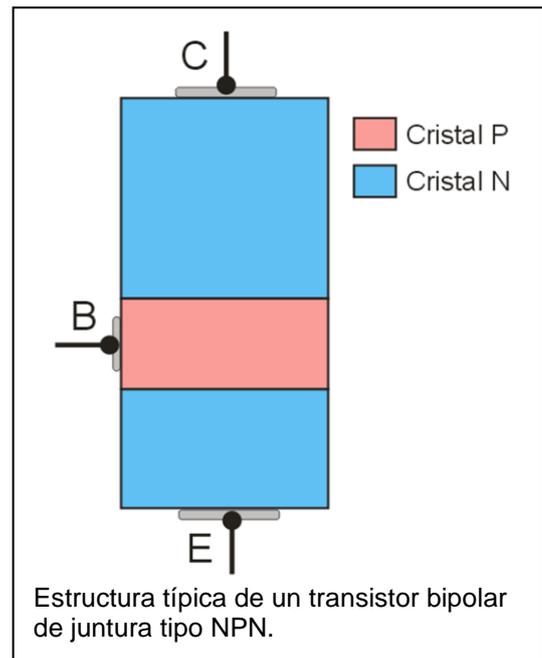


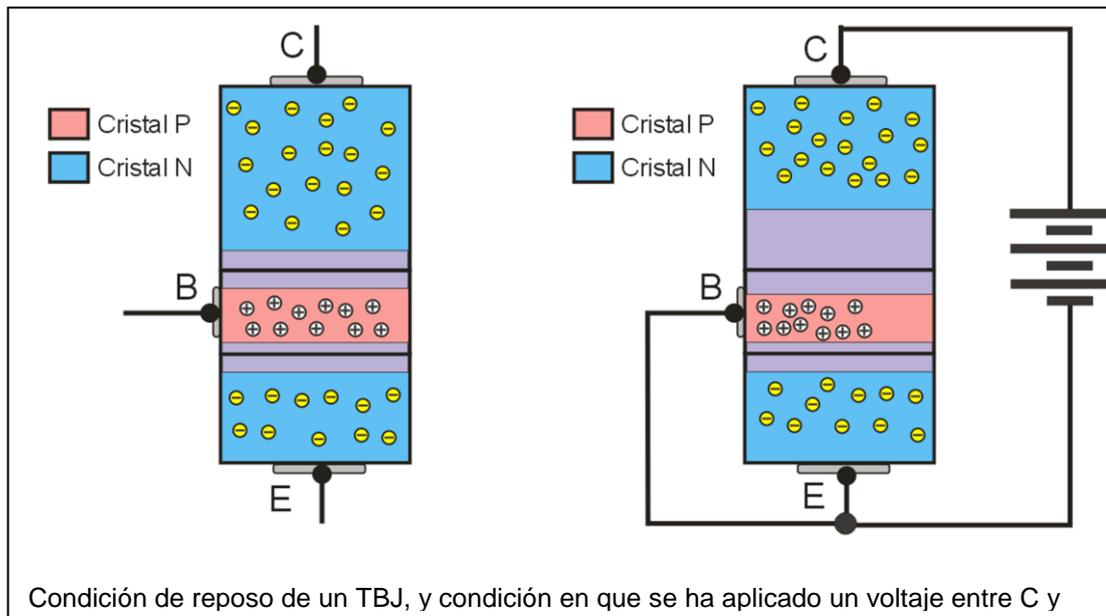
5.1 ESTRUCTURA, FUNCIONAMIENTO Y CURVAS CARACTERÍSTICAS

Un transistor bipolar de juntura está construido de forma completamente distinta a la de un FET, y su principio de operación también es muy diferente. En la figura anexa se muestra la estructura básica de un transistor de este tipo, con identificación de terminales. Se puede observar que se trata de tres capas de semiconductor intercaladas: N-P-N, y que se han colocado terminales de conexión en los dos cristales N de los extremos, y una más en el cristal P del centro. Estas terminales están



identificadas con las letras C-B-E, siglas de colector, base y emisor, que son los nombres que se le han dado a las terminales de un TBJ. A continuación se describe cómo funciona este dispositivo.

En primer lugar, en condiciones iniciales, sin voltajes externos aplicados, el transistor se comporta como si fueran un par de diodos conectados por su ánodo, esto es, en las uniones P-N se da un pequeño intercambio de portadores (huecos de P a N, y electrones de N a P), hasta alcanzar un estado de equilibrio donde se forman un par de zonas de transición en ambas uniones PN dentro del dispositivo. En esas condiciones, se dice que el transistor está en estado de reposo.

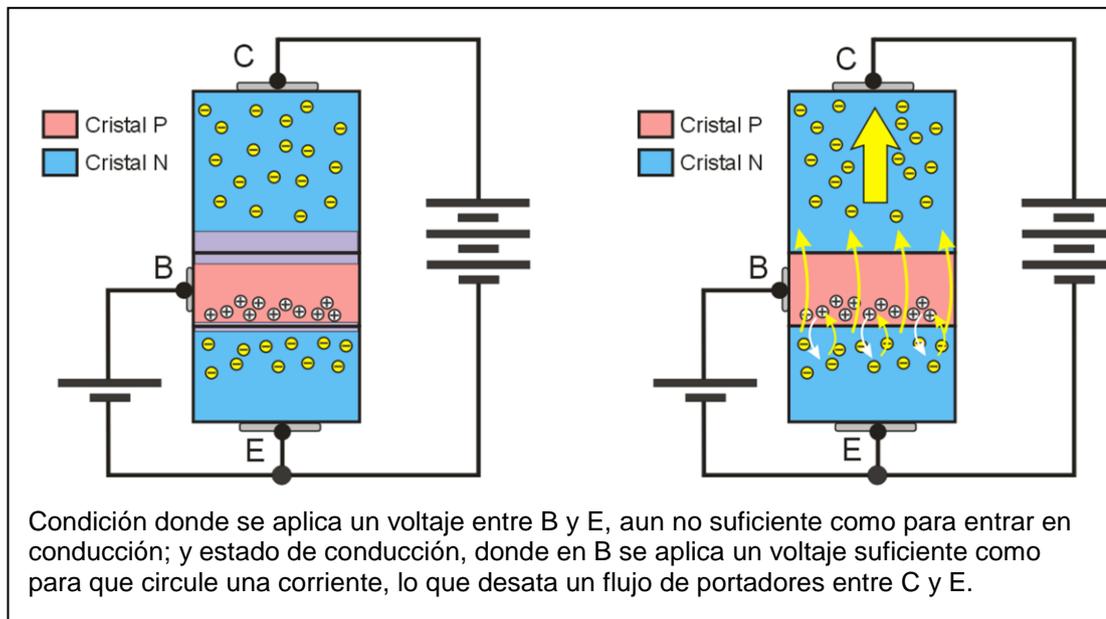


Cuando se aplica un voltaje positivo entre C y E, con un voltaje de 0V en B, se rompe el estado de equilibrio, y se presenta entre B y C un fenómeno parecido al que se da en un diodo polarizado en inversa: el potencial positivo de C atrae a los electrones del cristal N superior, mientras que el potencial negativo en B atrae a los huecos del cristal P; esto significa que en la unión de ambos cristales se forma una zona de no conducción, que impide la circulación de corriente entre C y E. En esta condición, se dice que el transistor está en modo de corte, ya que a pesar de tener voltaje aplicado entre C y E, no existe circulación de corriente.

Cuando se aplica en B un voltaje pequeño, la unión P-N entre el cristal del centro y la región N inferior comienza a polarizarse en forma directa, apareciendo un ligero flujo de portadores entre ambos cristales. Sin embargo, hay que recordar que, al igual que como sucedió en el caso de los diodos, cuando se estableció la condición de reposo, entre estos cristales P-N se forma un campo eléctrico de polaridad inversa, que impide el flujo de todos los electrones y huecos de su cristal original hacia el contrario. Este voltaje es de alrededor de 0.3V en el caso del germanio, y de aproximadamente 0.7V en el caso del silicio; así que mientras el voltaje en la base no exceda estos valores, en realidad el flujo de portadores entre ambos cristales es prácticamente nulo.

Sin embargo, cuando el voltaje de base sobrepasa esta tensión de polarización, comienza a presentarse un flujo de portadores en la unión P-N,

y este flujo provoca un pequeño fenómeno de avalancha en la unión de P y el cristal N superior, por lo que los electrones de E comienzan a “brincar” la zona P intermedia y a llegar hasta el cristal de C, estableciéndose una corriente entre C y E. También se establece una corriente entre B y E, aunque de una magnitud mucho menor.

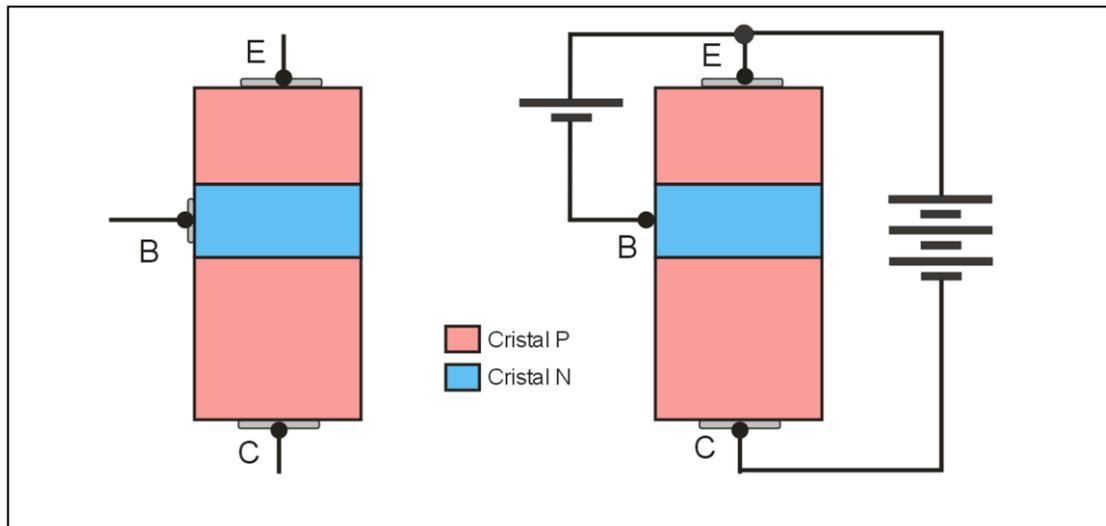
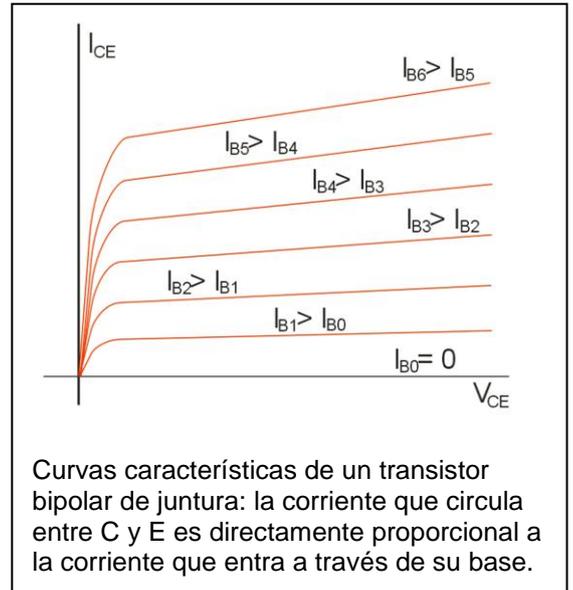


Si se incrementa todavía más el voltaje en la base, más portadores circulan entre B y E, y esto provoca una mayor avalancha entre C y E, aumentando la corriente que circula entre ambas terminales. Esto significa, para efectos prácticos, que el TBJ es un dispositivo cuya corriente C-E está controlada por el flujo de corriente que exista entre B y E: a menor corriente BE, menor corriente CE, y cuando la corriente BE aumenta, también lo hará la corriente CE. La salvedad está en que la corriente CE siempre es mucho mayor que la corriente BE, lográndose entonces un efecto de amplificación de señal.

Aquí hay que aclarar un punto: cuando se aplica un voltaje en la base, y se establece una corriente BE, el valor de esta corriente es lo que determinará la cantidad de corriente que puede circular entre C y E, de forma casi independiente del valor de voltaje aplicado entre estas terminales. Esto significa que si se hace una gráfica del comportamiento de I_{CE} en comparación al voltaje aplicado entre C y E (V_{CE}), se obtendría algo como lo que se muestra en la figura anexa: se puede observar que cuando el voltaje V_{CE} es pequeño, el dispositivo conduce gradualmente, pero cuando alcanza

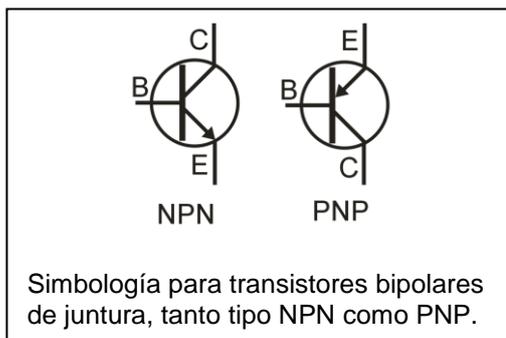
un voltaje mínimo de conducción, entonces la corriente se estabiliza, dependiendo del valor de I_B .

Cuando esta corriente se ha estabilizado, se puede aumentar el voltaje V_{CE} , pero la corriente permanecerá casi igual. Si se aumenta poco a poco el valor de I_B , entonces también aumentará el valor de la corriente I_{CE} ; y aunque teóricamente se podría aumentar I_B de forma indefinida, existe un momento en que el dispositivo falla por sobrecalentamiento. Entonces, aquí se observa claramente que, en un TBJ, se tiene una corriente I_C controlada por medio de una corriente I_B , y el efecto de amplificación se logra debido a que I_C siempre es mucho mayor que I_B .



Todo lo que se ha explicado para transistores NPN se puede aplicar

para dispositivos PNP, aunque con sus correspondientes cambios en los voltajes aplicados (se muestran en la figura anexa). También en otra figura adicional se muestra la simbología para estos dispositivos, tanto el tipo NPN como el tipo PNP; se puede ver que en



este caso, la punta de flecha que indica la unión P-N está indicando la

polaridad del diodo que se forma entre base y emisor; y eso significa que, al menos en los TBJ, sí es posible identificar sus tres terminales a simple vista en un diagrama.

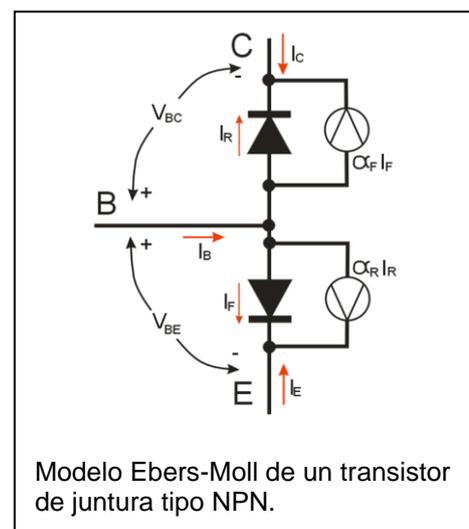
ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE 5A

- ¿Qué significan las siglas TBJ?
- ¿Cómo está construido un TBJ?
- ¿Cómo se denominan las terminales de un TBJ?
- ¿Qué sucede si en un TBJ-NPN se aplica un voltaje entre C y E, pero no hay voltaje en B?
- Cuando el transistor entra en conducción, ¿qué factor controla el flujo de corriente entre C y E?
- ¿Qué ocurre con I_{CE} si aumenta I_{BE} ? ¿Y si disminuye?
- Dibuja los símbolos para un TBJ-NPN y para un TBJ-PNP:

5.2 MODELOS Y POLARIZACIÓN

Para simplificar el estudio de los TBJ, se han creado algunos modelos que facilitan la comprensión de su principio de operación. Uno de los más conocidos y utilizados es el modelo de Ebers-Moll, que representa al transistor como un par de diodos con sendas fuentes de corriente asociadas, como se muestra en la figura anexa. Se dice que este es un “modelo para señales grandes”, ya que refleja bastante bien el comportamiento del dispositivo ante la presencia de señales de entrada relativamente amplias y con pocas variaciones respecto al tiempo.

Se puede observar que las uniones PN de base-colector y base-emisor se representan por medio de un par de diodos, y que cada uno de ellos tiene en paralelo una pequeña fuente de corriente asociada. A través de la terminal C está entrando una corriente I_C , en E entra I_E y en B se encuentra I_B ; adicionalmente, en el diodo en C se encuentra una corriente inversa I_R

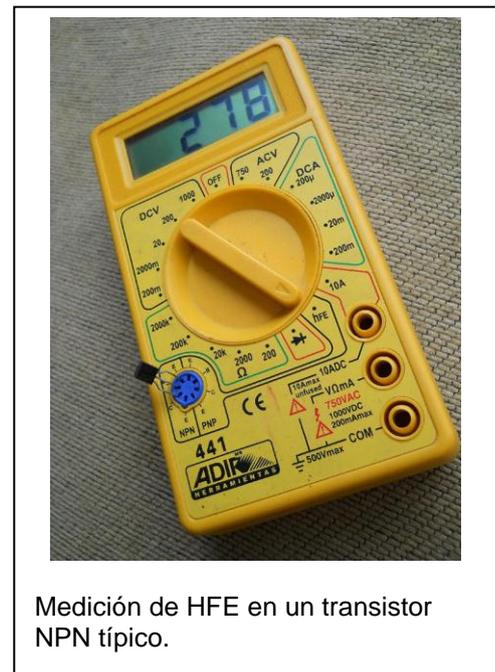


y en E otra llamada I_F . Finalmente, el valor de la corriente de las fuentes en paralelo a los diodos está dado por un factor calculado a base precisamente de las corrientes I_F e I_R . Hay que ver también la presencia de los voltajes V_{BC} y V_{BE} , que son los que fuerzan a la circulación de corriente dentro del transistor.

A partir de este modelo, se deducen una serie de fórmulas bastante complejas, que involucran cálculos matemáticos algo elaborados; sin embargo, todo esto puede resumirse en una fórmula simplificada, en la cual se desprecian ciertos factores que casi no influyen en el comportamiento del transistor, y que poco o ningún efecto tienen en el resultado final deseado. Las fórmulas más empleadas para calcular las corrientes dentro de un transistor son:

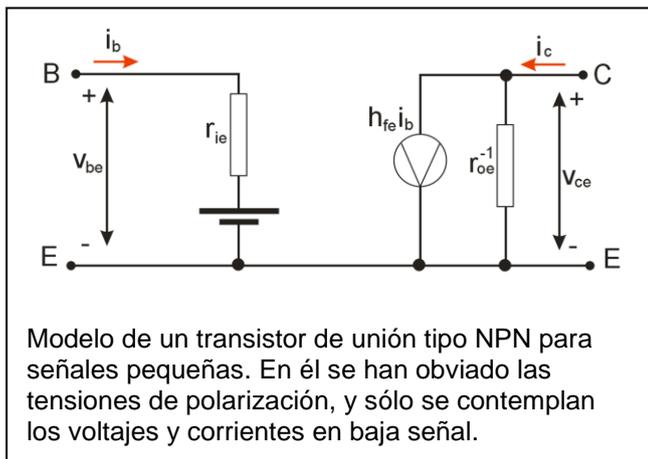
$$I_C = \beta_F \times I_B \quad I_E = I_C + I_B$$

Donde β_F es un factor de amplificación típico del transistor que se esté usando, el cual depende de la construcción física del mismo. A este factor también se le conoce como H_{FE} , y normalmente tiene un valor grande: de más de 60 para transistores de potencia, y de más de 200 para transistores de pequeña señal (en la foto anexa se presenta la medición de este factor en un transistor BC547 típico; se aprecia que su valor H_{FE} es de casi 300). Casi todos los multímetros modernos poseen una escala especializada para poder llevar a cabo esta medición, así que incluso si no se tienen a la mano las hojas de datos de un cierto transistor, es posible conocer su valor de amplificación de corriente interno.



Medición de HFE en un transistor NPN típico.

¿Qué sucede cuando se habla de señales más pequeñas? En tal caso, los modelos matemáticos varían ligeramente, ya que se tienen que contemplar otros factores como voltajes de caída, tensión mínima para



polarizar el diodo en directa, etcétera. En la figura anexa se muestra el modelo más empleado para representar a un transistor NPN para bajas señales y frecuencias medianas; se aprecia que en la base se tiene una resistencia pequeña de

entrada, y que también existe una fuente de voltaje equivalente a la tensión de polarización del diodo BE; esto significa que a la base no podrá entrar ninguna corriente mientras la señal de entrada esté por debajo del valor de esta fuente interna. Por su parte, entre el colector y el emisor se encuentra una fuente de corriente, cuyo valor se calcula a partir de la corriente que entra en la base; también hay que notar que existe una resistencia parásita en paralelo con esta fuente de corriente.

Al igual que en el caso anterior, a partir de este modelo se pueden deducir una serie de fórmulas matemáticas algo complejas, pero que al momento de simplificar términos y de despreciar los efectos que no influyan casi nada en el resultado final, se obtiene una fórmula muy similar a la que se indicó con anterioridad:

$$i_c = \beta_f \times i_b \quad i_e = i_c + i_b$$

En esta fórmula se utilizan letras minúsculas para indicar que se refiere a corrientes en pequeña señal, no de polaridades en corriente directa. Esta es una convención que se utiliza mucho en electrónica y que se puede apreciar en la figura del modelo: cuando son voltajes o corrientes constantes, las letras H, R, V e I se representan con mayúsculas, y cuando son señales eléctricas variables, las letras h, r, v e i se representan en minúsculas.

Al igual que en el caso anterior, el término β_f también se representa por las siglas h_{FE} , y normalmente es así como se puede encontrar en las hojas de datos de los TBJ. En un principio, cuando los procesos de

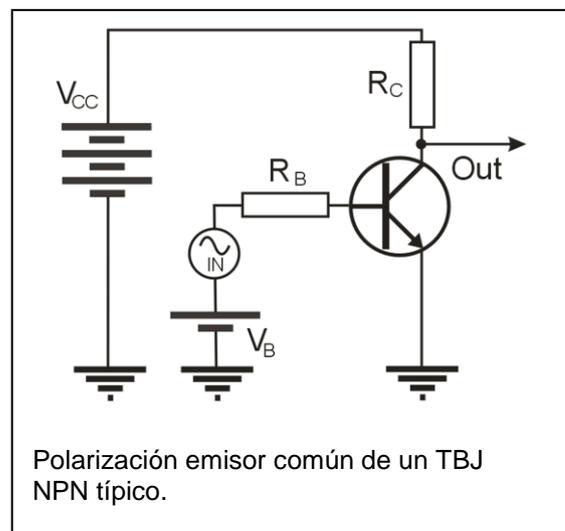
manufactura de los transistores estaban apenas desarrollándose, sí se tenían grandes diferencias entre los valores de H_{FE} y h_{FE} ; sin embargo, en la actualidad casi han desaparecido, así que no se comete un error significativo al considerar que ambos factores de amplificación son iguales (de hecho, algunos fabricantes sólo consignan uno de ellos en sus hojas de datos, asumiendo que el otro es prácticamente idéntico).

Finalmente, ocurre una situación especial si el dispositivo se empleará en aplicaciones de baja señal y muy alta frecuencia; para ello, existe un modelo adicional que contempla la aparición de minúsculas capacitancias parásitas entre B-C y entre B-E. Este modelo no se detallará en este momento, ya que es poco probable encontrar un caso como éstos; pero se menciona para hacer conciencia de la necesidad de contemplar ese efecto capacitivo para diseños especializados.

Ahora que se han descrito los modelos teóricos, es momento de conocer cómo trabaja el transistor en la práctica, y para ello se describirá primero el tema de la polarización del dispositivo.

Para operar adecuadamente, un TBJ necesita de ciertos voltajes y corrientes que lo hagan funcionar dentro de los parámetros deseados según la aplicación en la que se utilizará. Para lograr esto, se han diseñado algunas formas de conexión que buscan aprovechar de la mejor forma posible una señal de entrada, para entregarla a su salida con las características que se necesiten en ese momento.

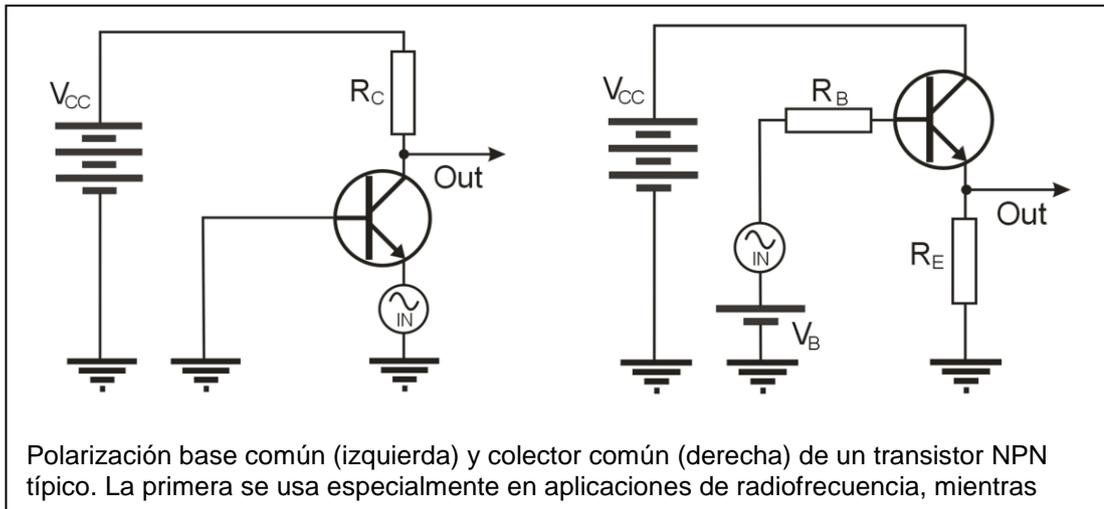
El método más común de polarización de un TBJ es la conexión en modo emisor común, la cual se muestra en la figura anexa. Se aprecia que en este caso, se ha conectado una fuente de voltaje entre C y E, con una resistencia R_C entre el positivo de la fuente y el colector del TBJ. El emisor está conectado directamente al extremo negativo de la fuente, y en la base se ha colocado



una fuente adicional (con su respectiva resistencia R_B) con un valor

calculado de tal forma que, en condición de reposo, a través de B circule una corriente suficiente como para mantener la corriente en C en un punto medio entre su valor máximo permitido y cero. De esta forma, cuando a este voltaje en la base se suma una señal externa (IN), esta señal se sumará o restará a la tensión V_B , haciendo que i_b varíe según los cambios en la señal de entrada. Al variar i_b , esto provoca un cambio en i_c , el cual a su vez ocasiona que la caída de voltaje entre los extremos de R_C reflejen los cambios en la señal de entrada, pero amplificados y con polaridad invertida. Esta es la forma más usual de utilizar un TBJ, como amplificador-inversor de señal, y por esa razón se abundará más en este tema un poco más adelante en esta unidad.

Sin embargo, esta no es la única forma de conectar un TBJ; existen configuraciones para conectarlo en modo base-común y colector-común, cada una de ellas para funciones muy específicas; por ejemplo, un TBJ en modo base-común normalmente se utiliza para amplificar el voltaje de una señal, *pero no su corriente*; esto significa que casi siempre al encontrar esta configuración, será en aplicaciones de acoplamiento de impedancias, y esta forma de conexión es especialmente popular en circuitos de radiofrecuencia. Por su parte, la configuración de colector común produce, en su terminal emisor, una versión casi idéntica de la señal aplicada en B, ya que la caída de voltaje entre B y E siempre es la misma, prácticamente sin depender del voltaje aplicado. Por esta razón, a este tipo de conexión se le denomina “seguidor de señal”, ya que toma una señal de baja potencia en la base, y la entrega idéntica en su emisor, pero con la posibilidad de entregar mucha más corriente que el dispositivo de entrada original.



A pesar de ello, la polarización más frecuente para los transistores bipolares de juntura es la de emisor común, y por ello se le dará especial énfasis cuando se estudie al TBJ como amplificador.

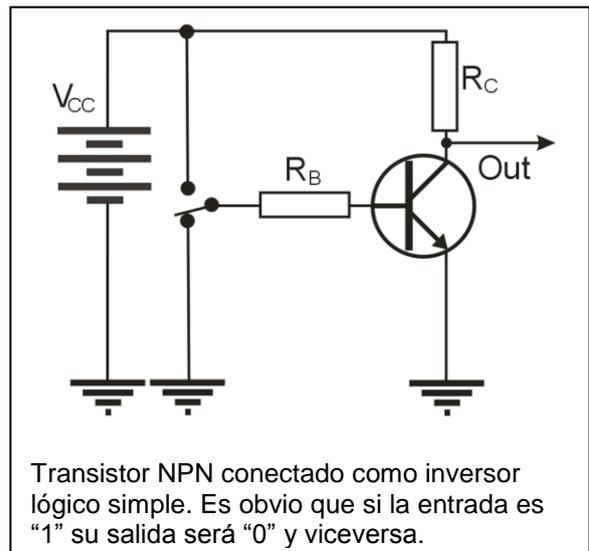
ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE 5B

- ¿Cuál es el modelo más popular para representar un TBJ en señales grandes y de baja frecuencia?
- ¿Cómo representa este modelo a un transistor NPN?
- Indica la fórmula simplificada que representa el comportamiento de la corriente dentro de un TBJ:
- ¿De qué depende el factor de amplificación de un TBJ?
- En el modelo para señales pequeñas, ¿qué factores se consideran?
- ¿Cuál es la polarización más empleada en transistores TBJ?
- ¿Cómo se le llama a esta polarización?

5.3 EL TBJ COMO INVERSOR Y COMPUERTAS LÓGICAS

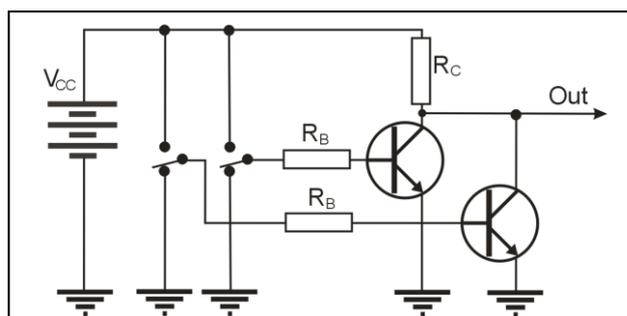
Aunque hasta el momento se ha mencionado bastante la posibilidad de utilizar un TBJ para el manejo de señales análogas, lo cierto es que este dispositivo también resulta ideal para usarse en circuitos digitales, ya que su característica principal de tomar una corriente baja en su base y multiplicarla por un factor muy alto en su colector, lo hacen especialmente útil en el manejo de señales lógicas.

En la figura anexa se muestra una conexión típica de un TBJ, donde a su entrada se tendrá un "1" o un "0" (esto es, un voltaje alto para "1" y un voltaje igual a cero para "0"); y es fácil deducir que, cuando en la base se están aplicando 0V, el transistor no conduce y, por tanto, no hay caída de voltaje en la resistencia del colector, lo que significa que al medir el voltaje a la salida se tendrá un nivel equivalente al voltaje de alimentación, esto es, un "1" lógico.



Si ahora se lleva la entrada del transistor a un nivel alto, a través de la resistencia de la base comenzará a circular una cierta corriente, la cual se multiplicará por el factor H_{FE} del transistor en su colector. Para fines prácticos, es como si el transistor estuviera en corto circuito con el nivel de tierra, así que la salida en el colector toma prácticamente ese mismo valor, lo que equivale a un "0" lógico. Es fácil entonces deducir que un TBJ conectado como se muestra en esta figura, está trabajando como un inversor digital, ya

que cuando a su base llega un "1", expide por su salida un "0", y viceversa.

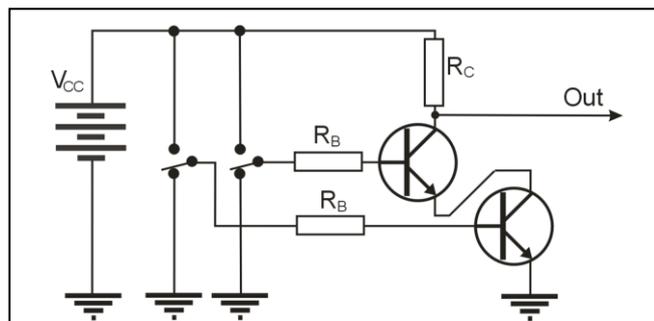


Conexión de dos transistores NPN formando una compuerta NOR de dos entradas. Es fácil observar que basta que alguno de los dos transistores se encienda (entrada "1"), para que la salida caiga a "0"; sólo cuando ambos están apagados, la salida será "1".

Entradas		Salida	Símbolo
A	B		
0	0	1	
0	1	0	
1	0	0	
1	1	0	

El TBJ también se puede utilizar para construir compuertas lógicas. Por ejemplo, en la figura anexa se muestra la conexión de dos transistores TBJ con una salida común. Al analizar cómo se comporta, se tiene que si ambas entradas están en nivel bajo, ninguno de los

transistores conduce, lo que implica un voltaje alto a la salida. Si alguna de las entradas pasa a un nivel alto, ese transistor se pone en corto, obligando a la resistencia R_C a conducir y llevando la salida a un nivel bajo o "0"; si se retira el nivel alto de la primera entrada y se coloca en la segunda, el efecto es el mismo; y obviamente, si ambos transistores se encienden, la salida seguirá siendo un "0". Esto da como resultado la tabla de verdad mostrada en la figura anexa, y recordando un poco la electrónica digital básica, esa tabla corresponde al comportamiento de una compuerta NOR de dos entradas.



Conexión de dos transistores NPN para formar una compuerta NAND de dos entradas. Es obvio que si sólo uno de los transistores se enciende, o si los dos están apagados, la salida será igual a "1"; sólo cuando ambos transistores se encienden, la salida pasa a "0".

Entradas		Salida	Símbolo
A	B		
0	0	1	
0	1	1	
1	0	1	
1	1	0	

Si se reacomodan los transistores como se muestra en la figura anexa, ahora se tiene que, cuando ambas entradas de los transistores están en nivel bajo, ninguno de los dos conduce, lo que significa que a la salida

habrá un "1"; si se enciende cualquiera de los dos, pero el otro permanece apagado, la corriente sigue sin poder fluir a través de R_C , lo que significa que a la salida permanece el "1"; sólo cuando ambos transistores reciben niveles "altos" a su entrada, es que ambos entran en conducción, y la salida será un

"0". Este comportamiento se resume en la tabla mostrada, y corresponde al de una compuerta tipo NAND de dos entradas.

Ahora, al tener como bloques básicos el inversor, la compuerta NOR y la compuerta NAND, a partir de ellas se pueden construir prácticamente todos los bloques funcionales de la electrónica



Los populares circuitos integrados TTL de la serie 74xx, están contruidos precisamente con base en transistores bipolares de juntura.

digital, como flip-flops, contadores, registros de corrimiento, memorias, unidades aritméticas, etc. Precisamente la popular serie de circuitos integrados TTL (siglas de *Transistor-Transistor Logic* o lógica de transistor a transistor), está diseñada a base de dispositivos tipo TBJ.

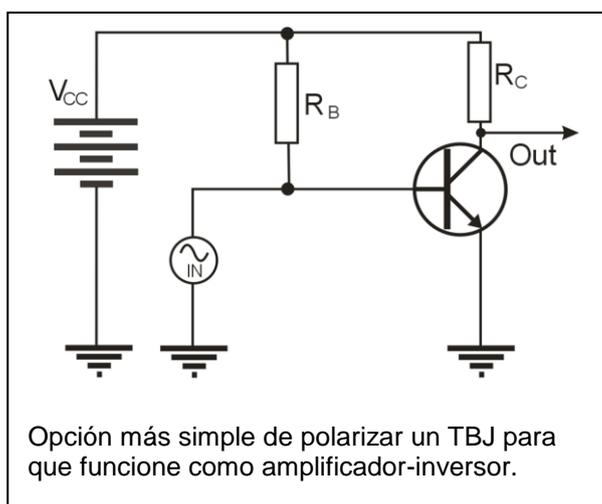
ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE 5C

- ¿Se pueden utilizar TBJ en aplicaciones de electrónica digital?
- ¿Cómo se conecta un TBJ para que funcione como un inversor lógico?
- ¿Cómo están conectados los transistores en una compuerta NOR?
- ¿Cómo están conectados los transistores en una compuerta NAND?
- ¿Qué familia de circuitos digitales está construida con base en TBJ?

5.4 EL AMPLIFICADOR BÁSICO

Como ya se indicó anteriormente, la principal aplicación de los transistores es como amplificadores de señal, lo que significa que, cuando se localice un dispositivo de éstos dentro de un circuito electrónico, es muy probable que esté tomando una señal de entrada pequeña y convirtiéndola en una señal más grande a su salida.

La forma como se hace esto es la siguiente: ya se mencionó que cuando se conecta un TBJ en configuración emisor común, funciona como amplificador-inversor de señal; sin embargo, en el ejemplo visto anteriormente, se necesitaban dos fuentes de poder independientes para poder realizar esta función, una alimentando al colector, y otra polarizando a la base. Obviamente que para los diseñadores esto resultaba algo

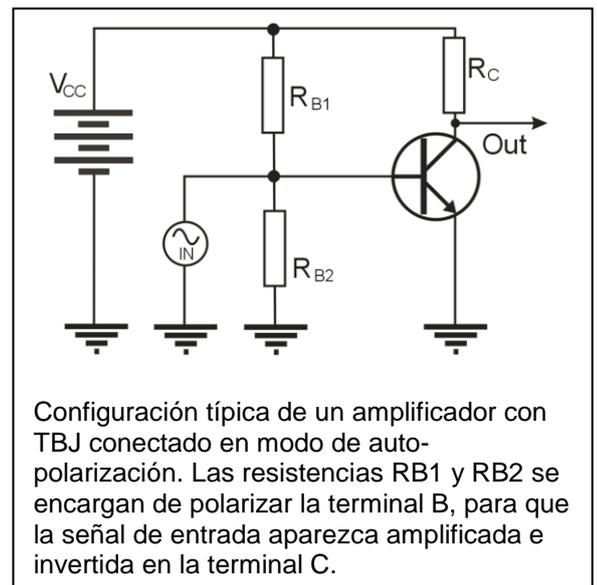


complicado, así que se buscaron alternativas para que, a partir de una fuente única, se obtuviera tanto la alimentación como la polarización del dispositivo.

Una primera solución consistió simplemente en colocar una resistencia entre el extremo

positivo de la fuente y la terminal de base, calculando el valor de la resistencia para que, al restar la caída de voltaje normal entre B-E, a través de la resistencia (y por tanto entrando a la base) circule una corriente que coloque al transistor en un estado de conducción parcial; de este modo, cuando a la base se aplica la señal de una fuente externa (IN), esta tensión se suma o resta a la que normalmente llega a la base, y hace que la corriente que circula a través de esa terminal refleje los cambios de la señal de entrada; y esto a su vez induce grandes cambios en la corriente que circula entre C y E, provocando una variación en la caída de voltaje en R_C , y la obtención de una señal en la terminal C, que será una versión amplificada e invertida de la señal que originalmente se aplicó en la base.

Aunque esta solución sí proporcionaba cierta amplificación, pruebas realizadas demostraron que la salida era muy inestable, y que la señal de salida solía presentar algunas irregularidades poco convenientes. Para corregir este problema, se buscó la forma de estabilizar sobre todo el voltaje de polarización aplicado en la base del TBJ, y se llegó así a lo que se muestra en la figura anexa: un transistor dentro de un

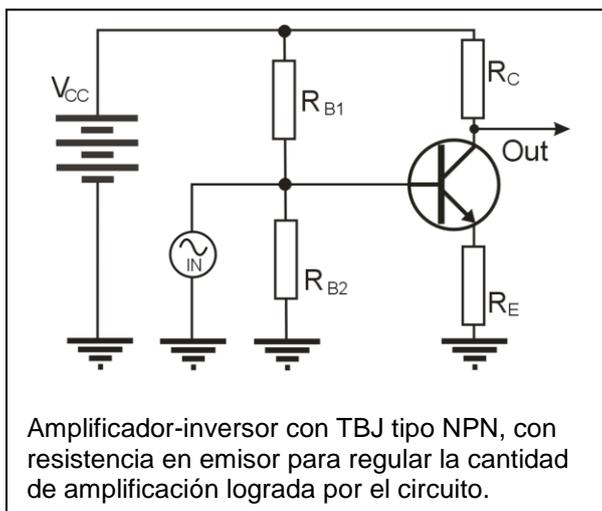


circuito auto-polarizador, donde se ha añadido una resistencia entre la base y tierra para estabilidad. Se puede apreciar que, si la fuente de señal externa toma un valor de cero, en la base del transistor se está aplicando un voltaje equivalente al resultado del divisor de voltaje formado por R_{B1} y R_{B2} ; y este voltaje se calcula de tal valor que obligue a que por el transistor circule una corriente lo más parecida a la mitad de su corriente máxima de operación. Esto significa que a la salida, en el colector, se tendrá un voltaje igual al de la fuente de alimentación menos la caída de voltaje provocada por la corriente circulando en C multiplicada por el valor de la resistencia R_C . Esta es la condición de reposo del TBJ.

Si ahora la fuente de señal comienza a inyectar un voltaje variable en la base del transistor, esto hará que la corriente de base varíe siguiendo los

cambios de voltaje de esta fuente externa. Esta variación en i_b se refleja de inmediato en i_c , haciendo que el transistor conduzca más o menos, y estos cambios en la corriente de colector se reflejan en la caída de voltaje en R_C : si la señal de entrada es positiva, circulará más corriente por B, lo que hace circular más corriente por C y la caída en R_C se incrementa, reduciendo el voltaje de la señal de salida. Si la señal de entrada es negativa, esto disminuirá la cantidad de corriente que circula en B, lo cual se refleja en la corriente de C, y eso hace que disminuya la caída en R_C , aumentando el voltaje de la señal de salida. Entonces, se tiene que una configuración como la mostrada en la figura anterior está trabajando como un amplificador-inversor de señal, y el grado de amplificación estará dado principalmente por las características internas del transistor, específicamente su valor H_{FE} .

Esto presenta algunos inconvenientes: en primer lugar, el valor H_{FE} de un transistor de pequeña señal por lo general es muy alto (entre 200 y 300 de forma típica), y muchas veces el diseñador no necesita un grado de amplificación tan alto en su aplicación en particular. Ante esta situación, se



mejoró el circuito anterior añadiendo una resistencia de valor relativamente pequeño entre emisor y el voltaje negativo de la fuente, para quedar como se muestra en la figura anexa. Esta resistencia adicional tiene un efecto de amortiguación, que reduce considerablemente el grado de amplificación, hasta

dejarlo en los niveles deseados.

La forma como sucede esto es la siguiente: cuando el circuito está en reposo, a través de la base circula una cierta corriente que a su vez provoca que circule un cierto valor de I_C . Este valor de I_C se suma a I_B y es la corriente que circula a través de E, lo que provoca que en los extremos de la resistencia R_E aparezca un voltaje positivo. Cuando se inyecta una señal de entrada en B, ésta hace que la corriente en B aumente, lo que automáticamente haría crecer a i_c e i_e , pero esto a su vez hace que el valor

de voltaje en E aumente, lo que amortigua a la señal de entrada evitando una amplificación demasiado grande. Esto significa que, para efectos prácticos, añadir una resistencia en E funciona como una especie de realimentación hacia la base, evitando que induzca cambios demasiado pronunciados en la corriente de base, y limitando por tanto el grado de amplificación del circuito. Esta es la configuración más empleada para amplificar una señal de entrada por medio de transistores bipolares.

Todo lo que se ha explicado hasta este momento, puede aplicarse también para transistores tipo PNP, lo único que se debe cuidar es la ubicación y polaridad de sus voltajes de alimentación.

ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE 5D

- a) ¿Cuál es la polarización que se emplea generalmente para usar un TBJ como amplificador?
- b) ¿Qué estado de conducción debe tener un TBJ en reposo cuando se usa como amplificador?
- c) ¿Cuál es la principal desventaja del método de polarización con resistencia única en la base?
- d) ¿Cuál es el inconveniente del método de polarización con doble resistencia en la base, pero sin resistencia en emisor?
- e) ¿Qué ventaja proporciona añadir la resistencia en el emisor?

5.5 ESPECIFICACIONES DEL FABRICANTE

Tal como ocurre con los transistores de efecto de campo, para que los investigadores y diseñadores electrónicos sepan exactamente qué esperar de un dispositivo en particular, los fabricantes de transistores bipolares ponen a disposición del público consumidor una serie de hojas de datos, con las especificaciones operativas de estos componentes. En la siguiente figura se muestra la primera página de las hojas de datos de un transistor PN2222A de pequeña señal.

PN2222A / MMBT2222A / PZT2222A
NPN General Purpose Amplifier

Features

- This device is for use as a medium power amplifier and switch requiring collector currents up to 500mA.
- Sourced from process 19.



Absolute Maximum Ratings * $T_a = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage	40	V
V_{CBO}	Collector-Base Voltage	75	V
V_{EBO}	Emitter-Base Voltage	6.0	V
I_C	Collector Current	1.0	A
T_{STG}	Operating and Storage Junction Temperature Range	- 55 - 150	$^\circ\text{C}$

* This ratings are limiting values above which the serviceability of any semiconductor device may be impaired.

NOTES:

- 1) These rating are based on a maximum junction temperature of 150 degrees C.
- 2) These are steady limits. The factory should be consulted on applications involving pulsed or low duty cycle operations.

Thermal Characteristics $T_a = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Max.			Units
		PN2222A	*MMBT2222A	**PZT2222A	
P_D	Total Device Dissipation	625	350	1,000	mW
	Derate above 25°C	5.0	2.8	8.0	$\text{mW}/^\circ\text{C}$
$R_{\theta JC}$	Thermal Resistance, Junction to Case	83.3			$^\circ\text{C}/\text{W}$
$R_{\theta JA}$	Thermal Resistance, Junction to Ambient	200	357	125	$^\circ\text{C}/\text{W}$

* Device mounted on FR-4 PCB $1.6'' \times 1.6'' \times 0.06''$.

** Device mounted on FR-4 PCB $36\text{mm} \times 18\text{mm} \times 1.5\text{mm}$; mounting pad for the collector lead min. 6cm^2 .

Primera página de las hojas de datos del transistor PN2222A. (Imagen: Fairchild).

Como se observa, en esta primera página existe información muy importante sobre el dispositivo, como es:

- Tipo de transistor (amplificador de propósito general).
- Si es NPN o PNP (NPN).
- Voltaje máximo de operación entre C y E (40V).
- Corriente máxima que puede circular entre C y E (1.0 A).
- Potencia máxima que puede disipar (depende del encapsulado).
- Tipos de encapsulado y disposición de terminales.

Con estos datos se puede comenzar a trabajar con el transistor, sin embargo, aún falta saber alguna información muy importante para conocer bien las características de este dispositivo. A continuación se muestra la página 2 de las hojas de datos, con parámetros adicionales que conviene conocer:

Electrical Characteristics $T_a = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted					
Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Max.	Units
Off Characteristics					
$BV_{(BR)CEO}$	Collector-Emitter Breakdown Voltage *	$I_C = 10\text{mA}, I_B = 0$	40		V
$BV_{(BR)CBO}$	Collector-Base Breakdown Voltage	$I_C = 10\mu\text{A}, I_E = 0$	75		V
$BV_{(BR)EBO}$	Emitter-Base Breakdown Voltage	$I_E = 10\mu\text{A}, I_C = 0$	6.0		V
I_{CEX}	Collector Cutoff Current	$V_{CE} = 60\text{V}, V_{EB(off)} = 3.0\text{V}$		10	nA
I_{CBO}	Collector Cutoff Current	$V_{CB} = 60\text{V}, I_E = 0$ $V_{CB} = 60\text{V}, I_E = 0, T_a = 125^\circ\text{C}$		0.01 10	μA μA
I_{EBO}	Emitter Cutoff Current	$V_{EB} = 3.0\text{V}, I_C = 0$		10	nA
I_{BL}	Base Cutoff Current	$V_{CE} = 60\text{V}, V_{EB(off)} = 3.0\text{V}$		20	nA
On Characteristics					
h_{FE}	DC Current Gain	$I_C = 0.1\text{mA}, V_{CE} = 10\text{V}$ $I_C = 1.0\text{mA}, V_{CE} = 10\text{V}$ $I_C = 10\text{mA}, V_{CE} = 10\text{V}$ $I_C = 10\text{mA}, V_{CE} = 10\text{V}, T_a = -55^\circ\text{C}$ $I_C = 150\text{mA}, V_{CE} = 10\text{V}^*$ $I_C = 150\text{mA}, V_{CE} = 1\text{V}^*$ $I_C = 500\text{mA}, V_{CE} = 10\text{V}^*$	35 50 75 35 100 50 40	300	
$V_{CE(sat)}$	Collector-Emitter Saturation Voltage *	$I_C = 150\text{mA}, I_B = 15\text{mA}$ $I_C = 500\text{mA}, I_B = 50\text{mA}$		0.3 1.0	V V
$V_{BE(sat)}$	Base-Emitter Saturation Voltage *	$I_C = 150\text{mA}, I_B = 15\text{mA}$ $I_C = 500\text{mA}, I_B = 50\text{mA}$	0.6	1.2 2.0	V V
Small Signal Characteristics					
f_T	Current Gain Bandwidth Product	$I_C = 20\text{mA}, V_{CE} = 20\text{V}, f = 100\text{MHz}$	300		MHz
C_{obo}	Output Capacitance	$V_{CB} = 10\text{V}, I_E = 0, f = 1\text{MHz}$		8.0	pF
C_{ibo}	Input Capacitance	$V_{EB} = 0.5\text{V}, I_C = 0, f = 1\text{MHz}$		25	pF
rbC_c	Collector Base Time Constant	$I_C = 20\text{mA}, V_{CB} = 20\text{V}, f = 31.8\text{MHz}$		150	pS
NF	Noise Figure	$I_C = 100\mu\text{A}, V_{CE} = 10\text{V},$ $R_S = 1.0\text{K}\Omega, f = 1.0\text{KHz}$		4.0	dB
$Re(h_{ie})$	Real Part of Common-Emitter High Frequency Input Impedance	$I_C = 20\text{mA}, V_{CE} = 20\text{V}, f = 300\text{MHz}$		60	Ω
Switching Characteristics					
t_d	Delay Time	$V_{CC} = 30\text{V}, V_{EB(off)} = 0.5\text{V},$ $I_C = 150\text{mA}, I_{B1} = 15\text{mA}$		10	ns
t_r	Rise Time			25	ns
t_s	Storage Time	$V_{CC} = 30\text{V}, I_C = 150\text{mA},$ $I_{B1} = I_{B2} = 15\text{mA}$		225	ns
t_f	Fall Time			60	ns

* Pulse Test: Pulse Width $\leq 300\mu\text{s}$, Duty Cycle $\leq 2.0\%$

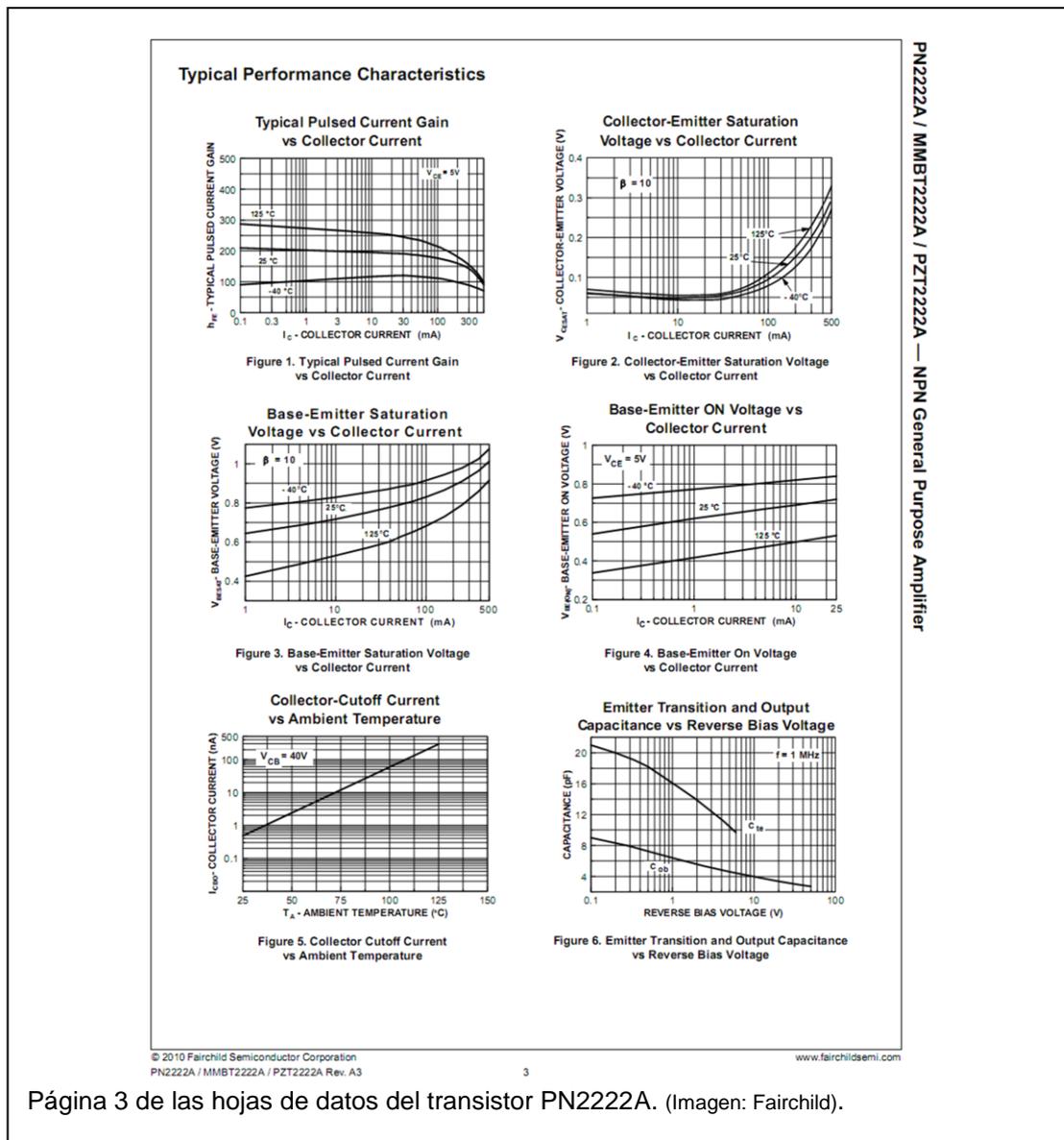
PN2222A / MMBT2222A / PZT2222A — NPN General Purpose Amplifier

Segunda página de las hojas de datos del transistor PN2222A. (Imagen: Fairchild).

Aquí se pueden apreciar algunos otros datos importantes necesarios durante el diseño de circuitos con este componente, como son:

- Ganancia en corriente h_{FE} (hasta 300 como máximo).
- Ancho de banda f_T (300MHz).
- Tiempos de conmutación.
- Capacitancias parásitas.

Y algunos otros de aplicación más especializada. Finalmente, para que el diseñador tenga a su disposición la mayor cantidad de información posible, incluyendo el comportamiento del dispositivo en condiciones dinámicas, las hojas de datos también incluyen una serie de gráficos que muestran la respuesta del transistor ante distintas señales de entrada y voltajes de polarización. Enseguida se muestran las páginas 3 y 4 del PN2222A.



Typical Performance Characteristics

(Continued)

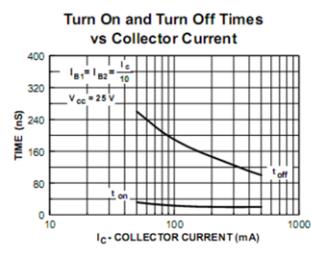


Figure 7. Turn On and Turn Off Times vs Collector Current

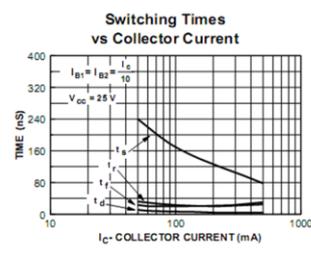


Figure 8. Switching Times vs Collector Current

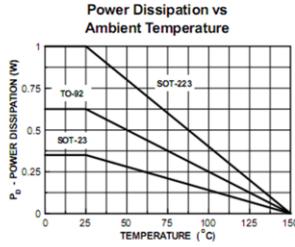


Figure 9. Power Dissipation vs Ambient Temperature

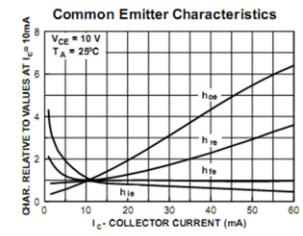


Figure 10. Common Emitter Characteristics

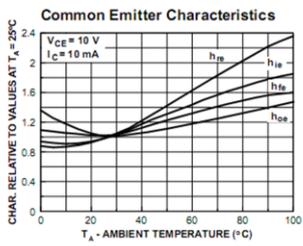


Figure 11. Common Emitter Characteristics

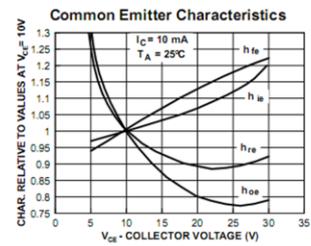


Figure 12. Common Emitter Characteristics

Página 4 de las hojas de datos del transistor PN2222A. (Imagen: Fairchild).

Resulta obvio que de estas hojas de datos se obtiene toda la información relevante que el diseñador necesita para el correcto cálculo de sus circuitos; así que conviene tenerlas siempre disponibles para consultarlas. Hay que recordar que estas hojas se consiguen normalmente por medio de Internet, entrando a cualquier buscador y colocando como criterio de búsqueda “(matrícula del dispositivo) datasheet” (sin comillas); esto significa que si se desean las hojas de datos de un transistor 2N4401, sólo se debe colocar en cualquier buscador “2N4401 datasheet” (sin

comillas), y de inmediato se desplegarán las páginas donde se pueden consultar o descargar esas hojas de datos.

En el caso específico de los transistores de potencia, existe un factor muy importante que se debe considerar durante el diseño: la capacidad que tiene el dispositivo de deshacerse del calor desprendido por la operación constante del mismo. Este punto resulta fundamental para un buen diseño debido a que, por lo general, un transistor de potencia puede llegar a generar varios watts de calor residual mientras está funcionando; el problema es que si este calor es excesivo, el dispositivo por sí mismo será incapaz de liberarse de tanto calor, y comenzará a sobrecalentarse, con el consiguiente riesgo de falla. La capacidad que tiene un transistor para liberarse del calor recibe el nombre de “resistencia térmica”, y se mide en °C/W. Este parámetro se utiliza para calcular el tipo y tamaño de disipador de calor que se debe colocar en el dispositivo para evitar su sobrecalentamiento.

ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE 5E

- a) Menciona cinco datos básicos que se pueden consultar en las hojas de datos de un transistor:
- b) ¿Cómo se identifica la ganancia de corriente en estas hojas?
- c) ¿Para qué sirven las curvas de comportamiento del transistor?
- d) ¿Qué es la resistencia térmica de un transistor?
- e) ¿Para qué sirve conocer este factor?

AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Cómo se construye un transistor bipolar de juntura?
2. ¿Qué fenómeno se aprovecha para que circule corriente entre el colector y el emisor de un TBJ?
3. ¿Qué regula la cantidad de corriente que circula en el colector?
4. ¿Cómo se llama el modelo más empleado para representar a un TBJ para señales grandes y bajas frecuencias?
5. ¿Cuáles son las fórmulas que representan el comportamiento de las corrientes dentro de un TBJ?
6. ¿Cómo se construye una compuerta por medio de transistores bipolares?
7. ¿Qué polarización es la más empleada cuando se desea usar un TBJ como amplificador de señal?
8. Dibuja el circuito más utilizado cuando se requiere usar un TBJ como amplificador-inversor:
9. ¿En dónde se consiguen las hojas de datos de los transistores?

RESPUESTAS

1. Colocando capas alternadas de material semiconductor N-P-N o P-N-P.
2. Un fenómeno de avalancha inducido por la corriente de base.
3. La corriente en el colector será igual a la corriente de la base, multiplicada por un factor típico del dispositivo en cuestión.
4. Modelo de Ebers-Moll.
5. $I_C = \beta_F \times I_B$ $I_E = I_C + I_B$
6. Colocando dos transistores en configuración emisor común, ya sea en paralelo (compuerta NOR) o en serie (compuerta NAND).
7. La polarización de emisor común.
8. Dibujo.
9. Los fabricantes las ponen al alcance del público por medio de Internet.

RESPUESTAS A LAS ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE

Actividad de aprendizaje 5A:

- a) Transistor bipolar de juntura.
- b) Por tres capas alternadas de material semiconductor: N-P-N o P-N-P.
- c) Colector, base y emisor.
- d) Por el transistor no fluye corriente, debido a la zona de no conducción formada por el diodo en inversa entre B y C.
- e) La corriente que fluye entre la base y el emisor.
- f) Cuando I_{BE} aumenta o disminuye, también lo hace I_{CE} , aunque multiplicada por un factor que depende de la construcción del dispositivo.
- g) Dibujar.

Actividad de aprendizaje 5B:

- a) El modelo Ebers-Moll.
- b) Como un par de diodos conectados en su ánodo, con fuentes de corriente asociadas.
- c) $I_C = \beta_F \times I_B$ $I_E = I_C + I_B$
- d) De la construcción física del dispositivo.
- e) La presencia de resistencias parásitas de entrada y salida, el voltaje de polarización necesario para que circule corriente en la base, y una fuente de corriente entre C y E equivalente a la corriente de base multiplicada por el factor de amplificación del transistor.
- f) La polarización emisor-común.
- g) Amplificador-inversor.

Actividad de aprendizaje 5C:

- a) Sí, ya que funcionan bien en modo de conmutación.
- b) Como un amplificador emisor común, con ganancia ilimitada.
- c) En paralelo uno con otro, de modo que si uno se enciende, la salida cambia de "1" a "0".

- d) En serie, para que sea necesario que ambos se enciendan para que la salida pase de “1” a “0”.
- e) La familia de circuitos TTL 74xx.

Actividad de aprendizaje 5D:

- a) La polarización de emisor común.
- b) Un estado de conducción parcial, intermedio entre su corriente máxima de trabajo y cero.
- c) Que su respuesta no es muy lineal, ya que el voltaje de base no es muy estable.
- d) Que no se puede regular el grado de amplificación, el cual está fijado por la ganancia de corriente del dispositivo.
- e) Funciona como amortiguador para los cambios en la señal de entrada, y esto permite regular la cantidad de amplificación que dará el circuito.

Actividad de aprendizaje 5E:

- a) Tipo de transistor, si es NPN o PNP, voltaje de operación, corriente máxima, tipo de encapsulado, disposición de terminales, etc.
- b) Por las siglas h_{FE} .
- c) Para conocer las características dinámicas del dispositivo.
- d) Es lo que indica la cantidad de calor que es capaz de desprender el dispositivo en condiciones de trabajo.
- e) Para saber si es necesario colocar un disipador de calor al transistor, y el tamaño del mismo.

UNIDAD 6

EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL

OBJETIVO

El estudiante conocerá lo que es un amplificador operacional, su principio de funcionamiento y las formas más comunes de conectarlo para distintas aplicaciones en el área de la electrónica analógica, mostrando las fórmulas involucradas y los aspectos que se deben considerar al usar este dispositivo.

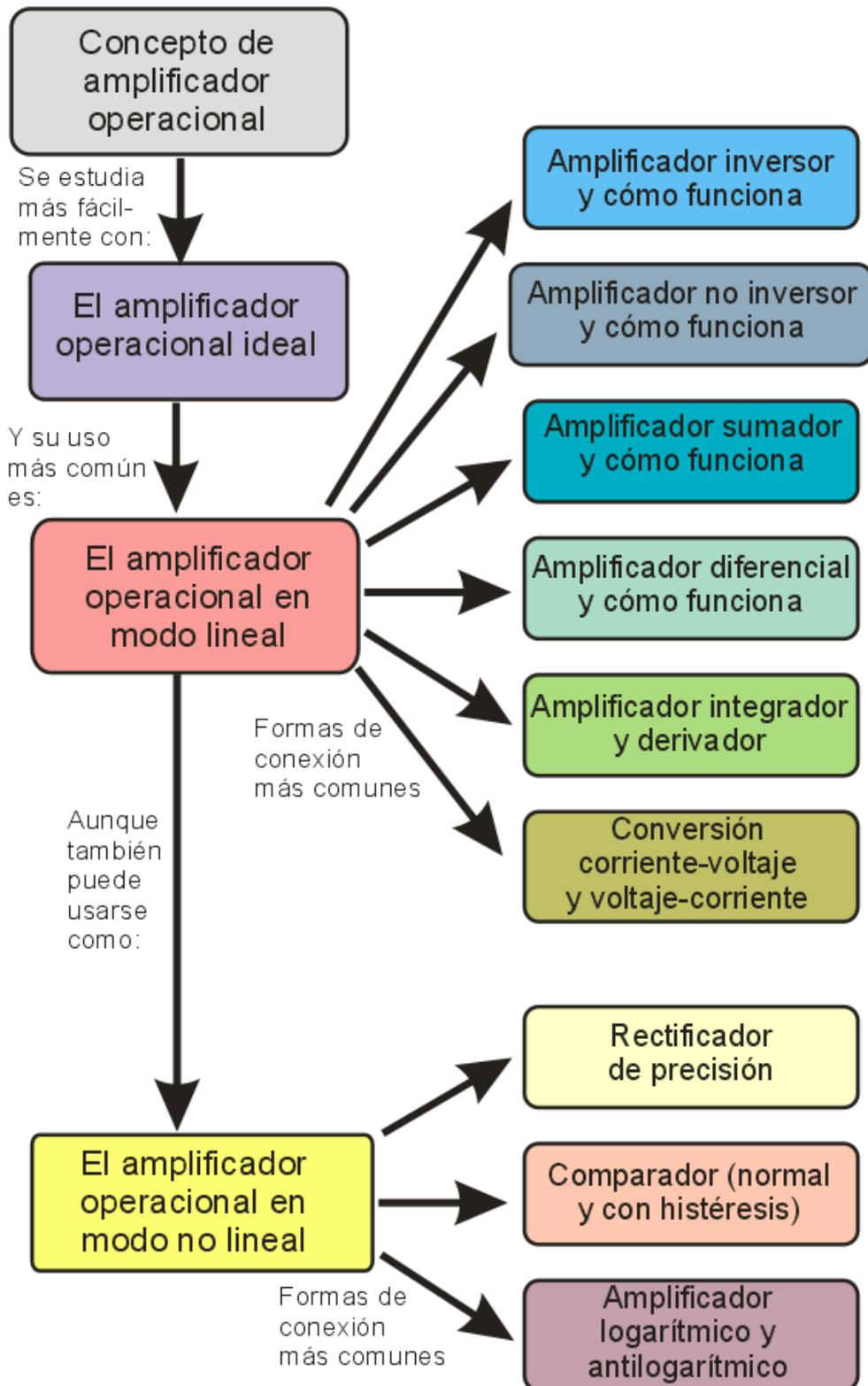
TEMARIO

6.1 MODELO IDEAL

6.2 ANÁLISIS DE CIRCUITOS LINEALES: INVERSOR, NO INVERSOR, SUMADOR, DIFERENCIAL INTEGRADOR, DERIVADOR, SEGUIDOR DE VOLTAJE, CONVERTIDORES DE VOLTAJE A CORRIENTE Y CORRIENTE A VOLTAJE.

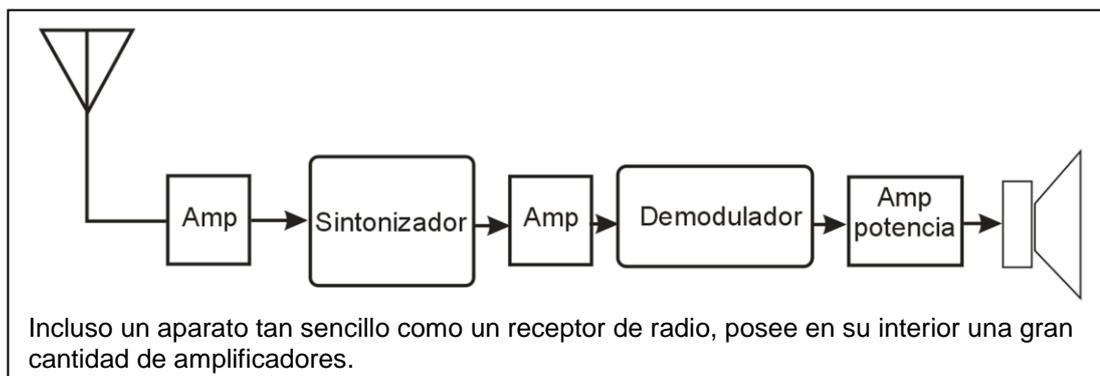
6.3 ANÁLISIS DE CIRCUITOS NO LINEALES: EL RECTIFICADOR DE PRECISIÓN, COMPARADORES Y AMPLIFICADORES LOGARÍTMICOS.

MAPA CONCEPTUAL



INTRODUCCIÓN

Como se indicó en unidades anteriores, una de las grandes fuerzas impulsoras detrás del desarrollo de los transistores fue la necesidad de contar con un dispositivo capaz de amplificar una señal de entrada, ya que en la industria electrónica, los amplificadores son uno de los bloques más utilizados en prácticamente todas las aplicaciones. Por ejemplo, en un receptor de radio es indispensable amplificar la pequeñísima señal que llega a través de la antena; una vez que se tiene en un nivel aceptable, se sintoniza la estación deseada y se amplifica nuevamente; de la estación recuperada hay que extraer el audio, y luego éste se amplifica otra vez; finalmente, para poder expedir el sonido por medio de una bocina, es necesaria la presencia de un amplificador adicional, que le dé al audio la potencia adecuada para que el sonido de la estación salga mediante los altavoces. Es obvio entonces que incluso una aplicación tan simple y tradicional como la recepción de una estación de radio, requiere el uso de múltiples amplificadores, cada uno diseñado para recibir una señal de amplitud o potencia reducida, para expedir la misma señal, pero ya con el tamaño y potencia adecuados para su posterior aprovechamiento.



Esto significa que, en electrónica analógica, los amplificadores son uno de los bloques más empleados para una enorme cantidad de aplicaciones. Como resultaría un verdadero dolor de cabeza que cada vez que un diseñador se enfrentara con la necesidad de incluir un amplificador en un circuito, tuviera que calcular desde cero la configuración de transistores adecuada para conseguir el fin deseado, las empresas productoras de dispositivos electrónicos decidieron aprovechar la

oportunidad de negocios que se les presentaba y, debido a la tecnología de los circuitos integrados, que permite combinar distintos componentes electrónicos en un encapsulado sencillo, decidieron sacar al mercado un chip que en su interior tuviera todos los elementos necesarios para realizar una amplificación controlada, dependiendo de algunos pocos elementos externos que el diseñador puede calcular fácilmente. A este chip se le llamó “amplificador operacional”, y tiene la enorme ventaja de que puede manejarse

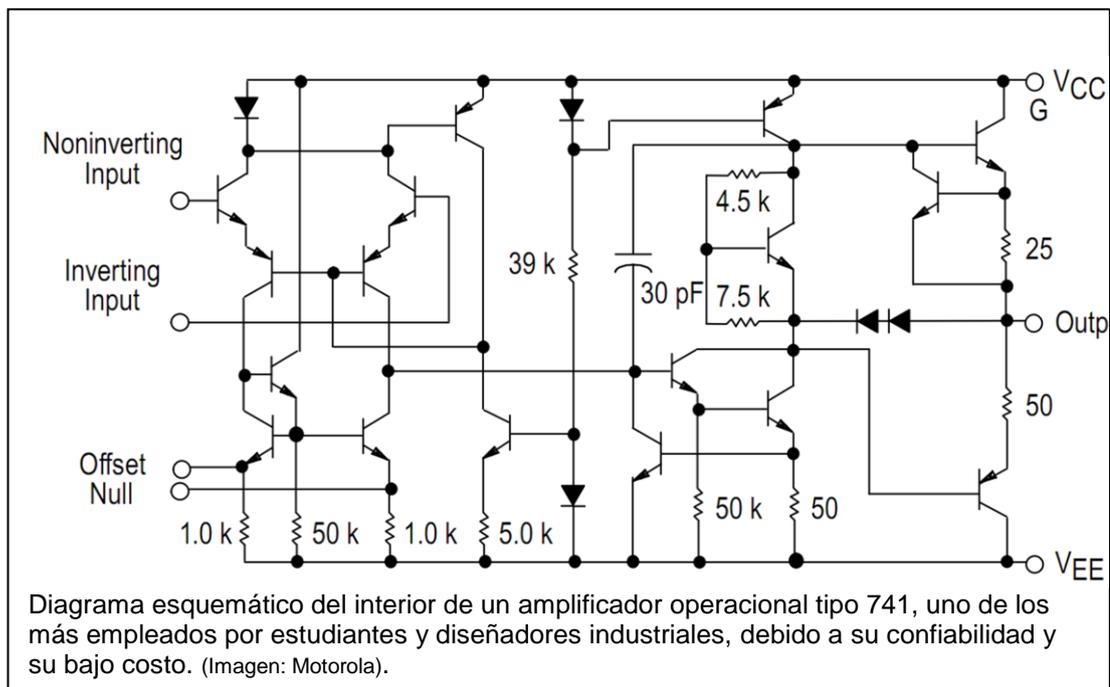


como un bloque funcional, donde quien esté diseñando un circuito sabe que por una de sus terminales entra una señal de cierta amplitud, y que por otra de sus terminales saldrá la misma señal amplificada las veces que sea necesario para su mejor aprovechamiento.

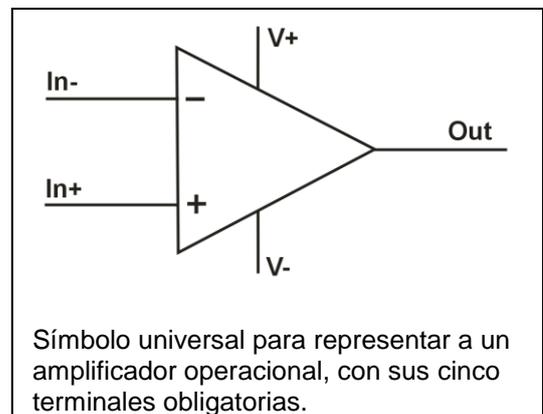
Pero ¿cómo funciona un amplificador operacional? Precisamente ello se expondrá en esta unidad.

6.1 MODELO IDEAL

Los amplificadores operacionales no son “cajas negras” cuyo interior es desconocido; de hecho, gran cantidad de fabricantes incluyen, en sus hojas de datos, un diagrama de la construcción interna de estos chips. Como referencia, en la imagen anexa se muestra el diagrama interno de un amplificador tipo LM741, uno de los más utilizados tanto por estudiantes como en aplicaciones profesionales. Se puede distinguir que dentro de este chip lo único que hay son transistores, resistencias, diodos y un capacitor, todos conectados de tal forma que puedan realizar una buena labor de amplificación.



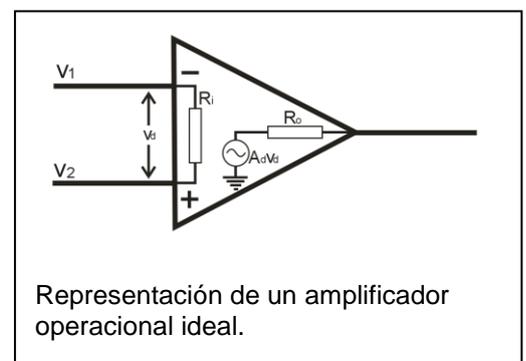
De este diagrama también se pueden deducir algunos otros conceptos: un amplificador operacional posee básicamente cinco terminales indispensables para poder funcionar: alimentación positiva, alimentación negativa, entrada inversora, entrada no inversora y salida. En la figura anexa se muestra el símbolo universal utilizado para representar a este bloque, mostrando claramente



las cinco terminales mencionadas. Se puede distinguir que se trata de un triángulo colocado en forma horizontal, de modo que en la cara que queda vertical se tienen las dos terminales de entrada, y en el vértice opuesto la salida. También se incluyen las terminales de alimentación, identificadas como V_+ y V_- , aunque en gran parte de la literatura aparecen como V_{CC} y V_{EE} (siglas de “voltaje de colectores” y “voltaje de emisores”). Algunos chips poseen un par de terminales adicionales llamadas “Offset null”, que sirven para fijar un voltaje de salida igual a cero en caso de que no haya señal en ninguna de las entradas; y finalmente, ciertos casos especiales poseen una terminal más identificada como “compensación”, donde se coloca un capacitor externo para estabilizar el comportamiento del chip a altas frecuencias.

Para entender más fácilmente cómo funciona un amplificador operacional, se puede recurrir a un modelo ideal, al igual que como se hizo con el diodo y el transistor. Este modelo ideal permite apreciar las características más importantes de este bloque, dejando a un lado por el momento algunos aspectos que poco influyen en el comportamiento general de este chip. En la figura anexa se tiene la representación de un amplificador operacional ideal; se puede ver que se ha colocado una resistencia R_i entre las dos terminales de entrada, y que a su salida hay una fuente de voltaje capaz de proporcionar una señal de A_d veces la diferencia de voltaje existente entre V_1 y V_2 ; finalmente, también a la salida se encuentra una resistencia R_o . Entonces, las condiciones que debe reunir un amplificador operacional ideal son las siguientes:

- La resistencia R_i debe ser lo más grande posible, tendiendo al infinito.
- La resistencia R_o debe ser lo más pequeña posible, tendiendo a cero.
- El grado de amplificación A_d debe ser lo más grande posible, tendiendo a infinito.



- El amplificador tratará siempre de mantener a las terminales $In+$ e $In-$ al mismo potencial.
- Como la resistencia R_i es casi infinita, la corriente que puede entrar en las terminales $V1$ y $V2$ es prácticamente igual a cero.
- Como R_o es casi cero, el amplificador puede expedir una gran corriente de salida sin que haya caída en su voltaje.

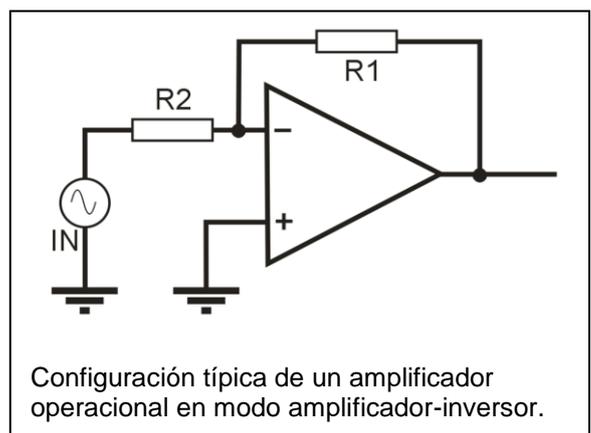
Con estas condiciones iniciales, se puede comenzar a explorar cómo funciona un amplificador operacional; para ello se estudiará la configuración más simple de todas, que es la del amplificador inversor, y de ahí ir elevando poco a poco el grado de dificultad, estudiando otros circuitos típicos en los que se aplica el amplificador operacional.

ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE 6A

1. ¿Cómo está construido por dentro un amplificador operacional?
2. Menciona las cinco terminales básicas de cualquier amplificador operacional.
3. En el modelo ideal de un OPAMP, ¿qué valor debe tener la resistencia de entrada entre las terminales (+) y (-)?
4. ¿Qué valor debe tener la resistencia de salida?
5. ¿Cómo debe ser el grado de amplificación en el OPAMP ideal?
6. ¿Cuánta corriente puede entrar a las terminales (+) y (-) del OPAMP ideal?
7. ¿Cómo debe ser el voltaje en las terminales (+) y (-) del OPAMP ideal?

6.2 ANÁLISIS DE CIRCUITOS LINEALES: INVERSOR, NO INVERSOR, SUMADOR, DIFERENCIAL INTEGRADOR, DERIVADOR, CONVERTIDORES DE VOLTAJE A CORRIENTE Y CORRIENTE A VOLTAJE

Para usar un amplificador operacional (OPAMP) como amplificador inversor simple, se debe conectar como se



muestra en la figura anexa: se puede distinguir que hay una fuente de señal externa conectada hacia la terminal (-) mediante una resistencia R2; mientras que la otra terminal de entrada (+) está conectada directamente al nivel de tierra. Finalmente, existe una segunda resistencia R1 conectada entre la terminal de salida y la terminal de entrada negativa.

Si la señal de entrada presenta un valor cualquiera, comienza a presentarse un fenómeno interesante: se debe recordar que el amplificador siempre intenta mantener sus terminales de entrada en el mismo nivel de voltaje, y como la terminal (+) está conectada a tierra, la terminal (-) también tratará de mantener ese valor; esto significa que a través de la resistencia R2 circulará una corriente igual a $V_{IN}/R2$. Pero aquí hay que recordar algo: también se mencionó que en las terminales de entrada del amplificador no podía entrar ninguna corriente, pues su resistencia interna es casi infinita. Entonces, si por R2 está circulando una corriente, pero ésta no puede entrar al dispositivo, el único camino que le queda por tomar es a través de R1; y por tanto, el amplificador produce en su salida un voltaje lo suficientemente alto como para que a través de R1 circule una corriente idéntica a la que circula por R2. De aquí se desprende una fórmula:

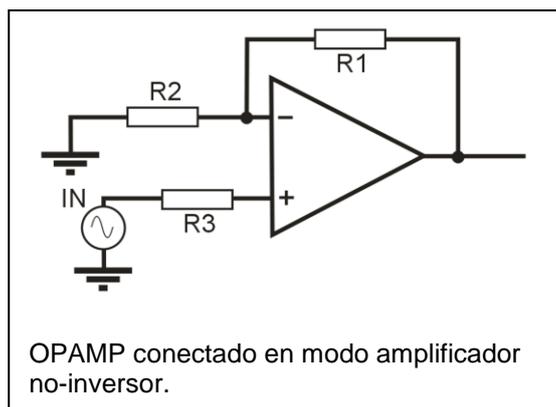
$$\text{Si } I_{R2} = V_{IN}/R2 \quad I_{R1} = V_{OUT}/R1 \quad \text{y} \quad I_{R1} = -I_{R2}$$

$$\text{Entonces, } V_{IN}/R2 = -V_{OUT}/R1 \quad \text{y por tanto } V_{OUT} = -V_{IN} (R1/R2)$$

Lo que significa que si se calculan cuidadosamente los valores de R2 y R1, se puede obtener el grado de amplificación deseado; por ejemplo, si se coloca una R1=10K y R2=1K, se tendrá un amplificador inversor con una ganancia de 10, lo que significa que a la salida del chip se tendrá la misma señal de entrada, pero amplificada diez veces e invertida. Es por esta razón

que a esta configuración se le denomina “amplificador inversor”.

Por supuesto que ésta no es la única forma de conectar un OPAMP. Si la aplicación requiere cierto grado de amplificación, pero



no se desea que la señal salga invertida, entonces se puede conectar el dispositivo como se muestra en la figura anexa: se puede ver que ahora la señal de entrada se inyecta directamente a la terminal (+) del OPAMP, mientras que la terminal (-) está conectada hacia el nivel de tierra a través de una resistencia R2; y todavía se tiene la resistencia R1 entre la salida y la terminal (-). Para calcular cómo trabaja esta conexión, se debe recordar que ambas terminales de entrada tratan de estar al mismo nivel de voltaje, y que la corriente que puede entrar a esas terminales es igual a cero.

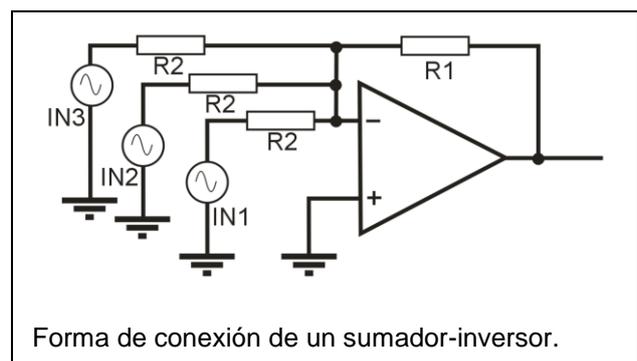
Si la señal de entrada toma un cierto valor V_{IN} , por lo que se indicó anteriormente, este valor también tiene que aparecer en la terminal (-) del OPAMP; para lograrlo, el chip produce en su terminal de salida un voltaje suficiente como para que a través de R1 y R2 circule una corriente tal que, al hacer el divisor de corriente entre R1 y R2, el voltaje en la terminal (-) sea idéntico al de la terminal (+). Conociendo las fórmulas del divisor de corriente, se tiene que:

$$\text{Si } V_{IN} = V_{OUT} [R1/(R1+R2)] \text{ entonces, } V_{OUT} = V_{IN} [(R1+R2)/R2]$$

$$\text{Finalmente, } V_{OUT} = V_{IN} [(R1/R2) + 1]$$

Es obvio entonces que, en este caso, la salida del OPAMP será idéntica a la entrada, pero amplificada por un factor que depende del valor de las resistencias R1 y R2, y tendrá la misma polaridad que la señal original. Por indicar valores, si nuevamente $R1=10K$ y $R2=1K$, entonces la salida será igual a la entrada multiplicada por un factor de 11, y sin que salga invertida. Por esta razón, a esta conexión se le llama “amplificador no-inversor”.

Existe otra forma de conectar un OPAMP, que se utiliza especialmente cuando existen varias señales de entrada, y se desean combinar en una salida única. En tal caso, lo mejor es conectarlas como se muestra en la figura anexa: se puede



distinguir que hay tres señales de entrada conectadas hacia la terminal (-) del OPAMP, todas a través de sendas resistencias R2. También se tiene la resistencia R1 de realimentación entre la salida y la terminal (-); y finalmente, la terminal (+) está conectada a tierra. En este caso, cada generador de señal de entrada producirá una corriente a través de su resistencia respectiva, por lo que a la entrada (-) del OPAMP llegará lo siguiente:

$$I_{\text{total}} = V_{\text{IN1}}/R2 + V_{\text{IN2}}/R2 + V_{\text{IN3}}/R2 = (V_{\text{IN1}}+V_{\text{IN2}}+V_{\text{IN3}})/R2$$

Pero ya se indicó que esta corriente no puede entrar al OPAMP por la terminal (-), así que para compensarla, la salida del chip toma un valor tal que iguale a esta corriente, pero en sentido contrario; por tanto:

$$V_{\text{OUT}}/R1 = -I_{\text{total}} \quad \text{entonces, } V_{\text{OUT}} = -(V_{\text{IN1}}+V_{\text{IN2}}+V_{\text{IN3}})(R1/R2)$$

Lo que significa que a la salida del chip se tendrá el equivalente a la suma de las tres entradas, multiplicadas por un factor que depende del valor de R1 y R2, e invertida. Por indicar algunos valores como ejemplo, si R1=10K y R2=1K, entonces a la salida de este circuito se tendrá un voltaje equivalente a la suma de IN1+IN2+IN3, multiplicado por un factor de 10, e invertido. Claro que este circuito se puede extender más, para que en lugar de tres entradas se tengan cuatro, cinco o más; en todos los casos, la salida del mismo será la suma de todas ellas multiplicadas por el factor de amplificación. Por esta razón, a este circuito se le llama “sumador-inversor”.

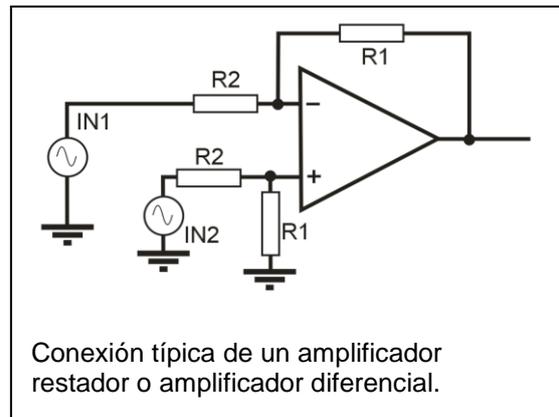
Se debe aclarar otro aspecto de este circuito: no siempre es forzoso que todas las resistencias de entrada sean iguales, se pueden utilizar valores distintos, con lo que se conseguiría un circuito que sumara los valores de las “N” entradas, dándoles al mismo tiempo una amplificación distinta a cada una de ellas; sin embargo, en casi todas las aplicaciones normales, se mantienen los mismos valores en las resistencias de entrada, para que el chip funcione únicamente como sumador con un factor de amplificación único para todas las señales de entrada.



¿En dónde se usa un sumador-inversor? Un caso típico es en los equipos de audio que poseen ecualizador; en ellos, para poder modificar el grado de amplificación de ciertas frecuencias, se toma la señal total y se divide en una

serie de filtros paso-banda, que permiten subir o bajar la ganancia en una banda de frecuencia específica; pero una vez hecho el ajuste, es necesario reunir nuevamente todas las señales de todas las bandas, y para tal efecto se usa precisamente una configuración sumadora como la que se explicó.

Sin embargo, hay ocasiones en las que lo que se desea no es sumar señales, sino restarlas; esto es, obtener la diferencia existente entre dos señales; para ello, se ha diseñado una configuración especial denominada “amplificador diferencial”, la cual se muestra en



la figura anexa. Se puede distinguir que en este caso, hay entradas en ambas entradas del OPAMP; ambas a través de sendas resistencias R2. En el caso de la terminal (-), se tiene una resistencia R1 de realimentación entre esta terminal y la salida, y para la entrada (+), se tiene un divisor de voltaje entre R1 y R2. Al hacer una serie de operaciones, se tiene que en la terminal (+) se tendrá:

$$V_{(+)} = V_{IN2} \left(\frac{R2}{R1+R2} \right)$$

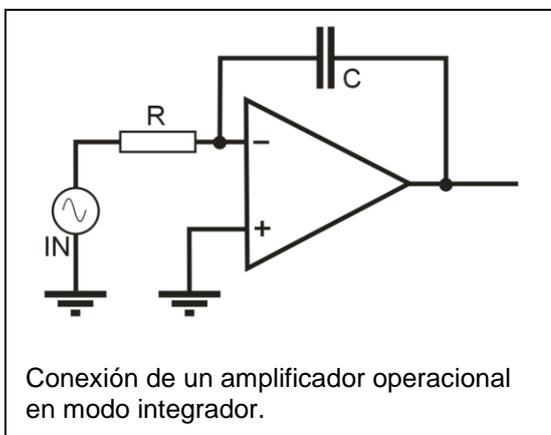
Y como por propiedades del operacional, este voltaje también aparece en la terminal (-), se tiene que a través de R2(-) estará circulando una corriente de:

$$I_{IN1} = \frac{V_{IN1} - V_{IN2} \left(\frac{R2}{R1+R2} \right)}{R2}$$

Pero hay que recordar que a la terminal (-) no puede entrar ninguna corriente, así que para compensar, el OPAMP produce a su salida un voltaje tal que haga circular a través de la R1 de realimentación una corriente igual a la anterior, pero en sentido contrario. Al despejar junto a la fórmula anterior, se llega al resultado final de:

$$V_o = (V_{IN2} - V_{IN1}) \left(\frac{R1}{R2} \right)$$

Por lo que resulta obvio que en esta configuración, a la salida del OPAMP se obtendrá la diferencia entre las señales V_{IN2} y V_{IN1} , amplificada por un factor que depende de los valores de R1 y R2. Es muy importante distinguir que para que esta fórmula se cumpla, el circuito debe estar justo como se mostró anteriormente, con valores iguales de resistencias para las dos R1 y para las dos R2; si se ponen valores distintos, la configuración no funcionará adecuadamente.



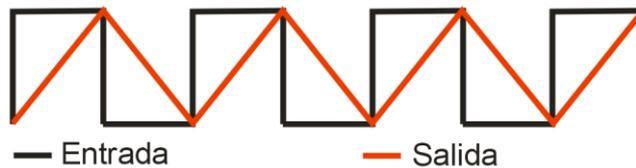
Hasta ahora se han expuesto distintas configuraciones de amplificadores operacionales en las cuales su función está dada por una combinación de resistencias; pero ¿qué sucedería si se introduce un elemento distinto, por ejemplo, un condensador? En la figura anexa se

muestra una conexión especial de un OPAMP, donde la resistencia de realimentación entre la salida y la terminal (-) se ha sustituido por un capacitor. En este caso, se tiene una situación muy particular, ya que al aparecer una señal V_{IN} , a través de R trata de circular una corriente igual a V_{IN}/R ; pero como esta corriente no puede entrar en la terminal (-), el OPAMP expide a su salida un voltaje tal que haga circular a través del capacitor una corriente igual pero en sentido opuesto. Debido a las propiedades particulares de los capacitores, el voltaje a la salida del OPAMP tendrá que

ser variable aunque la entrada V_{IN} sea constante, ya que al irse cargando o descargando, el capacitor precisa de un voltaje variable para que por él circule una corriente constante. El despeje de fórmulas en este caso es muy complejo, pero el resultado final es el siguiente:

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta t} = \frac{-V_{IN}}{R \cdot C}$$

Donde la letra griega delta (Δ) sirve para indicar un diferencial; por lo que la fórmula se lee: el diferencial del voltaje de salida dividido entre el diferencial de tiempo es igual al inverso del voltaje de entrada, dividido entre el producto de R y C. Pero ¿qué significa “el diferencial”? En la figura siguiente se observa de forma gráfica cómo sería una entrada y su respectiva salida para esta configuración:

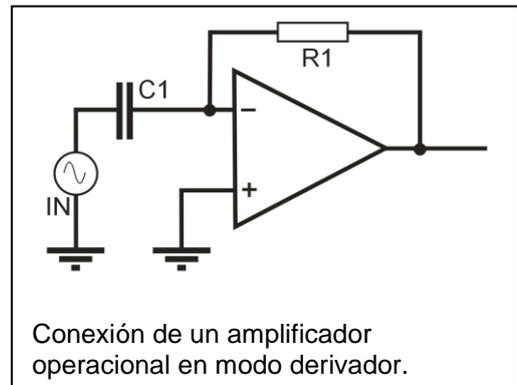


De donde se desprende que la salida del OPAMP será la integral de la señal de entrada; de ahí que a esta conexión se le llame “amplificador integrador”.

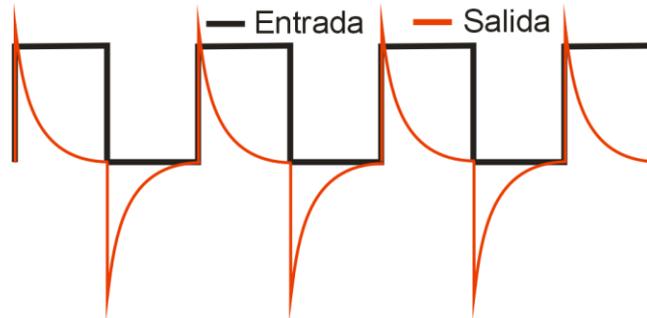
Si ahora se desplaza el condensador a la entrada del OPAMP, de modo que se tenga una configuración como la que se muestra en la figura anexa, se tiene en este caso que la corriente que trata de circular a través de C está dada por la integral de V_{IN} , lo que implica que el OPAMP expedirá a su salida un voltaje tal que trate de compensar esta corriente, pero en sentido contrario. El cálculo matemático es algo complejo, pero el resultado final es el siguiente:

$$V_o = \frac{-\Delta V_{IN} RC}{\Delta t}$$

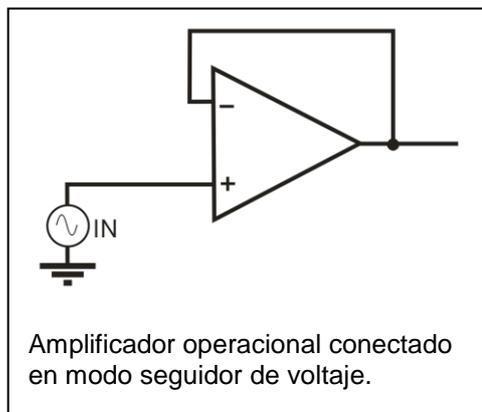
Lo que representa el comportamiento de un derivador (la operación contraria a la integral), por lo que se trata de un “amplificador derivador”. Al



graficar una señal de entrada contra la salida (como en el caso anterior), se obtendría algo como lo siguiente:



Existe otra configuración muy usual, que se utiliza sobre todo cuando hay necesidad de tomar una señal de un dispositivo que puede proporcionar

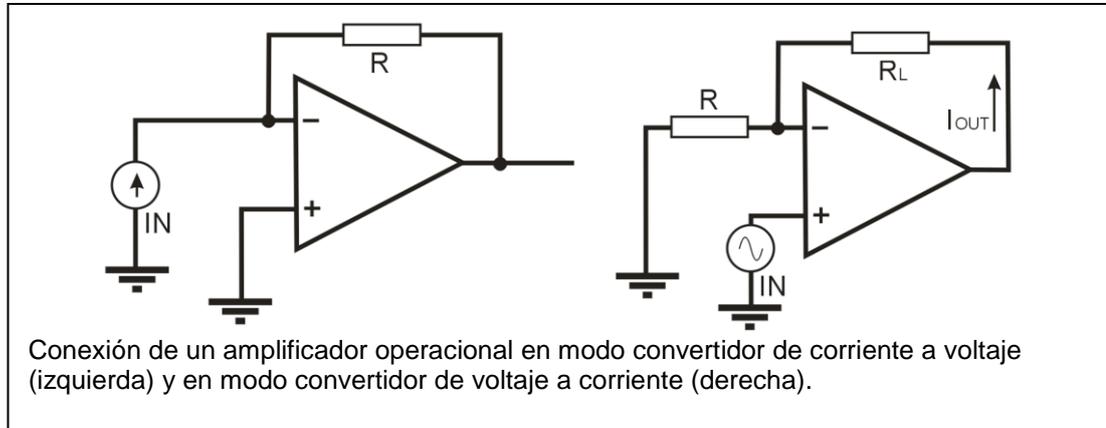


un voltaje de salida, pero que prácticamente no puede proporcionar corriente; en tal caso, antes incluso de tratar de amplificar la señal, es conveniente colocar un bloque que reciba el voltaje de entrada, y lo expida a su salida sin ningún cambio, pero ya con la posibilidad de proporcionar la corriente

adecuada para su posterior manejo. A esta configuración se le llama “seguidor de voltaje”, y se arma como se muestra en la figura anexa: es obvio que la señal de entrada está llegando directamente a la entrada (+) del OPAMP, y que hay una realimentación directa entre la salida y la terminal (-). Por propiedades del OPAMP, el mismo voltaje que hay a la entrada (+) debe aparecer en la entrada (-), y por tanto, el OPAMP expide por su salida un voltaje idéntico al que está llegando a la terminal (+), con la diferencia de que esta salida sí puede proporcionar una corriente considerable a circuitos posteriores.

Finalmente, hay otras dos configuraciones en las que todavía se considera que el OPAMP está trabajando de forma lineal: la primera es un convertidor de corriente a voltaje, el cual se arma como se muestra en la figura anexa. Se puede ver que la fuente de corriente de entrada llega directamente hacia la terminal (-) del OPAMP, pero como a través de esta terminal no puede entrar nada de corriente, entonces el OPAMP produce a

su salida un voltaje tal que contrarreste a la corriente de entrada. Esto significa que expedirá un voltaje que, al dividirse entre el valor de la resistencia de realimentación, sea idéntica a la corriente de entrada, pero en sentido inverso.



Si ahora se tiene una fuente de voltaje como entrada, y se desea convertir en una corriente de salida, hay que conectar al OPAMP como se muestra en la figura anexa: se puede ver que la fuente de voltaje se conecta directamente a la terminal (+) del OPAMP, y por propiedades del mismo, este mismo voltaje aparece en la terminal (-), lo que significa que a través de R_2 estará circulando una corriente igual a V_{IN}/R_2 ; pero como esta corriente no puede ni entrar ni salir de la terminal (-) del chip, entonces la salida del mismo produce un voltaje tal para que a través de R_L (que es la carga del circuito) circule una corriente idéntica a la anterior, con lo que se consigue la conversión de voltaje a corriente.

Estas son las principales formas de conectar un OPAMP para que se comporte de manera lineal; sin embargo, existen otras configuraciones en las que ya no se busca una respuesta de este tipo. A continuación se describirán algunas configuraciones de OPAMP trabajando en modo no-lineal.

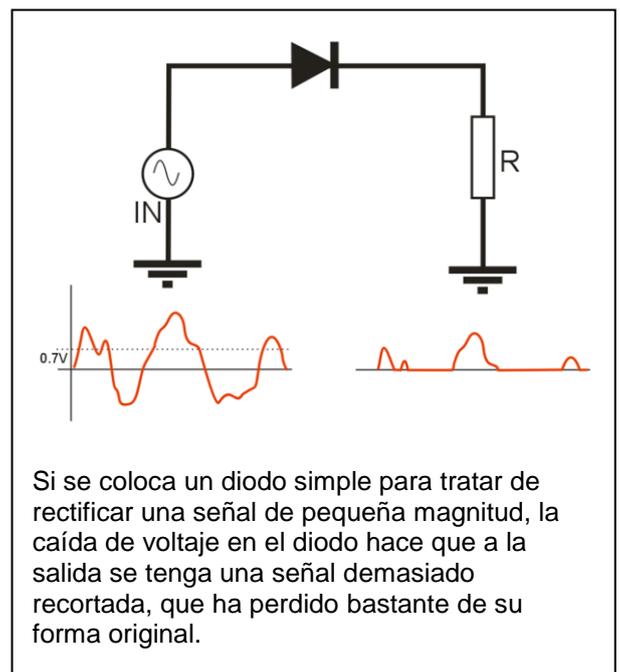
ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE 6B

1. Dibuja la forma de conectar un amplificador operacional como amplificador inversor simple:
2. ¿Cómo se calcula el grado de amplificación en esta conexión?

3. Dibuja la conexión de un OPAMP en modo amplificador no inversor.
4. ¿Cuál es la fórmula para calcular el grado de amplificación en esta conexión?
5. Dibuja la conexión de un OPAMP en modo sumador-inversor:
6. Escribe la fórmula que muestra el comportamiento de esta conexión:
7. Dibuja la conexión de un OPAMP en modo amplificador diferencial:
8. Escribe la fórmula que muestra el comportamiento de esta conexión:
9. Dibuja cómo conectar un OPAMP para que funcione como integrador y como derivador.
10. Dibuja cómo conectar un OPAMP en modo convertidor corriente a voltaje y voltaje a corriente:

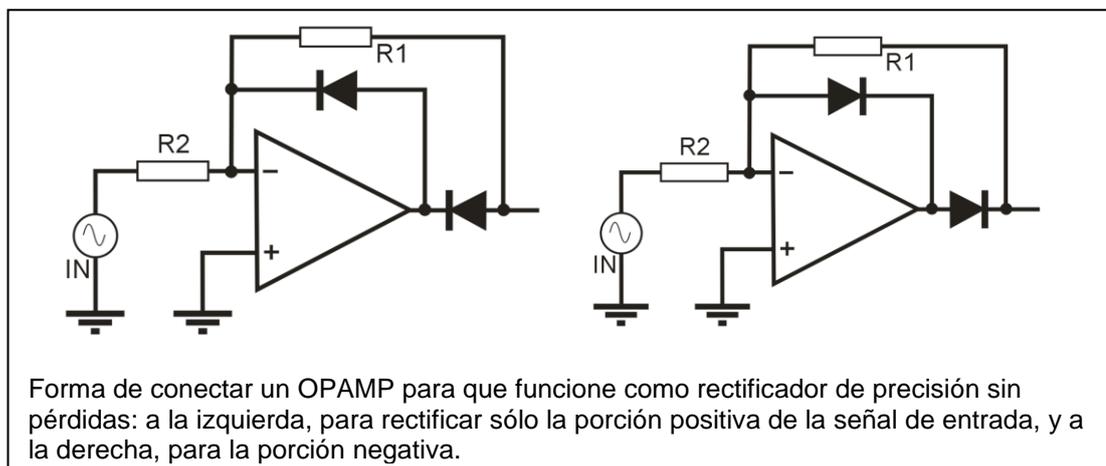
6.3. ANÁLISIS DE CIRCUITOS NO LINEALES: EL RECTIFICADOR DE PRECISIÓN, COMPARADORES Y AMPLIFICADORES LOGARÍTMICOS

Existen gran cantidad de aplicaciones de los amplificadores operacionales en las cuales no es necesario trabajar de forma lineal, esto es, no es indispensable que la entrada y la salida tengan la misma forma o alguna función de la misma. De hecho, hay ocasiones en las que se requiere que la salida del OPAMP sea completamente distinta de la señal de origen, ya que el objetivo del circuito es detectar alguna característica particular de la señal, y activarse de alguna forma sólo cuando esa característica se cumpla. A continuación se describirán algunas de estas configuraciones, que se utilizan ampliamente en diversos circuitos electrónicos.



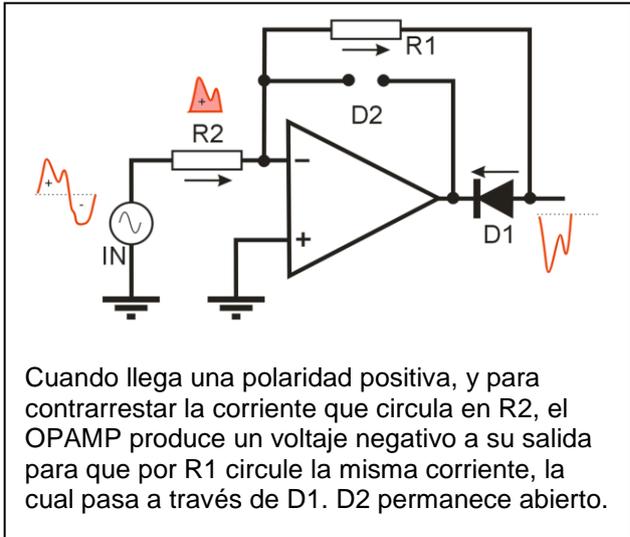
Primero, se puede considerar un escenario como el siguiente: se tiene una fuente de señal muy pequeña, pero sólo importa su parte positiva. En condiciones normales, si la señal fuera lo suficientemente grande, se podría colocar simplemente un diodo rectificador, que deje pasar la señal cuando tiene la polaridad deseada, y la bloquee cuando ésta se invierta; pero al recordar el comportamiento de un diodo, resulta que éste tiene un voltaje de polarización que no se puede despreciar en señales pequeñas, ya que presenta una caída de voltaje de alrededor de 0.3V para diodos de germanio, y de 0.7V para diodos de silicio. Si la señal de entrada es muy pequeña, habrá grandes porciones de la señal que se perderán a causa de este voltaje de polarización, lo cual obviamente no resulta adecuado.

Para evitar esta pérdida de información, se han diseñado rectificadores de precisión, capaces de recortar una señal para que sólo aparezca la polaridad deseada, pero sin ninguna pérdida debida a la caída de voltaje en el diodo rectificador. En la figura anexa se puede ver esta configuración; se observa que en realidad son dos casos, un rectificador para la porción positiva de la señal y otro distinto para la porción negativa. Se tomará como base el primer caso, ya que el segundo se comporta exactamente igual, pero con polaridades inversas.



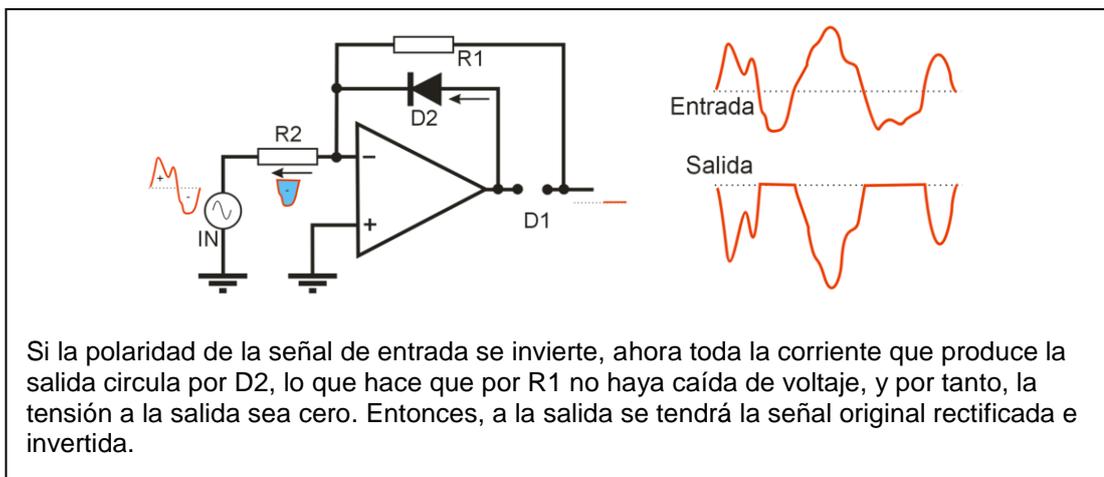
Para mayor claridad, se simulará una señal genérica a la entrada, para analizar qué sucede cuando ésta tiene polaridad positiva, y cuando esta polaridad se invierte. En el primer caso, es obvio que, debido a la propiedad de un OPAMP de que sus terminales de entrada siempre tratan de mantener un mismo valor de voltaje, y debido a que la terminal (+) está conectada a tierra, esto significa que a través de R2 estará circulando una corriente igual

a V_{IN}/R_2 ; pero ya se indicó que esta corriente no puede entrar al integrado, así que para compensar, la salida del mismo produce un voltaje tal que pueda absorber esa corriente, haciéndola pasar por R_1 y por D_1 . Esto significa que en el ánodo de D_1 se tendrá un voltaje igual a $-V_{IN}(R_1/R_2)$; y haciendo $R_1=R_2$, se tendrá que $V_{OUT} = -$



V_{IN} . Por D_2 no circula nada debido a que está polarizado en inversa, así que para fines prácticos se comporta como un circuito abierto.

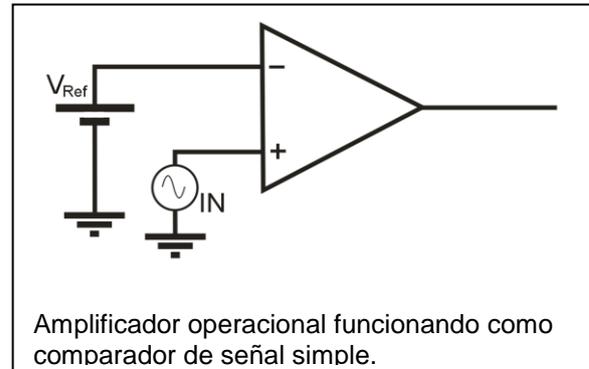
Si ahora se invierte la polaridad de la señal de entrada, en tal caso, la corriente que circula por R_2 también se invierte; como esta corriente no puede salir de la terminal (-), entonces la salida del OPAMP produce un voltaje tal que compense a esa corriente, y la hace pasar a través de D_2 . En este caso, D_1 estará polarizado en inversa, así que para fines prácticos se comportará como un circuito abierto. Como por R_1 no está circulando ninguna corriente, y como en la terminal (-) se tiene el mismo nivel de tierra que en la terminal (+), entonces en el ánodo de D_1 se tendrá un valor de voltaje igual a cero.



Por tanto, se tiene exactamente el comportamiento deseado: cuando la señal tiene una cierta polaridad, el circuito la deja pasar amplificada e invertida (aunque la amplificación es opcional), pero cuando toma la

polaridad opuesta, la bloquea por completo. Debido a que no hay pérdida debido a la caída de voltaje en los diodos, a esta configuración se le llama “rectificador de precisión”.

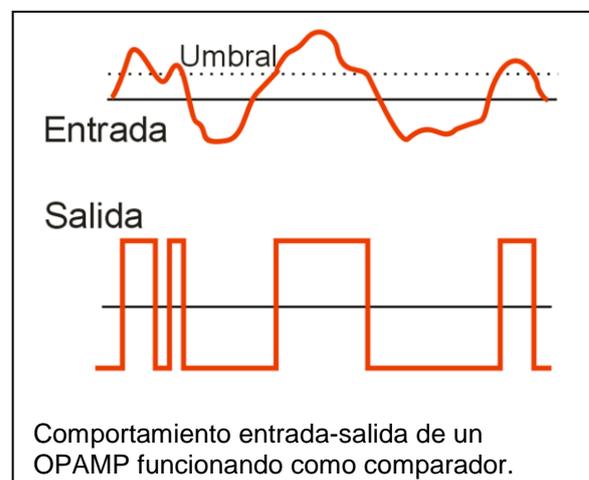
Otro uso muy común de los amplificadores operacionales es como comparadores de señal; en esta aplicación, el OPAMP aprovecha su capacidad de amplificación casi infinita para que, cuando la señal de entrada cruce por un cierto voltaje de umbral establecido, la salida reaccione de inmediato tomando uno de dos valores: un “alto” o un “bajo”, indicando con ello si la señal de entrada es mayor o menor que el voltaje de umbral.



Para que funcione de esta forma, hay que conectar al OPAMP como se muestra en la figura anexa: se puede apreciar que en realidad aquí la conexión es muy sencilla: a la terminal (+) llega directamente la señal de entrada, a la terminal (-) se conecta un voltaje de referencia fijo, y se tiene una salida independiente de ambas entradas, esto es, no hay realimentación entre la salida y las entradas.

Su forma de trabajo es la siguiente: Si se tiene una señal de entrada como la mostrada en la figura anterior, y un voltaje de umbral como el marcado en la misma figura, se puede ver que, mientras la señal esté por debajo del valor del voltaje de umbral, y debido a que el OPAMP tiene una amplificación interna muy alta, la salida permanecerá en el voltaje de saturación negativo, esto es, muy cercano al de su voltaje V_{EE} de alimentación.

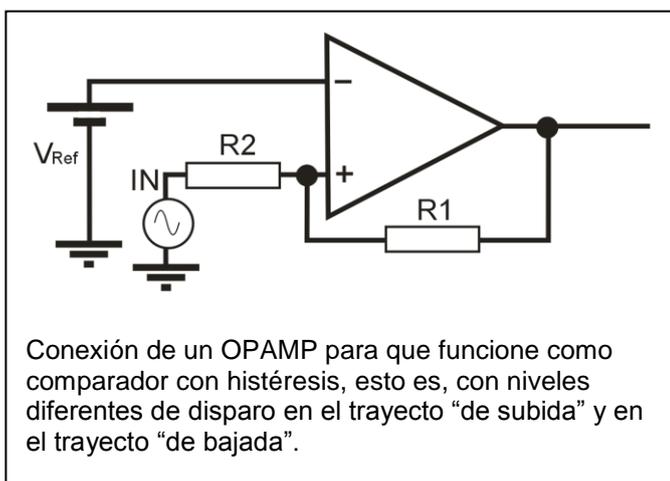
Cuando la señal de entrada cruza por el voltaje de umbral, nuevamente el OPAMP trata de amplificar esta diferencia de voltajes, pero al tener un valor casi



infinito de amplificación, esto significa que la salida toma el otro nivel de saturación posible, esto es, muy cercano al voltaje V_{CC} . Por tanto, la salida del circuito será como la mostrada en la figura anterior: una señal que sólo toma dos valores: V_{EE} o V_{CC} , dependiendo si la señal de entrada es mayor o menor que el voltaje de umbral. Claro que también se podrían conectar las entradas invertidas, esto es, la señal a la terminal (-) y el voltaje de umbral a la terminal (+), en cuyo caso el comportamiento sería el mismo, sólo que cuando la señal de entrada fuera superior al umbral, entonces la salida se iría a un nivel bajo, y viceversa; esto es el comportamiento contrario al descrito en el caso anterior. Por la característica que tiene este circuito de estar comparando las dos señales de entrada, e indicar a la salida cuál de ellas es mayor o menor, a esta configuración se le denomina “comparador de señal”.

Este tipo de conexión tiene innumerables aplicaciones en la electrónica moderna; un buen ejemplo de ello son los dispositivos automáticos que funcionan una vez que se alcanzan ciertas condiciones; por ejemplo, el sistema de enfriamiento de una habitación, que cuando la temperatura ambiente alcanza un valor predeterminado, se activa el acondicionador de aire, reduciendo la temperatura ambiente, cruzando nuevamente el umbral “hacia abajo”, y apagando de forma automática el enfriador cuando la habitación ya está a una temperatura adecuada.

Pero aquí hay un inconveniente de este circuito: si la temperatura del cuarto sube apenas una fracción de grado por encima del umbral, el enfriador de aire se enciende, lo que obliga a que la temperatura baje, y

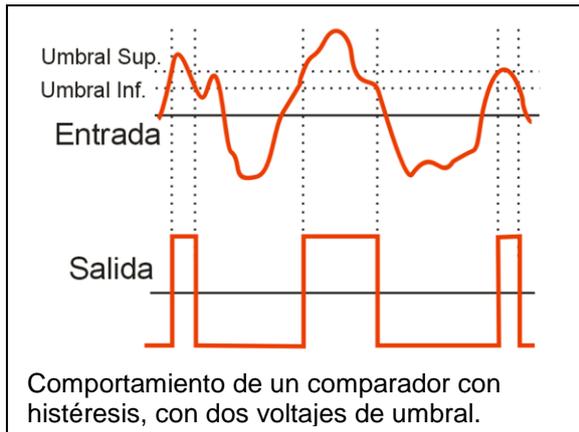


cuando la señal del termómetro cruce el umbral hacia abajo, el enfriador se apaga. Esto significa que el acondicionador de aire se estará encendiendo y apagando constantemente haciendo oscilar la temperatura alrededor del

umbral, lo cual resulta muy poco eficiente.

Para evitar este problema, se ha diseñado una conexión alternativa, donde el nivel de umbral se afecta por el estado de la salida del comparador: en la figura anexa se ve este tipo de conexión, en el cual como se aprecia, se tiene una resistencia de realimentación entre la salida y la entrada de señal, y una resistencia entre la fuente de señal y la entrada (+) del OPAMP. Conectando así el chip, se crea un fenómeno interesante: la entrada se ve influida por el valor de la salida

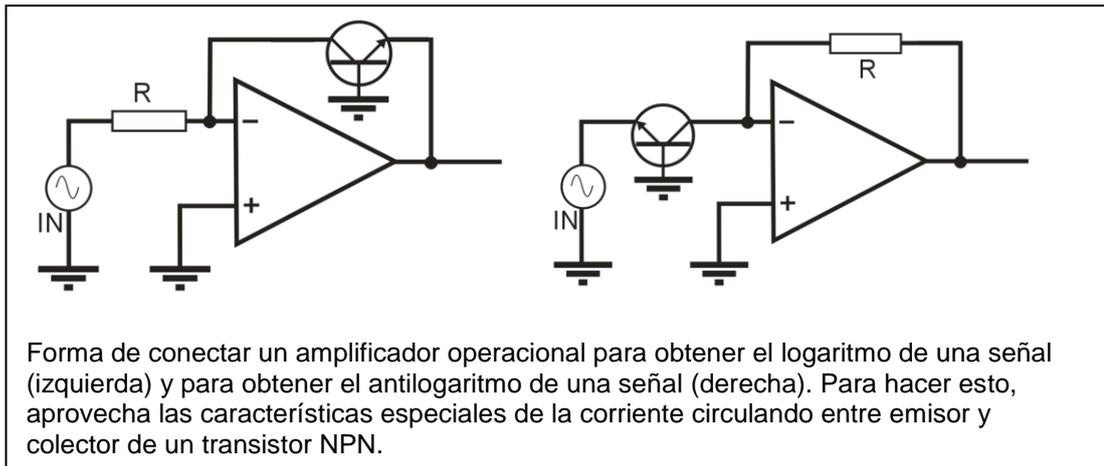
del amplificador, lo que hace que en lugar de que haya un umbral fijo, en realidad se tenga un umbral superior y otro inferior, el cual está ligeramente arriba y abajo del valor del voltaje de referencia, determinando el grado de desviación los valores



de R1 y R2: si R1 es muy grande y R2 es pequeño, el grado de desviación es muy pequeño, y empieza a ampliarse conforme crece R2.

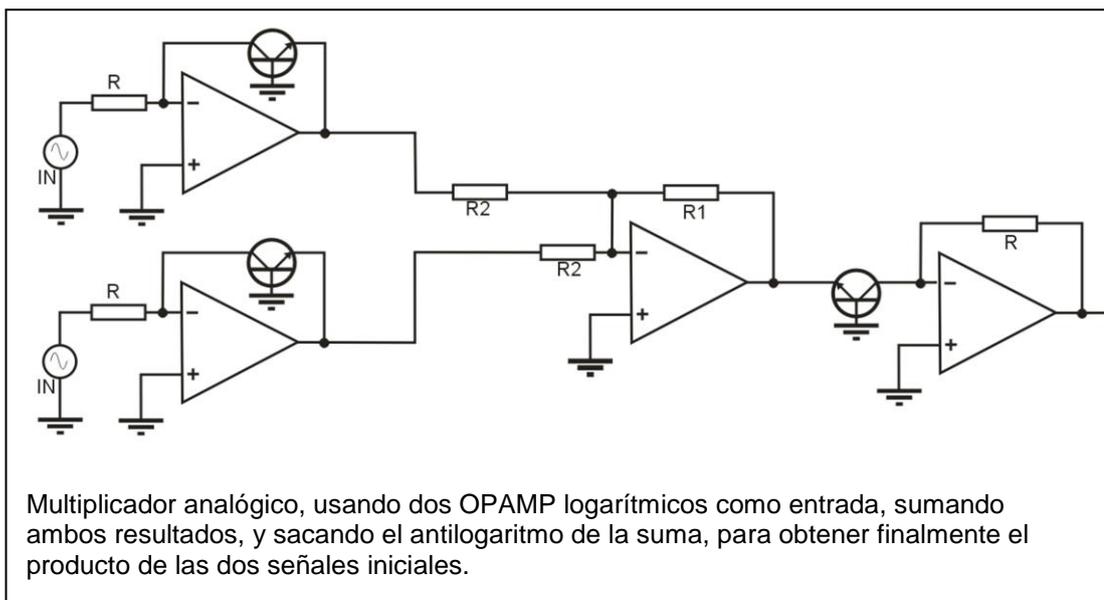
En este caso, cuando la señal de entrada supera al umbral en la terminal (+), la salida del OPAM pasa a su valor V_{EE} , modificando el voltaje de umbral a un nivel menor, con lo que la señal de entrada requiere bajar mucho más que en el caso anterior, hasta alcanzar el nuevo umbral inferior, lo que hará que nuevamente la salida conmute y pase a valor V_{CC} . A este tipo de arreglo se le llama “comparador con histéresis”, y es el más empleado en sistemas de control modernos.

Otra configuración que se llega a encontrar en algunas aplicaciones electrónicas, es el amplificador logarítmico, el cual, como su nombre lo indica, produce a su salida el equivalente logarítmico de la señal de entrada. Para construirlo, se aprovechan las propiedades de los transistores NPN, cuya corriente de colector a emisor se comporta aproximadamente como una función logarítmica, lo que significa que si se conecta un OPAMP como se muestra en la figura anexa, se obtendrá el efecto deseado.



Claro que si se puede sacar un logaritmo colocando un transistor de realimentación en el OPAMP, también se podría obtener el antilogaritmo colocando el transistor a la entrada del mismo, como se muestra en la figura anterior. Por lo general, estas dos configuraciones complementarias se utilizan al mismo tiempo, y la razón de esto es muy sencilla.

Recordando los cursos de matemáticas, se sabe que cuando se quieren multiplicar dos números muy grandes, la forma más sencilla de hacerlo, antes de la invención de las calculadoras electrónicas, era sacando el logaritmo del primero, sacando el logaritmo del segundo, sumar ambos resultados, y luego encontrar el antilogaritmo de este último, para obtener el resultado de la multiplicación.



En electrónica analógica, hay ocasiones en las que es necesario obtener el producto de dos señales, y la forma más sencilla de hacerlo es precisamente aplicar dos operacionales logarítmicos a la entrada, sumarlas por medio de un OPAMP sumador, y el resultado aplicarlo a un OPAMP antilogarítmico, para tener como resultado final el producto de ambas señales. El circuito final se vería como se muestra en la figura anterior.

De todo lo anterior, es obvia la razón por la cual se le dio el nombre de “amplificador operacional” a este circuito integrado: después de todo, es posible realizar con él diversas operaciones con dos o más señales de entrada, como suma, resta, multiplicación, inversión, etc. Los OPAMP son de los circuitos más usados en el mundo de la electrónica, así que una buena comprensión de cómo funcionan y qué se puede hacer con ellos, resulta fundamental.

ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE 6C

1. ¿Por qué no conviene colocar un diodo simple para rectificar una señal de baja intensidad?
2. Dibuja la forma de conectar un OPAMP en modo rectificador de precisión para la porción positiva de la señal de entrada:
3. ¿Se puede amplificar la señal al mismo tiempo que se rectifica?
4. Dibuja la forma de conectar un OPAMP en modo comparador de señal:
5. ¿Por qué en ocasiones no conviene tener un voltaje de umbral fijo?
6. Dibuja la forma de conectar un OPAMP en modo comparador con histéresis:
7. ¿De qué dependen los valores de umbral superior e inferior?
8. Dibuja la forma de conectar un OPAM para obtener el logaritmo y el antilogaritmo de una señal:
9. ¿Cómo pueden aprovecharse estas configuraciones?

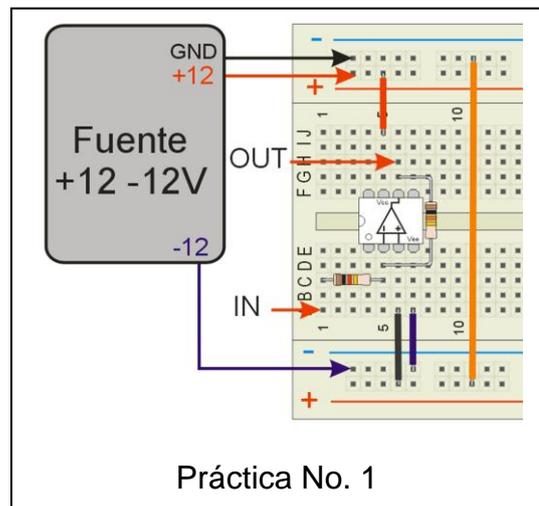
ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE

1. Descarga de Internet la hoja de datos completa de un amplificador operacional tipo LM741 (puede ser también el uA741, el MC1741, el

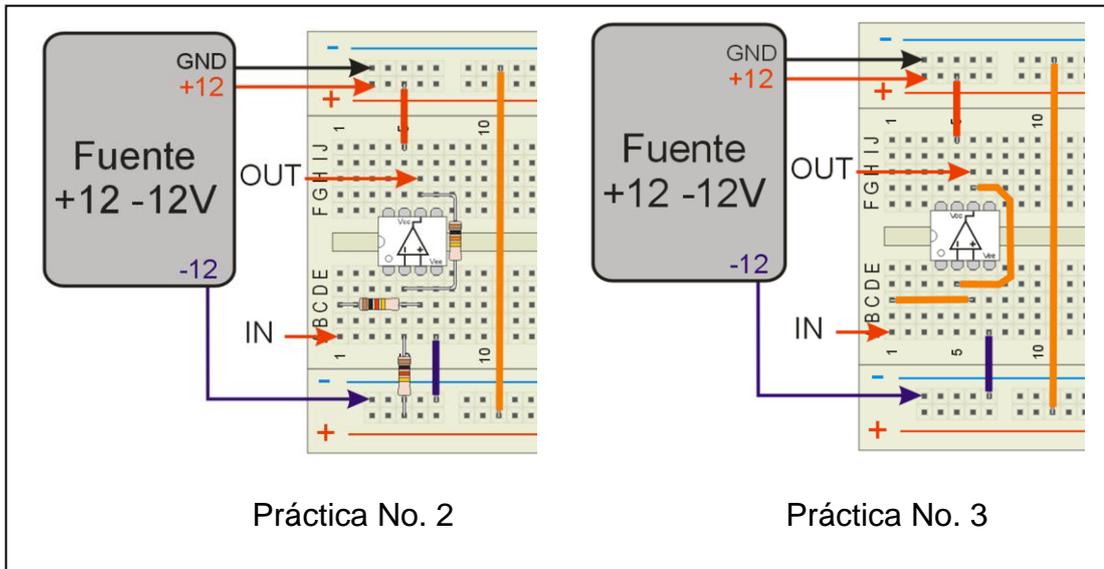
NE741, etcétera); para que consultes sus datos de operación. Trata de localizar los siguientes parámetros:

- Voltaje máximo de alimentación, tanto positivo como negativo.
 - Voltaje máximo que se puede aplicar entre terminales de entrada (+) y (-).
 - Frecuencia máxima de operación.
 - Disposición de terminales.
2. Adquiere en una tienda de partes electrónicas un amplificador operacional LM741 para hacer experimentos con él. Adquiere también dos resistencias de 1K y una de 10K, todas a $\frac{1}{4}W$.

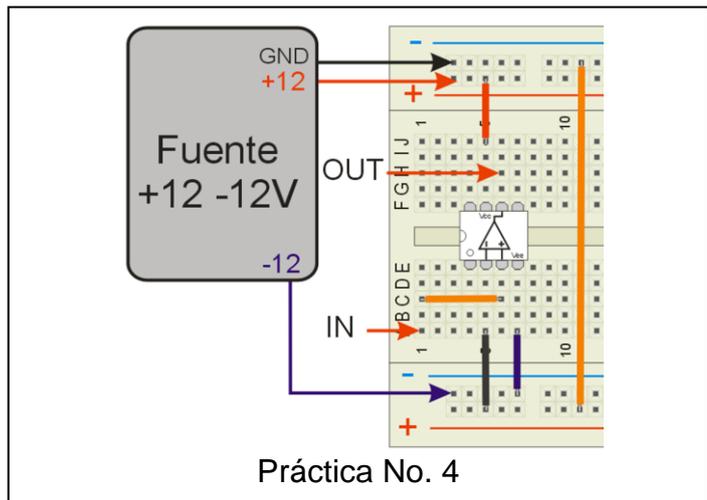
3. Usando una tablilla protoboard, conecta el amplificador como se muestra en la figura anexa. Si cuentas con laboratorio de electrónica, aplica a la entrada una señal pequeña (aproximadamente 100mVp-p), y comprueba con el osciloscopio que a la salida se tiene la misma señal, pero amplificada 10 veces e invertida.



4. Ahora arma lo que se muestra en la figura anexa (práctica 2) y aplica nuevamente la misma señal; notarás que ahora la señal está ligeramente más amplificada que en el caso anterior (un factor de 11), y que no está invertida.
5. Configura ahora el amplificador como un seguidor de voltaje (práctica 3), y comprueba qué relación tienen la entrada y la salida en este caso.



6. Para comprobar el uso del OPAMP como comparador, arma lo que se muestra en la figura anexa, y aplica como entrada una señal senoidal. Comprueba qué relación hay entre la entrada y la salida.



AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Por qué se necesita un bloque amplificador en electrónica?
2. ¿Cuál es el símbolo de un amplificador operacional?
3. Menciona las características más importantes de un amplificador operacional ideal:
4. ¿Cuál es la fórmula que relaciona entrada y salida en un OPAMP conectado en modo amplificador-inversor?
5. ¿Cuál es la fórmula que relaciona entradas contra salida en un OPAMP conectado en modo sumador-inversor?
6. ¿Cuál es la característica principal de un seguidor de voltaje?
7. ¿Por qué se necesita un OPAMP para rectificar adecuadamente señales de muy baja amplitud?
8. ¿Cuál es el principal uso de un OPAMP conectado como comparador?
9. ¿Cuál es la característica especial de un OPAMP comparador con histéresis, y cómo se aprovecha?
10. Dibuja cómo conectar cuatro OPAMP para que funcionen como multiplicador de dos señales de entrada:

RESPUESTAS

1. Porque en electrónica frecuentemente existe la necesidad de amplificar una señal de entrada para darle mayor amplitud y/o potencia a la salida.
2. (Dibujo).
3. Las características son las siguientes:
 - La resistencia R_i debe ser lo más grande posible, tendiendo al infinito.
 - La resistencia R_o debe ser lo más pequeña posible, tendiendo a cero.
 - El grado de amplificación A_d debe ser lo más grande posible, tendiendo a infinito.
 - El amplificador tratará siempre de mantener a las terminales $In+$ e $In-$ al mismo potencial.
 - Como la resistencia R_i es casi infinita, la corriente que puede entrar en las terminales V_1 y V_2 es prácticamente igual a cero.
 - Como R_o es casi cero, el amplificador puede expedir una gran corriente de salida sin que haya caída en su voltaje.
4. $V_{OUT} = -V_{IN} (R_1/R_2)$
5. $V_{OUT} = -(V_{IN1} + V_{IN2} + V_{IN3})(R_1/R_2)$
6. Que a su salida presenta exactamente la misma señal que está entrando en su terminal (+), pero capaz de proporcionar mayor corriente de salida.
7. Porque un diodo simple crearía una caída de voltaje que eliminaría porciones importantes de la señal.

8. Detectar en qué momento una señal de entrada cruza por un cierto voltaje de referencia, el cual se toma como umbral.

9. El tener distintos voltajes de umbral para los casos en que la señal de entrada vaya en ascenso o en descenso, y se aprovecha para que detectar si la señal de entrada está dentro de un rango de valores.

10. (Dibujo).

RESPUESTAS A LAS ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE

Actividad de aprendizaje 6A:

1. Con transistores, diodos, resistencias y otros componentes, conectados de tal forma que puedan amplificar una señal de entrada para entregarla con amplitud y potencia mejorada a su salida.
2. $V(+)$, $V(-)$, entrada-(+), entrada-(-) y salida.
3. Muy alto, tendiendo a infinito.
4. Muy bajo, tendiendo a cero.
5. Muy alto, tendiendo a infinito.
6. No debe entrar corriente por ninguna de las terminales de entrada.
7. El OPAMP siempre trata de mantener ambos voltajes en el mismo valor.

Actividad de aprendizaje 6B:

1. (Dibujo)
2. $V_{OUT} = -V_{IN} (R1/R2)$
3. (Dibujo)
4. $V_{OUT} = V_{IN} [(R1/R2) + 1]$
5. (Dibujo)
6. $V_{OUT} = -(V_{IN1} + V_{IN2} + V_{IN3})(R1/R2)$
7. (Dibujo)
8. $V_{OUT} = (V_{IN2} - V_{IN1})(R1/R2)$
9. (Dibujo)
10. (Dibujo)

Actividad de aprendizaje 6C:

1. Porque la caída de voltaje del diodo hace que se pierda mucho de la señal que se quiere rectificar.
2. (Dibujo)
3. Sí, calculando los valores de R1 y R2.

4. (Dibujo)
5. Porque se podrían tener casos en los que un equipo se estuviera encendiendo y apagando constantemente, debido a que la señal de entrada está oscilando alrededor del voltaje de umbral.
6. (Dibujo)
7. Del valor del voltaje de referencia y de las resistencias R_1 y R_2 .
8. (Dibujo)
9. Se usan para obtener el producto de la multiplicación de dos señales análogas, sacando el logaritmo de las señales originales, sumándolos y obteniendo el antilogaritmo de la suma.