

TEMA 1: Circuitos con Amplificadores Operacionales.

Bibliografía básica:

- A. Budak: Passive and active network analysis and synthesis. Houghton–Mifflin 1974.
- L. O. Chua: Introduction to nonlinear network theory. McGraw–Hill 1969.

Bibliografía Adicional:

- J.W. Wait, L. Huelsman, G.A. Korn: Introduction to operational amplifier theory and applications McGraw–Hill 1975.
- J.K. Roberge: Operational Amplifiers. Wiley 1975.

1.Descripción del circuito y modelo.

El Amplificador Operacional es un bloque básico elemental en numerosas aplicaciones.

Desde finales de los 60's están disponibles comercialmente implementaciones del mismo usando circuitos integrados monolíticos.

La realización física de un amplificador operacional se hace via la interconexión de transistores bipolares y/o transistores MOS. Aquí solo estamos interesados en su descripción desde las puestas en condiciones estáticas y en mostrar las posibilidades de aplicación del mismo.

Como paso previo es conveniente profundizar en el concepto genérico de amplificador de tensión y en el modelado estático de los mismos.

• Amplificador de tensiones: Modelo ideal y real.

La amplificación constituye una de las aplicaciones básicas de los dispositivos semiconductores.

La idea básica es obtener una señal (vg. Una tensión) que sea una versión ampliada de otra.

La propiedad de amplificación suele estar asociada al comportamiento en pequeña señal o lineal de resistores no-lineales como el transistor bipolar o el transistor MOS.

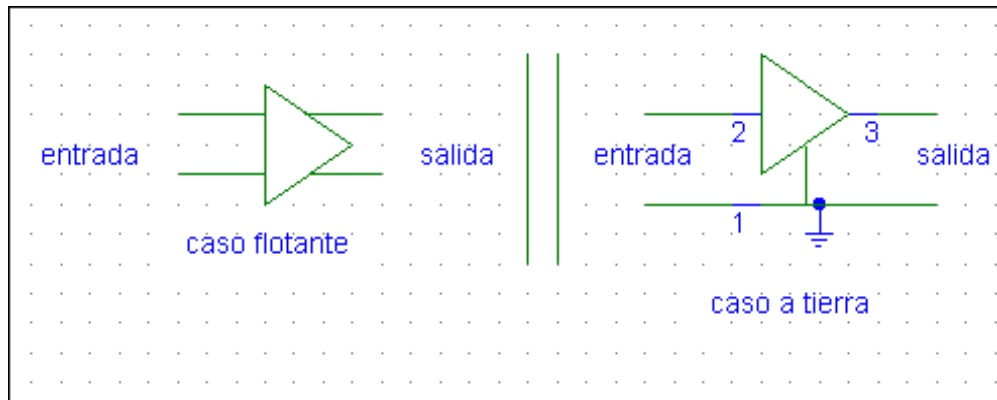
EJEMPLO 1.1

$$V_s \ll V_{gs}$$

$$V_{ds} = V_{ds} + V_o \text{ con valores típicos}$$

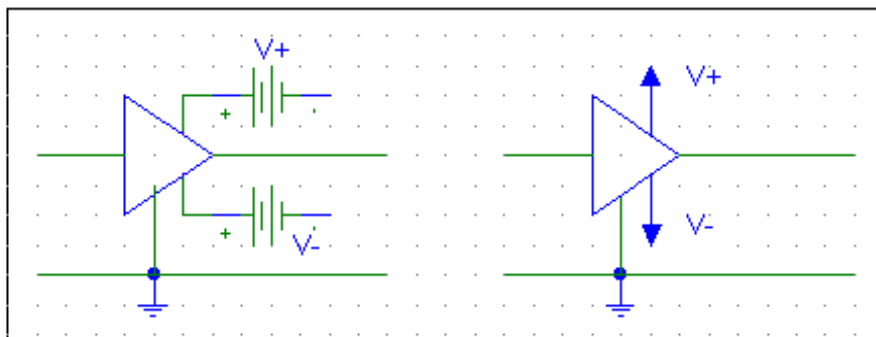
En el punto Q(V_{ds} , V_{gs})

Para representar Amplificadores de Tensión se suele usar la siguiente simbología:



Caben situaciones intermedias (vg. , entrada flotante y salida a tierra). En el caso a tierra a veces se prescinde de mostrar explícitamente el terminal de tierra.

Debe recordarse que en un amplificador se requieren fuentes de polarización para seleccionar el punto de operación, lo cual se manifiesta a veces en el símbolo usado.

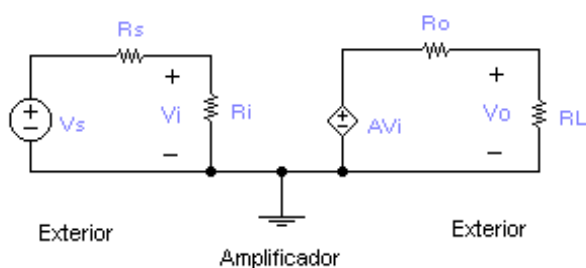


En el **Modelo Ideal** de un Amplificador Operacional se supone que los circuitos externos no afectan al funcionamiento del mismo. Es una fuente de tensión controlada por tensión.

$$V_{out} = A_v V_s \quad \nabla$$

V_s, R_s y R_L

En un amplificador real, la relación V_o/V_s se ve afectada por el valor de R_s y el de R_L , esto se modela mediante sendos parámetros llamados resistencia de entrada y de salida, respectivamente.



$R_s/R_i \ll 1$

Notamos que $V_o/V_s \approx 1$ para

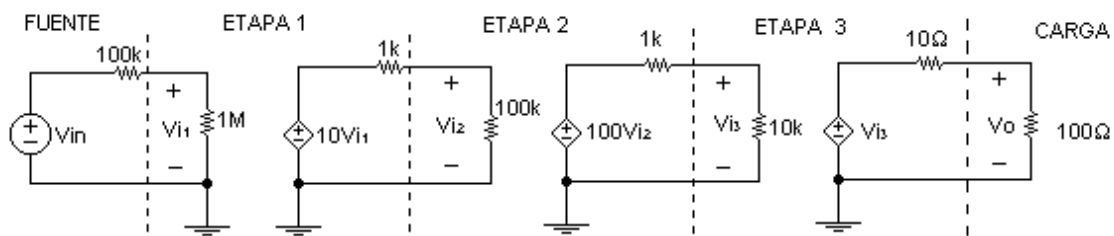
$R_o/R_L \ll 1$

Un parámetro de interés es la ganancia de potencia:

$$A_p = \frac{P_L}{P_s} = \frac{V_o^2 / R_L}{V_s^2 / (R_s + R_i)} = \frac{R_s + R_i}{R_L} \frac{V_o^2}{V_s^2}$$

A veces, interesa solo ganancia de potencia sin amplificación de la señal (buffer o seguidor de tensiones).

Ejemplo 1.2. Para el circuito cascada de tres amplificadores de la figura, calcular A_v y A_p .



$$A_{V1} = 10 \frac{1000}{1000 + 100} = \frac{100}{100 + 1} = 9 = \frac{V_{i2}}{V_{in}}$$

$$A_{V2} = 100 \frac{10}{10 + 1} = 90.9 = \frac{V_{i3}}{V_{i2}}$$

$$A_{V3} = 1 \frac{100}{100 + 10} = 0.909 = \frac{V_o}{V_{i3}}$$

La ganancia total es:

$$A_v = \frac{V_o}{V_s} = A_{V1} A_{V2} A_{V3} = 743.7 = 57.4dB$$

$$P_L = \frac{V_o^2}{100}$$

$$; P_s = \frac{V_s^2}{10^5 + 10^6}$$

$$; A_p = A_v^2 (1.1 \cdot 10^4) = 97.8dB$$

Para otros tipos de amplificador que no sean de tensiones, los modelos reales se muestran abajo (V_s , R_s y R_L son elementos externos en cada caso).

$$\frac{i_o}{i_s} = A \frac{R_s}{R_s + R_i} \frac{R_o}{R_o + R_L}$$

Amplificador de Intensidad ($I_s = V_s/R_s$)

$$\frac{i_o}{V_s} = A \frac{R_i}{R_s + R_i} \frac{R_o}{R_o + R_L}$$

Amplificador de transconductancia

$$\frac{V_o}{I_s} = A \frac{R_s}{R_s + R_i} \frac{R_L}{R_o + R_L}$$

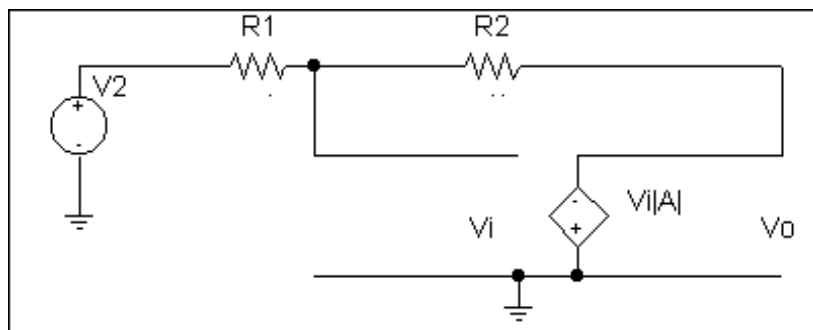
Amplificador de transresistencia.

- **Concepto básico de realimentación. Insensibilidad frente a parámetros.**

Sea un amplificador de tensiones y supongamos $R_i \rightarrow \infty$; $R_o = 0$; $A < 0$.

Si se considera la realización de tal circuito mediante dispositivos tales como transistores, se encuentra que $|A|$ presenta una alta dependencia de factores como la temperatura y el dispositivo particular usado. Esto es indeseable y se puede corregir recurriendo al uso de realimentación.

Conceptualmente, realimentar implica hacer que la salida dependa de ella misma, además de la entrada. Por ejemplo con el amplificador anterior:



$$V_i = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_s + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_o$$

$$V_o = -|A| \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_s - |A| \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_o$$

Despejando V_o en la expresión anterior se obtiene:

$$\frac{V_o}{V_s} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{|A|}{1 + \frac{R_2}{R_1} + |A|} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Que se denomina ganancia en lazo cerrado en contraposición con $|A|$, ganancia en lazo abierto.

Notamos que haciendo $|A|$ suficientemente grande, tiende a 1.

$$\lim_{|A|} = -\frac{R_2}{R_1}$$

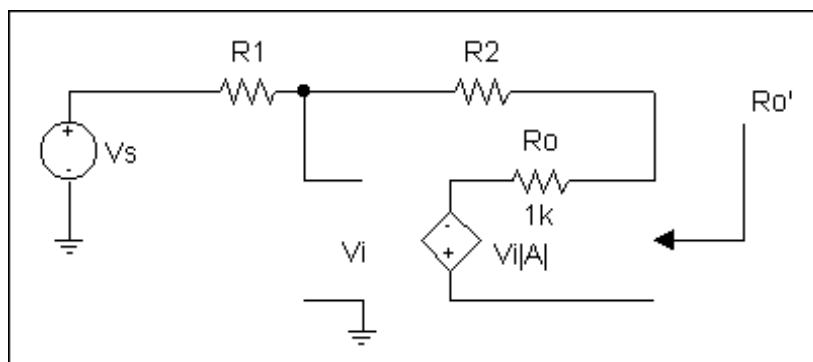
¡¡ Dependiente del cociente de resistencias, que se puede fijar con precisión!!

EJEMPLO 1.3

R2/R1	($ A =103$)	($ A =104$)
1	$1-2 \times 10^{-3}$	$1-2 \times 10^{-4}$
10	$1-0.01$	$1-1 \times 10^{-3}$
100	$1-0.09$	$1-0.01$

En conclusión la realimentación, junto con una ganancia en lazo abierto elevada, permite obtener ganancias en lazo cerrado insensibles al amplificador básico.

Notamos como aspecto adicional que la realimentación permite reducir la resistencia de salida, aproximando así el comportamiento del amplificador realimentado al de uno ideal. En efecto:



Se obtiene tras un cálculo elemental:

$$R_o' = \frac{R_o(R_1 + R_2)}{R_o + R_1 + R_2 + R_1|A|} \quad |A| \rightarrow \infty$$

• El Amplificador Operacional.

Esencialmente es un amplificador de tensiones con la entrada flotante (diferencial); salida a tierra; ganancia en lazo abierto muy alta; resistencia de entrada muy alta y resistencia de salida muy baja.

Conceptualmente se puede describir como sigue:

V_o

1

A

V_a

$R_{in} = \infty$; R_{o0}

Las características del modelo ideal son las siguientes:

- Resistencia de entrada infinita: intensidad nula en cada terminal de entrada.
- Resistencia de salida nula: la tensión de salida no resulta afectada por las cargas externas.
- Tensión de salida proporcional a la diferencia de las tensiones de entrada.

$V_o = A (V_+ - V_-)$

- Constante de proporcionalidad muy grande (esencialmente infinito).

$A \rightarrow \infty$

Notamos que lo anterior constituye una descripción lineal. No se establece restricción alguna sobre la tensión de salida, pero es evidente que esta debe restringirse a un rango finito. Con esta precisión, el modelo no-lineal ideal del amplificador operacional resulta: V_o

V_{s+}

V_a

1

$A \rightarrow \infty$

V_{s-}

1.3 Regiones de funcionamiento

Atendiendo al modelo anterior, podemos distinguir dos regiones de funcionamiento:

- ZONA LINEAL
- ZONA NO-LINEAL

Zona lineal: La tensión de salida se mantiene en el rango $[V_{s-}, V_{s+}]$

$-V_{s-} \leq V_o \leq V_{s+}$

Nótese que esto significa:

$V_a = (V_o/A) \ll 1$

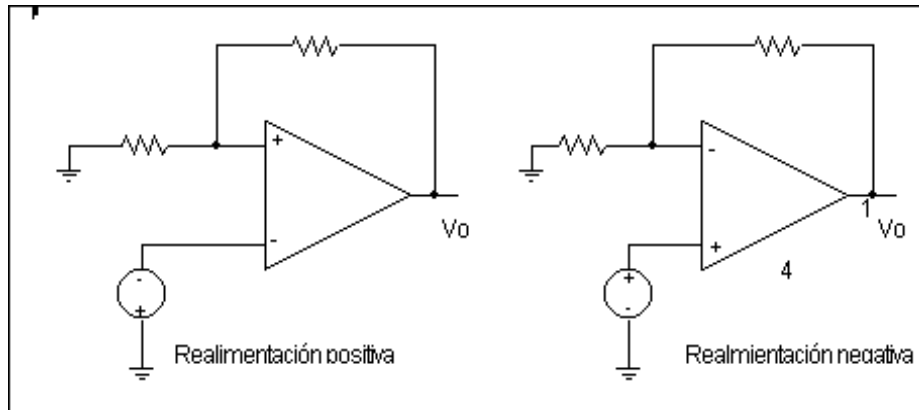
Zona no-lineal: La tensión de salida se sale del rango $(-V_{s-}, V_{s+})$.

Esto significa que la tensión de entrada V_a se independiza de la salida.

2.El Amplificador Operacional en zona lineal

La operación del AO en zona lineal se asocia al uso de realimentación.

Debe distinguirse realimentación negativa, de realimentación positiva. Por ejemplo:



Para funcionamiento en zona lineal debe proveerse realimentación negativa o, al menos, que la realimentación negativa sea mayor que la positiva.

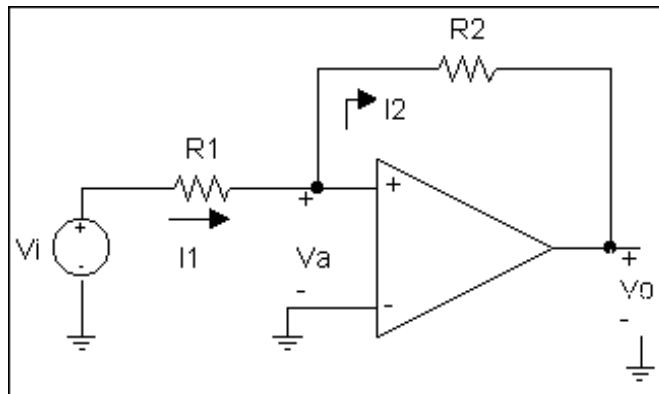
2.1 Modelo de tierra virtual

En zona lineal, $V_a = V_o/A$ con $A \gg 1$. Esto constituye la base del siguiente modelo, de gran utilidad a efectos de análisis.

- La tensión en los terminales de entrada es la misma ($V_a = 0$).
- La intensidad entrando a los terminales de entrada es nula.
- la tensión de salida es un valor establecido, V_o .

2.2 Análisis de la Configuración Inversora

Sea el circuito de la figura y supongamos que se desea calcular V_o/V_i .



METODO 1

$$\text{KCL } -V_i + R_1 I_1 + V_a = 0 \quad \text{MODELO } I_2 = I_1$$

$$+ -V_o - R_2 I_2 + V_a = 0 \quad \text{DEL AO } V_a = 0$$

$$\text{KVL } I_2 = I_1 - I_a$$

De este modo, se tendrá:

MÉTODO 2

Por inspección del circuito, teniendo en cuenta que $I_a = 0$.

OBSERVACIONES

- La ganancia en lazo cerrado es negativa y puede seleccionarse vía R_2/R_1 .
- La fuente V_i ve una resistencia de valor R_1 (en esta debe incluirse una eventual resistencia de fuente).
- Con el modelo usado, la impedancia de salida es cero. No obstante, en la práctica debe ser capaz de suministrar la intensidad requerida por R_2 y una eventual carga R_L .
- El resultado obtenido solo es válido si $V_o \in [-V_{s-}, V_{s+}]$.

EJEMPLO 1.4.– Encontrar la ganancia de lazo cerrado del circuito mostrado abajo.

$$I_s = I_1 = I_2 + I_3$$

$$= -1020$$

GENERALIZACIÓN

Supongamos una estructura tal como la mostrada abajo:

Donde N_1 y N_2 están caracterizados genéricamente como sigue:

Siendo $F_1(\cdot)$ y $F_2(\cdot)$ representaciones simbólicas de operadores arbitrarios.

El modelo de tierra virtual nos permite escribir: ($V_a = 0$, $I_s = I_f$).

$$I_s = F_1(V_i); -V_o = F_2[F_1(V_i)]$$

EJEMPLOS

- INTEGRADOR
- DIFERENCIADOR

$$F_2(I_f) = R I_f$$

- CIRCUITO NO LINEAL

j

$$F_2(I_f) = \frac{1}{R_2/R_1} V_o$$

V_i

$1/R_f$

R_2

