

Amplificadores Operacionales (I)

Concepto general de amplificador operacional:

Amplificador diferencial con una ganancia de tensión elevada, acoplo directo y diseñado para facilitar la inclusión de una red de realimentación. El A.O. puede ser considerado como un bloque funcional analógico.

Concepto de amplificador operacional ideal:

Amplificador operacional con características idealizadas. Es un modelo matemático más que un circuito electrónico real.

Impedancia de entrada: infinita

Corrientes de polarización nulas

Impedancia de salida: cero

Asimetrías (offsets) nulas

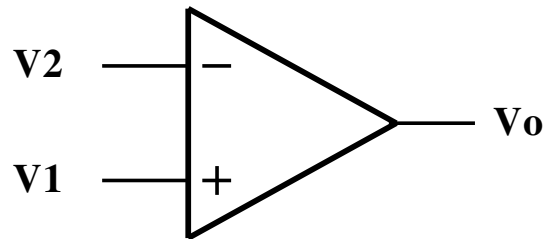
Ganancia de tensión en modo diferencial: infinita

Ganancia de tensión en modo común: cero

Ancho de banda: $f_L=0$ (DC) ; f_H infinita

SlewRate: infinito (V/ μ s)

Amplificadores Operacionales (I)



$$V_i = V_1 - V_2$$

$$V_o = A_V \cdot V_i$$

Concepto de amplificador operacional real:

Ganancia de tensión (bucle abierto): 1000 a 100000 (60 dB a 100 dB)

Amplificador operacional realizable como circuito electrónico:

Impedancia de entrada: 2 MΩ a 1GΩ

Impedancia de salida: 50 Ω a 1 KΩ

Corr. polarización I_b : 10 pA a 10 μA

Offset V_{io} : 1 nV a 10 mV

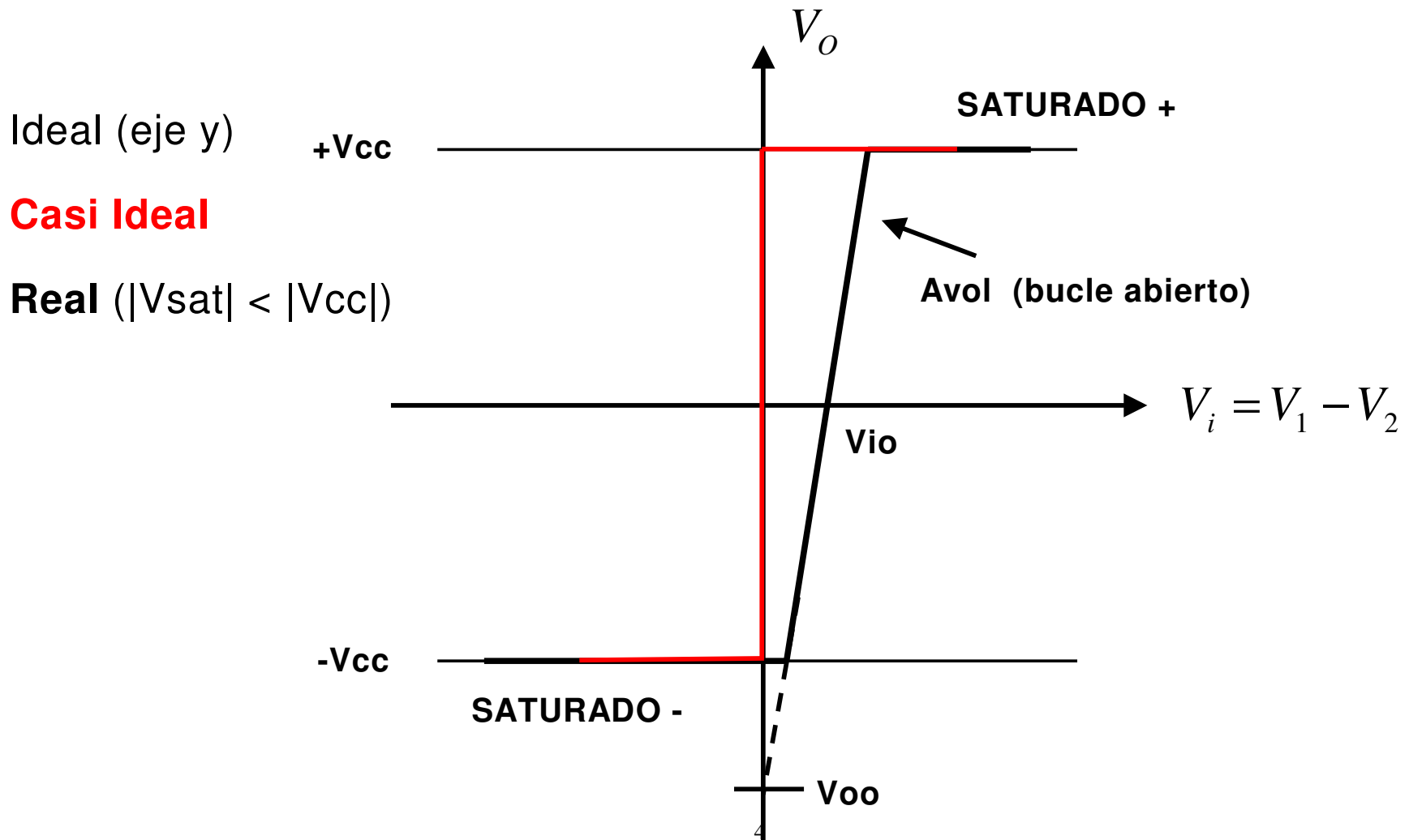
CMRR: de 80 a 120 dB f_H (ganancia 1): 100 KHz a 1 GHz SlewRate: 0.1 V/μs a 1000 V/μs

TABLA COMPARATIVA DE OPERACIONALES REALES

Tipo	Vcc	Icc	Vio	Ib	Iomax	R2R	Av	Ft	SR	Vn	In
Bipolar básico LM741	±15	1.7	2	80	25	no	2E5	1	0.5	30	?
BiFet básico LF356	±15	5	1	.03	25	no	2E5	4.5	12	15	0.01
CMOS básico TLC2272	±5	2.2	0.3	.001	3	out	1.5E3 (mA/V)	2.2	3.6	9	.001
BiFet rápido OPA656	±5	16	0.3	.002	70	no	1E3 RL=100	230	290	7	.0013
CMOS rápido OPA354	±2.5	5	2	.003	100	In & out	3E5	250	150	6.5	.05
Bipolar CFOA AD8002	±5	5	2	3E3(+) 5E3(-)	70	no	900 kΩ	600	1.2k	2	.002(+) .018(-)
	V	mA	mV	nA	mA			MHz	V/μs	nV/√Hz	pA/√Hz

Amplificadores Operacionales (I)

Función de transferencia estática:



Amplificadores Operacionales (I)

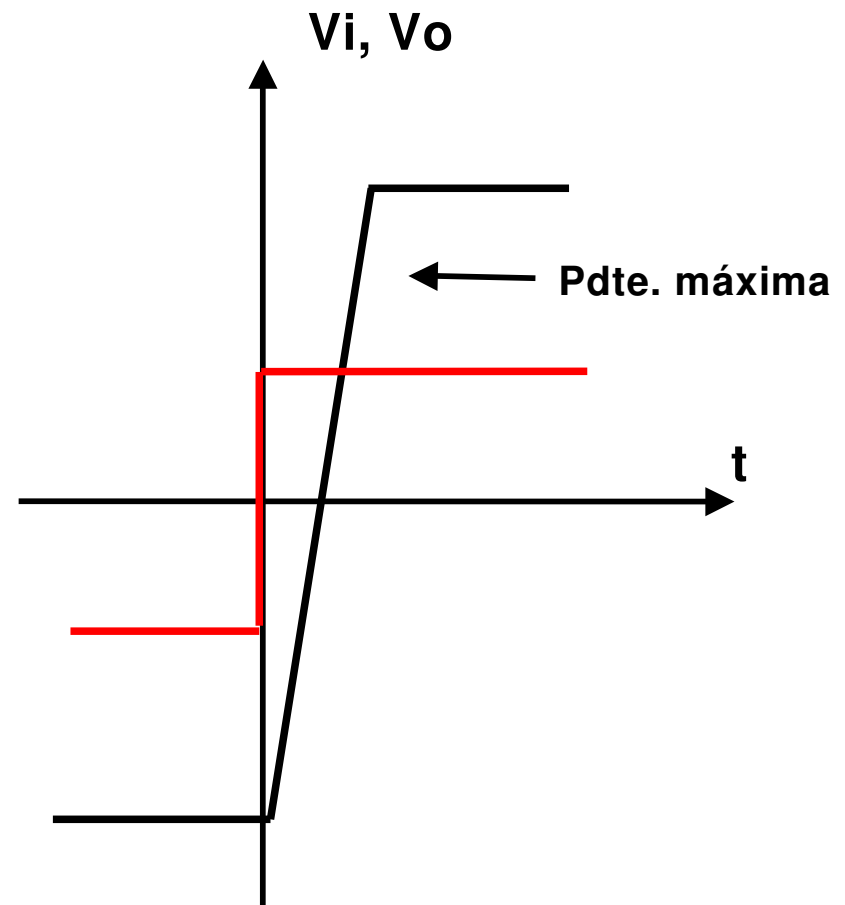
Slew Rate:

Pendiente máxima de la salida

Vi en rojo

Vo en negro

NOTA: Los fabricantes suelen medir el slew rate para el montaje seguidor de tensión ($A_v = 1$), aplicando un escalón en la entrada.



Amplificadores Operacionales (II)

Aplicaciones del Amplificador Operacional:

Con Realimentación Negativa

Lineales

Amplificadores

Amplificador inversor

Amplificador no inversor y seguidor de tensión

Sumador

Amplificador diferencial

Convertidor V-I y convertidor I-V

Integrador y derivador

Amplificadores Operacionales (II)

Aplicaciones del Amplificador Operacional (cont):

Con realimentación Negativa (cont)

No Lineales

Rectificadores de media onda

Rectificador de onda completa

Recortadores

Convertidor logarítmico (NO)

Amplificadores Operacionales (II)

Aplicaciones del Amplificador Operacional (cont):

Sin realimentación

Comparador simple

Con realimentación Positiva

Comparador de Scmitt (Schmitt trigger)

Con ambas realimentaciones (Negativa y Positiva)

Con predominio de la negativa

Osciladores senoidales

Con predominio de la positiva

Osciladores de relajación

Amplificadores Operacionales (II)

Aplicaciones: Amplificador no inversor

Se supone que A_{vol} no es infinita (única característica no ideal del operacional).

Se aplica una tensión V_i en la entrada no inversora.

$$V_o = A_{vol} * (V_i - V_2)$$

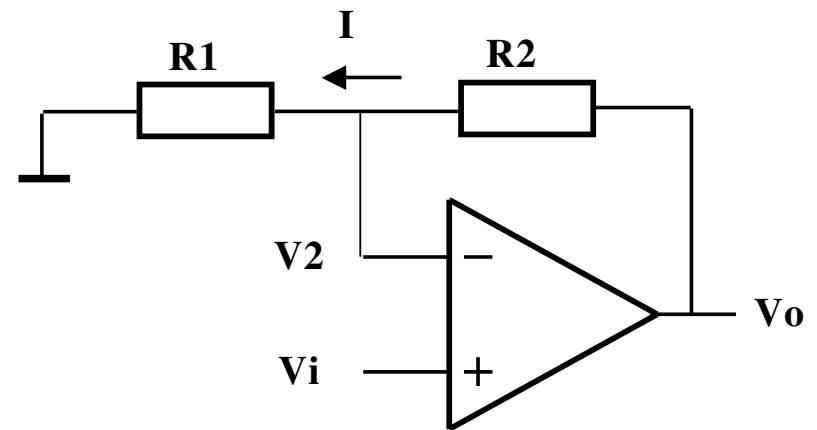
$$I = V_2/R_1 = (V_o - V_2)/R_2$$

Multiplicando por $R_1 * R_2$

$$V_2 * R_2 = V_o * R_1 - V_2 * R_1$$

$$V_2 = V_o * R_1 / (R_1 + R_2)$$

$$V_o = A_{vol} * V_i - A_{vol} * V_o * R_1 / (R_1 + R_2)$$



Amplificadores Operacionales (II)

Despejando V_o

$$V_o (1 + A_{vol} \cdot R_1 / (R_1 + R_2)) = A_{vol} \cdot V_i$$

Y la ganancia (en bucle cerrado)

$$A_v = V_o / V_i = A_{vol} / (1 + A_{vol} \cdot R_1 / (R_1 + R_2))$$

Que tiene el formato de la ley de realimentación:

$$“A_{vf} = A_v / (1 + A_v \cdot \beta)”$$

Identificando:

$$\beta = R_1 / (R_1 + R_2)$$

Si A_{vol} tiende a infinito (equivale a tierra virtual: $V_1 = V_2$)

$$A_v = 1 / \beta = 1 + R_2 / R_1$$

Amplificadores Operacionales (II)

Aplicaciones: Amplificador inversor

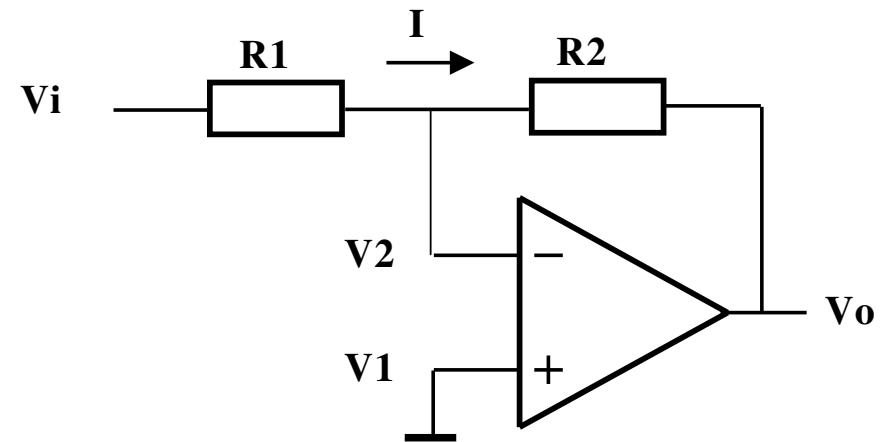
Se supone que el operacional es ideal.

Si el operacional no está saturado:

$$V_1 = V_2 ; V_2 = 0$$

$$I = V_i / R_1 = -V_o / R_2$$

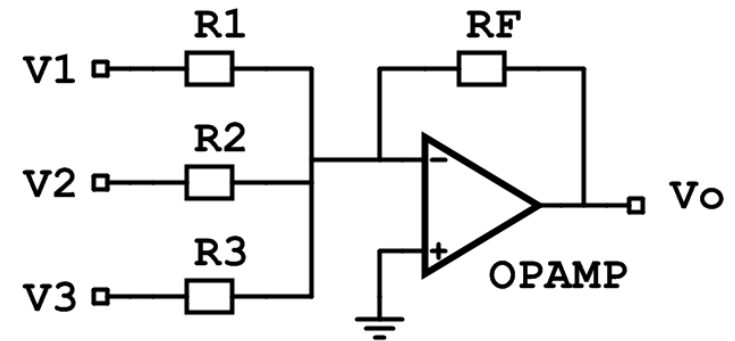
$$A_v = V_o / V_i = - R_2 / R_1$$



Amplificadores Operacionales (II)

Sumador inversor:

El circuito sumador inversor permite sumar varias señales de forma ponderada. Todas las señales de entrada aparecen invertidas en la salida.



Se supone que el operacional no está saturado (ideal) por lo que la tensión en la entrada inversora del operacional es cero. Por lo tanto, la corriente I_f que circula por R_F hacia la derecha es:

$$I_f = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3}$$

Y la tensión de salida V_o es:

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

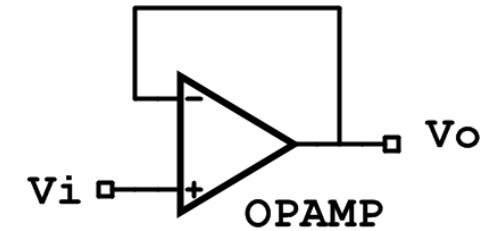
R_F permite ajustar la ganancia global, y R_1 , R_2 y R_3 permiten ajustar la ganancia individual de cada entrada.

Amplificadores Operacionales (II)

Seguidor de tensión:

El seguidor de tensión es un caso particular del amplificador no inversor, en el que se hace R1 infinita o R2 cero, o ambas asignaciones.

$$V_o = V_i$$



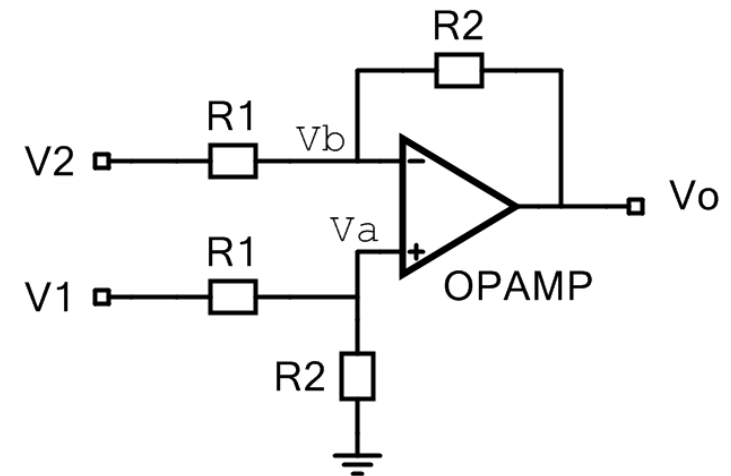
Amplificador diferencial básico

$$V_a = V_1 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_a = V_b$$

$$\frac{V_2 - V_a}{R_1} = \frac{V_a - V_o}{R_2}$$

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} \cdot (V_1 - V_2)$$



CMRR infinito (teórico)

Amplificadores Operacionales (II)

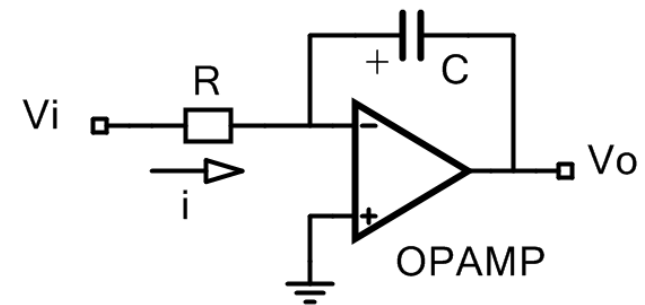
Integrador:

$$i = \frac{v_i}{R}$$

$$v_c = \frac{1}{C} \int i \cdot dt$$

$$v_o = -v_c$$

$$v_o = -\frac{1}{C} \int i \cdot dt = -\frac{1}{R \cdot C} \int v_i \cdot dt + k$$

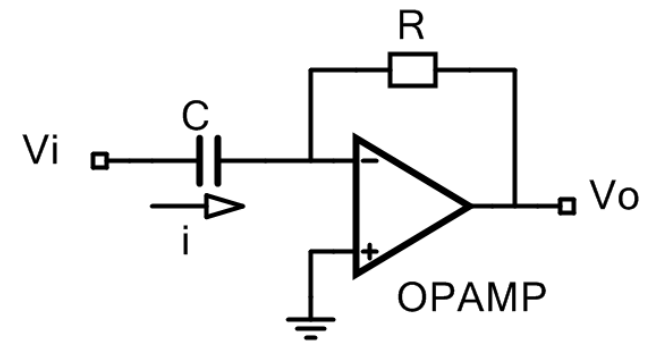


Derivador o diferenciador:

$$i = C \cdot \frac{dv_i}{dt}$$

$$v_o = -i \cdot R$$

$$v_o = -R \cdot C \cdot \frac{dv_i}{dt}$$



Amplificadores Operacionales (II)

Convertidor $V \rightarrow I$:

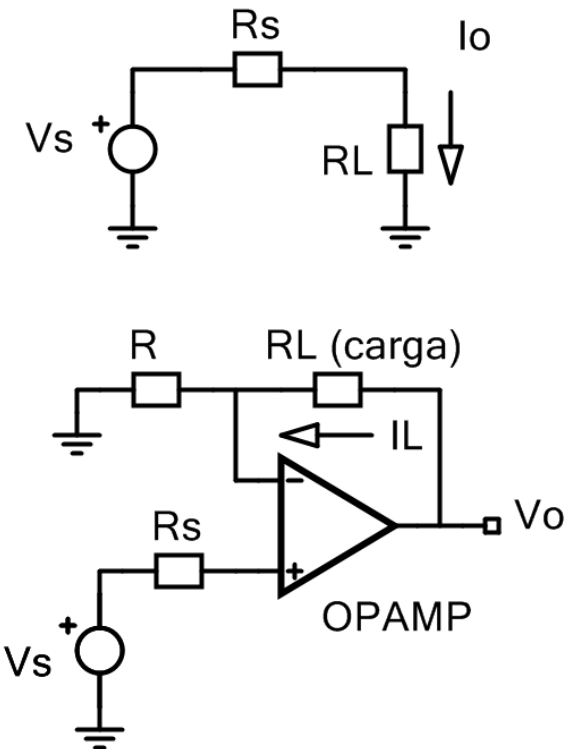
La conexión directa del generador V_s a la carga R_L no realiza una conversión $V \rightarrow I$ correcta, ya que la corriente en la carga dependería del valor de R_L .

El convertidor $V \rightarrow I$ con operacional sí genera una conversión correcta porque:

- 1) R_s no provoca caída de tensión, dado que la impedancia de entrada del opamp es infinita.
- 2) La corriente I_o no depende del valor de R_L .

La tensión en la entrada no inversora es igual a V_s . La de la entrada inversora es igual. Por lo tanto:

$$I_L = \frac{V_s}{R}$$



Amplificadores Operacionales (II)

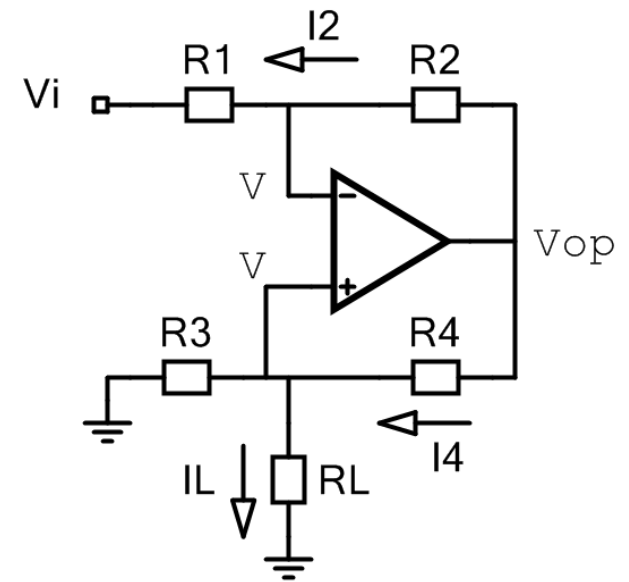
Convertidor $V \rightarrow I$ con carga a masa:

Es preciso que: $R_4/R_2 = R_3/R_1 = n$ ($R_4 = n \cdot R_2$; $R_3 = n \cdot R_1$)

La corriente que circula por R_2 y R_1 de derecha a izquierda se designa como I_2 . La que circula por R_4 de derecha a izquierda se designa como I_4 . La corriente I_4 es n veces menor que la I_2 , porque ambas comparten la misma caída de tensión ($V_{op} - V$) pero R_4 es n veces mayor que R_2 .

$$I_2 = \frac{V - V_i}{R_1}$$

$$I_4 = \frac{I_2}{n} = \frac{V - V_i}{n \cdot R_1} = \frac{V - V_i}{R_3}$$



La corriente que circula por la carga hacia masa es:

$$I_L = I_4 - I_3 = \frac{V - V_i}{R_3} - \frac{V}{R_3} = \frac{V - V_i - V}{R_3} = \frac{-V_i}{R_3}$$

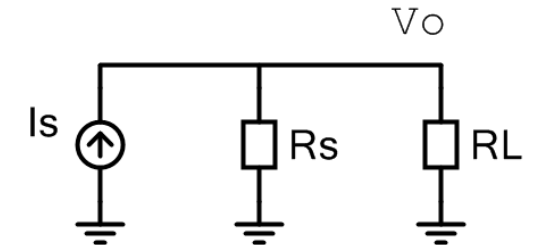
$$I_L = \frac{-V_i}{R_3}$$

que no depende del valor de R_L . Si la carga R_L es infinita, el circuito es inestable.

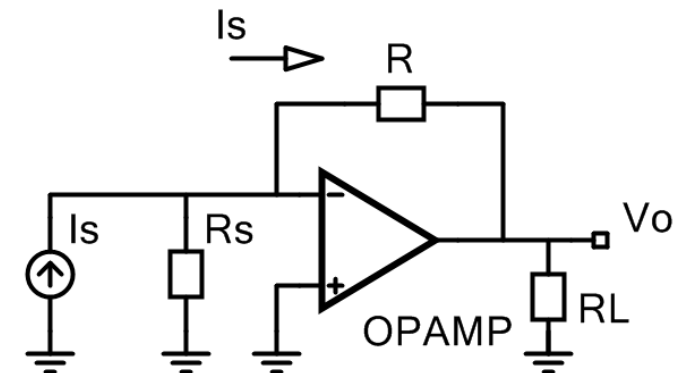
Amplificadores Operacionales (II)

Convertidor $I \rightarrow V$:

La conexión directa del generador a la carga R_L no realiza una conversión $I \rightarrow V$ correcta, ya que la tensión en la carga dependería del valor de R_L .



El circuito convertidor basado en un amplificador operacional realiza la conversión correctamente, ya que la tensión en bornas de la resistencia R_s es cero (tierra virtual) y no circula corriente por R_s .



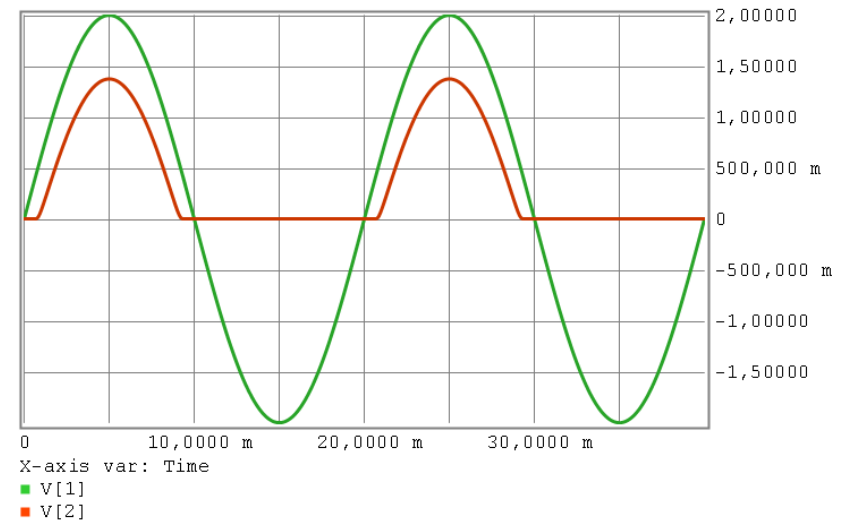
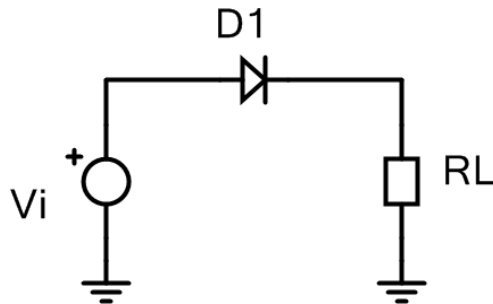
$$V_o = -I_s \cdot R$$

El valor de R_L no afecta a V_o .

Amplificadores Operacionales (III)

Rectificador de media onda (1):

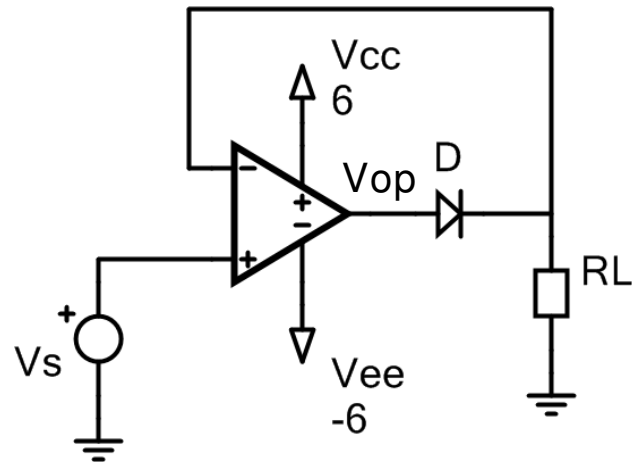
La caída de tensión en el diodo del rectificador básico de la figura hace que la amplitud en V_o sea menor que la de la señal de entrada.



El circuito con operacional evita este inconveniente. Cuando la señal V_i es positiva, la tensión de salida del operacional se eleva para compensar la caída de tensión en el diodo.

Cuando la señal en V_i es negativa, el diodo no conduce, y el operacional queda en bucle abierto (sin realimentación). En estas condiciones la resistencia R_L mantiene la tensión de salida del rectificador a cero. Al mismo tiempo, la salida del operacional se satura negativamente.

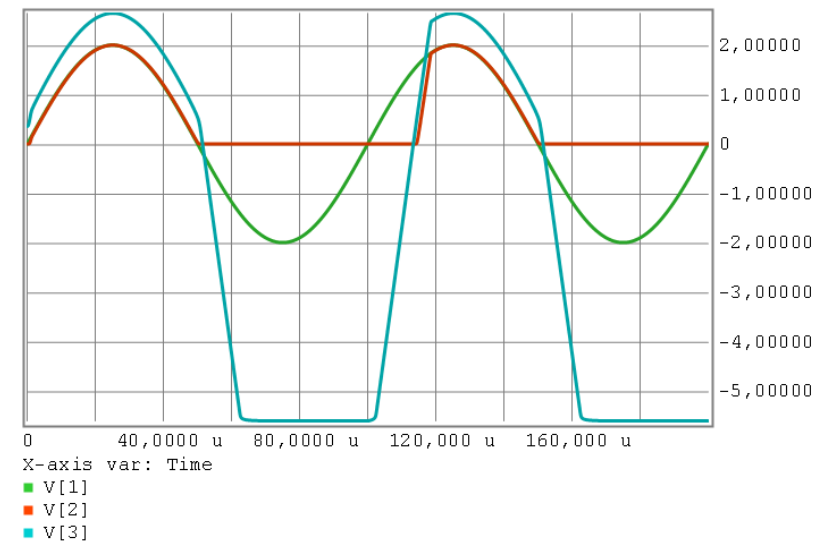
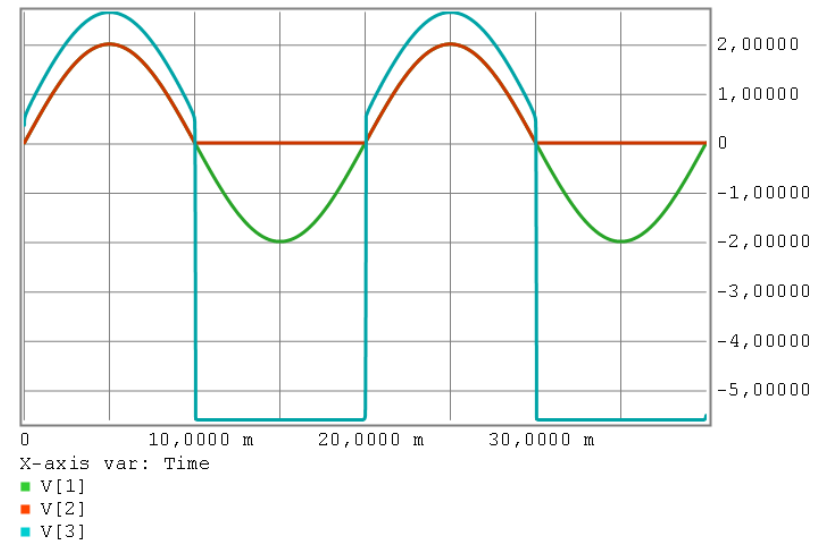
Rectificador de media onda (2):



(Vs en verde; Vo en rojo; Vop en azul)

El inconveniente de este circuito es que no rectifica correctamente si la señal V_i es de frecuencia elevada. Ésto se debe a que el operacional tiene un slew-rate muy lento y tarda demasiado tiempo en pasar de $-6V$ a $0V$.

La gráfica superior se ha obtenido con una V_s de 50 Hz, y la inferior con 10 kHz.



Amplificadores Operacionales (II)

Rectificador de media onda rápido (inversor).

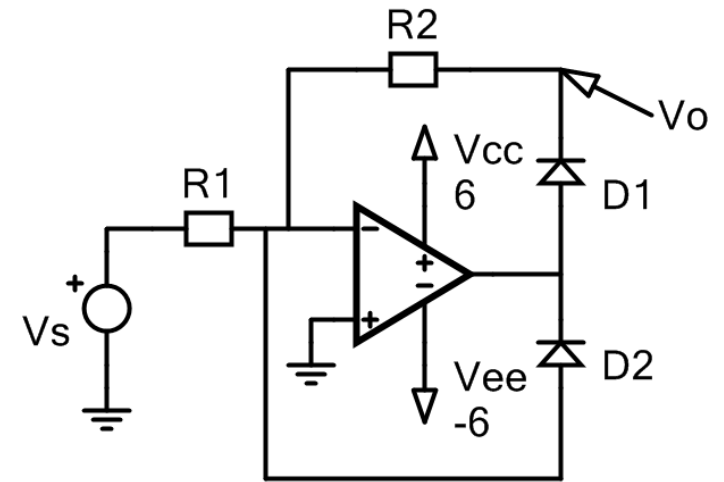
Este rectificador es más rápido porque la salida del operacional no se satura en ningún momento, lo que se consigue utilizando dos diodos.

La salida del rectificador está marcada en la figura como V_o . Cada diodo conduce en *medio* ciclo de la señal de entrada.

La gráfica se ha obtenido con una señal de entrada senoidal de 10 kHz (trazo verde). La salida V_o (trazo rojo) está invertida con respecto a la entrada (rectificador inversor). La señal, aunque no es perfecta, es claramente mejor que la del rectificador básico.

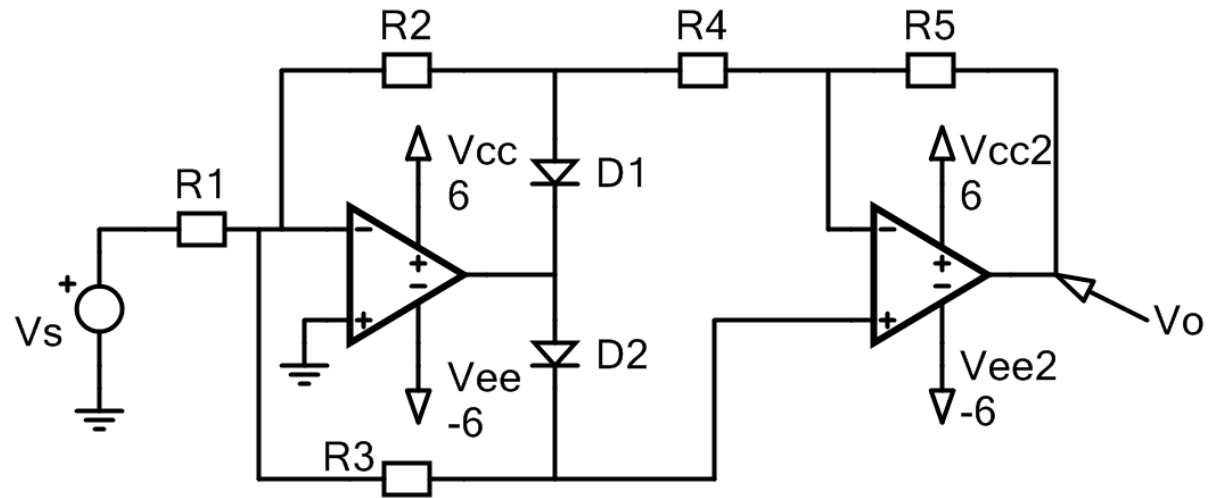
El trazo azul corresponde a la salida del operacional (V_{op}).

$V_s < 0$	Conduce D1	$V_o = -V_i$	$V_{op} = V_o + V_D$
$V_s > 0$	Conduce D2	$V_o = 0$	$V_{op} = -V_D$



Amplificadores Operacionales (II)

Hay una gran variedad de circuitos rectificadores de onda completa (patentes, publicaciones). Referencia: "Versatile Precision Full-Wave Rectifiers...", Stephan J. G. Gift, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, October 2007.

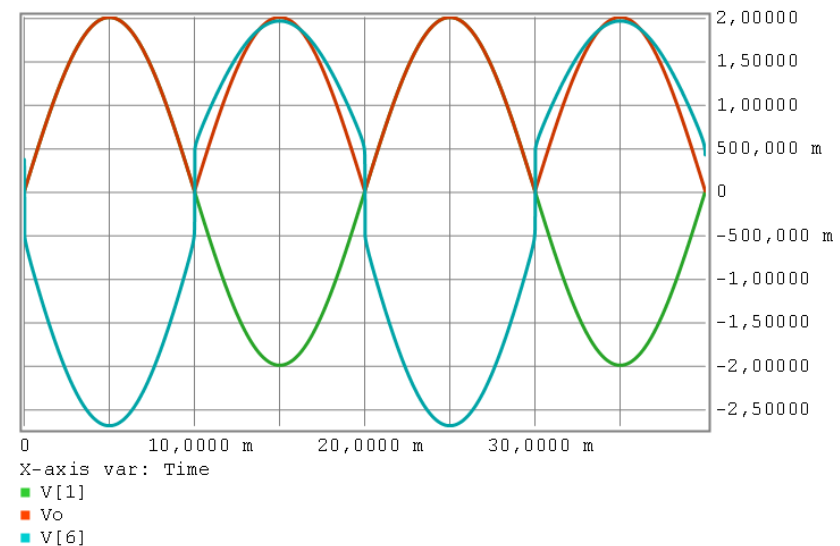


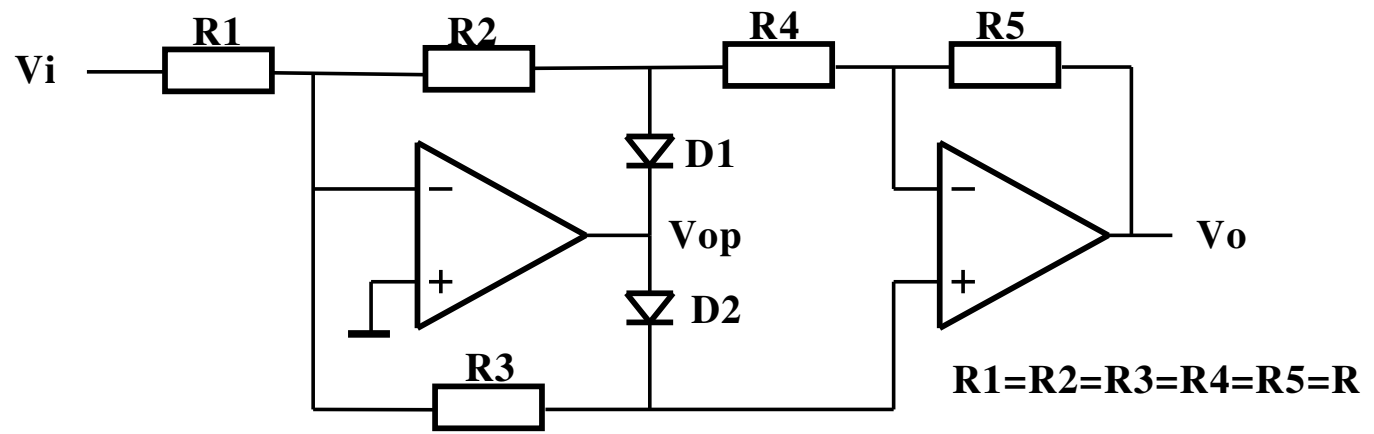
Rectificador de onda completa.

Vs= trazo verde

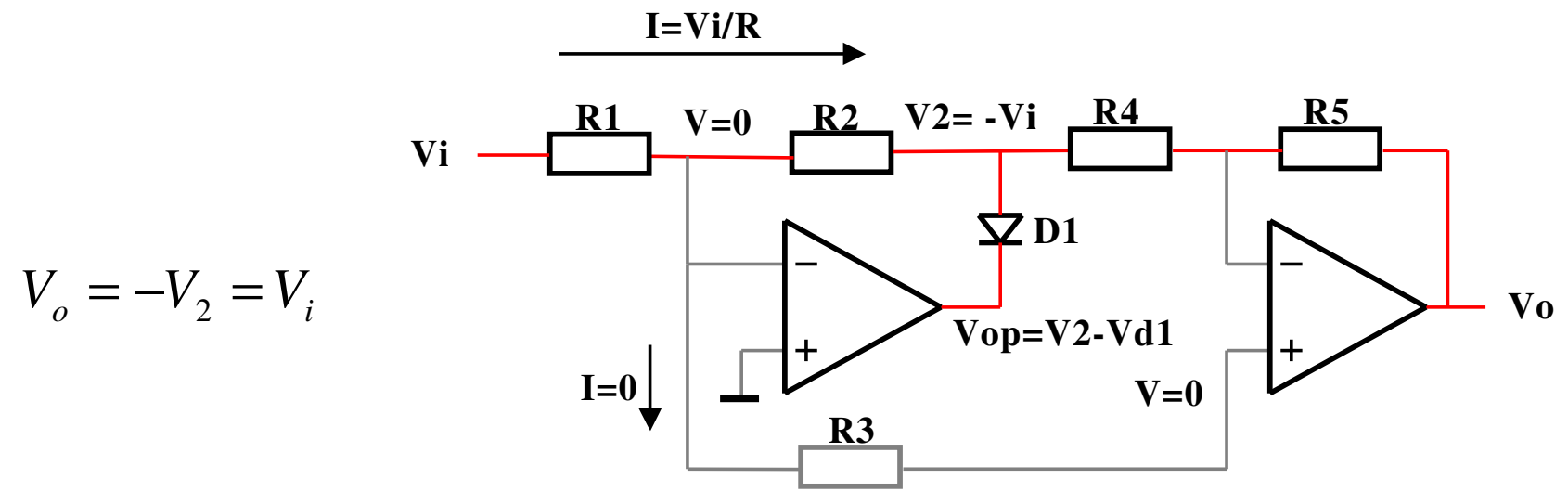
Vop1= trazo azul

Vo= trazo rojo

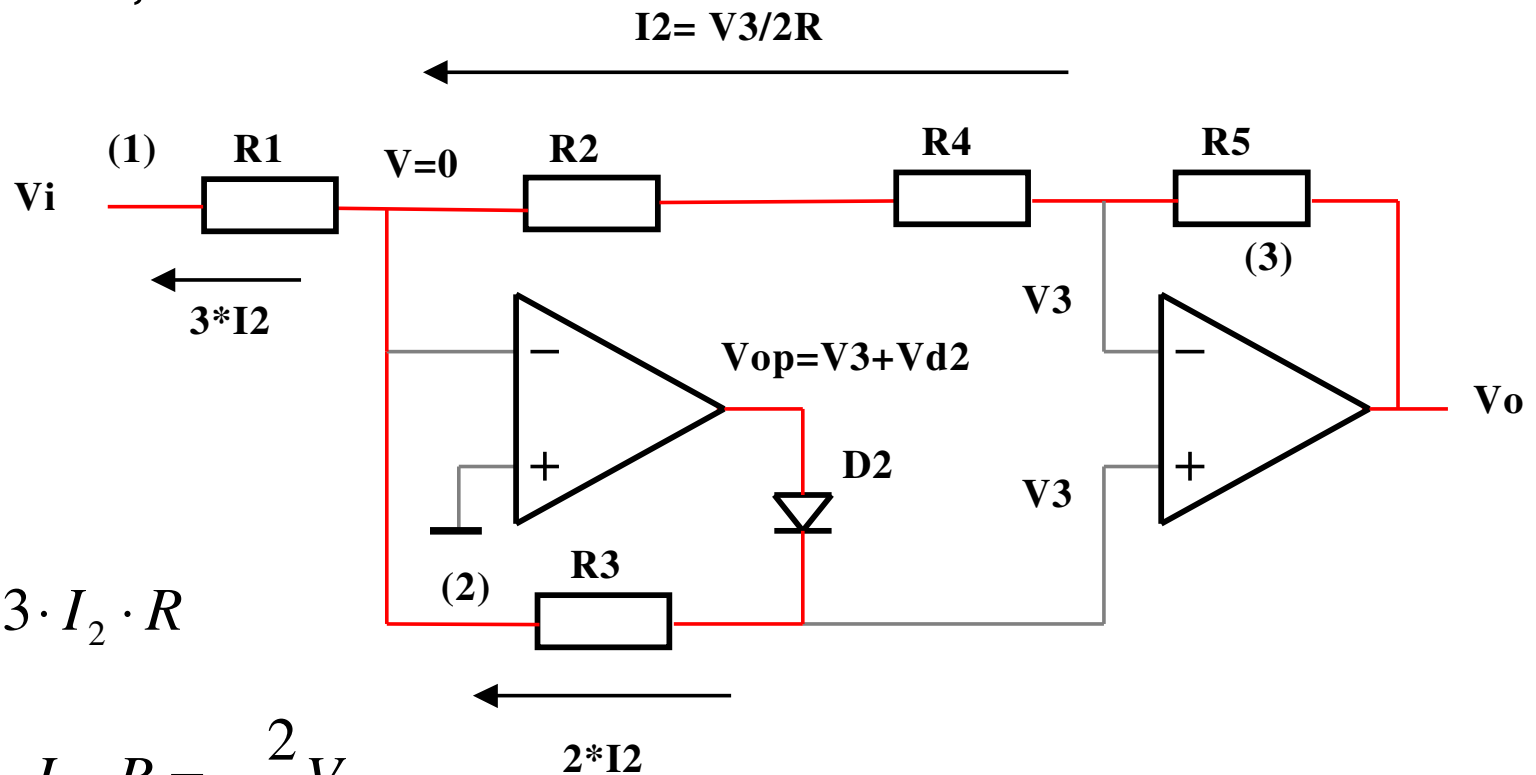




Si $V_i > 0$: D1 ON, D2 OFF



Si $V_i < 0$: D1 OFF, D2 ON



(1) $V_i = -3 \cdot I_2 \cdot R$

(2) $V_3 = 2 \cdot I_2 \cdot R = -\frac{2}{3} V_i$

(3) $V_o = V_3 + \left(\frac{V_3}{2R} \right) \cdot R = \frac{3}{2} V_3 = -V_i$

Por lo tanto, para ambas polaridades se obtiene: $V_o = |V_i|$

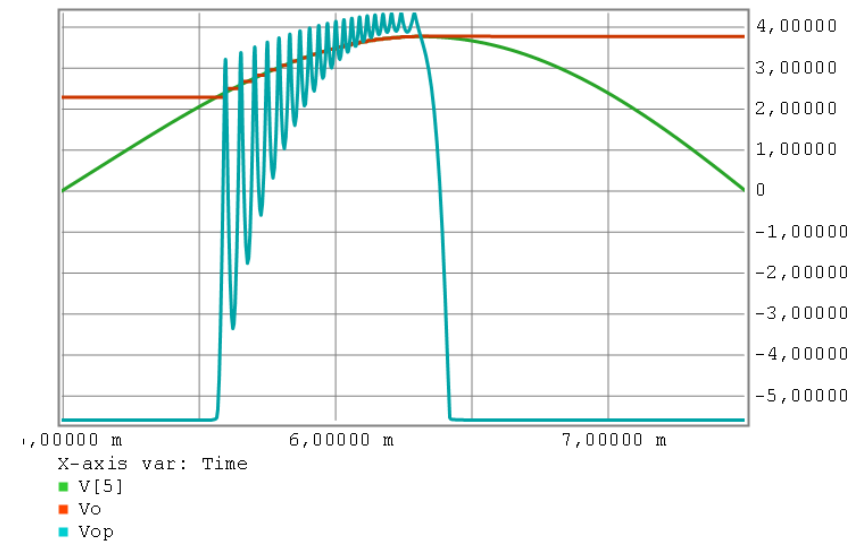
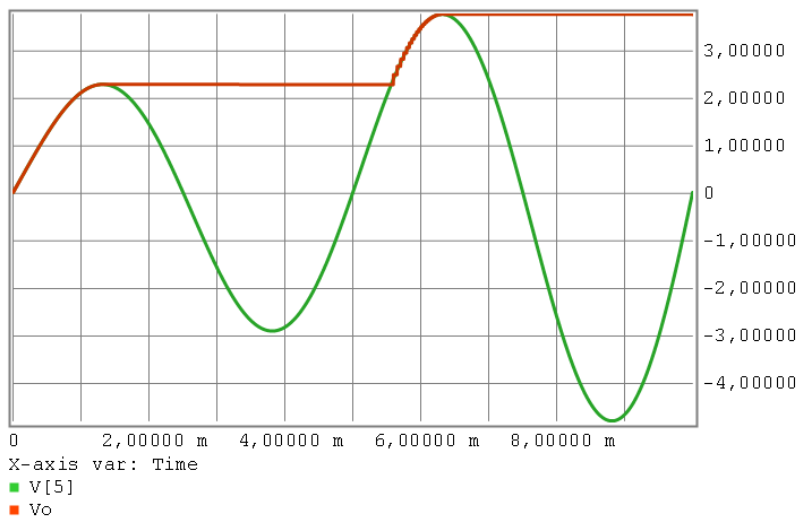
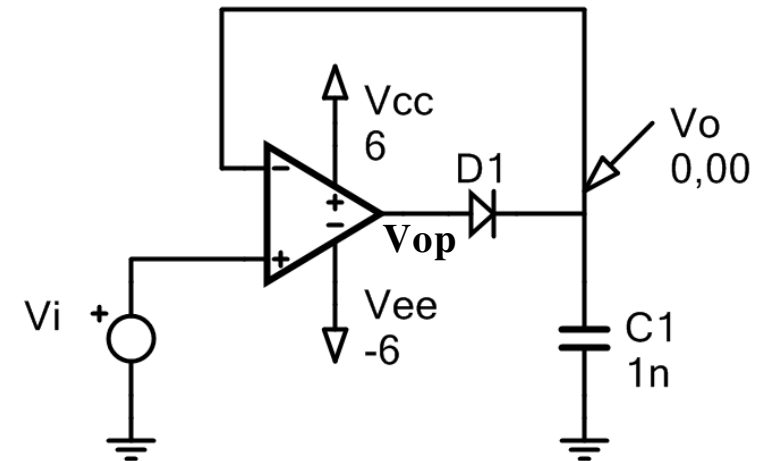
Amplificadores Operacionales (II)

Detector de pico.

Se obtiene añadiendo un condensador al rectificador simple.

La primera gráfica muestra una señal de entrada *senoidal* (200 Hz) con amplitud creciente, para poder observar como la salida se mantiene en el valor máximo.

La segunda muestra un detalle de la inestabilidad en V_{op} (salida del operacional). Pregunta: $C1$, ¿se descarga?



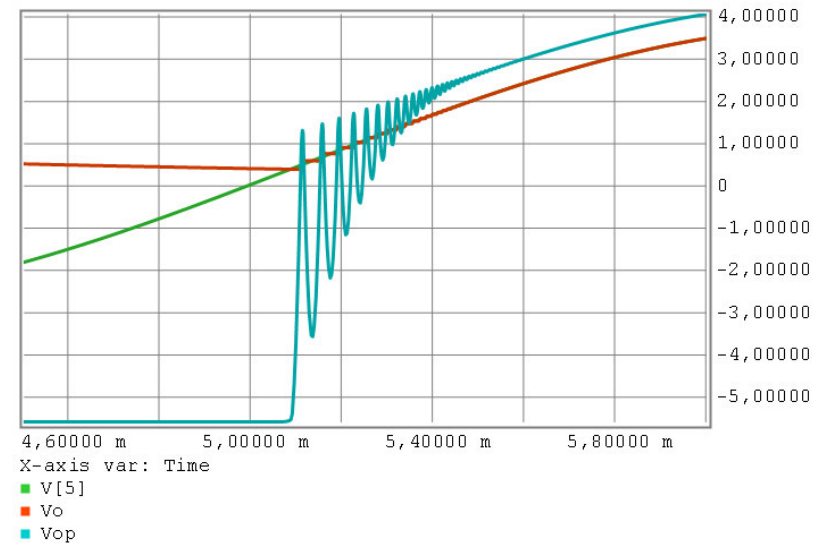
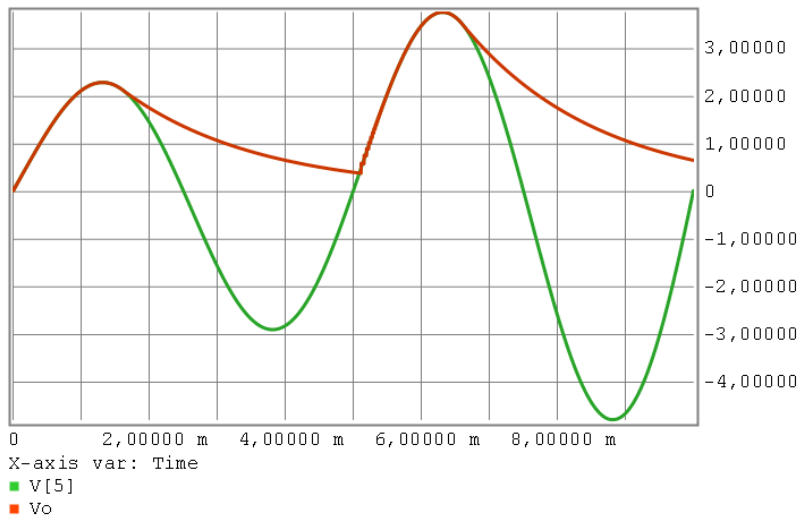
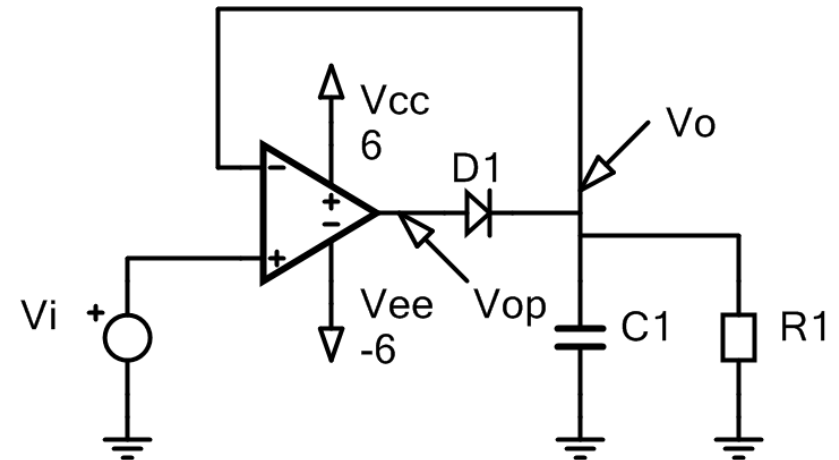
Detector de envolvente.

Se obtiene añadiendo una resistencia en paralelo con el condensador del detector de pico.

El condensador se descarga a través de la resistencia con una constante de tiempo R·C.

La señal de entrada es la misma que se aplicaba al detector de pico.

La primera figura muestra el efecto de la descarga de C. La segunda muestra un detalle de la inestabilidad en Vop.



Recortadores con diodos.

Se parte de un amplificador inversor de ganancia:

$$A_v = -R_2/R_1$$

Y se añaden dos diodos zener en serie y oposición (conectados en paralelo con R2).

Mientras los diodos no conducen ($|V_o| < V_z + V_D$) el circuito se comporta como un amplificador.

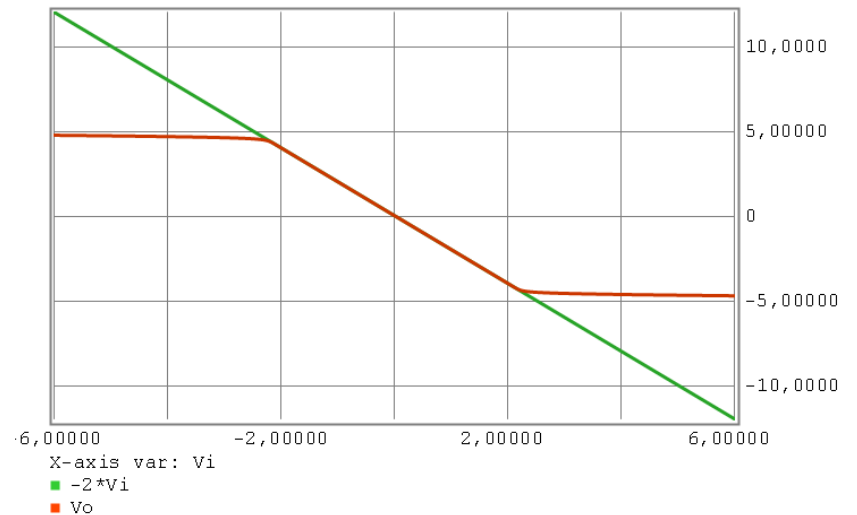
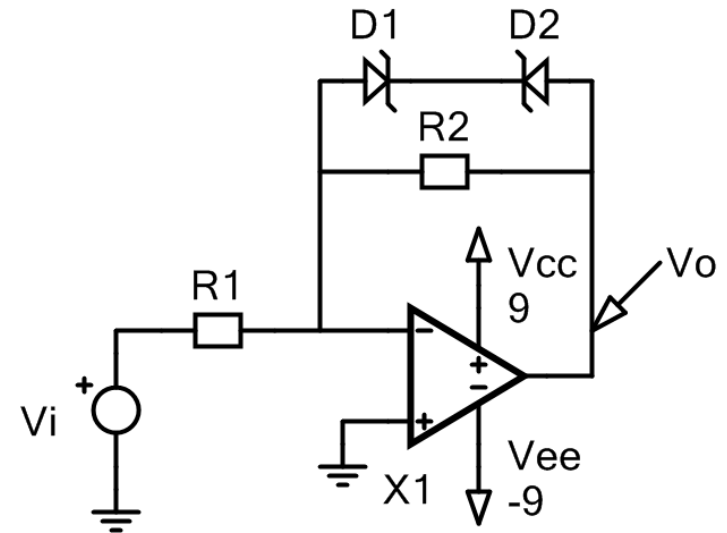
Cuando $V_o > V_z + V_D$ el diodo D2 conduce en directa y el D1 conduce en zona zéner, limitando la tensión a aproximadamente 5V.

Cuando $V_o < -(V_z + V_D)$ el diodo D1 conduce en directa y el D2 conduce en zona zéner, limitando la tensión a aproximadamente -5V.

La gráfica muestra la función de transferencia estática $V_o = f(V_i)$ en color rojo.

La recta trazada en color verde muestra la ecuación:

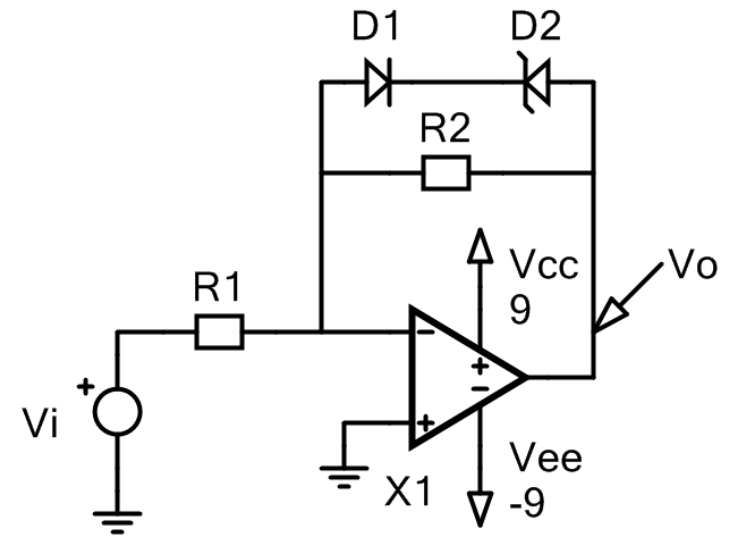
$$V_o = -2 * V_i \quad \text{para que sirva de referencia.}$$



Si se reemplaza uno de los zéners con un diodo que no presente efecto de ruptura inversa (en la zona de trabajo), se puede conseguir que el recorte se realice solamente en una polaridad.

En la figura se puede observar el recorte a $-5V$ aproximadamente en la parte positiva del eje x.

En la zona negativa del eje x también se produce un recorte (a $8V$ aprox.), pero en este caso es debido a la saturación del operacional (que está alimentado a $\pm 9V$).



NOTA: En ambos casos las gráficas se han realizado con $R2 = 2 \cdot R1$.

