

TEMA 9

Comparadores de tensión

9.1.- Introducción: El OA como comparador

Los comparadores son circuitos no lineales que, como su nombre indica, sirven para comparar dos señales (una de las cuales generalmente es una tensión de referencia) y determinar cuál de ellas es mayor o menor. La tensión de salida tiene dos estados (binaria) y se comporta como un convertidor analógico-digital de 1 bit. Su utilización en las aplicaciones de generación de señal, detección, modulación de señal, etc, es muy importante y constituye un bloque analógico básico en muchos circuitos.

La función del comparador es comparar dos tensiones obteniéndose como resultado una tensión alta (V_{OH}) o baja (V_{OL}). En la figura 9.1.a se presenta el símbolo para representar comparadores que es el mismo que el utilizado para amplificadores operacionales. La operación de un comparador, representado en la VTC de la figura 9.1.b, se puede expresar como:

$$\begin{cases} V_o = V_{OL} & \text{si } V_p < V_n \\ V_o = V_{OH} & \text{si } V_p > V_n \end{cases} \quad (9.1)$$

En el caso de que la tensión V_n esté fijada a 0, entonces la tensión de salida $V_o = V_{OL}$ o $V_o = V_{OH}$ en función de si $V_p < 0$ o $V_p > 0$, respectivamente. El comparador acepta señales analógicas a la entrada y proporciona señales binarias a la salida. Este elemento constituye un nexo de unión entre el mundo analógico y digital.

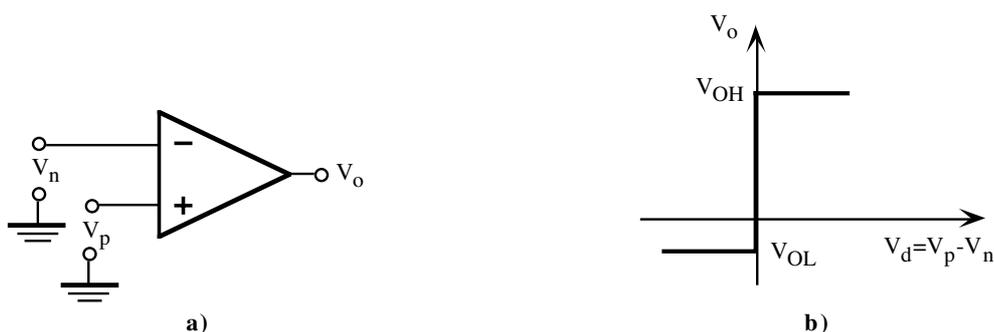


Figura 9.1. Comparador de tensión: a) Símbolo, b) VTC.

Los OAs pueden actuar como comparadores cuando la ganancia diferencial en lazo abierto sea alta (>10.000) y la velocidad no sea un factor crítico. Como ejemplo, el OA 741 se comporta como un elemento de entrada lineal si la tensión de entrada en modo diferencia está comprendida entre los valores $-65\mu V < V_d < +65\mu V$. Fuera de ese rango la etapa de salida del amplificador entra en saturación y puede comportarse como comparador.

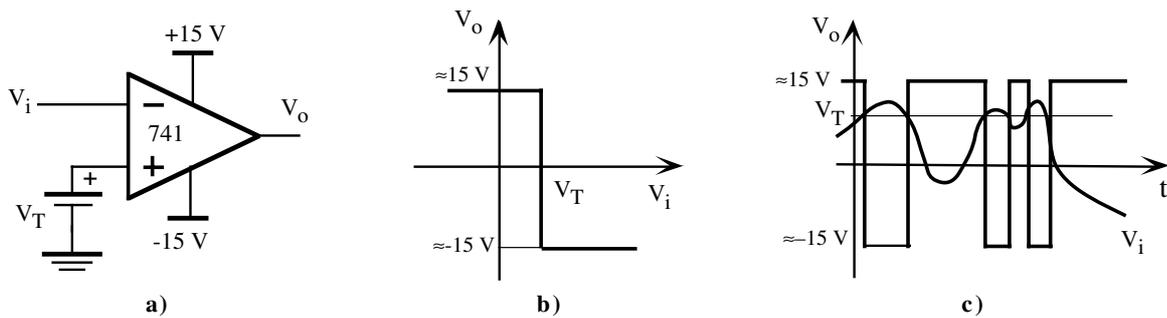


Figura 9.2. a) OA 741 como comparador; b) VTC; c) Ejemplo de formas de onda entrada-salida.

En la figura 9.2.a se muestra una aplicación sencilla del OA 741 como comparador. El amplificador carece de realimentación y la VTC de la figura 9.2.b indica que siempre que $V_i > V_T$, entonces la salida es baja, y viceversa, si $V_i < V_T$ la salida es alta. Los límites alto y bajo de V_o son establecidos por las tensiones de alimentación; en este caso $\pm 15\text{V}$. La figura 9.2.c muestra un ejemplo del comportamiento de este circuito a una entrada V_i analógica.

Aunque los OAs funcionalmente pueden actuar como comparadores, sus limitaciones hacen que sean inservibles para muchas aplicaciones. Tienen una limitación en frecuencia importante, un *slew-rate* bajo y unos retrasos tan elevados que únicamente son válidos a frecuencias bajas. Además, los OAs están pensados para actuar como amplificadores e incluyen técnicas de compensación en frecuencia no necesarias cuando operan como comparadores. A veces es necesario añadir una circuitería adicional cuando los niveles de tensión tienen que ser compatibles con TTL, ECL o CMOS. Por estas limitaciones, se han desarrollado comparadores monolíticos especialmente concebidos para aplicaciones de comparación.

9.2.- Comparadores de tensión monolíticos

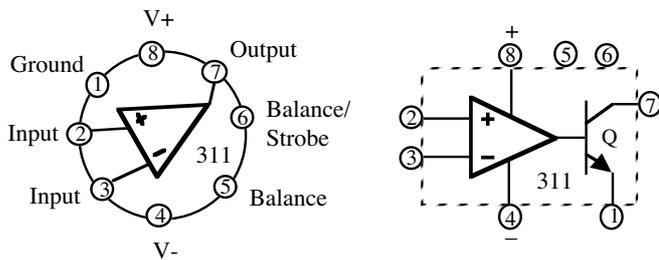
Los comparadores monolíticos tienen una estructura similar a los OAs, excepto que utiliza unas técnicas circuitales especiales que mejoran la velocidad y facilitan la interfase de salida para hacerlo compatible con otros circuitos. Un parámetro importante de un comparador es su *respuesta temporal* definida como el tiempo necesario en alcanzar el 50% del nivel de salida cuando se aplica un escalón a la entrada. Los comparadores típicos tienen tiempos que varían entre 50 y 200ns. Sin embargo, los convertidores A/D, como por ejemplo los convertidores *flash*, precisan de comparadores de muy alta velocidad con tiempos de respuesta del orden de 10ns. Tales circuitos se pueden lograr usando configuraciones basadas en las familias lógicas ECL y Schottky TTL. Ejemplos de este tipo de comparadores son el LM361 (14ns) de National Semiconductor, ME521 (12ns max) de Signetics, el LT1016 (10ns) de Linear Technology y el Am-685 (6.5ns) de Avanced Micro-Devices.

Por último, ciertos comparadores monolíticos tienen incorporados líneas de *strobing* a la entrada para habilitar/deshabilitar el dispositivo y biestables a la salida para retener el resultado de la última comparación. Estas aplicaciones son muy útiles en determinados convertidores A/D y en interfases con microcomputadores.

9.2.1.- Familia 311

La serie 311 de National Semiconductor es una de las familias más populares en comparadores integrados. Puede operar con tensiones duales de $\pm 15\text{V}$ o con tensión simple de $+5\text{V}$ y la salida es en colector abierto (*open-colector*) con tensiones de alimentación independientes para seleccionar los niveles de tensión de salida. Posee además un circuito de protección que limitan la intensidad máxima de salida a 50mA. Las correcciones de

offset se puede realizar mediante un potenciómetro variable conectado a las entradas 5 y 6, similar a la técnica utilizada en amplificadores operacionales.



Características	
Response Time, typ (ns)	100
Supply Voltage, min/max (Volt)	5/36
Supply Current (mA)	5.1
Output Type	Open Drain
Output Current, typ (mA)	50
V _{OS} , Room max (mV)	7.5
Input Bias Current, max (nA)	300

Figura 9.3. Características del comparador LM311.

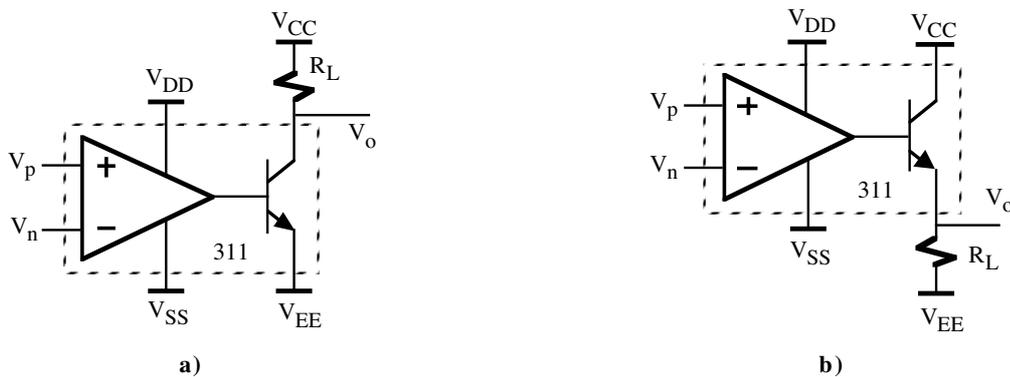


Figura 9.4. Polarización de la etapa de salida del LM311. a) Configuración con resistencia de colector o configuración normal y b) configuración seguidor de emisor.

Las formas más sencillas de utilizar este comparador se muestran en la figura 9.4.a y 9.4.b. En la figura 9.4.a, el transistor de salida tiene conectado una resistencia R_L y dos tensiones de polarización independientes. Los niveles de tensión de salida son

$$\begin{cases} V_o = V_{OL} \approx V_{EE} & \text{si } V_p < V_n \text{ (Q en SATURACION)} \\ V_o = V_{OH} = V_{CC} & \text{si } V_p > V_n \text{ (Q en CORTE)} \end{cases} \quad (9.2)$$

La configuración seguidor de emisor de la figura 9.4.b resulta muy útil cuando se precisa de interfaces a masa tal como sucede en los SRC. Los niveles de tensión de salida son

Transfer Function

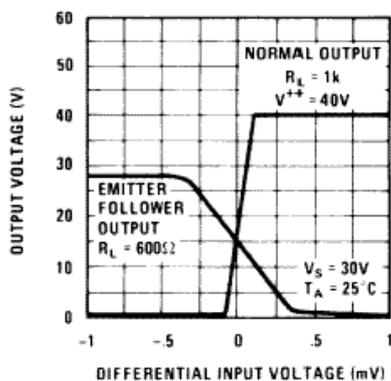


Figura 9.5. VTC de las configuraciones de la figura 9.4.

$$\begin{cases} V_o = V_{OL} \approx V_{CC} & \text{si } V_p < V_n \text{ (Q en SATURACION)} \\ V_o = V_{OH} = V_{EE} & \text{si } V_p > V_n \text{ (Q en CORTE)} \end{cases} \quad (9.3)$$

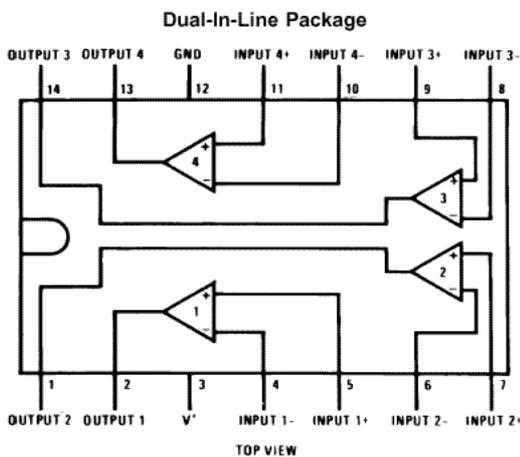
La gráfica de la figura 9.5 indica la VTC de las configuraciones de las figuras 9.4.a y 9.4.b proporcionadas por el fabricante. El seguidor de emisor presenta una polaridad contraria a la de resistencia de colector y su rango de tensiones de entrada en modo diferencial es mucho mayor.

Este comparador tiene versiones de baja potencia inferiores a $500\mu W$

(LP311), duales (LH2311) y con entrada JFET (LF311).

9.2.2.- Familia 339

La serie 339 de National Semiconductor es otra familia de comparadores muy utilizada cuando el coste es crítico ya que un mismo encapsulado contiene varios comparadores cada uno de ellos con dos entradas y una salida en colector abierto. La tensión de alimentación es común y todos los comparadores disipan potencia aunque solo se utilice uno de ellos. La figura 9.6 contiene la distribución circuital del encapsulado del “quad” LM339 y las principales características de este comparador descritas por el fabricante. La intensidad máxima de salida es de 16mA (typ) con 6mA (min). Esta familia tiene diferentes versiones como el LP339 de bajo consumo ($60\mu A$), el LP365 cuyo consumo estático de corriente puede ser programado mediante una resistencia externa, el LM292 formado por dos OAs y dos comparadores, el CA3290 en de RCA en tecnología BiCMOS con corrientes de entrada del orden de pA, etc.



Features

- Wide supply voltage range
 - LM139/139A Series 2 to 36 V_{DC} or ± 1 to $\pm 18 V_{DC}$
 - LM2901: 2 to 36 V_{DC} or ± 1 to $\pm 18 V_{DC}$
 - LM3302: 2 to 28 V_{DC} or ± 1 to $\pm 14 V_{DC}$
- Very low supply current drain (0.8 mA) — independent of supply voltage
- Low input biasing current: 25 nA
- Low input offset current: ± 5 nA
- Offset voltage: ± 3 mV
- Input common-mode voltage range includes GND
- Differential input voltage range equal to the power supply voltage
- Low output saturation voltage: 250 mV at 4 mA
- Output voltage compatible with TTL, DTL, ECL, MOS and CMOS logic systems

Figura 9.6. Encapsulado y características y del LM339.

9.3.- Algunas aplicaciones de los comparadores de tensión

Los comparadores de tensión son utilizados en diferentes fases de generación y transmisión de señal. En este apartado se describen algunas de las aplicaciones básicas que suelen constituir parte de sistemas más complejos.

9.3.1.- Detector de nivel

La función del detector de nivel es identificar cuando una variable física (tensión, corriente, temperatura, humedad, etc) es superior o inferior a un nivel de referencia. La salida del detector es binaria y puede ser utilizada para controlar un motor, relé o un diodo LED, por ejemplo. En la figura 9.7 se describe un detector de nivel basado en el LM339 en donde la tensión de entrada es comparada con la tensión de referencia de un diodo Zener; en función del resultado de comparación el LED conducirá o no. En este circuito se verifica que

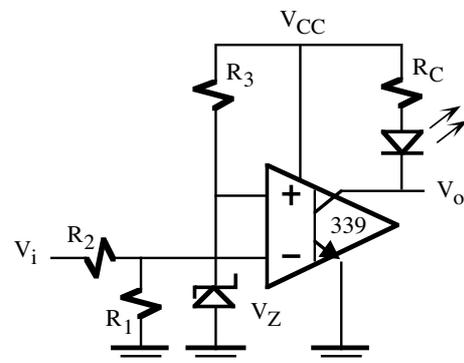


Figura 9.7. Detector de nivel básico.

$$\begin{cases} V_Z < V_i \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) & \rightarrow \text{LED ON} \\ V_Z > V_i \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) & \rightarrow \text{LED OFF} \end{cases} \quad (9.4)$$

9.3.2.- Detector de ventana

El detector de ventana, también llamado comparador de ventana, permite determinar si una tensión de entrada está comprendida dentro de un rango de tensiones. El circuito puede ser construido fácilmente mediante dos comparadores y dos tensiones de referencia que definen el límite superior (V_{TH}) e inferior (V_{TL}). En el circuito de la figura 9.8 se presenta un comparador de ventana basado en el LM339 y su VTC. Si se verifica que $V_{TL} < V_i < V_{TH}$ entonces la salida es alta ($V_{OH} = V_{CC}$); en el resto de los valores la salida es baja ($V_{OL} \cong 0 \text{ V}$).

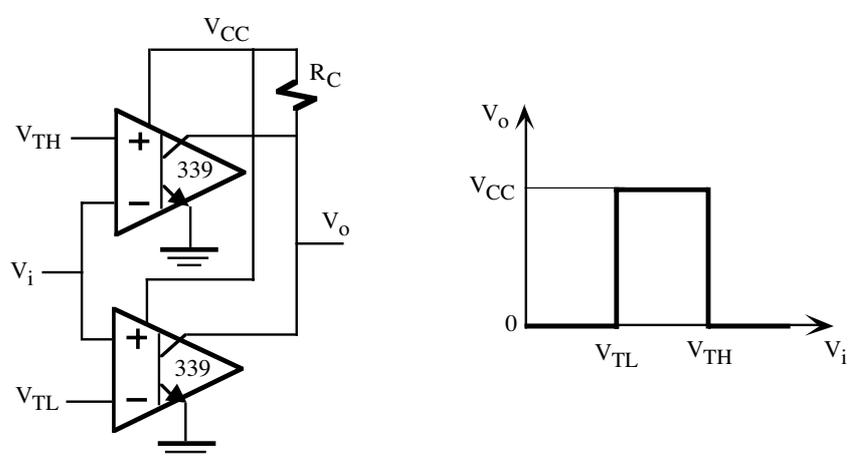


Figura 9.8. Detector de ventana y su VTC.

9.3.3.- Medidor gráfico de barras

Un medidor gráfico de barras proporciona una indicación visual del nivel de señal a la entrada del circuito. Un ejemplo muy típico se encuentra en los indicadores luminosos de los amplificadores de sonido comerciales. Este circuito básicamente es una cadena de detectores de ventana con diferentes tensiones de comparación; la salida suele estar constituida por diodos LEDs para su visualización luminosa.

El medidor gráfico de barras se puede construir mediante comparadores, pero existen en el mercado varios circuitos integrados especialmente diseñados con este propósito como son el TL490C de Texas Instruments y el LM3914/15/16 de National Semiconductor. A modo de ejemplo en la figura 9.9 aparece el diagrama circuital del medidor gráfico de barras LM3914. Está constituido por 10 comparadores cuya tensión de referencia se obtiene mediante una cadena de 10 resistencias de $1\text{k}\Omega$ conectadas en serie que permiten seleccionar el rango de tensiones de comparación en función de las tensiones aplicadas a R_{HI} (pin 6) y R_{LO} (pin 4). La señal de entrada (pin 5) accede a la entrada negativa de los comparadores mediante un OA en configuración seguidor y tiene un diodo de protección para eliminar tensiones negativas. Este circuito dispone además de una fuente de tensión de referencia de 1.25V para ajustar su sensibilidad y un circuito adicional que permite seleccionar el modo de operación de los LEDs: simple o barras. A la derecha de esta figura se presenta un ejemplo de aplicación del

LM3914 para construir un medidor gráfico de barras entre 0 V y 5 V. En este circuito, la fuente tensión de referencia fija a 1.25 V la caída de tensión en R_1 . Aplicando el principio de divisor de tensión y suponiendo despreciable la intensidad que circula por la línea 8, la tensión en la línea 6 vale $V_6 = (1 + R_2/R_1)1.25 \text{ V} = 5.2 \text{ V}$. Las tensiones de referencia en los comparadores van a ser: 0.52 V, 1.04 V, 1.56, 2.08, ..., 4.68 V.

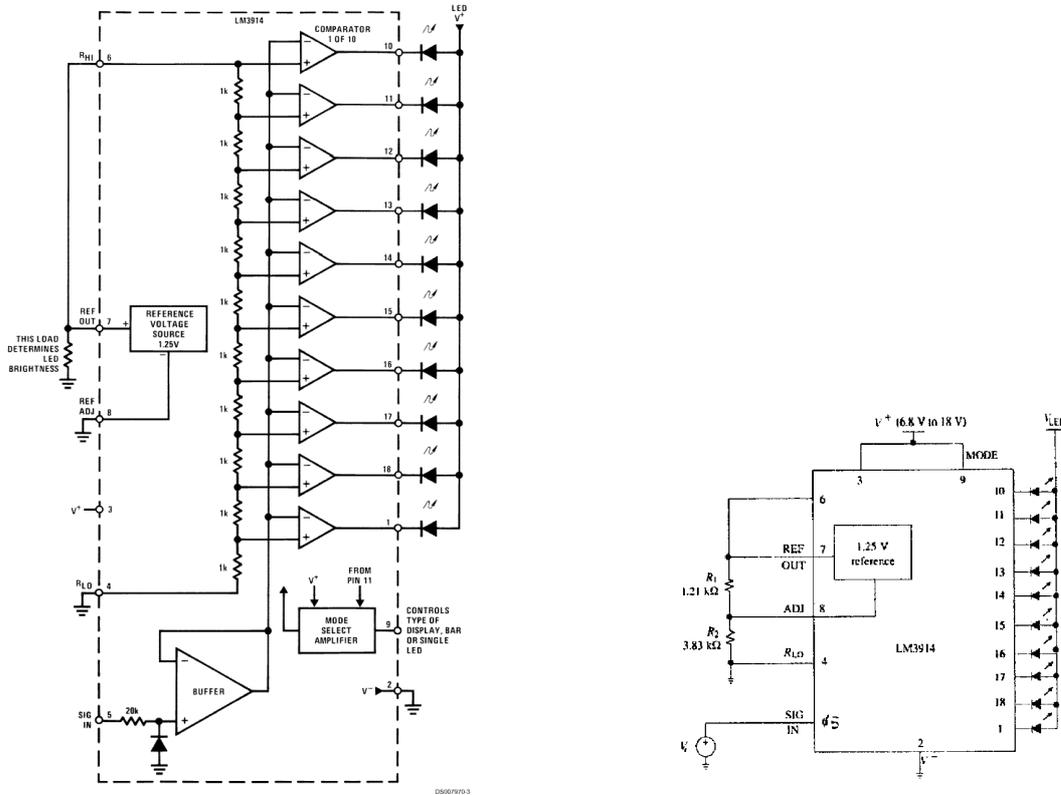


Figura 9.9. Diagrama circuital del medidor gráfico de barras LM3914. A la derecha se muestra un ejemplo de aplicación de este circuito para un nivel de entrada de 0 V y 5 V.

9.4.- Disparador Schmitt

La realimentación negativa en un amplificador tiende a mantenerle dentro de la región lineal y una realimentación positiva fuerza a ese amplificador a operar en la región de saturación. Un disparador Schmitt es un comparador regenerativo con realimentación positiva que presenta dos tensiones de comparación a la entrada, V_{TH} y V_{TL} , en función del estado de la salida. La VTC de estos circuitos presenta histéresis y por ello también se les denomina comparador con histéresis. Sus principales aplicaciones se encuentran en el campo de comunicaciones digitales debido a su capacidad de eliminar ruidos y en circuitos generadores de formas de onda.

En la figura 9.10.a se muestra el esquema de un disparador de Schmitt inversor formado por un OA o un comparador. Las resistencias R_1 y R_2 introducen una realimentación positiva en el circuito que fuerza a operar al OA en saturación. La tensión de entrada V_i es comparada con V_p ; esta tensión se obtiene a través del divisor de tensión formado por R_1 y R_2 de forma que

$$V_p = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_o \tag{9.5}$$

Como V_o puede tener dos estados (V_{OH}, V_{OL}), existen dos tensiones umbrales o *threshold* definidos por

$$\begin{cases} V_{TH} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{OH} \\ V_{TL} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{OL} \end{cases} \quad (9.6)$$

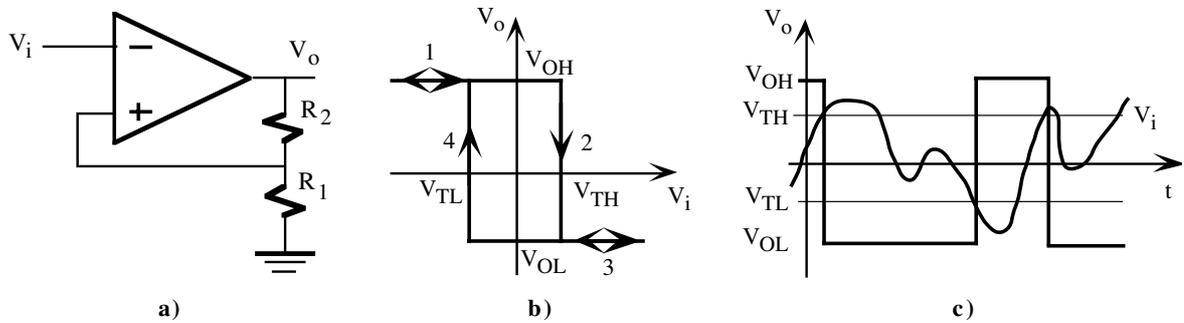


Figura 9.10. a) Disparador de Schmitt inversor; b) VTC; c) Formas de onda entrada-salida.

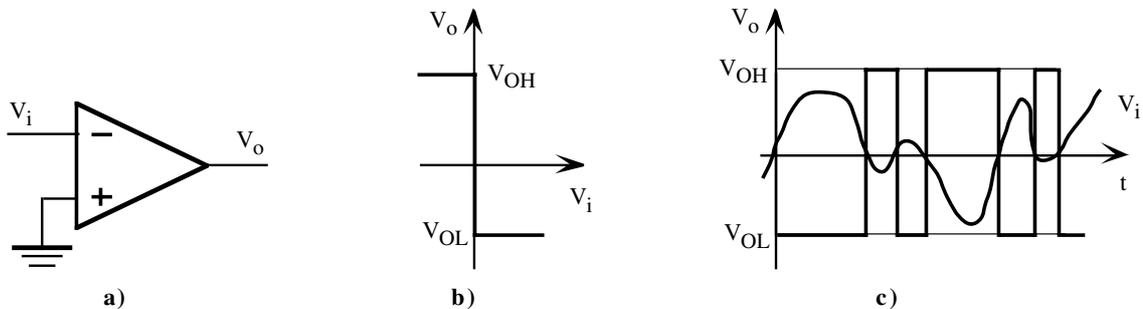


Figura 9.11. a) Comparador inversor; b) VTC; c) Formas de onda entrada-salida.

En la figura 9.10.b se describe la VTC de este disparador Schmitt. Esta curva se obtiene fácilmente a partir de las ecuaciones 9.5 y 9.6. Cuando la V_i es muy negativa se verifica que $V_i < V_p$ resultando que $V_o = V_{OH}$ y $V_p = V_{TH}$ (tramo 1 de la VTC). Si se aumenta la V_i llegará un momento en que $V_i > V_p = V_{TH}$ y se producirá un cambio en la salida del comparador resultando que $V_o = V_{OL}$ y $V_p = V_{TL}$ (tramo 2 y 3 de la VTC); la tensión de comparación es ahora V_{TL} . Si se disminuye V_i se produce un nuevo cambio en la salida del comparador cuando $V_i < V_p = V_{TL}$ resultando que $V_o = V_{OH}$ y $V_p = V_{TH}$ (tramo 4 y 1 de la VTC). El efecto de esta VTC se pone de manifiesto en las formas de onda de entrada-salida que se muestra en la figura 9.10.c. El cambio en la salida del comparador únicamente se produce cuando la tensión de entrada V_i alcanza el valor de V_{TL} o V_{TH} . Esta característica le hace idóneo en entornos industriales con alto ruido en donde los comparadores originan múltiples transiciones de salida. Un ejemplo concreto se muestra en el comparador de la figura 9.11.a con la VTC de la figura 9.11.b. En la figura 9.11.c se puede observar la respuesta del comparador a la misma señal de entrada aplicada al disparador de Schmitt de la figura 9.10.c. En este caso, el ruido existente alrededor de la tensión de comparación (0 V) genera varias transiciones inexistentes en el disparador Schmitt. Este efecto es más perjudicial cuando se utiliza un comparador como elemento de detector de nivel. Pequeñas variaciones alrededor de la tensión de comparación debida a ruidos, fluctuaciones, etc, originan transiciones en la salida que deben ser eliminadas introduciendo una pequeña cantidad de histéresis para estabilizarlos frente a posibles oscilaciones.

El disparador de Schmitt de la figura 9.10.a es inversor porque para tensiones bajas de V_i la salida es V_{OH} y, viceversa, para tensiones altas de V_i la salida es V_{OL} . En la figura 9.12.a se muestra la versión no-inversora de un

disparador de Schmitt que incluye un circuito limitador basado en dos diodos Zener conectados en contraposición. De esta manera, los límites de la tensión de salida estarán fijados a $V_{OH}=V_Z+V_d$ y $V_{OL}=-V_Z-V_d$ con independencia de la tensión de alimentación. La VTC de este circuito aparece en la figura 9.12.b; la $V_{TH}=(R_1/R_2)V_{OH}$ y $V_{TL}=(R_1/R_2)V_{OL}$. En la figura 9.13 se indican los símbolos utilizados para representar los disparadores Schmitt inversores y no inversores.

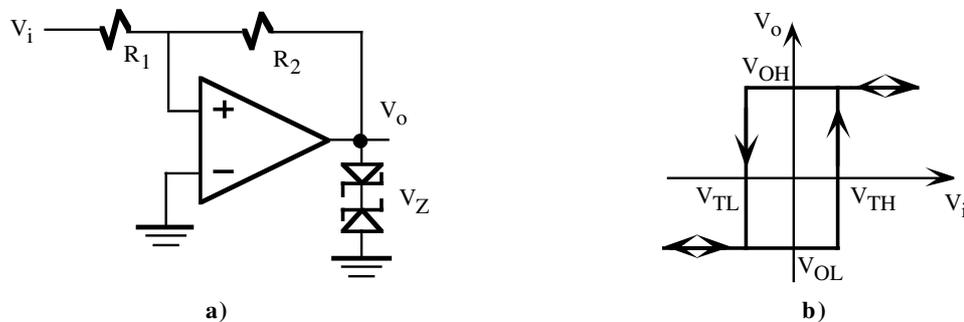


Figura 9.12. a) Disparador Schmitt no-inversor estabilizado; b) VTC.

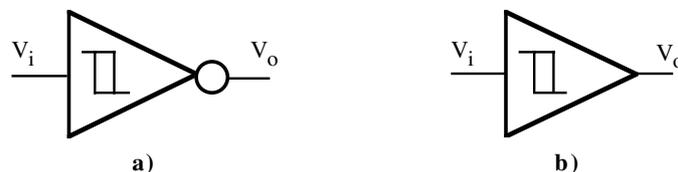


Figura 9.13. Símbolos de un Disparador Schmitt: a) inversor; b) no-inversor.

9.4.1.- Disparadores Schmitt monolíticos

Entre los disparadores Schmitt monolíticos se encuentran los de tecnología CMOS que presentan las siguientes ventajas: alta impedancia de entrada, rango de salida *rail-to-rail* y bajo consumo de potencia, ventajas que les hace particularmente interesantes para muchas aplicaciones. Los valores de la tensión umbral o *threshold* de estos circuitos se encuentran alrededor del 60% de V_{DD} para la V_{TH} y del 40% de la V_{DD} para la V_{TL} , aunque debido a las variaciones del proceso de fabricación estos valores pueden tener una elevada dispersión. Ejemplo de estos tipos de circuitos son CD40106B y 74HC14. El CD4039B y 74HC132 son otros ejemplos de disparadores Schmitt NAND.

La figura 9.14 contiene información sobre el HCC40106B de SGS-Thomson Microelectronics que es un circuito monolítico CMOS constituido por 6 disparadores Schmitt inversores. Este circuito no precisa de componentes externos, es insensible al tiempo de subida o caída de las señales de entrada, presenta características de salida simétrica y la corriente de entrada es de 100nA a 25°C y $V_{DD}=18$ V. La gráfica de la figura P.14.c indica la variación de las tensiones ($V_{TH}=V_P$ y $V_{TL}=V_N$) umbrales con la tensión de alimentación. Por ejemplo, para $V_{DD}=10$ V, la $V_{TH}=6$ V y $V_{TL}=4$ V, es decir, el 60% y 40% de la V_{DD} respectivamente. La tensión de histéresis, $V_H=V_P-V_N$, varía de 0.9 V a $V_{DD}=5$ V hasta 3.5 V a $V_{DD}=15$ V.

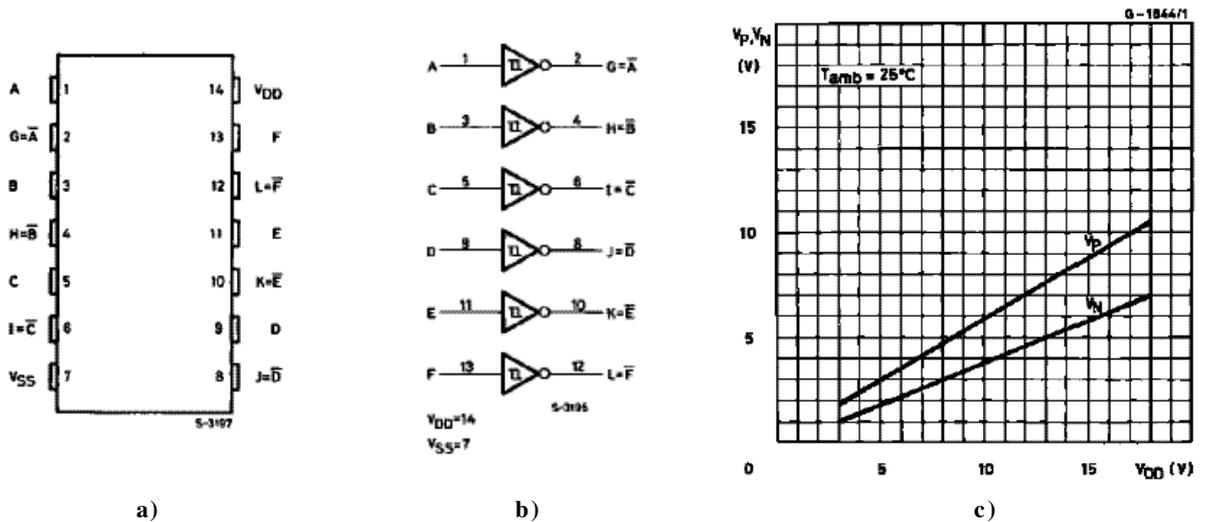
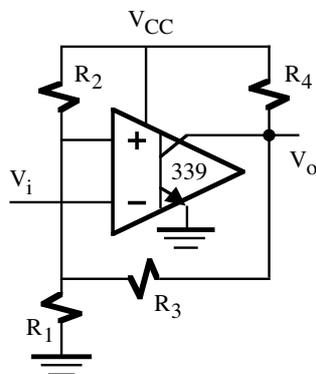


Figura 9.14. Algunas características del Hex-disparador Schmitt HCC40106B de SGS-Thomson Microelectronics: a) encapsulado, b) esquema circuital y c) variación de las tensiones umbrales con la tensión de alimentación.

Los comparadores monolíticos, por ejemplo el LM339, pueden ser configurados mediante resistencias externas para que funcione como un disparador de Schmitt. La asignación en los valores a las resistencias definen las tensiones *threshold* del disparador, siempre situadas en el primer cuadrante debido a que opera con una única tensión positiva de alimentación. En la figura 9.15 se presenta el disparador Schmitt inversor basado en el LM339 con sus ecuaciones características de operación. Las resistencias R_1 , R_2 y R_3 definen las tensiones de comparación de entrada debido a la realimentación positiva. El valor típico de R_4 es de unos pocos $k\Omega$, y si se impone la condición de que $R_3 \gg R_4$ para reducir al mínimo la cargabilidad de R_3 en el nudo de salida, se verifica que $V_{OH} \cong V_{CC}$.



$$V_{TL} = \frac{R_1 \parallel R_3}{R_1 \parallel R_3 + R_2} V_{CC}$$

$$V_{TH} = \frac{R_1}{R_1 + R_2 \parallel (R_3 + R_4)} V_{CC}$$

$$V_{OL} \cong 0$$

$$V_{OH} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} V_{CC} + \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_{TH}$$

Figura 9.15. Disparador Schmitt inversor basado en el LM339 y ecuaciones características.

Problemas

P9.1 Representar gráficamente la curva de transferencia en tensión (VTC) de los circuitos de las figuras P9.1.a hasta P9.1.d.

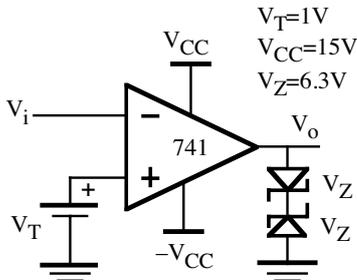


Figura P9.1.a

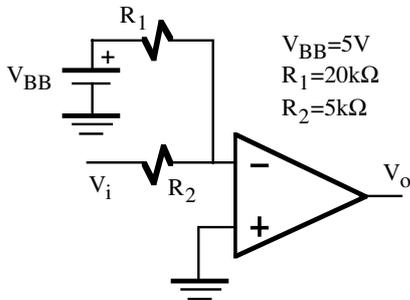


Figura P9.1.b

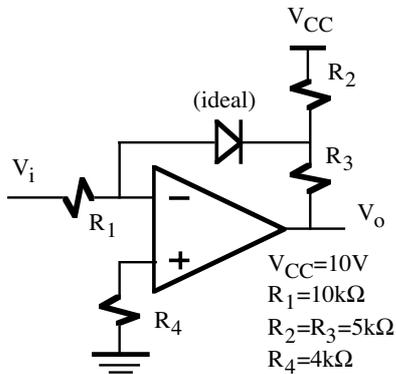


Figura P9.1.c

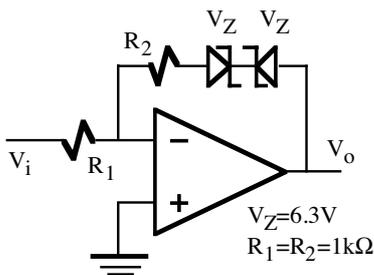


Figura P9.1.d

P9.2 El comparador LM311 de la figura P9.2 tiene conectado a su salida N inversores TTL del tipo 74LS04 cuyas características eléctricas se indican en el recuadro de esta figura. Sabiendo que la intensidad máxima del comparador cuando el transistor de salida está en conducción es de 50mA, calcular el valor máximo de N (*fan-out*) para asegurar el correcto funcionamiento del circuito.

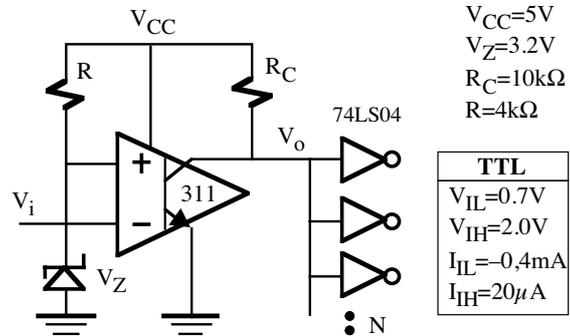


Figura P9.2

P9.3 Se desea que el circuito de la figura 9.7 se active cuando la tensión de entrada sea de 4 V. Además la impedancia de entrada debe ser de 20kΩ. Determinar el valor de R_1 , R_2 y R_C .
 Datos: $V_{CC}=5V$, $V_Z=2V$, $I_{LED}=2mA$ y $V_{LED}=1.8V$.

P9.4 Diseñar un detector de ventana como el de la figura 9.8 que verifique $V_{TH}=4/5V_{CC}$ y $V_{TL}=1/5V_{CC}$.

P9.5 Dibujar la VTC del circuito de la figura 9.12.a.
 Datos: $R_1=10k\Omega$, $R_2=5k\Omega$ y $V_Z=4.3V$.

P9.6 Obtener la VTC del circuito de la figura P9.6.

P9.7 Obtener la VTC del disparador Schmitt basado en el LM339 de la figura 9.14 si $R_1=R_2=R_3=100k\Omega$ y suponiendo que $R_3 \gg R_4$.
 Dato: $V_{CC}=10V$, $R_4=3k\Omega$.

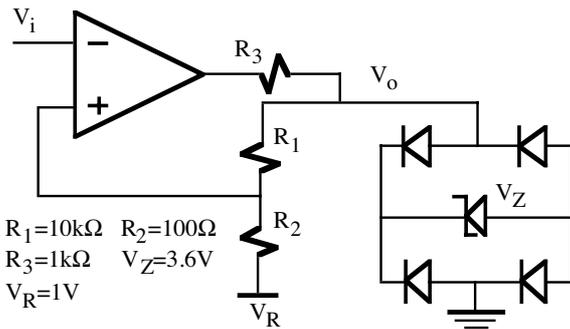


Figura P9.6

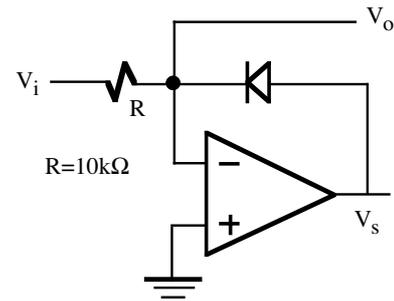


Figura P9.10

P9.8 Obtener la VTC del disparador Schmitt no-inversor de la figura P9.8 suponiendo que $R_4 \gg R_5$.

P9.11 Representar la VTC del circuito rectificador de la figura P9.11. Dato: $V_d=0.7V$.

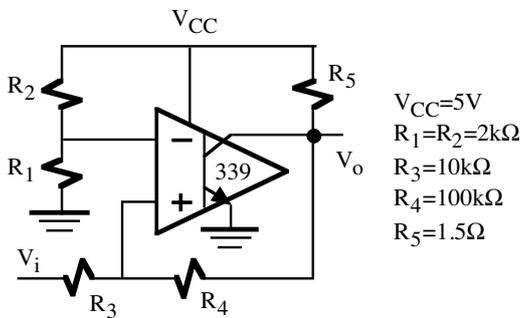


Figura P9.8

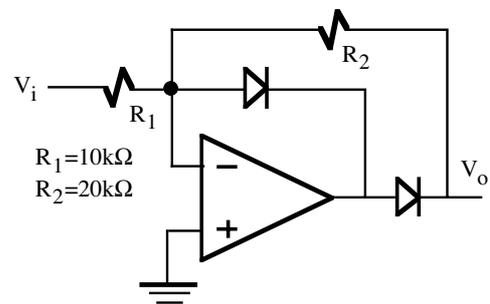


Figura P9.11

P9.9 Obtener la VTC del comparador de ventana de la figura P9.9 basado en OA ideales.

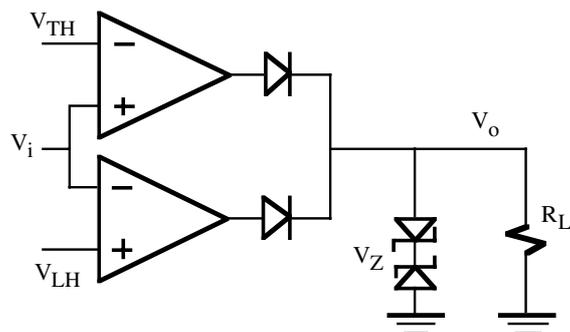


Figura P9.9

P9.10 En la figura P9.10 se muestra un rectificador de media-onda. Representan gráficamente la salida V_o y V_s para una entrada $V_i=2 \text{ V senwt}$. Datos: El OA tiene una $A_d=10.000$ y el diodo $V_d=0.7V$.

