

Universidad Nacional de Córdoba



Facultad De Ciencias Exactas Físicas y Naturales

Cátedra de Síntesis de Redes Activas

Trabajo de Laboratorio 2

Profesor Titular: Dr. Ing. Pablo Ferreyra

Profesor Adjunto: Ing. César Reale

Integrantes:

Mouton Laudin, Alfonso.

Rodríguez Alba, Iván.

Espejo, Alejandro Andrés.

diciembre, 2024



Universidad
Nacional
de Córdoba

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}	5
3.2.3. Error por ganancia no infinita $Ad < \infty$	5
3.2.4. Error por RRMC no infinita $RRMC < \infty$	6
3.3. Errores en AC	6
3.3.1. Error Vectorial.	6
3.3.2. Ancho de banda en pequeña señal.	6
3.3.3. Ancho de banda en plena potencia.	6
4. LM324	8
5. Caso de Estudio: $R_i = 50\Omega$	8
5.1. Errores DC	8
5.2. Errores AC	9
6. Caso de Estudio: $R_i = 100K\Omega$	10
6.1. Errores DC	11
6.2. Errores AC	12

1. Introducción

Este trabajo consistirá en analizar el funcionamiento de un amplificador real, para lo cual se deberá tener en cuenta las fuentes de error que están presentes en el mismo, lo que causa una desviación en la salida que deberá ser tenida en cuenta para el diseño de un sistema robusto.

Los errores que deberán ser tenidos en cuenta para el análisis son los siguientes:

Errores en DC.

- Error de offset de tensión V_{os} .
- Error de corriente de polarización I_{os} .
- Error por ganancia no infinita $Ad < \infty$.
- Error por RRMC no infinita $RRMC < \infty$.

Errores en AC.

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

Se hará un análisis teórico y simulaciones para corroborar lo obtenido.

1.1. Objetivos

- Aplicar el conocimiento teórico - práctico para analizar los errores acarreados en circuitos que hacen uso de amplificadores operacionales.
- Identificar las limitaciones respecto a la exactitud de la respuesta ofrecida por el amplificador utilizado.
- Fortalecer el uso del simulador LtSpice e interpretar los resultados del mismo realizando las comparaciones correspondientes con los resultados teóricos obtenidos.

2. Sumador Inversor

2.1. Circuito

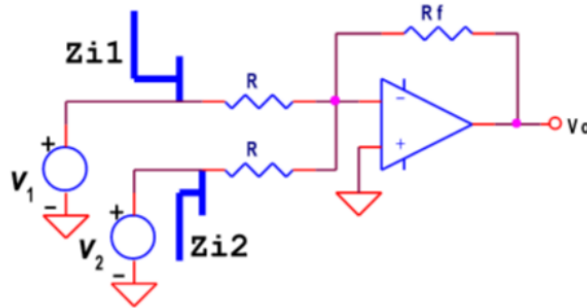


Figura 1: Circuito a analizar

2.2. Requerimientos

Para desarrollar el trabajo, se deberá emplear el circuito propuesto, con el amplificador operacional LM324. Se deberá cumplir con las siguientes especificaciones establecidas:

- $V_{cc} = 10[V]$ y $V_{ss} = -10[V]$.
- $Av_{v1} = 30$ y $Av_{v2} = 30$.
- $R_i \ll Z_{i1}$ y $R_i \ll Z_{i2}$.
- Emplear resistencias menores a 10 $[M\Omega]$.

3. Desarrollo

3.1. Ganancia Ideal

Para obtener la ganancia ideal, debemos aplicar superposición, para esto:

Pasivando V1

$$V_o|_{V1=0} = -\frac{R_f}{R}$$

Pasivando V2

$$V_o|_{V2=0} = -\frac{R_f}{R}$$

$$V_o = -\frac{R_f}{R} * (v_1 + v_2)$$

3.2. Errores en DC

En esta sección se verán los errores en corriente continua, para ello se modelará en cada caso una fuente de error colocada estratégicamente; Los errores son analizados de manera separada y luego por superposición sumado los efectos, esto evita cálculos extensos pero se ignoran las alinealidades que el sistema pudiese tener.

Se utilizará además la fórmula de **Blackman** y se suponen el resto de características del amplificador ideales a excepción de la cual debemos calcular el error.

Se procede a calcular la ganancia de lazo:

$$T(s) = -Ad(s) * \frac{R}{R + 2 * R_f}$$

3.2.1. Error de offset de tensión V_{os} .

Se modela colocando en la entrada no inversora una fuente de tensión continua de entrada, y de valor V_{os} .

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

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

3.2.2. Error de corrientes de polarización I_{os}

$$I_{p+}$$

En este caso no se generará una tensión en la entrada positiva del amplificador debido a esta corriente, ya que no se posee una resistencia en tal punto que levante una diferencia de potencial tal que sea amplificada.

$$I_{p-}$$

$$V_o = V_- * \frac{R+2*R_f}{R}$$

$$V_o = -I_{p-} * \frac{R * R_f}{R + 2 * R_f} * \frac{R + 2 * R_f}{R} = -I_p * R_f$$

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

Es posible definir la ganancia real de un amplificador operacional mediante la fórmula de blackman, mediante la siguiente expresión:

$$Av(s) = \frac{A_{vfi}}{1 - \frac{1}{T(s)}}$$

Si la ganancia del amplificador tiende a infinito, entonces la ganancia será ideal, pero como no es infinita, entonces se puede definir un error como:

$$Av(s) = \frac{A_{vfi}}{1 - e_g}$$

Por lo que:

$$\Delta V_o = e_g(0) * V_{dmax}$$

pero $V_{dmax} = FS$, entonces:

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

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

Ya que la entrada no inversora está en masa, el error producido por la relación de rechazo en modo común es completamente despreciable, debido a que la tensión común es muy cercana a cero.

3.3. Errores en AC

Para hacer el análisis en AC, se debe tener en cuenta ahora las variaciones de los componentes debido a la frecuencia, tomamos el amplificador operacional como un dispositivo de un sólo polo, es decir de primer orden, con la siguiente función de transferencia:

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

3.3.1. Error Vectorial.

Es definido como la diferencia vectorial entre la ganancia ideal y la real.

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

Al ser un vector, es posible determinar mediante dos errores, error de ganancia o de módulo y error de fase.

Error de ganancia: Diferencia entre los módulos de la ganancia real y ideal. Aplicando esto y normalizando:

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

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

Error de Fase: Diferencia entre las fases de la ganancia real y ideal:

$$\phi_v = -\arctg(\frac{\omega}{\omega_H}) + \frac{\pi}{2}$$

3.3.2. Ancho de banda en pequeña señal.

Al ser un sistema de primer orden, es definido como el punto donde la ganancia cae -3[dB] respecto a la banda de paso. Podemos aplicar el producto ganancia-Ancho de banda constante debido a este comportamiento de primer orden:

$$\omega_H * A_{vf} = 1 * \omega_T$$

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

3.3.3. Ancho de banda en plena potencia.

Es la máxima frecuencia que puede colocarse en el amplificador operacional, para que en su salida no se presente distorsión a su máxima potencia.

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

Donde, V_{pp} es la tensión pico a pico máxima presentada en la entrada del amplificador.

4. LM324

Desde la hoja de datos del Amplificador Operacional podemos determinar los siguientes parámetros típicos:

- $V_{os} = 0,6[mV]$.
- $RRMC = 80[dB]$.
- $I_{os} = 0,5[nA]$.
- $I_p = 10[nA]$.
- $SR = 0,5[V/uS]$.
- $Ad0 = 100[dB]$.
- $f_T = 1[MHz]$.

5. Caso de Estudio: $R_i = 50\Omega$

Si tenemos una impedancia interna de la fuente de ese valor especificado, para no cargar a la misma, la impedancia de entrada deberá ser de al menos 10 veces mayor, esto es:

$$R_i = 50[\Omega] \rightarrow Z_{i1,2} \geq 10 * R_i$$

$$R \geq 500[\Omega]$$

Si tomo que $R = 1,8[K\Omega]$, entonces:

$$\frac{R_f}{R} = 30 \rightarrow R_f = 54[K\Omega].$$

5.1. Errores DC

- $\Delta V_o|_{vos} = (1 + 2 * \frac{R_f}{R}) * V_{os} = 36,6[mV]$.

Se procede a conectar una fuente de tension V5 de 0.6mV valor de V_{os} indicado por el fabricante a la entrada No Inversor y observar la salida del circuito y verificar que calculo hecho anteriormente es correcto.

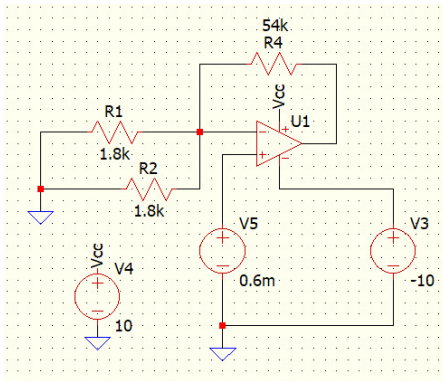


Figura 2: Diagrama de Error Vos.

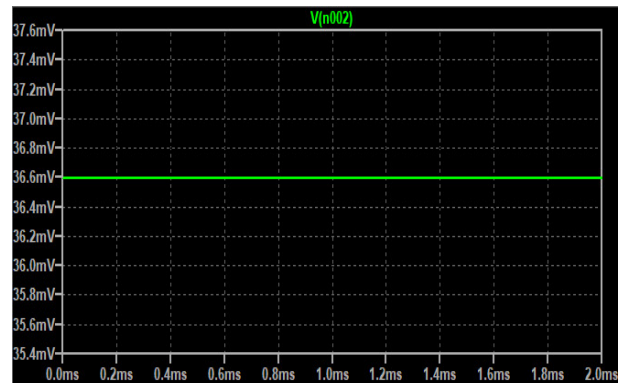


Figura 3: Simulación del Error Vos.

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

En cuanto al error por corrientes de polarización, no se puede simular exactamente, ya que no se tiene una resistencia conectada al terminal no inversor, pero si se conecta una fuente de corriente al terminal inversor, de modo de simular la I_p - planteada, se obtiene lo siguiente:

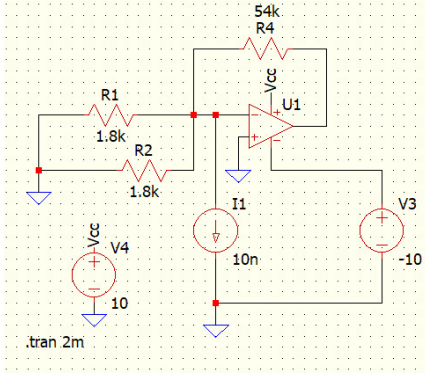


Figura 4: Diagrama de Error I_{os} .

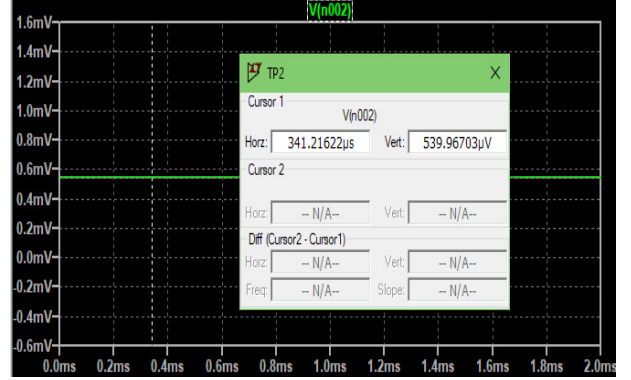


Figura 5: Simulación del Error I_{os} .

- $\Delta V_o|_{Ad<\infty} = \frac{ES}{T_o} = 6,1[mV]$.

- $\Delta V_o|_{RRMC<\infty} = 0[mV]$.

Por lo que el error total en continua será de $\Delta V_o = 43,24[mV]$.

5.2. Errores AC

Ancho de Banda de plena Potencia.

$$f_{HP} = \frac{SR}{2 \cdot \pi \cdot V_{pp}} = 8[KHz].$$

Ancho de Banda de pequeña Señal.

$$f_{HP} = k \cdot f_T = \frac{R}{R+2 \cdot R_f} \cdot f_t = 16,393[KHz]$$

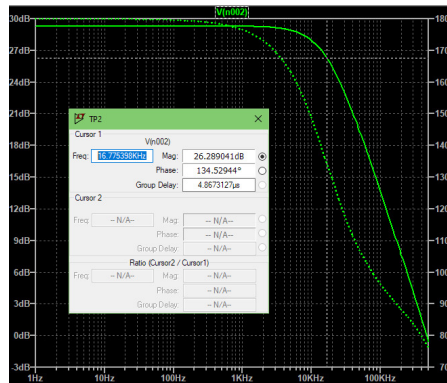


Figura 6: Diagrama de Bode Pequeña Señal

Error Vectorial.

f [Hz]	Avf		Error Vectorial	
	Mod	Fase [°]	Mod	Fase [°]
16393				
1639,3	0,995	-5,711	0,005	84,289
3278,6	0,981	-11,310	0,019	78,690
4917,9	0,958	-16,699	0,042	73,301
6557,2	0,928	-21,801	0,072	68,199
8196,5	0,894	-26,565	0,106	63,435
9835,8	0,857	-30,964	0,143	59,036
11475,1	0,819	-34,992	0,181	55,008
13114,4	0,781	-38,660	0,219	51,340
14753,7	0,743	-41,987	0,257	48,013
16393	0,707	-45,000	0,293	45,000

Figura 7: Error Vectorial

Slew Rate

Injectamos un Señal cuadrada de 10V por V1 y conectando V2 a masa obtuvimos la pendiente de Slew Rate.

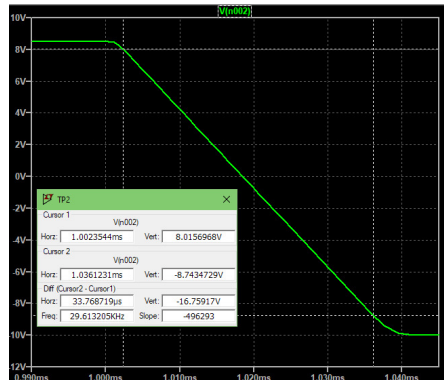


Figura 8: Pendiente de Slew Rate

$$SR=0,496V/uS$$

6. Caso de Estudio: $R_i = 100K\Omega$

Ahora para este caso, se tiene una fuente con una impedancia de entrada muy mayor, por lo cual, será más difícil la implementación sin perturbar la señal de entrada, para ello, tomamos al igual que en el anterior análisis:

$$R_i = 100[K\Omega] \rightarrow Z_{i1,2} \geq 10 * R_i$$

$$R \geq 1[M\Omega]$$

Si tomo que $R = 1,8[M\Omega]$, entonces:

$$\frac{R_f}{R} = 30 \rightarrow R_f = 54[M\Omega].$$

Como vemos, esto no cumple con la especificación dada que R_f no debe superar los $10[M\Omega]$, por lo cual se agregará una red tipo T tal que se cumpla con lo especificado.

Supongo la entrada inversora pasivada, por lo cual:

$$i_f = \frac{V_o}{R_2 + R_1 // R_3} * R_1 // R_3 * \frac{1}{R_1}$$

$$\frac{V_o}{i_f} = \frac{R_2 * R_1}{R_3} + R_2 + R_1 = R_f$$

Sii tomo $R_1 = R_2 = 220[K\Omega]$.

$$R_3 = 903,66[\Omega]$$

De esta manera podemos lograr el requerimiento.

6.1. Errores DC

Incorporar la red T, hace que la ganancia de lazo ahora esté determinada por la siguiente expresión:

$$T = -\frac{1}{2} * \frac{Ad * R * R_3}{(R_1 + R/2) * (R_2 + R_3)} = 328,72$$

En este caso no volvemos a simular el Error de Vos ya que resultaria el mismo que en el caso anterior.

- $\Delta V_o|_{vos} = (1 + 2 * \frac{R_f}{R}) * V_{os} = 36,6[mV]$.
- $\Delta V_o|_{Ios} = I_{os} * R_f = 540[mV]$.

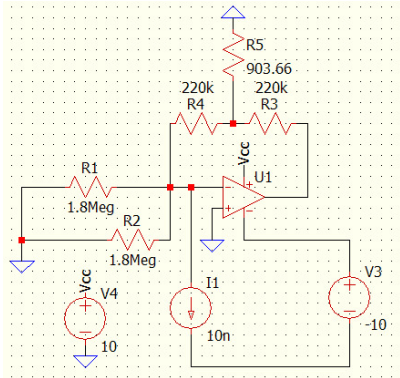


Figura 9: Diagrama de Error Ios.

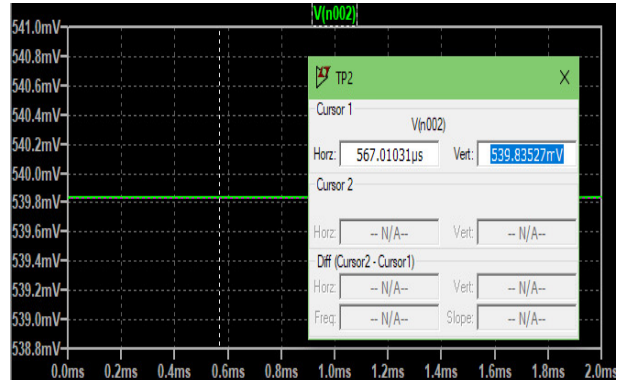


Figura 10: Simulación del Error Ios.

- $\Delta V_o|_{Ad < \infty} = \frac{ES}{T_o} = 30,421[mV]$.
- $\Delta V_o|_{RRMC < \infty} = 0[mV]$.

Por lo que el error total en continua será de $\Delta V_o = 0,607[V]$., por lo que se ve, se debería agregar una etapa anterior como adaptación de impedancia, tal como un **buffer de tensión**.

6.2. Errores AC

Ancho de Banda de plena Potencia.

$$f_{HP} = \frac{SR}{2 * \pi * V_{pp}} = 8[KHz].$$

Ancho de Banda de pequeña Señal.

$$f_{HP} = k.f_T = 3,28[KHz]$$

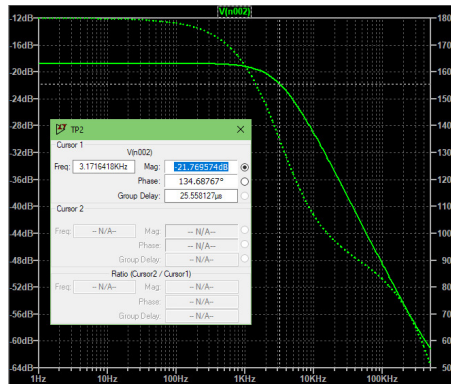


Figura 11: Diagrama de Bode Pequeña Señal

Error Vectorial.

f [Hz]	Avf		Error Vectorial	
	Mod	Fase [°]	Mod	Fase [°]
3287	0,995	-5,711	0,005	84,289
328,7	0,981	-11,310	0,019	78,690
657,4	0,958	-16,699	0,042	73,301
986,1	0,928	-21,801	0,072	68,199
1314,8	0,894	-26,565	0,106	63,435
1643,5	0,857	-30,964	0,143	59,036
1972,2	0,819	-34,992	0,181	55,008
2300,9	0,781	-38,660	0,219	51,340
2629,6	0,743	-41,987	0,257	48,013
2958,3	0,707	-45,000	0,293	45,000
3287				

Figura 12: Error Vectorial