

PRACTICA 4

Uno de los dispositivos electrónicos de mayor versatilidad en aplicaciones lineales es el amplificador operacional, al cual se le llama especialmente en libros en inglés op amp. El amplificador operacional goza de gran popularidad porque su costo es bajo, es fácil de utilizar y divertido trabajar con él. Permite construir circuitos útiles sin necesidad de conocer la complejidad de la circuitería interna.

Los posibles errores de cableado no tienen consecuencias pues están provistos de circuitos internos para autoprotección.

George Philbrick es una de las personas a quienes se le atribuye la invención y difusión de los amplificadores operacionales. Trabajó primero en Huntington Engineering Labs. y luego en su propia compañía Philbrick Associates. Intervino en el diseño de un amplificador operacional con un sólo tubo de vacío y lo introdujo al mercado en 1948. Esos primeros amplificadores y las versiones posteriores mejoradas estaban destinadas fundamentalmente a emplearse en las computadoras analógicas. Por aquella época, la palabra "operacional" en estos dispositivos significaba operaciones matemáticas. Los primeros amplificadores operacionales servían para construir circuitos capaces de sumar, restar, multiplicar e incluso resolver ecuaciones diferenciales.

Las computadoras analógicas eran poco exactas: admitían un máximo de tres cifras significativas. De ahí que fueran reemplazadas por las computadoras digitales que son más rápidas, exactas y versátiles. Pero el advenimiento de la computadora digital no marcó la desaparición del amplificador operacional.

Entre los años 1964 y 1967 Fairchild desarrolló los amplificadores operacionales en circuitos integrados 702, 709 y 741, mientras que National Semiconductor introdujo 101/301. Estos amplificadores de circuito integrado revolucionaron algunas áreas de la electrónica por su tamaño pequeño y costo bajo. Más importante aún, redujeron drásticamente el trabajo de diseño de circuitos. Por ejemplo, en vez de la tediosa y difícil tarea de realizar un amplificador con transistores, los diseñadores podían servirse del amplificador operacional y unas cuantas resistencias para construir un excelente amplificador.

El tiempo para diseñar un amplificador con un amplificador operacional es de unos diez segundos. Es más, los amplificadores operacionales en circuitos integrados son baratos, ocupan menos espacio y requieren menos potencia que los componentes discretos. Los circuitos que pueden realizarse con uno o dos amplificadores operacionales y unos pocos componentes incluyen la generación de señal (osciladores), acondicionamiento de señales, temporizadores, detección de nivel de voltaje y la modulación. La lista podía extenderse casi al infinito.

A medida que la tecnología de fabricación adquirió mayor precisión se realizaron mejoras notables a los amplificadores operacionales en dos aspectos: primero, algunos transistores de unión (juntura) bipolar fueron sustituidos por transistores de efecto de campo. Los JFET, en la entrada del amplificador operacional toman corrientes muy pequeñas y permiten que los voltajes de entrada varíen entre los límites de la fuente de alimentación. Los transistores MOS o de semiconductor de óxido metálico, en los circuitos de salida permiten que la salida se aproxime a 1 mV de los límites de la fuente de poder.

El primer amplificador operacional BIFET, o de transistores de efecto de campo fue el LF356. El CA3130 tiene entradas bipolares y una salida MOS complementaria. De ahí su nombre tan apropiado: BIMOS. Estos amplificadores son más rápidos y presentan una respuesta mejor a altas frecuencias que el 741.

La segunda innovación fundamental fue la invención de los encapsulados de doble y cuádruple amplificador. En el mismo encapsulado de 14 terminales ocupado por un sólo amplificador operacional, los diseñadores fabrican cuatro individuales, los cuales comparten la misma fuente de poder. El LM324 es un ejemplo de este

tipo cuádruple y el LM358 es uno doble muy usado.

Llegó el ineludible momento en que los amplificadores operacionales de propósito general fueron rediseñados para optimizar o incorporar ciertas características. Los circuitos integrados de función especial que contiene más de un amplificador operacional se desarrollaron entonces para llevar a cabo funciones complejas.

Basta hojear los manuales de datos de amplificadores operacionales lineales para apreciar la gran variedad. Los siguientes son algunos ejemplos:

1. Capacidad de alta corriente, alto voltaje o ambos.
2. Módulos para sonar de emisión y recepción.
3. Amplificadores múltiples.
4. Amplificadores de ganancia programable.
5. Instrumentación y control automatizado.
6. Circuitos integrados para comunicaciones.
7. Circuitos integrados de radio/audio/video.

Los amplificadores de propósito general durarán muchos años en el mercado. Sin embargo, cabe suponer que se desarrollen circuitos integrados más complejos en un sólo chip que combine varios amplificadores con circuitos digitales. De hecho, con el advenimiento con la tecnología de integración a gran escala (VLSI) es inevitable que se fabriquen sistemas completos en un sólo chip.

Hoy es una realidad la computadora en un sólo circuito integrado. Con el tiempo se inventará también el televisor en un sólo chip. Antes de aprender a utilizar los amplificadores operacionales conviene saber como son y como comprarlos. Su aplicación más importante será como parte de un sistema que conecta el mundo real de voltaje analógico con el mundo digital de la computadora

El símbolo de un amplificador operacional que se muestra en la figura 4.1 es un triángulo que apunta en la dirección del flujo de la señal.

Este componente tiene un número de identificación de parte (NIP) colocado dentro del símbolo del triángulo. El número designa al amplificador operacional con características específicas.

El amplificador operacional también puede codificarse en un esquema o diagrama de circuito con un número de referencia por ejemplo UI, IC 101, etc. Después el número de identificación de parte se pone dentro de la lista de partes del esquema del circuito. Todos los amplificadores operacionales poseen por lo menos cinco terminales:

- (1) la terminal de fuente de poder positiva V_{cc} o $+V$, en el pin 7,
- (2) la terminal de fuente de alimentación negativa V_{ee} o $-V$, en el pin 4
- (3) la terminal de salida, pin 6, (4) la terminal de entrada inversora (\sim) en el

pin 2,

(5) la terminal de entrada no inversora(+), en el pin 3..Algunos amplificadores operacionales de propósito general cuentan con más terminales especializadas(las terminales que se acaban de mencionar se refieren al caso del mini DIP de ocho terminales).

El circuito equivalente del amplificador operacional 741 se muestra en la figura 4.2. Es un diseño complejo de tercera generación, compuesto de un capacitor, 11 resistencias y 27 transistores.

Los transistores Q1 y Q2, con sus circuitos de apoyo, constituyen la etapa de entrada diferencial de alta ganancia. Los transistores Q14 y Q20 son la etapa de salida complementaria. Los transistores Q15 y Q21 detectan la corriente de salida y dan protección contra cortocircuitos. El resto de los transistores constituyen la etapa de desplazador de nivel, que conecta la etapa de entrada con la de salida.

ENCAPSULADO.

El amplificador operacional se fabrica en un diminuto chip de silicio y se encapsula en una caja adecuada. Alambres finos conectan el chip con terminales externas que salen de la cápsula de metal, plástico cerámica. La figura 4.3(a), (b) y (c) muestran los encapsulados comunes de los amplificadores operacionales.

El encapsulado de caja metálica de la figura 4.3(a) viene con 3,5,8,10 y 12 terminales. El chip de silicio está unido a la placa metálica del fondo para facilitar la disipación de calor. La lengüeta identifica el pin 8 y los pines están numerados en sentido contrario al de las manecillas del reloj cuando la caja metálica se ve desde arriba.

Los conocidos encapsulados doble en línea (DIP) de 14 y 8 pines se muestran en la figura 4.3(b) y 4.3(c). Se dispone de cápsulas de plástico o de cerámica. Cuando se ven desde arriba un punto o muesca identifica el pin 1 y las terminales están numeradas en sentido contrario al de las manecillas del reloj.

Los circuitos integrados complejos que contienen muchos amplificadores operacionales y otros circuitos integrados pueden fabricarse hoy en una sola pastilla grande o bien interconectarse muchas pastillas grandes y poniéndolas en una sola cápsula. Para facilitar la fabricación y el armado unas lengüetas sustituyen las terminales. A la estructura resultante se le llama tecnología de montaje de superficie (SMT) y se muestra en la figura 4.3(d) estos encapsulados ofrecen mayor densidad de circuito para un encapsulado de tamaño determinado. Además, estos dispositivos tienen menos ruido y mejores características de respuesta en frecuencia. Los componentes para montaje de superficie están disponibles como (1) chip con encapsulado de plástico (PLCC, del inglés "plastic lead chip carriers"), (2) circuitos integrados de tamaño pequeño (SOIC, del inglés "small outline integrated circuits chip carriers") y (3) chip con encapsulado cerámico (LCCC, del inglés "Leadless ceramic chip carriers")

SIMBOLO Y TERMINALES.

Los fabricantes combinan actualmente en un sólo dibujo el símbolo del circuito de un amplificador operacional con el encapsulado. Por ejemplo, los cuatro tipos más comunes de encapsulado que aloja el amplificador operacional 741 se muestran en la figura 4.4. Si se comparan las figuras 4.4(a) y 4.4(d) se puede observar que los esquemas de numeración son idénticos para la caja de ocho patas y para el DIP de ocho pines.

Una muesca o punto identifica el pin 1 en estos dispositivos y una lengüeta identifica el pin 8 en el encapsulado tipo TO-5.

CODIGO DE IDENTIFICACION.

Cada tipo de amplificador operacional tiene un código de identificación de letra y número. Este código responde a cuatro preguntas:

- 1 ¿Qué tipo de amplificador es? (ejemplo 741)
- 2.¿Quién lo fabrica? (ejemplo: Analog Devices)
- 3.¿De qué calidad es? (ejemplo, el intervalo garantizado de temperatura de operación)
- 4.¿Qué clase de encapsulado contiene el chip del amplificador operacional? (ejemplo, DIP de plástico.)

No todos los fabricantes utilizan el mismo código, pues la mayoría se sirve de un código de identificación que consta de cuatro parte escritas en el siguiente orden: (1) prefijo de letras,(2) número de circuito, (3) sufijo de letras y (4) código de especificación militar.

Prefijo de letras.

El código de prefijo de letras por lo general consiste de dos letras que identifican al fabricante. En los siguientes ejemplos se dan algunos códigos.

Prefijo Fabricante

literal

AD Analog Devices

CA RCA

LM National Semiconductor Corp.

mc Motorola

NE/SE Signetics

OP Precision Monolithics

RC/RM Raytheon

SG Silicon General

TL Texas Instruments

UA(UA) Fairchild

Numero del circuito.

El número del circuito se compone de tres a siete números y letras que identifican el tipo de amplificador operacional y su intervalo de temperatura. Por ejemplo:

062C

Los tres códigos de intervalo de temperatura son:

1. C: comercial, 0 a 700C
2. I: industrial, -25 a 850C
3. M: militar, -55 a 1250C

Sufijo de letras.

El sufijo de una y dos letras identifica el tipo de encapsulado que contiene al chip del amplificador operacional. Se necesitan conocer el tipo de encapsulado para obtener las conexiones correctas de los pines de la hoja de especificaciones. A continuación se dan los tres códigos de sufijos más comunes de los encapsulados.

Código de Descripción

encapsulado

D De plástico, doble en línea para montaje en la superficie en una tarjeta de circuito impreso.

i De cerámica, doble en línea.

N,P De plástico, doble en línea para inserción en receptáculo. (las terminales traspasan la superficie superior de una tarjeta de circuito impreso y se sueldan a la superficie inferior.)

Código de especificación militar.

Se emplea exclusivamente cuando la pieza se destina a aplicaciones que requieren de gran confiabilidad.

Ejemplo:

Un amplificador de propósito general, el 741 , se identifica por completo de la siguiente manera:

Prefijo Número Sufijo

uA 741C P(8terminales)

Fairchild Amplificador operacional Encapsulado

de propósito general plástico

con intervalo de tempe-

ratura comercial.

TERMINALES DE LOS AMPLIFICADORES OPERACIONALES.

En la figura 4.1 se muestra el símbolo de un amplificador operacional que es una punta de flecha que significa 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 alimentación de corriente, dos para las señales de entrada y una para la salida.

El amplificador operacional ideal de la figura 4.5 tiene ganancia infinita y respuesta a la frecuencia también

infinita. Las terminales de entrada no toman corriente de señal ni de 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 límites.

TERMINALES DE ALIMENTACION DE CORRIENTE.

Las terminales del amplificador operacional etiquetadas como $+V$ y $-V$ identifican las terminales del amplificador operacional que deben conectarse a la fuente de alimentación.

La fuente de alimentación en la figura 4.6 recibe el nombre de fuente bipolar o dividida y los valores típicos son de $-15V$ y $+15V$. Algunos amplificadores operacionales de propósito especial pueden usar una fuente de polaridad única como $+5$ o $+15$ y tierra. Nótese que la tierra no está conectada al amplificador operacional en la figura 4.6. Las corrientes que retornan a la fuente desde dicho amplificador deben pasar a través de los elementos externos del circuito, como por ejemplo la resistencia de carga R_L . El voltaje máximo de la fuente que puede aplicarse entre $+V$ y $-V$ suele ser $36V$ o bien $+18V$ y $-18V$.

TERMINALES DE SALIDA.

En la figura 4.6 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. El voltaje de salida V_o se mide con respecto a tierra. Ya que sólo hay una terminal de salida en un amplificador operacional, se le llama salida de extremo único. Hay un límite a la corriente que pueda tomarse de la terminal de salida de un amplificador operacional, por lo común del orden de 5 a $10mA$. También hay límites en los niveles de voltaje en la terminal de salida; estos límites se determinan por los voltajes de alimentación y por los transistores de salida Q_{14} y Q_{20} en la figura 4.2. Estos transistores necesitan cerca de 1 a $2V$ del colector al emisor para asegurarse de que actúen como amplificadores y no como interruptores. Por tanto, la salida en la terminal puede crecer hasta $1V$ abajo de $+V$ y caer hasta $2V$ arriba de $-V$. El límite superior de V_o se denomina voltaje positivo de saturación, $+V_{sat}$, y el límite inferior voltaje negativo de saturación, $-V_{sat}$. Por ejemplo, con una fuente de alimentación de $+15V$ y $-15V$, $+V_{sat} = +14V$ y $-V_{sat} = -13V$. Por tanto, V_o está restringido a una variación simétrica de pico a pico de $+13V$ y $-13V$. Ambos límites de corriente y voltaje determinan un valor mínimo en la resistencia de carga R_L de $2K$. Sin embargo, los amplificadores operacionales de propósito especial como el CA3130 tienen MOS, semiconductores de óxido metálico (metal óxido-semiconductor), en vez de transistores bipolares de salida. Esta salida puede acercarse a pocos milivolts ya sea de $+V$ o $-V$.

La mayor parte de los amplificadores operacionales, entre ellos el 741, tienen circuitos internos que automáticamente limitan la corriente de la terminal de salida. Aún cuando ocurra un cortocircuito en R_L , la corriente de salida está limitada a unos $25mA$.

TERMINALES DE ENTRADA.

En la figura 4.7 hay dos terminales de entrada, etiquetadas $-$ 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, AOL . Como se muestra en la figura 4.7(a), la terminal de salida es positiva respecto a tierra cuando la entrada $(+)$ es positiva respecto a la entrada $(-)$. Cuando E_d está invertida como en la figura la entrada $(+)$ es negativa respecto a, o menor, a la entrada $(-)$ y V_o se vuelve negativo respecto a tierra.

Se concluye a partir de la figura 4.7 que la polaridad de la terminal de salida es la misma polaridad de la terminal de entrada $(+)$ con respecto a la entrada $(-)$. Es más, 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 designa entrada no inversora $(+)$.

Es importante destacar que la polaridad V_o depende sólo de la diferencia en voltaje entre las entradas

inversora y no inversora. Esta diferencia de voltaje puede encontrarse por:

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

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 está puesta a tierra, e inclusive si ambas entradas están arriba o abajo del potencial tierra.

GANANCIA DE VOLTAJE EN LAZO ABIERTO.

En referencia a la figura 4.7. El voltaje de salida V_o quedará determinado por E_d y la ganancia de voltaje en circuito abierto, AOL; AOL se denomina 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 en forma ideal mediante la relación:

$$\text{voltaje de salida} = \text{voltaje diferencial de entrada} * \text{ganancia en lazo abierto}$$

$$V_o = E_d * AOL$$

DESARROLLO