

# Introducción al Amplificador Operacional

Laboratorio de Electrónica 2019

## Práctica 1

### Introducción

Características y comportamiento del Amplificador Operacional ideal:

- Los dos terminales de entrada (Input + y Input -) no toman corriente del circuito externo (impedancia de entrada infinita).
- El voltaje de salida es constante siempre que  $V_+ = V_-$ .
- El voltaje de salida aumenta infinitamente rápido cuando  $V_+ > V_-$ .
- El voltaje de salida disminuye infinitamente rápido cuando  $V_+ < V_-$ .

Si hay *realimentación negativa* las reglas anteriores se reducen a las conocidas Reglas de Oro:

- Los dos terminales de entrada ( $V_+$  y  $V_-$ ) no toman corriente del circuito externo (impedancia de entrada infinita).
- La diferencia de tensión entre las entradas  $V_+$  y  $V_-$  es nula:  $V_+ = V_-$ .

*Ejemplo:* Seguidor de voltaje:

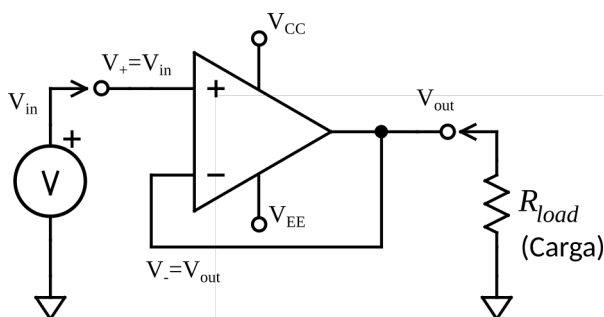


Figura 1: Seguidor de voltaje

En el circuito de la Fig 1,  $V_+ = V_-$  implica que  $V_{out} = V_{in}$ . Si  $V_{in}$  aumentara,  $V_{out}$  aumentará “infinitamente rápido” hasta llegar a la condición  $V_+ = V_-$ .

#### Limitaciones

Hay limitaciones al comportamiento ideal, una primera viene de considerar que la potencia de la salida se obtiene a partir de los terminales  $V_{CC}$  y  $V_{EE}$ .

Hay otras limitaciones que tienen que ver con que las reglas anteriores no se cumplen exactamente y con la velocidad de respuesta del amplificador operacional. Algunas de ellas quedarán en evidencia en los ejercicios que signen.

## Núcleo

### Ejercicio 1:

Amplificador no inversor: usar las reglas del Op Amp ideal para obtener que en el circuito de la figura 2,  $V_{out}=V_{in}(1 + R_1/R_2)$ .

-Se define la ganancia de voltaje del sistema como  $g=V_{out}/V_{in}$ . ¿Cuál es la ganancia de este tipo de amplificador? ¿Tiene mínimo? ¿máximo?

- Dada una ganancia deseada, ¿cómo elegiría las resistencias  $R_1$  y  $R_2$ ? Discutan si pueden ser arbitrariamente chicas o grandes y que factores limitan su elección.

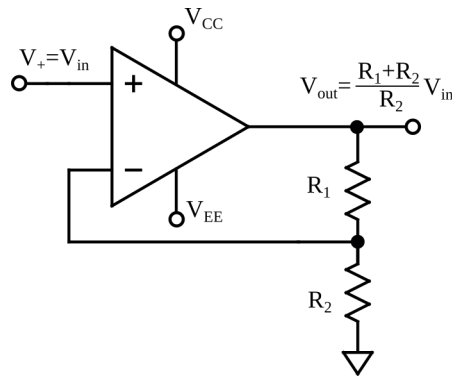


Figura 2: Amplificador no inversor

### Experimento1:

Armar sobre el *protoboard* un amplificador no inversor como el de la figura 2, de ganancia aproximadamente 10 (elegir las resistencias adecuadas, con tolerancias del 5%\*). Usar un opamp de la serie [TL08XX](#) o un [LM741](#). Alimentar al amplificador con voltajes  $V_{CC}$  y  $V_{EE}$ . Inicialmente estudiar el comportamiento del circuito usando un voltaje constante (DC), y determinar así su ganancia de baja frecuencia. Posteriormente usar el generador de funciones para medir la ganancia comparando los valores de pico de las señales de entrada y salida. Ver qué ocurre con la salida si se aumenta la amplitud de la señal de entrada.

### Ejercicio 2:

Amplificador inversor: obtener la ganancia del amplificador inversor de la figura 3, teniendo en cuenta las dos primeras reglas de funcionamiento ( $i_+ = i_- = 0$ , y  $V_+ = V_-$ ). ¿Qué valor mínimo toma?

\* Para reconocer valores y tolerancias de resistores se puede visitar la página: <https://learn.parallax.com/support/reference/resistor-color-codes>

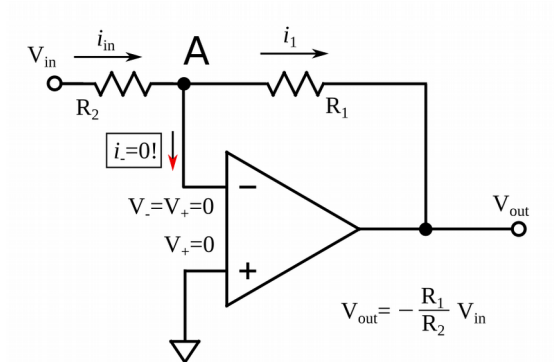


Figura 3: Amplificador inversor

Al punto A se lo denomina *tierra virtual*, ya que no está conectado directamente a tierra pero  $V_A = V_+ = 0$ .

### Experimento 2:

Rearmar el circuito para configurar un amplificador inversor (Fig. 3) y determinar su ganancia. Comparar los valores medidos en este punto y en el anterior con los valores teóricos, obtenidos a partir del modelo de OpAmp ideal.

Repetir estos estudios con ganancias de  $\times 1$ ,  $\times 100$  y  $\times 1000$ .

### Ganancia Diferencial y de Modo Común

En amplificadores con más de una entrada, pueden definirse distintos tipos de ganancias. Unas muy utilizadas son las inspiradas en el amplificador diferencial (ver fig. 4). En este tipo de amplificadores se pueden definir dos ganancias. La *ganancia diferencial*, que relaciona la salida con la diferencia de voltajes en las entradas:

$$G_{diff} = V_{out} / (V_{in+} - V_{in-}), \quad (1)$$

y la *ganancia de modo común*, que relaciona la salida con el valor promedio de las entradas:

$$G_{CM} = 2V_{out} / (V_{in+} + V_{in-}). \quad (2)$$

### Ejercicio 3:

Mostrar (usando que  $V_a = V_b$  y las leyes de Kirchoff) que la salida del circuito de la figura 4 es:

$$V_{out} = R_1 / R_2 (V_{in+} - V_{in-}). \quad (3)$$

Hay que tener en cuenta que esto es así, siempre y cuando los valores de los pares de resistencias  $R_1$  y  $R_2$  sean exactamente iguales. Diferencias entre ellas resultan en un valor no nulo (e indeseado) de la ganancia de modo común,  $G_{CM}$ . A la tasa entre la ganancia diferencial y la de modo común se la denomina *Common Mode Rejection Ratio* (CMRR) y es una especificación importante de diseño de amplificadores diferenciales.

Calcule la ganancia de modo común y el CMRR del circuito si todas las resistencias valen  $R$ , a menos de una de ellas que tendrá un valor  $R + \Delta R$ . (Recomendación: elijan distinta la resistencia de la realimentación).

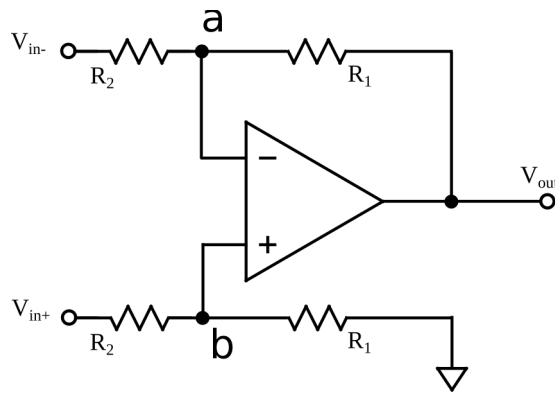


Figura 4: Amplificador diferencial ideal

### Experimento 3:

Armar un amplificador diferencial como el de la figura 4 y determinar las ganancias diferencial y de modo común. Calcule el CMRR.

Reemplace las resistencias por componentes de mayor precisión (tolerancia 1%) y analice si el CMRR se modifica.

### Ejercicio 4:

En el circuito de la figura 5, cuál es la ganancia en voltaje cuando el potenciómetro de ganancia está ajustado al máximo? Y al mínimo? Y en el centro?

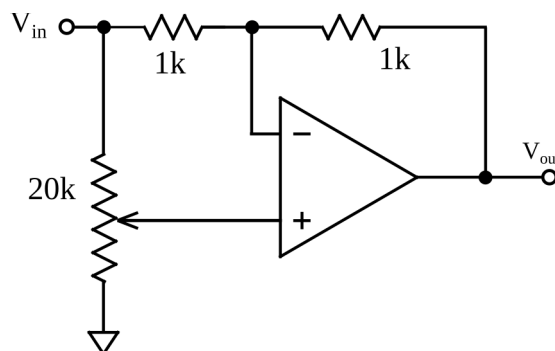


Figura 5: Amplificador de ganancia variable

## Lectura adicional

“The operational amplifier”, Curso *Introductory Electronics Laboratory* F. Rice (Caltech), Experimento 1.

“The art of electronics”, P. Horowitz and W. Hill, Cambridge Univ Press (1989), Capítulo 4.

“The Signal, A compendium of blog posts on op amp design topics” Bruce Trump, Texas Instruments.

## Extensiones

### Experimentos adicionales (seleccione algunos, no alcanza el tiempo para ver todos):

- *Amplificador de ganancia variable:* Arme el circuito de la figura 5 y releve la ganancia de una señal de aproximadamente 500 Hz en función del valor de la resistencia de ajuste. Compare con el valor esperado.
- *Sumador:* Calculen la función de transferencia del siguiente circuito y demuestren que funciona como un sumador. (Ayuda: Usen el principio superposición. Miren los circuitos anteriores y ayúdense de ellos para resolver este problema. Discutan porqué y bajo que límite vale el principio de superposición. )

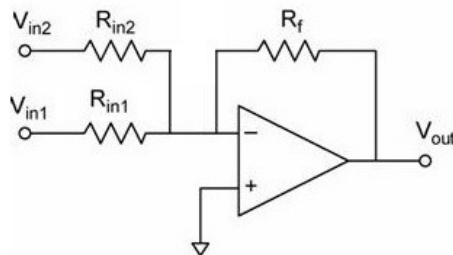


Figura 6: Amplificador Sumador

- *Amplificador de corriente a voltaje (amplificador de transimpedancia):* A veces, lo que se quiere amplificar no es un voltaje sino una corriente (por ejemplo en el caso de un fotodiodo funcionando en modo fotoconductor). Una forma usual de obtener un voltaje proporcional a una corriente es hacer circular esta corriente por una resistencia de valor conocido y amplificar el voltaje establecido en ella. Cuando esta corriente circula directamente a tierra, otra solución práctica es armar un amplificador de transimpedancia (figura 6), en el que la corriente a amplificar se sensa por uno de las entradas del OpAmp y circula a través de la resistencia de *feedback*  $R_f$ .

Como la caída de tensión de  $R_f$  aparece sobre la salida del amplificador, la “ganancia” es  $V_{out} / I_{in} = -R_f$  [esta ganancia tiene unidades de resistencia (impedancia), de ahí el nombre transimpedancia]. Una aplicación útil es como amplificador de un fotodiodo: un fotodiodo polarizado en inversa se conecta entre una fuente y el OpAmp como en la figura 6. En oscuridad, una corriente menor al  $\mu A$  circula por el diodo (corriente de oscuridad), pero cuando se lo ilumina, esta corriente será mucho más grande (decenas de  $\mu A$ ) y aproximadamente proporcional al nivel de iluminación. Investigue qué valores de  $R_f$  son apropiados para el nivel de iluminación del laboratorio, y trate de obtener un valor aproximado de la corriente de oscuridad. Compare con la hoja de datos del componente.

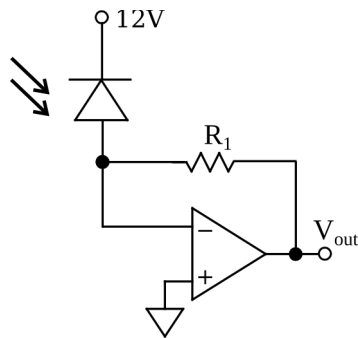


Figura 7: Aplicación de un amplificador de transimpedancia

- Amplificador de voltaje a corriente (amplificador de transconductancia):** Se utiliza este tipo de circuitos para definir una corriente sobre una carga, usando una tensión o voltaje de control. Es un amplificador no inversor: la realimentación negativa asegura que  $V_{in}$  se copia en la entrada (-), y por lo tanto sobre la resistencia  $R_1$ . **La corriente no viene del dispositivo en la entrada, sino de la salida del OpAmp!!**. La corriente de carga está dada por  $I_{out} = V_{in}/R_1$ , y la ganancia es el cociente entre la corriente de salida y el voltaje de entrada; la conductancia  $1/R_1$ . Una aplicación simple y práctica es el control de un LED: Armar entonces el circuito de la figura 7a. Qué corriente máxima puede entregar el opamp? Calcular el valor de resistencia adecuado para no arruinar el circuito integrado. Usar como entrada un generador de funciones y calcular el factor de conversión de voltaje a corriente para la resistencia seleccionada. Cuándo se enciende cada LED? Comparar la velocidad de este circuito al encender y apagar el LED a distintas frecuencias con un control simple de corriente por medio de una resistencia limitadora [Fig 7 b)]. Qué diferencia hay?

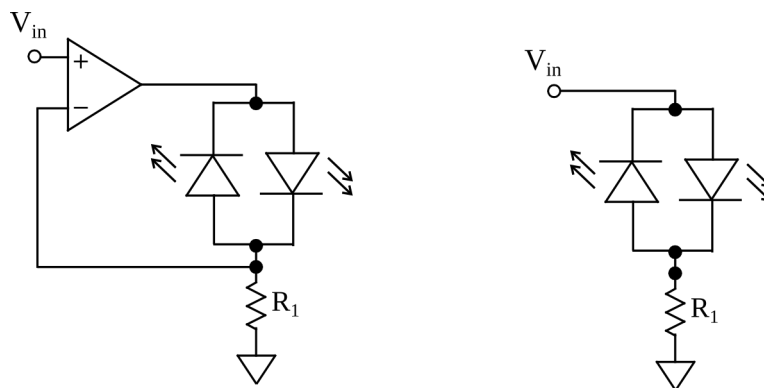


Figura 8: a) Amplificador de transconductancia controlando LEDs. b) Alimentación directa de LEDs

- Amplificador de instrumentación con 3 operacionales:** Es la combinación de un circuito de ganancia de modo común  $G_{CM}=1$  y alta ganancia diferencial, con un amplificador diferencial tradicional. Esta configuración tiene una ganancia diferencial que se puede variar cambiando una resistencia, tiene impedancia de entrada muy alta, y un CMRR muy alto. Es útil para aplicaciones científicas y de medición. Hay circuitos integrados específicos que implementan esta configuración, como el [LT1167](#), [AD8221](#) y [MAX4195](#) (Figura 8a).

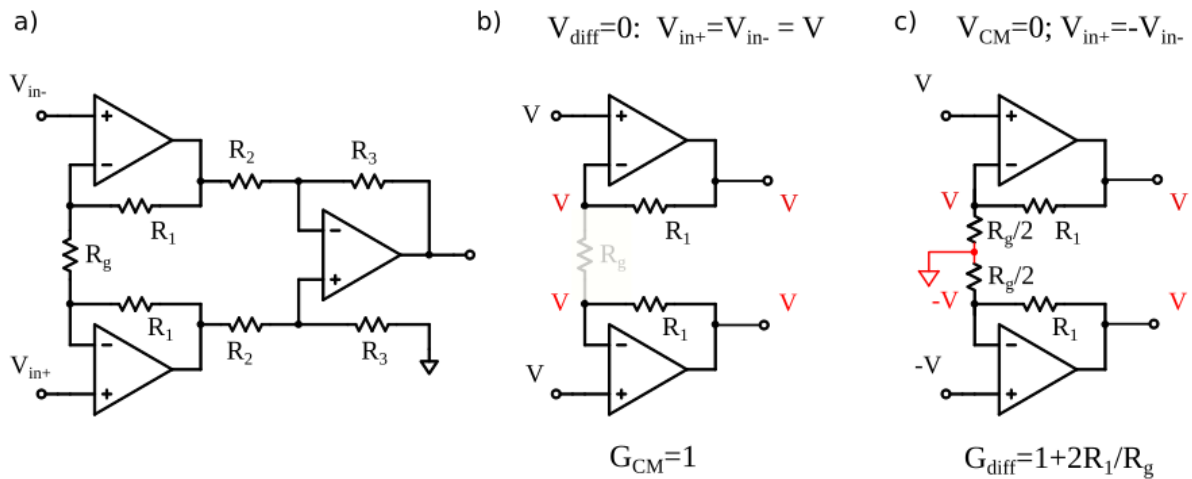


Figura 9: Amplificador de instrumentación: Alta ganancia diferencial, alto rechazo al modo común

Para estudiar cómo funciona este amplificador, se analiza en función de una combinación de los voltajes de entrada  $V_{in+}$  y  $V_{in-}$ :  $V_{diff} = V_{in+} - V_{in-}$ , y  $V_{CM} = (V_{in+} + V_{in-})/2$ . Cuando  $V_{diff}=0$ ,  $V_{in+}=V_{in-}$  y los dos primeros operacionales funcionan cada uno como un seguidor, con ganancia 1, por lo que la ganancia de modo común es 1 (Fig. 8b). Cuando  $V_{CM}=0$ ,  $V_{in+}=-V_{in-}$  y se pueden pensar como dos amplificadores no inversores, cada uno con ganancia  $1+2R_1/R_g$  (Figura 8c). La ganancia diferencial total del esquema es

$$G_{diff} = \frac{V_{out}}{(V_{in+} - V_{in-})} = \left(1 + 2\frac{R_1}{R_g}\right) \frac{R_3}{R_2}. \quad (4)$$

Armar esta configuración, medir las ganancias diferencial y de modo común de la primer etapa, y obtener el CMMR del sistema. Comparar este parámetro con el obtenido para el amplificador diferencial común de la figura 4.

- **Sample and Hold** El circuito de siguiente figura es llamado *sample-and-hold*. Cuando se acciona la llave el capacitor se carga al valor correspondiente a la tensión de entrada y la salida sigue a la entrada, este es el momento *sample* (muestreo). Al desactivar la llave el capacitor queda cargado porque el amplificador operacional tiene idealmente una impedancia de entrada infinita. A la salida se comporta como una fuente tensión con impedancia baja que copia el valor del capacitor, lo "sostiene" (*hold*).

Consideren que el amplificador operacional no es ideal. ¿Qué característica no ideal es la determinante para este circuito? Busquen cuánto valen los números que caracterizan estas imperfecciones para los amplificadores operacionales LM358, TL08x y ¿Cómo limita esto el tiempo de *hold*?

NOTA: Este circuito está muy relacionado con el circuito de detección de picos. Ambos suelen ser una primera etapa antes de un convertidor analógico digital. Piensen por qué necesitaría uno tal etapa y que cambia en cada caso. También, revisen su osciloscopio y vean si encuentran cómo usar uno u otro de estos circuitos de entrada para la señal.

NOTA: Este circuito es tan usado que suelen venir integrados con todas las componentes: seguidor, interruptor de estado sólido y etapa *sample-and-hold*. Algunos integrados típicos son el LF398 y el AD783. Busquen sus hojas de datos y entiendan sus diferencias.

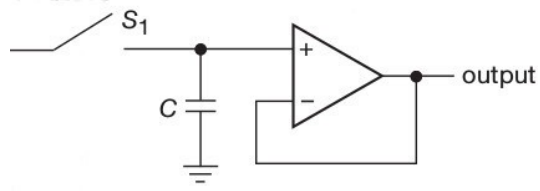


Figura 10: a) Circuito sample-and-hold