

Síntesis de redes activas

Laboratorio N°2: Amplificadores operacionales reales: Errores

Profesor Titular: Dr. Ing. Pablo Ferreyra
Profesor Adjunto: Ing. César Reale
Alumnos: Campos Mariano, Enzo Verstraete

26 de noviembre de 2024

Resumen

Introducir al estudiante en el diseño, armado, medición y análisis de circuitos amplificadores lineales, teniendo en cuenta las fuentes de error del AO real, y como se relacionan con las condiciones de entorno del circuito.

1. Circuito I: Sumador inversor

En esta sección se diseña un amplificador operacional (LM741 o LM324) en configuración sumador inversor, alimentado con $V_{cc} = 10[V]$, la ganancia en la banda media debe ser de 30 veces, la impedancia de entrada no debe cargar la fuente de señal:

1.1. Análisis de la ganancia de tensión en la banda media

Aplicamos el teorema de superposición, obteniendo la ganancia de tensión respecto a una entrada anulando la otra, y luego sumando los efectos:

Tanto para V_o/V_2 como para V_o/V_1 la ganancia resulta la expresión del OPAM inversor:

$$V_o = \frac{-R_f}{R} V_1 \quad (1)$$

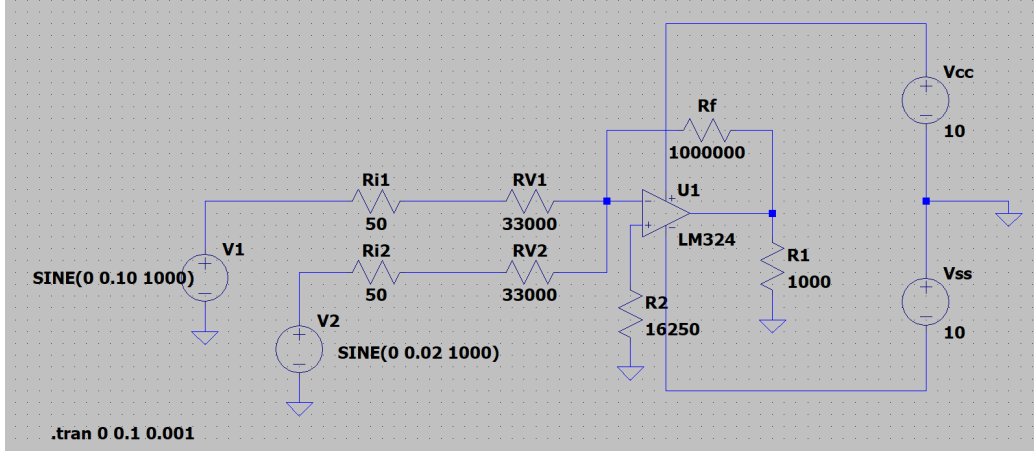


Figura 1: Esquemático del circuito

$$V_o = \frac{-R_f}{R} V_2 \quad (2)$$

La ganancia resulta:

$$V_o = \frac{-R_f}{R} (V_1 + V_2) \quad (3)$$

Para obtener una ganancia aproximada de 30 veces seleccionamos las resistencias de valores comerciales con los siguientes valores $R_f = 1[Mohm]$ y $R = 33[Kohm]$

1.2. Análisis de errores en continua

Para obtener la expresión total de los errores en continua tomamos del datasheet los valores de tensión/ corriente offset, ganancia en continua a lazo abierto y RRMC:

Error de corriente:

$$\Delta V(i_{pol-}) = \frac{(I_{pol-})(R//R//R_f)(-A_d)}{1 - T} \quad (4)$$

Agregamos una resistencia de ecualización en el terminal positivo para reducir el error:

$$Z = (R//R//R_f) \quad (5)$$

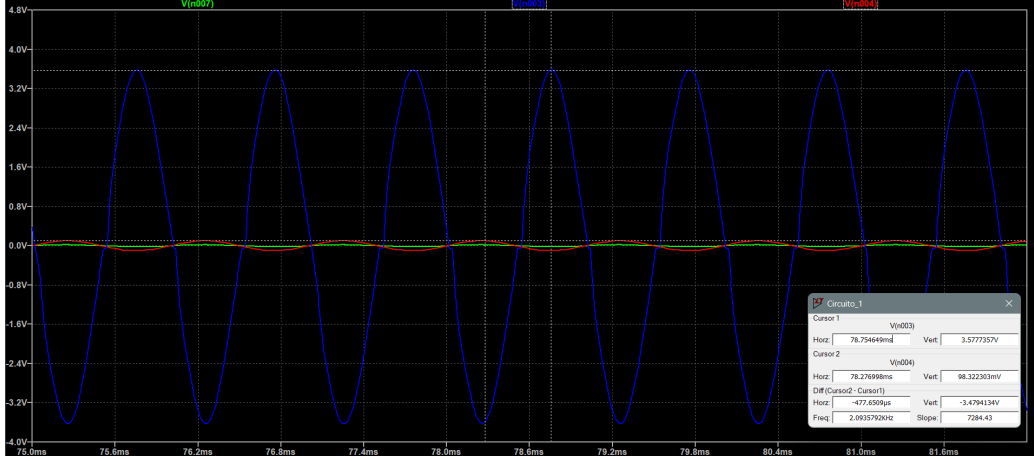


Figura 2: Ganancia de tensión

$$\Delta V(ipol+) = \frac{(Ipole)(R//R//Rf)(Ad)}{1 - T} \quad (6)$$

$$T = \frac{-R//R(Ad)}{R//R + Rf} \quad (7)$$

Resultando:

$$\Delta V = \frac{[(Ipole)(R//R//Rf)(Ad)] - [(Ipole)(R//R//Rf)(-Ad)]}{1 + \frac{R//R(Ad)}{R//R + Rf}} \quad (8)$$

Simplificando la expresión y teniendo en cuenta que $IOS = (Ipole) - (Ipole)$ tenemos:

$$\Delta V = \frac{(R//R//Rf)(R//R + Rf)IOS}{R//R} \quad (9)$$

Con los valores de resistencias obtenidos en la sección anterior y teniendo en cuenta que la corriente de offset para el amplificador operacional LM324 es de $50[pA]$, el error de corriente resulta en $0,05[V]$

Error de tensión:

$$\Delta V = \frac{AdVOS}{1 + \frac{R//R(Ad)}{R//R + Rf}} \quad (10)$$

Simplificando la expresión:

$$\Delta V = \frac{(R//R + Rf)VOS}{R//R} \quad (11)$$

Teniendo en cuenta que la tensión de offset del amplificador operacional es de $2[mV]$ el error de tension resulta en $0,123[mV]$

Error de ganancia no infinita:

$$\Delta V = \frac{FS}{|T|} \quad (12)$$

$$\Delta V = \frac{FS}{\frac{R//R(Ad)}{R//R+Rf}} \quad (13)$$

La ganancia no infinita para el LM324 es de $100dB$ el error resulta en $6,2[mV]$

Error de relación de rechazo en modo común no infinita: En este caso tenemos el terminal positivo del amplificador operacional a masa por lo que el error de RRMC es nulo

1.3. Simulación de error en continua

Para aproximar cuando es el error de continua se pasivo las entradas del operacional y se mide la tensión de salida, en este caso es de $20[mV]$

1.4. Ancho de banda de pequeña señal

$$F_H = \frac{FT}{Avf} \quad (14)$$

Teniendo en cuenta que $FT = 1[MHz]$ y la ganancia a lazo cerrado es 30 tenemos que la frecuencia de corte en alta es de $F_H = 33,3[KHz]$

1.5. Ancho de banda a plena potencia

Para calcular el ancho de banda a plena potencia obtenemos del datasheet el valor de "slew rate" del operacional en este caso, para el LM324 es de $0,3[V/uS]$, luego:

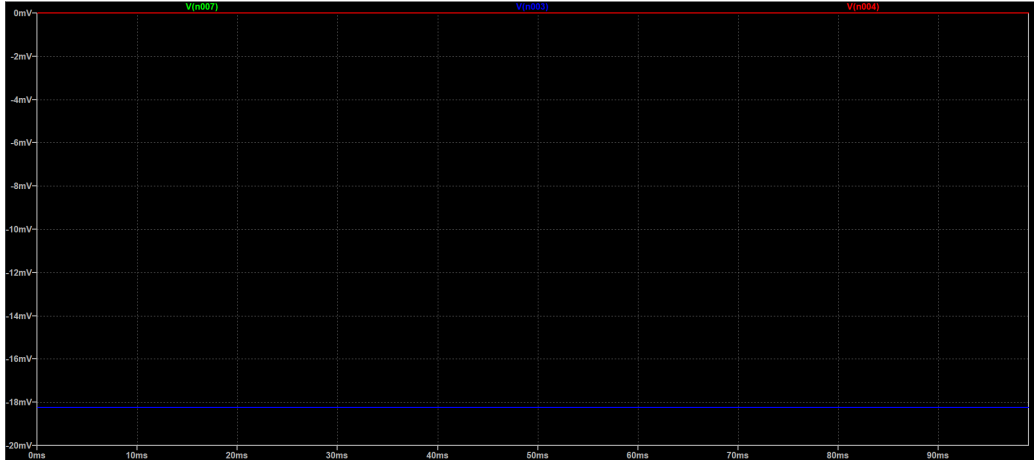


Figura 3: Simulación del error en DC

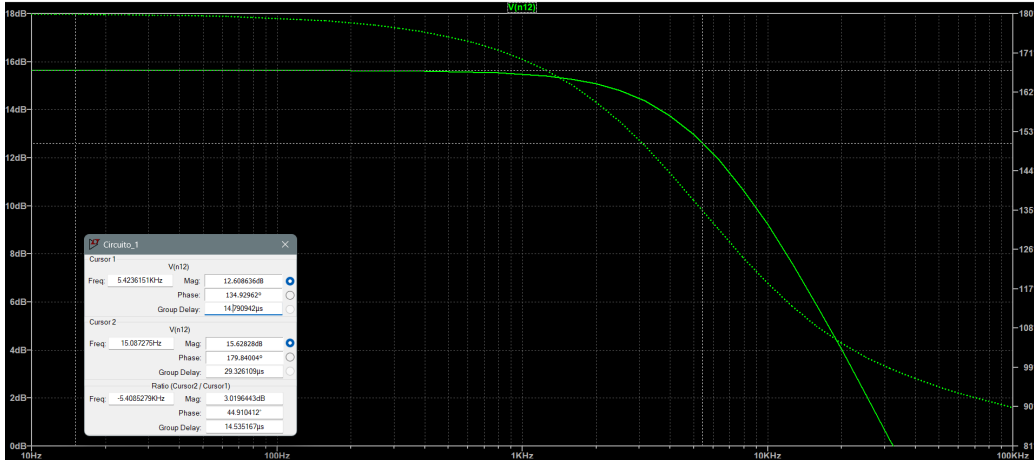


Figura 4: Ancho de banda de baja señal

$$F_{[Hp]} = \frac{SR}{2\pi FS} = 4775[Hz] \quad (15)$$

1.6. Tabla de error normalizado

El Error Vectorial Normalizado (EVN), también conocido como Normalized Error Vector (NEV) en inglés, es una medida utilizada en la caracteriza-

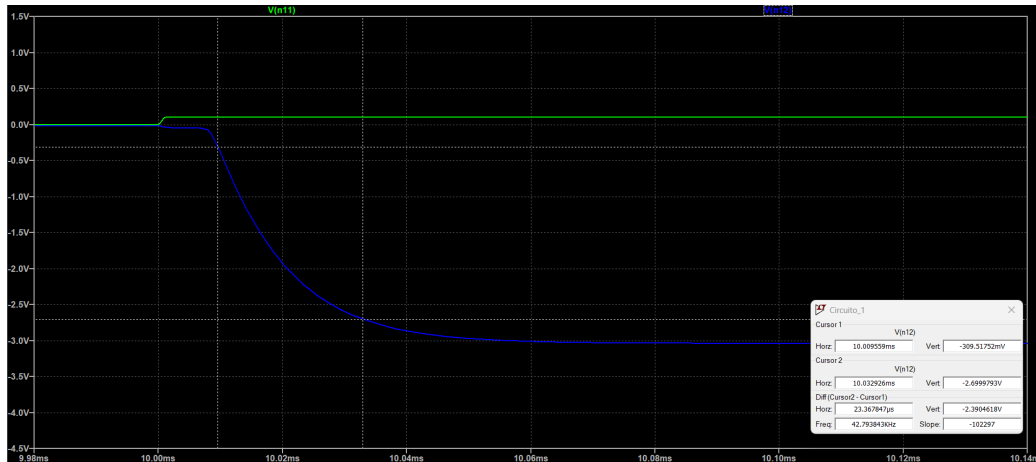


Figura 5: Slew rate

ción de amplificadores operacionales (op-amps) para evaluar su desempeño en términos de precisión y linealidad. Es una forma de cuantificar la desviación de la salida real del op-amp con respecto a la salida ideal para una determinada condición de operación. Para el cálculo de dicho error, utilizamos el siguiente script de matlab:

```
% Parámetros
fh = 33e3; % Frecuencia del polo en Hz
f = fh * (0.1:0.1:1); % Vector de frecuencias
s = 2*pi*1i*f; % Variable compleja s

% Función de transferencia
H = 30 ./ (1 + s ./ (2*pi*fh));

% Error vectorial normalizado
error_norm = (H - 30) ./ 30;

% Mostrar resultados
disp('Frecuencia (Hz) | Error normalizado');
disp('-----');
for i = 1:length(f) %n#caracter.decimales
    fprintf('%8.2f | %8.4f < %6.2f°\n', f(i), abs(error_norm(i)), angle(error_norm(i))*180/pi);
end
```

Figura 6: Script para calcular el EVN

La salida por la consola resulta:

| Frecuencia (Hz) | Error normalizado |
|-----------------|-------------------|
| 3300.00 | 0.0995 < -95.71° |
| 6600.00 | 0.1961 < -101.31° |
| 9900.00 | 0.2873 < -106.70° |
| 13200.00 | 0.3714 < -111.80° |
| 16500.00 | 0.4472 < -116.57° |
| 19800.00 | 0.5145 < -120.96° |
| 23100.00 | 0.5735 < -124.99° |
| 26400.00 | 0.6247 < -128.66° |
| 29700.00 | 0.6690 < -131.99° |
| 33000.00 | 0.7071 < -135.00° |

Figura 7: Tabla de error

2. Circuito II: Amplificadores en cascada con puente de Wheatstone

En este circuito tenemos un puente de Wheastone que produce una tensión diferencial, esta se amplifica mediante dos etapas, una no inversora (primera) y otra no inversora (segunda).

2.1. Análisis de la ganancia de tensión en la banda media

Para la primera etapa tenemos amplificador en configuración no inversora, la ganancia resulta:

$$\frac{V_x}{V_{in}} = \left(1 + \frac{R1}{aR1}\right) \quad (16)$$

Teniendo en cuenta que $aR1 = 47[Kohm]$ y $R1 = 2,2[Kohm]$, la ganancia resulta: 1,046

Para la segunda etapa tenemos un inversor donde la ganancia de tensión resulta:

$$\frac{V_o}{V_x} = \frac{-aR2}{R2} \quad (17)$$

Teniendo en cuenta que $aR2 = 47[Kohm]$ y $R2 = 2,2[Kohm]$, la ganancia resulta: $-21,36$ Por lo tanto la ganancia resultante es de $-22,34$, aproximadamente.

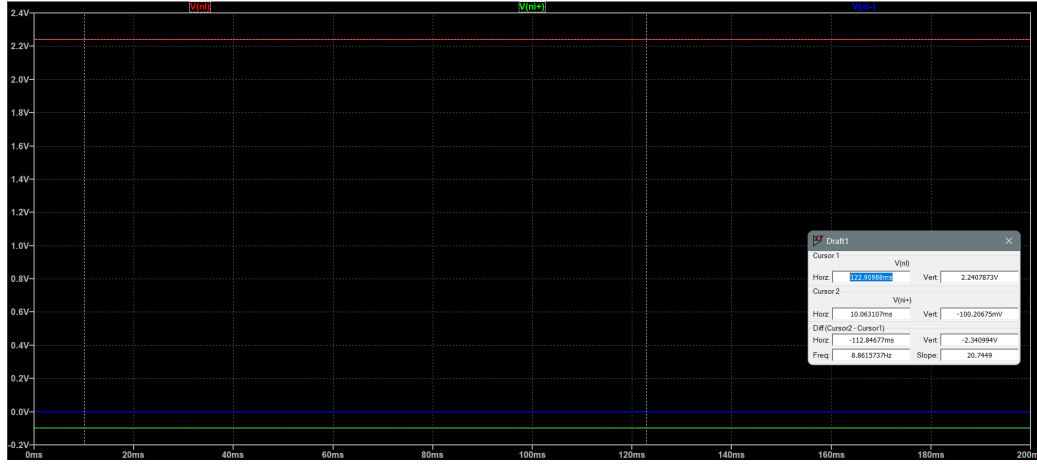


Figura 8: Ganancia de tension en la banda media

2.2. Análisis de error en continua

Error de corriente del primer amplificador:

$$V(I_{pol+}) = \frac{(I_{pol+})(R_p // R_p)(Ad)(-aR_2/R_2)}{(1 - T_1)} \quad (18)$$

$$V(I_{pol-}) = \frac{(I_{pol-})(aR_1 // R_1)(-Ad)(-aR_2/R_2)}{(1 - T_1)} \quad (19)$$

$$T_1 = \frac{-aR_1(Ad)}{R_1} \quad (20)$$

Simplificando la expresión queda:

$$\Delta V = \frac{(I_{pol})(-aR_2/R_2)[aR_1 // R_1 - R_p // R_p]}{\frac{aR_1}{R_1}} \quad (21)$$

Reemplazando los valores de las resistencias y conociendo el valor de la corriente de polarización del amplificador operacional, $I_{pol} = 90[nA]$, el error de corriente para la primera etapa es de $40,04[uV]$

Error de corriente del segundo amplificador:

$$V(I_{pol+}) = \frac{(I_{pol+})(R_p // R_p)(Ad)}{(1 - T_2)} \quad (22)$$

$$V(I_{pol}-) = \frac{(I_{pol}-)(aR2//R2)(-Ad)}{(1-T2)} \quad (23)$$

$$T2 = \frac{-R2(Ad)}{aR2} \quad (24)$$

Simplificando la expresión queda:

$$\Delta V = \frac{(I_{pol})[(Rp//Rp) - (R2//aR2)]}{\frac{R2}{aR2}} \quad (25)$$

El error de corriente para el segundo operacional resulta $0,86[mV]$

Error de tensión de offset para el primer operacional

$$\Delta V = \frac{VOS(aR2//R2)}{\frac{aR1}{R1}} \quad (26)$$

Para una tensión de offset de $2[mV]$ el error resulta $2[mV]$

Error de tensión para el segundo operacional

$$\Delta V = \frac{VOS}{\frac{R2}{aR2}} \quad (27)$$

Error resulta $42,7[mV]$

Error de ganancia no infinita:

$$\Delta V = \frac{FS}{|T1|} = 2,36[uV] \quad (28)$$

$$\Delta V = \frac{FS}{|T2|} = 1,068[mV] \quad (29)$$

Error en relación de rechazo en modo común no infinita (solo para el segundo operacional):

$$\Delta V = \frac{(\frac{Vc}{RRMC})}{\frac{R2}{aR2}} \quad (30)$$

La relación de rechazo en modo común para el LM324 es de $70[dB]$ error resultante es de $33,7[mV]$

El error total en continua resulta: $80,3[mV]$, calculamos la resolución en bits para el ADC:

$$\Delta V <= \frac{FE}{2^n} \quad (31)$$

$$n = \log\left(\frac{FS}{\Delta V}\right) = 6bits \quad (32)$$



Figura 9: Error en DC