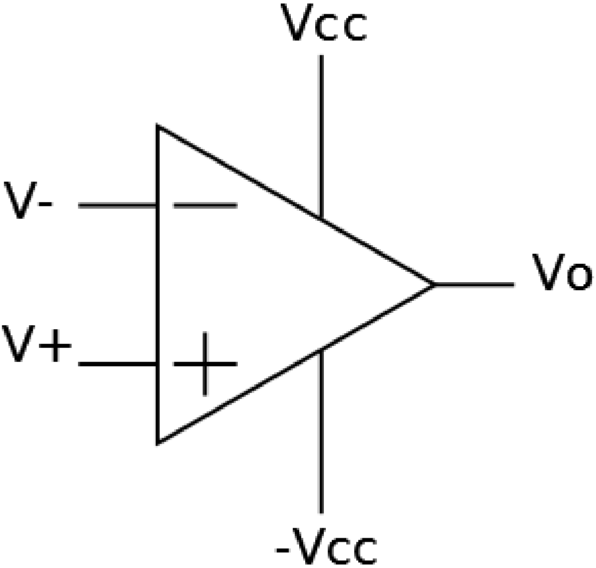
Amplificadores operacionales

Pablo Monzón

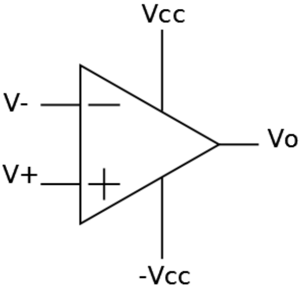
IIE-Fing-UDELAR

Segundo semestre, 2020

El amplificador operacional

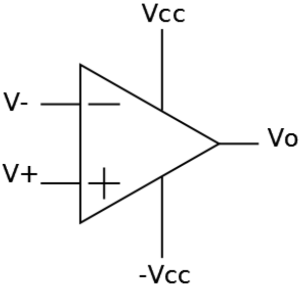


El amplificador operacional



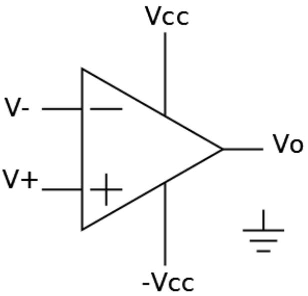
- Nueva componente electrónica.
- En realidad es un circuito que *encapsulamos* en una nueva componente.
- 1940: operacional basado en válvulas de vacío (Philbrick), 1968: el operacional *más famoso*, el 741, basado en transistores (Fairchild).
- A lo largo del curso entenderemos bien el por qué de su nombre.

El amplificador operacional



- No nos *meteremos dentro*, sino que la definiremos por cómo funciona desde sus bornes
- Tiene cinco terminales básicos, que definiremos a continuación.
- Puede tener más terminales, para ajustes diversos.

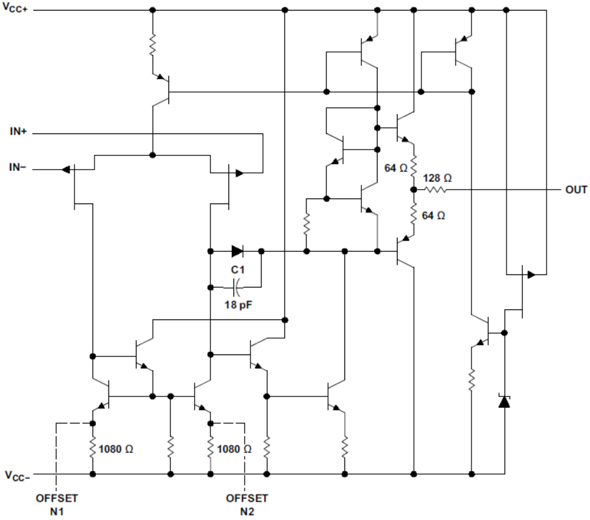
El amplificador operacional



Terminales

- Dos patas de *alimentación*, que denotaremos $\pm V_{CC}$, ya que usualmente se conectan fuentes simétricas. Estas fuentes definen la *tierra* del circuito (nivel de tensión nula).
- Dos *entradas*, marcadas con $-$ (inversora) y $+$ (no inversora). Las tensiones V_+ y V_- se miden respecto de tierra.
- Una *salida*, Vo, medida respecto de tierra.

El amplificador operacional

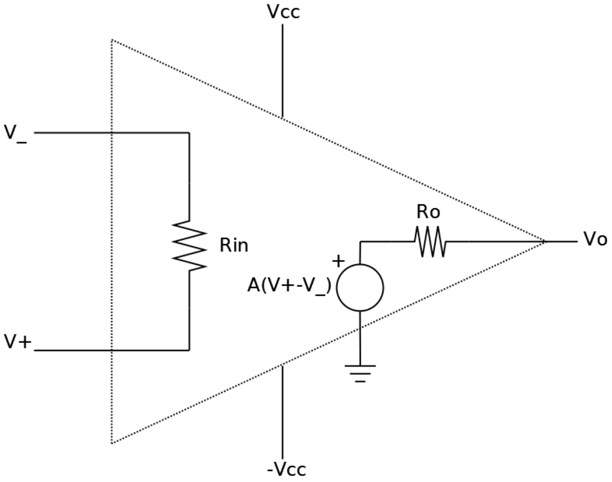


El amplificador operacional

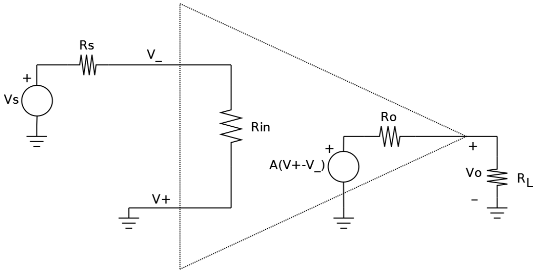
Modelo eléctrico

- Usaremos un modelo representativo del operacional que se basa en tres parámetros: A, R_{in} y R_o.
- Desde el punto de vista de la salida, usaremos un equivalente Thévenin, con tensión de vacío proporcional a la tensión diferencial de entrada $A(V_+ - V_-)$, con *ganancia* A y resistencia vista R_o (resistencia de salida).
- Desde el punto de vista de la entrada, representamos al operacional por cómo *carga* una etapa anterior, es decir, por la resistencia vista entre las terminales de entrada.
- No entraremos en detalles *prácticos*, que son importantes y se verán en los cursos de electrónica (como por ejemplo, las corrientes máximas que puede manejar un operacional, que usualmente son bajas).

El amplificador operacional



El amplificador operacional - ejemplo



$$V_+ - V_- = -V_s.\frac{R_{in}}{R_s + R_{in}}$$

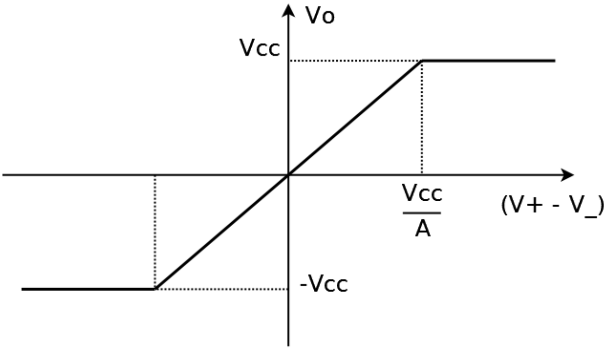
$$V_o = A(V_+ - V_-).\frac{R_L}{R_o + R_L}$$

Amplificador ideal y modos de funcionamiento

La salida y sus limitaciones

- La salida es proporcional a la diferencia de tensión, con signo, entre las patas $+$ y $-$.
- Es una conducta lineal, hasta que se presenta el fenómeno de *saturación*.
- Si la diferencia de tensión entre las entradas supera determinados valores, la salida se vuelve constante.
- Básicamente, la salida no puede superar el valor de la fuente $\pm V_{CC}$.
- Esto vale para entradas diferenciales menores a $\frac{V_{CC}}{A}$ en valor absoluto.

Curva de respuesta del operacional



Características ideales del operacional

Operacional real

- **Ganancia** A **muy grande**.

Las diferencias de tensión en la entrada deben ser muy pequeñas para evitar la saturación.

- **Resistencia de entrada** R_{in} **muy grande**.

Las corrientes que entran al operacional por las patas de entrada son muy pequeñas (despreciables).

- **Resistencia de salida** R_o **muy pequeña**.

La tensión de salida queda prácticamente definida por la tensión de entrada, sin importar la corriente que se le consuma al operacional.

Mostrar hoja de datos!!

Características ideales del operacional

Operacional ideal

- **Ganancia A infinita.**

La entrada diferencial es nula (*cortocircuito virtual*).

- **Resistencia de entrada R_{in} infinita.**

No entra corriente al operacional.

- **Resistencia de salida R_o nula.**

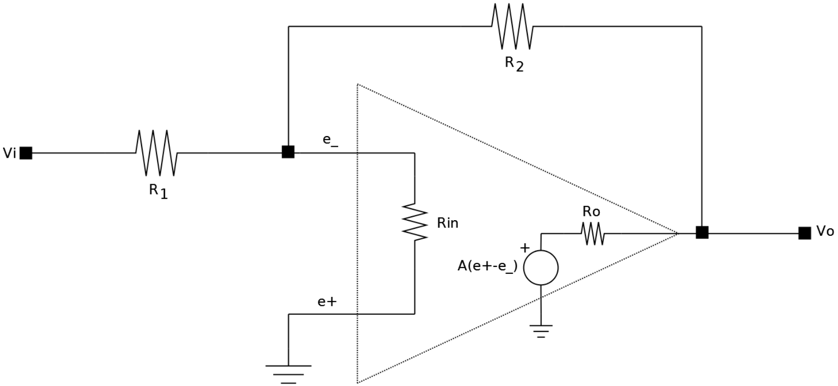
La tensión de salida no depende de la corriente que entrega el operacional.

Características ideales del operacional

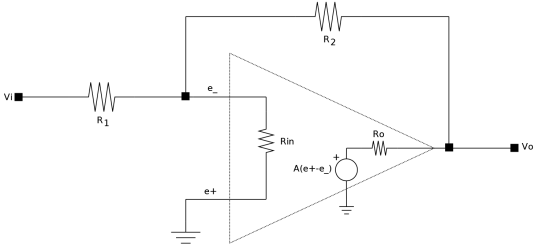
Cortocircuito virtual

- Al ser $A = \infty$, para que la salida $V_o = A(V_+ - V_-)$ sea finita, se debe cumplir $V_+ - V_- = 0$.
- Esto se denomina *cortocircuito virtual* y no implica un cortocircuito *eléctrico*.
- Veremos esto mejor en algunos ejemplos.

Configuración inversora



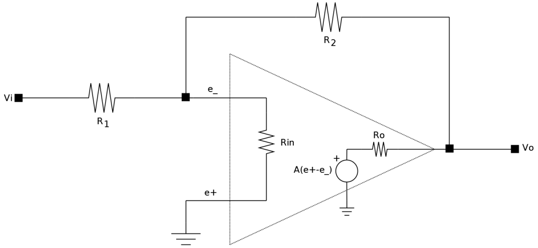
Configuración inversora



Relación entre V_o y V_i

- Consideremos el operacional con ganancia A finita (y $R_{in} = \infty$, $R_o = 0$).
- No entra corriente por las entradas. Miremos el nudo en la pata $-$.
- La corriente por R_1 es la misma que por R_2.
- $\frac{V_i - e_-}{R_1} = \frac{e_- - V_o}{R_2} \Rightarrow e_- \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) = \frac{V_i}{R_1} + \frac{V_o}{R_2}$
- Por otro lado, $V_o = A(e_+ - e_-) = -Ae_-$

Configuración inversora



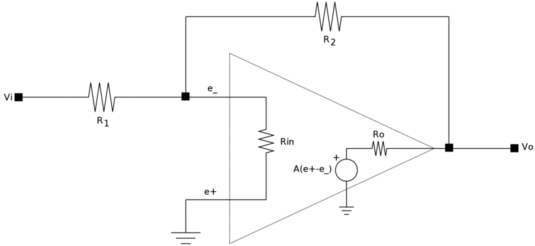
Relación entre V_o y V_i

- Juntando las dos últimas ecuaciones, obtenemos

$$V_o = -\frac{AR_2}{(1+A)R_1 + R_2} V_i \rightarrow -\frac{R_2}{R_1} V_i \quad \text{cuando } A \rightarrow \infty$$

- Cuando la ganancia del operacional es muy grande, la relación entrada salida del circuito no depende de A!!!

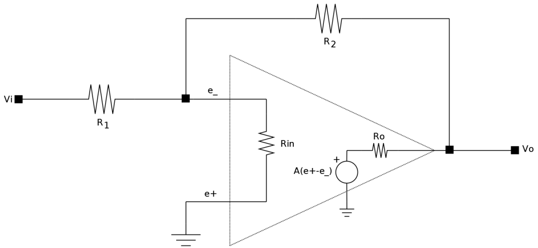
Configuración inversora



$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

- La salida tiene signo opuesto a la entrada (por eso lo de *inversora*).
- La relación $\frac{R_2}{R_1}$ fija la *ganancia* del circuito.
- Para entradas de mV, y $V_{CC} = 15V$, podemos tener grandes amplificaciones sin saturar!!!

Configuración inversora



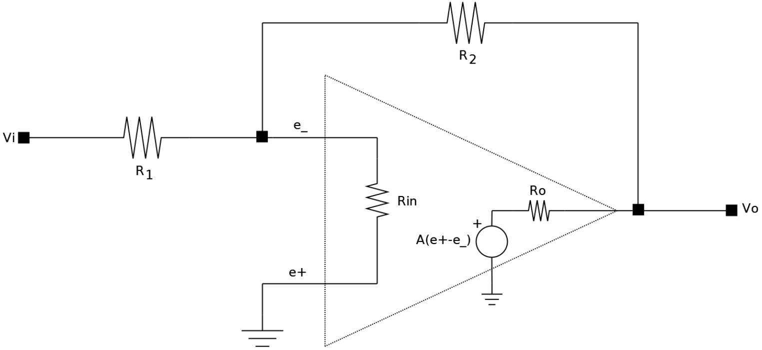
Tensión diferencial a la entrada

- Veamos qué pasa con $e_+ - e_-$.

$$e_+ - e_- = \frac{V_o}{A} = \frac{R_2}{(1+A)R_1 + R_2} V_i \to 0 \quad \text{cuando } A \to \infty$$

- Cuando la ganancia A es muy grande, tenemos un *cortocircuito virtual* entre las patas de entrada.
- En este caso particular, hablamos de *tierra virtual.*

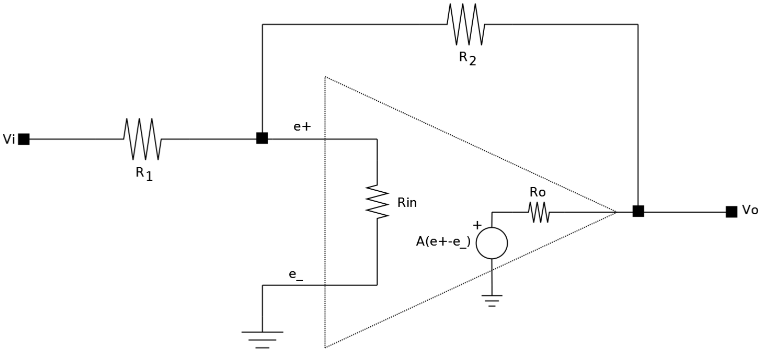
Configuración inversora



Realimentación negativa

- e_- crece $\Rightarrow V_o \approx A(e_+ - e_-)$ decrece $\Rightarrow e_-$ decrece
- Realimentar por la pata menos *estabiliza* el sistema.
- Da lugar a configuraciones en modo lineal.

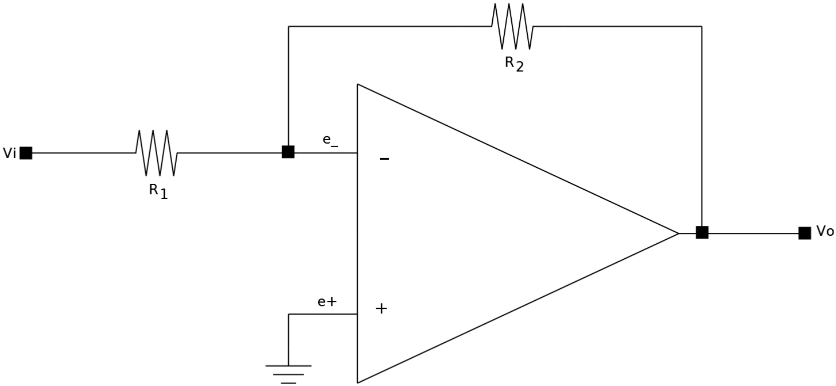
Observación



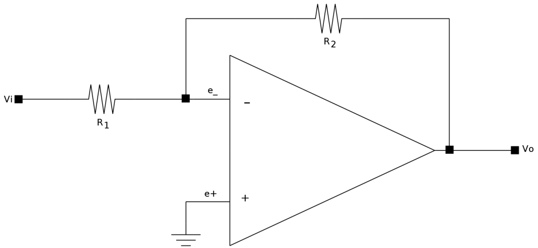
Realimentación "positiva": intercambiamos las patas de entrada

- e_+ crece $\Rightarrow V_o \approx A(e_+ - e_-)$ crece $\Rightarrow e_+$ crece $\Rightarrow$ saturación!!
- Realimentar por la pata más vuelve *inestable* al sistema.
- Da lugar a configuraciones en modo no lineal (comparadores).

Configuración inversora con ganancia infinita



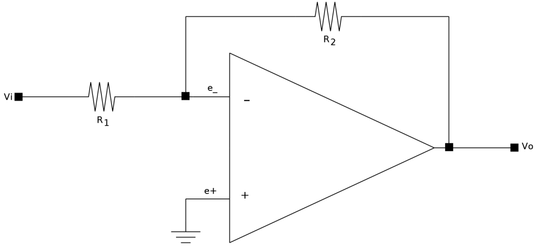
Configuración inversora con ganancia infinita



Análisis con ganancia infinita

- "Perdemos"la ecuación $V_o = A(e^+ - e^-)$.
- Al haber ganancia infinita, imponemos el *cortocircuito virtual*.
- Eso nos da la ecuación que nos falta para resolver el circuito.
- La ganancia queda definida siempre por lo que rodea al operacional.

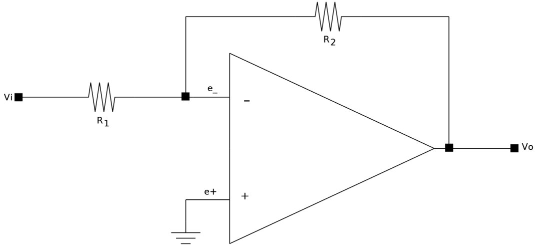
Configuración inversora con ganancia infinita



Análisis con ganancia infinita

- No entra corriente por las entradas. Miremos el nudo en la pata $-$.
- La corriente por R_1 es la misma que por R_2.
- $\frac{V_i - e_-}{R_1} = \frac{e_- - V_o}{R_2} \Rightarrow e_- \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) = \frac{V_i}{R_1} + \frac{V_o}{R_2}$
- Tierra virtual $\Rightarrow e_- = 0$.

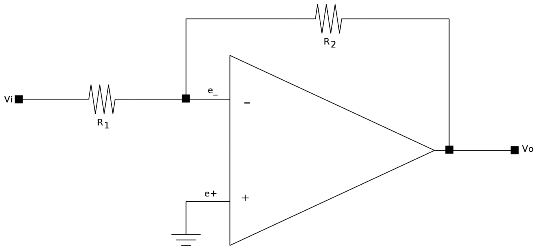
Configuración inversora con ganancia infinita



Análisis con ganancia infinita

- Entonces $0 = \frac{V_i}{R_1} + \frac{V_o}{R_2}$.
- Despejando: $\boxed{\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1}}$
- Recuperamos el resultado límite que vimos antes.

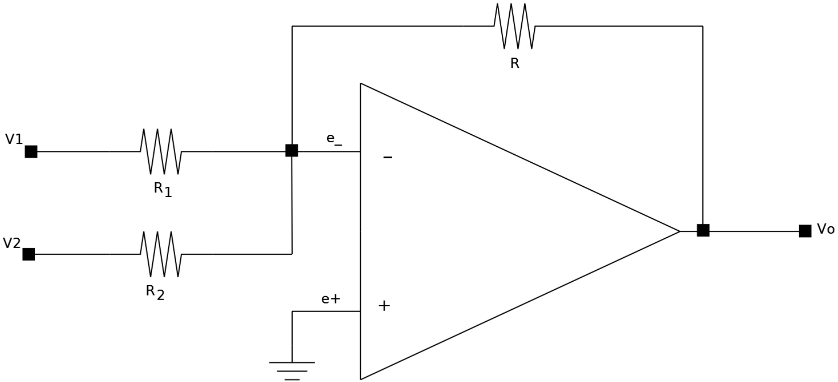
Configuración inversora con ganancia infinita



Análisis con ganancia infinita

- De ahora en más usaremos esta forma de análisis.
- Asumimos el cortocircuito virtual.
- Ojo: las patas $+$ y $-$ quedan *difusas*, ya que el cortocircuito virtual *unifica* las patas.
- Es importante recordar que el cortocircuito virtual sólo vale en modo lineal.

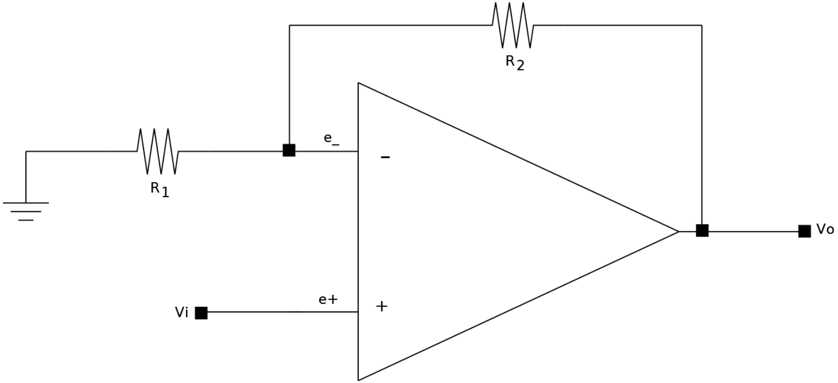
Sumador: $V_o = -\left[\frac{R}{R_1}V_1 + \frac{R}{R_2}V_2\right]$



Planteando el nudo (otro camino posible: por superposición)

$$\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} = -\frac{V_o}{R} \Rightarrow \boxed{V_o = -\left[\frac{R}{R_1}V_1 + \frac{R}{R_2}V_2\right]}$$

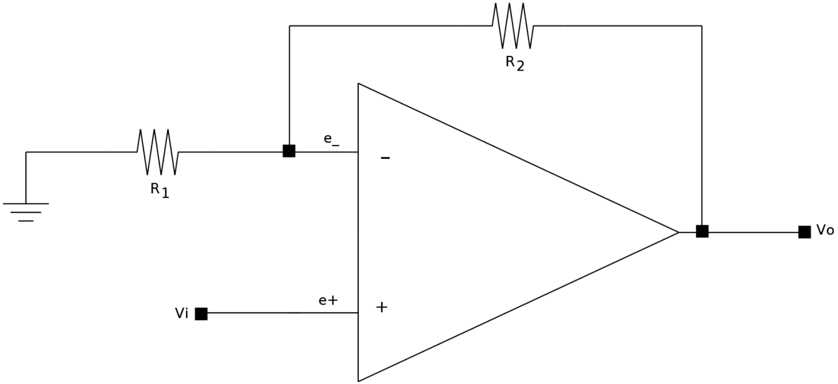
Configuración no inversora con ganancia infinita



Por divisor de tensión (R_1 y R_2 tienen la misma corriente)

$$V_i = e_+ = e_- = V_o \frac{R_1}{R_1 + R_2} \Rightarrow \boxed{\frac{V_o}{V_i} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}}$$

Configuración no inversora con ganancia infinita



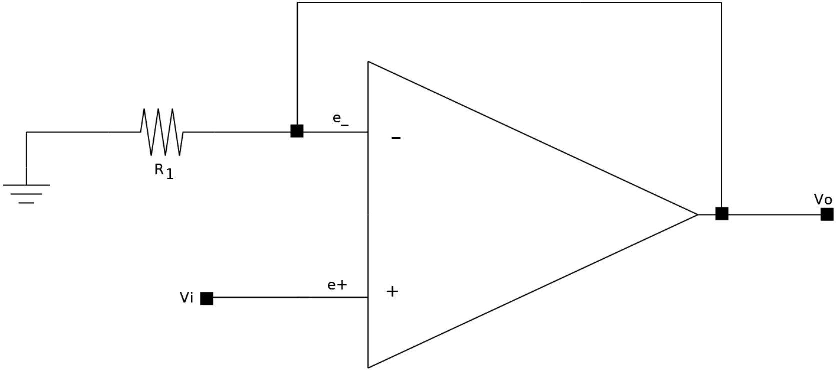
Comentarios

- La salida preserva el signo de la entrada (no inversora).
- La ganancia es siempre mayor o igual que 1.

Seguidor

Miremos esta configuración en casos límites

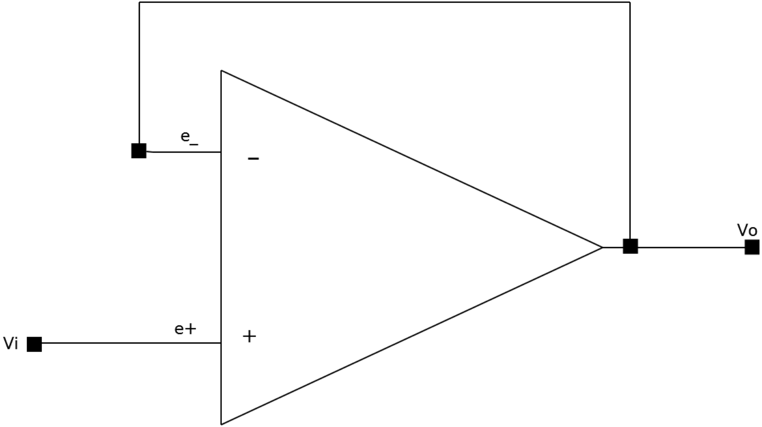
- Si R_2 es 0, entonces la relación entrada/salida es $V_o = V_i$, para todo $R_1 \neq 0$.



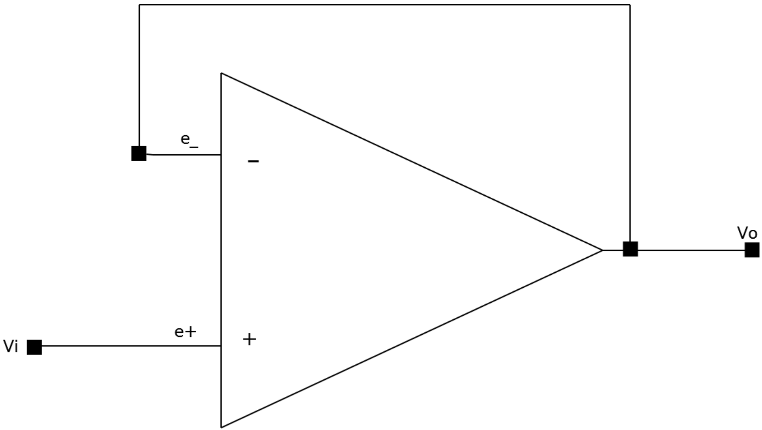
Seguidor

Miremos esta configuración en casos límites

- Entonces R_1 también puede eliminarse (haciéndola infinita!!).



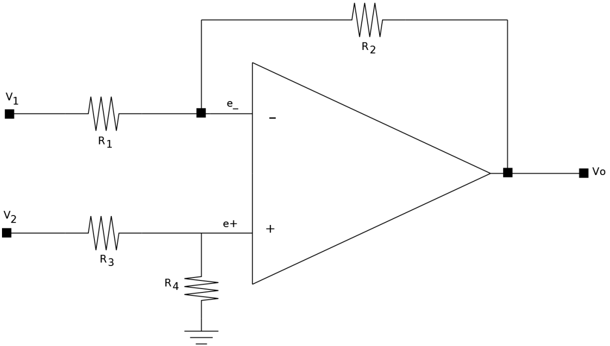
Seguidor



Aplicaciones

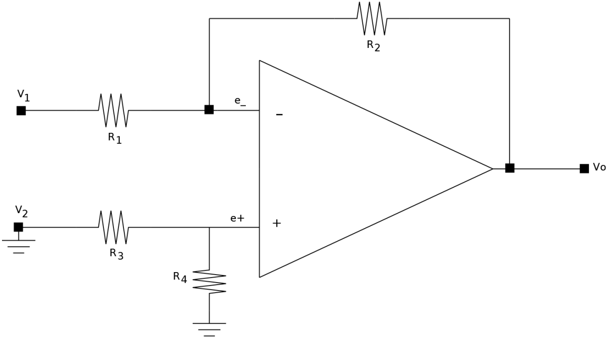
- Copiar una tensión, sin cargar a la etapa anterior.
- Aislar etapas.

Amplificador de diferencia o diferencial



- Tiene dos entradas y una salida.
- Resolvemos por superposición.
- Primero anulamos V_2.

Amplificador de diferencia o diferencial

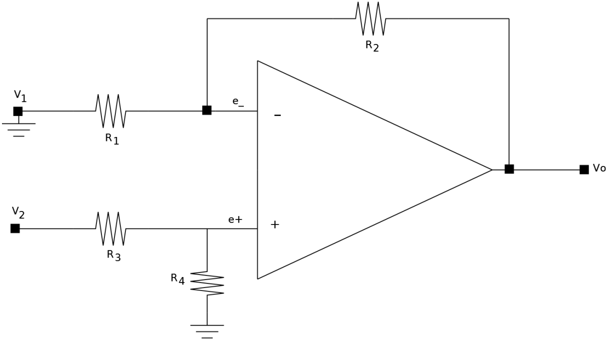


- Obtenemos una configuración inversora ($e_+ = 0$).

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

- Ahora anulamos V_1.

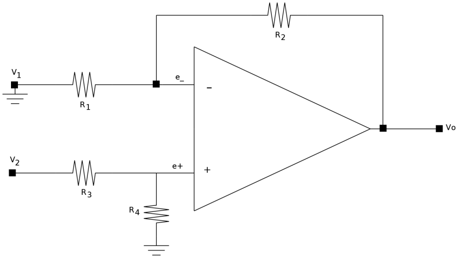
Amplificador de diferencia o diferencial



- Queda una configuración no inversora.
- Para hallar e_+, planteamos un divisor de tensión: $e_+ = \frac{R_4}{R_3+R_4}V_2$

$$V_{o2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right).\frac{R_4}{R_3 + R_4}V_2 = \frac{R_4}{R_1}.\frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4}V_2 = \frac{R_2}{R_1}.\frac{1 + \frac{R_1}{R_2}}{1 + \frac{R_3}{R_4}}V_2$$

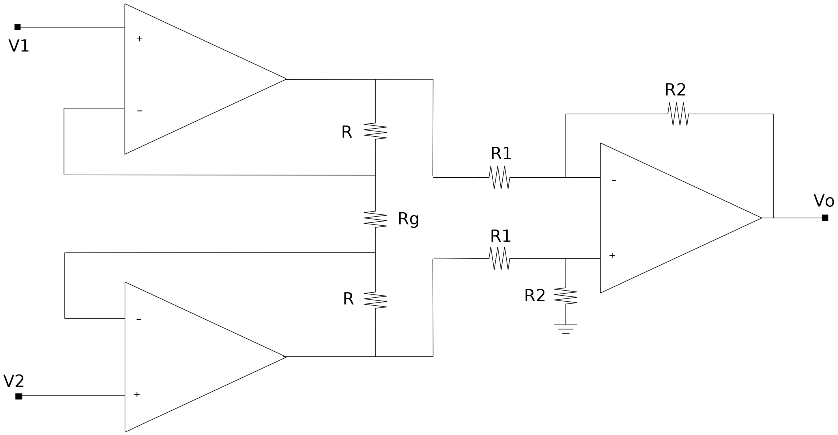
Amplificador de diferencia o diferencial



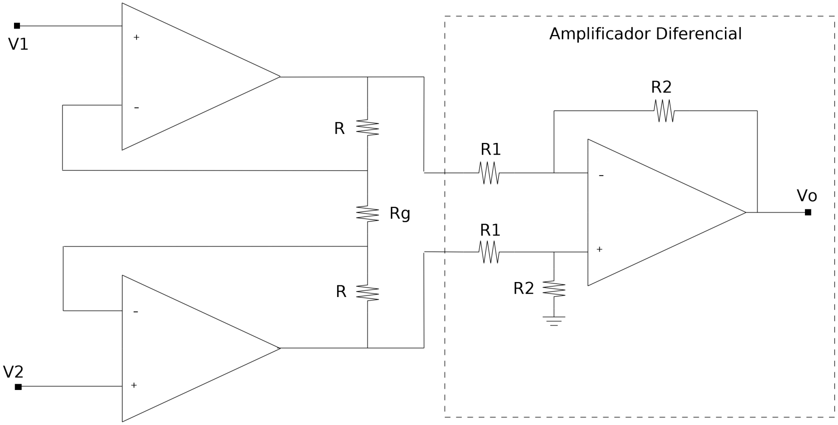
$$V_o = V_{o1} + V_{o2} = -\frac{R_2}{R_1}V_1 + \frac{R_2}{R_1}.\left(\frac{1+\frac{R_1}{R_2}}{1+\frac{R_3}{R_4}}\right)V_2 = \frac{R_2}{R_1}\left[\left(\frac{1+\frac{R_1}{R_2}}{1+\frac{R_3}{R_4}}\right)V_2 - V_1\right]$$

- Ajustando los valores de las resistencias, podemos obtener una salida proporcional a la diferencia entre las entradas.
- Si $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$, entonces $\boxed{V_o = \frac{R_2}{R_1}(V_2 - V_1)}$.
- Tendremos una salida proporcional a la diferencia, que podemos usar en etapas posteriores para tomar decisiones.

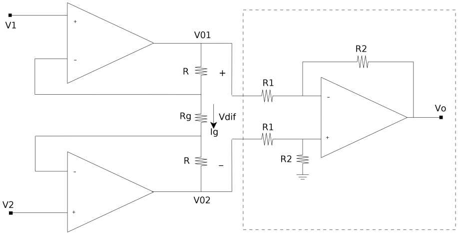
Amplificador de instrumentación



Amplificador de instrumentación



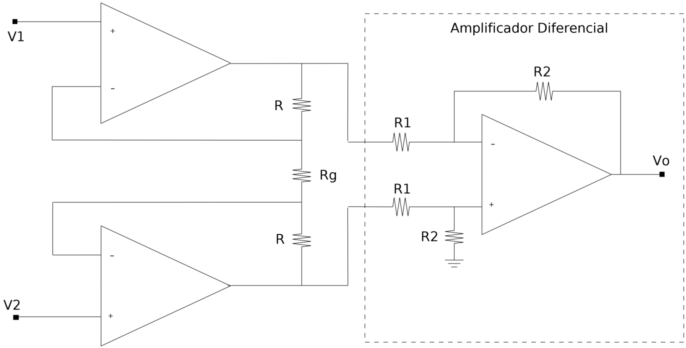
Amplificador de instrumentación



Análisis del circuito

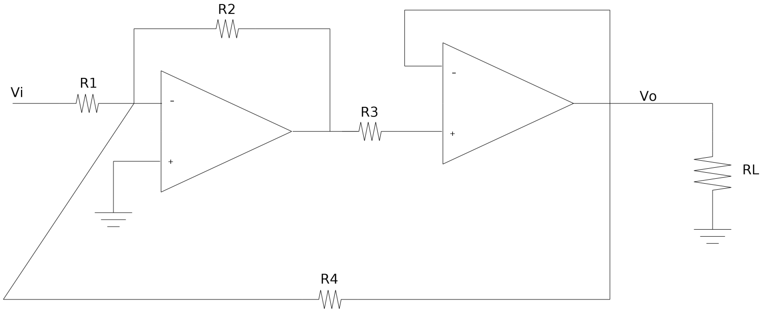
- Por el cortocircuito virtual, la diferencia de tensión en la resistencia R_g vale $V_1 - V_2$.
- Entonces, por las resistencias de valor R y R_g circula la corriente $I_g = \frac{V_1 - V_2}{R_g}$, *hacia abajo.*
- La tensión que ve el amplificador diferencial es $V_{dif} = V_{01} - V_{02} = (2R + R_g).I_g = \left(1 + \frac{2R}{R_g}\right)(V_1 - V_2)$.
- Luego aplicamos la expresión de la salida del amplificador diferencial.

Amplificador de instrumentación



- $$V_o = \frac{R_2}{R_1}.\left(1 + \frac{2R}{R_g}\right).(V_2 - V_1)$$
- El amplificador no carga a quienes generan las tensiones V_1 y V_2.

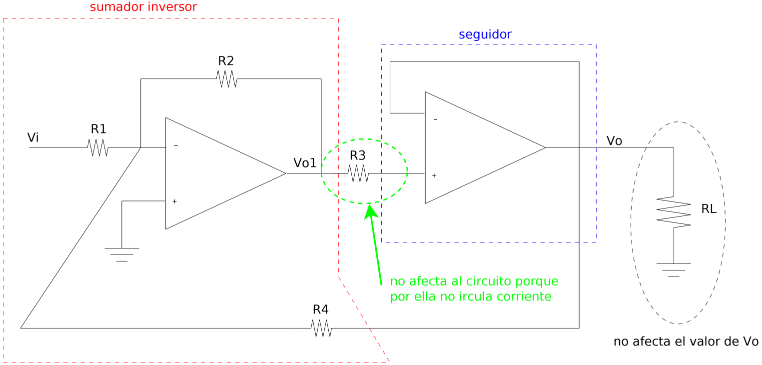
Reconociendo bloques



Objetivo: hallar V_o en función de V_i.

Primero, identificamos bloques.

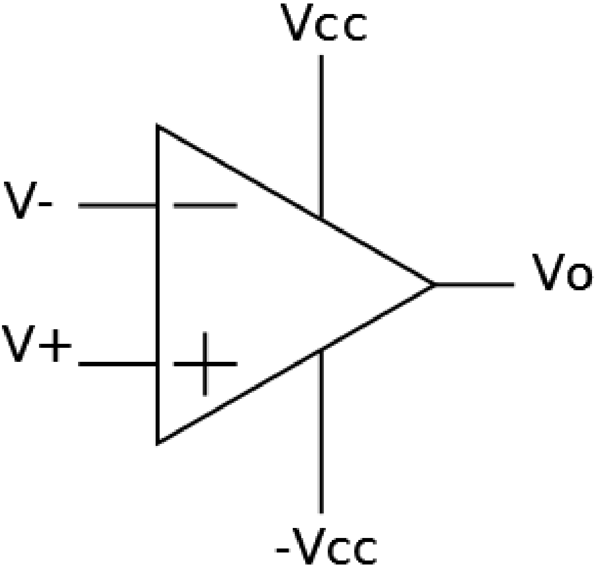
Reconociendo bloques



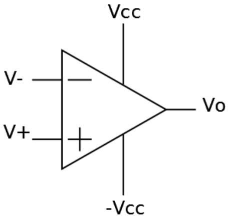
$$\left.\begin{array}{rcl} V_{o1} & = & -\frac{R_2}{R_1}V_i - \frac{R_2}{R_4}V_o \\ V_o & = & V_{o1} \end{array}\right\} \Rightarrow V_o\left(1+\frac{R_2}{R_4}\right) = -\frac{R_2}{R_1}V_i$$

$$\Rightarrow \boxed{V_o = -\frac{R_2R_4}{R_1(R_2+R_4)}V_i}$$

Volvamos al esquema básico del amplificador operacional



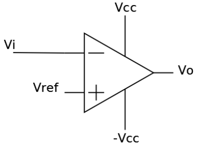
El amplificador operacional



Consideraciones

- si A es muy grande, el rango de la entrada diferencial para no saturar es muy pequeño.
- La realimentación negativa ayuda a estabilizar.
- Si el operacional se usa sin realimentar, o sin realimentación negativa, entonces trabaja saturado.
- Algunos operacionales incluso se diseñan para trabajar así y se denominan comparadores.

Comparador



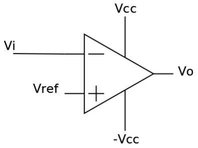
Forzamos las entradas a ser distintas

- La salida será $\pm V_{CC}$, según el signo de la entrada diferencial

$$V_o = \begin{cases} +V_{CC} & , \text{ si } e_+ > e_- \quad (\text{si } V_{ref} > V_i) \\ -V_{CC} & , \text{ si } e_+ < e_- \quad (\text{si } V_{ref} < V_i) \end{cases}$$

- Podemos analizarlo imponiendo un valor de saturación y viendo qué condiciones implica esto a la entrada.
- Otra alternativa es suponer un valor de saturación y ver que la configuración de tensiones es compatible con dicha suposición (como hacemos con los diodos).

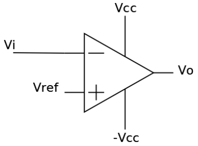
Comparador



Forzamos las entradas a ser distintas

- Para que $V_o = -V_{CC}$, debe ser $V_i > V_{ref}$.
- Para que $V_o = +V_{CC}$, debe ser $V_i < V_{ref}$.

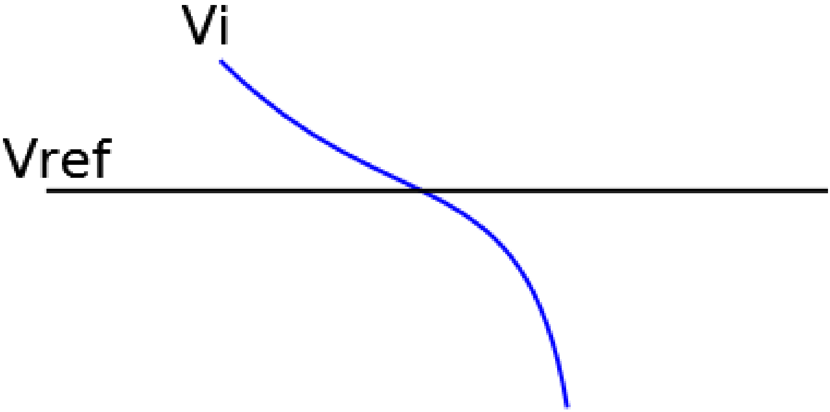
Comparador



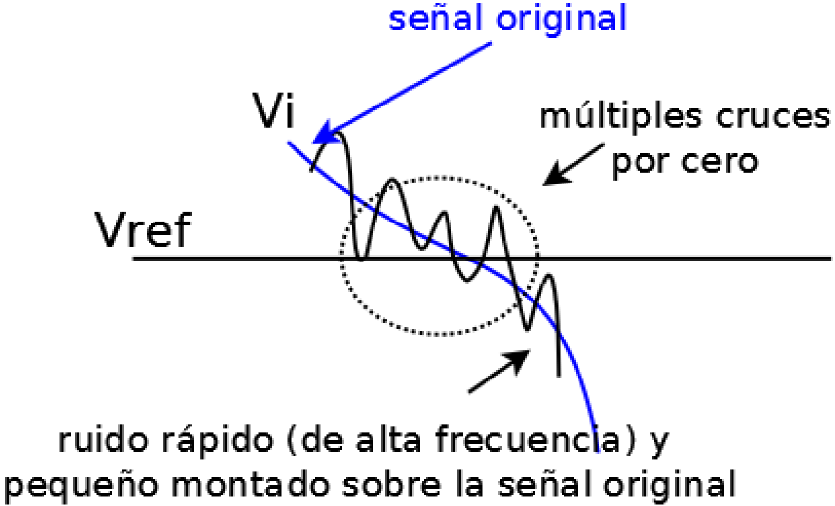
Características de este circuito comparador

- Detecta signo de la entrada diferencial.
- Poniendo $V_{ref} = 0$ es un detector de cruces por cero.
- Es muy sensible a pequeñas fluctuaciones de la entrada, que pueden provocar muchas conmutaciones de la salida.

Comparador

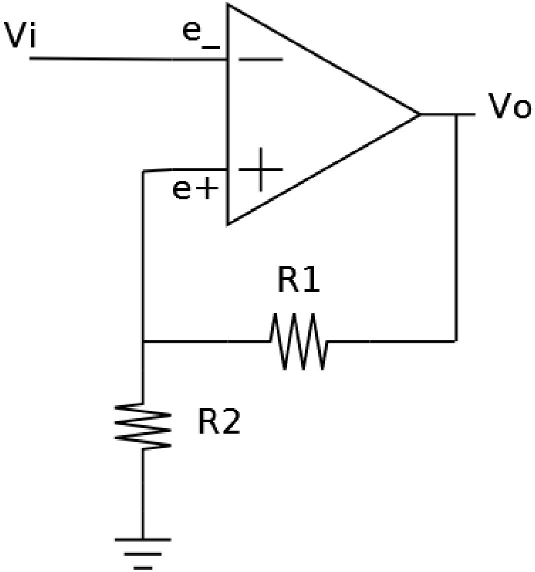


Comparador

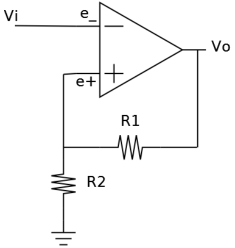


señal original
Vi
múltiples cruces
por cero
Vref
ruido rápido (de alta frecuencia) y
pequeño montado sobre la señal original

Schmitt trigger



Schmitt trigger



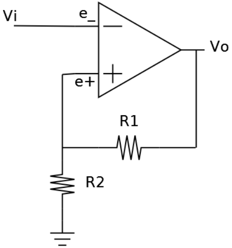
- La entrada va directo a la pata $-$.
- La salida se realimenta a través de la pata $+$

$$e_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_o$$

(divisor de tensión!!!).

- Veremos cómo analizar el circuito.

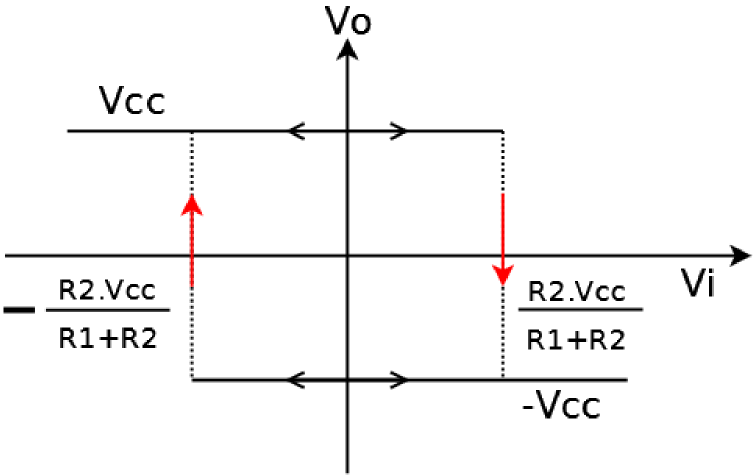
Schmitt trigger



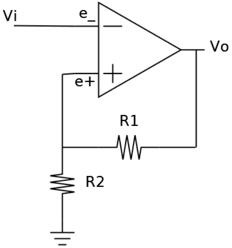
Fijamos V_o y vemos las condiciones en la entrada V_i

- $V_o = +V_{CC} \Rightarrow e_+ = \frac{R_2}{R_1+R_2} V_{CC}$. Debe ser $V_i < \frac{R_2}{R_1+R_2} V_{CC}$.
- $V_o = -V_{CC} \Rightarrow e_+ = -\frac{R_2}{R_1+R_2} V_{CC}$. Debe ser $V_i > -\frac{R_2}{R_1+R_2} V_{CC}$.
- La siguiente gráfica resume el análisis previo.

Schmitt trigger



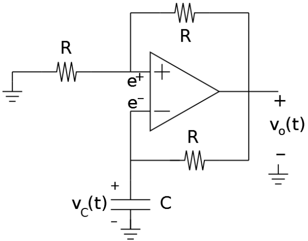
Schmitt trigger



Características de este circuito comparador

- Presenta histéresis, por lo que conmuta considerando el sentido de los cruces (tiene *memoria*).
- Permite eliminar hasta cierto punto el efecto de ruido en la señal.
- La ventana de disparo se puede ajustar, tanto en su centro como en su ancho (verlo como ejercicio!!).

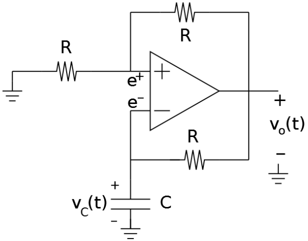
Astable



Circuito oscilador

- Genera una onda cuadrada en la salida del operacional.
- Su periodo está regulado por la constante RC.
- Es sencillo y tiene muchas aplicaciones.
- Incluso viene en un circuito integrado.

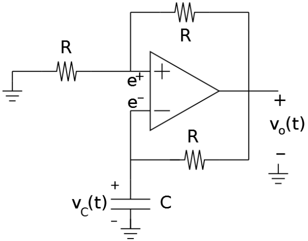
Astable



Circuito oscilador

- Consideremos que el condensador está inicialmente sin carga.
- Tenemos que suponer un estado inicial del comparador y analizar lo que sucede con las patas $+$ y $-$ del operacional, para ver si la hipótesis funciona bien.

Astable

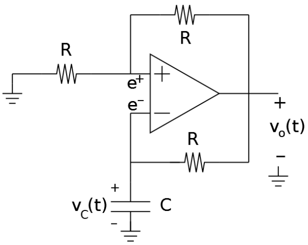


Circuito oscilador

- La rama de la pata + divide la tensión de salida del operacional.

$$e_+(t) = \frac{R}{R+R} v_o(t) = \frac{1}{2} v_o(t)$$

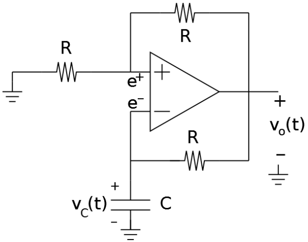
Astable



Circuito oscilador

- El circuito asociado a la pata − nos dice que $v_C(t) = e_-(t)$.
- Como $v_o(t)$ va a ser constante ($\pm V_{CC}$), tenemos esencialmente la carga o descarga del condensador.
- $v_C(t)$ va a tender a $v_o(t) = \pm V_{CC}$.

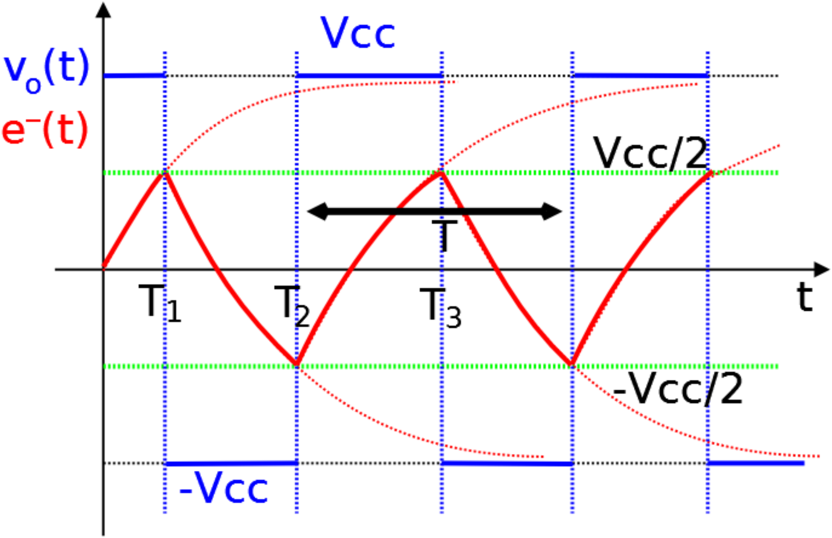
Astable



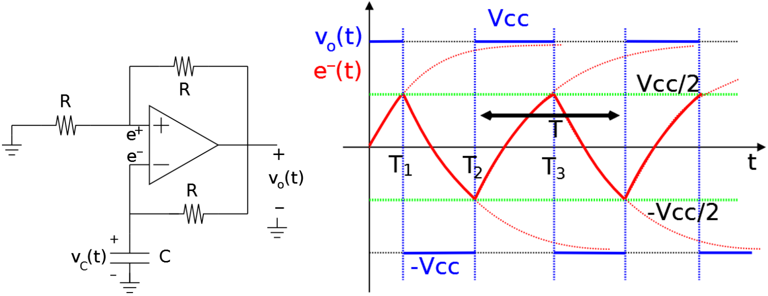
Supongamos que $v_o(t) = +V_{CC}$

- Tenemos que verificar que $e_+(t) > e_-(t)$.
- Por un lado, $e_-(t) = v_C(t) = V_{CC}.(1 - e^{-t/RC})$.
- Por otro lado $e_+(t) = \frac{1}{2}V_{CC}$.
- Como $v_C(0) = 0$, inicialmente se verifica $e_+(t) > e_-(t)$.
- ¿Hasta cuándo???

Astable



Astable



Terminarlo al hacer el práctico!!

- El periodo T se puede ajustar con los valores de las resistencias y la constante de tiempo.
- Si se generan distintos caminos de carga y descarga, la onda cuadrada puede ser asimétrica.