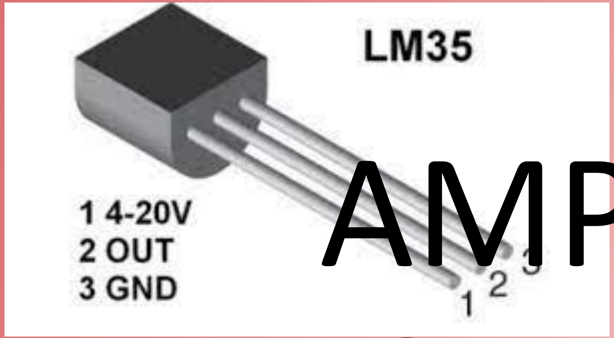
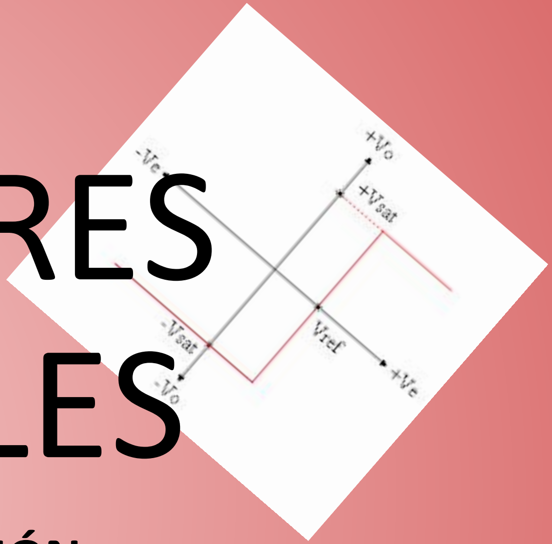
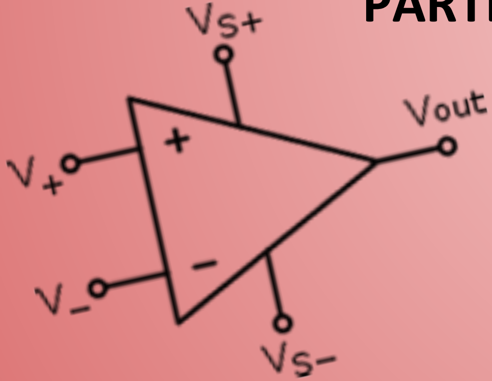




AMPLIFICADORES OPERACIONALES

PARTE 3: COMPARADORES DE TENSIÓN

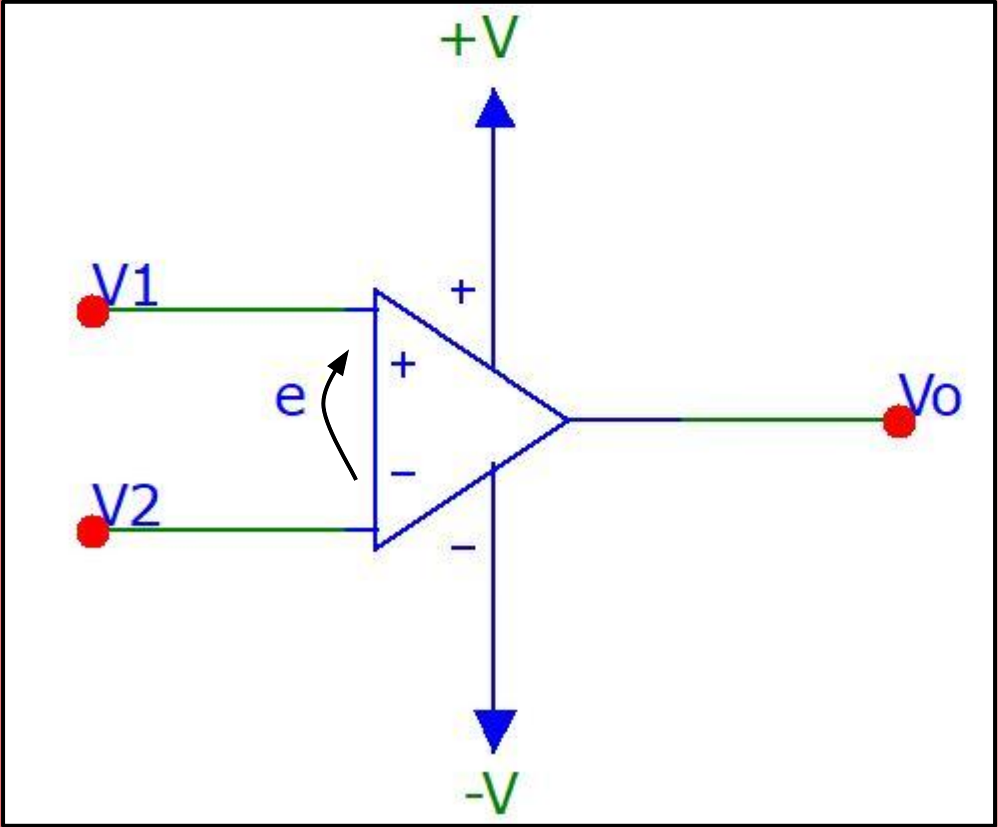


Prof. Ing. Sandro N. Amiel

Anteriormente vimos un conjunto de configuraciones básicas del Aop como amplificador, realimentado negativamente. Así es capaz de amplificar y realizar otras operaciones “analógicas” con las señales. La salida varía en forma continua entre un valor máximo y un mínimo.

Pero existen otras configuraciones en las cuales la salida “cambia de estado”, es decir pasa del máximo negativo (o cero) al máximo positivo y viceversa. Son circuitos en los cuales el comportamiento de la salida es “digital” en función de ciertas condiciones que se produzcan en las entradas.

COMPARADOR DE TENSIÓN



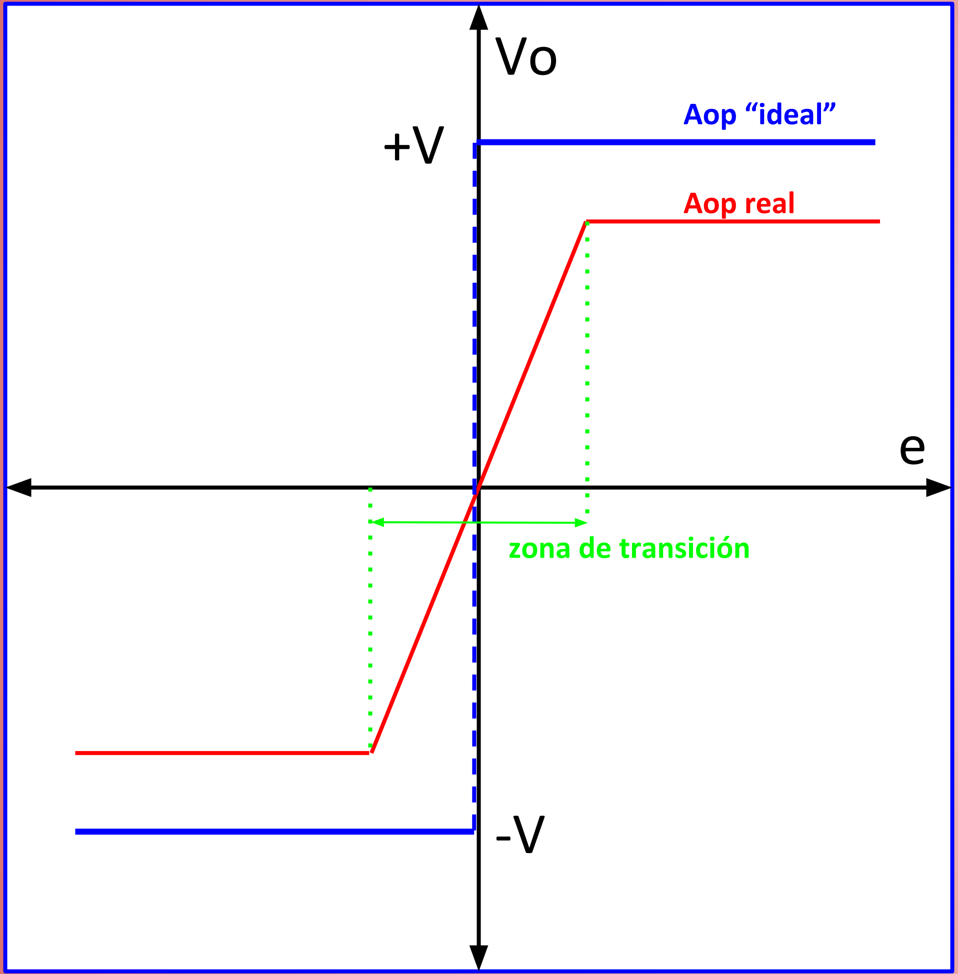
El Aop se encuentra "a lazo abierto", por lo que su ganancia será muy grande (idealmente infinita). Por lo tanto cualquier tensión entre las entradas (e) por pequeña que sea provocará que la salida vaya a su máximo valor posible (idealmente será infinito, en el Aop real tomará un valor cercano al de la alimentación). El signo de la salida dependerá del signo de la diferencia "e".

Entonces mirando el esquema podemos concluir lo siguiente:

- **SI V1 > V2 (o sea e > 0) entonces Vo = +V**
- **Si V1 < V2 (o sea e < 0) entonces Vo = -V**

¿ Pero que pasa si V1 = V2, o sea si e = 0?

Si el Aop fuera ideal (no existe) habría un punto de discontinuidad en 0, ya que la salida cambiaría abruptamente. Pero en la realidad los cambios abruptos no pueden darse porque requerirían velocidades (o frecuencias) infinitas. Lo que sucede es que la salida comienza a cambiar antes de e = 0 y termina de cambiar después.



Este gráfico muestra cómo varía la salida del comparador a medida que cambia el valor en las entradas (la diferencia “e”). Se llama **CURVA DE TRANSFERENCIA DEL COMPARADOR.**

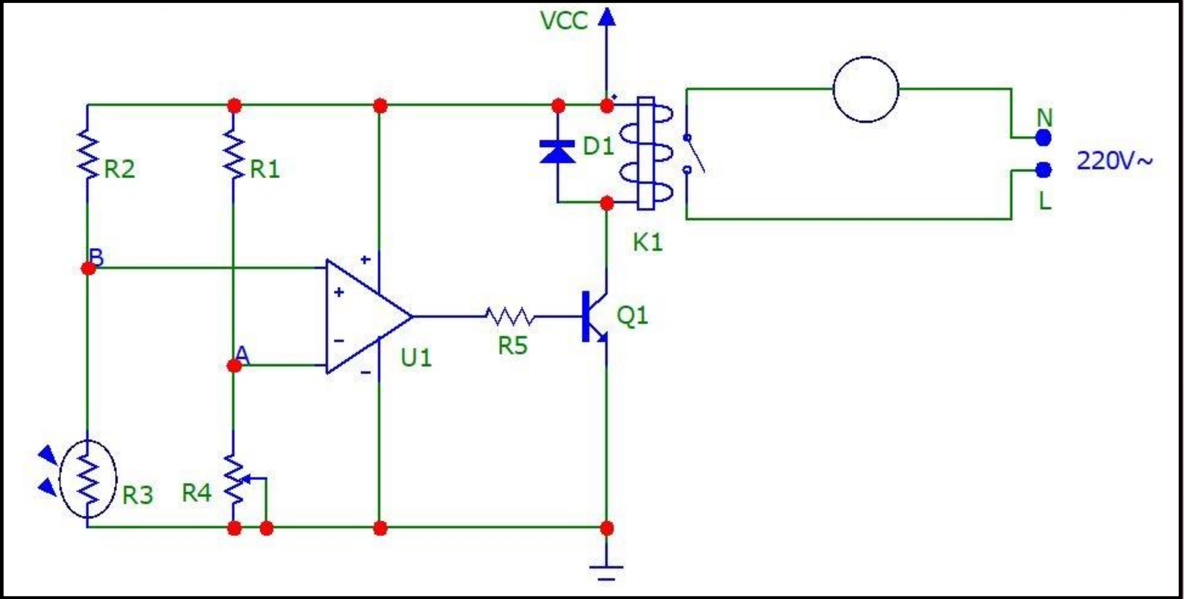
El trazo azul corresponde al caso del operacional ideal (que no existe). Podemos ver cómo se produce el cambio abrupto en la salida cuando “e” cambia de signo, es decir en e = 0.

El trazo rojo es la curva de un comparador real, en el que observamos que no existe un cambio inmediato de la salida (lo que requeriría velocidad infinita) sino una región o rango de valores de “e” (pero muy pequeño) en el cual la salida completa el cambio de estado. Se llama “zona de transición”. Además en un Aop común la salida no llega al valor de la alimentación, más aún en el caso del valor positivo. Esta limitación viene definida en la hoja de datos por un parámetro llamado “OUTPUT SWING”.

Pero existe un tipo de Aops capaces de alcanzar en la salida valores muy cercanos a la alimentación. Son aquellos con característica “RAIL TO RAIL”.

EJEMPLOS DE APLICACIÓN DEL COMPARADOR

FOTOCONTROL



Este circuito permite encender una o varias luces automáticamente al anochecer

FUNCIONAMIENTO

Se utiliza como sensor un resistor LDR, cuya resistencia disminuye con la luz, formando parte de un divisor de tensión.

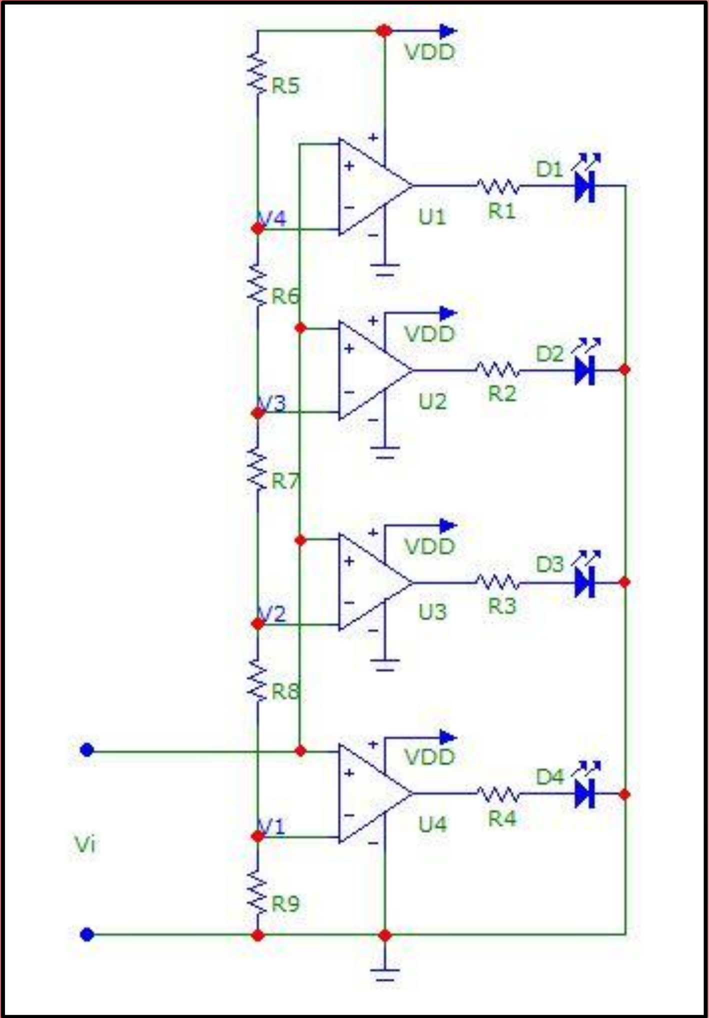
R1 y R4 (preset) forman un divisor de tensión que permite fijar una referencia en la entrada inversora del comparador.

Mientras la tensión en B sea menor que en A la salida del comparador estará a nivel bajo y el relé se encuentra apagado.

A medida que disminuye la cantidad de luz que llega a R3, aumenta su resistencia haciendo que aumente la tensión en B.

Cuando esta supera a la tensión calibrada en A el comparador cambia de estado, haciendo que sature Q1 y activando el relé.

Podemos notar que R4 nos permite ajustar la sensibilidad del circuito, es decir el nivel de oscuridad a partir del cual se encenderán las luces.



INDICADOR DE TENSIONES

FUNCIONAMIENTO

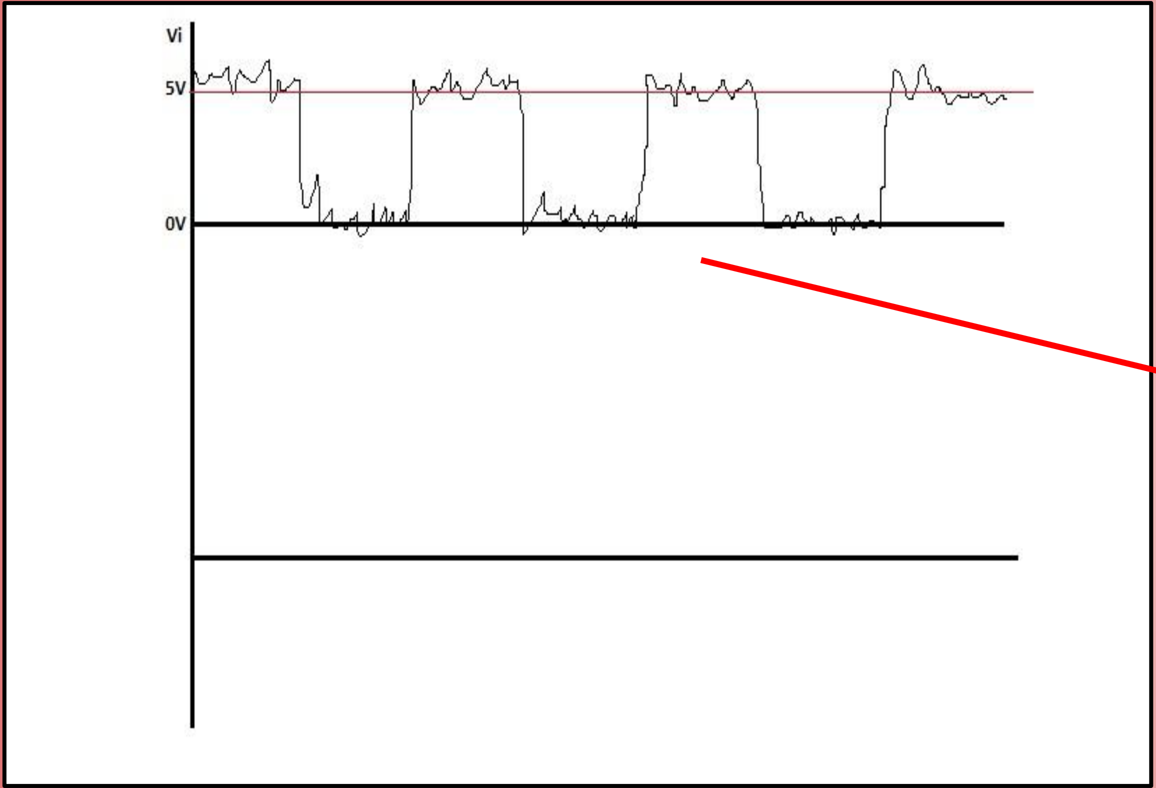
R5 a R9 forman un divisor de tensión múltiple que proporciona 4 tensiones de referencia para los comparadores.
Si Vi es menor a V1 todos los comparadores se encuentran en nivel bajo y por lo tanto los LEDs apagados.
A medida que Vi aumenta y va superando a V1, V2, etc. cambia el estado de los comparadores y se encienden los LEDs correspondientes.
El divisor de tensión se diseña de acuerdo a los valores que se quieran indicar. Una forma simple de hacerlo es fijar una corriente de 1mA para todo el divisor (ya que los operacionales no toman prácticamente corriente por sus entradas) y calcular las resistencias aplicando la ley de Ohm.
Entonces se hace I = 1mA y luego:
R9 = V1 / I
R8 = (V2 - V1) / I
R7 = (V3 - V2) / I
R6 = (V4 - V3) / I
R5 = (VDD - V4) / I
Para los LEDs se fija una corriente no superior a 10mA (el Aop no puede entregar más que ésto en su salida) mediante sus resistencias correspondientes.

EL COMPARADOR NO SIEMPRE ES LA MEJOR SOLUCIÓN

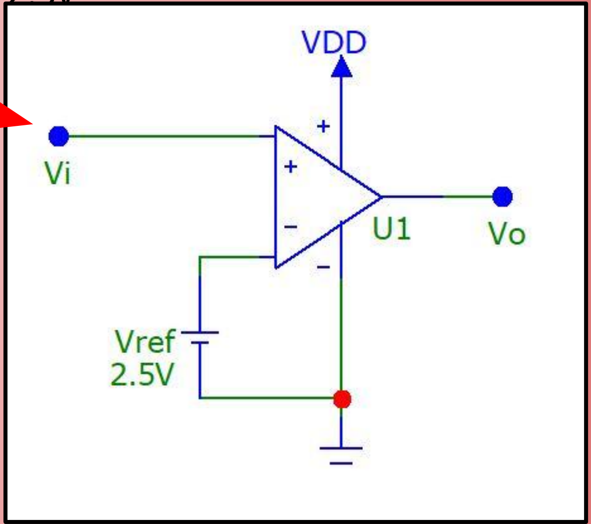
Al tener un único “umbral de decisión”, es decir un único valor de referencia alrededor del cual cambia de estado, el comparador puede comportarse de forma inestable en algunas aplicaciones, por ejemplo en aquellas en las cuales la tensión de entrada puede verse afectada por un cierto nivel de ruido (ruido es toda perturbación eléctrica, artificial o natural, que no forma parte de nuestra señal y que se suma a ella modificándola de alguna manera).

VEAMOS UN EJEMPLO

Una señal de pulsos 0 - 5V que podría provenir por ejemplo de algún tipo de sensor a través de un cable



Podemos detectar los niveles alto y bajo de esta señal si la ingresamos a un comparador. A simple vista parecería lo más lógico fijar la referencia en la mitad, es decir 2,5v

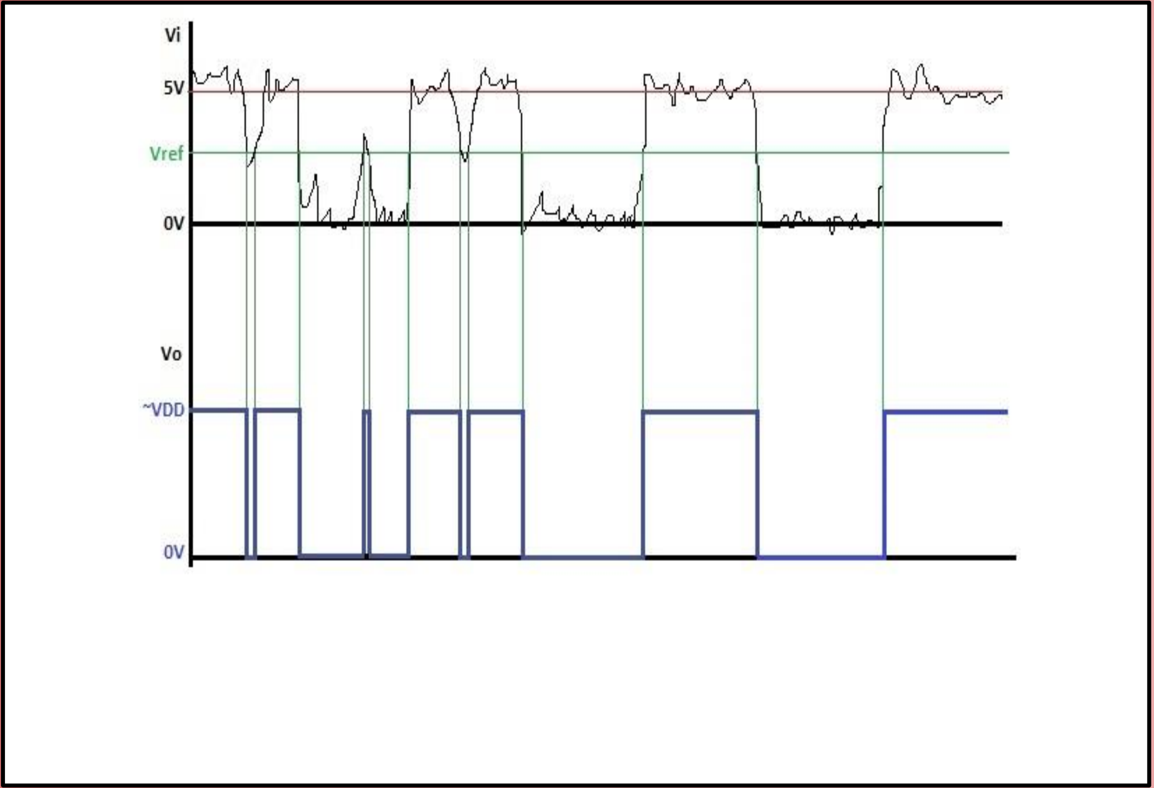


En estas condiciones, por encima de 2,5V la salida tendrá nivel alto y nivel bajo para valores inferiores a este.

Esta solución podría funcionar en forma satisfactoria si el nivel de ruido nunca supera los 2,5V

PERO...

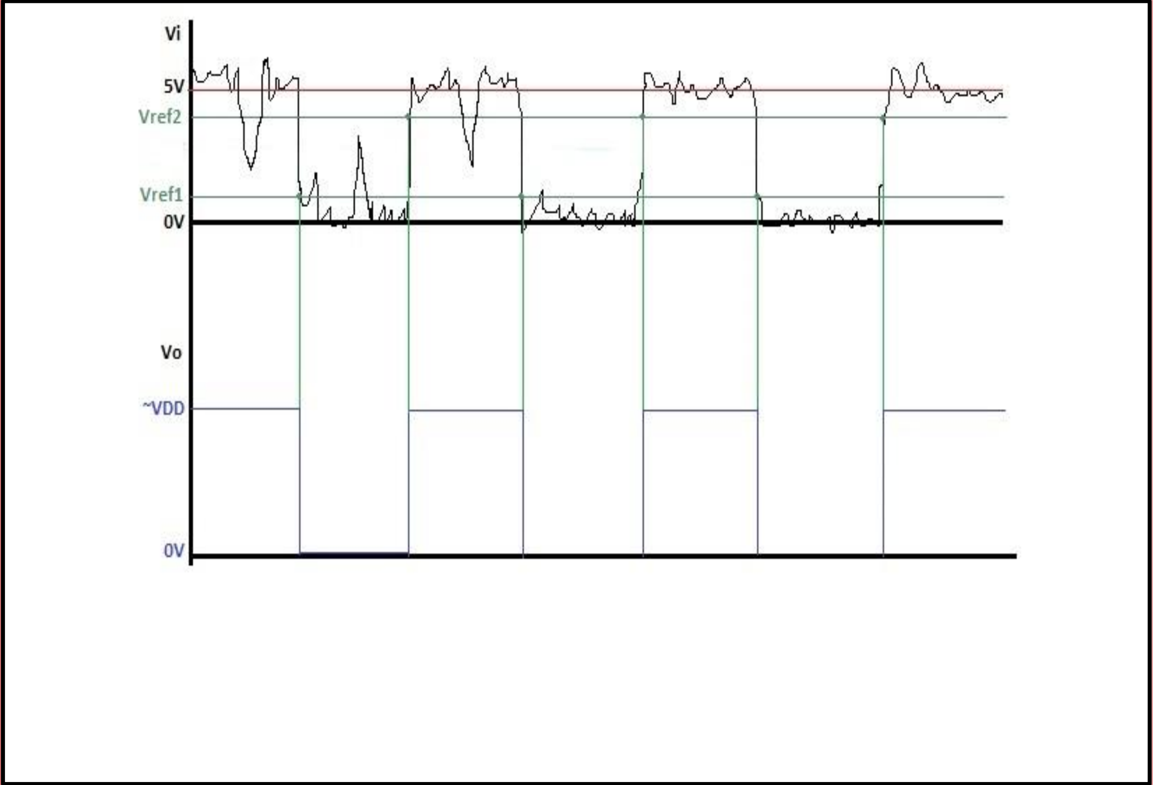
Si en algún momento aparecen (por algún motivo) picos o “espigas” de ruido grandes el comparador



puede llegar a reaccionar, dando a la salida cambios de nivel que no existen en la señal original.
Sería mejor tener 2 referencias diferentes, una para poder detectar el nivel alto y otra para el nivel bajo.

ES DECIR...

De esta manera, si la entrada supera Vref2 será interpretado como un nivel alto y si cae por debajo de Vref1 se tomará como un nivel bajo.

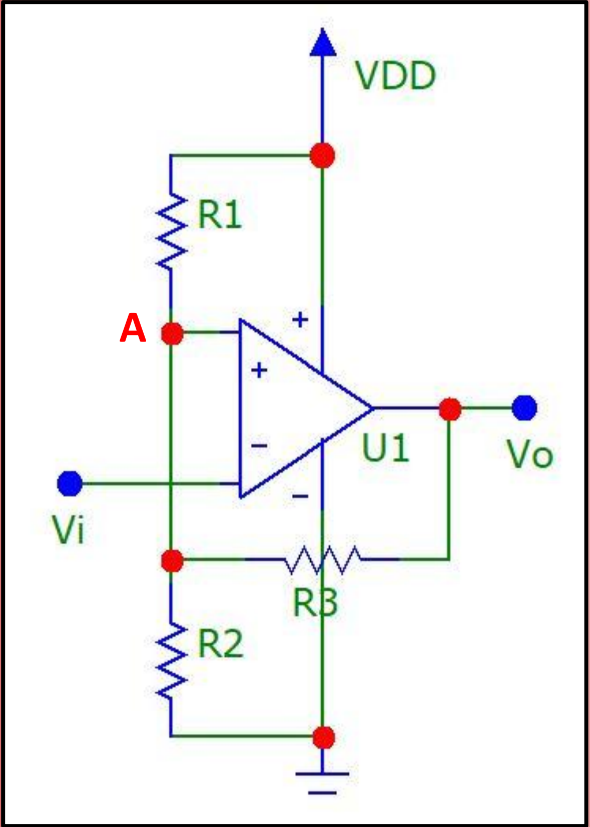


Todo lo que suceda por encima de Verf1 pero por debajo de Vref2 será ignorado.

Esto nos proporciona un rango de tensiones (Vref2 - Vref1) que separa ambos estados, reduciendo la posibilidad de ser afectados por elevados niveles de ruido. A este rango en algunos casos se lo denomina “margen de ruido”.

¿Y CÓMO SE IMPLEMENTA ESTA SOLUCIÓN CON OPERACIONALES?

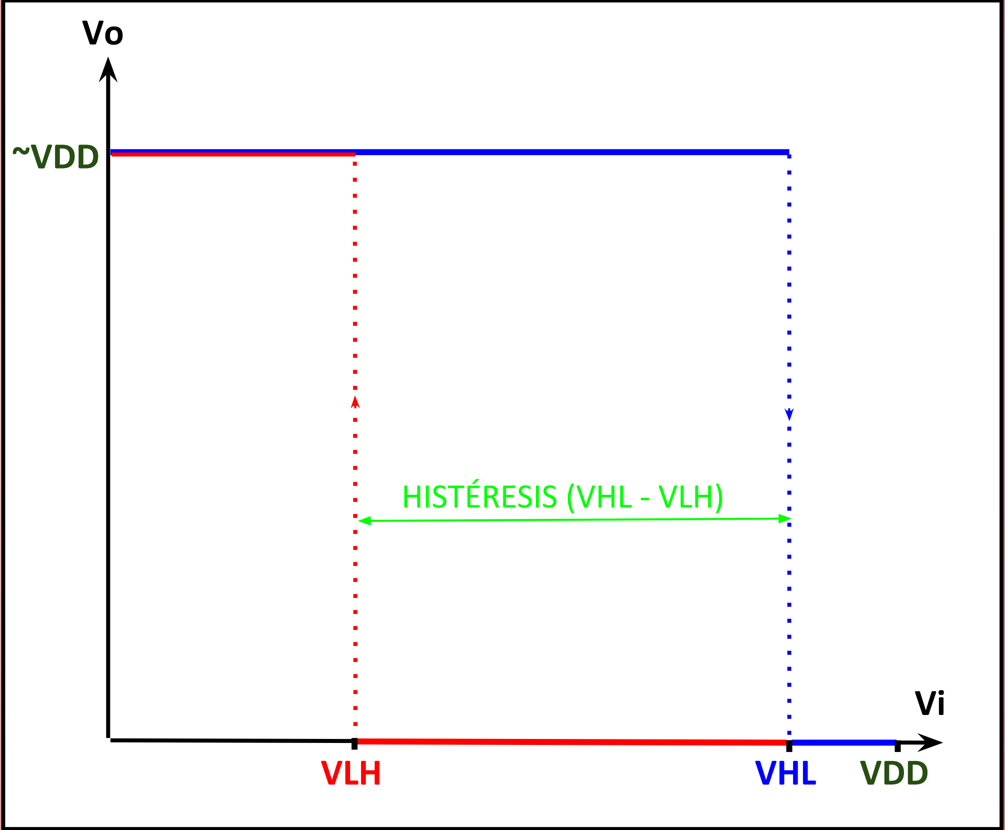
COMPARADOR CON HISTÉRESIS O “SCHMITT TRIGGER”



Si eliminamos R3 tenemos un comparador simple con un divisor de tensión (R1 - R2) que fija una referencia en la entrada no inversora.
La salida estaría en nivel alto hasta que la entrada Vi supere el valor de tensión del nodo “A” definido por este divisor de tensión.
Pero R3 actúa como una **realimentación positiva**, modificando la tensión en A de acuerdo al valor presente en la salida.
Supongamos que Vi comienza a aumentar desde cero. Entonces Vo será aproximadamente VDD. Si observamos el circuito veremos que tanto R1 como R3 se encuentran conectadas a VDD y al nodo A, o sea están en paralelo. Esto determina un cierto valor de tensión en A (Verf2).
Cuando Vi supere VA la salida irá a nivel bajo, haciendo que ahora R3 quede en paralelo con R2.
La nueva conexión en paralelo hace que la resistencia sea menor que antes, por lo que VA también lo será (Vref1). Es decir que la referencia o umbral se corrió ahora hacia abajo.
Cuando Vi disminuya, deberá caer por debajo de este nuevo valor de VA para que la salida vuelva a cambiar de estado.
Tenemos entonces dos umbrales de comparación: uno para cuando la entrada Vi va aumentando y otro, menor, para cuando la entrada va disminuyendo.
A la separación entre umbrales se la llama “HISTÉRESIS”

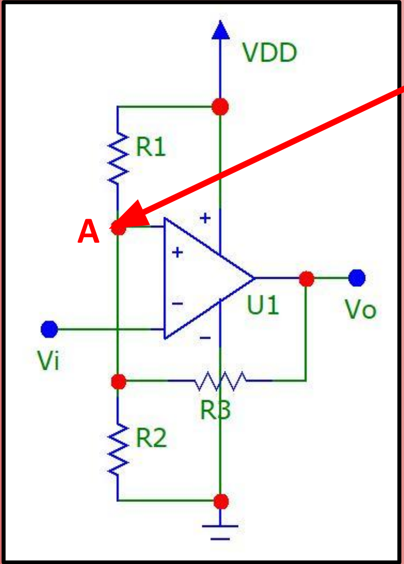
CURVA DE TRANSFERENCIA

Es la representación de la tensión de salida en función de la variación de la entrada dentro de su conjunto posible de valores.
Nos permite observar gráficamente el funcionamiento del circuito.
Podemos ver que para valores pequeños de la entrada la salida se encuentra en nivel alto. Cuando Vi alcanza el valor VHL la salida cambia a nivel bajo. Esto provoca que el nuevo umbral de conmutación ahora sea VLH.
Recién cuando Vi caiga por debajo de este valor la salida volverá a estado alto.
Como efecto de la realimentación el cambio de estado de la salida es más abrupto que en el comparador simple.

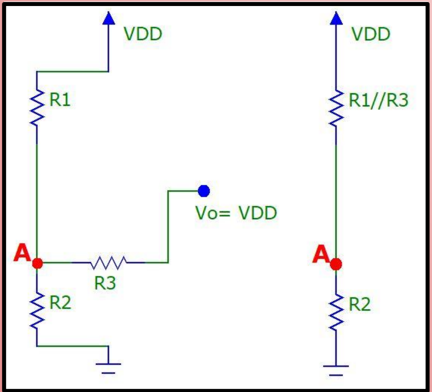


ANÁLISIS Y DISEÑO DEL SCHMITT TRIGGER (S.T.)

Vamos a encontrar las expresiones matemáticas que nos permiten determinar VHL y VLH a partir de los valores de las resistencias y VDD, es decir las fórmulas de análisis del Schmitt Trigger.
Luego, a partir de las expresiones halladas vamos a encontrar las que nos permitirán realizar el camino inverso, es decir calcular los valores de resistencias necesarios para los umbrales VHL y VLH requeridos.
Supondremos que la salida del operacional en estado alto es igual al valor de la alimentación VDD, cosa que no es real en los de uso general (pero es casi así en los "RAIL TO RAIL"). Esto permitirá simplificar los cálculos pero nos dará expresiones aproximadas.

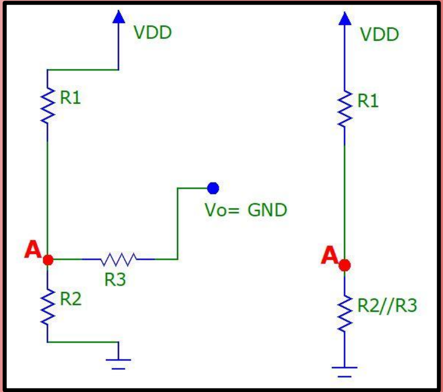


Para encontrar las expresiones de VHL y VLH debemos obtener la tensión en el nodo "A" cuando la salida está en alto (VHL) y para cuando está en nivel bajo (VLH). En ambos casos el divisor de tensión toma configuraciones distintas debido a la presencia de R3.



Si suponemos que Vi aumenta desde cero, Vo = VDD, el divisor de tensión queda así, y **VA = VHL**.

Cuando Vi supera a VHL, Vo pasa a GND, el divisor queda ahora así, y **VA = VLH**.



Prof. Ing. Sandro N. Amiel

Si Vo = VDD, R1 está en paralelo con R3. Entonces

$$Rp = \frac{R1 \times R3}{R1 + R3}$$

Luego

$$VA = \frac{VDD \times R2}{Rp + R2}$$

$$VA = \frac{VDD \times R2}{\frac{R1 \times R3}{R1 + R3} + R2}$$

hacemos denominador común abajo

$$VA = \frac{VDD \times R2}{\frac{R1R3 + R2(R1 + R3)}{(R1 + R3)}}$$

$$VA = \frac{VDD \times R2(R1 + R3)}{R1R3 + R2(R1 + R3)}$$

$$\boxed{VA = \boldsymbol{VHL} = \frac{\boldsymbol{VDD \times R2(R1 + R3)}}{\boldsymbol{R1R2 + R1R3 + R2R3}}}$$

Si Vo = GND, R2 está en paralelo con R3. Entonces

$$Rp = \frac{R2 \times R3}{R2 + R3}$$

Luego

$$VA = \frac{VDD \times Rp}{R1 + Rp}$$

$$VA = \frac{VDD \times \frac{R2 \times R3}{R2 + R3}}{R1 + \frac{R2 \times R3}{R2 + R3}}$$

hacemos denominador común abajo

$$VA = \frac{VDD \times \frac{R2 \times R3}{\cancel{R2 + R3}}}{\frac{R1(R2 + R3) + R2R3}{\cancel{(R2 + R3)}}}$$

$$VA = \frac{VDD \times R2R3}{R1(R2 + R3) + R2R3}$$

$$\boxed{VA = \boldsymbol{VLH} = \frac{\boldsymbol{VDD \times R2R3}}{\boldsymbol{R1R2 + R1R3 + R2R3}}}$$

LOS RESULTADOS ANTERIORES SON LAS EXPRESIONES DE ANÁLISIS (APROXIMADAS) QUE NOS PERMITEN CONOCER LOS UMBRALES DE CONMUTACIÓN DEL TRIGGER A PARTIR DE LOS VALORES DE SUS COMPONENTES.

SI PARTIMOS DE VALORES DE VHL Y VLH QUE QUEREMOS, PODEMOS DESPEJAR Y OBTENER FÓRMULAS PARA CALCULAR LAS RESISTENCIAS.

PERO COMO SON 3 Y SOLAMENTE TENEMOS 2 EXPRESIONES, NO PODEMOS DESPEJARLAS TODAS, ASÍ QUE UNA LA VAMOS A ELEGIR, R3, DE MODO QUE LAS INCÓGNITAS SERÁN R1 Y R2.

$$\boldsymbol{VHL = \frac{VDD \times R2(R1 + R3)}{R1R2 + R1R3 + R2R3}}$$

$$\boldsymbol{VLH = \frac{VDD \times R2R3}{R1R2 + R1R3 + R2R3}}$$

Tenemos que despejar R1 y R2 (R3 no es incógnita). Observando que el denominador de las dos expresiones es el mismo, lo despejamos de ambas:

$$(R1R2 + R1R3 + R2R3) = \frac{VDD \times R2(R1 + R3)}{VHL}$$

$$(R1R2 + R1R3 + R2R3) = \frac{VDD \times R2R3}{VLH}$$

Si las 2 representan lo mismo, quiere decir que:

$$\frac{\cancel{VDD} \times \cancel{R2}(R1 + R3)}{VHL} = \frac{\cancel{VDD} \times \cancel{R2}R3}{VLH}$$

Observemos que la única incógnita que queda es R1, así que la podemos despejar

$$\frac{R1 + R3}{VHL} = \frac{R3}{VLH}$$

$$R1 + R3 = \frac{R3 \times VHL}{VLH}$$

$$R1 = \frac{R3 \times VHL}{VLH} - R3$$

$$R1 = R3(\frac{VHL}{VLH} - 1)$$

$$\boxed{\boldsymbol{R1 = R3 \times \frac{(VHL - VLH)}{VLH}}}$$

Ahora para encontrar la expresión de R2 debemos reemplazar R1 por la fórmula anterior en cualquiera de las expresiones de las que partimos. Vamos a usar la de VLH porque tiene menos apariciones de R1, pero si lo hacemos en la otra nos va a dar lo mismo.

$$VLH = \frac{VDD \times R2R3}{R1R2 + R1R3 + R2R3}$$

$$VLH(R1R2 + R1R3 + R2R3) = \mathrm{VDD.R2R3}$$

$$VLH.R1R2 + VLH.R1R3 + VLH.R2R3 = \mathrm{VDD.R2R3}$$

Ahora remplazamos todas las R1:

$$\cancel{VLH}.R3\frac{(VHL - VLH)}{\cancel{VLH}}R2 + \cancel{VLH}.R3\frac{(VHL - VLH)}{\cancel{VLH}}R3 + VLH.R2R3 = \mathrm{VDD.R2R3}$$

Acomodamos un poco:

$$R2\cancel{R3}(VHL - VLH) + R3\cancel{R3}(VHL - VLH) + VLH.R2\cancel{R3} = \mathrm{VDD.R2}\cancel{\mathrm{R3}}$$

Y distribuimos el primer paréntesis solamente:

$$R2.VHL - \cancel{R2.VLH} + R3(VHL - VLH) + \cancel{VLH.R2} = \mathrm{VDD.R2}$$

Como tenemos que despejar R2 juntamos todo lo que tenga R2 en un solo lado:

$$R3(VHL - VLH) = \mathrm{VDD.R2} - R2.VHL$$

$$R3(VHL - VLH) = \mathrm{R2}(\mathrm{VDD} - VHL)$$

Por último pasamos el paréntesis dividiendo y tenemos despejada R2:

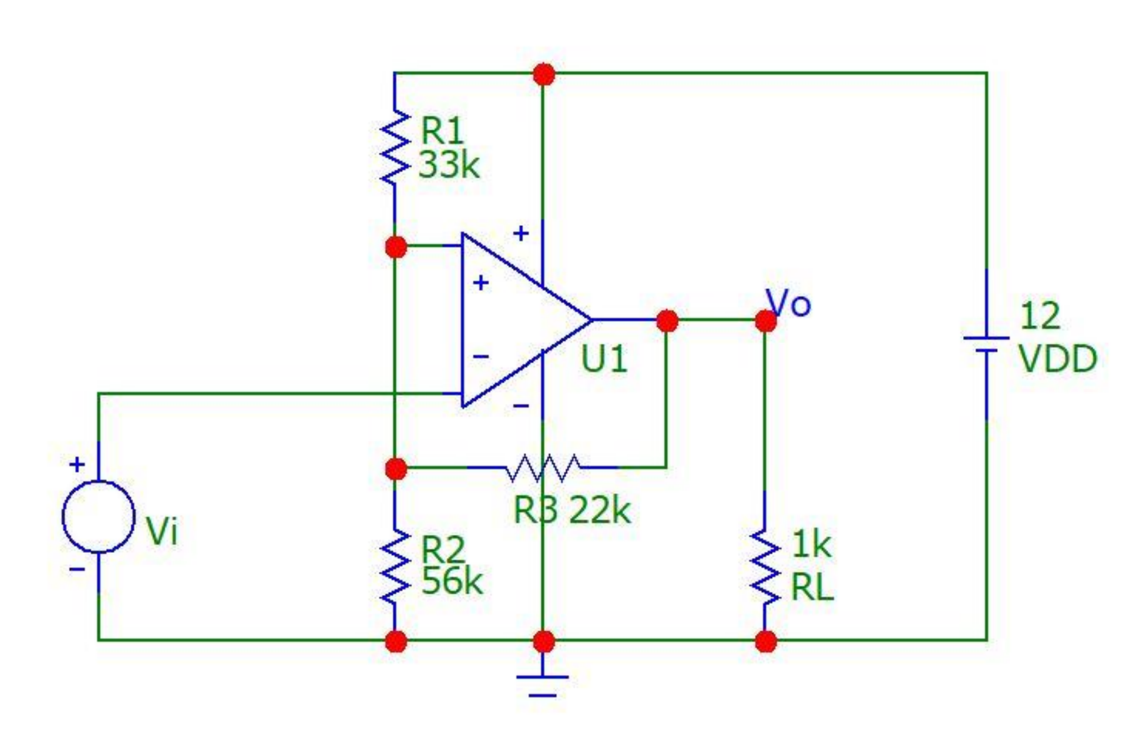
$$\boxed{R2 = R3 \times \frac{(VHL - VLH)}{(\mathrm{VDD} - VHL)}}$$

RESUMEN

SCHMITT TRIGGER CON AMPLIFICADOR OPERACIONAL		
	ANÁLISIS →	$VHL = \frac{VDD.R2.(R1+R3)}{R1R2 + R1R3 + R2R3}$ $VLH = \frac{VDD.R2.R3}{R1R2 + R1R3 + R2R3}$
	DISEÑO →	$R1 = R3.\frac{(VHL - VLH)}{VLH}$ $R2 = R3.\frac{(VHL - VLH)}{VDD - VHL}$

EJEMPLO 1

Vamos a calcular los umbrales de conmutación del Schmitt Trigger de la figura y verificar su funcionamiento mediante una simulación.



VHL = VDD.R2.(R1+R3)/(R1R2 + R1R3 + R2R3)

VHL = 12x56(33+22)/(33x56+33x22+56x22)

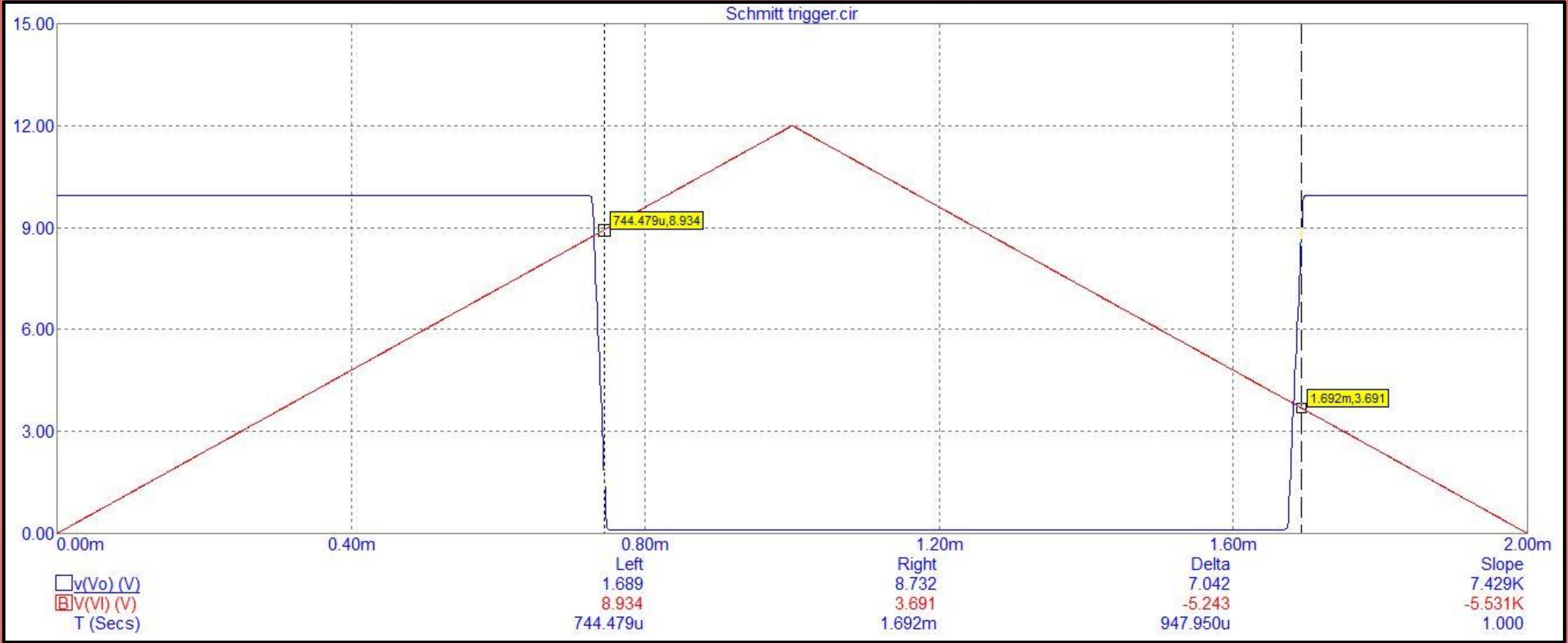
VHL = 9,7V

VLH = VDD.R2.R3/(R1R2 + R1R3 + R2R3)

VLH = 12x56x22/(33x56+33x22+56x22)

VLH = 3,9V

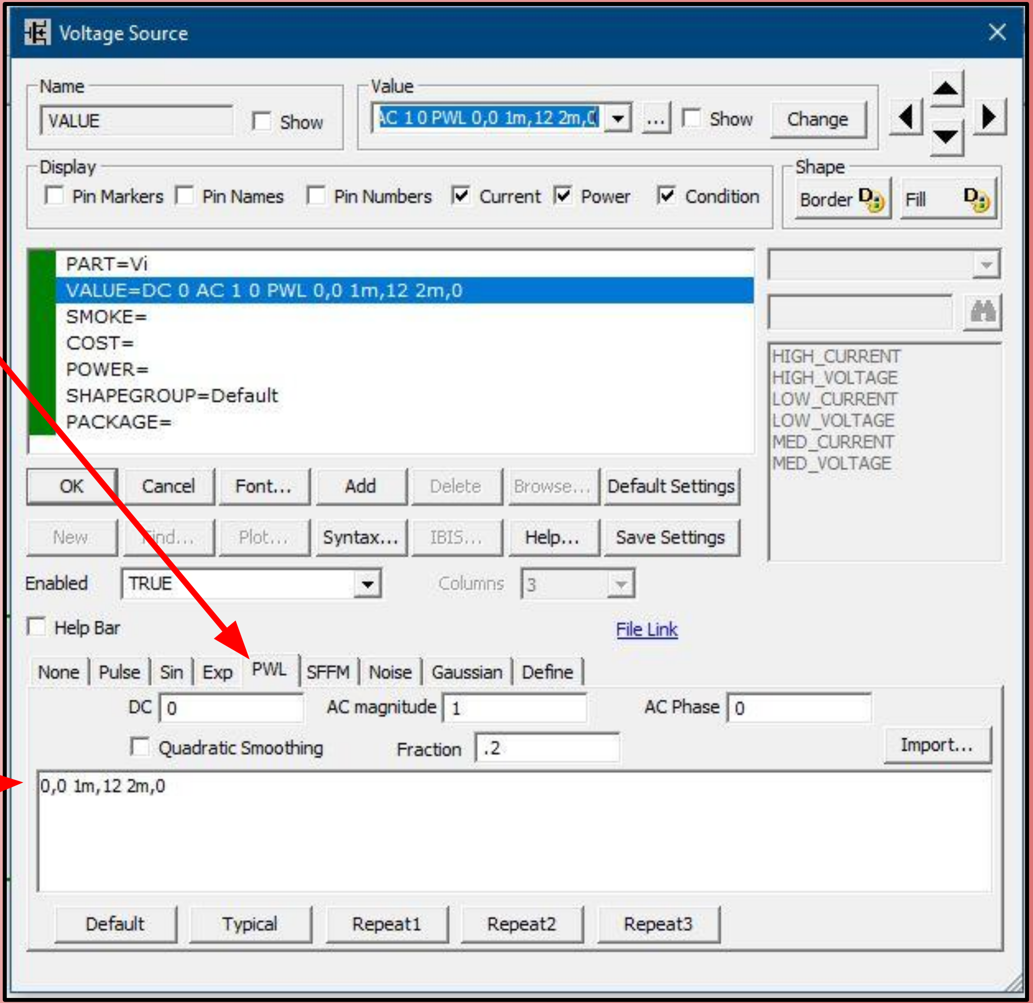
Para la simulación utilizaremos como señal de entrada un pulso triangular de 12V / 2mS que nos permitirá apreciar claramente las transiciones.



Los cursores muestran los valores de la entrada para los que la salida cambia de estado. Cuando Vi va en aumento y alcanza VHL la salida pasa a nivel bajo, mientras que cuando Vi disminuye y cae por debajo de VLH la salida pasa nuevamente a nivel alto. Las diferencias con los resultados de los cálculos se deben principalmente a que, como dijimos antes, las fórmulas son aproximadas por considerar que la salida en estado alto es igual a VDD, cosa que en realidad no sucede.

ESTA ES LA CONFIGURACIÓN DE LA FUENTE DE SEÑAL EN MICROCAP PARA GENERAR EL PULSO TRIANGULAR

DEBEMOS ESCRIBIR AQUÍ LOS PARES DE VALORES DE TIEMPO Y TENSIÓN QUE QUEREMOS QUE TOME LA SEÑAL. EN ESTE CASO 0mS,0V; 1mS,12V; 2mS,0V PARA DARLE FORMA TRIANGULAR.



EJEMPLO 2

Diseñamos un Schmitt Trigger que, con una alimentación de 9V, conmute en 4V y 7V. Luego verificamos el diseño mediante una simulación.

VDD = 9V; VHL = 7V; VLH = 4V

Debemos elegir un valor para R3, podría ser 100KΩ. Luego calculamos R1 y R2:

R1 = R3.(VHL - VLH)/VLH

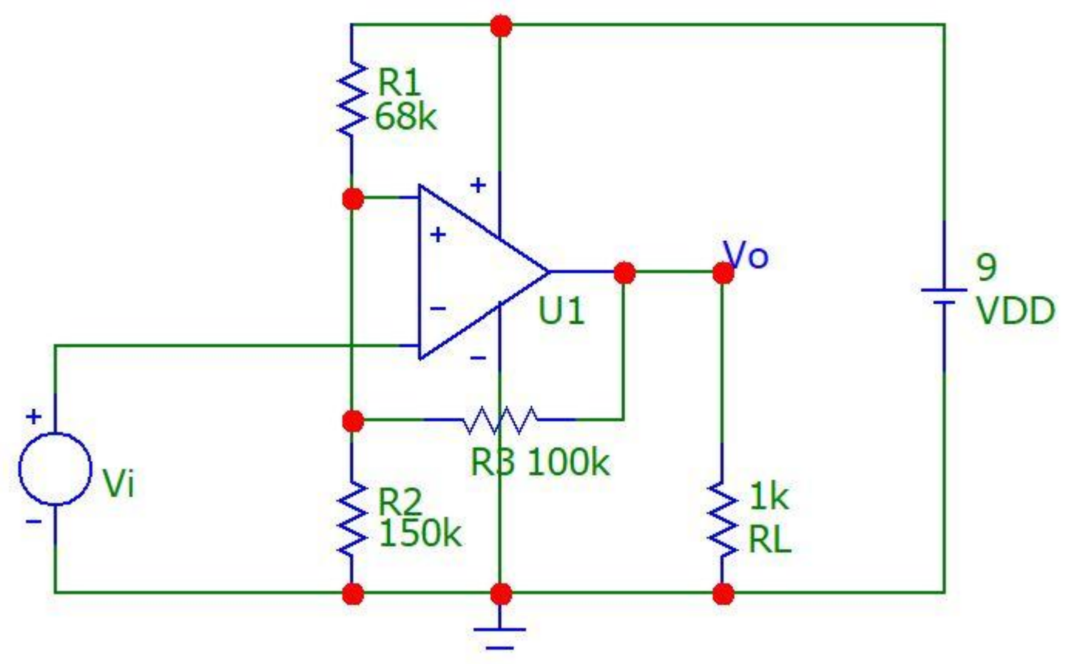
R1 = 100 x (7 - 4)/4

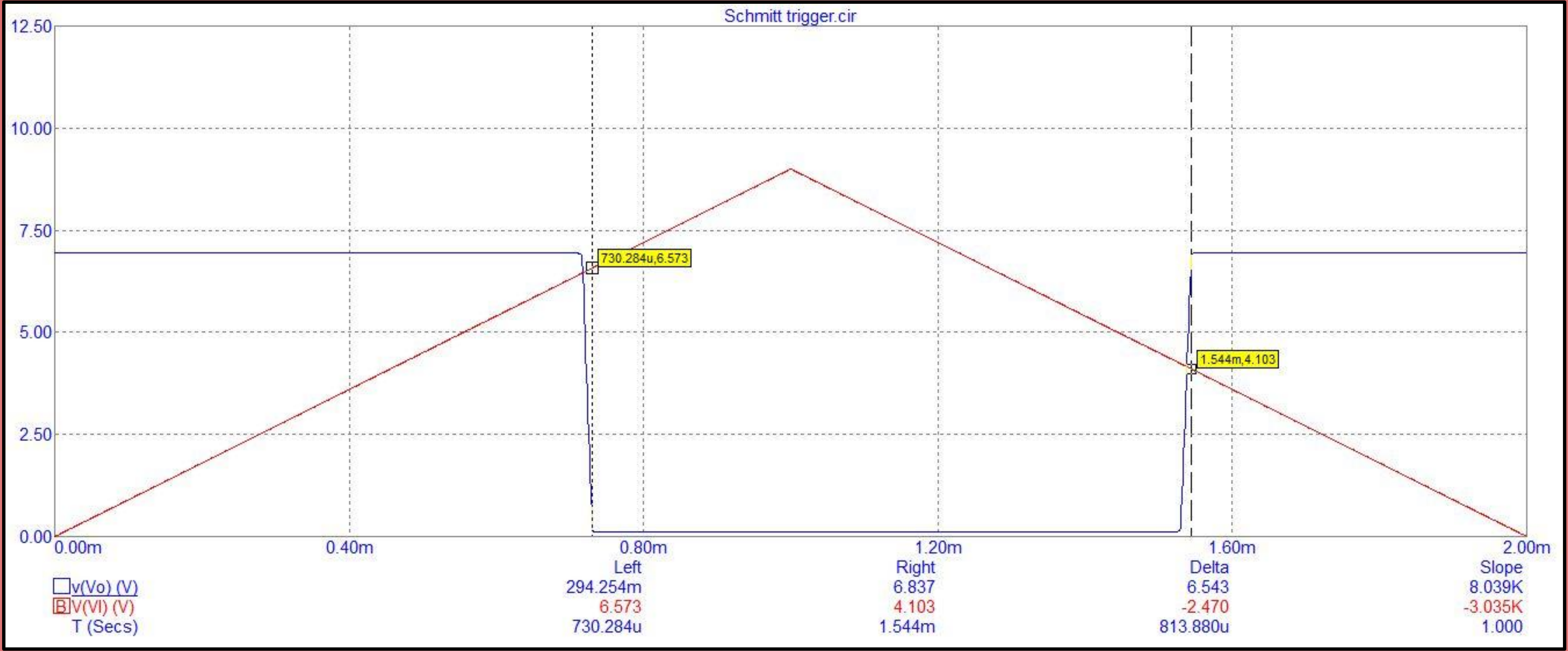
R1 = 75KΩ (podemos probar con el valor comercial de 68KΩ)

R2 = R3.(VHL - VLH)/(VDD - VHL)

R2 = 100 x (7 - 4)/(9 - 7)

R2 = 150KΩ





Para simular usamos la misma señal de entrada a la que solamente le modificamos el valor máximo.
Podemos ver que con los valores de resistencia calculados nos aproximamos bastante a los requerimientos del diseño

EJEMPLO 3

¿Qué sucede si todas las resistencias son iguales?

Supongamos que R1 = R2 = R3 = R, donde R podría ser cualquier valor dentro de los de uso común en circuitos con Aops. Luego:

VHL = VDD.R2.(R1+R3)/(R1R2 + R1R3 + R2R3) = VDD.R.(R + R)/(R.R + R.R + R.R)

VHL = VDD. $2R^2/3R^2$

VHL = ⅔ VDD

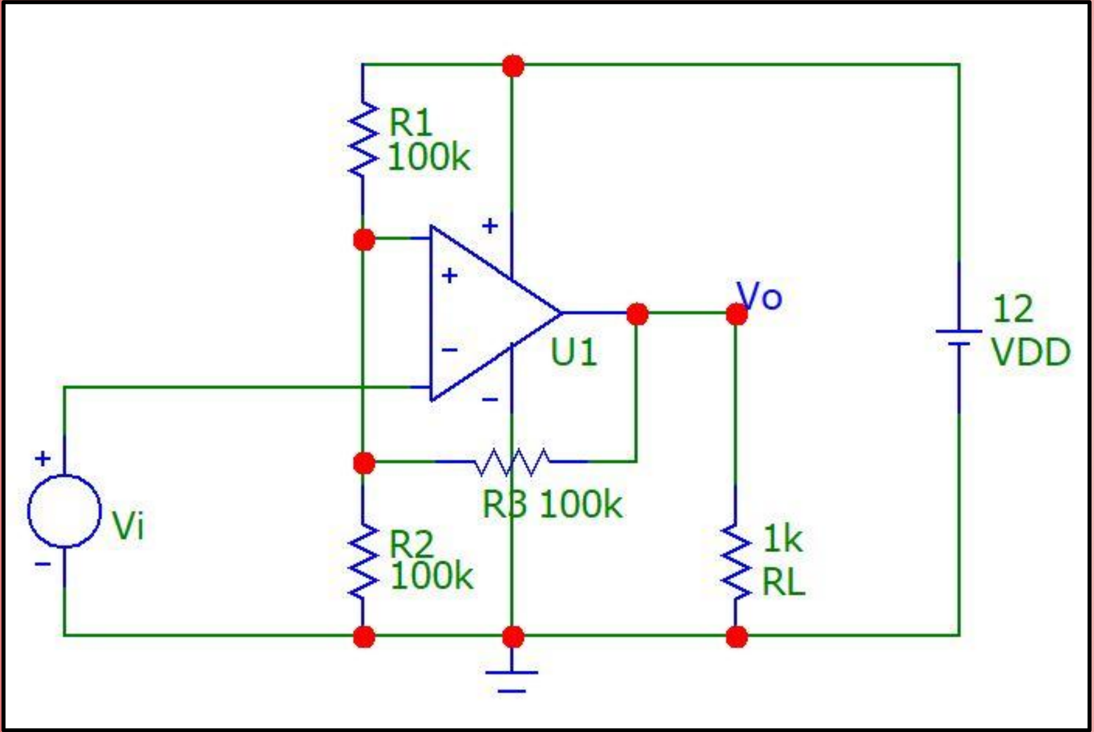
VLH = VLH = VDD.R2.R3/(R1R2 + R1R3 + R2R3) = VDD.R.R/(R.R + R.R + R.R)

VHL = VDD. $R^2/3R^2$

VHL = ⅓ VDD

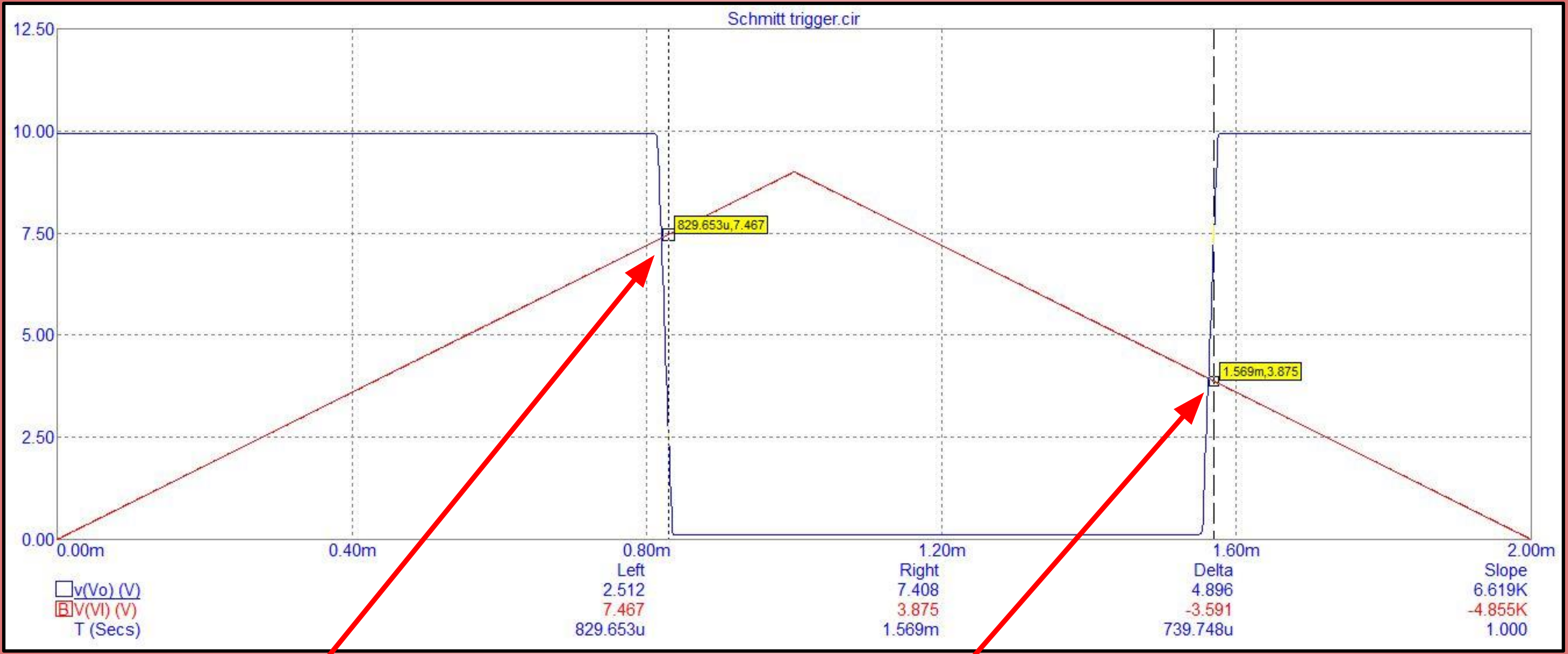
Por lo tanto, si todas las resistencias son iguales (cualquier valor) el Schmitt Trigger conmuta en ⅓ y ⅔ de la alimentación. Es una configuración de uso bastante común.

PROBEMOS ESTO CON UNA SIMULACIÓN



Según los resultados anteriores, este circuito debería conmutar en 4V y 8V

VEAMOS...



VHL
(8V según el cálculo)

VLH
(4V según el cálculo)

Prof. Ing. Sandro N. Amiel