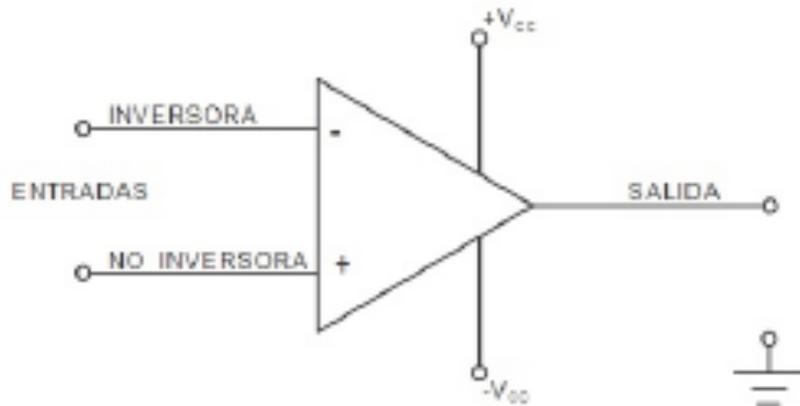


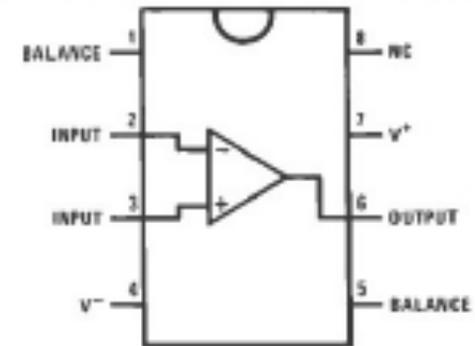
# EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL (OPAM)

## Representación circuital



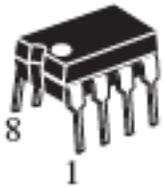
## Circuito integrado

Dual-In-Line Package (M and N)

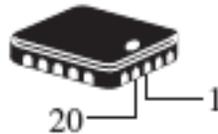


Order Number LF355M, LF356M, LF357M, LF355BM, LF356BM, LF355BN, LF356BN, LF357BN, LF355N, LF356N or LF357N  
See NS Package Number M08A or N08E

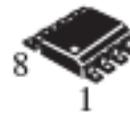
## Empaques



DIP



SMT



SMT

# EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL (OPAM)

- \* El amplificador operacional es el resultado del diseño de un circuito integrado capaz de presentar características que se asemejen a las características deseadas en un amplificador ideal.
- \* En 1947 se desarrolló la idea de diseñar un bloque constructivo analógico de gran utilidad. Los primeros amplificadores operacionales estaban diseñados con tubos de vacío.
- \* En 1964 se diseñó la compañía Fairchild Semiconductor el primer amplificador operacional con dispositivos de estado sólido, identificado como 702.
- \* A este dispositivo lo siguió el 709 y posteriormente el 741, que se ha convertido en el dispositivo estandar de mayor uso.

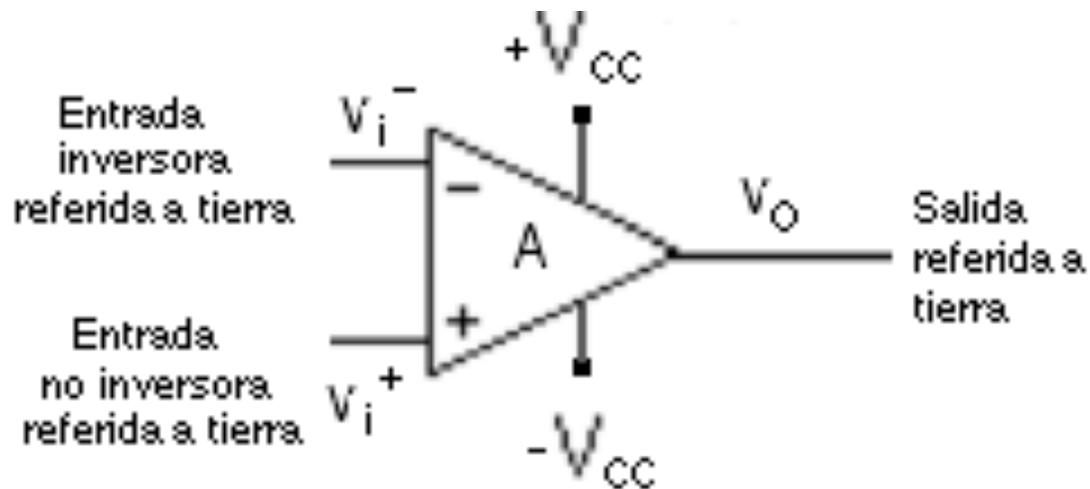
# CARACTERÍSTICAS DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL

Ganancia infinita  $A = \infty$

Impedancia de entrada infinita  $R_i = \infty$

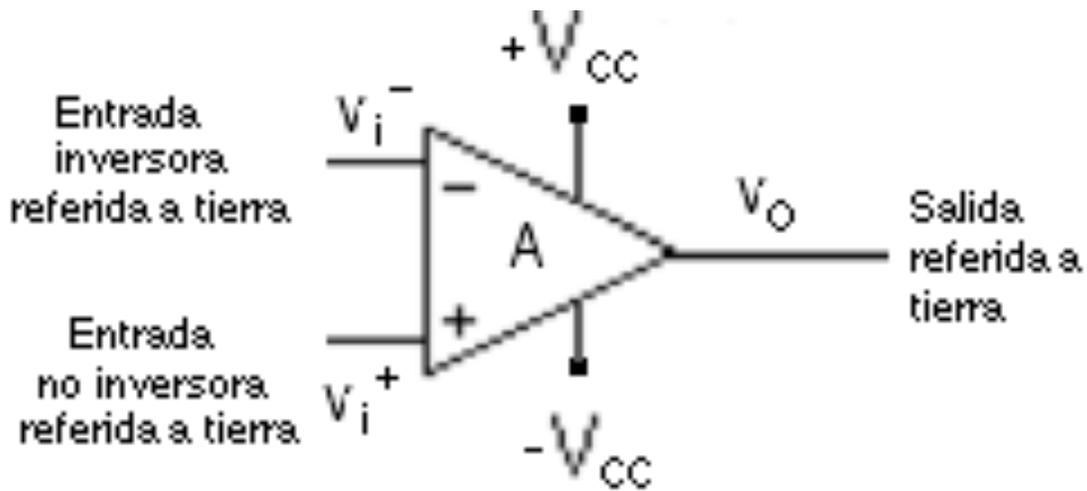
Impedancia de salida cero  $R_o = 0$

Ancho de banda infinito

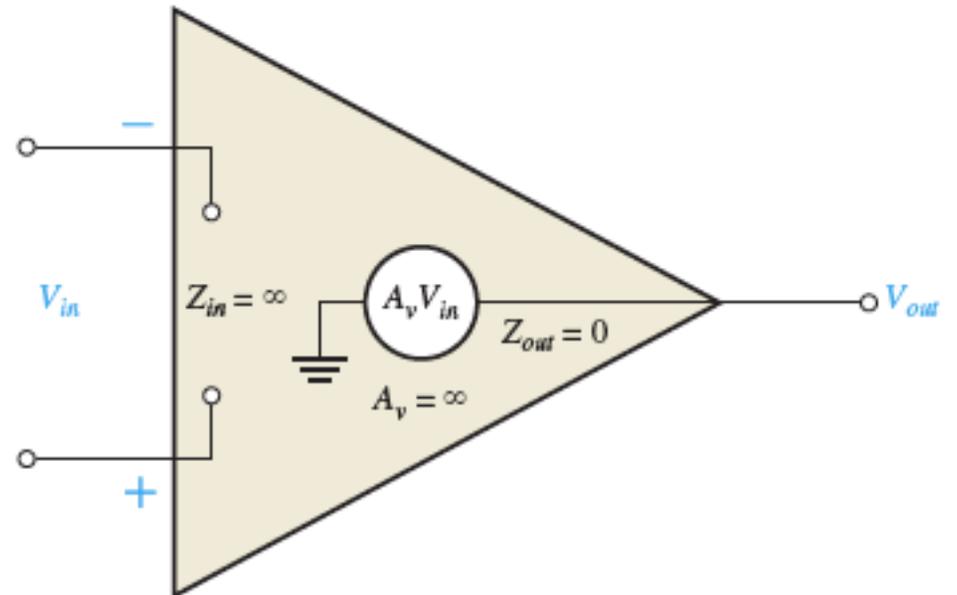


$$V_o = A (V_i^+ - V_i^-)$$

# MODELO DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL

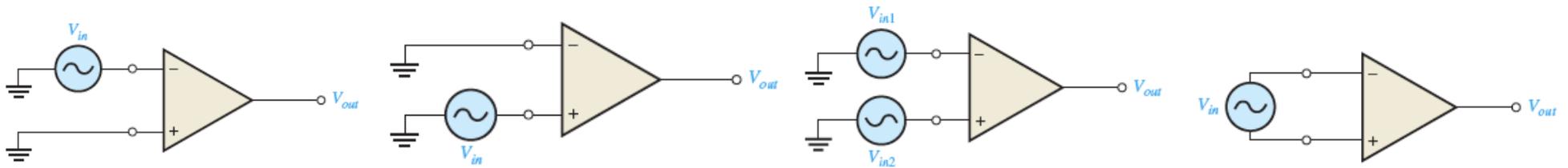


$$V_o = AV_{in} = A(V_i^+ - V_i^-)$$

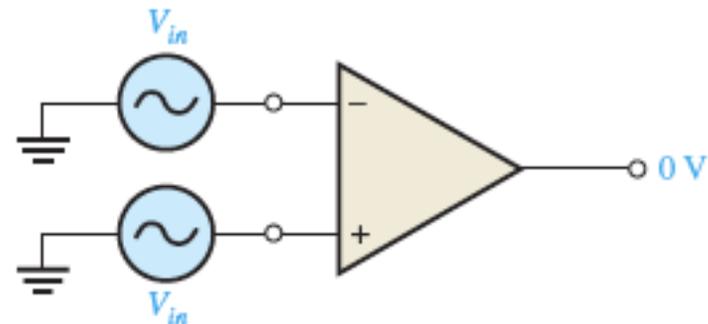


## MODOS DE APLICACIÓN DE LAS SEÑALES DE ENTRADA

\* **Modo Diferencial:** Se aplica una señal en una entrada mientras la otra está conectada a tierra o se aplican dos señales de polaridad opuesta simultáneamente.



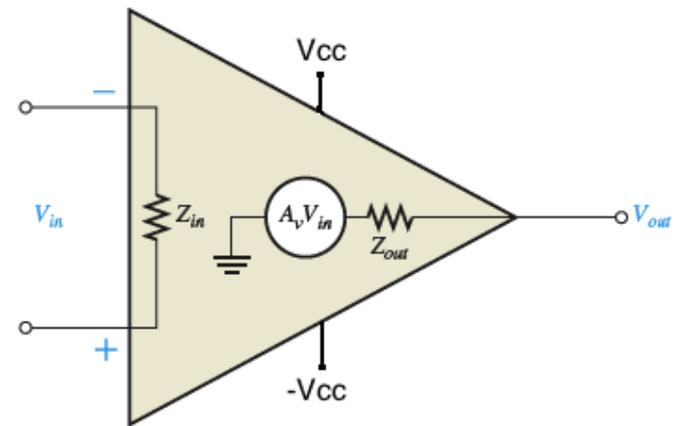
\* **Modo Común:** Se aplican dos señales de la misma amplitud, fase y frecuencia en ambas entradas, que tienden a cancelarse, por lo que debe resultar una salida de voltaje nula. Es importante para manejar señales de ruido no deseadas que aparecen en las entradas, junto con las señales que se quieren amplificar.



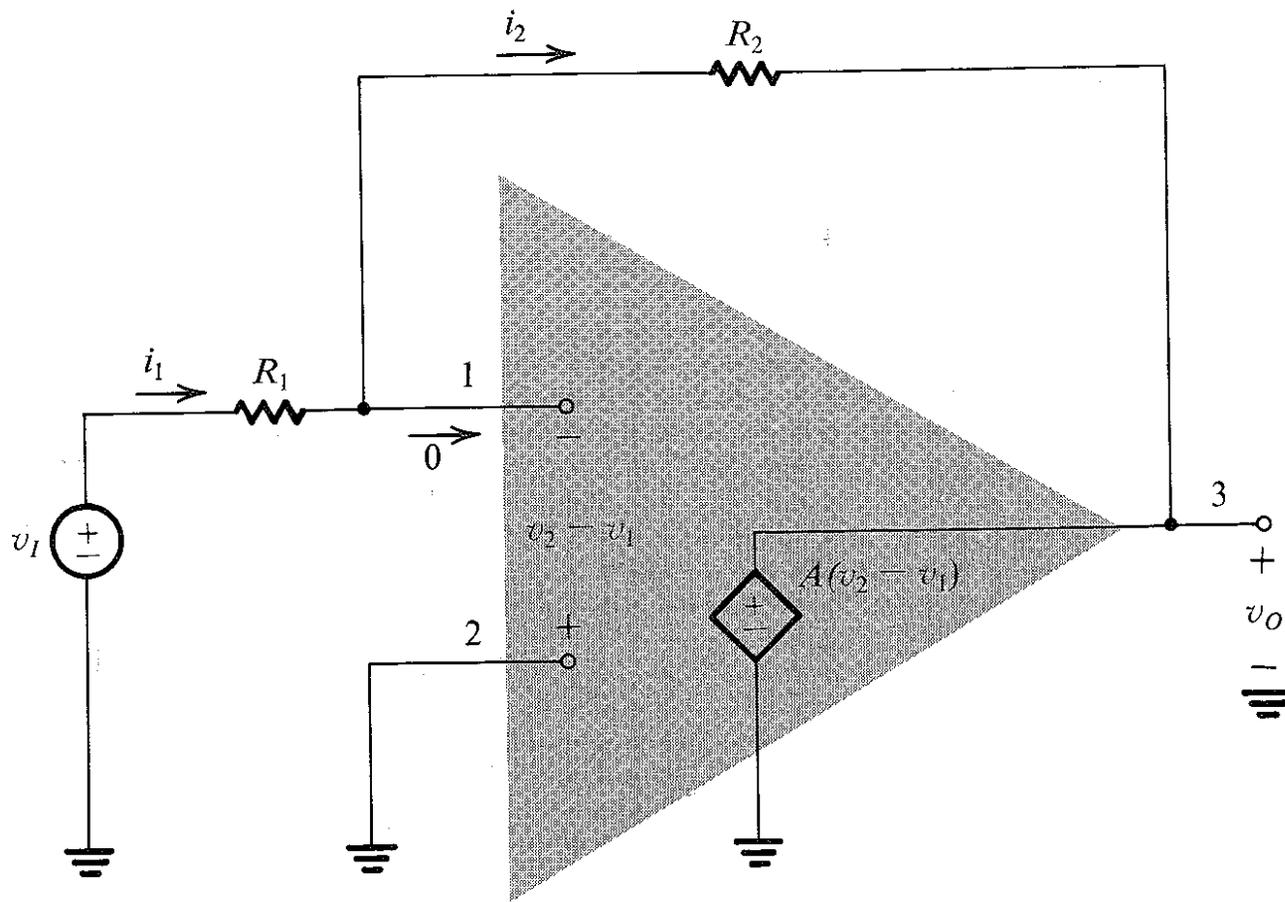
## ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE LOS AMPLIFICADORES OPERACIONALES REALES

- \* La ganancia  $A$  no es infinita, pero es muy grande (del orden de  $10^5$  o superior).
- \* La impedancia de entrada no es infinita, pero es elevada ( $1\text{M}\Omega$  o más).
- \* La resistencia de salida no es cero, pero es pequeña (pocos ohmios).
- \* Las fuentes de voltaje de alimentación ( $\pm 15\text{V}$ ) definen el rango de operación del amplificador y la salida no puede alcanzar el valor de la fuente (para las fuentes de  $\pm 15\text{V}$  la salidas máximas están alrededor de  $\pm 14\text{V}$  o menos).
- \* Las entradas no son perfectamente simétricas, las corrientes en ambas entradas no son exactamente iguales.
- \* Presentan un ancho de banda finito.

**El modelo ideal, tomando en cuenta solo las fuentes de alimentación, es muy útil para realizar la mayor parte de los análisis.**



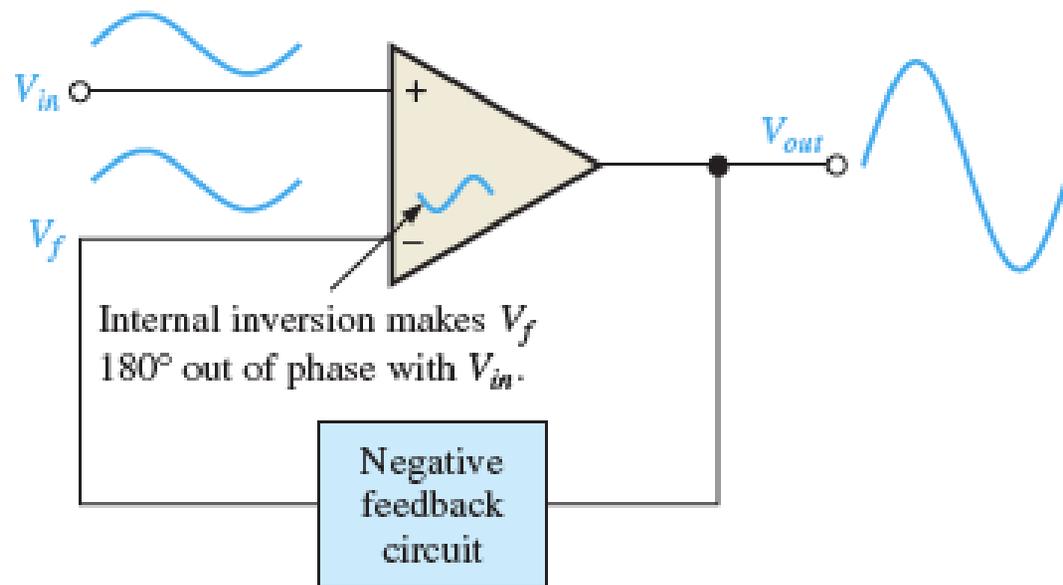
# AMPLIFICADOR INVERSOR BÁSICO CON EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL



(a)

## EL CONCEPTO DE REALIMENTACIÓN NEGATIVA

- \* La realimentación negativa es uno de los conceptos mas importantes en el área de la electrónica, y es fundamental en la explicación del funcionamiento de los circuitos lineales con amplificadores operacionales.
- \* Es un proceso mediante el cual una parte del voltaje de salida del circuito se devuelve a una entrada del mismo, con un ángulo de fase tal que se opone a (o se resta de) la señal de entrada.



# AMPLIFICADOR INVERSOR BÁSICO CON EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL

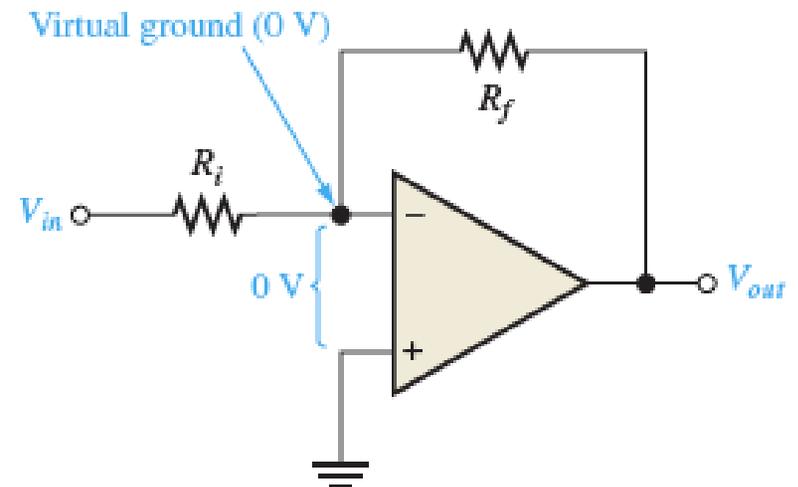
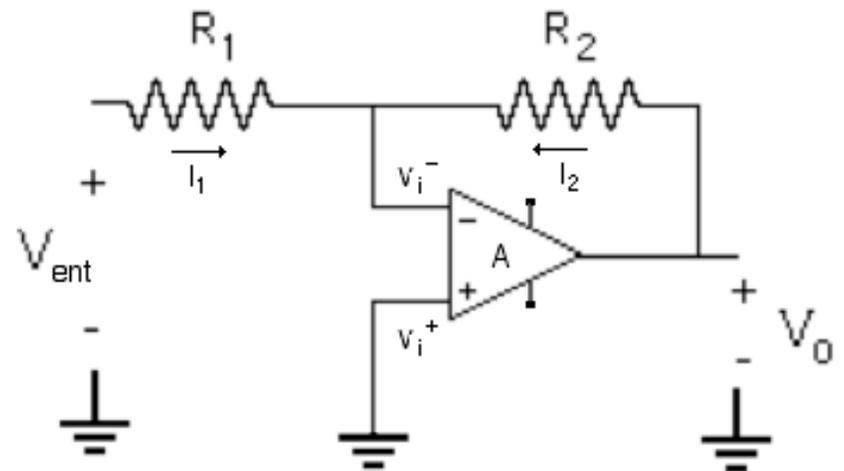
$$V_o = A(v_i^+ - v_i^-)$$

## REALIMENTACIÓN NEGATIVA

Aunque la ganancia  $A$  sea  $\infty$ , el voltaje de salida tiene que ser distinto de cero, lo cual implica  $v_i^+ = v_i^-$

En este caso  $v_i^+ = v_i^- = 0$

Se dice que en la entrada negativa hay una **TIERRA VIRTUAL**



Entonces:

$$V_{ent} = R_1 I_1 \quad \triangleright \quad I_1 = \frac{V_{ent}}{R_1}$$

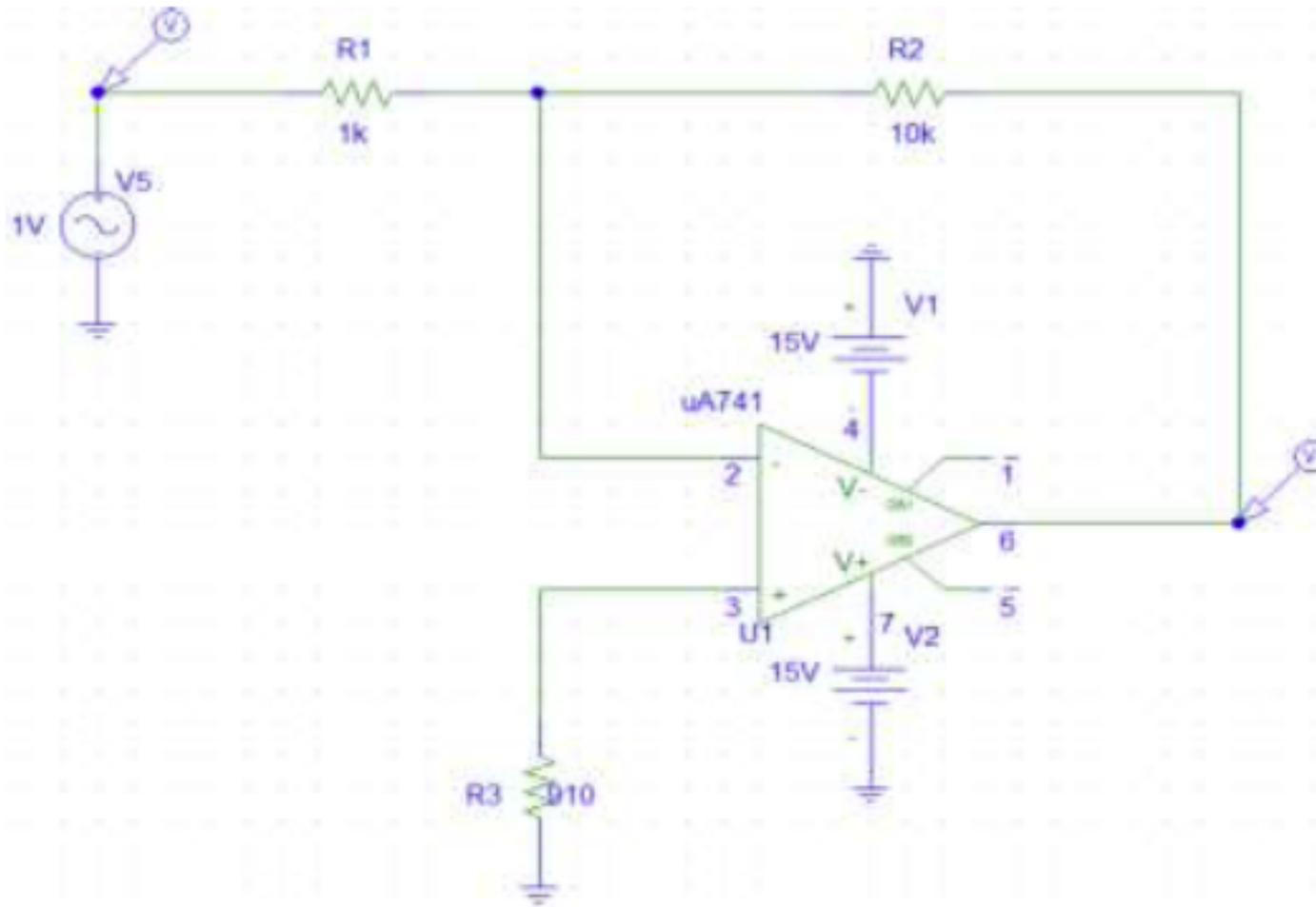
$$V_o = R_2 I_2 \quad \triangleright \quad I_2 = \frac{V_o}{R_2}$$

Si la impedancia de entrada es  $\infty$  se cumple  $I_1 = -I_2$

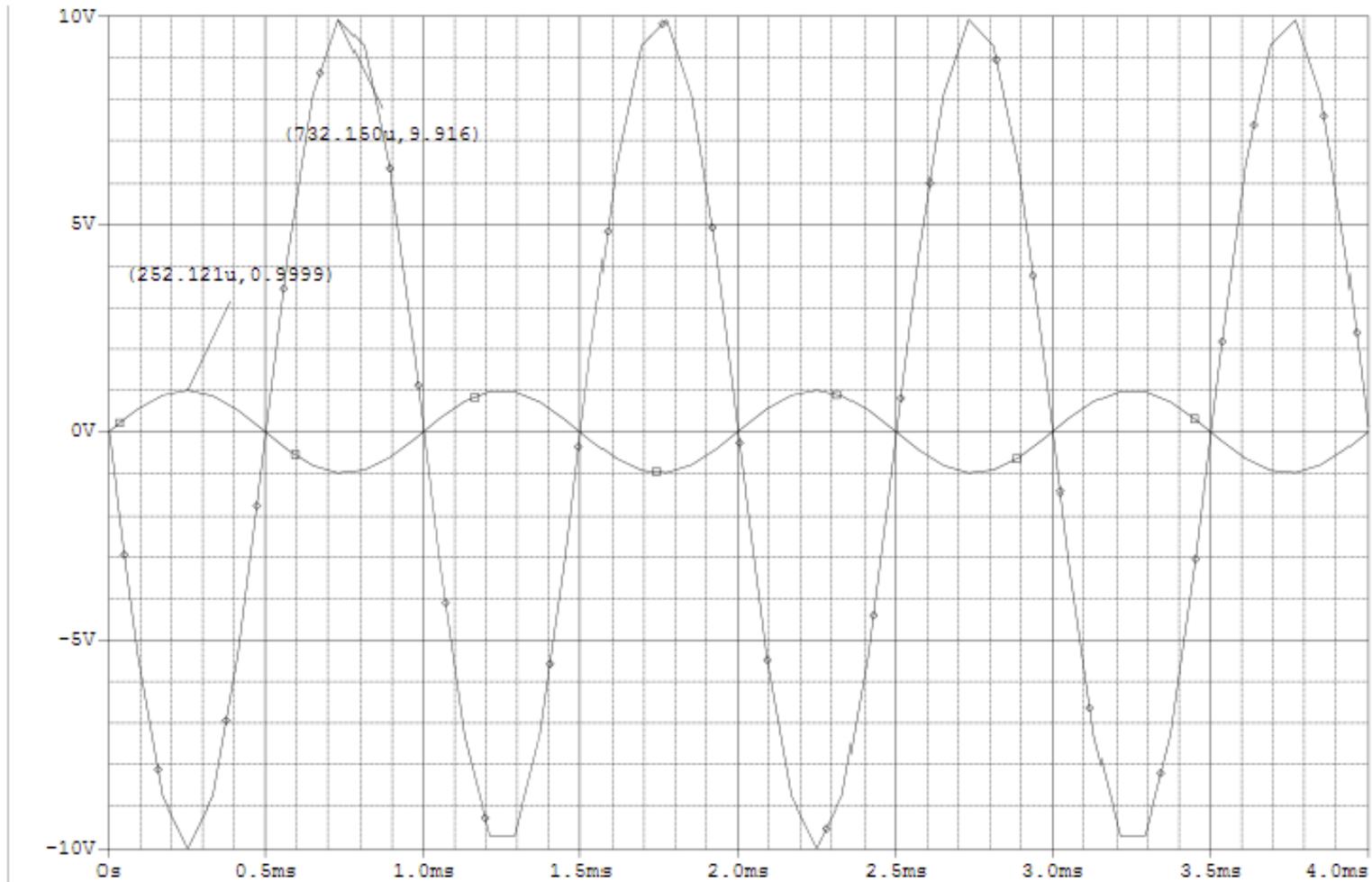
$$\text{Por lo tanto se cumple que } \frac{V_{ent}}{R_1} = \frac{-V_o}{R_2} \quad \triangleright \quad V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_{ent}$$

El signo menos indica que la señal de salida tiene un desfase de  $180^\circ$  con respecto a la señal de entrada. Por eso se llama amplificador inversor.

# SIMULACIÓN EN SPICE DE UNA AMPLIFICADOR INVERSOR CON EL OPAM 741

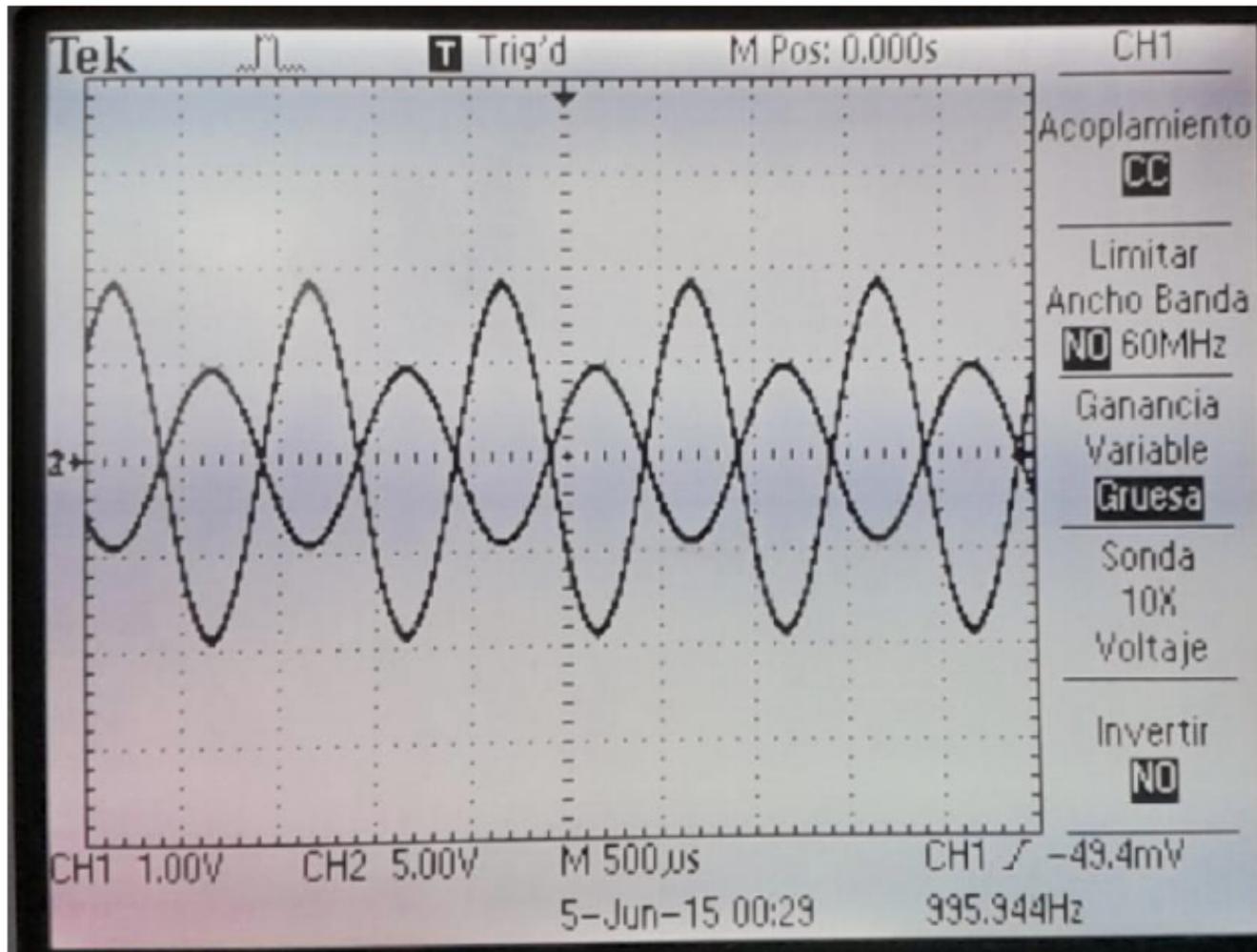


## Análisis TRANSIENT de señales de entrada y salida en SPICE:



# OBSERVACIÓN DE LAS SEÑALES DE ENTRADA Y SALIDA DE UN AMPLIFICADOR INVERSOR EN EL OSCILOSCOPIO

Gráfica obtenida en el osciloscopio digital, inciso 6.



## PROBLEMA AMPLIFICADOR INVERSOR

Diseñe un amplificador inversor que tenga una ganancia de 10 utilizando el modelo de un amplificador ideal, alimentado con fuentes de voltaje de  $\pm 15\text{V}$ . Dibuje las señales de entrada y salida del amplificador inversor si la señal de entrada es:

$$v_1(t) = 1\text{V} \text{ sen}(2\pi 1000t)$$

$$v_2(t) = 5\text{V} \text{ sen}(2\pi 1000t)$$

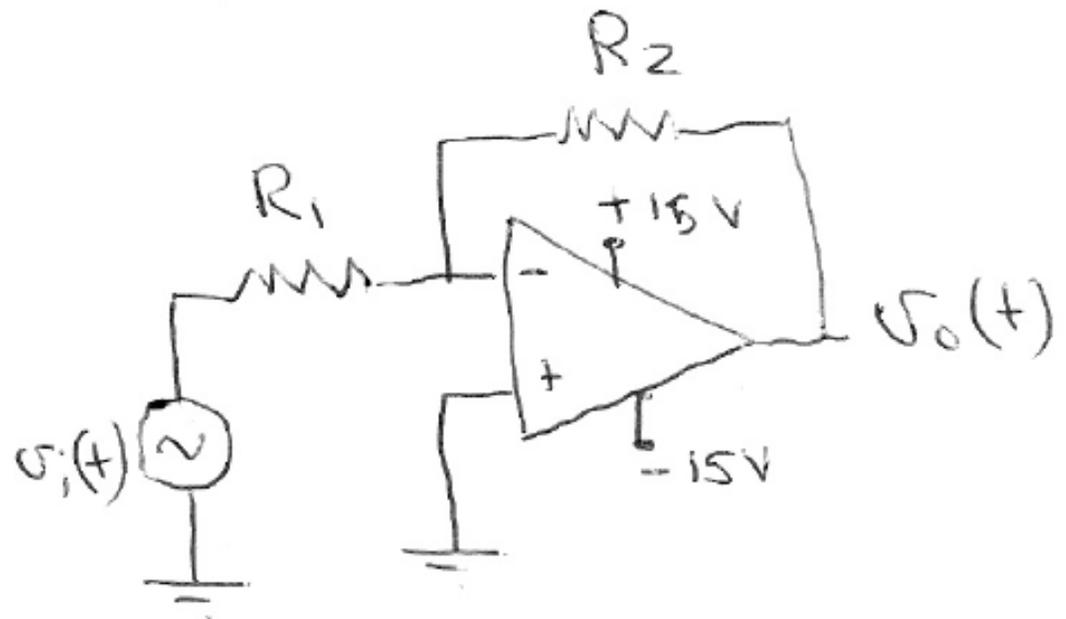
$$v_3(t) = 1\text{V} + 1\text{V} \text{ sen}(2\pi 1000t)$$

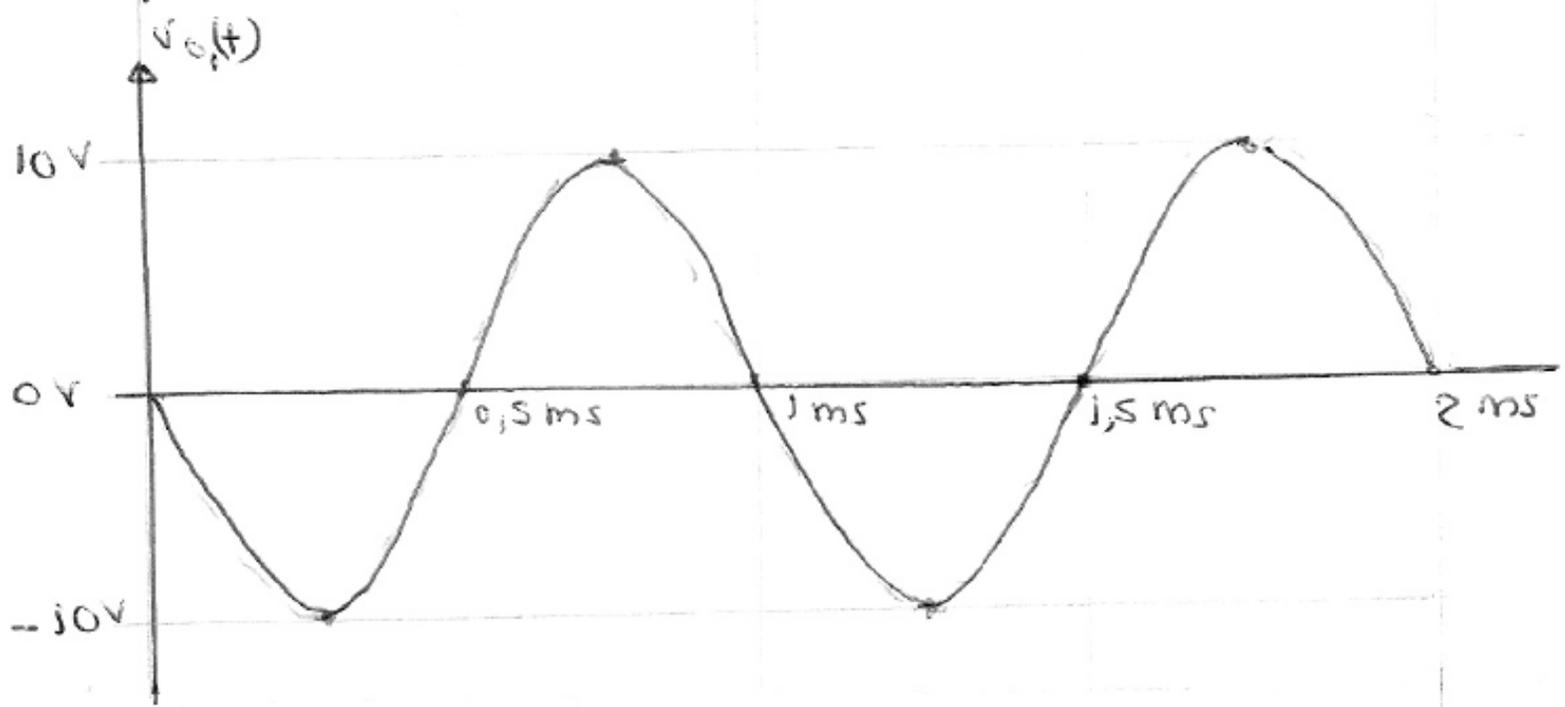
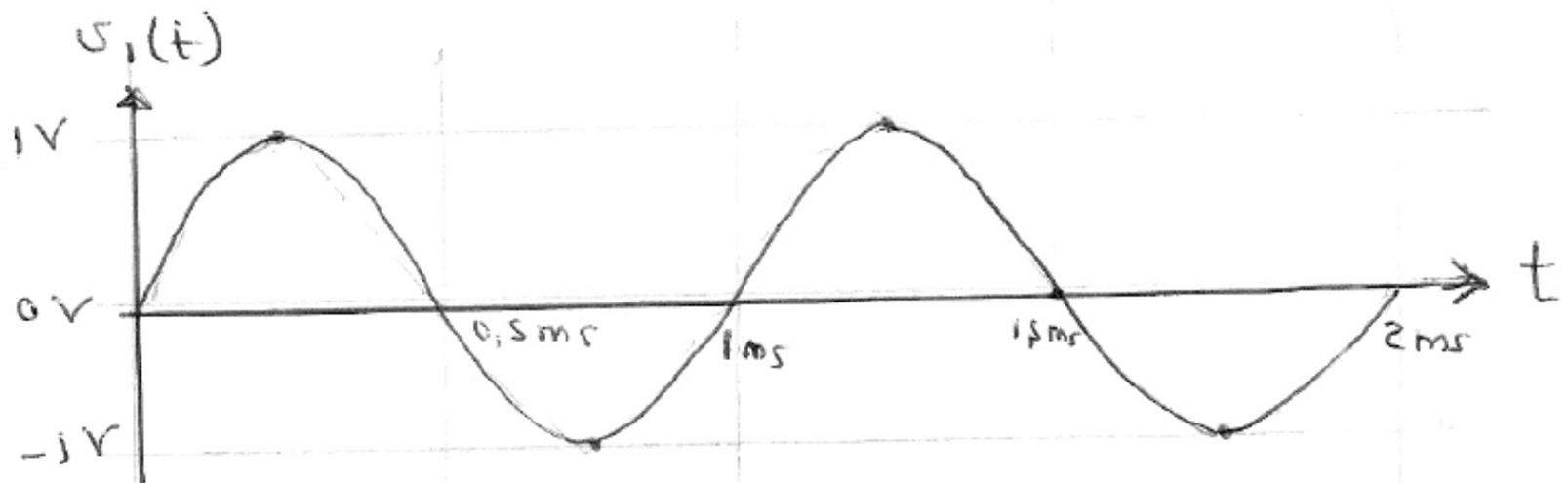
$$A_v = -10 = -\frac{R_2}{R_1}$$

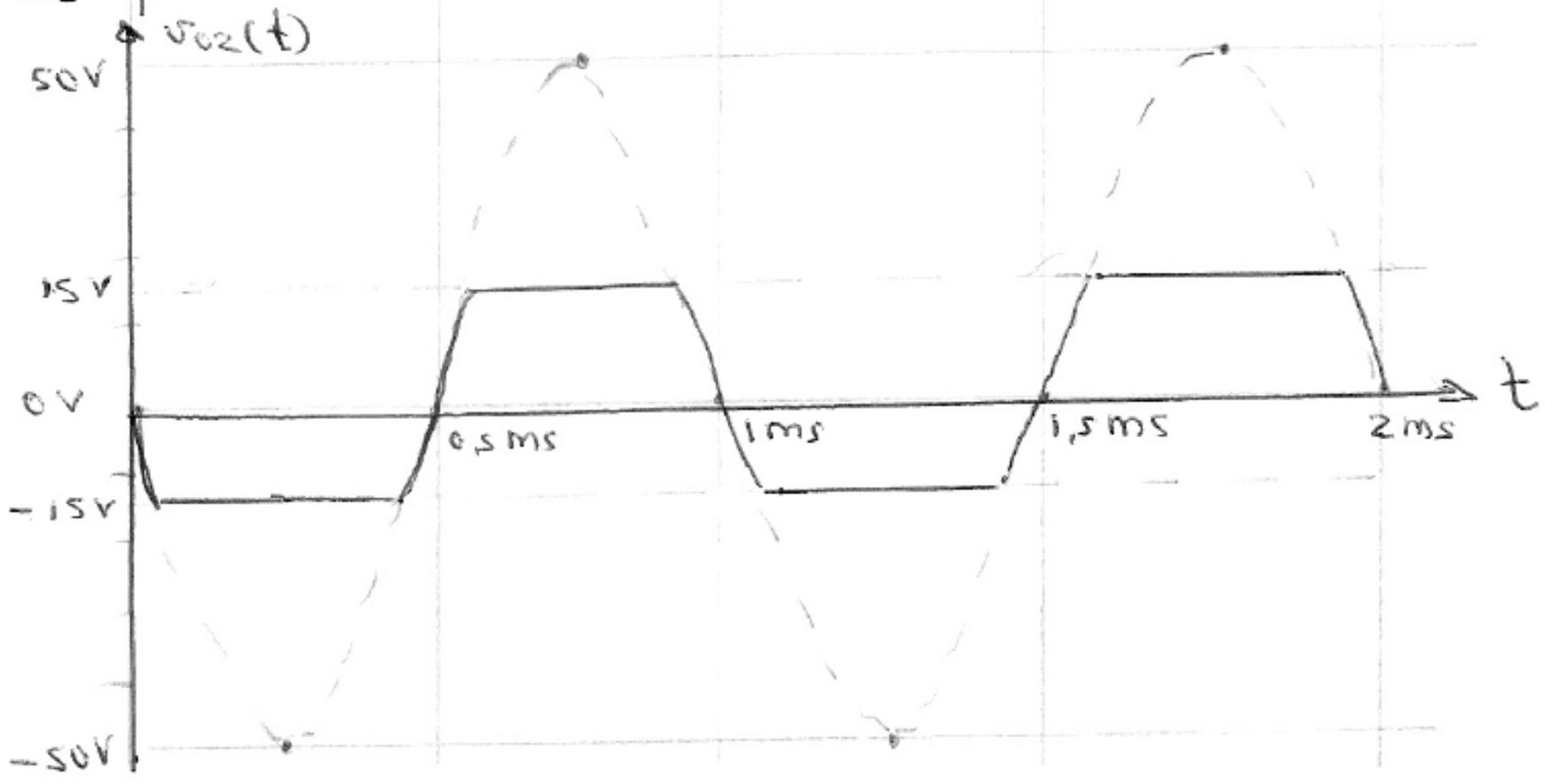
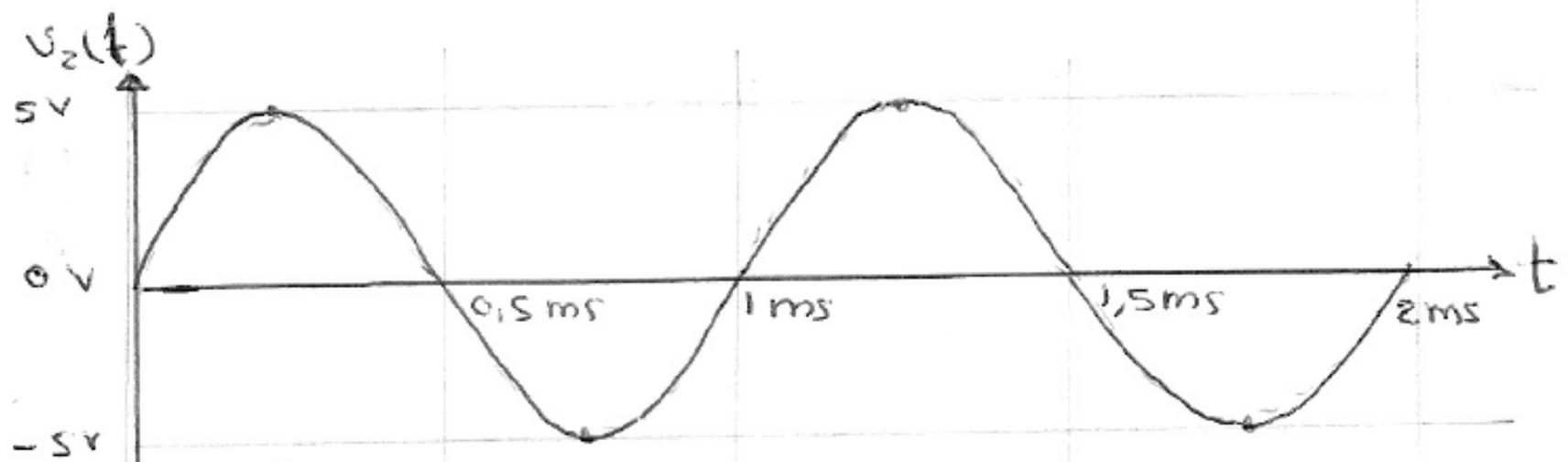
Escogemos

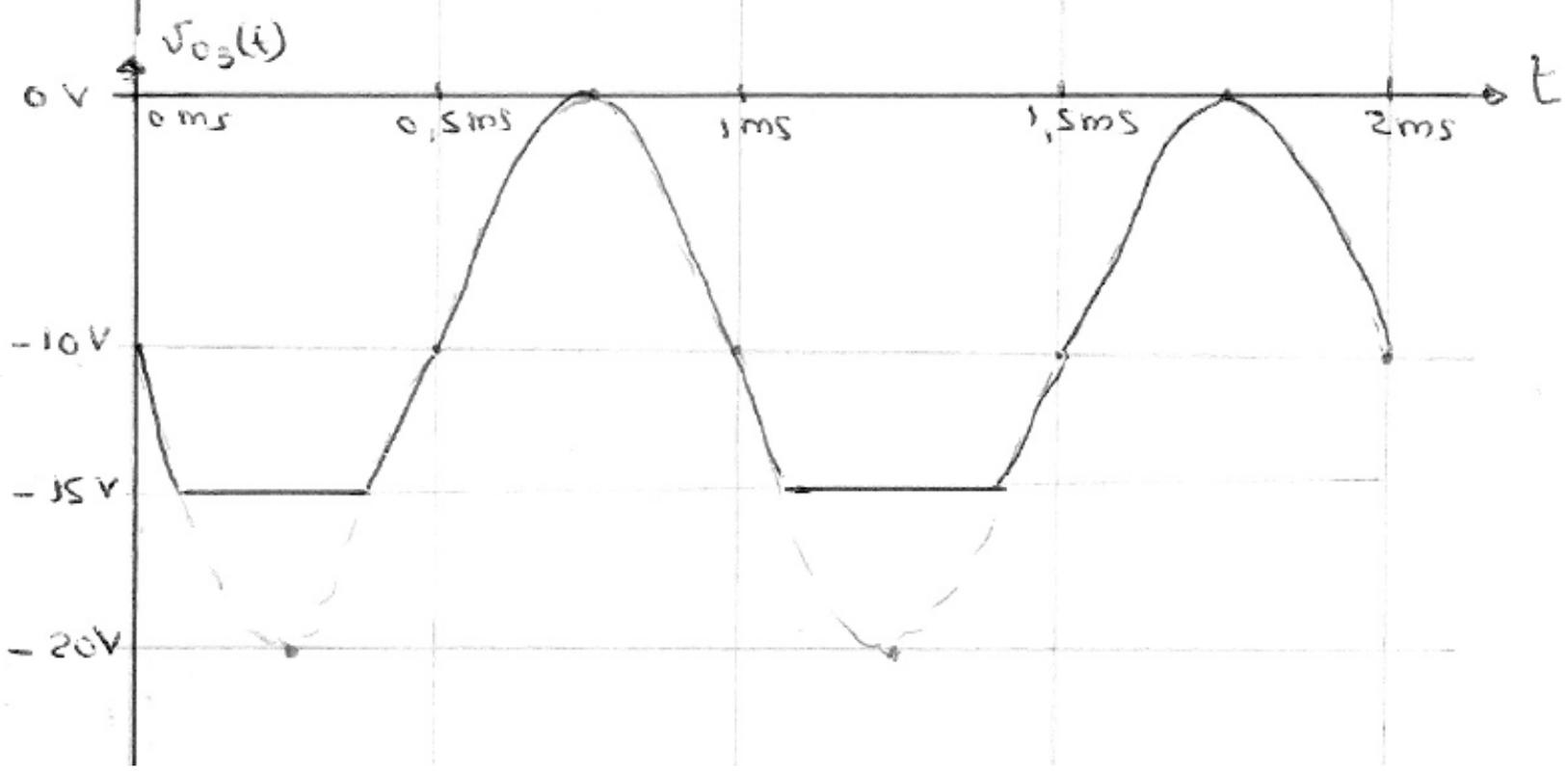
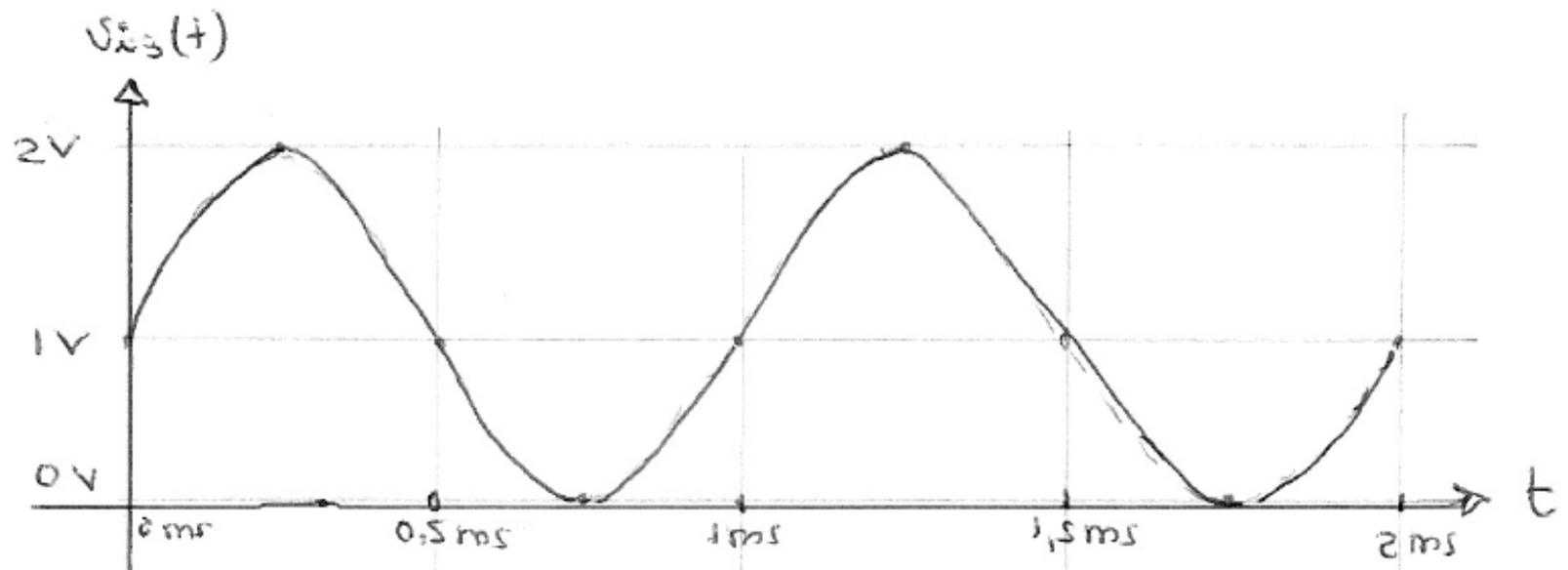
$$R_2 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$$









## AMPLIFICADOR NO INVERSOR BÁSICO CON EL OPAM IDEAL

$$V_o = A(v_i^+ - v_i^-)$$

### REALIMENTACIÓN NEGATIVA

Con  $A = \infty$ , el voltaje de salida distinto de cero implica  $v_i^+ = v_i^-$

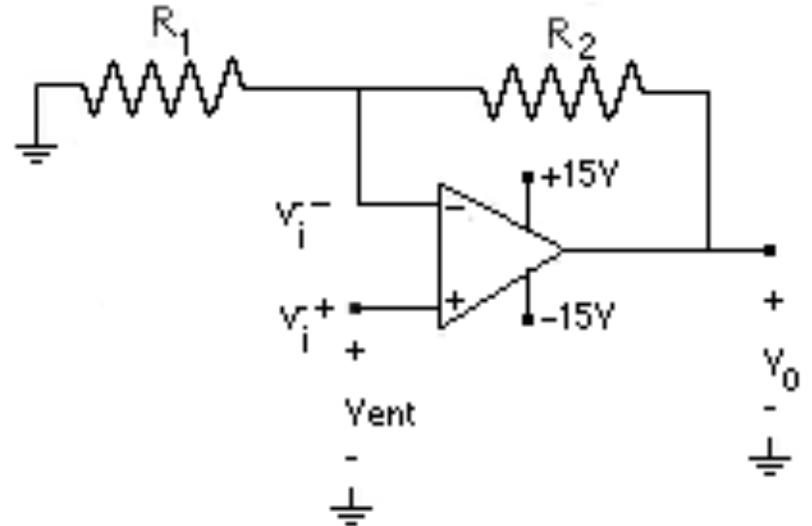
EN ESTE CASO  $v_i^+ = v_i^- = V_{ent}$

Entonces:

$$V_o - V_{ent} = R_2 I_2 \quad I_2 = \frac{V_o - V_{ent}}{R_2}$$

$$V_{ent} = R_1 I_1 \quad I_1 = \frac{V_{ent}}{R_1}$$

Si la impedancia de entrada es  $\infty$  se cumple  $I_1 = I_2$

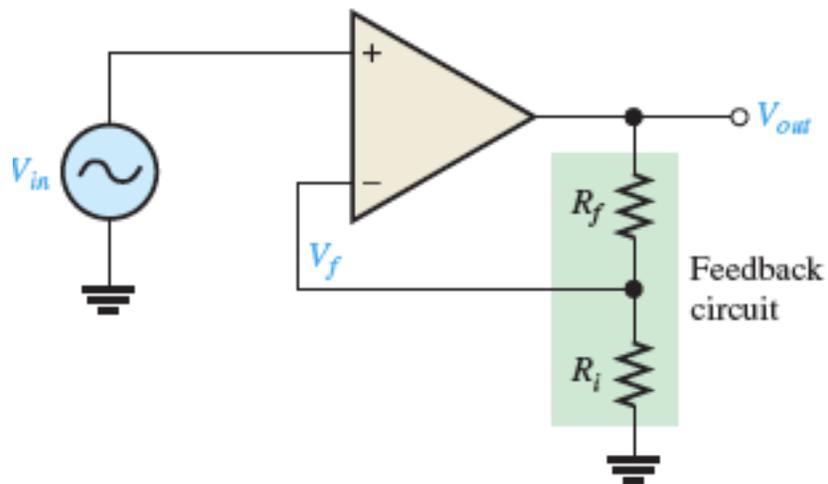


Por lo tanto

$$\frac{V_o - V_{ent}}{R_2} = \frac{V_{ent}}{R_1} \triangleright \frac{V_o}{R_2} = \frac{V_{ent}}{R_1} + \frac{V_{ent}}{R_2} \triangleright V_o = V_{ent} R_2 \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} \right)$$

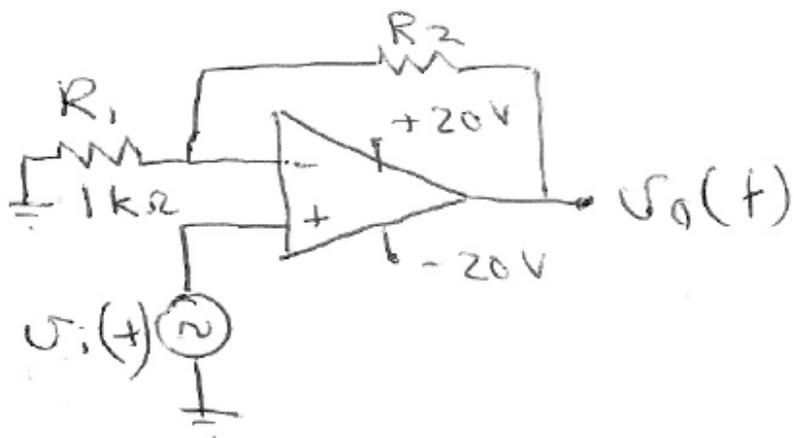
Lo que resulta 
$$V_o = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V_{ent}$$

Otra forma de presentar el amplificador no inversor básico (sin las fuentes)



## PROBLEMA AMPLIFICADOR NO INVERSOR

Se quiere amplificar una señal de  $1V \sin(2\pi 1000t)$  mediante el amplificador no inversor mostrado, a fin de obtener la señal de salida de mayor amplitud sin distorsión. Calcule el valor de  $R_2$  y seleccione el valor estandar mas conveniente para esta resistencia entre las de 5% de precisión y dibuje las formas de onda de entrada y salida. Considere el operacional ideal.

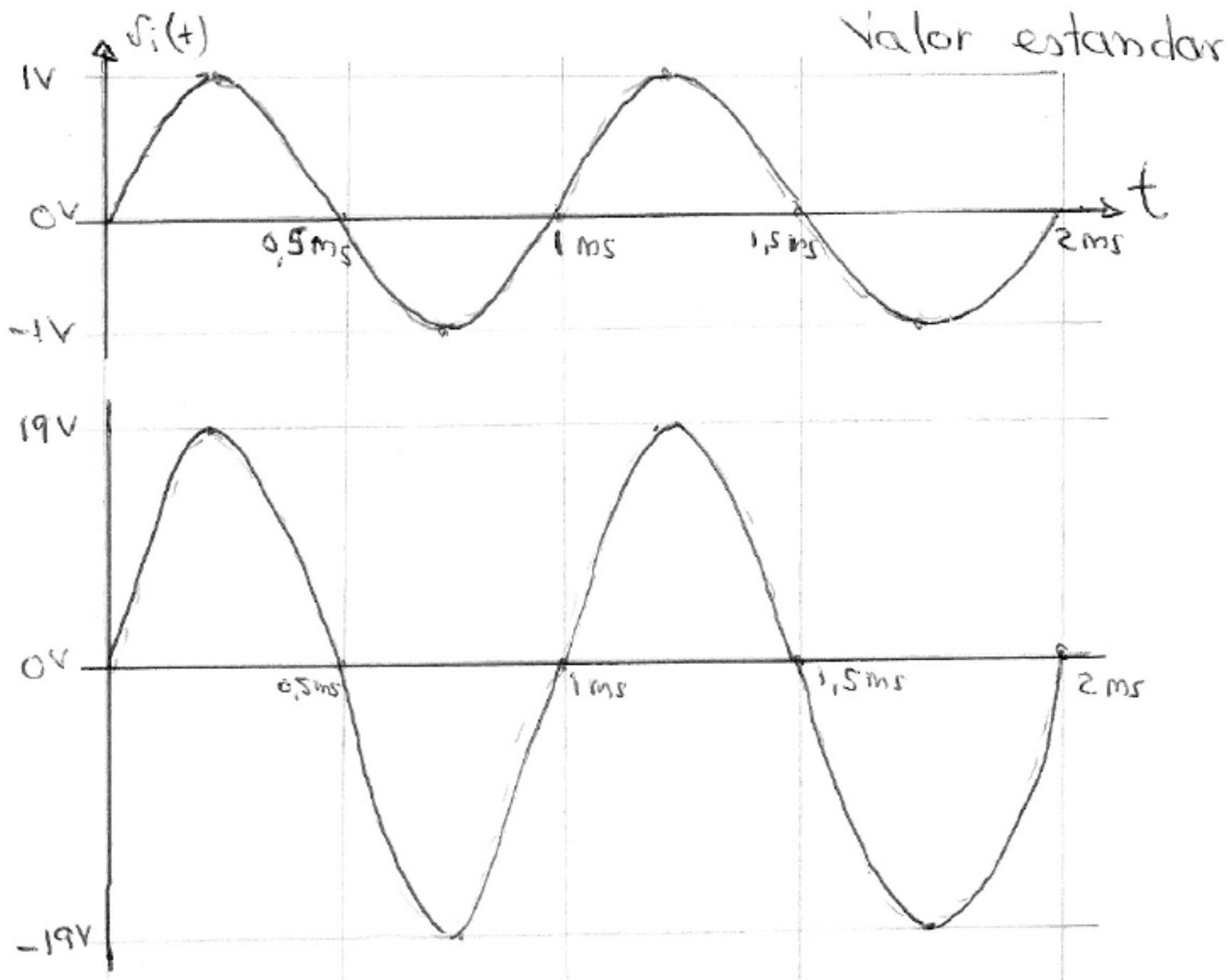


$$v_o(t) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_i(t)$$

$$\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = 20 \frac{V}{V} \quad \frac{R_2}{R_1} = 19$$

$$R_2 = 19 \times 1k\Omega = 19k\Omega$$

Valor estandar en 5% : 18kΩ



## SEGUIDOR DE VOLTAJE CON EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL

$$V_o = A(v_i^+ - v_i^-)$$

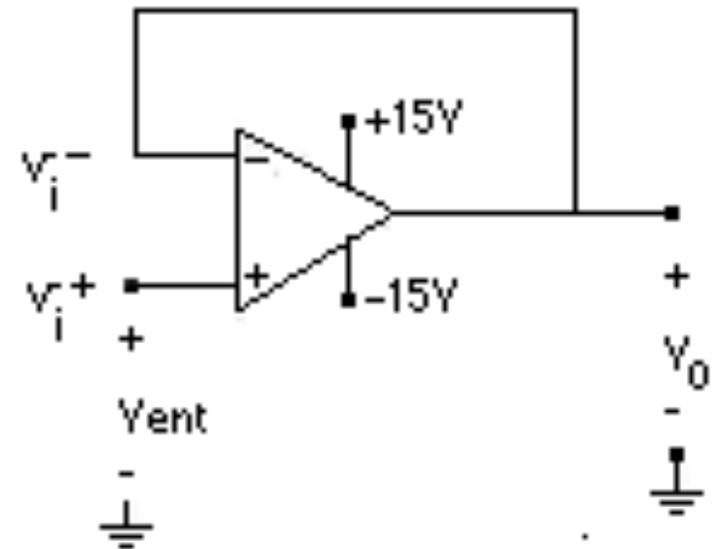
### REALIMENTACIÓN NEGATIVA

Con  $A = \infty$ , el voltaje de salida distinto de cero implica  $v_i^+ = v_i^-$

En este caso  $v_i^+ = v_i^- = V_{ent}$

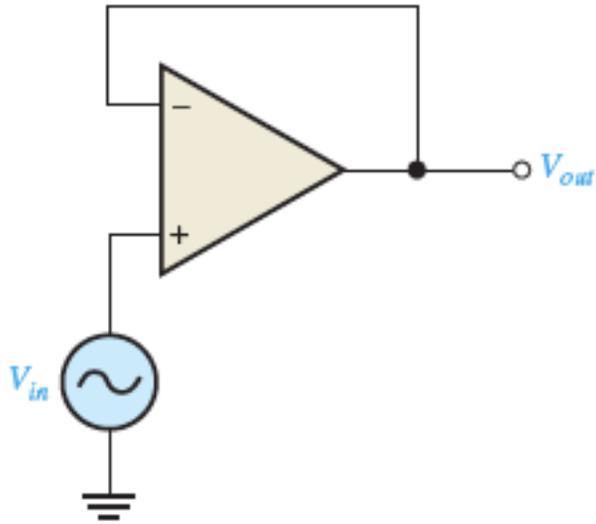
Entonces:

$$V_o = V_{ent}$$



Característica importante: Impedancia de muy alta (teóricamente infinita)

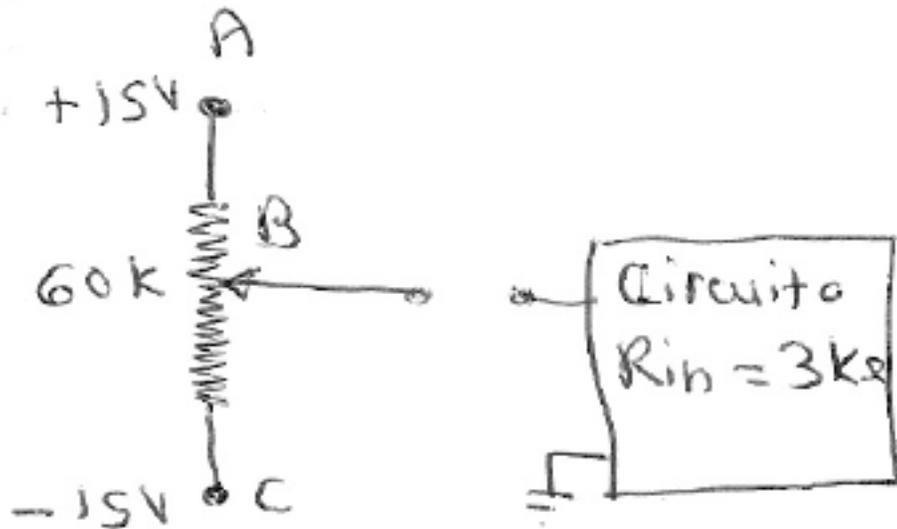
## UTILIDAD DEL SEGUIDOR DE VOLTAJE



Las características más importantes del seguidor de voltaje es que tiene una impedancia de entrada muy elevada y una impedancia de salida muy baja, lo cual lo hace muy útil para acoplar diferentes circuitos entre sí, sin que al realizar los acoplamientos se alteren los circuitos involucrados.

## PROBLEMA SEGUIDOR DE VOLTAJE

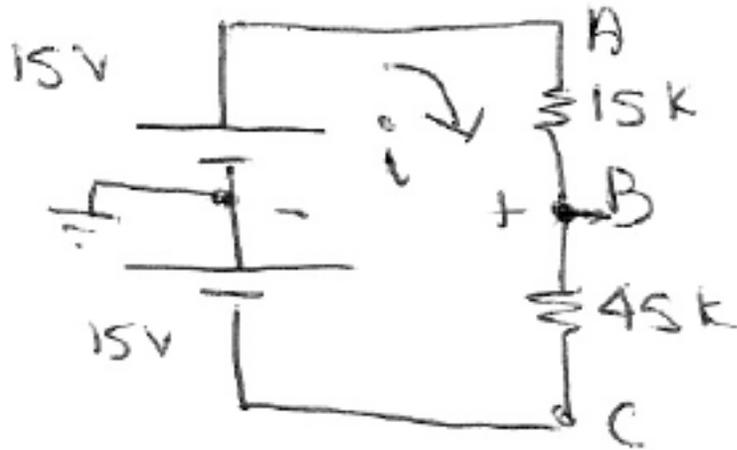
Se quiere aplicar un voltaje de entrada a un circuito cuya resistencia de entrada es  $3\text{k}\Omega$ , ajustando un potenciómetro de precisión de  $60\text{k}\Omega$  conectado entre dos fuentes de  $\pm 15\text{V}$ . El potenciómetro se ha ajustado de tal manera que la resistencia entre A y B es de  $15\text{k}\Omega$ .



a) ¿Qué ocurre si la salida del potenciómetro B se conecta directamente al circuito?

b) ¿Cómo debe conectarse un seguidor de voltaje para que la salida del potenciómetro no se vea afectada cuando se aplique al circuito y el voltaje de entrada de éste no se modifique al realizar la conexión?

## Circuito del potenciómetro



$$i = \frac{15V + 15V}{60k\Omega} = 0,5 \text{ mA}$$

$$V_B = 15V - 15k\Omega i = 15V - 7,5V = 7,5V$$

## Circuito Thevenin del potenciómetro

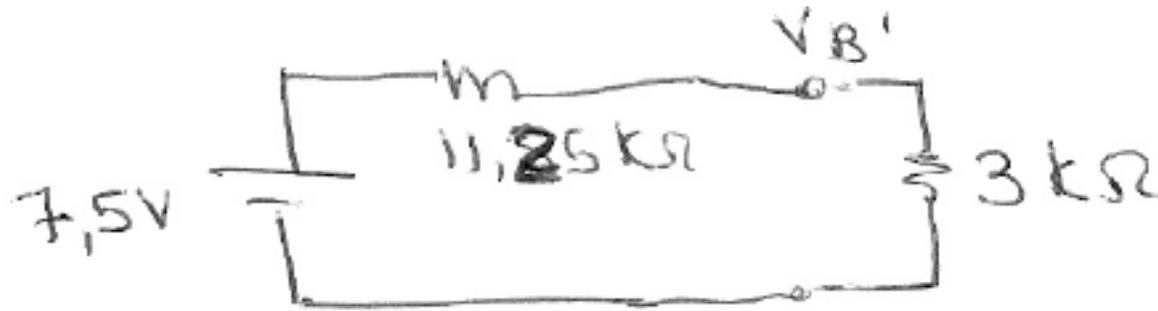
Voltaje de Thevenin: Voltaje entre B y tierra

$$V_{TH} = V_B = 7,5V$$

Resistencia de Thevenin: Paralelo de las resistencias del potenciómetro cuando las fuentes se sustituyen por un cortocircuito

$$R_{TH} = 15k\Omega \parallel 45k\Omega = 11,25k\Omega$$

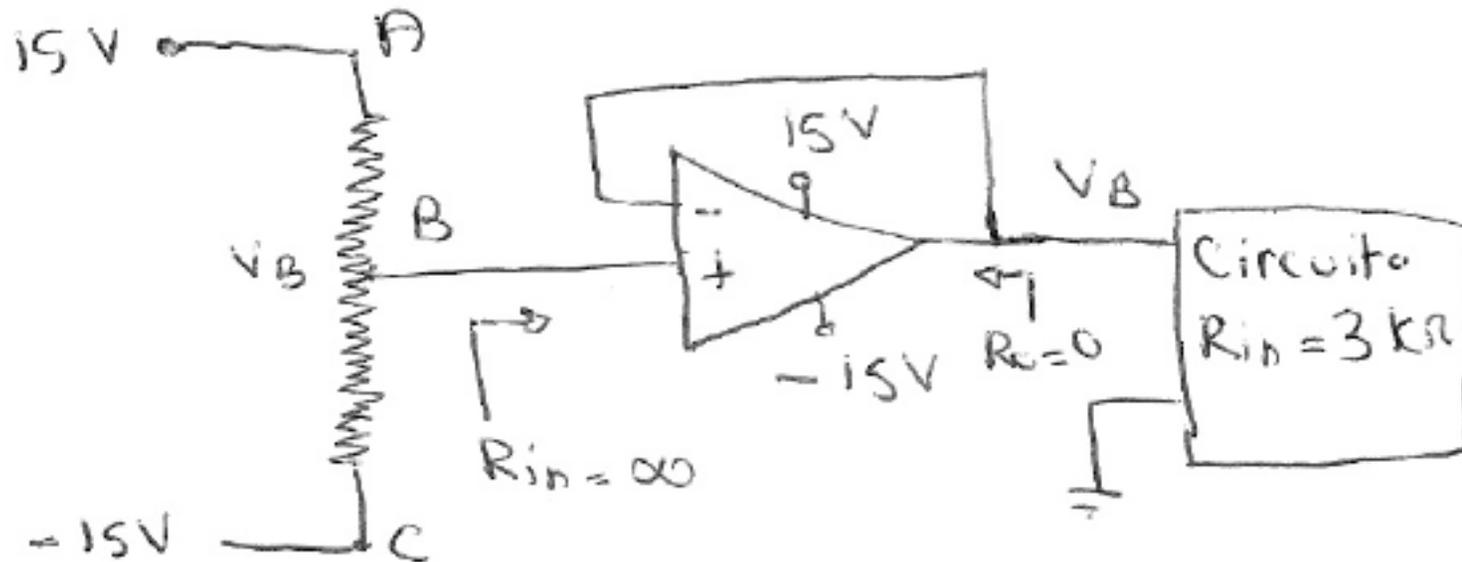
## Conexión directa del potenciómetro con el circuito



$$V_{B'} = \frac{3 \text{ k}\Omega}{3 \text{ k}\Omega + 11,25 \text{ k}\Omega} \times 7,5 \text{ V} = 1,58 \text{ V}$$

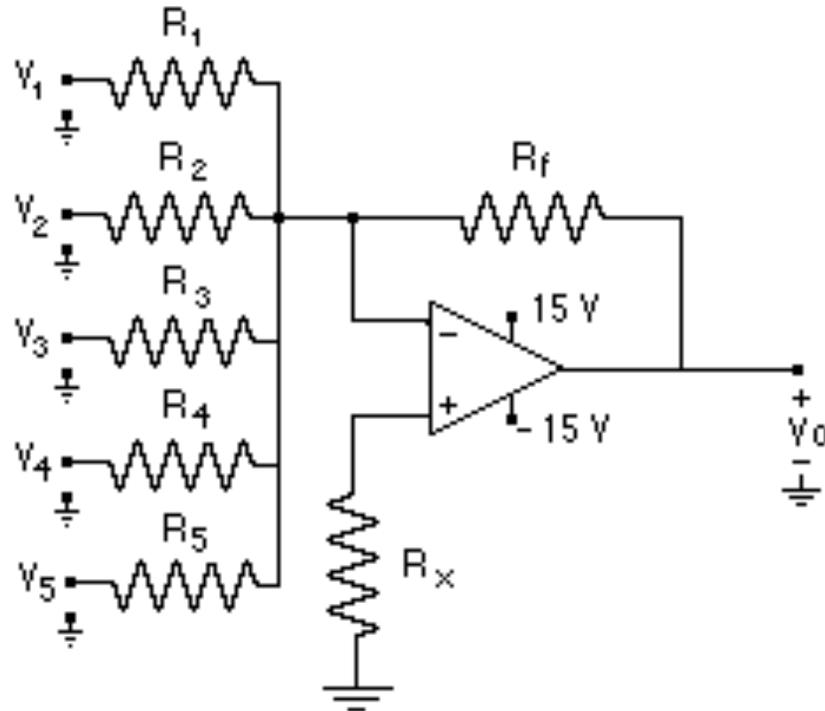
El voltaje a la entrada del circuito se reduce a 1,58 V.

## Conexión del seguidor de voltaje entre el potenciómetro y el circuito



Con este circuito la impedancia conectada al potenciómetro es la impedancia de entrada del amplificador operacional, prácticamente infinita, por lo que no modifica el voltaje establecido por el potenciómetro y la resistencia en serie con el voltaje a la entrada del circuito,  $V_B$ , es la resistencia de salida del operacional, prácticamente cero.

## SUMADOR INVERSOR CON EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL



La resistencia  $R_x$  esta conectada a tierra, por lo tanto  $v_i^+ = v_i^- = 0$

Si el voltaje en la entrada inversora es cero, las corrientes en las resistencias son:

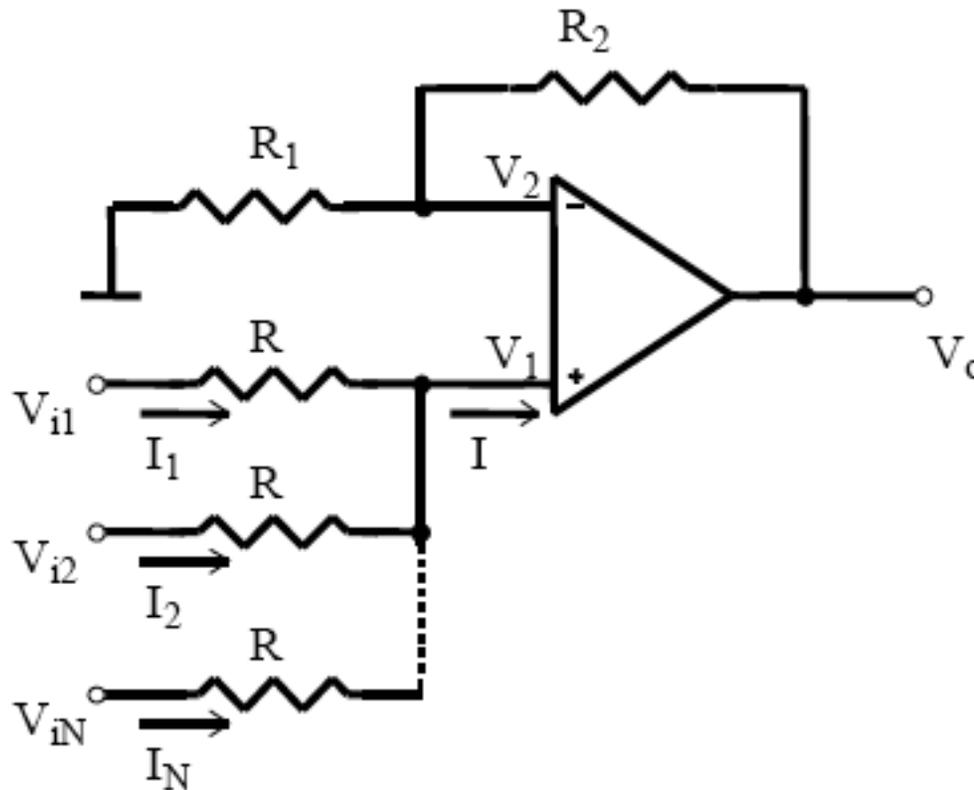
$$I_1 = \frac{V_1}{R_1} \quad I_2 = \frac{V_2}{R_2} \quad I_3 = \frac{V_3}{R_3} \quad I_4 = \frac{V_4}{R_4} \quad I_5 = \frac{V_5}{R_5}$$

Las cinco corrientes entran en el nodo  $v_i^-$ , la corriente por  $R_f$  sale del nodo, la corriente de entrada al OPAM es cero. Por lo tanto

$$I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 = I_F \quad I_F = -\frac{V_o}{R_F} \quad V_o = -R_F \left( \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} + \frac{V_4}{R_4} + \frac{V_5}{R_5} \right)$$

$$V_o = - \left( \frac{R_F}{R_1} V_1 + \frac{R_F}{R_2} V_2 + \frac{R_F}{R_3} V_3 + \frac{R_F}{R_4} V_4 + \frac{R_F}{R_5} V_5 \right)$$

## SUMADOR NO INVERSOR CON EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL



Como la realimentación es negativa se cumple que  $V_1 = V_2$  .

Además  $I = I_1 + I_2 + \dots + I_N = 0$

**Entonces, en el caso de que todas las resistencias R sean iguales:**

$$\frac{V_{i1} - V_1}{R} + \frac{V_{i2} - V_1}{R} + \dots + \frac{V_{iN} - V_1}{R} = \frac{V_{i1} + V_{i2} + \dots + V_{iN}}{R} - \frac{NV_1}{R} = 0$$

Por lo tanto:

$$\frac{V_{i1} + V_{i2} + \dots + V_{iN}}{R} = \frac{NV_1}{R} \triangleright V_{i1} + V_{i2} + \dots + V_{iN} = NV_1 \triangleright V_1 = \frac{V_{i1} + V_{i2} + \dots + V_{iN}}{N}$$

En la entrada inversora la suma de corrientes es:

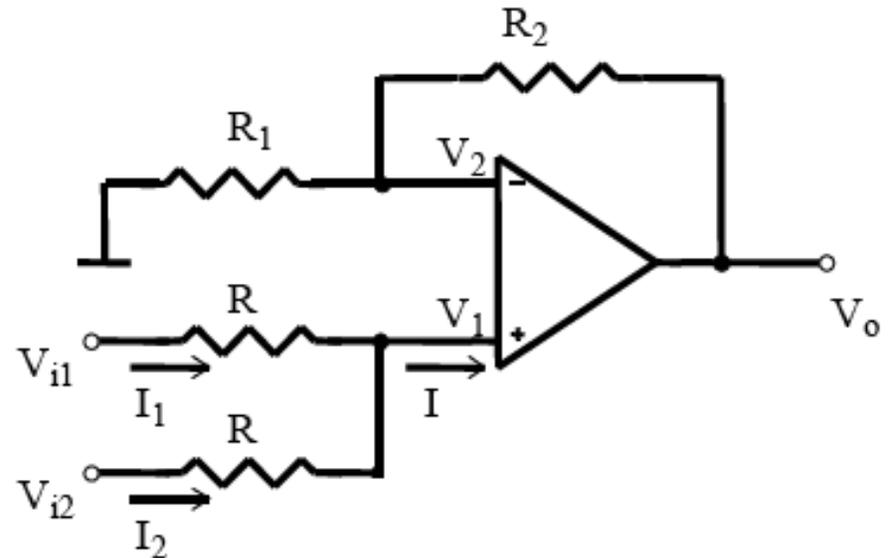
$$\frac{0 - V_2}{R_1} = \frac{V_2 - V_o}{R_2} \triangleright \frac{V_2}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} = \frac{V_o}{R_2} \triangleright V_o = \left( \frac{R_2}{R_1} + 1 \right) V_2$$

Por lo tanto:

$$\boxed{V_o = \left( \frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \left( \frac{V_{i1} + V_{i2} + \dots + V_{iN}}{N} \right)}$$

## PROBLEMA SUMADOR NO INVERSOR CON EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL

Para el siguiente sumador no inversor de dos entradas, alimentado con fuentes de  $\pm 15V$ ,  $R_1=10k\Omega$ ,  $R_2=30k\Omega$ ,  $R=10k\Omega$  calcule el máximo voltaje que puede tener la suma de  $V_{i1}+V_{i2}$  para que la salida del amplificador operacional no sature cuando se apliquen dichas entradas.



$$V_o = \left( \frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \left( \frac{V_{i1} + V_{i2}}{2} \right) = \left( \frac{30k\Omega}{10k\Omega} + 1 \right) \left( \frac{V_{i1} + V_{i2}}{2} \right) = 2(V_{i1} + V_{i2})$$

El voltaje de salida no debe sobrepasar los  $13,6V$ , pongamos  $13V$ , por lo tanto  $V_{i1}+V_{i2}$  no debe ser mayor de  $6,5V$ .

Si  $R_2=10k\Omega$  se tiene que  $V_o=V_{i1}+V_{i2}$ , sin amplificación y signo positivo.

## AMPLIFICADOR DIFERENCIAL CON EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL (RESTADOR)

Puede analizarse como la combinación de un amplificador inversor y uno no inversor aplicando superposición:

$$V_o = V_{o1} + V_{o2}$$

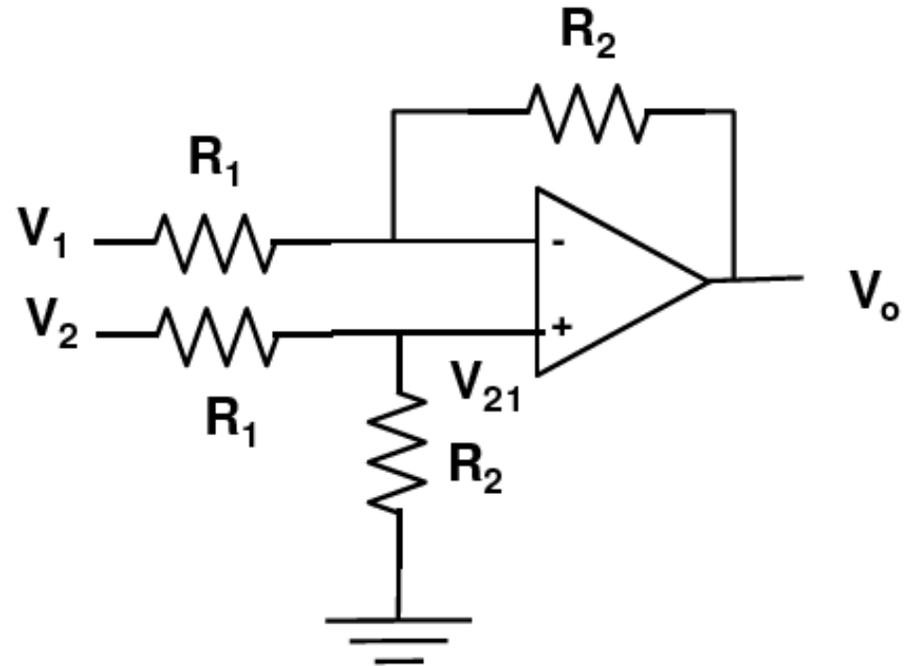
Considerando que  $V_2=0$ , se tiene un amplificador inversor.

$$V_{o1} = -\frac{R_2}{R_1} V_1$$

Considerando que  $V_1=0$ , se tiene un amplificador no inversor con entrada  $V_{21}$

$$V_{21} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_2 \quad V_{o2} = \left( \frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_2 = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_2 = \frac{R_2}{R_1} V_2$$

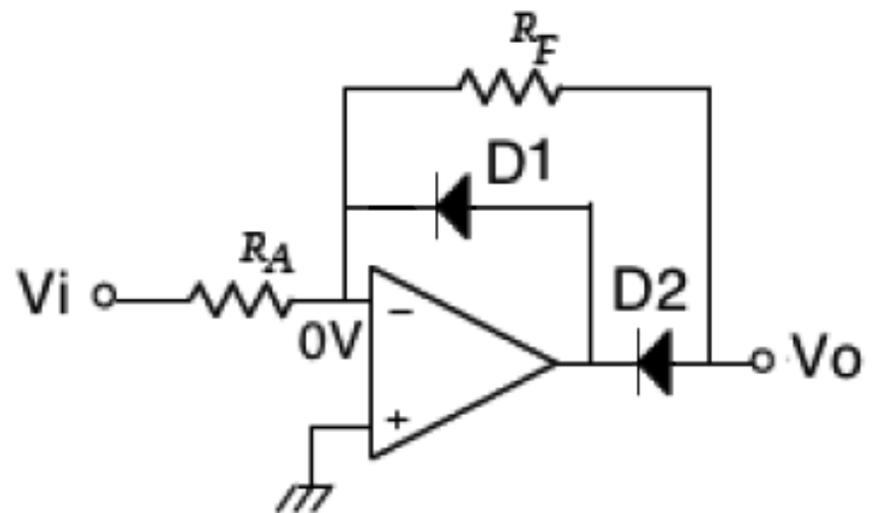
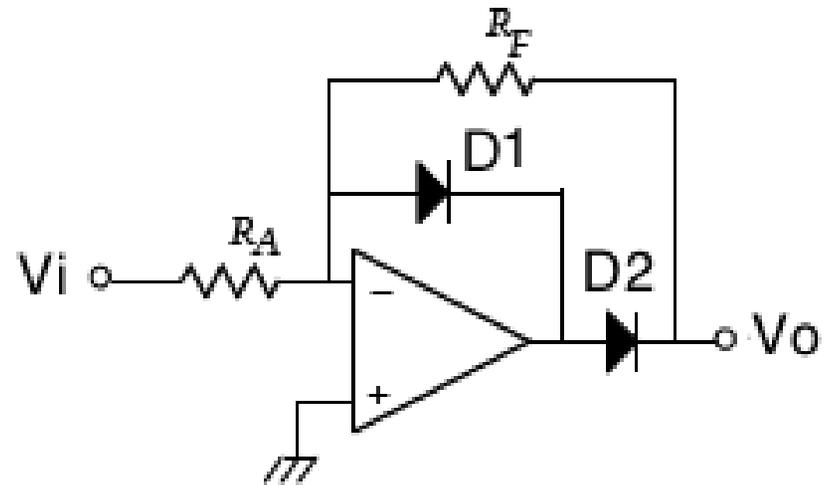
$$V_o = V_{o1} + V_{o2} = -\frac{R_2}{R_1} V_1 + \frac{R_2}{R_1} V_2 = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1)$$



## RECTIFICADORES DE PRECISIÓN DE MEDIA ONDA CON AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL

Los rectificadores con diodos no son capaces de rectificar señales de amplitud muy pequeña, porque el voltaje a la entrada del rectificador tiene que sobrepasar los 0,7V para que el diodo comience a conducir.

Los circuitos mostrados son dos configuraciones de un rectificador de media onda que pueden manejar inclusive señales en el orden de los mV.



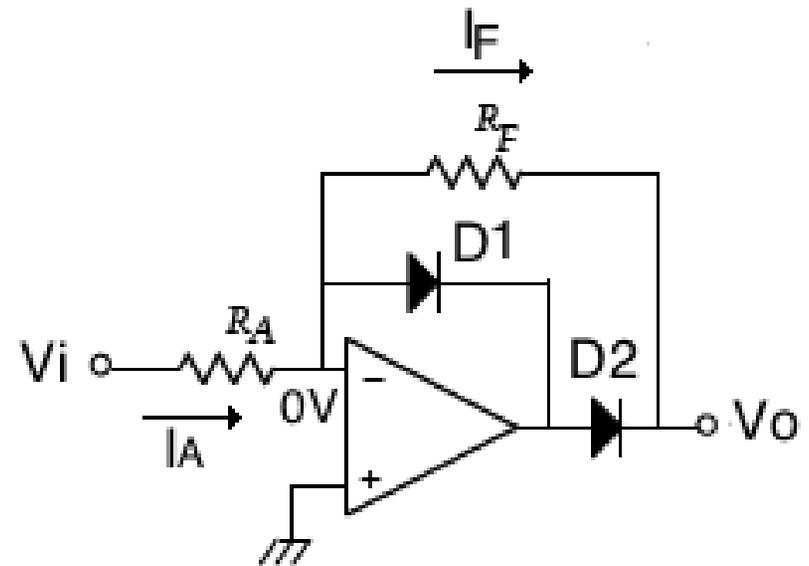
# ANÁLISIS DEL RECTIFICADOR DE PRECISIÓN DE MEDIA ONDA CON AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL. CICLO POSITIVO CONFIGURACIÓN 1

Si el voltaje  $V_i$  es positivo, las corrientes por las resistencias deben tener la dirección indicada, y en principio puede circular corriente por el diodo D1.

Ahora bien, esta es una configuración inversora, por lo que la salida del operacional va a tener polaridad negativa. Esto significa que D2 no puede conducir, y por lo tanto la corriente  $I_A$  circula por D1, que efectivamente conduce y entra en el amplificador.

La corriente  $I_F$  es cero y por lo tanto el voltaje  $V_o$  es cero.

**Resumen para  $V_i$  positivo: D1 conduce, D2 no conduce, salida  $V_o = 0$**



# ANÁLISIS DEL RECTIFICADOR DE PRECISIÓN DE MEDIA ONDA CON AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL. CICLO NEGATIVO

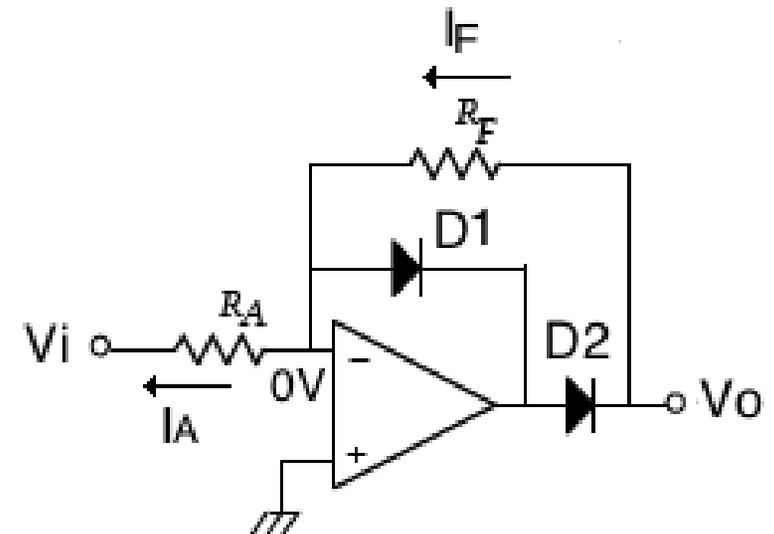
## CONFIGURACIÓN 1

Si el voltaje  $V_i$  es negativo, en principio no puede circular corriente por el diodo D1.

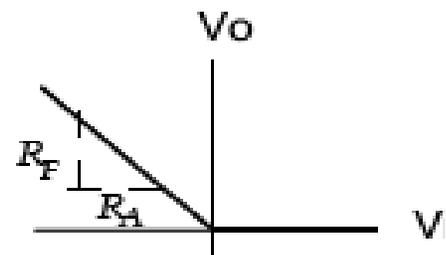
Como configuración inversora, la salida del operacional va a tener polaridad positiva. Esto significa que D2 conduce y la corriente  $I_F$  es igual a  $I_A$ . Entonces:

$$I_A = \frac{-V_i}{R_A} \quad I_F = \frac{V_o}{R_F} \quad \frac{-V_i}{R_A} = \frac{V_o}{R_F} \quad \triangleright \quad V_o = -\frac{R_F}{R_A} V_i$$

**Resumen para  $V_i$  negativo: D1 no conduce, D2 conduce. La salida es la entrada multiplicada por el factor  $R_F/R_A$  con polaridad invertida.**



**Característica salida-entrada**

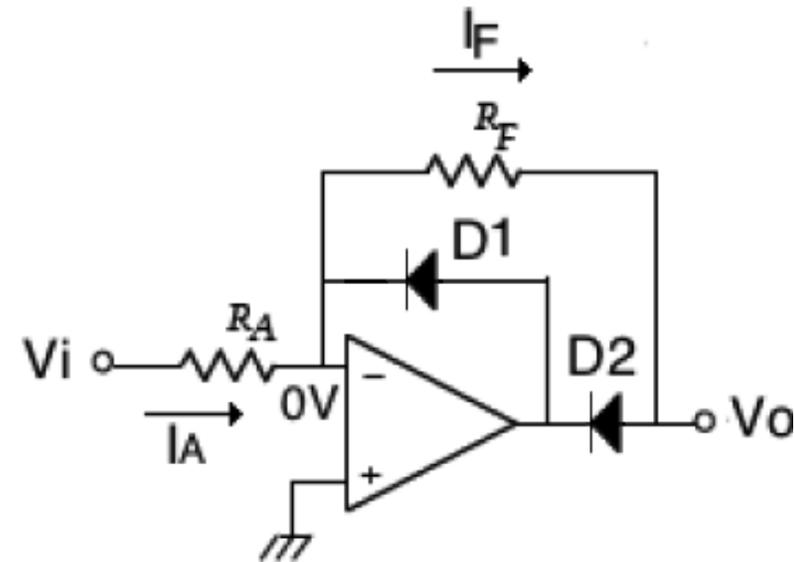


# ANÁLISIS DEL RECTIFICADOR DE PRECISIÓN DE MEDIA ONDA CON AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL. CICLO POSITIVO CONFIGURACIÓN 2

Si el voltaje  $V_i$  es positivo, las corrientes por las resistencias deben tener la dirección indicada, y en principio no puede circular corriente por el diodo D1.

Ahora bien, esta es una configuración inversora, por lo que la salida del operacional va a tener polaridad negativa. Esto significa que D2 conduce y la corriente  $I_F$  es igual a  $I_A$ . Entonces:

$$I_A = \frac{V_i}{R_A} \quad I_F = \frac{-V_o}{R_F} \quad \frac{V_i}{R_A} = \frac{-V_o}{R_F} \quad \triangleright \quad V_o = -\frac{R_F}{R_A} V_i$$



**Resumen para  $V_i$  positivo: D1 no conduce, D2 conduce. La salida es la entrada multiplicada por el factor  $R_F/R_A$  con polaridad invertida.**

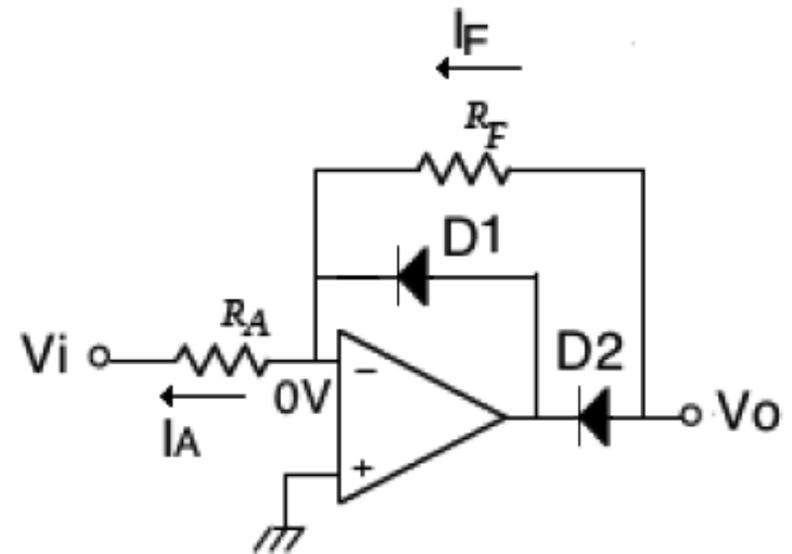
# ANÁLISIS DEL RECTIFICADOR DE PRECISIÓN DE MEDIA ONDA CON AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL. CICLO NEGATIVO

## CONFIGURACIÓN 2

Si el voltaje  $V_i$  es negativo, en principio puede circular corriente por el diodo D1.

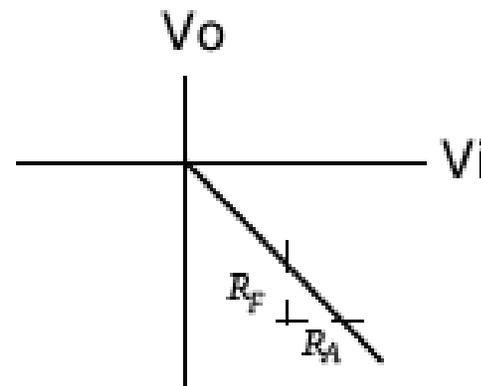
Como configuración inversora, la salida del operacional va a tener polaridad positiva. Esto significa que D2 no conduce y la corriente por D1 es igual a  $I_A$ .

La corriente  $I_F$  es cero y por lo tanto el voltaje  $V_o$  es cero.



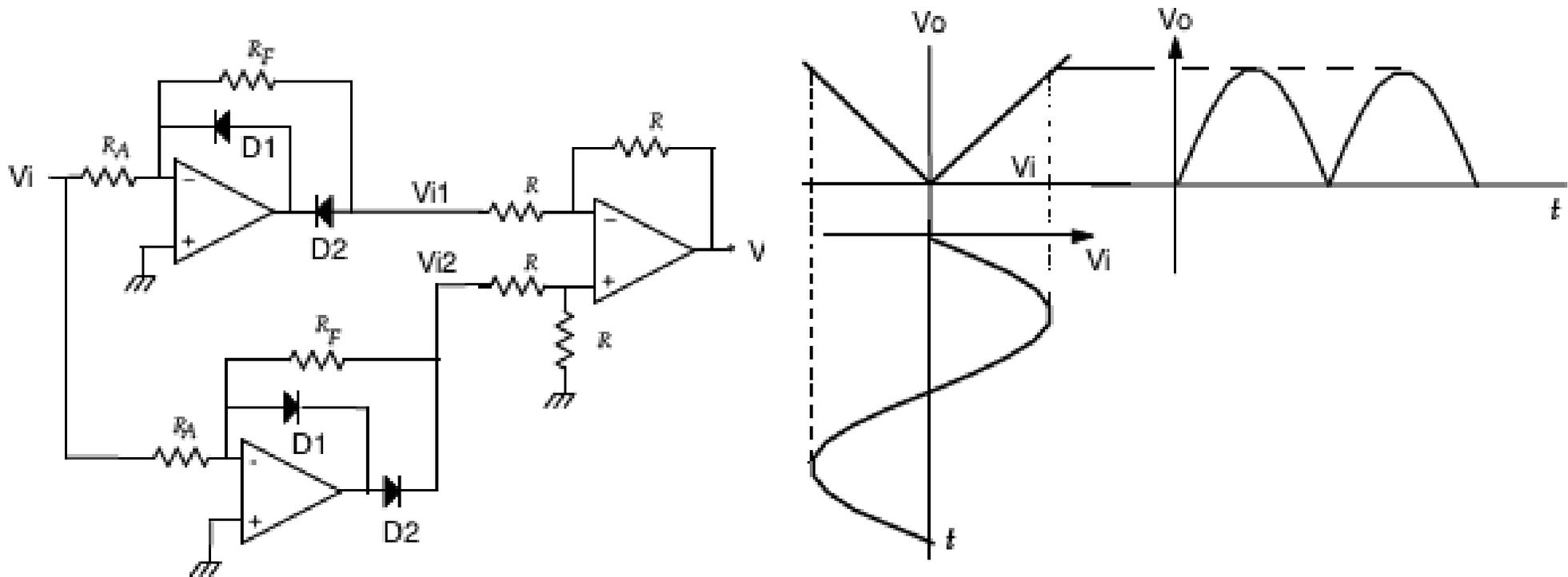
**Resumen para  $V_i$  negativo: D1 conduce, D2 no conduce, salida  $V_o = 0$**

**Característica salida-entrada**



# RECTIFICADOR DE PRECISIÓN DE ONDA COMPLETA CON AMPLIFICADORES OPERACIONALES IDEALES

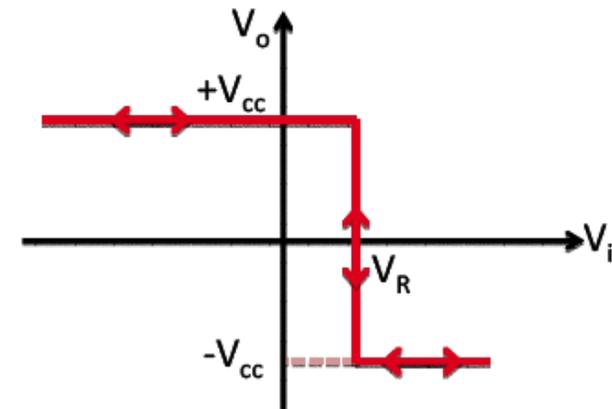
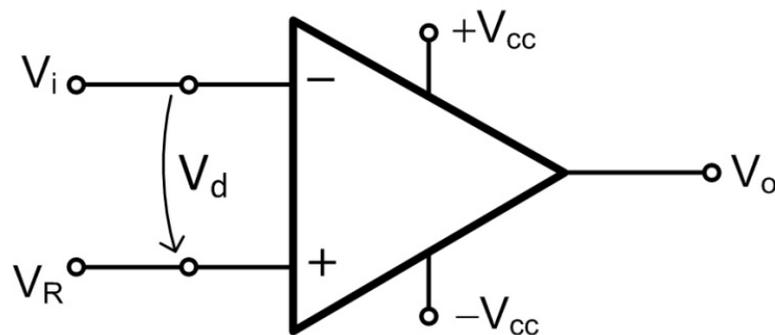
Conectando las dos configuraciones de rectificadores de precisión de media onda a un amplificador diferencial se obtiene un rectificador de precisión de onda completa.



## AMPLIFICADOR COMPARADOR (APLICACIÓN NO LINEAL)

Los comparadores analógicos utilizan la posibilidad del amplificador operacional de trabajar entre sus dos límites de saturación, al no disponer de una red de realimentación negativa. La salida toma únicamente dos valores:  $+V_{CC}$  o  $-V_{CC}$

**Comparador a lazo abierto:** Permite determinar si un valor de voltaje es mayor o menor que una referencia.

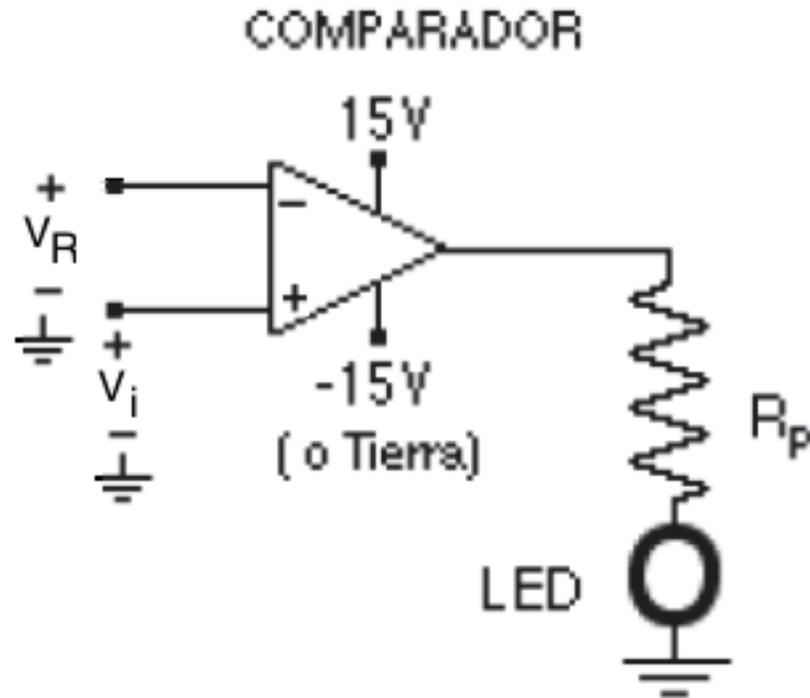


Si  $V_i$  es menor que  $V_R$ ,  $V_o$  es el voltaje de saturación positivo.

Si  $V_i$  es mayor que  $V_R$ ,  $V_o$  es el voltaje de saturación negativo.

## COMPARADOR CON INDICADOR

A la salida de un comparador se puede colocar un LED con una resistencia de protección, de forma que el LED encienda cuando se de la condición en la que se está interesado. En este caso el LED enciende cuando  $V_i$  es mayor que  $V_R$ .



## MAQUINA DE VOTACIÓN ANALÓGICA

El sumador inversor y el comparador pueden utilizarse para realizar una aplicación sencilla pero de utilidad práctica. Vamos a diseñar una máquina de votación para la junta directiva de una compañía formada por cinco socios, cada uno de los cuales tiene un porcentaje de participación diferente y por lo tanto un peso específico distinto al realizarse las votaciones para definir las políticas de la compañía. El socio A tiene el 30%, el socio B el 25%, el socio C el 20% , el socio D el 15% y el socio E el 10%. Cada socio va a disponer de un interruptor, que apretará si está a favor de una propuesta, y no lo apretará en caso contrario. La máquina de votación va a encender un LED si el porcentaje a favor de la propuesta es mayor al 50%.

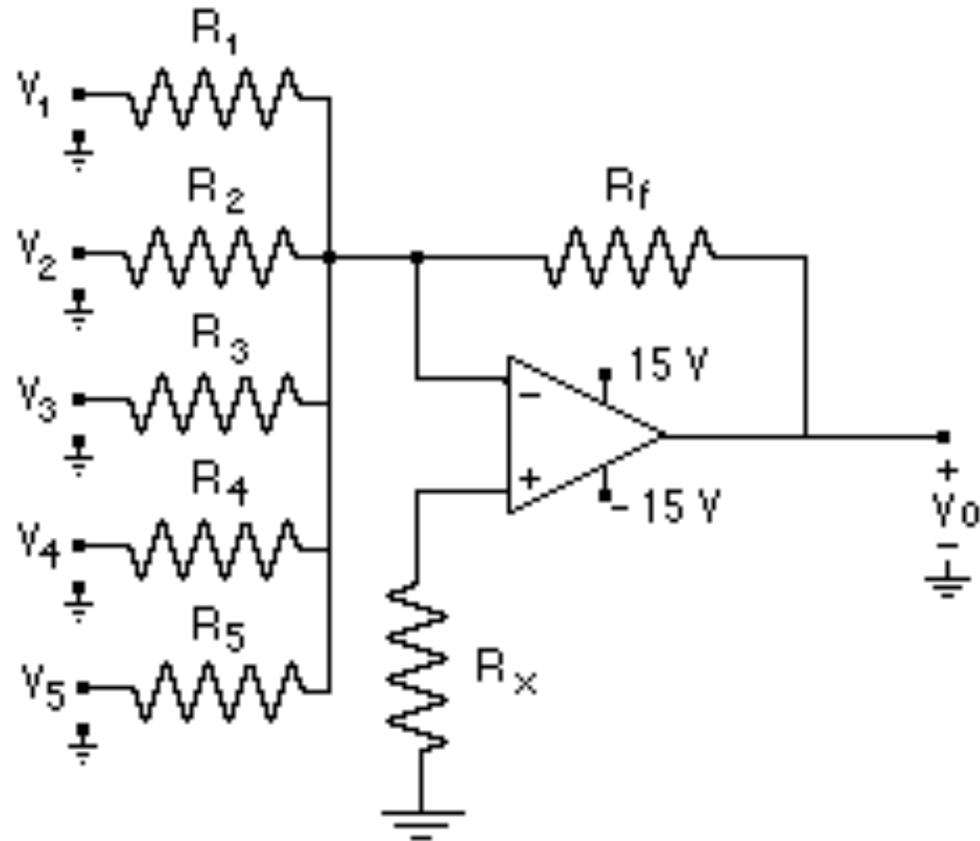
## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Hay que diseñar un circuito capaz de sumar cantidades proporcionales a las participaciones de cada uno de los socios, y luego averiguar si esa suma llega al 50% del total. Por lo tanto hay que utilizar un circuito sumador con valores de entrada proporcionales a cada participación.

Los operacionales usualmente trabajan con fuentes de  $\pm 15V$ . Supongamos que vamos a diseñar un circuito en el que si todos aportan su voto, la salida sea 10V. Entoces, cuando el socio A vota afirmativamente su contribución tiene que ser de 3V, la contribución del socio B es 2,5V, la del C es 2V, la del D es 1,5V y la del E 1V para el total de 10V.

Seleccionamos un sumador inversor dado que su configuración es mas simple.

## CIRCUITO PARA EL SUMADOR



$$V_0 = - \left( \frac{R_f}{R_1} V_1 + \frac{R_f}{R_2} V_2 + \frac{R_f}{R_3} V_3 + \frac{R_f}{R_4} V_4 + \frac{R_f}{R_5} V_5 \right)$$

## SELECCIÓN DE COMPONENTES

Vamos a seleccionar como voltajes de entrada al circuito unos interruptores que cuando cada socio los apriete apliquen un voltaje de 1V (o preferiblemente -1V para que la salida sea positiva) a la entrada correspondiente. Entonces, dejando aparte el signo negativo, para que la suma sea de 10V, la contribución de cada socio tiene que ser la siguiente:

$$\text{Socio A} \quad \frac{R_F}{R_1} 1V = 3V \triangleright \frac{R_F}{R_1} = 3$$

$$\text{Socio B} \quad \frac{R_F}{R_2} 1V = 2,5V \triangleright \frac{R_F}{R_2} = 2,5$$

$$\text{Socio C} \quad \frac{R_F}{R_3} 1V = 2V \triangleright \frac{R_F}{R_3} = 2$$

$$\text{Socio D} \quad \frac{R_F}{R_4} 1V = 1,5V \triangleright \frac{R_F}{R_4} = 1,5$$

$$\text{Socio E} \quad \frac{R_F}{R_5} 1V = 1V \triangleright \frac{R_F}{R_5} = 1$$

Por lo tanto hay que seleccionar un valor para  $R_F$  y calcular los valores de las otras resistencias.

Se pueden hacer pruebas con varios valores. Uno de los que da mejores resultados, porque se obtienen valores comerciales para las otras resistencias es  $30\text{ k}\Omega$ .

$$R_1 = \frac{R_F}{3} = \frac{30\text{k}\Omega}{3} = 10\text{k}\Omega$$

$$R_2 = \frac{R_F}{2,5} = \frac{30\text{k}\Omega}{2,5} = 12\text{k}\Omega$$

$$R_3 = \frac{R_F}{2} = \frac{30\text{k}\Omega}{2} = 15\text{k}\Omega$$

$$R_4 = \frac{R_F}{1,5} = \frac{30\text{k}\Omega}{1,5} = 20\text{k}\Omega$$

$$R_5 = \frac{R_F}{1} = \frac{30\text{k}\Omega}{1} = 30\text{k}\Omega$$

Si se usan interruptores que apliquen voltaje de 1V positivo, la salida del sumador inversor será negativa. Esta salida hay que compararla con -5V (o preferiblemente -4,9V) y colocar las entradas al comparador de tal manera que cuando el voltaje del sumador sea igual o mayor en valor absoluto a 4,9V, la salida del comparador sea positiva. A la salida del comparador se coloca un LED que encienda para indicar un resultado igual o mayor que 5V. El circuito es el siguiente:

