

# Universidad Nacional de Córdoba



Facultad De Ciencias Exactas Físicas y Naturales

---

Cátedra de Síntesis de Redes Activas

## Trabajo de Laboratorio 1

---

**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

<b>1. Enunciado</b>	<b>2</b>
1.1. Circuito 1: Amplificador Diferencial . . . . .	2
1.1.1. Circuito . . . . .	2
1.1.2. Análisis . . . . .	2
1.1.3. Mediciones-Simulaciones . . . . .	2
1.2. Circuito 2: Fuente de Corriente Controlada por Tensión . . . . .	3
1.2.1. Circuito . . . . .	3
1.2.2. Análisis . . . . .	3
1.3. Circuito 3: Rectificador de Precisión . . . . .	3
1.3.1. Circuito . . . . .	3
1.3.2. Análisis . . . . .	4
1.3.3. Mediciones-Simulaciones . . . . .	4
1.4. Circuito 4: Comparador con Histéresis . . . . .	4
1.4.1. Circuito . . . . .	4
1.4.2. Análisis . . . . .	4
1.4.3. Mediciones-Simulaciones . . . . .	5
1.5. Ejercicio Adicional I . . . . .	5
1.6. Ejercicio Adicional II . . . . .	5
<b>2. Introducción</b>	<b>6</b>
<b>3. Desarrollo</b>	<b>7</b>
3.1. Circuito 1: . . . . .	7
3.1.1. Análisis . . . . .	7
3.1.2. Simulación . . . . .	8
3.2. Circuito 2: . . . . .	10
3.2.1. Análisis . . . . .	10
3.2.2. Simulación . . . . .	11
3.3. Circuito 3: . . . . .	12
3.3.1. Análisis . . . . .	13
3.3.2. Simulación . . . . .	14
3.4. Circuito 4: . . . . .	14
3.4.1. Análisis . . . . .	14
3.4.2. Simulación . . . . .	16

## 1. Enunciado

Este trabajo consistirá en analizar los siguientes circuitos con amplificadores operacionales en diferentes configuraciones y además en aplicaciones tanto lineales como no-lineales, todo el análisis se hará con el modelo ideal de los mismos.

Se considerará demás lo siguiente:

$$V_C = (V_1 + V_2)/2$$

$$V_D = (V_2 - V_1)$$

### 1.1. Circuito 1: Amplificador Diferencial

#### 1.1.1. Circuito

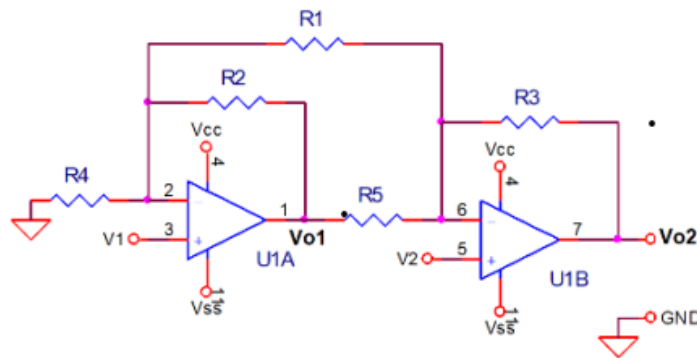


Figura 1: Amplificador Diferencial

#### Datos:

- LM324
- $V_{cc} = 10[V]$
- $V_{ss} = -10[V]$
- $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R$

#### 1.1.2. Análisis

- $V_{01} = f(V_1, V_2)$
- $V_{01} = f(V_D, V_C)$
- $V_{02} = f(V_1, V_2)$
- $V_{02} = f(V_D, V_C)$
- Impedancias vistas desde la fuente de señal

#### 1.1.3. Mediciones-Simulaciones

- Gráfico Entrada/Salida:  $V_{01} = f(V_1)$  y  $V_{01} = f(V_2)$ ,  $V_{ss} < V_1, V_2 < V_{cc}$
- Gráfico Entrada/Salida:  $V_{01} = f(V_C)$  y  $V_{02} = f(V_C)$ ,  $V_{ss} < V_C < V_{cc}$

## 1.2. Circuito 2: Fuente de Corriente Controlada por Tensión

### 1.2.1. Circuito

Datos:

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

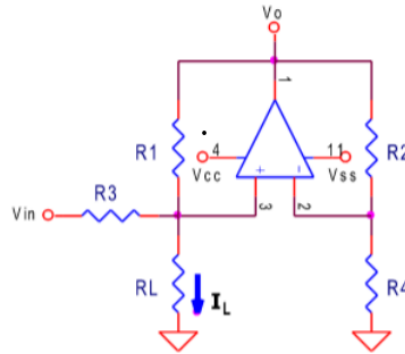


Figura 2: Fuente de Corriente

### 1.2.2. Análisis

- $I_{RL} = f(R_L, V_{in}), V_o = f(V_{in}, R_L)$
- $R_{LMax} = f(V_{in})$

Completar la siguiente tabla con Mediciones/Simulaciones.

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

## 1.3. Circuito 3: Rectificador de Precisión

### 1.3.1. Circuito

Datos:

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

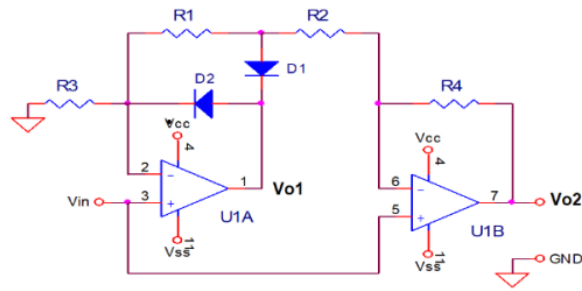


Figura 3: Rectificador de Precisión

### 1.3.2. Análisis

- $V_{01} = f(V_{in})$ ,  $V_{02} = f(V_{in})$ , con  $0V < V_{in}$  (Ignorar  $R_d$  del Diodo).
- $V_{01} = f(V_{in})$ ,  $V_{02} = f(V_{in})$ , con  $V_{in} > 0V$  (Ignorar  $R_d$  del Diodo).

### 1.3.3. Mediciones-Simulaciones

- Gráfico Entrada/Salida:  $V_{01} = f(V_{in})$  y  $V_{02} = f(V_{in})$ ,  $V_{ss} < V_1 < V_{cc}$

## 1.4. Circuito 4: Comparador con Histéresis

### 1.4.1. Circuito

Datos:

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

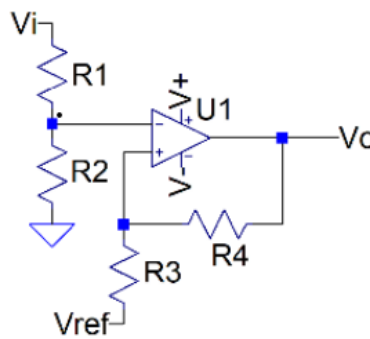


Figura 4: Comparador con Histéresis

### 1.4.2. Análisis

- Umbral de conmutación cuando  $V_o = V_+$ .
- Impedancia vista por las fuentes de señal

**1.4.3. Mediciones-Simulaciones**

- Gráfico Entrada/Salida:  $V_o = f(V_{in})$ ,  $V_- < V_c < V_+$

**1.5. Ejercicio Adicional I**

Diseñar un regulador de carga de batería, que corte cuando se alcanzan los 12.8V y reinicie la carga cuando baja a 10.5V.

**Materiales:**

- AO ideal con Saturación.
- Resistencias.
- 1 Relé 12V, Normal Abierto, 20mA de corriente de bobina.
- 1 Transistor NPN BC548 o PNP BC558.
- 1 Diodo 1N4148.
- 1 Referencia de Tensión: TL431.
- Batería 12V (Rango 8V a 13V) -  $R_{in} = 0,5\Omega$ .
- Celda Fotovoltaica: 15V Tensión sin carga, 1A de corriente de carga.

**1.6. Ejercicio Adicional II**

Diseñar un oscilador de relajación que oscile a 1kHz.

**Materiales:**

- AO ideal con Saturación.
- Resistencias.
- Capacitor de 1uF.

## 2. Introducción

Los **amplificadores operacionales** (conocidos también como **op-amps**) son dispositivos electrónicos fundamentales en el diseño de circuitos analógicos. Originalmente desarrollados para realizar operaciones matemáticas en computadoras analógicas, hoy en día se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, desde amplificación de señales hasta filtros, osciladores y más.

### Características Principales:

- **Ganancia de tensión casi infinita:** Teóricamente, un op-amp ideal amplifica infinitamente la diferencia de voltaje entre sus entradas.
- **Impedancia de entrada casi infinita:** Permite que fluya una muy pequeña corriente hacia las entradas, lo que evita la carga del circuito previo y simplifica el acoplamiento entre varios de los mismos.
- **Impedancia de salida casi nula:** La salida podría entregar bastante intensidad de corriente con una mínima caída de potencial en su salida.
- **Rechazo al modo común:** Tiene la capacidad de amplificar las tensiones diferenciales, no así las tensiones comunes a sus terminales, de aquí sale el concepto de la relación de rechazo al modo común.

### Aplicaciones comunes:

- **Comparadores:** Pueden indicar mediante un análisis de la salida, si la tensión en su entrada es mayor a cierto umbral.
- **Filtros Activos:** Mediante un filtro pasivo y un amplificador operacional, es posible mejorar las características del filtro en cuestión.
- **Amplificadores de señal:** Tienen la capacidad de proveer a lazo cerrado una ganancia muy constante y alta, útil en aplicaciones en baja señal.
- **Adaptaciones de señal:** Mediante operaciones matemáticas aplicadas analógicamente a la señal, es posible adaptar una señal de entrada a los requerimientos que se poseen.
- **Osciladores:** Pueden ser utilizados para generar señales periódica, como onda sinusoidales, cuadradas, triangulares, de los mismos surge el famoso integrado "555".
- Etc.

Los amplificadores operacionales son componentes versátiles y esenciales en el diseño de circuitos analógicos, gracias a su capacidad para ser configurados de diversas maneras y su utilidad en una multitud de aplicaciones electrónicas.

### 3. Desarrollo

#### 3.1. Circuito 1:

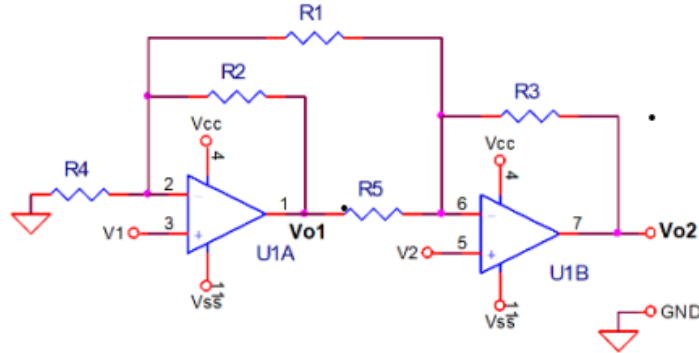


Figura 5: Amplificador Diferencial

##### 3.1.1. Análisis

En este circuito se propondrá que el mismo está en la zona lineal, ahora con esta suposición aplicamos el método de superposición para obtener la salida:

$$V_{01}|_{V_2=0} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1//R_4}\right) \cdot V_1 = \left(1 + \frac{R}{R/2}\right) \cdot V_1 = 3V_1$$

$$V_{01}|_{V_1=0} = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \cdot V_2 = -V_2$$

$$V_{02}|_{V_1=0, V_{01}=0} = \left(1 + \frac{R_3}{R_1//R_5}\right) \cdot V_2 = \left(1 + \frac{R}{R/2}\right) \cdot V_2$$

$$V_{02}|_{V_2=0, V_{01}=0} = -\left(\frac{R_3}{R_1}\right) \cdot V_1 = -V_1$$

$$V_{02}|_{V_1=0, V_2=0} = -\left(\frac{R_3}{R_5}\right) \cdot V_{01} = -V_{01}$$

**Entonces:**

$$V_{01} = 3V_1 - V_2$$

$$V_{02} = 3V_2 - V_1 - V_{01} = 3V_2 - V_1 - 3V_1 + V_2 = 4(V_2 - V_1)$$

$$\boxed{V_{01} = 3V_1 - V_2}$$

$$\boxed{V_{02} = 4(V_2 - V_1)}$$

Ahora si reemplazamos  $V_D = (V_2 - V_1)$ , se obtendrá:

$$\boxed{V_{02} = 4V_D}$$

Pero si se reemplaza con una tensión común  $V_1 = V_2$ , con  $V_C = (V_1 + V_2)/2$ :

$$\boxed{V_{02} = 0}$$



Por lo que la relación de rechazo al modo común **RRMC** daría en este caso:

$$RRMC = \frac{V_D}{V_C} = \infty$$

Para el análisis de las **impedancias** vistas por cada entrada, se supone que el amplificador operacional es **ideal**, por lo cual:

$$Z_{i1} = \frac{V_1}{I_{i1}} = \infty$$

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

La impedancia de salida será:

$$Z_o = \frac{V_o}{I_o} = 0$$

### 3.1.2. Simulación

Se realizaron difetentes simulaciones en **LTSpice** observando el comportamiento de cada salida del AO:

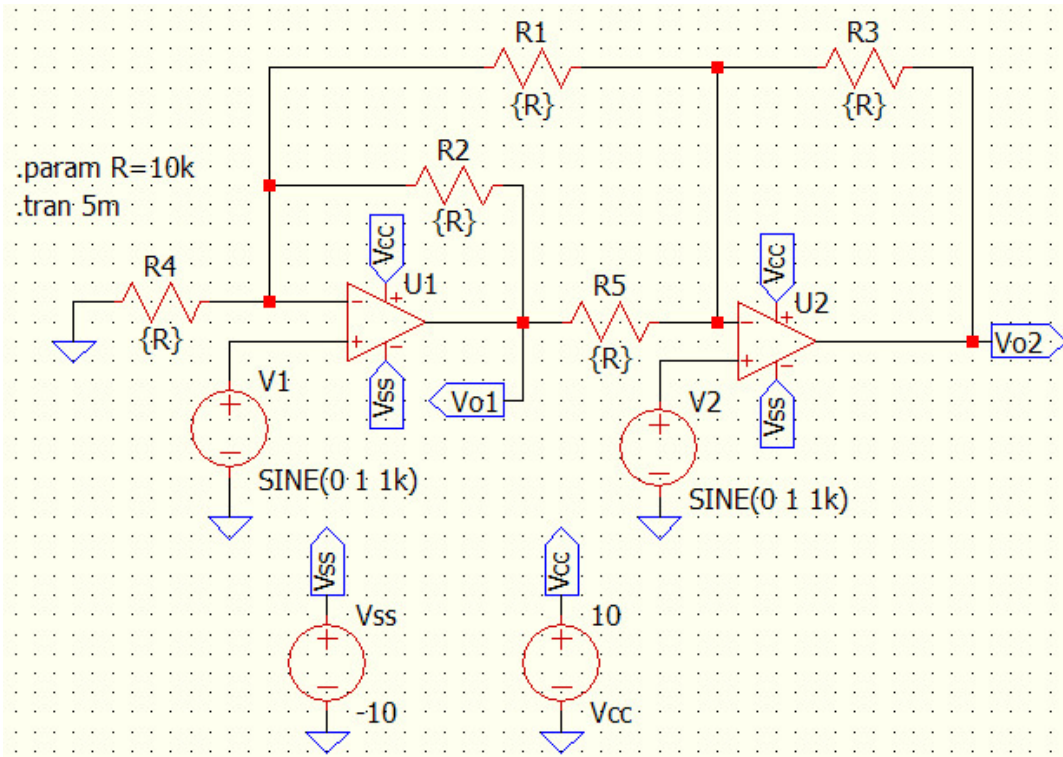


Figura 6: Circuito Simulado en LTSpice

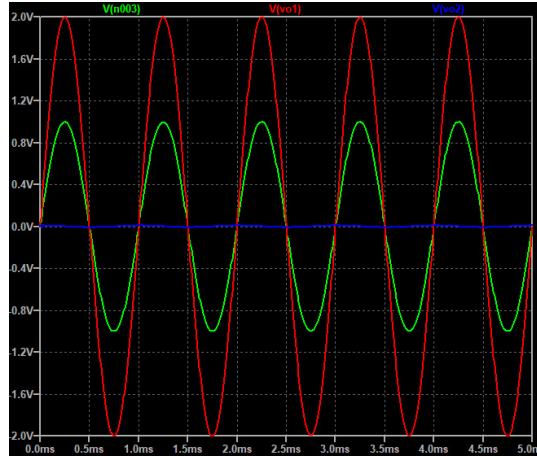
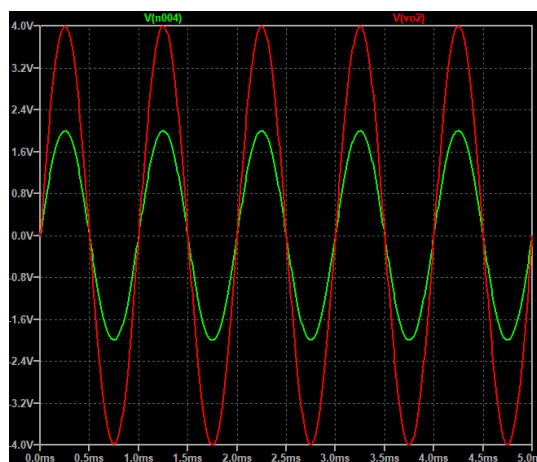


Figura 7: Salida del AO

Figura 8:  $V_{in1}$  y  $V_{o1}$ Figura 9:  $V_{in2}$  y  $V_{o2}$

### 3.2. Circuito 2:

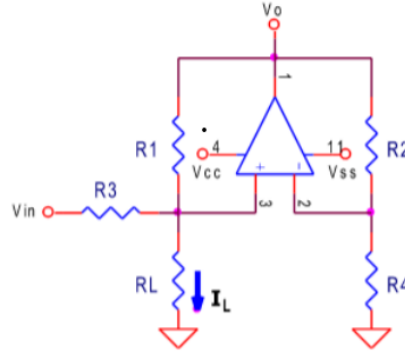


Figura 10: Fuente de Corriente controlada por Tensión

#### 3.2.1. Análisis

Para analizar este circuito, simplemente hacemos las ecuaciones de nodo, si tomamos la ganancia del operacional como ideal (infinita) y además que el mismo se encuentra en la zona lineal, podemos tomar que  $V_+ = V_-$ :

Entonces:

$$0 = \frac{V_-}{R_4} + \frac{-V_o + V_-}{R_2}$$

$$0 = \frac{V_+}{R_L} + \frac{-V_{in} + V_+}{R_3} + \frac{-V_o + V_+}{R_1}$$

$$I_L = \frac{V_+}{R_L}$$

Si de estas expresiones, se igualan, podremos hallar la relación entre la corriente en la carga  $I_L$  y la tensión de entrada  $V_{in}$ :

$$I_L = \frac{R_1 R_4 V_{in}}{R_1 R_3 R_4 + R_1 R_4 R_L - R_2 R_3 R_L}$$

Ahora para determinar los límites de este circuito, debemos conocer la tensión de salida  $V_o$

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

Con este dato, si tomamos que  $V_{omax} = V_{cc} * 0,9$  y se reemplaza por cada valor de resistencia dado, podemos hallar cuanto será  $R_{Lmax}$ :

$$R_{Lmax} = \frac{818,2 * V_{cc}}{V_{in}}$$

Este será el valor máximo de resistencia de carga de manera que la tensión de salida no supere la de alimentación, evitando así que el operacional no entre en saturación. Bajo esta condición, la corriente en la carga será:

$$I_L = 0,001 * V_{in}$$

## 3.2.2. Simulación

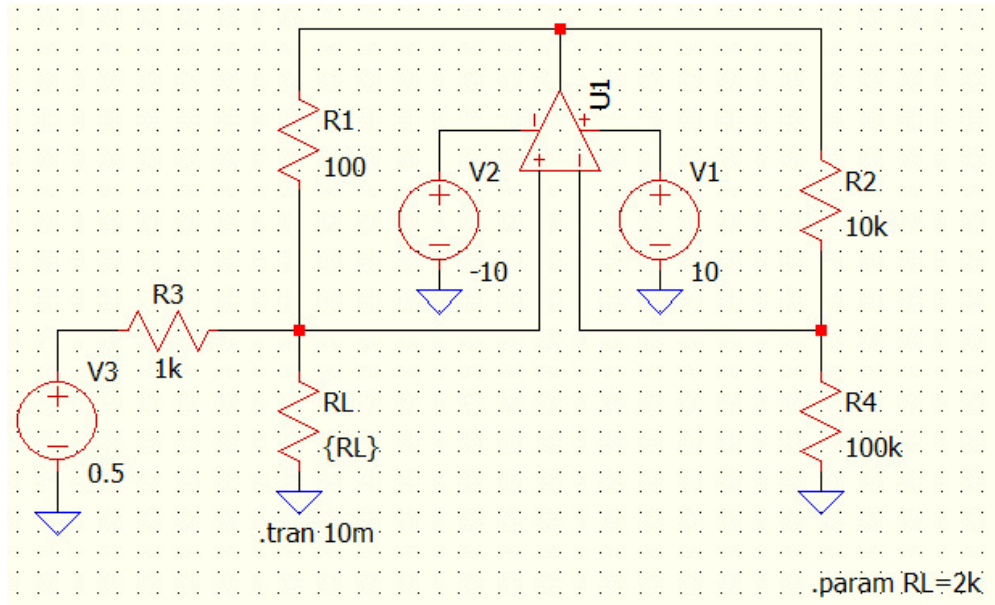
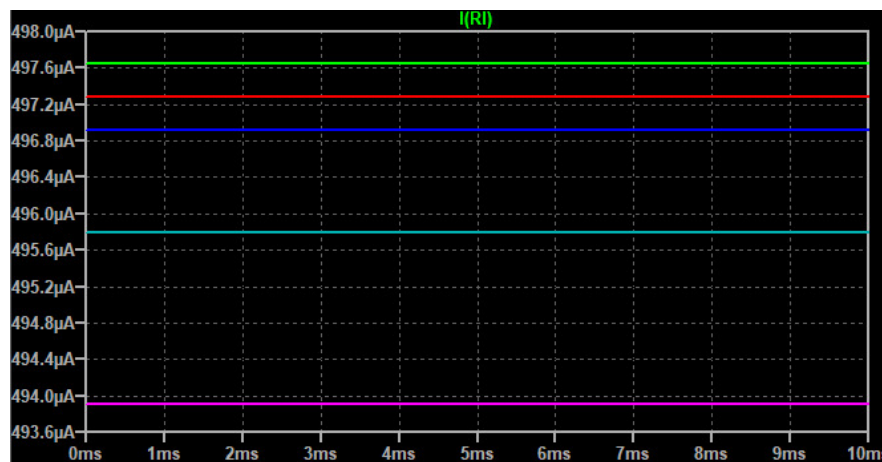
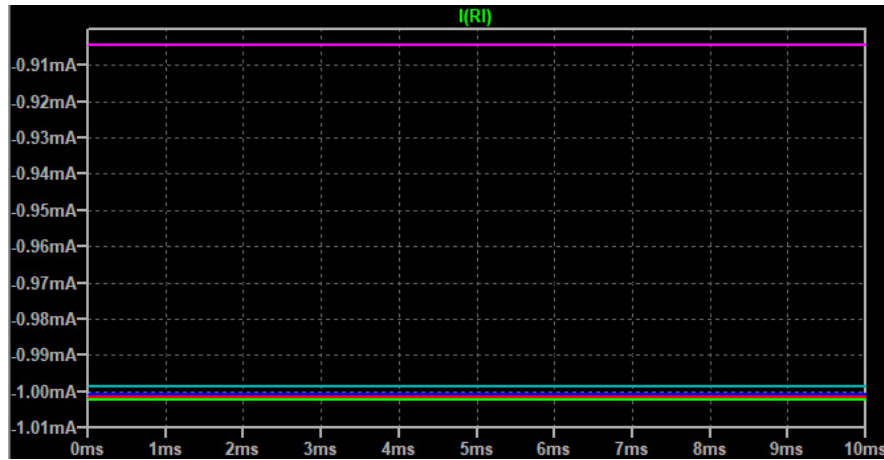
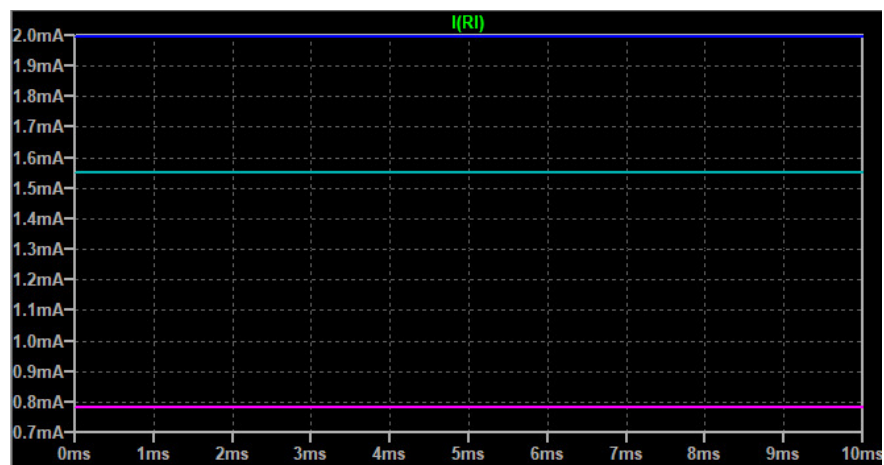


Figura 11: Circuito a simular

Figura 12: Caso 1,  $V_{in} = 0,5[V]$

Figura 13: Caso 2,  $V_{in} = -1[V]$ Figura 14: Caso 3,  $V_{in} = 2[V]$ 

### 3.3. Circuito 3:

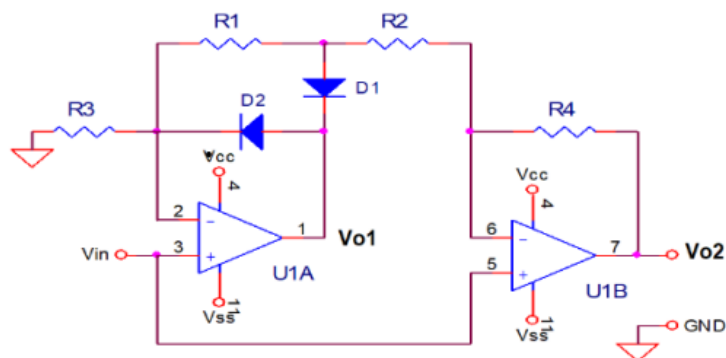


Figura 15: Rectificador de Precisión

### 3.3.1. Análisis

Para realizar el análisis, debemos tomarlo en dos partes, para una tensión de entrada positiva, es decir, para  $V_{in} > 0$  entonces:

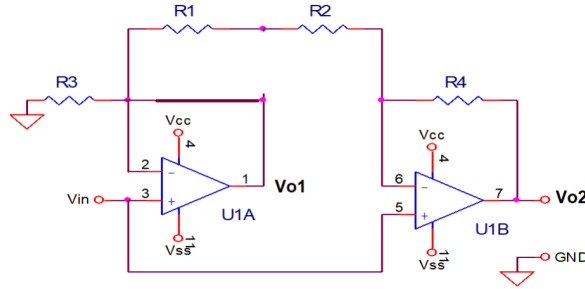


Figura 16: En tensiones Positivas

De aquí saldrán estas dos ecuaciones de nodos:

$$0 = \frac{V_{1+} - V_{2+}}{R_1 + R_2} + \frac{V_{1+}}{R_3}$$

$$0 = \frac{-V_{1+} + V_{2+}}{R_1 + R_2} + \frac{-V_{02} + V_{2+}}{R_4}$$

Si aplicamos superposición:

$$V_{02} = 1,66666 * V_{in} - 0,666666 * V_{in} = 1,0 * V_{in}$$

Ahora si analizamos nuevamente pero para una tensión de entrada negativa, es decir, para  $V_{in} < 0$  entonces:

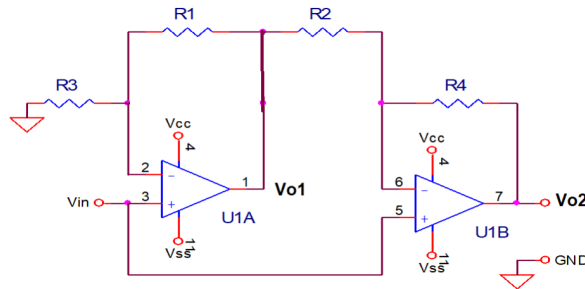


Figura 17: En tensiones Negativas

De aquí saldrán estas dos ecuaciones de nodos:

$$0 = \frac{V_{1+}}{R_3} + \frac{-V_{01} + V_{1+}}{R_1}$$

$$0 = \frac{-V_{02} + V_{2+}}{R_4} + \frac{-V_{01} + V_{2+}}{R_2}$$

Si aplicamos superposición:

$$V_{02} = 3 * V_{in} - 4 * V_{in} = -1,0 * V_{in}$$

### 3.3.2. Simulación

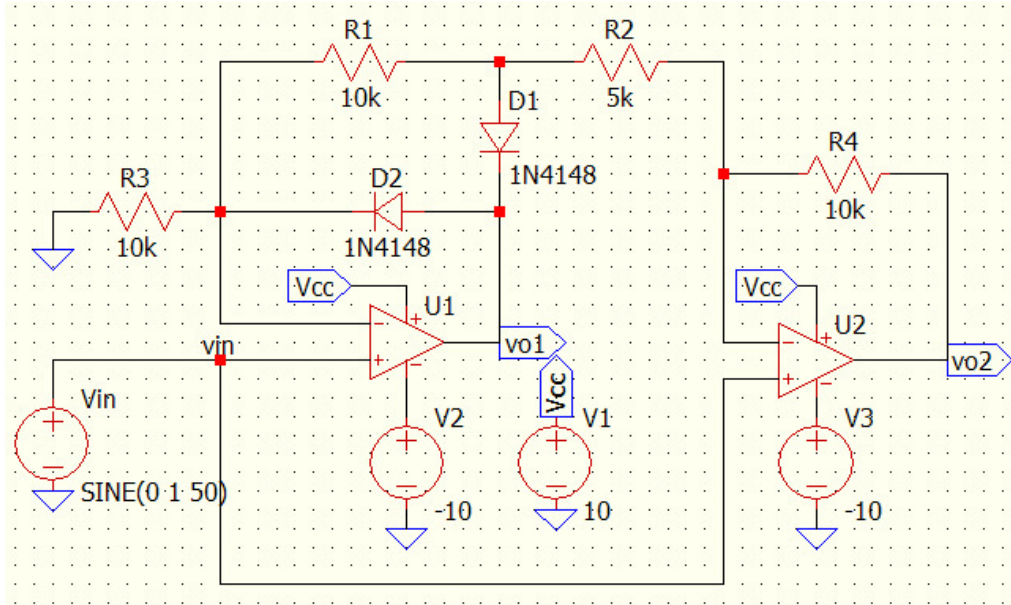


Figura 18: Circuito a Simular

### 3.4. Circuito 4:

#### 3.4.1. Análisis

Este es un circuito comparador con histéresis inversor "Schmitt Trigger Inversor", puesto con una fuente de alimentación asimétrica; Se comienza el análisis partiendo de que:

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

$$V_+ = V_o * \frac{R_3}{R_3 + R_4} + V_{ref} * \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

Ahora si  $V_d = V_+ - V_-$ , y tomamos que  $V_d > 0$ , entonces:

$$V_o = V_{cc}$$

$$V_+ > V_-, V_o * 0,166 + V_{ref} * 0,833 > V_{in} * 0,5$$

$$V_{in} > 6,667[V], \rightarrow V_o = 10[V]$$

Pero con  $V_d < 0$ , entonces:

$$V_o = V_{ss} = 0[V]$$

$$V_+ < V_-, V_{ref} * 0,833 < V_{in} * 0,5$$

$$V_{in} < 3,33[V], \rightarrow V_o = 0[V]$$

Ahora si  $V_d = 0$ , entonces:

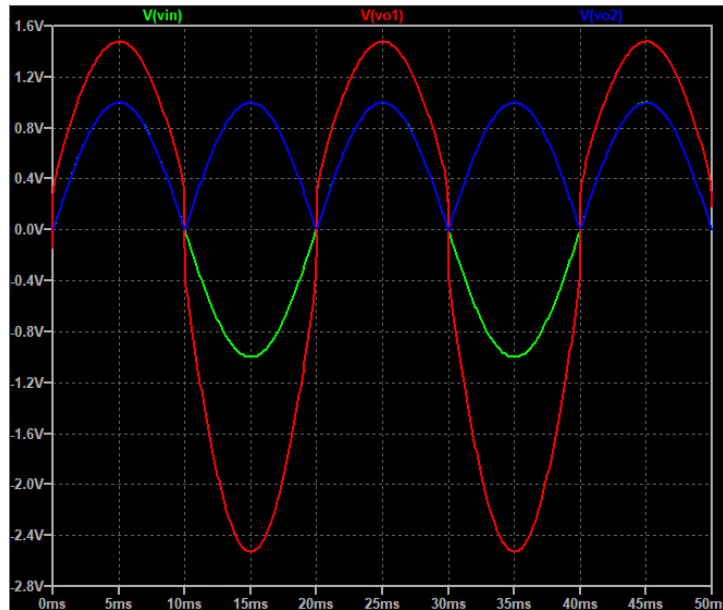


Figura 19: Salida

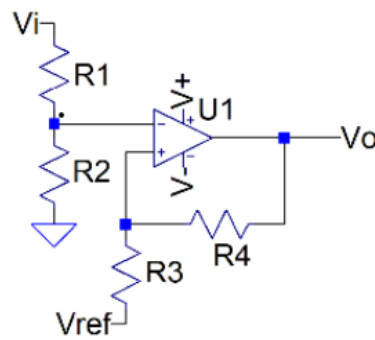


Figura 20: Comparador con Histéresis

$$V_o = 0$$

$$V_+ = V_-, V_{ref} * 0,833 = V_{in} * 0,5$$

$$V_{in} = 3,33[V], \rightarrow V_o = 0[V]$$



## 3.4.2. Simulación

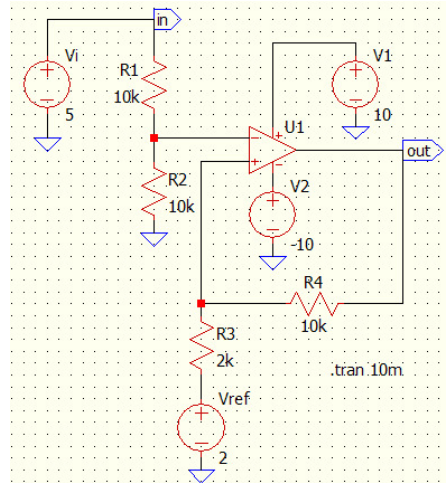


Figura 21: circuito en LTSpice

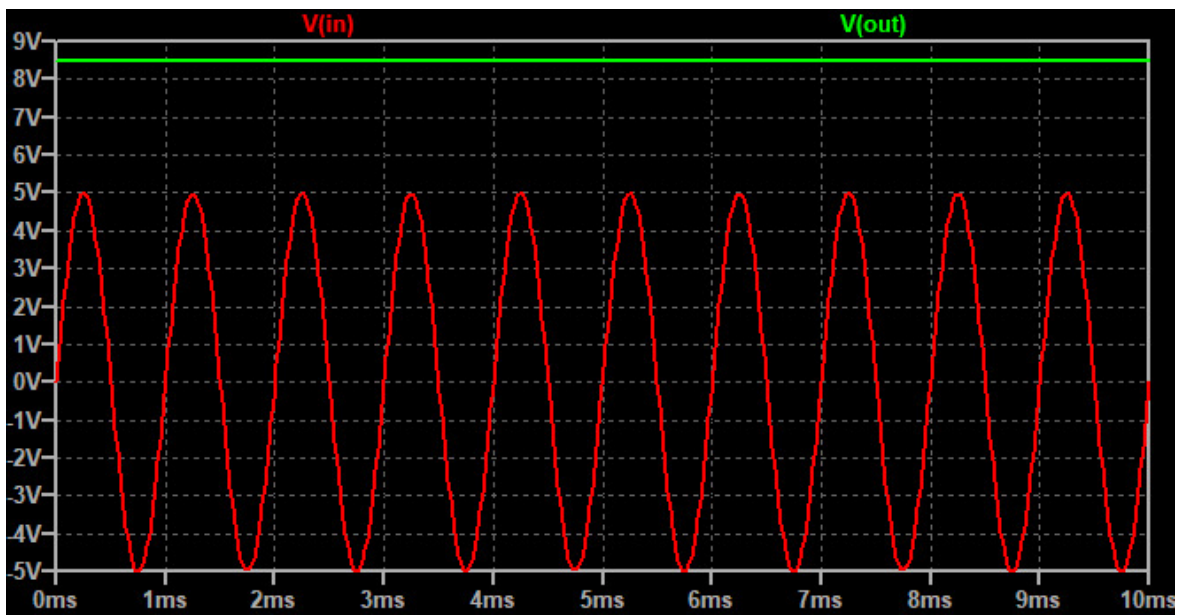


Figura 22: Salida