



FCEFYN

Facultad de
Ciencias Exactas
Físicas y Naturales

Síntesis de Redes Activas

Trabajo Práctico 2

“Amplificador Operacional real: Errores”

PROFESORES:

Dr. Ing. Ferreyra Pablo.

Ing. Reale Cesar.

ALUMNOS:

Dalla Fontana Facundo.

Gonzalez Bruno.

Lafay Justin.

Antonin, Kulyk.

Analisis Teorico.....	3
• Diseño de circuito:.....	3
• $V_o=f(V_1,V_2)$	4
• Errores en DC.....	5
➢ Error de offset por tensión V_{os} :.....	5
➢ Error de offset por corrientes de polarización I_{os}	5
➢ Error por R_{RMC} <.....	6
➢ Error por A_{D} <.....	7
➢ Error total de DC.....	7
• Errores AC.....	8
➢ Ancho de banda de plena potencia para $V_p=10V$	8
➢ Ancho de banda de pequeña señal.....	8
➢ Tabla de error relativo de módulo y fase.....	8
Circuito.....	10
• Diagrama esquemático en simulación.....	10
Análisis para $R_i=50$.....	11
• Ganancia $V_o=f(V_1)$	11
Característica entrada-salida.....	11
Análisis Transient.....	11
• Errores en DC.....	12
$V_{os} - I_{os}$	12
A_{D} <.....	13
Simulación.....	13
• Errores en AC - Slew Rate.....	14
Simulación.....	14
• Errores en AC - Diagrama de Bode.....	15
Análisis teórico.....	15
Simulación.....	15
• Errores en AC.....	17
Simulación.....	17
Comparación.....	17
Análisis para $R_i=100K$.....	19
• Ganancia $V_o=f(V_1)$	19
Característica entrada-salida.....	19
Análisis Transient.....	19
• Errores en DC.....	20
$V_{os} - I_{os}$	20
Simulación.....	20
A_{D} <.....	21
Simulación.....	21
• Errores en AC - Slew Rate.....	22
Simulación.....	23

• Errores en AC - Diagrama de Bode.....	24
Análisis teórico.....	24
Simulación.....	24
• Errores en AC - Error relativo de módulo y fase.....	25
Simulación.....	25
Comparación.....	25

Analisis Teorico

● Diseño de circuito:

Requerimientos:

- Amplificador Operacional LM741 o LM324
- Alimentación $V_{cc} = 10V$, $V_{ss} = -10V$
- Ganancia en banda media $A=V_o/V_1$ y $A=V_o/V_2$ debe ser igual a 30 veces
- Z_{in} del amplificador no puede alterar o cargar la fuente de señal, es decir, $R_i \ll Z_{i1}$ y Z_{i2} . (al menos 10 veces)
- $R_f \leq 1M\Omega$
- Las fuentes de tensión V_1 y V_2 son reales y vamos a estudiar dos casos para el valor
- de su resistencia interna R_i : $R_i = 50\Omega$ y $R_i = 100K\Omega$

Caso $R_i = 50\Omega$:

Buscamos $R_i \ll Z_{i1}$ y Z_{i2} . Definimos : $Z_{i1} = Z_{i2} = R = 1K\Omega$. Para obtener una ganancia de 30 veces, por ser un amplificador en configuración inversora, tenemos la siguiente ganancia ideal:

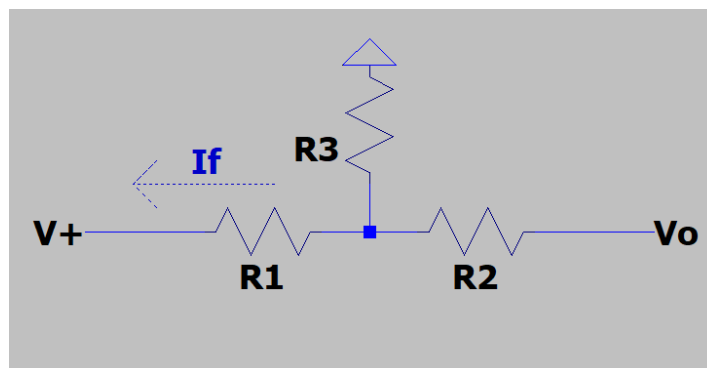
$$\frac{V_o}{V_1} = \frac{V_o}{V_2} = -\frac{R_f}{R} = -30$$

Entonces:

$$R_f = 30R = 30K\Omega$$

Caso $R_i = 100k\Omega$:

En este caso, para que R_i sea mucho menor a Z_{i1} y Z_{i2} , R debería ser por lo menos $1M\Omega$, lo que implica que para obtener una ganancia de 30 veces se necesitaría una $R_f = 30M\Omega$, lo cual no cumple la condición de que R_f sea menor o igual a $1M\Omega$. Por lo tanto, debemos colocar un divisor de corriente (red T), para que la corriente de feedback sea la misma que para $R_f=30M\Omega$.



$$R_f = 30M\Omega$$

$$R_1 = R_2 = 100k\Omega$$

$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_f - R_1 - R_2} = 335,6\Omega \Rightarrow R_3 = 330\Omega \text{ (normalizado)}$$

$$R_f = \frac{R_2 R_1 + R_3 R_2 + R_1 R_3}{R_3} = 30,5M\Omega \text{ (error} < 5\%)$$

$$\bullet V_o = f(V_1, V_2)$$

$$\frac{V_o}{V_1} \Big|_{V_2=0; V_o'=0} = - \frac{R//R_f}{R+R//R_f} A_D$$

$$\frac{V_o}{V_2} \Big|_{V_1=0; V_o'=0} = - \frac{R//R_f}{R+R//R_f} A_D$$

$$T = \frac{V_o}{V_o'} \Big|_{V_1=0; V_2=0} = - \frac{\frac{R}{2}}{\frac{R}{2} + R_f} A_D$$

$$V_o = \frac{\frac{V_o}{V_1} \times V_1 + \frac{V_o}{V_2} \times V_2}{1-T}$$

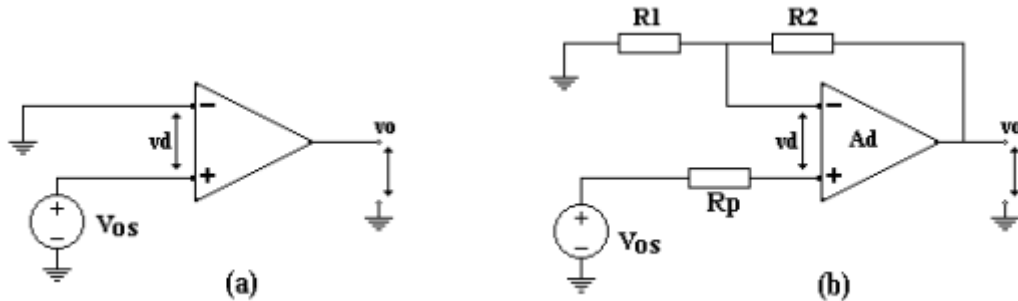
$$V_o = \frac{-\frac{R//R_f}{R+R//R_f} A_D \times V_1 - \frac{R//R_f}{R+R//R_f} A_D \times V_2}{1 + \frac{\frac{R}{2}}{\frac{R}{2} + R_f} A_D}$$

Para $A_D \rightarrow \infty$

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

• Errores en DC

➤ Error de offset por tensión V_{os} :



Para calcular el error de offset de tensión consideraremos que en V_+ se tiene conectada una fuente de tensión V_{os} . De esta forma, el error queda expresado como:

$$\Delta V_o = \frac{\left(\frac{V_o}{V_{os}}\right)_{V_o=30} V_{os}}{1-T}$$

Para $A_d \rightarrow \infty$:

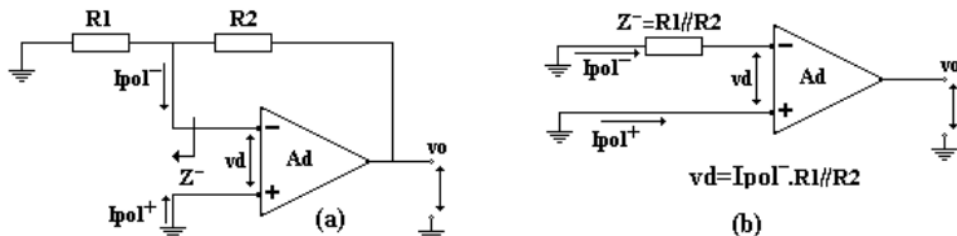
$$\Delta V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R/2}\right) V_{os}$$

Del datasheet $V_{os} = 0.6 \text{ mV}$

$$|\Delta V_o| = 61 V_{os}$$

$$|\Delta V_o| = 36,6 \text{ mV}$$

➤ Error de offset por corrientes de polarización I_{os}



Para calcular el offset por corrientes de polarización, pasivamos todas las fuentes de señal, y colocamos 2 fuentes de corriente I_{pol-} e I_{pol+} en los pines de entrada del amplificador.

$$R_p = R_f // (R/2)$$

$$\left(\frac{V_o}{I_p^-} \right)_{I_p^+ = 0} = - R_p A_D$$

$$\left(\frac{V_o}{I_p^+} \right)_{I_p^- = 0} = 0$$

$$T = \left(\frac{V_o}{V_o} \right)_{I_p^+ = I_p^- = 0} = - \frac{R_p}{R_f} A_D$$

Ahora para calcular el error, por superposición:

$$|\Delta V_o| = \left| \frac{\left(\frac{V_o}{I_p^-} \right)_{I_p^+ = 0} I_p^- + \left(\frac{V_o}{I_p^+} \right)_{I_p^- = 0} I_p^+}{1 - T} \right|$$

$$|\Delta V_o| = \frac{R_p A_D}{1 + \frac{R_p}{R_f} A_D}$$

Para $A_D \rightarrow \infty$

$$|\Delta V_o| = R_f I_p^-$$

Del datasheet $I_{P,typ}^- = 35 \text{ nA}$ (I_{BIAS} en datasheet)

$$|\Delta V_o| = 1,05 \text{ mV (Caso 1)}$$

$$|\Delta V_o| = 1,05 \text{ V (Caso 2)}$$

➤ Error por $RRMC < \infty$

Para la configuración inversora es despreciable, ya que el modo común aplicado a la entrada es prácticamente cero debido a que el potencial de ambas entradas es virtualmente el de tierra

➤ Error por $A_D < \infty$

$$\Delta V_o = \frac{FS}{T_o}$$

$$T_o \simeq \frac{A_D}{|A_{vfi}|}$$

Consideramos entrada de señal diferencial por pin V+ del amplificador, por lo tanto $A_{vfi}=61$, y $FS=10V$:

$$\Delta V_o = \frac{FS}{A_D/|A_{vfi}|} = \frac{10V}{10^5/61}$$

$$|\Delta V_o| = 6,1 \text{ mV}$$

➤ Error total de DC

Para caso 1, $R_i=50\Omega$:

$$\Delta V_o = \Delta V_{o,V_{os}} + \Delta V_{o,I_{os}} + \Delta V_{o,A_D}$$

$$\Delta V_o = 36,6 \text{ mV} + 1,05 \text{ mV} + 6,1 \text{ mV}$$

$$\Delta V_o = 43,75 \text{ mV}$$

Para caso 2, $R_i=100K\Omega$:

$$\Delta V_o = \Delta V_{o,V_{os}} + \Delta V_{o,I_{os}} + \Delta V_{o,A_D}$$

$$\Delta V_o = 36,6 \text{ mV} + 1,05 \text{ V} + 6,1 \text{ mV}$$

$$\Delta V_o = 1.0927 \text{ V}$$

- Errores AC

➤ Ancho de banda de plena potencia para $V_p=10V$

Calculamos con $SR = 0,5 V/us$ (datasheet)

$$f_h(SR) = \frac{SR}{2\pi \times V_{pk}} = \frac{0,5 V/us}{2\pi \times 10V}$$

$$f_h(SR) = 7,96 KHz$$

➤ Ancho de banda de pequeña señal

Calculamos con $f_t = 1 MHz$ y $A_{D0} = 100 dB = 10^5$ (datasheet)

$$f_h = K f_t$$

$$K = \frac{R/2}{R/2 + R_f} = \frac{1}{61}$$

$$f_h = \frac{1 MHz}{61}$$

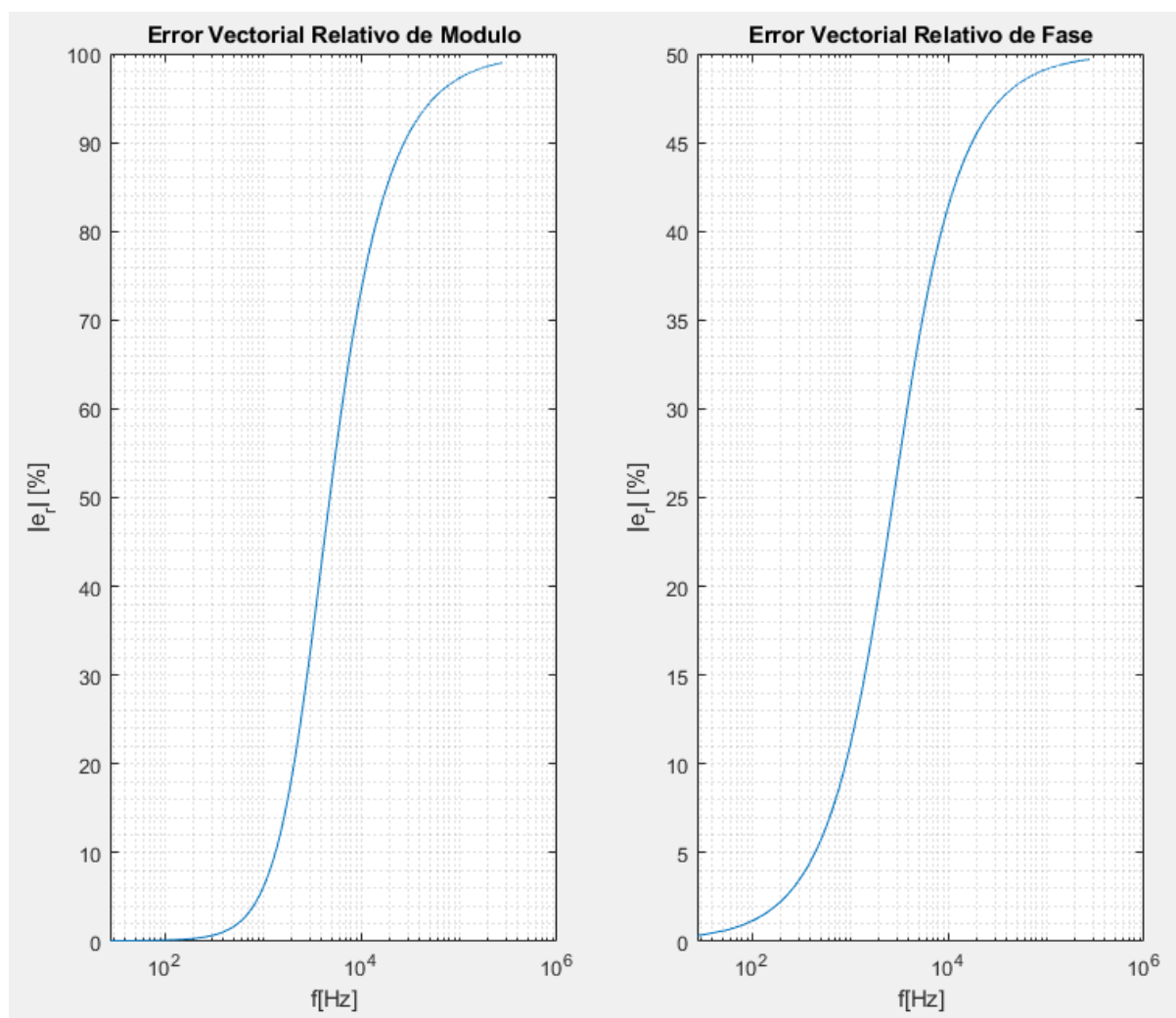
$$f_h = 16,4 KHz$$

➤ Tabla de error relativo de módulo y fase

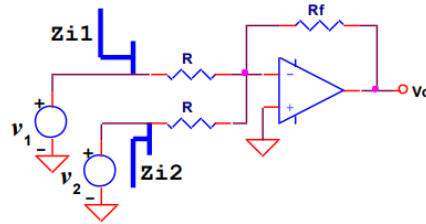
$f[KHz]$	$ e_v(\omega) [\%] = \left \frac{ A_{vfi} - A_{vf}(\omega) }{ A_{vfi} } \right \times 100$	$\phi e_v(\omega)[\%] = \left \frac{180^\circ - \phi A_{vf}(\omega)}{180^\circ} \right \times 100$
1,7	1,0634	3,2871
3,4	0,51	6,5056
5,1	2,9766	9,5950
6,8	6,1406	12,5091

8,5	9,7876	15,2180
10,2	13,7163	17,7079
11,9	17,7577	19,9774
13,6	21,7823	22,0344
15,3	25,6990	23,8926
17	29,4490	25,5684

Gráficos de los errores hechos con matlab:



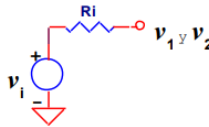
Circuito



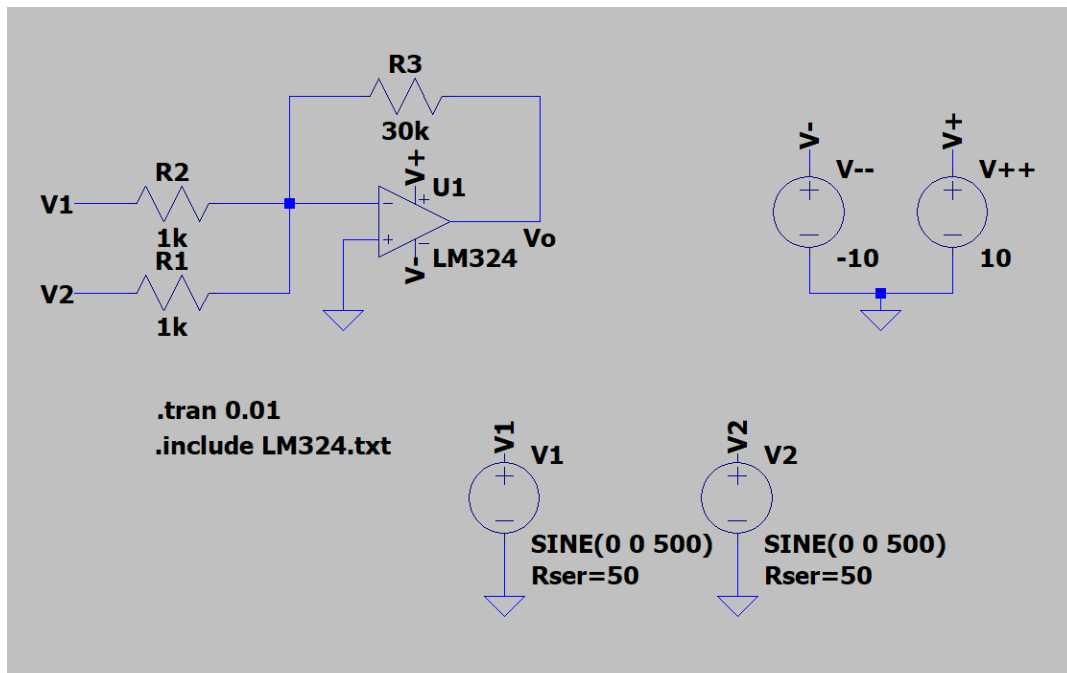
- Amplificador Operacional LM741 o LM324
- Alimentación $V_{cc} = 10V$, $V_{ss} = -10V$
- Ganancia en banda media $A=V_o/V_1$ y $A=V_o/V_2$ debe ser igual a 30 veces.
- Z_i del amplificador no puede alterar o cargar la fuente de señal, es decir, $R_i \ll Z_{i1}$ y Z_{i2} . (al menos 10 veces)
- Usar Resistencias $\leq 1M\Omega$

Las fuentes V_1 y V_2 deben considerarse en las condiciones 1.A y 1.B

- 1.A.- $R_i = 50\Omega$
 1.B.- $R_i = 100K\Omega$



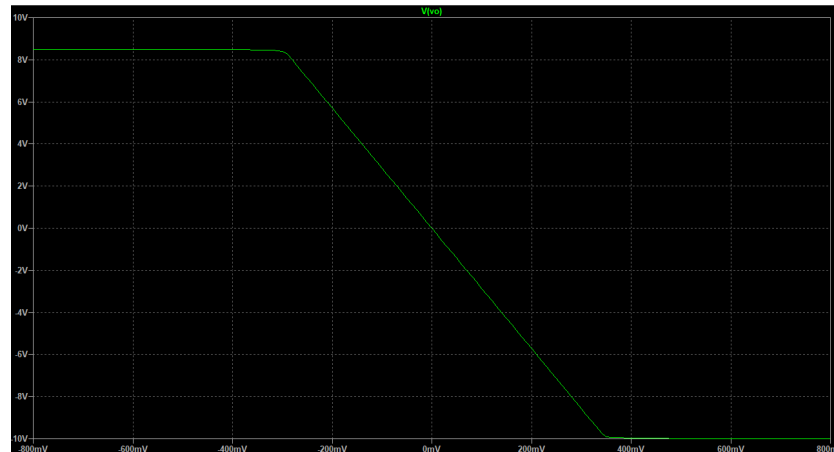
- *Diagrama esquemático en simulación*



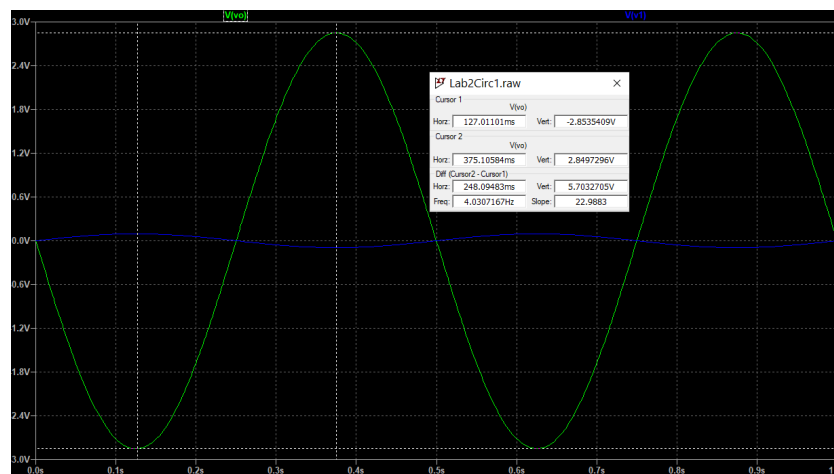
Análisis para $R_i = 50\Omega$

- *Ganancia* $V_o = f(V_1)$

Característica entrada-salida

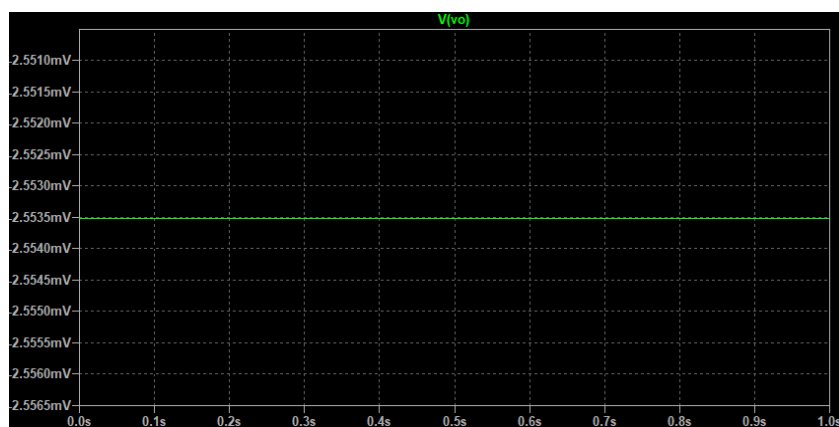


Análisis Transient



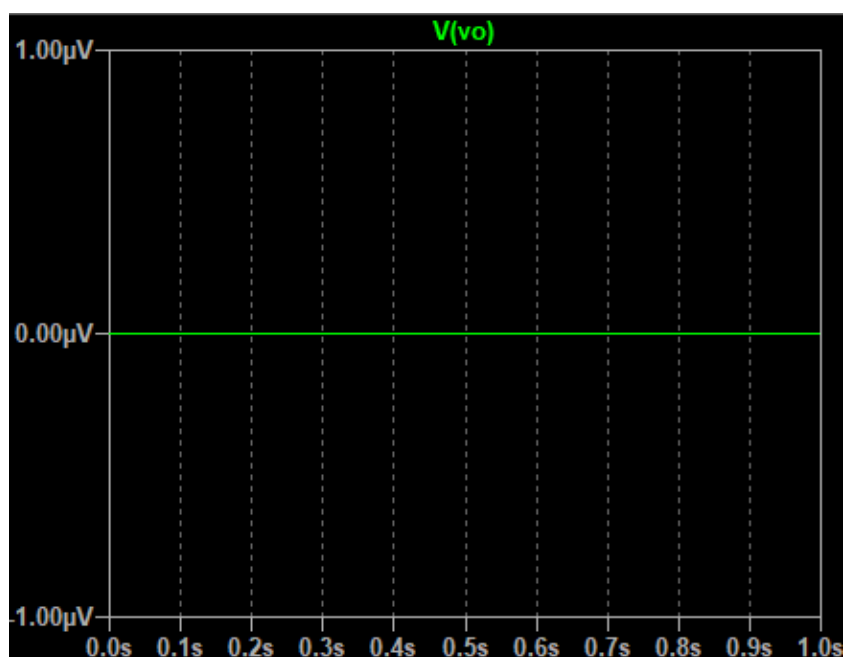
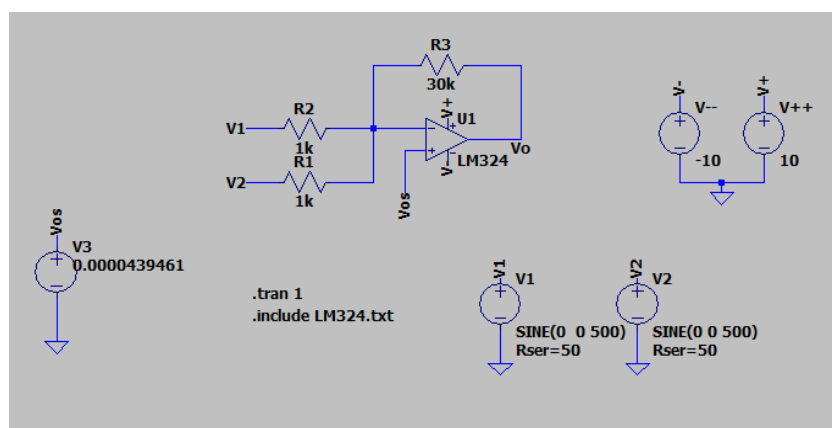
- Errores en DC

$$V_{os} - I_{os}$$



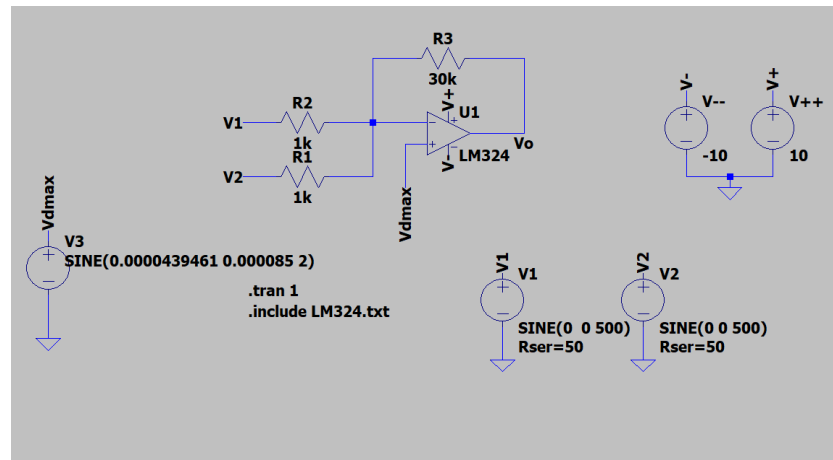
$$\Delta V_{os} + \Delta I_{os} = -2,5535\text{mV}$$

Para eliminar el error de offset se procede a conectar una tensión CC en V+.

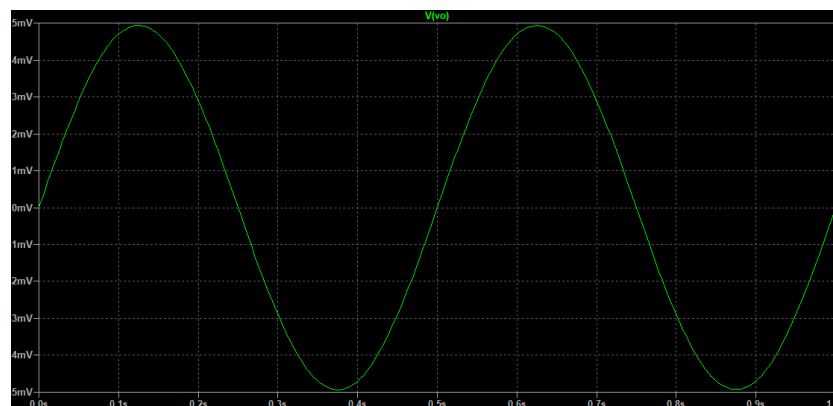


$$Ad < \infty$$

Simulación



$$V_{Dm\acute{a}x} = \frac{FS}{Ad}$$

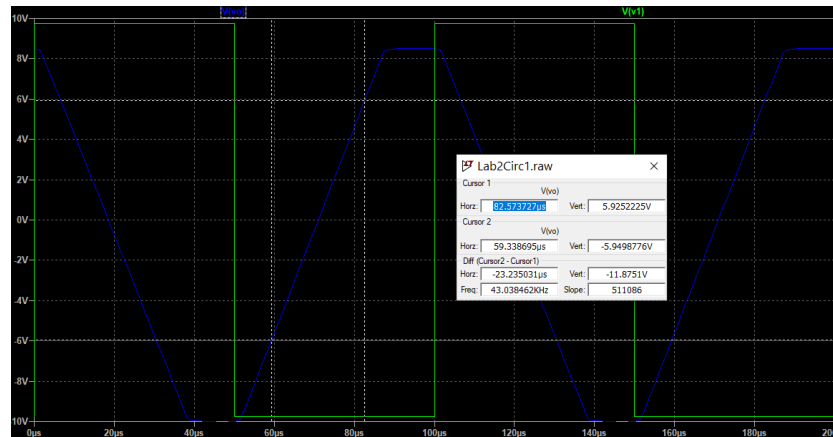


$$\Delta V_o_{Ad < \infty} = 5mV$$

- *Errores en AC - Slew Rate*

Simulación

Injectamos por V1 (V2 a masa) una señal cuadrada de $\pm 10V$, y frecuencia de 10KHZ:



$SR = 0,51 V/\mu s$ (pendiente positiva) ; $0,497 V/\mu s$ (pendiente negativa).

$$f_{h1}(SR) = \frac{0.497 V/\mu s}{2\pi \times 10V} = 7,91 KHz$$

$$f_{h2}(SR) = \frac{0.51 V/\mu s}{2\pi \times 10V} = 8.12 KHz$$

- *Errores en AC - Diagrama de Bode*

Análisis teórico

Datos:

$$f_t = 1 \text{ MHz}$$

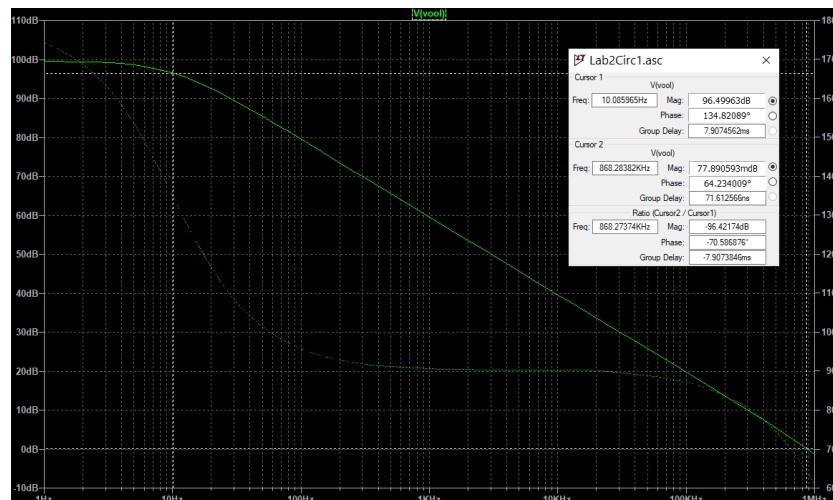
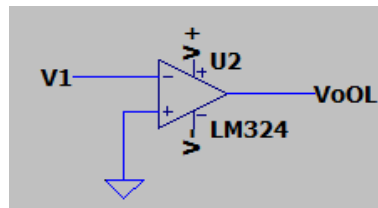
$$A_{d(0)} = 10^5 = 100 \text{ dB}$$

$$f_h = \frac{1}{K} \times f_t = 16,39 \text{ KHz (calculado)}$$

$$f_1 = \frac{f_t}{A_{d(0)}} = 10 \text{ Hz (calculado)}$$

Simulación

→ Característica del dispositivo LM324:

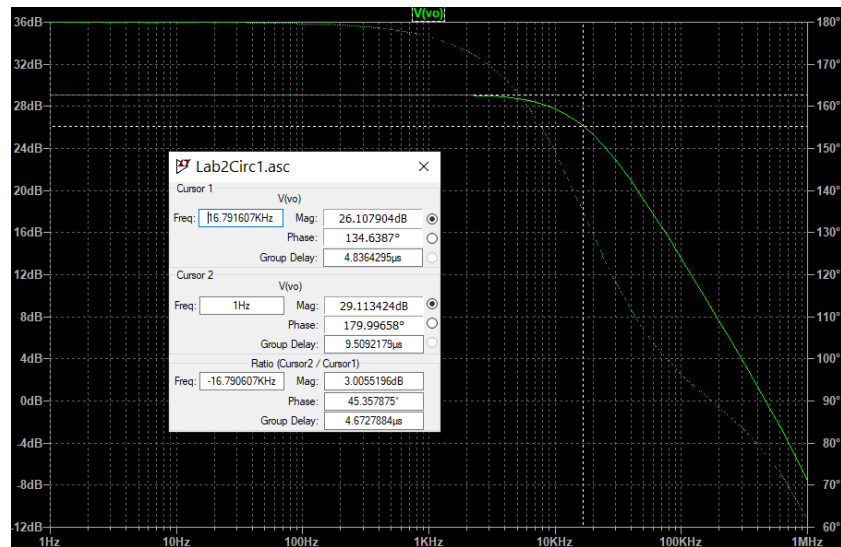


$$f_t = 875 \text{ KHz}$$

$$A_{d(0)} = 99,5 \text{ dB}$$

$$f_1 = \frac{f_t}{A_{d(0)}} = 10,0875 \text{ Hz}$$

→ Respuesta en frecuencia del circuito propuesto:



$$A_{vf(0)} = 29,11 \text{ dB} = 28,54 \text{ V/V (es distinto de 30 debido que no tuvimos en cuenta } R_i \text{ de la fuente)}$$

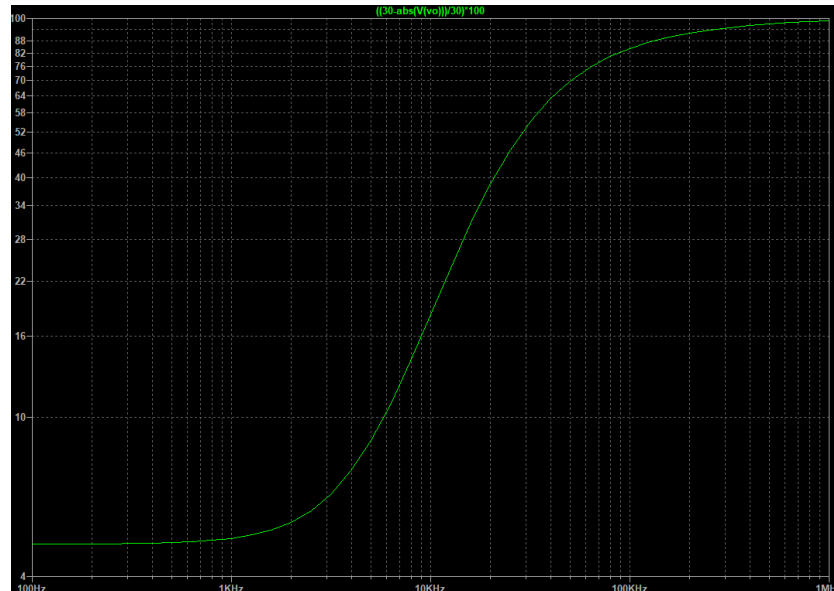
$$A_{vf(0)}(R_i) = \frac{R_f}{R_i + R_{1,2}} = \frac{30k\Omega}{50\Omega + 1k\Omega} = 28,57 \text{ V/V (Teórico, más cerca del simulado)}$$

$$f_h = 16,79 \text{ KHz}$$

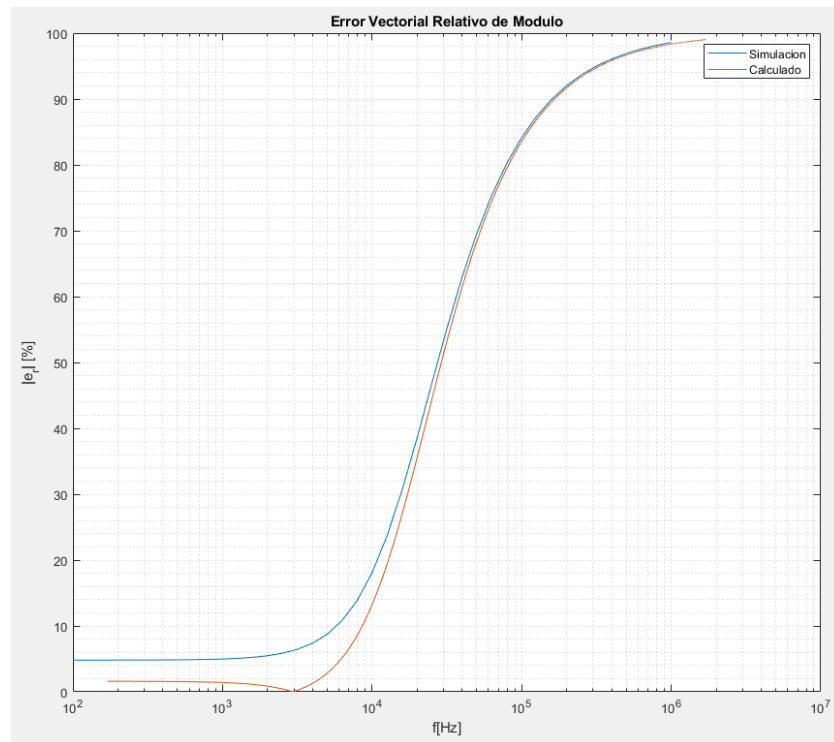
$$f_{tcal} = K \times f_h = 958 \text{ KHz}$$

- *Errores en AC*

Simulación



Comparación



Como podemos ver en la simulación tenemos un error cercano al 5% en baja frecuencia, esto se debe que como ya observamos en lugar de una ganancia de 30(ideal), tenemos una ganancia de 28,54.

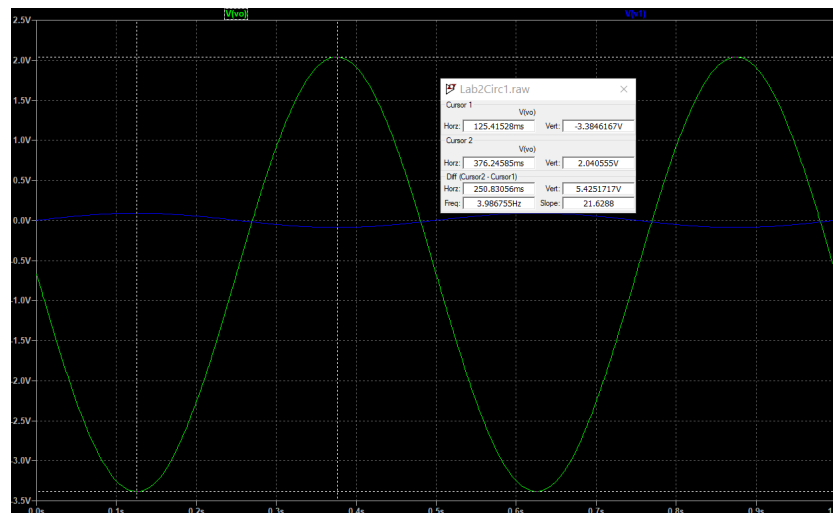
Análisis para $R_i = 100K\Omega$

- *Ganancia* $V_o = f(V_1)$

Característica entrada-salida



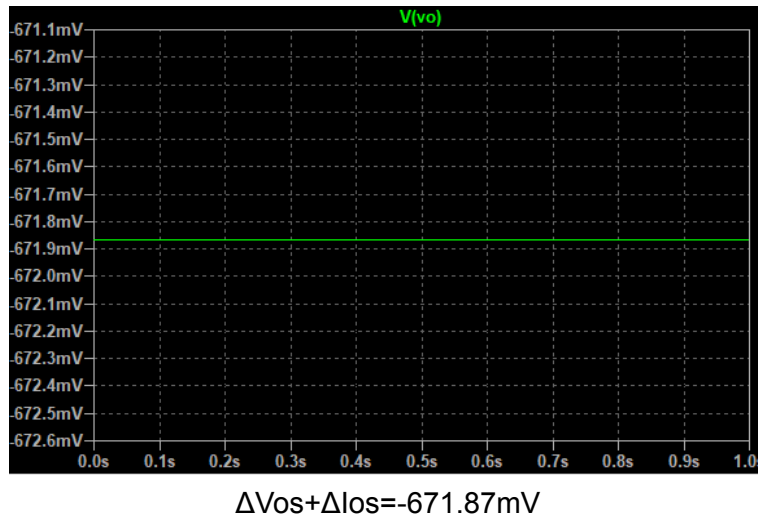
Análisis Transient



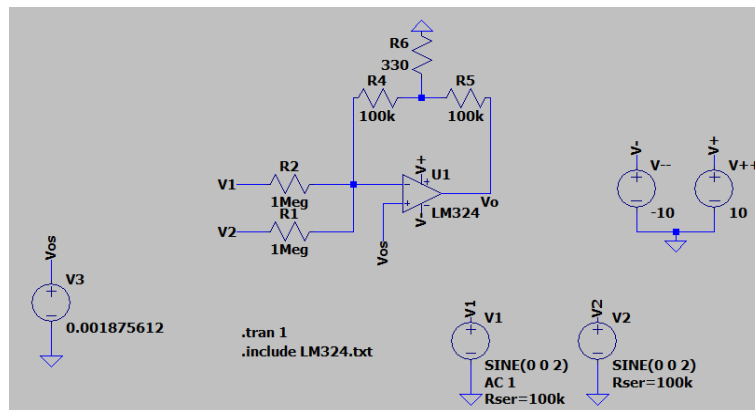
- *Errores en DC*

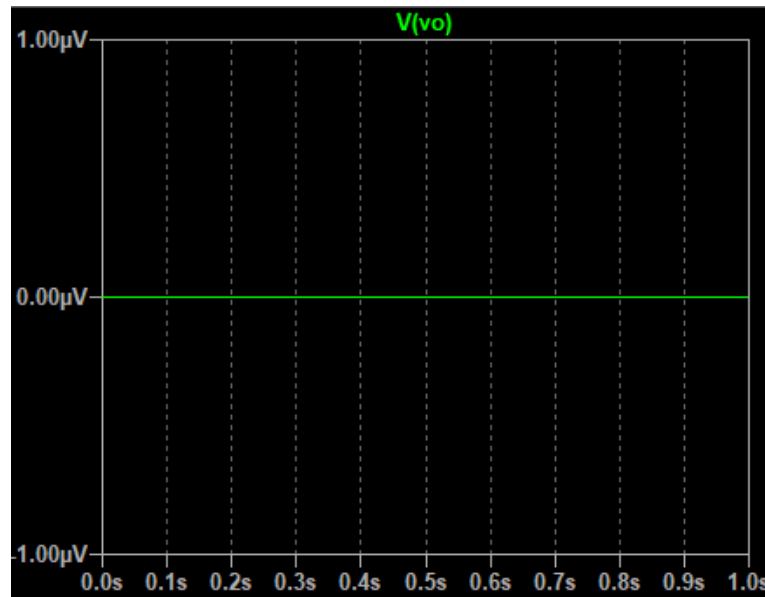
$$V_{os} - I_{os}$$

Simulación



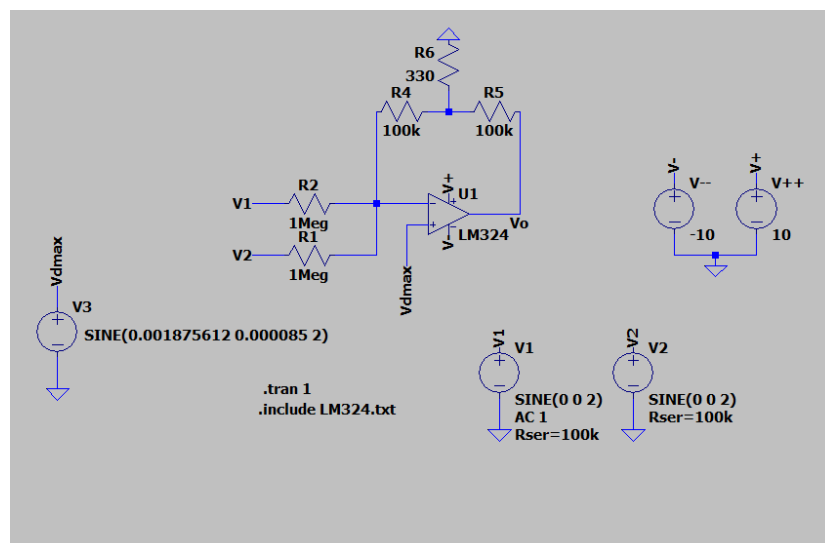
Para eliminar el error de offset se procede a conectar una tensión CC en V+.



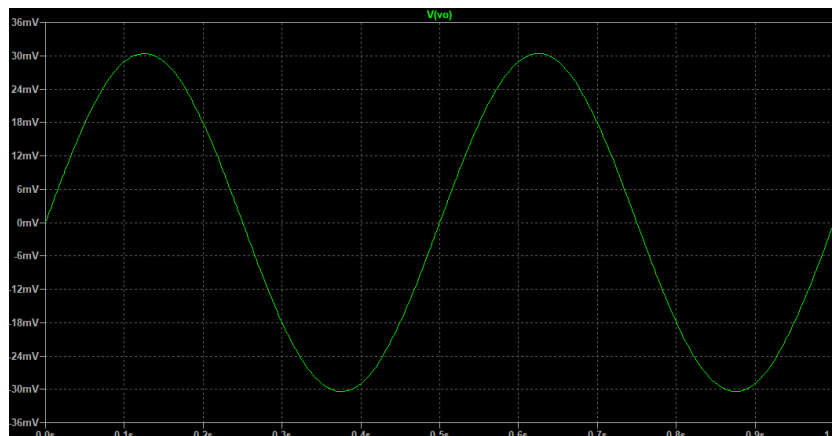


$$Ad < \infty$$

Simulación



$$V_{Dm\acute{a}x} = \frac{FS}{Ad}$$

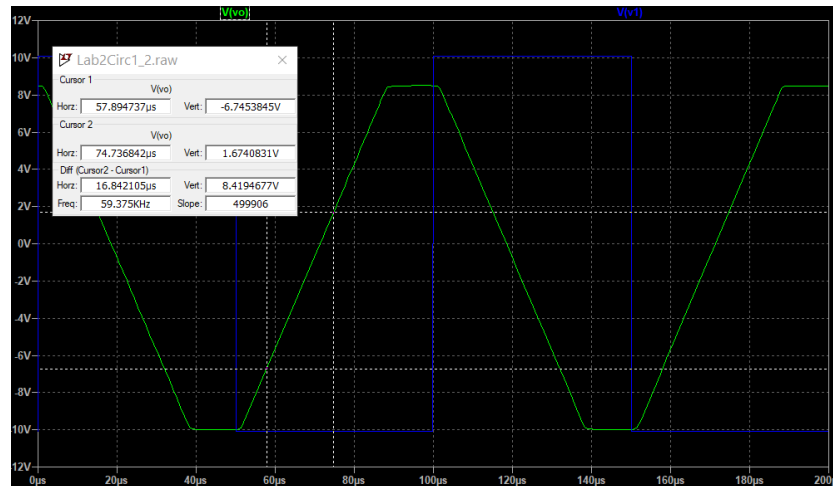


$$\Delta V o_{Ad < \infty} = 30mV$$

- *Errores en AC - Slew Rate*

Simulación

Injectamos por V1 (V2 a masa) una señal cuadrada de $\pm 10V$, y frecuencia de 10KHZ:



$SR = 0,499 V/us$ (pendiente positiva) ; $0,498 V/us$ (pendiente negativa).

$$f_{h1}(SR) = \frac{0.498 V/us}{2\pi \times 10V} = 7,96 KHz$$

$$f_{h2}(SR) = \frac{0.499 V/us}{2\pi \times 10V} = 7,93 KHz$$

- **Errores en AC - Diagrama de Bode**

Análisis teórico

Datos:

$$f_t = 1 \text{ MHz}$$

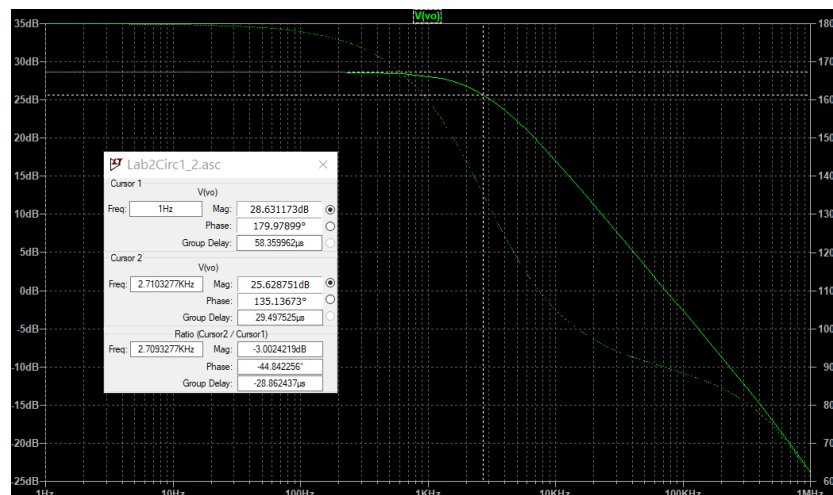
$$A_{d(0)} = 10^5 = 100 \text{ dB}$$

$$f_h = \frac{1}{K} \times f_t = 3,22 \text{ KHz (calculado)}$$

$$f_1 = \frac{f_t}{A_{d(0)}} = 10 \text{ Hz (calculado)}$$

Simulación

→ Respuesta en frecuencia del circuito propuesto:



$$A_{vf(0)} = 28,63 \text{ dB} = 27 \text{ V/V (es distinto de 30 debido que no tuvimos en cuenta Ri de la fuente)}$$

$$A_{vf(0)}(R_i) = \frac{R_f}{R_i + R_{1,2}} = \frac{30 \text{ M}\Omega}{100 \text{ k}\Omega + 1 \text{ M}\Omega} = 27,27 \text{ V/V (Teórico, más cerca del simulado)}$$

$$f_h = 2,71 \text{ KHz (esto se debe a las resistencias internas de las fuentes)}$$

Si tenemos en cuenta las Ri para el cálculo de K:

$$K = 359,5 ; f_h = K \times f_t = 2,78 \text{ KHz (calculado para } f_t = 1 \text{ MHz)}$$

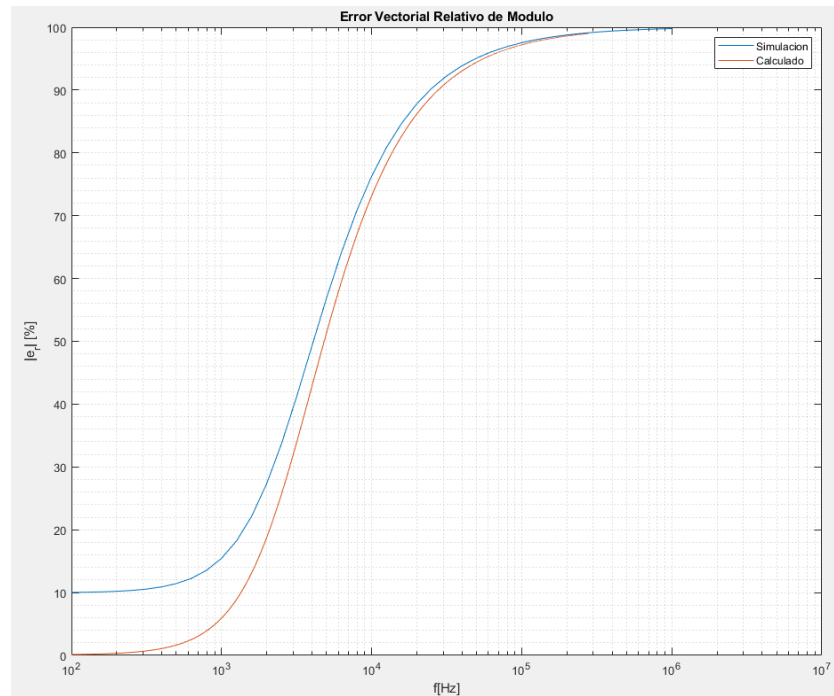
$$f_{t \text{ cal}} = K \times f_h = 974,3 \text{ KHz (calculado)}$$

- *Errores en AC - Error relativo de módulo y fase*

Simulación



Comparación



Como podemos ver en la simulación tenemos un error cercano al 5% en baja frecuencia, esto se debe que como ya observamos en lugar de una ganancia de 30(ideal), tenemos una ganancia de 27.