

Características no ideales (reales) de los amplificadores operacionales

- Clase 1T -

Laboratorio de Electrónica – Departamento de Física – FCEyN – UBA

Objetivos

- Comprender las limitaciones reales de los amplificadores operacionales.
- Identificar las principales especificaciones en hojas de datos.
- Aplicar estos parámetros en el diseño y análisis de circuitos.
- Comparar mediante simulación entre los operacionales ideales y reales.

1. Introducción: Amplificadores Lineales y Operacionales

■ Amplificador Lineal

Un amplificador lineal es un dispositivo que reproduce en la señal de salida, ya sea corriente o tensión, una réplica amplificada, lo más exacta posible de la señal de entrada y por lo tanto es capaz de aumentar, en la señal de salida el nivel de tensión, de corriente o ambos, superando siempre la potencia de la señal de salida a la potencia de la señal de entrada. La potencia que se añade a la señal es suministrada por una batería de corriente directa.

Un amplificador lineal puede considerarse como una fuente, de corriente o de tensión en que la señal de salida es dependiente linealmente de la señal de entrada, de forma que exista una ganancia de potencia de la salida con respecto a la entrada.

■ Amplificador Operacional

Un amplificador operacional es un amplificador lineal, fabricado como un IC analógico de bajo nivel de integración o una pequeña parte de un circuito integrado de muy alto nivel de integración, cuya ganancia de voltaje es muy grande, al cual se añade realimentación negativa para estabilizar su funcionamiento y tiene dos entradas y una salida. Generalmente presenta muy alta resistencia de entrada y baja resistencia de salida.

Los amplificadores operacionales se suelen enseñar en un marco ideal, asumiendo parámetros perfectos. Sin embargo, en aplicaciones reales, presentan limitaciones que influyen en el desempeño de los circuitos. Reconocer y cuantificar estas no idealidades es fundamental para diseñar y analizar montajes electrónicos. Este conocimiento es esencial para predecir el comportamiento de circuitos del mundo real, solucionar problemas de resultados inesperados y diseñar circuitos que cumplan con requisitos de rendimiento específicos, como mediciones de precisión o procesamiento de señales de alta velocidad.

2. Características de los amplificadores operacionales reales vs ideales

Las principales características del OVA con compensación de polo dominante y a lazo abierto, o sea, sin realimentación externa son:

PARÁMETROS	IDEAL	TÍPICO
A_{OL}	∞	$> 10^4$
RRMC	∞	> 70 dB
R_i	∞	> 1 M Ω
SR	∞	0,65 V/ μ seg
R_o	0	< 200 Ω
I_i	0	< 10 nA
V_{io}	0	< 10 mV
dV_{io}/dT	0	$< 3\mu$ V/ $^{\circ}$ C
I_{io}	0	$< 0,2$ nA

Algunas de las no idealidades más relevantes son:

- **Resistencia y Capacitancia de Entrada/Salida:** Resistencia de entrada (R_i), Resistencia de salida (R_o), y Capacitancia de entrada (C_i).
- **Ganancia y Ancho de Banda:** Ganancia de lazo a circuito abierto (A_{OL}) y Ancho de banda (Gain Bandwidth Product, GBW).
- **Respuesta Dinámica:** Velocidad de respuesta (Slew Rate, SR) y tiempo de levantamiento (t_r).
- **Offset y Bias:** Voltaje de offset de entrada (V_{io}), Corrientes de polarización de entrada (Input Bias Currents), y Corriente de offset de entrada (I_{io}).
- **Rechazo de Señales y Ruido:** Relación de rechazo de modo común (CMRR) y Relación de rechazo de la fuente de alimentación (PSRR).
- **Condiciones de Operación:** Límites del voltaje de entrada (Input Common Mode Range), Límites del voltaje de salida (Output Swing), y Deriva térmica.

Resistencia de Entrada y de Salida

Resistencia de entrada R_i : es la resistencia incremental medida entre el terminal inversor y el no inversor (típico 2 M Ω) y determina la corriente de entrada para un voltaje de entrada diferencial.

Resistencia de salida R_o : es la resistencia equivalente de Thevenin medida entre la salida del amplificador operacional y tierra (típico 75 Ω).

Capacitancia de Entrada

Capacitancia de entrada C_i : es la capacitancia equivalente medida entre uno de los terminales a tierra (típico 1.4 pF) y limita los tiempos de encendido y retraso del amplificador operacional.

Relación de Rechazo al Modo Común (CMRR)

El amplificador debe atenuar (ganancia menor que uno) o amplificar lo menos posible la señal de modo común, $V_c = \frac{V_+ + V_-}{2}$, que es igual al promedio de las dos señales de entrada con respecto a tierra y que es indeseable, pero que aparece a la entrada inevitablemente, junto a la señal diferencial y es muy difícil de eliminar totalmente.

Cuando se induce un ruido en la señal de entrada del amplificador, o ocurre un cambio de temperatura, dada la pequeñez del chip y la cercanía de los dos terminales de entrada del circuito integrado, es de esperar que el ruido o el cambio de temperatura afecten de forma similar a la señal V_+ y a la señal V_- . **La señal diferencial tiene la ventaja de que al restarse ambas señales, la contribución del ruido o cambio de temperatura tienden a anularse.** En cambio en la señal de modo común ambas señales se suman, reforzándose el ruido y el efecto del cambio de temperatura. Es esto lo que hace indeseable la señal de modo común y aconsejable trabajar solo con la señal diferencial.

Si el amplificador es lineal la tensión de salida V_o debe ser una combinación lineal de las tensiones de entrada V_1 y V_2 :

$$V_o = A_1 V_1 + A_2 V_2$$

Para el amplificador operacional es más conveniente expresar la tensión de salida en función de las tensiones diferenciales y de modo común:

$$V_1 = V_c + \frac{1}{2} V_d$$

$$V_2 = V_c - \frac{1}{2} V_d$$

Sustituyendo V_1 y V_2 en la expresión de V_o :

$$V_o = A_1(V_c + \frac{1}{2} V_d) + A_2(V_c - \frac{1}{2} V_d)$$

Que efectuando queda finalmente:

$$V_o = \frac{1}{2}(A_1 - A_2)V_d + (A_1 + A_2)V_c$$

En que la ganancia diferencial sería $A_d = \frac{1}{2}(A_1 - A_2)$ y la ganancia, o a veces la atenuación, de modo común sería $A_c = A_1 + A_2$. En la práctica se define el factor de rechazo del modo común como:

$$CMRR = \frac{|A_d|}{|A_c|}$$

Como este factor suele ser un número muy grande y mientras más grande mejor, en las hojas de datos de los operacionales se prefiere expresarlo como un número más pequeño, usando una escala logarítmica, cuya unidad es conocida como decibel (dB), o sea:

$$(CMRR)_{dB} = 20 \log \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$$

Respuesta de frecuencia del OVA. Compensación de frecuencia.

Como el OVA es un amplificador de acoplamiento directo, su frecuencia de corte a las bajas es cero. Por otra parte, en la respuesta de altas frecuencias intervendrán las capacidades parásitas de los elementos activos que lo conforman y el efecto de capacidades parásitas adicionales debido a acoplamiento al substrato común, ya que se construyen en forma integrados. Una curva de respuesta de frecuencia típica de un OVA LM741 sin compensar en lazo abierto se ilustra en la siguiente figura.

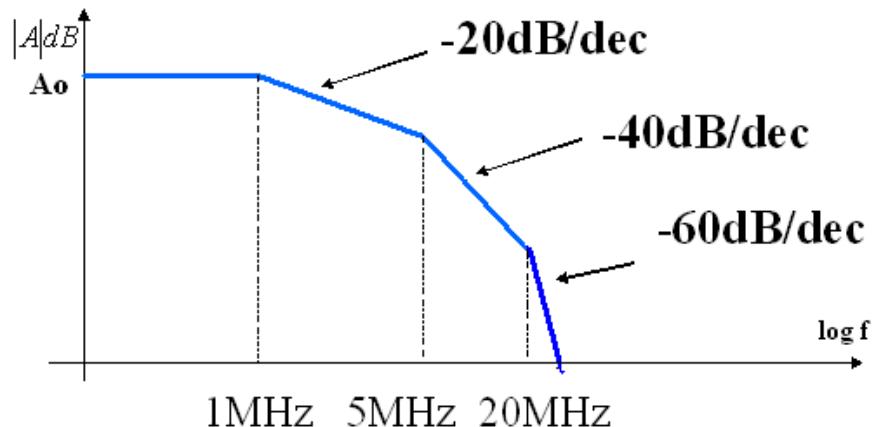


Figura 1: Diagrama de Bode de amplitud del LM741 sin compensar.

La compensación de polo dominante, que es la más empleada, se realiza con la adición de un capacitor C_C que inserta un polo dominante en la función transferencial del circuito a lazo abierto a una frecuencia mucho menor que la de los polos existentes.

Velocidad de Respuesta: Slew-rate (SR), limitación del OVA en aplicaciones de gran señal.

El amplificador operacional no responde instantáneamente a los cambios de la señal de entrada, pues los capacitores internos asociados con cada nodo necesitan de cierta cantidad de corriente para cargarse o descargarse. Esto impone un límite a la razón de cambio máxima del voltaje en estos nodos.

Este límite se expresa por el parámetro **slew-rate (SR)**, definido como la razón de cambio máxima del voltaje de salida ($dV_o/dt)_{max}$ para el OVA operando en lazo cerrado y para la condición de gran señal. Comúnmente, este parámetro se mide con el OVA trabajando en condiciones de gran señal como seguidor de tensión y aplicando en su entrada una señal de escalón.

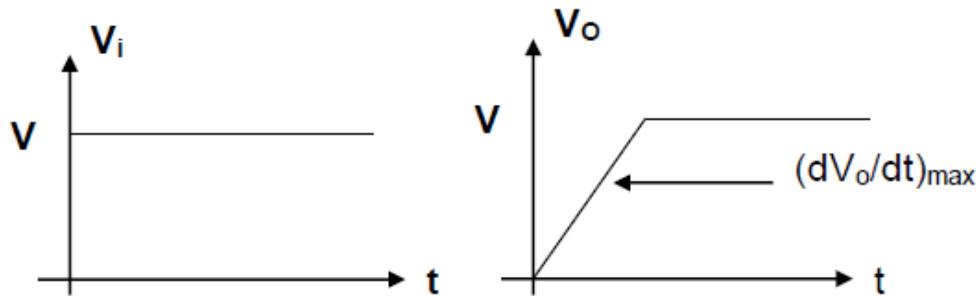


Figura 2: Señales de entrada y salida del seguidor de tensión.

El slew-rate limita la máxima frecuencia de trabajo en gran señal del OVA para obtener la máxima amplitud de la señal de salida. El valor de V_o max nunca llega al valor de V_{CC} , sino que se queda siempre uno o dos Volts por debajo de este. Siempre que la variación $(dV_o/dt)_{max}$ sea menor que el dato del slew-rate dado por el fabricante para el OVA empleado, la señal de salida V_o es capaz de seguir a la de entrada V_i sin introducir distorsión.

Para una señal de salida sinusoidal $V_o = V_m \sin \omega t$, el slew-rate se encuentra como:

$$\frac{dV_o}{dt} = \omega V_m \cos \omega t$$

De donde, la máxima velocidad de cambio conocido como slew-rate (SR) será:

$$(\frac{dV_o}{dt})_{max} = SR = \omega V_m = 2\pi f V_m$$

Por tanto, para un OVA específico con un valor de SR dado por el fabricante, se tiene que:

$$f_{max} = \frac{SR}{2\pi V_m}$$

Si la velocidad con que cambia la señal de entrada sinusoidal es mayor que el *SR* del amplificador operacional, la salida se distorsiona, dando una forma de onda triangular.

Tensiones y corrientes de offset

Un aspecto importante en la operación de un OVA es el mínimo voltaje diferencial de entrada que puede amplificar o detectar. La asimetría o diferencias que existe entre los valores de las componentes que conforman la etapa de entrada diferencial del OVA y las variaciones de sus parámetros con la temperatura, producen un voltaje de salida superpuesto a la señal amplificada que limita la resolución en su aplicación práctica.

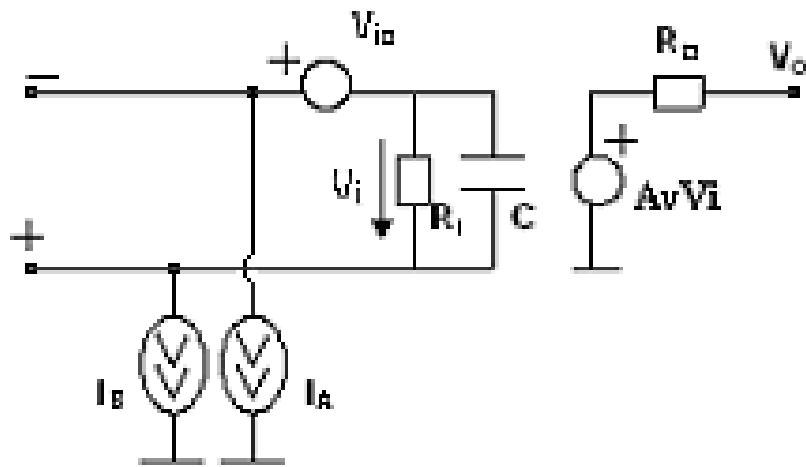


Figura 3: Macromodelo del OVA que incorpora los efectos de V_{10} I_A e I_B .

El **voltaje de offset de entrada** (V_{io}) se define como el voltaje de entrada requerido para llevar el voltaje de salida a cero sin señal aplicada. Un valor típico para los OVAs Standard está entre 0.5 y 2 mV.

Se define como **corriente de offset** (I_{io}) a la diferencia entre I_A e I_B que se debe poner entre las dos entradas inversora y no inversora del OVA para que V_0 se haga cero.

Otros Parámetros

Ganancia de voltaje de señal grande o de lazo abierto A_{OL} : es la ganancia en voltaje diferencial si se considera que el efecto de la señal de modo común es insignificante. Se define como:

$$\text{ganancia de voltaje } A_{OL} = \frac{\text{voltaje de salida}}{\text{voltaje diferencial de entrada}} = \frac{V_o}{V_d}$$

Tiempo de levantamiento t_r : es el tiempo requerido para que v_o cambie de 10% al 90% de su valor estable.

Límites del voltaje de entrada: el voltaje de entrada máximo no puede sobrepasar el voltaje máximo de alimentación.

Límites del voltaje de salida: debido a la saturación del AO, el voltaje de salida es menor en 3 ó 4 V que el V_{CC} y depende de la corriente de carga I_L .

Relación de rechazo con variaciones en la fuente de alimentación PSRR

Se define como el cambio en el voltaje de offset de entrada por unidad de cambio en el voltaje de alimentación de CD.

$$\begin{aligned} PSRR &= \frac{\Delta V_{io}}{\Delta V_{CD}} \\ &= 20 \log \left| \frac{\Delta V_{io}}{\Delta V_{CD}} \right| \end{aligned}$$