



Amplificador Operacional Teoría

Fco. Javier Hernández Canals.

> Nota histórica.

El término amplificador operacional se utilizó originalmente para denominar un tipo de amplificador empleado en ordenadores analógicos, capaces de realizar operaciones matemáticas: suma, resta, multiplicación, integración y derivación. Los primeros de estos elementos se construyeron a partir de componentes discretos; estaban formados por numerosos transistores, resistores y condensadores.

La aparición de los circuitos integrados, a finales de la década de 1950, hizo posible que este tipo de circuitos amplificadores se integrase en un espacio reducido. En 1963, la empresa Fairchild Semiconductors lanzó al mercado el primer amplificador operacional en un circuito integrado monolítico; su aparición marcaba una nueva era en el diseño de circuitos electrónicos. Unos años después, en 1968, se introdujo una versión mejorada, que daría el impulso definitivo al desarrollo y expansión de los amplificadores operacionales.

> Función.

La función básica de un amplificador operacional es producir a la salida una señal cuyo valor es directamente proporcional a la diferencia entre las dos señales de entrada. El factor de proporcionalidad se conoce como factor de amplificación o de ganancia. La ecuación que relaciona la tensión de salida con las tensiones de entrada en un circuito con amplificador operacional se denomina función de transferencia del circuito.

Si la tensión en la entrada con signo negativo varía, manteniéndose constante la tensión en la entrada positiva, en la salida la tensión variará con signo opuesto a la variación de la entrada negativa; por esta razón, la entrada con signo negativo recibe el nombre de inversora. Por el contrario, si la tensión en la entrada positiva varía, manteniéndose constante la tensión en la entrada negativa, la salida variará con el mismo signo que la variación de la entrada positiva, razón por la cual esta entrada se denomina no inversora.

> Características técnicas.

El número de características técnicas que definen a un amplificador operacional es muy amplio. En general, cada dispositivo se diseña con alguna de estas características optimizadas para un conjunto de aplicaciones específicas. Se agrupan en: características de entrada, de salida y de transferencia. Un conjunto de las más usuales que hay que tener en cuenta en el diseño de un circuito con este tipo de dispositivo es el siguiente:

- Impedancia de entrada:

Cuantifica que parte de la señal que proporciona la etapa anterior al amplificador operacional en realidad llega a la entrada de éste. Cuanto mayor sea el valor de esta impedancia, mayor será la relación entre la señal proporcionada y la que llega a la entrada del amplificador. La más importante a efectos prácticos es la impedancia de entrada en modo diferencial, que es la que se puede medir entre los dos terminales de entrada del amplificador operacional cuando una de éstas se conecta a

- Tensión diferencial máxima:

Máxima diferencia de tensión que puede existir entre las dos entradas del amplificador operacional, sin que se produzca la saturación.

- Tensión de entrada en modo común:

Es un rango de valores que delimita el margen de la media aritmética entre las dos tensiones de entrada para las cuales no se produce la saturación del amplificador.

- Tensión de compensación o tensión de offset:

Es la diferencia de tensión que hay que aplicar a las entradas del amplificador operacional para que la tensión de salida sea nula. El parámetro correspondiente a la variación de la tensión de compensación en función de la tensión de alimentación se denomina relación de rechazo de la tensión de alimentación (SVRR).

- Corriente de compensación:

Se define como la diferencia entre las intensidades de corriente continua que es necesario suministrar a los terminales de entrada de un amplificador operacional para obtener una tensión nula a la salida si la tensión de entrada es nula y la tensión de offset está compensada. Esta diferencia se incrementa con la temperatura, la tensión de alimentación y el tiempo de funcionamiento, y dicho incremento se denomina deriva de corriente de compensación.

- Impedancia de salida:

Es la impedancia que puede medirse entre el terminal de salida y masa cuando la tensión y la corriente a la salida son nulas. Cuanto menor sea este valor, menor será la caída de tensión debido a la existencia de esa impedancia a la salida y, por tanto, mayor será el aprovechamiento de la ganancia del amplificador.

- Slew-rate:

Es el valor máximo de la relación que existe entre el cambio de tensión de salida y el tiempo necesario para realizar dicho cambio.

- Corriente de salida:

Es el valor de la intensidad máxima de salida que puede proporcionar el amplificador operacional cuando su terminal de salida se conecta a masa. Este parámetro está estrechamente vinculado a la impedancia de salida.

- Ganancia en bucle abierto:

Es la relación entre la tensión diferencial de entrada y la tensión de salida cuando el circuito no está realimentado. Para muchas aplicaciones es importante que este valor sea lo más elevado posible.

- Factor de rechazo en modo común:

También expresado como CMRR (del inglés Common Mode Rejection Ratio), es un parámetro que indica cuánto más se amplifica la tensión diferencial de entrada que el nivel común de tensión (ruido) que llega a las entradas del amplificador operacional. Es muy importante tener en cuenta este parámetro en las aplicaciones en las que el amplificador operacional se usa básicamente como amplificador diferencial, con una de las dos señales de referencia.

- Ancho de banda:

También expresado con las siglas BW (del inglés Band Width), se define como el valor de frecuencia para el cual la ganancia en bucle abierto del operacional se reduce en un factor raíz de dos. Este parámetro describe el margen de frecuencias para el cual las características del amplificador operacional se mantienen con una aceptable invariabilidad.

- Tiempo de respuesta:

Es el tiempo que transcurre desde el momento en que se aplica una señal a los terminales de entrada del amplificador operacional hasta que se obtiene, a la salida, una respuesta de acuerdo a la señal aplicada.

> Amplificador operacional ideal.

Las características del amplificador operacional ideal se resumen en la siguiente lista:

- Impedancia de entrada infinita, entre los dos terminales de entrada y entre cada terminal de entrada y masa.
- Impedancia de salida nula.
- Ganancia sin realimentación infinita.
- Factor de rechazo en modo común infinito.
- Ancho de banda infinito.
- Corrientes y tensiones de compensación nulas.
- Derivas de temperatura nulas: sus propiedades deben mantenerse estables a cualquier temperatura.

Si en el análisis de los circuitos con amplificadores operacionales se emplean las suposiciones del amplificador ideal, surgen importantes simplificaciones.

Al ser la impedancia de entrada infinita, cualquier corriente que circule en los terminales de entrada no puede penetrar en el amplificador, por lo que deberá seguir otro camino. Debido a que la ganancia en bucle abierto es infinita, para obtener cualquier tensión a la salida no se requiere diferencia de potencial entre los terminales de entrada. La tensión de offset nula implica que si la tensión de salida es cero, la tensión diferencial de entrada es nula.

En estos casos, los efectos debidos a frecuencia y temperatura se ignoran, por lo que todas las características ideales de los amplificadores se cumplen independientemente de la frecuencia y de la temperatura a las cuales trabajen.

> Amplificador operacional no ideal.

Los amplificadores operacionales que se construyen en la actualidad presentan características que casi alcanzan el que se considera ideal y en la mayoría de los casos puede realizarse el diseño de un circuito con amplificadores operacionales suponiendo que en realidad éstos son ideales. Sin embargo, en muchas aplicaciones es importante conocer los efectos que producen las características no ideales.

Los principales efectos son:

- Efecto de una ganancia finita en bucle abierto:

En este caso, la función de transferencia de un circuito para una aplicación específica se verá modificada en un factor que dependerá, en general, del inverso de la ganancia en bucle abierto. En principio, este efecto se puede controlar ajustando la resistencia de realimentación.

- Efecto de la impedancia de entrada finita:

Aquí, la ganancia del circuito se verá afectada debido a que parte de la corriente circulará a través de la impedancia de entrada del operacional. Si las resistencias que componen el circuito se escogen de forma conveniente, este efecto puede minimizarse.

- Efecto de un ancho de banda finito:

Esta propiedad limita el uso del operacional. Para algunas aplicaciones es necesario estudiar previamente la respuesta frecuencial del circuito.

- Efecto de una resistencia de salida no nula:

La tensión de salida se verá modificada por la existencia de esta resistencia a la salida del amplificador.

- Efecto de la tensión de compensación:

En los diseños actuales de amplificadores operacionales se incorporan algunos terminales para compensar esta tensión. El mayor problema que presenta es el desplazamiento, que suele depender en gran medida de la temperatura.

> Circuitos básicos con amplificadores operacionales .

Para comprender las aplicaciones específicas de los circuitos con amplificadores operacionales es necesario conocer sus aplicaciones básicas como amplificador. En la mayor parte de sus aplicaciones, el amplificador operacional trabaja en bucle cerrado y su realimentación determina, en un porcentaje muy elevado, las características de la función de transferencia del circuito.

Comparador

Adaptador de impedancias

Amplificador inversor

Amplificador no inversor

> Circuitos de amplificadores operacionales para el cálculo .

Sumador inversor y no inversor

Restador

Integrador

Derivador

Amplificador logarítmico

> Otros circuitos con amplificadores operacionales.

La adaptabilidad de los amplificadores operacionales, unido a su bajo coste actual, han permitido que su uso se haya extendido a todo el campo de la electrónica. A continuación se definen dos circuitos de especial importancia en el diseño de dispositivos electrónicos.

Osciladores

Convertidor de corriente a tensión y de tensión a corriente

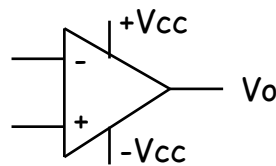


> El amplificador operacional (AO) es un circuito amplificador de elevada ganancia que usa lazos de realimentación para controlar sus características

- Sus características ideales y reales son muy aproximadas:
 - Alta ganancia.
 - Alta impedancia de entrada y baja de salida.
- Circuitos que se pueden realizar: Circuitos de control, Amplificadores, Reguladores, Rectificadores, ...

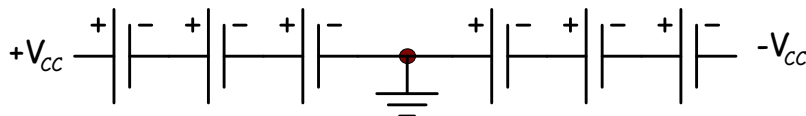
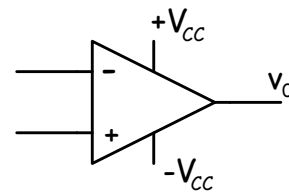
· Símbolo:

- 2 entradas.
 - + Entrada no inversora
 - Entrada inversora
- 1 salida.



> Alimentación del amplificador operacional

- Necesitan de una alimentación simétrica, necesaria para polarizar los transistores internos: +/- 3V y +/- 18V
- El método más sencillo de construir una alimentación simétrica es mediante dos baterías tal y como se indica en la figura.



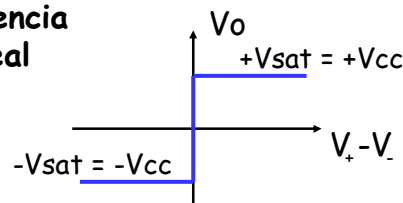
> **AO Ideal.**

- Ganancia de tensión infinita.
- Impedancia de entrada infinita.
- Impedancia de salida nula.

> **Valor de la señal de salida.**

$$V_o = A_v \cdot (v_+ - v_-) \begin{cases} v_+ > v_- \rightarrow V_o = +\infty \\ v_+ < v_- \rightarrow V_o = -\infty \\ v_+ = v_- \rightarrow V_o = \text{Indeterminado} \end{cases}$$

Nota: Indeterminado significa que puede tomar valores entre $+V_{cc}$ y $-V_{cc}$ en este caso se dice que esta en saturación.

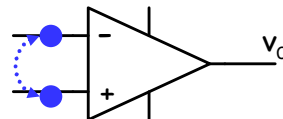
> **Función de transferencia estática de un AO Ideal**

Fco. Javier Hernández Canals

637

> **Amplificador operacional realimentado negativamente.**

- Para que el amplificador operacional no esté saturado y podamos controlar la tensión de salida, es necesario que trabaje con realimentación negativa (consiste en establecer una conexión entre la salida y la entrada inversora)
- En esta situación: $v_+ - v_- = 0 \rightarrow v_+ = v_-$. Trabaja en zona lineal.

- **Consideraciones:**

- * Los terminales de entrada tienen una impedancia de entrada infinita, por lo que las corrientes de entrada son nulas.
- * Existe un "cortocircuito virtual" entre la entrada inversora y la no inversora (por el no circula corriente)

Fco. Javier Hernández Canals

638

> Aplicaciones lineales del AO

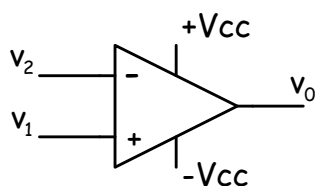
- No está saturado.
- No existen elementos externos no lineales (diodos, transistores, ...)
- Circuito trabaja con realimentación negativa.

· Circuitos más importantes: Seguidor de tensión, Amplificador inversor, Amplificador no inversor, Sumador inversor ponderado, Sumador no inversor ponderado, Amplificador con eliminación del nivel de continua, Amplificador diferencial, Amplificador diferencial de instrumentación, Amplificador de intensidad con carga flotante, Amplificador de intensidad con carga a masa, Convertidor tensión - corriente, Convertidor corriente - tensión, Fuente de corriente constante, Integrador inversor con condensador flotante, Integrador no inversor, Derivador inversor, Derivador no inversor.

> Aplicaciones no lineales.

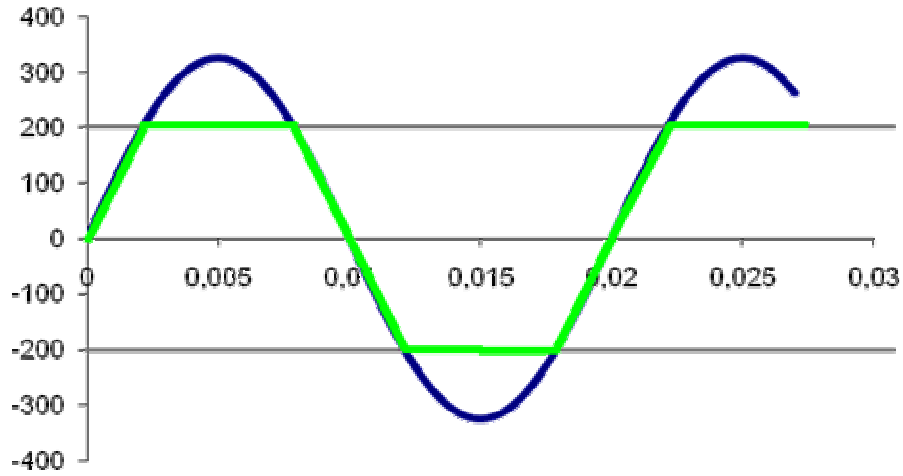
- Se trabaja en la zona de saturación.
- * No existe realimentación negativa (o existe una realimentación positiva mayor)
- * Trabaja en bucle abierto (Sin realimentaciones)
- * Únicamente existe realimentación positiva.

NOTA: si el circuito posee realimentación negativa y elementos activos, el análisis del circuito se realiza igual que para las aplicaciones lineales, pues aunque la respuesta no lo sea trabaja en la zona lineal.



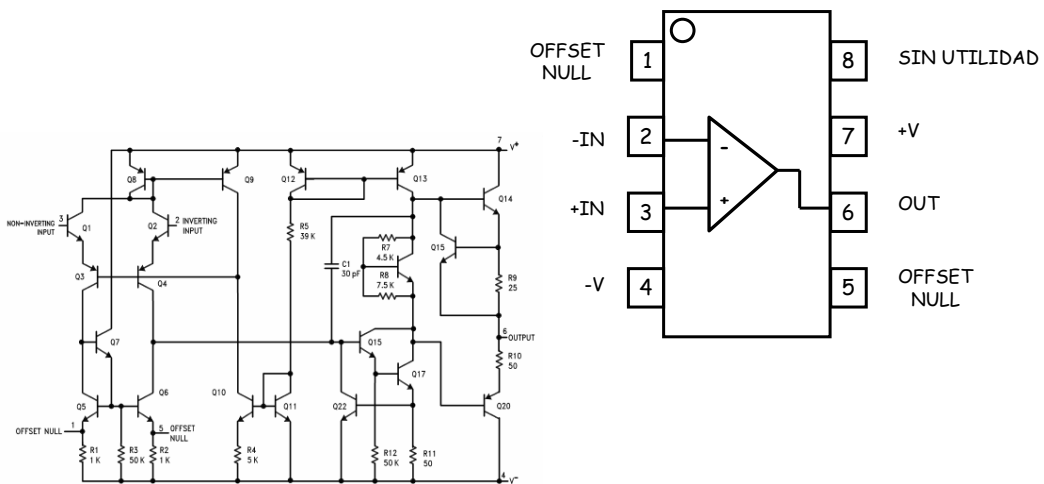
$$v_o = A_v \cdot (v_+ - v_-)$$

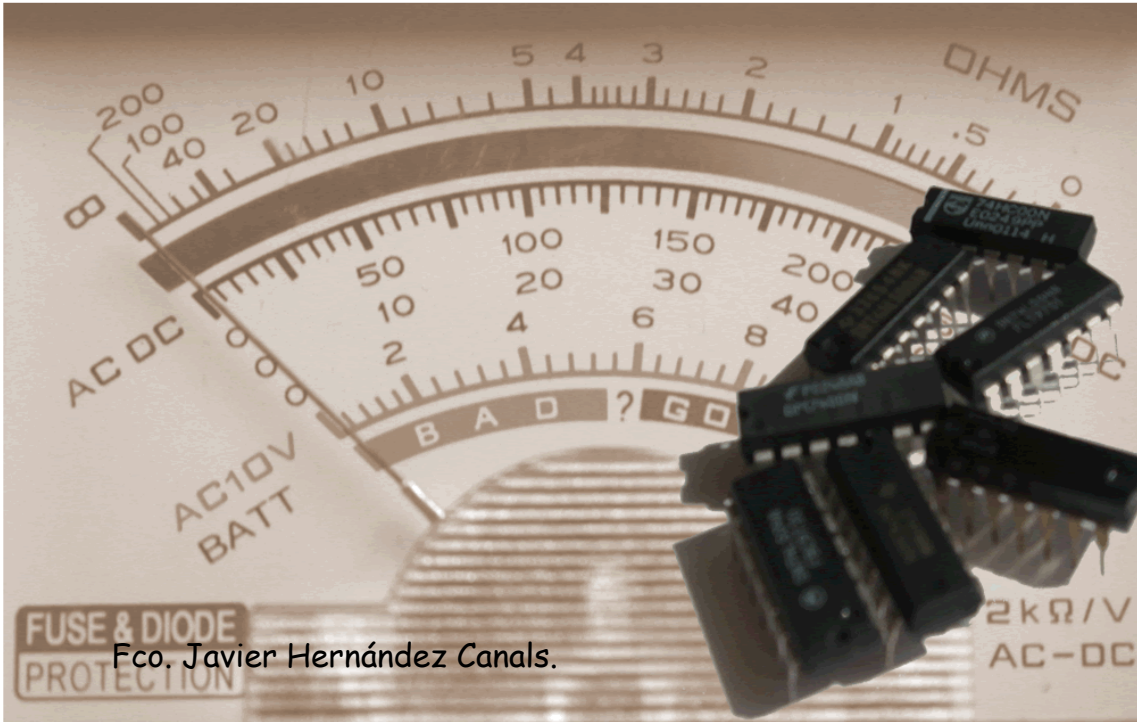
> Limitación de la tensión de salida.



> Amplificador 741

Este amplificador operacional es el más utilizado.





Fco. Javier Hernández Canals.