

Tema 11: El Amplificador Operacional.

Contenidos

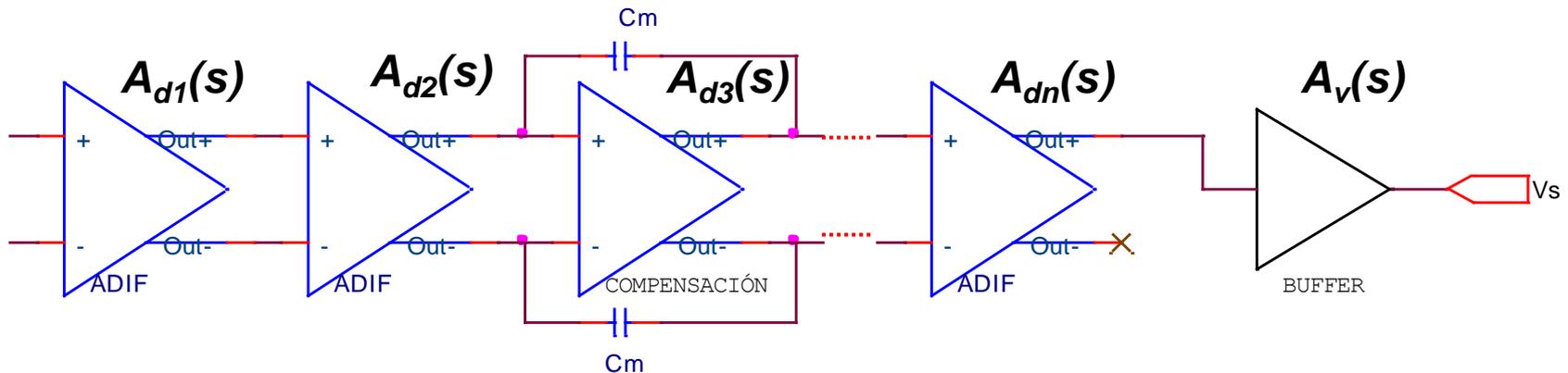
- 11.1 El OPA como Bloque Realimentado.
- 11.2 El OPA de una Etapa: Aumento de la Ganancia.
- 11.3 El OPA de dos Etapas: Esquema de Compensación.
- 11.4 Aplicaciones con OPAs y OTAs.

11.1 El OPA como Bloque Realimentado.

Estructura del OPA como amplificador multietapa.

Características deseables del amplificador operacional real

- Estructura de entrada diferencial: El OPA es un amplificador diferencial.
- Ganancia diferencial elevada (CMRR lo mayor posible): Amplificadores diferenciales en cascada, estructuras cascode.
- Impedancia de entrada elevada: Entradas FET, BJT tipo Darlington, etc.
- Impedancia de salida pequeña: Estructura buffer de salida.
- Estable en el caso peor: Se necesita compensación.



11.3 El OPA de dos Etapas: Esquema de Compensación.

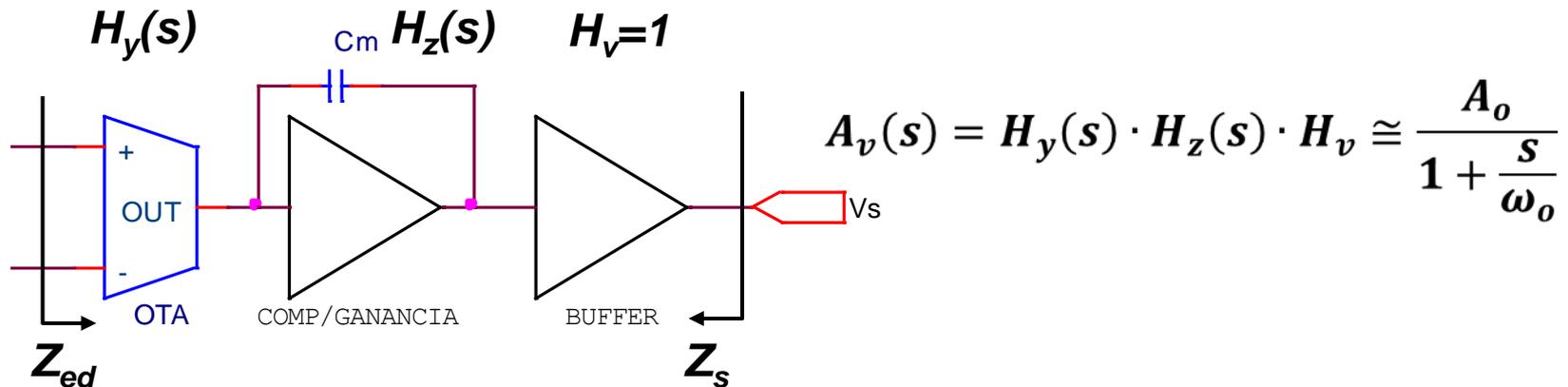
Estructura del OPA sencillo.

Objetivo

Se trata de obtener una estructura más sencilla que represente el OPA real.

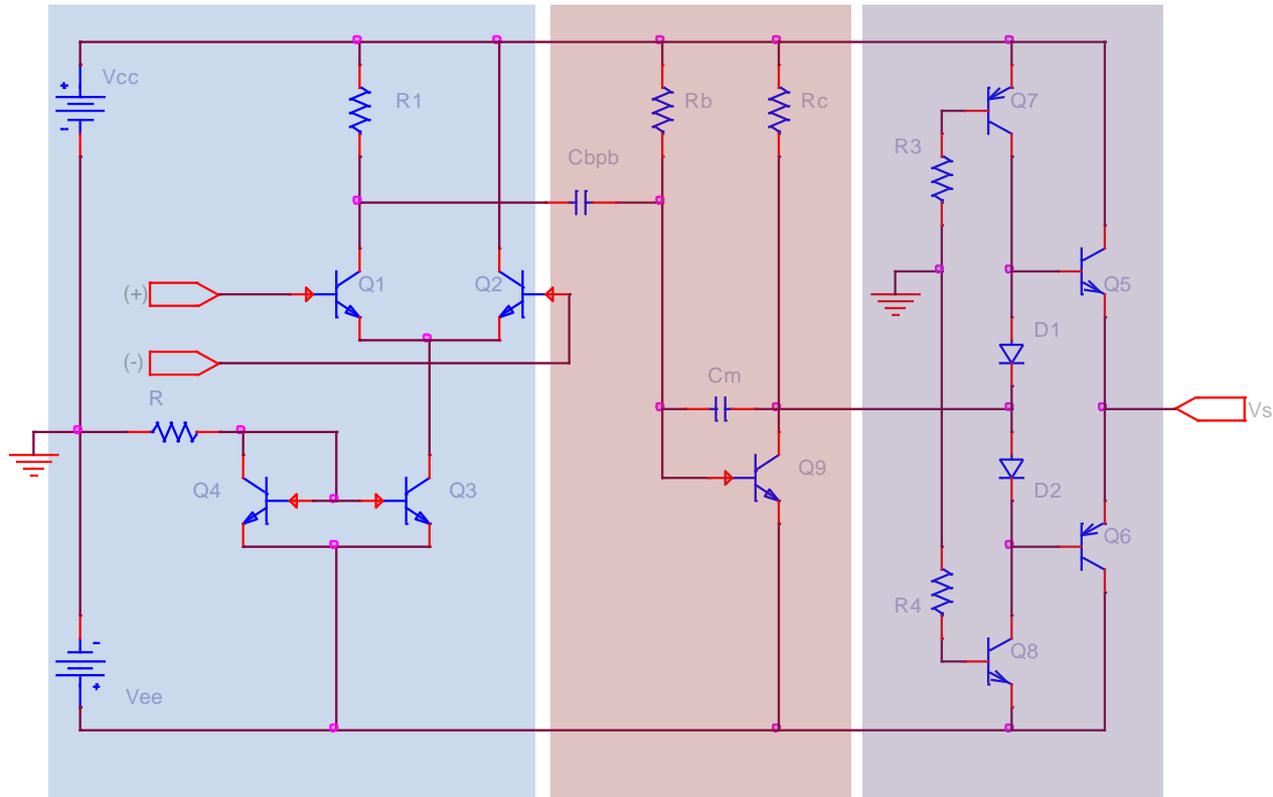
Requisitos

- Se necesita como mínimo una estructura diferencial: el OTA que, además, proporciona ganancia diferencial $H_y(s)$ y rechazo al modo común. Además su impedancia de entrada diferencial Z_{ed} es la del OPA resultante.
- Una etapa de compensación que también aporta parte de la ganancia total $H_z(s)$ y el polo dominante de la respuesta global ω_o .
- La etapa de salida será un buffer que proporcione la corriente necesaria a la carga sin aportar ganancia al conjunto $H_v=1$ (realmente sería menor que 1) y con impedancia de salida reducida Z_s .



11.3 El OPA de dos Etapas: Esquema de Compensación.

Estructura del OPA sencillo.



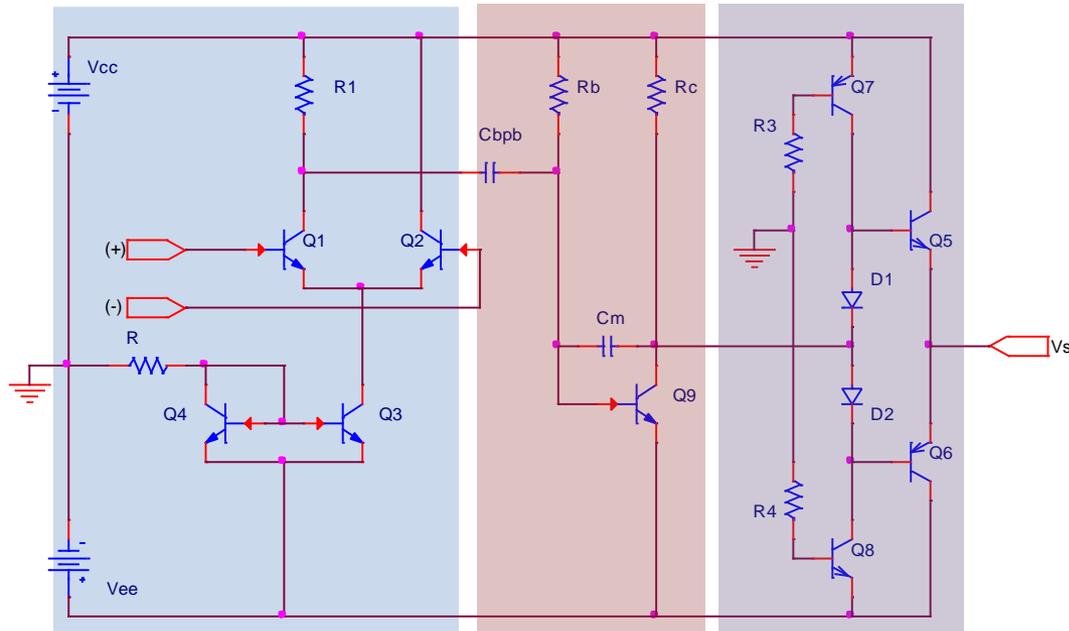
Etapa Diferencial:
 $H_y(s), Z_{ed}$

Etapa De
Compensación:
 $H_z(s), \omega_o$

Etapa Buffer:
 H_v, Z_s

11.3 El OPA de dos Etapas: Esquema de Compensación.

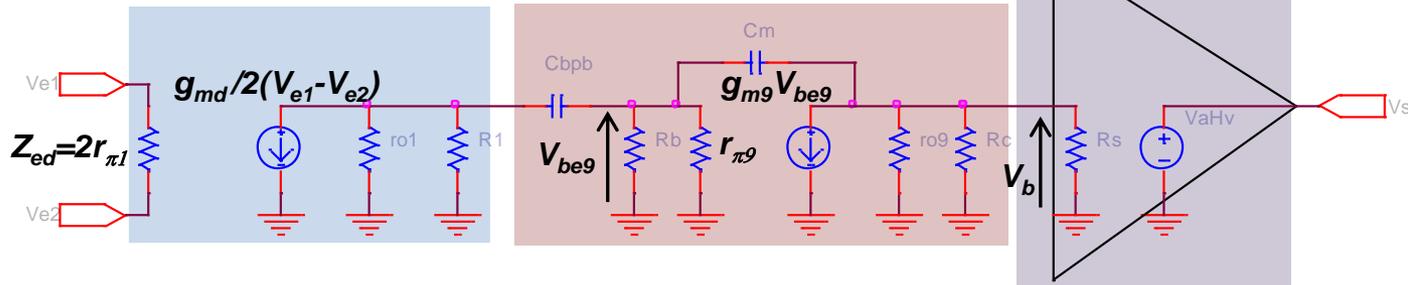
Modelo de Pequeña Señal Simplificado del OPA.



Etapa Diferencial:
 $H_y(s), Z_{ed}$

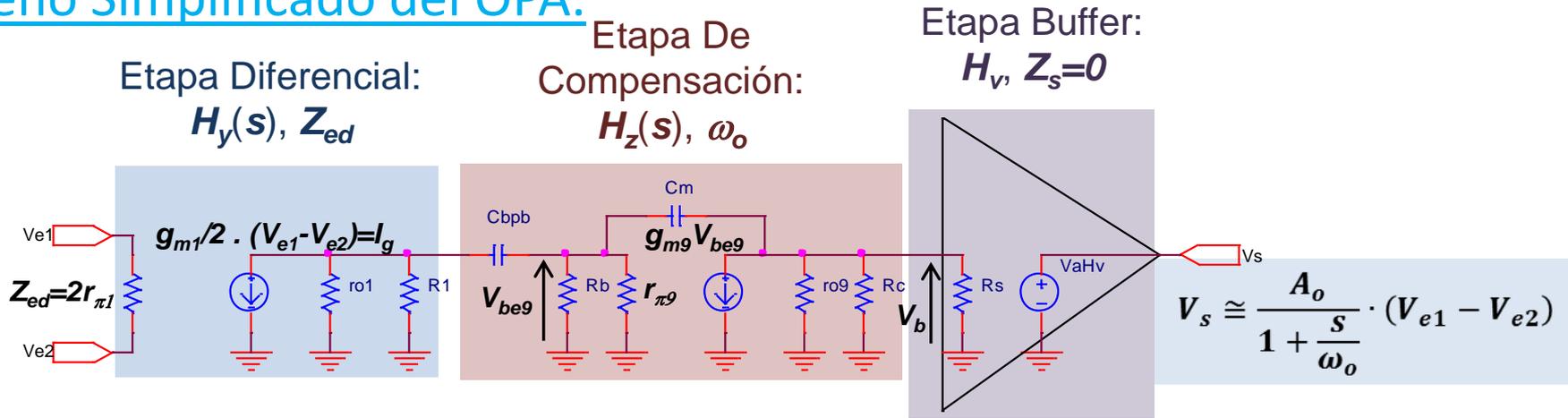
Etapa De
 Compensación:
 $H_z(s), \omega_o$

Etapa Buffer:
 $H_v, Z_s=0$



11.3 El OPA de dos Etapas: Esquema de Compensación.

Diseño Simplificado del OPA.



Impedancias:

- de entrada: $Z_{ed}=2r_{\pi 1}$.
- De salida: $Z_s=0$ (realmente sería pequeña pero distinta de 0Ω).

Ganancias a frecuencias medias:

- Transadmitancia del amplificador diferencial: $H_{y0}=I_g / (V_{e1}-V_{e2})=g_{m1}/2$.
- Transimpedancia de la etapa de compensación: $H_{z0}=V_b/I_g=g_{m9}(r_{o1}\parallel R_1\parallel R_b\parallel r_{\pi 9}) \cdot (r_{o9}\parallel R_c\parallel R_s)$.
- Trantensión del buffer: $0.9 < H_{v0} < 1$.
- Trantensión total: $A_0=H_{y0} \cdot H_{z0} \cdot H_{v0}$.

Respuesta en frecuencia:

- Frecuencia de corte inferior (realmente un OPA comercial no la tiene): $\omega_{ci}=1/(C_{bpb} \cdot R_{eq})$, donde $R_{eq}=(r_{o1}\parallel R_1)+(R_b\parallel r_{\pi 9})$
- Frecuencia de corte superior: f_{cs} Viene dada por la influencia de todos los parásitos de los dispositivos activos. (Se pueden estimar con las técnicas que conocemos ó mediante simulación).

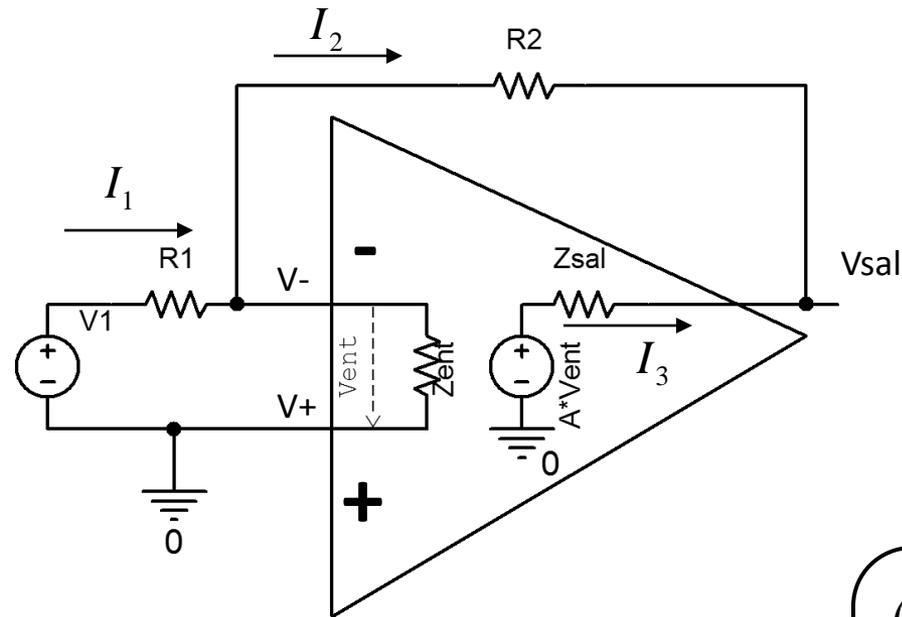
Compensación:

- A la frecuencia de corte $\omega_{cs}=2\pi f_{cs}$, aplicar la relación $|A_o| \cdot \omega_o = 1 \cdot \omega_{cs}$, entonces: $\omega_o = \frac{\omega_{cs}}{|A_{v0}|}$, y Donde:

$$\omega_o = 1 / (C_m \cdot R_{eq}), \text{ con } R_{eq} = (r_{o1}\parallel R_1\parallel R_b\parallel r_{\pi 9}) \cdot (r_{o9}\parallel R_c\parallel R_s) / (r_{o1}\parallel R_1\parallel R_b\parallel r_{\pi 9}\parallel r_{o9}\parallel R_c\parallel R_s \parallel 1/g_m)$$

11.4 Aplicaciones con OPAs y OTAs.

Configuración inversora: Versión OPA.



$$V1 = R1 \cdot I_1 - Vent$$

$$Vent = -(I_1 - I_2) \cdot Zent$$

$$Vsal = A \cdot Vent - I_3 \cdot Zsal$$

$$Vsal + Vent = -I_2 \cdot R2$$

$$\left. \begin{array}{l} V1 = R1 \cdot I_1 \\ Vsal = -I_2 \cdot R2 \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{Vsal}{V1} = -\frac{R2}{R1}$$

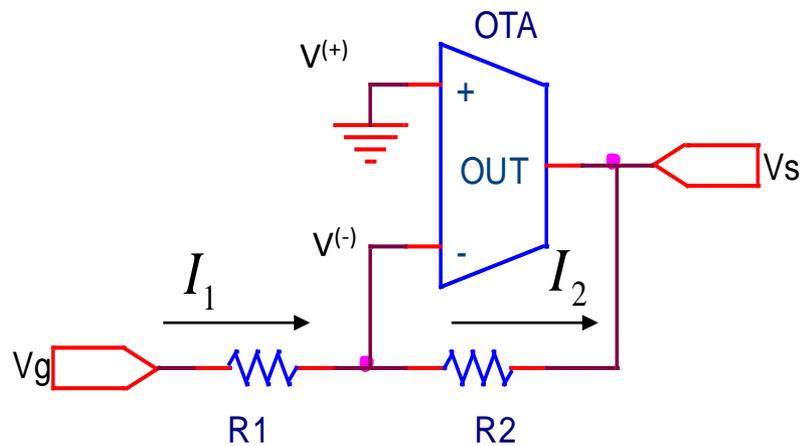
$$(Zsal \rightarrow 0) \Rightarrow [Vsal = A \cdot Vent]$$

$$(Zent \rightarrow \infty) \Rightarrow \left[\frac{Vent}{Zent} = 0 = -(I_1 - I_2) \right] \Rightarrow [I_1 = I_2]$$

$$(A \rightarrow \infty) \Rightarrow [Vent = 0] \quad \text{(Cortocircuito Virtual)}$$

11.4 Aplicaciones con OPAs y OTAs.

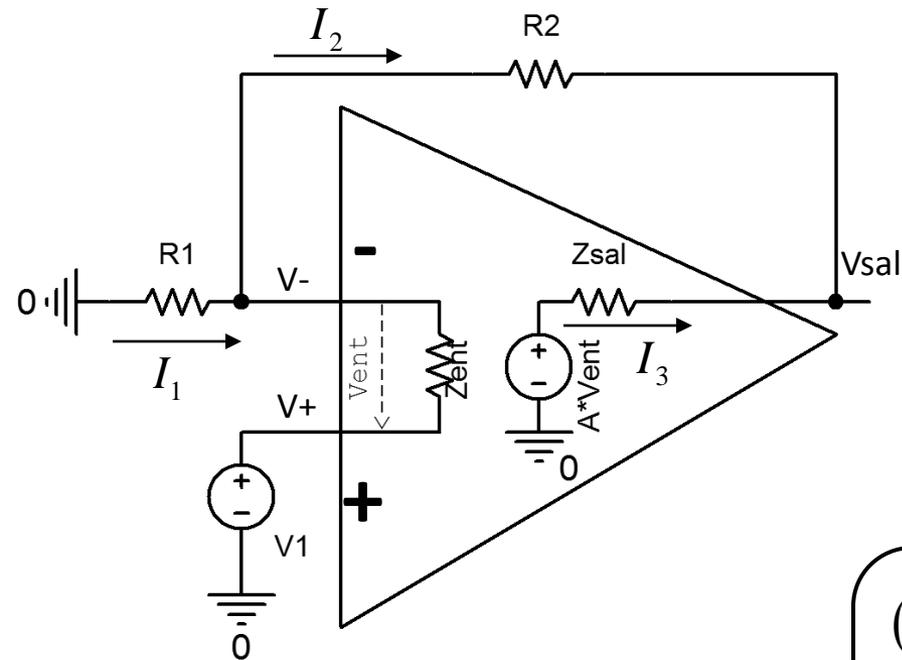
Configuración inversora: Versión OTA.



$$I_2 = -g_m \cdot (V^{(+)} - V^{(-)}) = g_m \cdot V^{(-)} = I_1$$
$$V^{(-)} = \frac{v_g}{1 + g_m \cdot R_1} \Rightarrow I_2 = \frac{g_m \cdot v_g}{1 + g_m \cdot R_1}$$
$$V_s = V_g - I_2 \cdot (R_1 + R_2)$$
$$V_s = v_g \cdot \frac{1 - g_m \cdot R_2}{1 + g_m \cdot R_1}$$

11.4 Aplicaciones con OPAs y OTAs.

Configuración no inversora (transtensión): Versión OPA.



$$V1 = Vent - R1 \cdot I_1$$

$$Vent = -(I_1 - I_2) \cdot Zent$$

$$Vsal = A \cdot Vent - I_3 \cdot Zsal$$

$$Vsal + Vent = -I_2 \cdot R2$$

$$\left. \begin{array}{l} V1 = -R1 \cdot I_1 \\ Vsal - V1 = -I_2 \cdot R2 \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{Vsal}{V1} = 1 + \frac{R2}{R1}$$

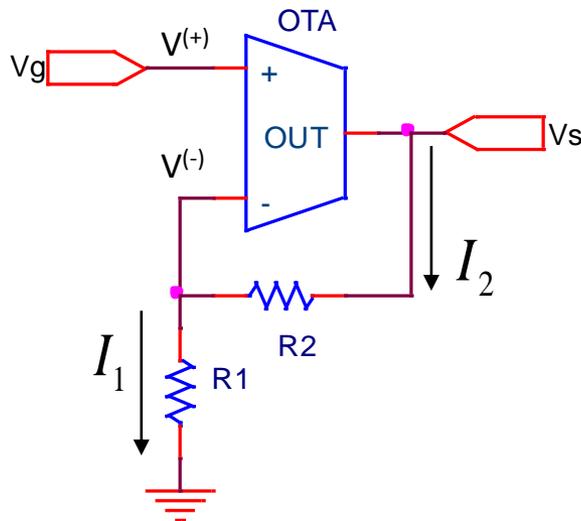
$$(Zsal \rightarrow 0) \Rightarrow [Vsal = A \cdot Vent]$$

$$(Zent \rightarrow \infty) \Rightarrow \left[\frac{Vent}{Zent} = 0 = -(I_1 - I_2) \right] \Rightarrow [I_1 = I_2]$$

$$(A \rightarrow \infty) \Rightarrow [Vent = 0] \quad \text{(Cortocircuito Virtual)}$$

11.4 Aplicaciones con OPAs y OTAs.

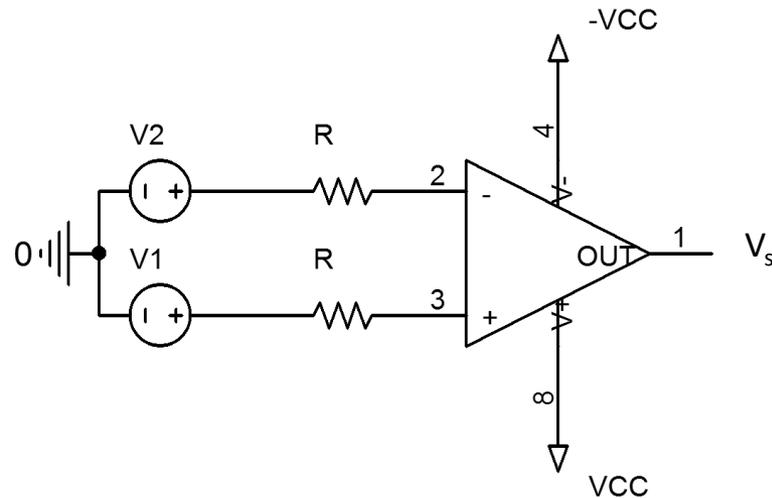
Configuración no inversora (transtensión): Versión OTA.



$$I_2 = g_m \cdot (V^{(+)} - V^{(-)}) = g_m \cdot (v_g - V^{(-)}) = I_1$$
$$V^{(-)} = \frac{R_1 \cdot v_s}{R_1 + R_2}$$
$$V_s = v_g \cdot \frac{g_m \cdot (R_1 + R_2)}{1 + g_m \cdot R_1}$$

11.4 Aplicaciones con OPAs y OTAs.

Comparador sin histéresis: Versión OPA.

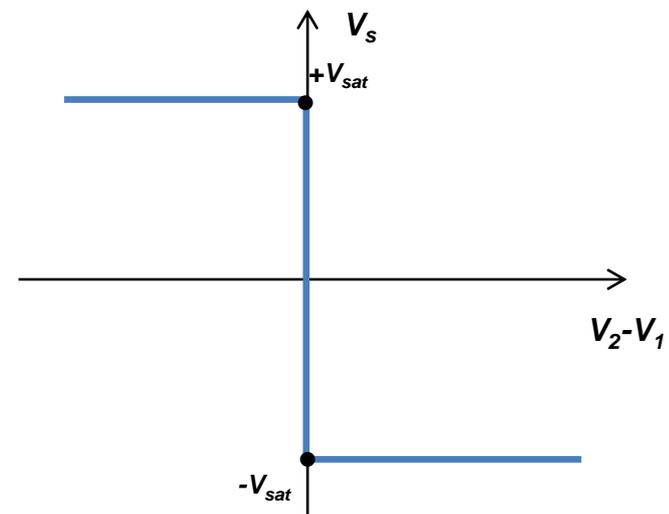


CONDICIONES (Estáticas)

- Tensión en la entrada inversora: $v^{(-)}=v_2$.
- Tensión en la entrada no inversora: $v^{(+)}=v_1$.
- La salida v_s sólo puede tomar como valores $+V_{sat}$ ó $-V_{sat}$.

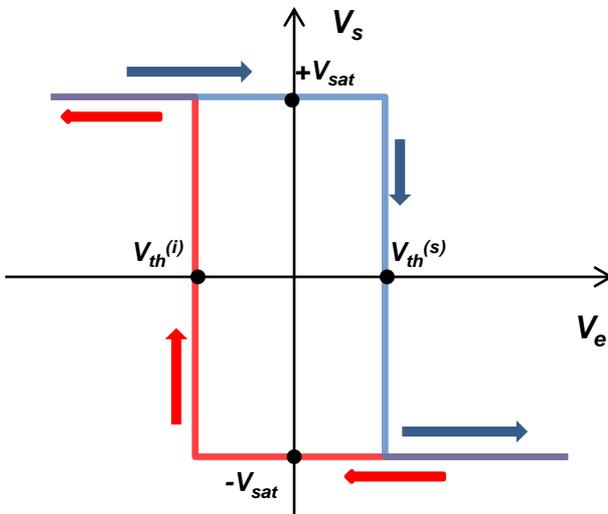
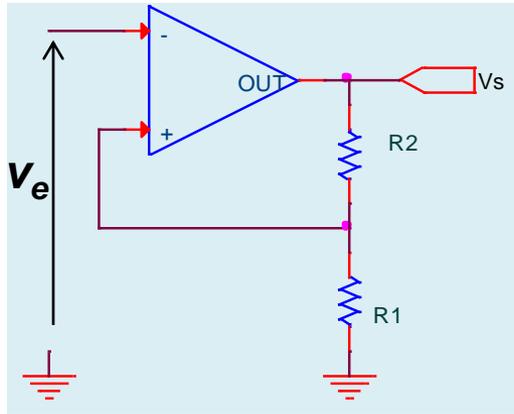
FUNCIÓN DE COMPARACIÓN

- $v_s = +V_{sat}$ si $v^{(+)}>v^{(-)}$ ó de otro modo $v_2 < V_1$
- $v_s = -V_{sat}$ si $v^{(+)}<v^{(-)}$ ó de otro modo $v_2 > V_1$



11.4 Aplicaciones con OPAs y OTAs.

Comparador con histéresis Inversor: Versión OPA.



CONDICIONES (Estáticas)

- Tensión en la entrada inversora: $v^{(-)}=v_e$.
- Tensión en la entrada no inversora: $v^{(+)}=v_s R_1/(R_2+R_1)$.
- La realimentación está conectada a la entrada no inversora, luego el sistema es inestable y la salida v_s sólo puede tomar como valores $+V_{sat}$ ó $-V_{sat}$.
- Valor umbral superior: $V_{th}^{(s)}=+V_{sat} R_1/(R_2+R_1)$.
- Valor umbral inferior: $V_{th}^{(i)}=-V_{sat} R_1/(R_2+R_1)$.

FUNCIÓN DE COMPARACIÓN

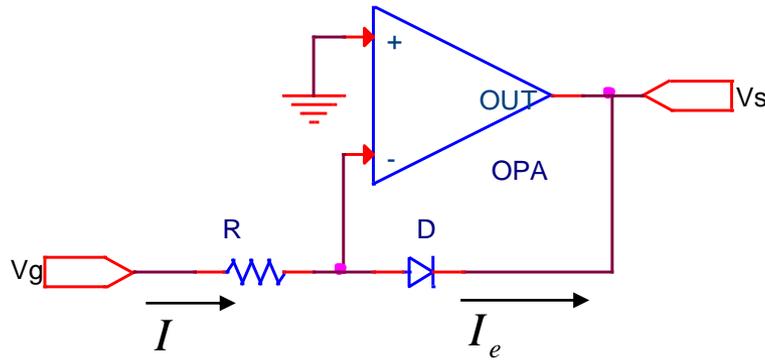
- $v_s = +V_{sat}$ si $v^{(+)}>v^{(-)}$ ó de otro modo $v_e < V_{th}^{(s)}$
- $v_s = -V_{sat}$ si $v^{(+)}<v^{(-)}$ ó de otro modo $v_e > V_{th}^{(i)}$

HISTÉRESIS

- Se define la **histéresis** del comparador a la diferencia de umbrales: $HIST= V_{th}^{(s)} - V_{th}^{(i)}$.
- La **histéresis** es una medida de la **inmunidad** del comparador a variaciones indeseadas (ruido) de la señal de entrada.

11.4 Aplicaciones con OPAs y OTAs.

Amplificador Logarítmico.



Válido sólo para $V_g > 0$

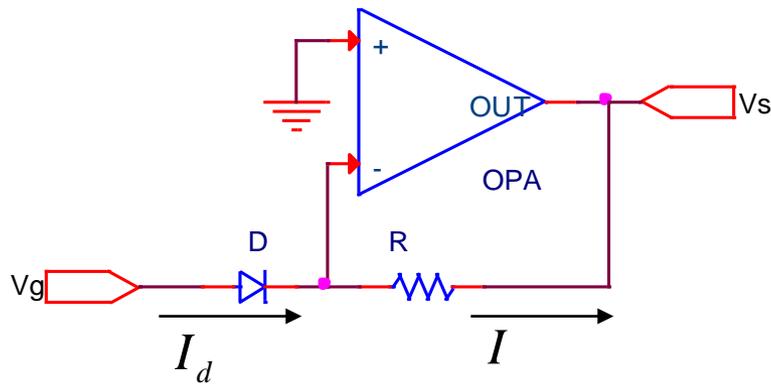
$$I = \frac{V_g}{R} = I_e = I_s (e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1) \approx I_s (e^{\frac{V_d}{V_t}})$$

$$V_d = -V_s$$

$$V_s = -V_t \ln\left(\frac{V_g}{I_s \cdot R}\right)$$

11.4 Aplicaciones con OPAs y OTAs.

Amplificador Exponencial.



Válido sólo para $V_g > 0$

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \approx I_s \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} \right) = I$$

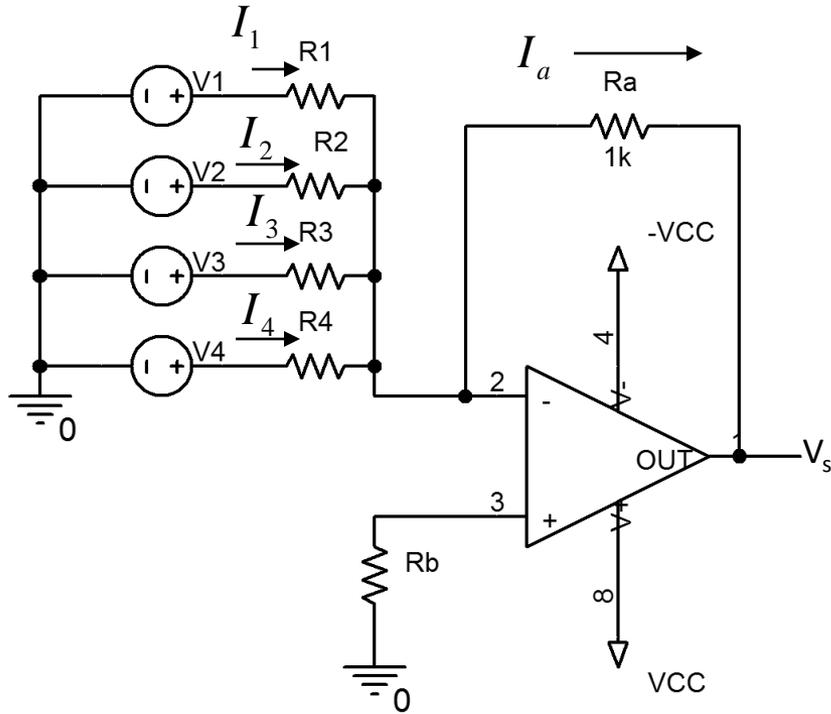
$$I = \frac{-V_s}{R}$$

$$V_d = V_g$$

$$V_s = -R \cdot I_s \left(e^{\frac{V_g}{V_t}} \right)$$

11.4 Aplicaciones con OPAs y OTAs.

Amplificador Sumador (Mezclador): Versión OPA



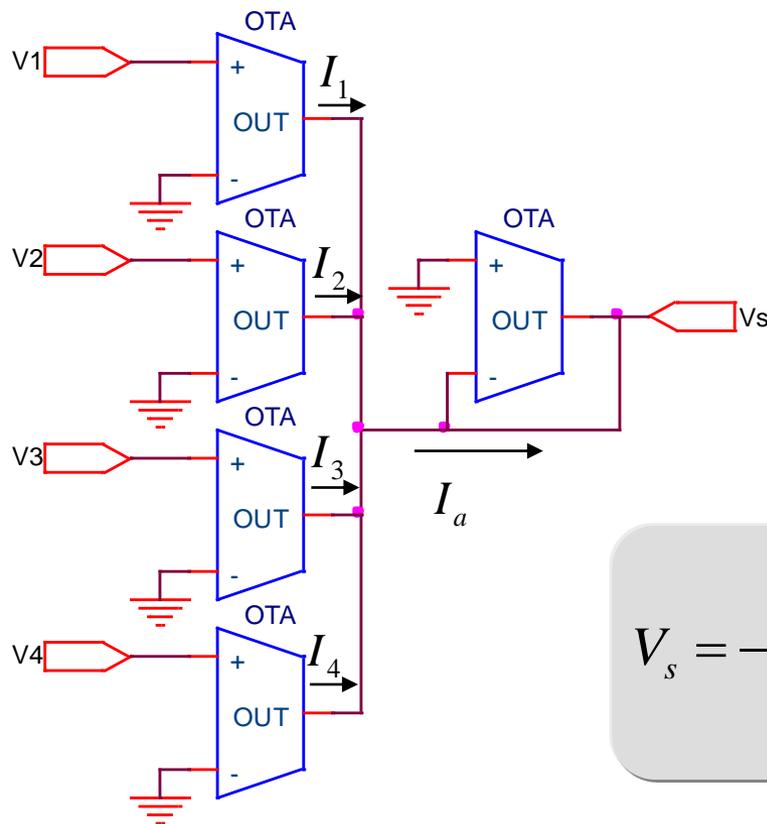
$$I_1 = \frac{V_1}{R_1}$$
$$I_2 = \frac{V_2}{R_2}$$
$$I_3 = \frac{V_3}{R_3}$$
$$I_4 = \frac{V_4}{R_4}$$

$$I_a = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$$
$$I_a = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} + \frac{V_4}{R_4}$$
$$V_s = -I_a \cdot R_a$$

$$V_s = -R_a \cdot \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} + \frac{V_4}{R_4} \right)$$

11.4 Aplicaciones con OPAs y OTAs.

Amplificador Sumador (Mezclador): Versión OTA



$$I_1 = g_{m1} \cdot V_1$$

$$I_2 = g_{m2} \cdot V_2$$

$$I_3 = g_{m3} \cdot V_3$$

$$I_4 = g_{m4} \cdot V_4$$

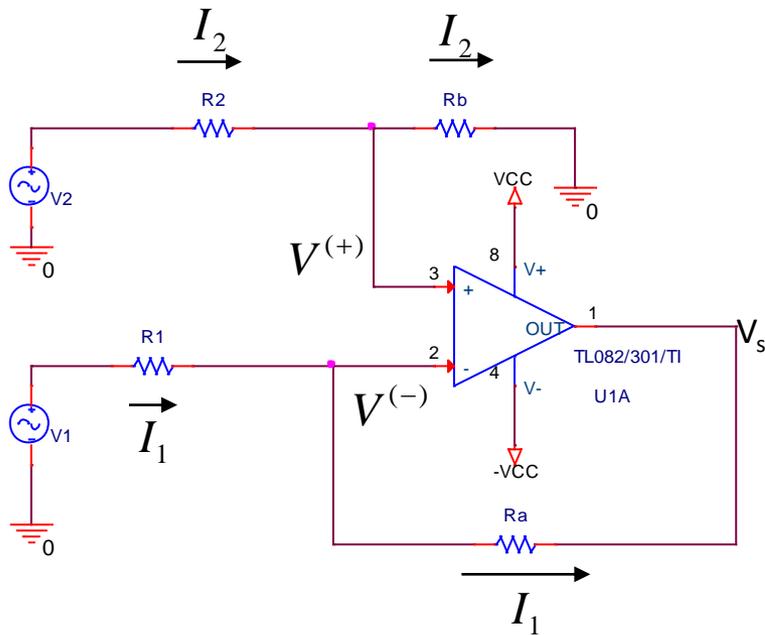
$$I_a = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$$

$$I_a = -g_{ma} \cdot V_s$$

$$V_s = - \left(\frac{g_{m1}}{g_{ma}} \cdot V_1 + \frac{g_{m2}}{g_{ma}} \cdot V_2 + \frac{g_{m3}}{g_{ma}} \cdot V_3 + \frac{g_{m4}}{g_{ma}} \cdot V_4 \right)$$

11.4 Aplicaciones con OPAs y OTAs.

Amplificador Sumador-Restador: Versión OPA.



$$V^{(+)} = V_2 \left(\frac{R_b}{R_2 + R_b} \right)$$

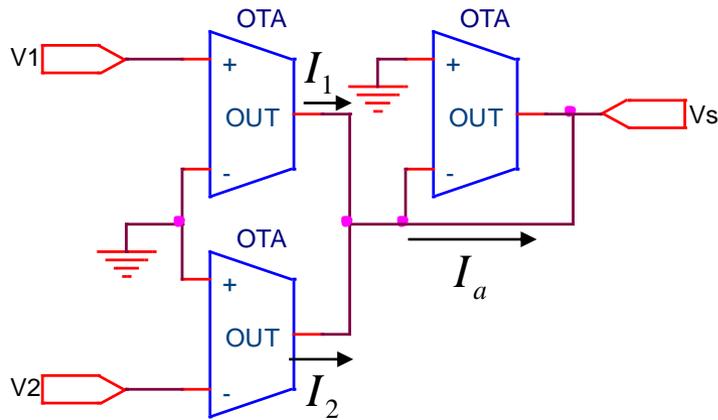
$$V^{(+)} = V^{(-)}$$

$$I_1 = \frac{V_1 - (V^{(+)})}{R_1} = \frac{(V^{(+)}) - V_s}{R_a}$$

$$V_s = V_2 \left(\frac{R_b}{R_2 + R_b} \right) \left(1 + \frac{R_a}{R_1} \right) - V_1 \left(\frac{R_a}{R_1} \right)$$

11.4 Aplicaciones con OPAs y OTAs.

Amplificador Sumador-Restador: Versión OTA.



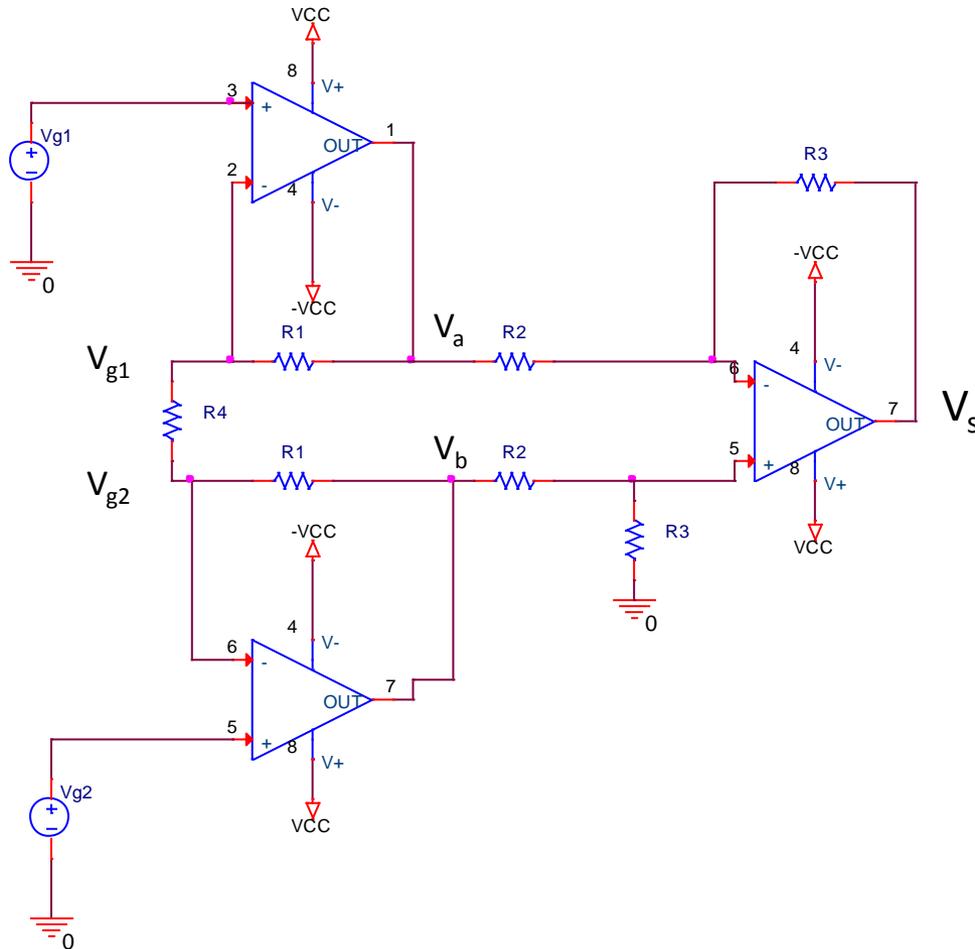
$$I_1 = g_{m1} \cdot V_1$$
$$I_2 = -g_{m2} \cdot V_2$$

$$I_a = I_1 + I_2$$
$$I_a = -g_{ma} \cdot V_s$$

$$V_s = -\frac{g_{m1}}{g_{ma}} \cdot V_1 + \frac{g_{m2}}{g_{ma}} \cdot V_2$$

11.4 Aplicaciones con OPAs y OTAs.

Amplificador de Instrumentación.



$$\frac{V_{g1} - V_a}{R_1} = \frac{V_{g2} - V_{g1}}{R_4} = \frac{V_b - V_{g2}}{R_1}$$

$$V_a = V_{g1} \left(1 + \frac{R_1}{R_4} \right) - V_{g2} \left(\frac{R_1}{R_4} \right)$$

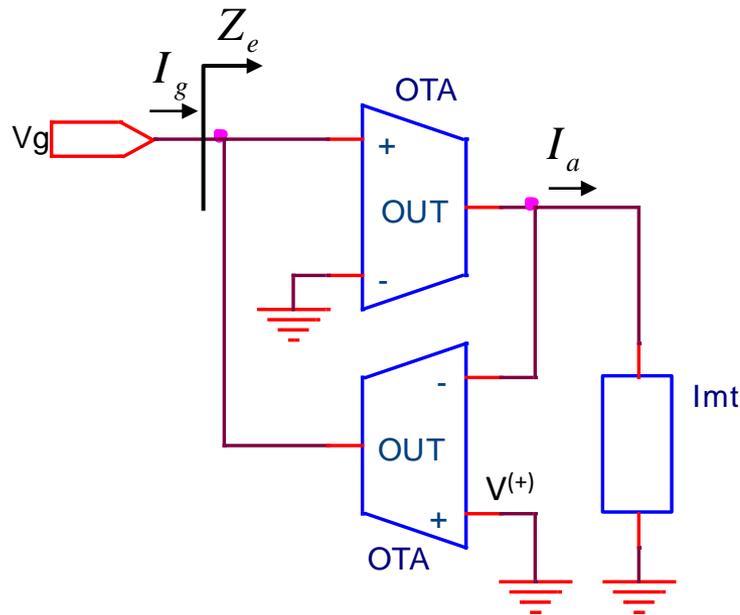
$$V_b = V_{g2} \left(1 + \frac{R_1}{R_4} \right) - V_{g1} \left(\frac{R_1}{R_4} \right)$$

$$V_s = (V_b - V_a) \left(\frac{R_3}{R_2} \right)$$

$$V_s = (V_{g2} - V_{g1}) \frac{R_3}{R_2} \left(1 + \frac{2 \cdot R_1}{R_4} \right)$$

11.4 Aplicaciones con OPAs y OTAs.

El Girador de Inmitancias (Gyrator).



$$I_g = -g_{m2} \cdot (V^{(+)} - V^{(-)})$$

$$V^{(+)} = 0; V^{(-)} = I_a \cdot Z$$

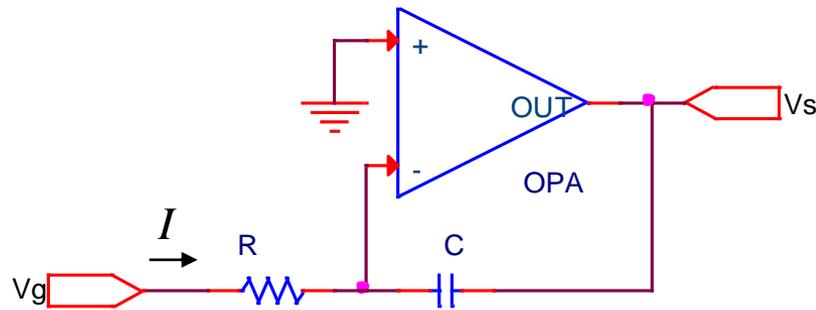
$$I_a = g_{ma} \cdot v_g$$

$$I_g = g_{m1} \cdot g_{m2} \cdot Z \cdot v_g$$

$$Z_e = \frac{v_g}{I_g} = \frac{1}{g_{m1} \cdot g_{m2} \cdot Z}$$

11.4 Aplicaciones con OPAs y OTAs.

El Integrador: Versión OPA.



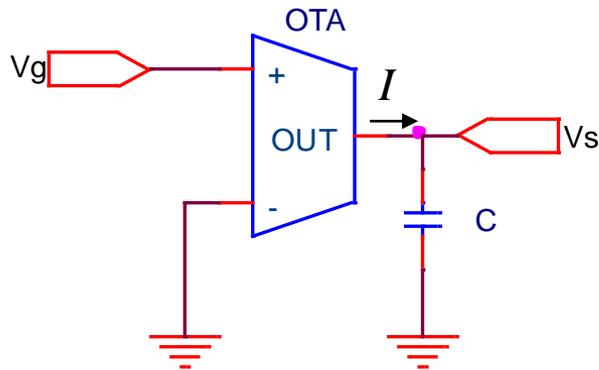
$$\frac{V_s}{V_e}(j\omega) = -\frac{1}{R \cdot C \cdot j\omega}$$

$$V_e = I \cdot R$$

$$V_s = -\frac{1}{C} \int I \cdot dt = -\frac{1}{R \cdot C} \int V_e \cdot dt$$

11.4 Aplicaciones con OPAs y OTAs.

El Integrador: Versión OTA.



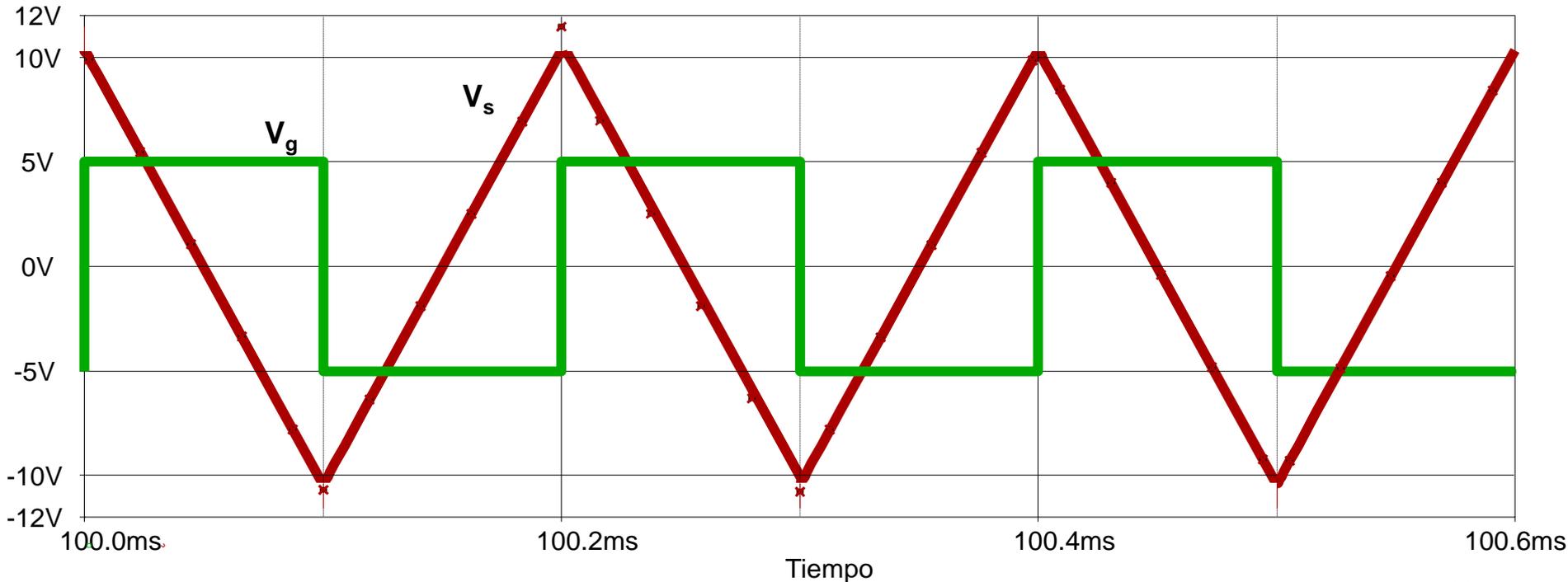
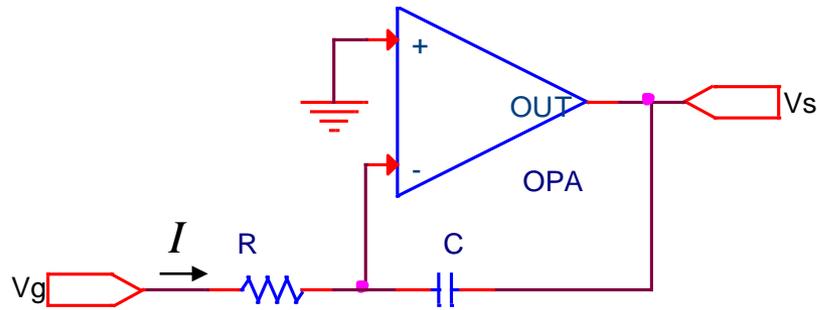
$$I = g_m \cdot v_g$$

$$v_s = \frac{g_m \cdot v_g}{j\omega \cdot C}$$

$$v_s(t) = \frac{g_m}{C} \int v_g \cdot dt$$

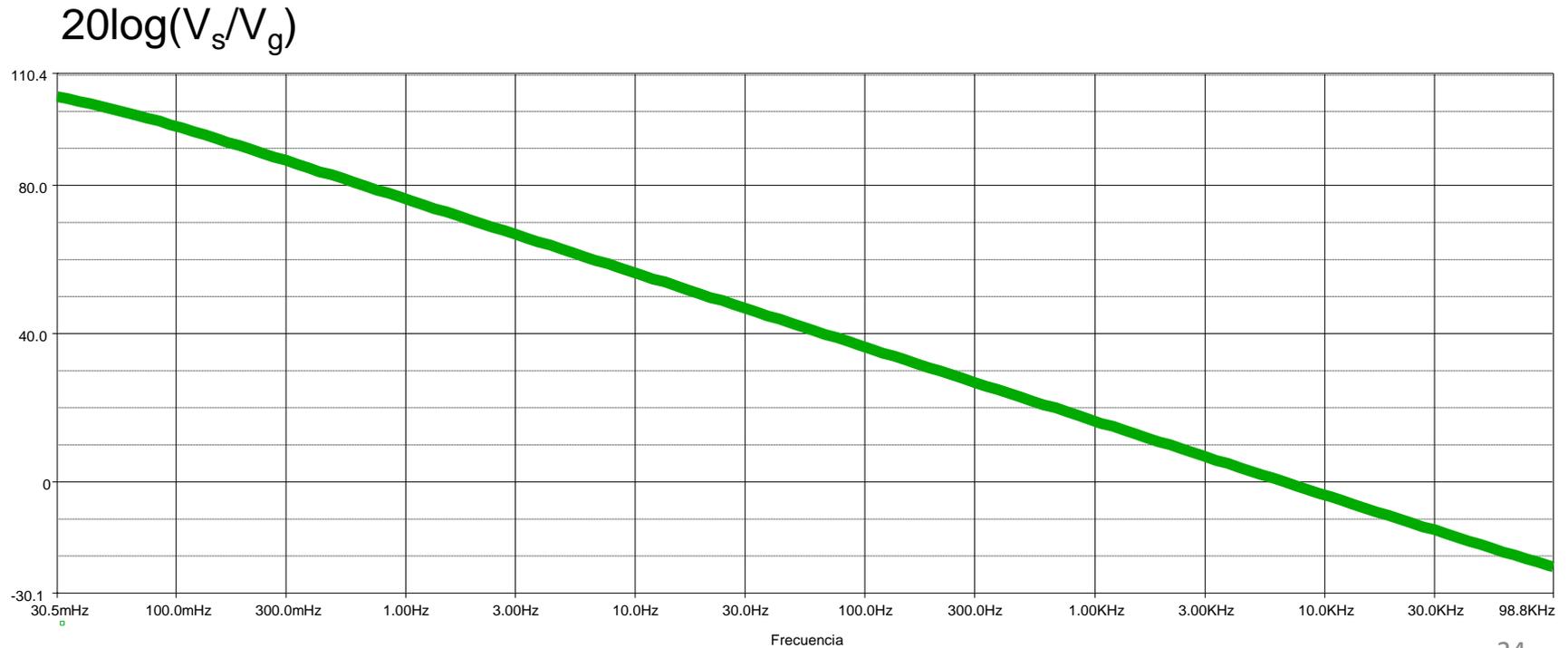
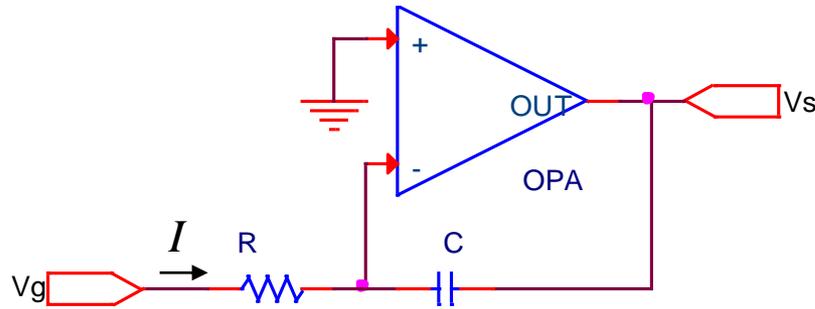
11.4 Aplicaciones con OPAs y OTAs.

El Integrador (OPA).

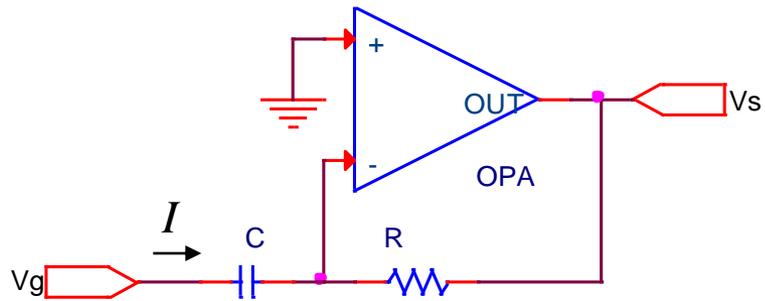


11.4 Aplicaciones con OPAs y OTAs.

El Integrador (OPA).



El Derivador: Versión OPA.



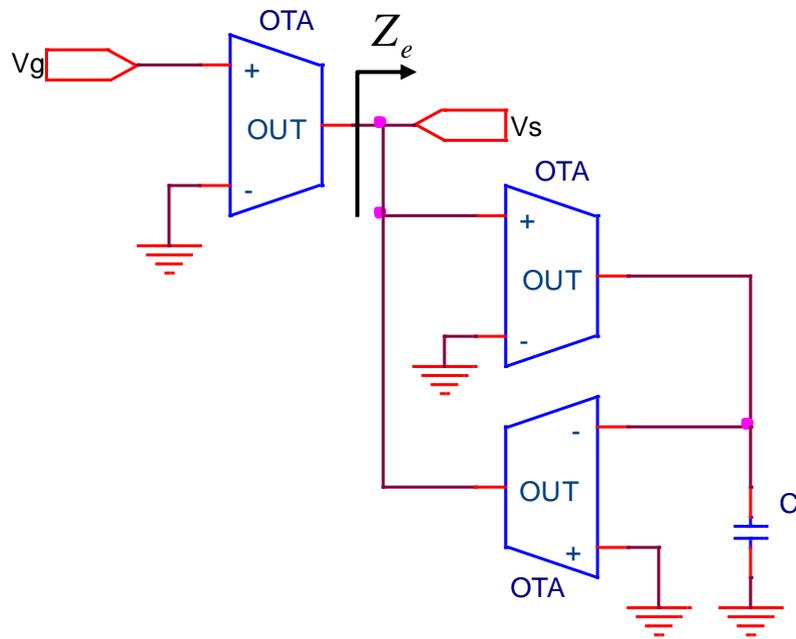
$$\frac{V_s}{V_g}(j\omega) = -R \cdot C \cdot j\omega$$

$$V_g = \frac{1}{C} \int I \cdot dt$$

$$V_s = -I \cdot R = -R \cdot C \cdot \frac{d(V_g)}{dt}$$

11.4 Aplicaciones con OPAs y OTAs.

El Derivador: Versión OTA.



$$Z = \frac{1}{j\omega \cdot C}$$

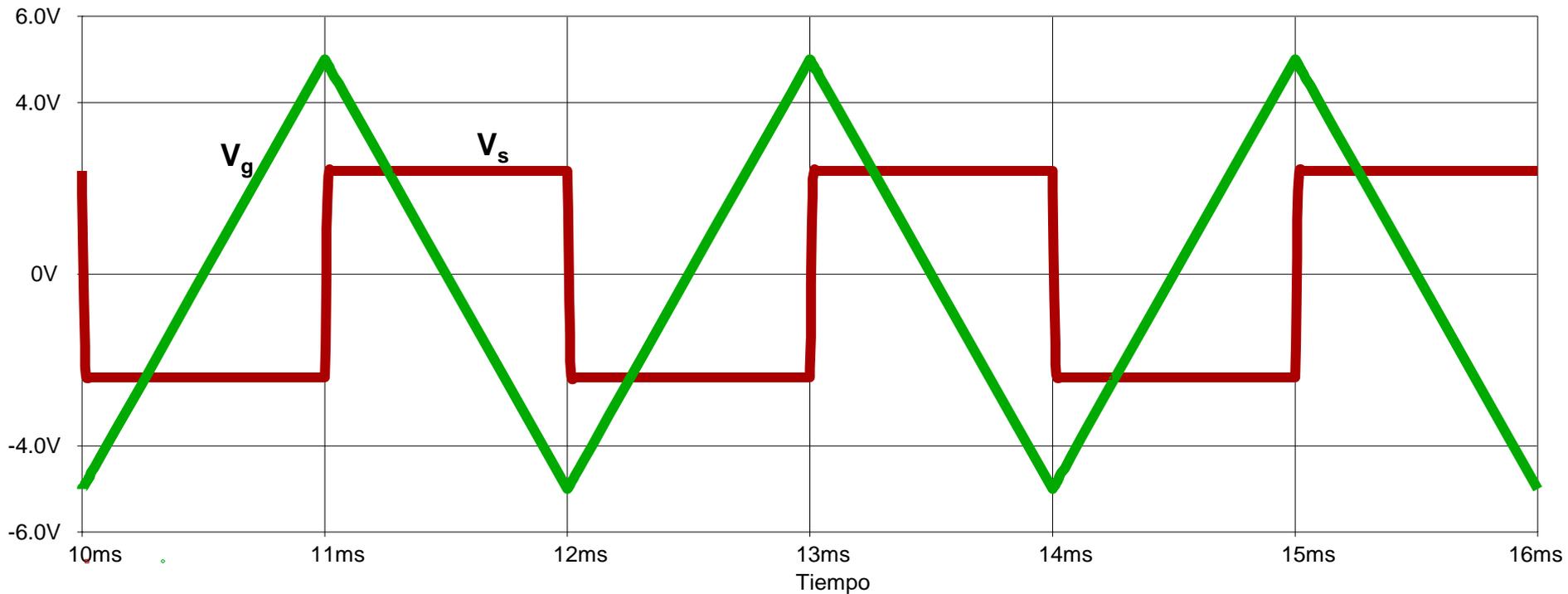
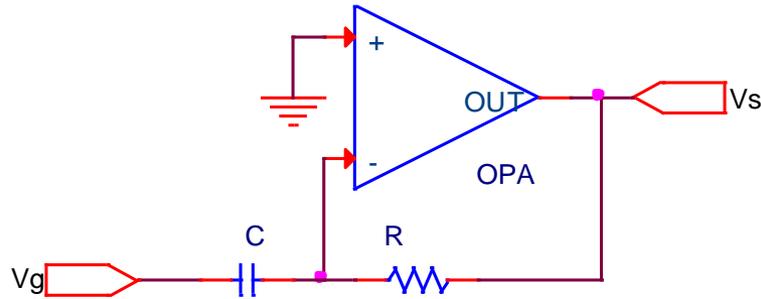
$$Z_e = \frac{1}{g_{m1} \cdot g_{m2} \cdot Z} = \frac{j\omega \cdot C}{g_{m1} \cdot g_{m2}}$$

$$v_s = \frac{j\omega \cdot C}{g_{m1} \cdot g_{m2}} \cdot v_g$$

$$v_s(t) = \frac{C}{g_{m1} \cdot g_{m2}} \cdot \frac{dV_g}{dt}$$

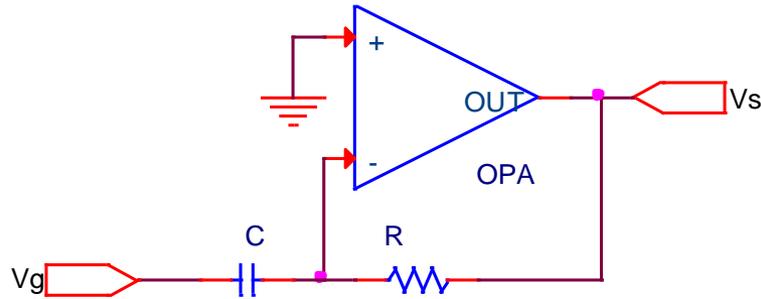
11.4 Aplicaciones con OPAs y OTAs.

El Derivador (OPA).

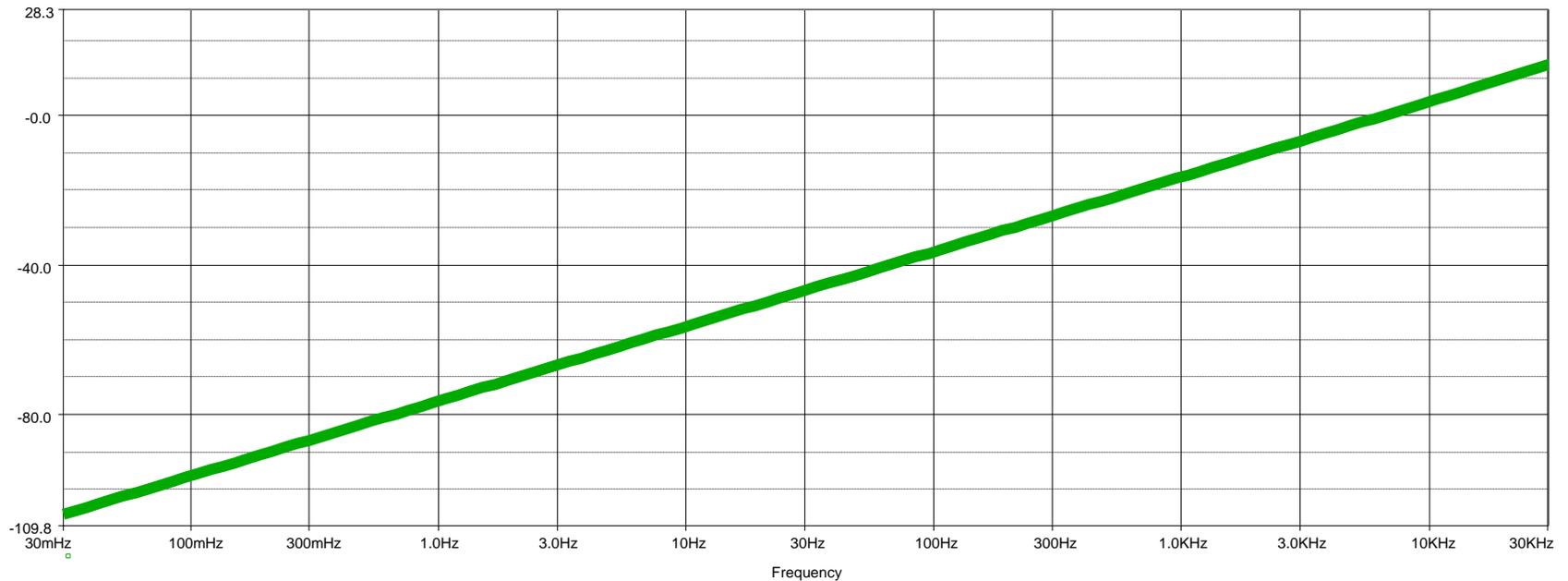


11.4 Aplicaciones con OPAs y OTAs.

El Derivador (OPA).

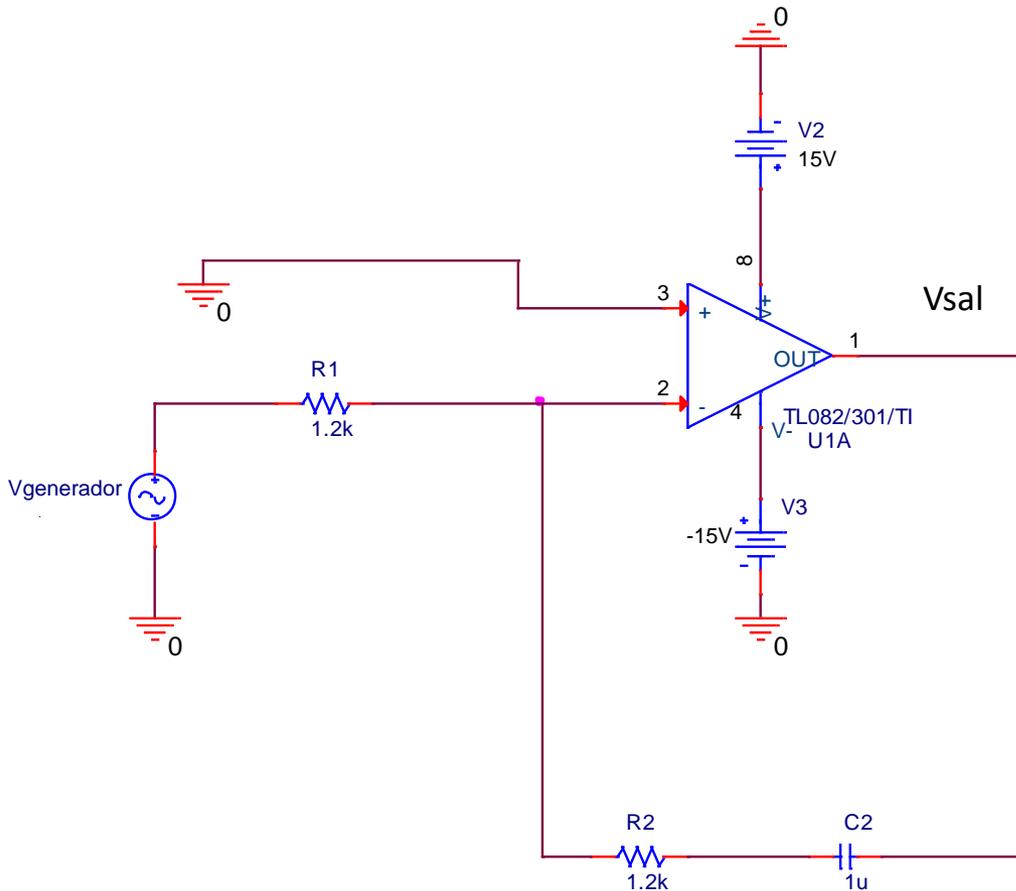


$20\log(V_s/V_g)$



11.4 Controladores Básicos

Configuración PI



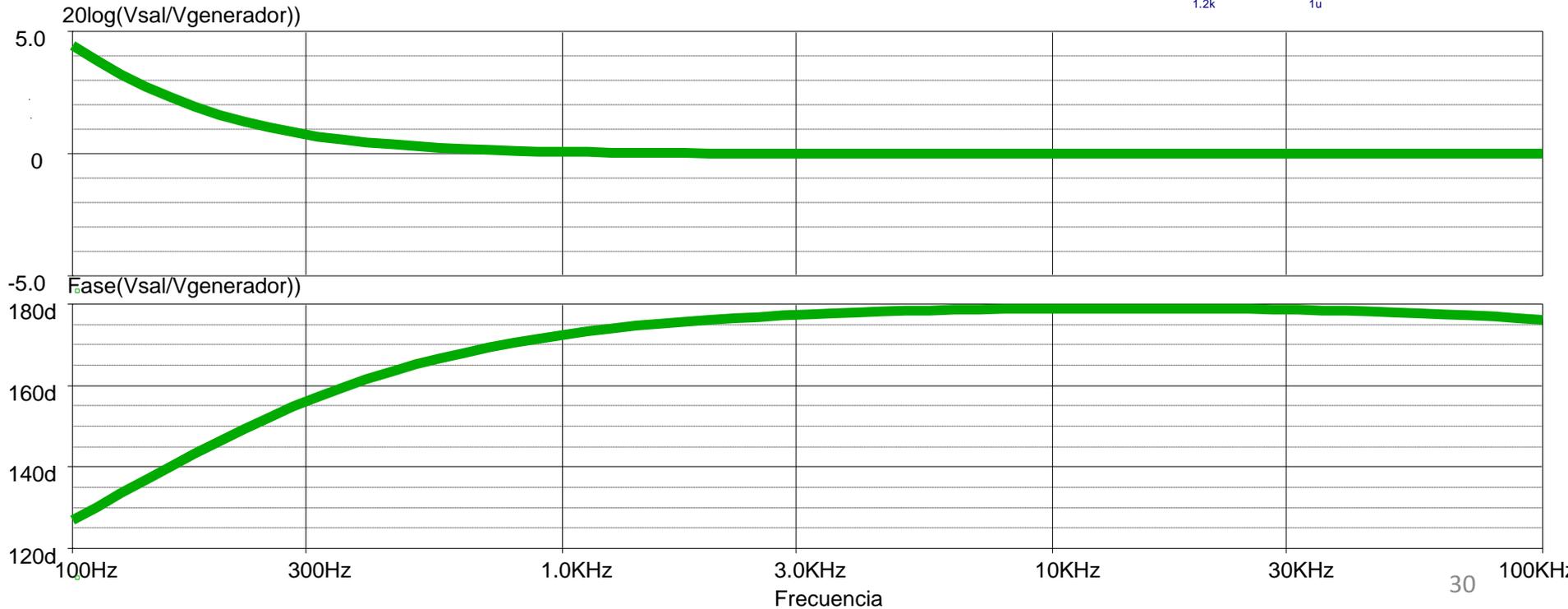
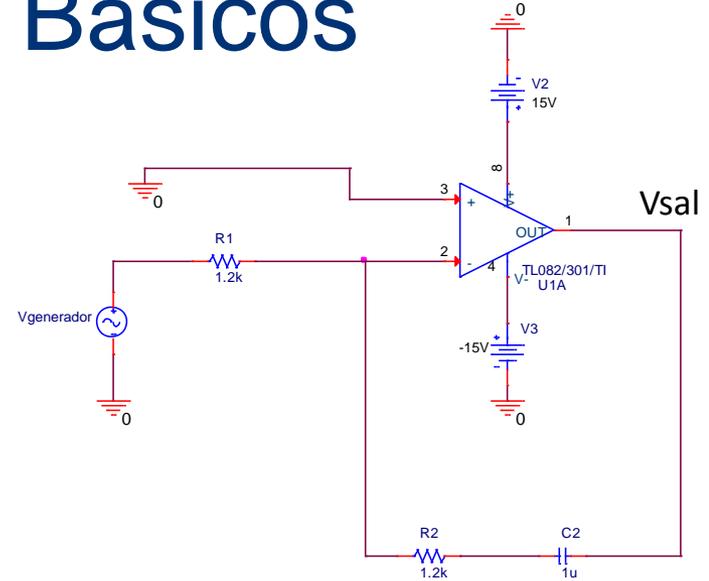
$$\frac{V_{sal}}{V_{generador}} = -K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

$$K_p = \frac{R2}{R1}$$

$$T_i = R2 \cdot C2$$

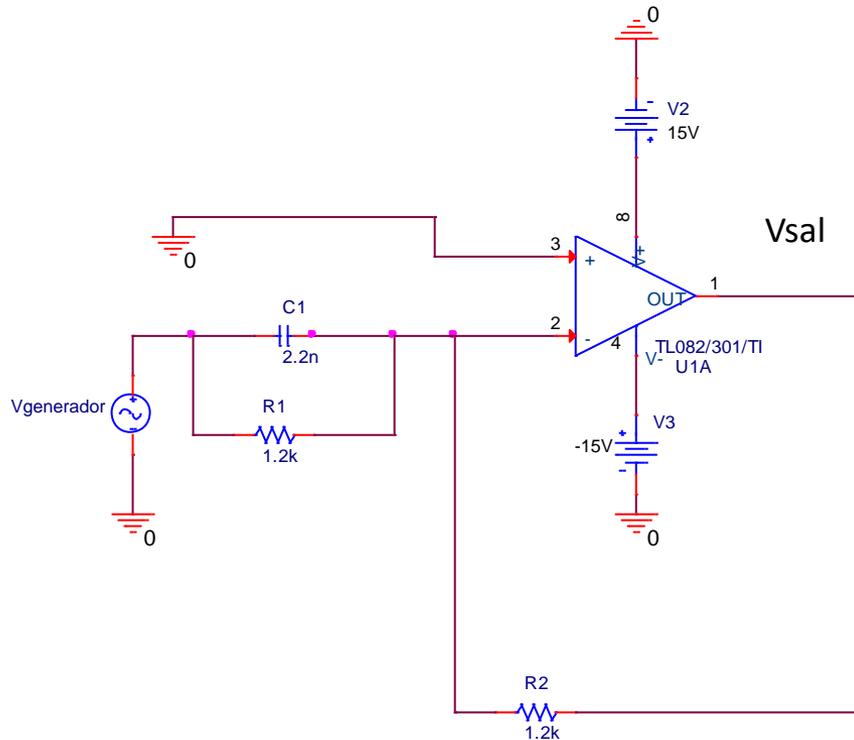
11.4 Controladores Básicos

Configuración PI



11.4 Controladores Básicos

Configuración PD



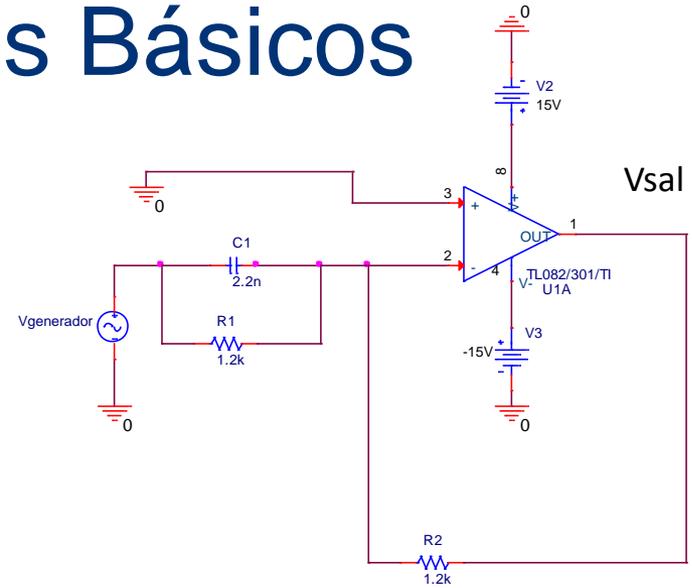
$$\frac{V_{sal}}{V_{generador}} = -K_p (1 + T_d s)$$

$$K_p = \frac{R2}{R1}$$

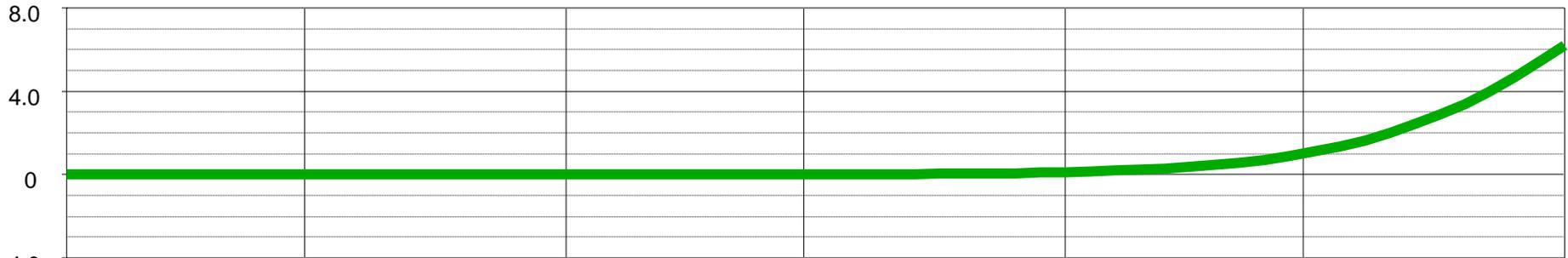
$$T_d = R1 \cdot C1$$

11.4 Controladores Básicos

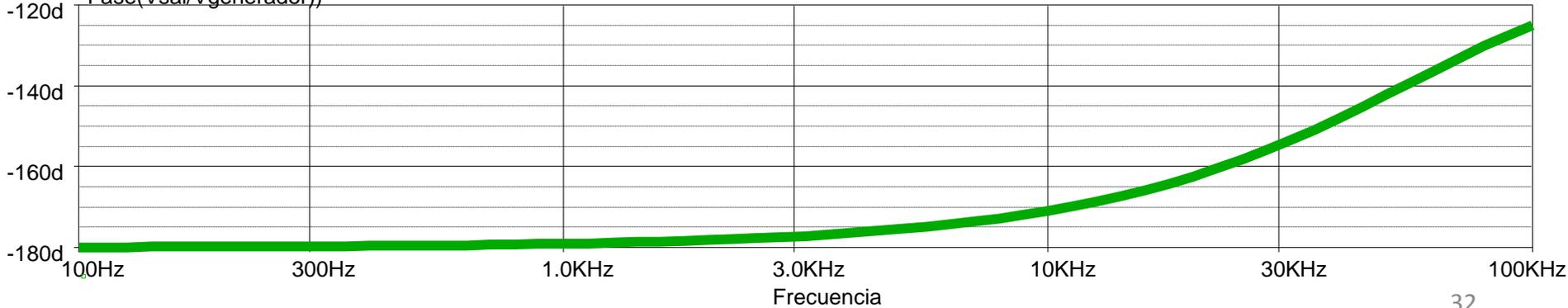
Configuración PD



$20\log(V_{sal}/V_{generador})$

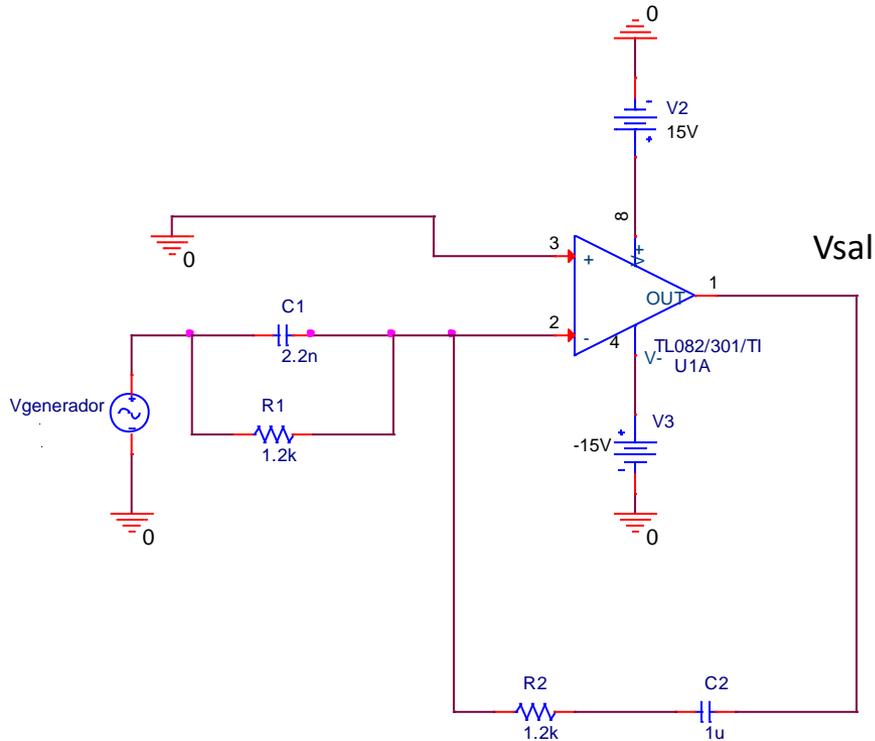


$\text{Fase}(V_{sal}/V_{generador})$



11.4 Controladores Básicos

Configuración PID



$$\frac{V_{sal}}{V_{generador}} = -K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

$$K_p = \frac{R1 \cdot C1 + R2 \cdot C2}{R1 \cdot C2}$$

$$T_i = R1 \cdot C1 + R2 \cdot C2$$

$$T_d = \frac{R1 \cdot C1 \cdot R2 \cdot C2}{R1 \cdot C1 + R2 \cdot C2}$$

11.4 Controladores Básicos

Configuración PID

