

Universidad Nacional de Córdoba
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Síntesis de Redes Activas
Trabajo Práctico N°2

Docentes:
Dr. Ing. Pablo Ferreyra
Ing. César Reale

Autores:
Matías Lucas Morales Robles
José Ignacio Torres
Esteban Samuel Suárez

Índice

1. Introducción	2
1.1. Objetivos	2
2. Sumador Inversor	3
2.1. Circuito	3
2.2. Requerimientos	3
3. Desarrollo	4
3.1. Ganancia Ideal	4
3.2. Errores en DC	4
3.2.1. Error de offset de tensión V_{os}	4
3.2.2. Error de corrientes de polarización I_{os}	4
3.2.3. Error por ganancia no infinita ($A_d < \infty$)	5
3.2.4. Error por RRMC no infinita ($RRMC < \infty$)	5
3.2.5. Errores en AC	5
3.2.6. Error Vectorial	5
3.2.7. Ancho de banda en pequeña señal	6
3.2.8. Ancho de banda en plena potencia	6
4. OPAMP LM324	7
5. Caso de estudio simulado: $R_i = 50 \Omega$	8
5.1. Gráfico de V_o en función de V_1	8
5.2. Errores DC	8
5.3. Errores AC	9
6. Caso de estudio simulado: $R_i = 100 k\Omega$	12
6.1. Gráfico de V_o en función de V_1	12
6.2. Errores DC	12
6.3. Errores AC	13
7. Caso de estudio medido físicamente: $R_i = 50 \Omega$	16
7.1. Gráfico de V_o en función de V_1	16
7.2. Errores DC	16
7.3. Errores AC	17
7.3.1. Slew Rate	17
7.3.2. Diagrama de Bode	18
8. Caso de estudio medido físicamente: $R_i = 100 k\Omega$	19
8.1. Gráfico de V_o en función de V_1	19
8.2. Errores DC	19
8.3. Errores AC	20
8.3.1. Slew Rate	20
8.3.2. Diagrama de Bode	21

1. Introducción

El presente trabajo tiene como objetivo analizar el funcionamiento de un amplificador real, considerando las diversas fuentes de error presentes en el mismo. Estas fuentes provocan desviaciones en la señal de salida, las cuales deben ser tenidas en cuenta para el diseño de un sistema robusto y confiable.

Los errores a considerar en el análisis se clasifican en dos grupos. En primer lugar, los errores en continua (DC):

- Error de offset de tensión (V_{os}).
- Error de corriente de polarización (I_{os}).
- Error debido a ganancia diferencial no infinita ($A_d < \infty$).
- Error por rechazo de modo común no infinito ($RRMC < \infty$).

En segundo lugar, los errores en alterna (AC):

- Error vectorial.
- Ancho de banda en pequeña señal.
- Ancho de banda en plena potencia.

Finalmente, se realizará un análisis teórico complementado con simulaciones, con el fin de corroborar los resultados obtenidos y evaluar el impacto de cada fuente de error en el comportamiento global del amplificador.

1.1. Objetivos

Los objetivos de este trabajo son los siguientes:

- Aplicar los conocimientos teóricos y prácticos para analizar los errores presentes en circuitos que emplean amplificadores operacionales.
- Identificar las limitaciones asociadas a la exactitud de la respuesta del amplificador utilizado.
- Fortalecer el manejo del simulador *Ltspice* e interpretar los resultados obtenidos, realizando las comparaciones correspondientes con los resultados teóricos.

2. Sumador Inversor

2.1. Circuito

A continuación se muestra una imagen representativa del circuito correspondiente:

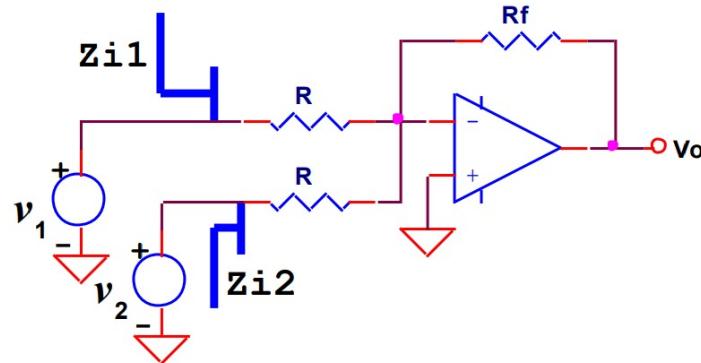


Figura 1: Circuito sumador inversor

2.2. Requerimientos

Para el desarrollo del trabajo se deberá emplear el circuito propuesto, utilizando el amplificador operacional *LM324*. El mismo deberá cumplir con las siguientes especificaciones:

- $V_{CC} = 10 \text{ V}$ y $V_{SS} = -10 \text{ V}$.
- $A_{vv1} = 30$ y $A_{vv2} = 30$.
- $R_i \ll Z_{i1}$ y $R_i \ll Z_{i2}$.
- Emplear resistencias menores a $1 \text{ M}\Omega$.

3. Desarrollo

3.1. Ganancia Ideal

Para obtener la ganancia ideal se aplica el principio de superposición. Para ello:

- Pasivando V_1 :

$$V_o|_{V_1=0} = -\frac{R_f}{R} V_2$$

- Pasivando V_2 :

$$V_o|_{V_2=0} = -\frac{R_f}{R} V_1$$

Por lo tanto, la salida total resulta:

$$V_O = -\frac{R_f}{R} (V_1 + V_2)$$

3.2. Errores en DC

En esta parte se analizan los errores en corriente continua. Para ello, en cada caso se modelará una fuente de error ubicada estratégicamente. Los errores se estudian de manera individual y luego se combinan mediante el principio de superposición, sumando sus efectos. Este método permite simplificar los cálculos, aunque ignora las posibles no linealidades del sistema.

Además, se empleará la fórmula de Black, suponiendo que el resto de las características del amplificador son ideales, a excepción de aquella cuyo error se desea determinar.

Se procede a calcular la ganancia de lazo:

$$T(s) = -A_d(s) \cdot \frac{R}{R + 2R_f}$$

3.2.1. Error de offset de tensión V_{os}

El error de offset de tensión se modela colocando en la entrada no inversora una fuente de tensión continua de valor V_{os} . A partir del circuito equivalente, se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{V_o}{V_{os}} = 1 + \frac{R_f}{R/2}$$

Por lo tanto, la tensión de salida resulta:

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R/2}\right) V_{os}$$

3.2.2. Error de corrientes de polarización I_{os}

En este caso, la corriente I_{P+} no genera una tensión en la entrada no inversora del amplificador, ya que en dicho punto no existe una resistencia que provoque una diferencia de potencial que pueda ser amplificada.

Por otro lado, la corriente I_{P-} sí produce un efecto en la salida. A partir del análisis del circuito se obtiene:

$$V_o = V^- \cdot \frac{R + 2R_f}{R}$$

y considerando que $V^- = -I_{P-} \cdot \frac{R \cdot R_f}{R + 2R_f}$, resulta:

$$V_o = -I_{P-} \cdot R_f$$

Por lo tanto, la corriente de polarización en la entrada inversora provoca una tensión de salida proporcional a $-I_{P-} R_f$.

3.2.3. Error por ganancia no infinita ($A_d < \infty$)

La ganancia real de un amplificador operacional puede determinarse mediante la *fórmula de Black*, expresada como:

$$A_v(s) = A_{vfi} \left(\frac{1}{1 - \frac{1}{T(s)}} \right)$$

Si la ganancia del amplificador tiende a infinito, la ganancia total será ideal. Sin embargo, dado que en la práctica A_d es finito, se puede definir un error de ganancia como:

$$A_v(s) = A_{vf} \left(\frac{1}{1 - e_g} \right)$$

De esta forma, la desviación en la tensión de salida puede expresarse como:

$$\Delta V_o = e_g(0) \cdot V_{d_{max}}$$

Si se considera que $V_{d_{max}} = FS$, donde FS representa el valor de salida a *full scale*, resulta:

$$\Delta V_o = e_g(0) \cdot FS = \frac{FS}{T(0)}$$

Por lo tanto, el error en la salida depende directamente de la ganancia de lazo en continua $T(0)$, siendo tanto menor cuanto mayor sea la ganancia de lazo del amplificador.

3.2.4. Error por RRMC no infinita ($RRMC < \infty$)

Dado que la entrada no inversora se encuentra conectada a masa, el error originado por la relación de rechazo en modo común resulta despreciable, ya que la tensión de modo común es prácticamente nula.

3.2.5. Errores en AC

Para realizar el análisis en régimen de alterna (AC), es necesario considerar las variaciones de los componentes con la frecuencia. Se modela el amplificador operacional como un dispositivo de un solo polo, es decir, de primer orden, cuya función de transferencia se expresa como:

$$A_{vf}(s) = \frac{A_{vf}(0)}{1 + \frac{s}{\omega_H}}$$

3.2.6. Error Vectorial

El error vectorial se define como la diferencia entre la ganancia ideal y la ganancia real del amplificador:

$$E_v = A_{vfi} - A_{vf}(s)$$

Al tratarse de una magnitud vectorial, puede descomponerse en dos componentes: el *error de ganancia* (o de módulo) y el *error de fase*.

Error de ganancia: Corresponde a la diferencia entre los módulos de la ganancia real y la ideal. Aplicando esta definición y normalizando, se obtiene:

$$e_v = |1| - \left| \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_H}} \right|$$

$$e_v = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^2}}$$

Error de fase: Corresponde a la diferencia entre las fases de la ganancia real y la ideal, dada por:

$$\varphi_v = -\arctan \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right) + \frac{\pi}{2}$$

3.2.7. Ancho de banda en pequeña señal

Al tratarse de un sistema de primer orden, la frecuencia de corte se define como el punto en el que la ganancia disminuye en -3 dB respecto a la banda de paso.

Debido a este comportamiento de primer orden, se cumple la relación de producto ganancia–ancho de banda constante, expresada como:

$$\omega_H \cdot A_{vf} = \omega_T$$

de donde se obtiene:

$$\omega_H = \frac{\omega_T}{A_{vf}}$$

3.2.8. Ancho de banda en plena potencia

La frecuencia de plena potencia corresponde a la máxima frecuencia que puede aplicarse al amplificador operacional sin que se produzca distorsión en la señal de salida cuando opera a su máxima amplitud.

$$\omega_{HP} = \frac{SR}{V_{pp}}$$

donde V_{pp} es la tensión pico a pico máxima presente en la salida del amplificador.

4. OPAMP LM324

A partir de la hoja de datos del amplificador operacional, se pueden obtener los siguientes parámetros típicos:

- $V_{OS} = 0,6 \text{ mV}$
- $\text{RRMC} = 80 \text{ dB}$
- $I_{OS} = 0,5 \text{ nA}$
- $I_P = 10 \text{ nA}$
- $SR = 0,5 \text{ V}/\mu\text{s}$
- $A_{d0} = 100 \text{ dB}$
- $f_T = 1 \text{ MHz}$

5. Caso de estudio simulado: $R_i = 50 \Omega$

Si la fuente presenta una impedancia interna de $R_i = 50 \Omega$, para evitar su carga excesiva, la impedancia de entrada del amplificador debe ser al menos diez veces mayor. Por lo tanto:

$$Z_{i1,2} \geq 10 \cdot R_i \Rightarrow R \geq 500 \Omega$$

Si se elige $R = 1,8 \text{ k}\Omega$, entonces:

$$\frac{R_f}{R} = 30 \Rightarrow R_f = 54 \text{ k}\Omega$$

5.1. Gráfico de V_o en función de V_1

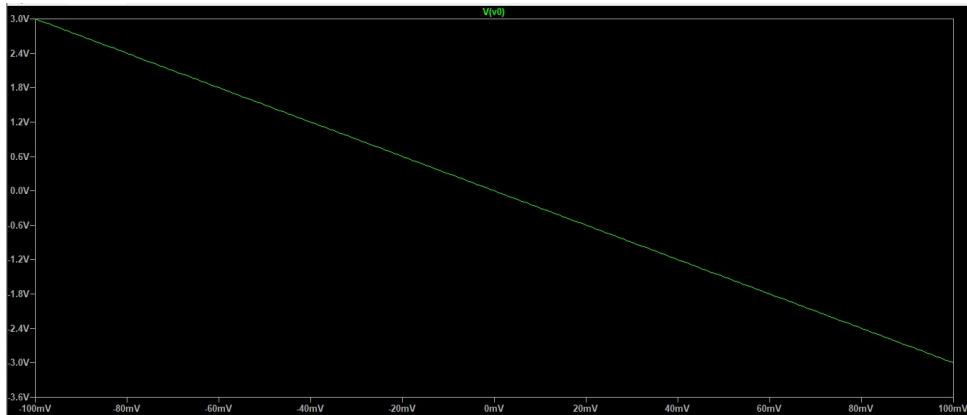


Figura 2: Barrido de V_o en función de V_1

5.2. Errores DC

- Se calcula el error en la salida debido al voltaje de offset del amplificador operacional:

$$\Delta V_o|_{V_{os}} = \left(1 + 2 \cdot \frac{R_f}{R}\right) \cdot V_{os} = 36,6 \text{ mV}$$

Luego, se conecta una fuente de tensión continua $V_5 = 0,6 \text{ mV}$, correspondiente al valor de V_{os} indicado por el fabricante, a la entrada no inversora del circuito. De esta forma, se mide la tensión de salida para comprobar que el valor experimental coincide con el cálculo teórico realizado.

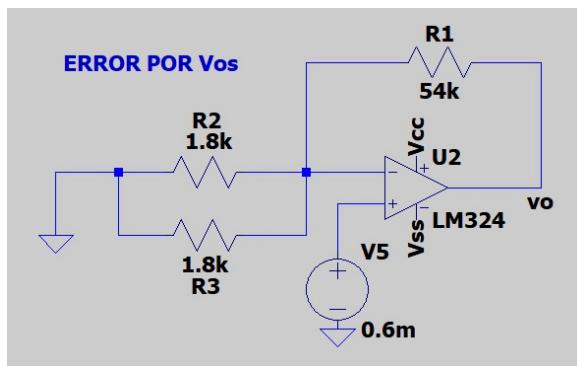


Figura 3: Diagrama de error V_{os}

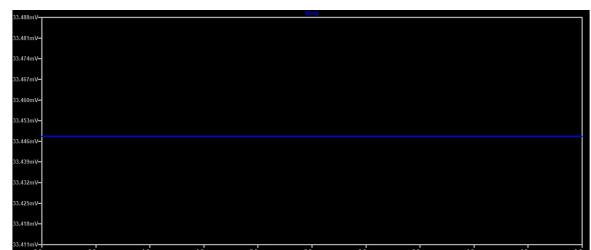


Figura 4: Simulación temporal del error V_{os}

Como puede verse, el error simulado es similar al calculado teóricamente.

- El error debido a las corrientes de polarización puede estimarse como:

$$\Delta V_o|_{I_{os}} = I_{os} \cdot R_f = 0,54 \text{ mV.}$$

En este caso, el error no puede simularse directamente, ya que el amplificador no posee una resistencia conectada al terminal no inversor. Sin embargo, es posible emular el efecto de la corriente de polarización I_{p-} aplicando una fuente de corriente en el terminal inversor. De esta manera, se reproduce el comportamiento esperado y se obtiene una respuesta coherente con el cálculo teórico.

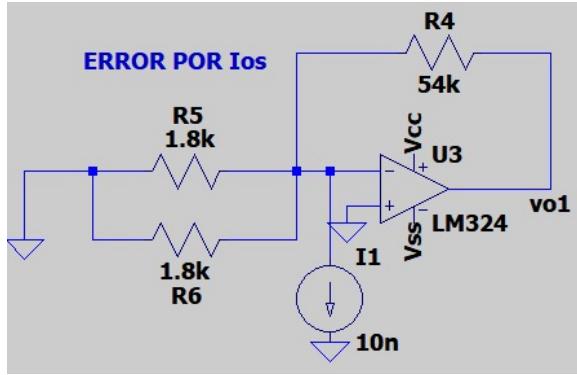


Figura 5: Diagrama de error I_{os}

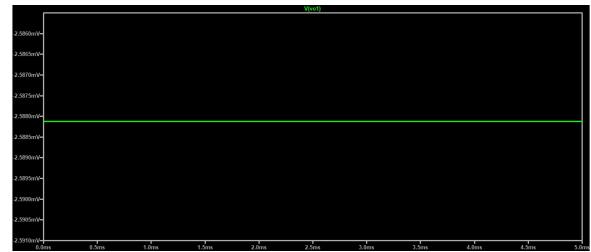


Figura 6: Simulación temporal del error I_{os}

- El error asociado a la ganancia finita del amplificador operacional se calcula mediante la expresión:

$$\Delta V_o|_{A_d < \infty} = \frac{FS}{T_0} = 6,1 \text{ mV.}$$

Este valor representa la desviación en la salida producida por la ganancia diferencial no infinita del amplificador, la cual limita su comportamiento ideal.

- El error asociado a la relación de rechazo en modo común (RRMC) se determina como:

$$\Delta V_o|_{RRMC < \infty} = 0 \text{ mV.}$$

Dado que la entrada no inversora se encuentra conectada a masa, la tensión común es prácticamente nula, por lo que el error producido por una RRMC finita resulta despreciable.

Por lo tanto, el error total en corriente continua es:

$$\Delta V_o = 43,24 \text{ mV.}$$

5.3. Errores AC

- **Ancho de banda de plena potencia.** Se determina mediante la expresión:

$$f_{HP} = \frac{SR}{2\pi V_{pp}} = 8 \text{ kHz.}$$

Este valor representa la máxima frecuencia a la cual el amplificador puede operar sin distorsión a su tensión de salida máxima.

- **Ancho de banda de pequeña señal.** Para señales de baja amplitud, el ancho de banda se obtiene como:

$$f_{HP} = k \cdot f_T = \frac{R}{R + R_f} \cdot f_T = 32,258 \text{ kHz.}$$

Este resultado refleja el límite superior de frecuencia en el que el amplificador mantiene una respuesta lineal dentro de la región de pequeña señal.

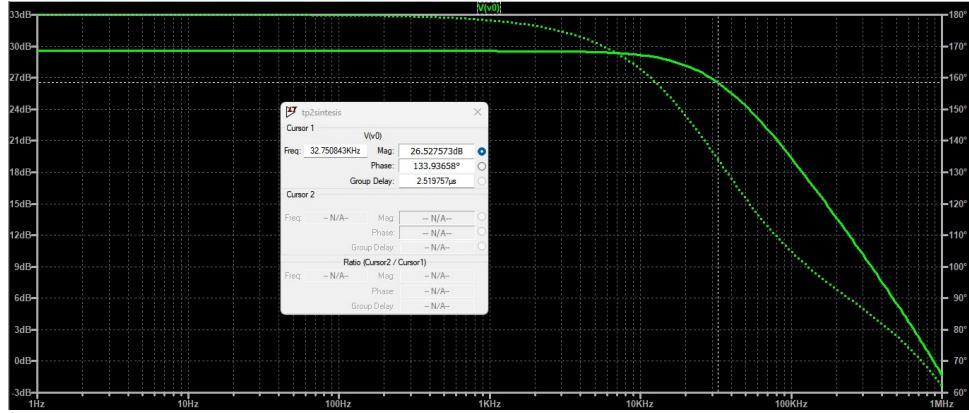


Figura 7: Ancho de Banda de pequeña señal

■ Error Vectorial

f [Hz]	Avf		Error Vectorial	
	Módulo	Fase [°]	Módulo	Fase [°]
3280	0,994	-174,16	0,006	84,19
6400	0,980	-168,74	0,020	78,77
9600	0,959	-163,34	0,041	73,43
12800	0,930	-158,24	0,070	68,36
16000	0,898	-153,43	0,102	63,62
19200	0,862	-149,00	0,138	59,24
22400	0,824	-144,90	0,176	55,22
25600	0,787	-141,16	0,213	51,56
28800	0,750	-137,74	0,250	48,24
32258	0,707	-134,44	0,293	45,00

Cuadro 1: Error vectorial

■ Slew Rate

Al inyectar una señal cuadrada de amplitud 10 V en V_1 y mantener V_2 conectado a masa, es posible obtener la pendiente correspondiente al *Slew Rate* del amplificador operacional:

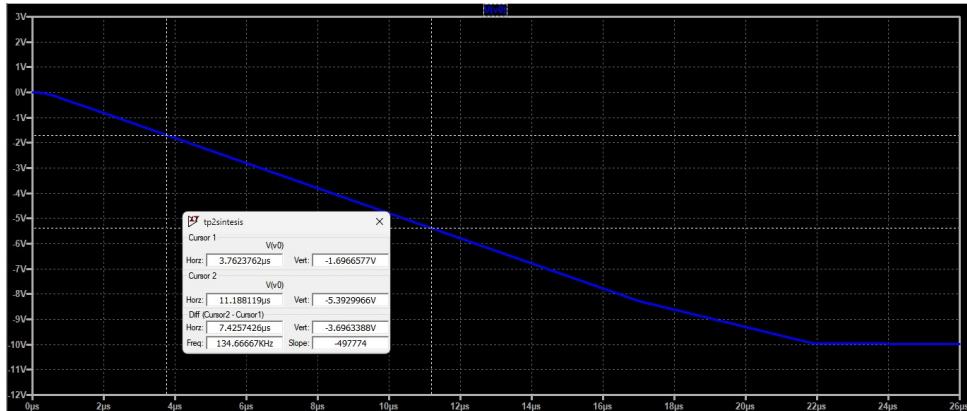


Figura 8: Pendiente de Slew Rate

Como puede observarse, el *Slew Rate* obtenido en la simulación es de 0,498 V/ μ s.

6. Caso de estudio simulado: $R_i = 100 \text{ k}\Omega$

En este caso, se cuenta con una fuente que posee una impedancia de entrada mucho mayor, lo que dificulta la implementación del circuito sin perturbar la señal de entrada. Para el análisis, se considera, de manera similar al caso anterior:

$$R_i = 100 \text{ k}\Omega \Rightarrow Z_{i1,2} \geq 10 \cdot R_i \Rightarrow R \geq 1 \text{ M}\Omega$$

Si se elige $R = 1 \text{ M}\Omega$, entonces:

$$\frac{R_f}{R} = 30 \Rightarrow R_f = 30 \text{ M}\Omega$$

Como puede verse, este valor de R_f excede la especificación de $1 \text{ M}\Omega$. Por lo tanto, se agrega una red tipo T para cumplir con el requisito. Suponiendo la entrada inversora pasivada, se tiene:

$$i_f = \frac{V_o}{R_2 + R_1 \parallel R_3} \cdot (R_1 \parallel R_3) \cdot \frac{1}{R_1} \Rightarrow V_o/i_f = R_f = \frac{R_2 \cdot R_1}{R_3} + R_2 + R_1$$

Si se elige $R_1 = R_2 = 220 \text{ k}\Omega$, se obtiene:

$$R_3 = 1637,35 \Omega$$

De esta manera, es posible cumplir con el requerimiento de no superar $R_f = 1 \text{ M}\Omega$ y mantener la impedancia de entrada adecuada.

6.1. Gráfico de V_o en función de V_1

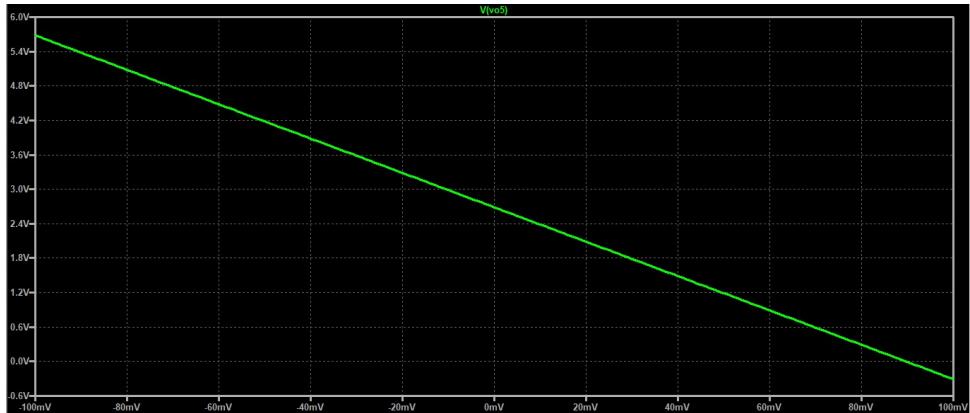


Figura 9: Barrido de V_o en función de V_1

6.2. Errores DC

La incorporación de la red tipo T hace que la ganancia de lazo quede determinada por la siguiente expresión:

$$T = -\frac{1}{2} \cdot A_d \cdot \frac{R \cdot R_3}{(R_1 + R/2) \cdot (R_2 + R_3)} = -513,02$$

En este caso, no se vuelve a simular el error de V_{os} , ya que sería el mismo que en el análisis anterior.

- El error de salida debido al voltaje de offset se calcula como:

$$\Delta V_o|_{V_{os}} = \left(1 + 2 \cdot \frac{R_f}{R}\right) \cdot V_{os} = 36,6 \text{ mV.}$$

- El error de salida debido a las corrientes de polarización se calcula como:

$$\Delta V_o|_{I_{os}} = I_{os} \cdot R_f = 300 \text{ mV.}$$

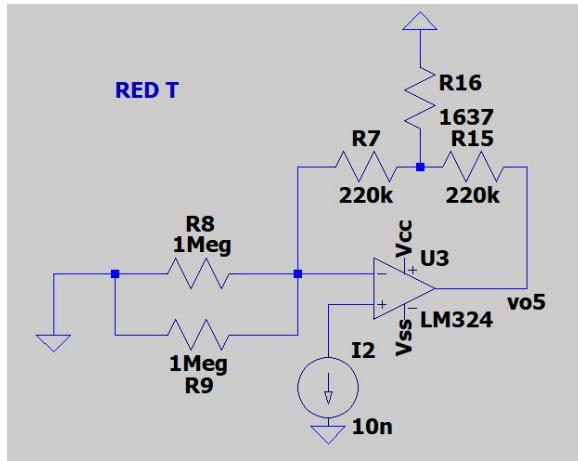


Figura 10: Diagrama de error I_{os}

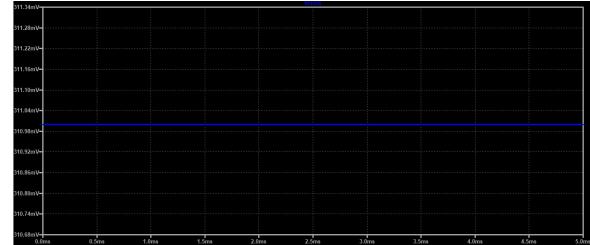


Figura 11: Simulación temporal del error I_{os}

- El error de salida debido a la ganancia finita del amplificador se calcula como:

$$\Delta V_o|_{A_d < \infty} = \frac{FS}{T_0} = 19,49 \text{ mV.}$$

- El error debido a la relación de rechazo en modo común resulta nulo, por lo que

$$\Delta V_o|_{RRMC < \infty} = 0 \text{ mV}$$

Por lo tanto, el error total en continua resulta ser:

$$\Delta V_o = 0,356 \text{ V.}$$

6.3. Errores AC

- **Ancho de banda de plena potencia.** Se determina mediante la expresión:

$$f_{HP} = \frac{SR}{2\pi V_{pp}} = 8 \text{ kHz.}$$

Este valor representa la máxima frecuencia a la cual el amplificador puede operar sin distorsión a su tensión de salida máxima.

- **Ancho de banda de pequeña señal.** Para señales de baja amplitud, el ancho de banda se obtiene como:

$$f_{HP} = k \cdot f_T = 5,13 \text{ kHz.}$$

Este resultado refleja el límite superior de frecuencia en el que el amplificador mantiene una respuesta lineal dentro de la región de pequeña señal.

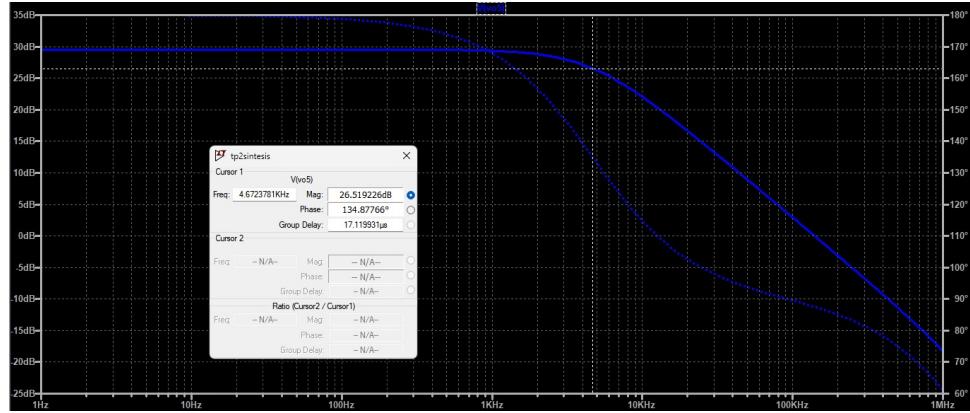


Figura 12: Ancho de Banda de pequeña señal

■ Error Vectorial

f [Hz]	Avf		Error Vectorial	
	Módulo	Fase [°]	Módulo	Fase [°]
-				
513	0,992	-173,75	0,008	84,29
1026	0,974	-167,59	0,026	78,69
1539	0,928	-161,73	0,072	73,30
2052	0,913	-156,24	0,087	68,19
2565	0,875	-151,17	0,125	63,43
3078	0,833	-146,55	0,167	59,04
3591	0,791	-142,36	0,209	55,01
4104	0,750	-138,60	0,250	51,34
4617	0,710	-135,22	0,290	48,01
5130	0,707	-132,19	0,293	45,00

Cuadro 2: Error vectorial

■ Slew Rate

Al inyectar una señal cuadrada de amplitud 10 V en V_1 y mantener V_2 conectado a masa, es posible obtener la pendiente correspondiente al *Slew Rate* del amplificador operacional:

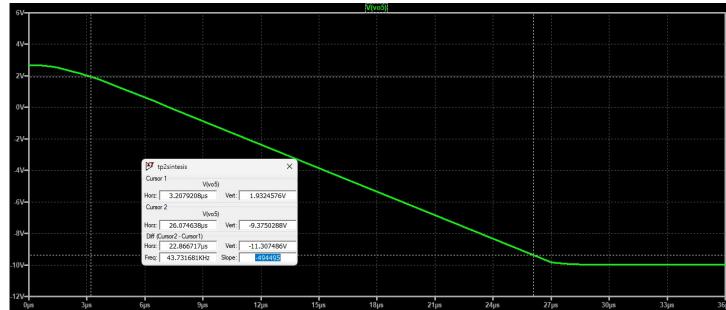


Figura 13: Pendiente de Slew Rate

Como puede observarse, el *Slew Rate* obtenido en la simulación es de $0,494 \text{ V}/\mu\text{s}$.

7. Caso de estudio medido físicamente: $R_i = 50 \Omega$

7.1. Gráfico de V_o en función de V_1

A continuación se muestra el gráfico correspondiente:

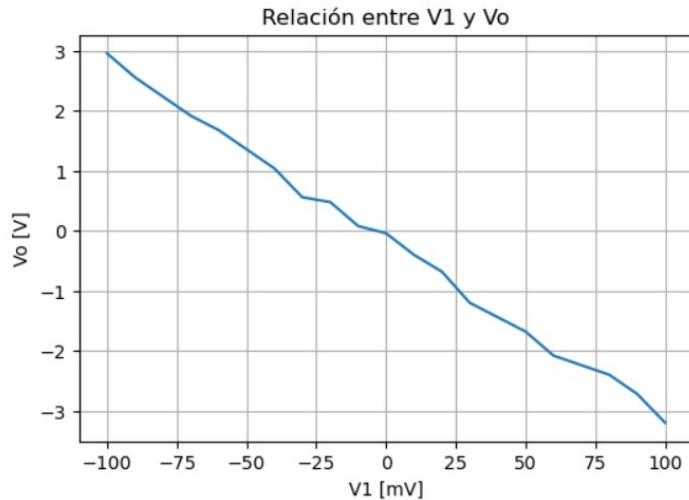


Figura 14: Gráfico de V_o en función de V_1

Como puede verse, la pendiente es -30 V/V.

7.2. Errores DC

A continuación se muestra la tensión continua medida sin excitación a la entrada:



Figura 15: Error de tensión en DC

Como puede verse, el error de tensión es de 44,44 mV.

7.3. Errores AC

7.3.1. Slew Rate

A continuación se muestra el oscilograma correspondiente:

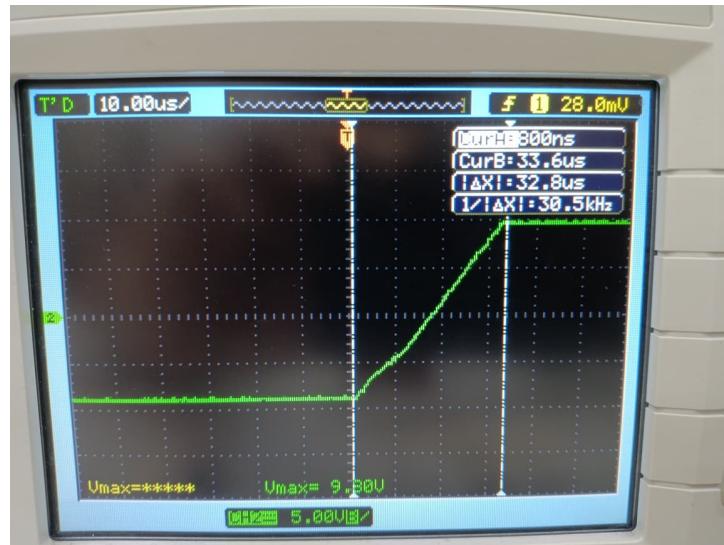


Figura 16: Pendiente de Slew Rate

Como puede observarse, la variación temporal medida es de $32,8 \mu\text{s}$.



Figura 17: Pendiente de Slew Rate

Como puede observarse, la variación de tensión observada es de $18,4 \text{ V}$. Por lo tanto, se obtiene un valor de $0,56 \text{ V}/\mu\text{s}$ para el *slew rate*.

7.3.2. Diagrama de Bode

A continuación se muestra el diagrama de Bode medido físicamente:

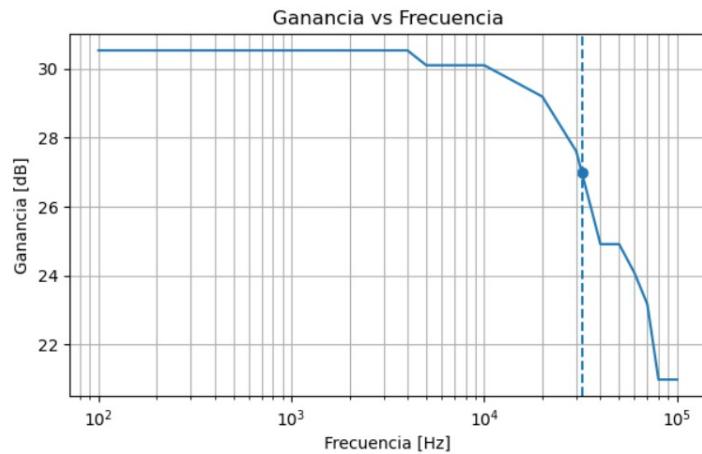


Figura 18: Diagrama de Bode

Como puede verse, el ancho de banda es de 32 kHz.

8. Caso de estudio medido físicamente: $R_i = 100 \text{ k}\Omega$

8.1. Gráfico de V_o en función de V_1

A continuación se muestra el gráfico correspondiente:

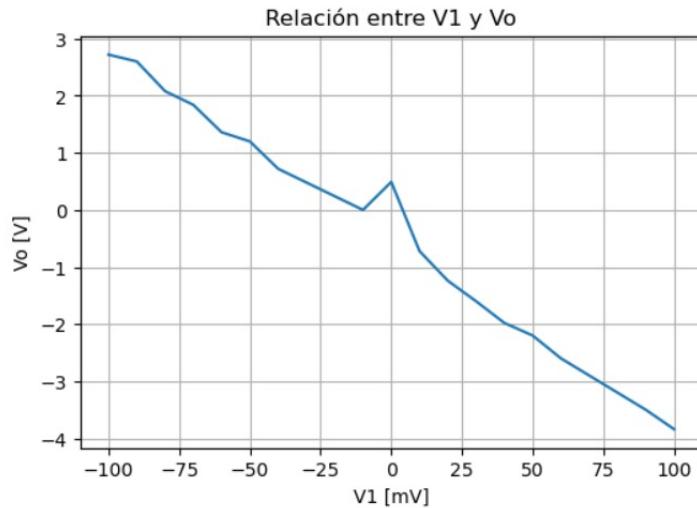


Figura 19: Gráfico de V_o en función de V_1

Como puede verse, la pendiente es -34 V/V .

8.2. Errores DC

A continuación se muestra la tensión continua medida sin excitación a la entrada:

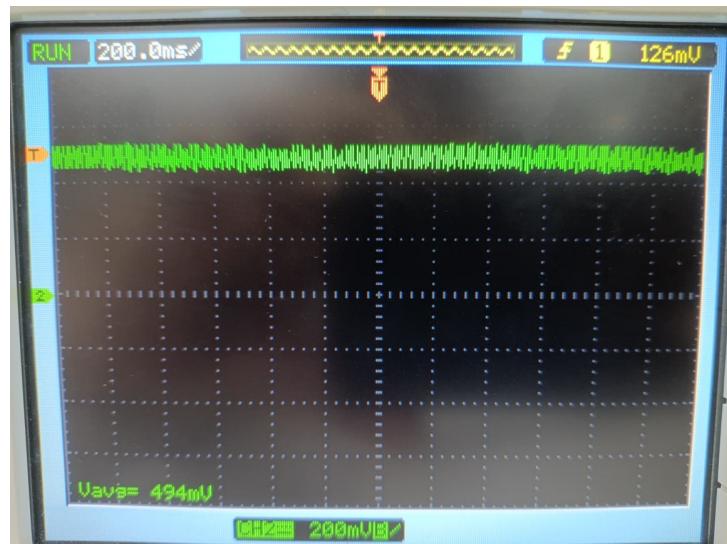


Figura 20: Error de tensión en DC

Como puede verse, el error de tensión en continua es de 494 mV .

8.3. Errores AC

8.3.1. Slew Rate

A continuación se muestra el oscilograma correspondiente:

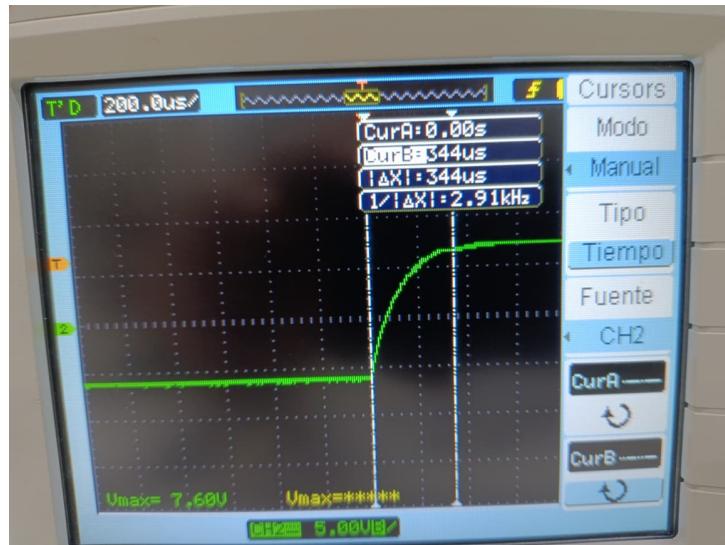


Figura 21: Pendiente de Slew Rate

Como puede observarse, la variación temporal medida es de $344 \mu s$.



Figura 22: Pendiente de Slew Rate

Como puede observarse, la variación de tensión observada es de 13,4 V. Por lo tanto, se obtiene un valor de $0,039 \text{ V}/\mu\text{s}$ para el *slew rate*.

8.3.2. Diagrama de Bode

A continuación se muestra el diagrama de Bode medido físicamente:

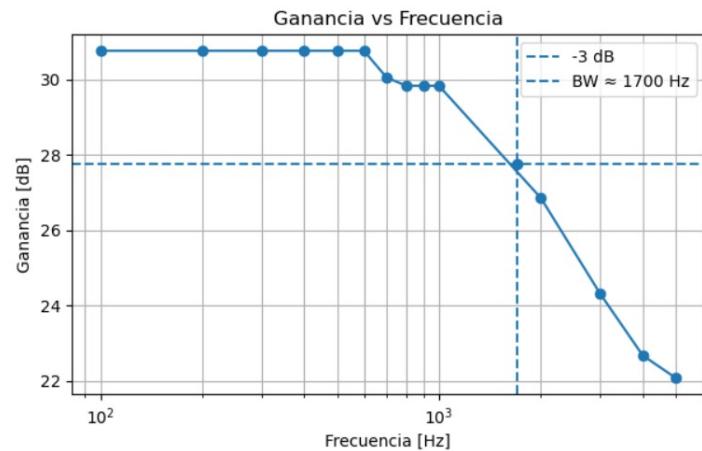


Figura 23: Diagrama de Bode

Como puede verse, el ancho de banda es de 1,7 kHz.