

Laboratorio de Electrotecnia

Experiencia Simulación: Amplificadores Operacionales

Diego Gómez (dngomez@uc.cl) - Guillermo Montecinos (gamontec@uc.cl)

Índice

1. Introducción	2
2. Marco Teórico	2
2.1. Amplificadores de Voltaje	2
2.2. El Opamp Ideal	4
2.3. El Opamp Real	6
2.4. Configuraciones Típicas de Opamps	7
3. Cuestionario	9
4. Experiencia de Simulación	10
4.1. Procedimiento	10

1. Introducción

La mayor parte del control y medida de los procesos industriales se realiza mediante circuitos electrónicos, en donde el amplificador operacional (Opamp) juega un rol fundamental. A pesar de que actualmente el procesamiento de la información y la toma de decisiones de sistemas se realiza con circuitos digitales o sistemas basados en microprocesadores, siempre se requiere convertir variables físicas (temperatura, presión, velocidad) en variables eléctricas, ya sea transformándolas a señales de voltaje o de corriente, o viceversa, transformar señales digitales en señales con significado físico, cómo por ejemplo el movimiento de un motor eléctrico.

Esta experiencia tiene por objetivo el estudio del amplificador operacional, el cual es uno de los circuitos más utilizados en la electrónica. Analizaremos tanto su marco teórico como su comportamiento real, simularemos su funcionamiento y compararemos los resultados obtenidos con aquellos esperados para este dispositivo electrónico.

2. Marco Teórico

2.1. Amplificadores de Voltaje

Un amplificador de voltaje, tal y como su nombre lo indica, es un dispositivo que toma un voltaje de entrada v_i y su salida corresponde a un voltaje v_o que corresponde a un múltiplo del voltaje de entrada v_i . Se define la ganancia de un amplificador de voltaje A_v como:

$$A_v \equiv \frac{v_o}{v_i} \quad (1)$$

El esquema de un amplificador de voltaje genérico se presenta en la siguiente figura:

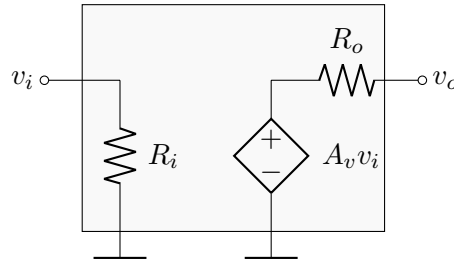


Figura 1: Amplificador de Voltaje Genérico.

En la figura anterior, podemos apreciar dos nuevos elementos: la resistencia de entrada R_i y la resistencia de salida R_o del amplificador. El rombo que aparece corresponde a una fuente de voltaje dependiente, en donde la diferencia de voltaje entre sus terminales corresponde a la ganancia del amplificador A_v multiplicada por el voltaje de entrada v_i . Ahora analicemos el efecto de la resistencia de entrada y salida sobre el desempeño de un circuito.

Resistencia de Entrada Todas las fuentes de voltaje reales pueden ser modeladas como una fuente de voltaje ideal, más una resistencia de salida R_s que idealmente es nula. Supongamos el siguiente esquema de conexión de nuestro amplificador de voltaje:

$$A_v \equiv \frac{v_o}{v_i} \quad (2)$$

El esquema de un amplificador de voltaje genérico se presenta en la siguiente figura:

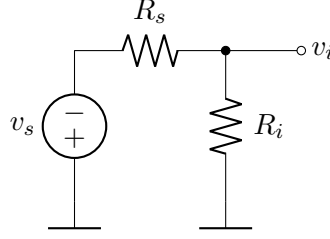


Figura 2: Resistencia de Entrada.

Dadas las resistencia de salida de la fuente R_s y la resistencia de entrada del amplificador R_i , es posible obtener el voltaje de entrada v_i en función del voltaje de la fuente v_s . Esta relación es:

$$v_i = \frac{R_i}{R_s + R_i} v_s \quad (3)$$

la cual corresponde a la relación de un divisor de voltaje. Idealmente, el amplificador de voltaje debe ser equivalente al voltaje entregado por la fuente v_s , pero notamos de (3) que esto sólo se cumple sólo cuando $R_s/R_i \rightarrow 0$, lo que equivale a decir que la resistencia de entrada del amplificador de voltaje R_i es muy grande en comparación a la resistencia de salida de la fuente R_s . En el caso de que la resistencia de entrada de un amplificador de voltaje R_i sea pequeña en comparación con la resistencia de salida de la fuente de voltaje R_s , entonces de (3) podemos notar que el voltaje a la entrada del amplificador se hace nulo y difiere demasiado del voltaje de la fuente v_s .

De lo anterior, concluimos que un buen amplificador de voltaje posee una alta resistencia de entrada R_i .

Resistencia de Salida La salida del amplificador de voltaje comúnmente va conectada a una carga resistiva R_L . Esto se muestra en la siguiente figura:

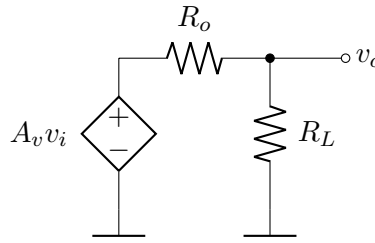


Figura 3: Resistencia de Salida.

El voltaje a la salida del amplificador v_o o en la carga está dado por:

$$v_o = \frac{R_L}{R_L + R_o} A_v v_i \quad (4)$$

Idealmente deseamos que el voltaje de salida $v_o = A_v v_i$, y esto se cumple en el caso de que la resistencia de salida del amplificador de voltaje R_o sea muy pequeña en comparación a la resistencia de la carga R_L . De otro modo, si la resistencia de salida del amplificador de voltaje fuese muy grande, el voltaje a la salida v_o se atenuaría.

En conclusión, un buen amplificador de voltaje posee una resistencia de salida pequeña.

2.2. El Opamp Ideal

Un amplificador operacional es básicamente un amplificador de voltaje. Posee dos terminales de entrada y uno de salida. La figura 4 muestra el símbolo que se utiliza para representar un Opamp.

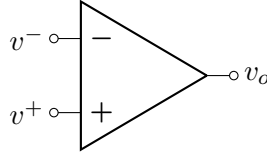


Figura 4: Símbolo de un Opamp.

En la figura anterior, los terminales v^+ (entrada no inversora) y v^- (entrada inversora) corresponden a los terminales de entrada, mientras que el terminal v_o representa al terminal de salida. Podemos percatarnos que el símbolo de un amplificador operacional corresponde a un triángulo, en donde una de sus puntas corresponde a su salida, y las entradas se encuentran en la arista contraria al vértice de salida.

Ahora analizaremos las propiedades de un Opamp ideal y responderemos el significado de los nombres de los terminales de entrada.

Un Opamp es un amplificador de voltaje. Como todo amplificador de voltaje, definimos por A_v a la ganancia de nuestro amplificador. En un Opamp ideal se cumple que para cualquier componente conectado a la salida

$$v_o = A_v (v^+ - v^-) \quad (5)$$

en donde la ganancia A_v se considera extremadamente grande ($A_v \rightarrow \infty$). Esta expresión nos dice que el voltaje de salida en un Opamp ideal depende de la diferencia de voltajes entre sus terminales de entrada, y de su ganancia de voltaje A_v , la cual se supone idealmente como infinita.

La entrada v^+ se denomina entrada no inversora debido a que en (5) si uno aumenta el voltaje en la entrada v^+ , aumenta el voltaje en la salida v_o . En cambio, la entrada v^- se denomina entrada inversora debido a que al aumentar su voltaje disminuye el voltaje en la salida v_o .

Otro aspecto importante de un amplificador operacional es su resistencia de entrada. La resistencia de entrada de un amplificador operacional ideal se considera como infinita. Esto en otras palabras implica que al conectar un Opamp ideal a un circuito, la corriente que entra desde el circuito hacia los terminales v^+ o v^- es nula.

Una forma de comprender el significado de las resistencias de entrada y/o de salida es analizando la siguiente figura:

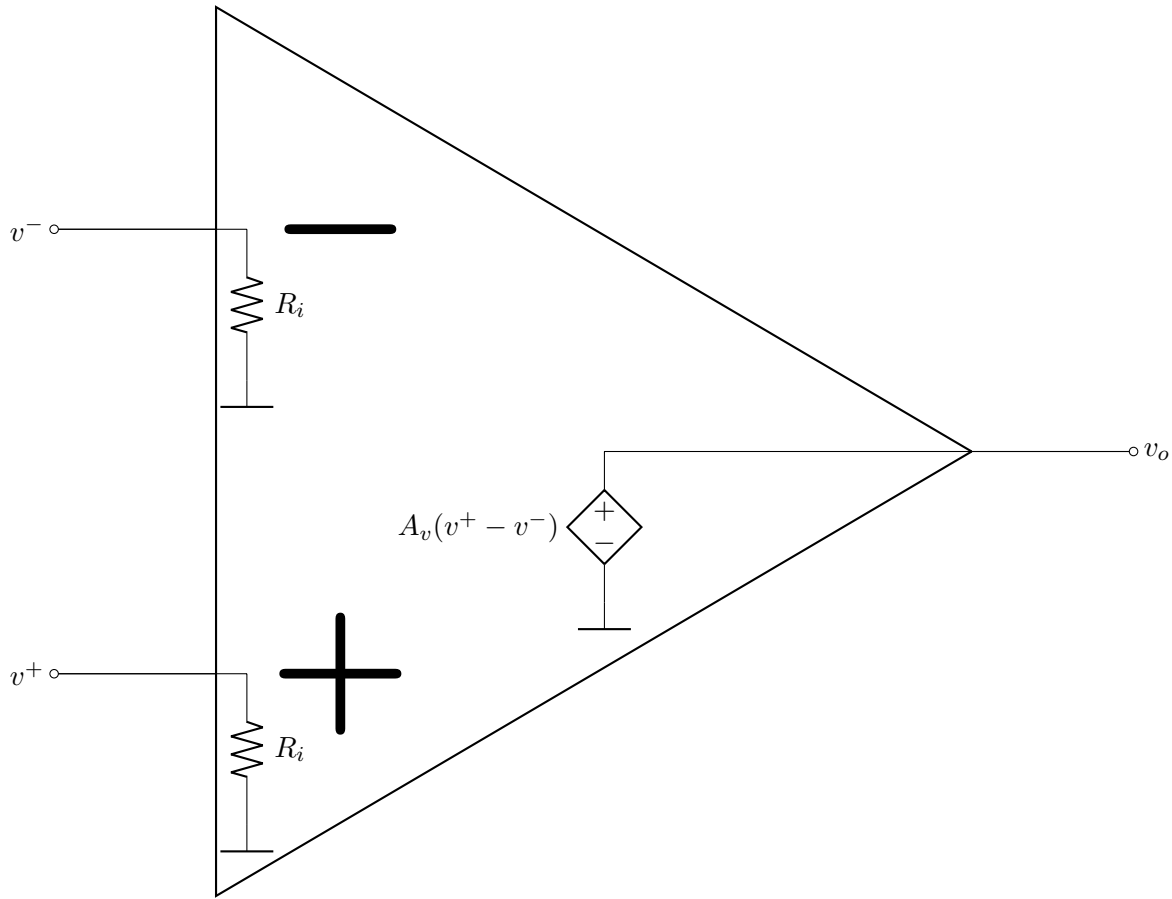


Figura 5: Impedancia de Entrada de un Opamp.

En la figura anterior podemos ver que los terminales de entrada v^+ y v^- internamente van a un resistor R_i conectado a tierra. El hecho de que el Opamp ideal tenga una resistencia de entrada muy grande (que tienda a infinito) implica que $R_i \rightarrow \infty$, por lo que cualquier circuito que conectemos a la entrada verá una impedancia extremadamente grande y la corriente que fluirá por la resistencia R_i será nula para ambas entradas. Además, tal y como vimos en la subsección anterior, un Opamp ideal es un buen amplificador de voltaje debido a que posee una resistencia de entrada que tiende a infinito.

También, en un Opamp ideal la resistencia de salida es nula.

A modo de resumen, las características de un Opamp ideal se pueden resumir como:

1. El voltaje de salida está dado por:

$$v_o = A_v (v^+ - v^-)$$

2. Su ganancia de voltaje $A_v \rightarrow \infty$. Esto se debe a que la resistencia de salida del Opamp ideal es nula.
3. La impedancia de entrada de sus terminales de entrada v^+ y v^- tiende a infinito, por lo que a su entrada es un amplificador de voltaje ideal. Esta característica implica que la corriente que entra por los terminales de entrada de un Opamp ideal es nula.

2.3. El Opamp Real

Como siempre, en la electrónica nada es ideal. Un esquema de un Opamp real se muestra en la siguiente figura:

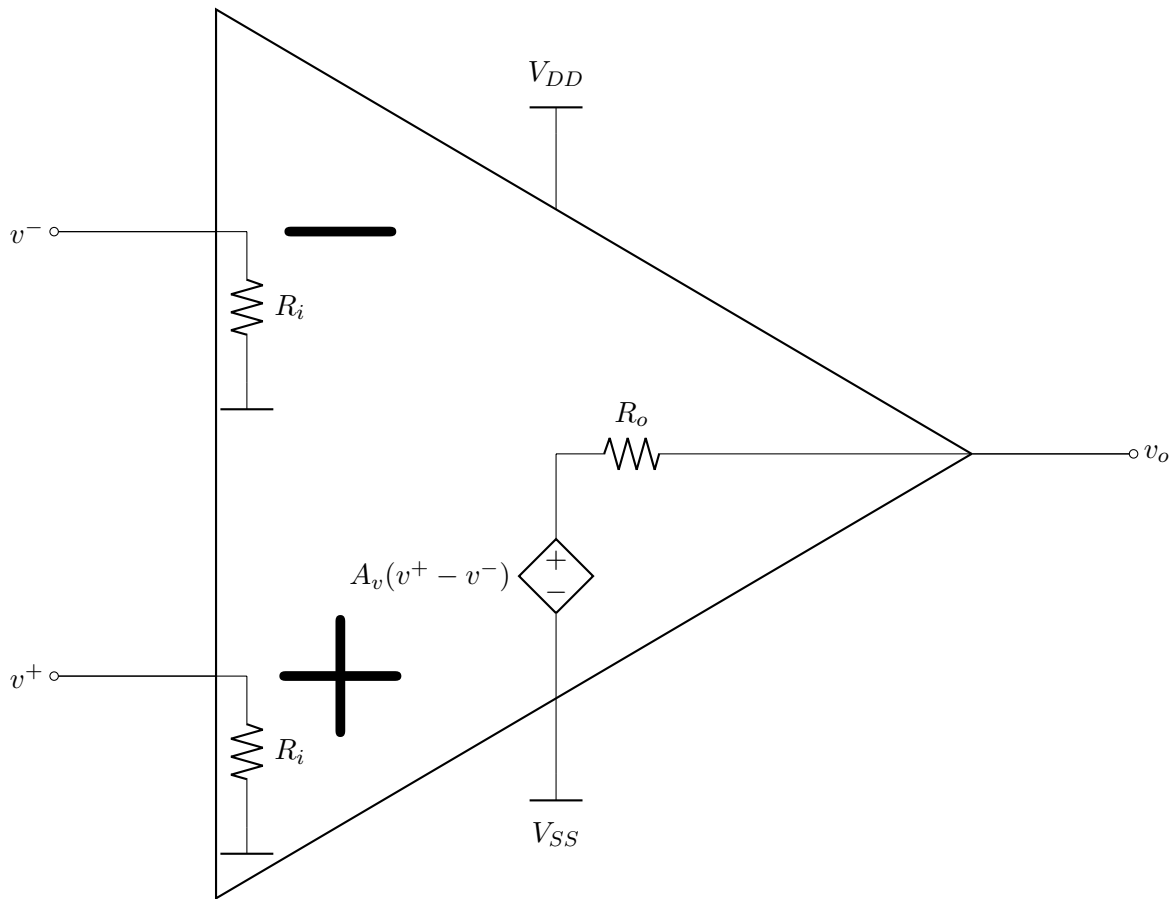


Figura 6: Esquema de un Opamp Real.

En la figura anterior podemos reconocer la ganancia de voltaje A_v , la impedancia de entrada R_i , pero ahora tenemos otro componente, el cual corresponde a la resistencia de salida R_o del Opamp Real. Además, tenemos dos terminales más (V_{DD} y V_{SS}) que corresponden a los terminales de alimentación del Opamp real. De ahora en adelante cuando hablemos de Opamp (sin decir que es ideal) nos referiremos al Opamp Real.

Ahora analizaremos las no idealidades del Opamp (real):

- **Resistencia de Entrada Finita:** Como vimos con anterioridad, el Opamp ideal poseía impedancia de entrada R_i infinita. En el caso de los Opamps reales, la impedancia de entrada a pesar de seguir siendo muy grande es finita. Esto implica que por los terminales de entrada si fluye corriente, y hay una atenuación de voltaje tal y como se analizó en la subsección de amplificadores de voltaje.
- **Resistencia de Salida No Nula:** El hecho de que un Opamp posea una resistencia de salida no nula implica que al conectar una carga, el voltaje de la carga no será exactamente el voltaje amplificado, si no que más bien, dependerá de la relación entre la resistencia de salida del Opamp y la resistencia de la carga.

- **Saturación:** Un Opamp ideal puede alcanzar en su salida cualquier valor de voltaje. Por ejemplo, si $v^+ - v^- > 0$, entonces la salida tenderá a infinito, debido a que su ganancia A_v es infinita. En el caso de los Opamps reales, el voltaje de salida no puede ir más allá de los voltajes de alimentación (V_{DD} y V_{SS}). Por ejemplo, si $V_{DD} = 5\text{ V}$ y $V_{SS} = -5\text{ V}$, entonces si la salida teórica fuese $v_o = 10\text{ V}$, la salida real será a lo más $v_o = 5\text{ V}$. Lo mismo pasa con voltajes que sean menores que el voltaje de alimentación negativo.

2.4. Configuraciones Típicas de Opamps

Es posible aprovechar la gran ganancia de un Opamp para construir otros circuitos que posean una ganancia determinada por el usuario. Para ello conectaremos los Opamps en una configuración que posea realimentación negativa. Este concepto, que escapa a los contenidos de este laboratorio, nos permite transar una alto A_v por precisión en la ganancia de salida. Ahora analizaremos dos configuraciones básicas del Opamp considerando Opamps ideales (nos olvidaremos de los Opamps reales de aquí en adelante).

Configuración Inversora La configuración inversora se muestra en la siguiente figura:

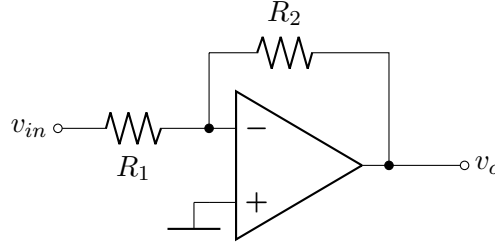


Figura 7: Configuración Inversora.

De la figura, si la ganancia de voltaje del Opamp ideal está dada por A_v , entonces, el voltaje a la salida será:

$$v_o = A_v (v^+ - v^-) = -A_v v^- \quad (6)$$

debido a que $v^+ = 0\text{ V}$. Ahora veamos la corriente que pasa por el resitor R_1 . Esta corriente está dada por:

$$I_1 = \frac{v_{in} - v^-}{R_1} \quad (7)$$

mientras que la corriente por R_2 es:

$$I_2 = \frac{v^- - v_o}{R_2} \quad (8)$$

Debido a que un Opamp ideal posee impedancia de entrada infinita, entonces la corriente I_3 que entra por el terminal - del Opamp cumple con $I_3 = 0$. Entonces:

$$I_2 = I_1 + I_3 = I_1 \Leftrightarrow \frac{v_{in} - v^-}{R_1} = \frac{v^- - v_o}{R_2} \quad (9)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones, obtenemos que:

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1 + \frac{R_1 + R_2}{A_v}} v_{in} \quad (10)$$

$$v^- = \frac{R_2}{(A_v + 1)R_1 + R_2} v_{in} \quad (11)$$

Dado que se trata de un Opamp ideal, entonces $A_v \rightarrow \infty$, con lo que finalmente:

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1}v_{in} \quad (12)$$

$$v^- = 0 \quad (13)$$

Configuración No Inversora La configuración no inversora se muestra en la siguiente figura:

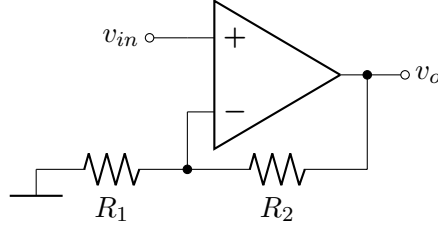


Figura 8: Configuración No Inversora.

De la figura, si la ganancia de voltaje del Opamp ideal está dada por A_v , entonces, el voltaje a la salida será:

$$v_o = A_v (v^+ - v^-) = A_v (v_{in} - v^-) \quad (14)$$

Dado que el Opamp ideal posee impedancia de entrada infinita, entonces la corriente que pasa por R_1 y R_2 son equivalentes. Esto es:

$$I_1 = -\frac{v^-}{R_1} = \frac{v^- - v_o}{R_2} = I_2 \quad (15)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones, obtenemos que:

$$v_o = \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{R_1 + R_2}{A_v R_1}} v_{in} \quad (16)$$

$$v^- = \frac{1}{1 + \frac{R_1 + R_2}{A_v R_1}} v_{in} \quad (17)$$

Dado que se trata de un Opamp ideal, entonces $A_v \rightarrow \infty$, con lo que finalmente:

$$v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_{in} \quad (18)$$

$$v^- = v_{in} \quad (19)$$

Seguidor de Voltaje La configuración de seguidor de voltaje se muestra en la siguiente figura:

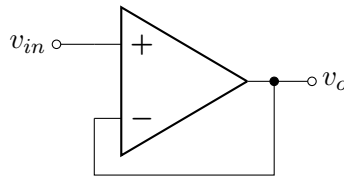


Figura 9: Configuración Seguidor de Voltaje.

El voltaje de salida v_o estará dado por:

$$v_o = \frac{A_v}{1 + A_v} v_{in} \quad (20)$$

Si el Opamp es ideal, entonces:

$$v_o = v_{in} \quad (21)$$

3. Cuestionario

1. Para cada uno de los circuitos siguientes calcule el voltaje de salida v_{out} en función de el/los voltajes de entrada v_i considerando que el Opamp utilizado es ideal.

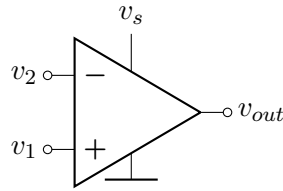


Figura 10: Circuito 1.

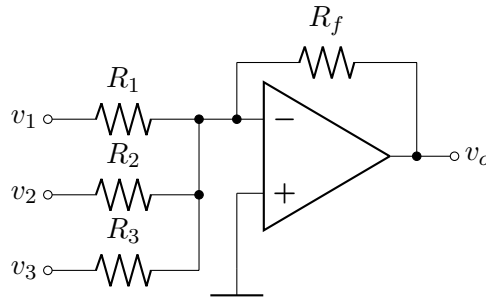


Figura 11: Circuito 2.

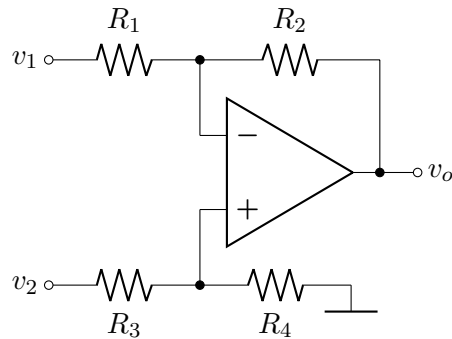


Figura 12: Circuito 3.

2. Diseñe un amplificador que posea una ganancia de 12 dB y que invierta el voltaje. También investigue acerca de la utilidad de expresar la ganancia de un amplificador en decibeles.

3. Investigue acerca del derivador e integrador implementado con Opamps. Calcule la expresión para el voltaje en función del tiempo y el voltaje de entrada y comente acerca de los problemas que presentan estas configuraciones.
4. Investigue en la literatura qué se entiende por pérdida por inserción en un amplificador.

4. Experiencia de Simulación

4.1. Procedimiento

1. Descargue el software LTSpice (link de descarga).
2. Utilizando el amplificador de nombre **UniversalOpamp2** incluido en las librerías de LTSpice, simule cada uno de los circuitos anteriormente estudiados, estos son configuración inversora, configuración no inversora, seguidor de voltaje, circuito 1, circuito 2, circuito 3, circuito derivador y circuito integrador.
3. Compare los resultados obtenidos con las ecuaciones anteriormente calculadas. ¿Existe alguna diferencia? ¿Cuáles son las corrientes de entrada en los terminales inversor y no inversor del amplificador?
4. Cambie el opamp utilizando por cualquier otro incluido en las librerías [Opamps] (Ejemplo: LT1022A), observe si existe alguna diferencia en sus resultados y/o corrientes de entrada.
5. Entregue una breve descripción de cada circuito simulado, los valores de voltaje de entrada y resistores, un gráfico por circuito correspondiente a los voltajes de entrada y salida, el archivo de simulación y su respuesta a los ítems anteriores.
6. Por último incluya un circuito distinto a todos los anteriores que sea de su interés, desarrolle sus ecuaciones, describalo y simúlelo.

Para generar los voltajes v_i de entrada utilice fuentes de voltaje con valores arbitrarios entre 0 y 5 V. Recuerde alimentar el amplificador con fuentes de voltaje de valores mayor o igual a 15 y -15 V respectivamente.

Incluya todos los circuitos simulados en solo un archivo .asc, note que puede crear tantos circuitos independientes dentro de la misma simulación como desee.

El formato de entrega del informe debe ser igual al de las experiencias previas realizadas.

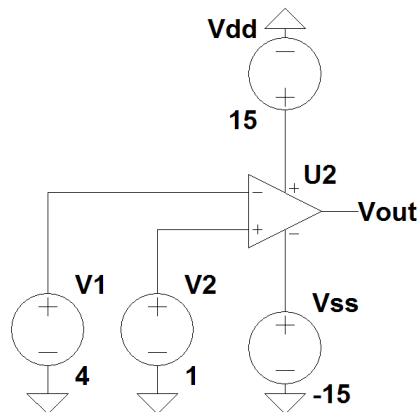


Figura 13: Ejemplo de circuito de simulación.