

Introducción al Amplificador Operacional
Laboratorio de Electrónica 2019
Práctica 1

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 $V_+ < V_-$.
- La potencia de la salida se obtiene a partir de los terminales V_{CC} y V_{EE} .

Ejemplo: Seguidor de voltaje:

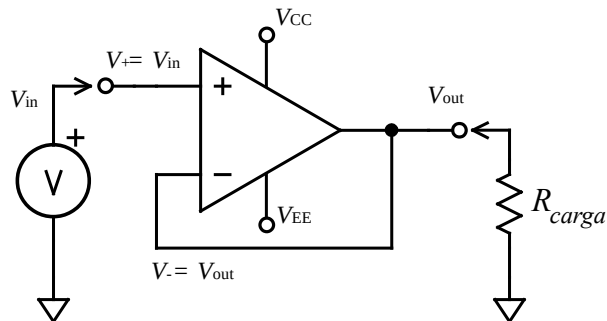


Figura 1: Seguidor de voltaje

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 $V_+ = V_-$. (Todo esto ocurre mientras no se superen en valor absoluto los límites V_{EE} y V_{CC}).

Ejercicio 1:

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

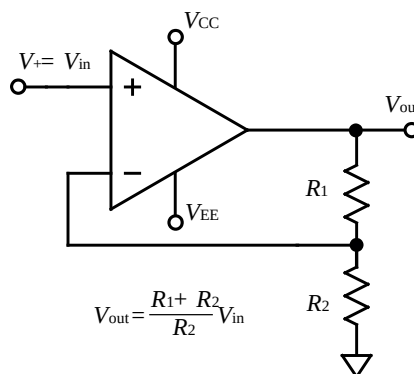


Figura 2: Amplificador no inversor

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

amplificador?

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

Experimento 1:

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 $V_+ = V_-$)

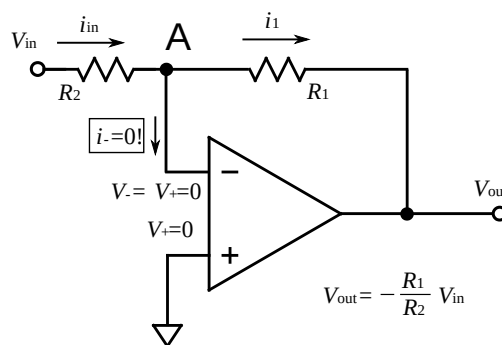


Figura 3: Amplificador inversor

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 $\times 1000$.

Amplificador diferencial (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:

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

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

Ejercicio 3:

Mostrar (usando que $V_a=V_b$ y las leyes de Kirchoff) que la salida del circuito de la figura 4, si $R_3=R_1$ y $R_4=R_2$ es:

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

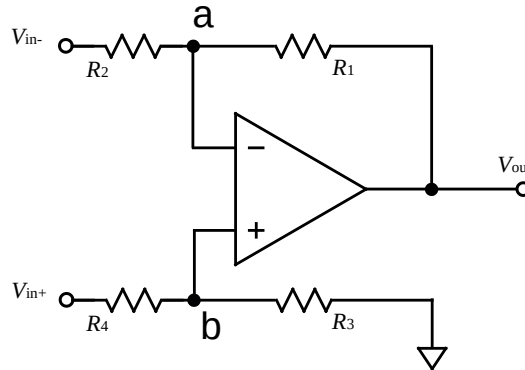


Figura 4: Amplificador diferencial ideal

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. Calcular la ganancia de modo común y el CMRR del circuito si una de las resistencias difiere del resto en un 5%. Sugerencia: Calcular V_{out} en función de las entradas y las cuatro resistencias, y reescribir $V_{in+} (V_{in-}) = V_{CM} + (-) V_{diff}/2$.

Experimento 3:

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

Reemplazar las resistencias por componentes de mayor precisión (tolerancia 1%) y analizar 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?

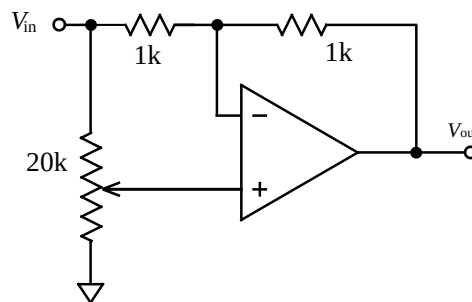


Figura 5: Amplificador de ganancia variable

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.

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

- *Amplificador de ganancia variable*: Armar el circuito de la figura 5 y relevar la ganancia de una señal de aproximadamente 500 Hz en función del valor de la resistencia de ajuste. Comparar con el valor esperado.
- *Sumador*: Calcular la función de transferencia del circuito de la figura 6 y demostrar que funciona como un sumador. (Ayuda: Usar el principio superposición. Mirar los circuitos anteriores y apoyarse en ellos para resolver este problema. Discuir porqué y bajo que límite vale el principio de superposición).

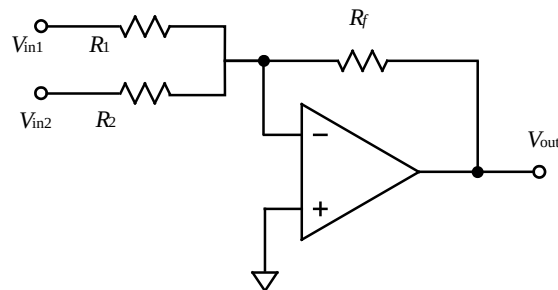


Figura 6: Amplificador sumador

- *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 7), 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 .

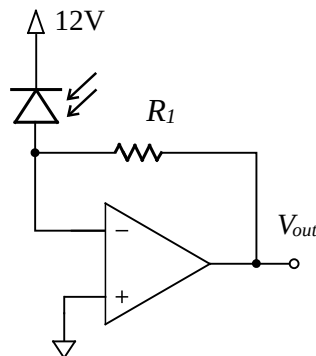


Figura 7: Aplicación de un amplificador de transimpedancia

Como la caída de tensión de R_1 aparece sobre la salida del amplificador, la “ganancia” es $V_{out}/I_{in} = -R_1$ [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 7. En oscuridad, una corriente menor al μA circula por el diodo (corriente de oscuridad), pero cuando se lo ilumina, esta corriente será mucho más grande (decenas de μA) y aproximadamente proporcional al nivel de iluminación. Investigue qué valores de R_1 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.

- **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 8. 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?.

Usar un fotodiodo para comparar la curva de corriente (por ejemplo mirando la caída de tensión en R) con la señal óptica al encender y apagar el LED a distintas frecuencias. A qué frecuencia máxima se puede conmutar el LED? Discuta de qué depende esto.

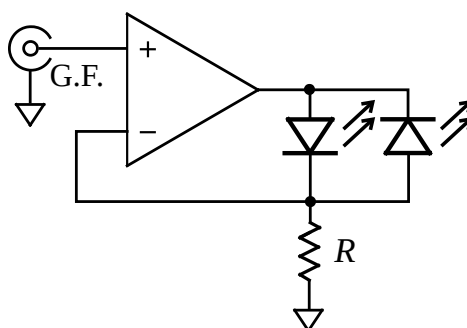


Figura 8: Amplificador de transconductancia controlando LEDs.

- **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 9a).

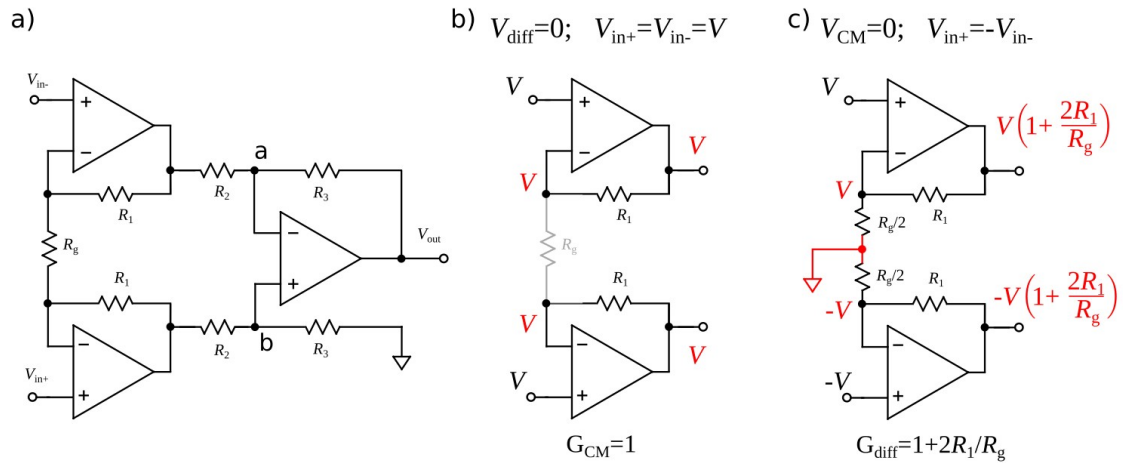


Figura 9: Amplificador de instrumentación: Alta ganancia diferencial, alto rechazo al modo común

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. 9b). 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 9c). 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.

- **Amplificador logarítmico:** El esquemático de la figura 10 representa un amplificador logarítmico basado en un op-amp y un diodo. La relación entre la corriente y el voltaje de un diodo PN está dada por la ecuación de la juntura:

$$I_d = I_{sat} \left(e^{V_d/V_t} - 1 \right) \simeq I_{sat} e^{V_d/V_t}, \quad (5)$$

donde I_d es la corriente del diodo, I_{sat} la corriente de saturación, V_d el voltaje sobre el diodo y V_T es el voltaje térmico,

$$V_T = \frac{k}{q} T \simeq 8.62 \times 10^{-5} \text{V/K} \times T. \quad (6)$$

Usar la condición del opamp que implica que $V_A = 0$ para mostrar que

$$I_R = \frac{V_{in}}{R} = I_s e^{V_d/V_T},$$

y por lo tanto el voltaje a la salida es

$$V_{out} = V_d = -V_T \log\left(\frac{V_{in}}{I_s R}\right). \quad (7)$$

Armar el circuito y a partir de las señales V_{in} y V_{out} obtener la corriente de saturación del diodo. Es constante? Se cumple la relación de la ecuación (7) entre los voltajes?

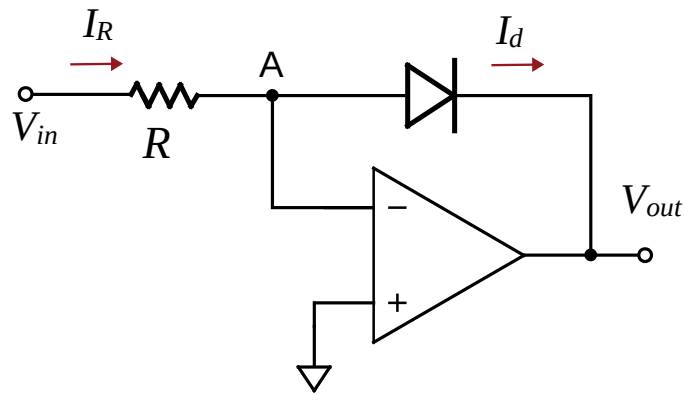


Figura 10: Amplificador logarítmico

Este tipo de amplificadores se utiliza para monitorear la corriente de fotodiodos (control de iluminación) y en general para comprimir la salida de una señal de rango dinámico grande en un rango más acotado. Además, si se combina con un circuito de salida exponencial, y un sumador se puede obtener un circuito devuelva el producto de dos señales.

- *Sample and Hold*: El circuito de la figura 11 se llama *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*). Considerar 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 *hold time*?

NOTA 1: Este circuito está muy relacionado con el circuito de detección de picos. Ambos suelen ser una primera etapa antes de un conversor analógico digital. Discutir por qué necesitaría uno tal etapa y qué cambia en cada caso. También, revisar el osciloscopio y ver si encuentran cómo usar uno u otro de estos circuitos de entrada para la señal.

NOTA 2: 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. Buscar sus hojas de datos e identificar sus diferencias

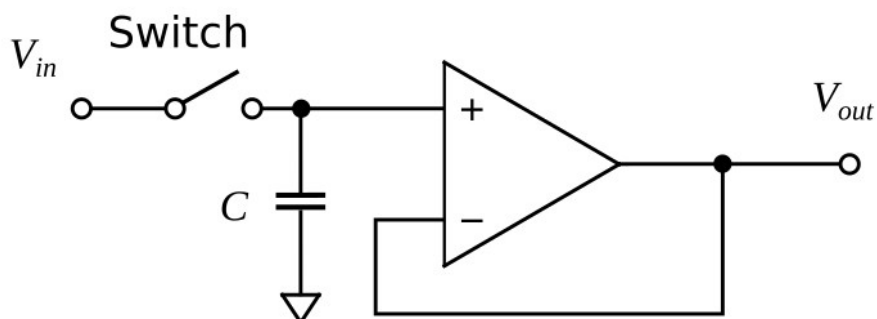


Figura 11: Circuito sample-and-hold