



Análisis de Circuitos

[AdC-86.04/66.06]



Amplificadores Operacionales

Docentes de Análisis de Circuitos

Primer cuatrimestre 2022

Introducción

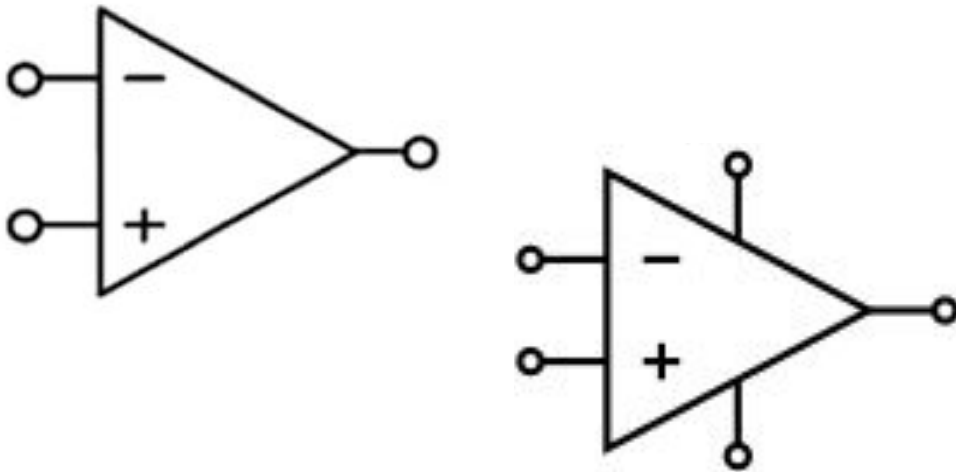
Origen del Amplificador Operacional (OpAmp):

Un amplificador operacional es un elemento de circuitos activo:

- Diseñado como un amplificador de tensión.
- Diseñado para realizar operaciones matemáticas de suma, resta, multiplicación, división, diferenciación e integración, sobre señales eléctricas (Más sobre esto sobre el final de la presentación).
- Utilizados en instrumentos, computadoras analógicas y posteriormente en todo circuito.
- Es un elemento básico de la electrónica de hoy en día.

Introducción

Símbolos del OpAmp:

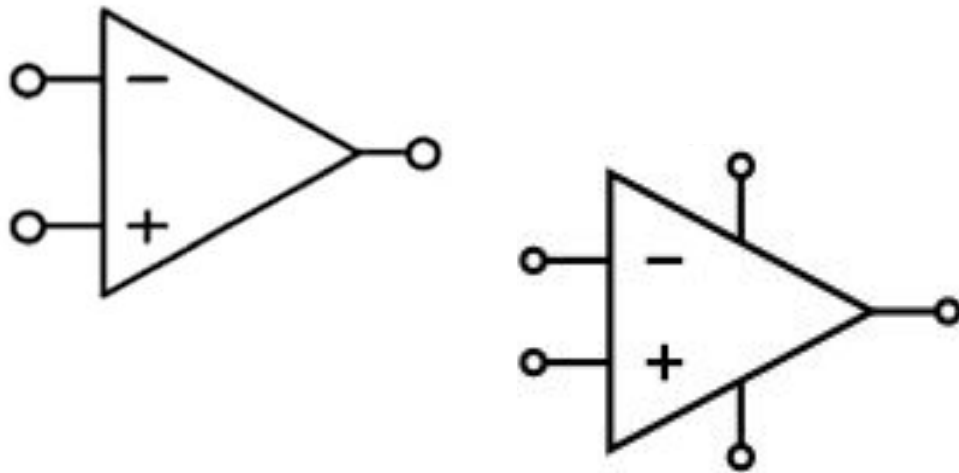


Sus puertos son:

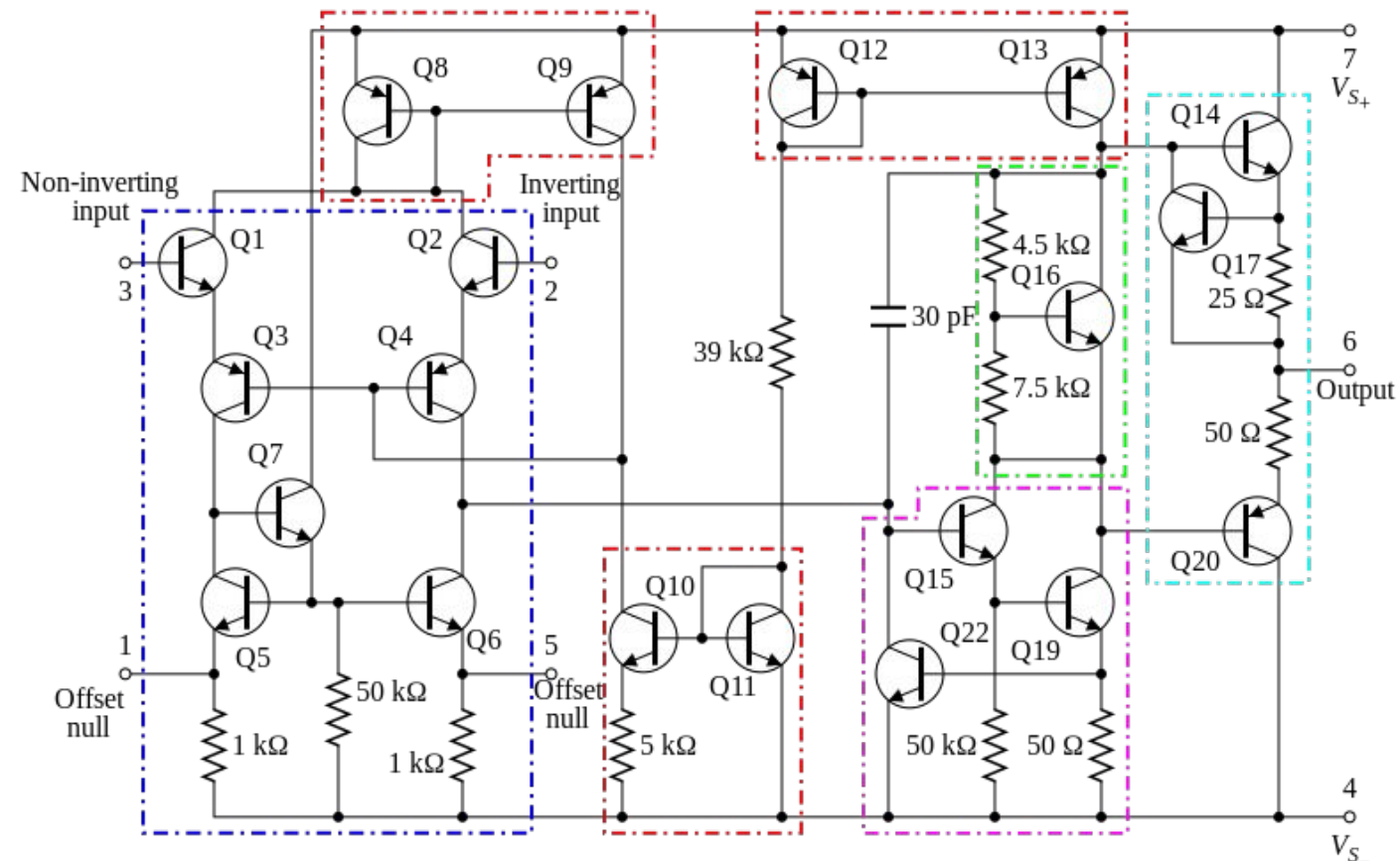
- Entrada inversora
- Entrada no inversora
- Salida
- [Alimentación positiva]
- [Alimentación negativa]

Introducción

Símbolos del OpAmp:

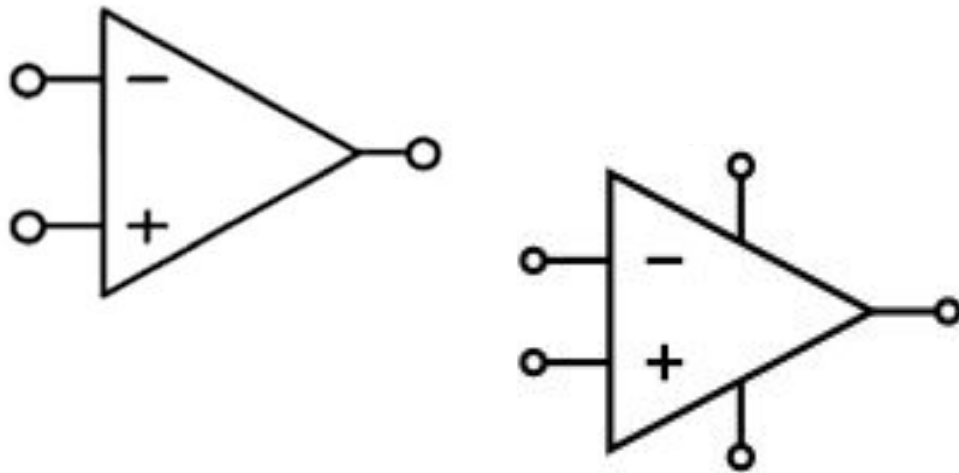


Su estructura interna es:
(ejemplo LM741)



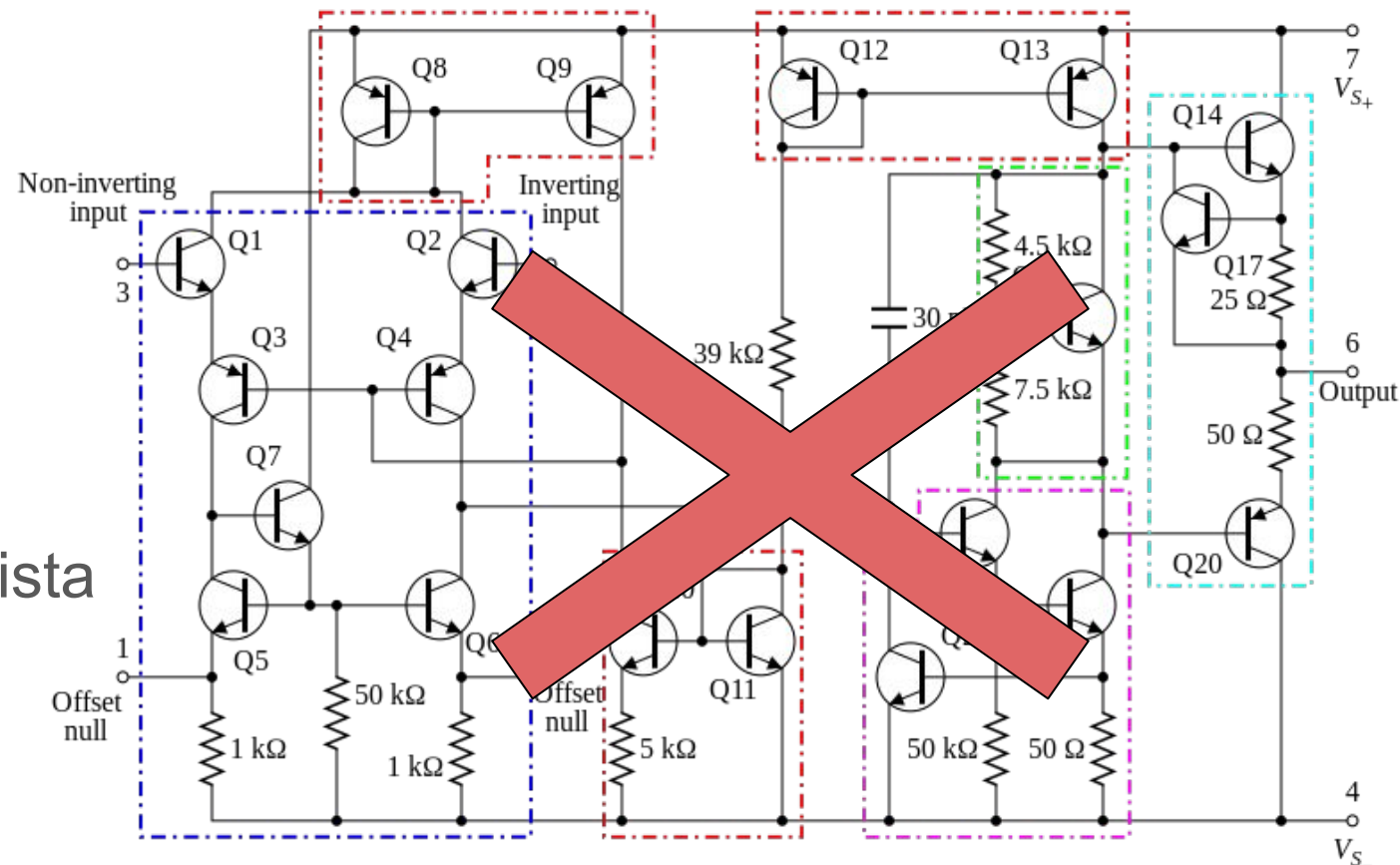
Introducción

Símbolos del OpAmp:



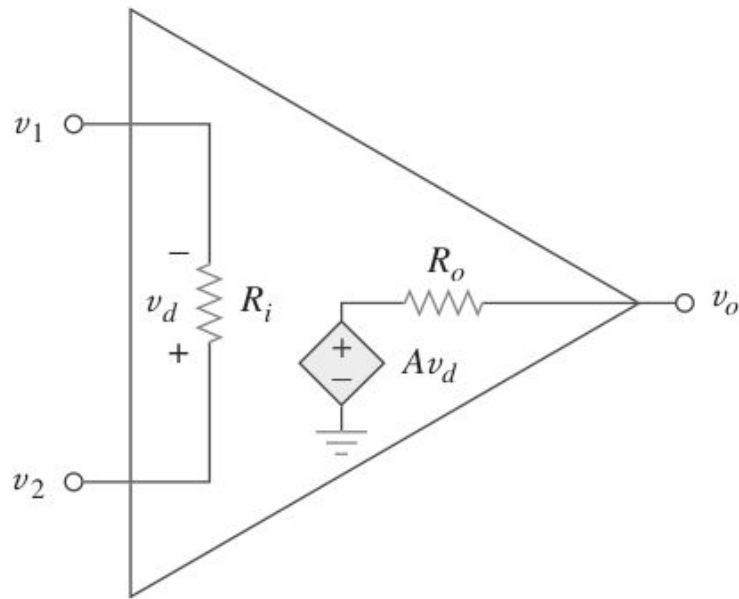
En esta materia se estudia su comportamiento desde el punto de vista de sus terminales, es decir que utilizaremos un modelo simplificado

Su estructura interna es:
(ejemplo LM741)



Introducción

Modelo del OpAmp:



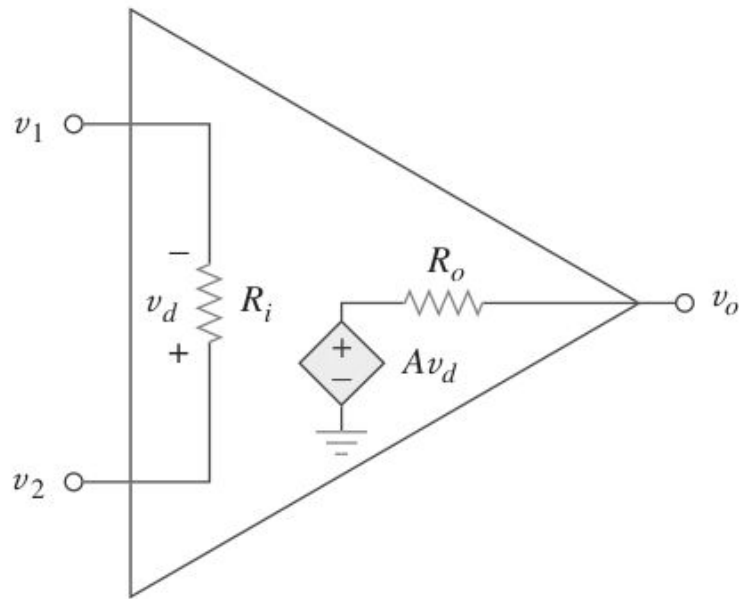
Sus parámetros son:

- R_i : Resistencia de entrada ($R_{Th} = R_i$)
- R_o : Resistencia de salida ($R_{Th} = R_o$)
- A_{vol} : Ganancia de lazo abierto
($V_{Th} = A_{vol} \cdot v_d$)

Parámetro	Rango típico	Valores ideales
Ganancia de lazo abierto, A	10^5 a 10^8	∞
Resistencia de entrada, R_i	10^5 a $10^{13} \Omega$	$\infty \Omega$
Resistencia de salida, R_o	10 a 100Ω	0Ω

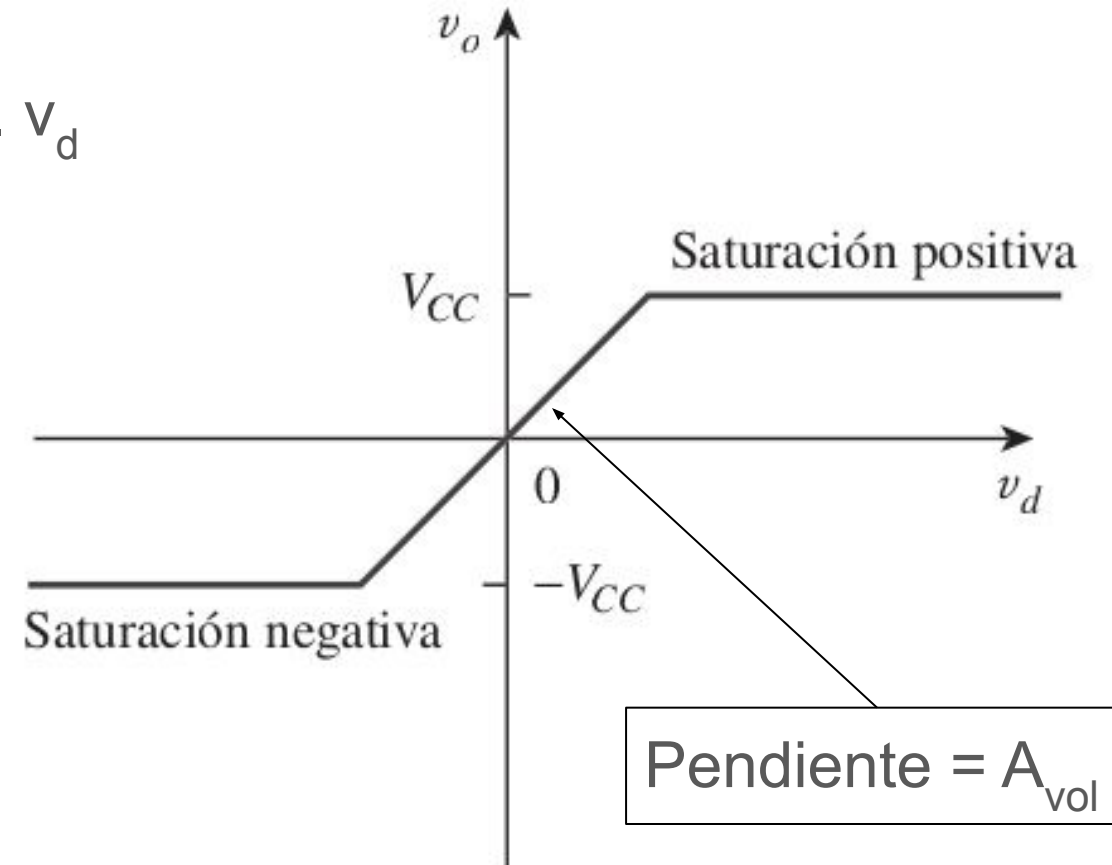
Introducción

Modelo del OpAmp:



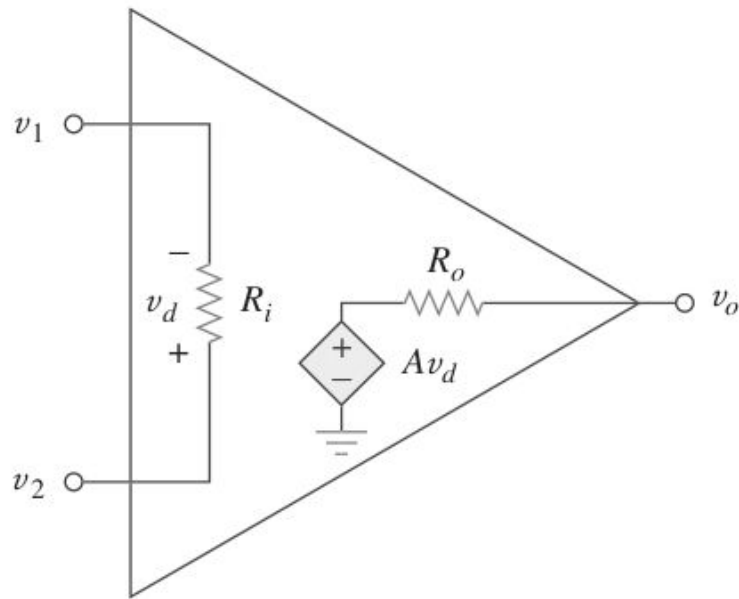
$$V_o = V_{Th} = A_{vol} \cdot v_d$$

Si consideramos las tensiones de alimentación $\pm V_{CC}$ y $R_o = 0 \Omega$, entonces



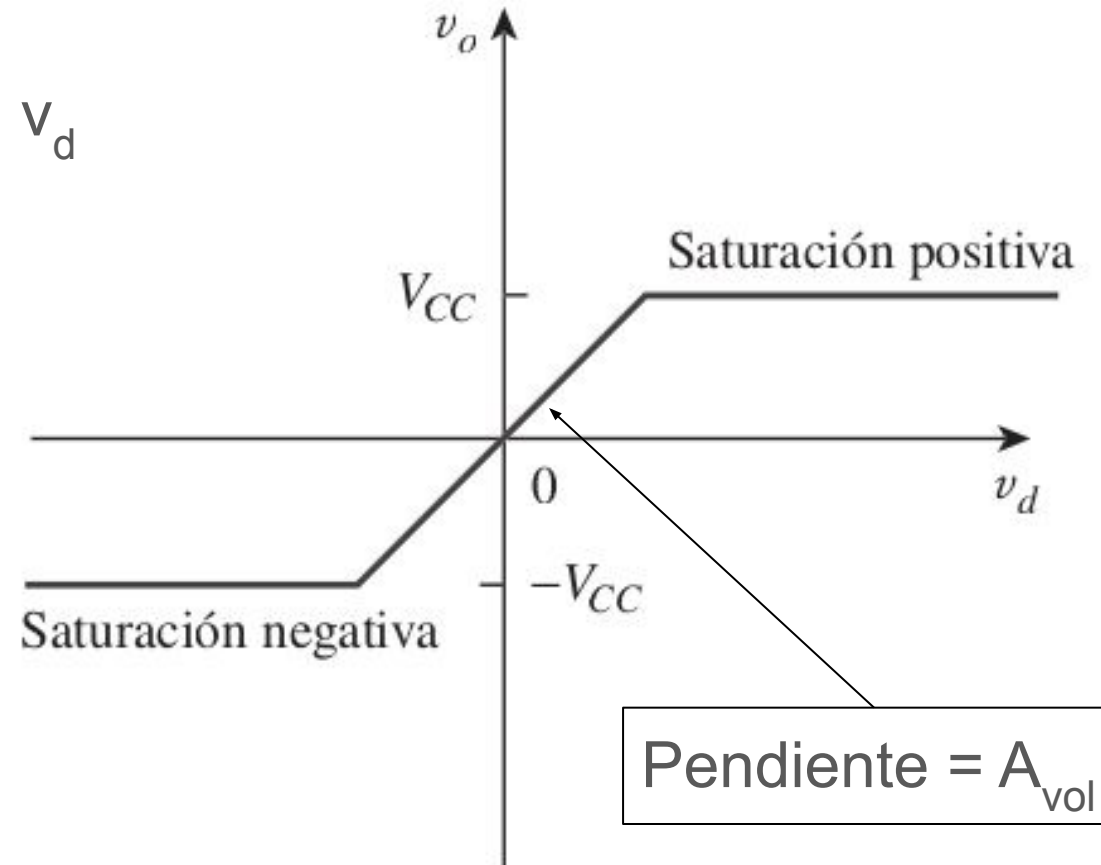
Introducción

Modelo del OpAmp:



$$V_o = V_{Th} = A_{vol} \cdot v_d$$

Si consideramos las tensiones de alimentación $\pm V_{CC}$ y $R_o = 0 \Omega$, entonces

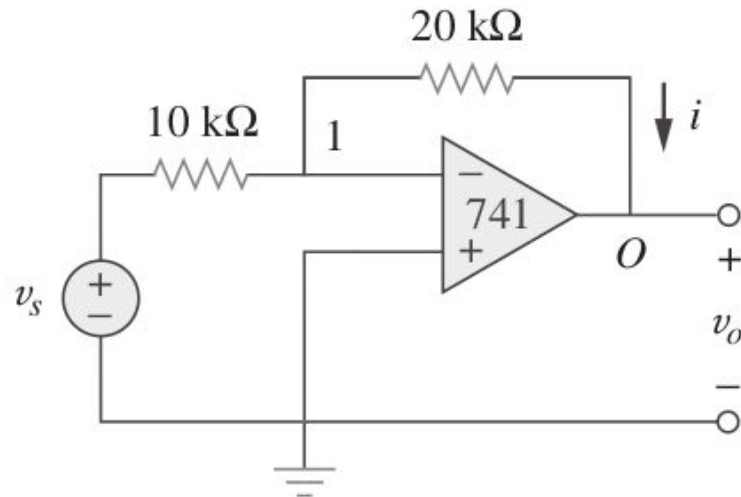


En el caso de un OpAmp ideal puede obviarse la tensión de alimentación y en ese caso no satura.

Introducción

Ejemplo con amplificador LM741 (*) (no ideal):

Un amplificador operacional 741 tiene una ganancia en tensión de lazo abierto de 2×10^5 , una resistencia de entrada de $2 \text{ M}\Omega$ y una resistencia de salida de 50Ω . Tal amplificador se usa en el circuito de la figura 5.6a). Halle la ganancia de lazo cerrado v_o/v_s . Determine la corriente i cuando $v_s = 2 \text{ V}$.

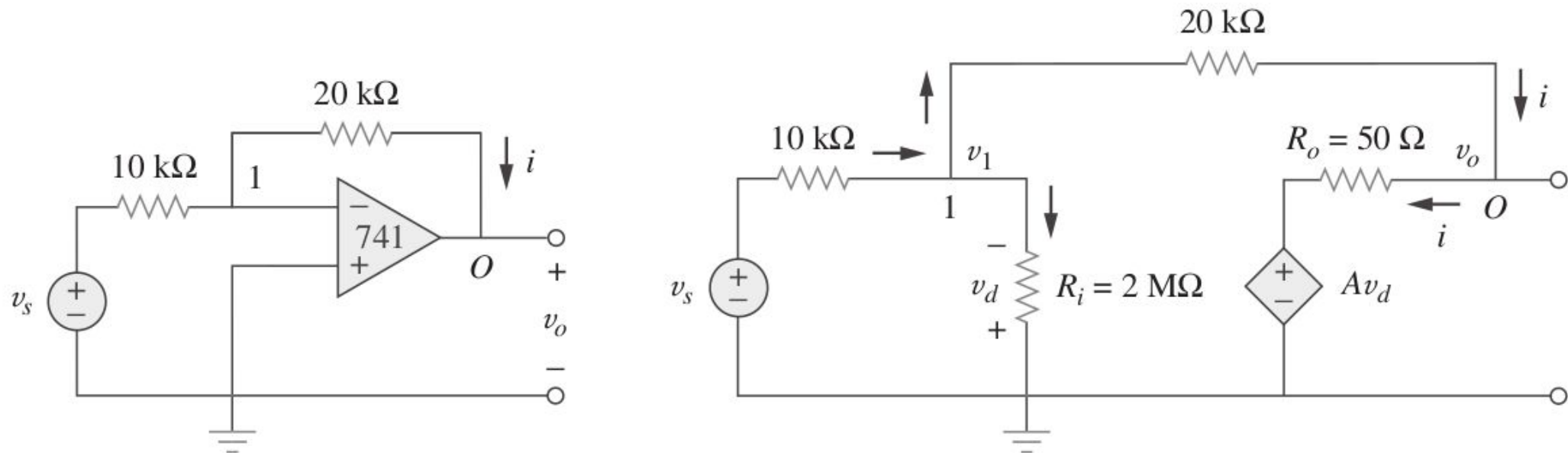


(*) Ver hoja de datos en <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm741.pdf>

Introducción

Ejemplo con amplificador LM741 (*) (no ideal):

Un amplificador operacional 741 tiene una ganancia en tensión de lazo abierto de 2×10^5 , una resistencia de entrada de $2 \text{ M}\Omega$ y una resistencia de salida de 50Ω . Tal amplificador se usa en el circuito de la figura 5.6a). Halle la ganancia de lazo cerrado v_o/v_s . Determine la corriente i cuando $v_s = 2 \text{ V}$.

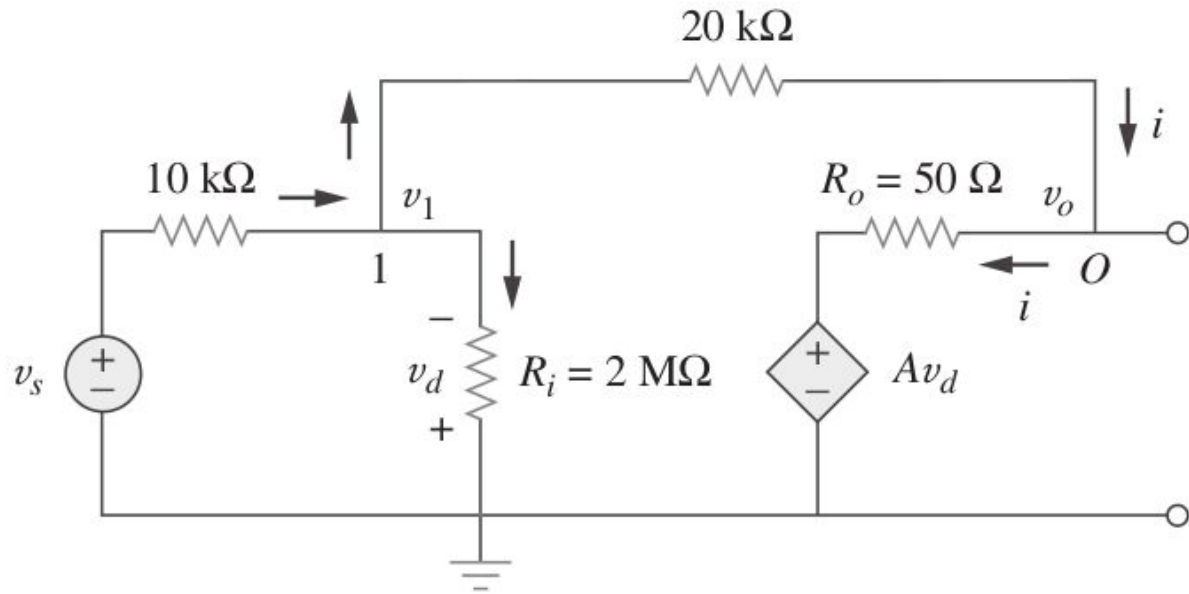


(*) Ver hoja de datos en <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm741.pdf>

Introducción

Ejemplo con amplificador LM741 (no ideal):

Resolvemos ...



Introducción

Ejemplo con amplificador LM741:

Solución del libro.

$$\frac{v_s - v_1}{10 \times 10^3} = \frac{v_1}{2\,000 \times 10^3} + \frac{v_1 - v_o}{20 \times 10^3}$$

Al multiplicar $2\,000 \times 10^3$ se obtiene

$$200v_s = 301v_1 - 100v_o$$

o sea $2v_s \approx 3v_1 - v_o \quad \Rightarrow \quad v_1 = \frac{2v_s + v_o}{3} \quad (5.1.1)$

En el nodo O ,
$$\frac{v_1 - v_o}{20 \times 10^3} = \frac{v_o - Av_d}{50}$$

Pero $v_d = -v_1$ y $A = 200\,000$. Por lo tanto,

$$v_1 - v_o = 400(v_o + 200\,000v_1) \quad (5.1.2)$$

La sustitución de v_1 de la ecuación (5.1.1) en la ecuación (5.1.2) da por resultado

$$0 \approx 26\,667\,067v_o + 53\,333\,333v_s \quad \Rightarrow \quad \frac{v_o}{v_s} = -1.9999699$$

Ésta es la ganancia de lazo cerrado, porque el resistor de retroalimentación de $20\text{ k}\Omega$ cierra el lazo entre las terminales de salida y entrada. Cuando $v_s = 2\text{ V}$, $v_o = -3.9999398\text{ V}$. De la ecuación (5.1.1) se obtiene $v_1 = 20.066667\text{ }\mu\text{V}$. Así,

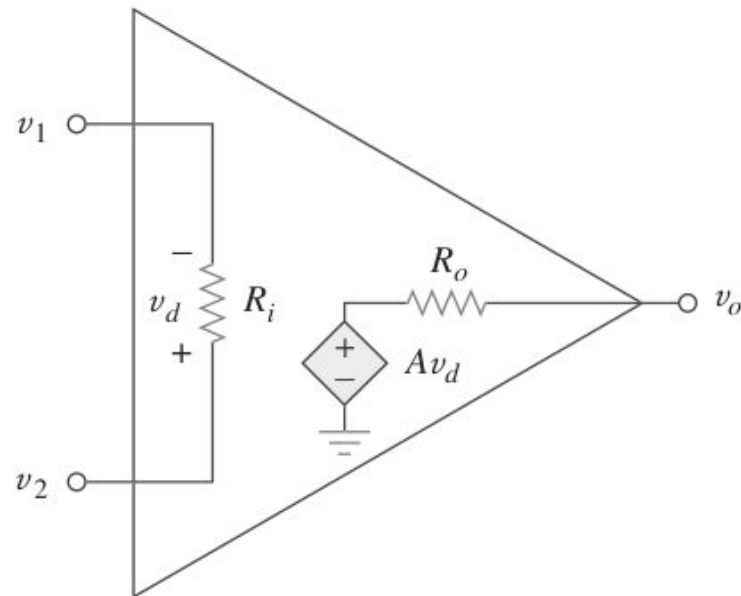
$$i = \frac{v_1 - v_o}{20 \times 10^3} = 0.19999\text{ mA}$$

Es evidente que trabajar con un amplificador operacional no ideal es tedioso, ya que se trata con números muy grandes.

Amplificador Operacional Ideal

Sus parámetros:

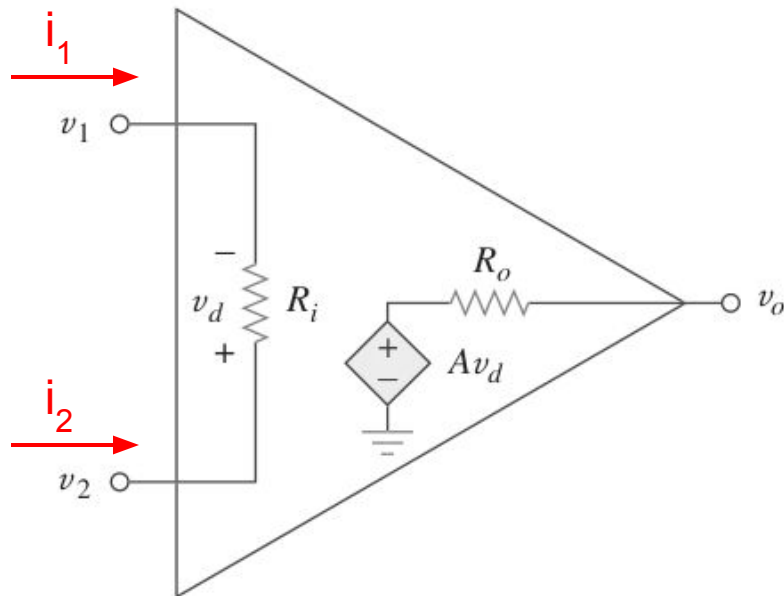
1. Ganancia infinita de lazo abierto, $A \simeq \infty$.
2. Resistencia de entrada infinita, $R_i \simeq \infty$.
3. Resistencia de salida cero, $R_o \simeq 0$.



Amplificador Operacional Ideal

Sus parámetros:

1. Ganancia infinita de lazo abierto, $A \simeq \infty$.
2. Resistencia de entrada infinita, $R_i \simeq \infty$.
3. Resistencia de salida cero, $R_o \simeq 0$.



A la hora de resolver ejercicios, esto lo podemos traducir a:

$$i_1 = 0, \quad i_2 = 0$$

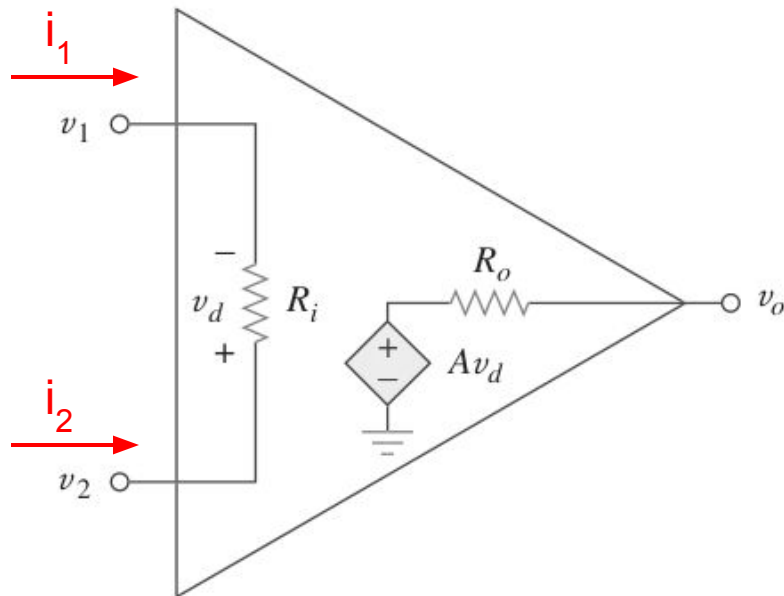
$$v_d = v_2 - v_1 = 0$$

$$v_1 = v_2$$

Amplificador Operacional Ideal

Sus parámetros:

1. Ganancia infinita de lazo abierto, $A \simeq \infty$.
2. Resistencia de entrada infinita, $R_i \simeq \infty$.
3. Resistencia de salida cero, $R_o \simeq 0$.



A la hora de resolver ejercicios, esto lo podemos traducir a:

$$i_1 = 0, \quad i_2 = 0$$

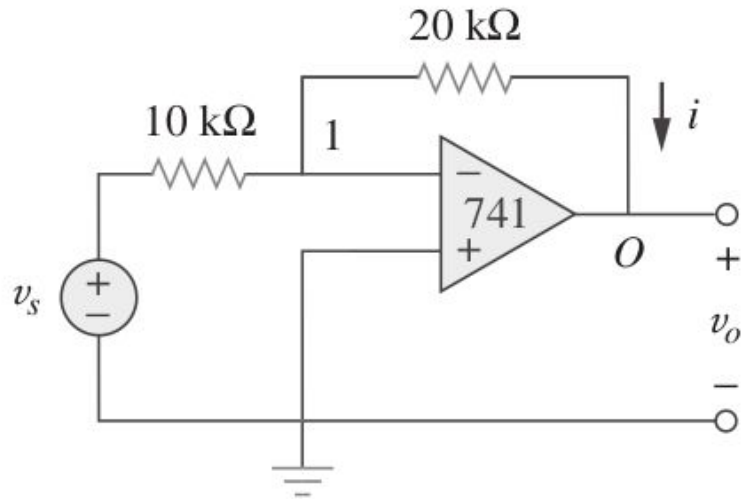
$$v_d = v_2 - v_1 = 0$$

$$v_1 = v_2$$

¿Cómo?, veamos un ejemplo.

Amplificador Operacional Ideal

Ejemplo anterior considerando utilizando el amplificador operacional ideal:



Amplificador Operacional Ideal

Al comparar los modelos ideal y no ideal
del amplificador operacional:

¿Qué conclusión podemos sacar?

Configuraciones

El amplificador diferencial se puede utilizar de muchas maneras, las configuraciones más conocidas son:

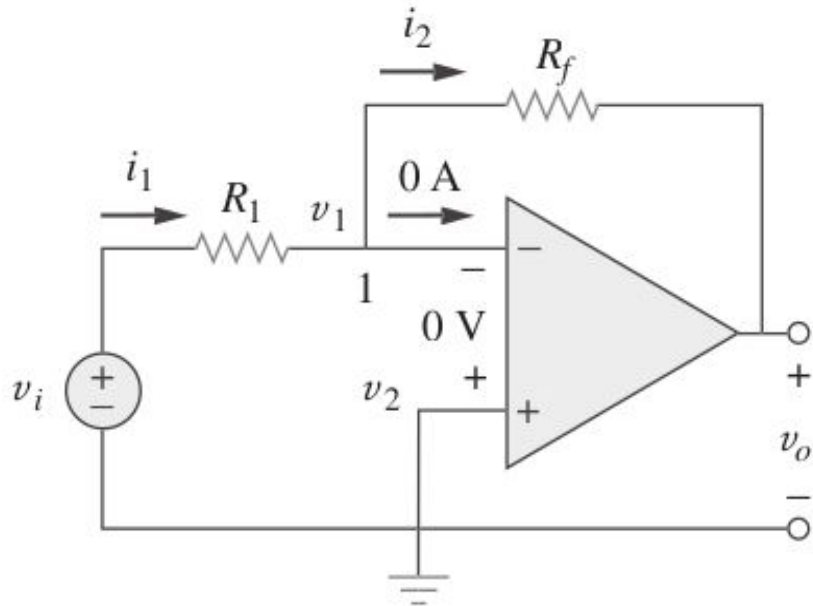
- Amplificador inversor
- Amplificador no inversor
- Amplificador sumador
- Amplificador diferencial
- Circuito integrador
- Circuito derivador
- Amplificadores en cascada

Configuraciones

Amplificador inversor:

Circuito amplificador con **ganancia negativa**.

Resolvemos ...



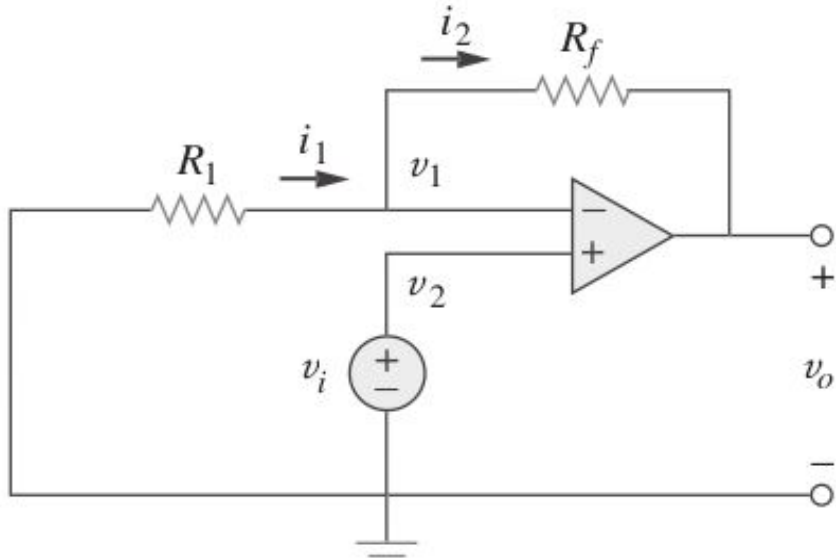
$$v_o = -\frac{R_f}{R_1}v_i$$

Configuraciones

Amplificador no inversor:

Circuito amplificador con **ganancia positiva**.

Resolvemos ...

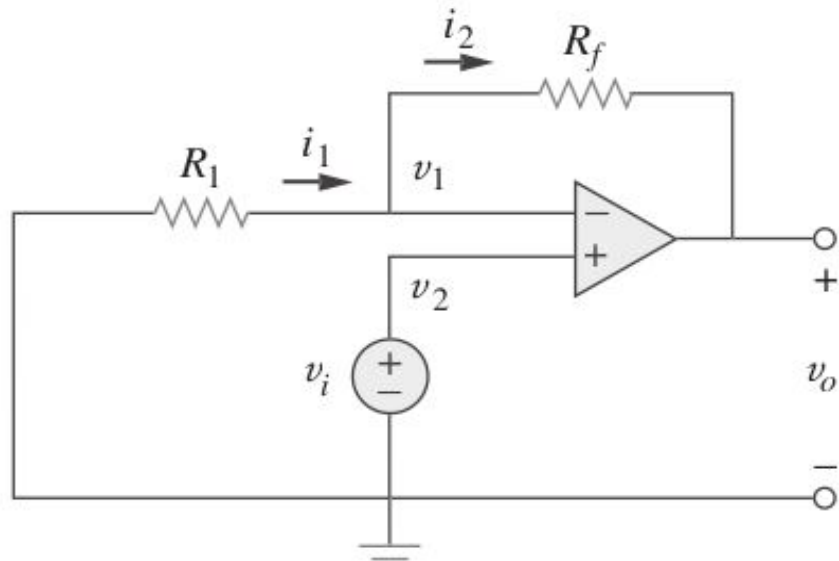


$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) v_i$$

Configuraciones

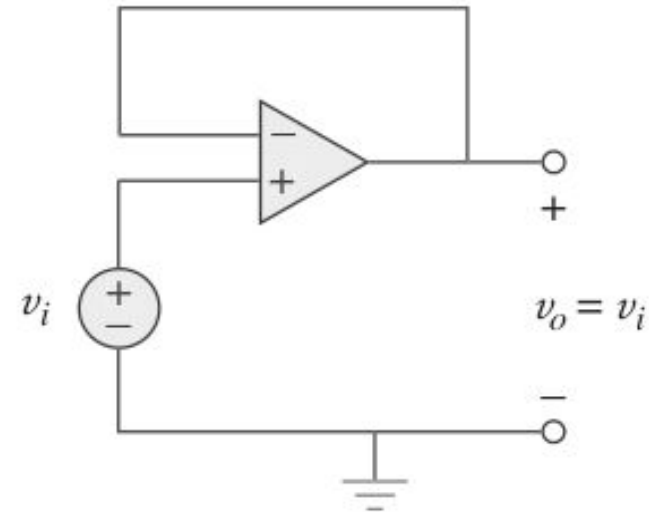
Amplificador no inversor:

Circuito amplificador con **ganancia positiva**.



$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) v_i$$

Caso particular: Seguidor

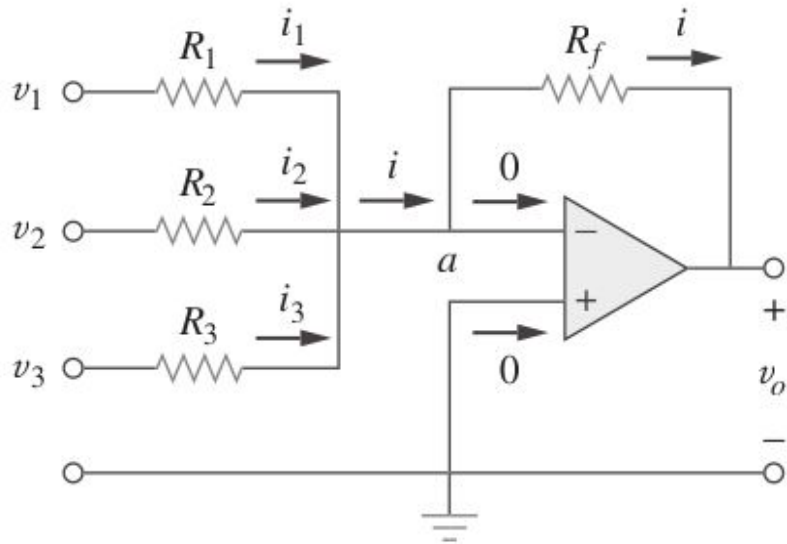


Configuraciones

Amplificador sumador:

Es un circuito del amplificador operacional que combina varias entradas y produce una salida que es la **suma ponderada de las entradas**.

Resolvemos ...



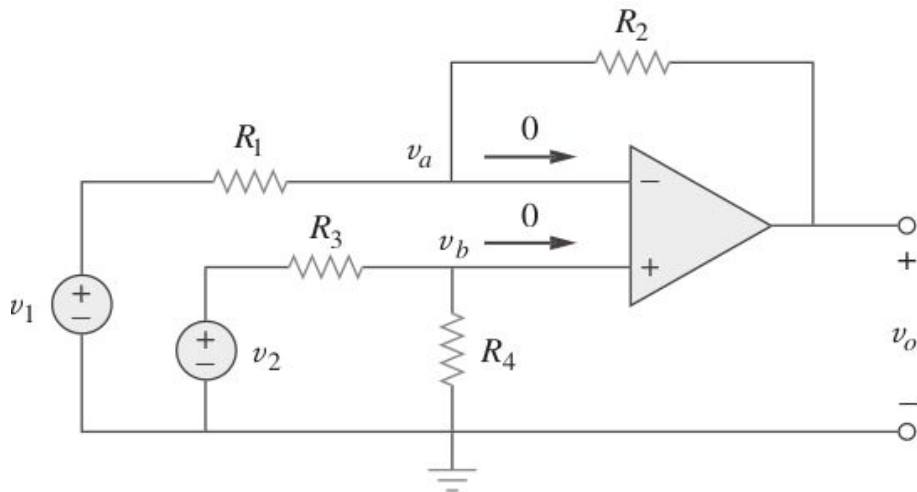
$$v_o = -\left(\frac{R_f}{R_1}v_1 + \frac{R_f}{R_2}v_2 + \frac{R_f}{R_3}v_3\right)$$

Configuraciones

Amplificador diferencial:

Es un dispositivo que amplifica la diferencia entre dos entradas pero **rechaza toda señal común a las dos entradas**.

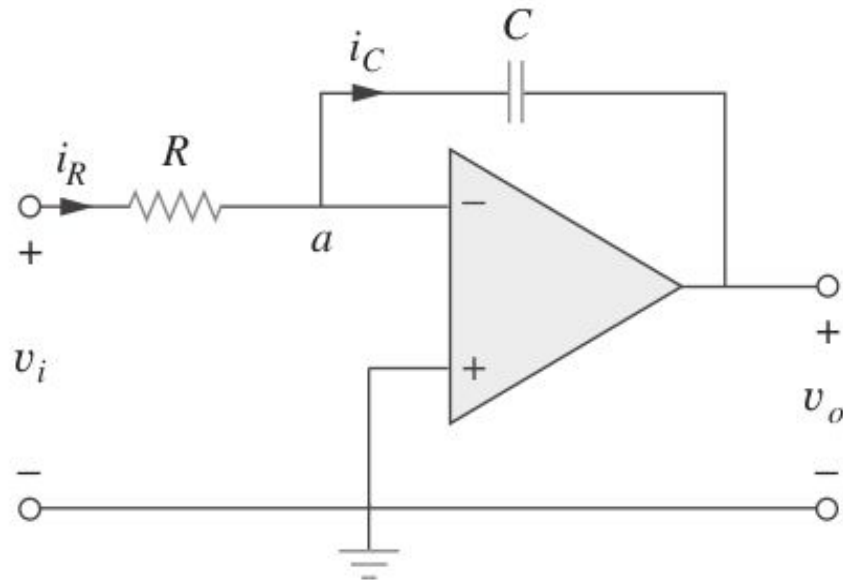
Resolvemos ...



$$v_o = \frac{R_2(1 + R_1/R_2)}{R_1(1 + R_3/R_4)}v_2 - \frac{R_2}{R_1}v_1 \quad v_o = \frac{R_2}{R_1}(v_2 - v_1)$$

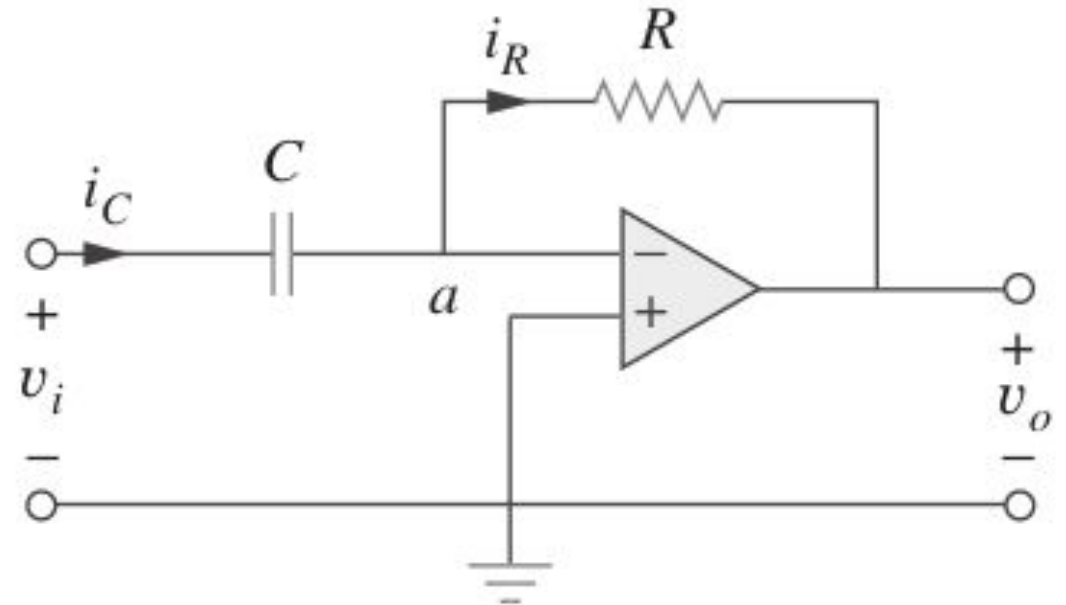
Configuraciones

Circuito integrador:



$$v_o = -\frac{1}{RC} \int_0^t v_i(\tau) d\tau$$

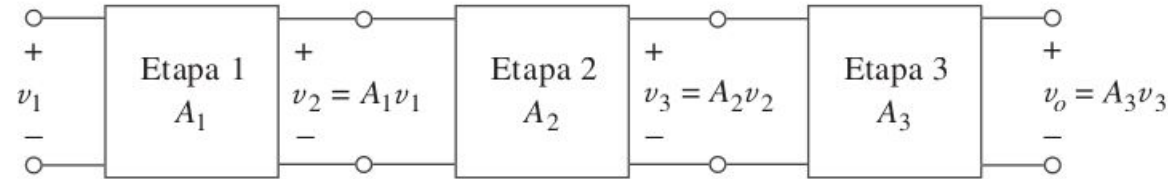
Circuito derivador:



$$v_o = -RC \frac{dv_i}{dt}$$

Configuraciones

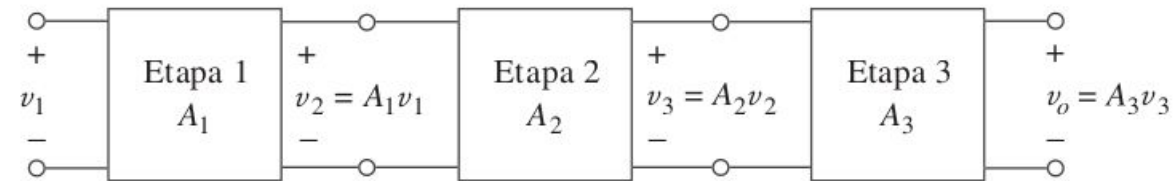
Amplificadores en cascada:



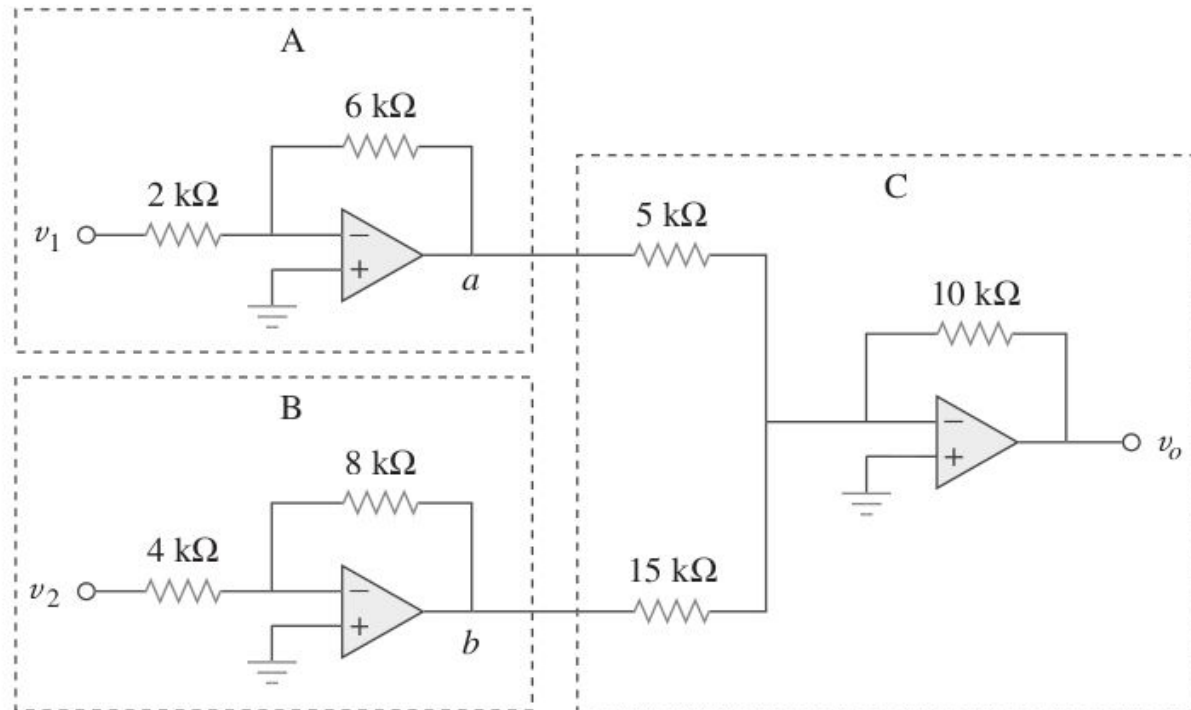
Una **conexión en cascada** es un arreglo de dos o más circuitos de amplificadores operacionales dispuestos uno tras otro, de manera que la salida de uno es la entrada del siguiente.

Configuraciones

Amplificadores en cascada:



Ejemplo:



Ejercicio

Encontrar el equivalente de Thevenin del siguiente circuito:



¿Consultas?

Simulación

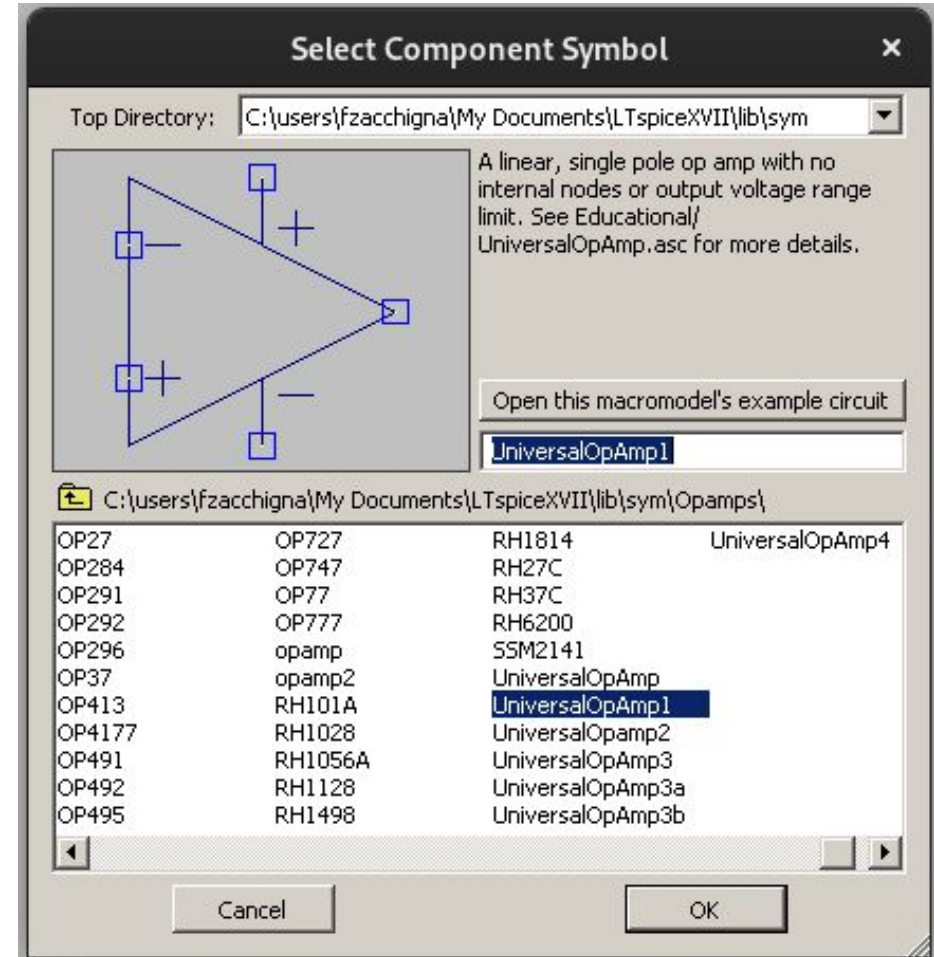
Ejemplos de simulación de circuitos con amplificadores operacionales utilizando LTSpice:

- Simulación con OpAmps ideales.
- Simulación con modelos de OpAmps de los fabricantes.
- Ejemplos:
 - Amplificador sumador.
 - Circuito integrador y derivador.

Simulación

Simulación con OpAmps ideales (Versión nueva):

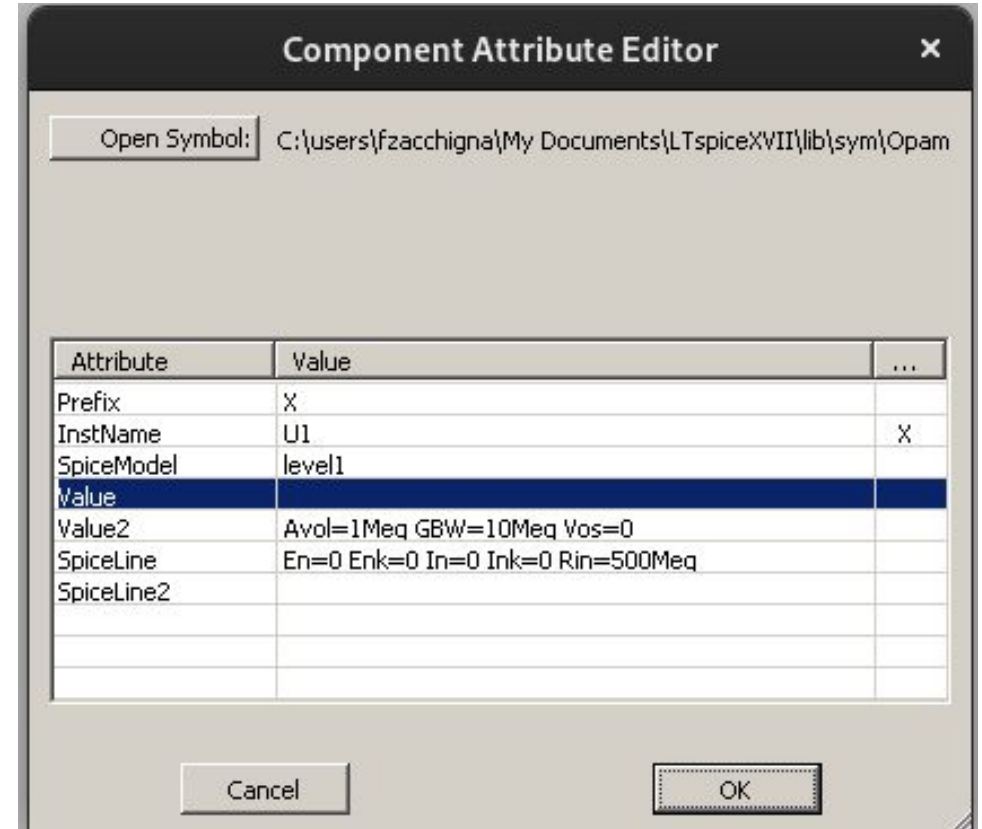
1. Seleccionar el "*UniversalOpamp1*"
2. Click derecho ➡ Modificar sus parámetros:
 - a. A_{vol} = DC open-loop gain
 - b. GBW = gain-bandwidth product
 - c. V_{os} = input offset voltage
 - d. R_{in} = input resistance



Simulación

Simulación con OpAmps ideales (Versión nueva):

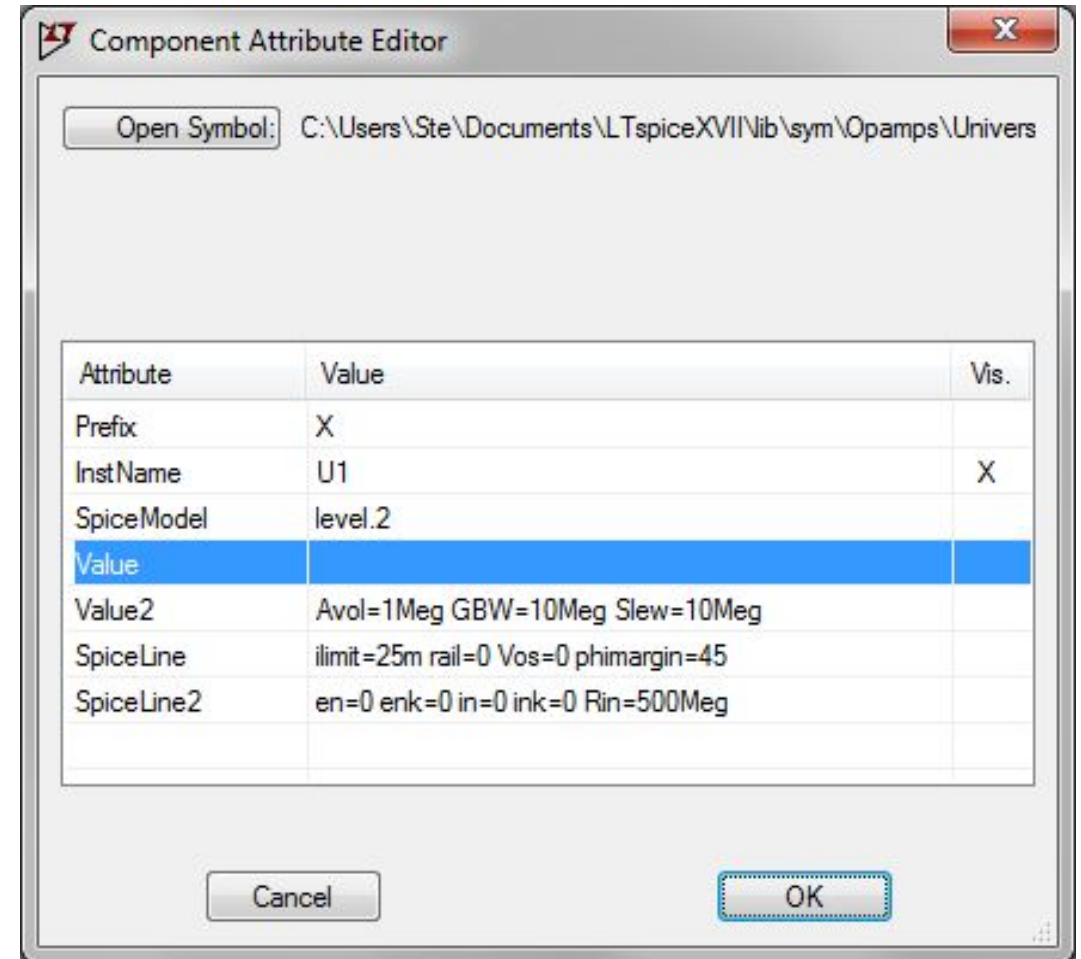
1. Seleccionar el "*UniversalOpamp1*"
2. Click derecho ➡ Modificar sus parámetros:
 - a. A_{vol} = DC open-loop gain
 - b. GBW = gain-bandwidth product
 - c. V_{os} = input offset voltage
 - d. R_{in} = input resistance



Simulación

Simulación con OpAmps ideales (Versión vieja):

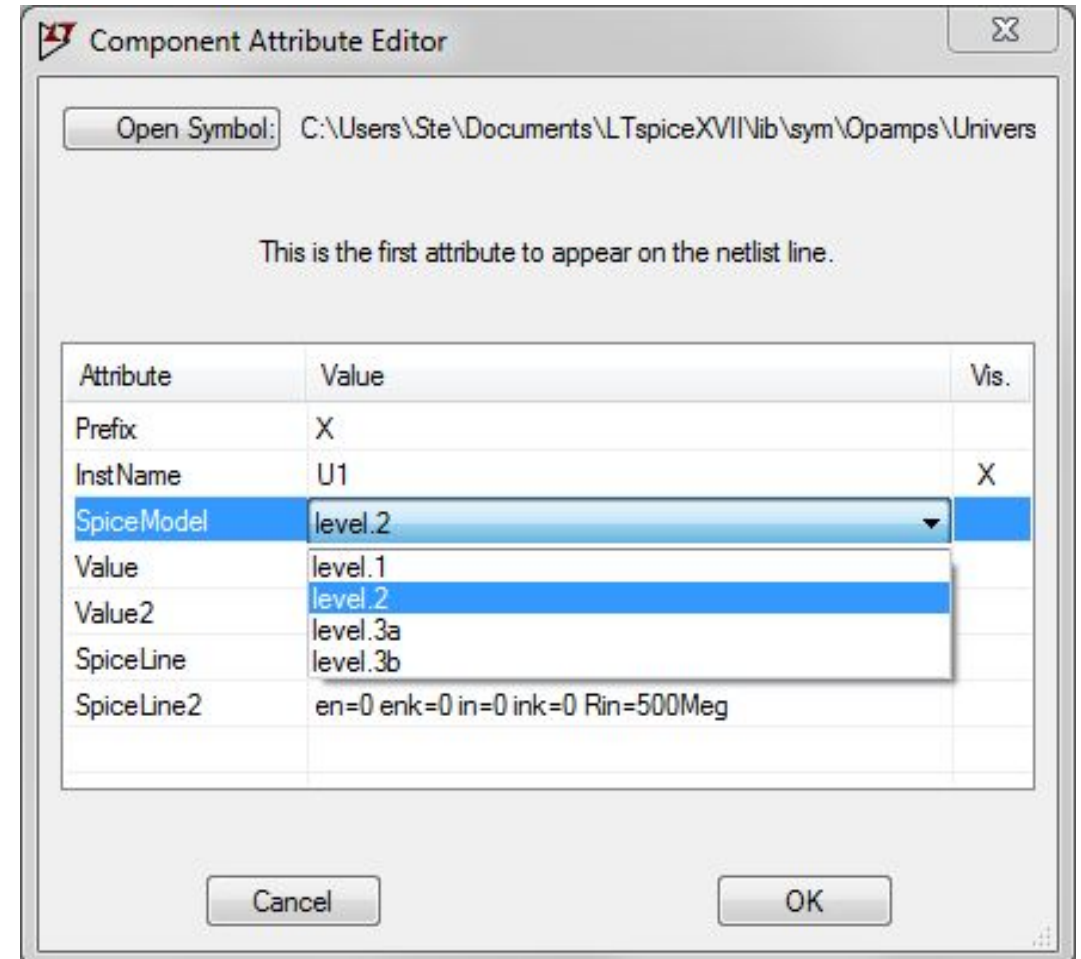
1. Seleccionar el "*UniversalOpamp2*"
2. Click derecho ➡ Cambiar a "*level.1*"
3. Modificar sus parámetros:
 - a. A_{vol} = DC open-loop gain
 - b. GBW = gain-bandwidth product
 - c. V_{os} = input offset voltage
 - d. R_{in} = input resistance



Simulación

Simulación con OpAmps ideales (Versión vieja):

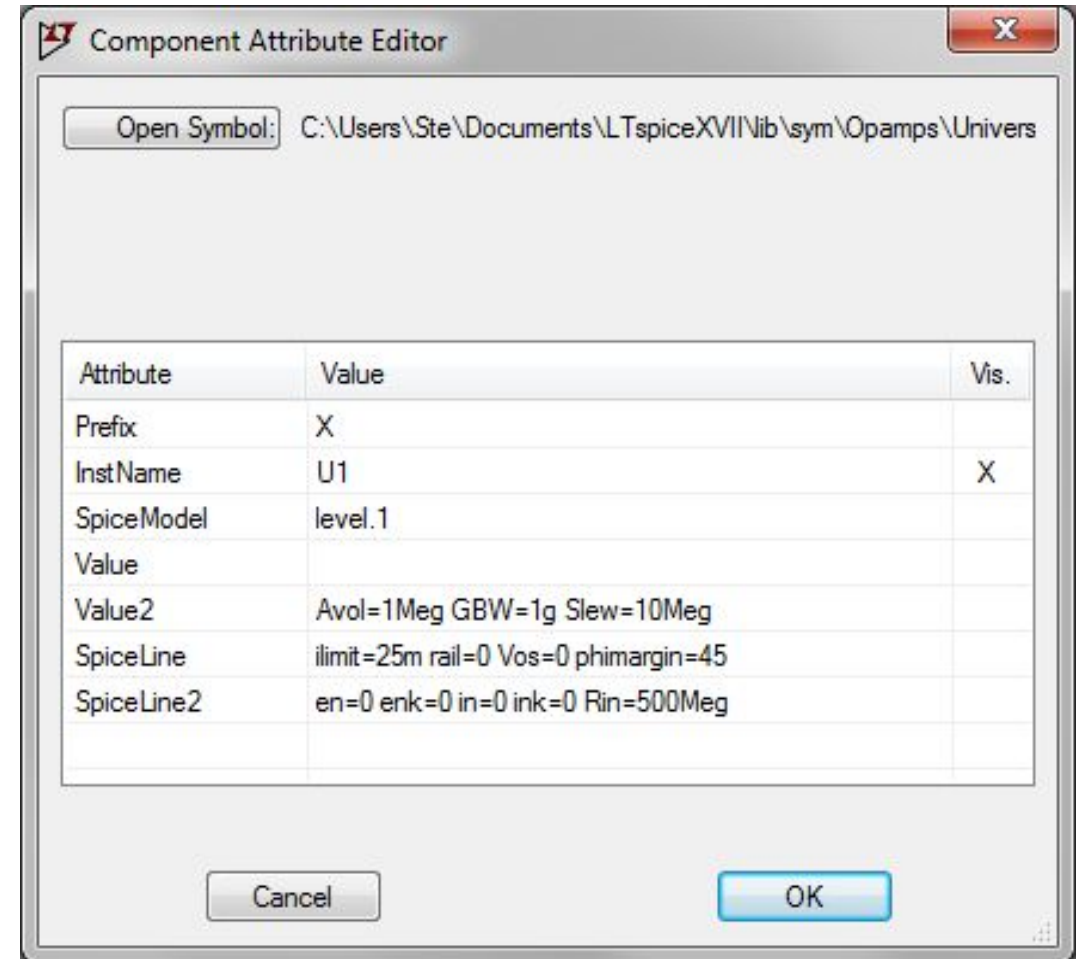
1. Seleccionar el "*UniversalOpamp2*"
2. Click derecho ➡ Cambiar a "*level.1*"
3. Modificar sus parámetros:
 - a. A_{vol} = DC open-loop gain
 - b. GBW = gain-bandwidth product
 - c. V_{os} = input offset voltage
 - d. R_{in} = input resistance



Simulación

Simulación con OpAmps ideales (Versión vieja):

1. Seleccionar el "*UniversalOpamp2*"
2. Click derecho ➡ Cambiar a "*level.1*"
3. Modificar sus parámetros:
 - a. A_{vol} = DC open-loop gain
 - b. GBW = gain-bandwidth product
 - c. V_{os} = input offset voltage
 - d. R_{in} = input resistance



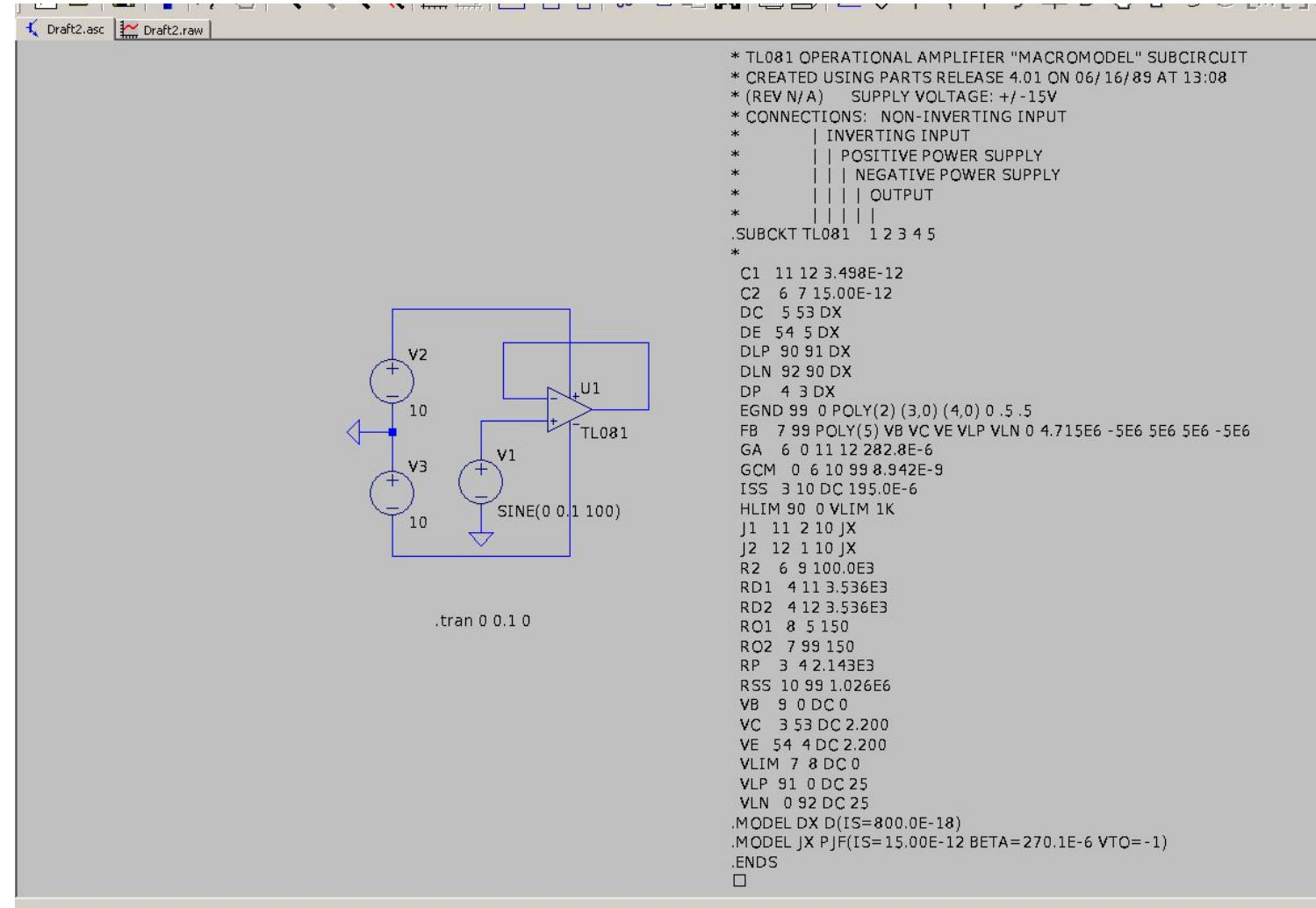
Simulación

Simulación con modelos de OpAmps de los fabricantes, por ejemplo TL081:

1. Conseguir el modelo del fabricante (campus)
2. Incluir el modelo en el LTSpice (hay muchas maneras)
 - a. Mediante una directiva
 - b. Incluir la librería
3. Instanciar un "opamp2", que tiene 5 terminales.
4. Cambiar "opamp2" por el modelo a simular ("TL081").

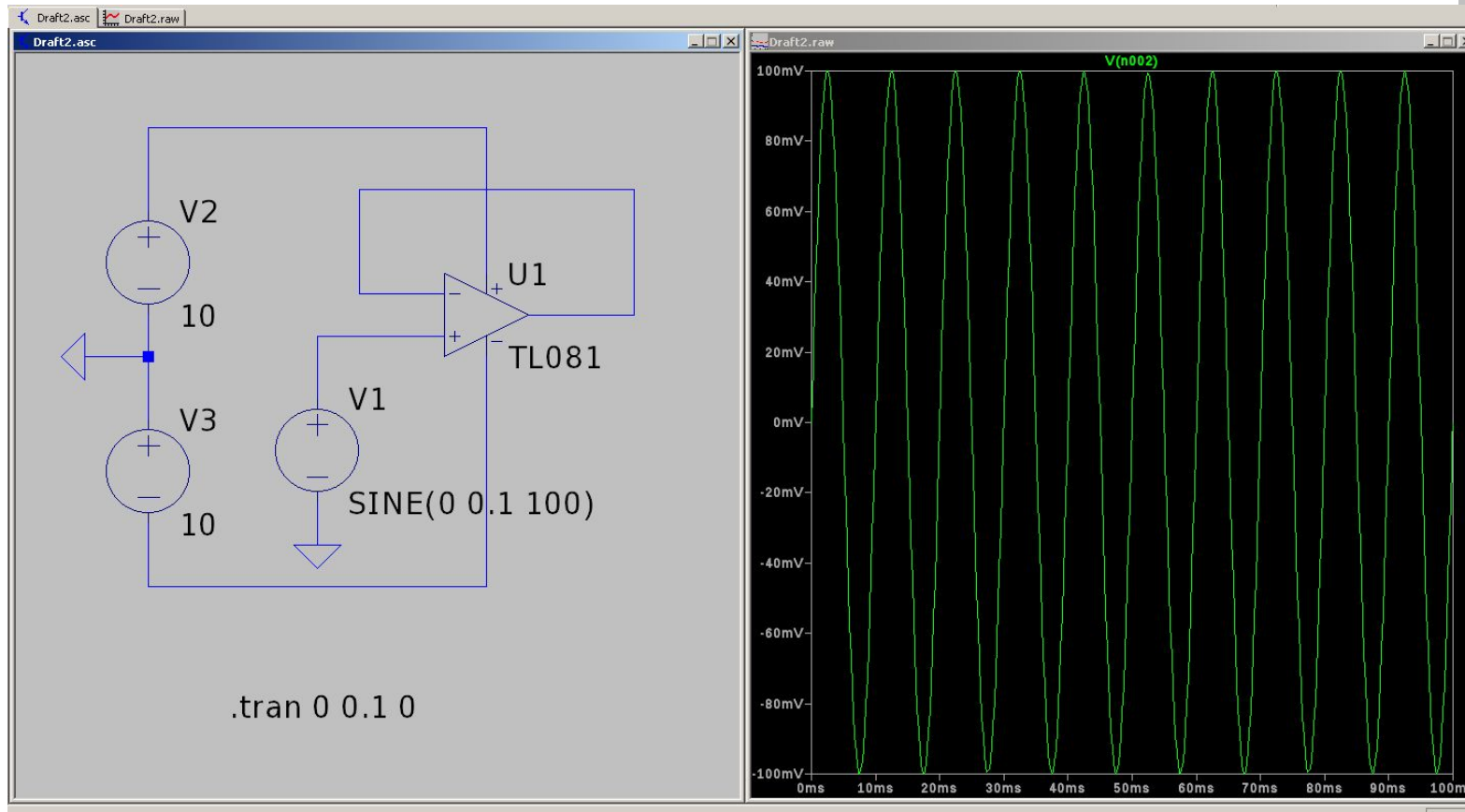
```
* TL081 OPERATIONAL AMPLIFIER "MACROMODEL" SUBCIRCUIT
* CREATED USING PARTS RELEASE 4.01 ON 06/16/89 AT 13:08
* (REV N/A)    SUPPLY VOLTAGE: +/-15V
* CONNECTIONS: NON-INVERTING INPUT
*             | INVERTING INPUT
*             || POSITIVE POWER SUPPLY
*             ||| NEGATIVE POWER SUPPLY
*             |||| OUTPUT
*             |||||
.SUBCKT TL081 1 2 3 4 5
*
C1 11 12 3.498E-12
C2 6 7 15.00E-12
DC 5 53 DX
DE 54 5 DX
DLP 90 91 DX
DLN 92 90 DX
DP 4 3 DX
EGND 99 0 POLY(2) (3,0) (4,0) 0 .5 .5
FB 7 99 POLY(5) VB VC VE VLP VLN 0 4.715E6 -5E6 5E6 5E6 -5E6
GA 6 0 11 12 282.8E-6
GCM 0 6 10 99 8.942E-9
ISS 3 10 DC 195.0E-6
HLIM 90 0 VLIM 1K
J1 11 2 10 JX
J2 12 1 10 JX
R2 6 9 100.0E3
RD1 4 11 3.536E3
RD2 4 12 3.536E3
RO1 8 5 150
RO2 7 99 150
RP 3 4 2.143E3
RSS 10 99 1.026E6
VB 9 0 DC 0
VC 3 53 DC 2.200
VE 54 4 DC 2.200
VLIM 7 8 DC 0
VLP 91 0 DC 25
VLN 0 92 DC 25
.MODEL DX D(IS=800.0E-18)
.MODEL JX P(JF(IS=15.00E-12 BETA=270.1E-6 VTO=-1)
.ENDS
□
```

Simulación con modelos de OpAmps de los fabricantes, por ejemplo TL081:



Simulación

Simulación con modelos de OpAmps de los fabricantes, por ejemplo TL081:



```
* TL081 OPERATIONAL AMPLIFIER "MACROMODEL" SUBCIRCUIT
* CREATED USING PARTS RELEASE 4.01 ON 06/16/89 AT 13:08
* (REV N/A)    SUPPLY VOLTAGE: +/-15V
* CONNECTIONS: NON-INVERTING INPUT
*              | INVERTING INPUT
*              | | POSITIVE POWER SUPPLY
*              | | | NEGATIVE POWER SUPPLY
*              | | | | OUTPUT
*              | | | |
.SUBCKT TL081 1 2 3 4 5
*
C1 11 12 3.498E-12
C2 6 7 15.00E-12
DC 5 53 DX
DE 54 5 DX
DLP 90 91 DX
DLN 92 90 DX
DP 4 3 DX
EGND 99 0 POLY(2) (3,0) (4,0) 0 .5 .5
FB 7 99 POLY(5) VB VC VE VLP VLN 0 4.715E6 -5E6 5E6 5E6 -5E6
GA 6 0 11 12 282.8E-6
GCM 0 6 10 99 8.942E-9
ISS 3 10 DC 195.0E-6
HLIM 90 0 VLIM 1K
|1 11 2 10 |X
|2 12 1 10 |X
R2 6 9 100.0E3
RD1 4 11 3.536E3
RD2 4 12 3.536E3
RO1 8 5 150
RO2 7 99 150
RP 3 4 2.143E3
RSS 10 99 1.026E6
VB 9 0 DC 0
VC 3 53 DC 2.200
VE 54 4 DC 2.200
VLIM 7 8 DC 0
VLP 91 0 DC 25
VLN 0 92 DC 25
MODEL DX D(IS=800.0E-18)
MODEL |X P|F(IS=15.00E-12 BETA=270.1E-6 VTO=-1)
ENDS
```

Simulación

Otros ejemplos ...

Bibliografía

1. Charles K. Alexander, Matthew N. O. Sadiku, "Fundamentos de circuitos eléctricos", McGraw-Hill Education, Quinta edición, Capítulo 5.
2. Hoja de datos LM741: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm741.pdf>
3. Wikipedia - Amplificadores operacionales:
https://en.wikipedia.org/wiki/Operational_amplifier
4. Simulación de amplificadores operacionales ideales en LTSpice:
<https://electronics.stackexchange.com/questions/529510/how-do-you-use-op-amps-in-a-design-in-ltspice>

www.ingenieria.uba.ar

f    **/ingenieriauba**

 **/FIUBAoficial**