



FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS y NATURALES

Síntesis de Redes Activas

Laboratorio N° 1

“AO Ideal: Circuitos Analógicos Lineales y No Lineales.”

Integrantes:
Angeloni, Luciano
Guyot, Lourdes
Schreiner, Federico

Docente Ing. Pablo Ferreyra

Córdoba, República Argentina
2025

Índice

1. Circuito I: AMPLIFICADOR DIFERENCIAL	2
1.1. Esquemático y datos	2
1.2. Análisis teórico	2
1.2.1. Análisis de modo diferencial	3
1.2.2. Análisis de modo común	4
1.2.3. RRMC	4
1.2.4. Impedancias	4
1.3. Simulación y mediciones de laboratorio	4
1.3.1. Caso $V_2 = 0$, y $V_1 \neq 0$	4
1.3.2. Caso $V_1 = 0$ y $V_2 \neq 0$	5
1.3.3. Caso $V_{o2} = f(V_d)$	6
1.3.4. Caso $V_{o2} = f(V_c)$	6
1.3.5. RRMC	6
1.3.6. Impedancias Z_{i1} y Z_{i2}	7
2. Circuito II: FUENTE DE CORRIENTE CONTROLADA POR TENSIÓN	9
2.1. Esquemático y datos	9
2.2. Análisis teórico	9
2.3. Simulación	11
3. Circuito III: RECTIFICADOR DE PRECISIÓN	12
3.1. Esquemático y datos	12
3.2. Análisis teórico	12
3.2.1. $V_{o1} = f(V_{in})$ con $0V < V_{in}$	12
3.2.2. $V_{o2} = f(V_{in})$ con $0V < V_{in}$	13
3.2.3. $V_{o1} = f(V_{in})$ con $0V > V_{in}$	13
3.2.4. $V_{o2} = f(V_{in})$ con $0V > V_{in}$	13
3.3. Simulación y mediciones de laboratorio	14
4. Circuito IV: COMPARADOR CON HISTÉRESIS	16
4.1. Esquemático y datos	16
4.2. Análisis teórico	17
4.3. Simulación:	19
4.4. Conclusiones	21

1. Circuito I: AMPLIFICADOR DIFERENCIAL

1.1. Esquemático y datos

Se realiza el análisis teórico del circuito que se muestra en la siguiente figura: Este circuito consiste

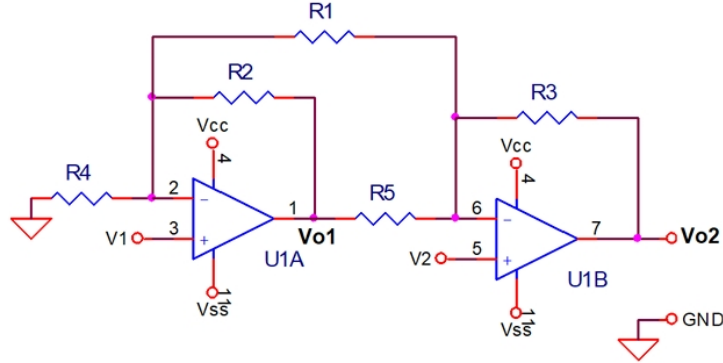


Figura 1: Esquemático del circuito N° 1

en un arreglo de dos amplificadores operacionales cuya función es rechazar la señal común y amplificar la diferencial.

Datos:

- Amplificador operacional: LM324
- $V_{cc} = 10 \text{ [V]}$
- $V_{ss} = -10 \text{ [V]}$
- $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R$

1.2. Análisis teórico

Para facilitar el análisis del circuito, se considerará a ambos AO ideales, es decir $V^+ = V^-$ y $A_d = \infty$, se analizarán los AO por separado, y luego se aplicará el teorema de la superposición.

Caso $V_2 = 0$, y $V_1 \neq 0$

Pasivada la fuente V_2 y analizando las corrientes del nodo de V^- del primer amplificador, resultan las siguientes ecuaciones:

$$-I_1 = I_2 + I_3$$

Esto es:

$$-\frac{V_1}{R_4} + \frac{V_{o1} - V_1}{R_2} - \frac{V_1}{R_1} = 0$$

$$\frac{V_1}{R_4 + R_2 + R_1} = \frac{V_{o1}}{R_2}$$

Como $R_1 = R_2 = R_4 = R$

$$V_1 \frac{R^2 + R^2 + R^2}{R^3} = \frac{V_{o1}}{R}$$

$$V_1 \frac{3R^3}{R^3} = V_{o1}$$

$$3V_1 = V_{o1}$$

Luego, haciendo el mismo análisis para calcular V_{o2} respecto a V_1 en el nodo de V^- del segundo amplificador operacional:

$$-I_5 = I_4 + I_3$$

$$\frac{V_{o1}}{R_5} + \frac{V_{o2}}{R_3} + \frac{V_1}{R_1} = 0$$

$$\frac{3V_1}{R_5} + \frac{V_{o2}}{R_3} + \frac{V_1}{R_1} = 0$$

$$\frac{4V_1}{R} + \frac{V_{o2}}{R} = 0$$

$$\Rightarrow -4V_1 = V_{o2}$$

Caso $V_1 = 0$ y $V_2 \neq 0$

Utilizando la ley de las corrientes en los nodos en la primer etapa:

$$I_{R2} + I_{R1} = 0$$

$$\frac{V_{o1}}{R_2} + \frac{V_2}{R_1} = 0$$

Como se mencionó antes, todas las resistencias son iguales, por lo que resulta:

$$V_{o1} = -V_2$$

Analizando la entrada negativa del segundo AO, las corrientes son definidas:

$$\frac{V_o - V_2}{R_3} - \frac{V_{o1} - V_2}{R_5} + \frac{V_2}{R_1} = 0$$

$$V_{o2} - V_2 - V_2 + V_{o1} - V_2 = 0$$

$$V_{o2} - 4V_2 = 0$$

$$V_{o2} = 4V_2$$

Aplicando la técnica de superposición:

$$V_o = 4V_2 - 4V_1$$

1.2.1. Análisis de modo diferencial

Considerando $V_d = V_2 - V_1$ y la tensión de salida calculada anteriormente, resulta

$$V_o = 4V_d$$

1.2.2. Análisis de modo común

Sabiendo que $V_c = \frac{V_1 + V_2}{2}$, entonces:

$$V_2 = \frac{V_{o2}}{4}; \quad V_1 = -\frac{V_{o2}}{4}$$

$$\frac{V_2 + V_1}{2}(4 - 4) = V_{o2}$$

$$V_{o2} = 0$$

1.2.3. RRMC

Recordando que $RRMC = \frac{A_d}{A_c}$ y, con el análisis realizado de ambos modos, se puede observar que el circuito rechaza por completo el modo común y amplifica el modo diferencial. Por lo tanto $RRMC = \infty$

1.2.4. Impedancias

Considerando que $Z_i = \frac{V_{in}}{I_{in}}$ y que se tratan de AO ideales, las corrientes de entrada de ambos amplificadores es 0, entonces

$$Z_{i1} = Z_{i2} = \infty$$

1.3. Simulación y mediciones de laboratorio

Se realiza la simulación del circuito en el software LTSpice y se arma el circuito de laboratorio respetando los valores de los parámetros simulados.

1.3.1. Caso $V_2 = 0$, y $V_1 \neq 0$

Las figuras 2 y 3 corresponden a la conexión y la salida para este caso.

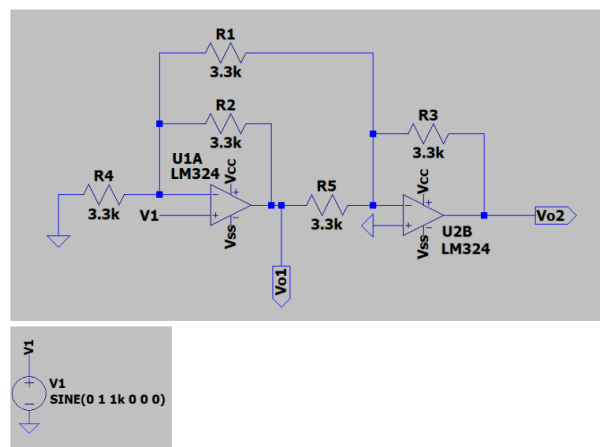


Figura 2: C 1 - $V_2 = 0$, y $V_1 \neq 0$

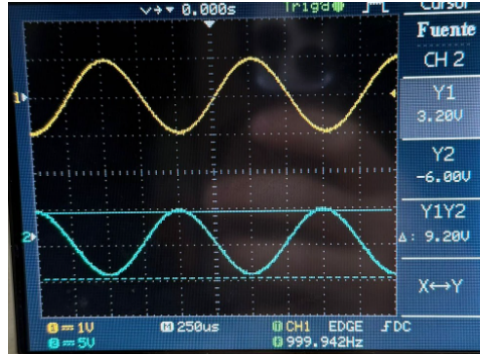


Figura 3: C 1- medición en osciloscopio para $V_2 = 0$, y $V_1 \neq 0$

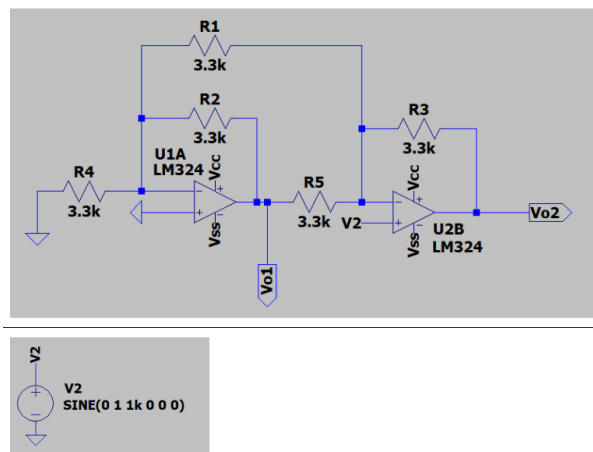


Figura 4: C 1 - $V_2 \neq 0$, y $V_1 = 0$

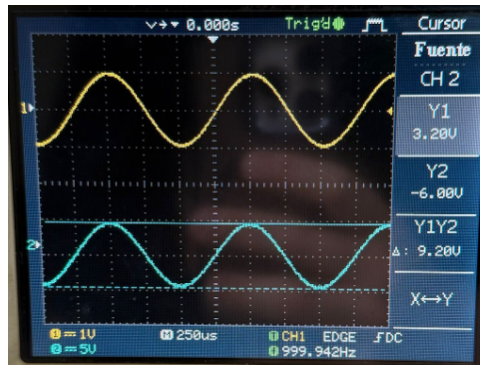


Figura 5: C 1- medición en osciloscopio para $V_1 = 0$, y $V_2 \neq 0$

1.3.2. Caso $V_1 = 0$ y $V_2 \neq 0$

Las figuras 4 y 5 corresponden a la conexión y la salida para este caso.

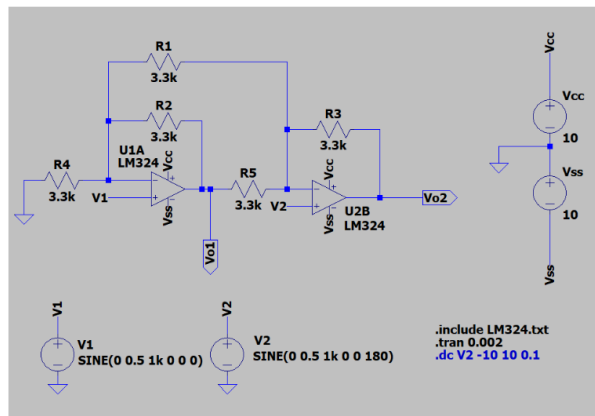


Figura 6: C 1 - tensión en modo diferencial

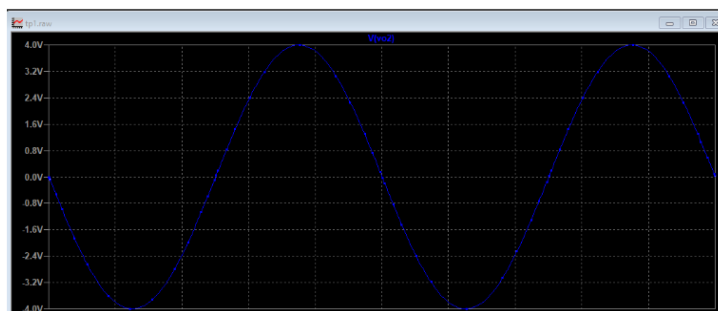


Figura 7: C 1 - Señal de salida para modo diferencial

1.3.3. Caso $V_{o2} = f(V_d)$

Se puede ver (figuras 6 y 7) que la tensión de salida simulada en LTSpice es 4 veces la tensión de entrada de modo diferencial como se calculó, teóricamente. Y la tensión medida en el circuito armado es de $V_{o2} = 4,5V_{in}$

1.3.4. Caso $V_{o2} = f(V_c)$

Aplicando una tensión de 1V, se puede notar que la tensión de salida $V_{o2} = 8,2mV$, es decir no es nula como se dedujo en el análisis teórico, pero sí pequeña.

En el circuito armado se ve que la tensión de salida es $V_{o2} = 16mV$ para 1V en la entrada, y es casi el doble de la simulada.

1.3.5. RRMC

Las relaciones reales de las ganancias de modo diferencial y de modo común indican que $A_d = 4V_{in}$ y $A_c = 8,2mV_{in}$. Luego:

$$\frac{A_d}{A_c} = \frac{4}{8,2 \cdot 10^{-3}}$$

$$\frac{A_d}{A_c} = 487,80$$

Experimentalmente no se obtiene una $RRMC = \infty$ ya que el modo común no es nulo, pero sí es mucho más chico que el diferencial, resultando una relación de casi 490 para lo medido en LTSpice y en el laboratorio da:

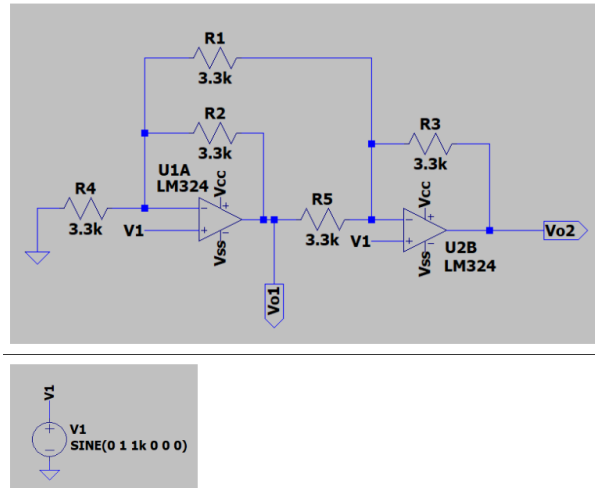


Figura 8: C 1- tensión en modo común

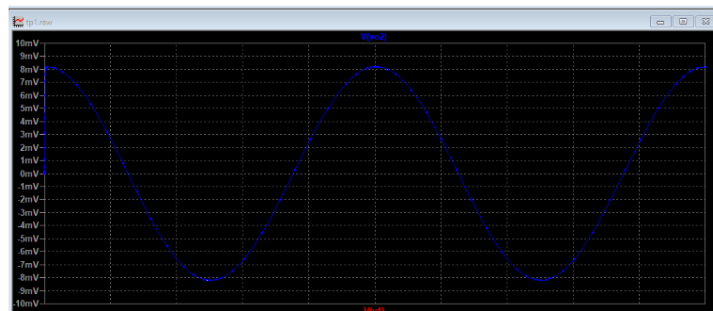


Figura 9: C 1 - Señal de salida para modo común

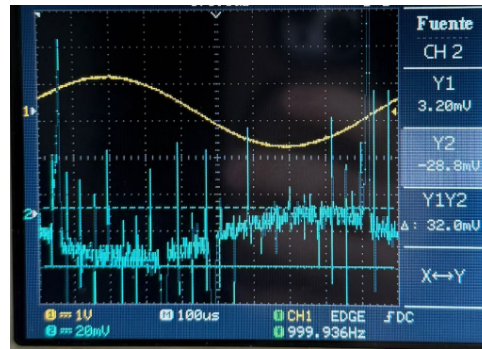


Figura 10: C1, Señal de salida para modo común medido en el circuito físico

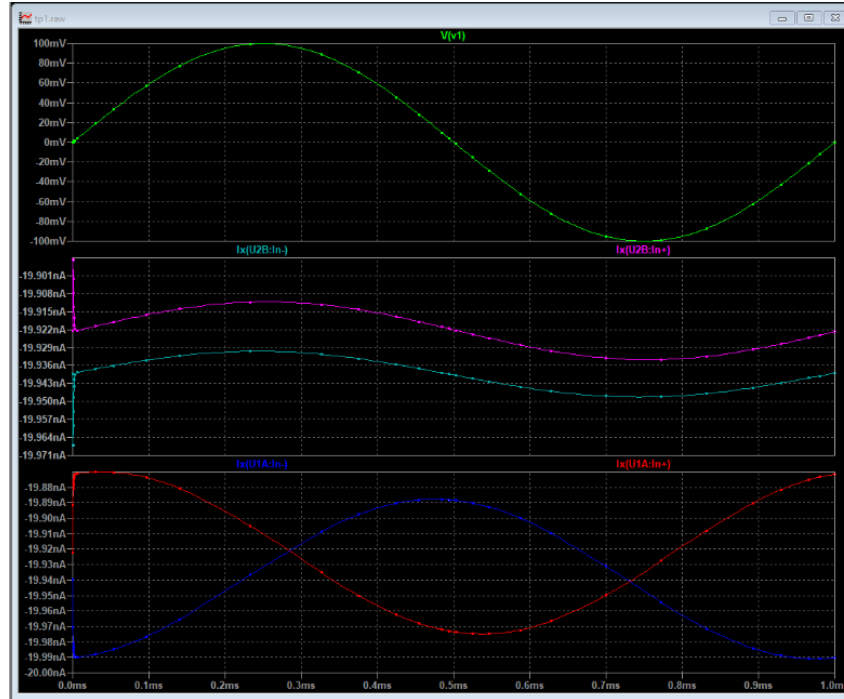
$$RRMC = \frac{A_d}{A_c} = \frac{4}{16,10^{-3}} = 218,25$$

1.3.6. Impedancias Z_{i1} y Z_{i2}

Midiendo las corrientes de entrada de ambos AO se pueden calcular los valores de las impedancias de entrada.

Se aplicó una tensión de entrada de 100mV y tomando las ecuaciones

$$Z_{i1} = \frac{V_c}{I_{i1}} \quad Z_{i2} = \frac{V_c}{I_{i2}}$$


 Figura 11: Medición de las corrientes de entrada con $V_c = 100\text{mV}$

Las corrientes medidas, como se muestra en la figura, permiten calcular las impedancias:

$$Z_{i1} = \frac{100\text{mV}}{19,87\text{nA}} = 5,03\text{M}\Omega$$

$$Z_{i1} = \frac{100\text{mV}}{19,99\text{nA}} = 5\text{M}\Omega$$

El valor medido difiere de lo planteado teóricamente ($Z_i = \infty$), pero de todas formas, ambas impedancias toman valores muy grandes, en el orden de los $5\text{M}\Omega$.

Para la medición de las corrientes en el circuito elaborado físicamente, se presentó la limitación de que los amperímetros disponibles no llegaban a hacer una lectura de valores en nanoAmperes, por lo que no se pudo hacer los cálculos correspondientes. Por lógica se deduce que las impedancias de entrada son muy altas pero no infinitas, ya que se trabaja con AO reales.

2. Circuito II: FUENTE DE CORRIENTE CONTROLADA POR TENSIÓN

2.1. Esquemático y datos

Se realiza el análisis teórico del circuito siguiente:

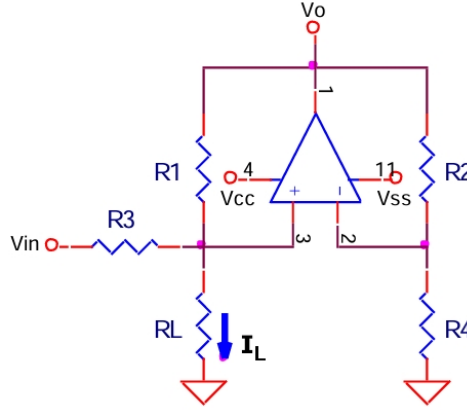


Figura 12: Esquemático del circuito N° 2

Datos:

- Amplificador operacional: LM324
- $V_{cc} = 10 \text{ [V]}$
- $V_{ss} = -10 \text{ [V]}$
- $R_1 = 100\Omega$, $R_2 = 10k\Omega$, $R_3 = 1k\Omega$, $R_4 = 100k\Omega$

Este circuito funciona como fuente de corriente, donde independientemente del valor de la carga, la corriente I_L es fija, dependiendo solamente del valor de la tensión de entrada aplicada.

2.2. Análisis teórico

Considerando que se trata de un amplificador operacional ideal, es decir con $V^+ = V^-$ y $A_d = \infty$, y al ser una fuente de corriente controlada por tensión, los parámetros de interés son V_{in} , V_o , R_L e I_L . Luego las corrientes en el nodo de la entrada V^+ resultan:

$$\frac{V_o - V^+}{R_1} + \frac{V_{in} - V^+}{R_3} - \frac{V^+}{R_L}$$

Teniendo

$$V^+ = V^- = \frac{V_o R_4}{R_4 + R_2}$$

$$V^+ = V^- = \frac{V_o 100k\Omega}{110k\Omega} = 0,9V_o$$

Análisis para $I_{RL} = f(R_L, V_{in})$

$$\frac{V_{in}}{R_3} + \frac{V_o}{R_1} = V_o \frac{R_4}{R_4 + R_2} \left(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} \right)$$

$$V_{in} = V_o R_3 \left[\frac{R_4}{R_4 + R_2} \left(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} \right) \right]$$

$$V_{in} = V_0 \left[\frac{1}{R_L} \left(R_3 \frac{R_4}{R_4 + R_2} \right) + R_3 \frac{R_4}{R_4 + R_2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} \right) - \frac{R_3}{R_1} \right]$$

Reemplazando con los valores especificados de $R_1 = 100\Omega$, $R_2 = 10k\Omega$, $R_3 = 1k\Omega$, y $R_4 = 100k\Omega$

$$V_{in} = V_0 \left[\frac{1}{R_L} 909,09091 \right]$$

Ahora, sigue la expresión de la corriente que fluye a través de la carga en función del valor de la carga resistiva y de la tensión de entrada :

$$I_{RL} = \frac{V^+}{R_L}$$

$$I_{RL} = V_o \frac{R_4}{R_4 + R_2} \frac{1}{R_L}$$

$$I_{RL} = \frac{V_{in}}{\left[\frac{1}{R_L} (R_3 R_4 R_4 + R_2) \right]} \frac{R_4}{R_4 + R_2} \frac{1}{R_L}$$

$$I_{RL} = \frac{V_{in}}{R_3}$$

$$I_{RL} = V_{in} \cdot 10^{-3}$$

También se puede declarar la amplitud de la tensión de salida en función de la tensión de entrada y de la carga:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{\frac{1}{R_L} 909,09091}$$

$$V_{out} = V_{in} R_L \cdot 1,1 \cdot 10^{-3}$$

Para terminar, se expresará la relación entre el valor máximo de la carga que se puede conectar al circuito y la tensión de entrada. Para determinar la R_L máxima, se debe considerar el caso en el cual V_o sea igual a V_{cc} (10V):

$$10[V] = V_{in} R_L \cdot 1,1 \cdot 10^{-3}$$

$$R_{L_{max}} = \frac{909,09091}{V_{in}}$$

Calculando los valores de corriente a distintos R_L y V_{in} :

I _{RL}	Vin		
	0,5 V	- 1 V	2 V
0KΩ	0 mA	0 mA	0 mA
1KΩ	0,5 mA	- 1 mA	2 mA
2KΩ	0,5 mA	- 1 mA	2 mA
5KΩ	0,5 mA	- 1 mA	2 mA
10KΩ	0,5 mA	- 1 mA	2 mA

2.3. Simulación

Con la simulación realizada en LTSPice, se completó la tabla con los valores de corrientes según los distintos valores elegidos de la resistencia R_L

I_{RL}	V_{in}		
	0,5 V	- 1 V	2 V
0K Ω	0 mA	0 mA	0 mA
1K Ω	0,502 mA	- 1,001 mA	2 mA
2K Ω	0,501 mA	- 0,999 mA	1,9964 mA
5K Ω	0,499 mA	- 0,995 mA	1,814 mA
10K Ω	0,494 mA	- 0,905 mA	0,918 mA

Con los datos obtenidos en la tabla anterior se puede notar que son distintos a los calculados teóricamente, ya que al aumentar la resistencia R_L , el error de los valores obtenidos aumenta. Algo similar sucede cuando se aumenta la tensión de entrada V_{in} , el amplificador operacional se satura a 8,49V.

Esto se puede observar en las siguientes gráficas, utilizando distintos valores de tensión de entrada y de resistencia de carga:

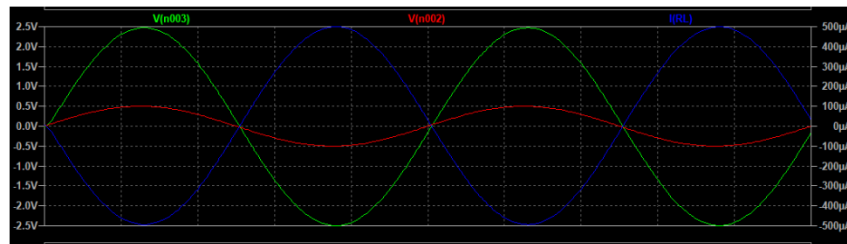


Figura 13: $R_L = 5k\Omega$, $V_{in} = 0,5V$, $V_o = 2,5V$

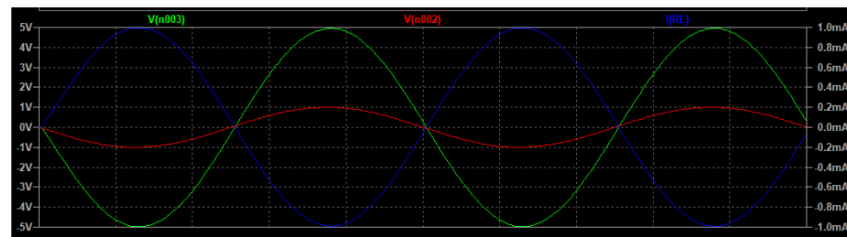


Figura 14: $R_L = 5k\Omega$, $V_{in} = 1V$, $V_o = 5V$

El análisis simulado se aproxima bastante al análisis teórico, siempre y cuando la resistencia de carga no supere en valor a la R_{Lmax} , ya que el AO se saturaría y disminuiría la corriente de la resistencia de carga.

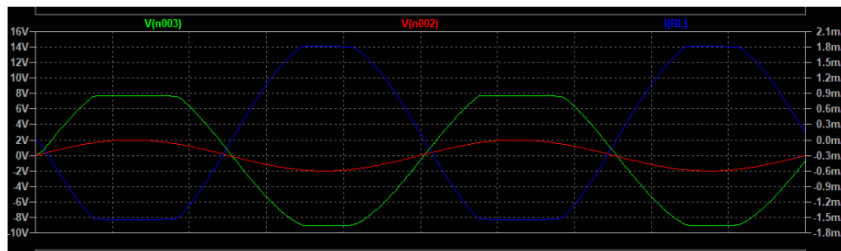


Figura 15: $R_L = 5k\Omega$, $V_{in} = 2V$, $V_o = 8,4V$

3. Circuito III: RECTIFICADOR DE PRECISIÓN

3.1. Esquemático y datos

Se realiza el análisis teórico del circuito que se muestra en la siguiente figura:

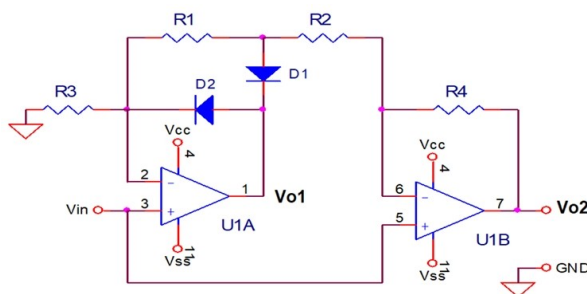


Figura 16: Esquemático del circuito N° 3

Este circuito tiene la funcionalidad de rectificación de una onda de entrada, en un ciclo conduce uno de los diodos, y en el otro ciclo, el otro diodo.

Datos:

- Amplificador operacional: LM324
- $V_{cc} = 10V$ $V_{ss} = -10V$
- $D_1 = D_2 = 1N4148$
- $R_1 = R_3 = R_4 = 10K\Omega$ 1% $y R_2 = 5K\Omega$ 1%

3.2. Análisis teórico

Suponiendo que ambos AO son ideales, al igual que los diodos, se analizarán las siguientes relaciones:

3.2.1. $V_{o1} = f(V_{in})$ con $0V < V_{in}$

Para este análisis se pasiva el AO U1B. En este caso el diodo que se polariza directamente es el D2, mientras que D1 está polarizado inversamente, actuando como un circuito abierto.

$$V_{in} = V^+ = V^-$$

Como se cierra el lazo por D2, entonces $V_o = V_{in} + 0,7V$

3.2.2. $V_{o2} = f(V_{in} \text{ con } 0V < V_{in})$

En este caso se pasiva U1A

$$V_{in} = V_{o2} \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R_4} = V_{o2} \frac{15k\Omega}{25k\Omega}$$

$$V_{o2} = V_{in} \frac{5}{3}$$

Ahora, pasivando U1B:

$$\frac{V_{o2}}{R_4} = -\frac{V_{in}}{R_1 + R_2}$$

Por superposición:

$$V_{o2} = V_{in} \left(\frac{5}{3} - \frac{2}{3} \right) = V_{in}$$

3.2.3. $V_{o1} = f(V_{in} \text{ con } 0V > V_{in})$

En esta instancia, el diodo D1 es el que polariza directamente para poder determinar la salida V_{o1} y D2 actúa como un circuito abierto. Se pasiva el AO U1B y tomando $V_x = V_{o1} - 0,7V$:

$$\frac{0V - V_{in}}{R_3} = \frac{V_{in} - V_x}{R_1} \Rightarrow \frac{V_{in}}{10k\Omega} = \frac{V_{in} - V_x}{10k\Omega}$$

$$2V_{in} = V_x \Rightarrow 2V_{in} = V_{o1} - 0,7V$$

$$V_{o1} = V_{in} + 0,7V$$

3.2.4. $V_{o2} = f(V_{in} \text{ con } 0V > V_{in})$

Se pasiva U1A nuevamente y se calcula $V_{o2} = f(V_{in})$:

$$V_{in} = V_{o2} \frac{R_2}{R_2 + R_4} \Rightarrow V_{in} = V_{o2} \frac{5k\Omega}{15k\Omega}$$

$$V_{o2} = 3V_{in}$$

La influencia de U1A en V_{o2} y tomando nuevamente $V_x = V_{o1} - 0,7V$:

$$\frac{V_x}{R_2} = -\frac{V_{o2}}{R_4} \Rightarrow \frac{V_{o1} - 0,7V}{5k\Omega} = -\frac{V_{o2}}{10k\Omega}$$

$$\frac{2V_{in}}{5k\Omega} = -\frac{V_{o2}}{10k\Omega}$$

$$V_{o2} = -4V_{in}$$

Por superposición:

$$V_{o2} = V_{in}(3 - 4) \Rightarrow V_{o2} = -V_{in}$$

El análisis realizado sugiere el trabajo de un rectificador de onda completa, cuando la señal de entrada es positiva, la salida también lo es, y cuando la señal de entrada es negativa, la salida es positiva. La amplitud de salida es igual a la de entrada para ambos casos.

3.3. Simulación y mediciones de laboratorio

Utilizando el simulador LTSpice y armando el circuito en físico, se mostrarán las gráficas simuladas y medidas para distintos valores de V_{in} :

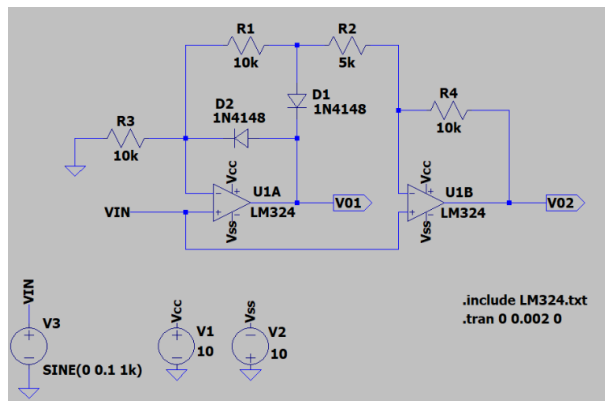


Figura 17: Simulación del C3

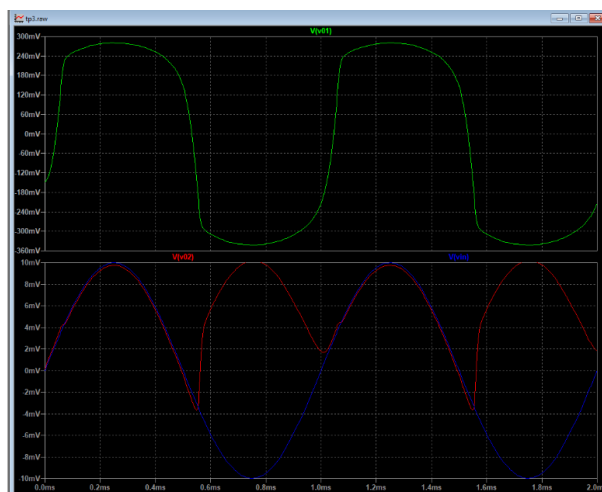


Figura 18: C3- señal de entrada $V_{in} = 0,1V$ con V_{o1} y V_{o2}

En esta figura (18), se puede notar que para señales muy pequeñas, menores al umbral del diodo, la señal se rectifica de manera correcta.

Se puede notar que hay un límite de tensión de V_{o1} para un correcto funcionamiento del rectificador, cuando este se satura, la salida V_{o2} se distorsiona. Como se tiene una mayor ganancia en el semiciclo negativo de V_{o1} es esperable que este sature primero y distorsione la señal de salida. Por lo tanto, para tener un margen de seguridad razonable, la tensión de entrada debe estar dentro del siguiente intervalo:

$$-3V < V_{in} < 3V$$

Se puede apreciar en la figura 24 que para una tensión de entrada V_{in} positiva, se tiene un comportamiento lineal en el que la salida toma los mismos valores que la entrada, es decir que el circuito tiene ganancia aproximadamente unitaria. Por otro lado, para una tensión V_{in} negativa, se puede ver



Figura 19: C3- señal de entrada $V_{in} = 0,01V con V_{o2}$

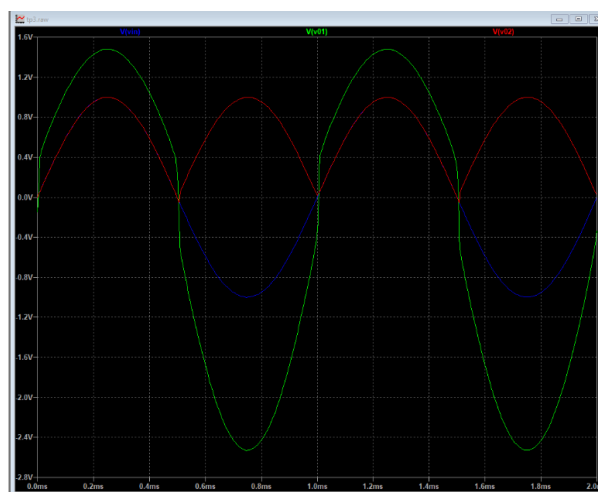


Figura 20: C3- señal de entrada $V_{in} = 1V con V_{o1} y V_{o2}$



Figura 21: C3- señal de entrada $V_{in} = 1V y V_{o2}$

que el circuito se comporta como un rectificador mientras esta se mantenga dentro de ciertos valores, es necesario limitar el valor de la tensión de entrada teniendo en cuenta a qué tensión se satura el AO, ya que cuando este se satura deja de rectificar correctamente

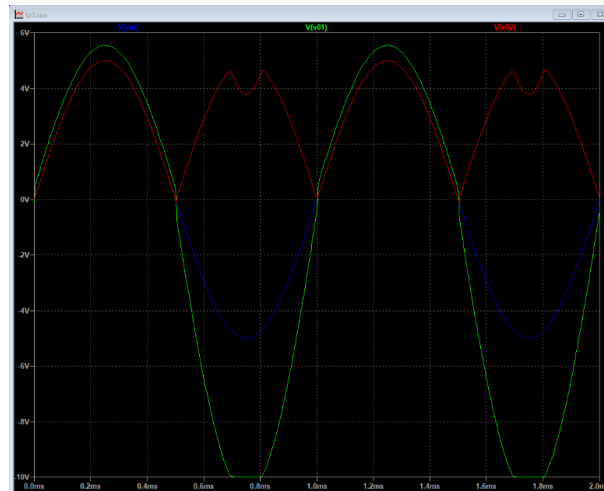


Figura 22: C3- señal de entrada $V_{in} = 5V$ con V_{o1} y V_{o2}

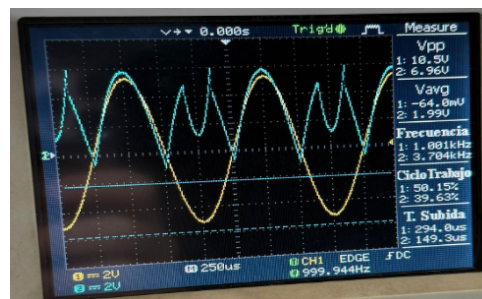


Figura 23: C3- señal de entrada $V_{in} = 5V$ y V_{o2}

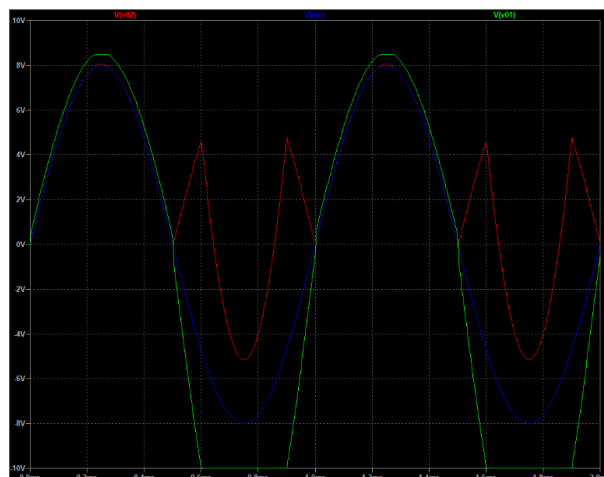


Figura 24: C3- señal de entrada $V_{in} = 8V$ y V_{o1} y V_{o2}

4. Circuito IV: COMPARADOR CON HISTÉRESIS

4.1. Esquemático y datos

Se realiza el análisis teórico del circuito que se muestra en la siguiente figura:

Este se trata de un circuito Schmitt Trigger inversor implementando un AO.

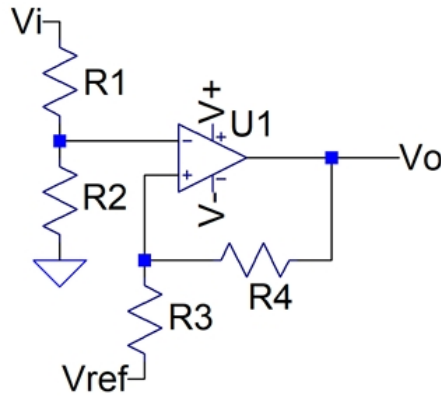


Figura 25: Esquemático del circuito N° 4

Datos:

- Amplificador operacional LM324
- $V^+ = 10 \text{ [V]}$
- $V^- = 0 \text{ [V]}$
- $R_1 = R_2 = R_4 = 10k\Omega, R_3 = 2K\Omega$
- $V_{ref} = 2V$

4.2. Análisis teórico

El circuito IV consiste en un comparador con histéresis, es decir, este va a comparar las entradas no inversora e inversora y en base a esto, satura su salida a V_{cc} o V_{ss} dentro de un intervalo dado por las tensiones umbrales de conmutación. Se analiza el modo diferencial de las entradas:

$$V^- = k_1 * V_i$$

$$V^+ = k_2 * (V_o - V_{ref}) + V_{ref}$$

Con:

$$k_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$k_2 = \frac{R_3}{R_3 + R_4}$$

Caso $V_d < 0$

Siendo $V_d = V^+ - V^-$ Si la tensión $V_d < 0$ y $V^+ < V^-$, se considera que en este caso la tensión de salida tiene un valor inicial $V_o = V_{cc}$ y luego pasa a tener un valor $V_o = V_{ee}$, debido a la acción de conmutación. Entonces se tiene:

$$V_d = V^+ - V^- < 0 \Rightarrow V_o = V_{ee}$$

$$k_2 * (V_o - V_{ref}) + V_{ref} < k_1 * V_i$$

$$\frac{k_2}{k_1} * (V_o - V_{ref}) + \frac{V_{ref}}{k_1} < V_i$$

$$\frac{k_2}{k_1} * V_o + \frac{1 - k_2}{k_1} * V_{ref} < V_i$$

Se tiene:

$$k_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{10K\Omega}{10K\Omega + 10K\Omega} = 0,5$$

$$k_2 = \frac{R_3}{R_3 + R_4} = \frac{2K\Omega}{2K\Omega + 10K\Omega} = 0,166$$

Reemplazando en la expresión anterior:

$$\frac{0,166}{0,5} * 10V + \frac{1 - 0,166}{0,5} * 2V < V_i$$

$$3,32V + 3,34V < V_i$$

$$V_i > 6,66V \Rightarrow V_o = V_{cc}$$

Siendo en este caso $V_{cc} = 10V$.

$$V_i > 6,66V \Rightarrow V_o = 10V$$

Caso $V_d > 0$

Se tiene que $V_d > 0$ y $V^+ > V^-$. Por lo tanto la salida tiene que ser positiva. Previo a esta condición, el circuito tendrá un valor de salida de $V_o = V_{ee}$, por lo que conmutará de un valor de $V_o = V_{ee}$ a $V_o = V_{cc}$. Se desarrolla la condición planteada:

$$V_d = V^+ - V^- > 0 \Rightarrow V_o = V_{cc}$$

$$k_2 * (V_o - V_{ref}) + V_{ref} > k_1 * V_i$$

$$\frac{k_2}{k_1} * V_o + \frac{1 - k_2}{k_1} * V_{ref} > V_i$$

Como $V_{ee} = 0V$, se tiene:

$$\frac{0,166}{0,5} * 0V + \frac{1 - 0,166}{0,5} * 2V > V_i$$

$$\frac{1 - 0,166}{0,5} * 2V > V_i$$

$$V_i < 3,336V \Rightarrow V_o = V_{ee}$$

En este caso:

$$V_i < 3,336V \Rightarrow V_o = 0V$$

4.3. Simulación:

Utilizando LTSpice para simular el circuito planteado, se tiene:

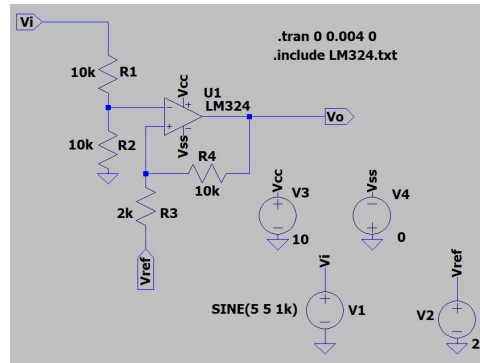


Figura 26: Simulación del circuito N° 4

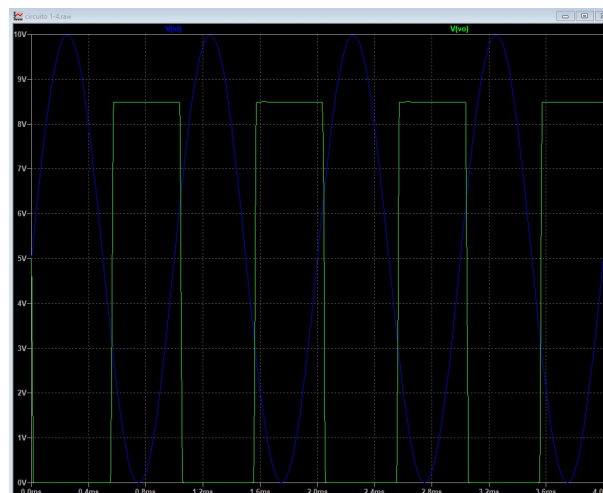


Figura 27: Señal de salida para $V_{ss} \leq V_{in} \leq V_{cc}$

Haciendo una vista ampliada de las curvas se pueden apreciar mejor los valores de conmutación:

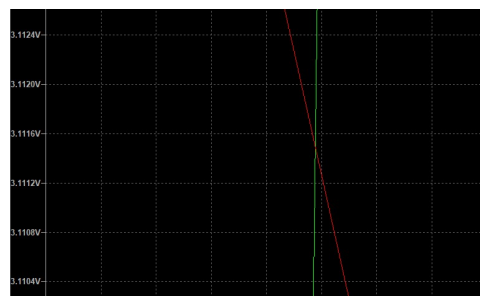


Figura 28: Zoom en el umbral de conmutación inferior de V_{in} y V_o

Las imágenes de la simulación muestran el punto de intersección entre V_{in} y V_o cumpliendo con lo planteado en el cálculo teórico.



Figura 29: Zoom en el umbral de conmutación inferior de V_{in} y V_o

Luego se puede observar la curva de histéresis graficando los valores de tensión V_{in} y V_o

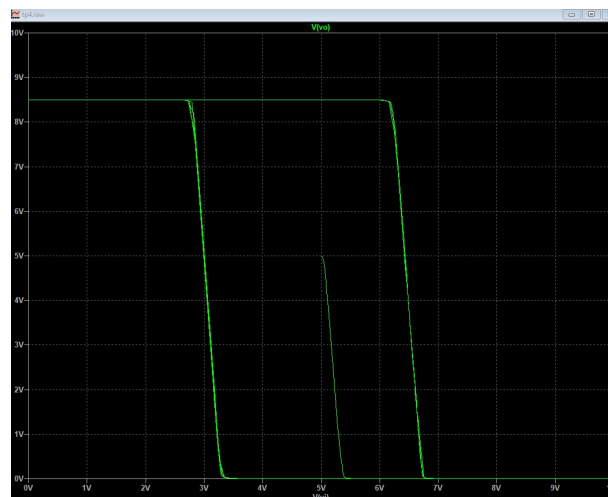


Figura 30: Curva de histéresis del comparador

Con la figura 30 queda corroborado el comportamiento característico de un comparador con histéresis. El comienzo de la señal sinusoidal se da en aproximadamente 5V y continua el trazo la curva externa análogamente a la histéresis de un material ferromagnético.

4.4. Conclusiones

Como conclusión a este informe se puede afirmar que se obtuvieron los resultados esperados. Comparando los valores obtenidos en el laboratorio con los obtenidos mediante simulación y desarrollo teórico, se puede apreciar una pequeña diferencia entre los mismos. Esto se debe a que, tanto en el análisis como en la simulación se consideran a los amplificadores operacionales como ideales, mientras que en la práctica eso no es así y existen una serie de errores que hay que tener en cuenta.

Se llegó observar claramente la no idealidad de estos amplificadores dado que ni su ganancia A_d , ni la relación de rechazo en modo común (RRMC) son infinitos.

También, a través de estos laboratorios se comprobó experimentalmente todo lo visto en la materia hasta el momento, tanto en la parte teórica como en la resolución de problemas.