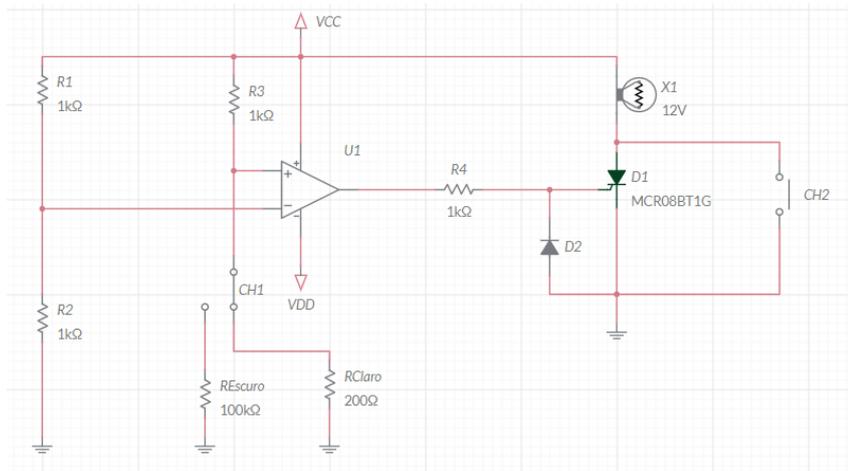


Figura 3.16 – Circuito para questão 2.

https://www.multisim.com/content/HgFVTR4ZR7DYFcb8mLV3du/comparador-e-scr-figura-3_16/open/

Resposta: No claro $R_{claro}=200\text{ ohms}=0,2\text{ k}$ logo a tensão na entrada não inversora vale:

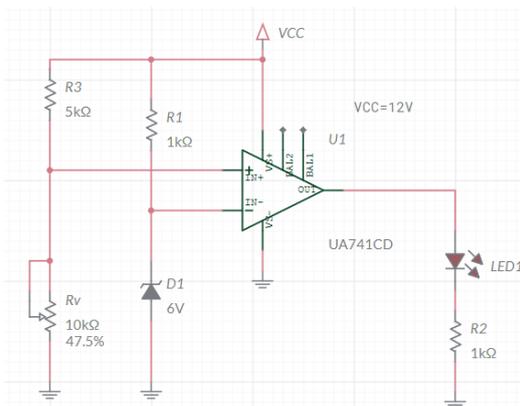
$$V_+ = \frac{0,2k}{1k + 0,2k} \cdot 12V = 2V$$

Como a tensão na entrada na entrada inversora vale 6V então a saída vale - 12 V e, portanto, o SCR não dispara e a lâmpada não acende.

Ao escurecer, a resistência no escuro vale 100 k logo a tensão na entrada não inversora vale:

$$V_+ = \frac{100k}{1k + 100k} \cdot 12V = 11,88V$$

3) Para que valores de R_v o LED acende?



Solução: O LED acende a tensão de saída é alta, e a tensão de saída é alta quando

$$V_{R_V} > V_Z = 6V \quad \text{por outro lado} \quad V_{R_V} = \frac{R_V}{R_V + 5k} > 6V \quad \text{que resolvendo resulta } R_V > 5k$$

4) O circuito tem um LDR que permite acender/apagar lâmpadas. O que acontece com as lâmpadas L1 e L2 no escuro (R_{escuro}) e no claro (R_{claro})?

