



Universidad  
Nacional  
de Córdoba



---

# Trabajo Práctico de Laboratorio N°1

*Síntesis de Redes Activas*  
Ingeniería Electrónica

**Autores:**

Cerquetti, Narella  
Hernandez, Facundo  
Taborda, Andrea  
Valdez Benavidez, Mauricio L.

**Profesores:**

Ing. Ferreyra, Pablo  
Ing. Reale, Cesar

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>2</b>
<b>3. Amplificador Diferencial</b>	<b>3</b>
3.1. Análisis teórico . . . . .	3
3.1.1. Cálculo de $V_{01}$ . . . . .	3
3.1.2. Cálculo de $V_{02}$ . . . . .	3
3.1.3. Cálculo de RRMC . . . . .	4
3.1.4. Respuesta en frecuencia . . . . .	4
3.1.5. Impedancias . . . . .	5
3.2. Simulaciones . . . . .	5
3.3. Implementación . . . . .	8
3.4. Comparación entre resultados . . . . .	8
3.5. Conclusión . . . . .	8
<b>4. Fuente de corriente controlada por tensión</b>	<b>9</b>
4.1. Análisis teórico . . . . .	9
4.2. Simulaciones . . . . .	11
4.3. Implementación . . . . .	12
4.4. Comparación entre resultados . . . . .	12
4.5. Conclusión . . . . .	13
<b>5. Rectificador de precisión</b>	<b>14</b>
5.1. Análisis teórico . . . . .	14
5.1.1. $V_o = f(V_{in})$ con $V_{in} > 0$ . . . . .	14
5.1.2. $V_o = f(V_{in})$ con $V_{in} < 0$ . . . . .	15
5.2. Simulación . . . . .	16

# 1. Introducción

En este trabajo de laboratorio, se analizarán tres circuitos:

1. Amplificador diferencial.
2. Fuente de corriente controlada por tensión.
3. Rectificador de precisión.

Para cada circuito, se realizará un análisis teórico, simulaciones y mediciones experimentales. Finalmente, se van a comparar los datos obtenidos en cada etapa.

# 2. Objetivos

- Aplicar el conocimiento teórico - práctico para analizar los circuitos.
- Fortalecer el uso del simulador LtSpice e interpretar los resultados del mismo.
- Familiarizarnos con los componentes físicos y el armado de los circuitos, comprobando el correcto funcionamiento a través de las mediciones correspondientes.
- Visualizar los errores relativos que hay entre el modelo teórico y las simulaciones y las implementaciones.

### 3. Amplificador Diferencial

Datos: Amplificador Operacional LM324

$V_{cc} = 10V$   $V_{ss} = -10V$

$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R$

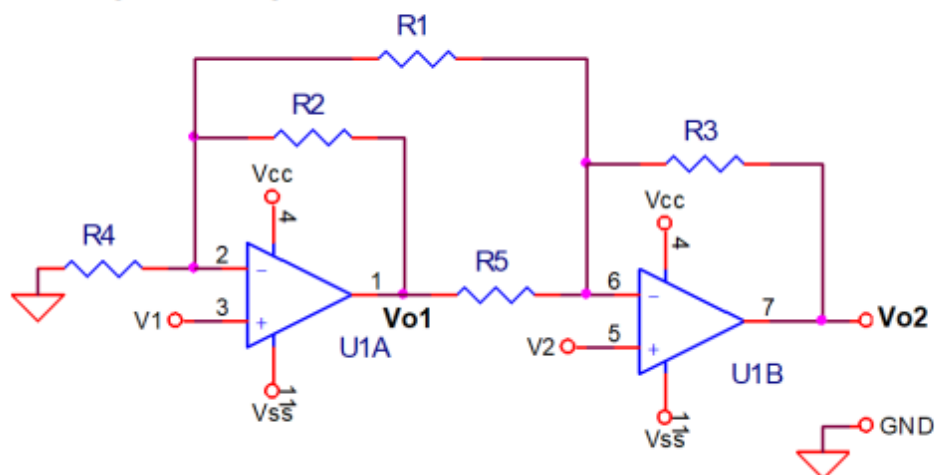


Figura 1: Circuito propuesto

#### 3.1. Análisis teórico

Se debe analizar la tensión de salida en función de la tensión de entrada en modo diferencial  $V_d = (V_2 - V_1)$  y también en modo común  $V_c = (V_1 + V_2)/2$ .

Para realizar el análisis en modo diferencial, se aplica el método de superposición, primero se calcula  $V_{O1}$  y luego  $V_{O2}$ .

##### 3.1.1. Cálculo de $V_{O1}$

**Pasivando  $V_2$**

$$V_{O1}|_{V_2=0} = \left(1 + \frac{R}{R/2}\right)V_1 = 3V_1$$

**Pasivando  $V_1$**

$$V_{O1}|_{V_1=0} = \left(-\frac{R}{R}\right)V_2 = -V_2$$

$$V_{O1} = 3V_1 - V_2$$

##### 3.1.2. Cálculo de $V_{O2}$

**Pasivando  $V_1$  y  $V_2$**

$$V_{O2}|_{V_1=0}^{V_2=0} = \left(-\frac{R}{R}\right)V_1 = -V_{O1}$$

**Pasivando  $V_2$  y  $V_{O1}$**

$$V_{O2}|_{V_{O1}=0}^{V_2=0} = \left(-\frac{R}{R}\right)V_1 = -V_1$$

**Pasivando  $V_1$  y  $V_{O1}$**

$$V_{O2}|_{V_1=0}^{V_1=0} = (1 + \frac{R}{R/2})V_2 = 3V_2$$

$$V_{O2} = 3V_2 - V_1 - 3V_1 + V_2 = 4V_2 - 4V_1 = 4(V_2 - V_1)$$

reemplazando con  $V_d = (V_2 - V_1)$

$$V_{O2} = 4V_d$$

Para el análisis en  $V_c = (V_1 + V_2)/2$  y haciendo  $V_1 = V_2$  tenemos que

$$V_{O2} = 0$$

### 3.1.3. Cálculo de RRMC

$$RRMC = (\frac{A_d}{A_c}) = \frac{4}{0}$$

$$RRMC = \infty$$

### 3.1.4. Respuesta en frecuencia

En el Datasheet del LM324 se encuentra el dato de la  $f_T = 1[MHz]$  por lo tanto

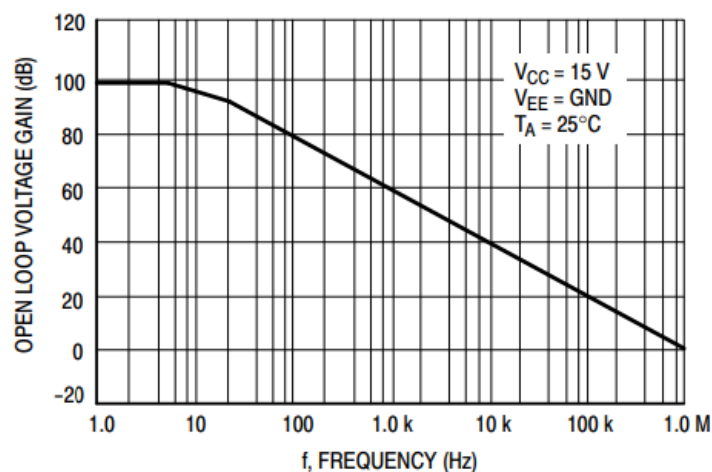
$$\omega_T = 2\pi f_T$$

$$\omega_H = \omega_T k = \omega_T \frac{1}{4} = \frac{\pi}{2} f_T$$

$$\omega_H = 1,57[Mrps]$$

$$f_H = 250[KHz]$$

La ganancia del amplificador es 4 lo que se traduce en 12.04[dB]. A 250[KHz] la ganancia disminuirá 3[dB], es decir que la amplitud quedará en 9.03[dB] ó 2.83 veces.



### 3.1.5. Impedancias

Las impedancias vistas por las fuentes de señales  $V_1$  y  $V_2$  son las impedancias de entrada de ambos amplificadores. Definimos  $Z_{i1}$  y  $Z_{i2}$  a las impedancias vistas por  $V_1$  y  $V_2$  respectivamente.

$$Z_{i1} = \frac{V_1}{I_{i1}} \text{ al ser } I_{i1} = 0$$

entonces queda  $Z_{i1} = \infty$

de manera análoga se determina

$$Z_{i2} = \frac{V_2}{I_{i2}} = \infty$$

### 3.2. Simulaciones

Se realizaron diferentes simulaciones con LTSpice para observar el comportamiento a la salida de cada amplificador. A continuación se listan las simulaciones realizadas:

- $V_{o1}$  y  $V_{o2}$  con  $V_1 = 10[mV]$  y  $V_2 = 0[mV]$ .
- $V_{o1}$  y  $V_{o2}$  con  $V_1 = 0[mV]$  y  $V_2 = 10[mV]$ .
- $V_{o1}$  y  $V_{o2}$  con  $V_1 = V_2 = 10[mV]$  pero ambas entradas desfasadas  $180^\circ$  entre ellas.
- $V_{o1}$  y  $V_{o2}$  con  $V_1 = V_2 = 10[mV]$  sin desfasar.
- Respuesta en frecuencia del circuito, graficando el Bode con Magnitud y Fase.

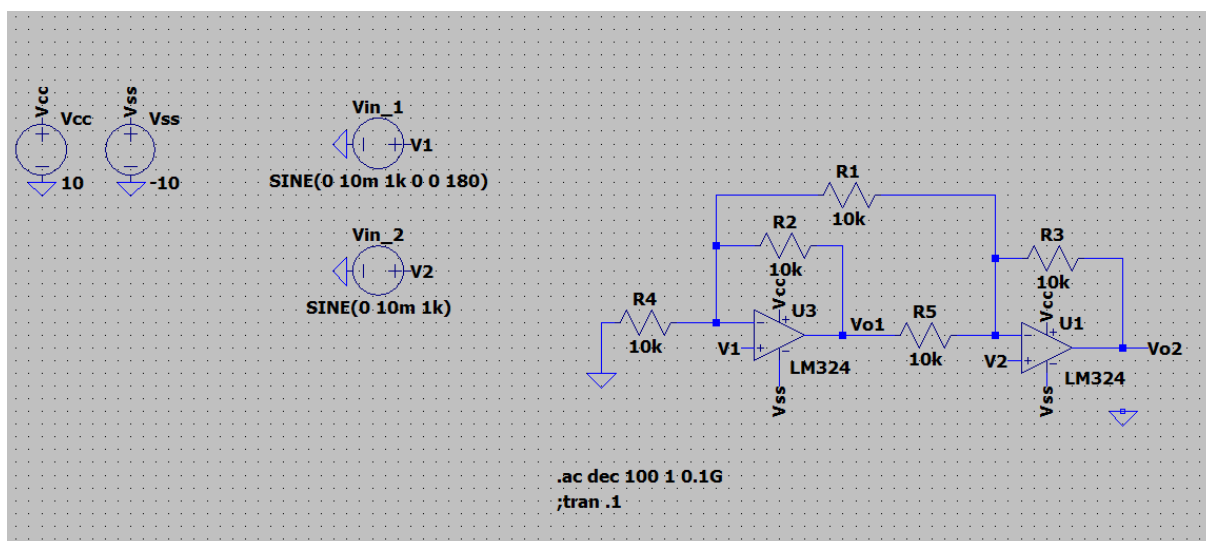


Figura 2: Circuito simulado

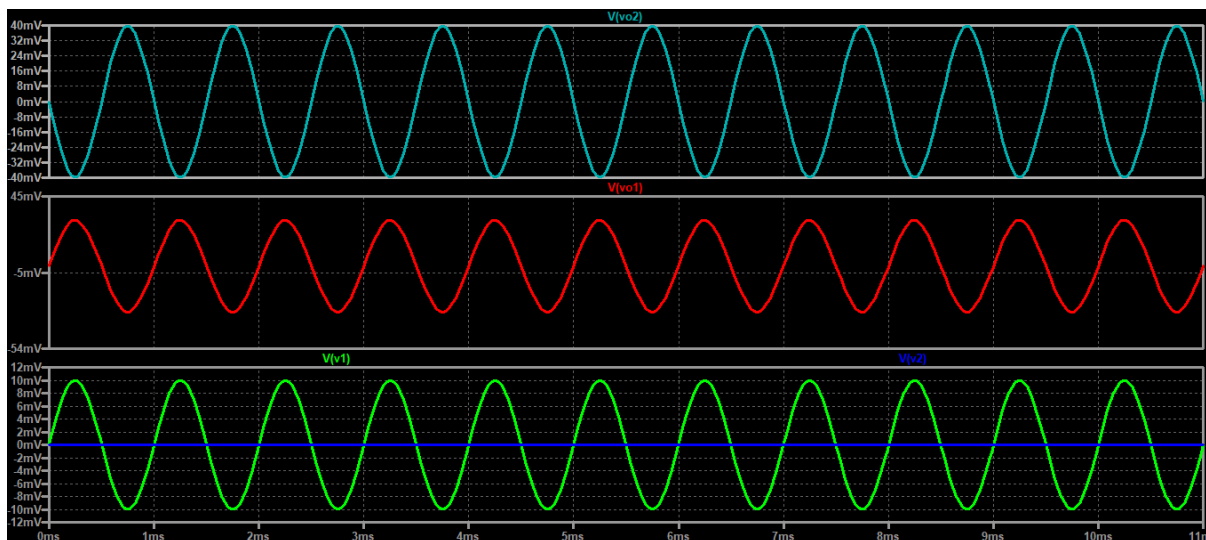


Figura 3:  $V_{o1}$  (rojo) y  $V_{o2}$  (celeste) con  $V_1 = 10[mV]$  y  $V_2 = 0[mV]$ .

	$V_1 = 10[mV]$ y $V_2 = 0[mV]$
$V_{o1}$	29.5 [mV]
$V_{o2}$	39.73[mV]

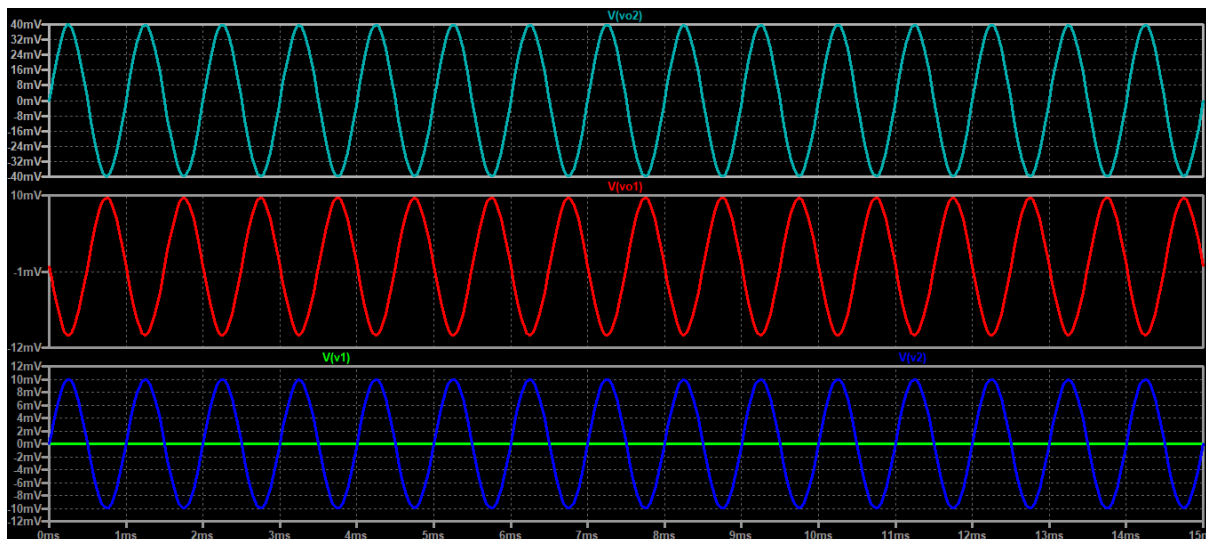


Figura 4:  $V_{o1}$  (rojo) y  $V_{o2}$  (celeste) con  $V_1 = 0[mV]$  y  $V_2 = 10[mV]$ .

	$V_1 = 0[mV]$ y $V_2 = 10[mV]$
$V_{o1}$	29.5 [mV]
$V_{o2}$	39.73[mV]

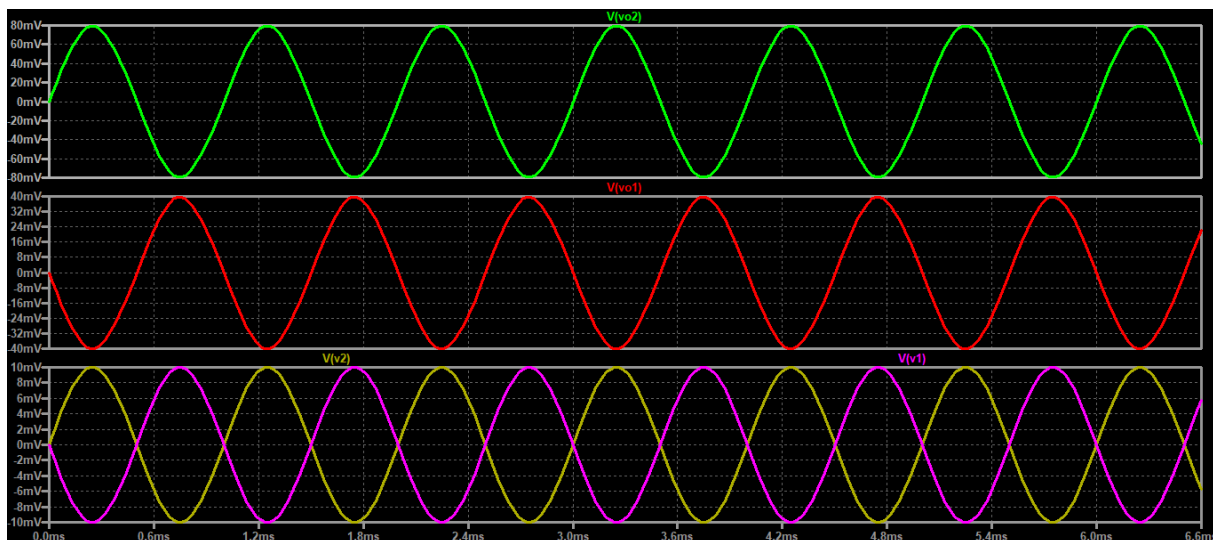


Figura 5:  $V_{o1}$  (rojo) y  $V_{o2}$  (verde) con  $V_1 = V_2 = 10[mV]$  pero ambas entradas desfasadas  $180^\circ$  entre ellas.

	$V_1 = 10[mV]$ y $V_2 = 10[mV]$ y $\Delta\varphi = 180^\circ$
$V_{o1}$	39.99 [mV]
$V_{o2}$	79.46[mV]

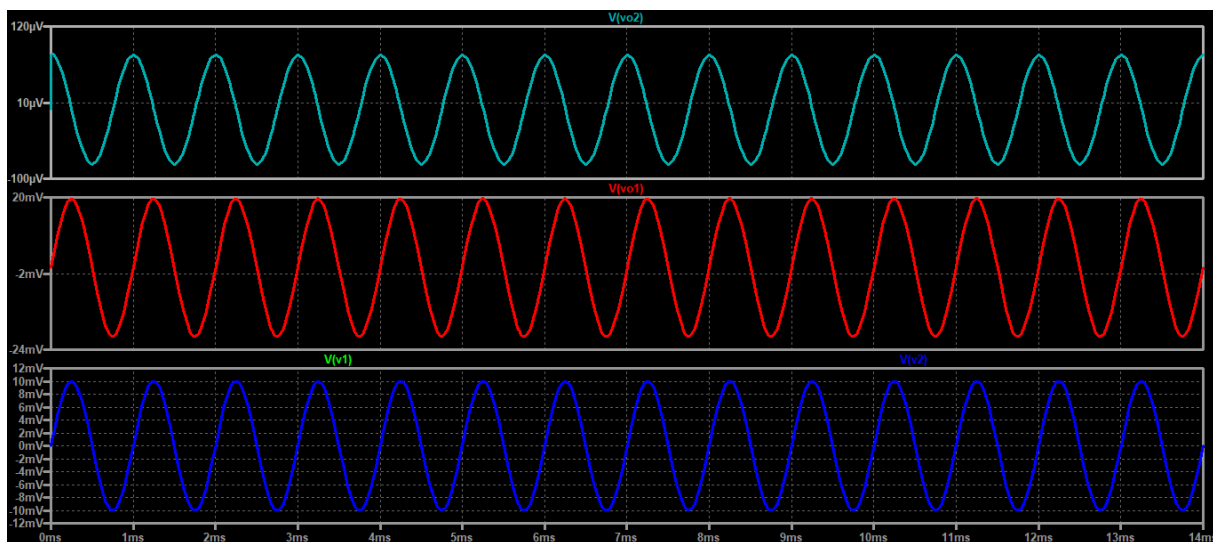


Figura 6:  $V_{o1}$  (rojo) y  $V_{o2}$  (celeste) con  $V_1 = V_2 = 10[mV]$  sin desfasar.

	$V_1 = 10[mV]$ y $V_2 = 10[mV]$ y $\Delta\varphi = 0$
$V_{o1}$	19.60 [mV]
$V_{o2}$	79.14[µV]



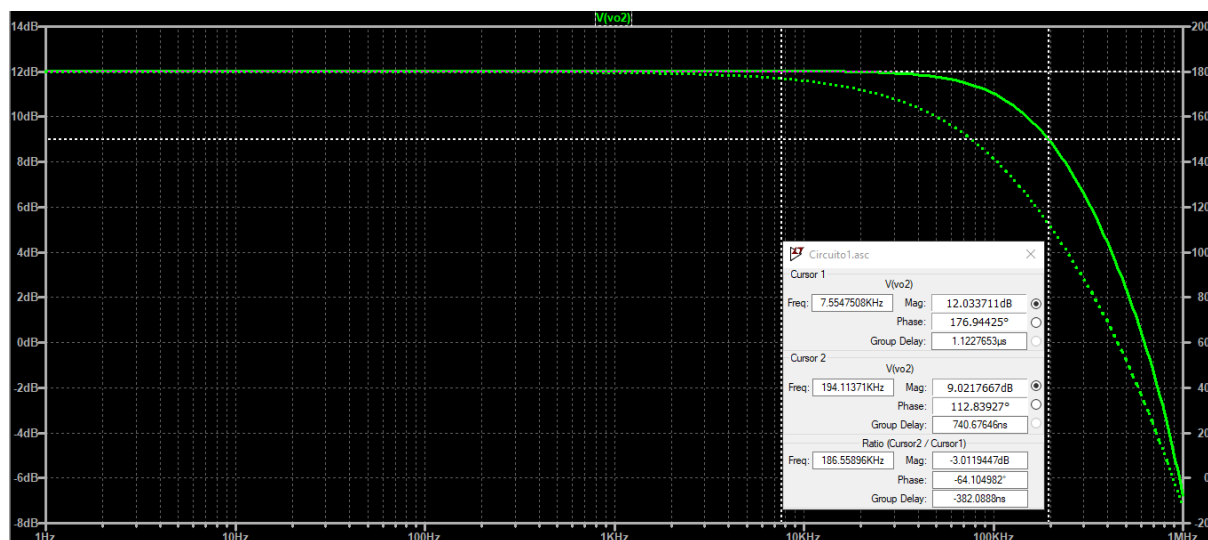


Figura 7: Bode con Magnitud y Fase  $-V_{O2}$  con  $V_1 = 1[V]$  y  $V_2 = 0[V]$ .

	$V_1 = 1[V]$ y $V_2 = 0[V]$
Frecuencia para -3[dB]	186.55 [KHz]
$\Delta\varphi$	64.10°

### 3.3. Implementación

### 3.4. Comparación entre resultados

En la siguiente tabla comparativa se reflejan los resultados obtenidos en cada una de las etapas previas y se calcula el error relativo que existe entre los resultados.

Tanto para la simulación como para la parte experimental, se ingresó señal por  $V_1$

	Salida $V_{O2}[V]$			Errores relativos (%)		
Entrada $V_1[V]$	Teoría	Simulación	Experimental	Exp/Teo	Exp/Sim	Sim/Teo
0.2	0.8	0.7989	-	-	-	0.14
0.4	1.6	1.5973	-	-	-	0.17
1	4	3.9974	-	-	-	0.06

### 3.5. Conclusión

Se puede concluir que la herramienta de simulación es bastante precisa, pues el error relativo respecto al valor teórico siempre se mantuvo menor al 1%.

Ahora bien, el error relativo entre el valor teórico y el experimental es mas grande, aproximadamente (... %), esto se debe a que los componentes no son ideales y el comportamiento puede variar en un rango acotado indicado por el fabricante.

## 4. Fuente de corriente controlada por tensión

Datos: Amplificador Operacional LM324

$V_{cc} = 10V$  y  $V_{ss} = -10V$

$R_1 = 100\Omega$ ;  $R_2 = 10K\Omega$ ;  $R_3 = 1K\Omega$  y  $R_4 = 100K\Omega$

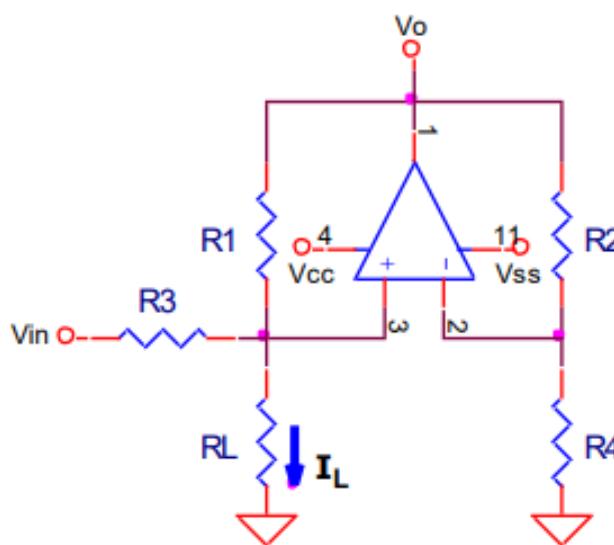


Figura 8: Circuito propuesto

### 4.1. Análisis teórico

Para analizar el circuito propuesto, se propone expresar  $V^+$  (la entrada no inversora del AO) y  $V^-$  (la entrada inversora del AO) en función del  $V_o$ , planteando el divisor resistivo en el nodo "2" de la figura:

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

luego se plantea la ley de los nodos de Kirchhoff en el nodo "3"

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

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

y reemplazando  $V^+$

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

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

Reemplazando para  $R_1 = 100[\Omega]$ ,  $R_2 = 10[K\Omega]$ ,  $R_3 = 1[K\Omega]$  y  $R_4 = 100[K\Omega]$ :

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

Luego la corriente que circula por la carga se define:

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

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

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

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

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

de igual manera se define la tensión  $V_o$  en función de  $R_L$  y de  $V_{in}$

$$V_o = \frac{V_{in}}{\left( \frac{1}{R_L} (909,09091) \right)}$$

$$V_o = V_{in} R_L (1,1 * 10^{-3})$$

Por último, se determina el valor de  $R_{Lmax}$  teniendo en cuenta que al ser ideal el A.O. la tensión de salida máxima será la misma que  $V_{cc} = 10[V]$ . Por lo tanto operando se obtiene:

$$R_{Lmax} = \frac{9090,9091}{V_{in}}$$

A partir de las relaciones obtenidas, se procede a completar la siguiente tabla:

-		$V_{in}[V]$		
$I_{RL}[\mu A]$		0.5	1	2
$R_L[K\Omega]$	0	0	0	0
	1	500	1000	2000
	2	500	1000	2000
	5	500	1000	2000
	10	500	1000	2000

Cuadro 1: Valores teóricos de  $I_{RL}$  en función de  $R_L$  y de  $V_{in}$

-		$V_{in}[V]$		
$V_o[V]$		0.5	1	2
$R_L[K\Omega]$	0	0	0	0
	1	0.55	1.1	2.2
	2	1.1	2.2	4.4
	5	2.75	5.5	11
	10	5.5	11	22

Cuadro 2: Valores teóricos de  $V_o$  en función de  $R_L$  y de  $V_{in}$

Aquellos valores que superen el valor de la tensión de  $V_{cc}$ , la salida se enclava a ese mismo valor y la forma de la onda se recorta.

## 4.2. Simulaciones

Se realizaron diferentes simulaciones con LTSpice para observar el comportamiento de  $I_{RL}$  y  $V_o$ . Luego se completaron nuevamente las tablas anteriores con los valores simulados.

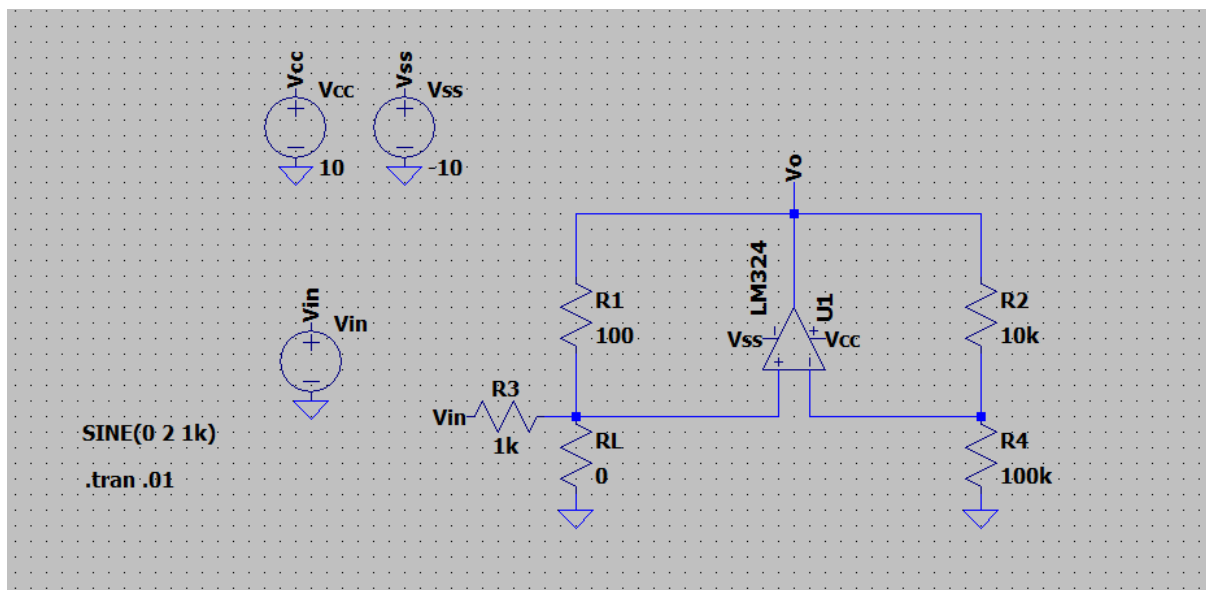


Figura 9: Circuito simulado

-		$V_{in}[V]$		
$I_{RL}[\mu A]$		0.5	1	2
$R_L[K\Omega]$	0	0	0	0
	1	495.93	994.15	1994.08
	2	495.52	993.33	1991.35
	5	493.86	990.39	1549.12
	10	488.45	771.00	783.06

Cuadro 3: Valores simulados de  $I_{RL}$  en función de  $R_L$  y de  $V_{in}$

-		$V_{in}[V]$		
$V_o[V]$		0.5	1	2
$R_L[K\Omega]$	0	0	0	0
	1	0.545	1.093	2.193
	2	1.089	2.185	4.380
	5	2.715	5.446	8.475
	10	5.372	8.458	8.492

Cuadro 4: Valores simulados de  $V_o$  en función de  $R_L$  y de  $V_{in}$

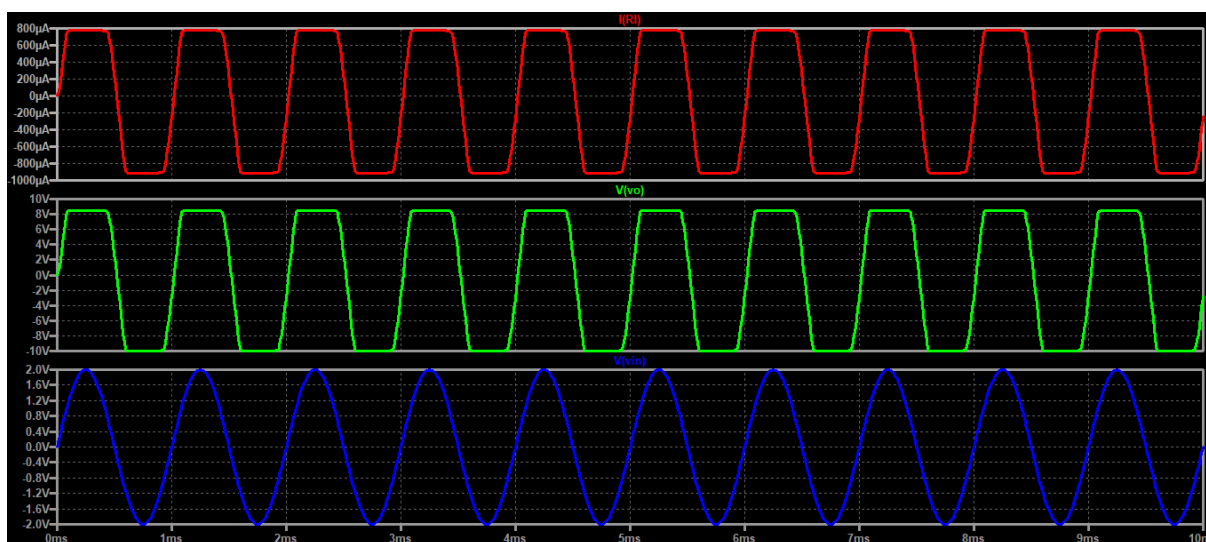


Figura 10: Simulación con  $V_{in} = 2[V]$  y  $R_L = 10[K\Omega]$  simulado

Aquí se observa como satura el amplificador a un valor próximo a  $V_{cc}$  cuando su ganancia teórica supera.

### 4.3. Implementación

### 4.4. Comparación entre resultados

En la siguiente tabla comparativa se reflejan los resultados obtenidos en cada una de las etapas previas y se calcula el error relativo que existe entre los resultados.

Para simplificar los cálculos, se compararon los resultados usando una  $R_L = 1[K\Omega]$

Entrada $V_{in}$ [V]	Salida $V_o$ [V]			Errores relativos (%)		
	Teoría	Simulación	Experimental	Exp/Teo	Exp/Sim	Sim/Teo
0.5	0.55	0.545	-	-	-	0.90
1	1.1	1.093	-	-	-	0.63
2	2.2	2.193	-	-	-	0.31

## 4.5. Conclusión

Se puede concluir que la herramienta de simulación es bastante precisa, pues el error relativo respecto al valor teórico siempre se mantuvo menor al 1 %.

Ahora bien, el error relativo entre el valor teórico y el experimental es mas grande, aproximadamente (... %), esto se debe a que los componentes no son ideales y el comportamiento puede variar en un rango acotado indicado por el fabricante.

## 5. Rectificador de precisión

Datos: Amplificador Operacional LM324

$V_{cc} = 10V$   $V_{ss} = -10V$

$D1 = D2 = 1N4148$

$R1 = R3 = R4 = 10K\Omega$  1% y  $R2 = 5K\Omega$  1%

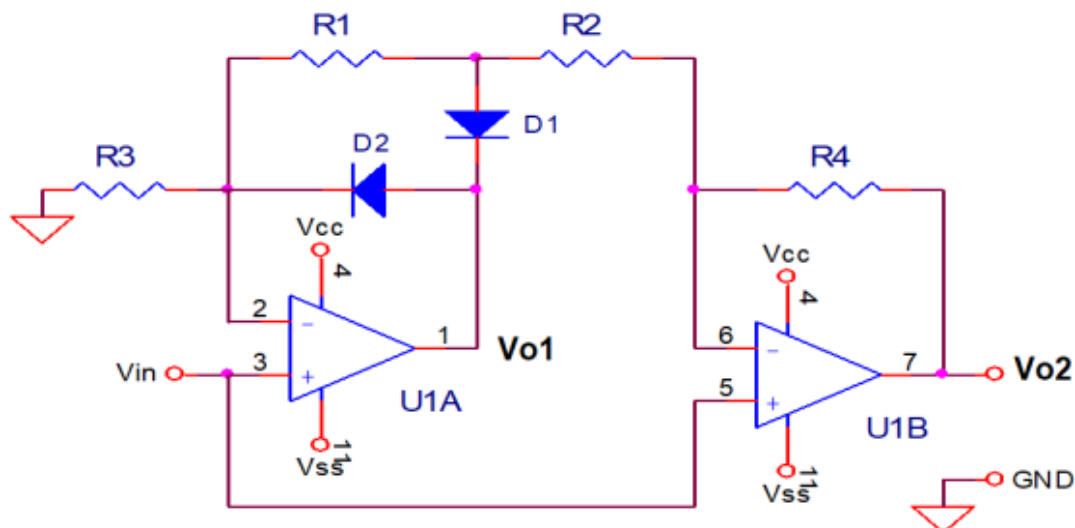


Figura 11: Circuito propuesto

### 5.1. Análisis teórico

Para determinar  $V_o$  en función de  $V_{in}$  el análisis se hace para cuando  $V_{in}$  es positiva y cuando  $V_{in}$  es negativa.

#### 5.1.1. $V_o = f(V_{in})$ con $V_{in} > 0$

Para ésta condición entonces  $D2 = ON$  y  $D1 = OFF$ .

Además considerando pasivada la entrada del AO U1B se plantea la ley de los nodos de Kirchhoff en el nodo "6"

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

$$\frac{V_o}{10[K\Omega]} = -\frac{V_{in}}{15[K\Omega]}$$

$$V_o = -\frac{2}{3}V_{in}$$

Luego pasivando la entrada de U1A

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

$$V_{in} = V_o \frac{15[K\Omega]}{25[K\Omega]}$$

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

Aplicando superposición para encontrar el resultado completo

$$V_o = V_{in} \frac{5}{3} - V_{in} \frac{2}{3}$$

$$\boxed{V_o = V_{in}}$$

### 5.1.2. $V_o = f(V_{in})$ con $V_{in} < 0$

Para ésta condición entonces D1 = ON y D2= OFF.

Además considerando pasivada la salida del AO U1A se plantea la ley de los nodos de Kirchhoff en el nodo "6"

$$V_{in} = V_o \frac{R_2}{R_2 + R_4}$$

$$V_{in} = V_o \frac{5[K\Omega]}{15[K\Omega]}$$

$$V_o = 3V_{in}$$

Luego pasivando la entrada de U1B y tomando  $V_{oB}$  como tensión de salida del amplificador U1B, resulta:

$$\frac{V_{oB}}{R_2} = -\frac{V_o}{R_4}$$

$$\frac{V_{oB}}{5[K\Omega]} = -\frac{V_o}{10K\Omega}$$

$$V_o = -2V_{oB}$$

Por otro lado, la tensión de salida de  $V_{oB}$  se obtiene planteando el divisor de tension del AO U1B:

$$V_{in} = V_{oB} \frac{R_3}{R_1 + R_3}$$

$$V_{in} = V_{oB} \frac{10K\Omega}{20K\Omega}$$

$$V_{in} = \frac{1}{2} V_{oB}$$

Reemplazando queda:

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

Aplicando superposición para encontrar el resultado completo

$$V_o = 3V_{in} - 4V_{in}$$

$$\boxed{V_o = -V_{in}}$$

Entonces, cuando la tensión de entrada es positiva, la tensión de salida es igual a la entrada, mientras que cuando la tensión de entrada es negativa, la tensión de salida tendrá la misma amplitud pero será positiva.



## 5.2. Simulación

Se realizaron diferentes simulaciones con LTSpice para observar el comportamiento a la salida para diferentes valores de entrada.

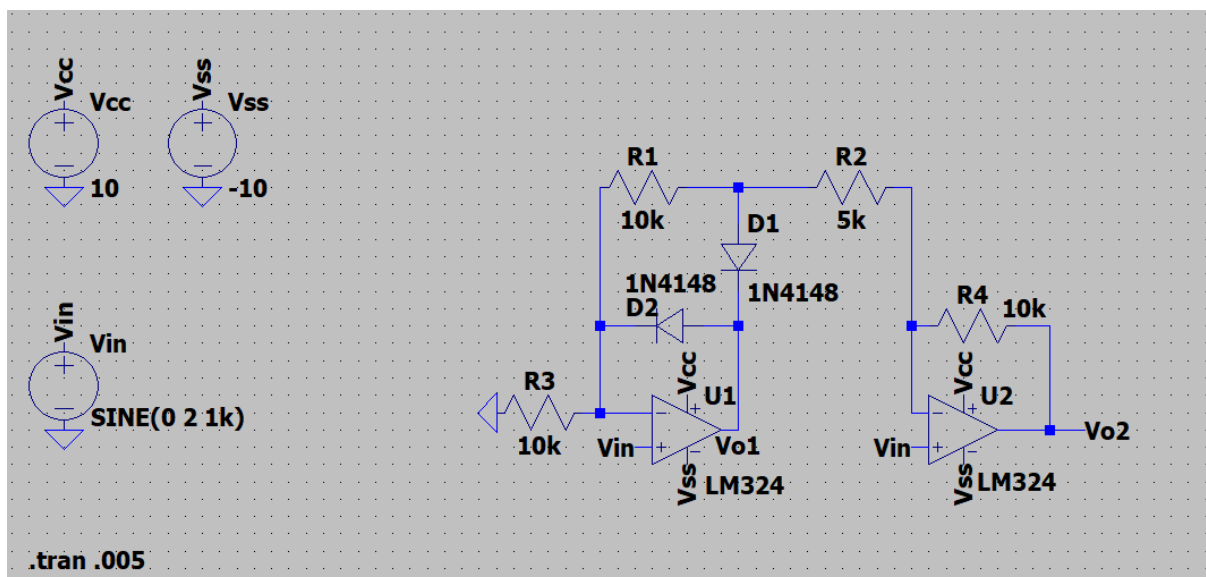


Figura 12: Circuito simulado

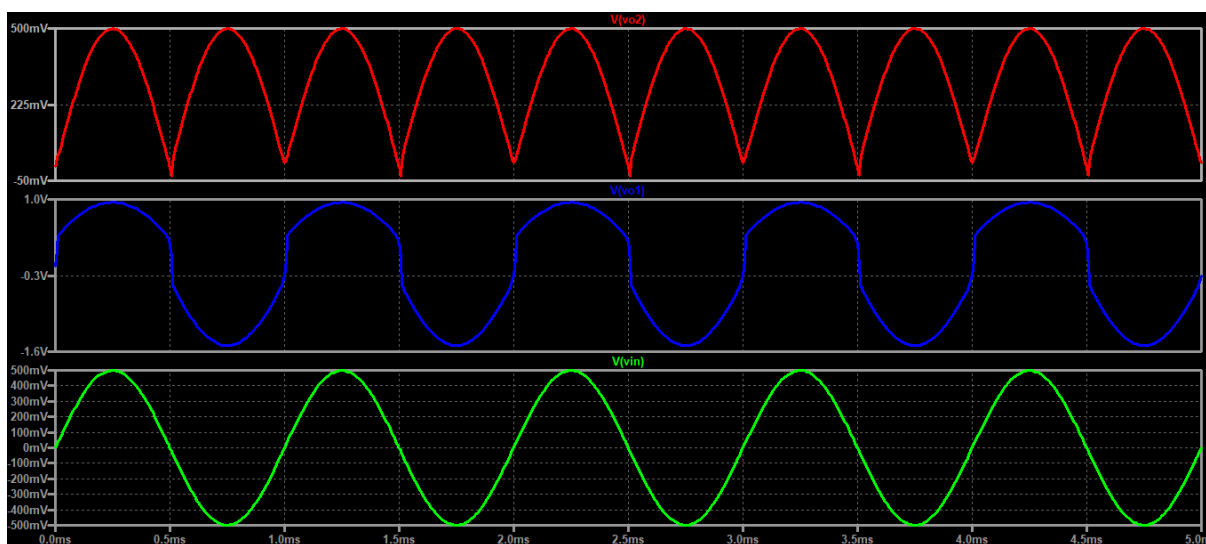


Figura 13:  $V_{O1}$  (azul) y  $V_{O2}$  (rojo) con  $V_{in} = 0,5[V]$ .

	$V_{in} = 0,5[V]$
$V_{O1}$	947.31 [mV]
$V_{O2}$	498.53 [mV]

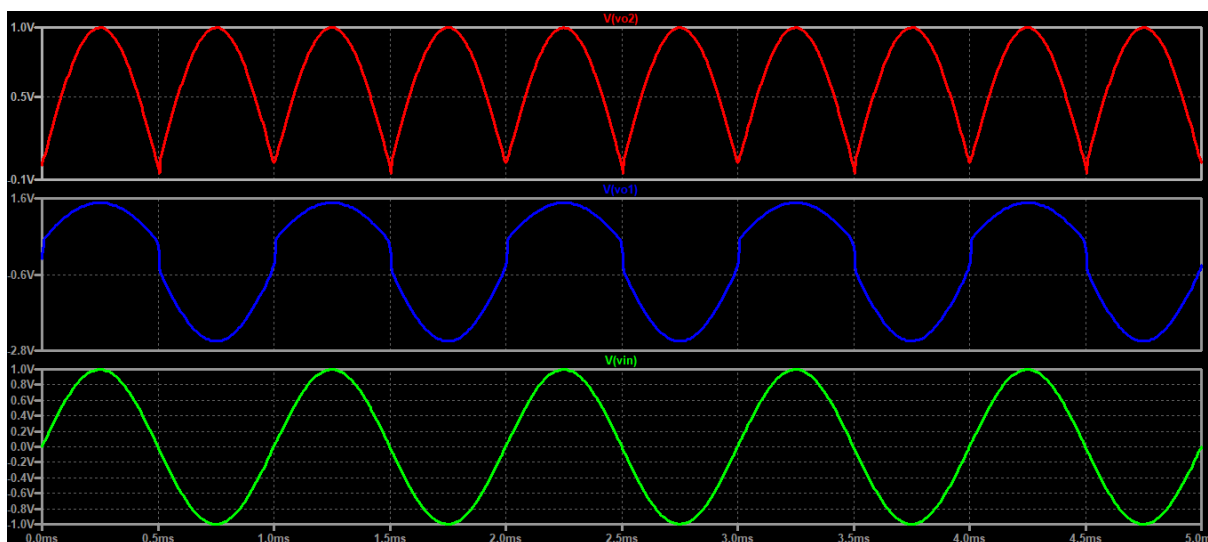


Figura 14:  $V_{o1}$  (azul) y  $V_{o2}$  (rojo) con  $V_{in} = 1[V]$ .

	$V_{in} = 1[V]$
$V_{o1}$	1.47 [V]
$V_{o2}$	997.73 [mV]

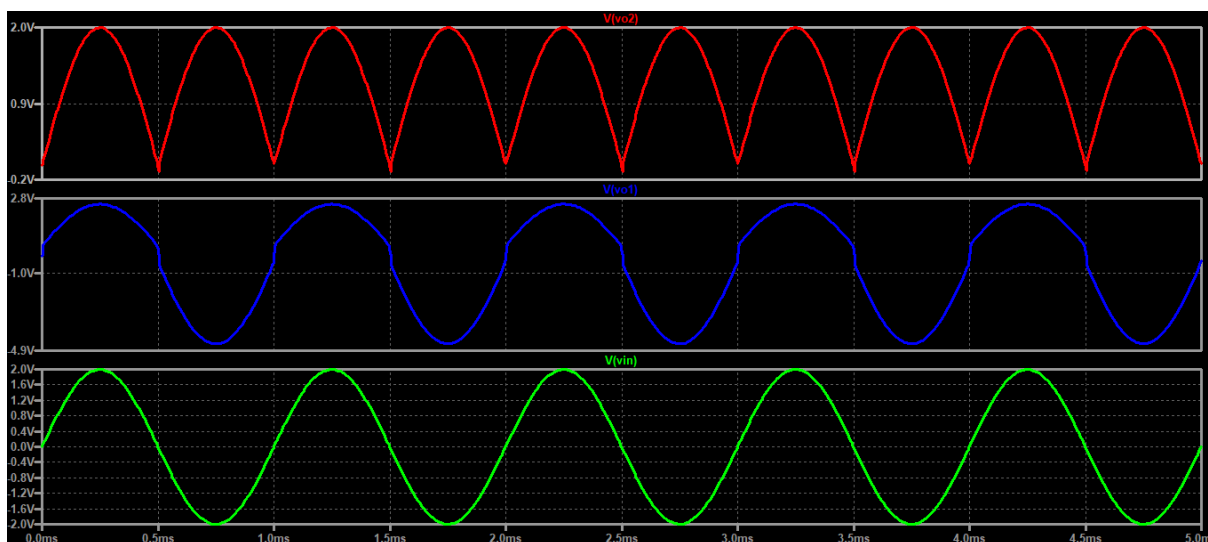


Figura 15:  $V_{o1}$  (azul) y  $V_{o2}$  (rojo) con  $V_{in} = 2[V]$ .

	$V_{in} = 2[V]$
$V_{o1}$	2.51 [V]
$V_{o2}$	1.99 [V]

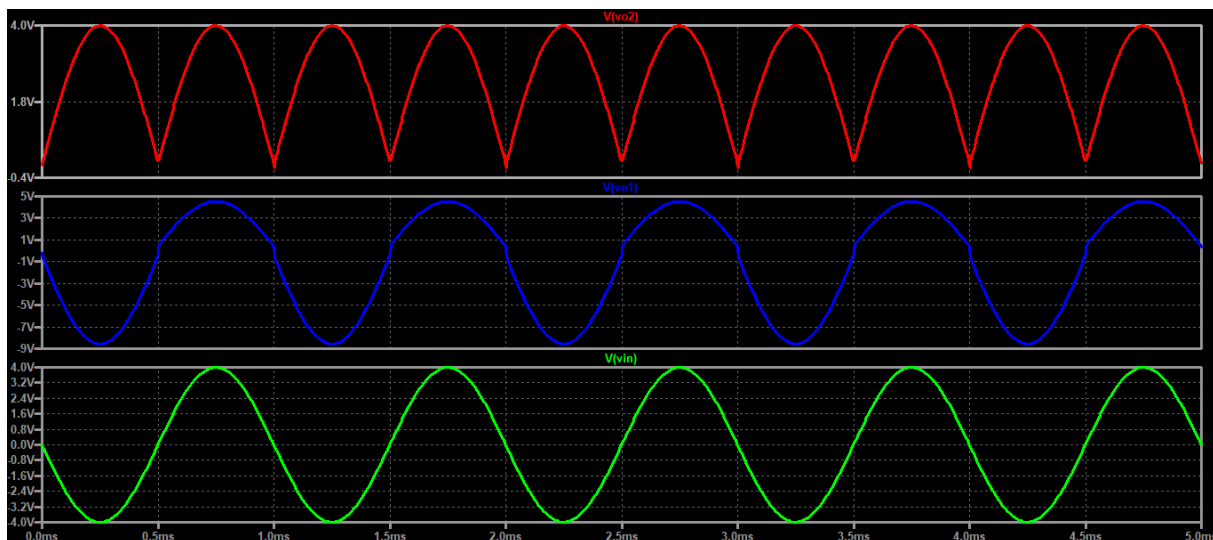


Figura 16:  $V_{O1}$  (azul) y  $V_{O2}$  (rojo) con  $V_{in} = -4[V]$ .

	$V_{in} = -4[V]$
$V_{O1}$	-8.57 [V]
$V_{O2}$	3.99 [V]

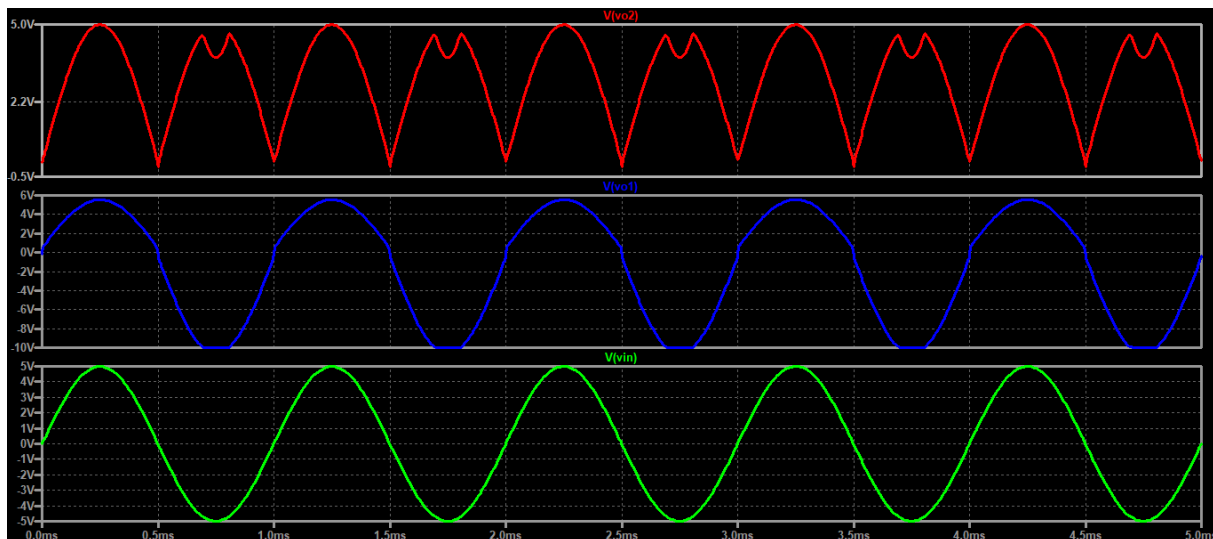


Figura 17:  $V_{O1}$  (azul) y  $V_{O2}$  (rojo) con  $V_{in} = 5[V]$ .

	$V_{in} = 5[V]$
$V_{O1}$	5.54 [V]
$V_{O2}$	4.98 [V]

Como se observa en las dos últimas imágenes la salida  $V_2$  se ve distorsionada,