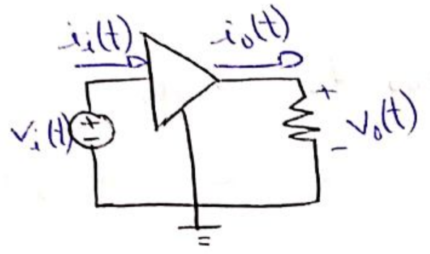
TEMA 6 - EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Características de los Amplificadores



GANANCIA DE VOLTAJE $A_v = \frac{V_o}{V_i}$

GANANCIA DE CORRIENTE $A_i = \frac{i_o}{i_i}$

Característica de transferencia $\Rightarrow V_o = A_v \cdot V_i$

- La alimentación (fuentes V_1 y $-V_2$) es necesario para que el amplificador funcione y limita su comportamiento.
- Condiciones ideales: $-V_2 \leq v_o(t) \leq V_1$
- Alimentación simétrica: $V_1 = V_{cc} = V_2$
- Fenómeno de saturación: La característica de transferencia permanece lineal sólo un intervalo limitado de voltajes de entrada y salida.
- Condiciones reales: $-V_2 < \underbrace{L_- \leq v_o(t) \leq L_+}_{\text{Valores de saturación}} < V_1$

Para evitar la saturación:

Como $v_o(t) = A_v \cdot v_i(t)$, sustituimos en la fórmula anterior:

$$L_- \leq v_o(t) \leq L_+ \Rightarrow \frac{L_-}{A_v} \leq v_i(t) \leq \frac{L_+}{A_v}$$

Respuesta en frecuencia

La señal de entrada y salida puede ser sinusoidal de frecuencia w. Dicha respuesta en frecuencia se caracteriza a través de la función de transferencia del propio amplificador: $|T(\omega)| = \frac{V_o}{V_i}$ $\arg(T(\omega)) = \arg(V_o) - \arg(V_i)$

Para calcular $T(\omega)$ es necesario analizar el dominio de la frecuencia con impedancias.

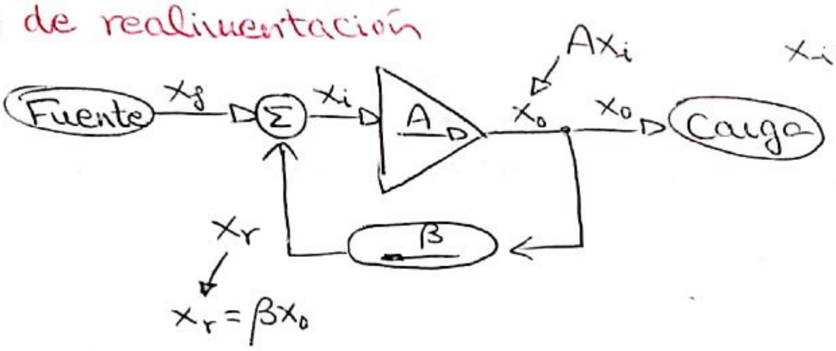
Realimentación

AMPLIFICADOR EN LAZO ABIERTO: No existe conexión entre entrada y salida.

AMPLIFICADOR CON REALIMENTACIÓN: Se establece conexión entre salida y entrada.

Tipos de realimentación

$x_i = x_g \pm x_r = x_g \pm \beta x_0$



- Realim. positiva: $x_i = x_g + \beta x_0$ · β suele ser grande $\Rightarrow x_i$ va aumentando y el amplificador acaba entrando en saturación.
- Realim. negativa: $x_i = x_g - \beta x_0$. Operando, $x_i = \frac{1}{1+\beta A} x_g$ · β suele ser grande $\Rightarrow x_i$ disminuye hasta que $x_i \simeq 0 \Rightarrow x_g \simeq \beta x_0$
- Ganancia del amplificador realimentado A_r:

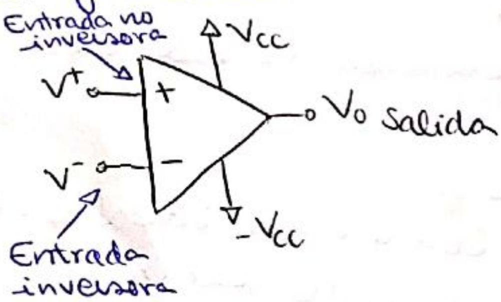
$$A_r = \frac{x_0}{x_g} = \frac{x_0}{x_i + x_r} = \frac{Ax_i}{x_i + \beta x_0} = \frac{Ax_i}{x_i + \beta A x_i} = \frac{A}{1+\beta A}$$

(Retroalimentación negativa)

En general se suele usar que $A_r \simeq \frac{1}{\beta} \Rightarrow$ La red de alimentación es la que realmente está controlando el proceso

Características del Amp. Op.

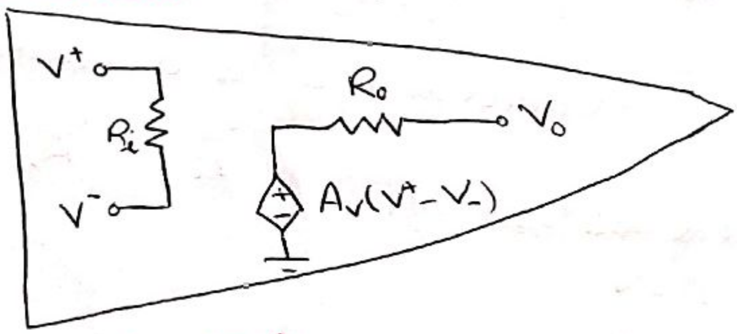
- Es de gran ganancia.



La tierra del circuito se encuentra fuera del amplificador

Está compuesto por muchos transistores

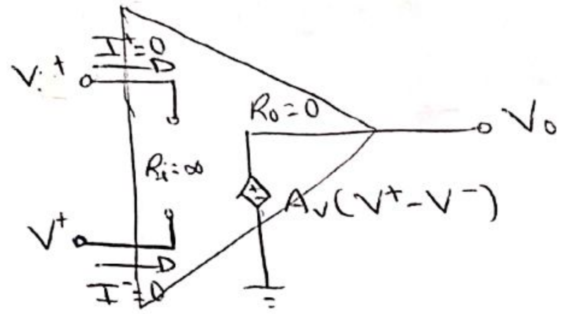
Modelo lineal



Es deseable que R_i sea grande y R_0 pequeña

Modelo lineal ideal

- Los límites de saturación son los voltajes de alimentación.
- A_v es muy grande $\Rightarrow A_v \rightarrow \infty$
- R_i es muy grande $\Rightarrow R_i \rightarrow \infty$
- R_0 es muy pequeña $\Rightarrow R_0 \rightarrow 0$ y $V_0 = A_v(V^+ - V^-)$
- Ancho de banda muy grande $\Rightarrow B \rightarrow \infty$



Es un circuito que sirve para comparar

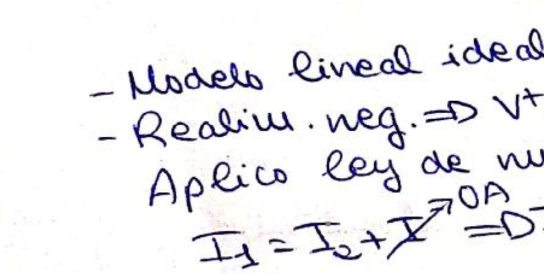
Realimentación en Amp. Op.

- Lazo abierto: Sin conexión entre entrada y salida. Como A_v es muy grande, el amplificador se satura ⟹ Circuito comparador
- Amp. Op. con realimentación:
  - Para real. positiva la salida se conecta, usando una red de realimentación, a la entrada no inversora. Circuito comparador.
  - Para real. negativa la salida se conecta, usando una red de realimentación, a la entrada inversora. Principal característica: $V^+=V^-$. Tiene múltiples aplicaciones.

Aplicaciones lineales

Siempre será con el modelo lineal ideal y realimentación negativa

▶ Configuración inversora



- Condiciones ideales: $I^-=I^+=0A$
- Leyes de Kirchoff:

$$I_1=I_2+\underset{0A}{I^-} \Rightarrow I_1=I_2 \Rightarrow \frac{V_i-V_A}{R_1}=\frac{V^--V_0}{R_2}$$

- Característica de transferencia:

$$\frac{V_0}{V_i}=-\frac{R_2}{R_1}$$

- Modelo lineal ideal ⟹ $I^+=I^-=0A$
- Realim. neg. ⟹ $V^+=V^-$

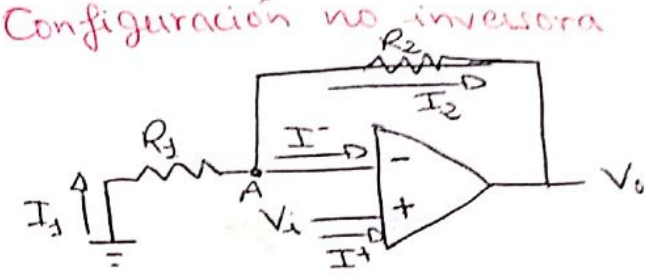
Aplico ley de nudos:

$$I_1=I_2+\cancel{I^-}^{0A} \Rightarrow I_1=I_2 \quad V^+=0 \text{ (Se ve del circuito)} \Rightarrow V^-=0V$$

$$I_1=\frac{V_i-V_A}{R_1}=\frac{V_i-\cancel{V_A}^{0A}}{R_1}=\frac{V_i}{R_1} \qquad I_2=\frac{\cancel{V_A}^{0A}-V_0}{R_2}=-\frac{V_0}{R_2}$$

$$\frac{V_i}{R_1}=-\frac{V_0}{R_2} \Rightarrow \boxed{V_0=-\frac{R_2}{R_1}V_i}$$

▸ Configuración no inversora



•) Modelo lineal ideal: $I^+ = I^- = 0A$

•) Realimentación negativa: $V^+ = V^-$

Analizo el circuito: $V^+ = V_i \Rightarrow V_i = V^-$

Uso ley de nudos (A):

$$I_1 = \cancel{I^-}^{0A} + I_2 \Rightarrow \frac{-V^-}{R_1} = I_1 = \frac{-V_i}{R_1}$$

$$\frac{V^- - V_o}{R_2} = I_2 = \frac{V_i - V_o}{R_2}$$

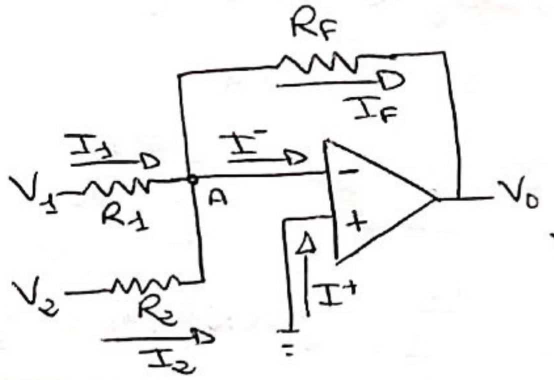
$$\frac{-V_i}{R_1} = \frac{V_i - V_o}{R_2}$$

$$\Rightarrow -V_i \frac{R_2}{R_1} - V_i = -V_o \Rightarrow V_o = V_i \frac{R_2}{R_1} + V_i = V_i \left(1 + \frac{R_2}{R_2}\right)$$

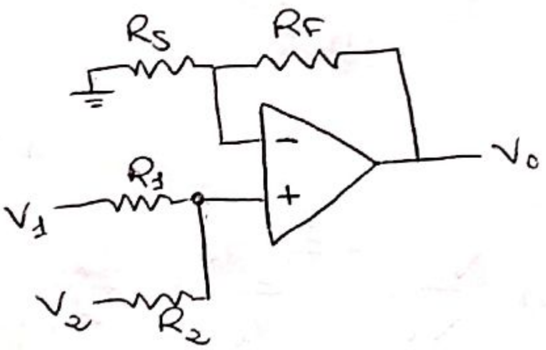
$$y = \underbrace{\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}_{\text{Positiva} > 1} x$$

▸ Sumador

CIRCUITO INVERSOR



CIRCUITO NO INVERSOR



•) Modelo L.I. $\Rightarrow I^+ = I^- = 0A$

•) Retroalim. negativa $\Rightarrow V^+ = V^- \Rightarrow 0 = V^-$

•) Ley de nudos:

$$I_1 + I_2 = \cancel{I^-}^{0A} + I_F \Rightarrow \frac{V_1 - V^-}{R_1} + \frac{V_2 - V^-}{R_2} = \frac{V^- - V_o}{R_F}$$

Aquí no tiene sentido pintar la característica de transferencia

$$V_1 R_F R_2 - V^- R_2 R_F + V_2 R_1 R_F - V^- R_1 R_F = V^- R_1 R_2 - V_o R_1 R_2$$

$$V_o R_1 R_2 = -V_1 R_F R_2 + V^- R_2 R_F - V_2 R_1 R_F + V^- R_1 R_F$$

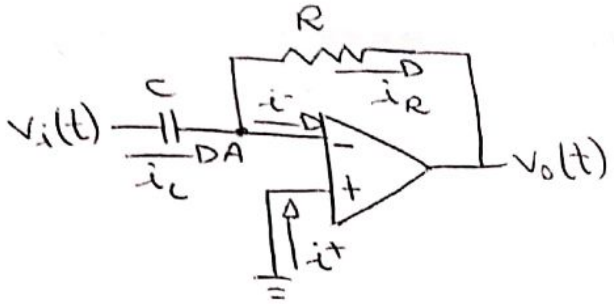
$$V_o R_1 R_2 = -V_1 R_F R_2 - V_2 R_1 R_F$$

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

Si $R_1 = R_2 = R_F \Rightarrow V_o = -(V_1 + V_2)$

Derivador

DERIVADOR DOMINIO T



Análisis

•) Modelo L.I. $\Rightarrow i^+ = i^- = 0A$

•) Realim. negat. $\Rightarrow V^+ = V^- \overset{\parallel}{=} 0V$

•) Ley de nudos (A):

$$i_C = \cancel{i^-}^{0A} + i_R$$

$$i_C = i_R$$

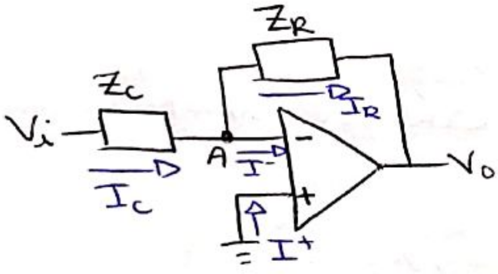
$$i_R = \frac{V_A - V_o}{R} = \frac{V^- - V_o}{R} = \frac{-V_o}{R}$$

$$i_C = C \cdot \frac{d(V_i - V^-)}{dt} = C \cdot \frac{d(V_i)}{dt}$$

$$\frac{-V_o}{R} = C \cdot \frac{d(V_i)}{dt}$$

$$\boxed{V_o(t) = -RC \cdot \frac{d(v_i(t))}{dt}}$$

DERIVADOR DOMINIO ω



Análisis

•) Modelo L.I. $\Rightarrow I^+ = I^- = 0A$

•) Realim. negat. $\Rightarrow V^+ = V^- = 0V$

•) Ley de nudos (A):

$$I_C = \cancel{I^-}^{0A} + I_R$$

$$\left.\begin{array}{l} I_C = \dfrac{V_i}{Z_C} \quad I_R = \dfrac{-V_o}{Z_R} \end{array}\right\} \frac{V_i}{Z_C} = -\frac{V_o}{Z_R}$$

$$\Downarrow$$

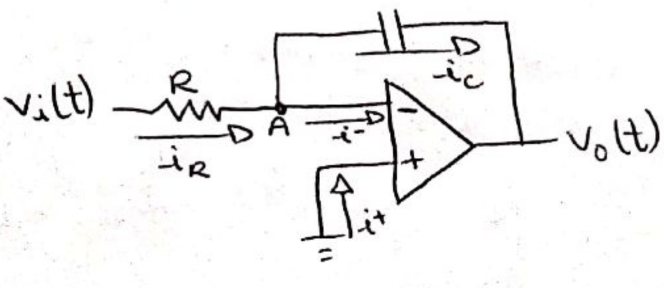
$$\boxed{V_o = -\frac{Z_R}{Z_C} V_i}$$

$$\boxed{T(\omega) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-\frac{Z_R}{Z_C} V_i}{V_i} = -\frac{Z_R}{Z_C} = -\frac{R}{\frac{1}{j\omega C}} = -j\omega CR}$$

$$\boxed{\begin{array}{l} |T(\omega)| = \sqrt{0 + (\omega CR)^2} = \omega CR \\ \arg(T(\omega)) = -\frac{\pi}{2} = \frac{3\pi}{2} \end{array}}$$

Integrador

INTEGRADOR DOMINIO T



Análisis

•) Modelo L.I. $\Rightarrow i^+ = i^- = 0A$

•) Realim. negat. $\Rightarrow V^+ = V^- = 0V$

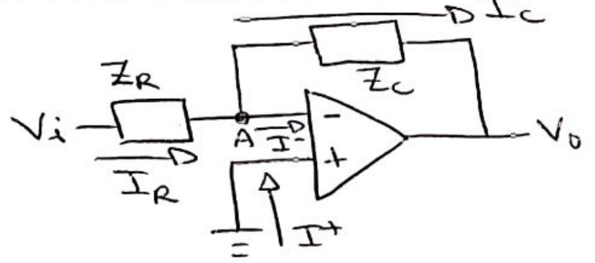
•) Ley de nudos (A):

$$i_R = \cancel{i^-}^{0A} + i_C$$

$$i_R = \frac{V_i(t)}{R} \quad i_C = C \cdot \frac{d(-V_o(t))}{dt} = -C\frac{d(V_o(t))}{R}$$

$$\frac{v_i(t)}{R} = -C \cdot \frac{d(v_o(t))}{dt} \Rightarrow V_o = -\frac{1}{RC}\int V_i(t)\,dt$$

INTEGRADOR DOMINIO ω



<u>Análisis</u>

•) Modelo L.I. ⇒ $I^+ = I^- = 0A$

•) Realim. negat. ⇒ $V^+ = V^- = 0V$

•) Ley de nudos A:

$$I_R = \cancel{I^-}^{\,0A} + I_C$$

$$I_R = \frac{V_i}{Z_R} \qquad I_C = \frac{-V_o}{Z_C}$$

$$\boxed{V_o = -\frac{Z_C}{Z_R} V_i}$$

$$V_o = -\frac{\frac{1}{j\omega C}}{Z_R} V_i = -\frac{1}{j\omega CR} V_i$$

$$T(\omega) = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{Z_C}{Z_R} = -\frac{1}{j\omega CR} \Rightarrow \boxed{T(\omega) = \frac{1}{\omega CR}}$$

$$|T(\omega)| = \frac{j}{\omega CR} \Rightarrow \boxed{\arg(T(\omega)) = \frac{\pi}{2}}$$

Problema de estabilidad

Se debe a que el condensador está en el bucle de realimentación. En continua, condensador = circuito abierto ⇒ no hay realimentación negativa.

Solución ⇒ Se coloca una resistencia muy grande en paralelo con el condensador (integrador modificado)