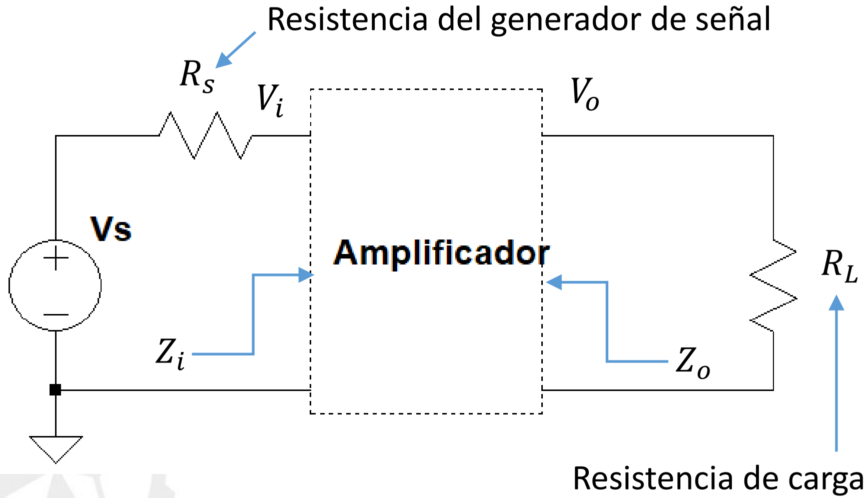
Amplificación, Amplificadores y Amplificadores Operacionales

Luis Cucala García

El amplificador

- Un amplificador es un dispositivo que amplifica una señal… no es una perogrullada
  - La amplificación puede ser de la amplitud en voltios de la señal
  - Pero puede ser de la corriente de una señal, sin amplificar su amplitud en voltios (a estos amplificadores se les llama "buffer")
- Los amplificadores convierten parte de la energía de una fuente de alimentación continua, en energía en la señal amplificada
  - Esto da lugar al concepto de eficiencia, el cociente entre la energía usada en la señal amplificada y la aportada por la fuente de alimentación
- La ganancia se define como el cociente entre la amplitud de la señal de salida y la de entrada
  - La amplitud puede ser de tensión o de corriente, para la entrada y la salida, lo que da lugar a cuatro combinaciones de ganancias posibles
- La ganancia del amplificador ideal es constante (para cualquier frecuencia, amplitud de entrada y de salida, para cualquier generador de señal y cualquier carga de salida). Como parece natural, semejante maravilla no existe pero es útil para hacer análisis básicos de circuitos

Comencemos con un amplificador de tensión

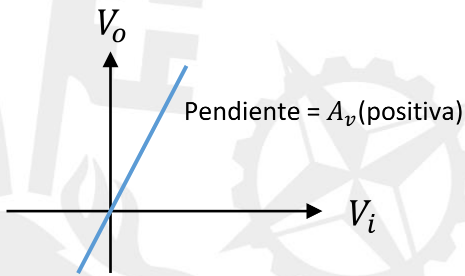


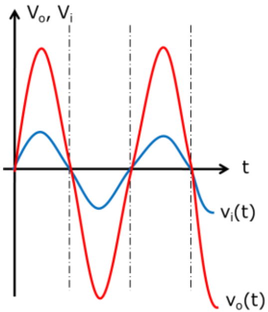
- Se define ganancia de tensión $\boldsymbol{A_v}$ como el **cociente de las amplitudes de tensión de la señal de salida y de entrada**
  - $A_v = {}^{V_o}/_{V_i}$

- Z_i es la impedancia de entrada del amplificador, y Z_0 la de salida (recordad Thevenin). Son parámetros propios del amplificador, y en el caso ideal la impedancia de entrada será infinita, y la de salida cero
  - En el caso no ideal y general, Z_i y Z_0 son complejas (amplitud y fase), aunque en este curso lo simplificaremos siempre como resistencias $\boldsymbol{R_i}$ **y** $\boldsymbol{R_o}$

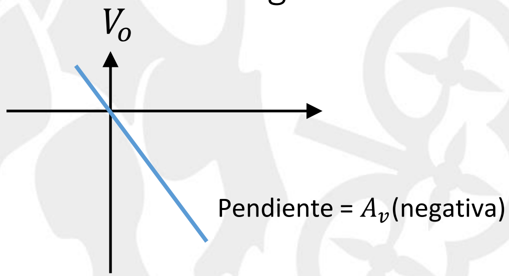
Amplificador de tensión ideal. Tipos

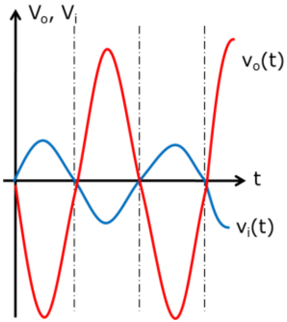
- Como decíamos, en el caso ideal $A_v = cte$, no dependerá de la frecuencia, de la R serie del generador de señal, de la R de carga ni de la amplitud de las señales. Podremos dibujar una Función de Transferencia, que será una recta
- El amplificador es "**no inversor**" cuando la pendiente de la función de transferencia es positiva



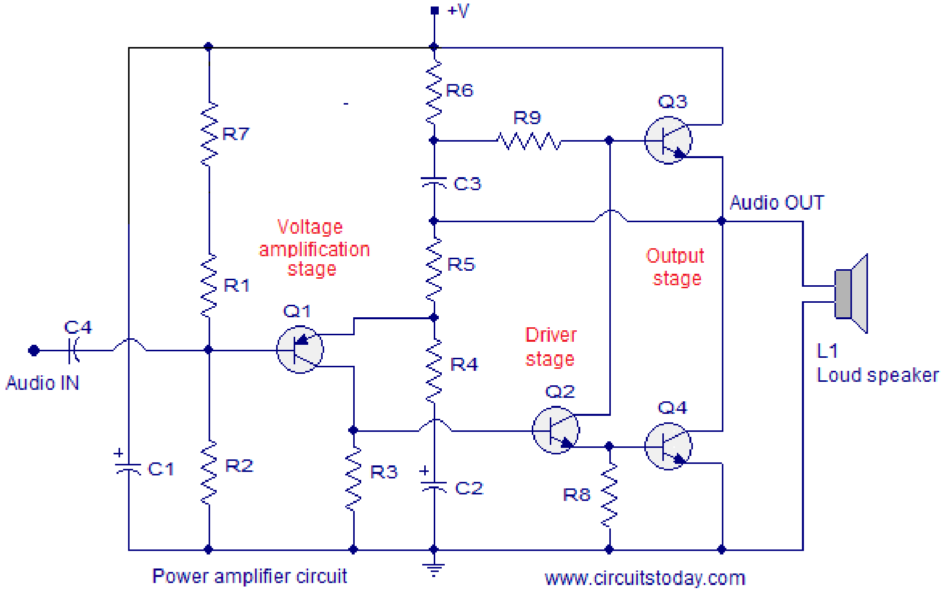


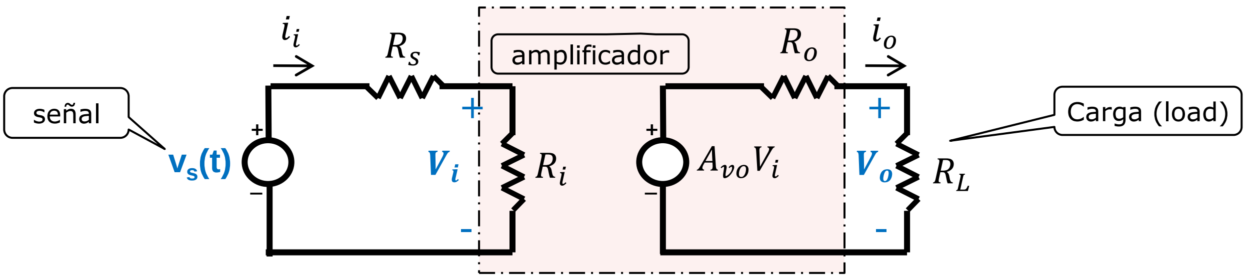
- El amplificador es "**inversor**" cuando la pendiente de la función de transferencia es negativa



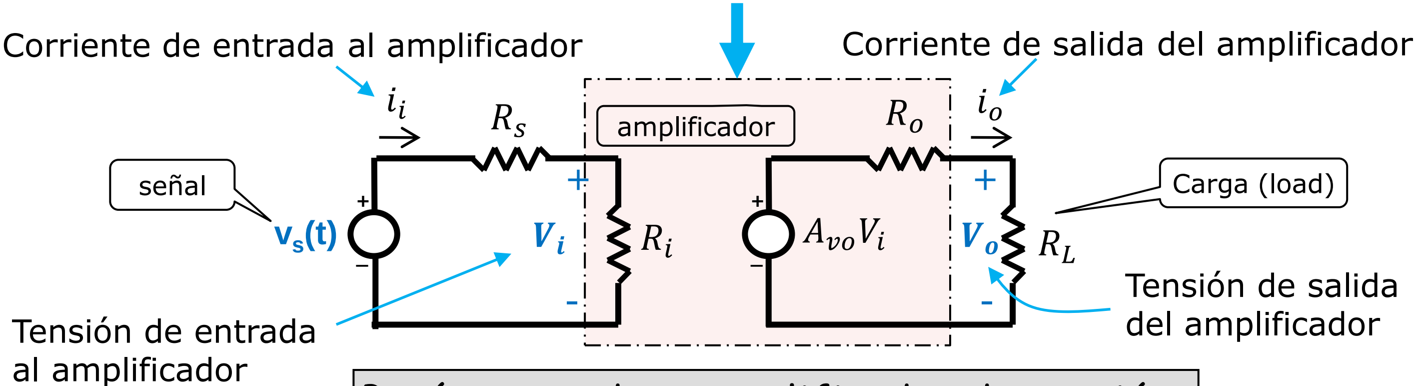


Modelo equivalente del amplificador de tensión





Modelo equivalente del amplificador de tensión



Parámetros de un amplificador de tensión:

R_i resistencia de entrada

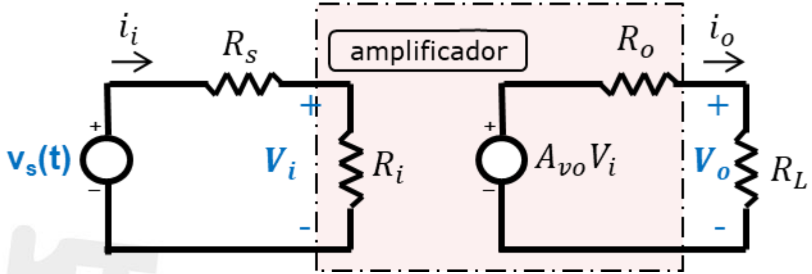
R_o resistencia de entrada

$$A_{v0} = \left.\frac{v_o}{v_i}\right)_{i_o=0} \equiv \text{ganancia de tensión en vacío}$$

Cuando $R_L = \infty$ decimos que el amplificador está "en vacio" (la o es de "open")

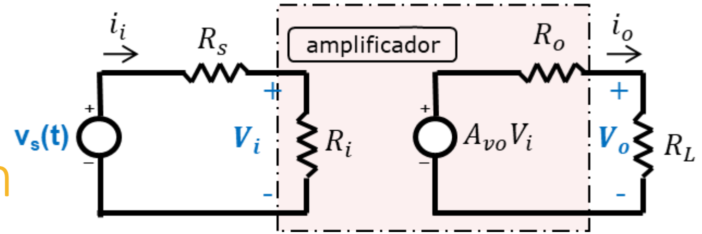
sin el efecto de R_L, $i_o = 0$ (pues $R_L = \infty$)

Modelo equivalente del amplificador de tensión



- Se define A_{v0} como el cociente de las amplitudes de tensión $^{V_o}/_{V_i}$ y sin conectar la carga R_L ($R_L = \infty$)
  - $A_{v0} = {}^{V_o}/_{V_i}$ (ojo: V_0 **sin conectar** R_L)
  - $\boldsymbol{A_{v0}}$ **es la ganancia en vacío o en abierto** (aquí ganancia de tensión), y representa la ganancia del amplificador sin el efecto de carga de salida ($R_L = \infty$)
- Con este esquema podemos calcular varias **ganancias interesantes**
  - G de tensión del amplificador, $\boldsymbol{A_v} = {}^{V_0}/_{V_i}$ (ojo: V_0 **con** R_L**conectado**)
  - G de tensión del circuito, $\boldsymbol{A_v^*} = {}^{V_0}/_{V_s}$ (ojo: V_0 **con** R_L**conectado**)
  - Ganancia de corriente del amplificador, $\boldsymbol{A_I} = {}^{I_o}/_{I_i}$
  - Ganancia de potencia del amplificador, $\boldsymbol{A_P} = {}^{P_o}/_{P_i}$

Problema 1. Ganancias en un circuito con un amplificador de tensión



- Ganancia de tensión **del amplificador**, $A_v = {}^{V_0}/_{V_i}$

$$V_o = A_{vo} V_i \frac{R_L}{R_L + R_o} \quad luego\ \boldsymbol{A_v = A_{vo} \underbrace{\frac{R_L}{R_L + R_o}}}$$

divisor de tensión de salida que reduce la ganancia con respecto a A_{vo}

y además, si $R_o = 0, entonces\ A_v = A_{vo}$

y obviamente, si $R_L = \infty, entonces\ A_v = A_{vo}$

- Ganancia de tensión **del circuito**, $A_v^* = {}^{V_0}/_{V_s}$

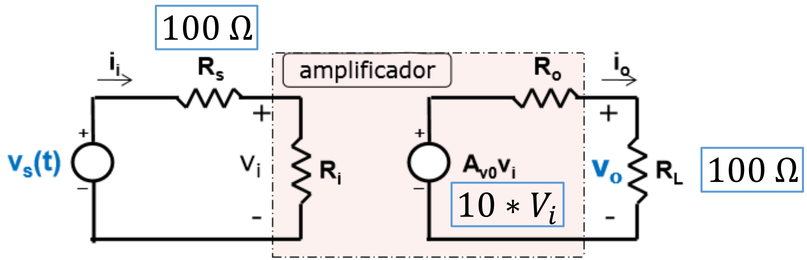
$$V_i = V_s \frac{R_i}{R_i + R_s} \rightarrow \boldsymbol{A_v^* = A_{vo} \underbrace{\frac{R_i}{R_i + R_s}} \underbrace{\frac{R_L}{R_L + R_o}}} \text{ o también } \boldsymbol{A_v^* = A_v \frac{R_i}{R_i + R_s}}$$

divisor de tensión de entrada divisor de tensión de salida

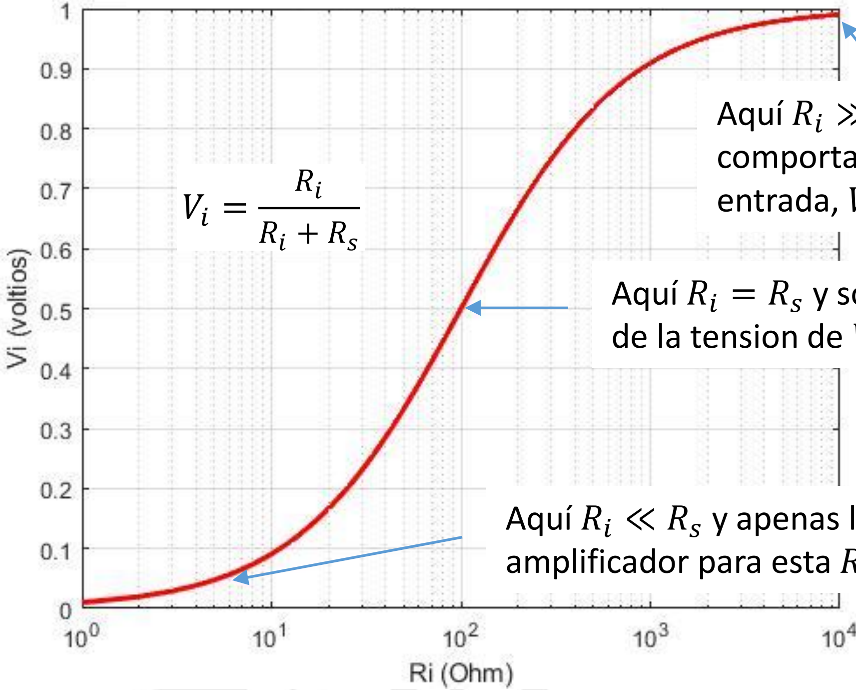
La ganancia de tensión **del circuito** es máxima cuando:

$\boldsymbol{R_i = \infty \quad R_o = 0\ (es\ un\ amplificador\ de\ tensión\ ideal)}$ en este caso el amplificador no se ve afectado por la resistencia serie de la fuente de señal ni por la resistencia de carga, y entonces $A_v^* = A_v = A_{v0}$

Una imagen vale más que 1.000 palabras... (efecto de R_i sobre V_i)



V_i en función de R_i ($R_s = 100\ \Omega, V_s = 1\ V$)



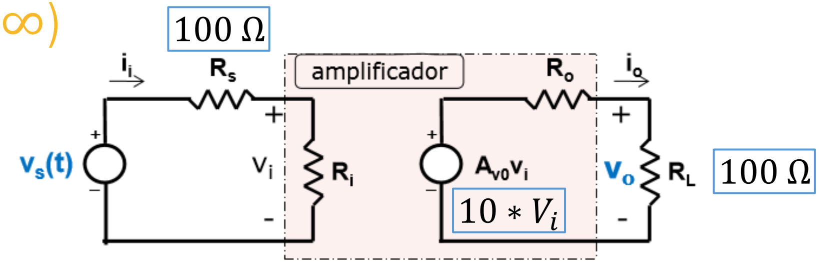
$$V_i = \frac{R_i}{R_i + R_s}$$

Aquí $R_i \gg R_s$ y el amplificador se comporta como casi ideal a la entrada, $V_i \cong V_s$

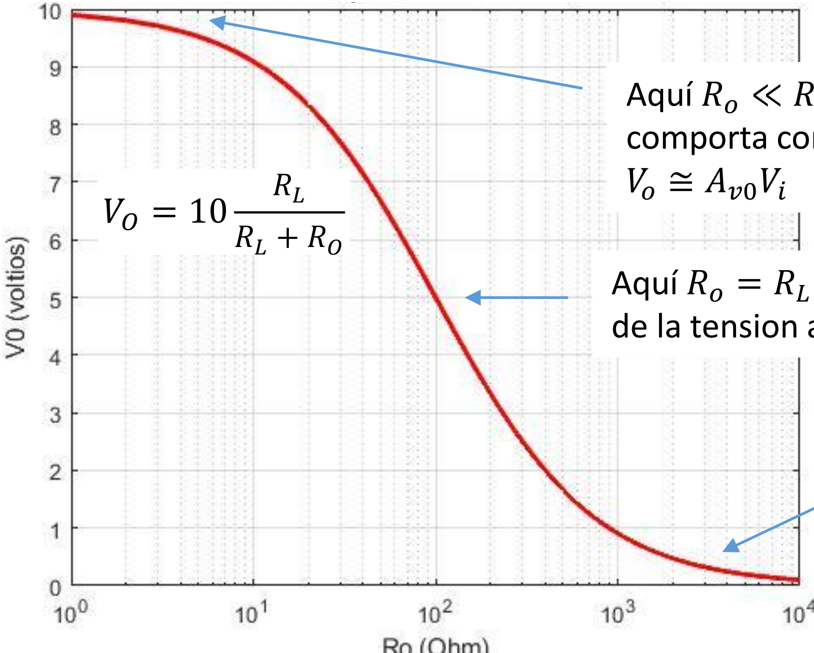
Aquí $R_i = R_s$ y solo llega la mitad de la tension de V_s a V_i

Aquí $R_i \ll R_s$ y apenas llega V_s a V_i, este amplificador para esta R_s es una castaña

Una imagen vale más que 1.000 palabras... (efecto de R_o sobre V_o, con $R_i = \infty$)



V_o en función de R_o ($V_s = 1\ V, R_s = 100\ \Omega, R_i = \infty, A_{v0} = 10$)



$$V_O = 10\frac{R_L}{R_L + R_O}$$

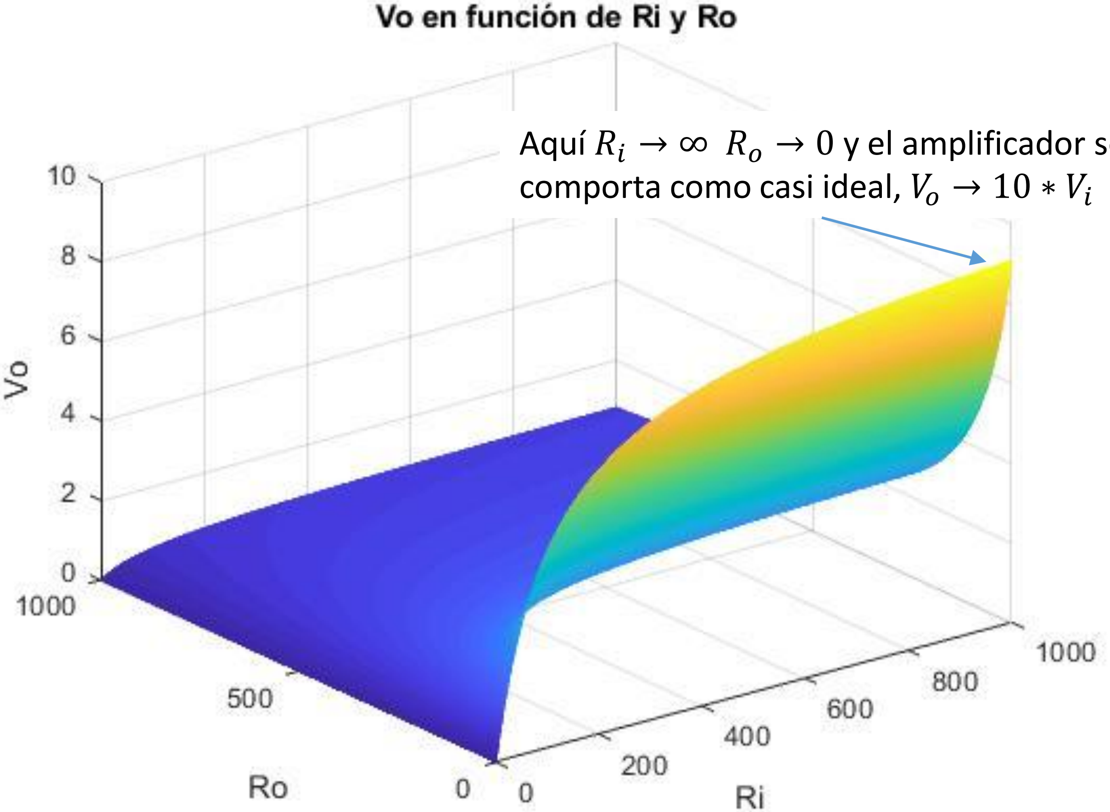
Aquí $R_o \ll R_L$ y el amplificador se comporta como casi ideal a la salida, $V_o \cong A_{v0}V_i$

Aquí $R_o = R_L$ y solo llega la mitad de la tension a V_o

Aquí $R_O \gg R_L$ y apenas llega $A_{v0}V_i$ a V_0, este amplificador para esta R_L es también una castaña

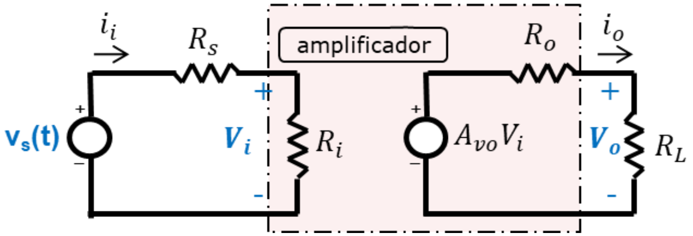
Y ahora con todo, efecto conjunto de R_i y R_o sobre V_o

$$V_O = V_s \frac{R_i}{R_i + R_s} 10 \frac{R_L}{R_L + R_O}$$



Aquí $R_i \to \infty$ $R_o \to 0$ y el amplificador se comporta como casi ideal, $V_o \to 10 * V_i$

Otras ganancias en un circuito con un amplificador de tensión



- Ganancia de corriente del amplificador, $A_I = {}^{I_o}/_{I_i}$

$$\boxed{A_I = {}^{I_o}/_{I_i} = \frac{{}^{V_0}/_{R_L}}{{}^{V_i}/_{R_i}} = \boldsymbol{A_v \frac{R_i}{R_L}}}$$

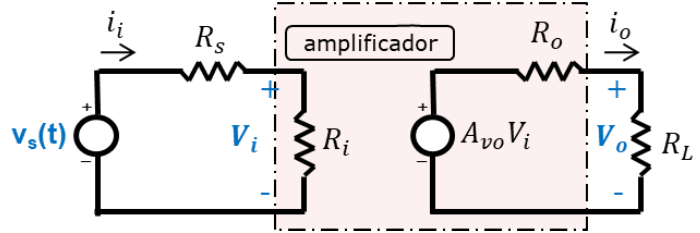
O bien, como $A_v = A_{vo}\,\frac{R_L}{R_L + R_o}$ entonces $\boldsymbol{A_I} = A_v \frac{R_i}{R_L} = A_{vo}\,\frac{R_L}{R_L + R_o}\frac{R_i}{R_L} = \boldsymbol{A_{vo}\,\frac{R_i}{R_o + R_L}}$

- Ganancia de potencia del amplificador, $A_P = {}^{P_o}/_{P_i}$

$$\boxed{A_P = {}^{P_o}/_{P_i} = \frac{V_0 I_0}{V_i I_i} = \boldsymbol{A_v A_i}}$$

O bien, como $A_v = A_{vo}\,\frac{R_L}{R_L + R_o}$ y $A_i = A_{vo}\,\frac{R_i}{R_o + R_L}$ entonces $\boldsymbol{A_P = A_{v0}^{\,2}\,\frac{R_i R_L}{(R_L + R_o)^2}}$

Otras ganancias en un circuito con un amplificador de tensión



- Y si nos pidieran la ganancia de potencia del circuito, $A_P^* = {}^{P_o}/_{P_S}$

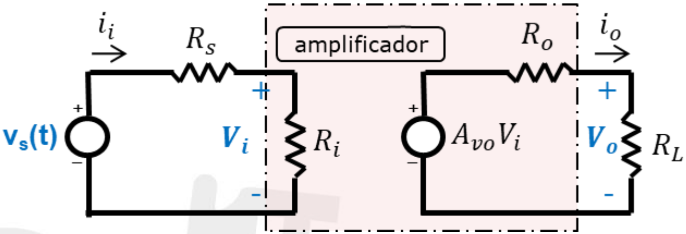
$$A_P^* = {}^{P_o}/_{P_S} = \frac{V_o I_o}{V_s I_s} = A_v^* \frac{I_o}{I_s} = A_v^* \frac{I_o}{I_i} = A_v^* \boldsymbol{A_i}$$

Problema 2

- La tensión de salida de un amplificador cae en un 20% al conectar una carga de 1K (con respecto a cuando no hay carga, o “en vacío”). Determinar el valor de la resistencia de salida del amplificador.

- Nota: este procedimiento se emplea habitualmente para determinar experimentalmente la resistencia de salida de un amplificador.

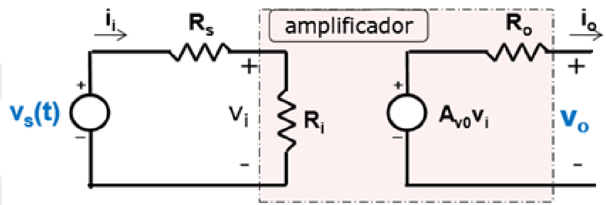
Medida experimental de la resistencia de salida de un amplificador (problema 2)



- Calcular R_o si al conectar una carga de 1K la tensión de salida V_o cae un 20%

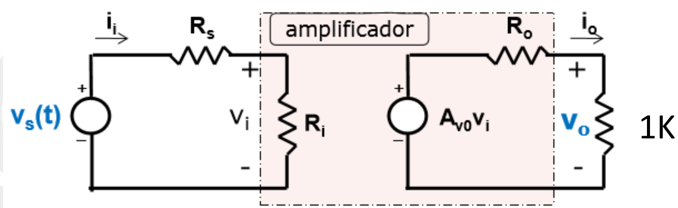
- Sin carga, la salida tendrá este valor (pues no hay corriente de salida):

$$V_o = A_{v0}V_i$$



- Y con una carga de 1K, la salida tendrá este otro valor (se formará un divisor resistivo):

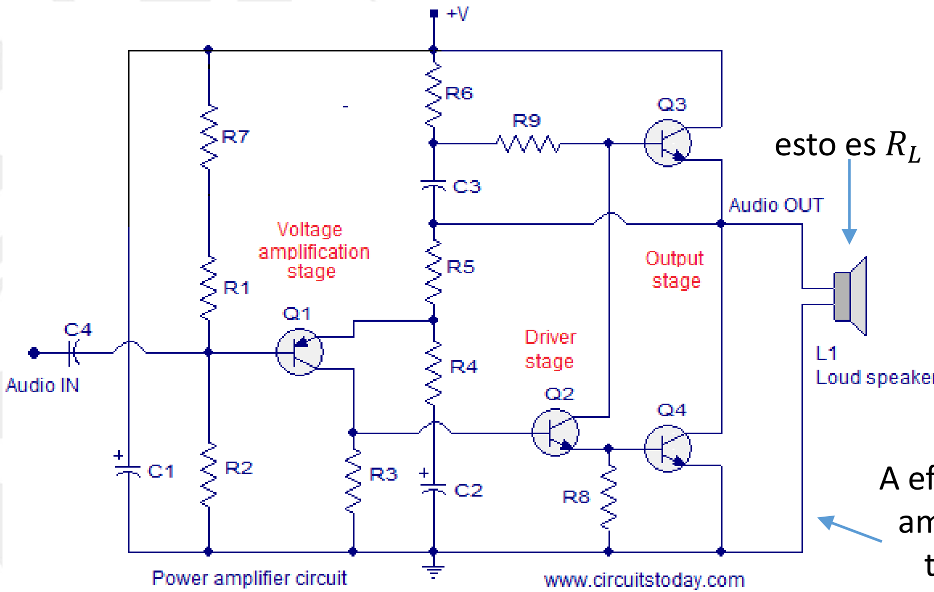
$$0{,}8\, V_o = A_{v0}\, V_i\, \frac{1K}{1K + R_o}$$



Usando las dos ecuaciones anteriores, $0{,}8 = \frac{1K}{1K+R_o}$ de modo que $R_o = 250\ \Omega$

Problema 3

- Diseñar un amplificador de audio (determinar valores razonables para Avo, Ri y Ro) que tenga como entrada un micrófono que de una tensión de pico 50 mV (V_s=50mV·sen(ωt) y Rs=10K para que entregue 10 W a un altavoz de 8 Ω (esta es la carga)



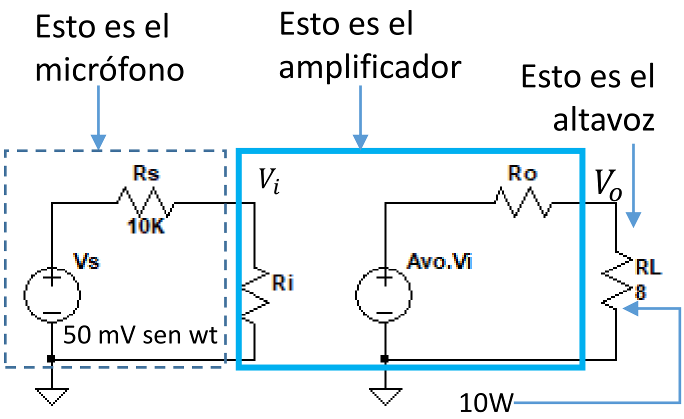
esto es R_L

A efectos ilustrativos: un amplificador de audio tiene este aspecto

Ejemplo de amplificador de tensión (problema 3)

1. Elijo una $R_i \gg R_s$ para que el micrófono no cargue mucho al amplificador (como podréis ver, el micrófono es una fuente de señal con una resistencia serie muy elevada).

Por ejemplo $\boldsymbol{R_i = 100K}$



2. Como impedancia de salida elijo $\boldsymbol{R_o = 0,8\ \Omega}$ (de nuevo, para que $R_o \ll R_L$ y no cargue la salida)

$$10\ W = P_o = \frac{\left(V_o/\sqrt{2}\right)^2}{R_L} \quad luego\ V_0 = 12{,}65\ V \text{ (tensión de pico de la salida)}$$

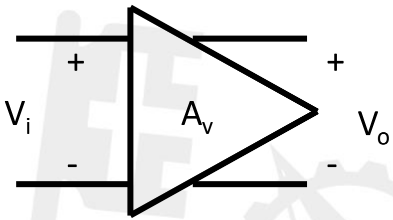
sabemos además que la **ganancia del circuito** es:

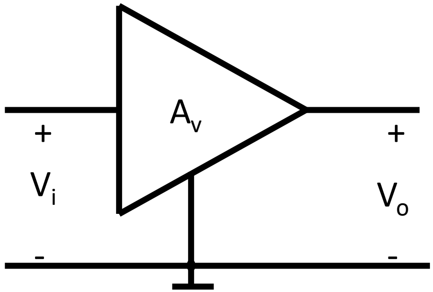
$$A_v^* = V_0/V_s = A_{vo}\,\frac{R_i}{R_i + R_s}\,\frac{R_L}{R_L + R_o} \text{ y sustituyendo valores}$$

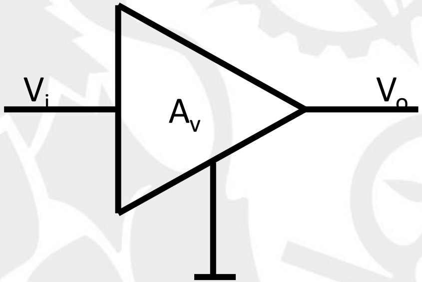
$$12{,}65\ V/50\ mV = A_{vo}\,\frac{100K}{100K + 10K}\,\frac{8}{8 + 0{,}8} \quad obtengo\ \boldsymbol{A_{vo} = 306{,}1\ V/V}$$

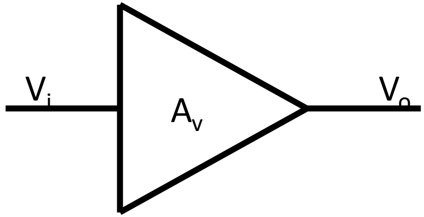
Amplificación

- Símbolos del amplificador empleados









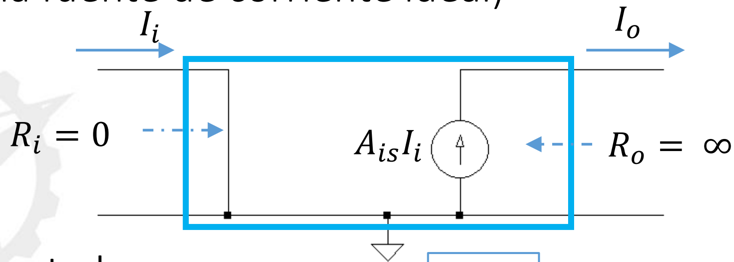
Amplificador de corriente

- Su objetivo es amplificar la corriente de la señal de entrada

$$A_i = \frac{I_o}{I_i}$$

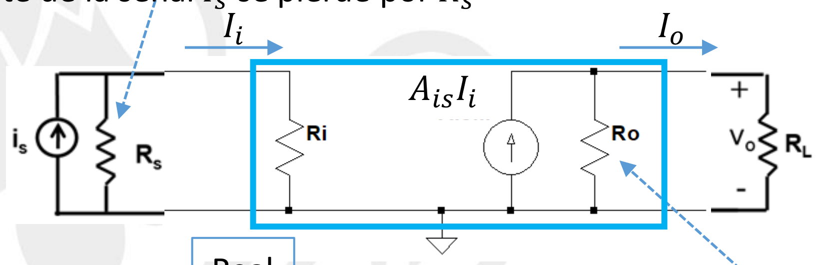
Ganancia de corriente en cortocircuito $A_{is} = \left.\frac{I_o}{I_i}\right|_{V_o=0}$

- El amplificador de corriente ideal tiene resistencia de entrada 0 (deja entrar toda la corriente de la señal) y resistencia de salida infinita (funciona como una fuente de corriente ideal)
  - Ideal ≡ $R_i = 0 \quad R_o = \infty$



Ideal

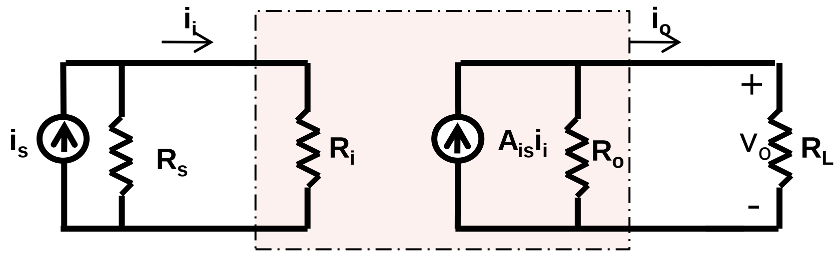
En el amplificador de corriente real, parte de la corriente de la señal I_s se pierde por R_s



Real

y parte de la corriente amplificada $A_{is}I_i$ se pierde por R_o

Problema 4: amplificador de corriente



Para el circuito de la figura, donde R_i resistencia de entrada del amplificador de corriente, R_o su resistencia de salida, y $A_{is} = \left.\frac{i_o}{i_i}\right)_{v_o=0}$ la ganancia de corriente en cortocircuito, se pide :

Cuando $R_L = 0\,\Omega$ (la s es de "short")

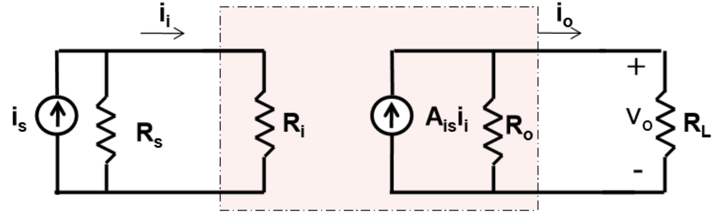
1) Calcular $A_i = \frac{i_o}{i_i}$ y $\frac{i_o}{i_s}$

2) ¿Qué deben cumplir R_i y R_o para que A_i sea máxima? ¿Qué vale A_i en ese caso?

3) Transformar el amplificador de corriente en uno de tensión equivalente

$\left(\text{resp } A_{v0} = A_{is}\frac{R_o}{R_i}, \text{ mismas } R_i \text{ y } R_o\right)$

Ejemplo de amplificador de corriente (problema 4)



- Ganancia de corriente **del amplificador**: $\boldsymbol{A_i}$

$$\boldsymbol{A_i = \frac{I_o}{I_i}} \qquad I_o = \boxed{A_{is} I_i \frac{1/R_L}{1/R_L + 1/R_o}} = A_{is} I_i \frac{R_o}{R_L + R_o} \longrightarrow \boxed{\boldsymbol{A_i = A_{is} \frac{R_o}{R_L + R_o}}}$$

Recordad, esto es un divisor de corriente

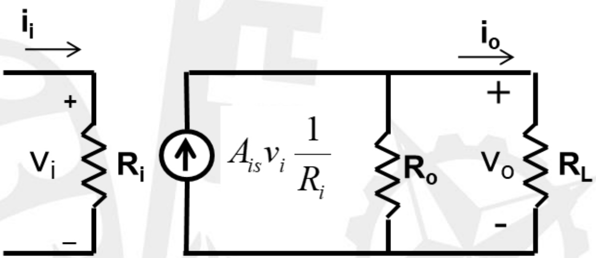
- Ganancia de corriente **del circuito**: $\boldsymbol{A_i^* = \frac{I_o}{I_s}}$ $\quad I_i = I_s \frac{R_s}{R_i + R_s}$

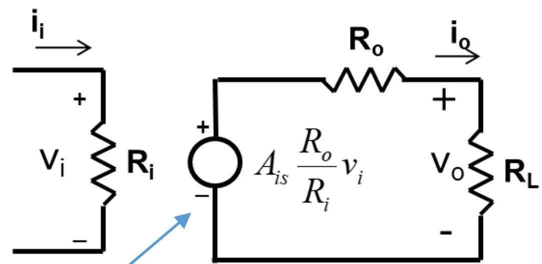
$$I_o = A_{is} I_s \underbrace{\frac{R_s}{R_i + R_s}}_{\text{divisor de corriente de entrada}} \underbrace{\frac{R_o}{R_L + R_o}}_{\text{divisor de corriente de salida}} \longrightarrow \boldsymbol{A_i^* = A_{is} \frac{R_s}{R_i + R_s} \frac{R_o}{R_L + R_o}}$$

$$\boxed{\begin{gathered} \mathit{Ganancia\ m\acute{a}xima\ si\ es\ un\ amplificador\ de\ corriente\ ideal} \\ (R_i = 0\,, R_o = \infty) \rightarrow A_i^* = A_i = A_{is} \end{gathered}}$$

Ejemplo de amplificador de corriente (problema 4)

- Nos piden convertir el amplificador de corriente en uno de tensión equivalente (el truco es convertir la fuente de corriente de la salida en una fuente de tensión, recordad el paso de Thevenin a Norton)





La tensión V_i será

$$V_i = I_i R_i$$

Y el generador de corriente pasará a ser uno de tensión que valdrá

$$A_{is} I_i R_o = \boldsymbol{A_{is} \frac{V_i}{R_i} R_o} = \boldsymbol{A_{is} \frac{R_o}{R_i}} V_i$$

entonces $\boldsymbol{A_{vo} = \frac{V_o}{V_i}(R_L = \infty) = A_{is} \frac{R_o}{R_i}}$

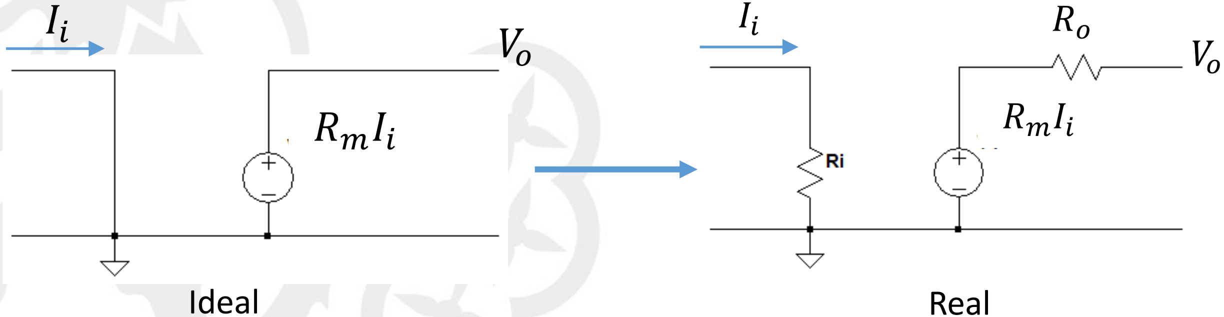
Amplificador de transresistencia

- Su objetivo es convertir la corriente de la señal de entrada en una tensión de salida

$R_m = \frac{V_o}{I_i}$ transresistencia en vacío (Ohmios)

  - Permiten que una fuente de señal diseñada para entregar corriente pueda ser convertida a una salida en tensión
  - Un ejemplo típico es el fotodetector que recibe la señal de una fibra óptica (si tenéis fibra en casa, tenéis un amplificador de transresistencia)

- El amplificador de transresistencia ideal tiene impedancia de entrada 0 (deja entrar toda la corriente de la señal) e impedancia de salida 0 (funciona como una fuente de tensión ideal)
  - Ideal → $R_i = 0 \quad R_o = 0$

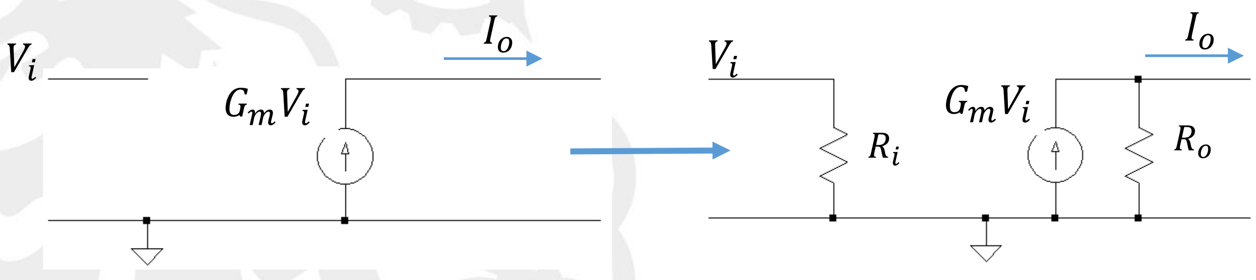


Amplificador de transconductancia

- Su objetivo es convertir la tensión de la señal de entrada en una corriente de salida

$G_m = \frac{I_o}{V_i}$ transconductancia en cortocircuito (Siemens)

- El amplificador de transconductancia ideal tiene impedancia de entrada infinita (no carga la amplitud en voltios del generador de señal) e impedancia de salida infinita (funciona como una fuente de corriente ideal)
    - Ideal → $R_i = \infty \quad R_o = \infty$

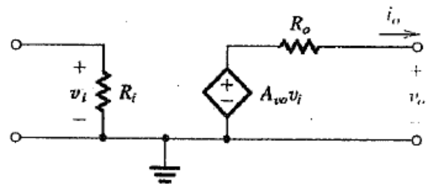
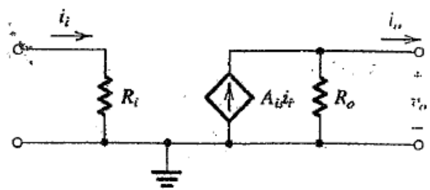
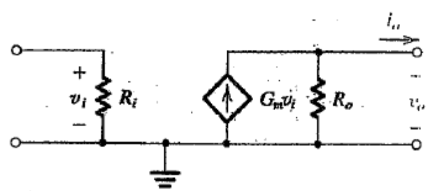
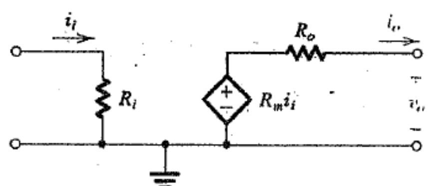


Ideal

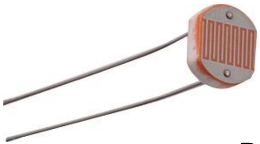
Real

Resumen tipos de amplificadores

Table 1.1 THE FOUR AMPLIFIER TYPES

Type	Circuit Model	Gain Parameter	Ideal Characteristics
Voltage Amplifier		Open-Circuit Voltage Gain $A_{vo} \equiv \left.\frac{v_o}{v_i}\right\|_{i_o = 0}$ (V/V)	$R_i = \infty$ $R_o = 0$
Current Amplifier		Short-Circuit Current Gain $A_{is} \equiv \left.\frac{i_o}{i_i}\right\|_{v_o = 0}$ (A/A)	$R_i = 0$ $R_o = \infty$
Transconductance Amplifier		Short-Circuit Transconductance $G_m \equiv \left.\frac{i_o}{v_i}\right\|_{v_o = 0}$ (A/V)	$R_i = \infty$ $R_o = \infty$
Transresistance Amplifier		Open-Circuit Transresistance $R_m \equiv \left.\frac{v_o}{i_i}\right\|_{i_o = 0}$ (V/A)	$R_i = 0$ $R_o = 0$

Problema 5

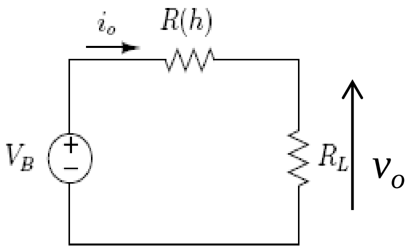


Una **fotoresistencia** es un sensor cuya resistencia varía con la intensidad luminosa *h* según $R(h)=\alpha/h$ con $\alpha = 10^4$ en Ω·fc (parámetro constructivo) y *h* en fc (footcandle)

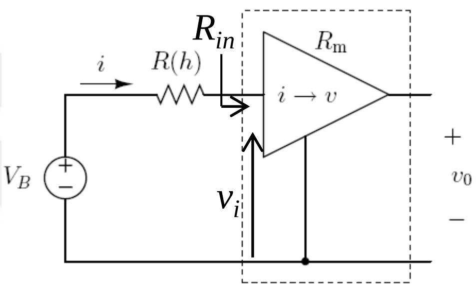
Nota: 1 fc o foot-candle corresponde a la intensidad luminosa que da una vela a una distancia de 1 pie=304,8mm. La unidad del SI es el lux≈1/10 fc. La intensidad de la luna llena es 0,01 fc ≈ 0,1 lux mientras que a pleno día es del orden de 10.000 fc.

Una forma de obtener una tensión proporcional a *h* es alimentar la fotoresistencia con tensión y medir su corriente. Se sugiere el siguiente circuito:

1. **Determinar la tensión de salida v_o y bajo qué condiciones es lineal con h. En este supuesto calcular la sensibilidad del circuito acondicionador.**



Otra forma es utilizando un **amplificador de transresistencia** con característica ideal $v_o(t)=R_m \cdot i(t)$ y resistencia de entrada R_{in} (como el de la siguiente figura).



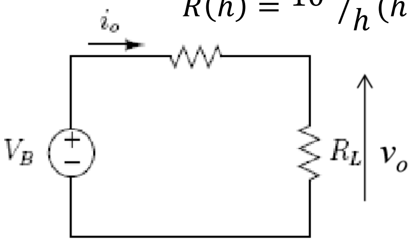
2. **¿Qué valor debe tener R_{in} para que v_o sea proporcional a la intensidad luminosa?**

3. **¿Qué sensibilidad tiene el nuevo circuito en ese caso? ¿De qué factores depende?**

Problema 5

- Primer circuito: mediante una fotoresistencia y un divisor de tensión

$$R(h) = {}^{10^4}/_{h} \; (h \equiv intensidad\ luminosa\ en\ foot-candle)$$



$$V_o = V_B \frac{R_L}{R_L + R(h)} = V_B \frac{R_L}{R_L + {}^{10^4}/_{h}} = V_B \frac{R_L\, h}{10^4 + R_L\, h}$$

$$si\ R(h) \gg R_L\ \ entonces\ \ V_o \approx \boldsymbol{V_B \frac{R_L}{10^4}}\ h$$

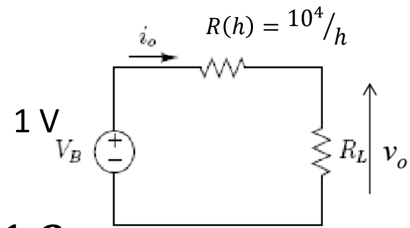
$$y\ la\ Sensibilidad\ del\ circuito\ es\ \boldsymbol{S = V_B \frac{R_L}{10^4}}$$

Nota: Si $R(h) \gg R_L$, es como alimentar R_L con una fuente de corriente $\frac{V_B}{R(h)}$ y resistencia $R(h)$

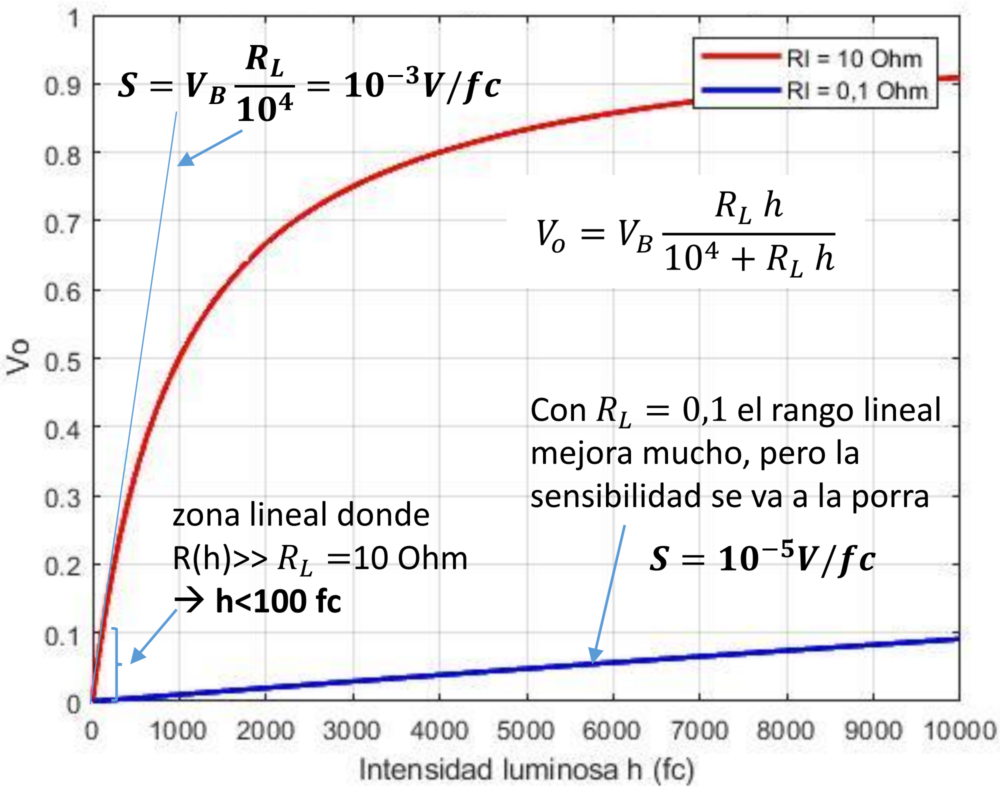
Este circuito tiene **<u>limitaciones</u>**:

- Para que sea lineal debe cumplirse $R(h) \gg R_L$ y esto requiere una R_L baja, lo que da lugar a una baja sensibilidad ($\boldsymbol{S = V_B \frac{R_L}{10^4}}$)
- $R(h) \gg R_L$ será posible con intensidades de luz bajas ($R(h) \uparrow$), pero a pleno sol (h=10.000) será imposible. Esto da lugar a un rango dinámico lineal limitado
- La limitación fundamental viene de que la fuente de señal ($\frac{V_B}{R(h)}$) tiene una resistencia paralelo $R(h)$ no bastante elevada en algunos rangos de luz, y se ve afectada por la carga R_L

Problema 5

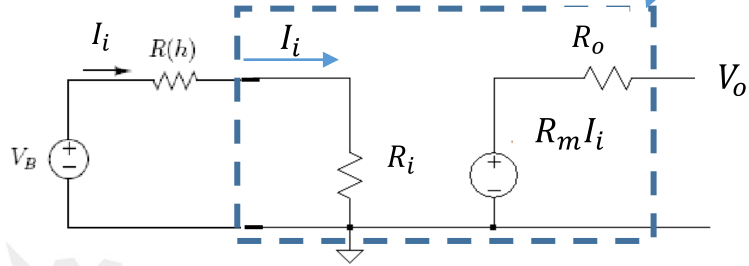


V_o en función de h, para $R_L = 10\ \Omega$ o $0,1\ \Omega$



Problema 5

- Segundo circuito: mediante una fotoresistencia y **amplificador en transresistencia**



$$I_i = \frac{V_B}{R_i + R(h)} \quad entonces \quad V_0 = R_m I_i = R_m \frac{V_B}{R_i + R(h)}$$

Si $R_i \ll \mathrm{R(h)} \rightarrow \; V_0 \approx R_m \frac{V_B}{R(h)} = \frac{\boldsymbol{R_m V_B}}{\boldsymbol{\alpha}} \; h$

$y \; la \; sensibilidad \; del \; circuito \; es \; \rightarrow \boldsymbol{S} = \frac{\boldsymbol{R_m V_B}}{\boldsymbol{\alpha}}$

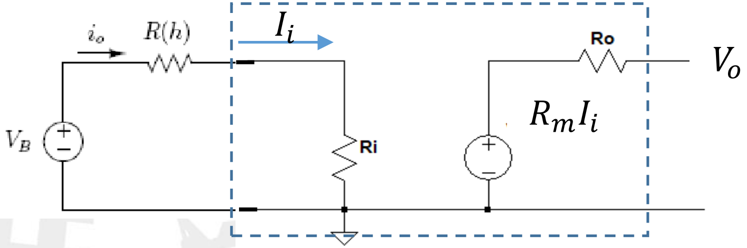
<u>Podemos tener una S elevada incrementando la ganancia R_m del amplificador</u>

La condición $\mathrm{R(h)} \gg R_i$ se cumple para un amplificador en transresistencia ideal, cuya $R_i = 0$

Si $R_i = 0$, $se \; cumple \; que \; V_0 = \frac{R_m V_B}{\alpha} \; h \;\; \forall h \;\; y \; el \; circuito \; es \; lineal$ para cualquier iluminación

Además, si es ideal $R_o = 0 \; y \; la \; salida \; no \; depende \; de \; la \; carga \; R_L \; que \; pongamos$

Sensor de luz mediante amplificador en transresistencia (problema 5)

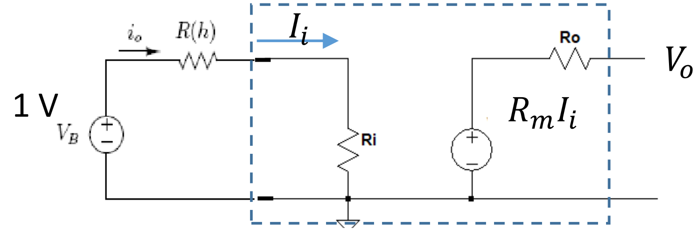


Veamos lo que pasa con los datos que nos dan: luz de luna 0,1 fc, luz del sol 10^4 fc

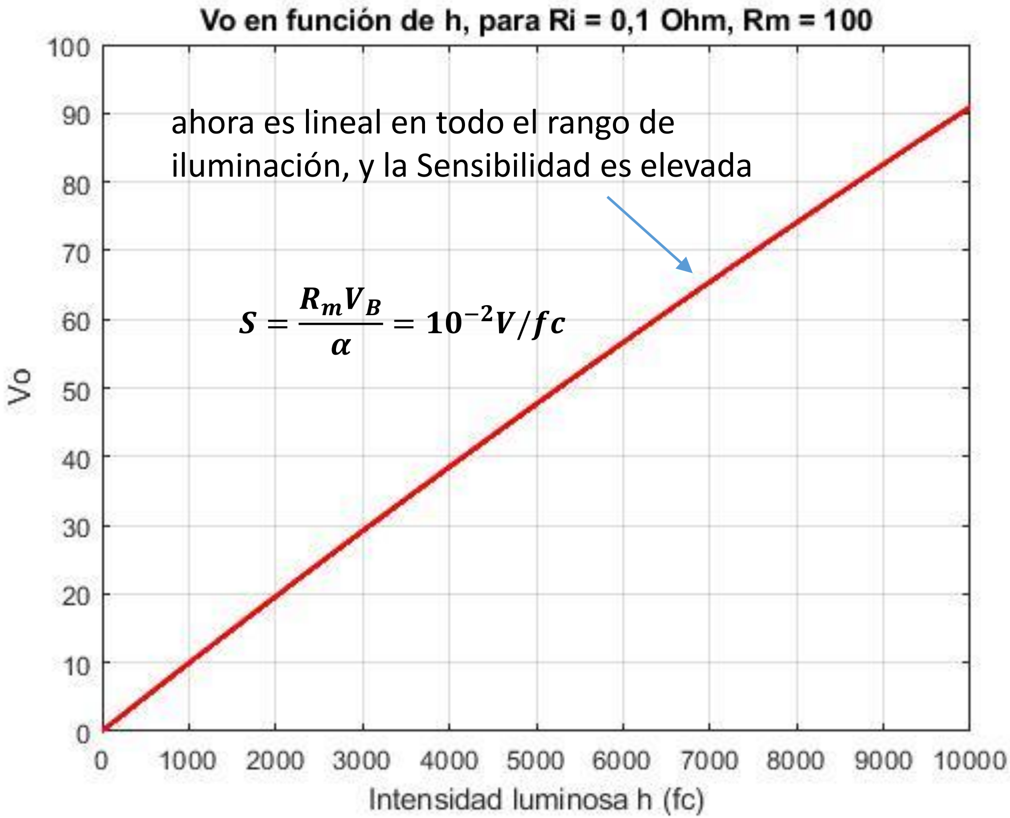
¿Valor de R_i máxima para que la salida sea lineal a la luz del sol?:

Caso peor → R(h= 10^4 fc) = 1 Ω

luego para cumplir $R_i \ll \mathrm{R(h)}$ → $R_i \leq 0{,}1\ Ohm$



i_o
$R(h)$
I_i
Ro
V_o
1 V
V_B
Ri
$R_m I_i$



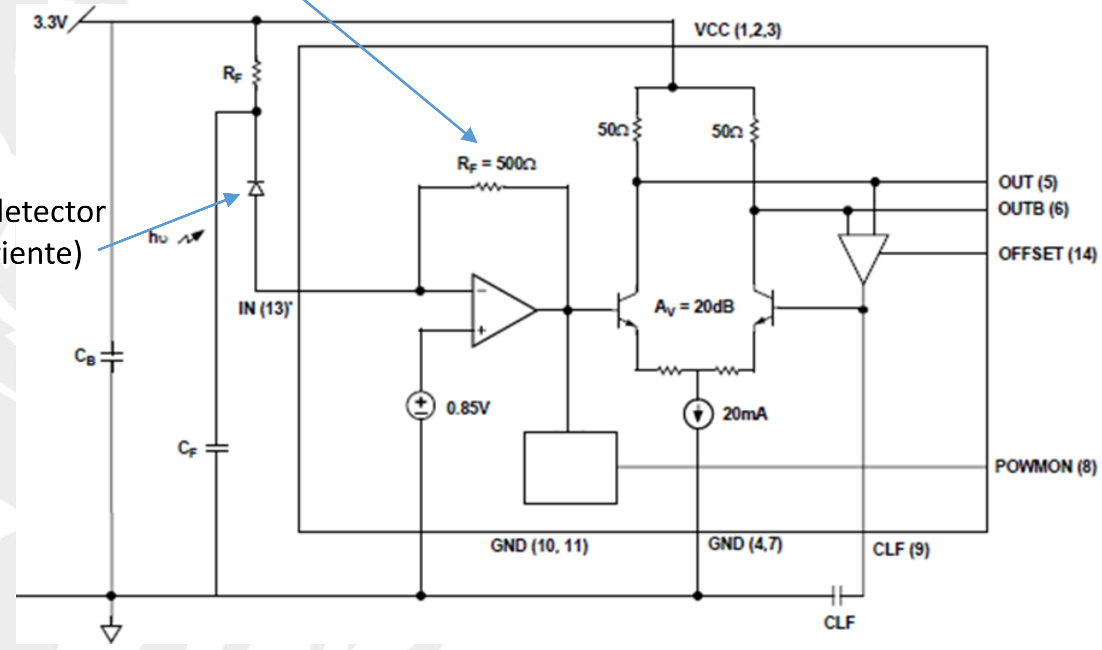
Vo en función de h, para Ri = 0,1 Ohm, Rm = 100
ahora es lineal en todo el rango de iluminación, y la Sensibilidad es elevada
$S = \frac{R_m V_B}{\alpha} = 10^{-2} V/fc$
Vo
Intensidad luminosa h (fc)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
1000
2000
3000
4000
5000
6000
7000
8000
9000
10000

Y solo a modo de ilustración; un amplificador en transresistencia para un receptor de fibra óptica

Esta es la R que marca el valor de la transresistencia

Analog Devices ADN2820 (10 Gb/sg)

Este es el fotodetector (fuente de corriente)



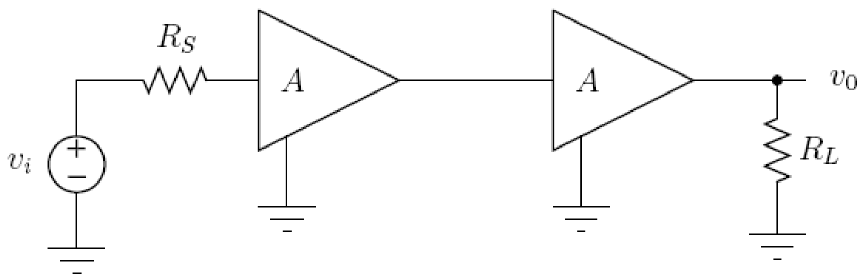
Problema 6: amplificadores en cascada

La figura muestra un circuito formado por dos **amplificadores de tensión** iguales conectados en serie. Las características de estos amplificadores son:

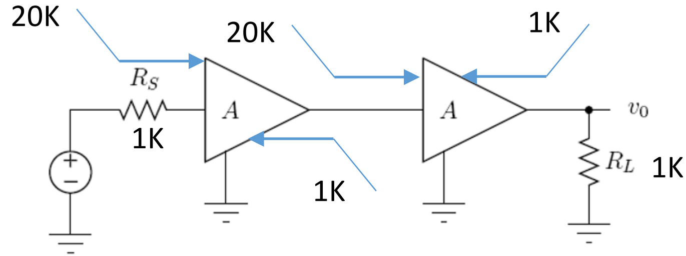
- Ganancia de tensión A = 10 V/V
- Resistencia de entrada R_{in} = 20 kΩ y resistencia de salida R_{out} = 1kΩ
- Además R_s = 1 kΩ y R_L = 10 kΩ.

1. Determine la ganancia de tensión del circuito (v_o/v_i)

2. ¿Cambiará la ganancia si conectamos una resistencia en paralelo con RL? ¿Por qué?



Problema 6



notación actualizada para mantener coherencia con las fórmulas previas $\rightarrow v_s$

(es mejor deducirlo cuando hacemos el problema...)

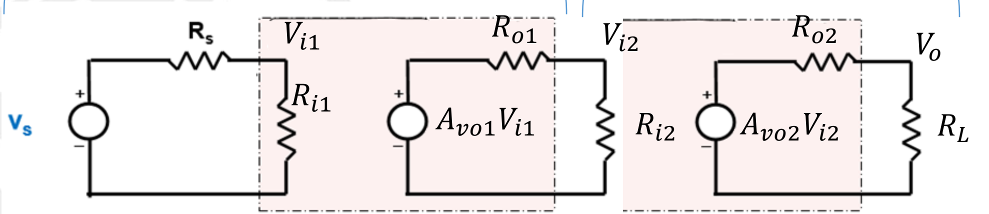
$$\textit{recordemos que}\ \ A_v^* = {}^{V_0}/_{V_s} = A_{vo}\frac{R_i}{R_i+R_s}\frac{R_L}{R_L+R_o} \quad \text{y que } A_v = A_{vo}\frac{R_L}{R_L+R_o}$$

calculemos la salida para la cascada

$$V_o = V_s \underbrace{\frac{R_{i1}}{R_{i1}+R_s} A_{vo1} \frac{R_{i2}}{R_{i2}+R_{o1}}}_{A^*_{v1}} \underbrace{A_{vo2} \frac{R_L}{R_L+R_{o2}}}_{A_{v2}}$$

esto nos da V_{i2}

y esto nos pasa de V_{i2} a V_o



No hace falta memorizar las fórmulas... razonad, esto solo es una cadena de divisores de tensión

Amplificadores de tensión en cascada (problema 6)

La ganancia de la 1ª etapa tiene en cuenta la resistencia de la fuente y la resistencia de carga de la siguiente etapa (la R_{in} de la siguiente etapa es la R_L de la primera)

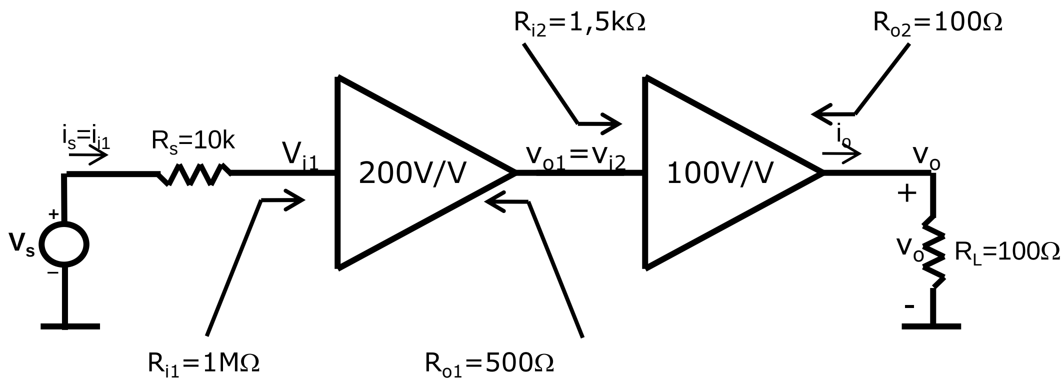
$$\boldsymbol{de\ acuerdo\ con\ lo\ anterior, la\ ganancia\ de\ la\ cascada}\ es\quad \frac{V_o}{V_s} = A^*_{v1}\, A_{v2}$$

La ganancia de la 2ª etapa NO tiene en cuenta la resistencia de salida de la etapa anterior (pues partimos ya de V_{in2}), y tiene en cuenta la resistencia de carga R_L

$$\text{Ganancia} \rightarrow \frac{V_o}{V_s} = \underbrace{\boxed{A_{vo1}\frac{R_{i1}}{R_{i1}+R_s}\frac{R_{i2}}{R_{i2}+R_{o1}}}}^{A^*_{v1}}\overbrace{\boxed{A_{vo2}\frac{R_L}{R_L+R_{o2}}}}^{A_{v2}} = \boxed{10\frac{20}{20+1}\frac{20}{20+1}}\boxed{10\frac{1}{1+1}} = 9{,}07\,.\,x\ 5 = 82{,}45$$

Y si colocamos una R en paralelo con R_L la ganancia variará (además de que lo dice el cálculo, la explicación es que al variar la carga final, como el último amplificador no es ideal, parte de la señal se pierde en la resistencia de salida de ese último amplificador)

Problema 7: amplificadores en cascada

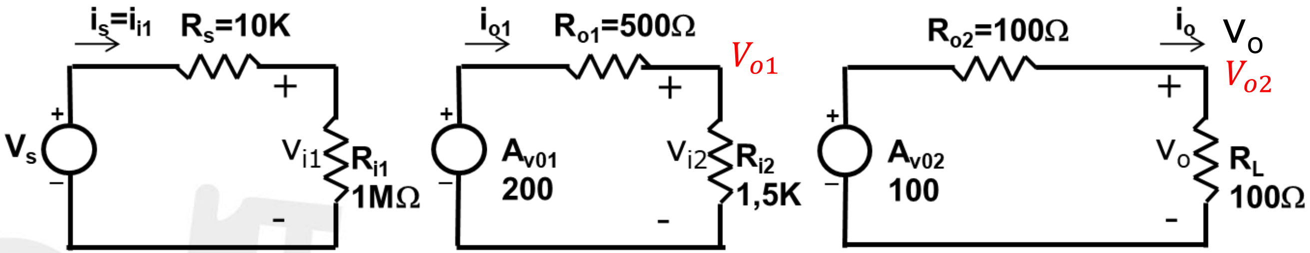


Calcular $A_v = \frac{v_o}{v_{i1}}, \frac{v_o}{v_s}, A_i = \frac{i_o}{i_s}, A_p = \frac{p_o}{p_s}$

Obtener el modelo equivalente del amplificador resultante

$$\left(\text{resp}: \frac{v_o}{v_{i1}} = 7500\frac{V}{V} \quad \frac{v_o}{v_s} \approx 7500\frac{V}{V} \quad \frac{i_o}{i_s} = 75\cdot 10^6\,\frac{A}{A} \quad \frac{p_o}{p_{i1}} = 5{,}625\cdot 10^{11}\,\frac{W}{W} \quad \middle| \quad R_i = 1M\Omega \quad R_o = 100\Omega \quad A_{vo} = \left.\frac{v_o}{v_{i1}}\right)_{i_{o2}=0} = 15\cdot 10^3\,\frac{V}{V} \right)$$

Amplificadores de tensión en cascada (problema 7)



$$A_{v1}=\frac{v_{o1}}{v_{i1}}=A_{vo1}\frac{R_{i2}}{R_{i2}+R_{o1}}=150\frac{V}{V}\quad(\neq A_{vo1})$$

$$A_{v2}=\frac{v_{o2}}{v_{i2}}=A_{vo2}\frac{R_L}{R_L+R_{o2}}=50\frac{V}{V}\quad(\neq A_{vo2})$$

$$A_v=\frac{v_o}{v_{i1}}=\frac{v_o}{v_{o1}}\frac{v_{o1}}{v_{i1}}=A_{v1}A_{v2}=7500\frac{V}{V}$$

$$\frac{v_o}{v_s}=\frac{v_o}{v_{o1}}\frac{v_{o1}}{v_{i1}}\frac{v_{i1}}{v_s}=A_{v1}A_{v2}\frac{R_{i1}}{R_{i1}+R_s}\approx 7500\frac{V}{V}$$

Cálculo de $\frac{\boldsymbol{V_o}}{\boldsymbol{V_{i1}}}$ $\boldsymbol{y\ de}$ $\frac{\boldsymbol{V_o}}{\boldsymbol{V_s}}$:

Insisto, no hace falta memorizar las fórmulas... razonad, esto solo es una cadena de divisores de tensión

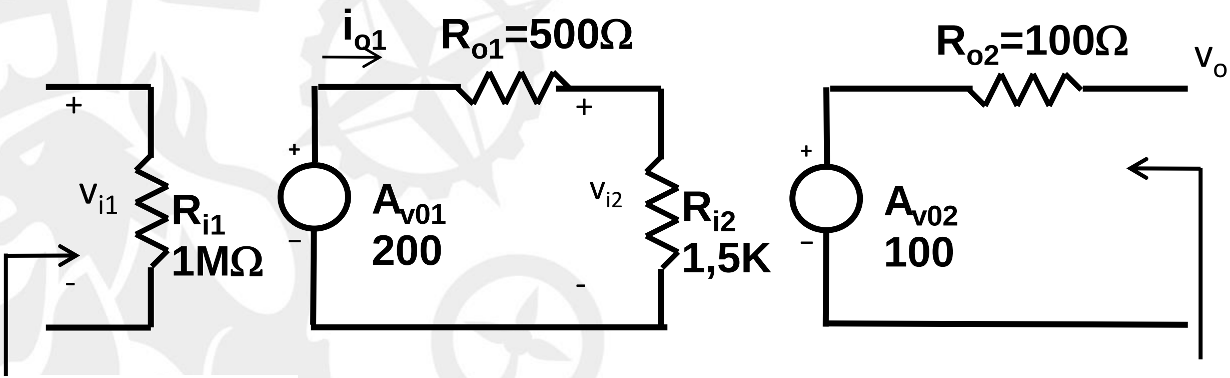
- Para ser exactos $\frac{V_o}{V_s}$ es como en el problema anterior, $\frac{\boldsymbol{V_o}}{\boldsymbol{V_s}}=\ \boldsymbol{A_{v1}^{*}\ A_{v2}}$

$$\frac{\boldsymbol{V_o}}{\boldsymbol{V_s}}=\frac{R_{i1}}{R_{i1}+R_s}A_{vo1}\frac{R_{i2}}{R_{i2}+R_{o1}}\ A_{vo2}\ \frac{R_L}{R_L+R_{o2}}=\frac{1000}{1000+10}\ 150.50\ =\mathbf{7425}$$

Modelo equivalente de la cascada de amplificadores (problema 7)

Calcular el amplificador equivalente. Pasos a seguir:

1. Se parte del amplificador sin fuente de señal ($R_s = 0$) ni carga ($R_L = \infty$)
2. Calcular la resistencia de entrada y de salida (usando Thevenin)
3. Calcular la ganancia del amplificador equivalente $A_V = \frac{V_o}{V_{i1}}$



$R_{in} = R_{Th} = 1M\ \Omega$

$R_o = R_{Th} = 100\ \Omega$

Solo nos falta calcular la ganancia de este conjunto

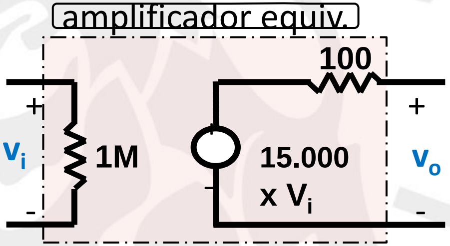
Modelo equivalente de la cascada de amplificadores (problema 7)

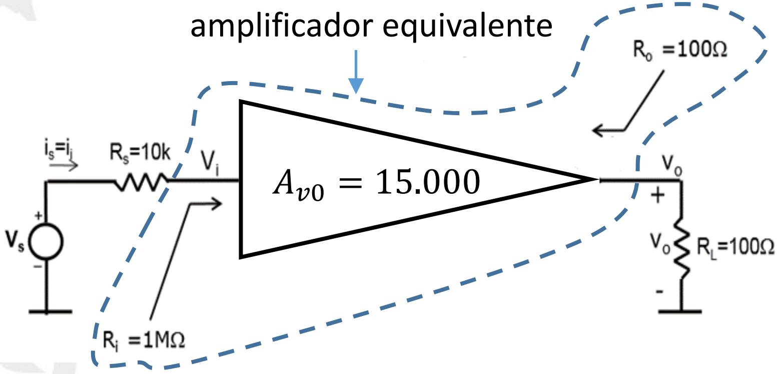
<u>Calcular el amplificador equivalente</u>: debo calcular la ganancia en vacío $\frac{V_o}{V_{i1}}$ (suponiendo que no hay carga a la salida, $R_L = \infty$)

$$\frac{\boldsymbol{V_o}}{\boldsymbol{V_{i1}}} = \underbrace{\boxed{A_{vo1}\frac{R_{i2}}{R_{i2}+R_{o1}}}}_{A_{v1}} \underbrace{\boxed{A_{vo2}\;\frac{R_L}{R_L+R_{o2}}}}_{A_{v2}(\sin carga)} = 200\;\frac{1{,}5}{1{,}5+0{,}5}\,100\,\frac{\infty}{\infty+0{,}1} =$$

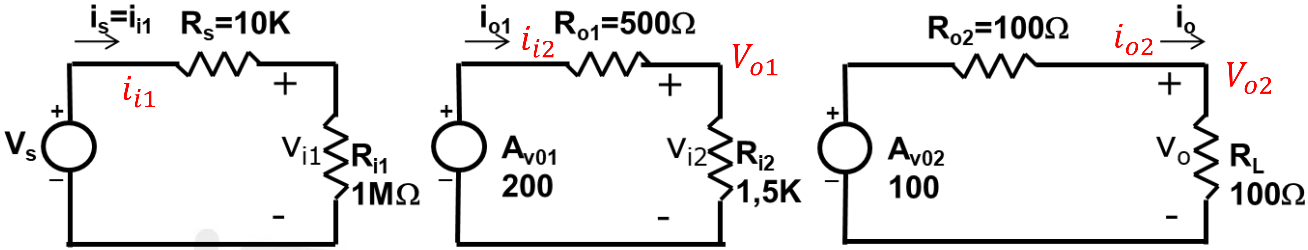
$$= 150\;x\;100 = \mathbf{15.000}$$

Y podríamos representar el circuito completo así y usar las fórmulas habituales





Amplificadores de tensión en cascada (problema 7)



$$A_{i1}=\frac{i_{o1}}{i_{i1}}=\frac{v_{o1}/R_{i2}}{v_{i1}/R_{i1}}=A_{v1}\frac{R_{i1}}{R_{i2}}=10^5\ \frac{A}{A}$$

$$A_{i2}=\frac{i_{o2}}{i_{i2}}=\frac{v_{o2}/R_L}{v_{i2}/R_{i2}}=A_{v2}\frac{R_{i2}}{R_L}=750\frac{A}{A}$$

$$A_i=\frac{i_{o2}}{i_{i1}}=\frac{i_{o2}}{i_{o1}}\frac{i_{o1}}{i_{i1}}=A_{i1}A_{i2}=75\cdot10^6\ \frac{A}{A}$$

Cálculo de $\frac{I_o}{I_s}$

<u>También podemos usar el amplificador equivalente:</u>

$$A_i=\frac{I_o}{I_i}=A_{vo}(del\ amp\ equivalente)\frac{R_i}{R_o+R_L}=$$

$$15.000\ \frac{1000}{0,1+0,1}=75\ 10^6$$

$$A_{p1}=\frac{p_{o1}}{p_{i1}}=\frac{v_{o1}\cdot i_{o1}}{v_{i1}\cdot i_{i1}}=A_{v1}A_{i1}=1{,}5\cdot10^7\ \frac{W}{W}$$

$$A_{p2}=\frac{p_{o2}}{p_{i2}}=\frac{v_{o2}\cdot i_{o2}}{v_{i2}\cdot i_{i2}}=A_{v2}A_{i2}=3{,}75\cdot10^4\ \frac{W}{W}$$

$$A_p=\frac{p_{o2}}{p_{i1}}=\frac{v_{o2}\cdot i_{o2}}{v_{i1}\cdot i_{i1}}=A_vA_i=5{,}625\cdot10^{11}\ \frac{W}{W}$$

Cálculo de $\frac{P_o}{P_i}$

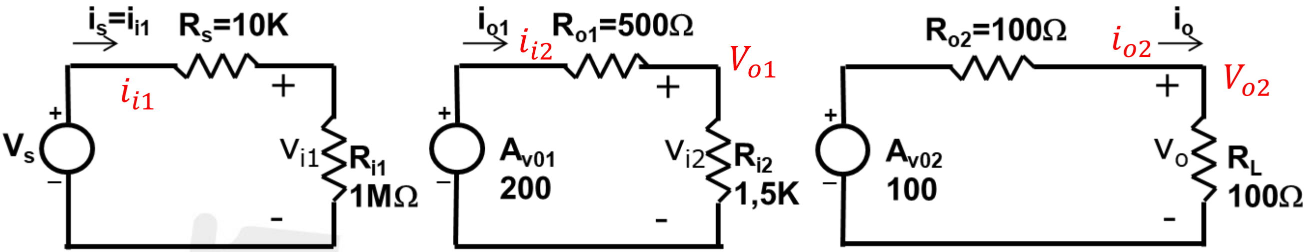
<u>También podemos usar el amplificador equivalente:</u>

$$A_P=A_{v0}{}^2\ \frac{R_iR_L}{(R_L+R_o)^2}=15.000^2\ \frac{1M\ 100}{(100+100)^2}$$

$$=5{,}625\ 10^{11}$$

También se cumple que $A_P=A_{p1}A_{p2}$

Amplificadores de tensión en cascada (problema 7)



Y si queremos calcular $\frac{\boldsymbol{P_o}}{\boldsymbol{P_s}}$ $\rightarrow$ $A_p^* = \frac{P_o}{P_s} = \frac{V_o I_o}{V_s I_{i1}} = A_v^* A_i \approx 5{,}625\ 10^{11}$

pues recordemos que $A_v^* = \frac{V_o}{V_s} = A_v \frac{R_i}{R_i + R_s} = 7425$ y que $A_i = \frac{I_o}{I_i} = 75\ 10^6$

Otra forma de hacerlo:

sabemos que $A_v^* = \frac{V_o}{V_s} = A_v \frac{R_i}{R_i + R_s}$ y que $A_P = A_v A_i$

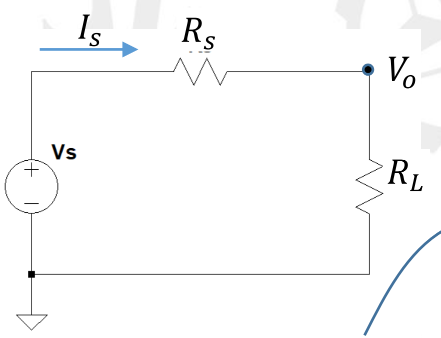
entonces $\boldsymbol{A_p^*} = A_v^* A_i = A_v \frac{R_i}{R_i + R_s} A_i = \boldsymbol{A_p \frac{R_i}{R_i + R_s}}$

y sustituyendo para nuestro problema

$$A_p^* = 5{,}625\ 10^{11} \frac{1000K}{1000K + 10K} \approx 5{,}625\ 10^{11}$$

Un caso especial de amplificador de tensión. El "buffer" de tensión, o seguidor

- Un amplificador de tensión puede tener ganancia ≤ 1 y aún así ser útil. No es algo absurdo
  - **Permite tener ganancia de potencia**, cuando la fuente de señal no puede entregar la potencia requerida en la carga (V_s puede entregar poca corriente)
  - **Permite adaptar impedancias** (permite que una fuente de señal con resistencia serie elevada se conecte a una carga con una resistencia similar o menor a la de la fuente)
- Este tipo de amplificador se llama "buffer"



NOTA: estoy suponiendo tensión eficaz

Sin el buffer pasa esto:

$$V_o = V_s \frac{R_L}{R_L + R_s} \quad de\ modo\ que\ la\ potencia\ P_{R_L}\ es$$

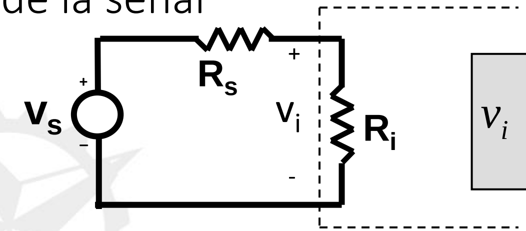
$$P_{R_L} = \frac{(V_o)^2}{R_L} = V_s^{\,2} \frac{R_L}{(R_L + R_s)^2}$$

$$\boxed{si\ R_L \ll R_s\ \ entonces\ P_{R_L} \to 0}$$

$$la\ solución\ es\ poner\ un\ buffer\ entre\ R_s (la\ fuente\ de\ señal)\ y\ R_L$$

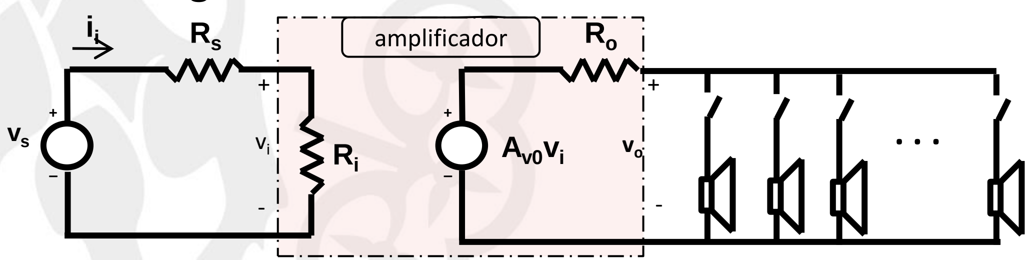
Ejemplos donde un buffer es útil

- Señales débiles con R_s variable (ej encefalograma)→ necesito R_{in} elevada
  - Evitamos ganancia variable
  - Evitamos pérdida de la señal

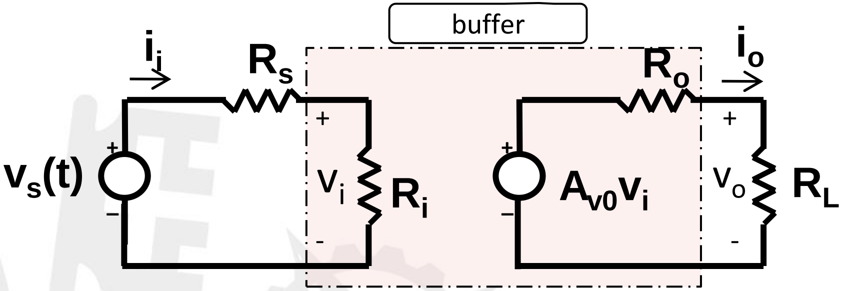


$$v_i = v_s \frac{R_i}{R_i + R_s}$$

- R_L variable → necesitamos R_o suficientemente pequeña
  - Evitamos ganancia variable



Problema 9: buffer de tensión



$$\text{si}\begin{cases} A_{v0} \rightarrow 1 \\ R_i \rightarrow \infty \\ R_o \rightarrow 0 \end{cases}$$

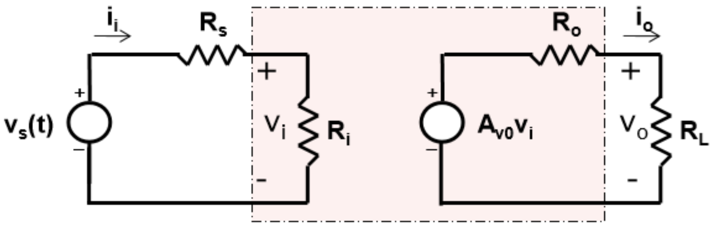
calcular $A_v = \dfrac{v_o}{v_s}$, la potencia entregada a R_L

y la potencia que entrega v_s

Cálculo de los parámetros del buffer de tensión (problema 9)

Cálculo de $\frac{\boldsymbol{V_o}}{\boldsymbol{V_s}}$, $\boldsymbol{P_{R_L}}$, $\boldsymbol{P_s}$

Si $A_{vo} = 1 \quad R_i = \infty \quad R_o = 0$



$$R_i = \infty \rightarrow V_i = V_s \;\; y\ además\ V_o = A_{vo}\, V_i = \; V_i = V_s \;\; \longrightarrow V_o = V_s \;\; luego \; \frac{\boldsymbol{V_o}}{\boldsymbol{V_s}} = \mathbf{1}$$

$$Potencia\ entregada\ por\ la\ fuente\ de\ señal \;\; \longrightarrow \boldsymbol{P_s} = V_s\, I_i = \; V_s\, .0 = \mathbf{0}$$

$$Potencia\ instantanea\ entregada\ en\ la\ carga \;\; \longrightarrow P_{R_L}(t) = \frac{(V_o(t))^2}{R_L} \;\; = \frac{(V_s(t))^2}{R_L}$$

Si $v_s(t), v_o(t)$ $son\ periódicas \rightarrow P_{R_L\, media} = \frac{V_{o\, eficaz}^2}{R_L}$

Si son señales sinusoidales tipo $v_s(t) = V_s sen\omega t \rightarrow P_{R_L} = \frac{(\frac{V_o}{\sqrt{2}})^2}{R_L}$

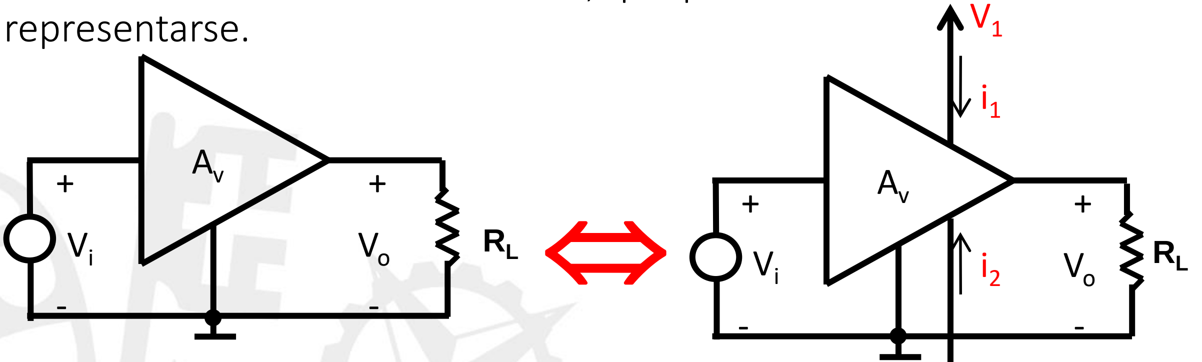
recordatorio de potencias

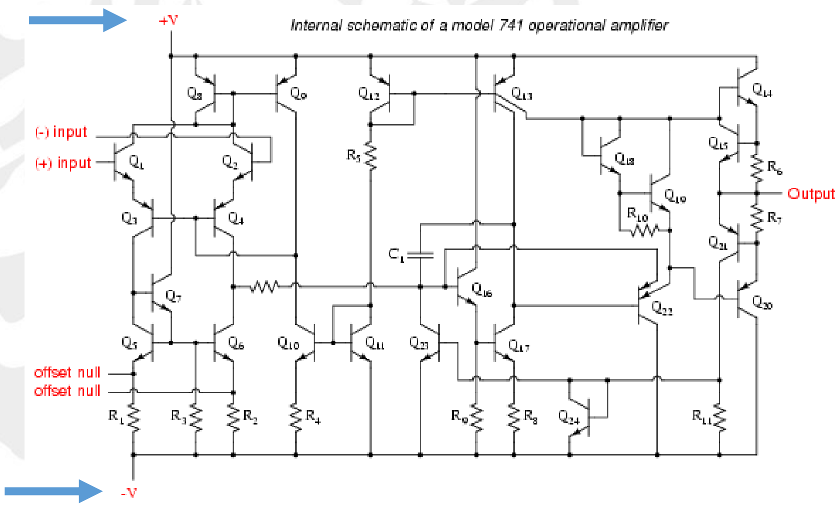
... la ganancia de potencia sería infinita (los amplificadores ideales son maravillosos, lástima que no existan…)

El buffer permite “adaptar impedancias” → Que el generador de señal vea una resistencia de entrada muy elevada, y que la carga vea una resistencia de salida previa muy baja

Alimentación y rendimiento

- Si $A_P > 0$, ¿de dónde procede la energía extra entregada a la carga? → De las fuentes de alimentación DC, que por comodidad no suelen representarse.



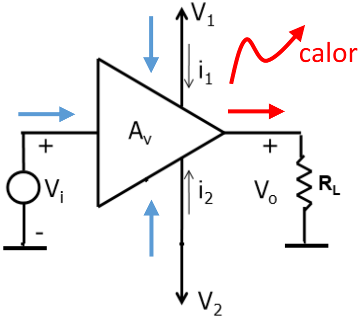


Rendimiento de un amplificador

- El amplificador lo que hace es convertir energía de la fuente de alimentación en energía de la señal de salida
- El **rendimiento** $\boldsymbol{\eta}$ se calcula como el cociente de la energía de la señal de salida entre la energía aportada por la fuente de alimentación
- De una forma exacta el balance de potencia es este:

$$\boldsymbol{P_i}(P.\,de\ la\ fuente\ de\ señal) + \boldsymbol{P_{DC}}(P.\,entregada\ por\ la\ alimentación) = \boldsymbol{P_{R_L}}(P.\,entregada\ a\ la\ carga) + \boldsymbol{P_{disipada}}(P.\,perdida\ como\ calor)$$

(energía que entra = energía que sale)



Para obtener P_{DC} sumamos la potencia entregada por cada fuente de alimentación

$$P_{DC} = \sum V_{alimentación}\ x\ I_{alimentación}$$

Como normalmente $P_i \ll P_{DC}\ entonces$

$P_{DC} \approx P_{R_L} + P_{disipada}$ (la energía de la alimentación se consume en la carga y en calor)

<u>Y el rendimiento del amplificador es:</u>

$$\boldsymbol{\eta = \frac{P_{R_L}}{P_{DC} + P_i} \approx \frac{P_{R_L}}{P_{DC}}}$$

Comentario sobre el cálculo del rendimiento (y así hagáis bien los problemas…)

- Para calcular el rendimiento debemos calcular la potencia entregada por las fuentes de alimentación P_{DC}
- Cada fuente alimentación consiste en una tensión continua.
  - P.e. $V_1 = 4\ V$ (la tensión de alimentación es siempre continua)
- Cada fuente continua de tensión entrega una corriente al amplificador, y esta corriente es en general NO continua (el amplificador demanda más o menos corriente en función de como varía la V_o de salida)
  - P.e. $I_1(t) = 10\ mA + 2\ mA\ sen\ \omega t$ $(siendo\ en\ general\ \omega\ la\ pulsación\ de\ la\ señal\ de\ entrada)$
- Para calcular la potencia media entregada por la fuente de alimentación debo hacer este cálculo

$$P_{med} = \boldsymbol{P_{DC}} = {}^{1}\!/_{T} \int_0^T v(t).i(t)dT = V\frac{1}{T}\int_0^T i(t)dT = VI_{med} = \boldsymbol{V\langle I\rangle}$$

- En nuestro ejemplo: $P_{DC} = V\langle I\rangle = 4\ voltios\ x\ 10\ mA = 40\ mW$

Problema 10

- Se tiene un amplificador alimentado a $V^{\pm} = \pm 10$ V con una entrada v_s senoidal, de 1V de amplitud, una salida senoidal V_o de 9 V de amplitud, y una resistencia de carga R_L= 1 K.
- Las fuentes de alimentación suministran $<i^+> = <i^-> = 9{,}5$mA
- La intensidad de entrada i_i es senoidal con amplitud 0,1 mA.
- Calcular A_v, A_i, A_p, P_{DC}, P_{DIS} y η.

Aclaraciones sobre el cálculo de las potencias (de nuevo para que nos lieis en los problemas...)

- En el ejemplo anterior calculamos la potencia media de una señal de esta forma (por ejemplo de la señal de entrada):

$$P_{i\ media} = V_{i\ Ef} I_{i\ Ef}$$

- Esto viene de que estamos calculando la potencia media de la forma habitual

potencia media $= P_{i\ media} = \frac{1}{T}\int_0^T V_i(t) I_i(t) dT$

si $V_i(t) = V_i\ sen\omega t$ y $I_i(t) = I_i\ sen\omega t$ entonces

$$P_{i\ media} = \frac{V_i I_i}{T}\int_0^T sen\omega t^2\ dT = \frac{V_i I_i}{2} = \frac{V_i I_i}{\sqrt{2}\sqrt{2}} = V_{i\ Ef} I_{i\ Ef}$$

- Nota: Fijaros en la diferencia con la potencia media entregada por una fuente **continua** de alimentación:

$$P_{DC} = V I_{med} = V\langle I\rangle$$

Problema 11

- Calcular el rendimiento de un amplificador de audio con las siguientes características:

$R_i = 100K$

$R_o = 2\,\Omega$

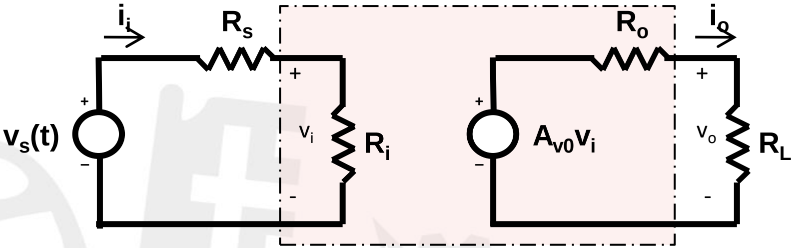
$A_{vo}=10^4$ V/V

alimentación $V^{\pm} = \pm 15V$ con corrientes $\langle i^+ \rangle = 1$ A e $\langle i^- \rangle = 0{,}5$ A

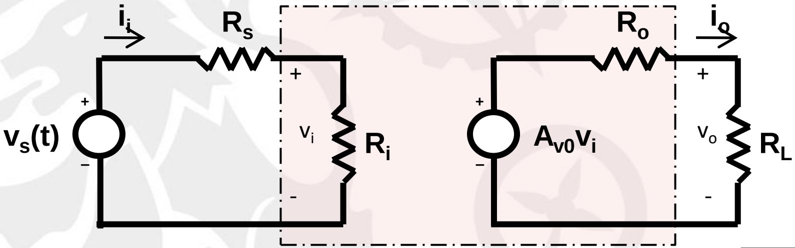
entrada senoidal de 1 mV **rms**

carga de 8 Ω.

Problema 12: medida parámetros amplificador



Proponer2 medidas sencillas para determinar R_i

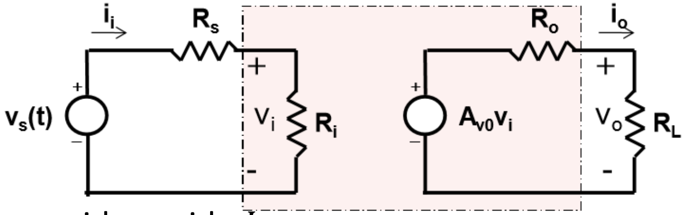


Proponer2 medidas sencillas para determinar R_o

Medida de parámetros de un amplificador (problema 12)

Determinar R_i y R_o *, mediante dos medidas en ambos casos*

(A_{vo} *es conocido, se determina midiendo* V_i *y* V_o sin *la carga* R_L)



Medida de R_i

1. Siendo conocida R_s, aplico una V_s conocida y mido I_i

$I_i = \frac{V_s}{R_s+R_i}$ y despejo la R_i

2. **Siendo desconocida R_s, aplico una V_s , y mido V_i e I_i**

$I_i = \frac{V_i}{R_i}$ y despejo la R_i

3. Siendo conocido R_s, aplico una V_s , y mido V_i $\rightarrow V_i = V_s \frac{R_i}{R_i+R_s}$ y despejo R_i

4. Dejo la salida en abierto ($R_L = \infty$), aplico una fuente de corriente I_i y mido V_o

$V_o = V_i A_{vo} \frac{R_L}{R_L+R_o} = I_i R_i A_{vo}$ (un poco enrevesado)

Medida de R_o

1. Cortocircuitamos V_s , eliminamos R_L (∞), y aplicamos una tensión en la salida, midiendo la corriente, el cociente entre la tensión y la corriente medida es R_o

$R_o = \frac{V_o}{I_o}$ *cuando* $V_s = 0$ (esto es lo que hacemos al calcular R_{Th})

2. Aplicamos V_s y medimos V_i , cortocircuitamos la salida y medimos I_o

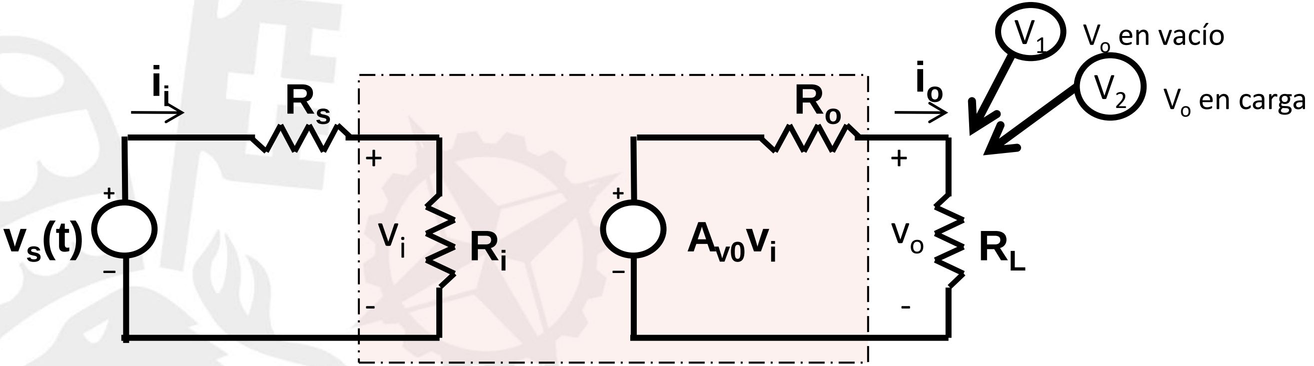
$I_o = \frac{A_{v0} V_i}{R_o}$ todos los parámetros son conocidos salvo R_o

Medida de parámetros de un amplificador (problema 12)

Determinar R_i y R_o $, mediante\ dos\ medidas\ en\ ambos\ casos$

Medida de R_o (otra forma más, y además es la forma habitual de hacerlo)

3. Medimos la tensión de salida con carga y sin carga



V_o en vacío (o sea, sin carga)

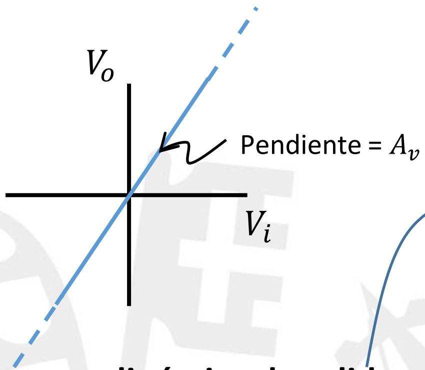
$$V_1 = A_{vo} V_i$$

V_o con carga

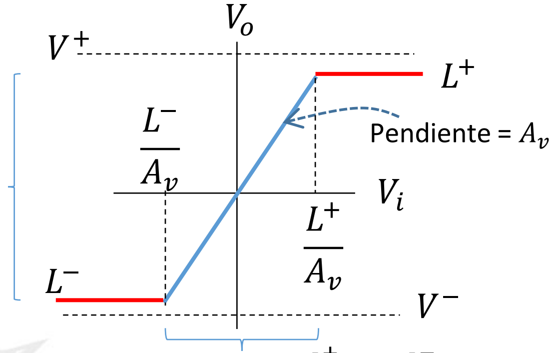
$$V_2 = A_{vo} V_i \frac{R_L}{R_o + R_L} = V_1 \frac{R_L}{R_o + R_L} \Rightarrow R_o$$

Saturación del amplificador

Amplificador ideal



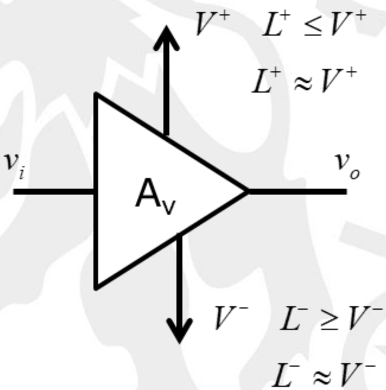
Amplificador un poco más real



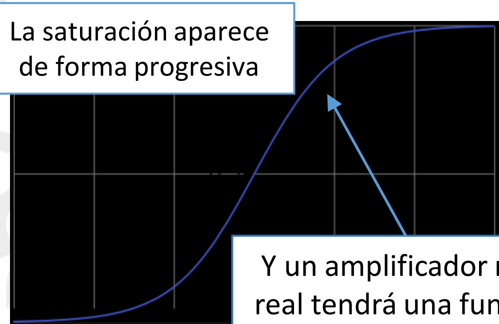
El **rango dinámico de salida** es $L^+ \leftrightarrow L^-$ y **el de entrada** $\frac{L^+}{A_v} \leftrightarrow \frac{L^-}{A_v}$

La salida no puede rebasar cierto límite por arriba L^+ ni por abajo L^-

El rango dinámico el margen donde el amplificador funciona linealmente (zona azul)

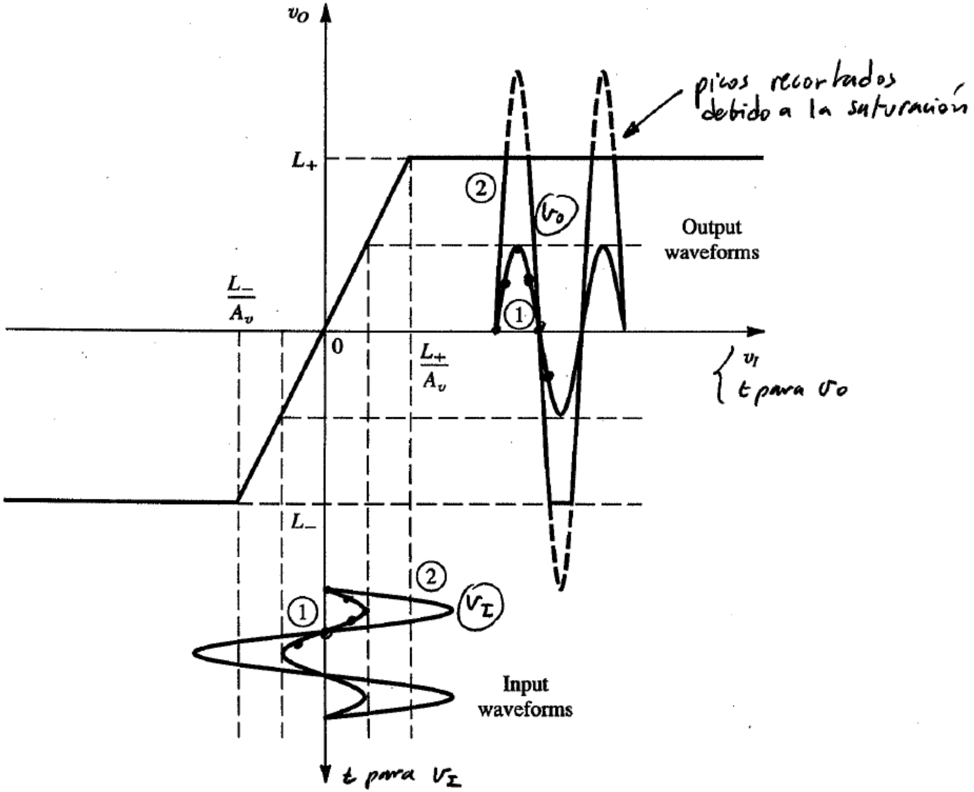


La saturación aparece de forma progresiva

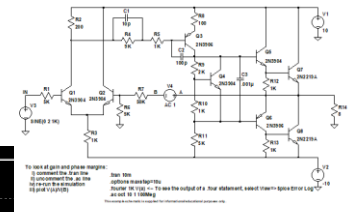


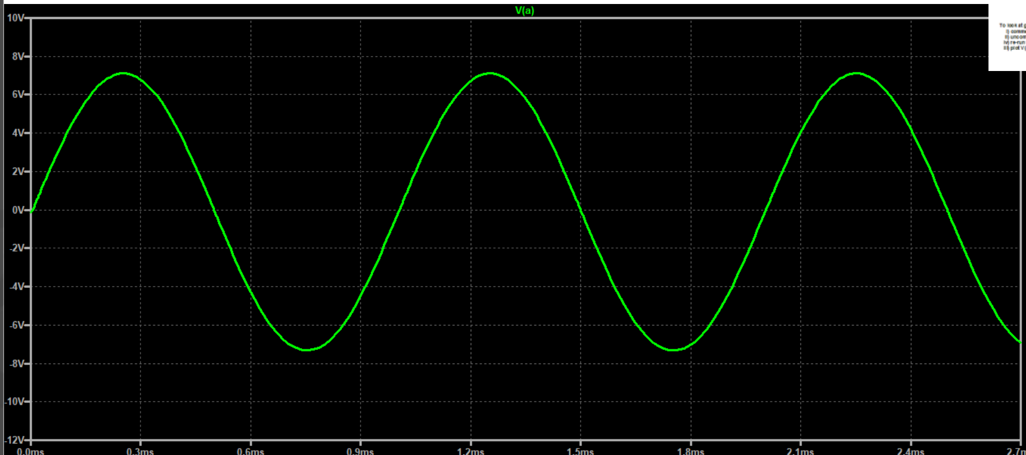
Y un amplificador muy real tendrá una función de transferencia así

Saturación del amplificador

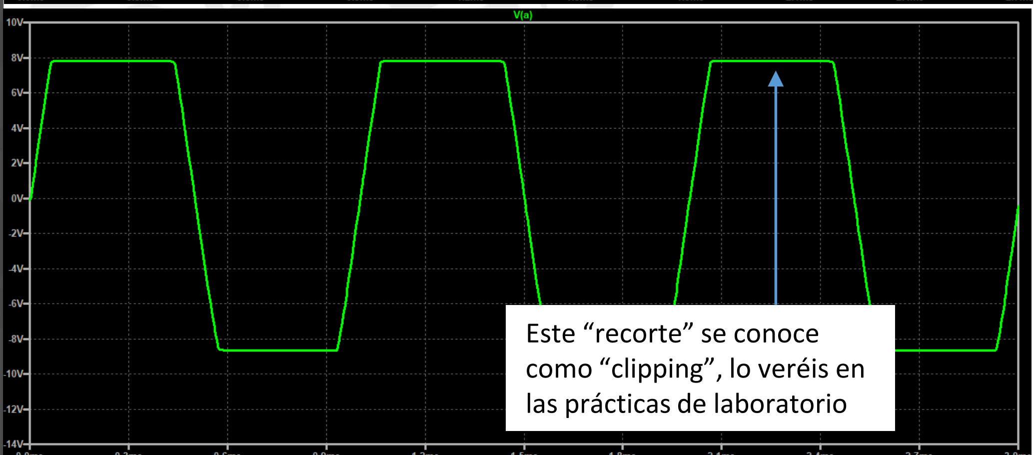


Ejemplo: saturación de un amplificador de audio





Con Vin = 0,7 v la salida es lineal



Este “recorte” se conoce como “clipping”, lo veréis en las prácticas de laboratorio

Pero con Vin = 2 v la salida está ya recortada

Saturación del amplificador (en el laboratorio usaremos este)

Alimentado a 5 voltios

electrical characteristics at specified free-air temperature, V_{DD} = 5 V (unless otherwise noted)

PARAMETER			TEST CONDITIONS		T_A†	TLC272C, TLC272AC, TLC272BC, TLC277C MIN	TYP	MAX	UNIT
V_{IO}	Input offset voltage	TLC272C	V_O = 1.4 V, R_S = 50 Ω,	V_{IC} = 0, R_L = 10 kΩ	25°C		1.1	10	mV
					Full range			12	
		TLC272AC	V_O = 1.4 V, R_S = 50 Ω,	V_{IC} = 0, R_L = 10 kΩ	25°C		0.9	5	
					Full range			6.5	
		TLC272BC	V_O = 1.4 V, R_S = 50 Ω,	V_{IC} = 0, R_L = 10 kΩ	25°C		230	2000	μV
					Full range			3000	
		TLC277C	V_O = 1.4 V, R_S = 50 Ω,	V_{IC} = 0, R_L = 10 kΩ	25°C		200	500	
					Full range			1500	
α_{VIO}	Temperature coefficient of input offset voltage				25°C to 70°C		1.8		μV/°C
I_{IO}	Input offset current (see Note 4)		V_O = 2.5 V,	V_{IC} = 2.5 V	25°C		0.1	60	pA
					70°C		7	300	
I_{IB}	Input bias current (see Note 4)				25°C		0.6	60	pA
					70°C		40	600	
V_{ICR}	Common-mode input voltage range (see Note 5)				25°C	−0.2 to 4	−0.3 to 4.2		V
					Full range	−0.2 to 3.5			V
V_{OH}	High-level output voltage		V_{ID} = 100 mV,	R_L = 10 kΩ	25°C	3.2	3.8	$\boxed{L^+}$	V
					0°C	3	3.8		
					70°C	3	3.8		
V_{OL}	Low-level output voltage		V_{ID} = −100 mV,	I_{OL} = 0	25°C	$\boxed{L^-}$	0	50	mV
					0°C		0	50	
					70°C		0	50	

Problema 13

Nota: Esto es típico, las tensiones de saturación no suelen llegar al valor de las tensiones de alimentación:

$$L^+ \leq V^+ , \qquad L^- \geq V^-$$

Un amplificador alimentado con una fuente de alimentación de $\pm 15\,\mathrm{V}$, tiene una ganancia de tensión $A = 100\,\mathrm{V/V}$ y satura en $\pm 13\,\mathrm{V}$. El amplificador suministra una tensión senoidal de $12\,\mathrm{V}$ de amplitud a una carga de $2\,\mathrm{k\Omega}$, mientras la corriente a la entrada del amplificador es despreciable. La corriente media suministrada por cada una de las fuentes de alimentación es $\pm 2\,\mathrm{mA}$.

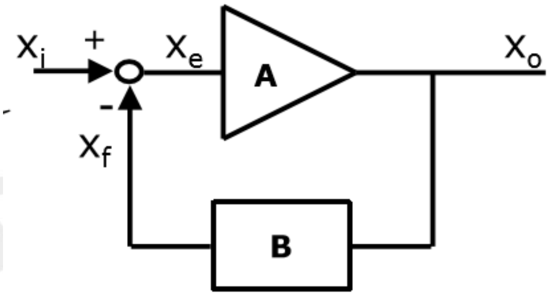
1. Dibuje la característica **salida-entrada** del amplificador en vacío. ¿Qué margen dinámico tiene el amplificador?
2. ¿Qué máxima amplitud puede tener la señal de entrada del amplificador sin distorsión a la salida?
3. ¿Qué potencia se disipa en la carga? ¿y la potencia disipada como calor?
4. Determine el rendimiento del amplificador

El Amplificador Operacional (Op Amp)

- Veamos el contexto; ¿de donde viene la idea o necesidad del Amplificador Operacional?
- Los amplificadores están hechos mediante dispositivos activos (transistores) y tienen algunas limitaciones:
  - Su ganancia varía con la frecuencia, con la temperatura, con la tensión de alimentación…
  - En los circuitos integrados es difícil incluir resistencias, porque ocupan mucho espacio, de modo que los amplificadores integrados intentan no usarlas; en esas condiciones es difícil ajustar la ganancia del amplificador con precisión
- La teoría de realimentación y el amplificador operacional nos resuelven estos problemas
  - La realimentación se basa en llevar una muestra de la señal de salida de un amplificador a su entrada, restando a la entrada esa muestra
  - Si el amplificador tiene una ganancia muy grande, se demuestra que la ganancia total del circuito (combinación de amplificador y realimentación) depende solo de la red de realimentación, no del amplificador. Como esta red puede ser pasiva, hecha con resistencias, podemos tener una ganancia con un valor preciso y estable
  - Este amplificador con una ganancia muy grande es el Amplificador Operacional)

El Amplificador Operacional. Teoría de la realimentación negativa

Harold Stephen Black



A *es un amplificador*
B *es la red de realimentación*
X_i *es la señal de entrada*
X_f *la señal realimentada (feedback)*
X_e *es la señal de error, y* X_o *la señal de salida*

$\boldsymbol{X_e = X_i - X_f}$ *(el signo menos indica que es una realimentación negativa, cuando hay realimentación positiva el conjunto tiende a oscilar o saturar)*

$\boldsymbol{X_f = X_o \,.\, B}$ *siendo B la función de transferencia de la red de realimentación*

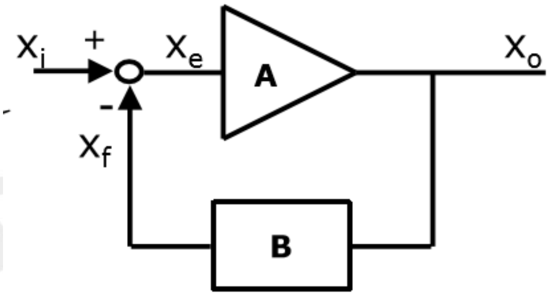
$$\boldsymbol{X_o = X_e A} = (X_i - X_f)A = (X_i - X_oB)A = AX_i - ABX_o \rightarrow \boxed{\boldsymbol{G = A_f = \frac{X_o}{X_i} = \frac{A}{1+AB}}}$$

$$\boldsymbol{ganancia\ del\ bucle\ o\ del\ lazo \equiv T = AB}$$

$$\boldsymbol{si\ T \gg 1 \ \rightarrow G \approx \frac{1}{B}}\ \text{¡}\textit{la ganancia solo depende de la red de realimentación}\text{!}$$

Además, cuando $\boldsymbol{T \gg 1 \rightarrow X_e \approx 0 \ \ y\, X_i \approx X_f}$
(como veréis, esto da lugar a las llamadas "reglas de oro" *del Op Amp)*

El Amplificador Operacional. Teoría de la realimentación negativa



A *es un amplificador*
B *es la red de realimentación*
X_i *es la señal de entrada*
X_f *la señal realimentada (feedback)*
X_e *es la señal de error, y* X_o *la señal de salida*

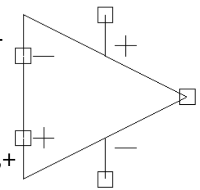
$$X_o = \frac{A}{1 + AB} X_i$$

$$X_e = X_i - X_f = X_i - X_o \,.\, B = X_i - \frac{A}{1+AB} X_i \mathrm{B} = X_i \frac{1}{1+AB}$$

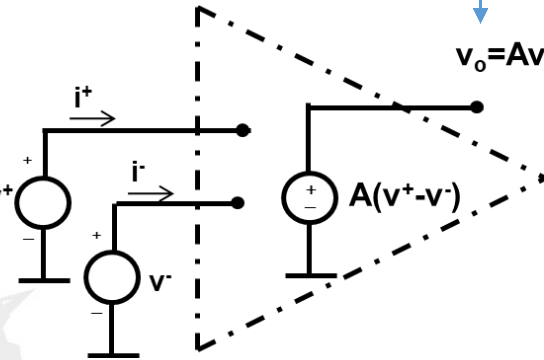
$$\boxed{Luego\ si\ \ AB \gg 1 \rightarrow X_e \approx 0\ \ y\ \ X_i \approx X_f}$$

El amplificador Operacional

Símbolo del Op Amp



Modelo equivalente del Op Amp



En un Op Amp ideal ***siempre*** *se cumple que:* $\boldsymbol{R_i \to \infty \quad R_o \to 0 \quad i_{in}^+ = i_{in}^- = 0 \quad A_v \to \infty}$

Si además está realimentado negativamente *se cumple que*

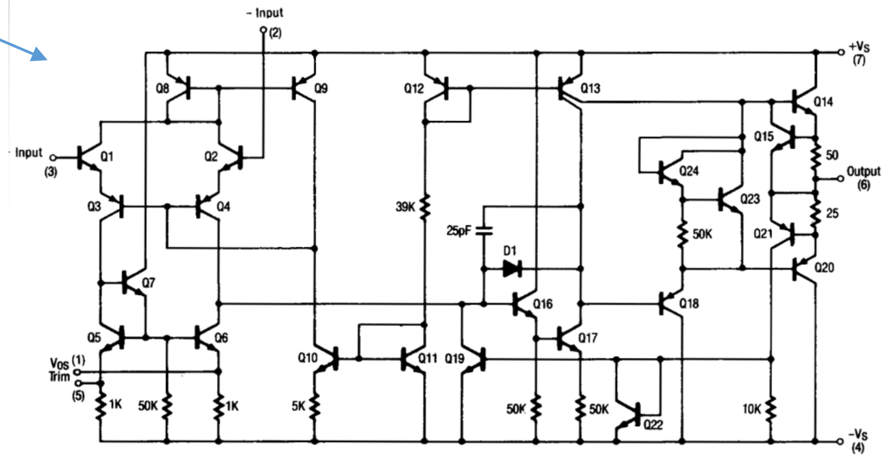
$$\boldsymbol{V_0 \; es \; tal \; que \; v^+ = v^-}$$

Regla de oro del Op Amp ***realimentado negativamente****)*

$(recordemos\ que\ X_e = X_i \dfrac{1}{1 + AB} \to 0)$

Amplificador operacional (op-amp)

El primer amplificador operacional monolítico fue el Fairchild µA702 (1964), diseñado por Bob Widlar. Le sigue el Fairchild µA709 (1965), también de Widlar, con gran éxito comercial. Más tarde es sustituido por el popular Fairchild **µA741 (1968)**, de David Fullagar, fabricado por numerosas empresas, en tecnología bipolar.

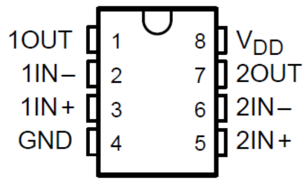


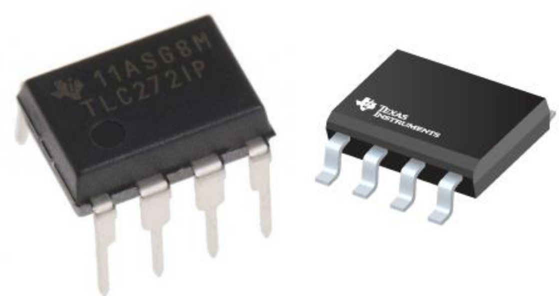
En el laboratorio usaremos este

TLC272, TLC272A, TLC272B, TLC272Y, TLC277
PRECISION DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS

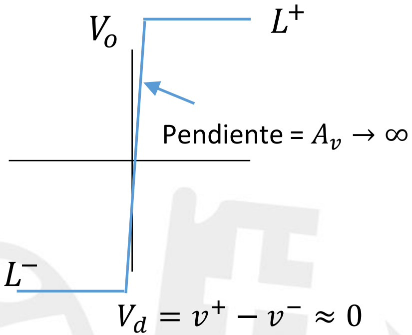
SLOS091E – OCTOBER 1987 – REVISED FEBRUARY 2002

D, JG, P, OR PW PACKAGE
(TOP VIEW)





Característica de transferencia del Op Amp



ejemplo: $\mu A741$

$$A = 200000 \frac{V}{V}$$

Si $V^{\pm} = \pm 15V \Rightarrow L^{\pm} = \pm 15V$

$$\Rightarrow \frac{L^-}{A} \le v_d \le \frac{L^+}{A} \equiv -75\mu V \le v_d \le 75\mu V$$

para trabajar en zona lineal

En resumen, en zona lineal $A \to \infty \Rightarrow v_d \to 0$

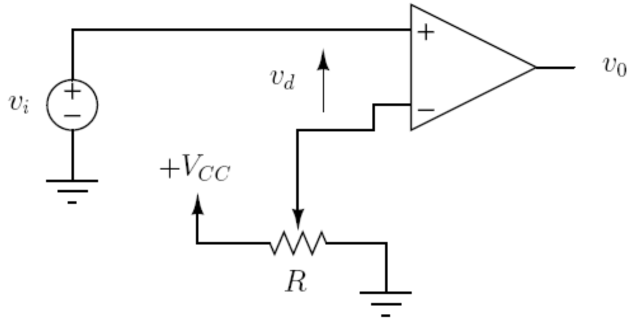
- En un Op Amp real la ganancia en tensión es muy elevada, con facilidad 10^5 (100 dB)
  - Esto quiere decir que el margen dinámico V_d lineal de entrada $\frac{L^+}{A_v} \leftrightarrow \frac{L^-}{A_v}$ es muy pequeño
- En un Op Amp ideal, $A_v \to \infty$, de modo que la pendiente de la función de transferencia es vertical, y el margen dinámico lineal de entrada es nulo
- Si $v^+ > v^-$ la salida se saturará y será $V_0 = L^+$
- Y si $v^+ < v^-$ la salida se saturará y será $V_0 = L^-$

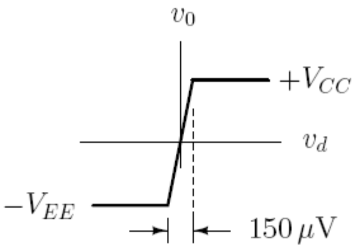
Problema 14: op-amp en lazo abierto

La ganancia en **bucle abierto** de un amplificador operacional es muy grande. La característica del operacional es lineal en un margen de tensiones denominado **margen dinámico de entrada**. Como puede verse, este margen es muy pequeño, comparado con las tensiones de saturación del operacional (típicamente ± 15 V). Por tanto, pequeños movimientos del cursor del potenciómetro provocarán un cambio brusco en la tensión de salida v_0.

Nota: Los datos que se usan en este problema corresponden al OP-AMP 741.

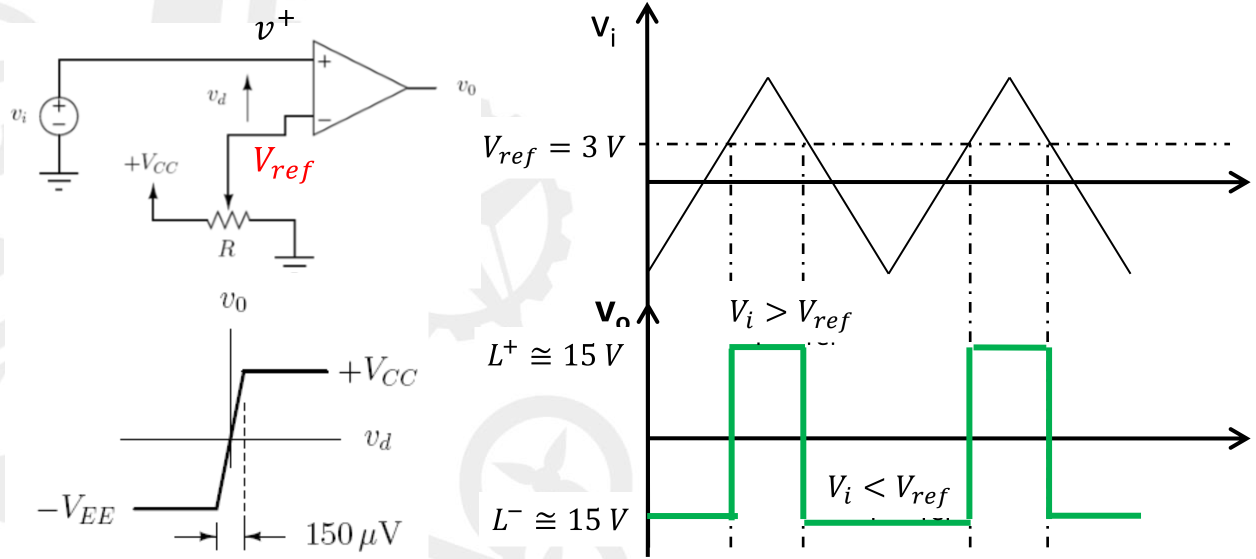
1. Dibuje la tensión v_0 si v_i es una señal triangular, de 10 V de amplitud y nivel medio nulo, y la tensión del terminal inversor es 3 V. ¿Qué operación está realizando el circuito? ¿Es una operación lineal?
2. ¿Cómo llamaría a este tipo de circuito?
3. ¿Para qué sirve el potenciómetro?





Op Amp en lazo abierto, usado como comparador (problema 14)

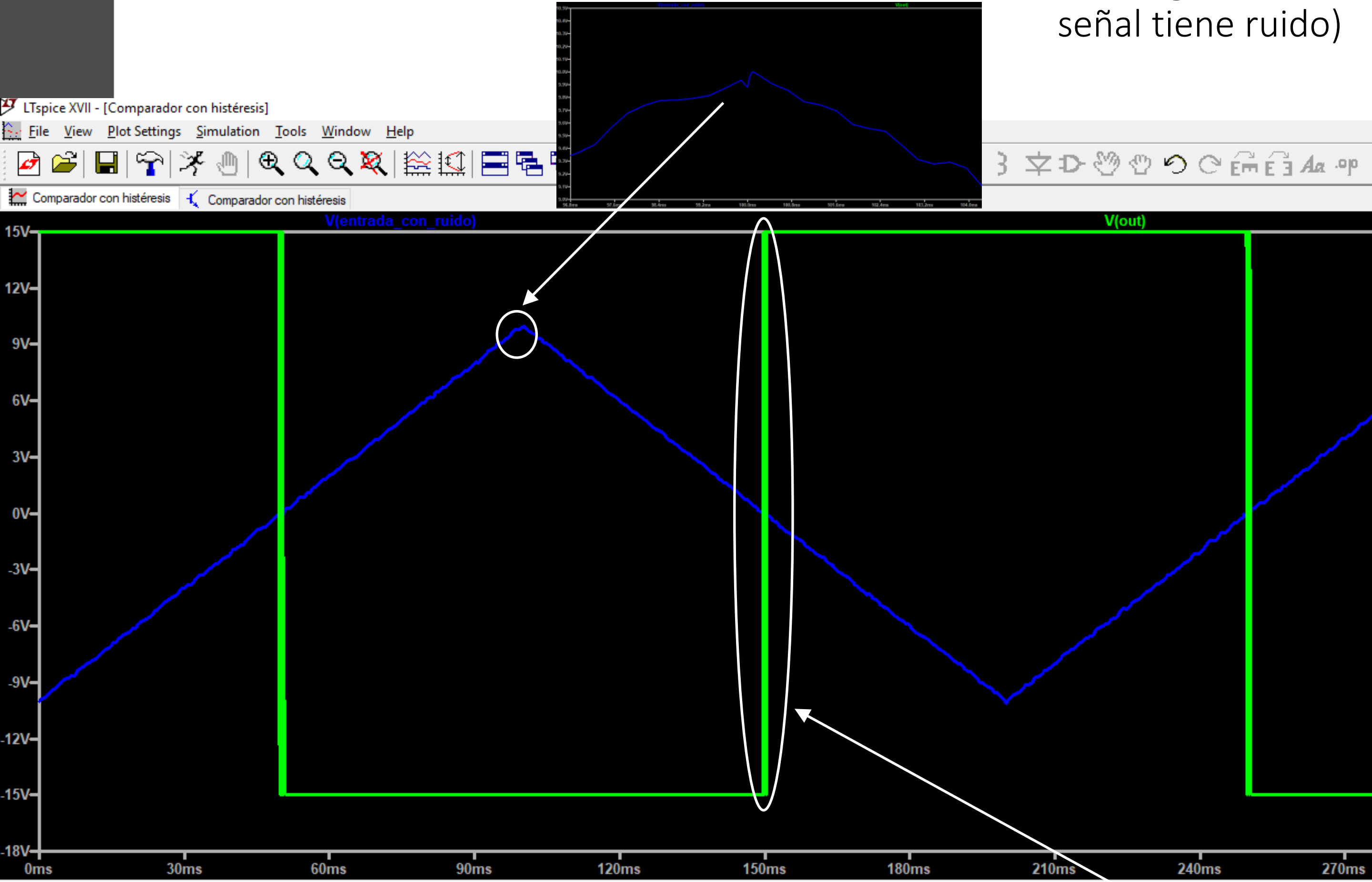
- El Op Amp no se suele usar en lazo abierto, así que este problema está solo para fines didácticos y entender su función de transferencia
- El Op Amp casi siempre se usa siempre en lazo cerrado (realimentado), ya sea con realimentación positiva (para construir comparadores u osciladores) o negativa.



Esto es un comparador, el potenciómetro permite ajustar el umbral de comparación V_{ref}. En función de si la señal v^+ está por encima o por debajo del umbral, el Op Amp se saturará a L^+ o L^-

(problema 14)

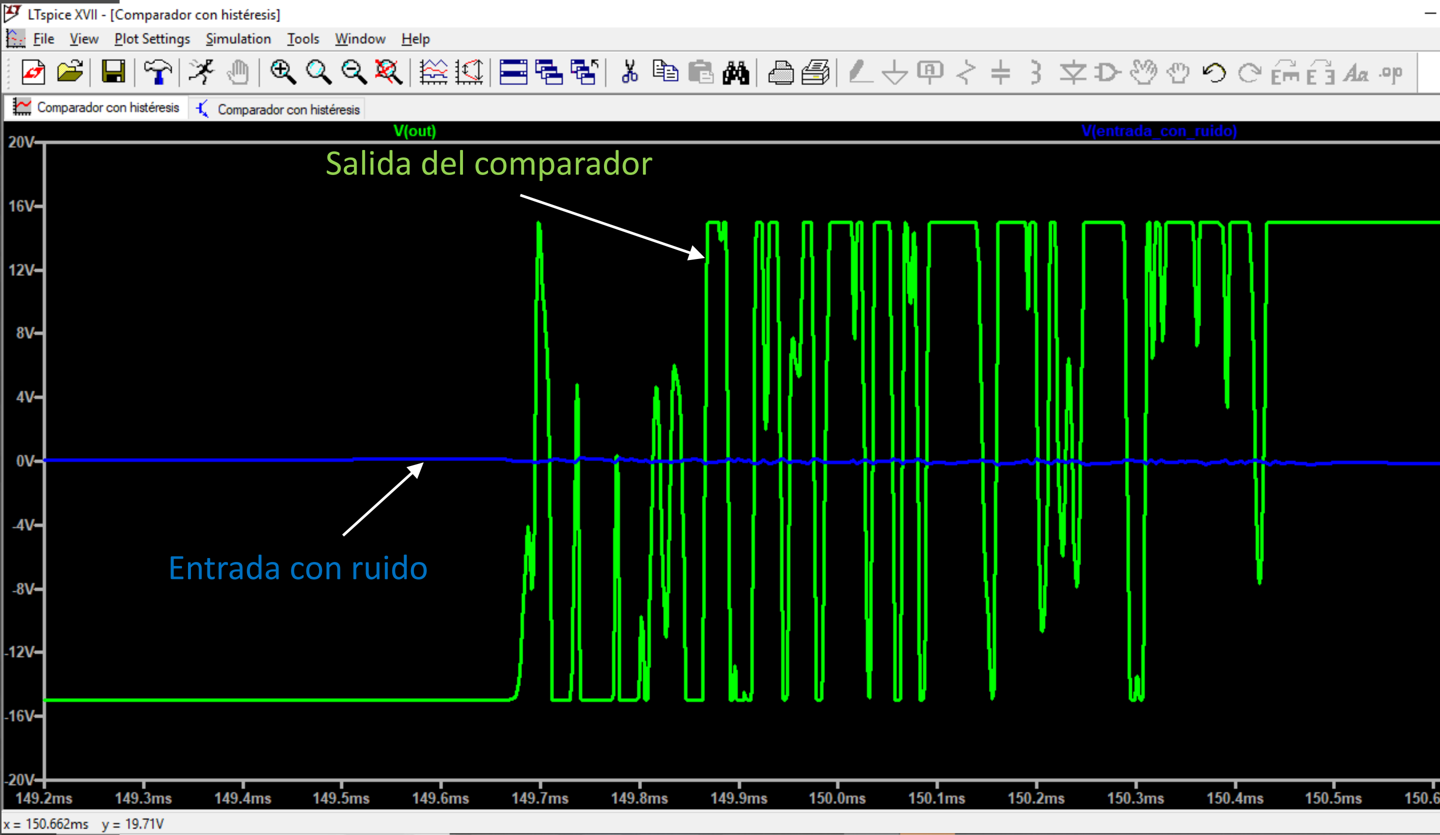
- Veamos con detalle lo que pasa. Hacemos una simulación **añadiendo ruido a la señal triangular** (toda señal tiene ruido)



- Aparentemente todo va bien, pero, si miramos con más detalle.....

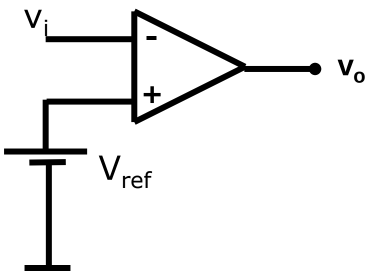
… las cosas no van bien

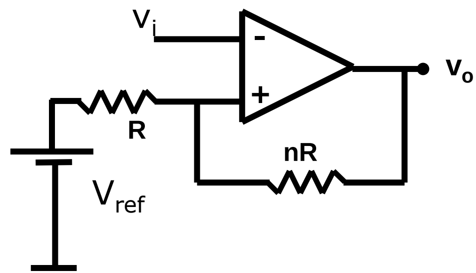
Como la ganancia es tan grande, si la señal tiene ruido superpuesto (SIEMPRE lo tiene) cruzará múltiples veces el umbral y habrá muchas transiciones en la salida



Problema 15:comparador con histéresis

- Ejemplo: comparador con histéresis





Si $v_i > V_{ref} \Rightarrow v_o = L^-$

Si $v_i < V_{ref} \Rightarrow v_o = L^+$

realimentación positiva $\Rightarrow v_o = L^\pm$.

- Suponemos $v_o = L^+ \Rightarrow v^+ = L^+ \dfrac{R}{(n+1)R} + V_{ref} \dfrac{nR}{(n+1)R}$

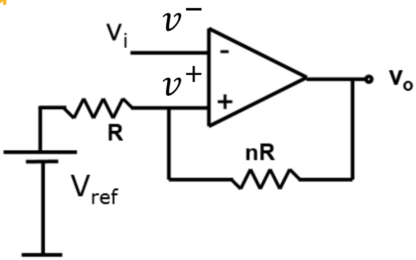
por tanto $v_o = L^+$ para $v_i < v^+ = V_{UT} = L^+ \dfrac{R}{(n+1)R} + V_{ref} \dfrac{nR}{(n+1)R}$

- Suponemos $v_o = L^- \Rightarrow v^+ = L^- \dfrac{R}{(n+1)R} + V_{ref} \dfrac{nR}{(n+1)R}$

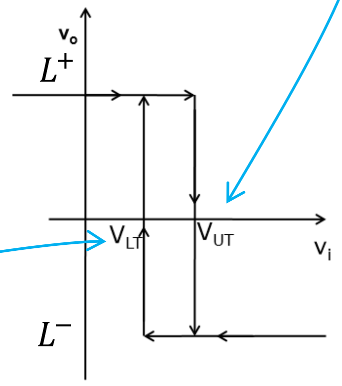
por tanto $v_o = L^-$ para $v_i > v^+ = V_{LT} = L^- \dfrac{R}{(n+1)R} + V_{ref} \dfrac{nR}{(n+1)R}$

Problema 15: Comparador con histéresis mediante realimentación positiva

- Llevamos parte de la señal de salida a la entrada v^+ (es una **realimentación positiva**)
- De esta forma, la tensión de salida influye en el valor del la tensión en la pata v^+ del Op Amp, que será la tensión umbral de comparación: habrá 2 umbrales

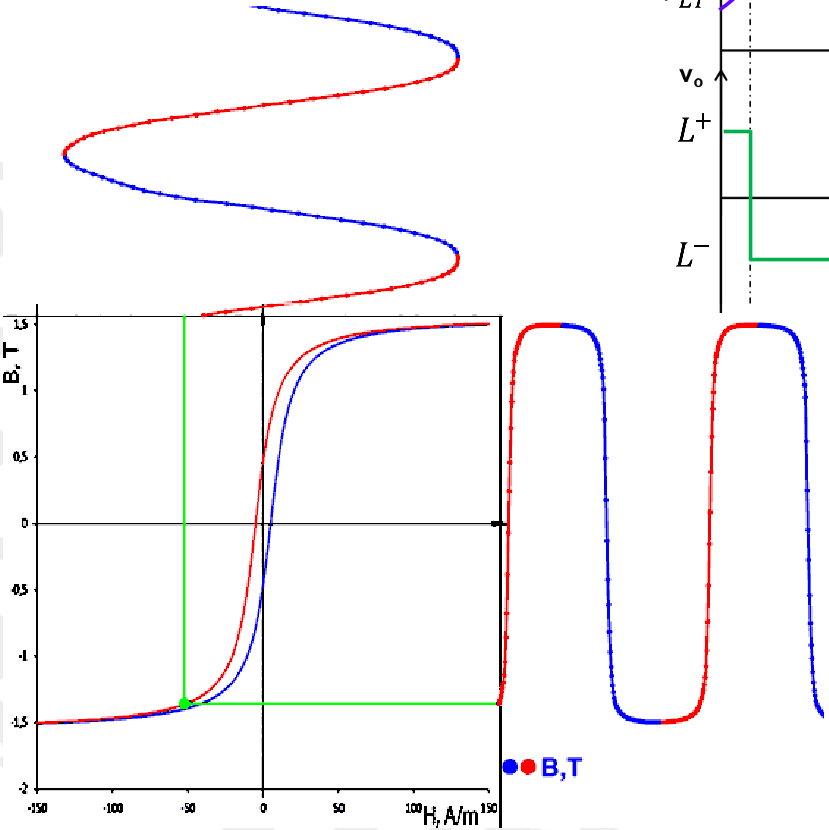


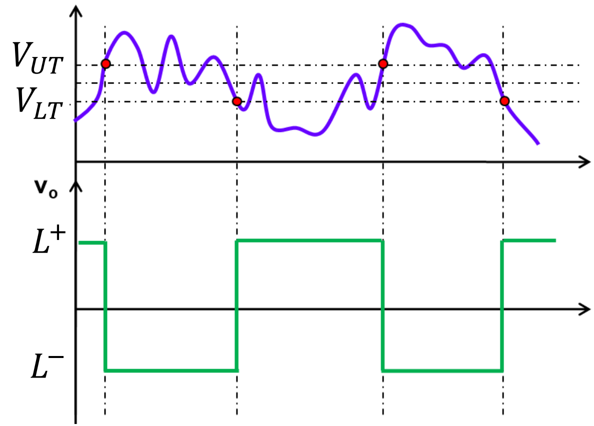
Umbral superior $\boldsymbol{V_{UT} = L^+ \frac{R}{(n+1)R} + V_{ref} \frac{nR}{(n+1)R}}$ cuando Vi está creciendo, debe superarse este umbral para que la salida conmute



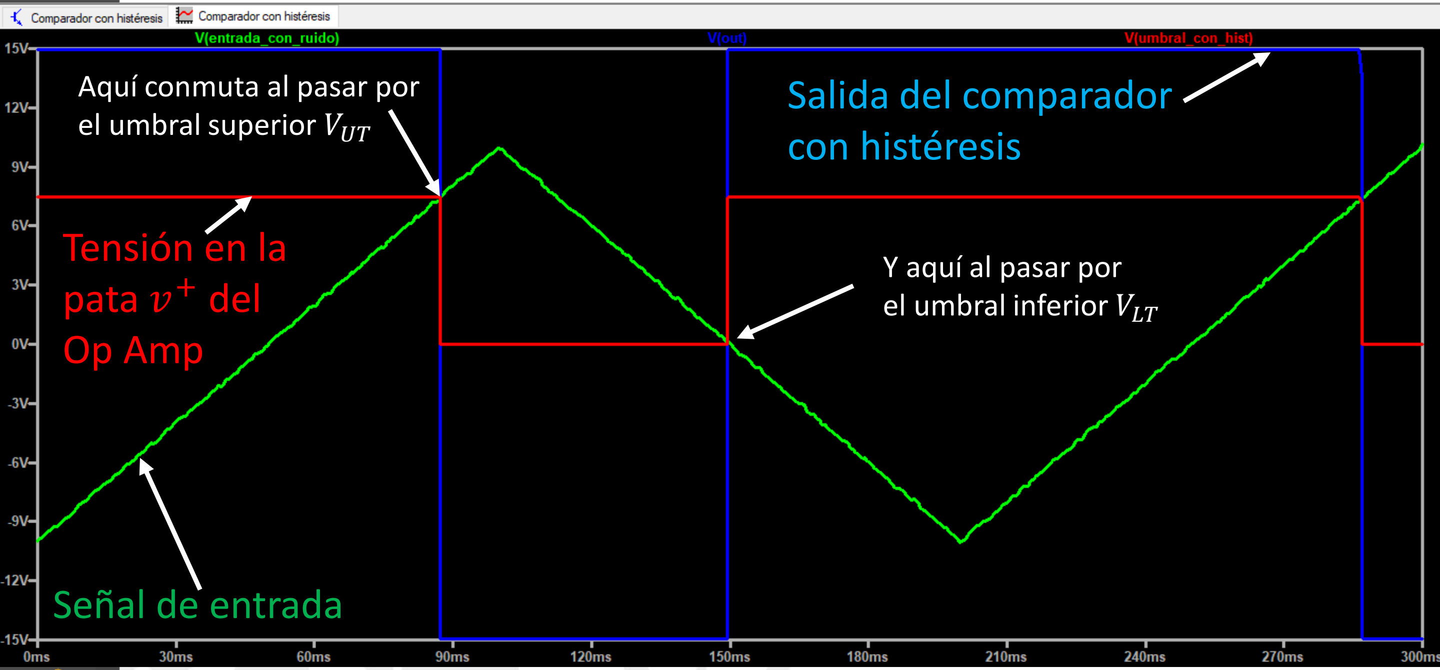
Umbral inferior $\boldsymbol{V_{LT} = L^- \frac{R}{(n+1)R} + V_{ref} \frac{nR}{(n+1)R}}$ cuando Vi está decreciendo, debe cruzarse este umbral para que la salida conmute

Comparador con histéresis mediante realimentación positiva

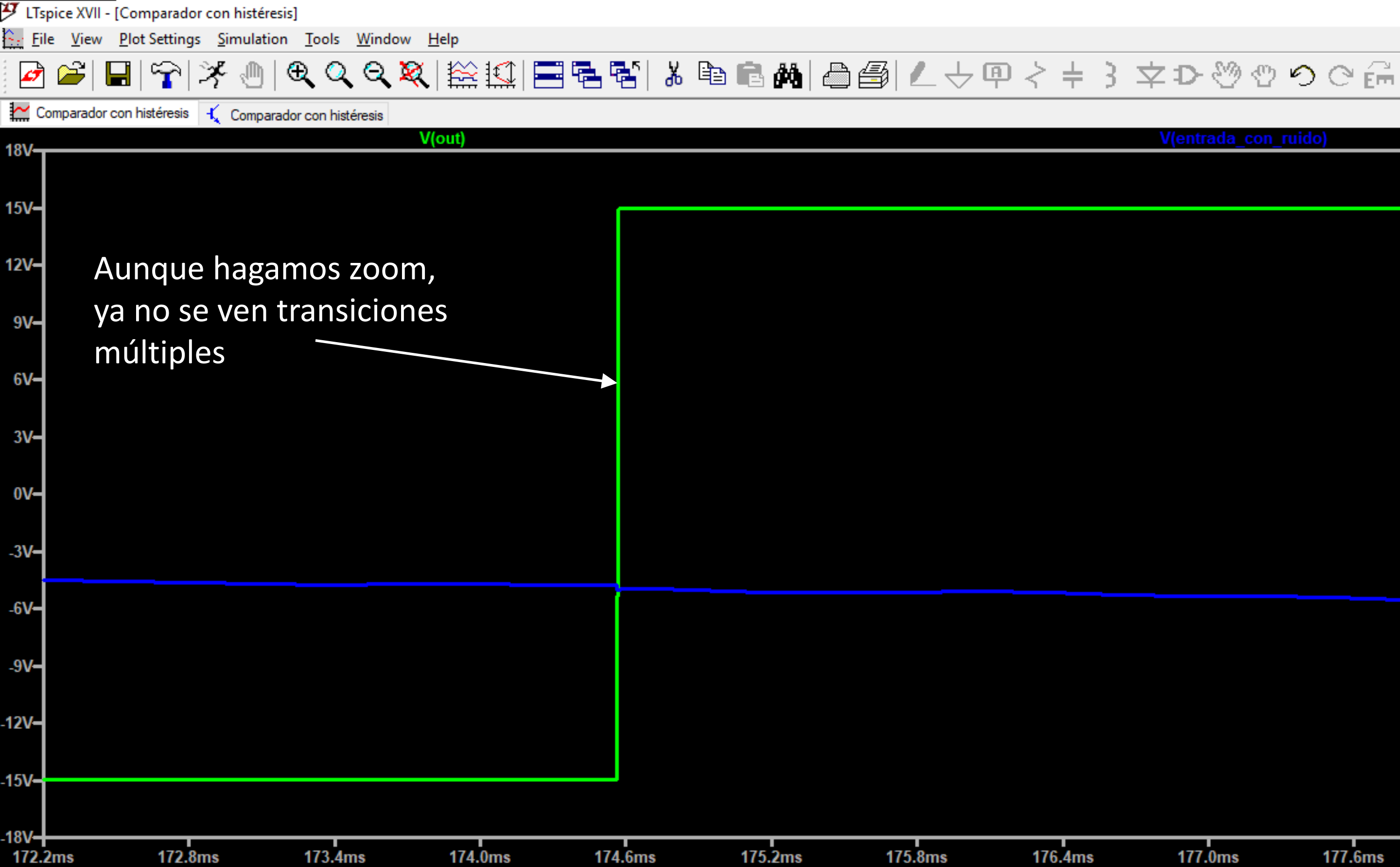




Formas de onda en el comparador con histéresis



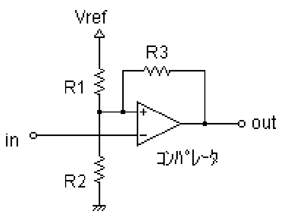
… ahora las cosas ya van bien

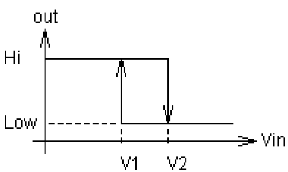


OKAWA Electric Design

Top > Tools > Comparator Hysteresis Tool

Comparator circuits with Hysteresis Design Tool - results -





Conditions:

Vref=15V
V1=4.75V
V2=4.85V
Vout(Hi)=14V
Vout(Low)=-14.9V

Result:

R1=**910Ω**
R2=**430Ω**
R3=**82kΩ**

V1=4.7434793096663V
V2=4.8460315603425V

Select Resistor Sequence	: E24
Vref	: 15 V
V1	: 4.75 V
V2	: 4.85 V
Vout(Hi)	: 14 V (comparator output at saturation Hi voltage)
Vout(Low)	: -14.9 V (comparator output at saturation Low voltage)

Calculate

comillas.

Op Amp con realimentación negativa. Configuración no inversora

Recordemos las **reglas del Op Amp realimentado negativamente**:

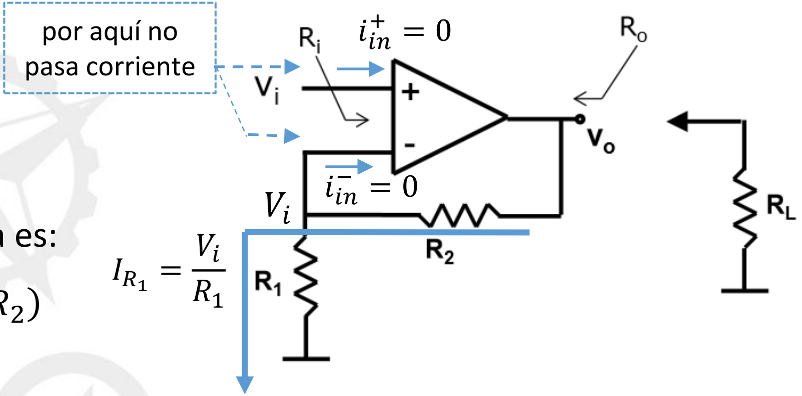
$$\boldsymbol{V_0\ es\ tal\ que\ v^+ = v^-}$$

y además siempre se cumple que $\boldsymbol{i_{in}^+ = i_{in}^- = 0}$

$Si\ \boldsymbol{v^+ = v^- = V_i}$

$la\ corriente\ por\ R_1\ es:$

$$I_{R_1} = \frac{V_i}{R_1} = I_{R_2}$$



De modo que la tensión de salida es:

$$V_o = I_{R_1}(R_1 + R_2) = \frac{V_i}{R_1}(R_1 + R_2)$$

Y la ganancia es

$$\boxed{\boldsymbol{A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}}}$$

Op Amp con realimentación negativa. Configuración no inversora

- Calculemos la resistencia de entrada y de salida para decidir si esta configuración es un buen amplificador de tensión:

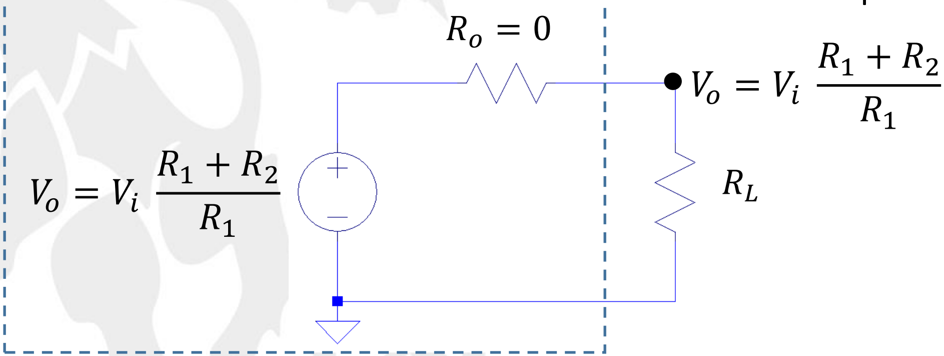
Como $i_{in}^{+} = 0 \;\rightarrow\; \boldsymbol{R_i} = \infty$ (calculad Thevenin con una V_x de prueba, y como I_x será 0, entonces $\frac{V_x}{I_x} = R_{th} = \boldsymbol{R_i} = \infty$)

Y como $V_o = V_i\,\frac{R_1+R_2}{R_1}\;\; \forall\, R_L\; entonces\; \boldsymbol{R_o} = \boldsymbol{0}$

Esta configuración es una amplificador de tensión ideal

La tensión V_o no depende de R_L, esto solo es posible si $\boldsymbol{R_o} = \boldsymbol{0}$

Explicación: equivalente de Thevenin de la salida



Op Amp con realimentación negativa. Configuración inversora

Recordemos las reglas **con realimentación negativa**:

$$\boldsymbol{V_0\ es\ tal\ que\ v^+ = v^-}$$

y además siempre se cumple que $\boldsymbol{i_{in}^+ = i_{in}^- = 0}$

$Si\ \boldsymbol{v}^+ = \boldsymbol{v}^- = 0\ \ entonces\ la\ corriente\ por\ R_1\ es$

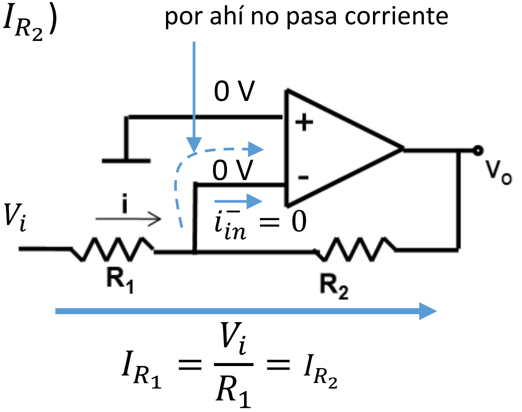
$$I_{R_1} = \frac{V_i}{R_1} = I_{R_2}$$

De modo que la tensión de salida es (pues $I_{R_1} = I_{R_2}$)

$$V_o = 0 - I_{R_1} R_2 = -\frac{V_i}{R_1} R_2$$

Y la ganancia es

$$\boxed{\boldsymbol{A_v = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1}}}$$



Op Amp con realimentación negativa. Configuración inversora

- De nuevo, calculemos la impedancia de entrada y de salida para ver si esta configuración es un buen amplificador de tensión:

calculad Thevenin con una V_x de prueba, y como I_x será

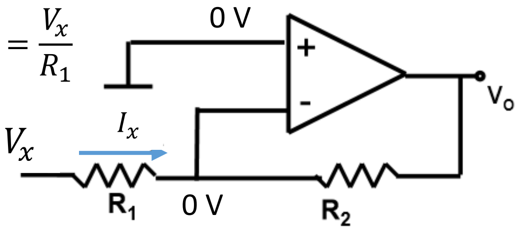
$$I_x = \frac{V_x}{R_1} \rightarrow \boxed{R_i = R_1}$$

Y como antes, $V_o = V_i \frac{R_2}{R_1} \; \forall \, R_L \; entonces \; \boxed{R_o = 0}$

La configuración inversora **no es un amplificador de tensión ideal**

(aunque puede ser un buen amplificador si $R_1 \gg R_s$)

$$I_x = \frac{V_x}{R_1}$$



Configuración inversora funcionando como amplificador de transresistencia

- Convirtamos la resistencia R_1 y el generador de señal de tensión en una fuente de señal de corriente, dejando solo la R_2

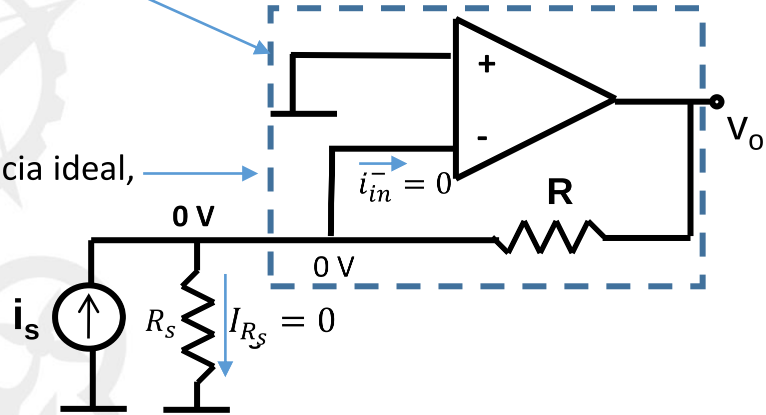
Como $\boldsymbol{i_{in}^{-}} = 0\ y\ \boldsymbol{v^{-}} = 0\ en\ tonces\ toda\ la\ I_s\ pasa\ por\ R\ (I_{R_s} = 0)$

De modo que $\boxed{V_o = -I_s\ R}$

Se comporta como un amplificador en transresistencia con ganancia G_R

$$G_R = \frac{V_0}{I_s} = -R$$

Es un amplificador en transresistencia ideal, pues $\boxed{R_i = 0 \quad R_o = 0}$

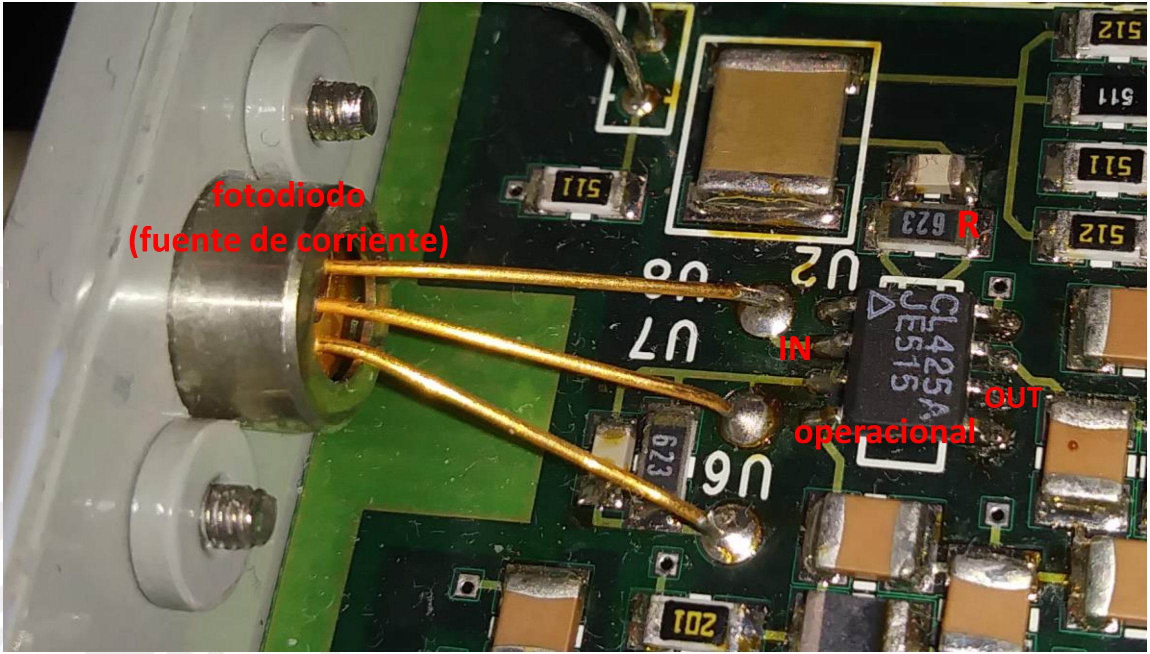


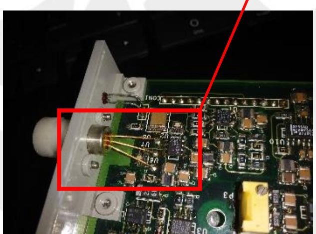
cálculo de $R_i \rightarrow observad\ que\ \forall\ I_s$ la tensión $\boldsymbol{v^{-}}$ es 0, por R_s no pasa corriente nunca $\rightarrow R_i = 0$

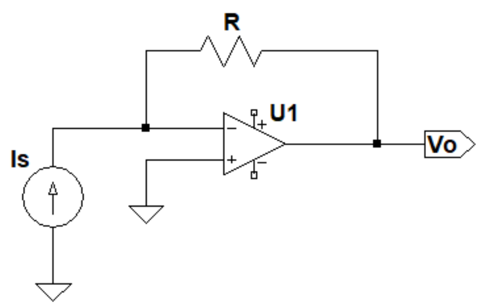
$y\ como\ V_0\ no\ depende\ de\ R_L\ \ entonces\ R_o = 0$

$\boxed{I_s . R_i = 0 \rightarrow R_i = 0}$

Amplificador de transresistencia

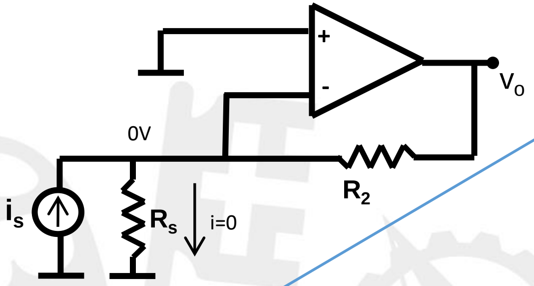






Problema 18: configuración inversora

Considere ahora el siguiente circuito.



$v_o = -i_s R_2$

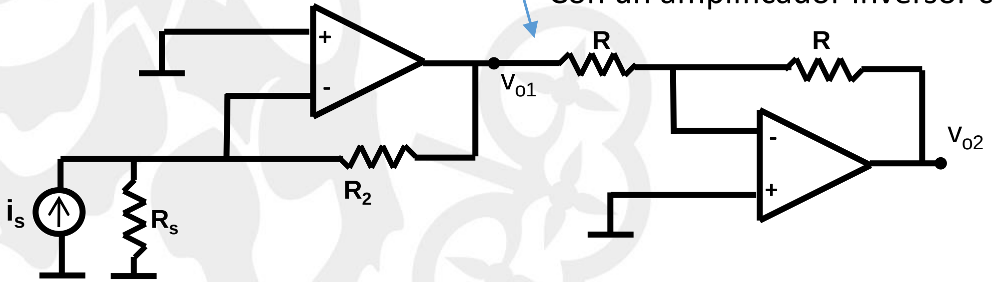
Convertidor $i \rightarrow v$

¿Qué vale v_o?

¿Qué aplicación puede tener?

¿Cómo podemos cambiar el signo de la tensión de salida?

Con un amplificador inversor con ganancia -1

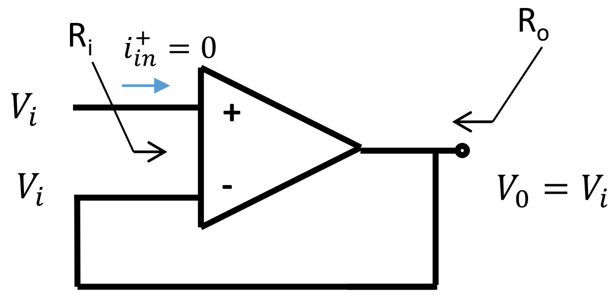


Configuración como buffer

Recordemos las reglas con realimentación negativa:
$\boldsymbol{V_0 \; es \; tal \; que \; v^+ = v^-}$

y además siempre se cumple que $\boldsymbol{i_{in}^+ = i_{in}^- = 0}$

Entonces $V_0 = V_i \;\; y \; la \; ganacia \; es \; 1$



Como $\boldsymbol{i_{in}^+} = 0 \;\rightarrow \boxed{R_i = \infty}$ y como $V_o = V_i \quad \forall \, R_L \; entonces \; \boxed{R_o = 0}$

La configuración es una amplificador de tensión ideal, con ganancia 1 (recordad que esto es un buffer, y es muy útil para acondicionar una fuente de señal con una resistencia serie elevada a una carga)

Problema 19

Recordemos que una fotoresistencia es un sensor cuya resistencia varía con la intensidad luminosa h según $R(h)=\alpha/h$ con $\alpha=10^4$ en $\Omega\cdot$fc (parámetro constructivo) y h en fc, es decir de manera inversamente proporcional a h.

Se quiere diseñar un circuito que suministre una tensión proporcional a la intensidad luminosa h. Si el nivel medio de h es de 10fc, diseñe el circuito acondicionador para que el nivel medio de la tensión de salida esté comprendido entre +6V y +9V.

Use $\pm$15V de alimentación.

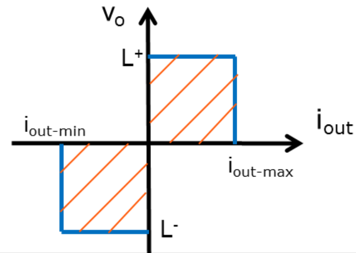
Se sugiere utilizar la configuración inversora colocando adecuadamente el sensor para cumplir las especificaciones.

Se pide:

1. Diseñar el circuito acondicionador
2. Obtener el equivalente de Thévenin a la salida del circuito anterior.

Efecto de la corriente máxima del Op Amp sobre la ganancia del circuito (problema 20)

- Hemos visto que la salida del Op Amp no puede superar los valores de tensión de saturación L^+ y L^-
- Otra limitación es **la corriente máxima que puede dar el Op Amp a la salida**. Si la carga o la red de realimentación piden más corriente que la máxima, el Op Amp entregará solo la máxima y la tensión de salida podrá verse limitada, y no llegar a $L^+ - L^-$



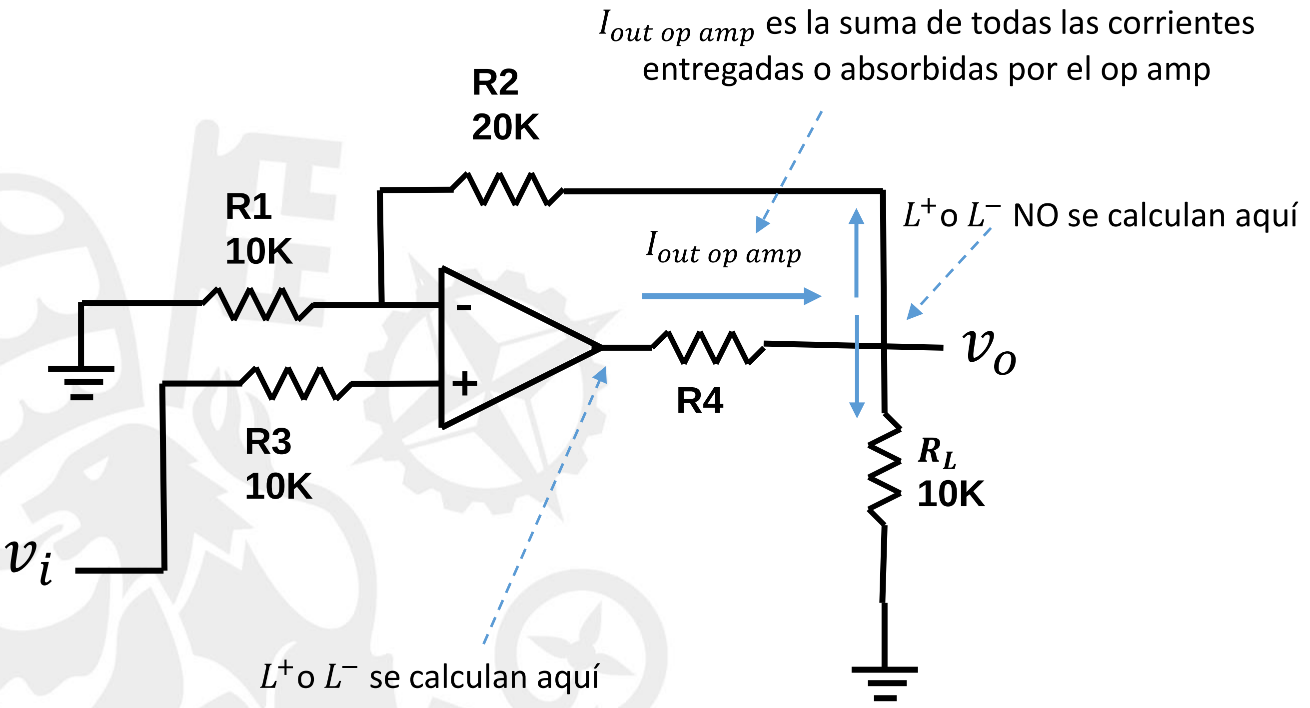
TLC272, TLC272A, TLC272B, TLC272Y, TLC277
LinCMOS™ PRECISION DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS

SLOS091E – OCTOBER 1987 – REVISED FEBRUARY 2002

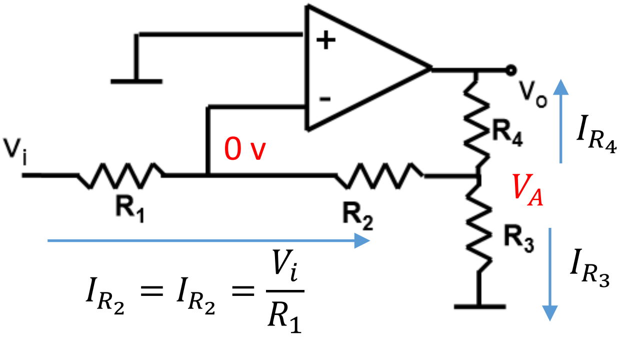
absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)†

Supply voltage, V_{DD} (see Note 1)	18 V
Differential input voltage, V_{ID} (see Note 2)	$\pm V_{DD}$
Input voltage range, V_I (any input)	–0.3 V to V_{DD}
Input current, I_I	±5 mA
output current, I_O (each output)	±30 mA
Total current into V_{DD}	45 mA
Total current out of GND	45 mA
Duration of short-circuit current at (or below) 25°C (see Note 3)	unlimited
Continuous total dissipation	See Dissipation Rating Table
Operating free-air temperature, T_A: C suffix	0°C to 70°C

Nota previa. ¿Donde miramos para comprobar L^{+} , L^{-} y $I_{out\ max}$, $I_{out\ min}$?



Amplificador de alta ganancia



1. Analizamos este circuito calculando la tensión V_A

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

(corriente $\frac{V_i}{R_1}$ multiplicada por R_2)

2. Calculamos la corriente por $\boldsymbol{R_3}$

$$I_{R_3} = \frac{V_A}{R_3} = \frac{-V_i \frac{R_2}{R_1}}{R_3} = -V_i \frac{R_2}{R_1 R_3}$$

3. **Sumamos corrientes:** $\boldsymbol{I_{R_2} - I_{R_3} - I_{R_4} = 0}$

$$I_{R_4} = \frac{V_i}{R_1} - \left(-V_i \frac{R_2}{R_1 R_3}\right) = \frac{V_i}{R_1} \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right)$$

4. **Calculamos** $\boldsymbol{V_o}$

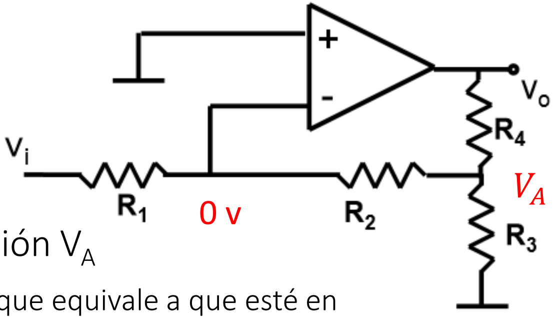
$$V_o = V_A - I_{R_4} R_4 = -V_i \frac{R_2}{R_1} - \frac{V_i}{R_1}\left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) R_4 = -V_i \frac{R_2}{R_1}\left(1 + \frac{R_2 + R_3}{R_2 R_3} R_4\right) =$$

$$V_i\left(-\frac{\boldsymbol{R_2}}{\boldsymbol{R_1}} \left(\boldsymbol{1} + \frac{\boldsymbol{R_4}}{\boldsymbol{R_2} \parallel \boldsymbol{R_3}}\right)\right)$$

$$\boxed{\boldsymbol{A_v = -\frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{R_4}{R_2 \parallel R_3}\right)}}$$

Este amplificador nos permite usar una R1 elevada (para tener una R_{in} elevada) y aún así conseguir ganancia elevada gracias al término $\frac{\boldsymbol{R_4}}{\boldsymbol{R_2 \parallel R_3}}$)

Amplificador de alta ganancia (otra forma de calcularlo)



- Analizamos este circuito calculando la tensión V_A

observad que R_2 está por su izquierda a 0 V, de modo que equivale a que esté en paralelo con R_3

$$V_A = V_o \frac{R_2 \parallel R_3}{(R_2 \parallel R_3) + R_4}$$

Por otra parte → $V_A = -V_i \frac{R_2}{R_1}$ (corriente $\frac{V_i}{R_1}$ multiplicada por R_2)

igualo los dos términos y despejo $\frac{V_o}{V_i} = A_v$

$$\boldsymbol{A_v = -\frac{R_2}{R_1}\left(1 + \frac{R_4}{R_2 \parallel R_3}\right)}$$

Este amplificador nos permite usar una R1 elevada (para tener una R_{in} elevada) y aún así conseguir ganancia elevada gracias al término $\frac{\boldsymbol{R_4}}{\boldsymbol{R_2 \parallel R_3}}$)

Amplificador de alta ganancia (problema 21)

- Diseñar un amplificador con ganancia $A_v = -100\, V/V$ y

$R_i = 1M$ y además se empleen resistencias $\leq 1M$

- El primer paso es determinar la resistencia de entrada del circuito

$$R_i = R_1 \quad luego\; R_1 = 1M$$

- Como no podemos usar resistencias superiores a 1M, el cociente $\frac{\boldsymbol{R_2}}{\boldsymbol{R_1}}$ no nos va a dar ganancia, elegimos la R_2 máxima posible

$$R_2 = 1M$$

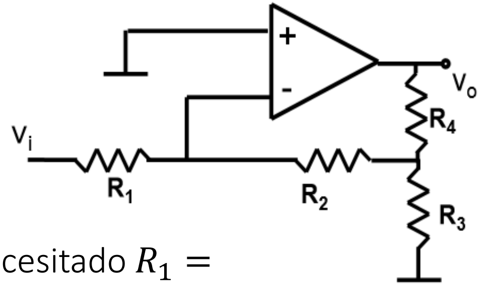
- Esto quiere decir que la ganancia de 100 la tiene que dar el término $\mathbf{1} + \frac{\boldsymbol{R_4}}{\boldsymbol{R_2} \| \boldsymbol{R_3}}$

$$\boldsymbol{A_v} = -\frac{\boldsymbol{R_2}}{\boldsymbol{R_1}}\left(\mathbf{1} + \frac{\boldsymbol{R_4}}{\boldsymbol{R_2} \parallel \boldsymbol{R_3}}\right)$$

- Elijo la R_4 que pueda darme la ganancia más elevada

$$R_4 = 1M$$

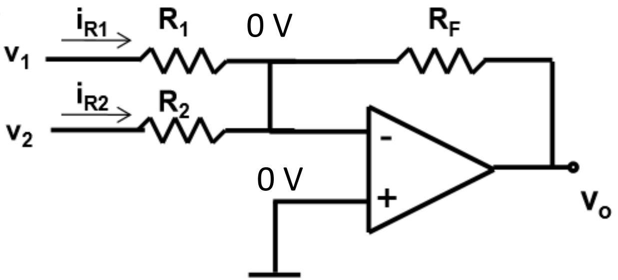
- De modo que $\frac{\mathbf{1}\boldsymbol{M}}{\mathbf{1}\boldsymbol{M} \| \boldsymbol{R_3}} = 99$



$$R_3 = 10K2$$

(Con el amplificador inversor estándar hubiéramos necesitado $R_1 = 1M$ y $R_2 = 100M$, esta última R no existe)

Sumador de señales



- Este circuito hace una suma ponderada de señales, gracias a que suma las corrientes que llegan a su terminal inversor v^-
- La corriente por la resistencia de realimentación R_f *es:*

$$I_{R_f} = I_{R1} + I_{R2} = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2}$$

- De modo que la tensión de salida es

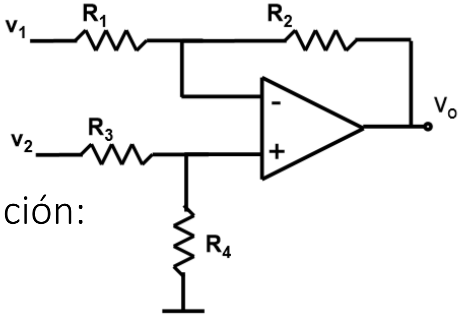
$$V_0 = -R_f\, I_{R_f} = -(\frac{R_f}{R_1}V_1 + \frac{R_f}{R_2}V_2)$$

y tenemos una salida que es una suma ponderada de las entradas

- Si ponderamos de igual forma ambas entradas ($R_1 = R_2$) la salida es entonces la suma de señales multiplicada por un factor

$$V_0 = -\frac{R_f}{R}(V_1 + V_2)$$

Amplificador diferencial



- Calculamos la tensión de salida por superposición:

V_0 debida a V_1 con V_2 puesta a 0

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1}V_1$$

(Esto es el amplificador inversor)

V_0 debida a V_2 con V_1 puesta a 0

$$V_o = V_2 \underbrace{\frac{R_4}{R_4+R_3}}_{\text{señal en la pata } v^+} \underbrace{\frac{R_1+R_2}{R_1}}_{\text{ganancia del no inversor}}$$

(Y esto el no inversor)

- Sumando tenemos:

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1}V_1 + \frac{R_4}{R_4+R_3}\frac{R_1+R_2}{R_1}V_2$$

Y **si** $\boldsymbol{\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}}$ y operando, obtenemos

$$\boxed{\boldsymbol{V_o = \frac{R_2}{R_1}(V_2 - V_1) = A_d V_d}}$$

$\boldsymbol{A_d = \frac{R_2}{R_1}}$ es la **ganancia diferencial** del circuito,

$\boldsymbol{V_d = (V_2 - V_1)}$ la **tensión diferencial** de entrada

Problema 25: diseño circuito acondicionador

- Se trata de diseñar un circuito de acondicionamiento para conectar el sensor de temperatura LM335 al conversor A/D de un microcontrolador. Para ello se propone generar una tensión de salida lineal con la temperatura tal que:

T=0ºC	$\Rightarrow$	V_{out} = 0 V
T=50ºC	$\Rightarrow$	V_{out} = 5 V

- El sensor de temperatura LM335 (ver hoja de características), cuando se alimenta apropiadamente, genera una tensión V_s que es función de la temperatura:

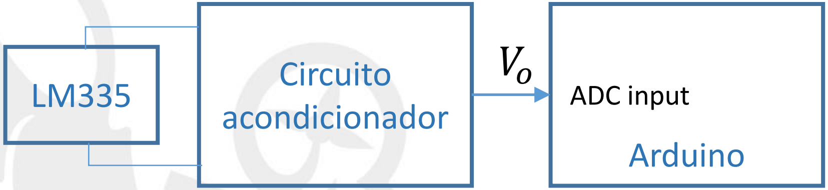
$$V_s = 10 \text{ mV/ºC} \times T + 2.73 \text{ V}$$

Siendo T la temperatura en grados centígrados. Suponiendo que se alimenta a ±15V se pide:

1. determinar la relación $V_{out} = f(V_s)$
2. diseñar el circuito

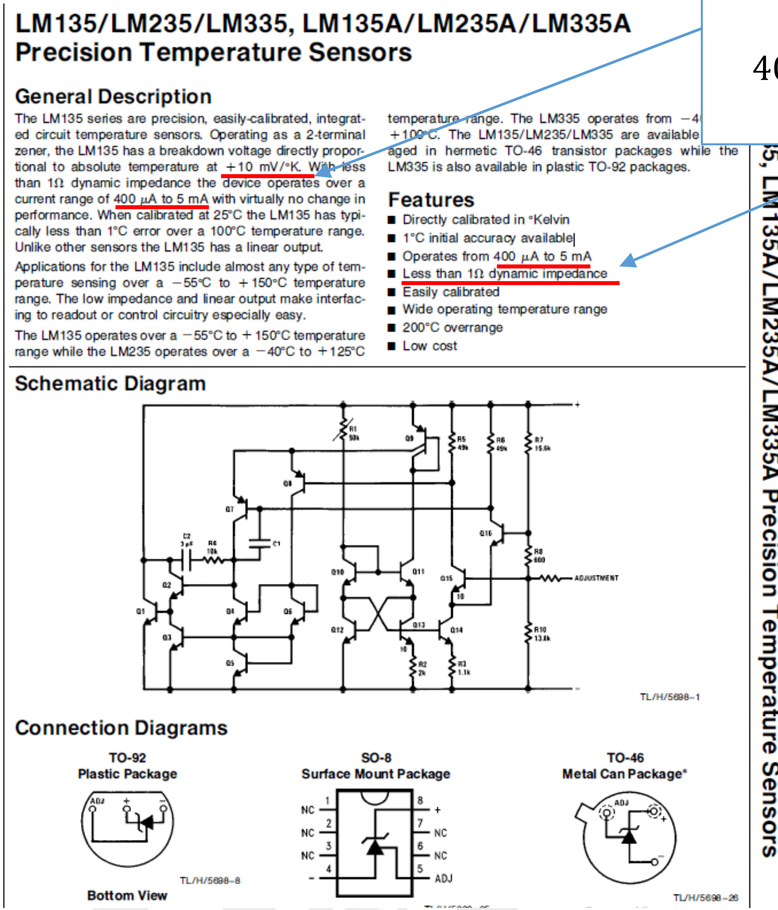
Circuito acondicionador para un sensor de Temperatura con LM335 (problema 25)

- Diseñar un circuito de acondicionamiento para conectar el sensor de temperatura LM335 con el conversor A/D de un microcontrolador (p.e. un Arduino, cuya entrada ADC tiene un rango de 0 a 5 V).
  - Generar una tensión de salida V_o lineal con la temperatura:
    - $T = 0º\ C \rightarrow V_o = 0\ V,\ \ T = 50º\ C \rightarrow V_o = 5\ V$
  - El sensor de temperatura es el LM335
  - Se alimenta el circuito a $\pm 15\ V$



Problema 25: LM 355

$$V_s = 10\,\frac{mV}{K}$$
$$R_o = 1\Omega \approx 0$$
$$400\mu A \leq I_o \leq 5\,mA$$



LM135/LM235/LM335, LM135A/LM235A/LM335A Precision Temperature Sensors

General Description

The LM135 series are precision, easily-calibrated, integrated circuit temperature sensors. Operating as a 2-terminal zener, the LM135 has a breakdown voltage directly proportional to absolute temperature at +10 mV/°K. With less than 1Ω dynamic impedance the device operates over a current range of 400 μA to 5 mA with virtually no change in performance. When calibrated at 25°C the LM135 has typically less than 1°C error over a 100°C temperature range. Unlike other sensors the LM135 has a linear output.

Applications for the LM135 include almost any type of temperature sensing over a −55°C to +150°C temperature range. The low impedance and linear output make interfacing to readout or control circuitry especially easy.

The LM135 operates over a −55°C to +150°C temperature range while the LM235 operates over a −40°C to +125°C temperature range. The LM335 operates from −4 +100°C. The LM135/LM235/LM335 are available aged in hermetic TO-46 transistor packages while the LM335 is also available in plastic TO-92 packages.

Features

- Directly calibrated in °Kelvin
- 1°C initial accuracy available
- Operates from 400 μA to 5 mA
- Less than 1Ω dynamic impedance
- Easily calibrated
- Wide operating temperature range
- 200°C overrange
- Low cost

Schematic Diagram

TL/H/5698–1

Connection Diagrams

TO-92
Plastic Package

Bottom View

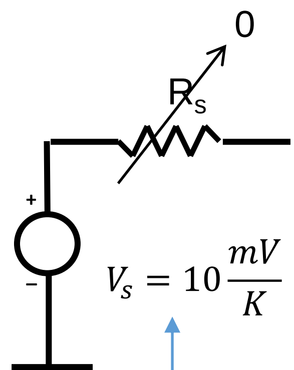
TL/H/5698–8

SO-8
Surface Mount Package

TO-46
Metal Can Package*

TL/H/5698–26

5, LM135A/LM235A/LM335A Precision Temperature Sensors



$$V_s = 10\,\frac{mV}{K}$$

El sensor se comportará como este equivalente de Thevenin

Problema 25: LM 355

Application Hints

CALIBRATING THE LM135

Included on the LM135 chip is an easy method of calibrating the device for higher accuracies. A pot connected across the LM135 with the arm tied to the adjustment terminal allows a 1-point calibration of the sensor that corrects for inaccuracy over the full temperature range.

This single point calibration works because the output of the LM135 is proportional to absolute temperature with the extrapolated output of sensor going to 0V output at 0°K (−273. 15°C). Errors in output voltage versus temperature are only slope (or scale factor) errors so a slope calibration at one temperature corrects at all temperatures.

The output of the device (calibrated or uncalibrated) can be expressed as:

$$V_{OUT_T} = V_{OUT_{T_o}} \times \frac{T}{T_o}$$

where T is the unknown temperature and T_o is a reference temperature, both expressed in degrees Kelvin. By calibrating the output to read correctly at one temperature the output at all temperatures is correct. Nominally the output is calibrated at 10 mV/°K.

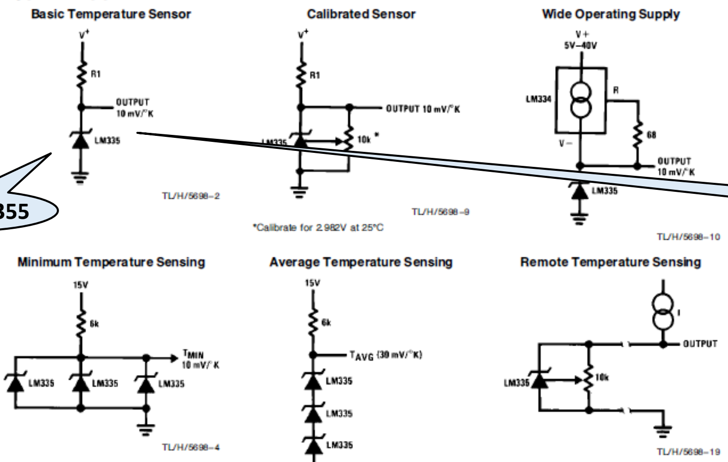
To insure good sensing accuracy several precautions must be taken. Like any temperature sensing device, self heating can reduce accuracy. The LM135 should be operated at the lowest current suitable for the application. Sufficient current, of course, must be available to drive both the sensor and the calibration pot at the maximum operating temperature as well as any external loads.

If the sensor is used in an ambient where the thermal resistance is constant, self heating errors can be calibrated out. This is possible if the device is run with a temperature stable current. Heating will then be proportional to zener voltage and therefore temperature. This makes the self heating error proportional to absolute temperature the same as scale

$$V_s = 10^{-2}[V/K].T[K] = 10^{-2}[V/K].(T[ºC]+273) = 10^{-2}[V/ºC].T[ºC] + 2{,}73[V]$$

point of the core. The unfilled ½" end melts and provides a seal over the device.

Typical Applications



Wire length for 1°C error due to wire drop

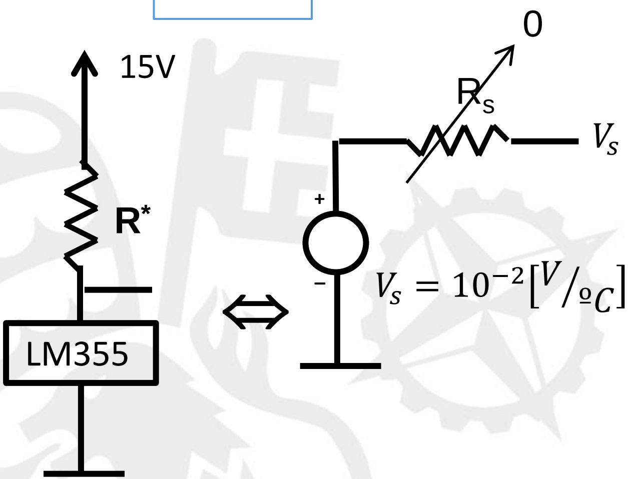
I_R = 1 mA I_R = 0.5 mA*

Sensor LM355

Circuito a emplear

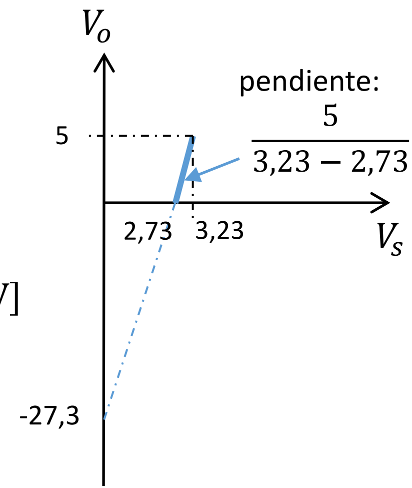
Circuito acondicionador para un sensor de T con LM335 (problema 25)

SENSOR



$$V_s = 10^{-2}[{}^{V}/_{ºC}].T[ºC] + 2{,}73[\mathrm{V}]$$

Buscamos esta salida del circuito



Para diseñar el circuito a colocar entre V_s y V_0 buscamos esta relación entre V_o y V_s

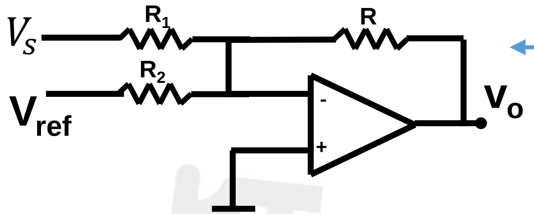
$$0\,^{o}C \rightarrow v_s = 2{,}73V \rightarrow v_o = 0V$$

$$50\,^{o}C \rightarrow v_s = 3{,}23V \rightarrow v_o = 5V$$

$$v_o = \frac{5}{3{,}23 - 2{,}73}\left(v_s - 2{,}73\right) = 10 v_s - 27{,}3\,V$$

Problema 25: diseño circuito acondicionador

Diseño : se trata de obtener $v_o = 10 v_s - 27{,}3\,V$



con un sumador

$$V_o = -\frac{R}{R_1}V_s - \frac{R}{R_2}V_{ref} \overset{?}{=} 10V_s - 27{,}3$$

Hace falta invertir el signo de v_s

Con inversor + sumador

$$v_o = \frac{R}{R_1}v_s - \frac{R}{R_2}V_{ref} = 10\,v_s - 27{,}3\,V$$

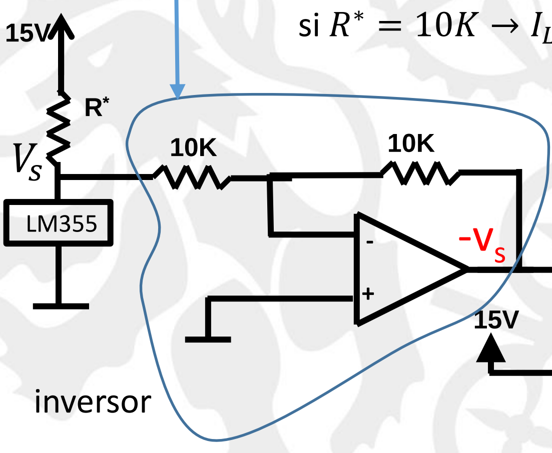
$$\left.\begin{aligned} \frac{R}{R_1} &= 10 \\ V_{ref}\frac{R}{R_2} &= 27{,}3 \end{aligned}\right\}$$

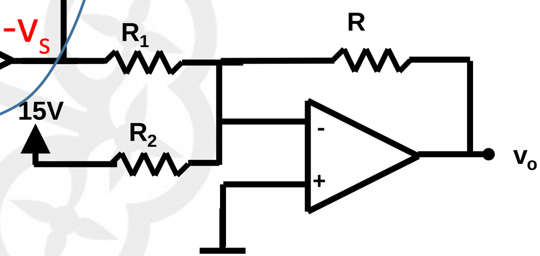
si $R_1 = 10K$ y $V_{ref} = 15V$ (alimentación)

$$R = 100K\,, R_2 = 54{,}9K$$

si $R^* = 10K \rightarrow I_{LM355} = \frac{15-V_S}{R^*} - \frac{V_S}{10K} = \frac{15-2v_S}{10K} = 0{,}85\,mA > 0{,}4\,mA$

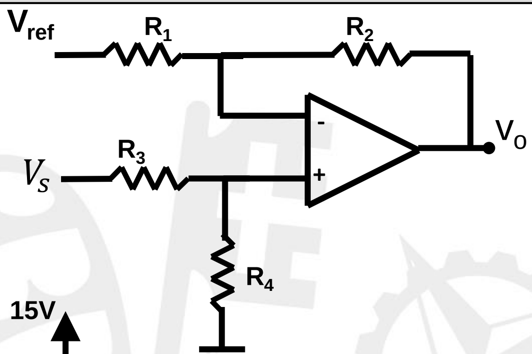
(cuando T es 50ºC, caso más desfavorable, pues V_S es máximo)

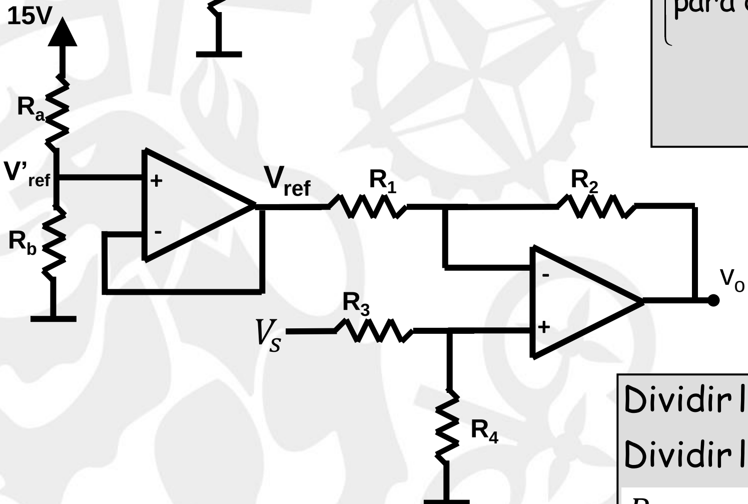




Problema 25: diseño circuito acondicionador

Diseño : se trata de obtener $v_o = 10 v_s - 27{,}3\,V$





¿Con restador?

$$v_o = \frac{R_4}{R_3 + R_4}\frac{R_1 + R_2}{R_1} v_s - \frac{R_2}{R_1} V_{ref} \overset{?}{=} 10 v_s - 27{,}3\,V$$

$$\begin{cases} \text{si } V_{ref} = 15V \Rightarrow \dfrac{R_2}{R_1} 15 = 27{,}3 \Rightarrow \dfrac{R_2}{R_1} = 1{,}82 \\ \dfrac{R_4}{R_3 + R_4} (1 + 1{,}82) = 10 \text{ imposible} \Rightarrow \text{reducir } V_{ref} \\ \dfrac{R_4}{R_3 + R_4} < 1 \\ \text{para dar más ganancia con } \dfrac{R_2}{R_1} \text{ que los } 1{,}82 \end{cases}$$

2 opciones para generar Vref

Dividir los 15V y añadir buffer

Dividir los 15V sin añadir buffer, pero con

$$R_{1\,eq} = (R_a \parallel R_b) + R_1$$

Problema 25: diseño circuito acondicionador

Si $V_{ref} = 1{,}5\ v \ \rightarrow \frac{R_2}{R_1} = 18{,}2$

y entonces $\frac{R_4}{R_3+R_4} = \frac{10}{1+18{,}2}$ ya es realizable