

Pontificia Universidad Católica de Chile
Escuela de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Amplificadores Operacionales

Profesor Álvaro Lorca

IEE2123 – Circuitos Eléctricos
Segundo Semestre 2018

Agradecimientos material: Ángel Abusleme, Enrique Álvarez, Daniel Olivares

Introducción

- En las siguientes clases estudiaremos amplificadores operacionales, un bloque circuital muy común y útil.

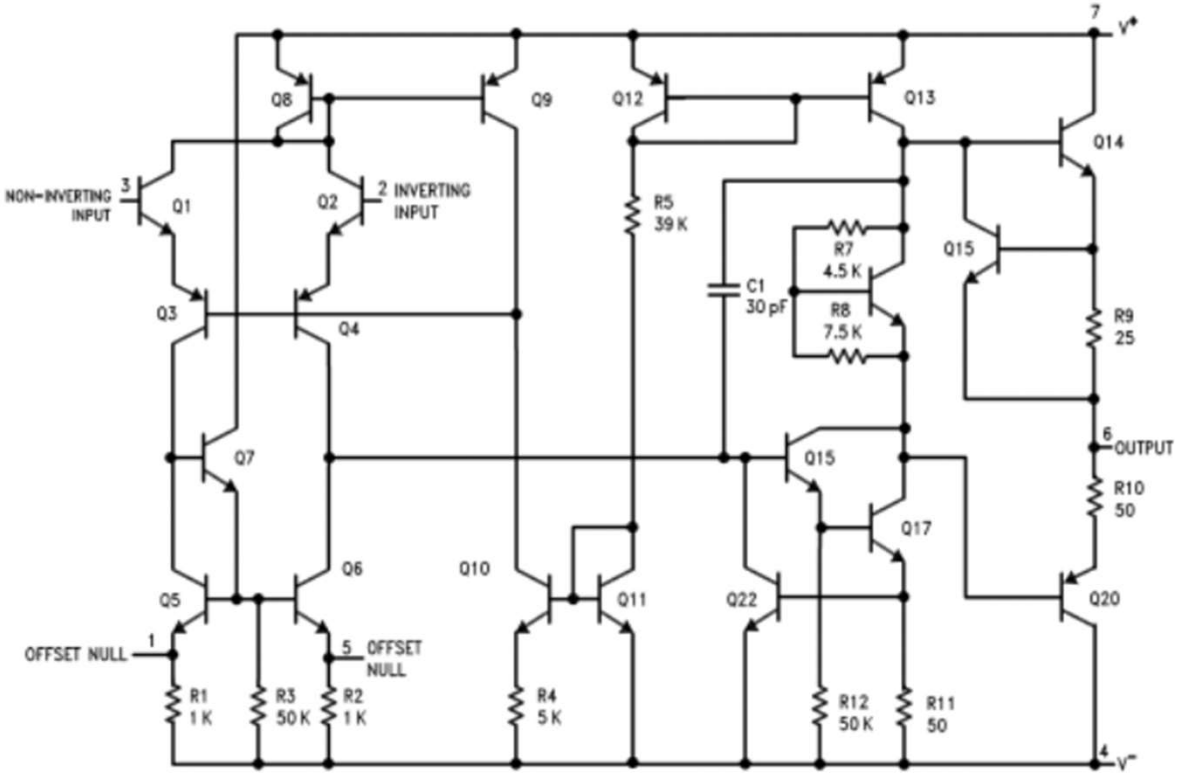
- En términos circuitales este nuevo bloque no representa nada nuevo para nosotros, pero es bueno estudiarlo como tal porque a diferencia de las fuentes dependientes ideales, este elemento sí existe.

- En teoría de circuitos ha sido probado que se necesita un sólo elemento activo (capaz de entregar energía) para poder hacer cualquier tipo de función circuital.

- Este elemento, el *elemento activo universal*, puede ser aproximado en la práctica de muchas formas, siendo el amplificador operacional una de ellas.

Amplificador operacional

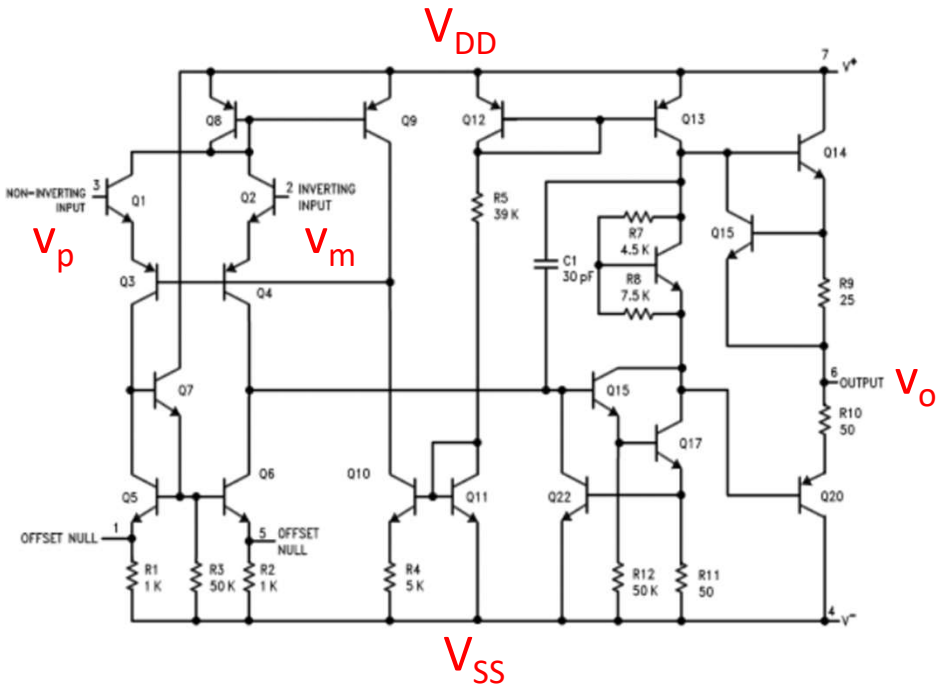
- Un amplificador operacional (opamp) es un bloque de dos entradas y una salida compuesto internamente por varios transistores.

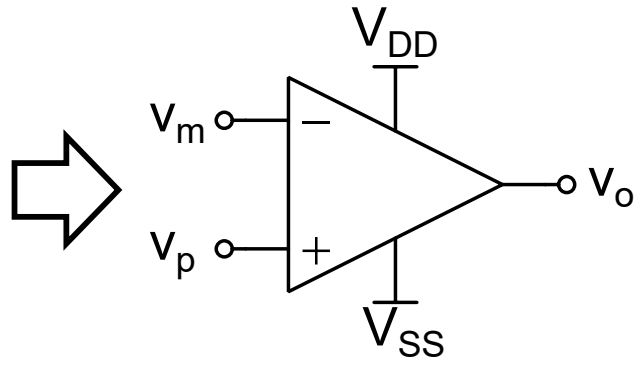


[LM741, TI]

Amplificador operacional

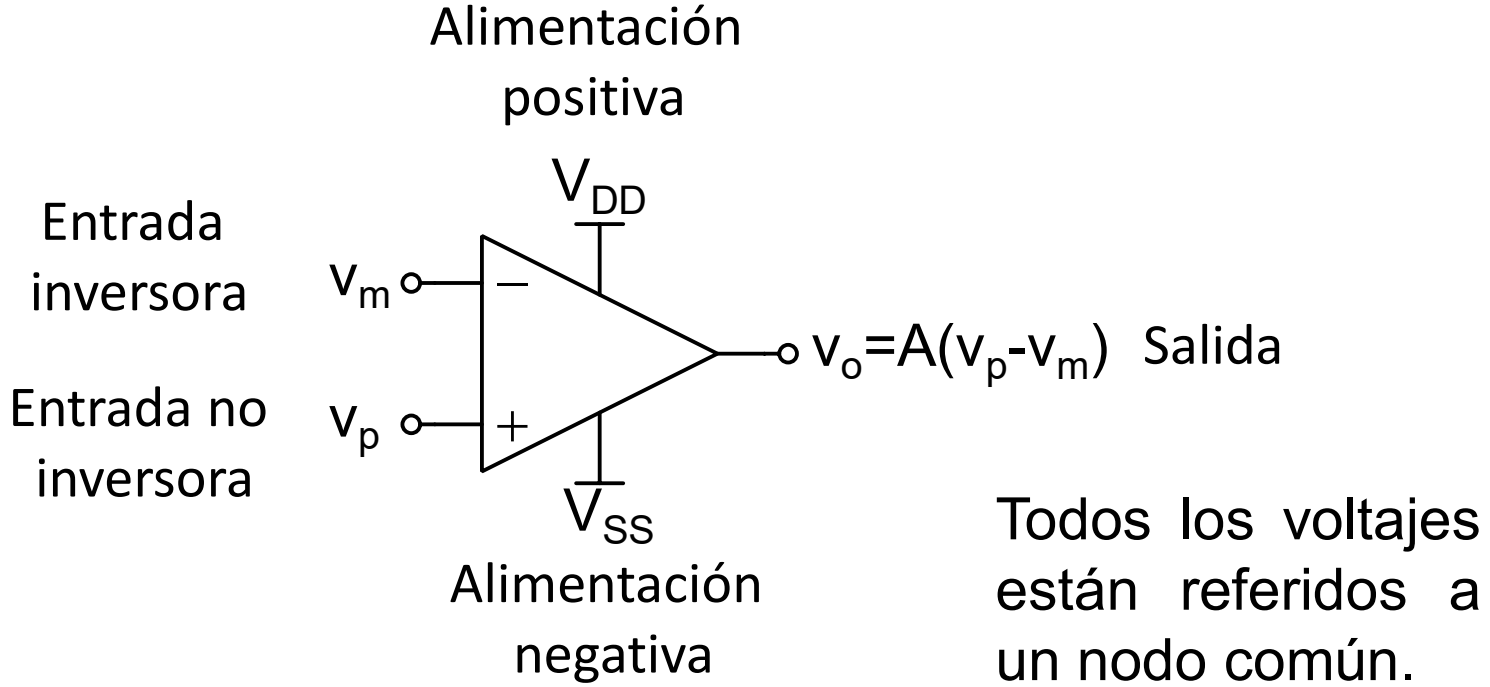
- En términos netamente circuitales no nos interesa su estructura interna (esos contenidos corresponden a los cursos de electrónica y diseño de circuitos integrados analógicos), sólo nos interesa su funcionamiento como caja negra.





Amplificador operacional

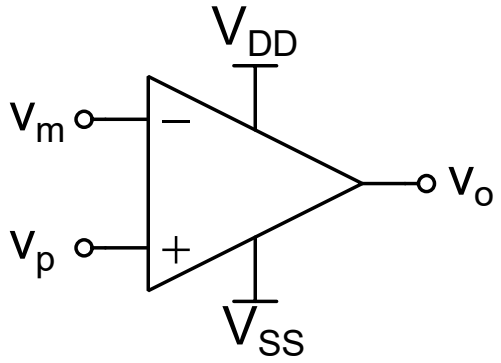
- Un opamp es un bloque que toma dos entradas, las resta, y las amplifica por una ganancia A (idealmente muy grande). La energía que entrega la salida del opamp es extraída de las fuentes de alimentación (los rieles).



Todos los voltajes están referidos a un nodo común.

Amplificador operacional

- La salida de un opamp no puede alcanzar valores mayores que V_{DD} ni menores que V_{SS} .
- La salida v_o *satura* en ambos rieles o incluso antes: deja de comportarse como un elemento lineal!



$$V_{SS} < v_o < V_{DD}$$

$$V_{SS} < A(v_p - v_m) < V_{DD}$$

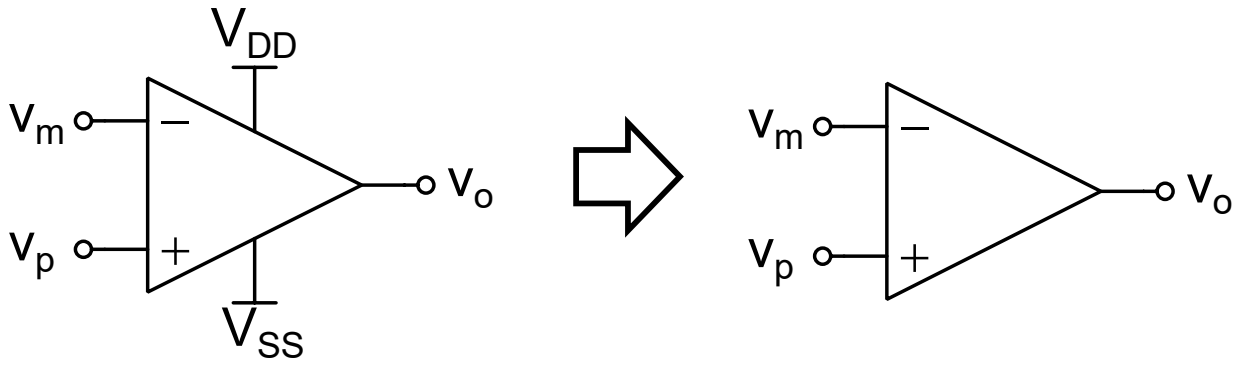
$$\frac{V_{SS}}{A} < v_p - v_m < \frac{V_{DD}}{A}$$

↑

Para entradas diferenciales (v_p-v_m) muy grandes, la salida del opamp satura

Amplificador operacional

- En términos electrónicos se pueden hacer cosas interesantes con el hecho de que la salida del opamp sature, pero nosotros omitiremos las alimentaciones del opamp por ahora y asumiremos que éste opera en su rango lineal.



Opamp ideal

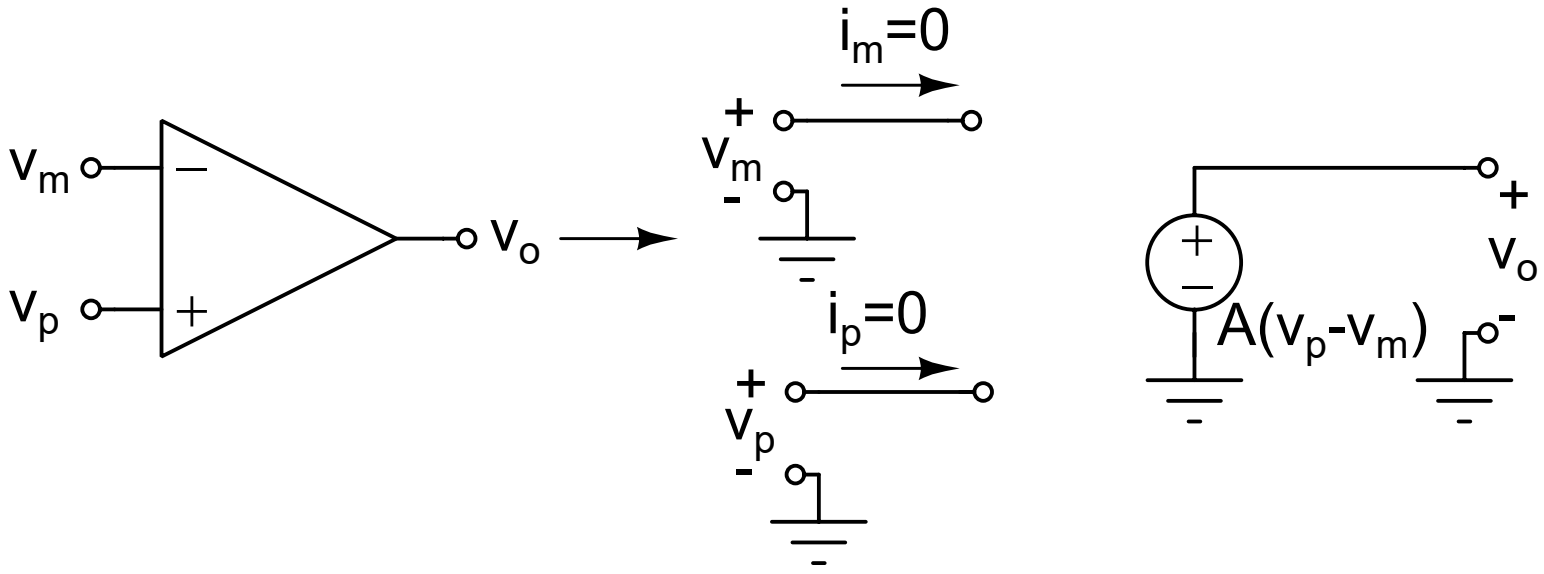
- Un opamp ideal cumple con las siguientes características:
  - Impedancia de entrada infinita (corrientes de entrada nulas).

$$Z_{in} = \infty \rightarrow i_p = i_m = 0$$

  - Impedancia de salida nula.

$$Z_{out} = 0$$

  - Ganancia infinita.



Modelo opamp ideal

Opamp ideal

- Cómo trabajar con ganancias infinitas de fuentes dependientes:
  - Si v_o es finito, entonces v_p-v_m tiene que ser nulo, es decir, hay un **cortocircuito virtual** entre las entradas inversora y no inversora del opamp ($v_p = v_m$).
  - Si v_o no es finito (*o satura* en la práctica), entonces v_p-v_m puede adoptar cualquier valor.

Opamp ideal

- En el gráfico de v_o vs v_p-v_m con A→∞:

$$v_o = A(v_p - v_m)$$

$$v_p - v_m = \frac{v_o}{A} \approx 0$$

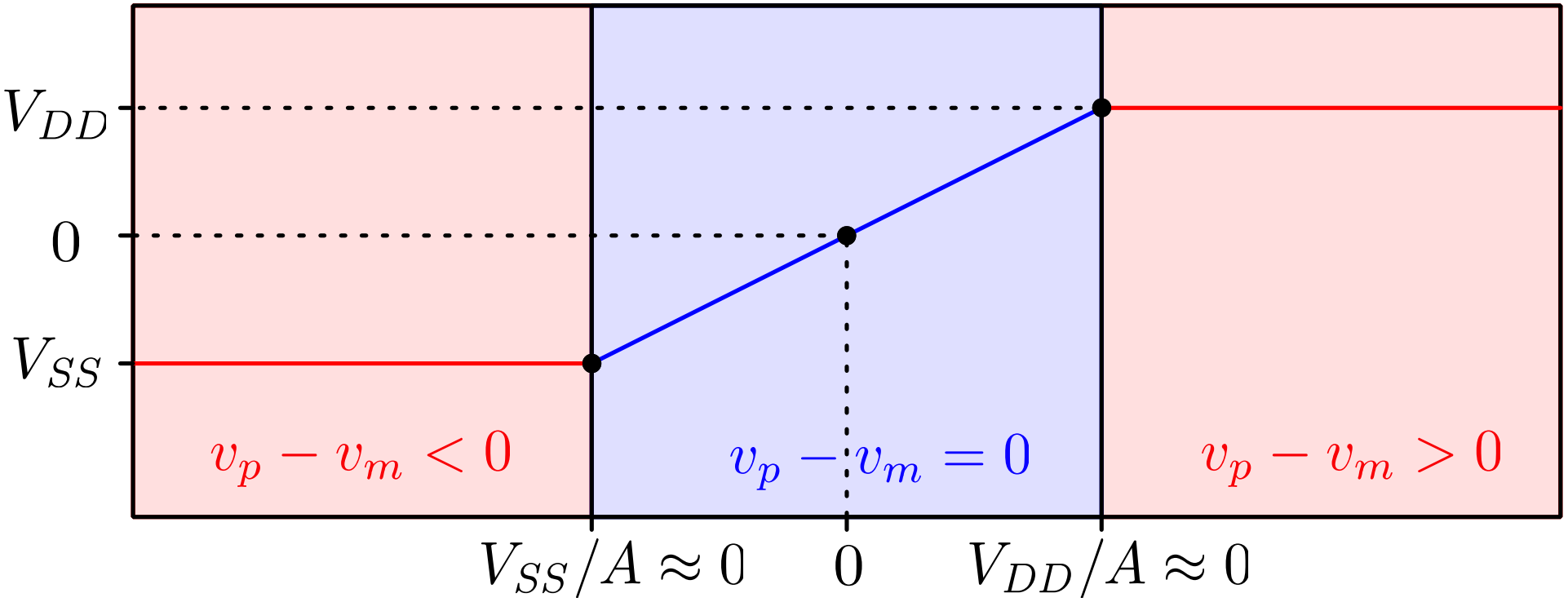
$$\rightarrow v_p = v_m$$

$$v_o = V_{SS}$$

$$v_p \neq v_m$$

$$v_o = V_{DD}$$

$$v_p \neq v_m$$



Opamp ideal

- Por lo tanto, para mantener al opamp en su región lineal (en la que hay cortocircuito virtual en la entrada) es necesario garantizar que la salida no sature.
  - Esto no se puede lograr simplemente haciendo la entrada diferencial v_p-v_m muy pequeña de forma “manual”.
  - La ganancia es tan grande (infinita idealmente) que por más pequeño que sea v_p-v_m, $A(v_p-v_m)$ satura en los rieles de alimentación.
- Para este propósito se usa *realimentación negativa*.

Opamp ideal

- La realimentación consiste en tomar parte de la salida de un sistema y volver a inyectarla a la entrada del mismo de alguna manera. Se distinguen dos tipos de realimentación.

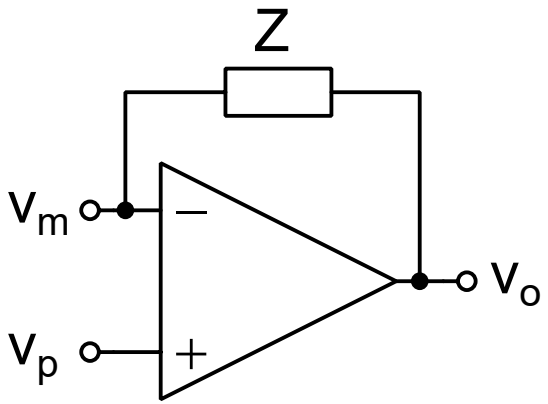
  - Realimentación positiva: cuando la salida crece, la señal de entrada aumenta, y viceversa (lleva hacia la inestabilidad). Por ejemplo:
    - El chillido del micrófono en sistema de audio (acoplamiento).
    - Reacción termonuclear en una bomba de H.

  - Realimentación negativa: cuando la salida crece, la señal de entrada disminuye, y viceversa (estabiliza la salida a un nivel deseado). Por ejemplo:
    - Termostato controlando la temperatura de una pieza.
    - Chofer controlando la dirección de un automóvil.
    - Control crucero en un automóvil.

Opamp ideal

- A grades rasgos, para realimentar negativamente un opamp se conecta una impedancia entre la salida y la entrada inversora.
  - Ya veremos en detalle cómo es que esto se traduce en un lazo de realimentación negativa.

- Similarmente, al conectar una impedancia entre la salida y la entrada no inversora se obtiene realimentación positiva.
  - Cabe preguntarse qué pasa cuando existen ambas conexiones. Hay que analizar cada caso.



Opamp ideal – Resumen

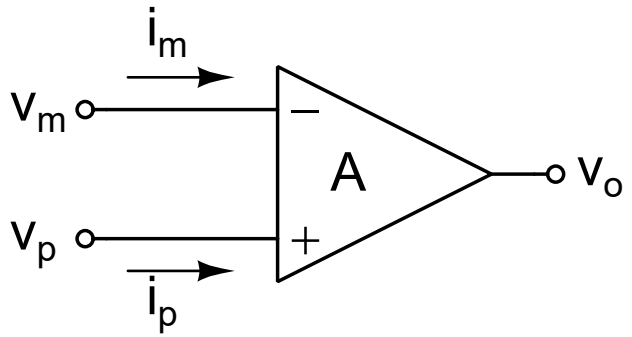
- En resumen, las corrientes de entrada de un opamp son aproximadamente nulas:

$$i_p \approx i_m \approx 0$$

  - Idealmente estas corrientes son exactamente nulas. Si bien un opamp real no tiene una impedancia de entrada infinita, ésta es una muy buena aproximación.

  - **Esta condición se cumple *siempre*, independiente de su región de operación.**

  - Notar que por la salida *sí* circula corriente (en cualquier sentido).



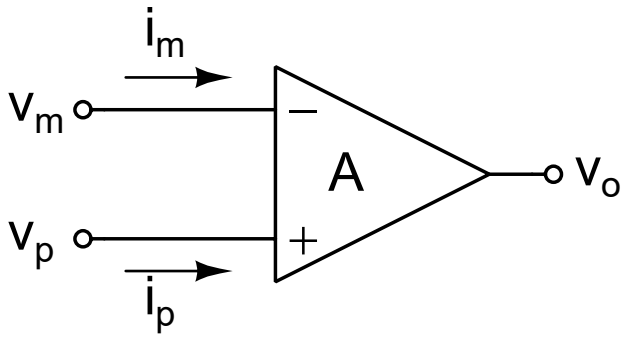
Opamp ideal – Resumen

- La ganancia de un opamp ideal es infinita, mientras que la de un opamp real es tan grande que puede ser considerada como infinita en la práctica.

- Si un opamp se encuentra en región de operación lineal hay cortocircuito virtual en sus entradas:

$$v_p \approx v_m$$

  - La realimentación negativa hace que el opamp no sature, y por lo tanto la entrada diferencial es muy cercana a cero.
  - En realimentación negativa, el opamp hará todo lo posible para que su entrada diferencial sea muy pequeña.



Opamp ideal

- Para resolver o analizar circuitos con opamps realimentados negativamente, en la práctica tenemos dos opciones equivalentes:

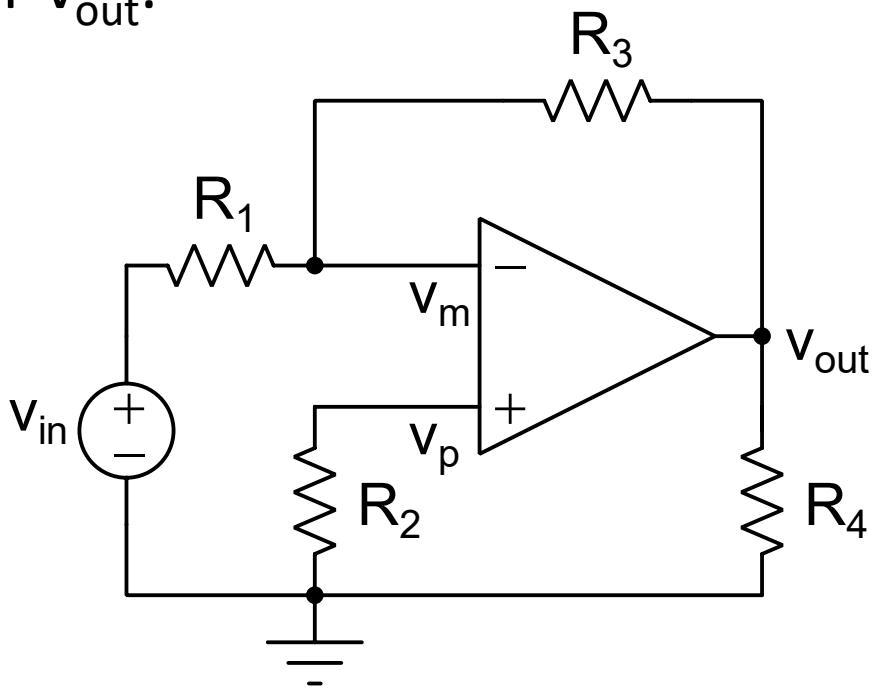
    1. Reemplazar el opamp por su modelo equivalente con ganancia A, resolver de cualquier forma y al final hacer tender A a infinito.

    2. No esperar hasta el final para hacer tender A a infinito, es decir, asumir que hay cortocircuito virtual desde un principio y resolver considerando esta condición.

- La segunda alternativa es mucho mejor, pero siempre hay que saber cómo hacer la primera, ya que por ejemplo sirve para analizar cómo cambia la respuesta del circuito cuando la ganancia del opamp no es tan grande como nos gustaría.

Opamp ideal

- **Ejemplo**: calcular v_{out}.



- Resolveremos este ejercicio de las dos formas posibles, aunque más adelante sólo usaremos la segunda forma (asumiremos que hay cortocircuito virtual desde un comienzo).

Opamp ideal

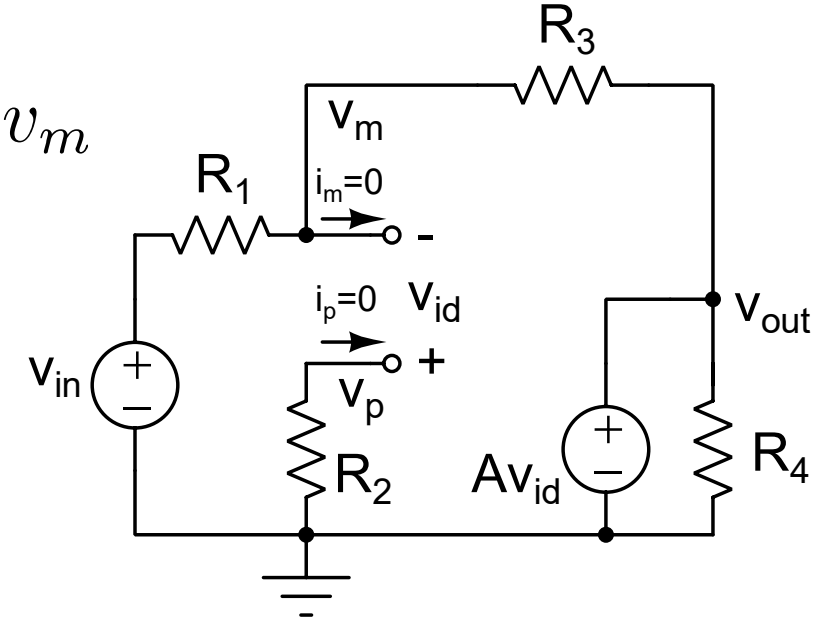
- Reemplazamos el opamp por su modelo equivalente y resolvemos:

$$v_{out} = Av_{id} = A(v_p - v_m) = -Av_m$$

$$v_m = -\frac{R_1}{R_1+R_3}Av_m + \frac{R_3}{R_1+R_3}v_{in}$$

$$\rightarrow v_m = \frac{R_3}{R_3+(1+A)R_1}v_{in}$$

$$\rightarrow v_{out} = -\frac{AR_3}{R_3+(1+A)R_1}v_{in}$$



- Finalmente hacemos tender A a infinito:

$$v_{out} = -\frac{R_3}{R_1}v_{in}$$

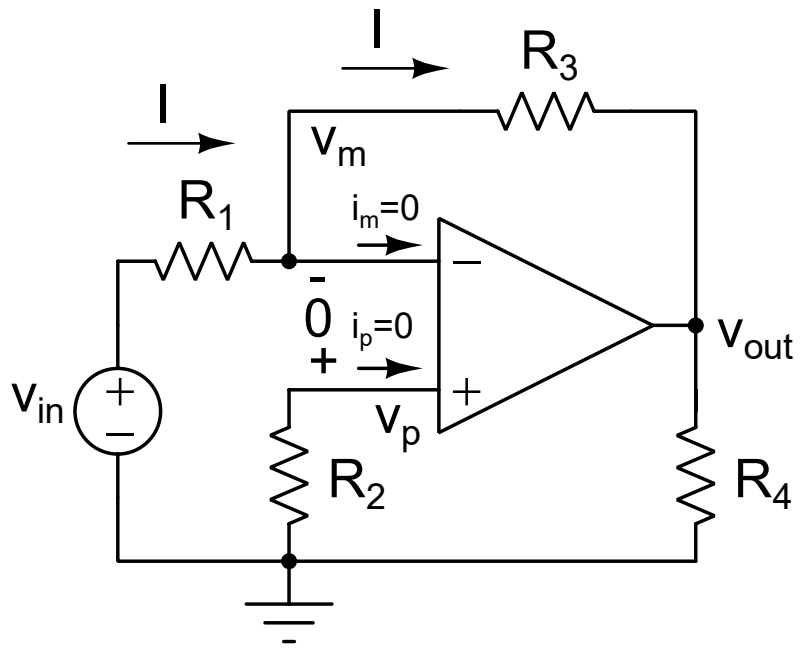
Opamp ideal

- Ahora resolvemos asumiendo que A es infinito desde un comienzo y que por lo lo tanto, dado que el opamp se encuentra realimentado negativamente, hay cortocircuito virtual en la entrada.

$$v_m = v_p = 0$$

$$I = \frac{v_{in} - 0}{R_1} = \frac{0 - v_{out}}{R_3}$$

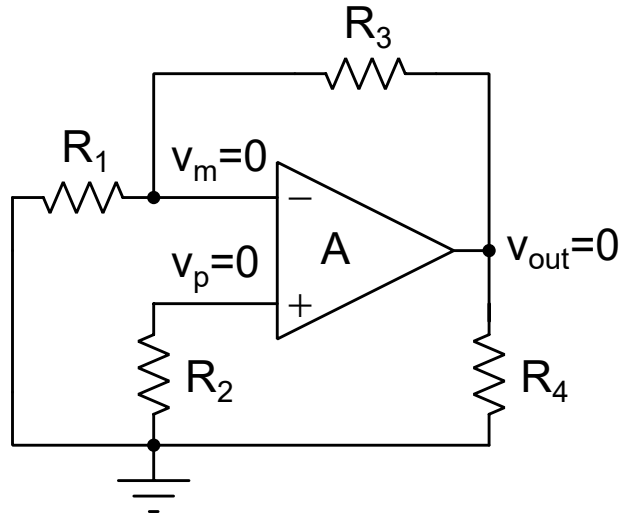
$$\rightarrow v_{out} = -\frac{R_3}{R_1} v_{in}$$



Opamp ideal

- Finalmente veamos cómo opera el lazo de realimentación negativa (para simplificar la explicación asumiremos que $v_{in} = 0$).
  - Supongamos que estamos en un punto tal que $v_m = 0$ y $v_{out} = 0$ y luego v_{out} se hace negativo:

$$v_{out} < 0$$
$$\rightarrow v_m = \frac{R_1}{R_1 + R_3} v_{out} < 0$$
$$\rightarrow v_{out} = -A v_m > 0$$



Un cambio en la salida genera una reacción del sistema tal que se contrarresta el cambio original

→ realimentación negativa!

Fin ej.

Circuitos con opamps

- Un opamp, en conjunto con los componentes circuitales pasivos que hemos visto, permite construir bloques funcionales útiles en el procesamiento de señales eléctricas.

- A continuación veremos varios de estos bloques circuitales. Claramente hay muchos más (prácticamente la imaginación es el límite), pero con los acá presentados se pueden hacer una buena idea del alcance que tiene el opamp en aplicaciones circuitales.

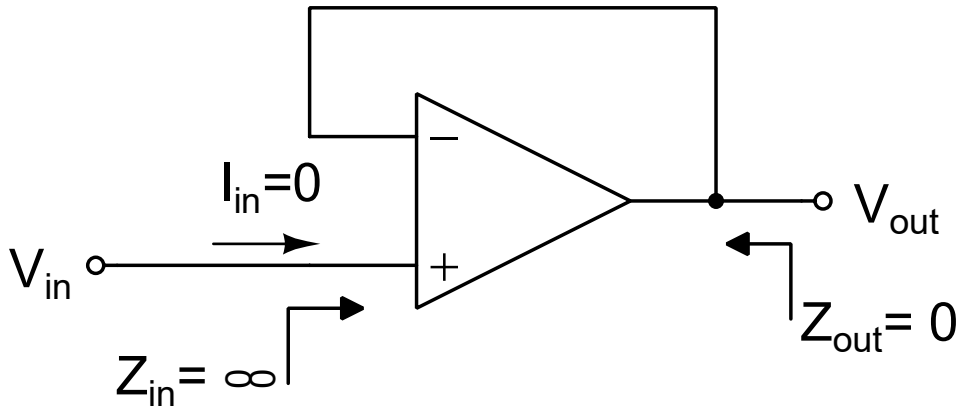
    - Recordar que *SIEMPRE* las corrientes de entrada del opamp son nulas, y que en presencia de realimentación negativa los voltajes de entrada son iguales.

Circuitos con opamps

- Buffer de voltaje:

$$V_{in} = V_p = V_m = V_{out}$$

$$\rightarrow V_{in} = V_{out}$$



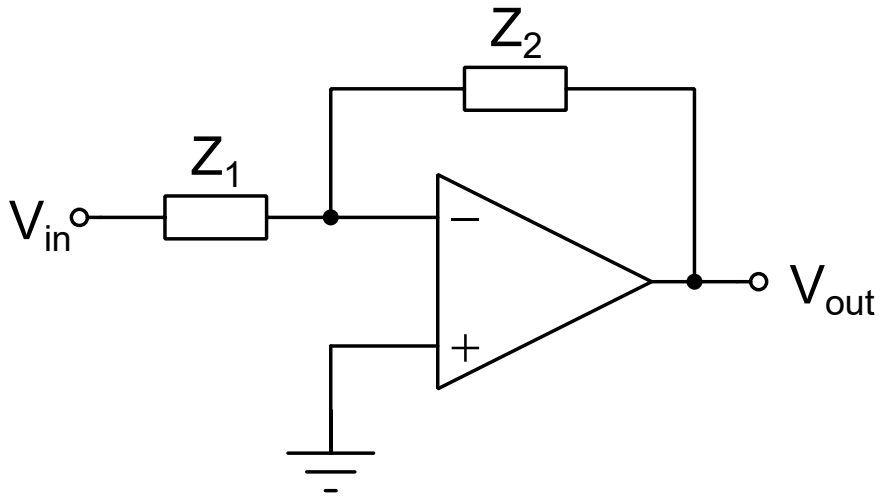
- Se puede ver que esta configuración se asemeja bastante a un buffer de voltaje ideal:
  - Corriente de entrada prácticamente nula (i.e. impedancia de entrada infinita).
  - Impedancia de salida prácticamente nula (puede manejar cualquier carga).

Circuitos con opamps

- Amplificador inversor:

$$\frac{V_{in}-0}{Z_1} = \frac{0-V_{out}}{Z_2}$$

$$\rightarrow V_{out} = -\frac{Z_2}{Z_1} V_{in}$$

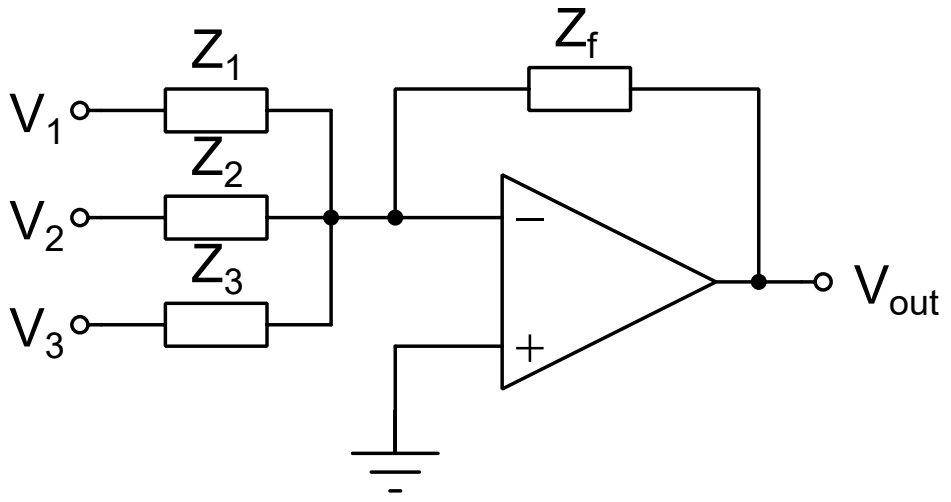


- Manipulando Z_2 y Z_1 se puede obtener prácticamente cualquier expresión de ganancia en función de s.

Circuitos con opamps

- Sumador inversor:
  - Por superposición:

$$V_{out} = -Z_f \left(\frac{V_1}{Z_1} + \frac{V_2}{Z_2} + \frac{V_3}{Z_3} \right)$$

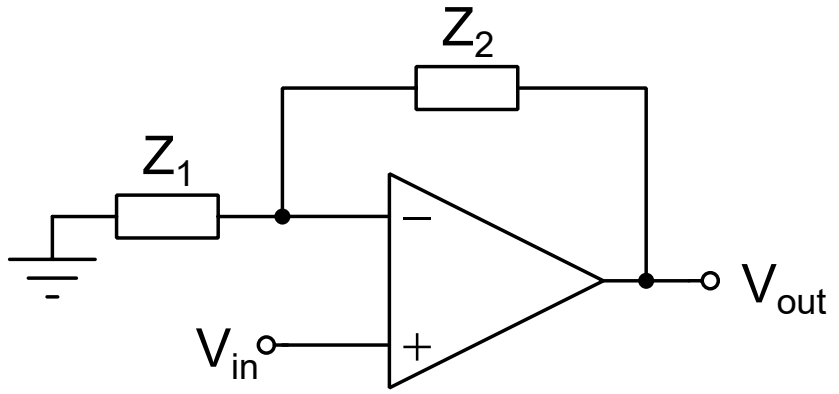


Circuitos con opamps

- Amplificador no inversor:

$$\frac{0-V_{in}}{Z_1} = \frac{V_{in}-V_{out}}{Z_2}$$

$$\rightarrow V_{out} = \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right) V_{in}$$



- Al hacer Z_1 infinito o Z_2 cero esta topología se transforma en el buffer de voltaje antes visto.

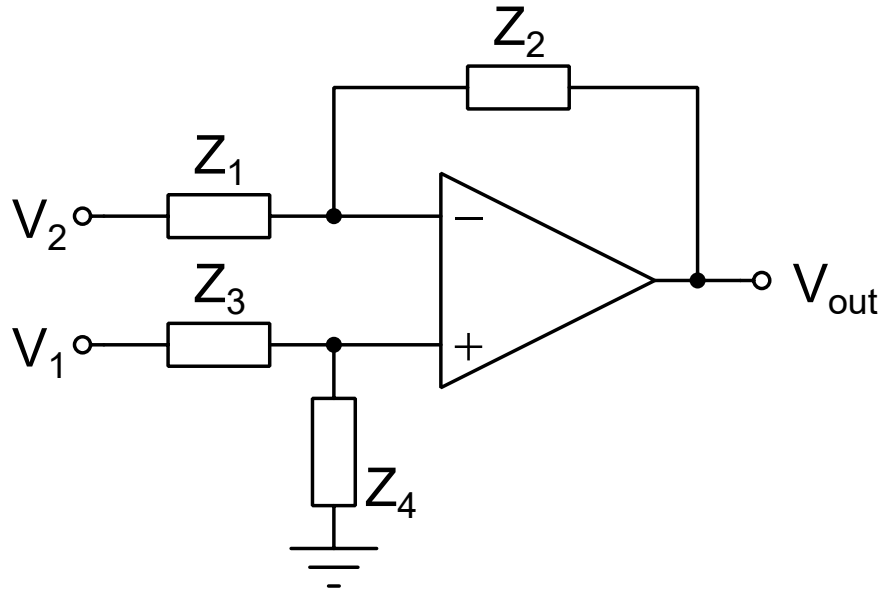
Circuitos con opamps

- Restador:
  - Por superposición:

$$V_{out} = \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right) \frac{Z_4}{Z_3 + Z_4} V_1 - \frac{Z_2}{Z_1} V_2$$

  - Si $Z_2/Z_1 = Z_4/Z_3$:

$$V_{out} = \frac{Z_2}{Z_1} (V_1 - V_2)$$



Circuitos con opamps

- Integrador:

$$i(t) = -\frac{v_{in}(t)}{R} = C\frac{\mathrm{d}v_C(t)}{\mathrm{d}t}$$

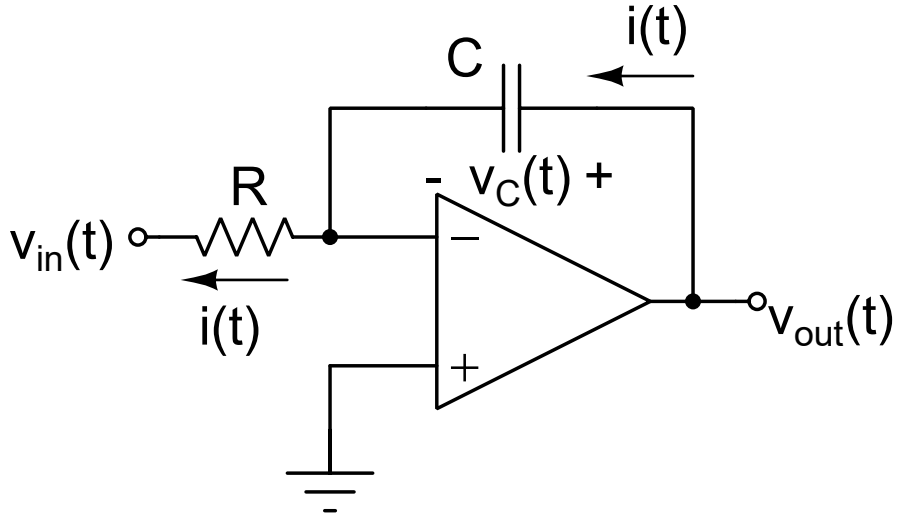
$$\rightarrow v_{out}(t) = v_C(t) = -\frac{1}{RC}\int_0^t v_{in}(x)\mathrm{d}x + v_C(0)$$

- Notar que este es un caso particular del amplificador inversor:

$$V_{out} = -\frac{1}{sRC}V_{in}$$

↑

Ya sabíamos que 1/s era equivalente a integrar!



Circuitos con opamps

- Derivador:

$$i(t) = \frac{v_{out}(t)}{R} = C\frac{\mathrm{d}v_C(t)}{\mathrm{d}t} = -C\frac{\mathrm{d}v_{in}(t)}{\mathrm{d}t}$$

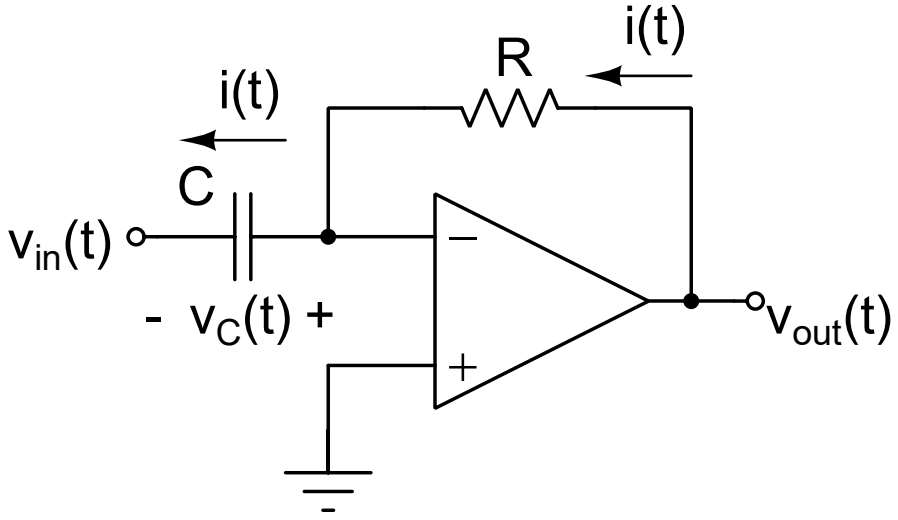
$$\rightarrow v_{out}(t) = -RC\frac{\mathrm{d}v_{in}(t)}{\mathrm{d}t}$$

- Este también es un caso particular del amplificador inversor:

$$V_{out} = -sRCV_{in}$$

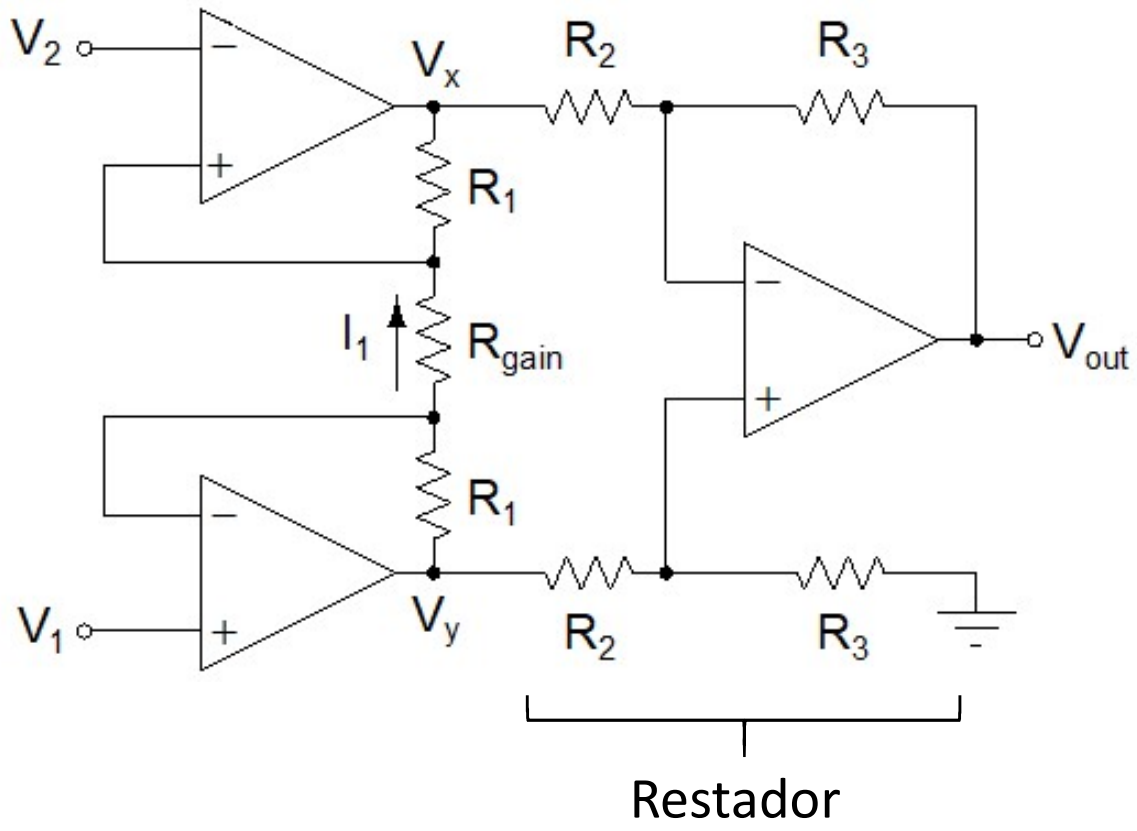
↑

Ya sabíamos que s era equivalente a derivar!



Circuitos con opamps

- Amplificador de instrumentación:



$$I_1 = \frac{V_1 - V_2}{R_{gain}}$$

$$V_y - V_x = (R_{gain} + 2R_1) I_1$$

$$V_{out} = \frac{R_3}{R_2}(V_y - V_x)$$

$$\rightarrow V_{out} = \left(1 + \frac{2R_1}{R_{gain}}\right) \frac{R_3}{R_2} (V_1 - V_2)$$

Circuitos con opamps

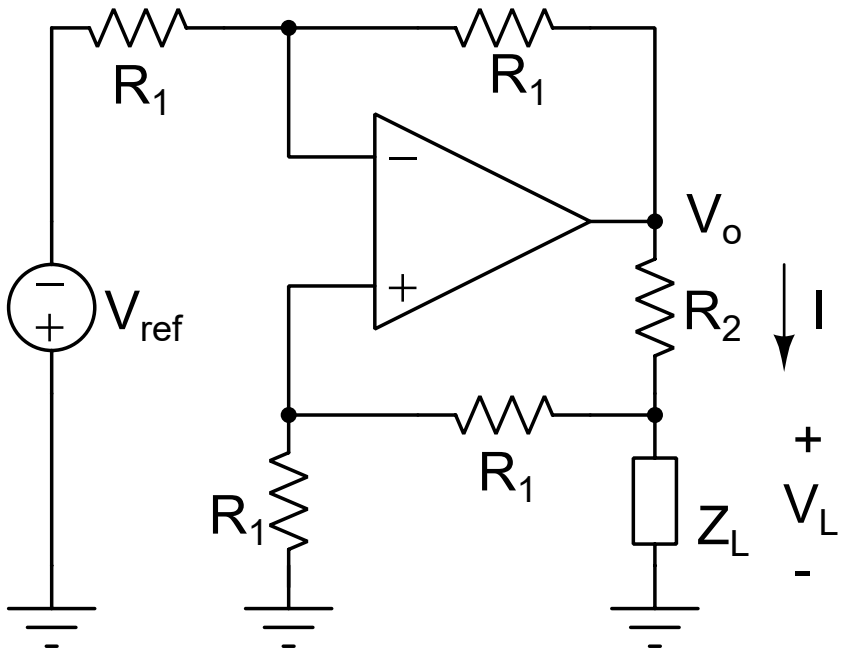
- Fuente de corriente de Widlar para cargas conectadas a tierra:

$$V_m = V_p = \frac{1}{2} V_L$$

  - Por superposición:

$$V_o = V_L + V_{ref}$$

$$\rightarrow I = \frac{V_o - V_L}{R_2} = \frac{V_{ref}}{R_2}$$

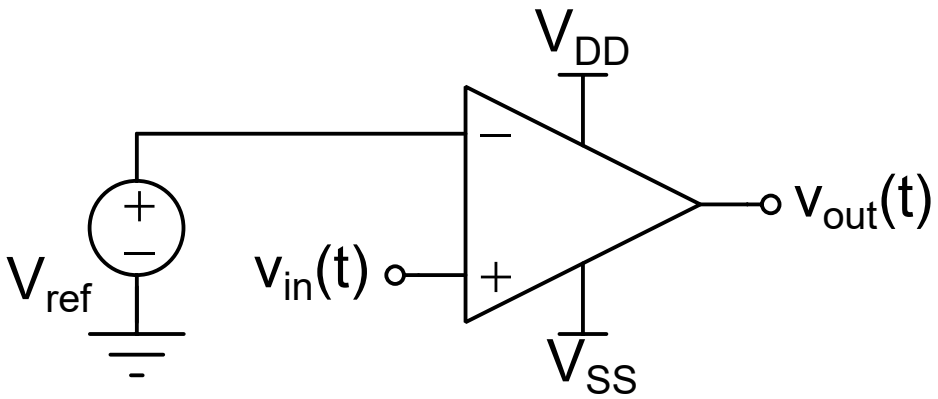


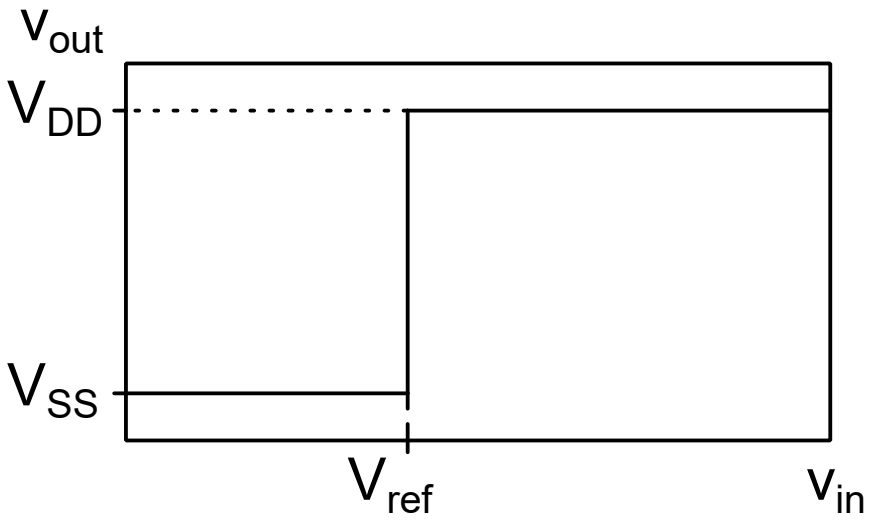
Circuitos no lineales con opamps

- También se pueden ocupar opamps para implementar bloques funcionales no lineales muy útiles.
  - Este contenido corresponde a otros cursos donde se ven circuitos no lineales (en este curso sólo hemos estudiado circuitos lineales).
  - En términos puramente académicos una de las gracias que tienen los circuitos no lineales es que para resolverlos hay que pensar “mucho más en serio”, a diferencia de los circuitos lineales para los cuales contamos con técnicas sistemáticas de resolución.

Circuitos no lineales con opamps

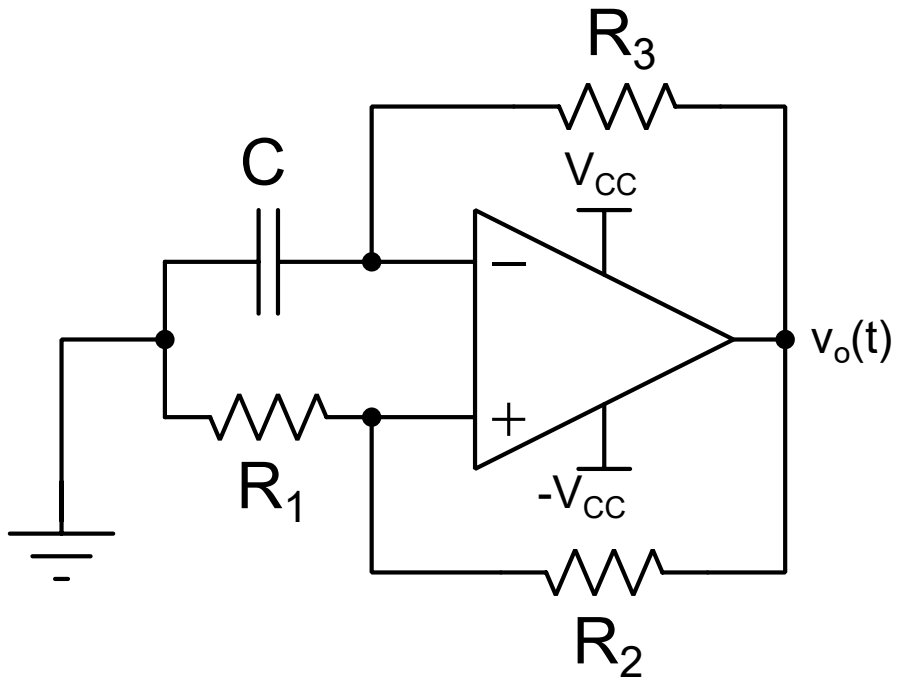
- Comparador:





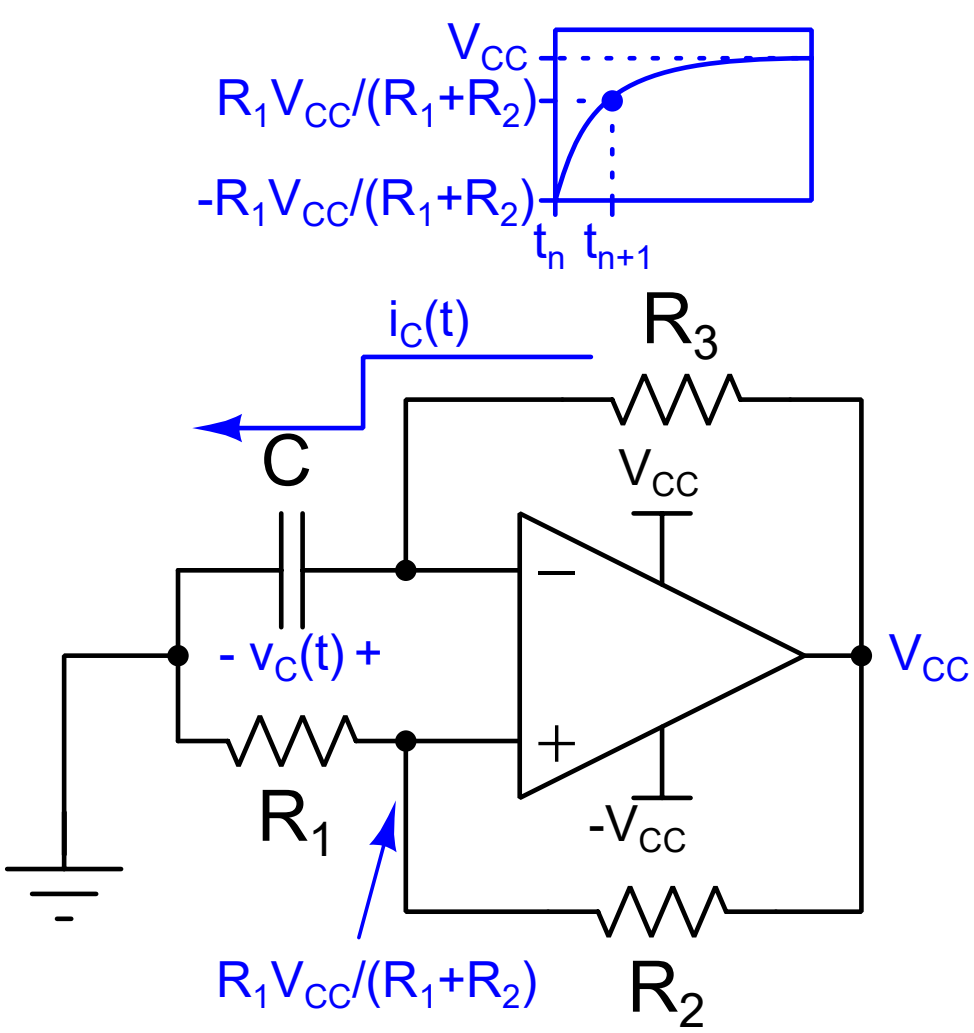
Circuitos no lineales con opamps

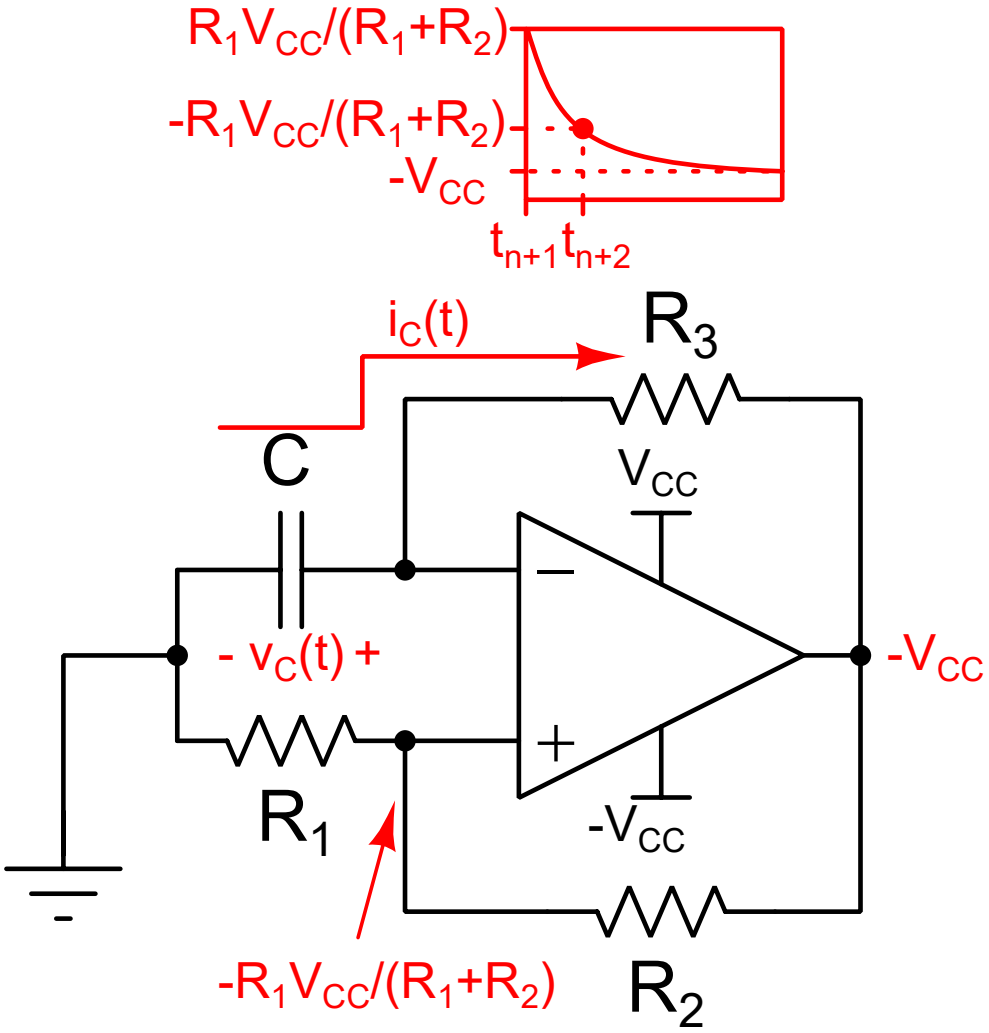
- Oscilador estable:
  - En este circuito el opamp opera como comparador, alternando entre V_{CC} y $-V_{CC}$ en la medida que el capacitor se carga y se descarga.



Circuitos no lineales con opamps

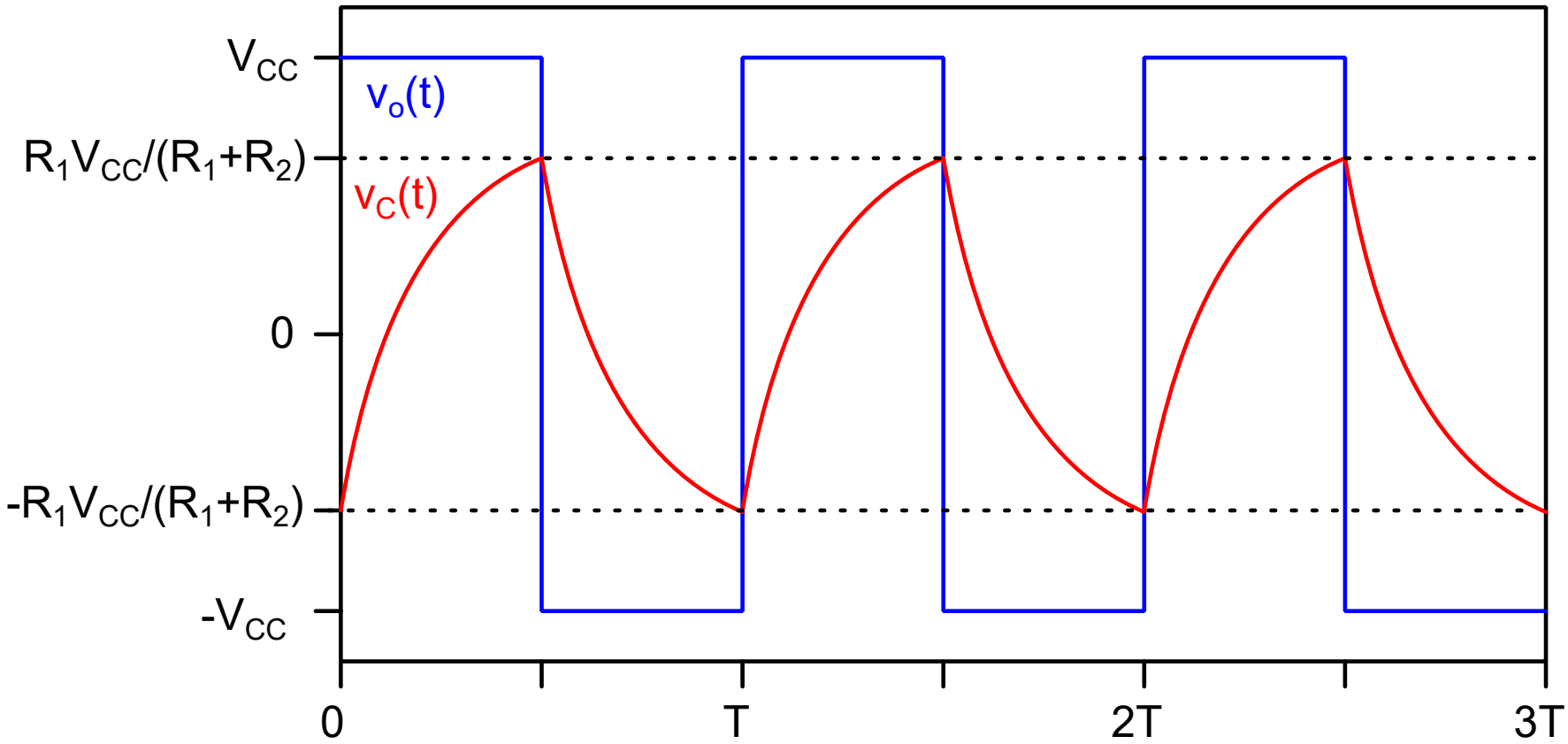
- Así:





Circuitos no lineales con opamps

- Así, asumiendo $v_C(0) = -R_1 V_{CC}/(R_1+R_2)$:



$$T = 2R_3C\ln\left(1+\frac{2R_1}{R_2}\right)$$