

Práctica 2. Circuitos comparadores

1. Objetivos

- Conocer el funcionamiento de circuitos comparadores empleando Amplificadores Operacionales.
- Conocer el funcionamiento de elementos auxiliares como el NTC y LDR.
- Saber diseñar el circuito comparador mediante el cálculo de todos los componentes necesarios.

2. Circuito comparador simple no inversor.

El primer circuito a realizar en esta segunda práctica de laboratorio se trata de un circuito comparador simple no inversor utilizando un amplificador operacional. También se empleará un transistor NPN para disparar un LED dependiendo de la comparación realizada en el amplificador a partir de la temperatura tomada en un NTC. Este circuito a montar en el laboratorio se muestra en la siguiente imagen (Figura 1):

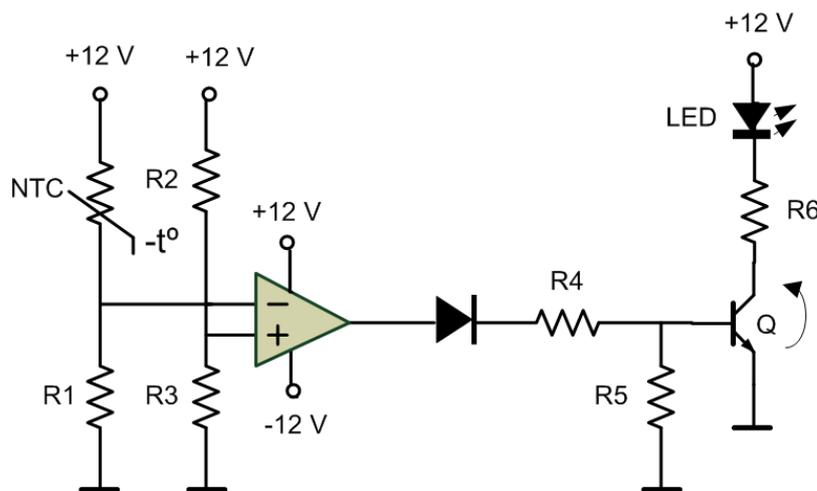


Figura 1. Circuito comparador mediante un amplificador operacional y un transistor NPN

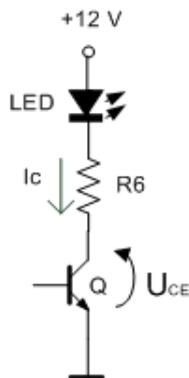
El circuito realiza una comparación de los niveles de tensión que el amplificador operacional posee en sus entradas y hará que el transistor Q conduzca o no (encendiendo el LED o apagándolo) dependiendo de la salida. El amplificador dará una salida alternante entre los valores de aproximadamente 11V y -11V (V_{CC} y V_{EE} con un error de $\pm 1V$) no invertida dependiendo si el valor de referencia (entrada + o no inversora del amplificador) es mayor o menor, respectivamente, del valor proporcionado en la entrada de comparación (entrada - o inversora del amplificador). El valor de la entrada + se encuentra fijado por los valores de resistencias R2 y R3, pero el de la entrada - se halla conectado a un sensor resistivo de temperatura NTC (*Negative Temperature Coefficient*). Como se vio en la práctica de simulación, un sensor NTC reduce su resistencia al aumentar su temperatura y viceversa (véase el manual de la práctica de simulación para más información del elemento NTC). Por lo tanto, dependiendo de la temperatura que detecte el NTC, aumentará o disminuirá su resistencia, haciendo que cambie la tensión en la entrada -, y que la comparación del amplificador conmute entre los valores $\pm 12V$. El diodo conducirá o no, haciendo que al transistor Q le llegue o no una corriente de base para que conduzca (modo saturación) o no (modo corte). Al conducir, el LED se encenderá.

2.1 Diseño del circuito.

En el diseño del circuito se calculan los valores de cada uno de los componentes. En este caso, se deberá calcular el valor de R1, R2, R3, R4, R5 y R6. Como datos, se tienen los *datasheets* de los componentes siguientes: amplificador operacional, transistor, LED y NTC. A continuación se muestra una lista de la referencia comercial de los componentes a utilizar y los parámetros más importantes para el diseño del circuito:

- Amplificador operacional: LM741CN.
- Transistor NPN: BC547C.
- LED: L53SGD (difuso verde).
- NTC: ND03 NTC Thermistor.
- Diodo: 1N4148.

Seguidamente se va a mostrar cómo se realiza el diseño del circuito para obtener el valor de las resistencias R1 a R6. Se va a comenzar con el cálculo de R6 a partir de los valores proporcionados en el *datasheet* del LED (referencia comercial L53SGD) para que conduzca y se ilumine. Esta situación ocurrirá cuando el transistor Q entre en saturación y conduzca. Según el *datasheet* del transistor BC547C, su tensión V_{CE} en saturación (V_{CEsat}) varía entre 0,09V y 0,6V en función del valor establecido para I_C . Para este caso, se va a suponer que existe una caída de $V_{CE} = 0,2V$, que es lo típico. El *datasheet* del LED informa sobre un valor máximo de 2,3V para la tensión directa (V_F), para un valor de 25mA de intensidad de corriente directa máxima (I_{Fmax}). Considerando unos valores para el LED de tensión directa de 2,2V e intensidad de corriente de 15mA se puede realizar el siguiente cálculo:



$$12 = V_{LED} + I_C \cdot R6 + U_{CE} \quad I_C = 15mA$$

$$12 = 2,2 + 15 \cdot 10^{-3} \cdot R6 + 0,2$$

$$R6 = \frac{12 - 2,2 - 0,2}{15 \cdot 10^{-3}} = 640 \Omega$$

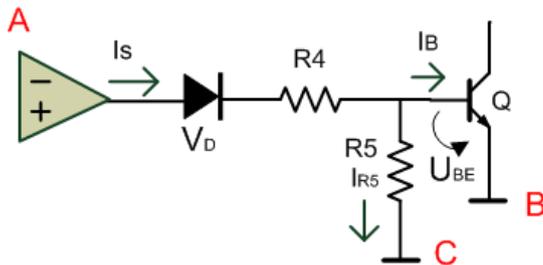
Ya resuelto el valor de la primera resistencia, y sabiendo que la corriente que se ha utilizado para la activación del LED es la corriente de colector del transistor Q (I_C), se van a calcular las resistencias R4 y R5 a partir de la corriente de base I_B . Previamente, es necesario calcular la corriente de base I_B , suponiendo que el transistor va a funcionar en modo saturación. Observando el *datasheet* del transistor utilizado (BC547C), se determina que la ganancia β varía entre 270 y 520 en función e I_C . Para el cálculo de I_B se considerará $\beta=300$, y se tomará I_B diez veces mayor para asegurar la saturación.

$$I_C < \beta \cdot I_B \rightarrow I_B > \frac{I_C}{\beta} = \frac{15 \cdot 10^{-3}}{300} = 0,05mA$$

$$I_B > 0,05mA \rightarrow I_B = 10 \cdot 0,05mA = 0,5mA$$

Con el valor de I_B , es posible calcular los valores de R4 y R5. Para ello, se plantea una corriente de salida del amplificador operacional de $10 \cdot I_B$, regla típica de diseño utilizada para circuitos con transistores NPN con un divisor de tensión (R4 y R5). Por lo tanto, el valor de I_S (véase cálculos siguientes), se plantea con este valor para el diseño del circuito. A partir del valor de I_S , se calcula el valor de I_{R5} , ya que

se sabe el valor de I_B . Teniendo el valor de esta corriente, y sabiendo que el valor de U_{BE} en el transistor NPN en saturación es aproximadamente de 0,7V (véase el valor V_{BEsat} del *datasheet* del BC547C), es posible calcular el valor de R5. Además, el valor de R4 se puede computar sabiendo que la salida del amplificador, cuando el diodo conduce, es aproximadamente de +11V y que en el diodo hay una tensión $V_D=1V$ según su *datasheet*. A continuación, se muestran los cálculos de R4 y R5 comentados en este párrafo:



Corrientes

$$I_S = 10 \cdot I_B = 5mA$$

$$I_{R5} = I_S - I_B = 4,5mA$$

Malla AB

$$V_{salida} - V_D = R4 \cdot I_S + U_{BE}$$

$$11 - 1 = R4 \cdot 5 \cdot 10^{-3} + 0,7$$

$$R4 = \frac{11 - 1 - 0,7}{5 \cdot 10^{-3}} = 1860\Omega$$

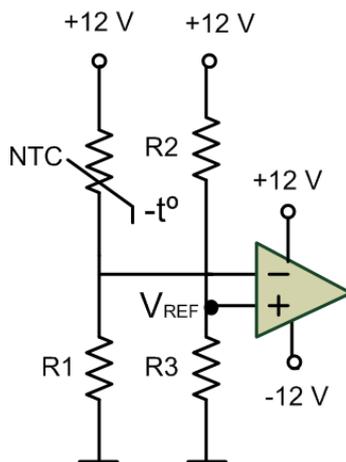
Malla CB

$$U_{BE} = R5 \cdot I_{R5}$$

$$0,7 = R5 \cdot 4,5 \cdot 10^{-3}$$

$$R5 = \frac{0,7}{4,5 \cdot 10^{-3}} = 155,5\Omega$$

Con los cálculos vistos hasta el momento, se ha calculado la parte de la salida del amplificador. Ahora se va a mostrar los cálculos de la parte de la entrada, donde se encuentra el elemento de referencia NTC. En primer lugar, se va a plantear un valor de V_{REF} en el nodo positivo de +6V, que es la mitad de el valor proporcionado de +12V. Para ello, tan sólo es necesario que R2 y R3 tengan un mismo valor, por ejemplo de 1K Ω cada una, ya que por la entrada + del operacional no circula corriente.



$$V_{ref} = \frac{R3}{(R2 + R3)} \cdot V_{cc}$$

$$6 = \frac{R3}{(R2 + R3)} \cdot 12$$

$$R2 = R3 = 1k\Omega$$

Finalmente, se van a realizar los cálculos pertinentes con la NTC, suponiendo que se desea que el circuito comparador detecte los cambios cuando la resistencia esté a 50°C o a 25°C. El cambio en la resistencia hará que la entrada - del amplificador tenga un valor de voltaje diferente en cada temperatura. Para ello, en primer lugar se calcula el valor de la resistencia del NTC para ambas temperaturas, que será diferente, y habrá que comprobar que para esas temperaturas, la diferencia de voltaje es suficiente para la comparación en el circuito.

El cálculo del valor de la resistencia del NTC se realiza en base a una formulación matemática y con una serie de constantes características que facilita el *datasheet* del elemento (ND03 NTC Thermistor). El valor variable de la resistencia en un NTC se expresa con la siguiente ecuación exponencial:

$$R_T = R_0 \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}$$

Donde R_0 es la resistencia a una temperatura de referencia, T_0 es dicha temperatura expresada en K y el parámetro B es la denominada temperatura característica del material. En la hoja de características del NTC, existen diferentes rangos de cambio de resistencia dependiendo del material a escoger. Dentro del tipo ND/NE03, se toman los siguientes valores:

Part Number	Rn at 25°C (Ω)	Material Code	B (K) (ΔB/B (1) ± 5% (2) ± 3%)	α at 25°C (%/°C)
N_03P00223 N_03P00333	22,000 33,000	P	4220 (2)	- 4.7

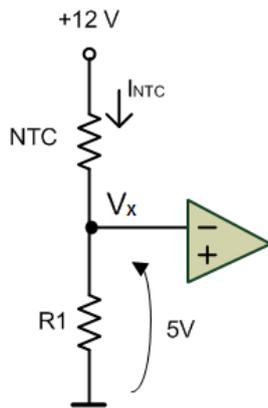
La primera columna es el tipo de NTC, seguido del valor de R_0 . Posteriormente, se muestra el código del material, seguido del valor de B. Tomando estos valores para calcular el valor de la resistencia a 25° y 50°, se tiene que:

$$R_T = R_0 \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}$$

⇒ **T=25°C** $R = 33000 \cdot e^{4220\left(\frac{1}{298} - \frac{1}{298}\right)} = 33 \text{ k}\Omega$

⇒ **T=50°C** $R = 33000 \cdot e^{4220\left(\frac{1}{298} - \frac{1}{323}\right)} = 11 \text{ k}\Omega$

Con el valor de la resistencia calculada del NTC, se puede calcular el valor de R1. Para ello, se establece un valor en la entrada – del amplificador (V_x) de 5V, un valor menor del establecido en la entrada + (6V), para el caso en el que la NTC se encuentra a 25°C (un valor resistivo de 33kΩ). En la entrada del amplificador, se puede considerar una corriente nula, por lo que el valor de R1 se calcula de la siguiente manera:



$$I_{NTC} = \frac{12 - 5}{R_{NTC}} = \frac{12 - 5}{33 \cdot 10^3} = 0,21 \text{ mA}$$

$$R1 = \frac{5}{0,21 \cdot 10^{-3}} = 23,57 \text{ k}\Omega$$

A continuación, dado que se ha puesto el valor de $V_x=5V$ para el caso en el que la temperatura es de 25°C, ahora es necesario comprobar que para el valor de 50°C la resistencia de la NTC hace que el valor en la entrada – sea mayor que el valor de V_{REF} (6V). Los cálculos se muestran a continuación, donde el valor de R1 se toma del cálculo previo y el valor de la resistencia del NTC es ahora para 50°C (11kΩ):

$$I_{NTC} = \frac{12}{R_{NTC} + R1} = \frac{12}{11 \cdot 10^3 + 23,57 \cdot 10^3} = 0,34 \text{ mA}$$

$$V_x - = 0,34 \cdot 10^{-3} \cdot 23,57 \cdot 10^3 = 8,02 \text{ V}$$

Como se puede observar, el valor de V_x es mayor que el valor fijo de referencia en el nodo positivo, por lo que el circuito comparador funcionará bien: para 25°C , el valor de la salida del amplificador ($V_x=5\text{V}$ y $V_{\text{REF}}=6\text{V}$) será $+V_{\text{CC}}=12\pm 1=11\text{V}$, que hará que el diodo conduzca y el transistor NPN entre en saturación, por lo que el LED se encenderá; para 50°C , el valor de la salida del amplificador ($V_x=8,2\text{V}$ y $V_{\text{REF}}=6\text{V}$) será de $-V_{\text{CC}}=-12\pm 1=-11\text{V}$, que hará que el diodo no conduzca y que el transistor pase a modo corte, y el LED se apagará.

2.2. Montaje del circuito

En este apartado se va a describir el montaje de algunos de los componentes del circuito comparador, tales como el amplificador operacional (circuito integrado LM741CN) y el transistor NPN (componente BC547C). Además, se pondrá un esquema aproximado del montaje del circuito sobre los pines de la placa.

Los posibles circuitos integrados que implementan un operacional y sus conexiones, se muestran en la Figura 2, extraída del *datasheet* del LM741CN. Como se puede observar, existen dos tipos de integrados: el tipo 1, con una ranura en uno de los extremos, o el tipo 2, con un punto negro, ambos para indicar la numeración de la patas del integrado. Los pines V^+ y V^- son la alimentación simétrica del amplificador, mientras que INPUT + e INPUT- son las entradas del mismo. Para la implementación del circuito comparador, no hace falta el uso de las entradas OFFSET, que sirven para ajustar el error diferencia del amplificador, por lo que estas se dejarán sin conectar.

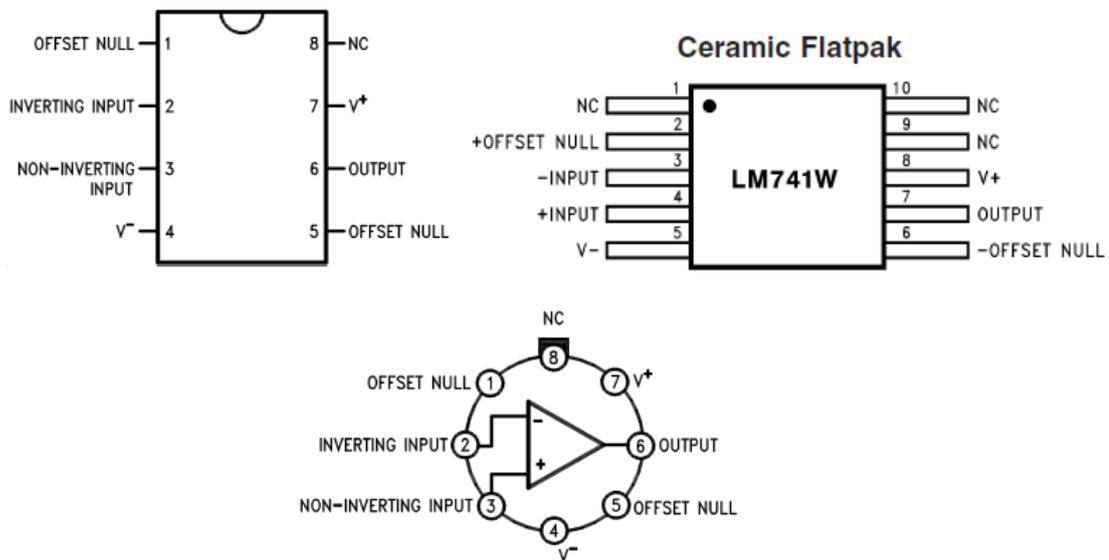


Figura 2. Circuitos integrados y conexiones del LM741CN.

Con respecto al transistor NPN, en la siguiente figura se muestra la correspondencia de los terminales con las conexiones:

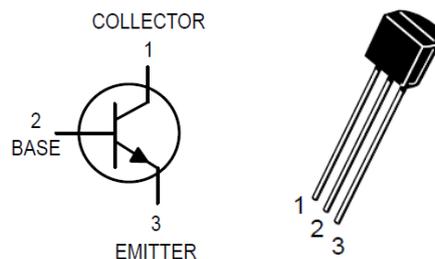


Figura 3. Conexiones del transistor NPN

A continuación, se muestra una posible conexión de los componentes en la placa *proto-board*, que será conveniente seguir para que la evaluación de la práctica sea más sencilla. La etiqueta GND (*Ground*) se refiere a la conexión de referencia común del circuito (\perp).

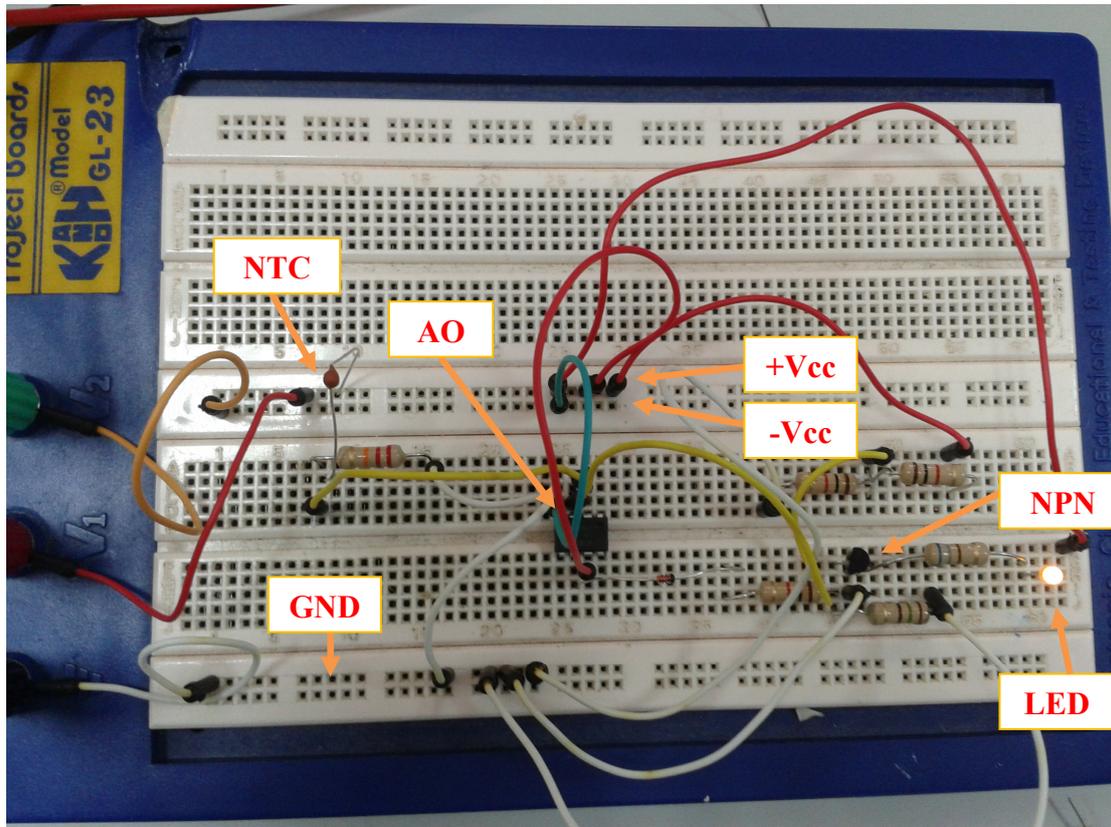


Figura 4. Imagen de conexiones sobre la placa *proto-board* del circuito comparador 1.

3. Circuito comparador mediante realimentación positiva.

El segundo circuito a realizar en esta segunda práctica de laboratorio se trata de un *Trigger de Schmitt* (Figura 5). Un *Trigger de Schmitt* es un comparador que tiene dos umbrales de tensión de entrada diferentes gracias al uso de una realimentación positiva. A la existencia de dos umbrales de comparación se denomina histéresis.

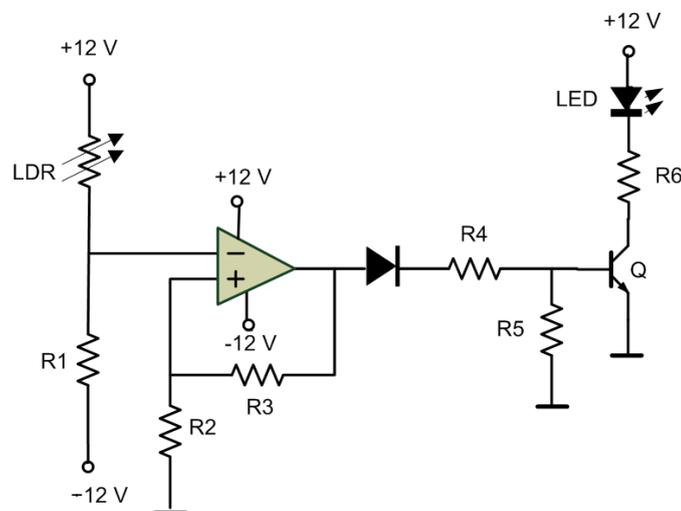


Figura 5. Circuito comparador Trigger de Schmitt simétrico

Principalmente, el *Trigger de Schmitt* usa la histéresis para prevenir el ruido que podría tener la señal de entrada y que puede causar cambios de estado si los niveles de referencia y entrada son parecidos. En la Figura 6, se muestra el funcionamiento de un *Trigger de Schmitt* simétrico, que compara la señal de entrada U_E con dos niveles de tensión U_{TL} (Low-Bajo) y U_{TH} (High-Alto).

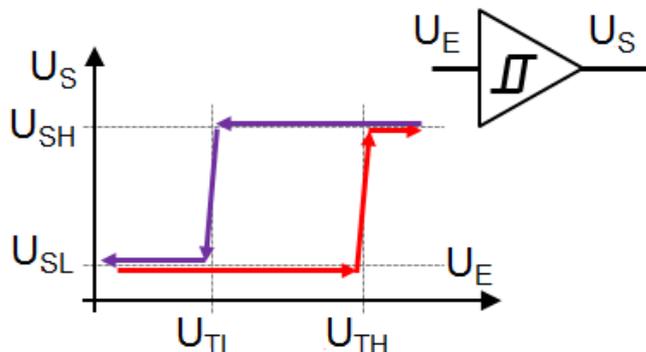


Figura 6. Imagen del funcionamiento de un Trigger de Schmitt simétrico

El funcionamiento es el siguiente: inicialmente, mientras el valor de la entrada U_E sea menor que U_{TH} ($U_E < U_{TH}$), el valor de la salida es U_{SH} . Una vez que el valor de la entrada U_E supera por poco U_{TH} , entonces se cambia de estado y si U_E es mayor que U_{TL} ($U_E > U_{TL}$), la salida conmuta a U_{SL} . Finalmente, cuando U_E sea menor que U_{TL} ($U_E < U_{TL}$), entonces la salida volverá al estado de U_{SH} . A continuación se muestra una imagen del funcionamiento mencionado (Figura 7):

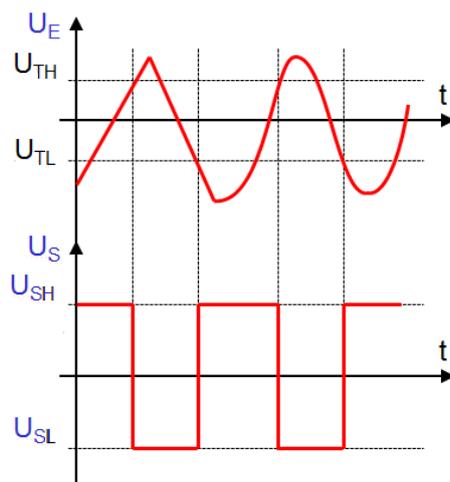


Figura 7. Funcionamiento del Trigger Schmitt simétrico

Para implementar el *Trigger de Schmitt* en esta práctica se utilizará un amplificador operacional realimentado positivamente (Figura 7). Los niveles de conmutación de la salida serán en este caso de V_{CC} para U_{SH} , y V_{EE} para U_{SL} (despreciando la caída de aproximadamente 1V dentro del operacional), dependiendo si el valor de voltaje en la entrada inversora es menor que U_{TH} (valor determinado por R_2 , R_3 y $U_{SH}=V_{CC}$) o mayor que U_{TL} (valor determinado por R_2 , R_3 y $U_{SL}=V_{EE}$). En la práctica, se propone que el nivel de tensión en la entrada inversora esté determinado por un elemento LDR (*Light Dependent Resistor*), que posee una resistencia variable en función de la luz que capte del entorno. El LDR utilizado es el NSL-19M51, cuyo *datasheet* se proporciona con el material de la práctica. Al igual que el circuito anterior, la comparación se podrá verificar con el encendido de un LED en la salida del amplificador operacional, activado mediante un transistor NPN.

3.1. Conceptos sobre la realimentación en el amplificador operacional.

En un circuito de *Trigger de Schmitt* con amplificador operacional como el propuesto en este experimento, los niveles de conmutación U_{TH} y U_{TL} son simétricos, debido a que ambos están determinados por el mismo divisor de tensión que hay entre la salida del amplificador y la entrada no inversora, garantizando la realimentación positiva, y a que la salida varía entre los niveles simétricos de $V_{CC}=12V$ y $V_{EE}=-12V$. En el ejemplo de la figura 8, las resistencias del divisor de tensión son R_1 y R_2 , que tienen el mismo valor ($10K\Omega$), y por lo tanto $U_{TH}=6V$ y $U_{TL}=-6V$.

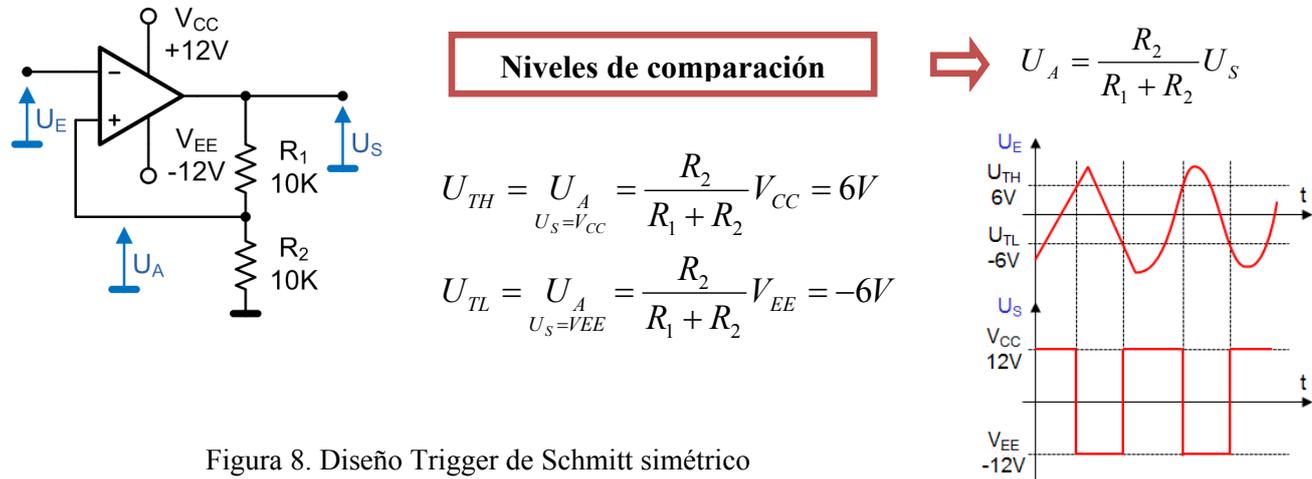


Figura 8. Diseño Trigger de Schmitt simétrico

3.2. Cálculos previos al montaje

En este caso, dado que ya se ha mostrado cómo se calculan las resistencias para el circuito anterior, en este caso, para el comparador basado en *Trigger de Schmitt*, se propone como ejercicio de la práctica realizar el cálculo de R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , R_5 y R_6 para el circuito propuesto en la Figura 5. Las resistencias R_4 , R_5 y R_6 se calculan de una forma similar a la indicada en el circuito comparador descrito en el apartado 2 de esta memoria, pero considerando un LED rojo brillante (L-53HD) con una corriente de 20mA y tensión directa de 2,3V. Las resistencias que conforman el divisor de tensión de la realimentación positiva del amplificador, serán del mismo valor ($R_2=R_3$). Emplear unos niveles de comparación de $\pm 6V$. Para calcular el valor de R_1 hay que determinar antes los umbrales de conmutación, y después hacer los cálculos necesarios considerando la resistencia que tiene la LDR (Fotorresistencia NSL19-MS51) en condiciones de luz y oscuridad, según se describe en su *datasheet*, que también se proporciona.

Nota: el diseño del circuito deberá realizarse para que el LED del circuito se encienda cuando el LDR detecte que no haya luz. Para ello, se tendrá que mirar la tabla de valores de resistencia del LDR de su *datasheet* para distintas configuraciones de iluminación.

3.3. Montaje del circuito

Para el montaje del circuito, será necesario consultar las imágenes incluidas en el apartado 2.3, donde se muestra las conexiones tanto del amplificador como del transistor. La conexión de los componentes también es bastante similar a la del primer circuito comparador. En este caso, no se muestra la imagen del circuito prototipo, ya que es bastante similar a la del ejercicio anterior. Además, en la ficha de la práctica se ha puesto una cuestión para dibujar el circuito realizado, indicando las conexiones de los componentes sobre una imagen de la placa *protoboard*.

4. Tareas de la práctica.

Circuito comparador 1.

- Describe el funcionamiento del circuito y comenta cuando se enciende el LED y porqué.
- Realiza mediciones de voltaje en la entrada positiva (INPUT+) y negativa (INPUT-) del comparador (amplificador operacional). Con respecto a la INPUT-, prueba a diferentes temperaturas del NTC: T^a ambiente, apretando el NTC con los dedos y calentando el NTC con un mechero proporcionado por el profesor. ¿Qué ocurre con los cambios de temperatura del NTC?
 - o Valores medidos: INPUT+, INPUT-.
- Realiza mediciones de voltaje a la salida del operacional durante los mismos casos del apartado anterior. ¿Qué está ocurriendo a la salida del comparador cuando la NTC detecta distintas temperaturas? ¿Qué ocurre cuando la salida es un valor positivo de voltaje? ¿Y cuándo es negativo?.
 - o Valores medidos: OUTPUT.
- Mide la intensidad de salida del amplificador.
 - o Valores medidos: I_s.
- Mide la intensidad que pasa por el LED cuando éste se enciende. Esta intensidad es la intensidad del colector del transistor NPN. ¿En qué modo está trabajando el transistor NPN (corte, saturación, activo). Mide también el voltaje de caída en el LED cuando está conduciendo.
 - o Valores medidos: I_C, V_{LED}.
- Mide la tensión de caída entre la base y el emisor del transistor NPN. También mídelo entre el colector y el emisor.
 - o Valores medidos: V_{BE}, V_{CE}.

Circuito comparador 2

- Describe cómo has realizado los cálculos para calcular las resistencias R1, R2, R3, R4, R5 y R6. Indica los datos que has seleccionado de los *datasheets* de los componentes.
- Describe el funcionamiento del circuito y comenta cuando se enciende el LED y porqué.
- Realiza mediciones de voltaje en la entrada positiva (INPUT+) y negativa (INPUT-) del comparador (amplificador operacional). Con respecto a la INPUT-, prueba a diferentes intensidades de luz: luz ambiente, a oscuras y con una mayor iluminación. ¿Qué ocurre con los cambios de temperatura del LDR?
 - o Valores medidos: INPUT+, INPUT-.
- Realiza mediciones de voltaje a la salida del operacional durante los mismos casos del apartado anterior. ¿Qué está ocurriendo a la salida del comparador cuando el LDR detecta distintas medidas de luz? ¿Qué ocurre cuando la salida es un valor positivo de voltaje? ¿Y cuándo es negativo?.
 - o Valores medidos: OUTPUT.
- Mide la intensidad de realimentación del amplificador operacional.
 - o Valores medidos: I_R.

- Mide la intensidad que pasa por el LED cuando éste se enciende. Esta intensidad es la intensidad del colector del transistor NPN. ¿En qué modo está trabajando el transistor NPN (corte, saturación, activo). Mide también el voltaje de caída en el LED cuando está conduciendo.
 - o Valores medidos: I_C , V_{LED} .