

AMPLIFICADORES OPERACIONALES

INTRODUCCIÓN

Anteriormente se designaba con el nombre de *amplificador operacional* a los primeros amplificadores de tubo de vacío de alta ganancia diseñados para realizar operaciones matemáticas de adición, sustracción, multiplicación, división, diferenciación e integración. Además, conectándolos podían resolver ecuaciones diferenciales.

El actual sucesor de los anteriores amplificadores es el *amplificador operacional integrado lineal*. Aun cuando este amplificador heredó el nombre de sus antecesores, trabaja con voltajes más bajos y se encuentra en diversas formas especializadas. El amplificador operacional actual es tan barato que la cantidad que anualmente se adquiere de ellos asciende a millones. Su empleo se ha extendido, más allá de las aplicaciones previstas por los primeros diseñadores, gracias a su bajo costo, versatilidad y confiabilidad. Algunas de sus aplicaciones en nuestros días están en los campos del acondicionamiento de señales, el control de procesos, las comunicaciones, las computadoras, las fuentes de potencia y de señales, las pantallas de visualización y los sistemas de prueba y medición. El amplificador operacional es, en su forma básica, un excelente amplificador de cd de alta ganancia.

Es recomendable que las primeras experiencias que llegue uno a tener con un amplificador operacional se enfoquen en sus propiedades más importantes y básicas.

TERMINALES DE LOS AMPLIFICADORES OPERACIONALES

El símbolo de circuito de un amplificador operacional es una punta de flecha que representa la alta ganancia y apunta, de la entrada a la salida, en dirección del flujo de la señal. Los amplificadores operacionales tienen cinco terminales básicas: dos para la alimentación, dos para las señales de entrada y una para la salida. Para poder utilizar un amplificador operacional no es necesario saber mucho sobre el funcionamiento interno de éste. Haremos alusión a ciertos circuitos internos cuando sea necesario. Quienes diseñaron y construyeron los amplificadores operacionales hicieron un trabajo excelente, al grado de que los componentes externos conectados al amplificador son los que determinan el desempeño del sistema.

El amplificador operacional ideal de la figura 1 tiene ganancia infinita y también su respuesta a la frecuencia es infinita. Las terminales de entrada no consumen corriente de la señal de entrada ni de la polarización y presentan una resistencia de entrada infinita. La impedancia de salida es de cero ohms y los voltajes de la fuente de poder no tienen límite. A continuación veremos en qué consiste la función de cada terminal del amplificador operacional para darnos una idea de las limitaciones de un amplificador real.

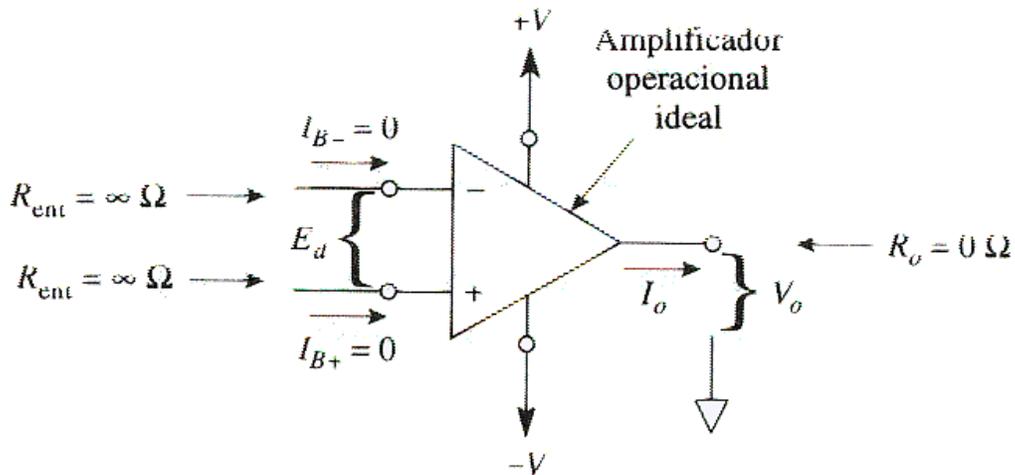
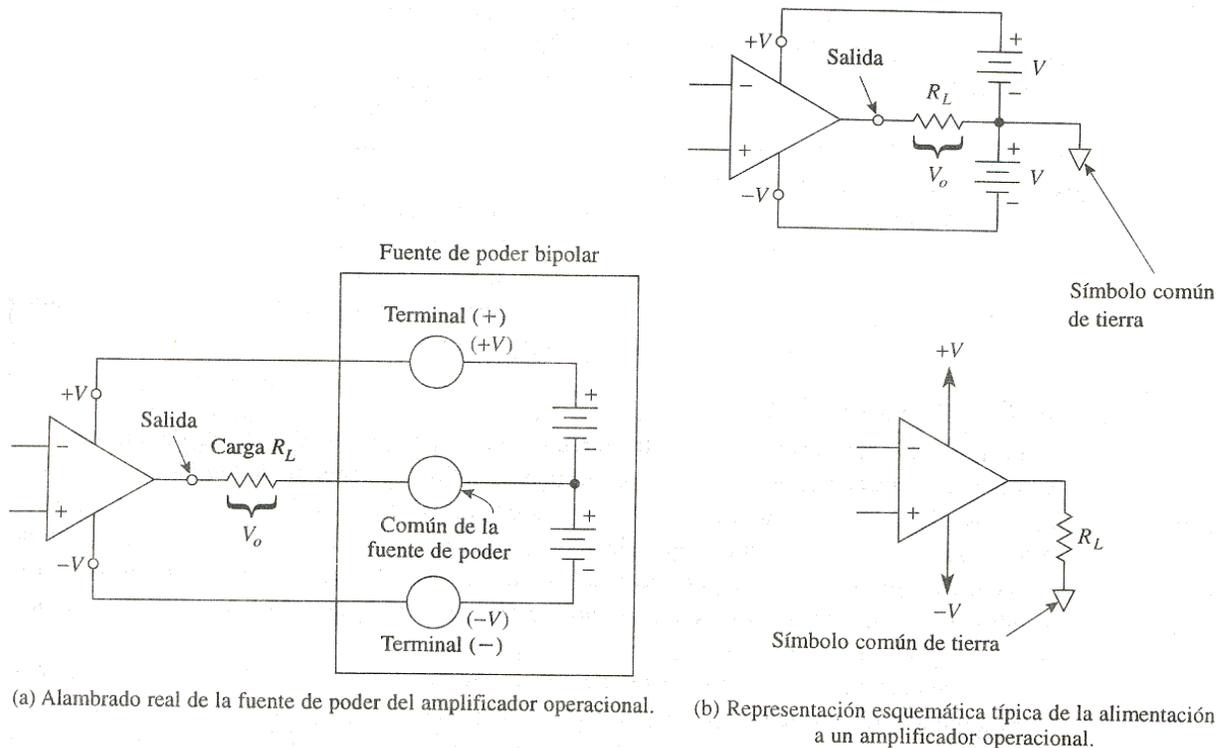


FIGURA 1 El amplificador operacional ideal tiene ganancia infinita, resistencia de entrada también infinita y resistencia cero a la salida.

Terminales de la fuente de alimentación

Las terminales del amplificador operacional identificadas como $+V$ y $-V$ designan las terminales del amplificador operacional que deben conectarse a la fuente de poder (véase la figura 2). Observe que la *fuentes de alimentación* tiene *tres* terminales: positiva, negativa y común. La terminal común de la fuente puede estar o no conectada a tierra mediante el tercer alambre del cable de la línea. Sin embargo, se ha vuelto frecuente la práctica de mostrar el común de la alimentación como un símbolo de tierra en el diagrama. El uso del término "tierra" o el símbolo tierra es una convención que sirve para indicar que *todas las mediciones de voltaje se hacen con respecto a "tierra"*.



(a) Alambrado real de la fuente de poder del amplificador operacional.

(b) Representación esquemática típica de la alimentación a un amplificador operacional.

FIGURA 2 Alambrado para la alimentación y carga de un amplificador operacional.

La fuente de poder en la figura 2 recibe el nombre de fuente bipolar o dividida y sus valores tradicionales son de ± 15 V. Algunos amplificadores operacionales de propósito especial pueden usar una fuente de polaridad única, que puede ser de + 5 a + 15 V y tierra. Obsérvese que *la tierra* no está conectada al amplificador operacional en la figura 2. Las corrientes que retornan a la fuente desde dicho amplificador deben pasar por los elementos externos del circuito, como por ejemplo la resistencia de carga R_L . El voltaje máximo de la fuente que se puede aplicar entre + V y -V suele ser de 36 V, o bien ± 18 V.

Terminales de salida

En la figura 2, la terminal de salida del amplificador operacional está conectada a un extremo de la resistencia de carga R_L . El otro extremo de R_L está conectado a tierra y el voltaje de salida V_o se mide con respecto a tierra. Debido a que sólo hay una terminal de salida en un amplificador operacional, se le denomina *salida sencilla o única*. Existe un límite para la corriente que puede proporcionar la terminal de salida de un amplificador operacional, por lo común de entre 5 y 10 mA. También hay límite en cuanto a los niveles de voltaje en la terminal de salida, estas fronteras se determinan por los voltajes de alimentación y por los transistores de salida. Estos transistores necesitan cerca de la 2 V del colector al emisor para asegurarse de que actúen como amplificadores y no como interruptores. Por lo tanto, la salida en la terminal puede llegar hasta 1 V abajo de + V y hasta 2 V por encima de -V. El límite superior de V_o se denomina *voltaje de saturación*

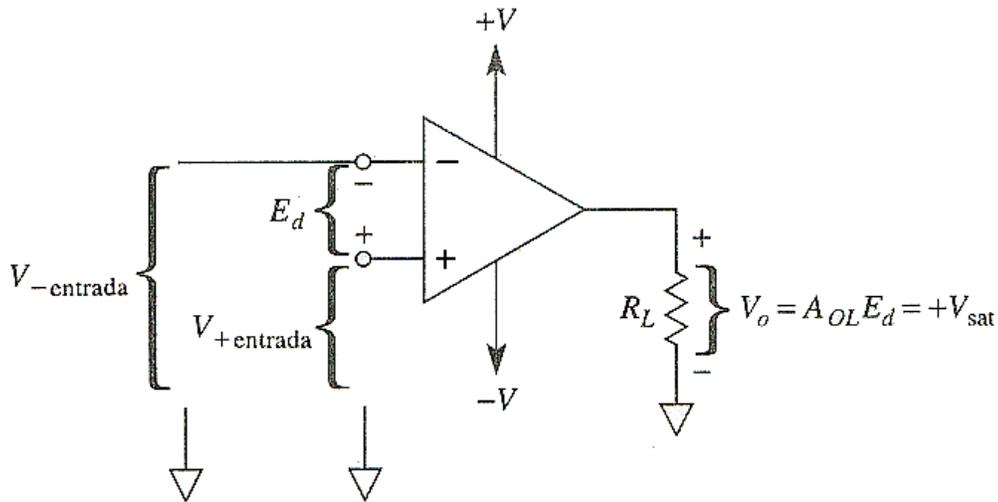
positivo, $+V_{\text{sat}}$, y el límite inferior *voltaje de saturación negativo*, $-V_{\text{sat}}$. Con una fuente de alimentación, digamos, de ± 15 V, $+V_{\text{sat}} = +14$ V y $-V_{\text{sat}} = -13$ V. Por lo tanto, V_o está restringido a una variación simétrica de pico a pico de ± 13 V. Ambos límites de corriente y voltaje determinan un valor *mínimo* en la resistencia de carga R_L de 2 k Ω . Sin embargo, en la actualidad se dispone de amplificadores operacionales hechos especialmente para aplicaciones que funcionan con voltajes de alimentación bajos (+ 3.3 V) y que cuentan con MOS en lugar de transistores de salida bipolares. La salida de estos amplificadores operacionales puede ajustarse dentro del rango de los milivolts, ya sea de $+V_o$ o $-V_o$.

La mayor parte de los amplificadores operacionales, entre los cuales está el LM741, tienen circuitos internos que automáticamente limitan la corriente de la terminal de salida. Aun cuando se produjese un cortocircuito en R_L , la corriente de salida estaría limitada a unos 25 mA, esta característica impide la destrucción del amplificador operacional en caso de producirse un cortocircuito.

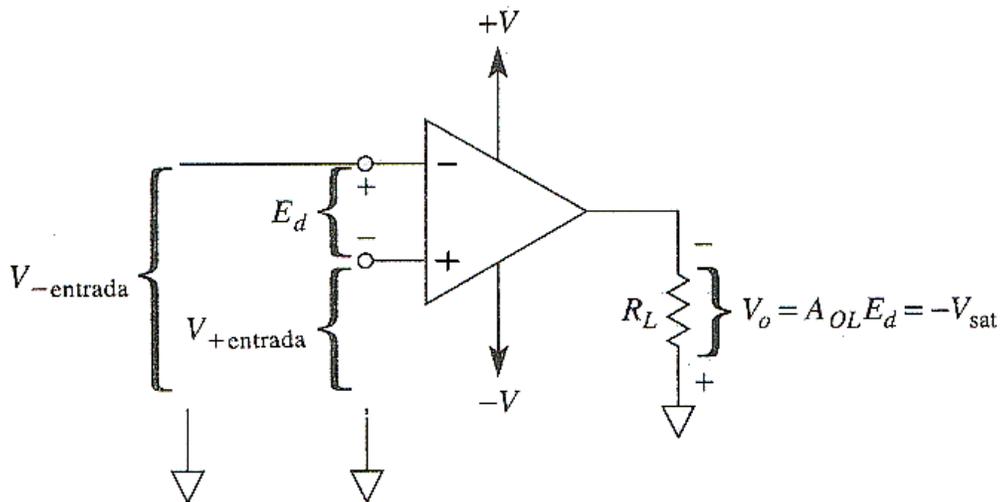
Terminales de entrada

En la figura 3 hay dos terminales de entrada identificadas como $-$ y $+$. Se denominan *terminales de entrada diferencial* ya que el voltaje de salida V_o depende de la *diferencia* de voltaje entre ellas, E_d , y la ganancia del amplificador, A_{OL} . Como se muestra en la figura 3(a), la terminal de salida es positiva en relación con la tierra cuando la entrada ($+$) es positiva respecto a la entrada ($-$) o mayor que ésta. Cuando E_d está invertida como en la figura 3(b), la entrada ($+$) es negativa respecto a la entrada ($-$), o menor que ésta y V_o se vuelve negativo con respecto a la entrada ($-$).

De acuerdo con la figura 3 puede concluirse que la polaridad de la terminal de salida es igual a la de entrada ($+$) con respecto a la entrada ($-$). Es más, incluso la polaridad de la terminal de salida es opuesta o inversa respecto a la polaridad de la terminal de entrada ($-$). Por estas razones, la entrada ($-$) se denomina *entrada inversora* y la entrada ($+$) se conoce como *entrada no inversora*.



(a) V_o es positivo cuando la entrada (+) es más positiva que la entrada (-) (por encima de ésta), $E_d = (+)$.



(b) V_o se vuelve negativa cuando la entrada (+) es menos positiva que la entrada (-) (por abajo de ésta), $E_d = (-)$.

FIGURA 3 POLARIDAD DE LA SALIDA (a) V_o es positivo cuando la entrada (+) es más positiva que la entrada (-) (por encima de ésta), $E_d = (+)$. (b) V_o se vuelve negativa cuando la entrada (+) es menos positiva que la entrada (-) (por abajo de ésta), $E_d = (-)$.

Es importante hacer ver que la polaridad de V_o depende sólo de la *diferencia* de voltaje entre las entradas inversora y no inversora. Tal diferencia de voltaje puede encontrarse mediante la relación

$$E_d = \text{voltaje en la entrada (+)} - \text{voltaje en la entrada (-)}$$

Ambos voltajes de entrada se *miden con respecto a tierra*. El signo de E_d indica: (1) la polaridad de la entrada (+) respecto a la entrada (-); y (2) la polaridad de la terminal de

salida con respecto a tierra. Esta ecuación es válida si la entrada inversora está puesta a tierra, si la entrada no inversora se encuentra también puesta a tierra, e inclusive si ambas entradas están por encima o por debajo del potencial tierra.

Corrientes de polarización de entrada y voltaje de desvío

Las terminales de entrada de los amplificadores operacionales consumen corrientes muy pequeñas de polarización y de señal para activar a los transistores internos. Las terminales de entrada presentan además un pequeño desequilibrio conocido como *voltaje de desvío de entrada*, V_{io} . Tal voltaje funciona como fuente de voltaje V_{io} en serie con la entrada (+).

GANANCIA DE VOLTAJE EN LAZO ABIERTO

Definición. Observe la figura 3. El voltaje de salida V_o estará determinado por E_d y por la *ganancia de voltaje en lazo abierto*, A_{OL} . A_{OL} se conoce como ganancia de voltaje en lazo abierto porque las posibles conexiones de retroalimentación desde la terminal de salida a las terminales de entrada se han dejado abiertas. En consecuencia, V_o se puede expresar de manera ideal mediante la siguiente relación:

$$\text{voltaje de salida} = (\text{voltaje diferencial de entrada}) \times (\text{ganancia en lazo abierto})$$
$$V_o = E_d \times A_{OL}$$

Voltaje diferencial de entrada, E_d

El valor de A_{OL} es excesivamente grande, con frecuencia de 200,000 o más. V_o nunca puede exceder los voltajes de saturación positivo o negativo, $+V_{sat}$ y $-V_{sat}$. Para una fuente de 15 V, los voltajes de saturación estarán alrededor de ± 13 V. Por lo tanto, para que el amplificador operacional actúe como tal, E_d debe limitarse a un voltaje máximo de ± 65 μ V. Deducida de la ecuación anterior.

En el laboratorio es difícil medir 65 μ V a consecuencia del ruido inducido, del “zumbido” de 60 Hz y de las corrientes de fuga del aparato de medición; aun así es bastante factible que se genere un milivolt (1,000 μ V). Además, es difícil e inconveniente medir ganancias muy altas. El amplificador operacional también tiene pequeños desequilibrios internos que producen un voltaje pequeño que puede exceder a E_d . Este *desvío de voltaje* se mencionó anteriormente.

Conclusiones

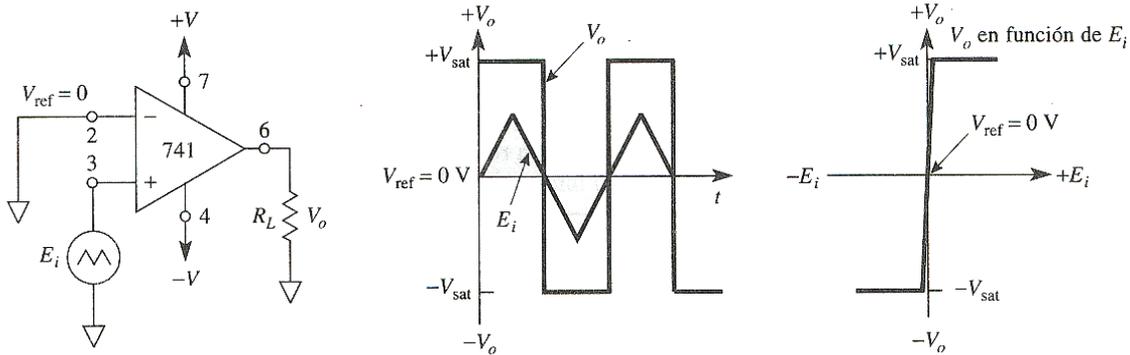
Con base en los breves comentarios hechos con anterioridad se pueden obtener las tres conclusiones siguientes. Primera, V_o del circuito de la figura 3 puede estar ya sea en uno de los límites $+V_{sat}$ o $-V_{sat}$ u oscilando entre éstos. No hay razón para preocuparse, ya que tal comportamiento es característico de un amplificador de alta ganancia. Segunda, para mantener V_o dentro de esos límites hay que recurrir a un circuito de retroalimentación que obligue a V_o a depender de elementos de precisión estables, como las resistencias y los capacitores, más que de A_{OL} y de E_d .

No es necesario saber más acerca del amplificador operacional para entender una de sus aplicaciones básicas como comparador. En una aplicación de esta naturaleza, el amplificador operacional no actúa como amplificador sino como un dispositivo que indica cuándo un voltaje desconocido se encuentra por debajo, por encima o al mismo nivel que el voltaje de referencia.

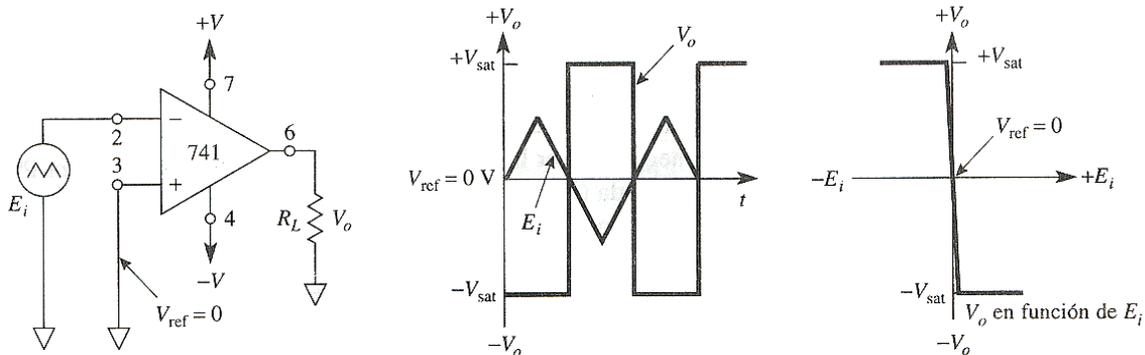
DETECTORES DE CRUCE POR CERO

Detector no inversor de cruce por cero

El amplificador operacional de la figura 4(a) funciona como comparador. Su entrada (+) contrasta el voltaje E_i con un voltaje de referencia de 0 V ($V_{ref} = 0$ V). Cuando E_i es mayor que V_{ref} , V_o es igual a $+V_{sat}$. Esto se debe a que el voltaje en la entrada (+) es más positivo que el voltaje en la entrada (-). Por lo tanto, el signo de E_d es positivo. En consecuencia, V_o es positivo.



(a) No inversor: cuando E_i está arriba de V_{ref} , $V_o = +V_{sat}$.



(b) Inversor: cuando E_i está arriba de V_{ref} , $V_o = -V_{sat}$.

FIGURA 4 Detectores de cruce por cero, no inversores en (a) e inversores en (b). Si se aplica la señal E_i a la entrada (+), la acción del circuito será no inversora.

La polaridad de V_o indica si E_i está arriba o abajo de V_{ref} . La *transición* de V_o señala cuándo E_i cruza la referencia y en qué dirección lo hace. Por ejemplo, cuando V_o cambia de $-V_{sat}$ a $+V_{sat}$, indica que E_i acaba de cruzar por o en la dirección positiva. El circuito de la figura 4(a) es, pues, un detector no inversor por cruce de cero.

Detector inversor por cruce de cero

La entrada (-) del amplificador operacional de la figura 4(b) compara E_i con un voltaje de referencia de 0V ($V_{ref} = 0$ V). Este circuito es un *detector inversor de cruce por cero*. Las formas de onda de V_o en función del tiempo y V_o en función de E_i pueden explicarse mediante el siguiente resumen:

1. Si E_i está por encima de V_{ref} , V_o es igual a $-V_{sat}$.

2. Cuando E_i cruza la referencia y pasa a positivo, V_o realiza una transición hacia lo negativo y pasa de $+V_{sat}$ a $-V_{sat}$.

DETECTORES DE NIVEL DE VOLTAJE POSITIVO y NEGATIVO

Detectores de nivel positivo

En la figura 5 se aplica un voltaje positivo de referencia, V_{ref} a una de las terminales del amplificador operacional. Esto quiere decir que el amplificador operacional está conectado, como un comparador para registrar el voltaje positivo. Si el voltaje E_i , que se va a detectarse aplica a la terminal (+) del amplificador operacional, el resultado es un *detector no inversor de nivel positivo*. Su operación se indica mediante las formas de onda de la figura 5(a). Cuando E_i está por encima de V_{ref} V_o es igual a $+V_{sat}$. Cuando E_i está por debajo de V_{ref} V_o es igual a $-V_{sat}$.

Si E_i se aplica ala entrada inversora como en la figura 5(b), el circuito es un detector inversor de nivel positivo. Su operación puede resumirse en la siguiente afirmación: cuando E_i es mayor que V_{ref} , V_o es igual a $-V_{sat}$. Esta acción del circuito se ve con más claridad si se observa la gráfica de E_i y V_{ref} en función del tiempo, en la figura 5(b).

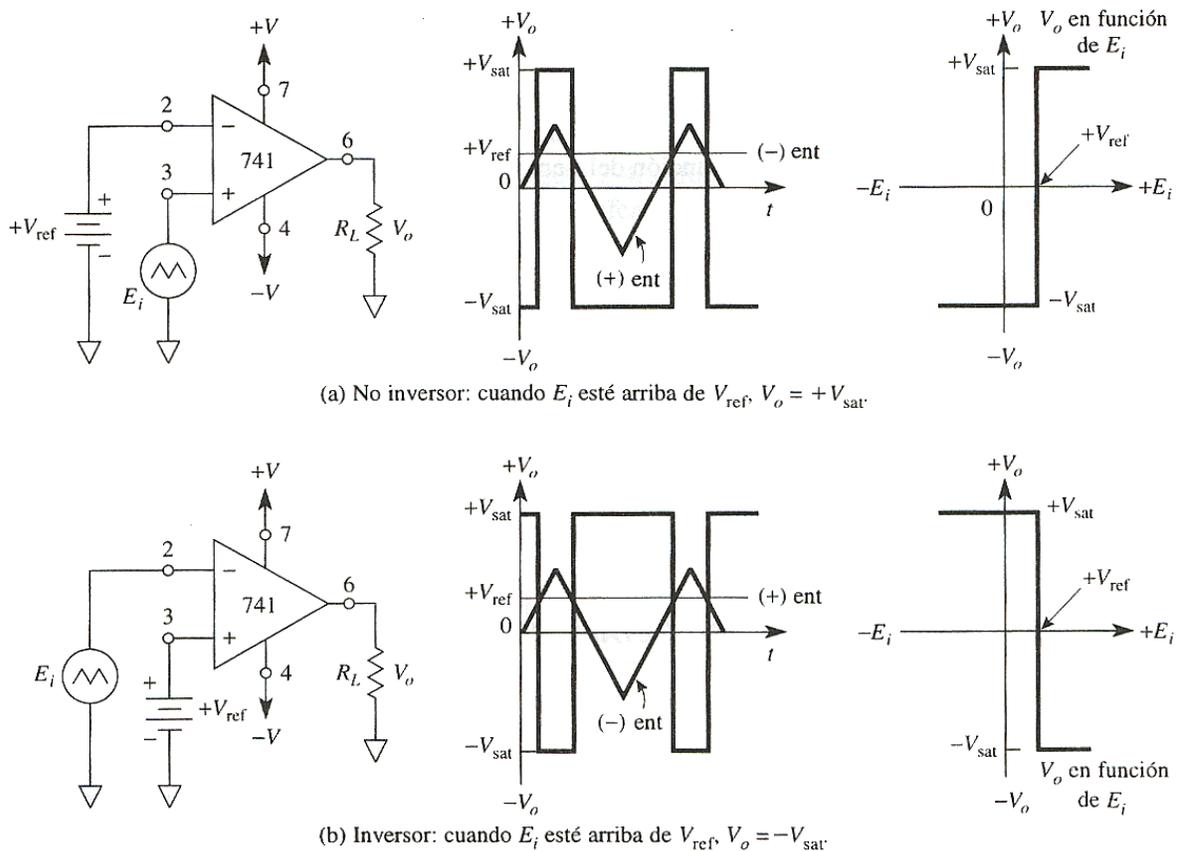


FIGURA 5 Detector de nivel de voltaje positivo, no inversor en (a) e inversor en (b). Si la señal E_i se aplica a la entrada (+), la acción del circuito es no inversora. Si la señal E_i se aplica a la entrada (-), la acción del circuito es inversora.

Detectores de nivel negativo

La figura 6(a) es un *detector no inversor de nivel negativo*. Este circuito detecta cuando la señal de entrada E_i cruza hacia el voltaje negativo, $-V_{ref}$. Si E_i es mayor que $-V_{ref}$, V_o es igual a $+V_{sat}$. Cuando E_i es menor que $-V_{ref}$, $V_o = -V_{sat}$. El circuito de la figura 6(b) es un *detector inversor de nivel negativo*. Cuando E_i es mayor que $-V_{ref}$, V_o es igual a $-V_{sat}$ y cuando E_i es menor que $-V_{ref}$, V_o es igual a $+V_{sat}$.

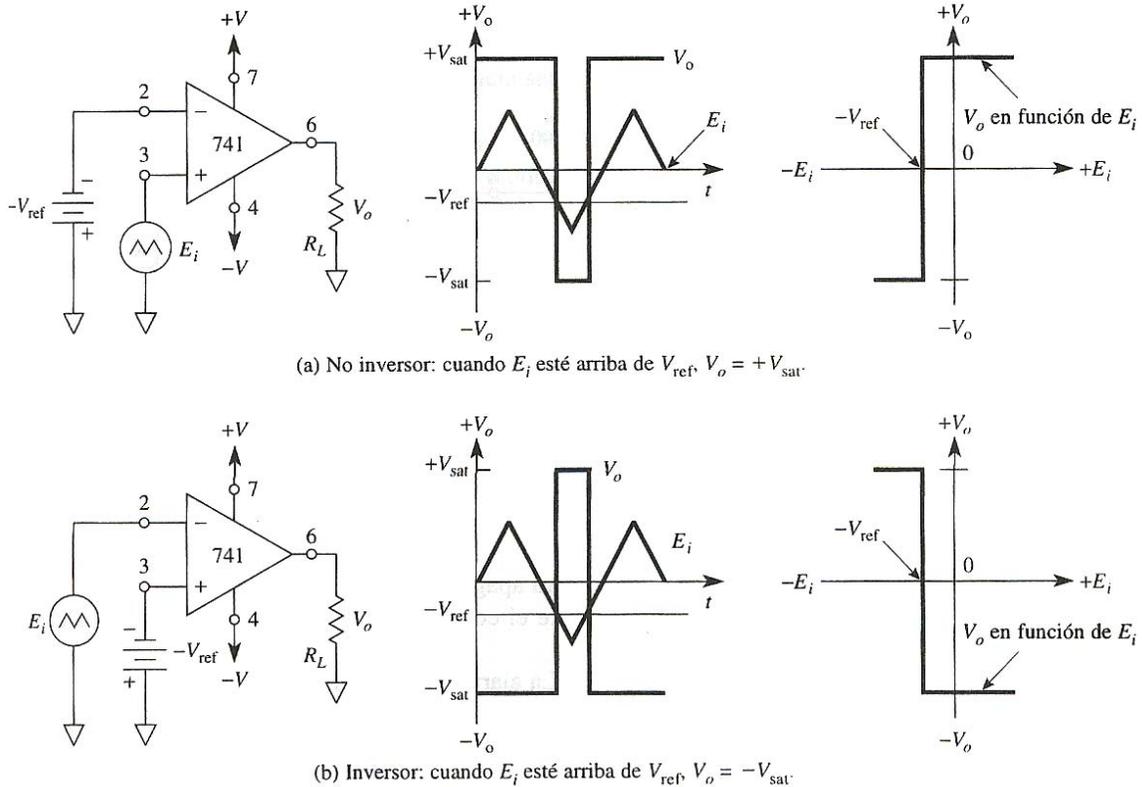


FIGURA 6 Detector de nivel de voltaje negativo, no inversor en (a) e inversor en (b).

Detector de humo

Aplicación práctica de un detector de nivel de voltaje es un detector de humo, como puede observarse en la figura 7. La lámpara y la celda fotoconductor se montan en una cámara cerrada a la que puede entrar humo, pero no luz del exterior. El fotoconductor es una resistencia sensible a la luz. Cuando no hay humo, es muy poca la luz que incide en el fotoconductor y su resistencia permanece en cierto valor alto, en forma tradicional, varios cientos de kilohms. El control de sensibilidad de $10 \text{ k}\Omega$. se ajusta hasta que se apaga la alarma.

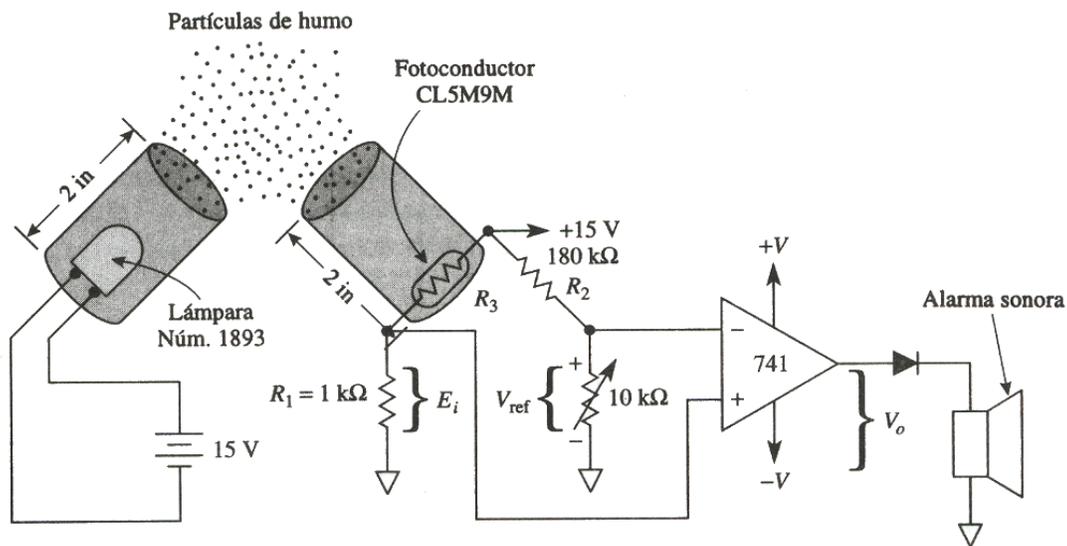


FIGURA 7 Si no hay humo, el control de sensibilidad de $10\text{ k}\Omega$ se ajusta hasta que la alarma deje de sonar. La luz reflejada por las partículas de humo hace que suene la alarma.

Si entra humo a la cámara, éste provocará que la luz se refleje en las partículas de humo e incida en el fotoconductor, Ésta, a su vez, ocasiona que la resistencia del fotoconductor disminuya y se eleve el voltaje por R_1 . A medida que E_i rebase el V_{ref} , V_o pasará de $-V_{sat}$ a $+V_{sat}$ y esto hará que la alarma suene. El circuito de alarma de la figura 7 no incluye un rectificador controlado por silicio. De esta manera, cuando las partículas de humo abandonan la cámara, la resistencia del fotoconductor aumenta y la alarma se desactiva. Es necesario montar la lámpara y la fotorresistencia en una caja negra y plana, a prueba de luz, en la que pueda penetrar el humo. La luz ambiental impide un correcto funcionamiento. La red resistiva ala entrada del amplificador operacional forma un puente Wheatstone. Este circuito puede utilizarse también para monitorear el nivel de partículas de polvo en un ambiente de sala limpia.