

COMPARADOR CON AMPLIFICADOR OPERACIONAL

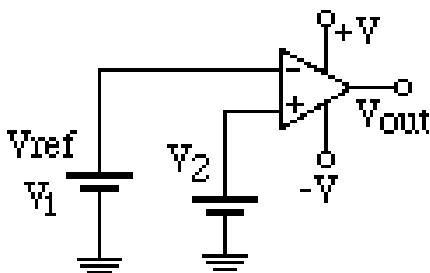
COMPARADOR INVERSOR, COMPARADOR NO INVERSOR

Tienen como misión comparar una tensión variable con otra, normalmente constante, denominada tensión de referencia, dándonos a la salida una tensión positiva o negativa. Se basan en hacer trabajar a saturación los A.O. dando a la salida una tensión V_{cc} (caso ideal). Existen dos tipos básicos de comparadores:

O sea que un Amplificador Operacional puede ser utilizado para determinar cual de dos señales en sus entradas es mayor. (se utiliza como **comparador**). Basta con que una de estas señales sea ligeramente mayor para que cause que la salida del amplificador operacional sea máxima, ya sea positiva ($+V_{sat}$) o negativa ($-V_{sat}$).

Esto se debe a que el operacional se utiliza en lazo abierto (tiene ganancia máxima)

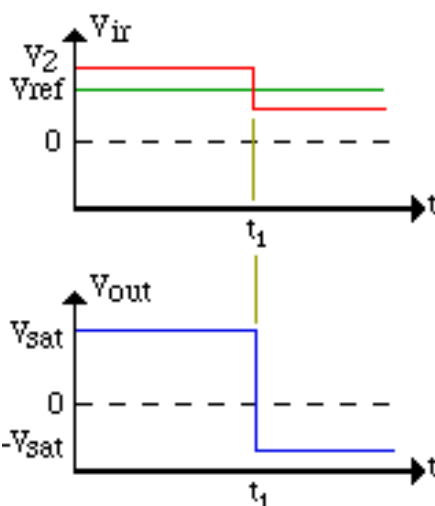
La ganancia real de un amplificador operacional es de 200,000 o más y la fórmula de la señal de salida es: $V_{out} = AOL (V_1 - V_2)$



Donde:

- V_{out} = tensión de salida
- AOL = ganancia de amplificador operacional en lazo abierto (200,000 o más)
- V_1 y V_2 = tensiones de entrada (las que se comparan)

V_{out} no puede exceder la tensión de saturación del amplificador operacional, sea esta saturación negativa o positiva. (Normalmente este valor es unos 2 voltios menos que el valor de la fuente (V_+ ó V_-))



Del gráfico se ve que el valor de la entrada en V_2 es mayor que la de V_1 (que se utiliza como referencia y tiene un valor fijo), hasta que en un momento t_1 , V_2 cambia y ahora es menor que V_1 .

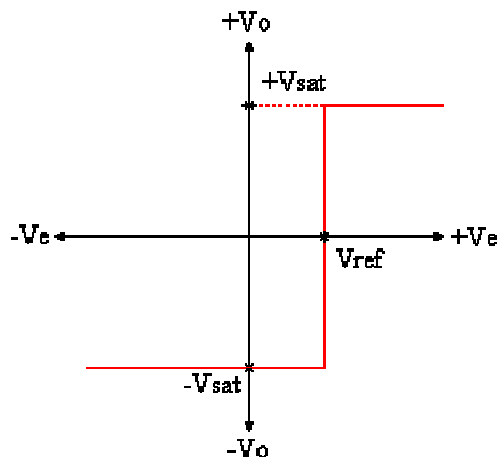
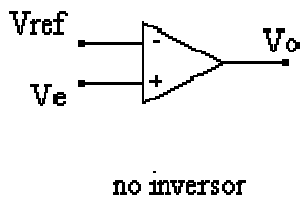
Como V_2 está conectado a la entrada no inversora del operacional, la salida (V_{out}) está en saturación positiva, hasta que llega a t_1 , en donde la salida ahora está en saturación negativa.

COMPARADOR NO INVERSOR

En este comparador la tensión de referencia se aplica a la entrada inversora, y la señal a detectar será aplicada a la entrada no inversora. La tensión de referencia puede ser positiva o negativa

$$\text{Si } V_e < V_{ref} \Rightarrow V_o = -V_{sat}$$

$$\text{Si } V_e > V_{ref} \Rightarrow V_o = +V_{sat}$$



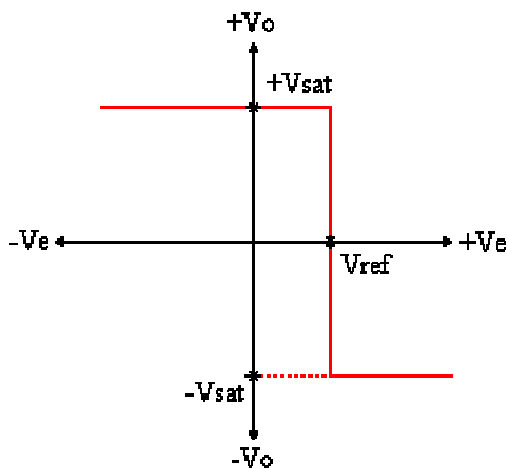
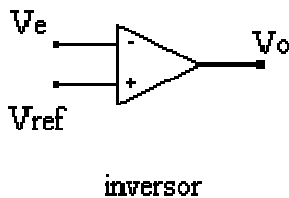
- Si la señal a detectar tenga una tensión superior a la tensión de referencia, la salida será una tensión igual a $+V_{sat}$ (tensión de saturación positiva).
- Si la señal de entrada tiene una tensión inferior a la señal de referencia, la salida será igual a $-V_{sat}$ (tensión de saturación negativa)

COMPARADOR INVERSOR

En este comparador la tensión de referencia se aplica a la entrada no inversora, y la señal a detectar será aplicada a la entrada inversora. La tensión de referencia puede ser positiva o negativa

$$\text{Si } V_e > V_{ref} \Rightarrow V_o = -V_{sat}$$

$$\text{Si } V_e < V_{ref} \Rightarrow V_o = +V_{sat}$$



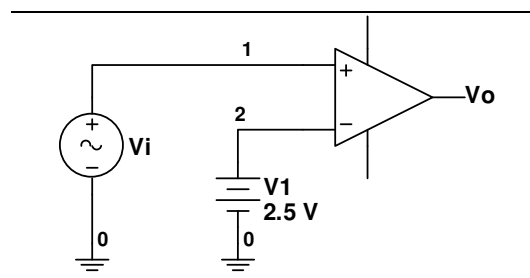
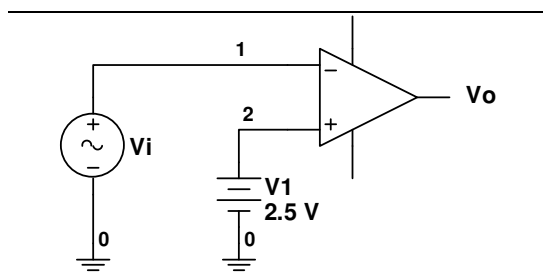
- Si la señal a detectar tenga una tensión superior a la tensión de referencia, la salida será una tensión igual a $-V_{sat}$ (tensión de saturación negativa).
- Si la señal de entrada tiene una tensión inferior a la señal de referencia, la salida será igual a $+V_{sat}$ (tensión de saturación positiva)

EJERCICIOS

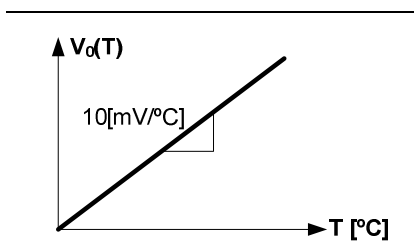
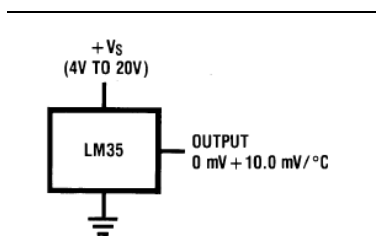
1. Un comparador de voltaje usa un LM741 y la entrada no inversora es conectada a un voltaje de $-5.4V$, dibujar el circuito y la forma de onda de salida sincronizada con una onda senoidal de $20V_{pp}$ aplicada a la entrada inversora. El voltaje de las fuentes son $\pm 12V$.
2. Un comparador de voltaje usa un LM741 y la entrada inversora es conectada a un voltaje de $-5.1V$ mediante un Zener que proporciona la tensión. Dibujar el circuito y la forma de onda de

salida sincronizada con una onda senoidal de $7V_p$ aplicada a la entrada no inversora. El voltaje de las fuentes son $\pm 15V$.

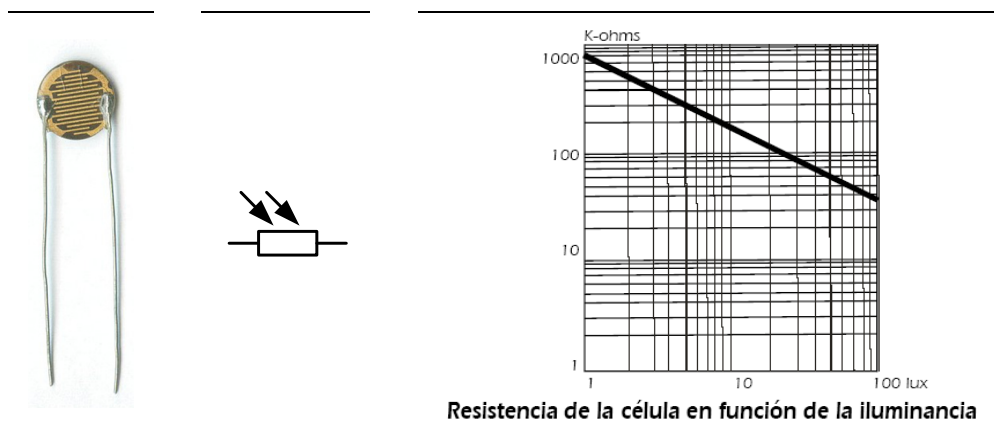
- Realizar el circuito de un detector de cruce por cero (una de las entradas recibe una señal variable en el tiempo, por ejemplo una señal triangular, y la otra entrada es conectada a masa) y dibujar las formas de ondas.
- Para las siguientes configuraciones de comparadores dibujar la tensión de salida cuando la tensión de comparación (V_i) es una señal triangular de $\pm 5V$ de valor de pico y $10KHz$ de frecuencia; y la tensión de referencia es una tensión continua de $2,5V$.



- El LM35 es un sensor de temperatura que entrega una señal de tensión de salida linealmente proporcionalmente a la temperatura sensada. La señal de salida del LM35 tiene una variación de $10(mV/^\circ C)$. Diseñar un circuito de control de temperatura que cuando la misma supere los $40^\circ C$, se apague un conmutador (Relé) y cuando la temperatura sea menor a $50^\circ C$, se encienda el conmutador.



- Las LDR (Resistencias Dependiente de la LUZ) o Fotorresistencias, son componentes electrónicos que como su nombre lo indica, varia su valor ohmico de acuerdo al nivel de luz al que están expuestas. Su símbolo y curva característica son las siguientes:



Los valores de una fotorresistencia cuando está totalmente iluminada y cuando está totalmente a oscuras varían y puede valer de 50 ohmios a 1000 ohmios ($1K$) en iluminación total y $50K$ (50.000 Ohms) a varios megohmios cuando está a oscuras.

Diseñar un circuito (Fotocélula) con amplificadores operacionales que cumpla:

- Cuando la iluminación natural en cualquier ambiente no sea la adecuada, el circuito debe encender una lámpara incandescente de $100W$.
- El circuito debe ser portátil y alimentado con una batería de $9V$.

Debe haber un potenciómetro de ajuste de sensibilidad de la fotocélula.

COMPARADOR CON HISTÉRESIS

Consideremos el siguiente circuito comparador “Detector de cruce por cero inversor”.

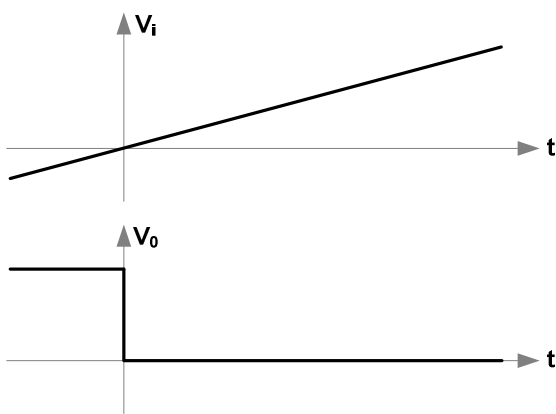
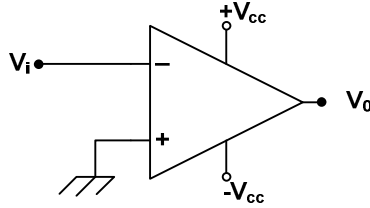


Fig 1: Salida del comparador con una señal $v_i(t)$ sin ruido montado a esta.

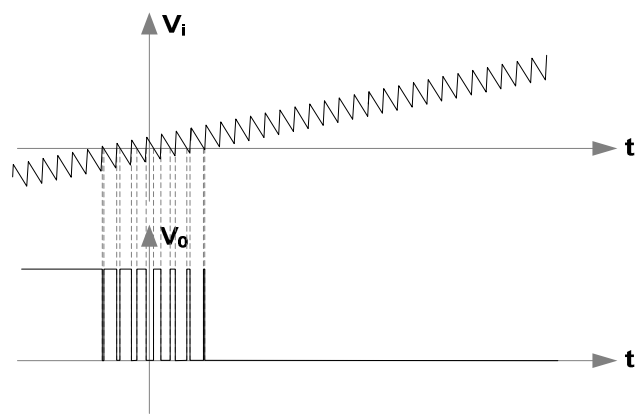


Fig 2: Salida del comparador con una señal $v_i(t)$ con una señal de ruido montada sobre esta.

En este circuito (detector de cruce por cero inversor), observamos en la figura 1 que la detección del cero se produce en el lugar esperado ($v_i=0$), produciendo solo un estado a la salida del comparador cuando se produce la conmutación.

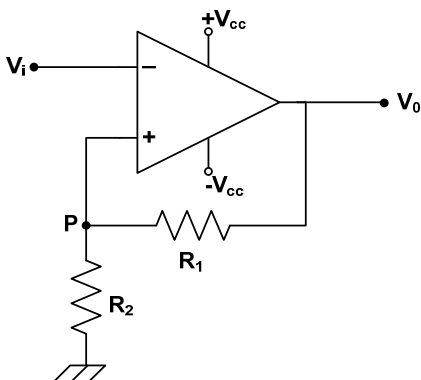
Sin embargo, en la figura 2 vemos que la detección del cruce por cero de la tensión de entrada $v_i(t)$ es errónea, ya que la misma tiene montada una señal de ruido, cuya amplitud y frecuencia modifica considerablemente los puntos de conmutación. Es así que cerca del cero de la tensión $v_i(t)$ se producirán múltiples conmutaciones en la tensión de salida del comparador.

Este inconveniente es muy importante de evitar, ya que los falsos disparos en la salida del comparador podrían ocasionar un funcionamiento perjudicial en las etapas de salida conectadas al comparador.

Para solucionar este problema se utiliza el comparador con histéresis. Este es un circuito con realimentación positiva que se utiliza en el caso en que la señal de entrada $v_i(t)$ a comparar esté acompañada de una señal de ruido.

COMPARADOR CON HISTÉRESIS INVERSOR:

El circuito de este comparador y su funcionamiento se describen a continuación.



Funcionamiento: Como sabemos, un comparador coteja las tensiones que ingresan en las entradas inversora (-) y no inversora (+) del amplificador operacional.

La tensión que ingresa en la entrada inversora del OPAMP es la señal de entrada $v_i(t)$. La tensión que ingresa en la entrada no inversora del OPAMP es la tensión en el punto P, o sea en la resistencia R_2 . Esta tensión resulta de la realimentación de la tensión de salida V_o a la entrada del amplificador, la cual se atenúa mediante un divisor de tensión formado por R_1 y R_2 . La tensión en el punto P está dada por:

$$V_P = \pm \frac{R_2}{R_2 + R_1} \cdot V_{Sat} \quad \text{ó} \quad V_P = \pm \beta \cdot V_{Sat} \quad \text{con} \quad \beta = \frac{R_2}{R_2 + R_1}$$

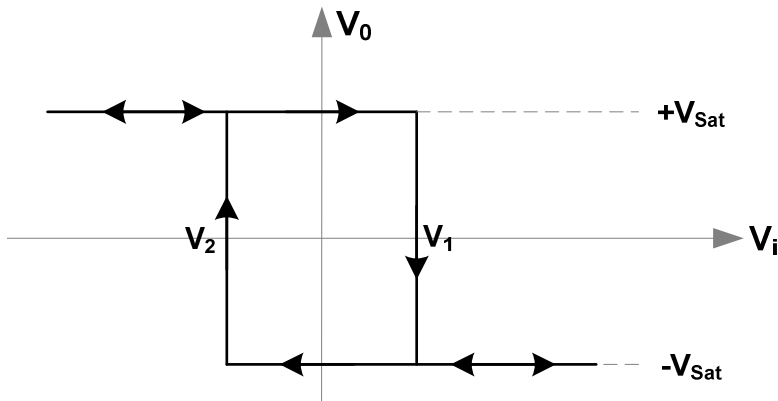
En la expresión anterior, V_{sat} es la tensión de salida del OPAMP cuando este está saturado.

$$\pm V_{sat} \approx \pm V_{cc} \mp 1,5(V)$$

Si consideramos que la tensión de salida del OPAMP es $V_0 = +V_{sat}$, entonces la tensión de referencia en el punto P será $V_p = +\beta \cdot V_{sat}$, por lo tanto la tensión de entrada $v_i(t)$ debe incrementarse un valor ligeramente mayor que “ $+\beta \cdot V_{sat}$ ” para conmutar la tensión de salida V_0 del OPAMP de “ $+V_{sat}$ ” a “ $-V_{sat}$ ”.

Una vez que la salida está en el estado negativo, permanecerá en ese estado hasta que la tensión de entrada $v_i(t)$ sea más negativa que el valor de tensión $V_p = -\beta \cdot V_{sat}$. En este caso, la tensión de salida del OPAMP conmuta de “ $-V_{sat}$ ” a “ $+V_{sat}$ ”.

La curva característica para este comparador se muestra a continuación:



Los puntos de conmutación son:

$$V_1 = +\beta \cdot V_{sat}$$

$$V_2 = -\beta \cdot V_{sat}$$

en donde:

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

La diferencia entre los puntos de conmutación es lo que se denomina “Tensión de Histéresis V_H ”.

$$V_H = V_1 - V_2 = +\beta \cdot V_{sat} - (-\beta \cdot V_{sat}) = 2 \cdot \beta \cdot V_{sat} \rightarrow \boxed{V_H = 2 \cdot \beta \cdot V_{sat}}$$

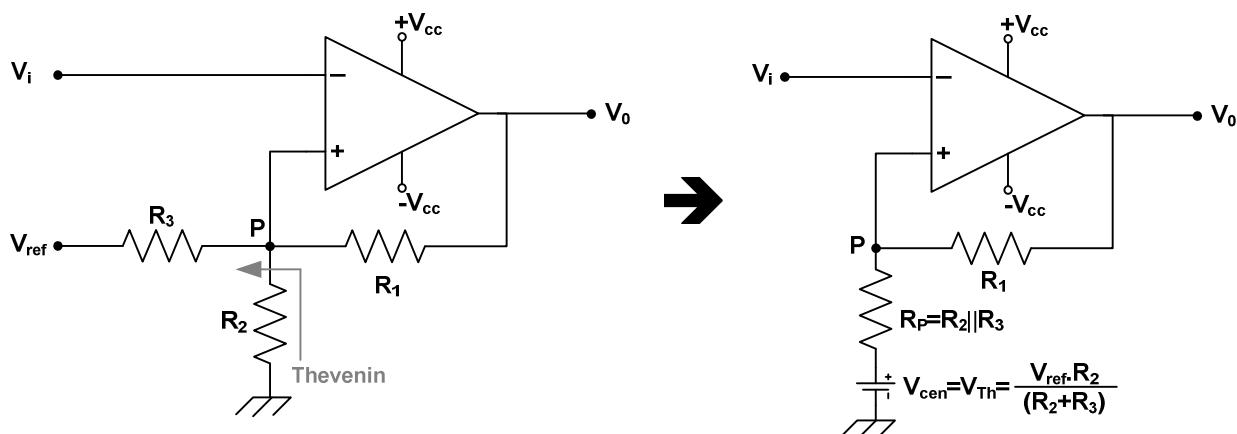
La realimentación positiva ocasiona la histéresis. Si no hubiese realimentación, $\beta=0$ (lo que ocurre cuando $R_2=0$ ó $R_1 \rightarrow \infty$) la histéresis desaparecerá ya que los puntos de conmutación serían ambos similares e iguales a cero, quedando el circuito como un circuito comparador detector de cruce por cero inversor.

Para evitar que la tensión de ruido ocasione falsos disparos debe cumplirse que:

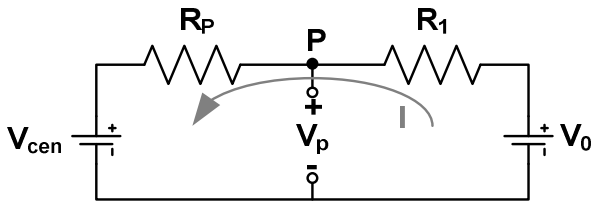
$$\boxed{\hat{V}_{ruido} < V_H}$$

En esta configuración, si se elige correctamente el valor de la tensión de histéresis, se evita conmutaciones múltiples a la salida del comparador de tensión. La desventaja de este circuito es que se produce el desplazamiento del punto de comparación, lo que puede solucionarse seleccionando adecuadamente el valor del punto de conmutación.

DESPLAZAMIENTO DEL PUNTO DE CONMUTACIÓN: Para desplazar el punto de conmutación en un comparador con histéresis inversor, se utiliza el siguiente circuito:



Siguiendo con la metodología empleada para el cálculo de los puntos de conmutación, calculamos el valor de la tensión V_p . El modelo circuital que utilizamos se muestra en la figura siguiente:



De acuerdo a la LKV, la ecuación de malla es:

$$-V_0 + I \cdot (R_1 + R_P) + V_{cen} = 0$$

De donde:

$$I = \frac{V_0 - V_{cen}}{R_1 + R_P}$$

Entonces, la tensión V_p la podemos calcular como:

$$V_p = V_{cen} + I \cdot R_P = V_{cen} + \frac{V_0 - V_{cen}}{R_1 + R_P} \cdot R_P$$

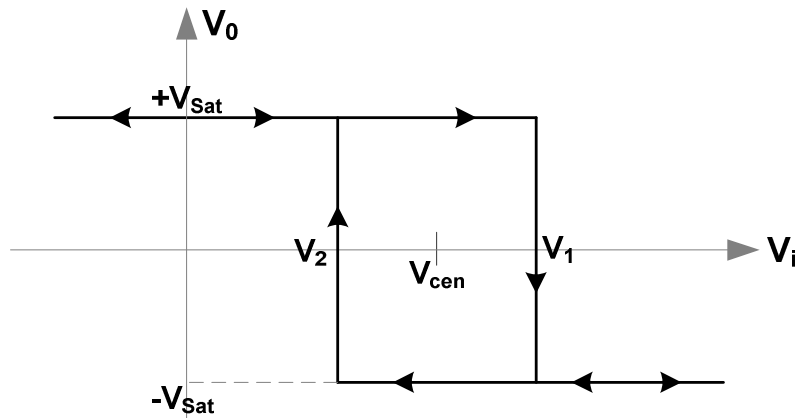
en donde si $\beta = \frac{R_P}{R_1 + R_P}$, podemos escribir: $V_p = V_{cen} + \beta \cdot (V_0 - V_{cen})$

Así, si la tensión de salida del OPAMP es " $V_0 = \pm V_{sat}$ ", los puntos de conmutación serán:

➤ Si $V_0 = +V_{sat} \rightarrow V_2 = V_{cen} + \beta \cdot (+V_{sat} - V_{cen}) \rightarrow V_2 = V_{cen} + \beta \cdot (V_{sat} - V_{cen})$

➤ Si $V_0 = -V_{sat} \rightarrow V_1 = V_{cen} + \beta \cdot (-V_{sat} - V_{cen}) \rightarrow V_1 = V_{cen} - \beta \cdot (V_{sat} + V_{cen})$

Con lo cual la curva característica será:

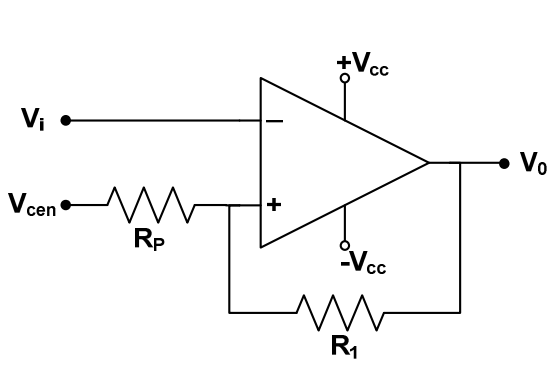


La tensión de histéresis es para este circuito:

$$V_H = V_1 - V_2 = V_{cen} - \beta \cdot (V_{sat} + V_{cen}) - (V_{cen} + \beta \cdot (V_{sat} - V_{cen})) = 2 \cdot \beta \cdot V_{sat}$$

$$V_H = V_1 - V_2 = 2 \cdot \beta \cdot V_{sat}$$

Resumiendo, el circuito y las ecuaciones de diseño para un "comparador inversor con histéresis, con desplazamiento del punto de conmutación", son:



$$V_1 = V_{cen} - \beta \cdot (V_{sat} + V_{cen})$$

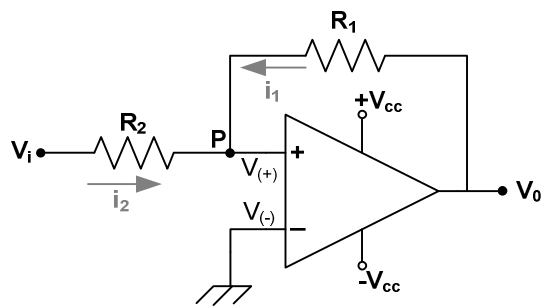
$$V_2 = V_{cen} + \beta \cdot (V_{sat} - V_{cen})$$

$$V_H = V_1 - V_2 = 2 \cdot \beta \cdot V_{sat}$$

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

COMPARADOR CON HISTÉRESIS NO INVERSOR:

El circuito de este comparador y su funcionamiento se describen a continuación.



La ecuación de nodo en el punto P es:

$$\frac{v_i - v_{(+)}}{R_2} + \frac{v_0 - v_{(+)}}{R_1} = 0$$

$$\frac{v_i}{R_2} - \frac{v_{(+)}}{R_2} + \frac{v_0}{R_1} - \frac{v_{(+)}}{R_1} = 0$$

$$v_{(+)} \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{v_i}{R_2} + \frac{v_0}{R_1} \quad \text{y} \quad v_{(-)} = 0$$

Para analizar el comportamiento del circuito debemos comparar las tensiones en ambas entradas del OPAMP.

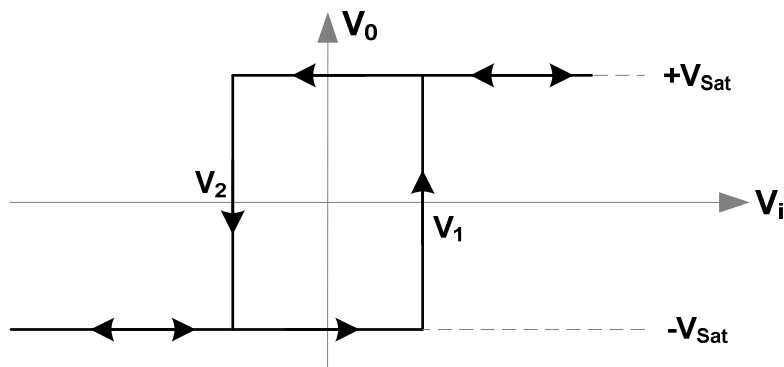
- Si $V_{(+)} > V_{(-)} \Rightarrow V_{(+)} > 0$; entonces $V_0 = +V_{Sat}$. Para que esto se cumpla se debe cumplir que:

$$\frac{v_i}{R_2} + \frac{v_0}{R_1} > 0 \quad \Rightarrow \quad v_i > -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_{Sat} \quad \Rightarrow \quad \boxed{v_i > -\beta \cdot V_{Sat}} \quad \text{donde} \quad \boxed{\beta = \frac{R_2}{R_1}}$$

- Si $V_{(+)} < V_{(-)} \Rightarrow V_{(+)} < 0$; entonces $V_0 = -V_{Sat}$. Para que esto suceda debe cumplirse que:

$$\frac{v_i}{R_2} + \frac{v_0}{R_1} < 0 \quad \Rightarrow \quad \boxed{v_i < \beta \cdot V_{Sat}} \quad \text{donde} \quad \boxed{\beta = \frac{R_2}{R_1}}$$

Teniendo en cuenta lo anterior, la curva característica es:



Los puntos de conmutación son:

$$V_1 = +\beta \cdot V_{Sat}$$

$$V_2 = -\beta \cdot V_{Sat}$$

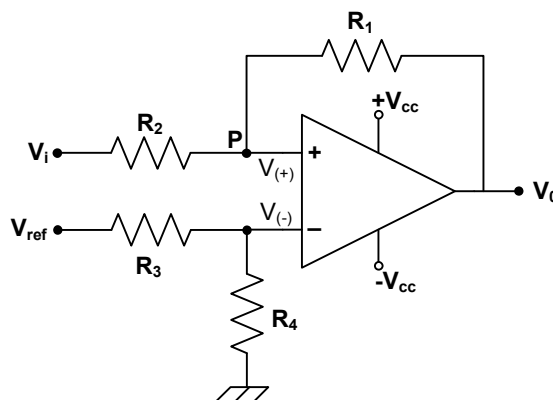
en donde:

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

La tensión de histéresis es en este caso:

$$\boxed{V_H = V_1 - V_2 = 2 \cdot \beta \cdot V_{Sat}}$$

DESPLAZAMIENTO DEL PUNTO DE CONMUTACIÓN: Para lograr esto se utiliza el siguiente circuito:



La tensión que ingresa en la pata inversora del OPAMP está dada por: $v_{(-)} = V_{ref} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$

La tensión en el punto "P" es:

$$\frac{v_i - v_{(+)}}{R_2} + \frac{v_0 - v_{(+)}}{R_1} = 0 \Rightarrow v_{(+)} \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{v_i}{R_2} + \frac{v_0}{R_1}$$

Para analizar el comportamiento del circuito, comparamos las tensiones en ambas entradas del OPAMP.

➤ Si $V_{(+)} > V_{(-)} \Rightarrow V_{(+)} > V_{ref} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$; entonces $V_0 = +V_{Sat}$. Esto se cumple cuando:

$$R_P \cdot \left(\frac{v_i}{R_2} + \frac{v_{Sat}}{R_1} \right) > V_{ref} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad \text{con} \quad R_P = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Si $\beta = \frac{R_2}{R_1}$ y $V_{cen} = V_{ref} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$, se puede demostrar que la condición para este estado es:

$$v_i > V_{cen} + \beta \cdot (V_{cen} - V_{Sat})$$

➤ Si $V_{(+)} < V_{(-)} \Rightarrow V_{(+)} < V_{ref} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \Rightarrow V_{(+)} < V_{cen}$; entonces $V_0 = -V_{Sat}$. Con lo cual se

puede demostrar que la condición en este caso es:

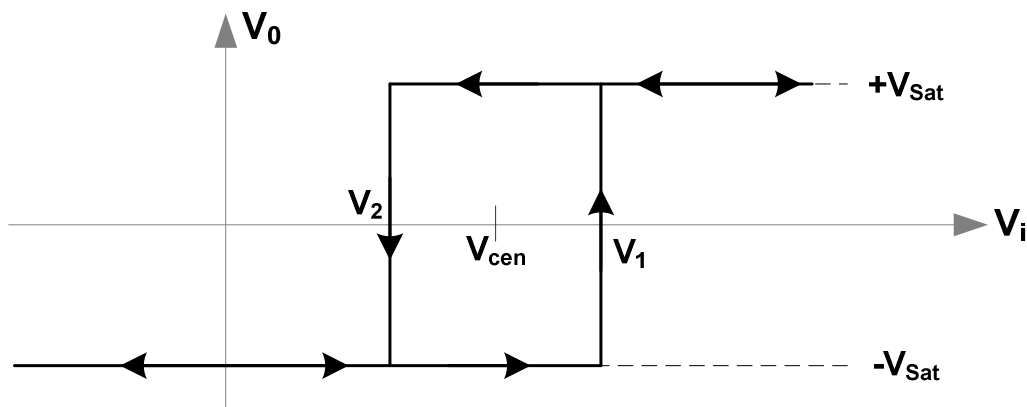
$$v_i < V_{cen} + \beta \cdot (V_{cen} + V_{Sat})$$

A partir de lo anterior, podemos escribir las tensiones de conmutación como:

$$V_1 = V_{cen} + \beta \cdot (V_{cen} + V_{Sat})$$

$$V_2 = V_{cen} + \beta \cdot (V_{cen} - V_{Sat})$$

La curva característica para este caso es:



La tensión de histéresis es en este caso:

$$V_H = V_1 - V_2 = V_{cen} + \beta \cdot (V_{Sat} + V_{cen}) - (V_{cen} + \beta \cdot (V_{cen} - V_{Sat})) = 2 \cdot \beta \cdot V_{Sat}$$

$$V_H = V_1 - V_2 = 2 \cdot \beta \cdot V_{Sat}$$