

El Amplificador Operacional Real: Parámetros y especificaciones técnicas

J. I Huircán

Abstract—Se describen las características del Amplificador Operacional real, el cual tiene ganancia finita, y depende de la frecuencia. Este amplificador no tiene balance perfecto, pues, presenta un error en corriente continua, el cual se llama offset y es causado por V_{io} , I_B e I_{io} . Las resistencias de entrada y salida del dispositivo tienen valores finitos. Cada AO es identificado mediante un código que especifica su encapsulado y tipo.

Index Terms—Op Amp IC, Amplificador Operacional.

I. INTRODUCTION

Para trabajar con AO reales se requiere tomar en cuenta aspectos de tipo práctico, pues, aunque el modelo ideal se asemeja bastante al real, éste no se comporta exactamente igual al ideal. Se debe conocer esta diferencia, ya que de ello depende el comportamiento final de un circuito diseñado con un AO.

II. EL AO INTEGRADO (OP AMP IC)

El Amplificador Operacional (AO) integrado (CI) está constituido básicamente por dos etapas de ganancia de voltaje (una entrada diferencial y una etapa de emisor común) seguida por una etapa de salida clase AB de baja impedancia. Un diagrama simplificado de este circuito integrado es mostrado en la Fig. 1. Esta versión de un AO integrado es equivalente a un AO de propósito general, similar al LM101, μA 741, o versiones de AO múltiples [1]. Este circuito permite entender el funcionamiento interno del CI.

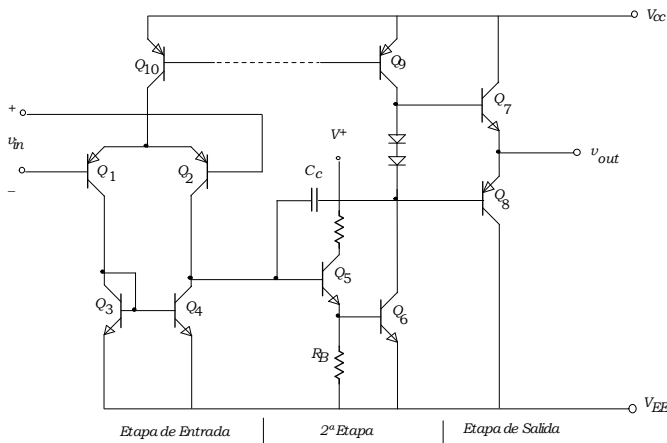


Fig. 1. Diagrama interno de un AO.

La etapa de entrada conformada por Q_1 y Q_2 forman un par diferencial con carga activa formada por Q_3 y Q_4 .

La salida se toma desde el colector del transistor Q_4 . Por otro lado, Q_{10} proporciona una polarización adecuada para el par diferencial.

En la mayoría de los AO, la etapa intermedia (2ª etapa) proporciona una alta ganancia a través de varios amplificadores, en el circuito de la Fig. 1, dicha etapa esta formada por Q_5 la cual es un circuito en emisor común que proporciona una alta impedancia de entrada a la primera etapa (la que atenúa los efectos de carga). Además, esta etapa tiene un capacitor C_c el cual es utilizado por el AO para compensación en frecuencia.

Finalmente, la etapa de salida está conformada por Q_7 y Q_8 , la que proporciona una alta ganancia de corriente a una baja impedancia de salida.

Existen muchas variantes y mejoras al circuito mostrado, como lo es, modificar el par diferencial y utilizar transistores JFET en la entrada, que permite el incremento de la resistencia de entrada del AO, además, la incorporación de otras etapas de amplificación interna, trasladadores de nivel y circuitos de protección.

Cada AO posee rasgos particulares, los que se encuentran especificados en las hojas de especificación (Datasheet) de los manuales (Data Book) proporcionados por los fabricantes. Estas contienen características de los AO para determinadas condiciones de operación, indicados en forma de tabla o en gráficos en conjunto con aplicaciones típicas para el dispositivo.

III. GANANCIA DE LAZO ABIERTO A_v

La diferencia más significativa entre el AO ideal y el real es la ganancia de tensión en lazo abierto, también conocida como ganancia diferencial. Mientras AO ideal tiene ganancia infinita, la ganancia AO real es finita y además disminuye a medida que aumenta la frecuencia de trabajo. La ganancia de tensión se especifica en decíbeles.

$$A_v = \frac{v_o}{v_d} \quad A_v|_{dB} = 20 \log \frac{v_o}{v_d} \quad (1)$$

La ganancia es alta para entradas cuya frecuencia fluctúa entre c.c. y 10 KHz aproximadamente, para luego empezar a decaer. Esta frecuencia de corte varía de acuerdo al tipo de AO, para el caso de la Fig. 2, la alta ganancia se mantiene hasta los 100Hz, decayendo a medida que aumenta la frecuencia.

IV. ERRORES DE DESPLAZAMIENTO (OFFSET) DE TENSIÓN Y CORRIENTE

El AO ideal es un dispositivo balanceado, es decir

$$v_o = 0, \text{ si } v^+ = v^- \quad (2)$$

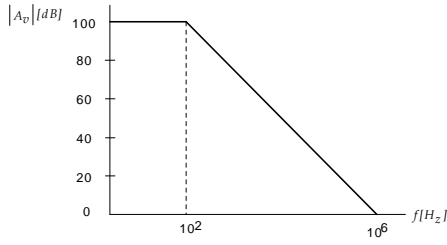


Fig. 2. Respuesta en frecuencia del AO.

En cambio, el AO real tiene un desajuste, debido a que los transistores que lo componen, especialmente los transistores del amplificador diferencial de entrada (Q_1 y Q_2), no son exactamente pareados.

Esto implica que se producen desajustes en los valores de β de los transistores, lo cual trae como consecuencia variaciones en los valores de las corrientes de entrada. Como los flujos de corrientes son distintos en los terminales de entrada, aparecen diferencias en las tensiones base emisor de los transistores del par diferencial. También una variación en las resistencias de colector, producirá un desequilibrio.

El resultado final es un desajuste entre los colectores del amplificador diferencial, que se manifiesta en un voltaje v_o de salida distinto de cero. El desbalance producido se conoce como voltaje *offset* o voltaje de desplazamiento.

Para solucionar este problema, se requiere de la aplicación de un voltaje de compensación entre los terminales de entrada, para balancear la salida del amplificador (anulación del voltaje de offset).

A parte de los desajustes propios de construcción de los AO, existen otros tales como los producidos por variaciones de temperatura y cambios en las tensiones de alimentación. Para medir y especificar la compensación de offset del AO, se proponen tres parámetros, el V_{io} , I_B e I_{io} .

A. Tensión de desplazamiento (Offset) en la entrada (V_{io})

En el AO real si ambas entradas son conectadas a tierra, la salida es distinta de cero, pues existe una pequeña tensión de desplazamiento. Esta tensión en la entrada, llamada V_{io} , se define como la tensión de entrada necesaria para que la salida sea igual a cero. Si este valor es distinto de cero, el AO amplificará cualquier desplazamiento en la entrada, provocando un error grande en corriente continua en la salida.

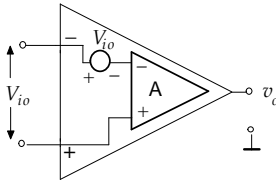


Fig. 3. Modelación del V_{io} .

Este parámetro es independiente de la ganancia del AO, y su polaridad puede ser positiva o negativa. El efecto del

TABLE I
VALORES TÍPICOS DE V_{io} PARA DIFERENTES AO.

AO	V_{io}
AO de propósito general	2 – 10 [mV]
Entrada JFET	1 – 2 [mV]
Instrumentación	10 – 100 [μ V]

voltaje V_{io} , se modela como una fuente de tensión continua en una de las entradas del AO ideal como se indica en la Fig. 3 y sus valores típicos de muestran en la Tabla ??.

B. Corriente de polarización de entrada (I_B)

Las entradas del AO ideal no requieren corriente, sin embargo, en el caso real ingresa una corriente de polarización en cada terminal de entrada. Esta corriente I_B (la letra B corresponde a la abreviación *Bias*) es la corriente de base del transistor de entrada, que se define como la semi-suma de las corrientes de entradas individuales de un AO balanceado de acuerdo a la ecuación (3). La corriente de polarización de entrada se puede modelar como dos fuentes de corrientes como se indica en la Fig. 4.

$$I_B = \frac{I_B^+ + I_B^-}{2} \quad (3)$$

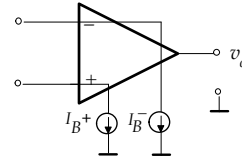


Fig. 4. Modelación de I_B .

TABLE II
VALORES TÍPICOS DE I_B PARA DIFERENTES AO.

AO	I_B
AO de propósito general	2 [μ A]
Entrada JFET	1 [pA]
Instrumentación	3 – 6 [nA]

C. Coeficientes que varían con respecto a la temperatura

Tanto V_{io} , I_B e I_{io} son dependientes de la temperatura, es por eso que se definen tres coeficientes que relacionan su variación con la variación de temperatura.

- Coeficiente de temperatura de I_B , $\frac{\Delta I_B}{\Delta T_o}$
- Coeficiente de temperatura de I_{io} , $\frac{\Delta I_{io}}{\Delta T_o}$
- Coeficiente de temperatura de V_{io} , $\frac{\Delta V_{io}}{\Delta T_o}$

D. Modelo Considerando los efectos del offset

De acuerdo a lo planteado resulta conveniente para los análisis de circuitos con offset, usar el modelo de la Fig.5,

el cual muestra un AO ideal con los efectos de V_{io} e I_B . Dada la linealidad del dispositivo, los efectos de las fuentes en las salidas serán aditivos.

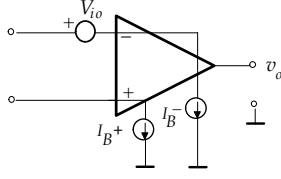


Fig. 5. Modelo completo de Offset en un AO ideal.

V. PARÁMETROS RELACIONADOS CON LA RESPUESTA EN FRECUENCIA

El AO real no tiene ancho de banda (BW) infinito. En los AO reales, el ancho de banda comienza en la frecuencia cero y llega hasta la frecuencia de corte superior f_c (frecuencia a la cual la ganancia disminuye en 3dB), ésta depende del tipo de AO y de la ganancia de lazo cerrado.

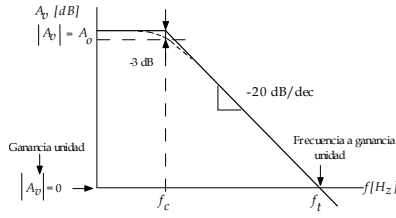


Fig. 6. Respuesta en frecuencia del AO (curva de lazo abierto)

La respuesta en frecuencia del AO en lazo abierto se indica en la Fig. 6, donde A_o es la ganancia máxima también llamada ganancia de corriente continua o ganancia en baja frecuencia. Si el AO es realimentado, ya sea una configuración inversora o no inversora, la ganancia disminuye y la frecuencia de corte aumenta.

A. Producto Ganancia - Ancho de Banda (GBP)

Es el producto de la ganancia en lazo abierto disponible y el ancho de banda a una frecuencia específica. En gran parte de los AO (compensados internamente en frecuencia) cuya respuesta en frecuencia cae con una pendiente de 20 dB/dec, el GBP se considera constante. Este parámetro está ligado a la frecuencia a ganancia unidad (f_t) y en algunos casos son la misma cosa. Cuando se trabaja a ganancia unitaria, el GBP es igual al ancho de banda.

TABLE III

GBP PARA DISTINTOS AO.

AO	GBP [MHz]
LM 741	1
LF 351	4
LF 356	10

B. Rise Time (t_r)

Es el tiempo que se demora la señal de salida en ir desde 10% hasta el 90% de su valor final, bajo condiciones de pequeña señal y en lazo cerrado. Se define en base a la respuesta de una entrada escalón y se relaciona con el ancho de banda a través de (4).

$$BW = \frac{0.35}{t_r} [Hz] \quad (4)$$

TABLE IV

t_r PARA AO 741 Y 351.

AO	t_r [μs]	BW [MHz]
LM741	0.3	1.16
LF351	0.08	4.35

El t_r está dado para ganancia unitaria, así el ancho de banda calculado recibe el nombre de GBP o frecuencia ganancia unitaria (f_t).

C. Slew Rate (SR)

La respuesta debida a un escalón no es ideal. Si se quiere llevar la salida entre dos extremos, la respuesta del amplificador no es instantánea. La velocidad que toma la salida en ir desde un extremo a otro es la que se conoce como *razón de cambio* o *slew rate* y está medida en $\frac{V}{\mu s}$.

TABLE V

SR PARA DISTINTOS AO.

AO	SR [$\frac{V}{\mu s}$]
LM 741	0.3
LF 351	13

Comúnmente el SR se relaciona con el *ancho de banda de potencia*, f_p , que se define como la frecuencia a la cual una señal senoidal de salida, a una tensión predeterminada, comienza a distorsionarse. Si $v_o = V \sin 2\pi f_p t$, donde V es la amplitud máxima de salida, el ancho de banda de potencia se define como la habilidad para entregar el máximo de voltaje de salida con incremento de frecuencia.

VI. CARACTERÍSTICA ELÉCTRICAS

Los fabricantes especifican una serie de características eléctricas para los AO, que ayudan a determinar los rangos máximos a los cuales pueden ser sometidos los amplificadores y además sus características de entrada y salida.

A. Relación de rechazo en modo común (CMRR)

Mide la habilidad de un AO para rechazar señales en modo común. Si la misma señal alimenta a la entrada inversora como a la no inversora de una configuración diferencial, la salida v_o debiera ser cero, sin embargo, debido a

la componente en modo común esto no ocurre. La capacidad de atenuar esta componente es lo que se conoce como CMRR y comúnmente se expresa en decibeles (dB).

$$CMRR = \frac{A_d}{A_{cm}} \quad CMRR|_{dB} = 20 \log \left(\frac{A_d}{A_{cm}} \right) \quad (5)$$

Donde, A_d , es la ganancia diferencial y A_{cm} es ganancia en modo común.

TABLE VI
CMRR PARA DIFERENTES AO.

AO	CMRR[dB]
Propósito general	70
Entrada JFET	100
Instrumentación	120

VII. RESISTENCIA DE ENTRADA (r_{in})

Es la resistencia vista desde un terminal de entrada con la otra entrada puesta a tierra. Esta varía para cada AO.

TABLE VII
 r_{in} PARA DIFERENTES AO.

AO	r_{in}
Propósito general (Entrada bipolar)	$1 - 2 [M\Omega]$
Entrada JFET	$10^{12} [\Omega]$
Instrumentación (OP-07)	$3.3 [M\Omega]$

A. Resistencia de salida (r_o)

Es la resistencia vista desde el terminal de salida. Este parámetro se define bajo condiciones de pequeña señal con frecuencias por encima de algunos cientos de hertz.

TABLE VIII
 r_o PARA DISTINTOS AO.

AO	r_o
Propósito general (Entrada bipolar)	$75 [\Omega]$
Instrumentación (OP-07)	$60 [\Omega]$

B. Output voltage swing ($\pm V_{o\ max}$, V_{op})

Dependiendo de la resistencia de carga, este es el máximo *peak* de salida en voltaje que el AO puede entregar sin saturarse o recortar la señal.

VIII. CARACTERÍSTICA NOMINAL MÁXIMA

A. Tensión de alimentación (V^+ y V^-)

Es la tensión de alimentación máxima permitida que puede aplicarse con seguridad al amplificador. Aunque se

TABLE IX
 V_{op} PARA DISTINTOS AO.

AO	Output Voltage swing [V]
Propósito general	$\pm 14 (RL > 10K\Omega)$
Instrumentación (OP-07)	$\pm 13 (RL > 10K\Omega)$

designa como estandar 15 [V] de alimentación, la mayoría de los AO integrados operan sobre un amplio rango de potenciales, algunos van desde valores tan bajos como 1 [V], y otros hasta 40 [V].

TABLE X
VOLTAJES DE ALIMENTACIÓN PARA DISTINTOS AO.

AO	V_{cc} [volts]
Propósito general	± 18
Instrumentación (OP-07)	± 22

B. Rango de Temperaturas de operación (T_{or})

Es el rango de temperatura dentro del cual el dispositivo funcionará con las especificaciones mostradas.

TABLE XI
RANGOS DE TEMPERATURA.

Tipo Especificación	Rango de Temperatura
Militar	-55 °C a +125 °C
Industrial	-25 °C a + 85 °C
Comercial	0 °C a + 70 °C

C. Tensión de entrada diferencial (V_{id})

Es la tensión máxima que puede aplicarse con seguridad entre los terminales de entrada diferencial sin flujo excesivo de corriente. Estos valores son variables, los AO con entrada cascode *pnp/npn* soportan hasta ± 30 [V], similares a los AO con entrada FET.

D. Voltaje de entrada en modo común (V_{cm})

Es el rango de voltaje que se puede aplicar en ambas entradas respecto a tierra.

E. Consumo de potencia (P_c)

Es la potencia requerida para operar el AO o la potencia consumida por el AO con propósitos de polarización. Se especifica para 15 [V].

F. Disipación de Potencia (P_D)

Es la potencia que un dispositivo particular es capaz de disipar con seguridad en forma continua mientras opera dentro de un rango de temperatura específico. Esta característica varía de acuerdo al tipo de encapsulado. Por

ejemplo, los encapsulados cerámicos permiten una alta disipación de potencia, los metálicos permiten la siguiente más alta disipación, en cambio los de plásticos tienen la más baja. Un valor típico es de 500 [mW].

IX. ALIMENTACIÓN Y PROTECCIÓN EN LOS AO

A. Alimentación de los AO

La mayoría de los AO han sido diseñados para operar con dos fuentes de alimentación simétricas, sin embargo, también pueden operar con una única fuente. Para aplicaciones en las cuales existe una sola fuente (interface con circuitos digitales), se han diseñado AO especiales.

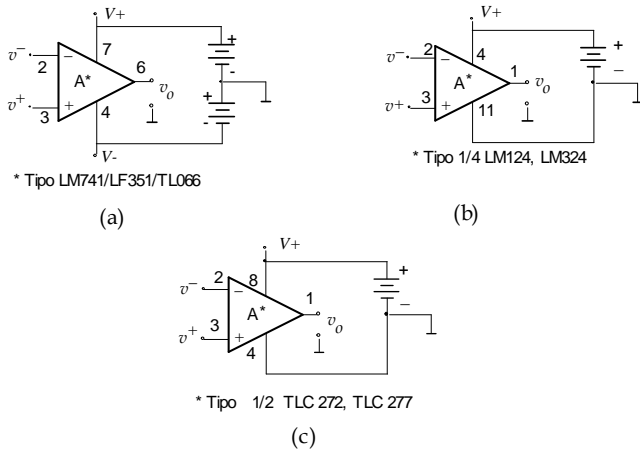


Fig. 7. Alimentación de un AO.

La notación 1/2 TLC272 y 1/4 LM324 hace referencia a los AO Múltiples, es decir, 1/2 TLC 272 indica que el CI tiene dos AO en su interior.

B. Limitaciones de entrada

Las fallas en los AO en la etapa de entrada se producen de dos formas: (a) excediendo las características nominales de entrada diferencial; (b) excediendo características nominales en modo común. El parámetro más susceptible es el nominal de entrada diferencial.

Cuando se sobrepasan las características de entrada diferencial, en un AO de entrada no protegida el diodo zener emisor-base de uno de los transistores de entrada diferencial entrará en disrupción. Siempre que la diferencia entre los dos terminales de entrada exceda los $\pm 7[V]$, estos diodos emisor-base entrarán en disrupción y conducen una corriente que solo estará limitada por una resistencia externa. Si la impedancia que alimenta ambas entradas es baja, la corriente puede elevarse hasta niveles destructivos. Las corrientes sobre 50[mA] provocarán daños permanentes.

La forma más sencilla de proteger el AO es agregar dos diodos como lo indica la Fig. 8. Estos diodos deben ser de bajas pérdidas tipo 1N458 o similares.

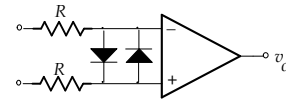


Fig. 8. Protección de entrada diferencial.

C. Latch-up

La salida del AO permanece fija en un determinado nivel de tensión continua después de haber retirado la señal de entrada responsable. Si un AO entra en *Latch-up* es muy posible que quede dañado permanentemente. Esto se produce a menudo en etapas de seguidor de emisor.

Para evitar este problema se plantea esta configuración la que permite limitar la señal de entrada a la indicada por el diodo zener. D_1 y D_2 son diodos de bajas pérdidas y D_3 y D_4 pueden ser diodos zener de 10 – 12 [V].

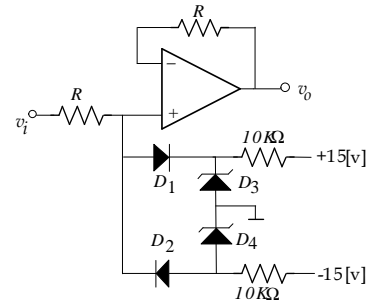


Fig. 9. Protección contra latch-up.

D. Protección contra cortocircuito a la salida

Los primeros AO no incorporaban limitación de corriente en la etapa de salida, aunque estos pueden sobrevivir a cortocircuito de unos pocos segundos de duración, un cortocircuito prolongado a tierra o a $\pm V_{cc}$ produce la destrucción del circuito. Una protección muy útil contra cortocircuitos es usar una resistencia de bajo valor en serie con la salida, como se indica en la Fig. 10.

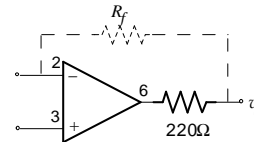


Fig. 10. Protección contra cortocircuito.

El resistor tiene un efecto mínimo en el funcionamiento si se conecta dentro del lazo de realimentación, excepto la caída en la tensión de salida. Este evita la destrucción del amplificador debido a un cortocircuito de la carga.

E. Protección de las tensiones de alimentación

E.1 Inversión de Polaridad

Debido a la construcción interna, los CI's debe operar siempre con la polaridad de las tensiones de alimentación especificada. Si alguna de las tensiones se invierte, aunque sólo sea un momento, fluiría una corriente destructiva a través de los diodos de aislamiento del CI, que están polarizados normalmente en inversa. Pueden ser utilizadas las configuraciones de la Fig. 11.

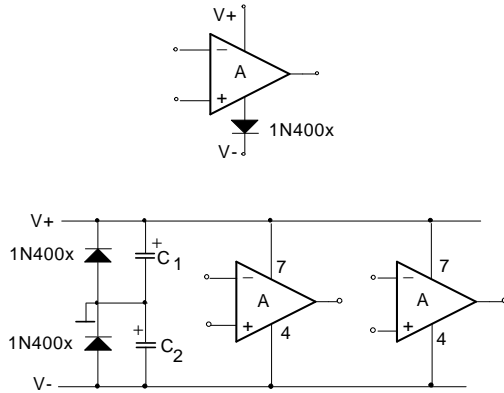


Fig. 11. Protección de los AO.

E.2 Sobretensión

Los AO comerciales se especifican generalmente para una tensión total de operación de 36 [V] (± 18 [V]). Estos límites de tensión NO deben ser sobrepasados ni siquiera durante breves instantes. Para prevenir esto, se deberá utilizar un voltaje de bloqueo mediante un diodo zener en los terminales de alimentación.

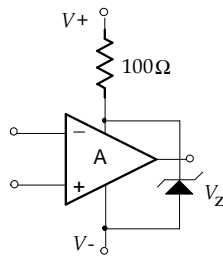


Fig. 12. Protección contra sobre tensión.

La resistencia es opcional siempre que la alimentación lleve fusible o limitación de corriente. Otra alternativa es utilizar dos diodos zener, uno para cada terminal de alimentación, esto proporciona protección contra sobre tensión e inversión de polaridad. El zener debe ser de 36 [V], si la alimentación de ± 18 [V] o de 43 [V] cuando la alimentación es de ± 22 [V].

X. ENCAPSULADOS Y CÓDIGOS DE IDENTIFICACIÓN

El AO se fabrica de un pequeño chip de silicio y se encapsula en una caja adecuada que puede ser de metal, plástico

o cerámica.

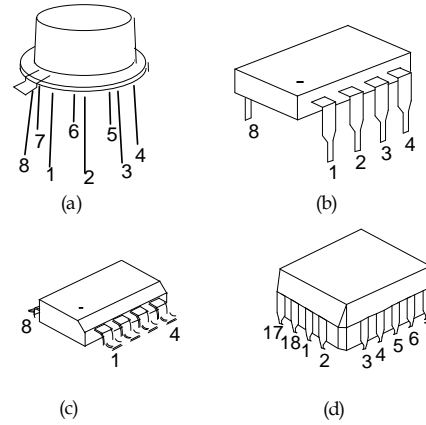


Fig. 13. (a) Encapsulado Metálico. (b) Encapsulado DIP (8 terminales). (c) SOIC. (d) Encapsulado PLCC.

La Fig. 13 muestra los diferentes tipos de encapsulado. El encapsulado DIP (Dual In-line Package - Encapsulado en doble línea) de 8 pines (terminales) indicado en la Fig. 13b, puede ser cerámico o plástico, mirado desde arriba una muesca o punto identifica el terminal 1. La distancia entre terminales es de 0.1 pulgadas (2.5mm aprox).

Los AO encapsulados en componentes más pequeños son llamados de montaje superficial (SMT-Surface-Mounted Technology), se distingue el encapsulado SOIC (Small-Outline Integrated Circuit) cuya distancia entre terminales es 0.05 pulgadas (1.27mm). Los distintos formatos se encuentran indicados en la Tabla XII. El formato PLCC (Plastic Lead Chip Carriers) o *chip con encapsulado de plástico* se muestra en la Fig. 13d.

TABLE XII
MONTAJE SUPERFICIAL.

SMT	Descripción
SOIC	Small outline integrated Circuit
PLCC	Plastic Lead Chip Carriers
LCCC	Leadless Ceramics Chip Carrier

A. Combinación de Símbolos y Terminales

Se puede combinar en un sólo dibujo el símbolo del AO con el encapsulado (Fig. 14).

La abreviación NC indica que no hay conexión. El componente se mira desde arriba. En el encapsulado DIP 14 la numeración de los pines es similar al DIP 8, con la única diferencia en que tiene 7 terminales por lado.

B. Códigos De Identificación

Cada tipo de AO tiene un código de identificación de letra y número, que permite saber el fabricante, el tipo de amplificador, de que calidad es y que encapsulado tiene. No todos los fabricantes utilizan el mismo código, pero

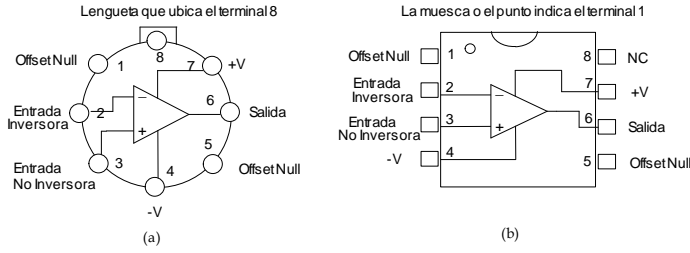


Fig. 14. (a) Encapsulado metálico de 8 terminales. (b) Encapsulado mini DIP de 8 pines.

la mayoría utiliza una identificación que consta de cuatro partes escritas en el orden indicado en la Fig. 15.

P.L.	Num Cto	S.L.	Cod Esp Mil
------	---------	------	-------------

Fig. 15. Especificación de código de los AO.

Donde:

- P.L. (Prefijo de Letras): Son dos letras que identifican al fabricante.

TABLE XIII
IDENTIFICACIÓN DE FABRICANTE DE AO [3].

Prefijo	Fabricante
AD	Analog Device
LM	National Semiconductor
MC	Motorola
NE/SE	Signetics
OP	Precision Monolithics
LT	Linear Technology
SG	Silicon General
TL	Texas Instrument
UA (μA)	Fairchild
CA	RCA

- Num. Cto.(Número del Circuito): Se compone de tres a siete números y letras que identifican el tipo de AO y su intervalo de temperatura.

TABLE XIV
INTERVALO DE TEMPERATURA.

Código	Intervalo de Temperatura
C	Comercial
I	Industrial
M	Militar

- S.L. (Sufijo de Letras): Indica el tipo de encapsulado que contiene al AO, puede ser de una o dos letras.

Example 1: μA 741CP, Amp. Op. de propósito general Fairchild, con intervalo de temperatura comercial y encapsulado de plástico.

TABLE XV
DESCRIPCIÓN DEL SUFJO.

Código	Descripción
D	De plástico, doble en línea SMT
J	De cerámica doble en línea
N, P	De plástico DIP para inserción en receptáculo

Example 2: OP037CP, Amp. Op. precisión, bajo ruido, alta velocidad, temperatura comercial y encapsulado de plástico.

Example 3: LF351D, Amp. Op. con entrada JFET para montaje superficial (Linear Bi-FET)

XI. CONCLUSIONES

El AO real tiene una ganancia de lazo abierto de aproximadamente 100 dB, la cual decrece a medida que aumenta la frecuencia, luego, el ancho de banda es finito, y dependerá básicamente de la ganancia realimentada de trabajo. El AO también presenta errores de corriente continua, es decir, si $v^+ = v^-$, la salida es distinta de cero, esto se conoce como offset, el cual se debe reducir o compensar sobre todo para aplicaciones de alta ganancia. Las causas de offset son V_{io} , I_B e I_{io} .

Todos estos parámetros, más los relacionados con las características nominales del circuito integrado deben ser considerados para su óptimo funcionamiento.

REFERENCES

- [1] Solomon, E. "The Monolithic Op Amp: A Tutorial Study" *IEEE Journal Solid State Circuits*, Vol. SC-9, no.6, pp. 314-332, Dec 1974.
- [2] Jung, W. (1977) *Amplificadores Operacionales Integrados*, Paraninfo
- [3] Caughlin, R., Driscoll, F. (1991) *Operational Amplifiers & Linear Integrated Circuits*, Prentice-Hall
- [4] Savat, C., Roden, M (1992). *Diseño Electrónico*. Addison-Wesley
- [5] Sedra, A., Smith, K. (1998). *Microelectronic Circuit*. Oxford Press