

Universidad Central de Venezuela
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Eléctrica

Prelaboratorio N° 6: Aplicaciones lineales del Amplificador Operacional

Emerson Warhman
C.I. 25.795.480
17 de febrero de 2025

Índice

1. Objetivos

Objetivo General

- Reconocer las ventajas del uso del concepto de amplificadores operacionales en el diseño e implementación de sistemas analógicos.

Objetivos Específicos

- Conocer las desviaciones de las implementaciones comerciales del amplificador operacional ideal.
- Reconocer las ventajas del uso de amplificadores operacionales en sistemas de procesamiento de señal, en comparación con sistemas implementados con componentes discretos

2. Marco Teórico

2.1. Realimentación en un amplificador

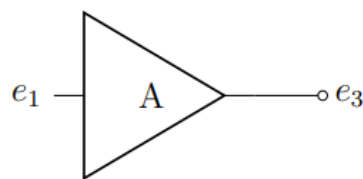
Los primeros amplificadores operacionales fueron implementados con tubos de vacío, en computadores analógicos para resolver operaciones matemáticas complejas, combinando la ganancia y la realimentación negativa.

En 1968 se introdujo el $\mu A741$, como el primer amplificador estándar en la industria electrónica.

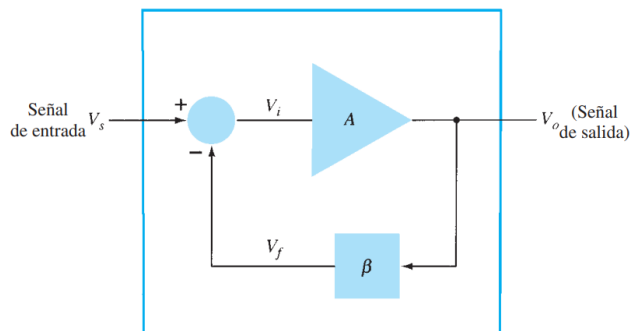
Un amplificador es un dispositivo que tiene dos puertos de entrada, llamados puerto inversor y puerto no inversor, y una salida que es proporcional al valor de la entrada por una ganancia.

Un amplificador $\mu 741$ tiene una ganancia típica de $200V/mV$, o $106dB$. Sin embargo, esta ganancia se sostiene en un pequeño ancho de banda cuando el amplificador no está realimentado.

Suponga que tenemos un amplificador con ganancia A , como se observa en la ilustración ??.



[ht]



[ht]

Y este amplificador se realimenta con una red de ganancia β como se muestra en la ilustración ??. Entonces podemos definir el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned}v_o &= e_1 \cdot A \\e_1 &= v_i + \beta v_o \\e_o &= v_o\end{aligned}$$

Resolviendo este sistema de ecuaciones, encontramos la siguiente función de transferencia:

$$A_{fb} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{A}{1 - \beta A} \quad (1)$$

De esta ecuación podemos definir cinco zonas:

Realimentación negativa o degenerativa: $\beta A < 0$
Realimentación positiva o regenerativa: $0 < \beta A < 1$
Realimentación nula: $\beta A = 0$
Oscilación: $\beta A = 1$
Inestabilidad: $\beta A > 1$

2.2. Método del amplificador desvanecido (MAD)

El método aprovecha las características reales del amplificador operacional para desvanecer los elementos no lineales, de manera que el problema se reduce a resolver un sistema compuesto de elementos pasivos.

Supongamos que tenemos un sistema que está realimentado, entonces encontramos el lazo de realimentación que contiene al amplificador principal, y encontramos los siguientes parámetros, para resolver la ecuación de la ganancia.

$$\begin{aligned} x_{io} &= \left. \frac{v_o}{v_i} \right|_{A=0} \\ x_{i1} &= \left. \frac{e_1}{v_i} \right|_{A=0} \\ x_{3o} &= \left. \frac{v_o}{e_3} \right|_{v_i=0} \\ x_{31} &= \left. \frac{e_1}{e_3} \right|_{v_i=0} \end{aligned}$$

donde

- x_{io} es la ganancia vista desde la entrada v_i hasta v_o con el amplificador desvanecido.
- x_{i1} es la ganancia vista desde la entrada v_i hasta e_1 con el amplificador desvanecido.
- x_{3o} es la ganancia vista desde la salida del amplificador desvanecido e_3 hasta v_o con la entrada en cortocircuito.
- x_{31} es la ganancia vista desde la salida del amplificador desvanecido e_3 hasta e_1 con la entrada en cortocircuito.

Una vez obtenidos estos parámetros, se resuelve la siguiente ecuación:

$$A_{fb} = \frac{v_o}{v_i} = x_{io} + \frac{x_{i1} \cdot A \cdot x_{3o}}{1 - A \cdot x_{31}} \quad (2)$$

Donde A es la ganancia del amplificador desvanecido.

2.3. Teorema de Blackman

Esta fórmula fue desarrollada por Harold Blackman en 1943 con el objetivo de estudiar el efecto que tiene la realimentación sobre la impedancia de un sistema. La fórmula es la siguiente:

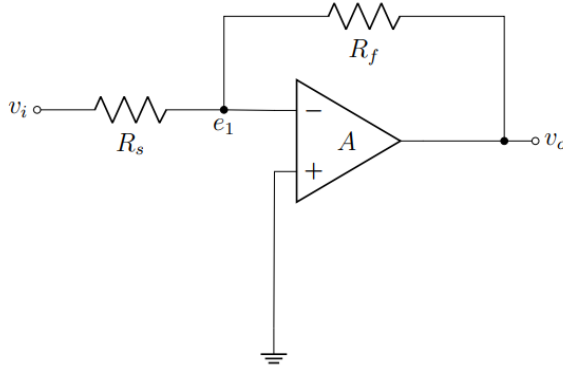
$$Z_{aa'} = Z_a \cdot \frac{1 - x_{31cc}A}{1 - x_{31ca}A} \quad (3)$$

Donde,

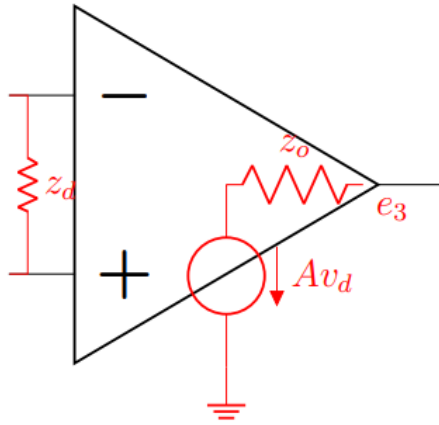
- Z_a es la impedancia vista desde los terminales de estudio con el amplificador desvanecido.
- x_{31cc} es la ganancia del lazo de realimentación con los terminales de estudio (aa') en cortocircuito.
- x_{31ca} es la ganancia del lazo de realimentación con los terminales de estudio (aa') en circuito abierto.
- $Z_{aa'}$ es la impedancia del sistema realimentado, vista desde los terminales aa'.

2.4. Amplificador Inversor

El amplificador inversor constituye una de las aplicaciones básicas y fundamentales de los amplificadores operacionales. Este amplificador se puede observar en la ilustración ??, donde se observa un amplificador base, el cual tiene una impedancia de entrada Z_d , una impedancia de salida Z_o y una ganancia A , tal como se observa en la ilustración ??.



[ht]



[ht]

Aplicando el Método de Amplificador Desvanecido al amplificador inversor, tomando en cuenta los modelos de las ilustraciones 2.2 y 2.3, se tiene

$$\begin{aligned}
 x_{i0} &= \left. \frac{v_o}{v_i} \right|_{A=0} = \frac{(R_f + z_o) \parallel z_d}{R_s + (R_f + z_o) \parallel z_d} \cdot \frac{z_o}{z_o + R_f} \\
 x_{i1} &= \left. \frac{e_1}{v_i} \right|_{A=0} = \frac{(R_f + z_o) \parallel z_d}{R_s + (R_f + z_o) \parallel z_d} \\
 x_{3o} &= \left. \frac{v_o}{e_3} \right|_{v_i=0} = \frac{R_f + R_s \parallel z_d}{z_o + R_f + R_s \parallel z_d} \\
 x_{31} &= \left. \frac{e_1}{e_3} \right|_{v_i=0} = \frac{R_s \parallel z_d}{z_o + R_f + R_s \parallel z_d}
 \end{aligned}$$

Ahora, aproximando la impedancia de entrada y salida $Z_d \rightarrow \infty$ y $z_o \rightarrow 0$ entonces:

$$\begin{aligned}
 x_{i0} &= \left. \frac{v_o}{v_i} \right|_{A=0} = 0 \\
 x_{i1} &= \left. \frac{e_1}{v_i} \right|_{A=0} = -\frac{R_f}{R_s + R_f} \\
 x_{3o} &= \left. \frac{v_o}{e_3} \right|_{v_i=0} = 1 \\
 x_{31} &= \left. \frac{e_1}{e_3} \right|_{v_i=0} = -\frac{R_s}{R_f + R_s}
 \end{aligned}$$

Aplicando la fórmula MAD se tiene:

$$A_{fb} = 0 + \frac{-\frac{R_f}{R_s+R_f} \cdot A \cdot 1}{1 - \left(-\frac{R_s}{R_f+R_s}\right) A}$$

$$\boxed{A_{fb} = -\frac{R_f}{R_s}} \quad (4)$$

Por otro lado, la impedancia de entrada se busca utilizando el teorema de Blackman.

$$z_a = R_s \parallel z_d + R_f = R_s + R_f$$

$$x_{31cc} = -\frac{R_s \parallel z_d}{R_f + R_s \parallel z_d} = -\frac{R_s}{R_f + R_s}$$

$$x_{31ca} = -\frac{z_d}{z_d + R_f} \approx -1$$

Por lo tanto, aplicando la formula

$$z_{in} = (R_s + R_f) \cdot \frac{1 - \left(-\frac{R_s}{R_f+R_s}\right) A}{1 - (-1)A}$$

Tomando $A \rightarrow \infty$

$$\boxed{z_{in} = R_s} \quad (5)$$

Por último, también utilizamos la fórmula de blackman para encontrar la impedancia de salida.

$$z_a = r_o \parallel (R_f + R_s \parallel z_d) = r_o$$

$$x_{31cc} = 0$$

$$x_{31ca} = -\frac{R_s \parallel z_d}{R_f + R_s \parallel z_d} = -\frac{R_s}{R_f + R_s}$$

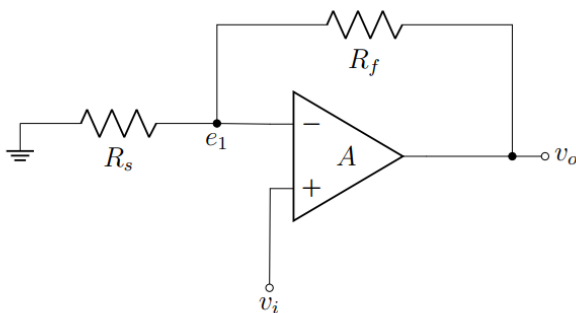
$$z_o = r_o \cdot \frac{1 - 0}{1 - \left(-\frac{R_s}{R_f+R_s}\right) A}$$

Lo cual se puede escribir como:

$$\boxed{z_o = \frac{r_o}{A / \left(1 + \frac{R_f}{R_s}\right)}} \quad (6)$$

2.5. Amplificador no inversor

Al igual que el amplificador inversor, este es uno de las topologías básicas de los amplificadores operacionales. Este amplificador se muestra en la ilustración ??, cuya diferencia radica en que la entrada ahora es directamente en el puerto no inversor.



[ht]

Aplicando el Método de Amplificador Desvanecido y aproximando la impedancia de entrada y salida $z_d \rightarrow \infty$ y $z_o \rightarrow 0$, entonces

$$\begin{aligned}
x_{i0} &= \left. \frac{v_o}{v_i} \right|_{A=0} = 0 \\
x_{i1} &= \left. \frac{e_1}{v_i} \right|_{A=0} = 1 \\
x_{3o} &= \left. \frac{v_o}{e_3} \right|_{v_i=0} = 1 \\
x_{31} &= \left. \frac{e_1}{e_3} \right|_{v_i=0} = -\frac{R_s}{R_f + R_s}
\end{aligned}$$

Por lo tanto, aplicando la fórmula de MAD

$$A_{fb} = 0 + \frac{1 \cdot A \cdot 1}{1 - \left(-\frac{R_s}{R_f + R_s} \right) A}$$

$$\boxed{A_{fb} = 1 + \frac{R_f}{R_s}} \quad (7)$$

Por otro lado, la impedancia de entrada se busca utilizando el Teorema de Blackman.

$$\begin{aligned}
z_a &= z_d + R_s \parallel R_f = z_d \\
x_{31cc} &= \frac{-R_s \parallel z_d}{R_f + R_s \parallel z_d} = \frac{-R_s}{R_f + R_s} \\
x_{31ca} &= 0
\end{aligned}$$

Donde este último es nulo debido que al abrir el circuito no pasa corriente por z_d , por consiguiente no habrá tensión.

$$z_{in} = z_d \cdot \frac{1 - \left(\frac{-R_s}{R_f + R_s} \right) A}{1 - 0 \cdot A}$$

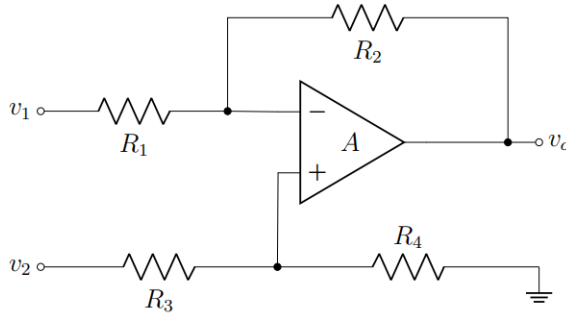
$$\boxed{z_{in} = z_d \cdot \frac{A}{1 + \frac{R_f}{R_s}}} \quad (8)$$

Por último, calculamos la impedancia de salida, la cual será igual a la impedancia de salida del amplificador inversor.

$$\boxed{z_o = \frac{r_o}{A / \left(1 + \frac{R_f}{R_s} \right)}} \quad (9)$$

2.6. Amplificador en diferencia o restador

La siguiente aplicación corresponde al amplificador en diferencia, el cual tiene una salida y dos entradas, una aplicada a la entrada inversora y otra a la entrada no inversora. La salida es una combinación lineal de las entradas. Por otro lado las resistencias vistas desde sus entradas son finitas y diferentes la una de la otra. Si las fuentes de entrada son diferentes, entonces se producirá un efecto de carga distinto debido a la diferencia entre estas impedancias.



[ht]

El amplificador en diferencia es un circuito que responde sólo al componente en modo diferencial, rechazando el componente en modo común.

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1}v_1 + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)v_2$$

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1}v_1 + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1}\right)v_2$$

Para este caso particular, si $R_1 = R_4$ y $R_2 = R_3$, entonces se puede simplificar

$$\boxed{v_o = \frac{R_2}{R_1}(v_2 - v_1)} \quad (10)$$

Sin embargo, existe una diferencia entre las impedancias de entrada.

$$z_{in1} = R_1$$

$$z_{in2} = R_3 + R_4 = R_1 + R_2$$

Un amplificador en diferencia será insensible a la tensión en modo común, a medida que el amplificador sea ideal y que las resistencias cumplan la condición de puente balanceado.

2.7. Amplificador integrador

Si se sustituye la resistencia de realimentación R_f por un condensador en un amplificador inversor, entonces tendremos un integrador. Se puede demostrar que la función de transferencia es

$$\frac{v_o}{v_i} = -\frac{1}{sRC}$$

Si se apaga la tensión v_i en el integrador, este estará influenciado solo por la acción de la tensión y la corriente de offset. Estudiando sólo la tensión de offset, se tiene que el voltaje de salida es:

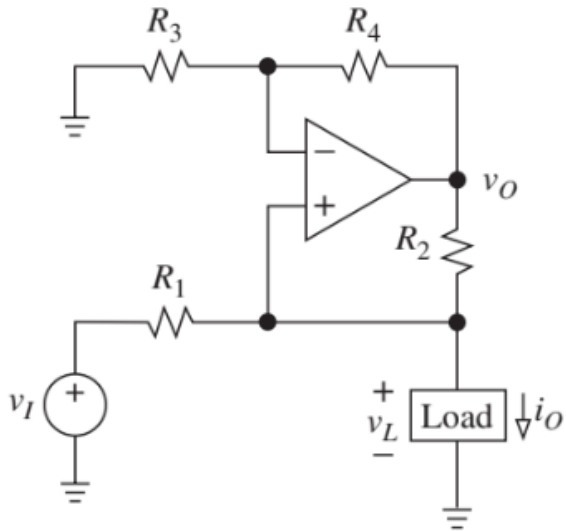
$$v_o = v_{os} + \frac{t}{RC}v_{os}$$

Por lo tanto, se puede observar que la tensión de salida crecerá hasta que se sature el amplificador. Un comportamiento similar ocurre por la acción de las corrientes de bias.

$$v_o = -I_{b2}R + \left(I_{b1} - \frac{I_{b2}R}{R}\right) \frac{t}{C}$$

2.8. Convertidor de tensión a corriente

El circuito consiste en una fuente de entrada V_i con una resistencia en serie R_1 , y un convertidor de resistencia negativa que sintetiza una resistencia a tierra de valor $-R_2R_3/R_4$ como en la ilustración ??.



Podemos simplificar el circuito aplicando Blackman tomando parte del circuito cómo un amplificador no inversor:

$$z = z_a \cdot \frac{1 - X_{3icc}A}{1 - X_{3ica}A}$$

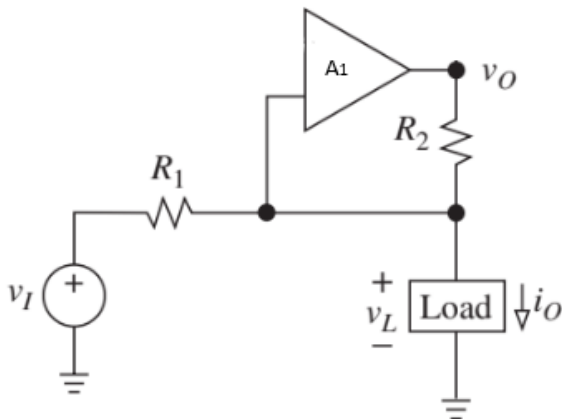
$$z_a = R_1 \parallel R_2$$

$$X_{3icc}Q = \left. \frac{e_1}{e_3} \right|_{v_a=0}$$

al utilizar la formula de MAD, obtenemos la ganancia:

$$A_1 = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (11)$$

Podemos aproximar la impedancia de entrada y salida $Z_d \rightarrow \infty$ y $z_o \rightarrow 0$ y obtener el nuevo circuito simplificado de la ilustración ??.



[ht]

Aplicando nuevamente Blackman en el circuito simplificado:

$$X_{31ca} = \left. \frac{e_1}{e_3} \right|_{I_a=0} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$z_o = R_1 \parallel R_2 \left(\frac{1 - 0A}{1 - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right)} \right)$$

$$z_o = \frac{R_1 R_2 / R_1 + R_2}{\frac{R_3(R_1 + R_2) - R_1(R_3 + R_4)}{(R_1 + R_2)R_3}}$$

resultando en:

$$z_o = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_2 R_3 - R_1 R_4} \quad (12)$$

para que $Z_o \rightarrow \infty$ el denominador debe ser igual a 0:

$$R_2 R_3 - R_1 R_4 = 0$$

$$R_2 R_3 = R_1 R_4$$

por lo que

$$\boxed{R_1 = R_3} \quad (13)$$

$$\boxed{R_2 = R_4} \quad (14)$$

Cuando se cumple esta condición, la salida se vuelve independiente de V_i :

$$\boxed{i_o = \frac{1}{R_1} V_i} \quad (15)$$

Dado que $V_L = V_o \frac{R_3}{R_3 + R_4} = V_o \frac{R_1}{R_1 + R_2}$, el máximo voltaje de salida para actuar en la zona lineal es, asumiendo una saturación de salida simétrica,

$$|V_L| \leq \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{sat} \quad (16)$$

Para el proposito de extender el rango de linealidad, es deseable mantener R_2 suficientemente pequeño en comparación con R_1 (por ejemplo, $R_2 \approx 0,1R_1$).

2.9. Integrador no inversor (Integrador de Deboo)

El integrador de Deboo usa una fuente de corriente de Howland, sustituyendo la carga por una capacitancia para obtener un integrador no inversor. El circuito de la ilustración ?? es la representación de un integrador de Deboo.

Cómo sabemos, la fuente de corriente fuerza una corriente $i = \frac{v_i}{R}$ en la capacitancia, resultando en un voltaje de entrada no inversor:

$$v_p = \frac{1}{s2C} i = \frac{i - i}{sRC}$$

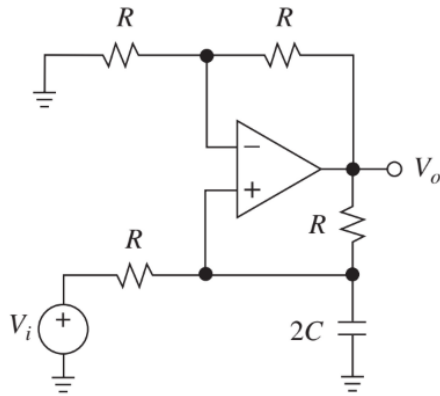
Luego, el amplificador operacional amplifica este voltaje de manera que:

$$v_o = \frac{1 + R}{R} v_p$$

$$v_o = \frac{v_i}{sRC}$$

Por lo que la función de transferencia es:

$$H(s) = \frac{1}{sRC} \quad (17)$$



[ht]

3. Trabajo de preparación

1. A partir del circuito de la figura ?? determinar las conexiones necesarias para obtener un:
 - Amplificador inversor.
 - Amplificador no inversor.
 - Amplificador restador.
 - Convertidor de tensión a corriente.
 - Circuito integrador no inversor (Integrador de Boo).
2. Escoger los valores de las resistencias para obtener un restador de ganancia 2, un inversor de ganancia -2, un amplificador no inversor. Para el integrador utilice un condensador de poliéster de $10nF$.

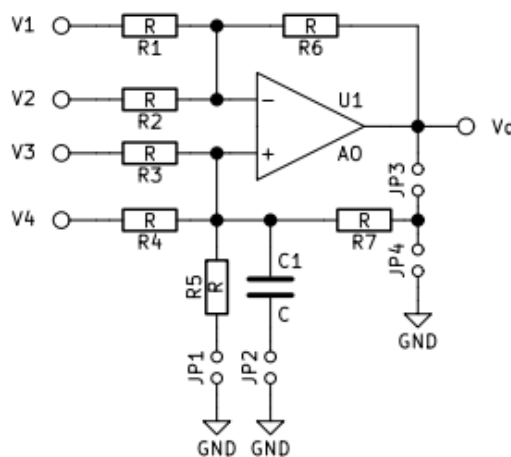


Figura 1: Topologías básicas

3.0.1. Amplificador inversor

Para construir un inversor a partir de la topología base, se realizarán las siguientes conexiones:

- a fuente: v_1
- a tierra: JP1
- abierto: 2, 3, 4, 2, 3, 4

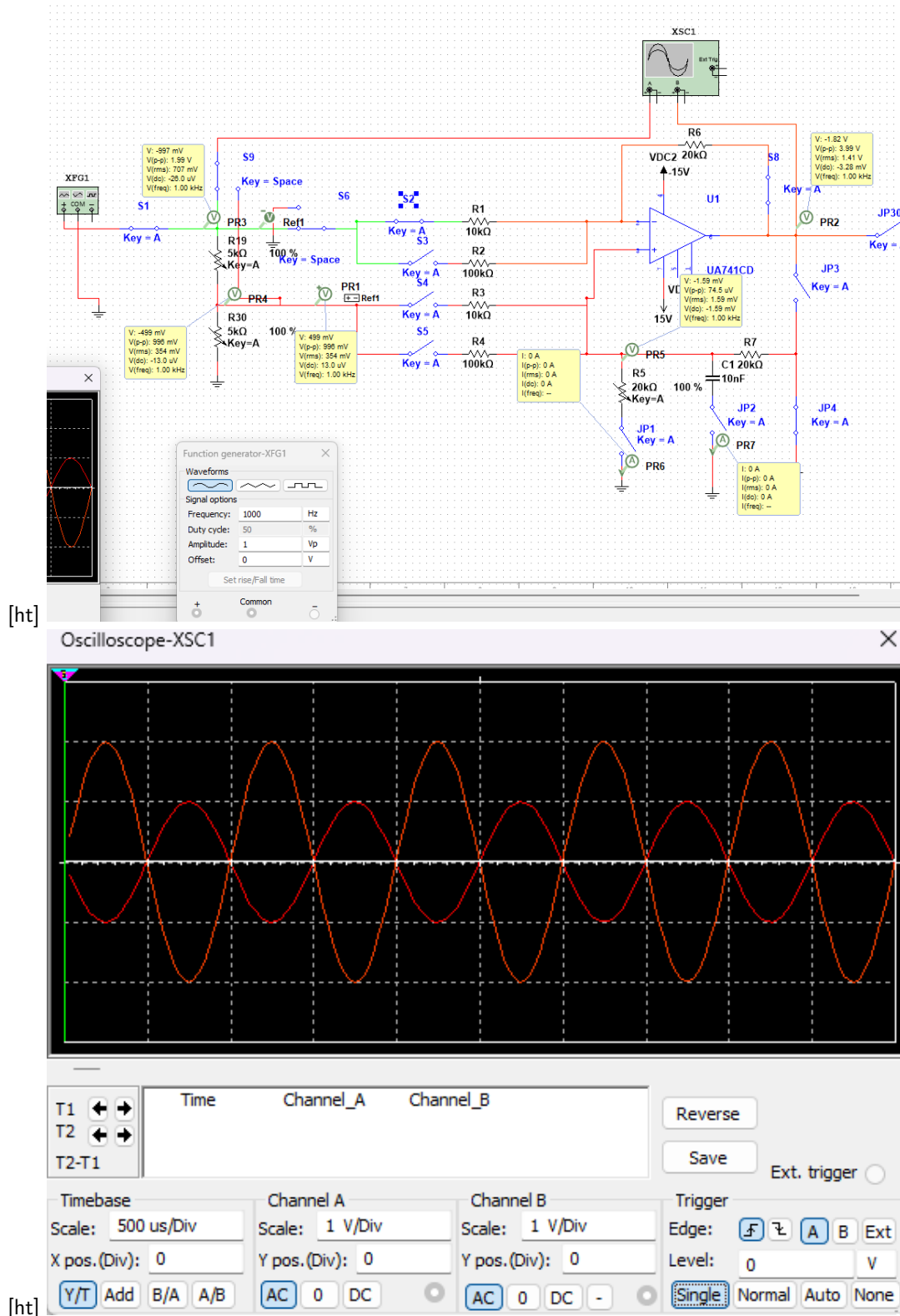
Para que la ganancia sea -2 , debemos usar la formula ??, y seleccionar una resistencia R_1 cualquiera, en este caso se escoge $R_1 = 10k\Omega$, por lo que:

$$r_6 = -A \cdot R_1$$

$$r_6 = -(-2) \cdot 10k\Omega$$

$$r_6 = 20k\Omega$$

En la ilustración ?? podemos observar la simulación del amplificador no inversor, y en la ilustración ?? podemos ver que la ganancia es -2 , que corresponde con el valor teórico.



3.0.2. Amplificador restador

Para construir un restador a partir de la topología base, se realizarán las siguientes conexiones:

- a fuente: 1 y 3
- a tierra: 4
- abierto: 2, 4, 1, 2, 3

Utilizando las mismas resistencias r_1 y r_2 que en inversor y la condición de que $r_1 = r_3$ y $r_6 = r_7$, obtenemos:

$$R_3 = R_1 = 10k\Omega$$

$$R_7 = R_6 = 20k\Omega$$

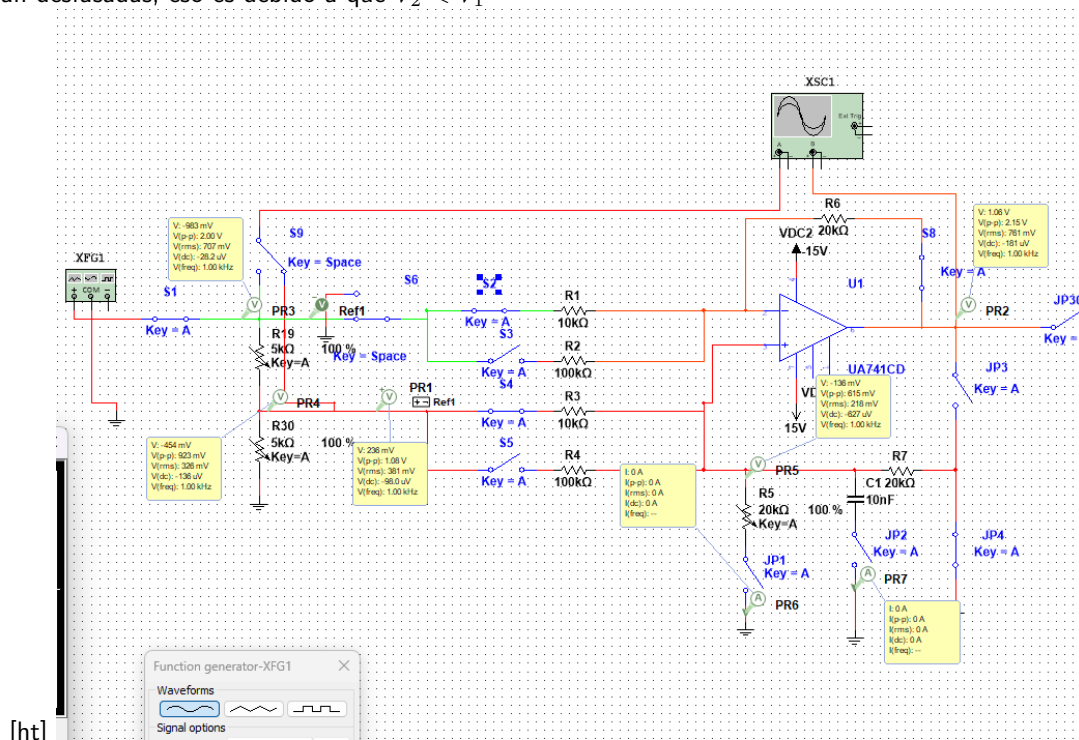
Ahora podemos utilizar la formula simplificada de ganancia del restador (??):

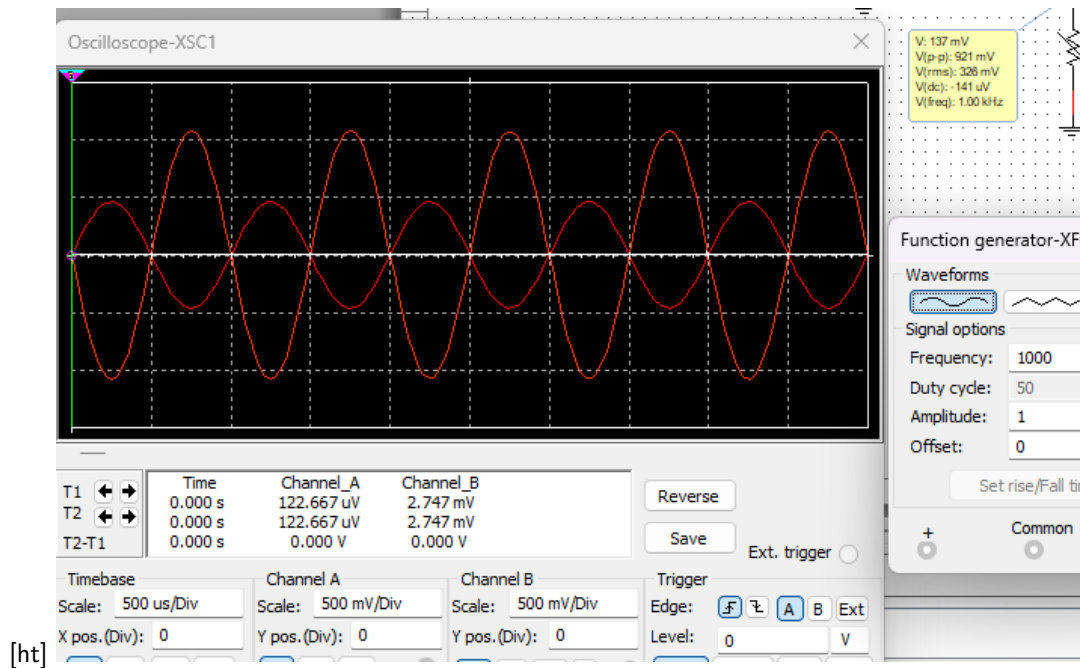
$$A = \frac{v_0}{v_2 - v_1}$$

$$A = \frac{R_6}{R_1} = 2$$

$$A = \frac{20k\Omega}{10k\Omega} = 2$$

En la ilustración ?? podemos observar la simulación del amplificador no inversor, y en la ilustración ?? podemos ver que la ganancia es 2, que corresponde con el valor teórico. Aunque pareciera que las señales de entrada y salida están desfasadas, eso es debido a que $V_2 < V_1$





3.0.3. Amplificador no inversor

Para construir un no inversor a partir de la topología base, se realizarán las siguientes conexiones:

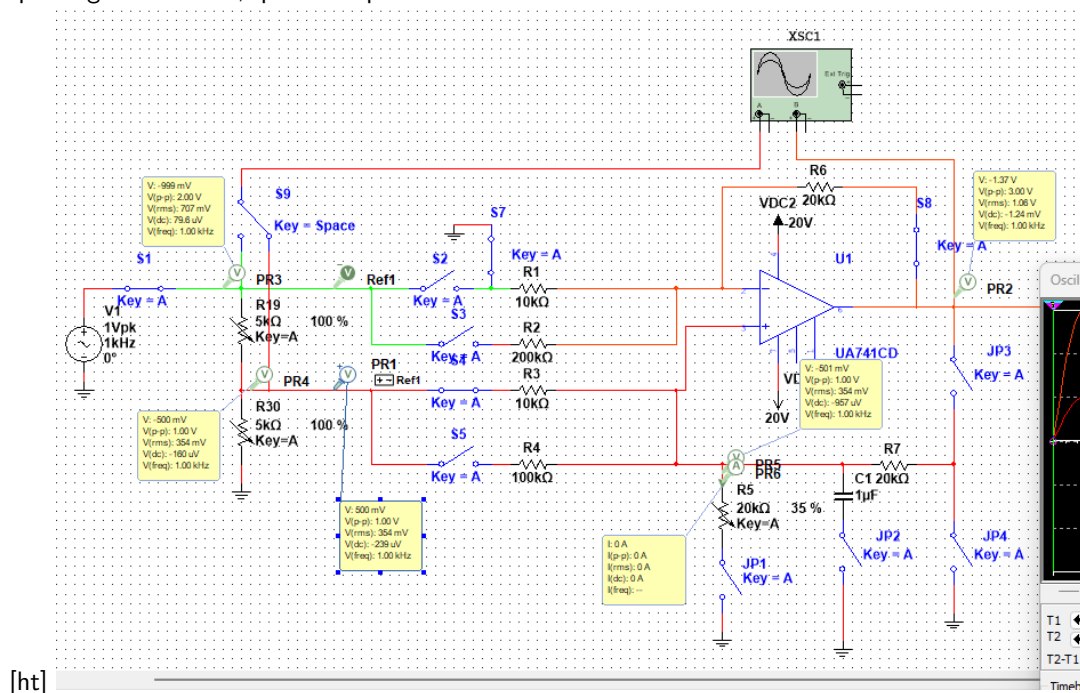
- a fuente: 3
- a tierra: 1
- abierto: 2, 4, 1, 2, 3, 4

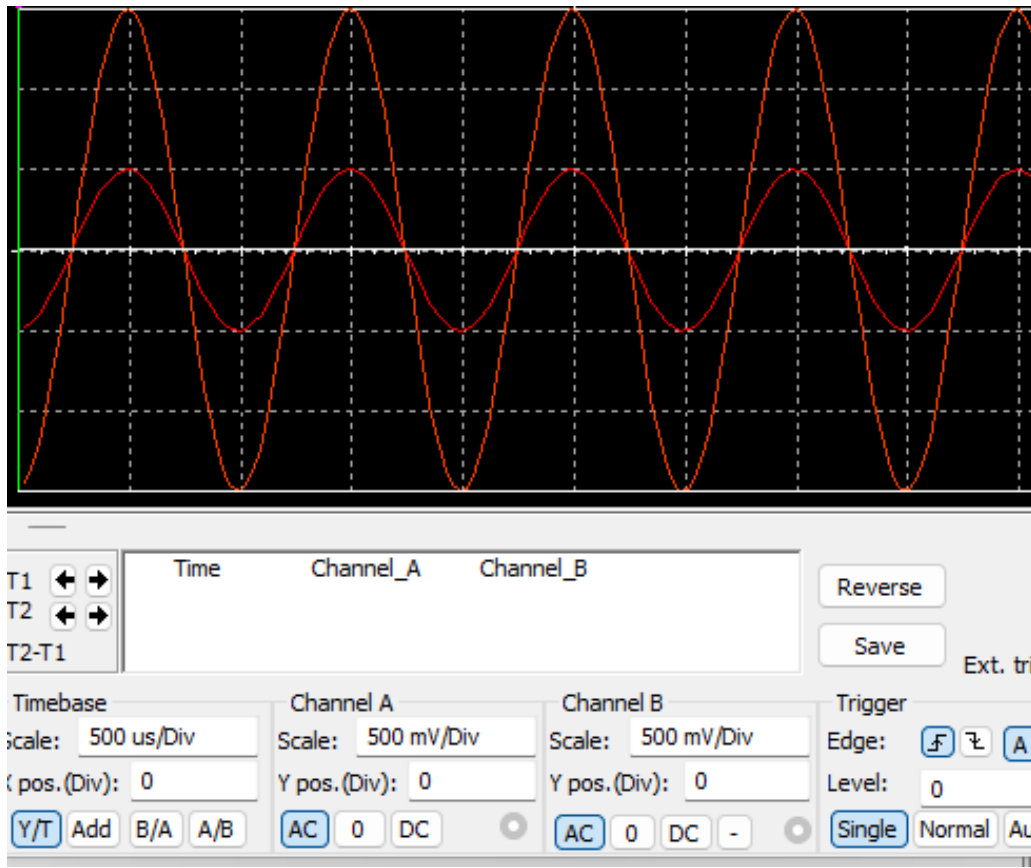
Siguiendo la formula de ganancia del no inversor (??), y utilizando las resistencias r_3 y r_6 utilizadas anteriormente, se obtiene:

$$A = 1 + \frac{r_3}{r_6}$$

$$A = 1 + \frac{20k\Omega}{10k\Omega} = 3$$

En la ilustración ?? podemos observar la simulación del amplificador no inversor, y en la ilustración ?? podemos ver que la ganancia es 3, que corresponde con el valor teórico.





[ht]

3.0.4. Fuente de corriente

Para construir un convertidor de tensión a corriente a partir de la topología base, se realizarán las siguientes conexiones:

- a fuente: 4
- a tierra: 2, 1
- abierto: 1, 3, 2, 4
- cerrado: 3

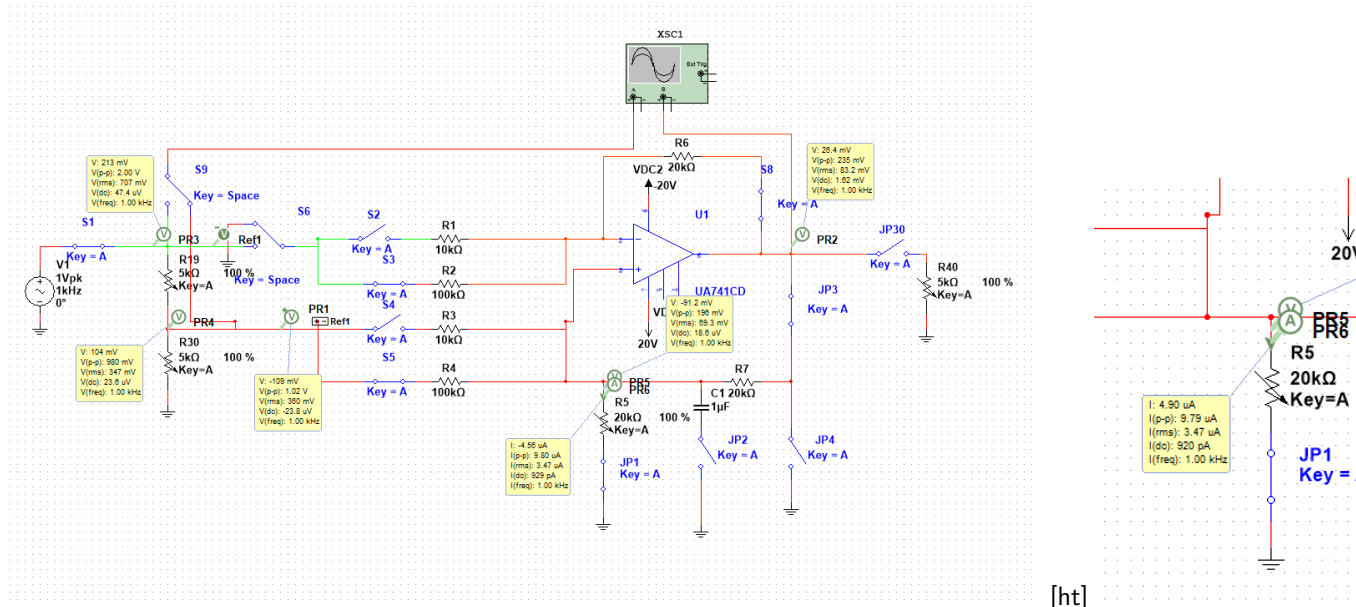
Para esta conexión se utilizarán las mismas resistencias $r_6 = r_7$ que con las conexiones anteriores, sin embargo, para aumentar la estabilidad de la salida, es necesario que $R_1 \gg R_7$, por ello, para las entradas 2 y 4 se escogerán las resistencias:

$$R_2 = R_4 = 100k\Omega$$

Ahora, utilizando la formula (??) y asumiendo un voltaje de entrada $v_i = 1V_p$ obtenemos:

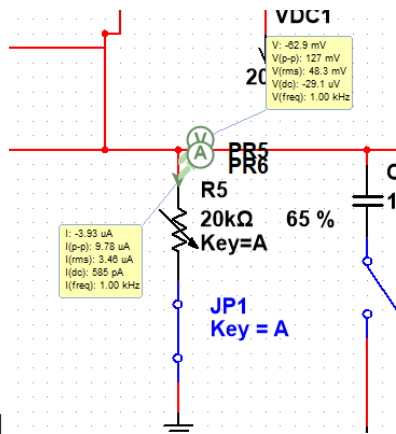
$$\begin{aligned} i_o &= \frac{v_i}{R_1} \\ i_o &= \frac{1V}{100k\Omega} \\ i_o &= 10\mu A \end{aligned}$$

En la ilustración ?? podemos observar el circuito de la fuente de corriente. Y en las siguientes ilustraciones podemos observar que para distintos valores de resistencias (20k, 16k, 5k y 1k) obtuvimos valores cercanos a $10\mu A$, que fue el valor esperado.

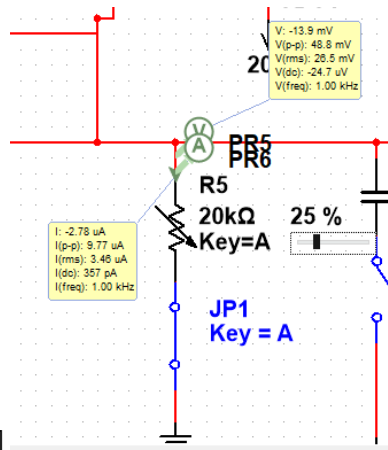


[ht]

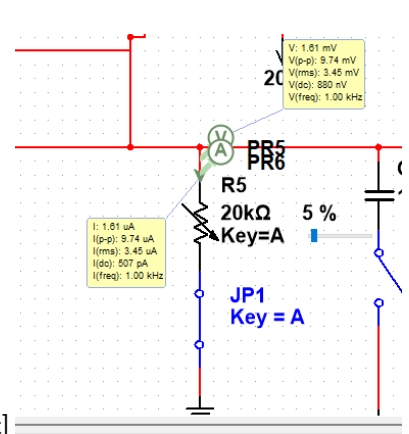
[ht]



[ht]



[ht]



[ht]

3.0.5. Integrador no inversor

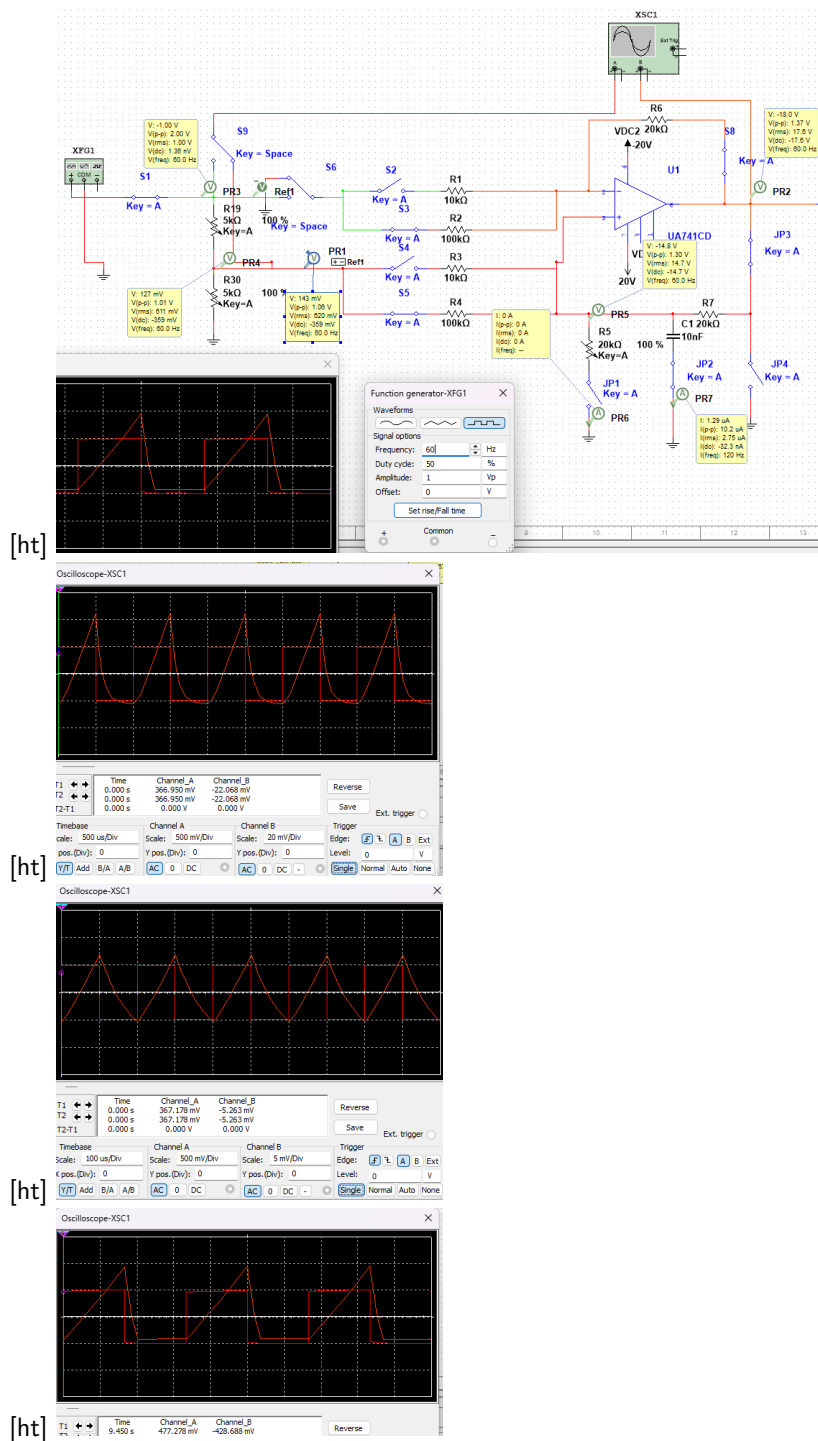
Para construir el integrador no inversor, simplemente sustituimos la carga R_5 por una capacitancia $C_1 = 10nF$ en la fuente de voltaje, las conexiones serán las siguientes:

- a fuente: 4
- a tierra: 2, 2
- abierto: 1, 3, 1, 4
- cerrado: 3

Este circuito debe integrar la señal de entrada. Si se la entrada es una señal cuadrada, la salida debe ser una señal triangular.

En la ilustración ?? podemos apreciar la conexión del circuito integrador.

En las siguientes ilustraciones podemos observar la como el circuito integra la señal de entrada, en este caso una señal cuadrada se transforma en una rampa. Las zonas donde la señal se curva es porque se encuentra en la zona de saturación.



4. Metodología

1. se monta el circuito de la ilustración ?? y se energiza con los voltajes V_{cc} y V_{ee} .
2. Se conecta un generador de señales senoidales y se le conecta un divisor de tensión para obtener dos salidas de voltaje con la misma fase.
3. se realiza la conexión del amplificador inversor y se realizan las mediciones de voltaje de entrada V_i y voltaje de salida V_o .
4. se repite el procedimiento anterior para las conexión del amplificador no inversor.
5. se realizan las conexiones del restador y se toman las medidas de voltaje de entrada V_1 y V_2 y de salida V_o .

6. se conecta la fuente de corriente con una resistencia R_5 inicial y se mide la tensión V_5 en dicha resistencia, luego se intercambia la resistencia R_5 por otras resistencias de otros valores y se vuelve a medir el voltaje cada vez.
7. se cambia el generador para entregar una señal cuadrada, y se realiza la conexión del integrador, conectando el osciloscopio a la salida se ajusta la frecuencia hasta obtener una señal triangular.