IEE 2123 Circuitos Eléctricos
Prof. David Watts, PUC
Clase 12 y 13: Resumen Amplificador Operacional (AO)

Contenidos:

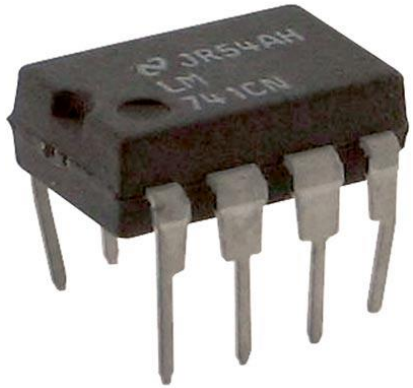
Amplificador Operacional

1. Introducción
2. El Amplificador Ideal
3. Usando el AO ideal: Ejemplos de circuitos
4. Aplicaciones de ejemplo

Apéndice

1. Introducción extendida
2. El A.O.
   2.1. Funcionamiento
   Aplicaciones
3. Modelos equivalentes

Capítulo 6 Dorf 6ª Edición



1. El amplificador operacional

- **Diagrama circuital de un A.O:**

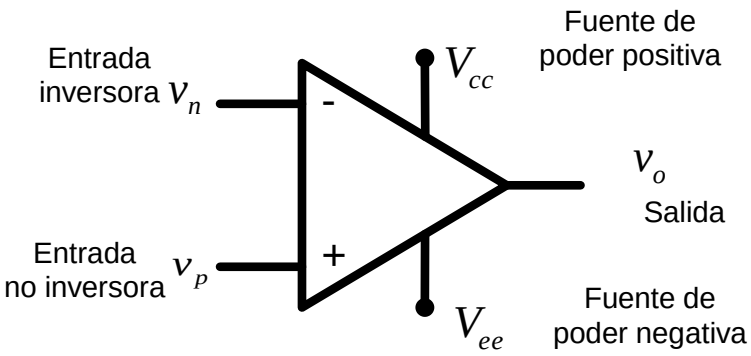
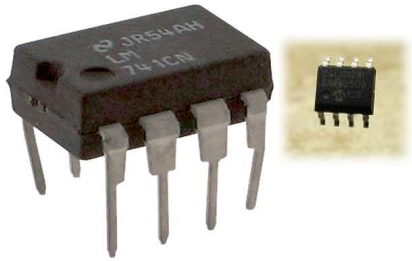
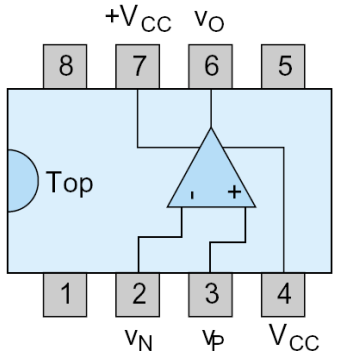


Diagrama de conexiones de un Chip A.O.:





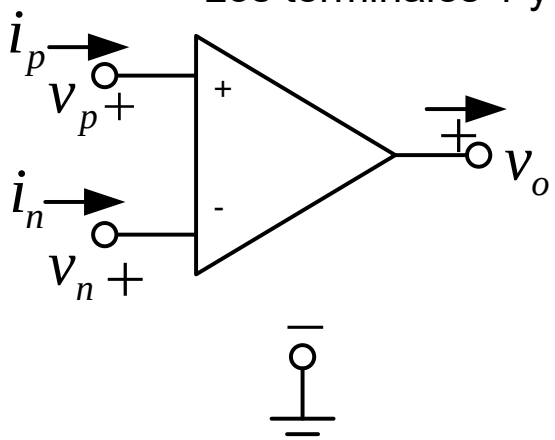
Todos los voltajes (el de las dos entradas, salida y fuentes de poder) están referidos a un nodo común.

El terminal 8 se deja libre (sin conexión)

El terminal 6 es la salida

Los terminales 1 y 5 son para “ajuste de cero”

Diagrama simplificado:



2. El A.O. ideal

Modelo del AO Ideal:

$R_I > 100.000\Omega$
$R_O < 100\Omega$
$A > 10.000$

$\Rightarrow$

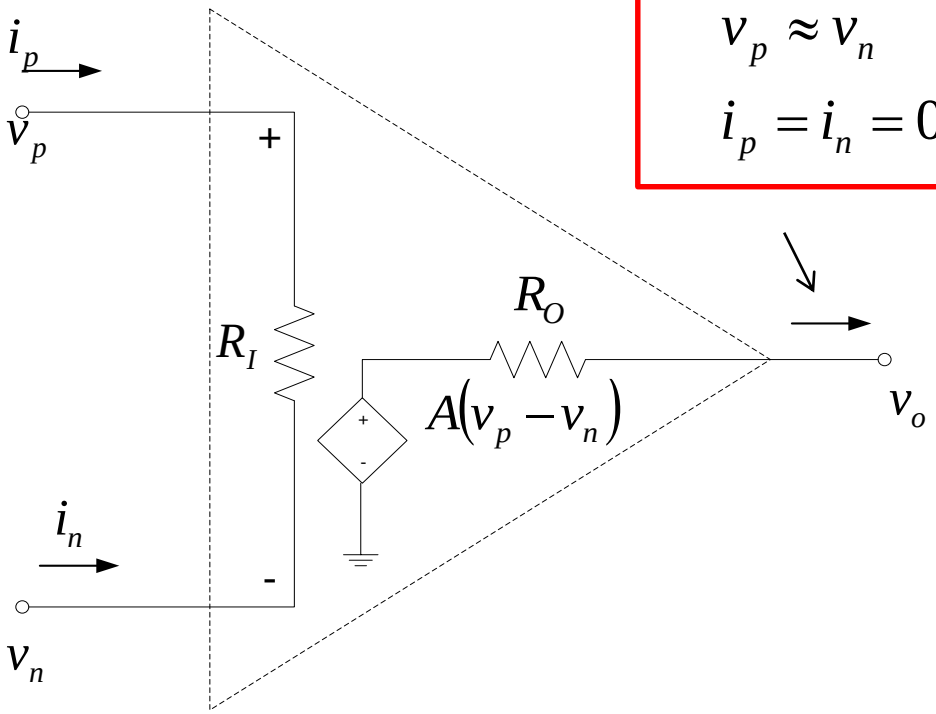
$R_I = \infty$
$R_O = 0$
$A = \infty$

$\Rightarrow$

$v_o = A(v_p - v_n)$

Esto es todo lo que necesito saber del Amplificador operacional

$$v_p \approx v_n$$
$$i_p = i_n = 0$$

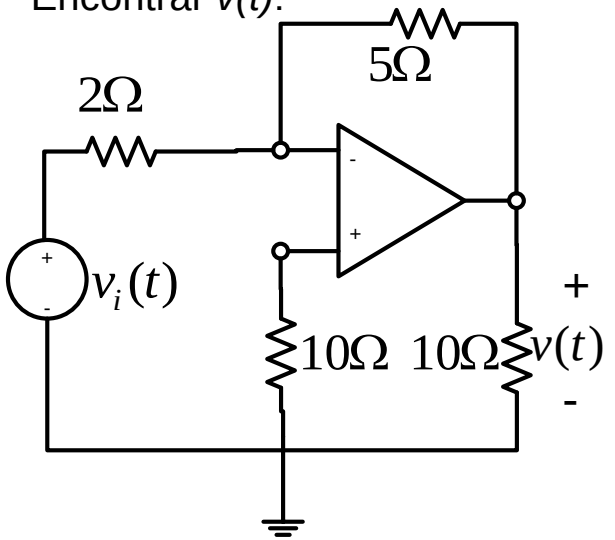


Resolver ejercicios con A.O.

- Reemplazar el A.O. por las condiciones de su **modelo ide** y realimentación negativa:

$i_p = i_n = 0$ $\quad$ $v_p = v_n$

- **Resolver** de la manera que parezca más conveniente.
  - Nodos, LVK, LCK,…
- **Ejemplo:**
  - Encontrar *v(t)*:

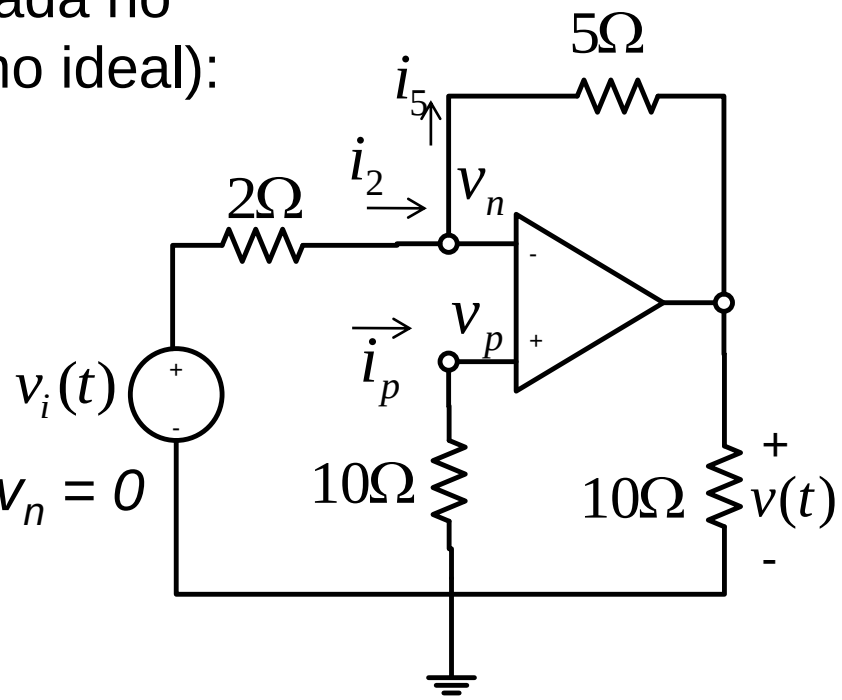


El amplificador operacional – El A.O. ideal

3. Usando El A.O. ideal:
Ejemplo.

Hacemos LKC en el nodo de la entrada no inversora (considerando el A.O. como ideal):

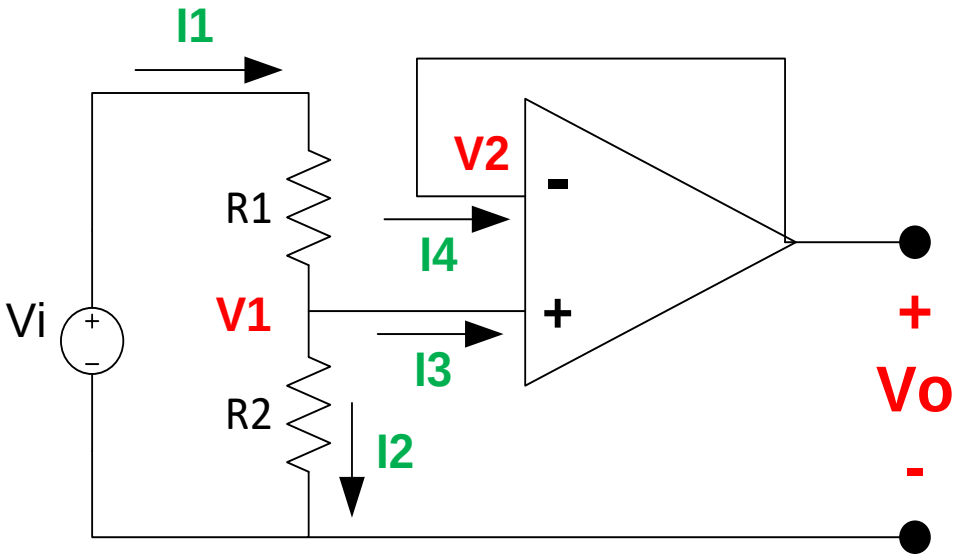
$$v_p = v_n$$
$$i_p = i_n = 0 \rightarrow v_p = ?$$
$$\frac{v_i - v_n}{2} = \frac{v_n - v}{5}$$



Como i_n es cero $v_p = 10*i_p = 0$ y $v_p = v_n = 0$
Entonces:

$$v(t) = \frac{-5}{2} v_i(t)$$

3. El A.O. ideal:
Ejemplo.



OPAMP IDEAL

$$\Rightarrow i_3 = 0 \text{ y } i_4 = 0$$

RETROALIMENTACIÓN NEGATIVA

$$\Rightarrow V_1 = V_2$$

Resolvemos Nodo en V1:

$$i_1 - i_2 - i_3 = 0$$

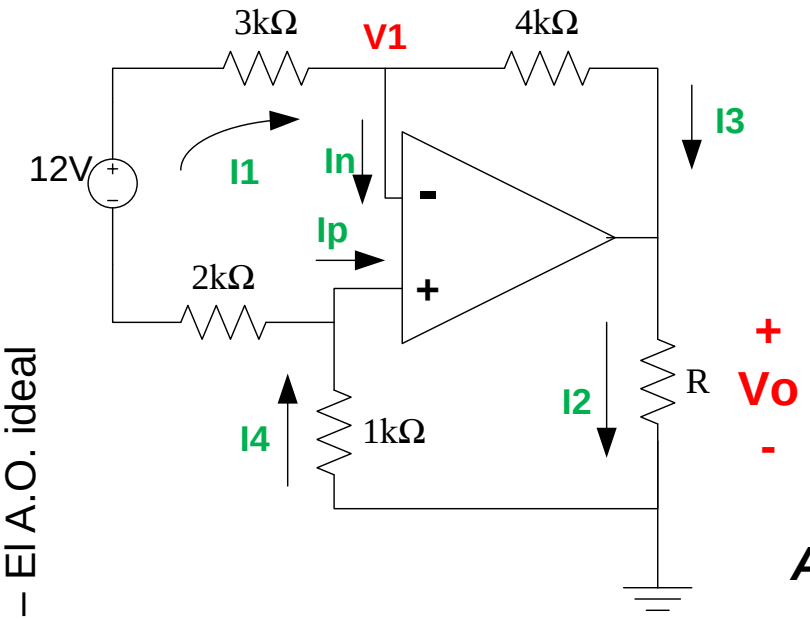
$$\rightarrow i_1 = i_2 = \frac{V_i}{R_1 + R_2}$$

Luego encontramos Vo:

$$V_o = V_2 = V_1$$

$$\rightarrow V_o = i_1 R_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_i$$

3 El A.O. ideal:
Ejemplo.



Resolvemos Malla usando $v_- = v_+$:

$$M_1 = -12 + 3k \times i_1 + 2k \times i_1 = 0$$

$$\Rightarrow i_1 = \frac{12}{5000} = 2{,}4mA$$

Además sabemos que Ip e In son cero, luego:

$$\Rightarrow i_3 = i_1 = 2{,}4mA$$

$$\Rightarrow i_4 = i_1 = 2{,}4mA$$

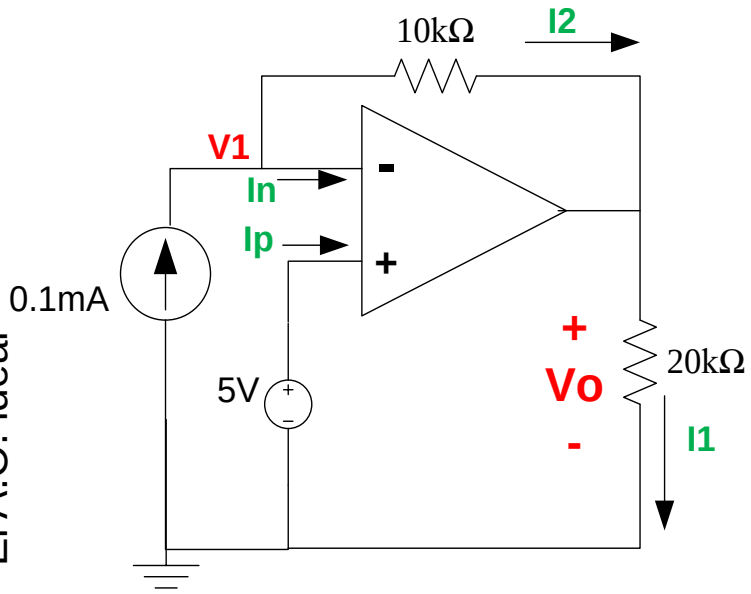
Ahora calculamos V1: $\Rightarrow V_1 = 0 + 1k \times (-i_4) = -2{,}4V$

Podemos encontrar ahora el valor de Vo aplicando ley de Ohm en 4kΩ:

$$\Rightarrow V_o = V_1 - 4k \times i_3 = -2{,}4 - 4000 \times 2{,}4m = -12V$$

Notar que:
El resultado (Vo) no depende de la carga R
I2 si depende de la carga.
Sumatorias de corrientes deben ser realizadas con cuidado!

3. El A.O. ideal:
Ejemplo.



Sabemos que Ip e In son cero, luego:

$$\Rightarrow i_2 = 0{,}1mA$$

Además sabemos que Vp=Vn:

$$\Rightarrow V_1 = 5V$$

Ahora entonces Vo:

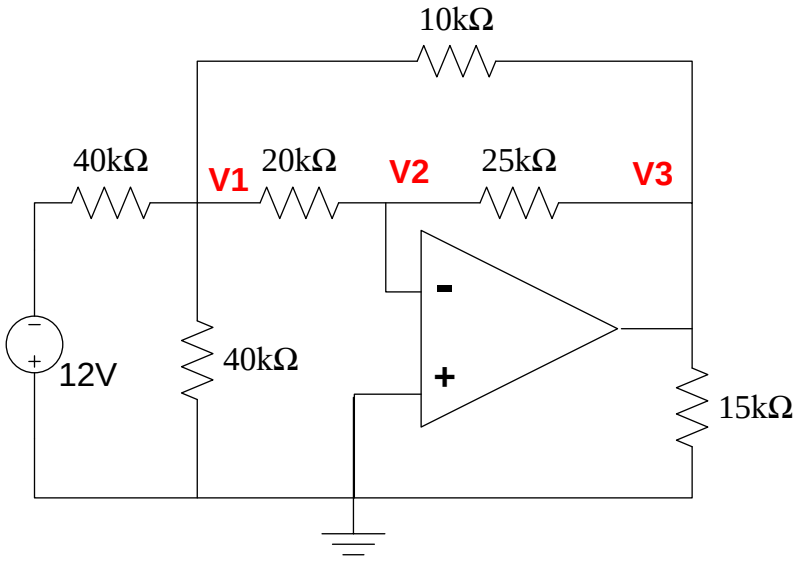
$$\Rightarrow V_o = V_1 - 10k \times i_2 = 4V$$

Aplicamos Ley de Ohm en la resistencia de 20kΩ:

$$\Rightarrow i_1 = \frac{4V}{20k\Omega} = 0{,}2mA$$

Notamos que la corriente i1 es distinta de i2

3. El A.O. ideal:
Ejemplo.



Aplicando LKC en el nodo 1:

$$\Rightarrow \frac{-12-V_1}{40k}+\frac{0-V_1}{40k}+\frac{V_2-V_1}{20k}+\frac{V_3-V_1}{10k}=0$$

Como es OPAMP ideal retroalimentado sabemos: $\Rightarrow V_2 = 0$

Aplicando LKC en el nodo 2:

$$\Rightarrow \frac{V_1-0}{20k}+\frac{V_3-0}{25k}=0$$

Resolviendo encontramos: $\Rightarrow V_1 = -\frac{12}{13}\ y\ V_3 = \frac{15}{13}$

No realizar LCK en nodo 3, pues es la salida del A.O.

Tarea: Diseñe un integrador, un derivador, un restador, y un sumador inversor

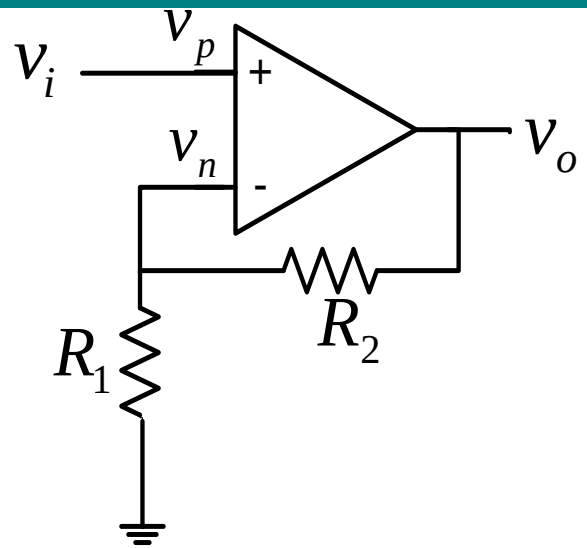
4. Aplicaciones de ejemplo

Al combinar un **A.O.** con **resistencias**, **condensadores** e **inductancias** puede realizar **muchas funciones útiles**, entre las que se encuentran las siguientes, para una señal de entrada:

- Amplificación/escalamiento
- Cambio de signo (inversión)
- Suma de varias señales
- Resta de varias señales
- Integración y derivación con respecto al tiempo

A continuación veremos algunos ejemplos.

4. Amplificador no inversor



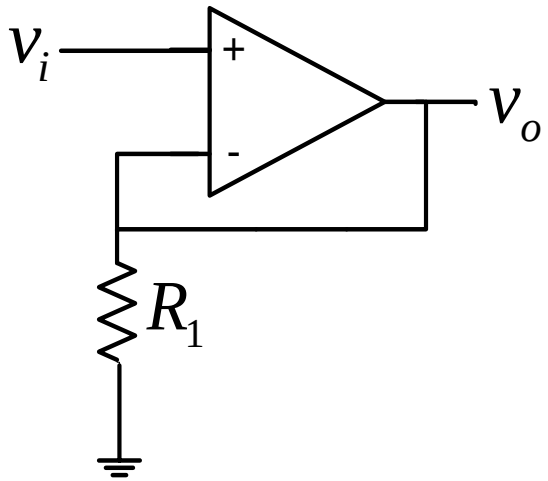
Nodo de la entrada inversora:

$$v_n = v_p = v_i;\ i_p = i_n = 0$$

$$\frac{v_i}{R_1} + \frac{v_i - v_o}{R_2} = 0$$

$$\boxed{\frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}}$$

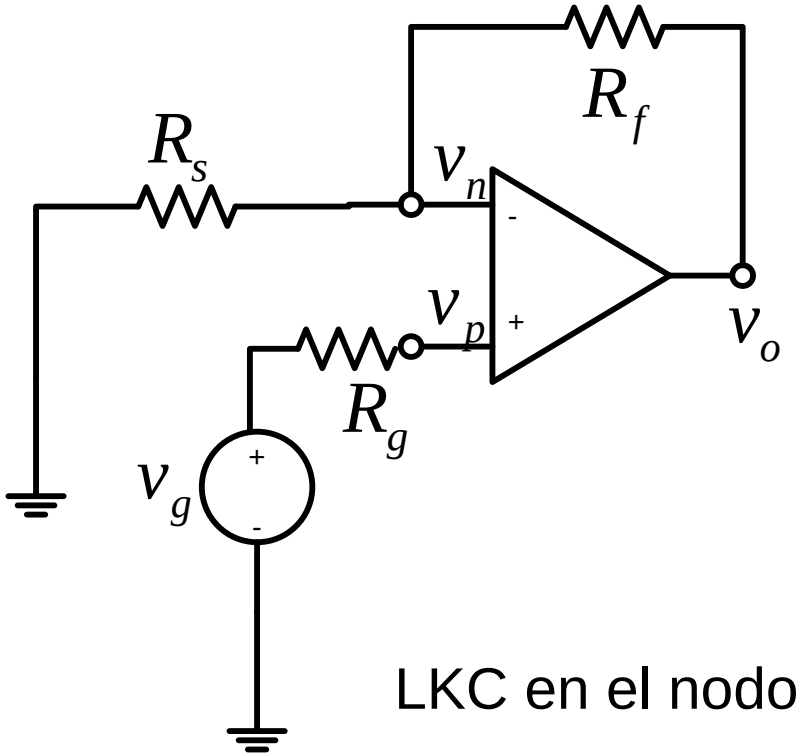
Circuito seguidor de voltaje (circuito anterior con R_2=0):



$$\boxed{\frac{v_o}{v_i} = 1}$$

Aplicaciones

4. Amplificador no inversor



$$v_p = v_n = v_g$$

$$i_p = i_n = 0$$

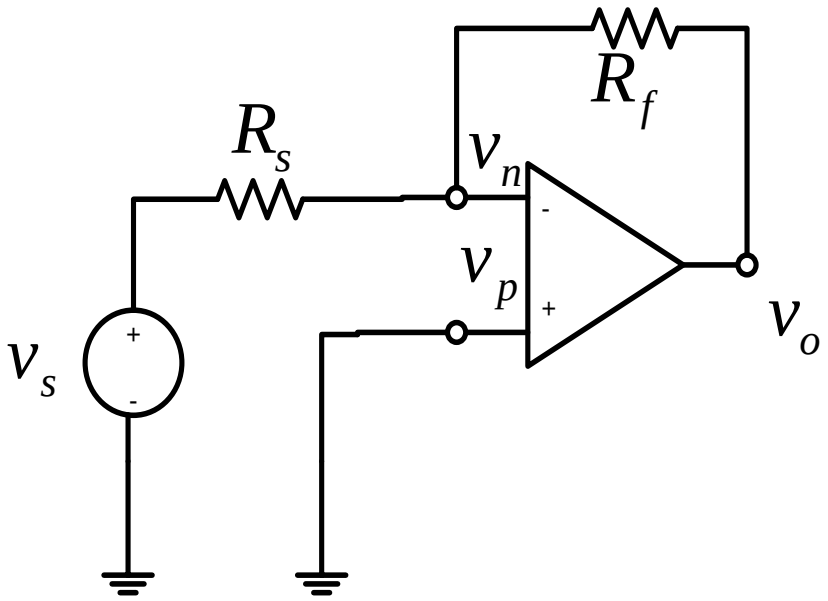
LKC en el nodo de la entrada inversora:

$$-\frac{v_g}{R_s} = \frac{v_g - v_o}{R_f}$$

$$\boxed{v_o = v_g \frac{\left(R_s + R_f\right)}{R_s}}$$

Aplicaciones

4. Inversor



$$v_p = v_n = 0$$

$$i_p = i_n = 0$$

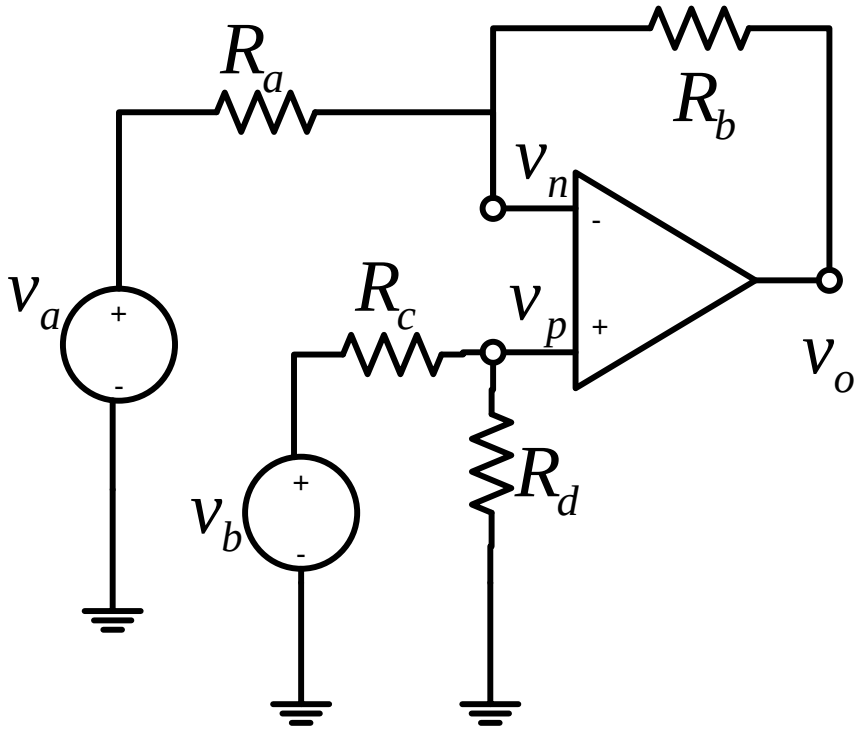
LKC en el nodo de la entrada inversora:

$$\frac{v_s - v_n}{R_s} + \frac{v_o - v_n}{R_f} = 0$$

$$\boxed{\frac{v_o}{v_s} = -\frac{R_f}{R_s}}$$

Aplicaciones

4. Restador



$$i_p = i_n = 0$$

$$\frac{v_n - v_a}{R_a} + \frac{v_n - v_o}{R_b} = 0$$

$$v_p = v_b \frac{R_d}{R_c + R_d} = v_n$$

$$\boxed{v_o = \frac{R_d\left(R_a + R_b\right)}{R_a\left(R_c + R_d\right)} v_b - \frac{R_b}{R_a} v_a}$$

Si $\dfrac{R_a}{R_b} = \dfrac{R_c}{R_d}$

Entonces: $v_o = \dfrac{R_b}{R_a}\left(v_b - v_a\right)$

Aplicaciones

4. Restador:
Método de superposición.

Por superposición:

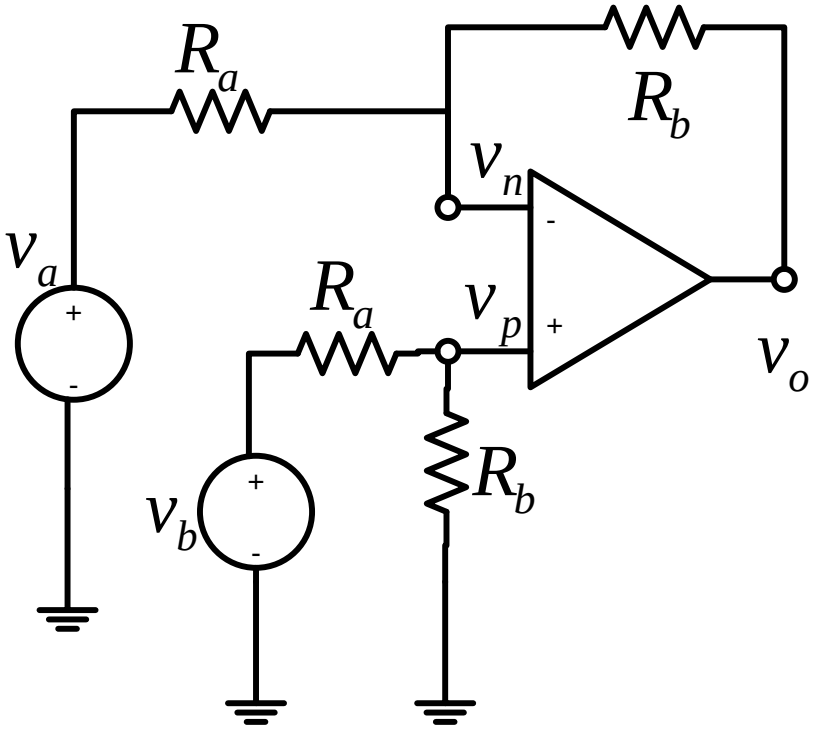
$$v_a = 0$$

$$v_{ob} = v_n \frac{R_a + R_b}{R_a} = v_p \frac{R_a + R_b}{R_a}$$

$$v_p = \frac{R_b v_b}{R_a + R_b} \rightarrow v_{ob} = v_b \frac{R_b}{R_a}$$

$$v_b = 0$$

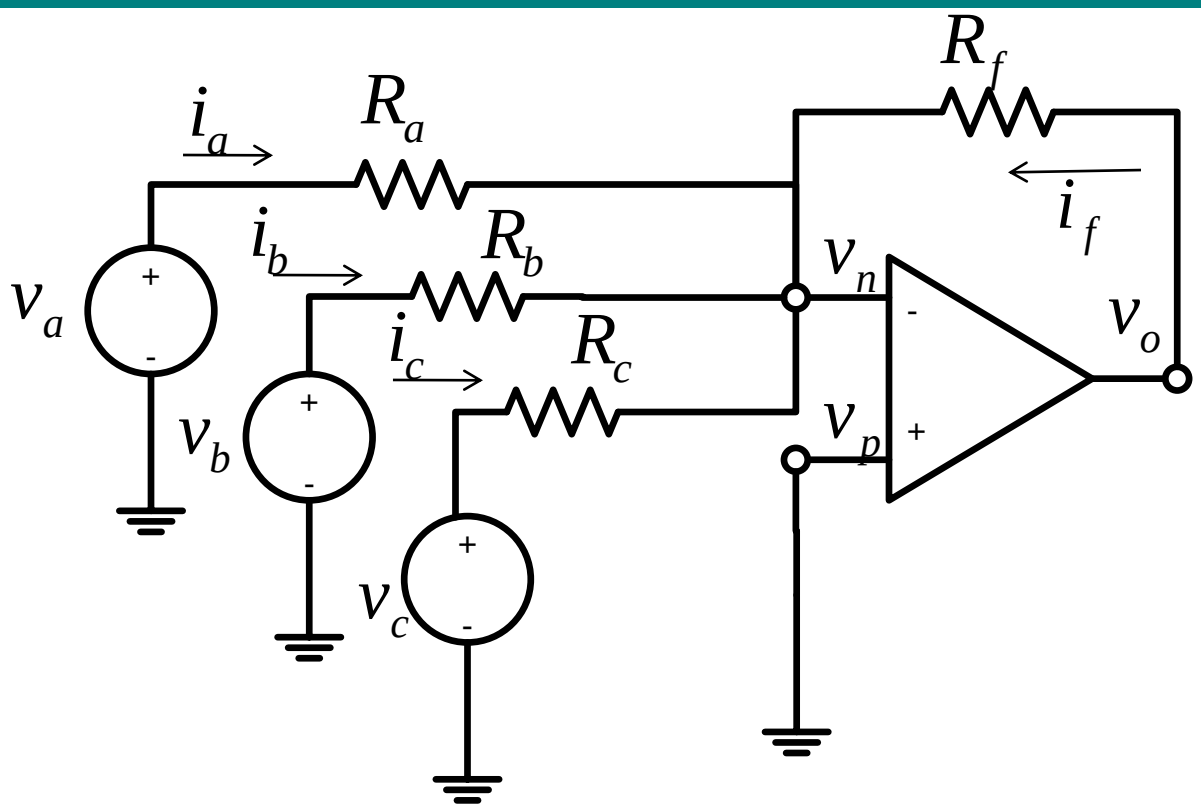
$$v_{oa} = -v_a \frac{R_b}{R_a}$$



$$v_o = v_{oa} + v_{ob} = \frac{R_b}{R_a}(v_b - v_a)$$

Aplicaciones

4. Sumador inversor



$$i_a + i_b + i_c = -i_f$$

$$v_n = v_p = 0$$

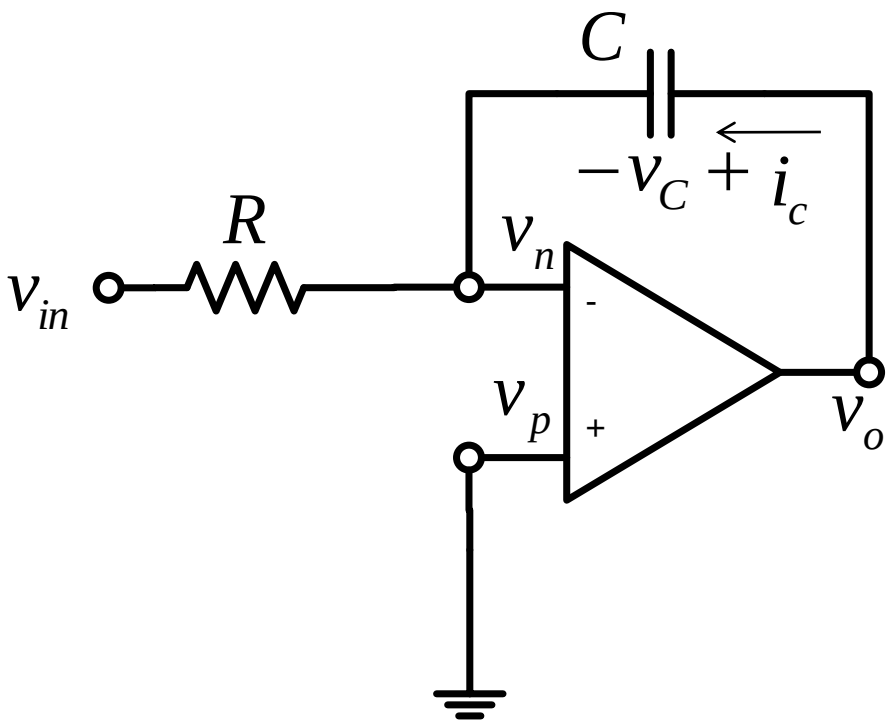
$$i_a = \frac{v_a}{R_a};\ i_b = \frac{v_b}{R_b}$$

$$i_c = \frac{v_c}{R_c};\ i_f = \frac{v_o}{R_f}$$

$$\boxed{v_o = -\left(v_a \frac{R_f}{R_a} + v_b \frac{R_f}{R_b} + v_c \frac{R_f}{R_c} \right)}$$

Aplicaciones

4. Integrador



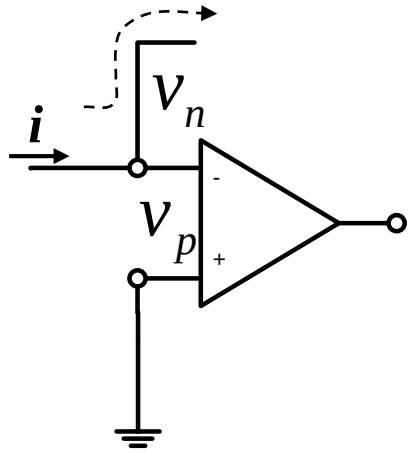
$$v_o(t) = -\frac{1}{RC}\int_0^t v_{in}(t)dt + v_C(0)$$

Aplicaciones

4. Integrador

Obtención del integrador:

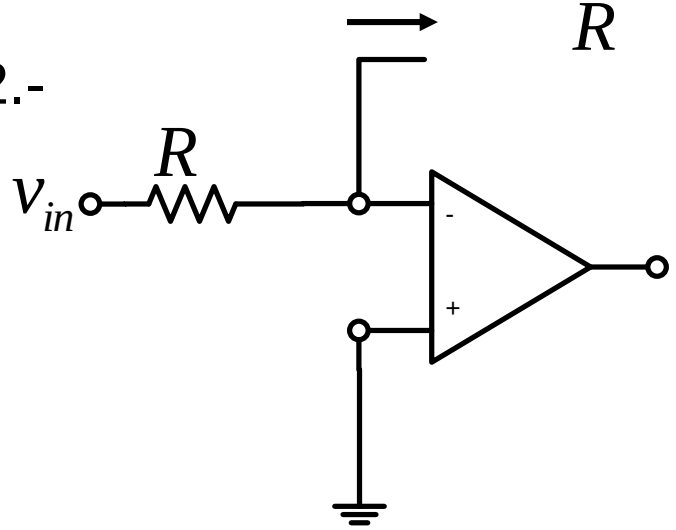
1.-



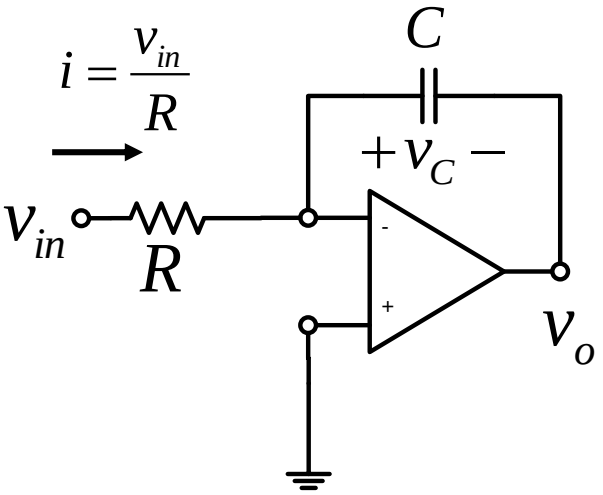
$$v_p = v_n = 0$$

$$i_n = 0$$

2.-



3.-



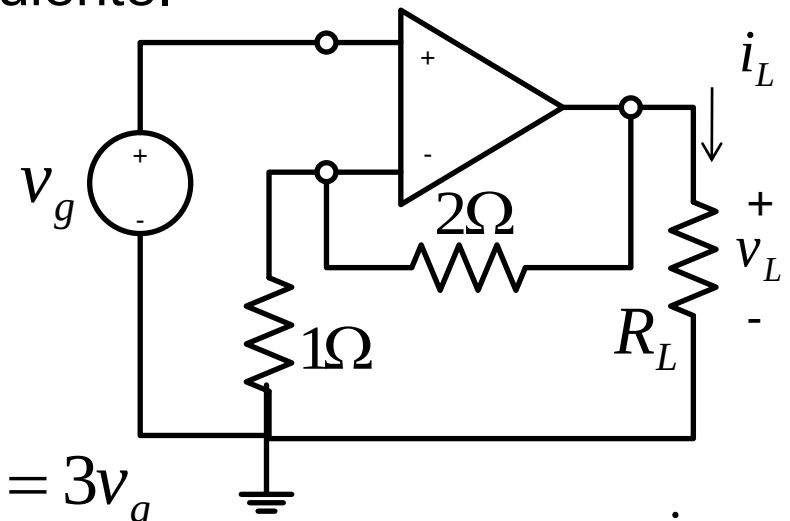
$$v_o = -v_C = -\frac{1}{C}\int_{-\infty}^{t}\frac{v_{in}(t)}{R}dt$$

$$\boxed{v_o(t) = -\frac{1}{RC}\int_{-\infty}^{t} v_{in}(t)dt}$$

Aplicaciones

4. Modelos equivalentes

Buscamos calcular v_L e i_L en la carga R_L para luego representar el circuito mediante una fuente dependiente.



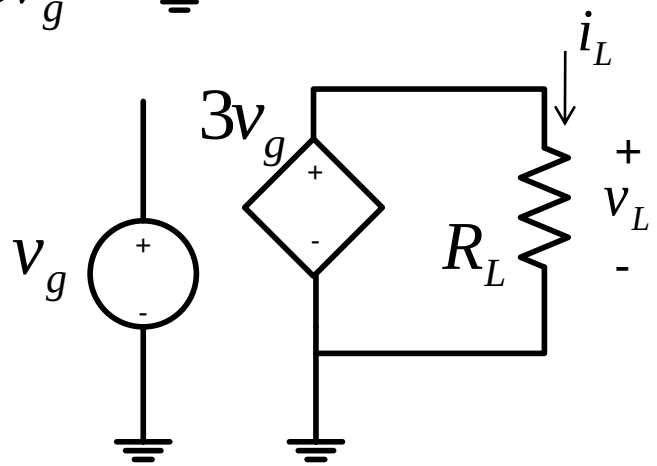
LKV en "malla izquierda":

$$v_{1\Omega} - v_g + \underbrace{v_p - v_n}_{=0} = 0 \rightarrow v_{1\Omega} = v_g$$

$$i_n = 0 \rightarrow v_{1\Omega} = \frac{1}{1+2} v_L \rightarrow v_L = 3v_{1\Omega} = 3v_g$$

$$i_L = \frac{v_L}{R_L} = \frac{3v_g}{R_L}$$

Circuito equivalente:



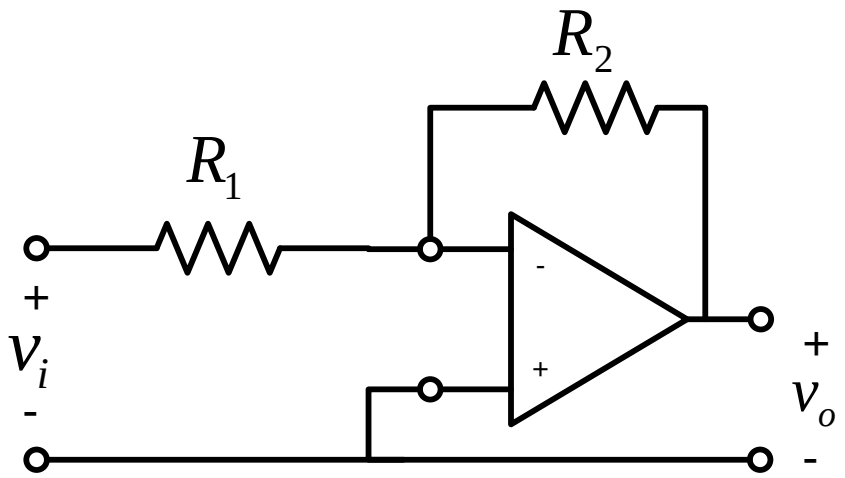
Modelo equivalente del A.O.

4. Modelos equivalentes:
Otro caso de obtención de fuente dependiente.

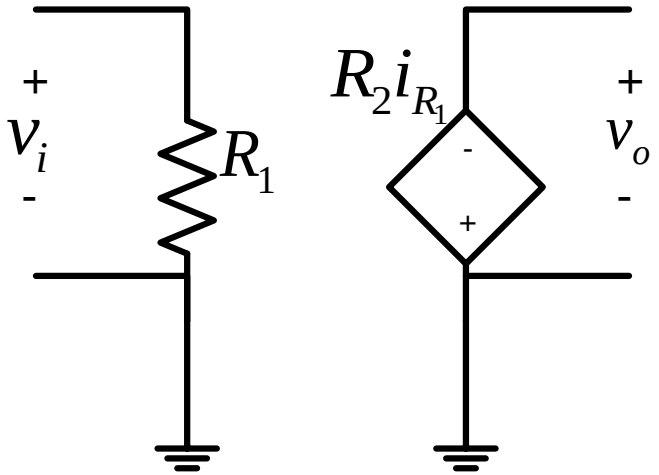
Claramente se trata de un circuito inversor, luego:

$$\frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$i_{R_1} = \frac{v_i - v_n}{R_1} = \frac{v_i}{R_1}$$



Circuito equivalente:



Modelo equivalente del A.O.

4. Modelos equivalentes

Otros:

- Funciones exponenciales y logarítmicas
- Conversores de voltaje – corriente
- Conversores digitales-análogos
- ….

Apendice

Apendice:

1. Introducción

- **Amplificador operacional (A.O., op-amp, OPAM,.):** circuito electrónico complejo compuesto por transistores y otras componentes que se usa en los circuitos con distintos fines.
- Habitualmente forma parte de un circuito integrado (CI), de muy bajo costo, tamaño, fácil uso y múltiples aplicaciones. Es un elemento activo de alta relación de ganancia y diseñado para emplearse con otros elementos de circuitos y efectuar operaciones específicas de procesamiento de señales.
- Originalmente los A.O. se utilizaban para operaciones matemáticas en calculadoras analógicas (suma, resta, multiplicación, división, integración, derivación, etc.).
- Muy simple de utilizar para amplificar/escalar, cambiar de signo (inversión), sumar varias señales (mezclar), hacer filtros activos y muchas aplicaciones en circuitos análogos.

- **Análisis con A.O. en este curso:** En este curso sólo nos interesa el comportamiento del A.O. como **componente** de un circuito y no su funcionamiento interno, luego lo consideramos como un elemento más de los circuitos, aprenderemos cómo trabajar con él y veremos qué consideraciones hay que tomar en cuenta.

2.2. El A.O. ideal

Modelo del AO Ideal: Considerando $v_o = A(v_p - v_n)$ con A muy grande (idealmente infinito), para el A.O. ideal se cumple:

$R_I > 100.000\Omega$
$R_O < 100\Omega$
$A > 10.000$

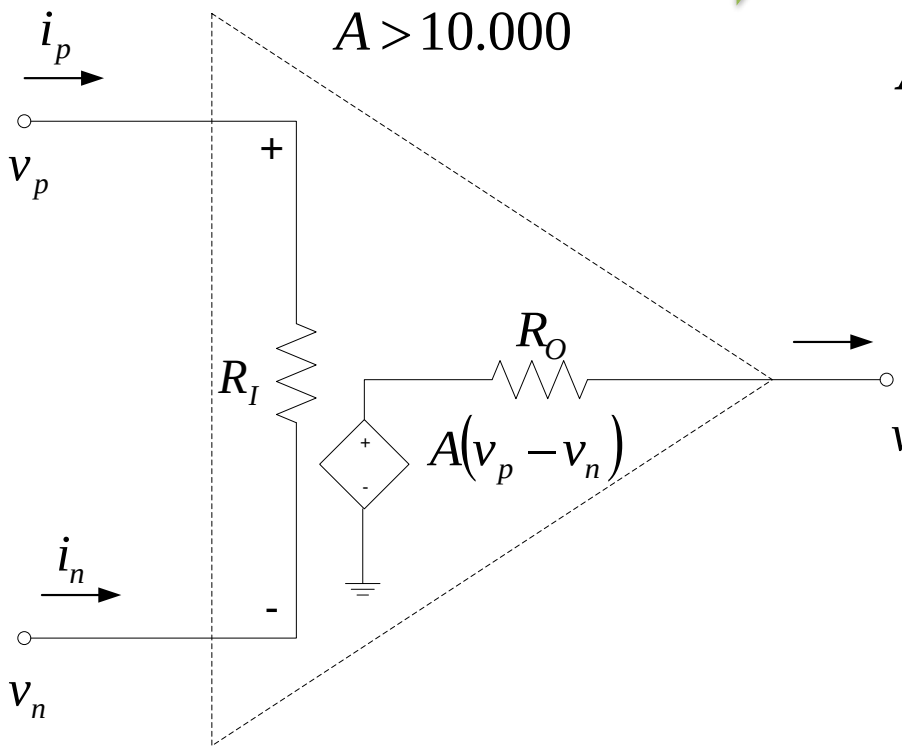
$\Rightarrow$

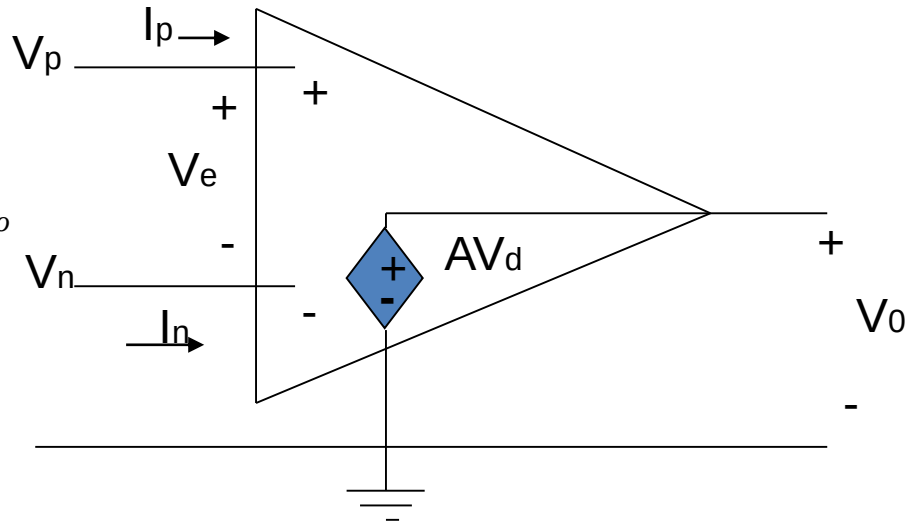
$R_I = \infty$
$R_O = 0$
$A = \infty$

$\Rightarrow$

$$v_p = v_n$$
$$i_p = i_n = 0$$

Importantísimo!





2.2. El A.O. ideal

O sea que existe un **“corto circuito virtual”** entre los terminales de entrada.

Como la resistencia de entrada es tan grande, la corriente de entrada es muy pequeña, de esto se deriva la primera regla para trabajar con el A.O. ideal:

$$i_p = i_n = 0$$

2.2. El A.O. ideal

El modelo ideal es un buen modelo para circuitos con A.O. siempre y cuando estos estén operando en su región lineal.

¿Cómo mantener un corto circuito virtual en la entrada del A.O. para asegurar su operación en la región lineal?

Usando **realimentación negativa**, que permite un sistema insensible a las condiciones ambientales y de fabricación.

2.2. El A.O. ideal:
Retroalimentación.

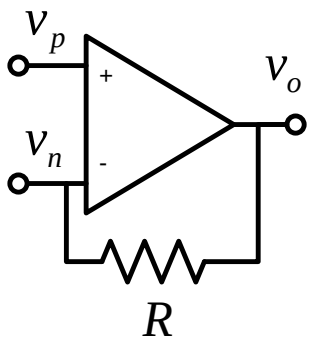
La entrada al circuito es modificada por una señal proporcional al valor de salida ”realimentado” hacia la entrada. Hay 2 tipos de realimentación:

- **Realimentación negativa:** cuando la salida crece, la señal de entrada disminuye, y viceversa (estabiliza la salida a un nivel deseado).
  - Termostato controlando la temperatura de una pieza.
  - Chofer controlando la dirección de un automóvil.
  - Cristales fotocromáticos en los lentes ópticos.

- **Realimentación positiva:** cuando la salida crece, la señal de entrada aumenta, y viceversa (lleva hacia la inestabilidad).
  - El “chillido” del micrófono en sistema de audio (acoplamiento).
  - Bi-estabilidad mecánica en interruptores de luz.
  - Reacción termonuclear en una bomba de H.

2.2. El A.O. ideal:
Retroalimentación.

Estabilidad de un A.O. → **realimentación negativa**, la salida se conecta a través de una resistencia R al terminal inversor, luego si v_o aumenta, v_n crece, reduciendo $v_d = v_p - v_n$



Un hecho importante de los A.O. con realimentación negativa es que, debido a no estar saturado, $V_d = V_0/A$ es muy pequeño, luego:

$$v_d = 0 \rightarrow v_p = v_n$$

2.2. El A.O. ideal:
Resolución de ejercicios.

- Reemplazar el A.O. por su **modelo ideal**.

$$i_p = i_n = 0$$

- Chequear la **realimentación negativa** (conexión entre el terminal de salida y el terminal inversor), y si es que hay:

$$v_p = v_n$$

- **Resolver** de la manera que parezca más conveniente.
- Nodos, LVK, LCK,…

2. El amplificador operacional

- Las **fuentes de poder** se utilizan para **polarizar** al A.O. (lo llevan a su **rango lineal de operación**) y a menudo no se dibujan ya que están relacionadas con el funcionamiento interno del A.O. y ese no es tema de este curso.
- Ojo con el balance de potencia!

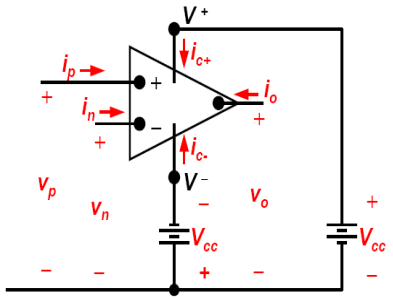
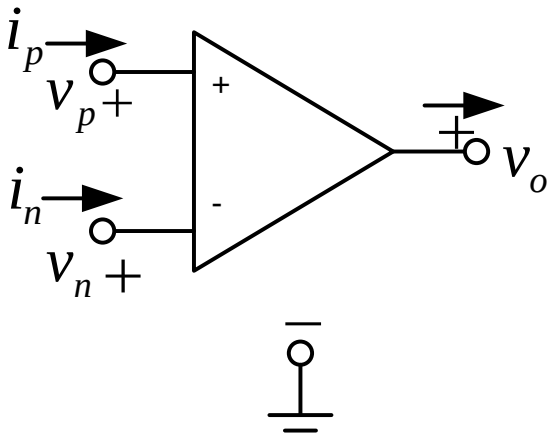


Diagrama simplificado:



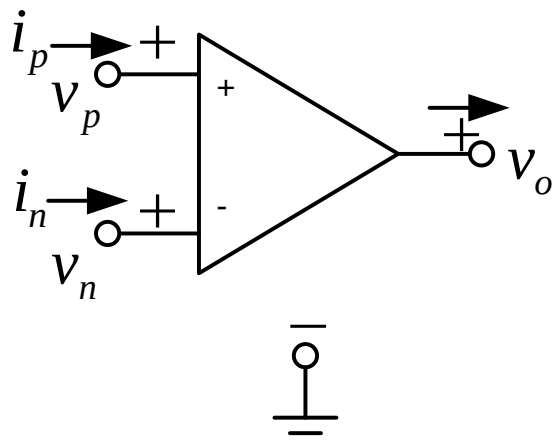
2.1. Funcionamiento

- El amplificador operacional es un amplificador de diferencias, o sea, en la región lineal:

$$v_o = A\left(v_p - v_n\right) = Av_e$$

A: ganancia de circuito abierto(>10^4)

- Los amplificadores no crean potencia, actúan como una "válvula", ajustando el flujo de potencia desde la fuente hacia la carga de acuerdo a la señal de entrada.

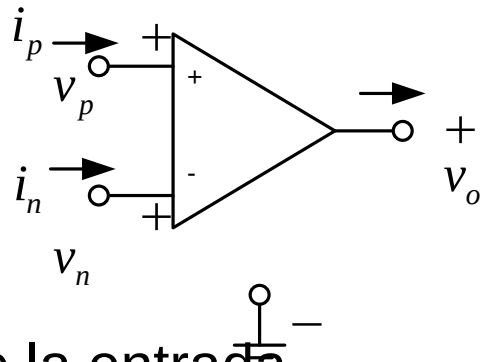


2.1. Funcionamiento

- Vo puede variar más o menos entre $V+$ y $V-$. El hecho de que el voltaje de salida de un amplificador no pueda exceder cierto valor umbral, se llama **SATURACIÓN**.

- El A.O. actúa linealmente (A constante) siempre y cuando el amplificador no esté saturado, o sea:

$$-V_{sat} < v_o < +V_{sat}$$
$$-V_{sat} < Av_e < +V_{sat}$$
$$-V_{sat}/A < v_e < +V_{sat}/A$$



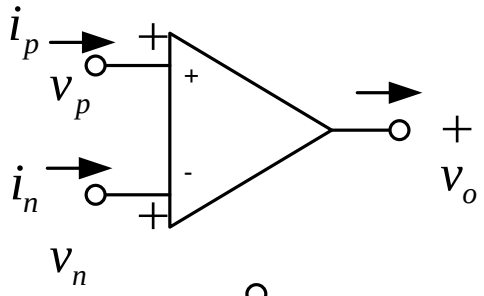
por lo tanto la saturación también depende de la entrada $V_e=V_p-V_n$.

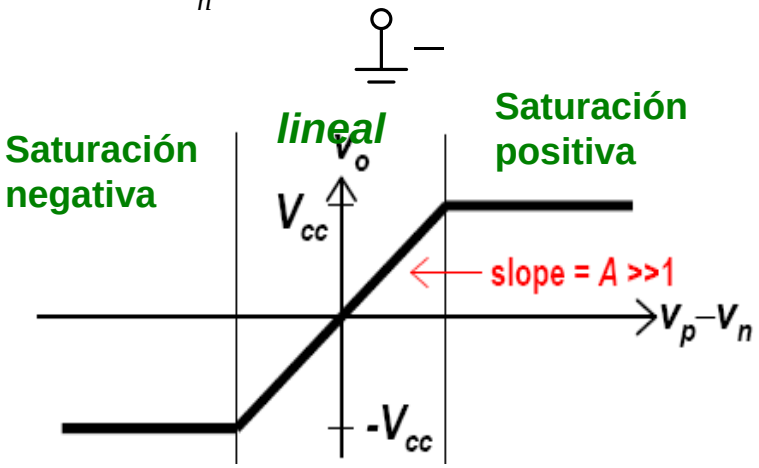
2.1. Funcionamiento

- Regiones de Operación
- El A.O. actúa linealmente (A constante) siempre y cuando el amplificador no esté saturado, o sea:

$$-V_{sat} < v_o < +V_{sat}$$
$$-V_{sat} < Av_e < +V_{sat}$$
$$-V_{sat}/A < v_e < +V_{sat}/A$$

por lo tanto la saturación también depende de la entrada $V_e=V_p-V_n$.

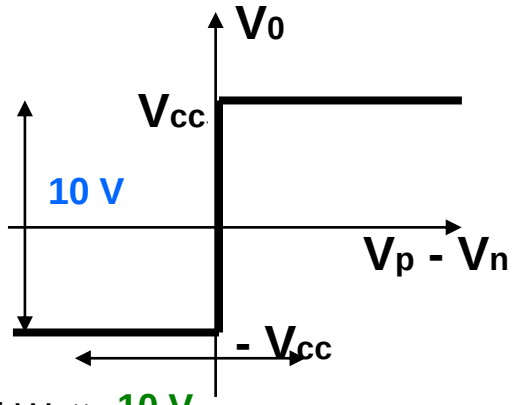




- En la ***región lineal***, $V_o = A\,(V_p - V_n)$

donde ***A* es la *ganancia de circuito abierto***

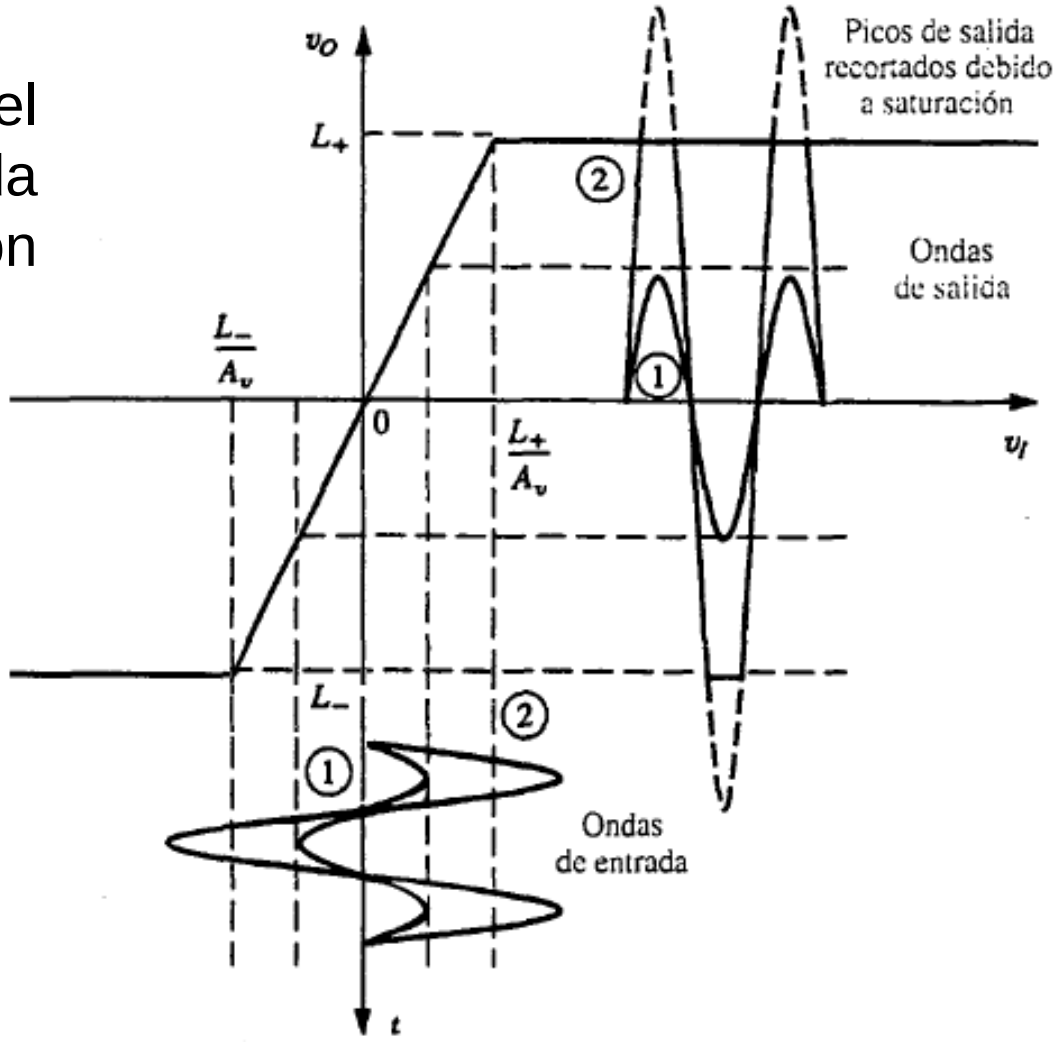
- Típicamente, $V_{cc} \leq 20$ V y $A > 10^4$
- Rango lineal: $-2\text{ mV} \leq V_p - V_n \leq 2\text{ mV}$
- Si un AO opera en la región lineal, entonces, se debe cumplir $V_p \cong V_n$ (***o sea, existe un "corto circuito virtual" entre los terminales de entrada***)



2.1. Funcionamiento

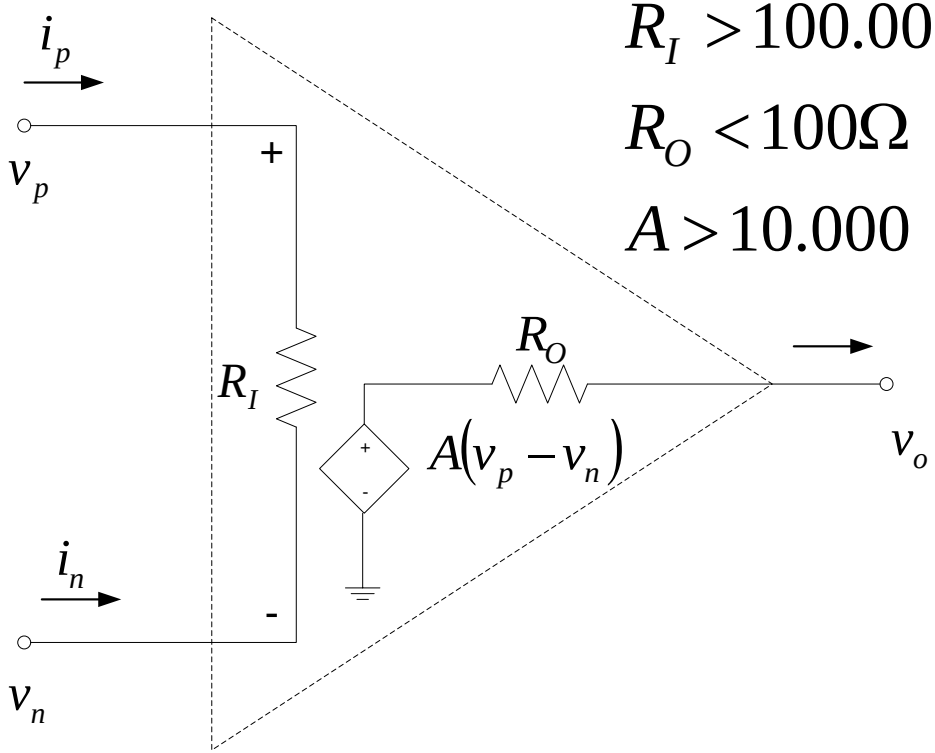
La región lineal

La figura muestra cómo el amplificador corta la salida cuando no está en la región lineal.



2.2. El A.O. ideal

Modelo del AO Ideal: Considerando que $v_o = A(v_p - v_n)$ con A muy grande (idealmente infinito), tenemos que para el A.O. ideal se cumple:



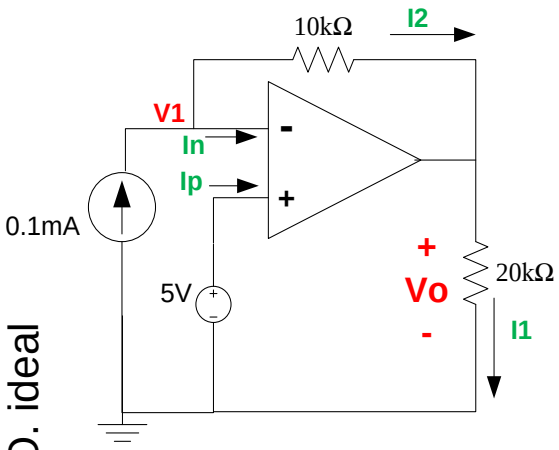
$$R_I > 100.000\Omega \qquad R_I = \infty$$
$$R_O < 100\Omega \qquad R_O = 0$$
$$A > 10.000 \qquad A = \infty$$

Luego:

$$v_p = v_n$$
$$i_p = i_n = 0$$

Importantísimo!

2.2. El A.O. ideal:
Ejemplo.



Usemos el modelo ideal para entender la situación:

