

04_amplificacion_opam

June 19, 2026

1 Temas 6 y 7 - Amplificación y Amplificador Operacional

Fundamentos de Electrónica - 2º GIERM

1.1 Objetivos de aprendizaje

- Comprender el concepto de amplificación y los cuatro modelos de amplificador (tensión, corriente, transconductancia, transresistencia)
- Dominar las definiciones de ganancia en tensión, corriente, potencia y decibelios
- Conocer los efectos capacitivos sobre la ganancia y los diagramas de Bode
- Entender el amplificador diferencial y las propiedades del OPAM ideal
- Resolver circuitos con las configuraciones fundamentales del OPAM (inversor, no inversor, sumador, diferenciador, integrador)
- Analizar el trigger de Schmitt y comprender las limitaciones del OPAM real (GBW, slew rate, saturación)

Configuración lista.

2 PARTE 1: Amplificación (Tema 6)

2.1 1. Introducción: ¿Qué es la amplificación?

Un **amplificador** es un dispositivo que toma una señal de entrada (pequeña) y produce una señal de salida más grande, manteniendo la forma de onda. Es una **bipuerta** (red de dos puertos): un puerto de entrada y un puerto de salida.

Analogía: Piensa en un micrófono y un altavoz. La voz (señal débil) entra por el micrófono, el amplificador aumenta la señal, y el altavoz reproduce el sonido amplificado. La energía extra proviene de la fuente de alimentación.

Características clave: - La señal de salida es una versión amplificada (o atenuada) de la entrada
- La energía adicional proviene de la fuente de alimentación (no se crea de la nada) - Un amplificador se modela como una **bipuerta lineal** con parámetros: ganancia, impedancia de entrada, impedancia de salida

2.2 2. Definiciones de ganancia

2.2.1 2.1 Ganancia en tensión, corriente y potencia

$$\boxed{A_v = \frac{V_o}{V_i}} \quad \boxed{A_i = \frac{I_o}{I_i}} \quad \boxed{A_p = \frac{V_o \cdot I_o}{V_i \cdot I_i} = A_v \cdot A_i}$$

- A_v : **ganancia de tensión** (adimensional)
- A_i : **ganancia de corriente** (adimensional)
- A_p : **ganancia de potencia** (adimensional)

2.2.2 2.2 Decibelios (dB)

Los decibelios permiten trabajar con **sumas en lugar de productos** cuando se encadenan amplificadores.

$$\boxed{A_{p\text{dB}} = 10 \cdot \log_{10}(A_p)}$$

$$\boxed{A_{v\text{dB}} = 20 \cdot \log_{10}(|A_v|)}$$

$$\boxed{A_{i\text{dB}} = 20 \cdot \log_{10}(|A_i|)}$$

Tabla de valores comunes en dB:

A_v (lineal)	$A_{v\text{dB}}$	Interpretación
1	0 dB	Sin amplificación
2	6 dB	Doble de tensión
10	20 dB	10 veces la tensión
100	40 dB	100 veces la tensión
1000	60 dB	1000 veces la tensión
$1/\sqrt{2} \approx 0.707$	-3 dB	Frecuencia de corte (mitad de potencia)
0.1	-20 dB	Atenuación a 1/10

Truco para el examen: Amplificadores en cascada $\rightarrow$ las ganancias en dB se **suman**:

$$A_{v_{\text{total, dB}}} = A_{v_1\text{dB}} + A_{v_2\text{dB}} + \dots$$

2.3 3. Modelado de fuente y carga

2.3.1 3.1 Modelos de fuente

La fuente de señal se puede modelar de dos formas equivalentes:

Modelo	Componentes	Esquema
Thévenin	V_s (fuente de tensión) en serie con R_s	Fuente de tensión + resistencia serie
Norton	$I_s = V_s/R_s$ (fuente de corriente) en paralelo con $R_p = R_s$	Fuente de corriente + resistencia paralelo

2.3.2 3.2 Modelo de carga

La carga se modela simplemente como una **impedancia** Z_L (en DC, una resistencia R_L). La carga afecta directamente a la ganancia real del amplificador, ya que forma un divisor de tensión con la resistencia de salida R_o .

2.4 4. Circuitos equivalentes del amplificador

Existen **cuatro modelos** de amplificador según el tipo de variable de entrada y salida:

2.4.1 4.1 Amplificador de tensión

Parámetro	Descripción
A_{vo}	Ganancia de tensión en vacío (circuito abierto)
R_i	Resistencia de entrada
R_o	Resistencia de salida

$$A_v = A_{vo} \cdot \frac{R_L}{R_o + R_L} \cdot \frac{R_i}{R_s + R_i}$$

- **Ideal:** $R_i \rightarrow \infty$ (no carga la fuente), $R_o \rightarrow 0$ (entrega toda la tensión a la carga)
- Con $R_i \rightarrow \infty$ y $R_o \rightarrow 0$: $A_v = A_{vo}$

2.4.2 4.2 Amplificador de corriente

Parámetro	Descripción
A_{icc}	Ganancia de corriente en cortocircuito
R_i	Resistencia de entrada
R_o	Resistencia de salida

$$A_i = -A_{icc} \cdot \frac{R_o}{R_o + R_L} \cdot \frac{R_p}{R_p + R_i}$$

- **Ideal:** $R_i \rightarrow 0$ (acepta toda la corriente), $R_o \rightarrow \infty$ (fuerza la corriente en la carga)

2.4.3 4.3 Amplificador de transconductancia

Parámetro	Descripción
A_{tcc}	Transconductancia en cortocircuito (A/V)
R_i	Resistencia de entrada
R_o	Resistencia de salida

- Entrada: tensión $\rightarrow$ Salida: corriente
- **Ideal:** $R_i \rightarrow \infty$, $R_o \rightarrow \infty$

2.4.4 4.4 Amplificador de transresistencia

Parámetro	Descripción
A_{ro}	Transresistencia en circuito abierto (V/A)
R_i	Resistencia de entrada
R_o	Resistencia de salida

- Entrada: corriente $\rightarrow$ Salida: tensión
- **Ideal:** $R_i \rightarrow 0$, $R_o \rightarrow 0$

2.4.5 Tabla resumen de los 4 modelos

Modelo	Entrada	Salida	R_i ideal	R_o ideal	Ganancia
Tensión	V	V	∞	0	A_{vo}
Corriente	I	I	0	∞	A_{icc}
Transconductancia	V	I	∞	∞	A_{tcc}
Transresistencia	I	V	0	0	A_{ro}

Ejercicio resuelto: Amplificador de tensión Datos: $V_s = 2$ V, $R_s = 100$ Ω , $R_L = 50$ Ω , $R_i = 1$ k Ω , $A_{vo} = 10$, $R_o = 10$ Ω

a) Tensión de salida con amplificador:

Paso 1: Aplicar la fórmula del amplificador de tensión:

$$A_v = A_{vo} \cdot \frac{R_L}{R_o + R_L} \cdot \frac{R_i}{R_s + R_i}$$

Paso 2: Sustituir valores:

$$A_v = 10 \cdot \frac{50}{10 + 50} \cdot \frac{1000}{100 + 1000} = 10 \cdot \frac{50}{60} \cdot \frac{1000}{1100}$$

$$A_v = 10 \cdot 0.833 \cdot 0.909 = 7.576$$

Paso 3: La tensión en la entrada del amplificador (divisor R_s - R_i):

$$V_i = V_s \cdot \frac{R_i}{R_s + R_i} = 2 \cdot \frac{1000}{1100} = 1.818 \text{ V}$$

Paso 4: La tensión de salida:

$$V_o = A_v \cdot V_s = 7.576 \cdot 2 = 15.15 \text{ V}$$

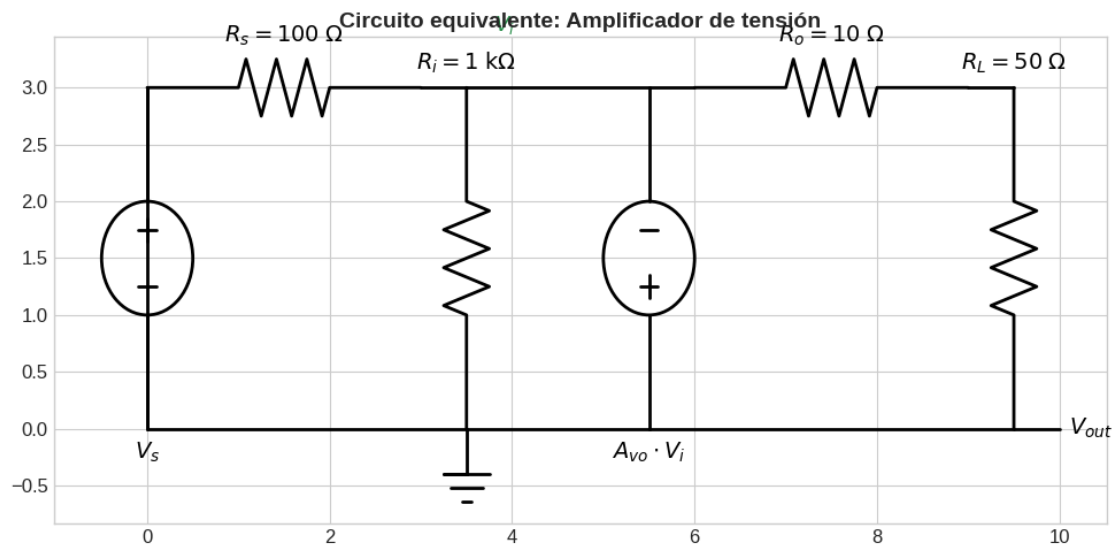
O equivalentemente:

$$V_o = A_{vo} \cdot V_i \cdot \frac{R_L}{R_o + R_L} = 10 \cdot 1.818 \cdot \frac{50}{60} = 15.15 \text{ V}$$

b) Tensión de salida sin amplificador (conexión directa fuente-carga):

$$V_o = V_s \cdot \frac{R_L}{R_s + R_L} = 2 \cdot \frac{50}{100 + 50} = 2 \cdot \frac{50}{150} = 0.667 \text{ V}$$

Conclusión: El amplificador eleva la tensión de salida de 0.667 V a 15.15 V, una mejora de factor ≈ 22.7 veces.



2.5 5. Medida de los parámetros del amplificador

2.5.1 5.1 Resistencia de entrada R_i

Aplicar V_s a la entrada con R_L conectada. Medir V_i e I_i :

$$R_i = \frac{V_i}{I_i}$$

2.5.2 5.2 Ganancia de tensión en vacío A_{vo}

Medir V_o y V_i **sin carga** ($R_L = \infty$, salida en circuito abierto):

$$A_{vo} = \left. \frac{V_o}{V_i} \right|_{R_L = \infty}$$

2.5.3 5.3 Resistencia de salida R_o

Aplicar una fuente V_s a la salida con $V_i = 0$ (entrada cortocircuitada). Medir V_o e I_o :

$$R_o = -\frac{V_o}{I_o}$$

2.5.4 5.4 Ganancia de corriente en cortocircuito A_{icc}

Medir I_o e I_i con $R_L = 0$ (salida en cortocircuito):

$$A_{icc} = \left. \frac{I_o}{I_i} \right|_{R_L = 0}$$

2.6 6. Efectos capacitivos sobre la ganancia

En circuitos reales, los **condensadores** limitan el comportamiento en frecuencia.

2.6.1 6.1 Condensador en serie (filtro paso alto)

Un condensador en serie con la señal bloquea las frecuencias bajas (acoplo AC):

$$|A_v(\omega)| = A' \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_T}{\omega}\right)^2}}$$

donde $\omega_T = \frac{1}{R_{eq} \cdot C}$ es la **frecuencia de corte inferior**.

- Para $\omega \gg \omega_T$: $|A_v| \approx A'$ (ganancia plana)
- Para $\omega = \omega_T$: $|A_v| = A'/\sqrt{2}$ (punto de **-3 dB**)
- Para $\omega \ll \omega_T$: $|A_v| \rightarrow 0$ (atenuación)

2.6.2 6.2 Condensador en paralelo (filtro paso bajo)

Un condensador en paralelo con la carga atenúa las frecuencias altas:

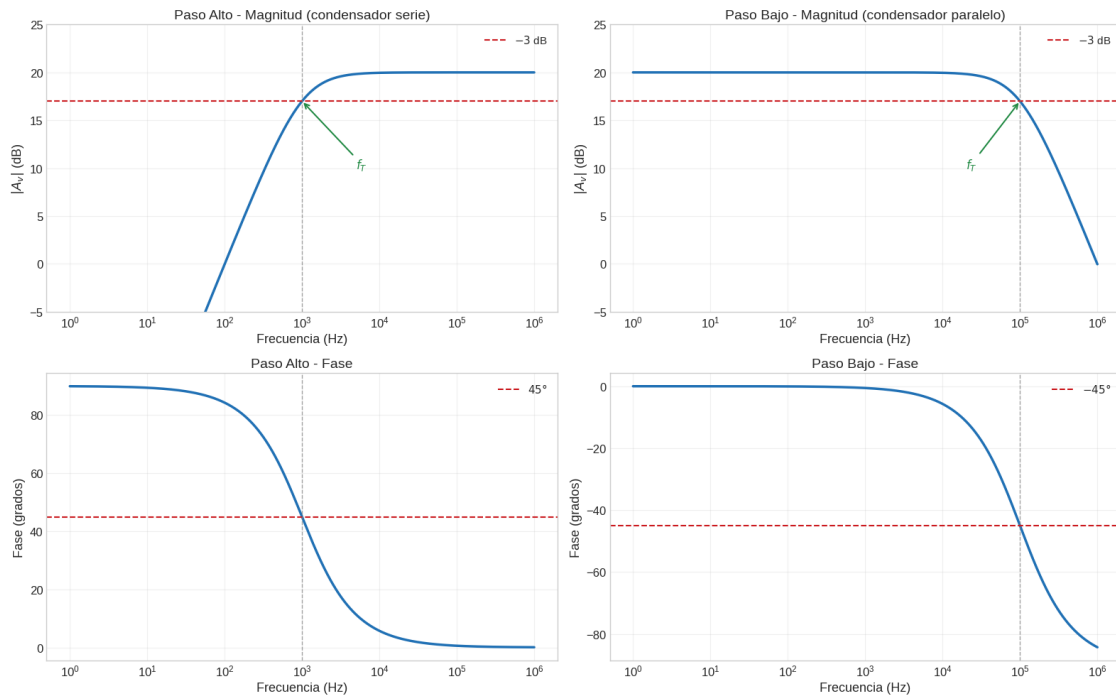
$$|A_v(\omega)| = A' \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_T}\right)^2}}$$

donde $\omega_T = \frac{1}{R_{eq} \cdot C}$ es la **frecuencia de corte superior**.

- Para $\omega \ll \omega_T$: $|A_v| \approx A'$ (ganancia plena)
- Para $\omega = \omega_T$: $|A_v| = A'/\sqrt{2}$ (punto de **-3 dB**)
- Para $\omega \gg \omega_T$: $|A_v| \rightarrow 0$ (atenuación)

2.6.3 6.3 Diagrama de Bode

El diagrama de Bode representa la **magnitud** y la **fase** de la ganancia en función de la frecuencia (escala logarítmica).



3 PARTE 2: Amplificador Operacional (Tema 7)

3.1 7. El amplificador diferencial

3.1.1 7.1 Concepto

Un **amplificador diferencial** amplifica la diferencia entre dos señales de entrada:

$$V_{out} = A_d \cdot (V^+ - V^-)$$

donde A_d es la **ganancia diferencial**.

3.1.2 7.2 Modo diferencial vs modo común

Cualquier par de señales V_1 , V_2 se descompone en:

$$V_d = V_1 - V_2 \quad (\text{modo diferencial})$$

$$V_c = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{modo común})$$

La salida real incluye ambas componentes:

$$V_{out} = A_d \cdot V_d + A_c \cdot V_c$$

donde A_c es la ganancia en modo común (idealmente **cero**).

3.1.3 7.3 CMRR (Relación de Rechazo al Modo Común)

$$CMRR = \frac{A_d}{A_c} \quad CMRR_{dB} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{A_d}{A_c} \right)$$

- Un CMRR alto significa que el amplificador **rechaza bien** el ruido común a ambas entradas
- OPAM ideal: $CMRR = \infty$

Ejercicio resuelto: CMRR Datos: $A_d = 10^5$, $CMRR = 80$ dB. Señales: $V_1 = 5.001$ V, $V_2 = 4.999$ V.

Paso 1: Calcular V_d y V_c :

$$V_d = V_1 - V_2 = 5.001 - 4.999 = 0.002 \text{ V} = 2 \text{ mV}$$

$$V_c = \frac{V_1 + V_2}{2} = \frac{5.001 + 4.999}{2} = 5 \text{ V}$$

Paso 2: Obtener A_c del CMRR:

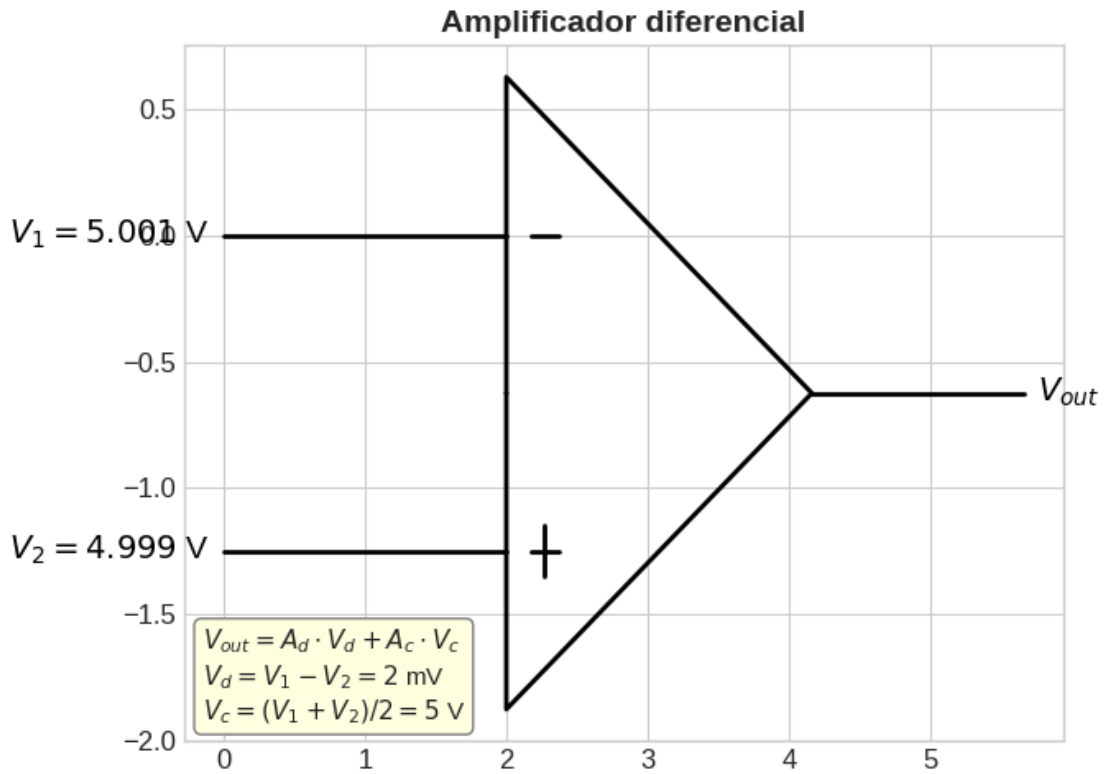
$$CMRR_{dB} = 80 \implies CMRR = 10^{80/20} = 10^4$$

$$A_c = \frac{A_d}{CMRR} = \frac{10^5}{10^4} = 10$$

Paso 3: Calcular la salida:

$$V_{out} = A_d \cdot V_d + A_c \cdot V_c = 10^5 \times 0.002 + 10 \times 5 = 200 + 50 = 250 \text{ V}$$

Nota: La componente de modo común (50 V) introduce un **error del 20%**. En un OPAM ideal ($CMRR = \infty$), la salida sería exactamente 200 V.



3.2 8. El OPAM ideal

3.2.1 8.1 Propiedades del OPAM ideal

Propiedad	Valor ideal	Consecuencia
Ganancia diferencial A_d	∞	Cualquier $V_d \neq 0$ satura la salida
Resistencia de entrada R_i	∞	$I^+ = I^- = 0$ (no entra corriente)

Propiedad	Valor ideal	Consecuencia
Resistencia de salida R_o	0	Entrega cualquier corriente sin caída
$CMRR$	∞	Rechaza totalmente el ruido común
Ancho de banda	∞	Funciona a cualquier frecuencia

3.2.2 8.2 Las dos reglas de oro del OPAM ideal (con realimentación negativa)

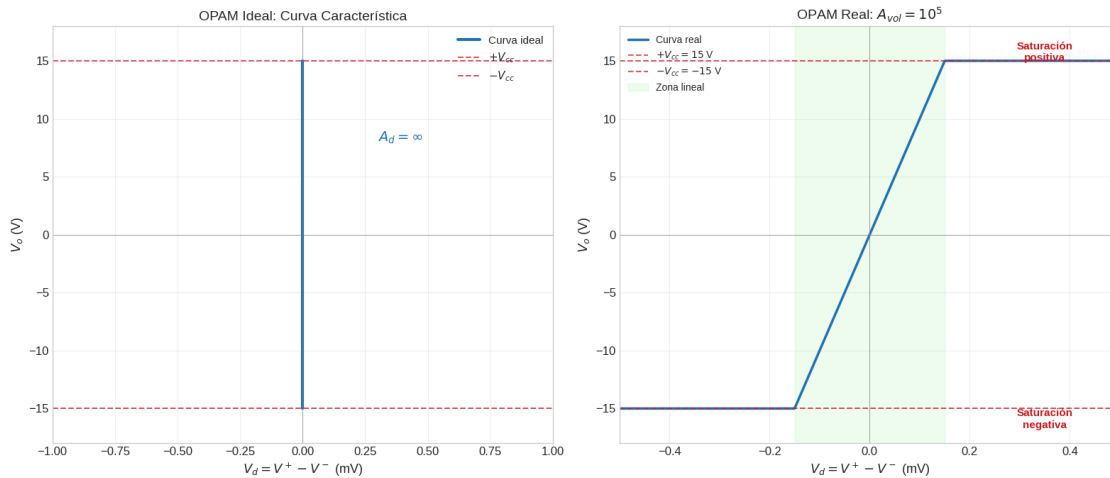
$$I^+ = I^- = 0 \quad (\text{no entra corriente por las entradas})$$

$$V^+ = V^- \quad (\text{tierra virtual / cortocircuito virtual})$$

Error frecuente: Estas reglas SOLO son válidas cuando hay **realimentación negativa** (conexión de la salida a la entrada inversora V^-). Sin realimentación, el OPAM funciona como comparador.

3.2.3 8.3 Curva característica

- **Ideal:** línea vertical en $V_d = 0$ (ganancia infinita)
- **Real:** pendiente finita con **saturación** a $\pm V_{cc}$



3.3 9. Configuraciones con realimentación negativa

Esta es la sección **más importante** del OPAM. Todas las configuraciones se analizan con las dos reglas de oro: 1. $I^+ = I^- = 0$ 2. $V^+ = V^-$ (tierra virtual)

3.3.1 9.1 Amplificador Inversor

$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_{in}$$

Propiedad	Valor
Ganancia	$A_v = -R_2/R_1$
Impedancia de entrada	$Z_{in} = R_1$ (la entrada inversora está a tierra virtual)
Impedancia de salida	$Z_{out} \approx 0$ (propiedad del OPAM)
Fase	Invierte la señal (desfase de 180°)

Dedución: Como $V^+ = 0$ (conectado a tierra), por tierra virtual $V^- = 0$. Nudo en V^- :

$$\frac{V_{in} - 0}{R_1} + \frac{V_{out} - 0}{R_2} = 0 \Rightarrow V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} V_{in}$$

Ejercicio resuelto: Amplificador inversor Datos: $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 47 \text{ k}\Omega$, $V_{in} = 0.5 \text{ V}$

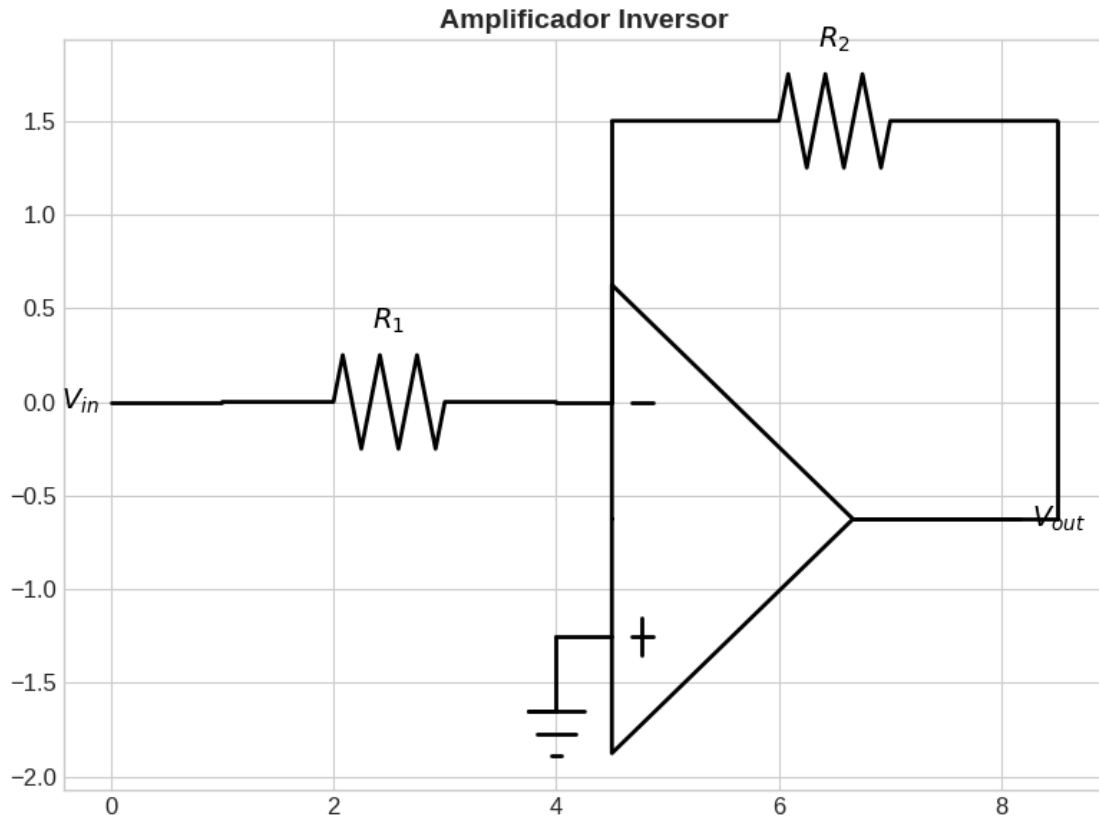
Paso 1: Calcular la ganancia:

$$A_v = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{47\text{k}}{10\text{k}} = -4.7$$

Paso 2: Calcular la salida:

$$V_{out} = A_v \cdot V_{in} = -4.7 \times 0.5 = -2.35 \text{ V}$$

Resultado: $V_{out} = -2.35 \text{ V}$ (señal invertida y amplificada 4.7 veces)



3.3.2 9.2 Amplificador No Inversor

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot V_{in}$$

Propiedad	Valor
Ganancia	$A_v = 1 + R_2/R_1$ (siempre ≥ 1)
Impedancia de entrada	$Z_{in} = \infty$ (la señal entra por la entrada no inversora)
Impedancia de salida	$Z_{out} \approx 0$
Fase	No invierte la señal

Deducción: V_{in} se aplica a V^+ . Por tierra virtual: $V^- = V^+ = V_{in}$. Divisor de tensión en la realimentación:

$$V^- = V_{out} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = V_{in} \Rightarrow V_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{in}$$

Ejercicio resuelto: Amplificador no inversor Datos: $R_1 = 4.7 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 22 \text{ k}\Omega$, $V_{in} = 0.3 \text{ V}$

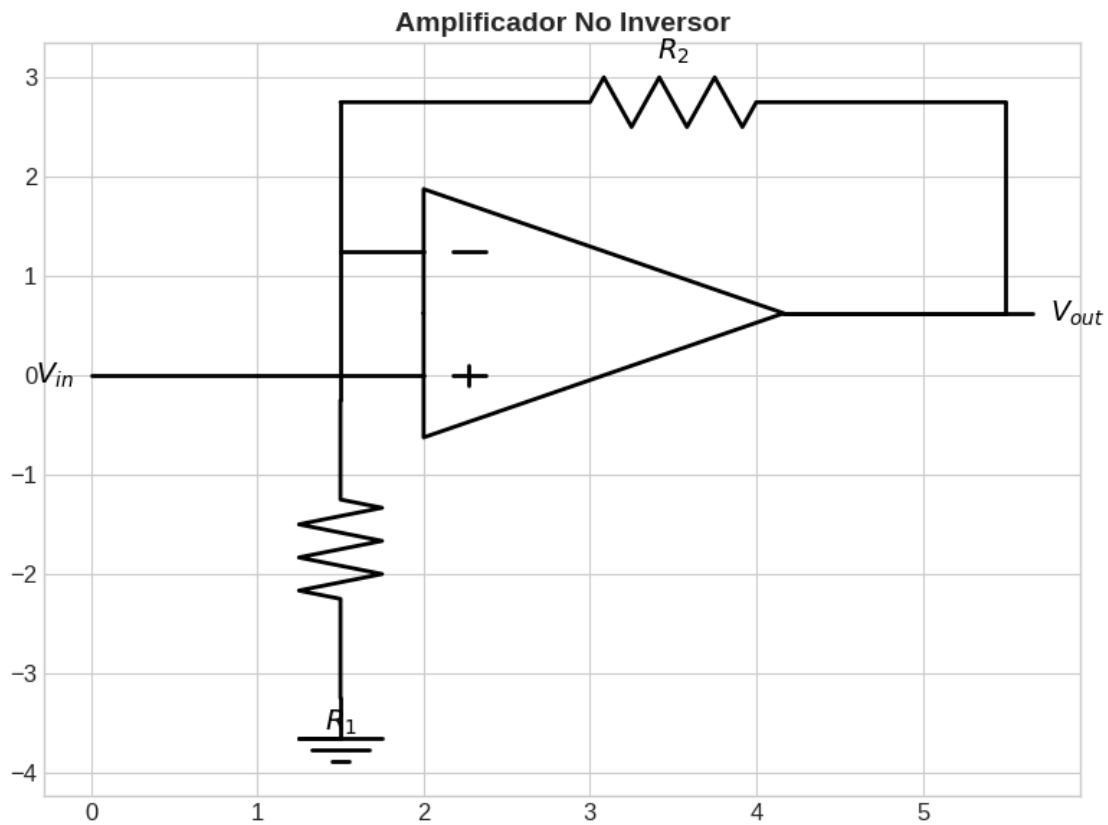
Paso 1: Calcular la ganancia:

$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{22k}{4.7k} = 1 + 4.681 = 5.681$$

Paso 2: Calcular la salida:

$$V_{out} = 5.681 \times 0.3 = 1.704 \text{ V}$$

Resultado: $V_{out} = 1.70 \text{ V}$ (señal amplificada sin inversión)



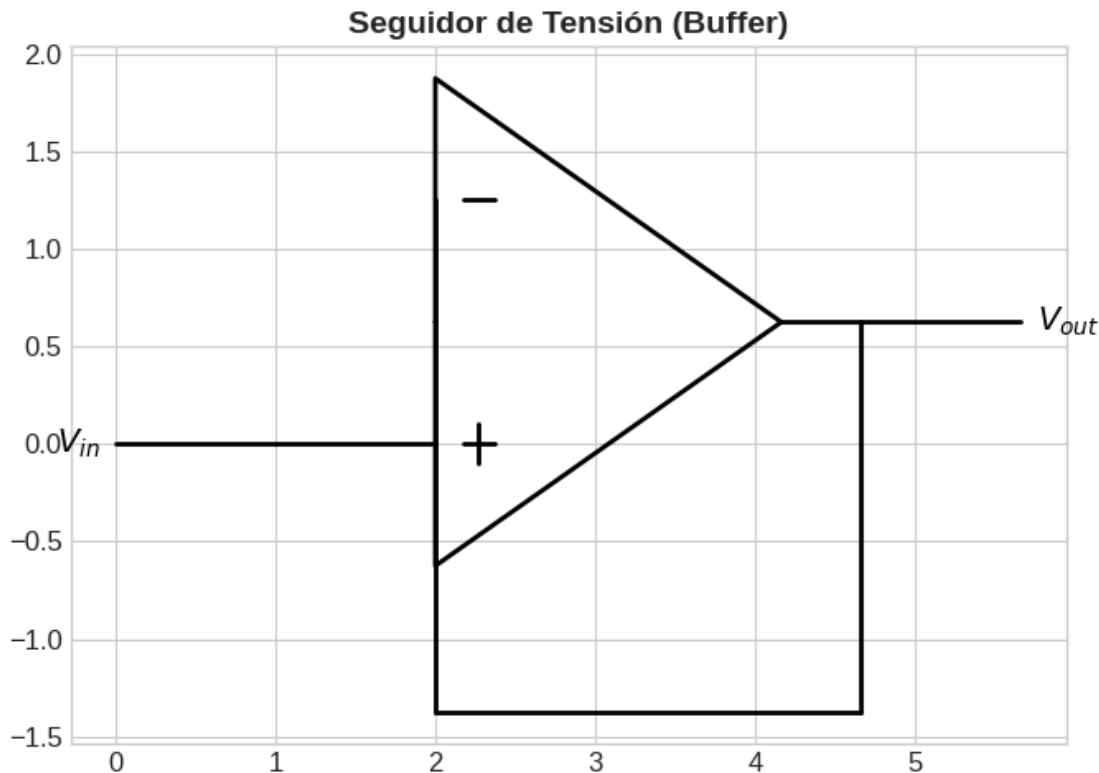
3.3.3 9.3 Seguidor de Tensión (Buffer)

$$V_{out} = V_{in}$$

Propiedad	Valor
Ganancia	$A_v = 1$
Impedancia de entrada	$Z_{in} = \infty$
Impedancia de salida	$Z_{out} \approx 0$

¿Para qué sirve si no amplifica? El seguidor de tensión **aísla** etapas: toma una señal de una fuente con alta impedancia y la entrega a una carga con baja impedancia sin atenuación. Es el caso especial del no inversor con $R_2 = 0$ y $R_1 = \infty$.

Aplicación típica: Adaptar impedancias entre un sensor (alta R_s) y un ADC (baja R_{in}).



3.3.4 9.4 Amplificador Sumador Inversor

$$V_{out} = -R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} + \dots \right)$$

Si todas las resistencias son iguales ($R_1 = R_2 = R_3 = R_f = R$):

$$V_{out} = -(V_1 + V_2 + V_3 + \dots)$$

Propiedad	Valor
Ganancia para cada entrada	$A_{v_k} = -R_f/R_k$
Impedancia de entrada	$Z_{in_k} = R_k$ (independientes)
Superposición	Cada entrada contribuye de forma independiente

Aplicación: Mezclador de audio, convertidor digital-analógico (DAC).

Ejercicio resuelto: Amplificador sumador Datos: $R_1 = 10\text{ k}\Omega$, $R_2 = 20\text{ k}\Omega$, $R_f = 40\text{ k}\Omega$, $V_1 = 1\text{ V}$, $V_2 = -0.5\text{ V}$

Paso 1: Aplicar la fórmula del sumador:

$$V_{out} = -R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \right) = -40\text{k} \left(\frac{1}{10\text{k}} + \frac{-0.5}{20\text{k}} \right)$$

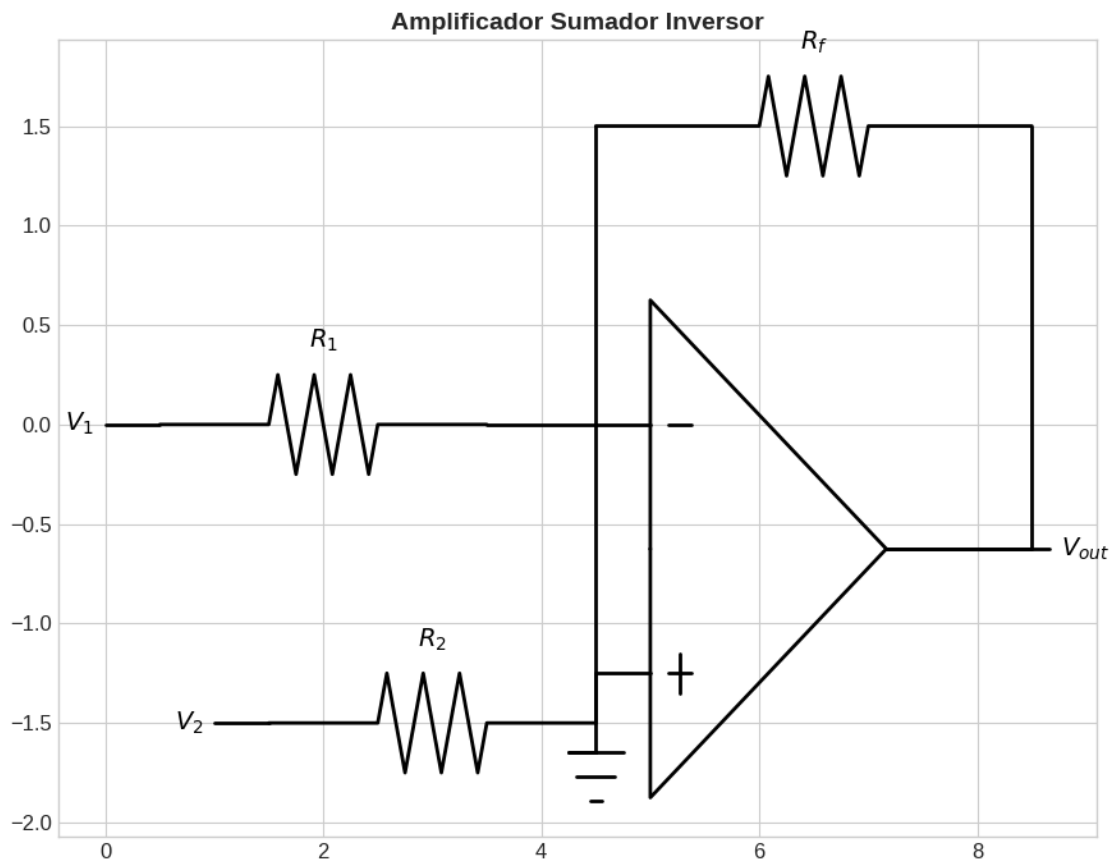
Paso 2: Calcular cada término:

$$V_{out} = -40\text{k} (0.1 \times 10^{-3} + (-0.025 \times 10^{-3})) = -40\text{k} \times 0.075 \times 10^{-3}$$

Simplificando:

$$V_{out} = -40 \times (0.1 - 0.025) = -40 \times 0.075 = -3\text{ V}$$

Resultado: $V_{out} = -3\text{ V}$



3.3.5 9.5 Diferenciador

$$V_{out} = -R \cdot C \cdot \frac{dV_{in}}{dt}$$

Propiedad	Valor
Función	Calcula la derivada de la señal de entrada
Entrada rampa	Salida: constante
Entrada senoidal $V_{in} = V_A \sin(\omega t)$	$V_{out} = -RC\omega V_A \cos(\omega t)$
Impedancia de entrada	$Z_{in} = 1/(j\omega C)$ (depende de la frecuencia)

Precaución: El diferenciador amplifica el ruido de alta frecuencia (la ganancia crece con ω).

Ejercicio resuelto: Diferenciador Datos: $R = 10 \text{ k}\Omega$, $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$, $V_{in}(t) = 2 \sin(2\pi \cdot 100 \cdot t) \text{ V}$

Paso 1: Calcular RC :

$$RC = 10 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-6} = 0.01 \text{ s}$$

Paso 2: La derivada de la entrada:

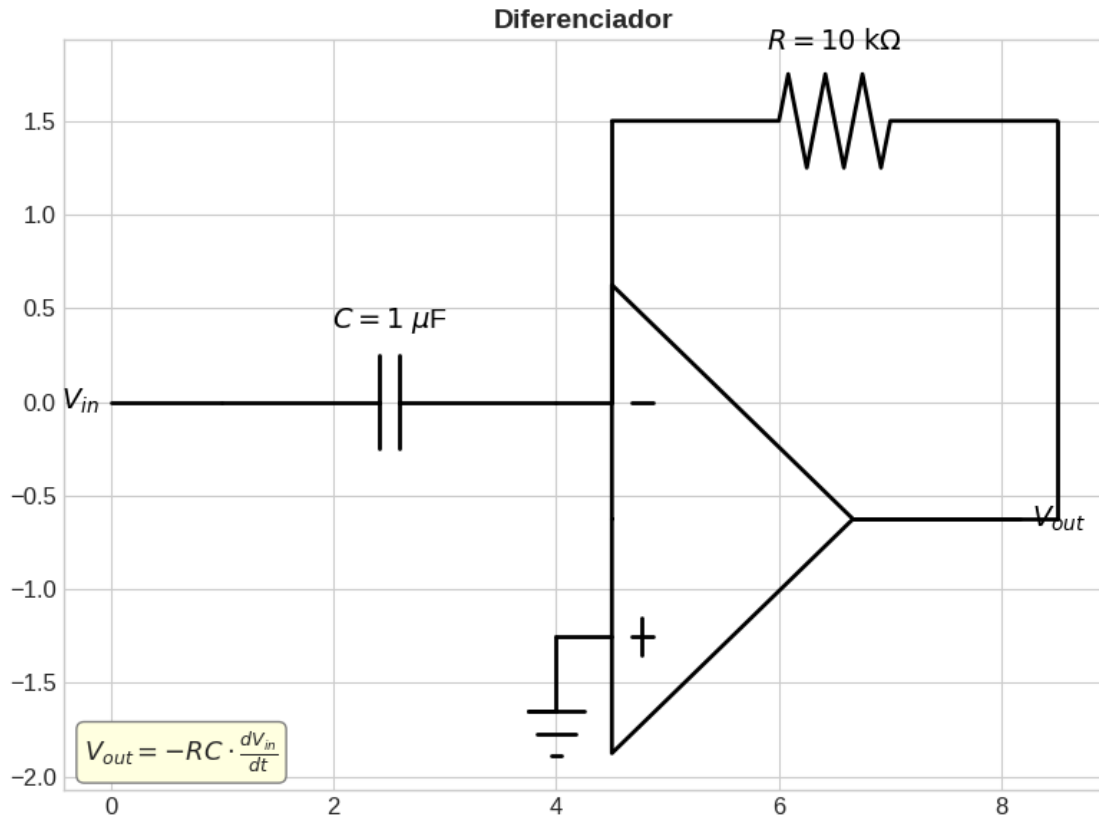
$$\frac{dV_{in}}{dt} = 2 \cdot 2\pi \cdot 100 \cdot \cos(2\pi \cdot 100 \cdot t) = 400\pi \cos(2\pi \cdot 100 \cdot t)$$

Paso 3: La salida:

$$V_{out} = -RC \cdot \frac{dV_{in}}{dt} = -0.01 \times 400\pi \cos(2\pi \cdot 100 \cdot t)$$

$$V_{out} = -4\pi \cos(2\pi \cdot 100 \cdot t) \approx -12.57 \cos(2\pi \cdot 100 \cdot t) \text{ V}$$

Resultado: La amplitud de salida es 12.57 V con un desfase de 90° .



3.3.6 9.6 Integrador

$$V_{out} = -\frac{1}{R \cdot C} \int V_{in} dt$$

Propiedad	Valor
Función	Calcula la integral de la señal de entrada
Entrada escalón V_0	Salida: rampa $V_{out} = -\frac{V_0}{RC} \cdot t$
Entrada senoidal	$V_{out} = \frac{V_A}{RC\omega} \cos(\omega t)$
Impedancia de realimentación	$Z_f = 1/(j\omega C)$ (crece a baja frecuencia)

Precaución: En DC ($\omega = 0$), la ganancia tiende a infinito $\rightarrow$ el OPAM se satura. En la práctica se añade una resistencia en paralelo con C .

Ejercicio resuelto: Integrador Datos: $R = 100 \text{ k}\Omega$, $C = 10 \text{ }\mu\text{F}$, $V_{in} = 2 \text{ V}$ (escalón constante)

Paso 1: Calcular RC :

$$RC = 100 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-6} = 1 \text{ s}$$

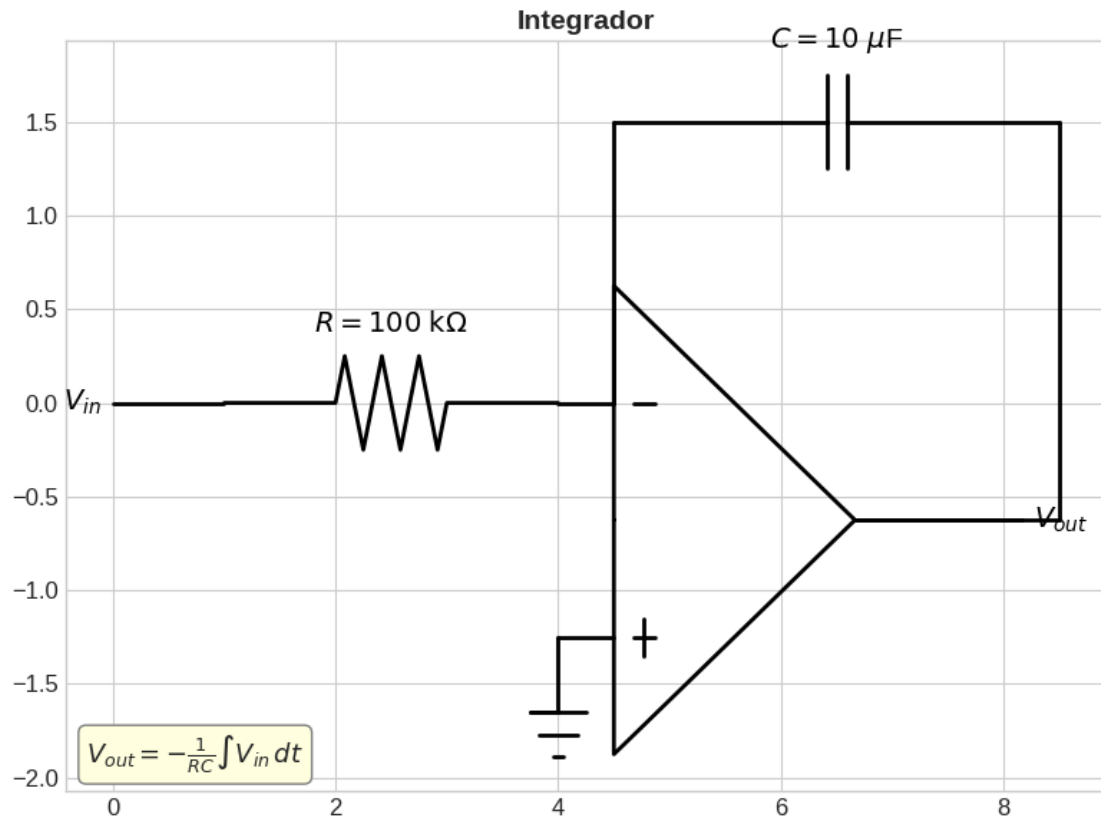
Paso 2: Aplicar la fórmula del integrador para entrada constante:

$$V_{out}(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t V_{in} dt' = -\frac{1}{1} \cdot 2 \cdot t = -2t$$

Paso 3: Evaluar en instantes concretos:

t (s)	V_{out} (V)
0	0
1	-2
2	-4
5	-10

Resultado: La salida es una **rampa descendente** con pendiente -2 V/s. En la realidad, el OPAM saturará en $-V_{cc}$.



3.4 10. Realimentación positiva: Trigger de Schmitt

3.4.1 10.1 Concepto

El **trigger de Schmitt** es un comparador con **histéresis**. La realimentación positiva (de la salida a la entrada no inversora V^+) crea dos umbrales de conmutación diferentes:

$$\boxed{V_{T+} = +V_{cc} \cdot \frac{R_1}{R_2}} \quad \boxed{V_{T-} = -V_{cc} \cdot \frac{R_1}{R_2}}$$

(para el caso de entrada por V^- y divisor R_1 - R_2 en la realimentación positiva)

3.4.2 10.2 Histéresis

$$\boxed{\Delta V = V_{T+} - V_{T-} = (V_{cc} + V_{ee}) \cdot \frac{R_1}{R_2}}$$

Con alimentación simétrica ($V_{ee} = -V_{cc}$):

$$\Delta V = 2V_{cc} \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

3.4.3 10.3 Comportamiento

- Si $V_{in} < V_{T-}$: salida salta a $+V_{cc}$
- Si $V_{in} > V_{T+}$: salida salta a $-V_{cc}$
- Entre V_{T-} y V_{T+} : la salida **mantiene su estado anterior** (memoria)

Aplicación: Eliminar rebotes en señales ruidosas, generar ondas cuadradas desde senoidales.

Ejercicio resuelto: Trigger de Schmitt Datos: $V_{cc} = 12$ V (alimentación simétrica ± 12 V), $R_1 = 10$ k Ω , $R_2 = 100$ k Ω

Paso 1: Calcular los umbrales:

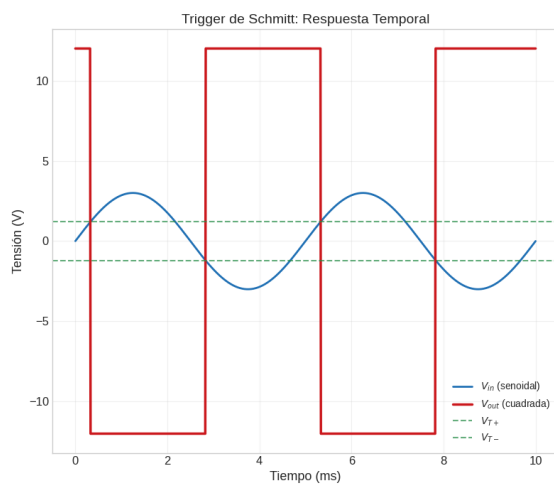
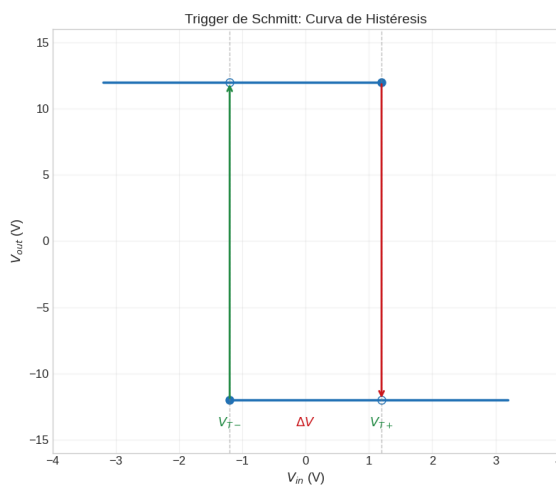
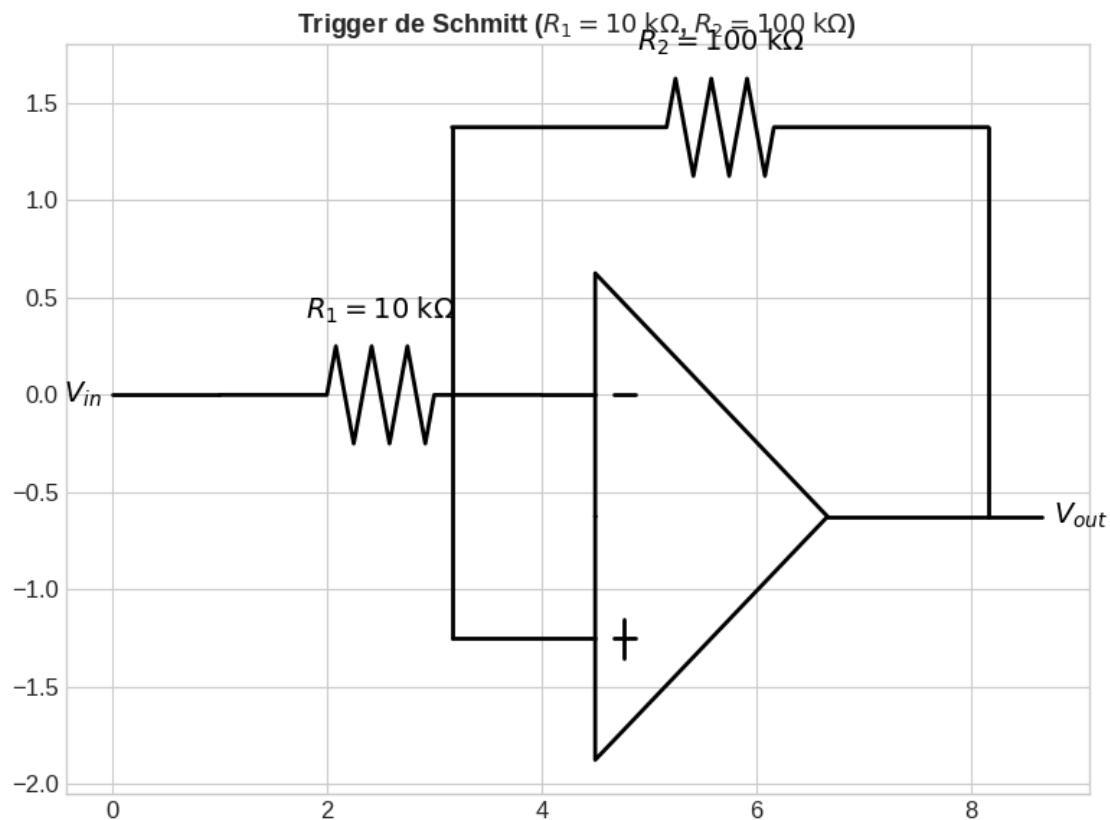
$$V_{T+} = V_{cc} \cdot \frac{R_1}{R_2} = 12 \cdot \frac{10\text{k}}{100\text{k}} = 12 \times 0.1 = 1.2 \text{ V}$$

$$V_{T-} = -V_{cc} \cdot \frac{R_1}{R_2} = -12 \times 0.1 = -1.2 \text{ V}$$

Paso 2: Calcular la histéresis:

$$\Delta V = V_{T+} - V_{T-} = 1.2 - (-1.2) = 2.4 \text{ V}$$

Resultado: El trigger conmuta hacia $+12$ V cuando la entrada baja de -1.2 V, y hacia -12 V cuando la entrada sube de $+1.2$ V. La ventana de histéresis es 2.4 V.



3.5 11. OPAM real: Limitaciones prácticas

3.5.1 11.1 Imperfecciones DC

Parámetro	Significado	Valor típico
Tensión de offset V_{os}	Tensión necesaria entre entradas para que $V_{out} = 0$	1 – 10 mV
Corriente de polarización I_B	Media de las corrientes de entrada: $I_B = (I_{B+} + I_{B-})/2$	10 – 100 nA
Corriente de offset I_{os}	Diferencia: $I_{os} = I_{B+} - I_{B-} $	1 – 10 nA

3.5.2 11.2 Producto ganancia-ancho de banda (GBW)

$$A_v \cdot B = A_{vol} \cdot f_c = GBW = \text{constante}$$

donde: - A_{vol} : ganancia en lazo abierto (ej. 10^5) - f_c : frecuencia de corte en lazo abierto (ej. 10 Hz) - GBW : producto ganancia-ancho de banda (ej. 1 MHz para un 741)

Consecuencia: Si se configura el OPAM con ganancia $A_v = 100$, el ancho de banda es:

$$B = \frac{GBW}{A_v} = \frac{10^6}{100} = 10 \text{ kHz}$$

A mayor ganancia, menor ancho de banda. La curva de ganancia en lazo abierto decae a -20 dB/década.

3.5.3 11.3 Slew Rate (Velocidad de respuesta)

$$SR = \left(\frac{dV_{out}}{dt} \right)_{\max}$$

Para una senoidal $V_{out} = V_A \sin(\omega t)$:

$$\left(\frac{dV_{out}}{dt} \right)_{\max} = \omega \cdot V_A = 2\pi f \cdot V_A$$

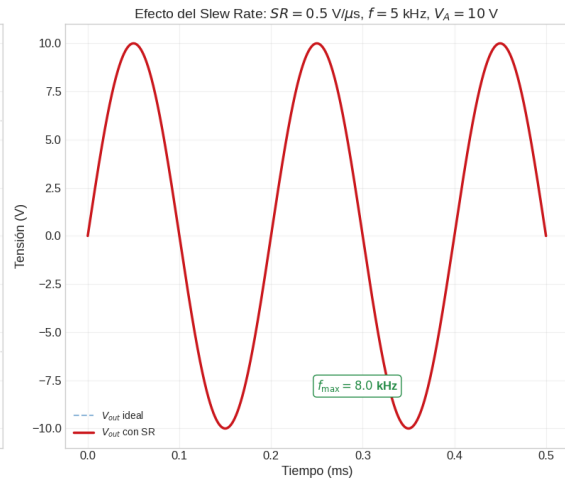
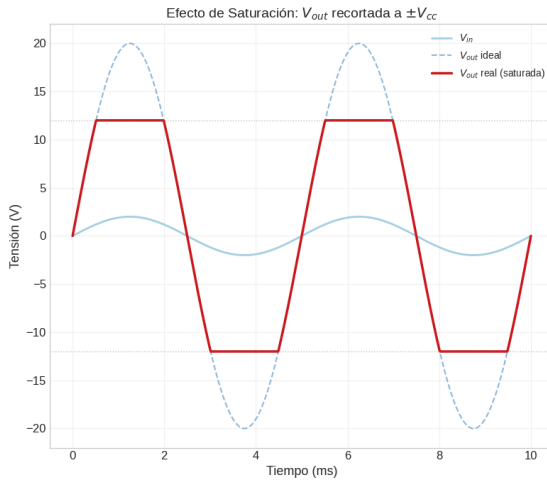
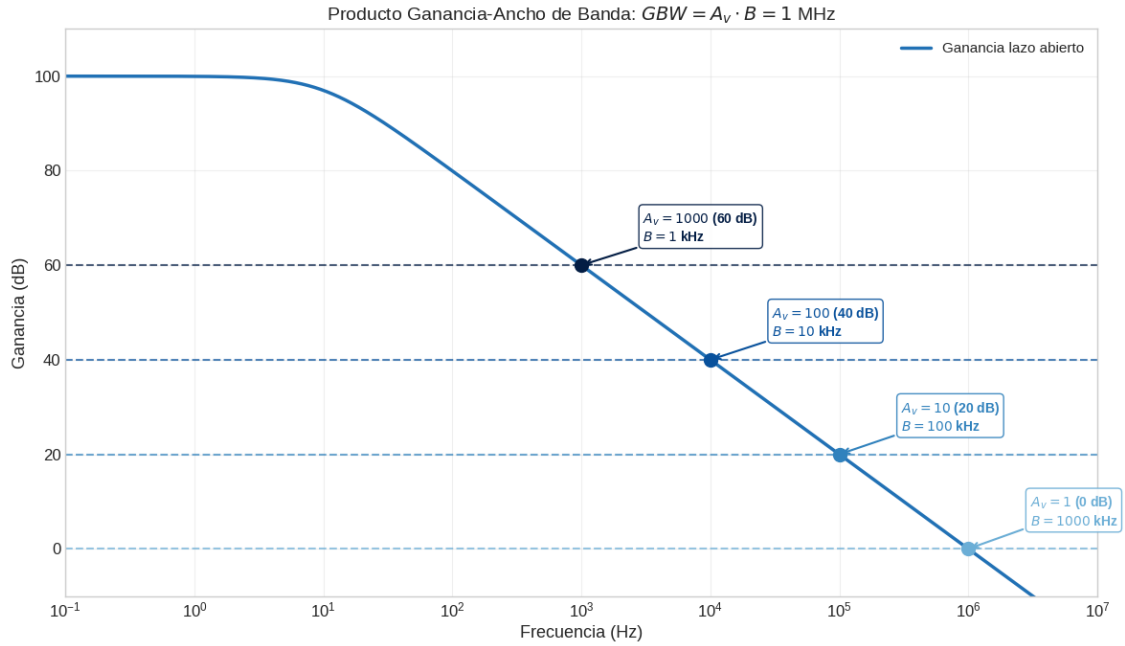
Para evitar distorsión por slew rate:

$$2\pi f \cdot V_A \leq SR$$

$$f_{\max} = \frac{SR}{2\pi V_A}$$

Ejemplo: 741 tiene $SR = 0.5 \text{ V}/\mu\text{s}$. Para $V_A = 10 \text{ V}$:

$$f_{\max} = \frac{0.5 \times 10^6}{2\pi \times 10} = 7.96 \text{ kHz}$$



3.6 12. Catálogo completo de ejercicios: todos los patrones

Esta sección clasifica **todos los tipos de problemas** de OPAM que pueden aparecer en exámenes.

#	Tipo	Configuración	Ecuación clave	Dificultad
1	Amplificador inversor	R_1, R_2	$V_{out} = -(R_2/R_1)V_{in}$	Baja

#	Tipo	Configuración	Ecuación clave	Dificultad
2	Amplificador no inversor	R_1, R_2	$V_{out} = (1 + R_2/R_1)V_{in}$	Baja
3	Seguidor de tensión	Realimentación directa	$V_{out} = V_{in}$	Baja
4	Sumador inversor	$R_1, R_2, \dots, R_f$	$V_{out} = -R_f(\sum V_k/R_k)$	Media
5	Diferenciador	C, R	$V_{out} = -RC \cdot dV_{in}/dt$	Media
6	Integrador	R, C	$V_{out} = -\frac{1}{RC} \int V_{in} dt$	Media
7	Amplificadores en cascada	Etapas A, B, C	$A_{total} = A_1 \cdot A_2 \cdot \dots$	Media
8	Identificar configuración	Circuito dado	Analizar conexiones	Media
9	Diseño: elegir R_1, R_2	Ganancia objetivo	Despejar de fórmulas	Alta
10	Trigger de Schmitt	R_1, R_2 realim. positiva	$V_T = \pm V_{cc} R_1/R_2$	Media
11	OPAM real: ancho de banda	GBW dado	$B = GBW/A_v$	Alta
12	OPAM real: slew rate	SR dado	$2\pi f V_A \leq SR$	Alta

3.6.1 12.1 Tipo 1: Amplificador inversor - Calcular ganancia y V_{out}

$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_{in}$$

Clave: La ganancia es negativa (invierte). La impedancia de entrada es R_1 .

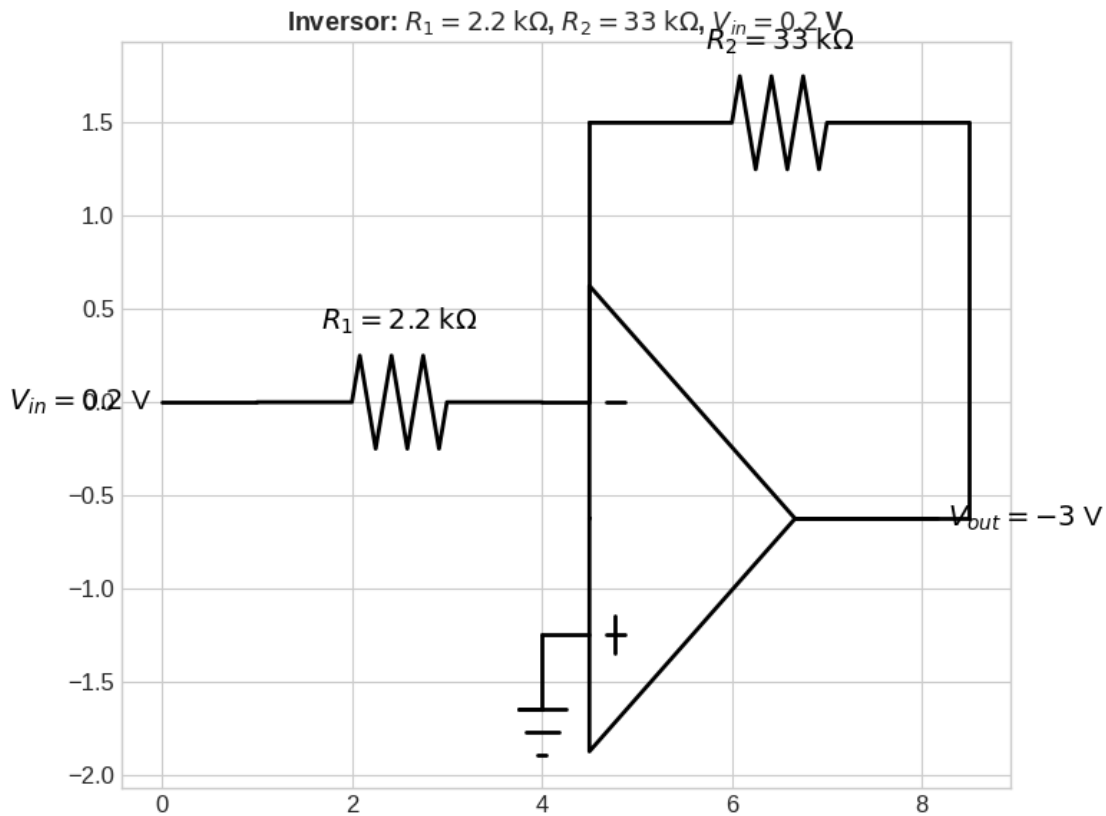
Cómo afectan las resistencias: - Si R_2 **aumenta** $\rightarrow |A_v|$ aumenta $\rightarrow$ mayor amplificación - Si R_1 **aumenta** $\rightarrow |A_v|$ disminuye $\rightarrow$ menor amplificación, mayor Z_{in}

Ejercicio resuelto: Inversor - cálculo rápido Datos: $R_1 = 2.2 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 33 \text{ k}\Omega$, $V_{in} = 0.2 \text{ V}$, $V_{cc} = \pm 15 \text{ V}$

$$A_v = -\frac{33\text{k}}{2.2\text{k}} = -15$$

$$V_{out} = -15 \times 0.2 = -3 \text{ V}$$

Verificar: $|V_{out}| = 3 < 15 = V_{cc} \rightarrow$ **No satura.**



3.6.2 12.2 Tipo 2: Amplificador no inversor - Calcular ganancia y V_{out}

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot V_{in}$$

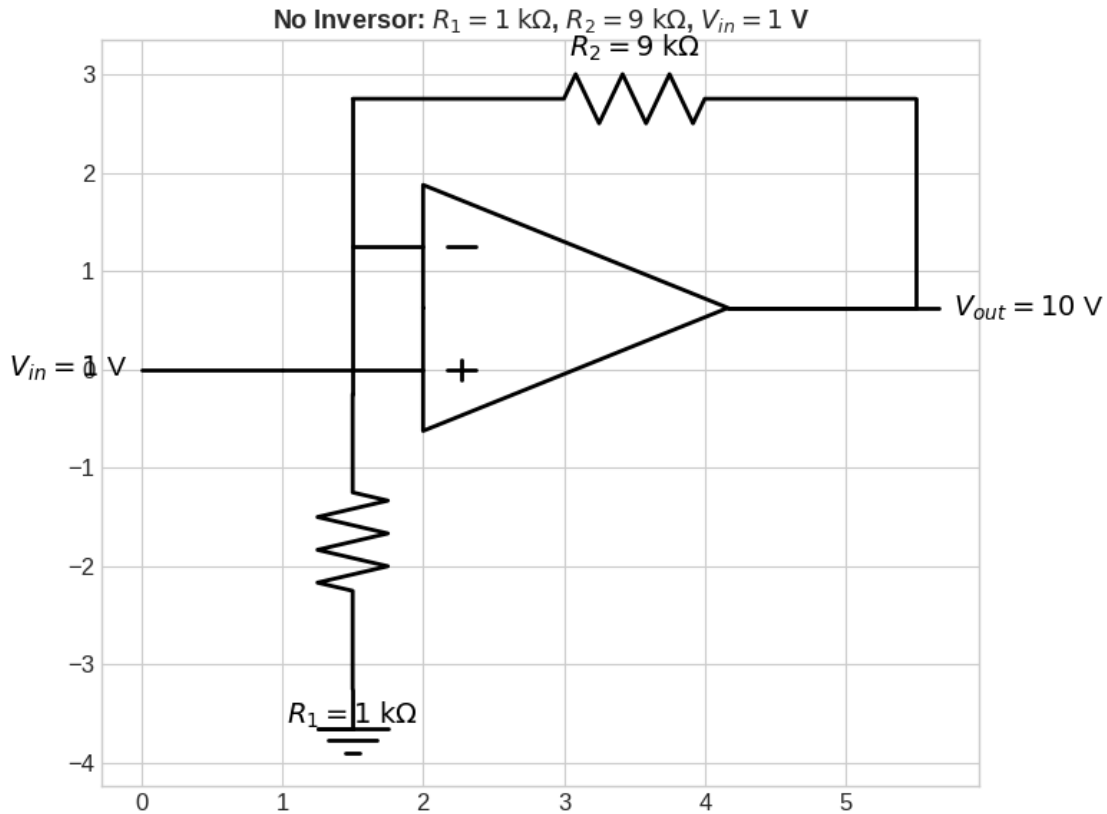
Clave: La ganancia es siempre ≥ 1 y positiva. Impedancia de entrada infinita.

Cómo afectan las resistencias: - Si R_2 **aumenta** $\rightarrow A_v$ aumenta - Si R_1 **aumenta** $\rightarrow A_v$ disminuye (se acerca a 1)

Ejercicio resuelto: No inversor Datos: $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 9 \text{ k}\Omega$, $V_{in} = 1 \text{ V}$

$$A_v = 1 + \frac{9\text{k}}{1\text{k}} = 10$$

$$V_{out} = 10 \times 1 = 10 \text{ V}$$



3.6.3 12.3 Tipo 3: Seguidor de tensión

$$V_{out} = V_{in}$$

Clave: Ganancia unitaria. $Z_{in} = \infty$, $Z_{out} \approx 0$. Sirve como **adaptador de impedancias**.

Cuándo usarlo: - Entre un sensor de alta impedancia y una carga de baja impedancia - Para evitar que la carga “cargue” la fuente de señal

Ejercicio resuelto: Seguidor Datos: Sensor con $V_s = 1 \text{ V}$, $R_s = 1 \text{ M}\Omega$. Carga $R_L = 100 \Omega$.

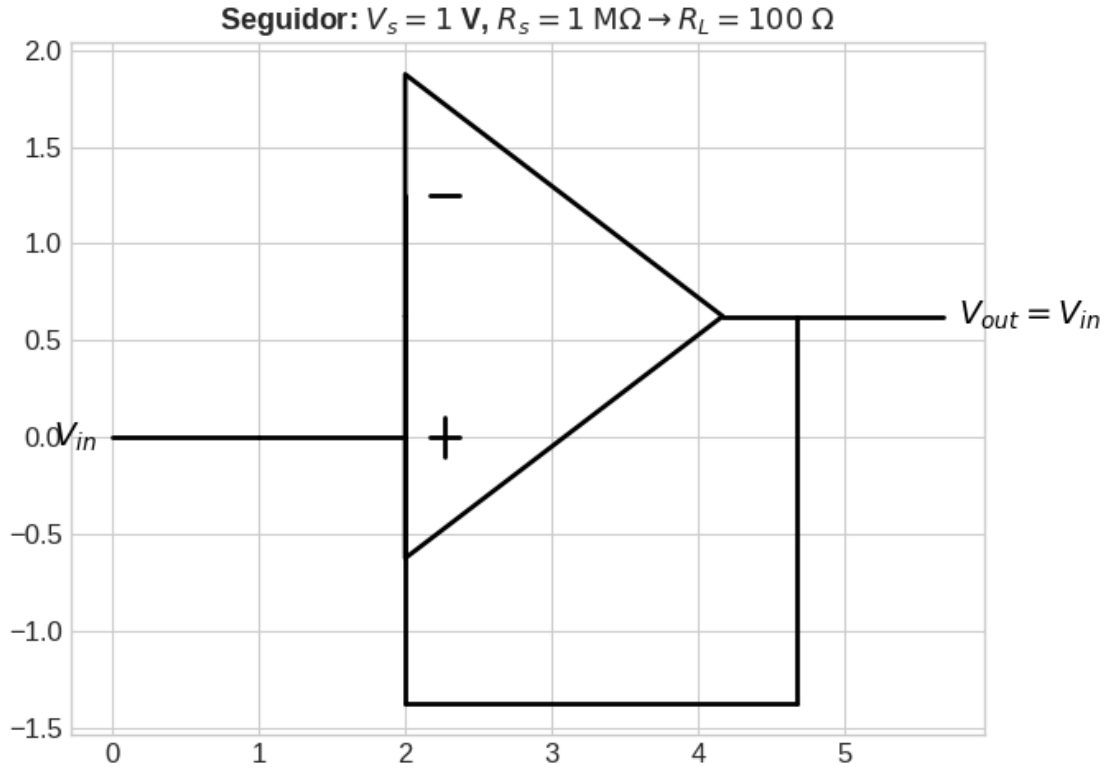
Sin buffer:

$$V_L = V_s \cdot \frac{R_L}{R_s + R_L} = 1 \cdot \frac{100}{10^6 + 100} \approx 0.0001 \text{ V}$$

Con buffer (seguidor):

$$V_L = V_{out} = V_{in} = V_s = 1 \text{ V}$$

El buffer entrega la totalidad de la señal del sensor a la carga.



3.6.4 12.4 Tipo 4: Sumador inversor - Múltiples entradas

$$V_{out} = -R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right)$$

Clave: Cada entrada tiene ganancia independiente $-R_f/R_k$. Se puede hacer una **suma ponderada**.

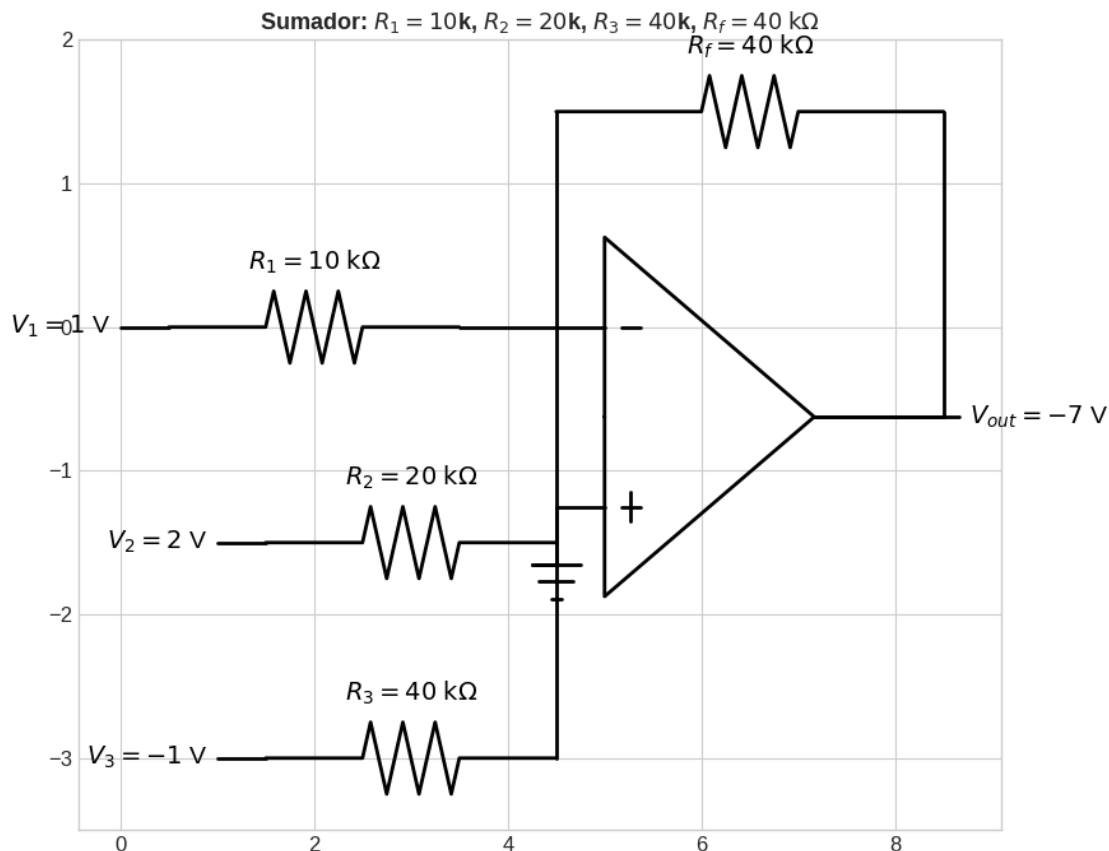
Truco: Si $R_1 = R_2 = R_3 = R_f$, entonces $V_{out} = -(V_1 + V_2 + V_3)$.

Ejercicio resuelto: Sumador con 3 entradas Datos: $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 40 \text{ k}\Omega$, $R_f = 40 \text{ k}\Omega$

$V_1 = 1 \text{ V}$, $V_2 = 2 \text{ V}$, $V_3 = -1 \text{ V}$

$$V_{out} = -40\text{k} \left(\frac{1}{10\text{k}} + \frac{2}{20\text{k}} + \frac{-1}{40\text{k}} \right) = -40 (0.1 + 0.1 - 0.025)$$

$$V_{out} = -40 \times 0.175 = -7 \text{ V}$$



3.6.5 12.5 Tipo 5: Diferenciador e integrador - con formas de onda

Diferenciador: $V_{out} = -RC \cdot dV_{in}/dt$

Entrada	Salida
Rampa ($V_{in} = kt$)	Constante ($V_{out} = -RCk$)
Escalón	Impulso (pico y vuelta a 0)
Senoidal	Cosenoidal (desfase 90° , amplitud $\times \omega RC$)

Integrador: $V_{out} = -\frac{1}{RC} \int V_{in} dt$

Entrada	Salida
Constante (V_0)	Rampa ($V_{out} = -V_0 t / RC$)
Rampa (kt)	Parábola
Senoidal	Cosenoidal (desfase -90° , amplitud $\div \omega RC$)

Ejercicio resuelto: Diferenciador con onda triangular Datos: $R = 10\text{ k}\Omega$, $C = 0.1\text{ }\mu\text{F}$.
Entrada: onda triangular con pendientes $\pm 2000\text{ V/s}$.

$$RC = 10 \times 10^3 \times 0.1 \times 10^{-6} = 1 \times 10^{-3} \text{ s}$$

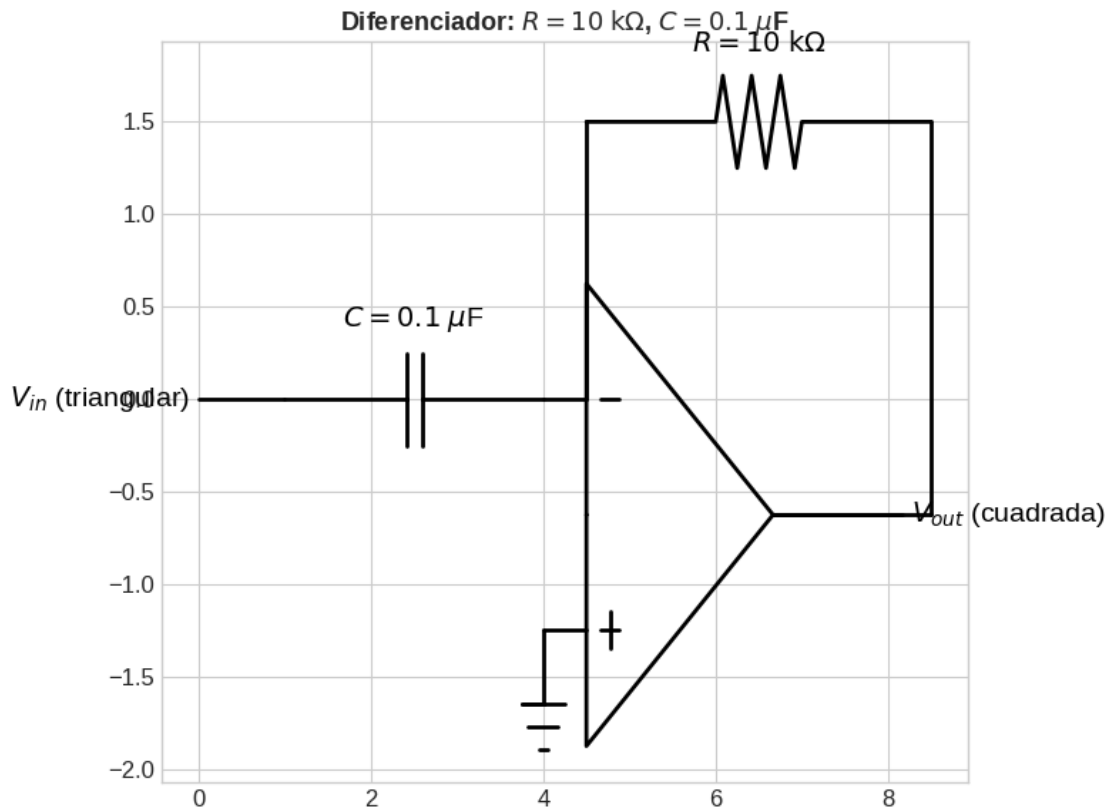
Rampa ascendente ($dV_{in}/dt = +2000 \text{ V/s}$):

$$V_{out} = -RC \times 2000 = -10^{-3} \times 2000 = -2 \text{ V}$$

Rampa descendente ($dV_{in}/dt = -2000 \text{ V/s}$):

$$V_{out} = -RC \times (-2000) = +2 \text{ V}$$

Resultado: La salida es una **onda cuadrada** de $\pm 2 \text{ V}$.



3.6.6 12.6 Tipo 7: Amplificadores en cascada

$$A_{v_{total}} = A_{v_1} \cdot A_{v_2} \cdot A_{v_3} \cdots$$

En decibelios:

$$A_{v_{total}, \text{ dB}} = A_{v_{1\text{dB}}} + A_{v_{2\text{dB}}} + A_{v_{3\text{dB}}} + \cdots$$

Clave: Se multiplican las ganancias lineales o se suman los dB.

Ejercicio resuelto: Cascada de dos etapas Datos: Etapa 1: inversor con $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$. Etapa 2: no inversor con $R_1 = 5 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 15 \text{ k}\Omega$. $V_{in} = 0.05 \text{ V}$.

Paso 1: Ganancia de cada etapa:

$$A_{v_1} = -\frac{100\text{k}}{10\text{k}} = -10$$

$$A_{v_2} = 1 + \frac{15\text{k}}{5\text{k}} = 4$$

Paso 2: Ganancia total:

$$A_{v_{total}} = A_{v_1} \cdot A_{v_2} = (-10) \times 4 = -40$$

Paso 3: Tensión de salida:

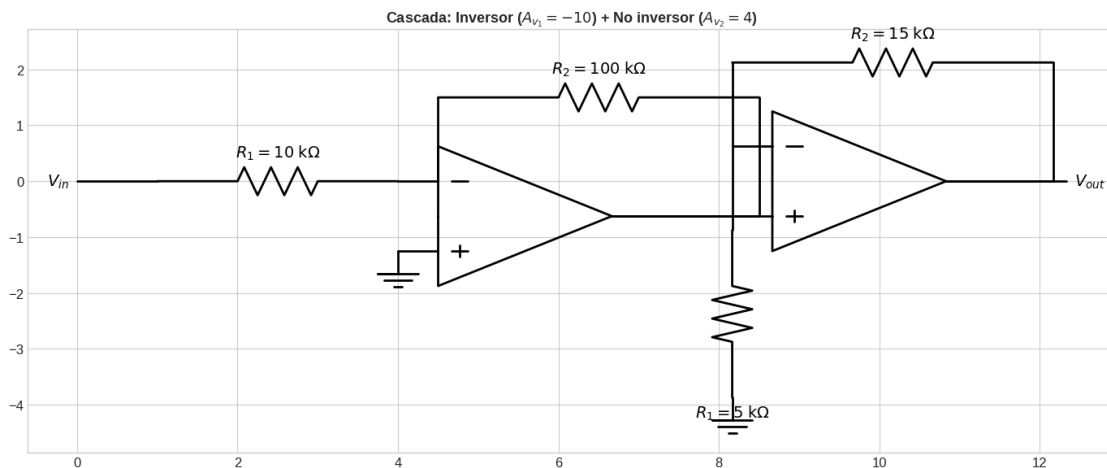
$$V_{out} = -40 \times 0.05 = -2 \text{ V}$$

En dB:

$$A_{v_1\text{dB}} = 20 \log_{10}(10) = 20 \text{ dB}$$

$$A_{v_2\text{dB}} = 20 \log_{10}(4) = 12.04 \text{ dB}$$

$$A_{v_{total\text{dB}}} = 20 + 12.04 = 32.04 \text{ dB}$$



3.6.7 12.7 Tipo 8: Identificar configuración desde un circuito

Método de identificación:

1. ¿Dónde entra la señal?

- En V^- (entrada inversora) $\rightarrow$ puede ser inversor, sumador, diferenciador, integrador
- En V^+ (entrada no inversora) $\rightarrow$ no inversor o seguidor

2. ¿Qué hay en la realimentación (entre salida y V^-)?
 - Resistencia $R_2 \rightarrow$ inversor o no inversor
 - Condensador $C \rightarrow$ integrador
 - Cable directo $\rightarrow$ seguidor
3. ¿Qué hay en la entrada?
 - Resistencia $R_1 \rightarrow$ inversor/no inversor estándar
 - Condensador $C \rightarrow$ diferenciador
 - Múltiples resistencias $\rightarrow$ sumador
4. ¿La realimentación va a V^+ ?
 - Sí $\rightarrow$ **Schmitt trigger** (realimentación positiva)

3.6.8 12.8 Tipo 9: Diseño - Elegir R_1 y R_2 para una ganancia deseada

Método general:

1. Determinar la ganancia requerida A_v
2. Elegir una configuración (inversor si se necesita inversión, no inversor si no)
3. Fijar una resistencia (típicamente $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$)
4. Calcular la otra: $R_2 = |A_v| \cdot R_1$ (inversor) o $R_2 = (A_v - 1) \cdot R_1$ (no inversor)

Restricciones prácticas: - Resistencias entre $1 \text{ k}\Omega$ y $1 \text{ M}\Omega$ - Valores de la serie E12 o E24

Ejercicio resuelto: Diseño de amplificador **Objetivo:** Diseñar un amplificador con $A_v = +20$ usando un OPAM.

Paso 1: $A_v > 0$ y $A_v > 1 \rightarrow$ usar configuración **no inversora**.

Paso 2: Fórmula: $A_v = 1 + R_2/R_1$

$$20 = 1 + \frac{R_2}{R_1} \implies \frac{R_2}{R_1} = 19$$

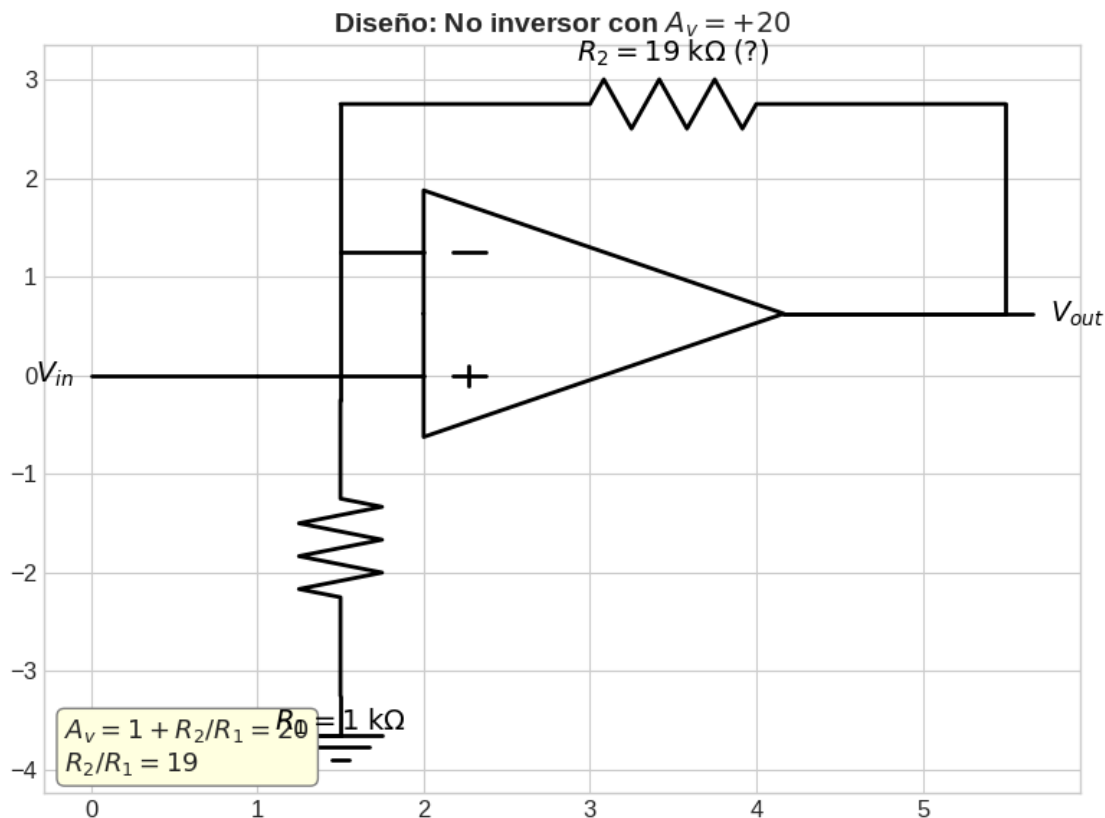
Paso 3: Fijar $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$:

$$R_2 = 19 \times 1 \text{ k}\Omega = 19 \text{ k}\Omega$$

Valor comercial más cercano (E24): $R_2 = 18 \text{ k}\Omega \rightarrow A_v = 1 + 18/1 = 19$ (error del 5%)

O $R_2 = 20 \text{ k}\Omega \rightarrow A_v = 1 + 20/1 = 21$ (error del 5%)

Alternativa: $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 190 \text{ k}\Omega$ (valor E24 exacto existe).



3.6.9 12.9 Tipo 10: Trigger de Schmitt - Calcular umbrales

$$V_{T+} = V_{cc} \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

$$V_{T-} = -V_{cc} \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

$$\Delta V = 2V_{cc} \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad (\text{alimentación simétrica})$$

Clave: La histéresis depende del cociente R_1/R_2 . A mayor R_1/R_2 , mayor histéresis.

Ejercicio resuelto: Diseño de Schmitt **Objetivo:** Diseñar un trigger de Schmitt con $\Delta V = 4$ V usando $V_{cc} = \pm 10$ V.

Paso 1: De la fórmula de histéresis:

$$4 = 2 \times 10 \times \frac{R_1}{R_2} \implies \frac{R_1}{R_2} = 0.2$$

Paso 2: Elegir $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$:

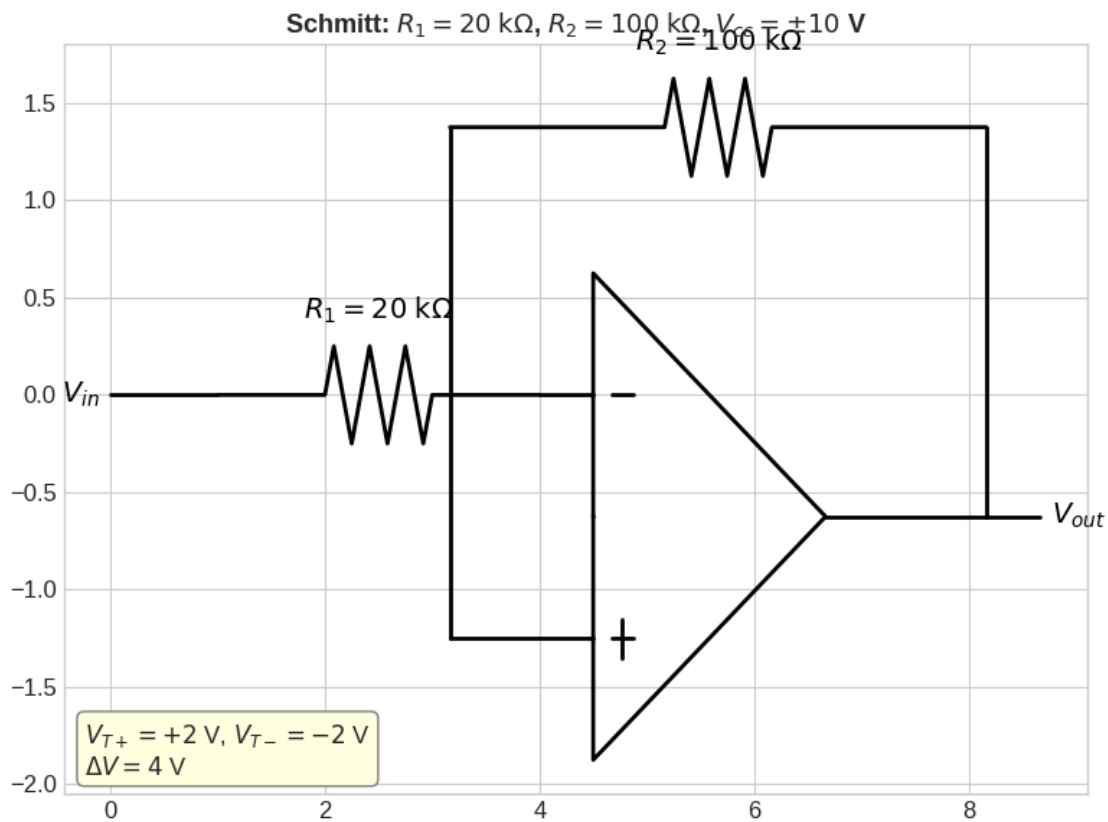
$$R_1 = 0.2 \times 100 \text{ k}\Omega = 20 \text{ k}\Omega$$

Paso 3: Verificar umbrales:

$$V_{T+} = 10 \times \frac{20k}{100k} = 2 \text{ V}$$

$$V_{T-} = -10 \times \frac{20k}{100k} = -2 \text{ V}$$

$$\Delta V = 2 - (-2) = 4 \text{ V} \checkmark$$



3.6.10 12.10 Tipo 11: OPAM real - Calcular ancho de banda

$$B = \frac{GBW}{A_v}$$

Clave: A mayor ganancia, menor ancho de banda. El GBW es una constante del OPAM (se obtiene del *datasheet*).

Ejercicio resuelto: Ancho de banda con GBW Datos: OPAM con $GBW = 4 \text{ MHz}$. Se configura como no inversor con $A_v = 50$.

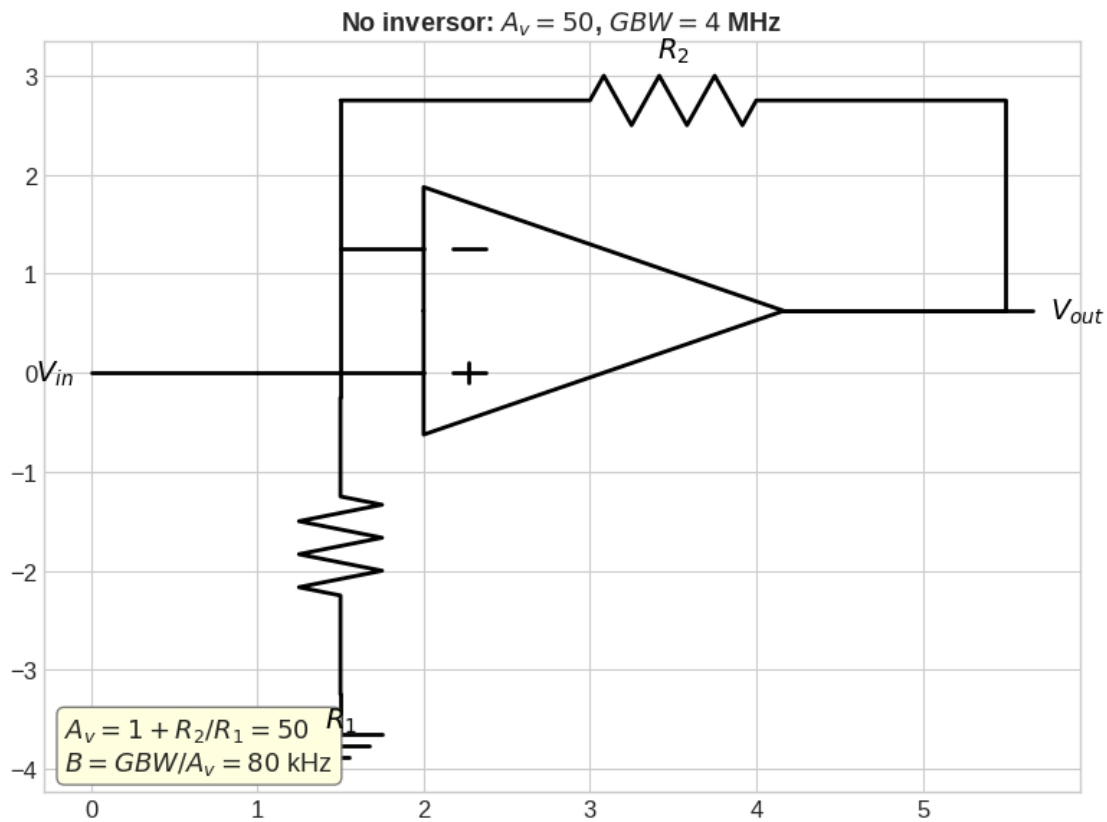
Paso 1: Calcular el ancho de banda:

$$B = \frac{GBW}{A_v} = \frac{4 \times 10^6}{50} = 80 \text{ kHz}$$

Paso 2: Si se necesita $B \geq 200 \text{ kHz}$, ¿cuál es la ganancia máxima?

$$A_{v_{\max}} = \frac{GBW}{B} = \frac{4 \times 10^6}{200 \times 10^3} = 20$$

Conclusión: Con este OPAM no se puede tener simultáneamente $A_v = 50$ y $B = 200 \text{ kHz}$. Opciones: usar un OPAM con mayor GBW o reducir la ganancia.



3.6.11 12.11 Tipo 12: OPAM real - Slew rate y frecuencia máxima

$$f_{\max} = \frac{SR}{2\pi \cdot V_A}$$

Clave: El slew rate limita la frecuencia máxima para señales de **gran amplitud**. Es independiente de la ganancia.

Ejercicio resuelto: Frecuencia máxima por slew rate Datos: $SR = 13 \text{ V}/\mu\text{s}$, $V_A = 10 \text{ V}$ (amplitud de la salida)

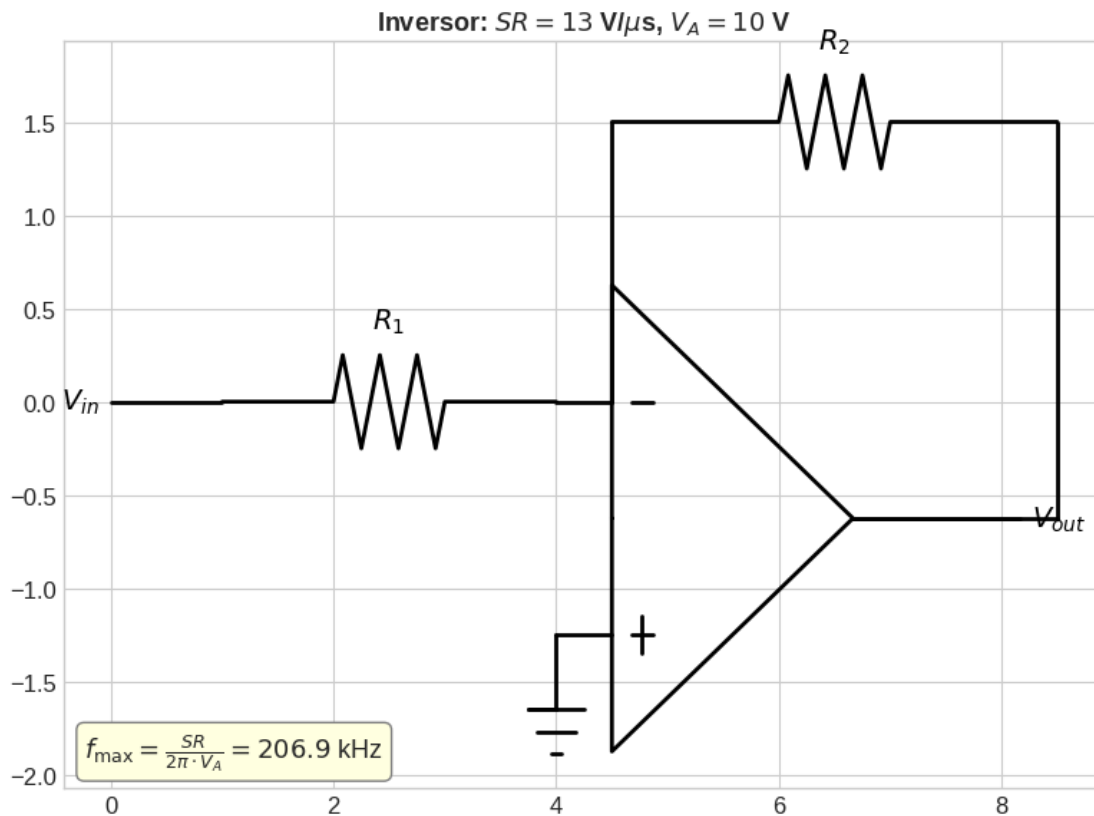
Paso 1: Calcular $f_{\max}$:

$$f_{\max} = \frac{SR}{2\pi \cdot V_A} = \frac{13 \times 10^6}{2\pi \times 10} = \frac{13 \times 10^6}{62.83} = 206.9 \text{ kHz}$$

Paso 2: Si la señal es de $f = 100 \text{ kHz}$, ¿cuál es la amplitud máxima?

$$V_{A_{\max}} = \frac{SR}{2\pi f} = \frac{13 \times 10^6}{2\pi \times 100 \times 10^3} = 20.7 \text{ V}$$

Paso 3: Verificar: ¿Puede el OPAM dar $V_A = 20.7 \text{ V}$? Solo si $V_{cc} > 20.7 \text{ V}$.



3.7 13. Tabla resumen de fórmulas clave

3.7.1 Amplificación (Tema 6)

Fórmula	Descripción
$A_v = V_o/V_i$	Ganancia de tensión
$A_i = I_o/I_i$	Ganancia de corriente
$A_p = A_v \cdot A_i$	Ganancia de potencia
$A_{v_{dB}} = 20 \log_{10}(A_v)$	Ganancia en decibelios
$A_v = A_{vo} \cdot \frac{R_L}{R_o + R_L} \cdot \frac{R_i}{R_s + R_i}$	Amplificador de tensión con fuente y carga
$ A_v = A' / \sqrt{1 + (\omega_T/\omega)^2}$	Efecto condensador serie (paso alto)
$ A_v = A' / \sqrt{1 + (\omega/\omega_T)^2}$	Efecto condensador paralelo (paso bajo)

3.7.2 Amplificador Operacional (Tema 7)

Fórmula	Configuración
$V_{out} = A_d(V^+ - V^-)$	Amplificador diferencial
$CMRR = A_d/A_c$	Rechazo al modo común
$V_{out} = -(R_2/R_1)V_{in}$	Inversor
$V_{out} = (1 + R_2/R_1)V_{in}$	No inversor
$V_{out} = V_{in}$	Seguidor
$V_{out} = -R_f(\sum V_k/R_k)$	Sumador inversor
$V_{out} = -RC \cdot dV_{in}/dt$	Diferenciador
$V_{out} = -(1/RC) \int V_{in} dt$	Integrador
$V_{T\pm} = \pm V_{cc} \cdot R_1/R_2$	Schmitt trigger
$B = GBW/A_v$	Ancho de banda (OPAM real)
$f_{max} = SR/(2\pi V_A)$	Frecuencia máxima (slew rate)

3.7.3 Reglas de oro del OPAM ideal (con realimentación negativa)

Regla	Expresión	Significado
No entra corriente	$I^+ = I^- = 0$	Impedancia de entrada infinita
Tierra virtual	$V^+ = V^-$	La diferencia de tensión entre entradas es cero