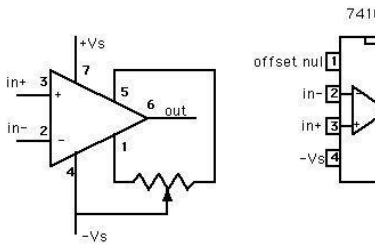


Diapositiva 1

El amplificador operacional como generador de tensión diferencial -voltaje controlado



The diagram on the left shows an operational amplifier with a feedback loop. The non-inverting input (pin 3, labeled 'in+') is connected to pin 7 (+Vs). The inverting input (pin 2, labeled 'in-') is connected to pin 4 (-Vs). The output (pin 6, labeled 'out') is connected to pin 5, which is also connected to pin 1. A feedback resistor is connected between pin 1 and pin 4. The diagram on the right shows the pin configuration for a 741CN operational amplifier. Pin 1 is labeled 'offset nul', pin 2 is 'in-', pin 3 is 'in+', pin 4 is '-Vs', and pin 5 is '741CN'.

Los amplificadores operacionales son amplificadores diferenciales de alto rendimiento. Tienen entradas de bucle cerrado y de corriente invertida y, normalmente, líneas de alimentación 2 DC.

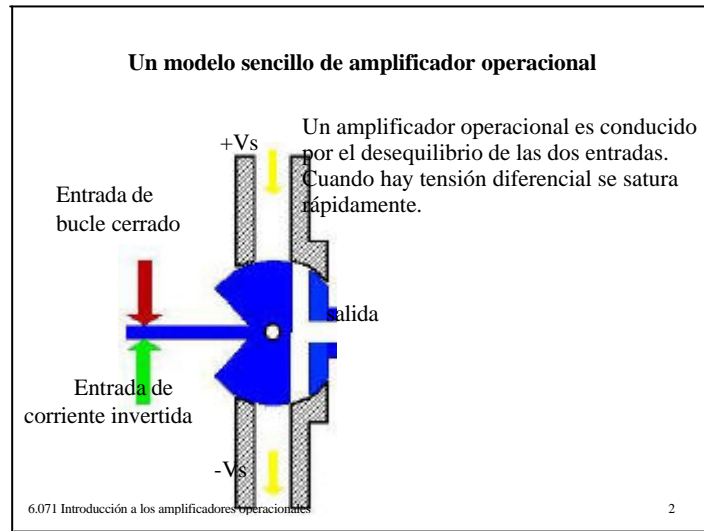
El 741 es un buen amplificador operacional de uso general en encapsulado DIP.

6.071 Introducción a los amplificadores operacionales 1

Hemos visto ya que con distintos transistores se pueden hacer conmutadores, osciladores, amplificadores, moduladores, etc. pero que no son muy cómodos de usar. Aunque los transistores siguen siendo las bases esenciales de la mayoría de los elementos interesantes de los circuitos, se han combinado en configuraciones y paquetes estándar que funcionan a un nivel más alto y dan mayor rendimiento. Evidentemente, así se obtiene una gran variedad e incluso clases nuevas de dispositivos, como la separación entre circuitos analógicos y digitales. Uno de los ejemplos más útiles de estos dispositivos analógicos de alto nivel con los amplificadores operacionales.

Éstos son amplificadores diferenciales (tienen dos entradas y el voltaje de salida es una copia ampliada de la diferencia entre las entradas).

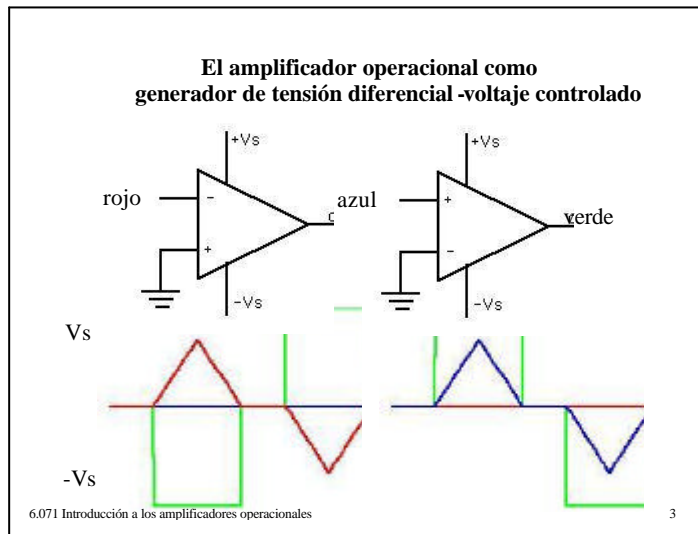
Diapositiva 2



Con esta analogía nos acercamos a la dinámica de un amplificador operacional. Al hacerse finita la diferencia de fuerza entre ambas entradas, la pieza azul gira y la salida se conecta a una de las dos tensiones de alimentación. Los canales son tales que la salida se envía rápidamente a la alimentación $+V$ o $-V$. Cuando se restaura el equilibrio entre las entradas la salida vuelve a ser cero.

Quiero dejar claro con esta analogía que es muy difícil mantener las entradas en un estado tal que la salida esté entre \pm de la tensión de alimentación.

Diapositiva 3

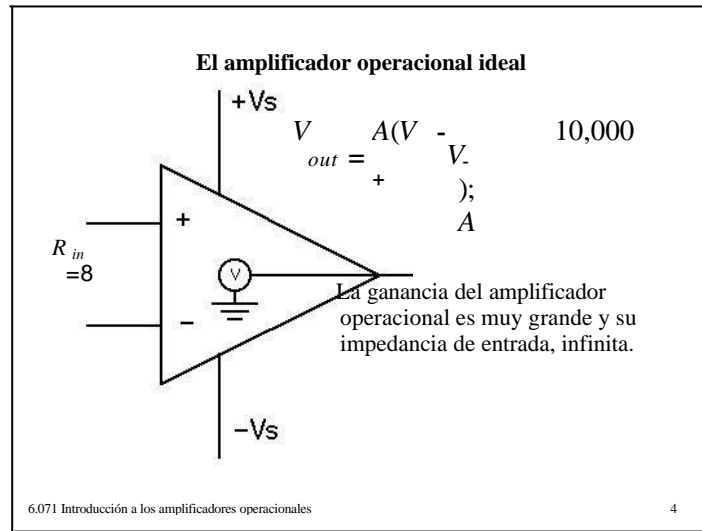


El ejemplo del amplificador operacional como amplificador diferencial de alta ganancia aclara que la salida es conducida muy rápidamente a las tensiones de salida. Con una ganancia de en torno a un millón, sólo hace falta una diferencia de unos cuantos microvoltios entre ambas entradas para llevar al amplificador a la saturación.

Si la entrada + (de bucle cerrado) es mayor que la - (invertida) el amplificador se satura a la + $V_{alimentación}$.

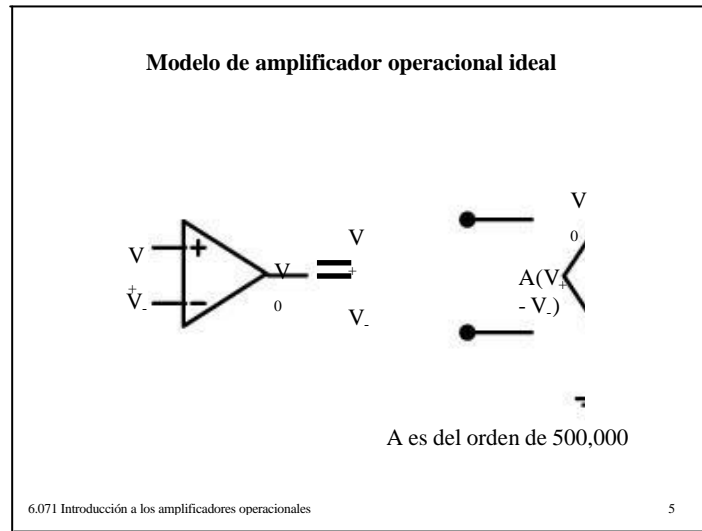
Cuando la entrada de corriente invertida se alimenta con las formas de onda dadas, la salida está fuera de fase con la entrada, y cuando es la entrada de bucle cerrado la que se alimenta con las ondas, es la salida la que está en fase con la entrada.

Diapositiva 4



El amplificador operacional ideal tiene una ganancia infinita, una impedancia de entrada infinita y una impedancia de salida arbitrariamente baja. Evidentemente, nada de esto es cierto, pero se puede utilizar estos ideales para diseñar circuitos y facilitar así el proceso en gran medida. Está claro que un amplificador ideal como ese sería maravilloso, con su infinita impedancia de entrada nunca cargaría ningún circuito y podría conducir cualquier carga sin que deje de funcionar. Como se verá, con una ganancia infinita se puede usar la retroalimentación para elegir cualquier ganancia que se desee. Un problema de estos amplificadores es que A no es un buen parámetro, ya que varía en cada dispositivo y depende de la temperatura y las condiciones de funcionamiento. Los buenos diseños de amplificadores operacionales evitan dependencias de A .

Diapositiva 5

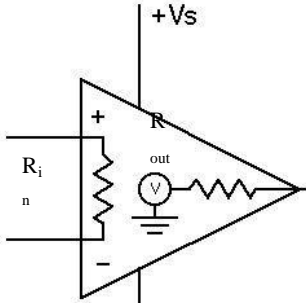


El modelo mostrado arriba es el que se suele dar para amplificadores operacionales. Se trata de un concepto bastante útil: la idea básica es que las dos entradas tengan impedancias de entrada arbitrariamente altas y que la diferencia de voltaje entre ellas actúa como generador de tensión independiente, con ganancia alta.

Sucede que con sólo un par de reglas sencillas (como para los transistores BJT) se puede diseñar y analizar circuitos amplificadores operacionales de manera mucho más eficiente. Por eso no se usará el modelo, que en nuestra opinión es más útil en circuitos que en electrónica.

Diapositiva 6

Amplificadores operacionales reales



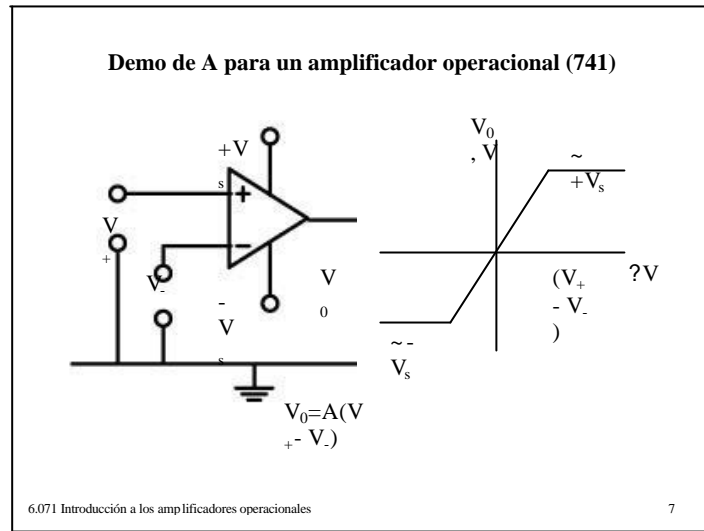
- La ganancia de bucle ideal es infinita, la real, de $A \sim 10^4$ a 10^6 .
- R_{in} de $\sim 10^6$ a $10^{12} \Omega$.
- R_{out} de $\sim 10 \Omega$ a 1000Ω .
- Flujo de potencia limitado.
- La corriente de entrada es muy cercana a cero, nA \rightarrow pA.
- Presillas en $\pm V_s$.

$$V_{out} = -A(V_{in} - V_{out})$$

6.071 Introducción a los amplificadores operacionales 6

Ahora llegamos a los amplificadores operacionales reales, que son similares al ideal, pero con las limitaciones descritas en el cuadro de arriba. Además, hay que recordar que A depende de todo.

Diapositiva 7



Un buen modo de considerar un amplificador operacional es correlacionando la entrada y salida de voltaje. Dado que sólo nos interesa la tensión de entrada diferencial, el eje horizontal es ese y el vertical es la tensión de salida. El gradiente de la curva es en el centro de A (la ganancia de bucle abierto del amplificador operacional), y las regiones planas es donde el amplificador se ha saturado y está reportando los raíles de voltaje o alimentaciones..
Nótese que, dado que A es grande, el gradiente de la curva es alto y por los tanto los dos ejes tiene diferentes unidades: microvoltios para la entrada y voltios para la salida.

Diapositiva 8

Demo de A para amplificadores operacionales (741)

$$-80dB = 10 \log \frac{P_o}{P_i}$$

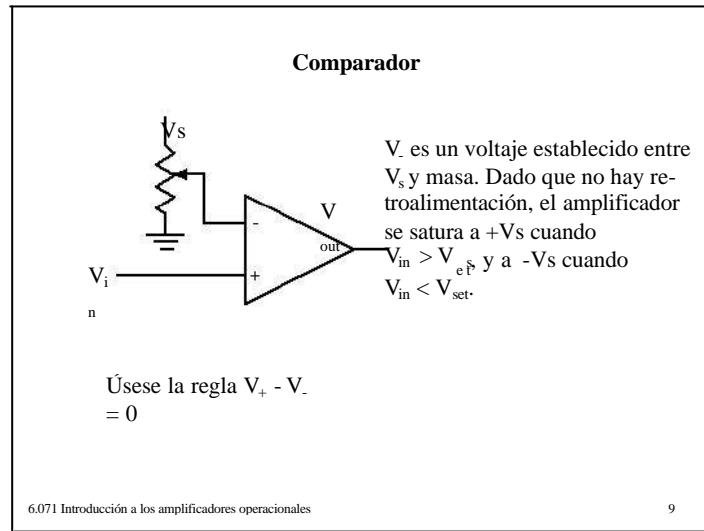
Aquí tenemos impedancia constante, por tanto $P = \frac{V^2}{R}$

$$-80dB = 10 \cdot \log \frac{\frac{V_o^2}{R}}{\frac{V_i^2}{R}} = 20 \log \frac{V_o}{V_i} \Rightarrow \frac{V_o}{V_i} = 10^{-4}$$

6.071 Introducción a los amplificadores operacionales 8

Esta primera demo incluye un atenuador para reducir la escala de la salida y simplificar la medición. El del ejemplo es un atenuador de 80 dB y por lo tanto, reduce el voltaje por un factor de 10.000, suponiendo que la impedancia sea constante.

Diapositiva 9



Uno de los usos de los amplificadores operacionales con una gran ganancia de bucle abierto es como comparador. Si V_{in} es mayor que el voltaje establecido, la salida será en el riel positivo de alimentación, y de lo contrario, en el negativo. La ganancia es tan alta que no se puede establecer la salida entre los raíles.

Diapositiva 10

Retroalimentación negativa

Es fácil evitar que estos amplificadores se saturen mediante retroalimentación negativa. Hay que tomar parte de la salida e inyectarla en la entrada de corriente invertida. En el amplificador ideal la corriente que atraviesa R_F es igual y opuesta a la que atraviesa R_{in} .

Emparejar las corrientes:
$$I_{in} R_i = - I_{out} R_F$$

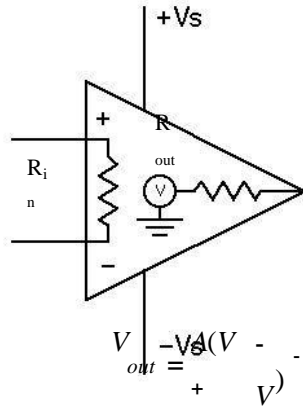
Ganancia resultante:
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = - \frac{R_F}{R_i}$$

6.071 Introducción a los amplificadores operacionales 10

Sin embargo, en casi todas las aplicaciones de los amplificadores operacionales se ve implicada la retroalimentación negativa. En este caso, parte de la tensión de salida se retroalimenta a la entrada de corriente invertida del amplificador. A medida que éste adquiere más ganancia, la salida crece y dado que va a parar a la entrada invertida, la salida se ve reducida. Muy rápidamente, el amplificador halla su punto de funcionamiento. Esta es la ventaja de tener un A enorme: así el dispositivo es muy rígido y alcanza su punto de funcionamiento muy rápido. Nótese que el punto de funcionamiento no depende de A , ya que A es grande.

Diapositiva 11

Reglas para amplificadores operacionales con retroalimentación



Cuando el amplificador ha alcanzado su punto de funcionamiento:

1. Los dos voltajes de entrada son iguales.
2. La corriente que va a cada entrada es cero.

$$V_{out} = -V_s \left(\frac{R_i}{R} \right)$$

6.071 Introducción a los amplificadores operacionales 11

Estas son las dos reglas prometidas para amplificadores operacionales con retroalimentación. La primera afirma que la diferencia de voltaje llega a cero y por ello no hay voltaje de salida. Esto se sigue del comportamiento del amplificador operacional ideal. La regla de la corriente se puede considerar como: una corriente de entrada suministra un voltaje interno que el amplificador corregirá ajustando el voltaje de salida. Por lo tanto, es la misma regla que la anterior, pero escrita en cuanto a una corriente efectiva en las entradas.

Diapositiva 12

Uso de la retroalimentación negativa

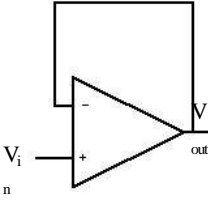
Para la retroalimentación negativa, el amplificador operacional ajusta su salida de manera que el voltaje o la corriente de retroalimentación son los necesarios para mantener $v_+ - v_-$ igual a cero.

6.071 Introducción a los amplificadores operacionales 12

Hay dos métodos sencillos de utilizar la retroalimentación negativa. Por supuesto, ésta debe ir siempre a la entrada invertida, pero el generador puede ir también a la entrada invertida (teniendo así un amplificador de inversión) o a la entrada de bucle cerrado y producir un amplificador no invertido. La fuerza de la retroalimentación (qué parte de la salida se realimenta) determinará la ganancia del dispositivo.

Diapositiva 13

Amplificador seguidor de tensión o de ganancia unitaria



Para $V_+ - V_-$ a igual a cero, entonces $V_{out} = V_{in}$.
Por tanto, la ganancia es 1.

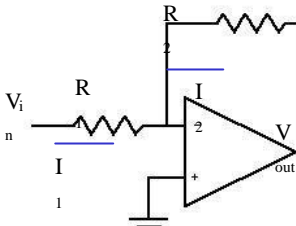
Recuérdese que la impedancia de entrada de un amplificador operacional es bastante alto, así que el acumulador intermedio suministra la impedancia de la transformación y protege a V_{in} de la carga.

6.071 Introducción a los amplificadores operacionales 13

Aquí, el amplificador es conducido en la entrada de bucle continuo con el voltaje de salida alimentando directamente a la entrada invertida. El amplificador operacional amplificará hasta que los voltajes de la entrada de corriente invertida y la de bucle cerrado sean los mismos. Por supuesto, esto sólo puede ocurrir si la salida es igual a la entrada. Así, el seguidor de tensión tiene ganancia unitaria (el voltaje de salida es el mismo que de entrada). Evidentemente, la impedancia de entrada del amplificador es bastante alta y la impedancia de salida es baja, así que hay una transformación de impedancia que puede generar ganancia de potencia. En general, cuando se usan ambas entradas, hay que tratar de aplicar la regla que dice que los voltajes deben ser iguales. En este caso no hay modo de usar la regla en la que las corrientes son cero (aunque en esencia lo son, por ser tan alta la impedancia).

Diapositiva 14

Amplificador inversor



$$\frac{I_1}{V_i} = \frac{I_2}{V} = -\frac{1}{2R}$$

Utilícese la regla en la que la corriente I_1 es zero.

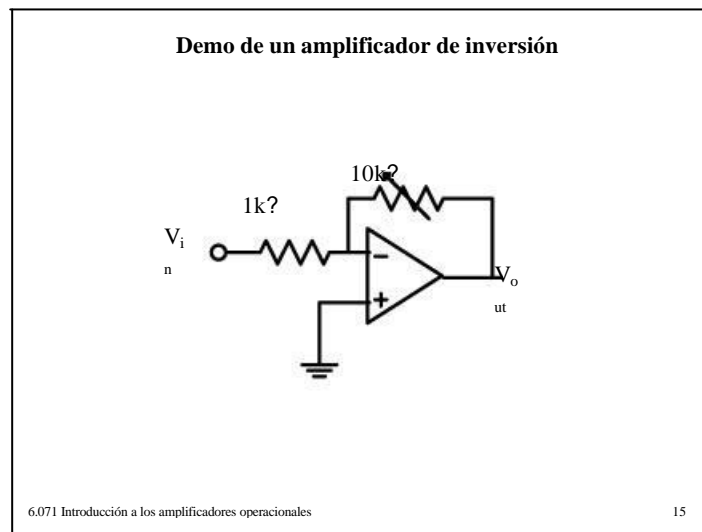
Para evitar errores de offset póngase un $R = R_1 || R_2$ a masa desde la entrada de bucle cerrado.

6.071 Introducción a los amplificadores operacionales 14

El amplificador inversor tiene la entrada de bucle cerrado a masa y suma las entradas de la entrada y la salida a la entrada inversa. El modo de analizar esto es dándose cuenta de que cuando I_1 y I_2 son iguales y opuestas la corriente no fluye a la entrada del amplificador operacional y los dos voltajes de entrada serán iguales. Es decir: en estos amplificadores, tanto la trayectoria de entrada como la de retroalimentación conducen la misma resistencia interna. Por tanto, si las dos corrientes son iguales pero opuestas en signo, los voltajes que inducen a través de esta resistencia interna serán también iguales y opuestos, y como resultado el voltaje total que pasa a la terminal de inversión es cero. Las corrientes vienen dadas arriba, y si se establecen iguales y opuestas, se produce directamente la ganancia.

En la práctica hay una pequeña corriente de entrada en la entrada inversa, y por ello es normal incluir una resistencia a masa desde la entrada de bucle cerrado para dar la misma impedancia efectiva. El efecto es pequeño, pero observable.

Diapositiva 15



En esta demo se comparan los voltajes de entrada y salida de un amplificador de inversión. Bajando la resistencia variable de retroalimentación se puede hacer que la ganancia sea muy pequeña y, en esencia, el dispositivo pasa a ser un amplificador con ganancia menor que 1 o atenuador.

Diapositiva 16

Amplificador no invertido

Úsese la regla en que $V_+ - V_-$ es igual a cero.

Para evitar errores de offset, dispóngase que $R_{fuente} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$

$$V_+ = V_i$$

$$V_- = \frac{V_{out}}{R_1 + R_2} R_2$$

$$V_+ = V_-$$

$$V_i = \frac{V_{out}}{R_1 + R_2} R_2$$

$$V_{out} = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_2} \right) V_i$$

6.071 Introducción a los amplificadores operacionales 16

El amplificador no invertido envía la entrada a la terminal de bucle cerrado. Por supuesto, la retroalimentación va a la entrada invertida. La ganancia se ajusta haciendo un muestreo del voltaje de salida a través de un divisor de potencial. Ajustando el cociente de R_1 a R_2 , se puede variar la fuerza de la retroalimentación, cambiando así la ganancia. Aquí se usará la regla por la que los voltajes de entrada deben ser los mismos. De nuevo, el uso de la regla nos da la ganancia de inmediato.

En este caso, para evitar un offset debido a un desajuste de corriente de entrada, se suele colocar una serie de resistencias alineadas con la entrada de bucle cerrado y ajustarlas a la impedancia efectiva en la entrada de corriente invertida.

Diapositiva 19

Amplificador no invertido (Cont.)

dado que
$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{A}{1 + A \frac{R}{R + R_f}}$$
, luego $A \frac{R}{R + R_f} \gg 1$

Así,
$$\frac{V_o}{V_i} \approx \frac{R + R_f}{R}$$