

AMPLIFICADORES OPERACIONALES

Realizado por : Ing. Pablo Morcelle del Valle

1. Introducción

El circuito electrónico conocido como **amplificador operacional** (AmpOp) ha cobrado una importancia cada vez mayor. Sin embargo, un análisis detallado de este circuito requiere una comprensión de dispositivos electrónicos tales como los transistores. Se verá a lo largo del presente capítulo que no resulta completamente necesario entender la operación de los componentes electrónicos que gobiernan su comportamiento. Son varias las razones para ello. En primer lugar, resulta perfectamente posible apreciar el modo en que puede usarse un AmpOp como bloque componente de otros circuitos más complejos centrándose simplemente en el comportamiento que presenta en sus terminales. En segundo lugar, el modelo de circuito del AmpOp requiere el uso de una fuente dependiente; de esta forma, el lector tendrá la posibilidad de utilizar este tipo de fuente en un circuito práctico, en lugar de como un componente de circuito abstracto. En tercer lugar, puede combinarse el AmpOp con resistencias y capacitores para realizar operaciones matemáticas.

La Figura 1 muestra el circuito real completo de un amplificador operacional comercial. El mismo está conformado por una considerable cantidad de componentes: 22 transistores, 11 resistores, 1 diodo y 1 capacitor; es decir, 35 elementos de circuito confinados a una superficie de menos de 1 mm² (*circuito integrado*).

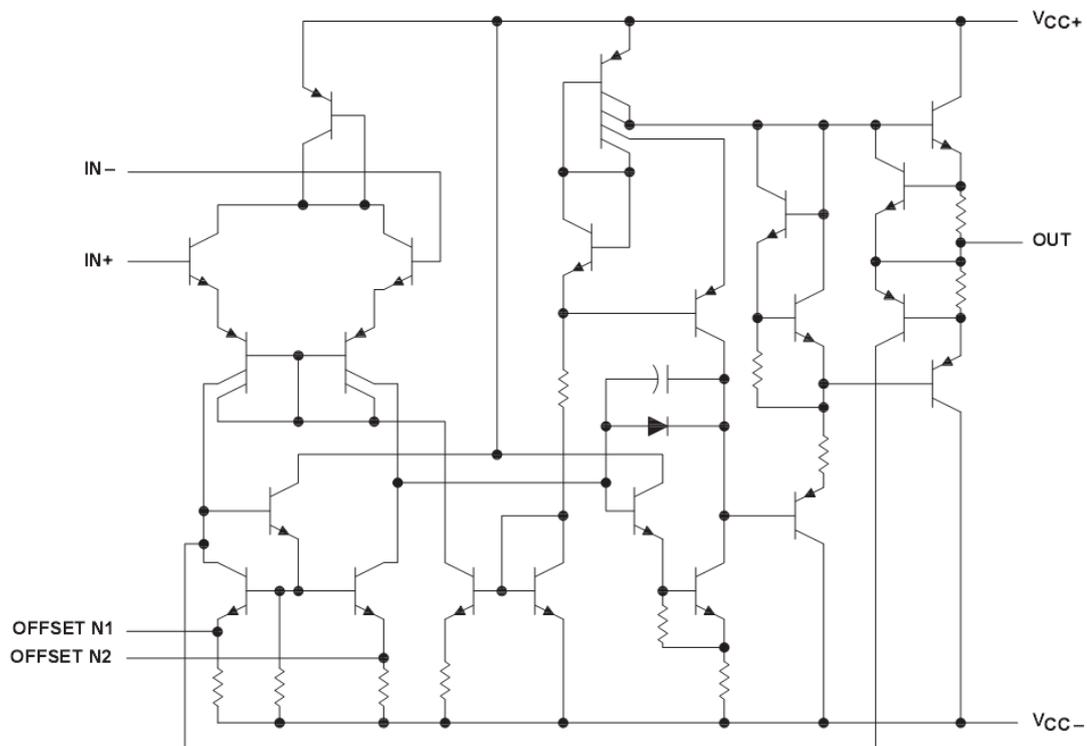


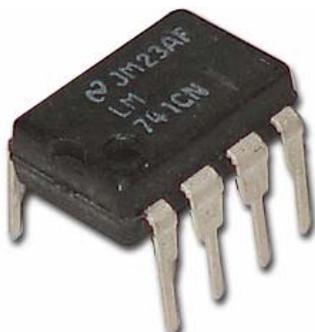
Figura 1 - Circuito real completo de un amplificador operacional (Fuente: hojas de datos del AmpOp μ A741 de Texas Instruments)

Una discusión completa de lo que hay dentro de un AmpOp está más allá del objetivo de este capítulo. Resultará suficiente tratar al AmpOp como un bloque constitutivo de circuito ("caja negra") y estudiar simplemente lo que ocurre en sus terminales. Un AmpOp se diseña de modo que efectúe algunas operaciones matemáticas cuando se le conectan componentes externos, como resistencias y capacitores. Por lo tanto, no interesa la estructura interna del amplificador ni las corrientes y tensiones que existen dentro de esta estructura. Lo que hay que tener en mente es que el comportamiento interno del amplificador es el responsable de las restricciones de tensión y de corriente impuestas en los terminales.

El término *amplificador operacional* fue introducido en 1947 por John Ragazzini y sus colegas en su trabajo sobre computadoras analógicas, realizado para el Consejo de Investigación de la Defensa Nacional de los Estados Unidos durante la Segunda Guerra Mundial. Los primeros amplificadores operacionales utilizaron tubos de vacío ("válvulas"), en vez de transistores.

El AmpOp es fundamental en los circuitos por su flexibilidad. Es una unidad electrónica que se comporta como una fuente de tensión controlada por tensión. También puede emplearse para fabricar una fuente de corriente controlada por tensión o por corriente. Un AmpOp puede sumar señales, amplificar o cambiar el signo de una señal, integrarla o diferenciarla. La capacidad del amplificador operacional para efectuar estas operaciones matemáticas constituye la razón por la que se lo llama de esta manera. Es la razón también del extenso uso de los amplificadores operacionales en el diseño analógico. Estos elementos son comunes en el diseño de circuitos prácticos debido a que son flexibles, económicos, fáciles de usar y es divertido trabajar con ellos.

Los amplificadores operacionales se consiguen comercialmente en paquetes de circuitos integrados en varias formas. La Figura 2 presenta un encapsulado típico de AmpOp en línea doble de 8 terminales (o DIP, por sus siglas en inglés de *dual in-line package*).



Detalle del encapsulado



Comparación de tamaño

Figura 2 - AmpOp con encapsulado DIP

Las Figuras 3 y 4 muestran la identificación de los terminales de un AmpOp con encapsulado DIP y su correspondencia con el símbolo de circuito representativo más difundido.

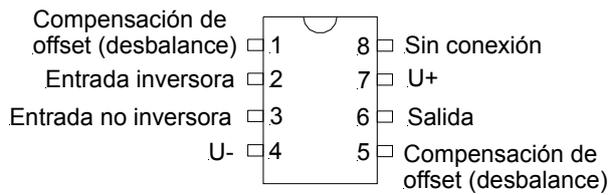


Figura 3 - Identificación de los terminales de un AmpOp con encapsulado DIP de 8 terminales

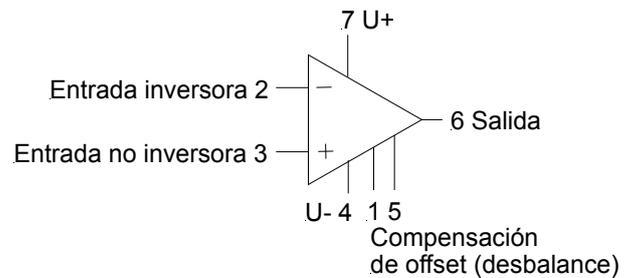


Figura 4 - Símbolo de circuito y su correspondencia con el encapsulado DIP

Si bien las Figuras 3 y 4 muestran la identificación de los terminales de un AmpOp real, el alcance del presente capítulo no involucra a los terminales 1 y 5.

2. Modelo y funcionamiento del amplificador operacional

2.1 Modelo

El símbolo de circuito para el AmpOp es el mostrado en la Figura 4. El AmpOp tiene dos entradas y una salida de señal. Las entradas se marcan con menos (-) y más (+) para especificar las entradas inversora y no inversora, respectivamente. Una entrada aplicada al terminal no inversor aparecerá con la misma polaridad en la salida; en tanto que una entrada que se aplique al terminal inversor aparecerá invertida en la salida.

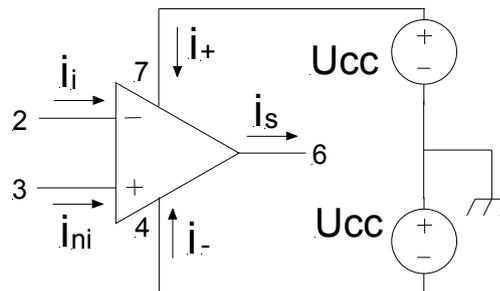


Figura 5 - Corrientes en un AmpOp

Siendo un elemento activo, es necesario un suministro de tensión de alimentación al AmpOp, como se muestra en la Figura 5. Aunque los suministros de potencia se ignoran a menudo en los diagramas de circuito en aras de la simplicidad, no deben pasarse por alto las corrientes del suministro de potencia, y por la segunda ley de Kirchhoff resulta:

$$i_s = i_i + i_{ni} + i_+ + i_- \quad (1)$$

En la Figura 6 se presenta un modelo real del circuito equivalente de un AmpOp.

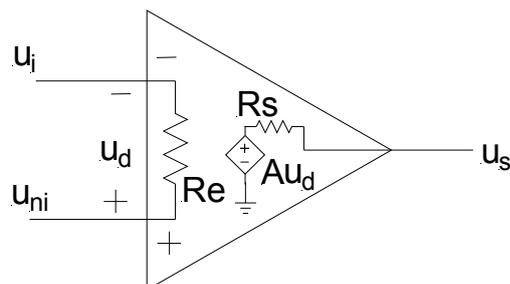


Figura 6 - Modelo real de un AmpOp

La sección de salida está compuesta por una fuente de tensión dependiente, controlada por la tensión de entrada al amplificador, en serie con la resistencia de salida R_s . Al observar la Figura 6, resulta evidente que la resistencia de entrada R_e es la resistencia equivalente de Thevenin vista desde los terminales de entrada; en tanto que la resistencia de salida R_s corresponde a la resistencia de Thevenin equivalente vista en la salida.

La tensión de entrada diferencial u_d está dada por:

$$u_d = u_{ni} - u_i$$

donde u_1 es la tensión entre el terminal inversor y tierra, y u_2 es la tensión entre el terminal no inversor y tierra. El AmpOp registra las dos entradas, la multiplica por la ganancia A y provoca que la tensión resultante aparezca a la salida. De tal manera, la salida u_o resulta:

$$u_s = A \cdot u_d = A \cdot (u_{ni} - u_i)$$

el factor A se denomina *ganancia en tensión de lazo abierto* debido a que se trata de la ganancia del AmpOp sin ninguna *realimentación* externa de la salida a la entrada. La Tabla 1 muestra los rangos de valores típicos que se pueden encontrar de la ganancia en tensión A , la resistencia de entrada R_e , la resistencia de salida R_s y la tensión de alimentación U_{cc} , según los diferentes modelos de amplificador operacional.

Tabla 1- Valores de los parámetros del amplificador operacional

Parámetro	Rango de valores	Valores ideales
Ganancia de lazo abierto, A	10^5 a 10^8	∞
Resistencia de entrada, R_e	10^6 a $10^{13} \Omega$	∞
Resistencia de salida, R_s	10 a 100Ω	0
Tensión de alimentación, U_{cc}	5 a 24 V	-

Para el amplificador operacional $\mu A741$ presentado precedentemente, los valores típicos de R_e , A y R_s son $2 M\Omega$, 10^5 y 75Ω , respectivamente.

El concepto de realimentación es crucial para nuestro entendimiento de los circuitos de AmpOp. Una realimentación negativa se obtiene cuando la salida alimenta de nuevo al terminal inversor del AmpOp. Cuando hay una trayectoria de realimentación de la salida a la entrada, la proporción entre la tensión de salida y la de entrada recibe el nombre de *ganancia de lazo cerrado*. Como resultado de la realimentación negativa, puede demostrarse que la ganancia de lazo cerrado es casi insensible a la ganancia de lazo abierto A del AmpOp. Por esta razón, los amplificadores operacionales se utilizan en circuitos con trayectorias de realimentación.

A pesar de lo que el término *realimentación negativa* pueda sugerir en una primera instancia, desde el punto de vista de la electrónica una realimentación negativa es sinónimo de estabilidad.

2.2 Saturación

Una limitación práctica del AmpOp es que la magnitud de su tensión de salida no puede superar el valor $|U_{cc}|$. En otras palabras, la tensión de salida es dependiente y está limitada por la tensión del suministro de potencia.

La Figura 7 ilustra que es posible operar el AmpOp en tres modos, según la tensión de entrada diferencial u_d .

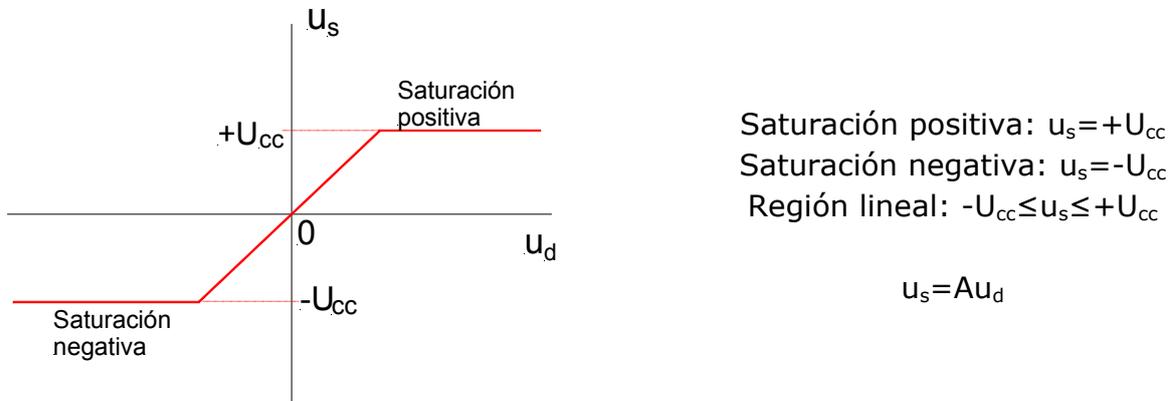


Figura 7 - Tensión de salida del AmpOp en función de la tensión de entrada diferencial y los tres modos de funcionamiento

Si intentamos incrementar u_d más allá del intervalo lineal, el AmpOp se satura y produce $u_s = +U_{cc}$ o $u_s = -U_{cc}$. A lo largo de este capítulo se supondrá que los amplificadores operacionales operan en el modo lineal. Esto quiere decir que la tensión de salida está restringida por

$$-U_{cc} \leq u_s \leq +U_{cc}$$

Aunque el AmpOp siempre debe operar en la región lineal, la posibilidad de saturación debe tenerse presente al diseñar dichos elementos en la práctica real.

3. Amplificador operacional ideal o teórico

Para facilitar el entendimiento de los circuitos de AmpOp supondremos que éstos son ideales. Un AmpOp es ideal si tiene las siguientes características:

- Ganancia infinita de lazo abierto: $A \rightarrow \infty$.
- Resistencia de entrada infinita: $R_e \rightarrow \infty$.
- Resistencia de salida cero: $R_s = 0$.

Si bien suponer un AmpOp ideal ofrece sólo un análisis aproximado, los amplificadores más modernos tienen ganancias e impedancias de entrada tan grandes que el análisis aproximado resulta adecuado. A menos que se señale de otra manera, supondremos a partir de ahora que todo amplificador operacional es ideal.

Para el análisis de circuitos, el AmpOp ideal se ilustra en la Figura 8 la cual se obtiene del modelo no ideal de la Figura 6. Dos características importantes del AmpOp ideal son:

- 1- Las corrientes en ambos terminales de entrada son cero:

$$i_+ = 0 \quad \text{e} \quad i_- = 0 \quad (2)$$

Esto se debe a la resistencia de entrada infinita. Una resistencia infinita entre los terminales de entrada implica que ahí existe un circuito abierto y que no puede entrar corriente al amplificador operacional. Sin embargo, la corriente de salida no necesariamente es cero, según la ecuación (1).

2- La tensión de salida es el producto de la ganancia de lazo abierto por la diferencia entre las tensiones de los terminales no inversor e inversor; es decir:

$$u_s = (u_{ni} - u_i) A \rightarrow \infty \quad \text{pues } A \rightarrow \infty \quad (3)$$

Si bien la conclusión obtenida de (3) puede parecer "inadecuada", en un ejemplo que sigue se verá la ventaja de este resultado.

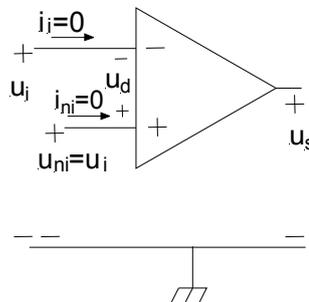


Figura 8 - Modelo del AmpOp ideal

4. Configuraciones de circuito elementales de amplificador operacional

Se deben entender como *configuraciones* de circuito de AmpOp las diferentes combinaciones de elementos pasivos asociadas a un AmpOp que permiten realizar los distintos procesamientos de la señal de entrada (generalmente tensión) con el objeto de obtener la señal de salida deseada.

En los apartados que siguen, se presentarán y analizarán las configuraciones más comunes de AmpOp. El análisis se hará con el detalle necesario y suficiente que permita extender los razonamientos a otro tipo de configuraciones menos comunes.

Debe tenerse siempre presente que en los análisis que siguen, y a menos que se mencionen lo contrario, el modelo de AmpOp utilizado será el ideal o teórico, lógicamente funcionando en la región lineal.

4.1 Seguidor de tensión

El circuito se representa en la Figura 9. Es la configuración más sencilla de AmpOp.

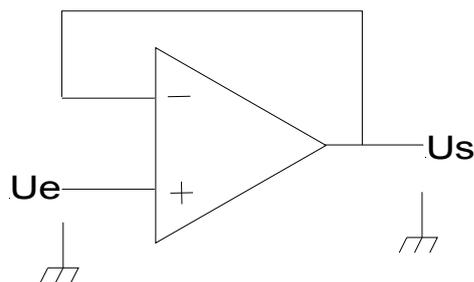


Figura 9 - Seguidor de tensión

El término "seguidor de tensión" se refiere a que la tensión de la salida del AmpOp "sigue" a la de entrada. En el siguiente análisis se verá qué significa esto.

En particular, este circuito no posee elementos externos al AmpOp en el sentido estricto. Se puede observar de la Figura 9 que el terminal de salida se encuentra conectado al terminal inversor mediante un conductor de resistencia nula. La tensión de entrada proveniente de una fuente u_f se aplica al terminal no inversor, respecto

de tierra (referencia); mientras que la tensión de salida u_s se mide respecto de la misma referencia.

En estas condiciones, se puede analizar por LKT la malla conformada por u_e , u_d y u_s , resultando:

$$u_e = u_d + u_s$$

Y recordando que para el AmpOp ideal, $u_s = (u_{ni} - u_i) A$, queda:

$$u_s = (u_{ni} - u_i) A = (u_e - u_s) A = u_a A - u_s A$$

y operando, resulta:

$$u_s = u_e A / (1 + A) \approx u_e \quad \text{pues } A \rightarrow \infty$$

Vale decir que este circuito reproduce la tensión de entrada en el terminal de salida (se suele referir que la tensión de salida "sigue" a la de entrada).

Aquí hay que detenerse un momento para observar un detalle fundamental para los estudios que siguen. Claramente se ve, en base a lo mencionado en párrafos anteriores, que en este circuito el AmpOp está *realimentado negativamente*. Se puede verificar que en esta condición *la tensión del terminal no inversor coincide con la del terminal inversor*, por lo tanto $u_d = 0$.

Esta conclusión se obtuvo para una configuración sencilla del AmpOp, pero queda como ejercicio para el lector verificarla para cualquier otra configuración de las que se verán más adelante.

Este resultado constituye el concepto que suele denominarse **cortocircuito virtual**, al cual nos referiremos a menudo durante la resolución de los diferentes circuitos con amplificadores operacionales. Y la denominación es adecuada teniendo en cuenta que *el cortocircuito virtual está conformado por dos puntos que se encuentran a la misma tensión pero entre los cuales no existe corriente*, recordando que en un AmpOp ideal no ingresa corriente por los terminales de entrada.

Aquéllos que recién se inician en el estudio de circuitos, y en particular de los amplificadores operacionales, a menudo se preguntan qué utilidad puede tener esta configuración, en la cual se incorpora un elemento de cierta complejidad para "no cambiar nada" en el circuito. A los fines didácticos es posible usar un burdo ejemplo, como sigue.

Supóngase que se tiene una fuente de tensión real (u_f , R_i), la cual debe aplicarse a una resistencia de carga R_c . La Figura 10 muestra el circuito planteado.

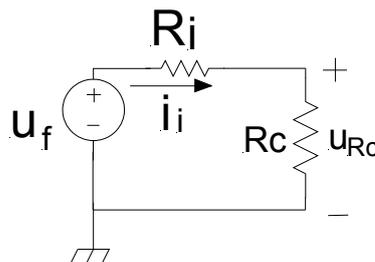


Figura 10 - Fuente de tensión real aplicada a una carga

Supóngase, además, que el valor de la resistencia de carga es comparable con el valor de la resistencia interna de la fuente, es decir, $R_c \approx R_i$. Por lo tanto, la tensión resultante sobre el resistor de carga vale

$$u_{Rc} = \frac{R_c}{R_i + R_c} u_f \approx \frac{u_f}{2}$$

Con lo cual, la tensión sobre el resistor de carga distará sobremanera del valor esperado, que debería ser próximo a u_f .

La incorporación de un AmpOp en configuración seguidor de tensión entre la fuente y la carga, según muestra la Figura 11, subsana el inconveniente.

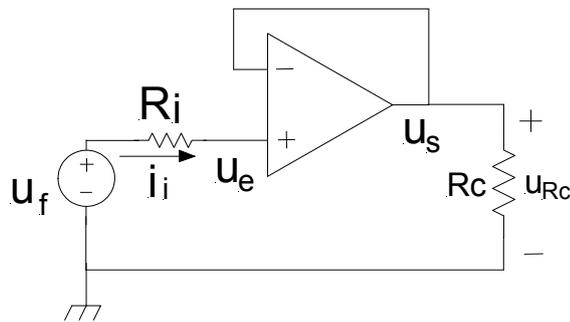


Figura 11 - Fuente de tensión real aplicada a una carga a través de un seguidor de tensión

Según se observa en la Figura 11, al no circular corriente entre la fuente y el AmpOp, no hay caída de tensión sobre R_i ; con lo cual la tensión en el terminal no inversor es igual a la de la fuente. A su vez, teniendo en cuenta las características del AmpOp ideal, la tensión de salida de éste resulta igual a la del terminal no inversor, es decir, igual a la tensión de la fuente.

Comprendido el funcionamiento del seguidor de tensión, se puede comenzar a analizar algunos circuitos importantes basados en amplificador operacional.

4.2 Amplificador inversor

La Figura 12 muestra un circuito de AmpOp en configuración inversora.

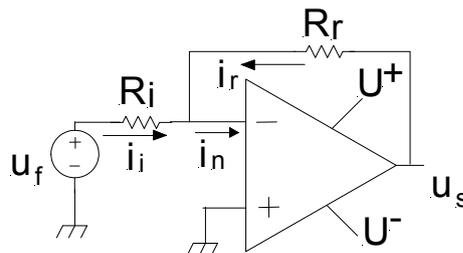


Figura 12 - Circuito amplificador inversor

Se puede observar que, además del amplificador operacional, el circuito está compuesto por dos resistores (R_i y R_f), una fuente de tensión como señal de entrada (u_f) y un cortocircuito vinculando la entrada no inversora y el nodo común (tierra).

El objetivo del presente análisis (y de todo lo que siga de aquí en adelante) es obtener una expresión de la tensión de salida u_s en función de la tensión de fuente, u_f .

Si se aplica la ley de nodos en el terminal inversor del AmpOp, se obtiene:

$$i_i + i_r = i_n$$

Las corrientes de entrada a los terminales inversor y no inversor son nulas en una AmpOp ideal, por lo tanto $i_n = 0$, resultando

$$i_i = -i_r \quad (4)$$

Por otra parte, el potencial de dicho nodo es cero, puesto que para el AmpOp ideal la tensión entre los terminales inversor y no inversor u_d resulta nula, y este último terminal se encuentra conectado a tierra. Por lo tanto, recorriendo las mallas de entrada y de salida hasta N de acuerdo a la segunda ley de Kirchhoff, respectivamente se tiene:

$$u_f = i_i R_i \quad \text{y} \quad u_s = i_r R_r \quad (5)$$

Sustituyendo las ecuaciones (5) en la ecuación (4), es posible determinar la tensión de salida en función de la de entrada.

$$u_s = -\frac{R_r}{R_i} u_f \quad (6)$$

Se debe observar que la tensión de salida es una réplica invertida y cambiada de escala de la tensión de entrada. La inversión de signo entre la entrada y la salida es, por supuesto, la razón para denominar a este circuito amplificador *inversor*. El factor de escala, o *ganancia de lazo cerrado*, es el cociente R_r/R_i .

El resultado dado por la Ecuación (5) sólo es válido si el amplificador operacional mostrado en el circuito de la Figura 12 es ideal; es decir; si A es infinita y si la resistencia de entrada es infinita. Para un amplificador operacional práctico la ecuación 6 constituye una aproximación usualmente bastante buena.

La ecuación 6 es importante porque indica que si la ganancia A del amplificador operacional es grande, la ganancia del amplificador inversor se puede fijar mediante las resistencias externas R_r y R_i . El límite superior de la ganancia (o *factor de amplificación de lazo cerrado*) R_r/R_i está determinado por las tensiones de alimentación y por el valor de la tensión de señal u_f . Si se tienen tensiones de alimentación simétricas, es decir $U^- = -U^+ = U_{cc}$, se obtiene

$$|u_s| \leq U_{cc} \quad \left| -\frac{R_r}{R_i} u_f \right| \leq U_{cc} \quad \frac{R_r}{R_i} \leq \left| \frac{U_{cc}}{u_f} \right|$$

Por ejemplo, si $U_{cc} = 15 \text{ V}$ y $u_f = 10 \text{ mV}$, el cociente R_r/R_i debe ser inferior a 1500.

En el circuito amplificador inversor mostrado en la Figura 12, la resistencia R_r proporciona la conexión de realimentación negativa; es decir, conecta el terminal de salida con el terminal de la entrada inversora. Si se elimina R_r , el camino de realimentación queda abierto y se dice que el amplificador estará operando en lazo abierto. La Figura 13 muestra la operación en lazo abierto.

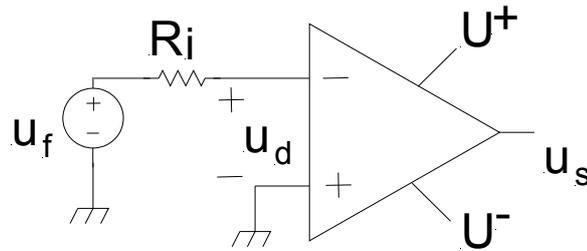


Figura 13 - Circuito amplificador operando en lazo abierto

La ruptura del camino de realimentación cambia drásticamente el comportamiento del circuito. En primer lugar, la tensión de salida será ahora:

$$u_s = Au_d \quad (6)$$

Suponiendo, como antes, que $U^- = -U^+ = U_{cc}$, entonces $|u_d| \leq \frac{U_{cc}}{A}$ para poder mantener el sistema en la región de operación lineal. Puesto que la corriente de la entrada inversora es prácticamente igual a cero, entonces la caída de tensión en bornes de R_i es prácticamente cero, luego la tensión de la entrada inversora es casi igual a la tensión de señal U_f . Pero además, debería cumplirse que $u_d \approx u_f$. Por tanto, el amplificador operacional puede funcionar en lazo abierto en el modo lineal sólo si $|u_f| < \frac{U_{cc}}{A}$. Si $|u_f| > \frac{U_{cc}}{A}$, el AmpOp simplemente se satura. En particular, $u_f < -\frac{U_{cc}}{A}$, el amplificador operacional se satura en $+U_{cc}$ y si $u_f > \frac{U_{cc}}{A}$, el amplificador operacional se satura en $-U_{cc}$. La relación mostrada en la ecuación (6) se aplica cuando no hay camino de realimentación, y es por ello que el valor de A se denomina a menudo *ganancia en lazo abierto* del amplificador operacional.

El mismo razonamiento seguido para el análisis del AmpOp en configuración inversor puede usarse para analizar cualquier otra configuración.

4.3 Amplificador sumador

La tensión de salida en un amplificador sumador es una suma cambiada de escala y cambiada de signo de las tensiones aplicadas a la entrada del amplificador. La Figura 14 muestra un amplificador sumador con tres tensiones de entrada.

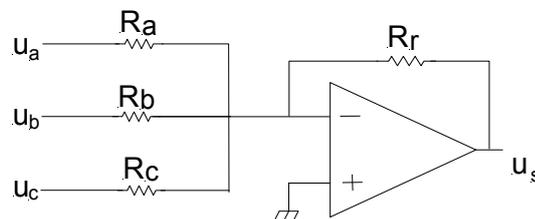


Figura 14 - Circuito amplificador sumador

La relación entre la tensión de salida u_s y las tres tensiones de entrada u_a , u_b y u_c se puede obtener planteando la LKC en el nodo N, o bien aplicando el principio de superposición; no olvidando las restricciones de tensión y de corriente en la entrada del amplificador operacional ideal.

El resultado obtenido en cualquier caso, es:

$$u_s = -\left(\frac{R_f}{R_a}u_a + \frac{R_f}{R_b}u_b + \frac{R_f}{R_c}u_c\right)$$

Se deja al lector la demostración de este resultado.

Si $R_a = R_b = R_c = R_i$, la ecuación anterior se reduce a:

$$u_s = -\frac{R_r}{R_i}(u_a + u_b + u_c)$$

Finalmente si $R_a = R_b = R_c = R_i$, la tensión de salida es la suma, con signo cambiado, de las tensiones de entrada:

$$u_s = -(u_a + u_b + u_c)$$

Aunque se ha ilustrado el amplificador sumador con sólo tres señales de entrada, la cantidad de tensiones de entrada puede aumentarse según sea necesario. Por ejemplo, pueden sumarse 16 señales de audio grabadas por separado con el fin de formar una única señal de audio. La configuración de amplificador sumador de la Figura 14 podría incluir 16 valores de resistencia de entrada distintos, de modo que cada una de las pistas de audio de entrada apareciera en la señal de salida con un factor de amplificación distinto. El amplificador sumador juega, así, el papel de un mezclador de audio.

4.4 Amplificador no inversor

La tensión de salida del amplificador no inversor tiene el mismo signo que la de entrada (de allí su nombre) y el factor de amplificación de lazo cerrado es combinación de las resistencias conectadas al terminal inversor.

La Figura 15 muestra circuito amplificador no inversor. La fuente de señal está representada por u_f en serie con R_i (fuente real). Para la determinación de la tensión de salida se aplican las restricciones correspondientes al AmpOp ideal operando entro de la zona lineal.

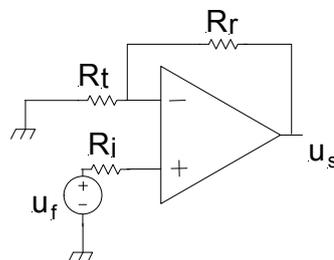


Figura 15 - Circuito amplificador no inversor

Al igual que antes, el lector debería llegar al siguiente resultado, de acuerdo al análisis planteado:

$$u_s = \frac{R_r + R_t}{R_t} u_f$$

También debe observarse que la resistencia interna de la fuente real no aparece en el resultado. ¿Por qué?

El mismo resultado debería obtenerse observando que el circuito, desde el punto de vista de la tensión de salida, es un divisor de tensión no cargado (recordar que la corriente de entrada al AmpOp vale cero); y que la tensión de la fuente es la "tensión del divisor", como se ve a continuación:

$$u_f = \frac{R_t}{R_r + R_t} u_s$$

4.5 Amplificador derivador o diferenciador

El amplificador operacional en configuración derivador o diferenciador, proporciona a la salida una tensión que resulta proporcional la derivada o diferencial de la señal de tensión de entrada. El circuito se muestra en la Figura 16.

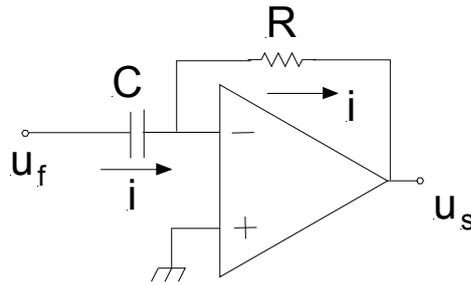


Figura 16 - Circuito amplificador derivador o diferenciador

Como en todos los casos analizados anteriormente, teniendo en cuenta las restricciones de tensión y corriente en la entrada del AmpOp, resulta:

$$u_s = -RC \frac{du_f}{dt}$$

Se propone al lector demostrar la expresión anterior, recordando que la relación fundamental entre la tensión y la corriente en un capacitor se expresa de la siguiente manera:

$$i_c = C \frac{du_c}{dt}$$

A pesar de que la expresión teórica de la tensión de salida de esta configuración resulta adecuada matemáticamente, este circuito se utiliza muy raramente en la práctica debido a que la operación de diferenciación de cualquier señal tiende a amplificar los ruidos presentes en la misma (se sugiere al lector ensayar una fundamentación apropiada para esta afirmación).

4.6 Amplificador integrador

El amplificador operacional en configuración integrador, entrega en la salida una tensión proporcional a la integral de la señal de tensión de entrada. El circuito se muestra en la Figura 17.

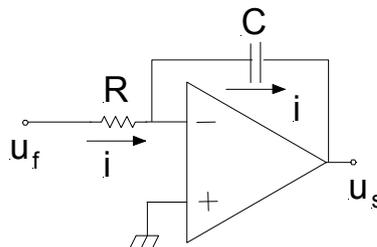


Figura 17 - Circuito amplificador integrador

De forma similar a los casos ya estudiados, resulta:

$$u_s = -\frac{1}{RC} \int u_f dt$$

El lector debe poder demostrar la expresión anterior, recordando nuevamente la relación fundamental entre la tensión y la corriente en un capacitor:

$$i_c = C \frac{du_c}{dt}$$

4.7 Conversor de corriente en tensión

El conversor de corriente en tensión es un circuito muy útil en aplicaciones industriales, debido a la inmunidad al ruido electromagnético que presentan las señales de corriente en comparación con la influencia que aquél genera sobre estas últimas. Además, dispositivos electrónicos tales como fotoceldas y tubos fotomultiplicadores, se comportan básicamente como fuentes de corriente con admitancia interna finita pero extremadamente baja.

Una de las ventajas de este tipo de circuitos es que resulta sumamente sencillo de implementar con amplificadores operacionales. La Figura 18 muestra un conversor de corriente en tensión con amplificador operacional.

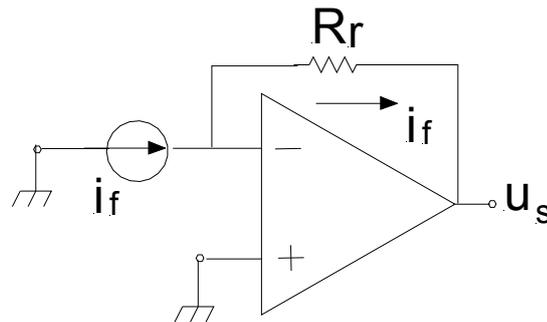


Figura 18 - Conversor de corriente en tensión con amplificador operacional

Del análisis de este circuito, realizado a partir de las consideraciones tenidas en cuenta en los casos estudiados anteriormente, resulta que:

$$u_s = i_f \cdot R_f$$

La fuente de corriente, que puede estar representando el modelo de comportamiento de alguno de los elementos mencionados en el primer párrafo del presente apartado, se consideró ideal en la Figura 18, puesto que la admitancia interna de la misma es cero. Es importante tener presente que si la fuente de corriente presenta admitancia distinta de cero, la corriente de conversión (que circula por la resistencia de realimentación) ya no será exactamente i_f .

4.8 Amplificador de carga

Los transductores del tipo piezoeléctrico representan una familia muy común destinada a la medición de fuerza, presión o aceleración. Estos elementos generan una carga eléctrica en respuesta a la deformación (la cual a su vez es provocada por una fuerza externa aplicada), tal como se puede ver en el capítulo *Transductores e Instrumentación*; en donde, además, se menciona que un elemento de este tipo se puede modelar en forma sencilla como una fuente de corriente con una capacitancia en paralelo a modo de admitancia interna. En realidad, dicha fuente de corriente representa la tasa de variación de la carga generada como respuesta a la fuerza externa aplicada; mientras que la capacitancia es consecuencia de la estructura del transductor, consistente en un dieléctrico (cristal piezoeléctrico) colocado entre dos electrodos metálicos, conformando de esta manera un capacitor de placas paralelas.

De esta forma, en la Figura 19 se muestra un amplificador de carga cuya fuente de señal tiene las características mencionadas en el párrafo anterior.

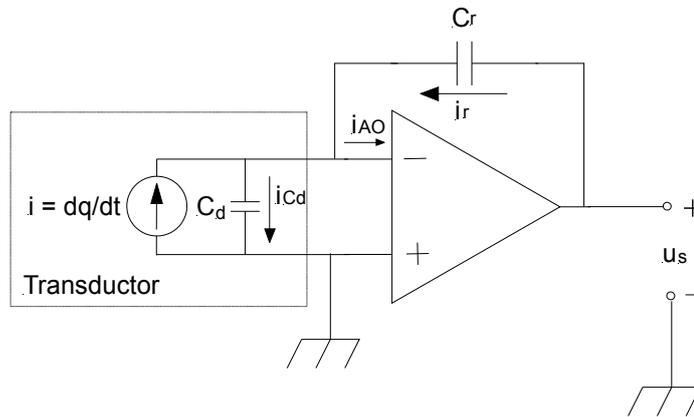


Figura 19 - Amplificador de carga

El amplificador de carga es básicamente un circuito integrador caracterizado por una impedancia de entrada extremadamente alta; lo cual resulta esencial pues, de otra forma, la carga generada por el transductor se fugaría a tierra a través de la entrada del amplificador, considerándose entonces que la corriente de entrada del amplificador es despreciable. Por otra parte, si se supone que la capacitancia del cristal es suficientemente pequeña, la parte de la carga que pudiese desviarse por C_d también sería despreciable. En consecuencia, toda la corriente en el capacitor de realimentación C_r resulta prácticamente igual a la entregada por la fuente:

$$i_r = -i$$

Además debe observarse que, debido a las hipótesis planteadas para el AmpOp ideal, la tensión sobre el transductor resulta efectivamente igual a cero. Por lo tanto, la expresión de la tensión de salida vale:

$$u_s = -\frac{1}{C_r} q$$

Si la magnitud de la carga generada por el piezoeléctrico es proporcional a la deformación x_i , resulta:

$$u_s = -\frac{1}{C_r} K_p x_i$$

con $q = K_p \cdot x_i$.

4.9 Amplificador diferencial

La Figura 20 presenta un amplificador diferencial constituido a partir de un AmpOp.

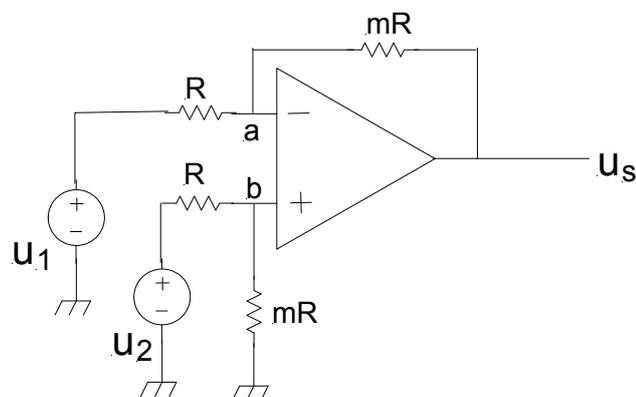


Figura 20 - Amplificador diferencial

Este tipo de amplificador es una combinación de los amplificadores no inversor e inversor. De hecho, una forma de análisis del mismo se puede efectuar aplicando el principio de superposición.

El lector debería demostrar que la tensión de salida vale:

$$u_s = m(u_2 - u_1)$$

Esta expresión indica que el amplificador diferencial *amplifica la diferencia de las dos señales de entrada*.

En la práctica es muy común la necesidad de amplificar la diferencia entre dos señales, que a su vez se encuentran contaminadas por ruido o algún otro tipo de interferencia. En estos casos, el amplificador diferencial suministra una herramienta invaluable para amplificar la señal deseada a la vez que se rechaza el ruido indeseable. Esto se puede visualizar fácilmente a partir de la Figura 21.

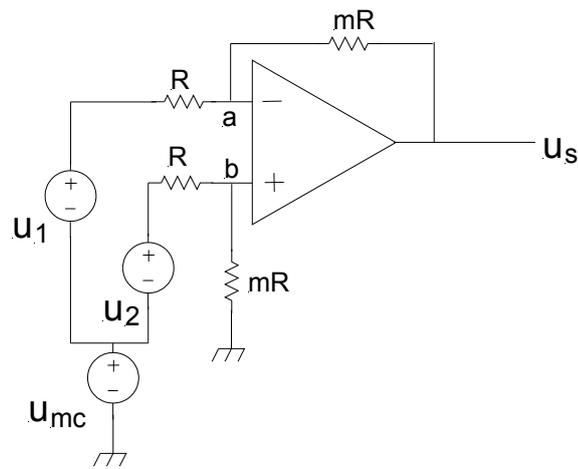


Figura 21 - Amplificador diferencial con una tensión de "modo común"

Si se supone que el ruido se puede representar con una fuente de tensión U_{MC} ; y que además, dicha señal de ruido se suma en forma simultánea a las fuentes de señal deseadas como se muestra en la Figura 21 (lo cual ocurre muy frecuentemente en la práctica), es posible demostrar (como ejercicio para el lector) que dicha U_{MC} no aparece en la salida. Es por ello que en estos casos suele hablarse de señales de *modo común* y señales de *modo diferencial*. En consecuencia, una vez demostrado que U_{mc} no aparece a la salida, salta a la vista la habilidad del amplificador diferencial de **amplificar sólo las señales de modo diferencial**, mientras que **rechaza las de modo común**.

En los amplificadores reales, el rechazo de las señales de modo común no es completo; por ello suele hablarse de una figura representativa de la calidad de un amplificador diferencial, denominada *relación de rechazo de modo común*. El estudio de esta situación queda fuera de los alcances del presente texto.

4.10 Amplificador diferencial y el puente de Wheatstone

En aplicaciones orientadas a la medición, resulta frecuente la combinación de un puente de Wheatstone con un amplificador operacional en configuración diferencial; dado que se puede advertir claramente que la señal de salida de un puente de este tipo es la diferencia de dos señales u_a y u_b , como se observa en la Figura 22, en la cual sólo una de las resistencias del puente es variable.

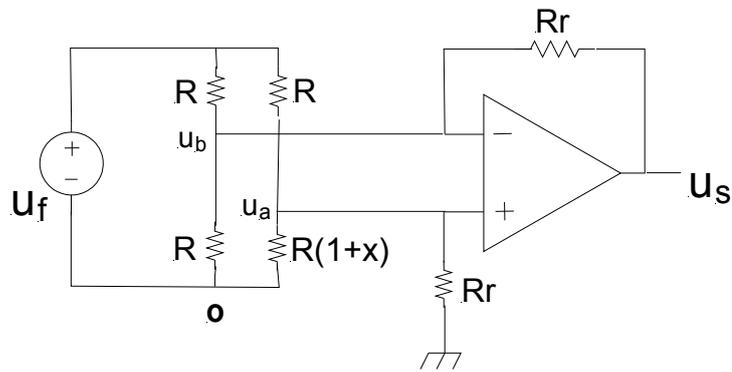


Figura 22 - Combinación de un puente de Wheatstone y un amplificador diferencial

Es posible analizar este circuito, al igual que el del apartado anterior, aplicando el principio de superposición. Dado que las tensiones u_a y u_b se pueden calcular a partir de los divisores de tensión definidos por las ramas respectivas, y que cada una de dichas tensiones se pueden representar mediante los correspondientes circuitos equivalentes de Thevenin; el circuito de la Figura 22 puede transformarse en el de la Figura 23.

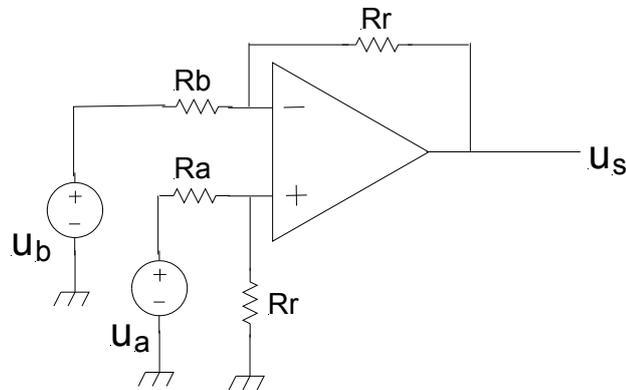


Figura 23 - Circuito con equivalentes de Thevenin de la combinación de un puente de Wheatstone y un amplificador diferencial

Según se observa en la Figura 23, cabe hacer la siguiente pregunta: ¿por qué es posible que la referencia de tensión de las fuentes equivalentes de Thevenin sea la misma que la del resistor R_r conectado al termina no inversor del AmpOp; es decir *tierra*?

Dado que en la Figura 22 la tensión del punto **o** es común tanto a u_a como a u_b , y dado que no es posible asignar un valor fijo de tensión a dicho punto (puede ser que dicho valor no sea conocido), es razonable pensar que la tensión del punto **o** es de *modo común*, de acuerdo a lo expresado.

Siendo así, la tensión del punto **o** es *rechazada* por la configuración diferencial y no aparece a la salida del amplificador. Por lo tanto, el dibujo del circuito de la Figura 23 es válido.

Resta sólo determinar los valores de u_a , u_b , R_a y R_b ; cuyo cálculo queda como ejercicio para el lector. Los valores resultan:

$$u_a = \frac{(1+x)}{(2+x)}E \quad u_b = \frac{E}{2}$$

$$R_a = \frac{(1+x)}{(2+x)}R \quad R_b = \frac{R}{2}$$

Se puede observar que las resistencias de Thevenin no resultan iguales; esto podría dar origen a algún inconveniente, dado que el amplificador diferencial requiere que las resistencias conectadas a los terminales inversor y no inversor sean iguales, de acuerdo a lo ya analizado en el apartado 4.9. De cualquier modo, se continuará el presenta análisis, con lo cual resulta:

$$u_s = \frac{x}{(2+x)(1+x)} \frac{R_r}{R} U_f$$

Se observa que la tensión de salida del amplificador diferencial es función de U_f , R , R_r y x , con el inconveniente que la dependencia respecto de x no es lineal, algo deseable por simplicidad.

Pero también se puede observar que si los valores de x son pequeños, es decir que si el rango de variación de la resistencia variable es suficientemente acotado se tiene:

$$u_s \approx \frac{R_r}{2R} \frac{x}{\left(1 + \frac{R}{2R_r}\right)} U_f \quad \text{si } x \ll 1$$

Cumpliendo la aproximación indicada, se logra linealidad entre u_s y x .

Una configuración muy utilizada se basa en un puente en el cual las cuatro resistencias varían simultáneamente y en la misma magnitud. En esta situación se puede realizar un análisis similar al anterior, pero teniendo en cuenta que las cuatro resistencias varían según el circuito de la Figura 24.

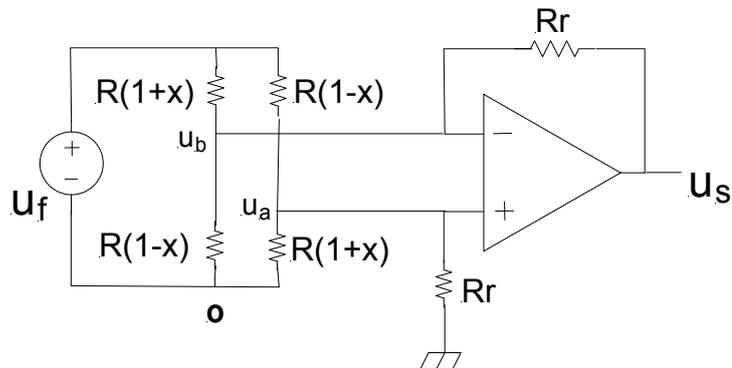


Figura 24 - Puente de Wheatstone con cuatro resistencias variables y un amplificador diferencial

Este es el caso de los transductores de presión resistivos que se estudian en detalle en el capítulo Transductores e Instrumentación. Estos elementos se construyen especialmente para que cumplan con la función específica de comportarse como un puente de Wheatstone en el cual las cuatro resistencias varían como se indica en la Figura 24.

Los correspondientes resultados, a demostrar por el lector, se indican a continuación:

$$u_a = \frac{U_f}{2} (1+x) \quad u_b = \frac{U_f}{2} (1-x)$$

$$R_a = R_b = \frac{R}{2}$$

$$u_s = 2 \frac{R_r}{R} U_f x$$

Como se puede observar al efectuar la demostración de estos resultados, no es necesario realizar aproximaciones para determinar el valor final de u_s , por lo cual la linealidad entre la tensión de salida y x se obtiene directamente.

5. Comentarios finales

A lo largo del presente capítulo se analizaron diferentes configuraciones de amplificador operacional, siempre teniendo en cuenta el modelo ideal de este último.

Para finalizar el estudio de los amplificadores operacionales, se propone a modo de ejemplo efectuar el análisis del circuito seguidor de tensión (la configuración más simple de las vistas), pero utilizando un modelo un poco más realista del AmpOp.

En la Figura 25 se representa el circuito seguidor de tensión, pero utilizando el modelo real del AmpOp visto en la Figura 6.

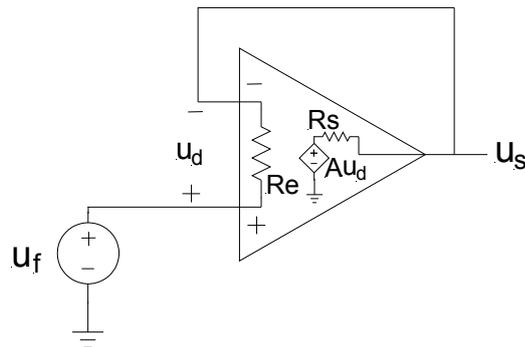


Figura 25 - Circuito seguidor de tensión asociado al modelo real del AmpOp

Para simplificar el análisis, se puede redibujar el circuito según la Figura 26.

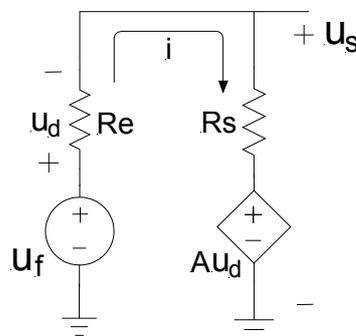


Figura 26 - Circuito simplificado del seguidor de tensión asociado al modelo real del AmpOp

Planteando la tensión u_s por los dos caminos posibles (rama izquierda y rama derecha, respectivamente) resulta:

$$u_s = u_f - u_d = u_f - iR_e$$

$$u_s = iR_s + Au_d = iR_s + AiR_e$$

De la segunda se puede despejar i :

$$i = \frac{u_f - u_s}{R_e}$$

que, reemplazada en la primera y luego de hacer álgebra, permite obtener u_s en función de u_f :

$$u_s = u_f \frac{\left(\frac{R_s}{R_e} + A \right)}{\left(1 + \frac{R_s}{R_e} + A \right)}$$

Esta expresión muestra cierta complejidad y difiere bastante de la vista en el apartado 4.1 del presente capítulo. Pero teniendo presente los valores teóricos de R_s , R_e y A ; o aún los valores reales de un AmpOp comercial práctico, se pueden efectuar aproximaciones con los criterios que se indican a continuación.

R_s es muy pequeña (teóricamente $R_s=0$) con relación a R_e (teóricamente $R_e \rightarrow \infty$), con lo cual el cociente R_s/R_e es prácticamente cero, con lo que resulta:

$$u_s = u_f \frac{A}{(1+A)}$$

Por otra parte, dado que A es mucho mayor que 1 (teóricamente $A \rightarrow \infty$), el cociente $\frac{A}{(1+A)}$ resulta prácticamente igual a 1 y $u_s = u_f$, resultado que coincide con el del punto 4.1.

Estos criterios pueden aplicarse a cualquier análisis de circuitos con amplificadores operacionales, invitándose al lector a resolver los circuitos vistos utilizando el circuito real del AmpOp, y finalmente realizar las aproximaciones correspondientes, verificando los resultados del punto 4.

6. Bibliografía

- "Fundamentos de circuitos eléctricos"; C. K. Alexander, M. N. O. Sadiku. Editorial McGraw Hill.
- "Circuitos eléctricos"; J. W. Nilsson, S. A. Riedel. Editorial Pearson-Prentice Hall.
- "Operational Amplifiers - Design and Applications"; L. G. Graeme, G. E. Tosey, L. P. Huelsman. McGraw-Hill Book Company.
- "Principios y aplicaciones de ingeniería eléctrica"; G. Rizzoni. Editorial McGraw-Hill.
- "Transducer interfacing handbook. A guide to analog signal conditioning". Editado por D. H. Sheingold. Publicado por Analog Devices Inc.