

Universidad Nacional de Córdoba
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Síntesis de Redes Activas
Trabajo Práctico N°1

Docentes:
Dr. Ing. Pablo Ferreyra
Ing. César Reale

Autores:
Matías Lucas Morales Robles
José Ignacio Torres
Esteban Samuel Suárez

Índice

1. Circuito I: Amplificador Diferencial	2
1.1. Marco teórico	2
1.2. Cálculos teóricos	3
1.2.1. Tensiones v_{o1} y v_{o2} en función de v_1 y v_2	3
1.2.2. Tensiones v_{o1} y v_{o2} en función de v_d y v_c	4
1.2.3. Impedancias vistas por las fuentes de señal	5
1.3. Simulación	6
1.3.1. Barrido para v_1	6
1.3.2. Barrido para v_2	6
1.3.3. Barrido para modo común	7
1.3.4. Impedancias de entrada	8
1.4. Mediciones Físicas	9
1.4.1. Barrido para v_1	9
1.4.2. Barrido para v_2	9
1.4.3. Barrido para modo común	10
2. Circuito III: Rectificador de Precisión	11
2.1. Marco teórico	11
2.2. Cálculos teóricos	12
2.2.1. Tensiones v_{o1} y v_{o2} en función de v_i	12
2.3. Simulación	14
2.3.1. Transferencia para v_{o1}	14
2.3.2. Transferencia para v_{o2}	14
2.3.3. Análisis temporal para v_{o2}	15
2.4. Mediciones Físicas	16
2.4.1. Transferencia para v_{o1}	16
2.4.2. Transferencia para v_{o2}	16
2.4.3. Análisis temporal para v_{o2}	17

1. Circuito I: Amplificador Diferencial

1.1. Marco teórico

En el primer circuito se utiliza un amplificador compuesto por dos etapas, el cual cuenta con dos entradas de señal. Está implementado con una fuente de alimentación simétrica de ± 10 V y todas las resistencias empleadas tienen el mismo valor. A continuación se muestra el circuito implementado:

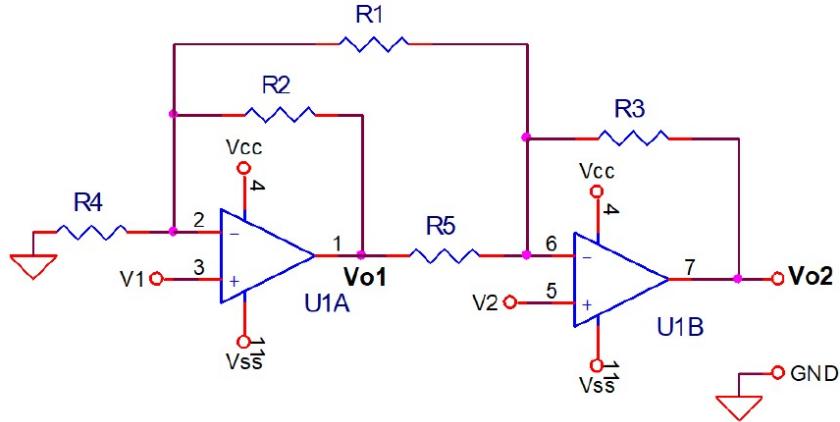


Figura 1: Circuito implementado

Cabe aclarar que para este circuito se analizan y simulan las salidas v_{o1} y v_{o2} tanto para las entradas v_1 y v_2 , como para el modo común (v_c) y el modo diferencial (v_d).

1.2. Cálculos teóricos

1.2.1. Tensiones v_{o1} y v_{o2} en función de v_1 y v_2

Primeramente se procedió a calcular v_{o1} en función de v_1 y v_2 . Para ello, primero se pasivó la fuente de señal v_2 y se calcularon las corrientes i_1 (que va desde el nodo 2 hacia el nodo 1), i_2 (que va desde el nodo 2 hacia el nodo 6) e i_3 (que va desde el nodo 2 hacia masa) como se muestra a continuación:

$$i_1 = \frac{v_{o1} - v_1}{R} \quad (1)$$

$$i_2 = \frac{v_1}{R} \quad (2)$$

$$i_3 = \frac{v_1}{R} \quad (3)$$

A continuación, se procedió a calcular la sumatoria de las corrientes entrantes y salientes para el nodo 2, llegando al siguiente resultado:

$$i_1 = i_2 + i_3 \quad (4)$$

$$\frac{v_{o1} - v_1}{R} = \frac{v_1}{R} + \frac{v_1}{R} \quad (5)$$

$$v_{o1} = 3v_1 \quad (6)$$

A continuación se pasivó la fuente de señal v_2 y se calcularon las mismas corrientes como se muestra a continuación:

$$i_1 = \frac{v_{o1}}{R} \quad (7)$$

$$i_2 = -\frac{v_2}{R} \quad (8)$$

$$i_3 = 0 \quad (9)$$

A continuación, se hizo el cálculo de la sumatoria de las corrientes entrantes y salientes para el nodo 2, llegando al siguiente resultado:

$$i_1 = i_2 + i_3 \quad (10)$$

$$\frac{v_{o1}}{R} = -\frac{v_2}{R} + 0 \quad (11)$$

$$v_{o1} = -v_2 \quad (12)$$

De esta manera, se llega a la siguiente expresión para v_{o1} en función de v_1 y v_2 :

$$v_{o1} = 3v_1 - v_2 \quad (13)$$

Posteriormente se procedió a calcular v_{o2} en función de v_1 y v_2 . Para ello, primero se pasivó la fuente de señal v_2 y se calcularon las corrientes i_2 (que va desde el nodo 2 hacia el nodo 6), i_4 (que va desde el nodo 7 hacia el nodo 6) e i_5 (que va desde el nodo 6 hacia el nodo 1) como se muestra a continuación:

$$i_2 = \frac{v_1}{R} \quad (14)$$

$$i_4 = \frac{v_{o2}}{R} \quad (15)$$

$$i_5 = -\frac{3v_1}{R} \quad (16)$$

A continuación, se procedió a calcular la sumatoria de las corrientes entrantes y salientes para el nodo 6, llegando al siguiente resultado:

$$i_2 + i_4 = i_5 \quad (17)$$

$$\frac{v_1}{R} + \frac{v_{o2}}{R} = -\frac{3v_1}{R} \quad (18)$$

$$v_{o2} = -4v_1 \quad (19)$$

A continuación se pasivó la fuente de señal v_2 y se calcularon las mismas corrientes como se muestra a continuación:

$$i_2 = -\frac{v_2}{R} \quad (20)$$

$$i_4 = \frac{v_{o2} - v_2}{R} \quad (21)$$

$$i_5 = \frac{v_2 - (-v_2)}{R} = \frac{2v_2}{R} \quad (22)$$

A continuación, se hizo el cálculo de la sumatoria de las corrientes entrantes y salientes para el nodo 6, llegando al siguiente resultado:

$$i_2 + i_4 = i_5 \quad (23)$$

$$-\frac{v_2}{R} + \frac{v_{o2} - v_2}{R} = \frac{2v_2}{R} \quad (24)$$

$$v_{o2} = 4v_2 \quad (25)$$

De esta manera, se llega a la siguiente expresión para v_{o2} en función de v_1 y v_2 :

$$v_{o2} = -4(v_1 - v_2) \quad (26)$$

1.2.2. Tensiones v_{o1} y v_{o2} en función de v_d y v_c

Primeramente se procedió a definir las tensiones de modo común y de modo diferencial de la siguiente manera:

$$v_d = v_2 - v_1 \quad (27)$$

$$v_c = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (28)$$

Entonces, a continuación se procedió a tomar la ecuación (13) obtenida anteriormente y mediante el siguiente manejo matemático se llegó a una expresión del tipo $v_{o1} = f(v_d, v_c)$:

$$v_1 = v_c - \frac{v_d}{2} \quad (29)$$

$$v_2 = v_c + \frac{v_d}{2} \quad (30)$$

$$v_{o1} = 3\left(v_c - \frac{v_d}{2}\right) - \left(v_c + \frac{v_d}{2}\right) \quad (31)$$

$$v_{o1} = 3v_c - \frac{3}{2}v_d - v_c - \frac{v_d}{2} \quad (32)$$

$$v_{o1} = 2v_c - 2v_d \quad (33)$$

Posteriormente se tomó la ecuación (26) obtenida anteriormente y mediante un manejo matemático similar se llegó a una expresión del tipo $v_{o2} = f(v_d, v_c)$:

$$v_1 = v_c - \frac{v_d}{2} \quad (34)$$

$$v_2 = v_c + \frac{v_d}{2} \quad (35)$$

$$v_{o2} = 4(v_2 - v_1) \quad (36)$$

$$\boxed{v_{o2} = 4v_d + 0v_c} \quad (37)$$

1.2.3. Impedancias vistas por las fuentes de señal

Las impedancias vistas por las fuentes de señal se calculan de la siguiente manera:

$$Z_{i1} = \frac{v_1}{i_1} \quad (38)$$

$$Z_{i2} = \frac{v_2}{i_2} \quad (39)$$

Ahora bien, sucede que tanto i_1 (corriente de entrada inyectada por v_1) como i_2 (corriente de entrada inyectada por v_2) tienden a cero por considerar comportamiento ideal del amplificador, y eso hace que ambos cocientes tiendan a infinito, lo cual matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$\boxed{Z_{i1} = Z_{i2} = \infty} \quad (40)$$

1.3. Simulación

Se efectuaron barridos en corriente continua (DC) para las tensiones de entrada v_1 y v_2 , variándolas en el rango de -10 V a $+10 \text{ V}$.

1.3.1. Barrido para v_1

A continuación se muestra el barrido de las salidas v_{o1} y v_{o2} en función de v_1 :

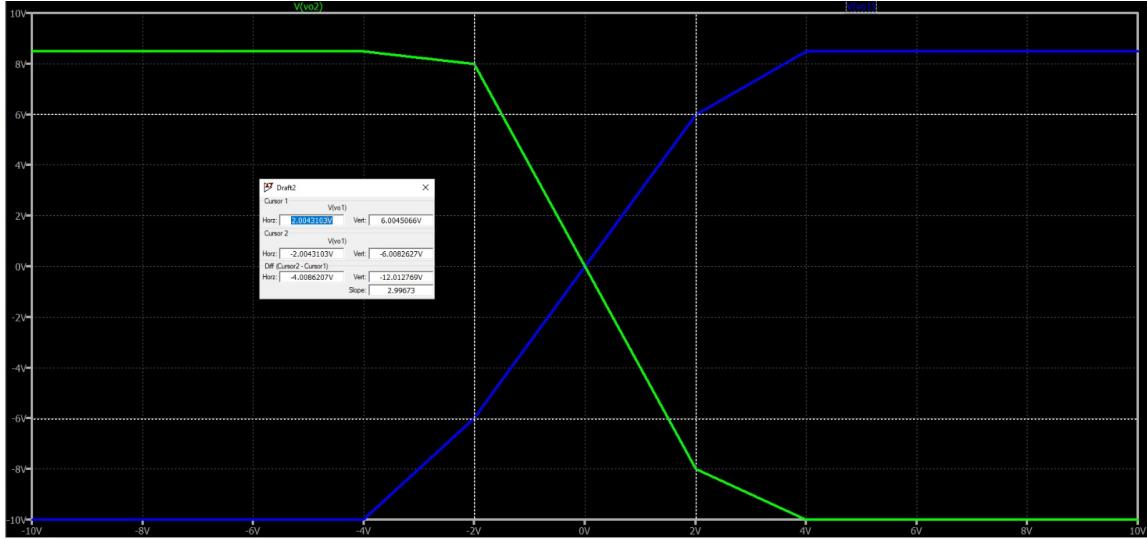


Figura 2: Barrido en DC para v_1 , gráficas de $v_{o1}(v_1)$ $v_{o2}(v_1)$

Se observa que, para pequeñas excursiones de la señal de entrada, las salidas se ajustan a las rectas previamente predichas: $v_{o1} = 3v_1$ y $v_{o2} = -4v_1$.

1.3.2. Barrido para v_2

A continuación se muestra el barrido de las salidas v_{o1} y v_{o2} en función de v_2 :

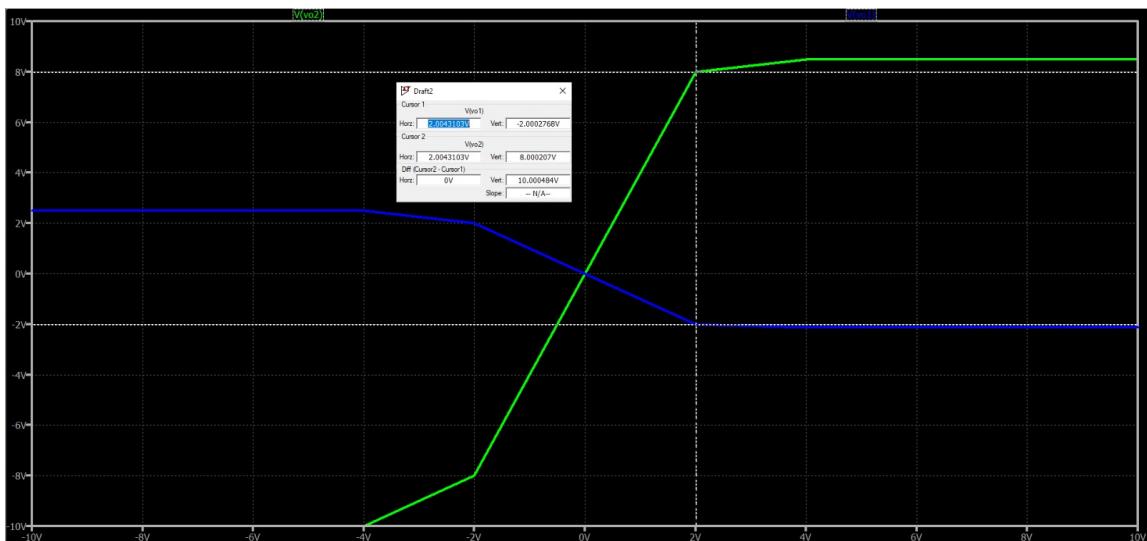


Figura 3: Barrido en DC para v_2 , gráficas de $v_{o1}(v_2)$ $v_{o2}(v_2)$

Se observa que, para pequeñas excursiones de v_2 , las salidas siguen las rectas previamente predichas: $v_{o1} = -v_2$ y $v_{o2} = 4v_2$. Además, la primera etapa deja de operar correctamente para valores de entrada superiores a $\pm 2 \text{ V}$ en v_2 .

1.3.3. Barrido para modo común

En este caso se aplicó la misma señal a ambas entradas y se realizó un barrido en el rango de -10 V a $+10\text{ V}$ como se muestra a continuación:

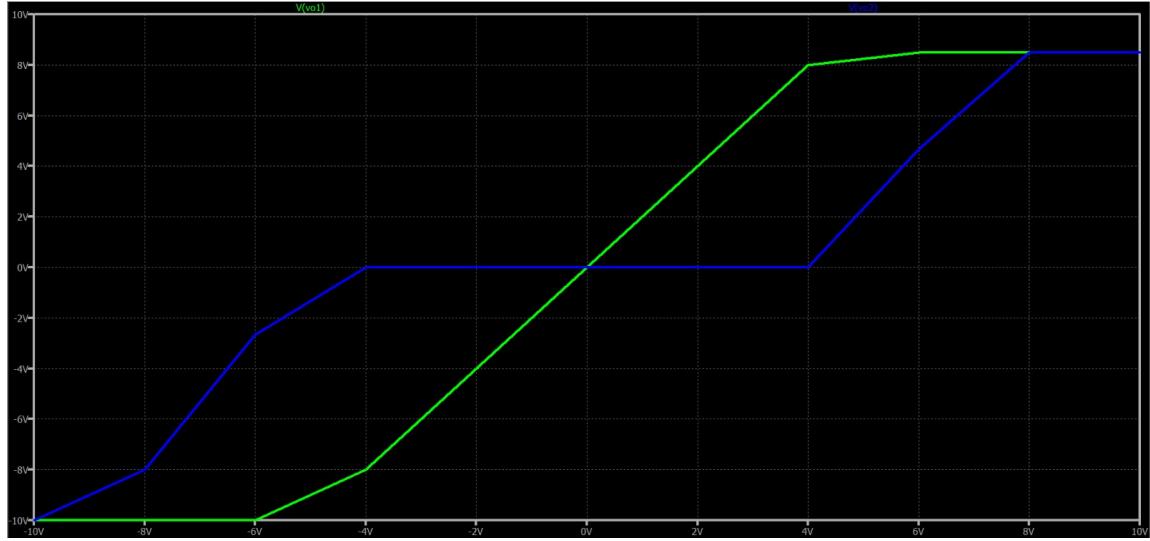


Figura 4: Barrido en DC para v_c , gráficas de $v_{o1}(v_c)$ $v_{o2}(v_c)$

Se observó la ausencia de componente en modo común en la salida v_{o2} , al menos dentro del rango seguro de operación del sistema, comprendido entre $\pm 4\text{ V}$.

1.3.4. Impedancias de entrada

Se simuló un barrido en frecuencia de las relaciones v_1/i_1 y v_2/i_2 con el fin de estudiar las impedancias de entrada de las etapas (el gráfico de impedancia es el de trazo continuo):

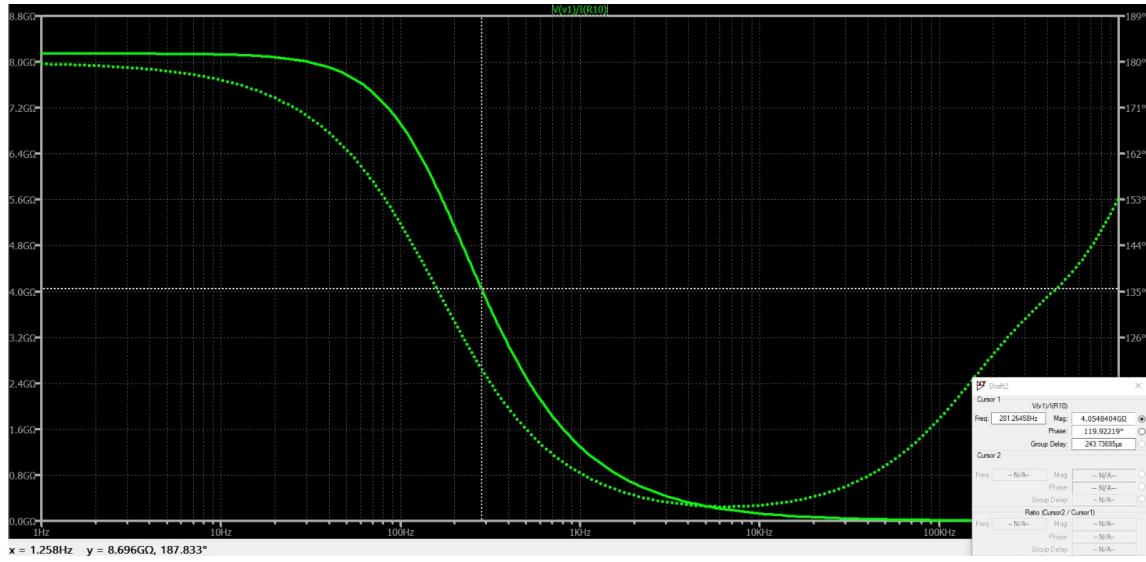


Figura 5: Impedancia de entrada Z_{i1}

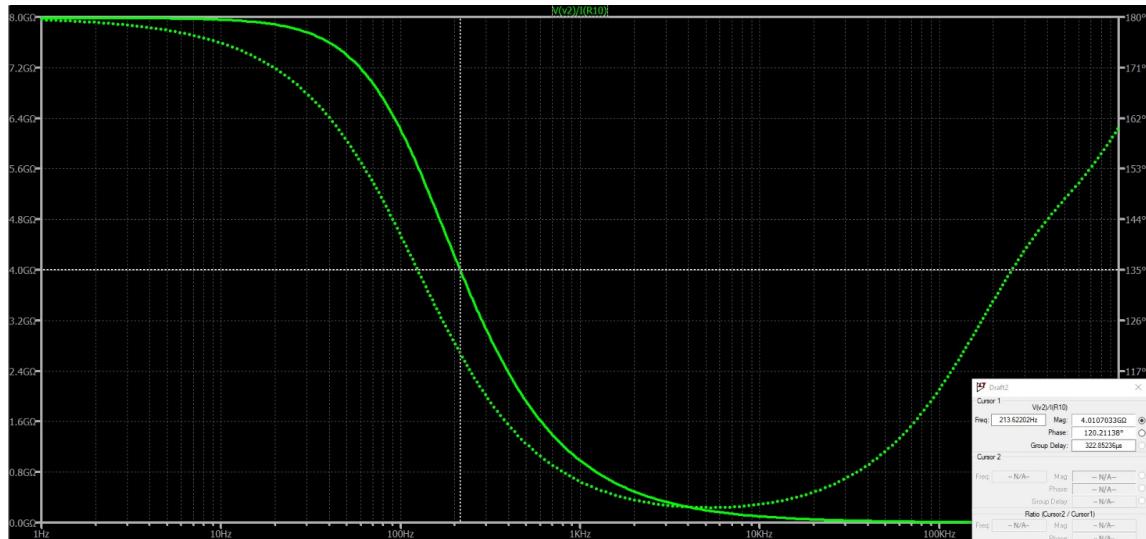


Figura 6: Impedancia de entrada Z_{i2}

En ambos casos se observa que, aproximadamente en la banda de 200-300 Hz, la impedancia de entrada disminuye hasta la mitad de su valor máximo.

1.4. Mediciones Físicas

Se efectuaron barridos en corriente continua (DC) para las tensiones de entrada v_1 y v_2 , variándolas en el rango de -10 V a $+10 \text{ V}$.

1.4.1. Barrido para v_1

A continuación se muestra el barrido de las salidas v_{o1} y v_{o2} en función de v_1 :

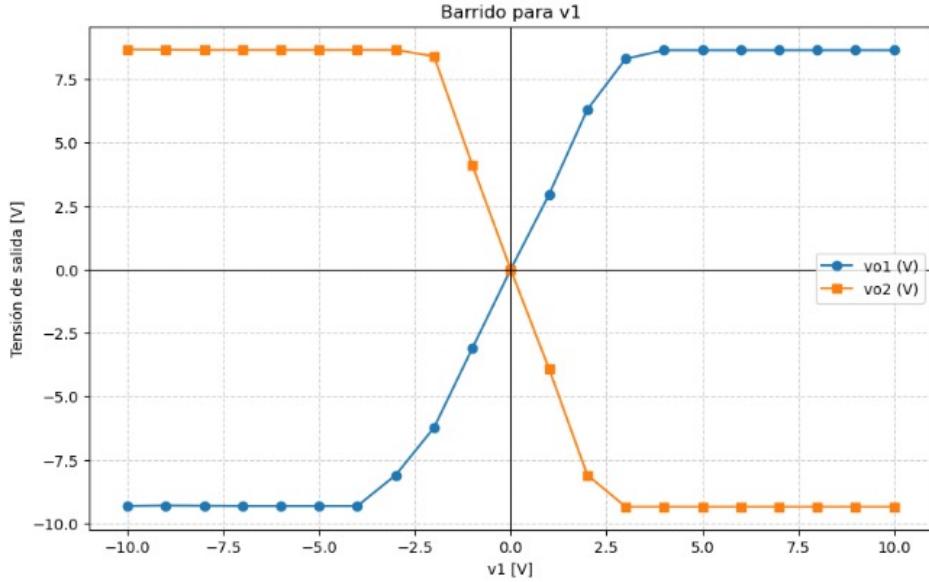


Figura 7: Barrido en DC para v_1 , gráficas de $v_{o1}(v_1)$ $v_{o2}(v_1)$

Como puede verse, el gráfico obtenido es muy parecido al de la simulación.

1.4.2. Barrido para v_2

A continuación se muestra el barrido de las salidas v_{o1} y v_{o2} en función de v_2 :

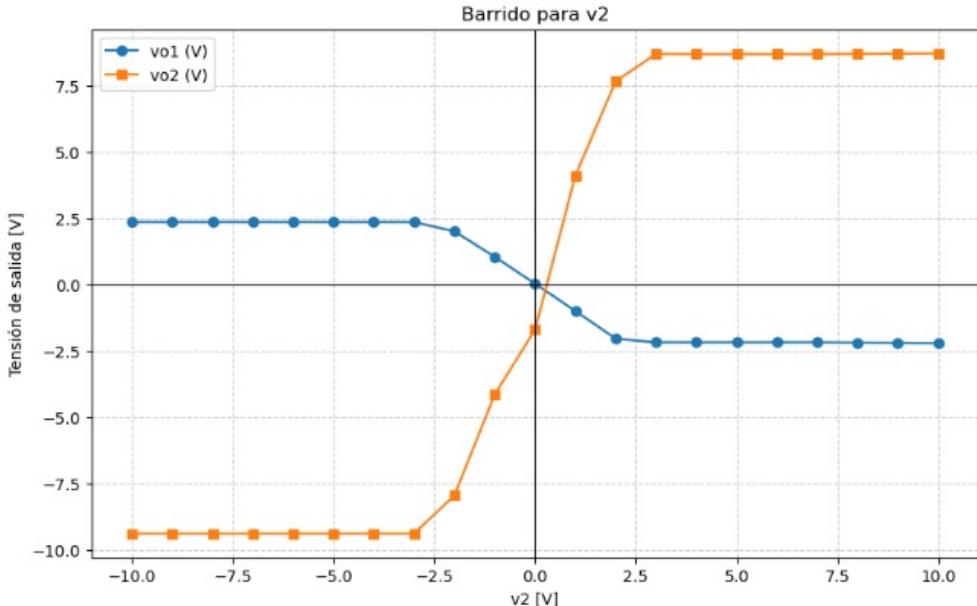


Figura 8: Barrido en DC para v_2 , gráficas de $v_{o1}(v_1)$ $v_{o2}(v_1)$

Como puede verse, el gráfico obtenido es muy similar al de la simulación.

1.4.3. Barrido para modo común

En este caso se aplicó la misma señal a ambas entradas y se realizó un barrido en el rango de -10 V a $+10\text{ V}$ como se muestra a continuación:

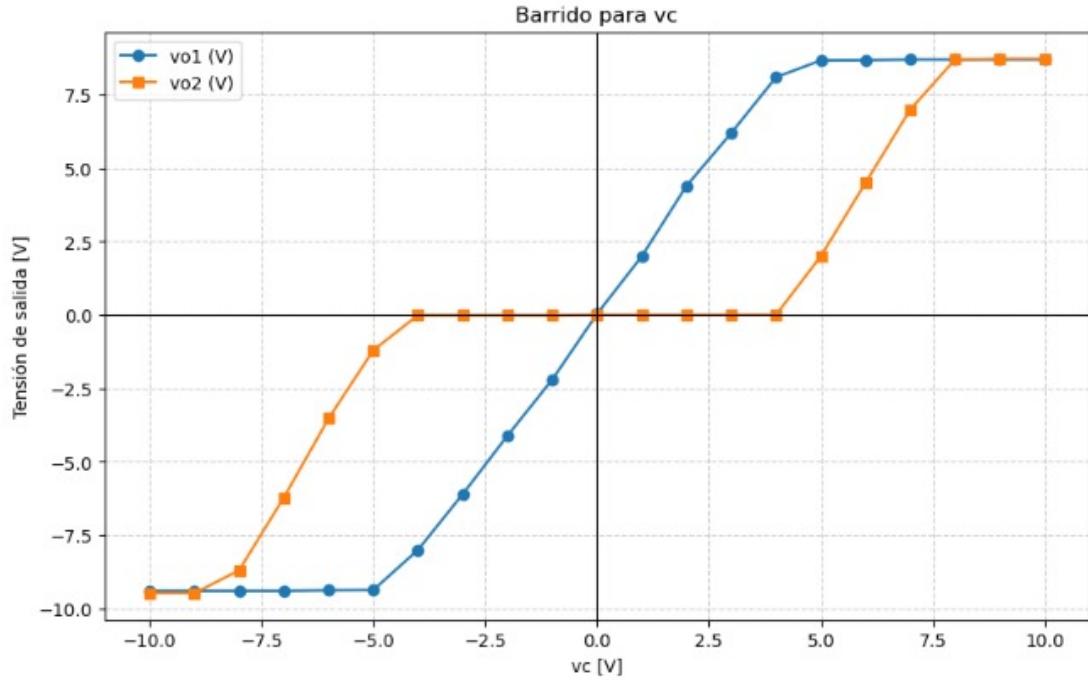


Figura 9: Barrido en DC para v_c , gráficas de $v_{o1}(v_c)$ $v_{o2}(v_c)$

Como puede verse, el gráfico obtenido es muy similar al de la simulación.

2. Circuito III: Rectificador de Precisión

2.1. Marco teórico

En este caso se emplean dos amplificadores operacionales LM324 junto con diodos, configurados como un rectificador de precisión con una entrada de señal común a ambos. El circuito se alimenta con una fuente simétrica de $\pm 10V$ y utiliza un par de diodos de pequeña señal 1N4148. Además, todas las resistencias tienen el mismo valor ($10\text{ k}\Omega$), salvo $R_2 = 5\text{ k}\Omega$. El circuito implementado es el que se muestra a continuación:

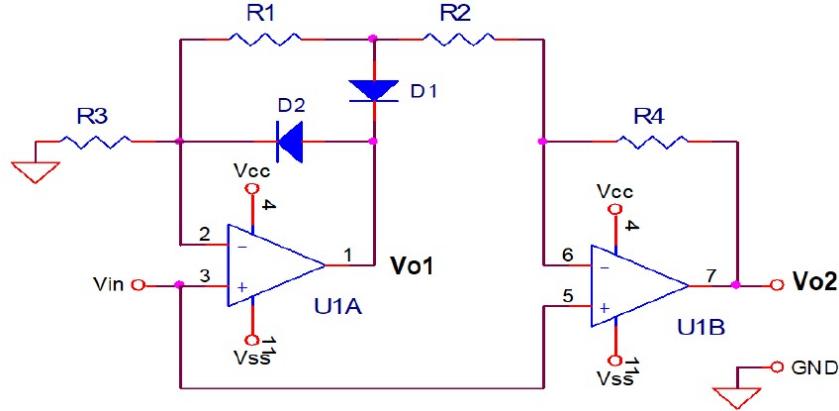


Figura 10: Circuito implementado

Cabe aclarar que para este circuito se analizan las salidas v_{o1} y v_{o2} en función de la entrada v_i .

2.2. Cálculos teóricos

2.2.1. Tensiones v_{o1} y v_{o2} en función de v_i

Para el análisis, dado que se trata de una aplicación no lineal, se consideraron los casos en que la señal de entrada v_i es positiva o negativa. Los diodos se reemplazaron por sus equivalentes ideales: cortocircuito para conducción y circuito abierto para bloqueo.

Cuando $v_i > 0$, la salida v_{o1} presenta una tensión positiva. En este caso, el diodo D2 se polariza directamente (cortocircuito), mientras que D1 se encuentra en polarización inversa (alta impedancia) y el circuito equivalente pasa a ser el siguiente:

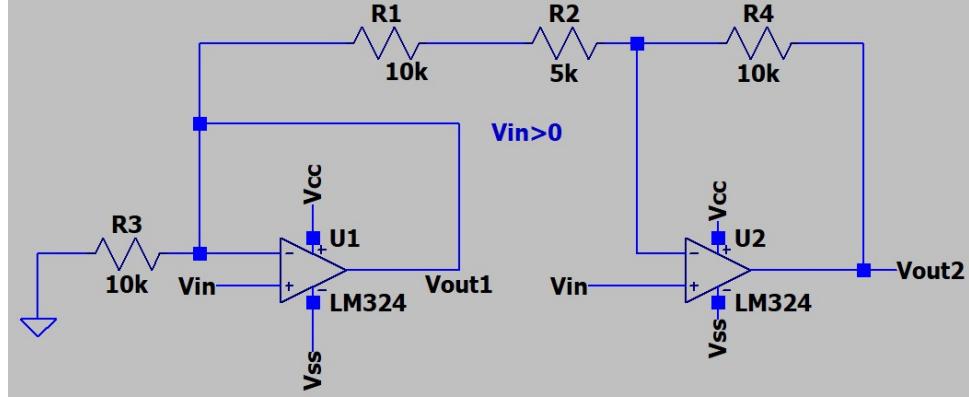


Figura 11: Circuito equivalente para $v_i > 0$

Entonces, dado que estamos considerando $v_d = 0$ para ambos amplificadores (comportamiento ideal), puede afirmarse por simple inspección lo siguiente:

$$v_{o1} = v_i \quad (41)$$

Ahora bien, si consideramos las corrientes que circulan alrededor del nodo 6, vamos a ver que desde este mismo nodo y hacia el nodo 2 no circula ninguna corriente (por existir el mismo valor de tensión en ambos puntos del circuito). Por lo tanto, eso nos lleva a pensar que desde el nodo 7 hacia el nodo 6 no circula ninguna corriente (puesto que la misma no posee ningún camino de drenaje), y por lo tanto podemos afirmar lo siguiente:

$$v_{o2} = v_i \quad (42)$$

Entonces, si ahora consideramos $v_i < 0$, vamos a ver que la salida v_{o1} presenta un valor negativo de tensión. En este caso, el diodo D1 se polariza directamente (cortocircuito), mientras que D2 se encuentra en polarización inversa (alta impedancia) y el circuito equivalente pasa a ser el siguiente:

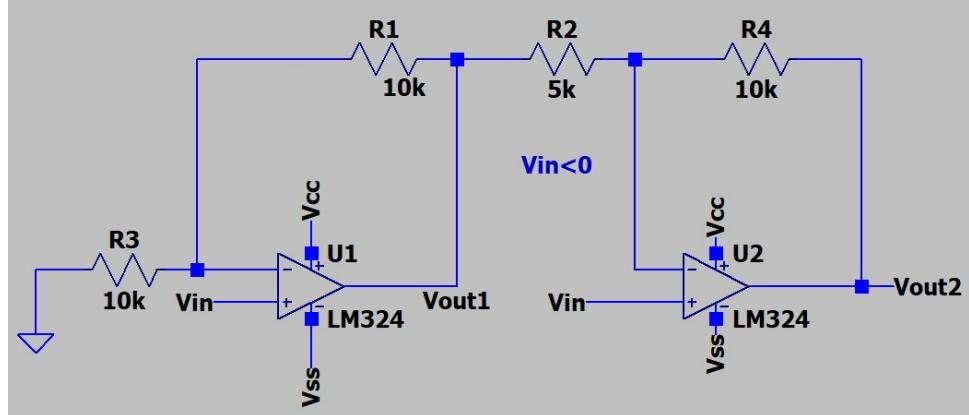


Figura 12: Circuito equivalente para $v_i < 0$

Entonces en este contexto es que podemos plantear las ecuaciones para las corrientes i_1 (que va desde el nodo 1 hacia el nodo 2) e i_2 (que va desde el nodo 2 hacia masa):

$$i_1 = \frac{v_{o1} - v_i}{R_1} \quad (43)$$

$$i_2 = \frac{v_i}{R_3} \quad (44)$$

$$i_1 = i_2 \quad (45)$$

$$\frac{v_{o1} - v_i}{R_1} = \frac{v_i}{R_3} \quad (46)$$

$$\frac{v_{o1}}{R_1} = v_i \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} \right) \quad (47)$$

$$v_{o1} = \left(1 + \frac{R_1}{R_3} \right) v_i = (1 + 1)v_i = 2v_i \quad (48)$$

$$v_{o1} = 2v_i \quad (49)$$

Y si ahora planteamos las ecuaciones para las corrientes i_3 (que va desde el nodo 7 hacia el nodo 6) e i_4 (que va desde el nodo 6 hacia el nodo 1), se llega a lo siguiente:

$$i_3 = \frac{v_{o2} - v_i}{R_4} \quad (50)$$

$$i_4 = \frac{v_i - v_{o1}}{R_2} = \frac{v_i - 2v_i}{R_2} = -\frac{v_i}{R_2} \quad (51)$$

$$i_3 = i_4 \quad (52)$$

$$\frac{v_{o2} - v_i}{R_4} = -\frac{v_i}{R_2} \quad (53)$$

$$\frac{v_{o2}}{R_4} = \left(\frac{1}{R_4} - \frac{1}{R_2} \right) v_i \quad (54)$$

$$v_{o2} = \left(1 - \frac{R_4}{R_2} \right) v_i = (1 - 2)v_i = -v_i \quad (55)$$

$$v_{o2} = -v_i \quad (56)$$

Entonces, resumiendo todo el anterior desarrollo, a continuación se presenta el comportamiento resultante del rectificador:

$$\begin{cases} v_{o1} = v_i & \text{para } v_i > 0 \\ v_{o2} = v_i & \text{para } v_i < 0 \end{cases}$$

2.3. Simulación

Se realizaron barridos en corriente continua (DC) para v_i en el rango de -10 V a $+10 \text{ V}$, y se graficaron las salidas v_{o1} y v_{o2} para todos los casos.

2.3.1. Transferencia para v_{o1}

A continuación se muestra el barrido para la salida v_{o1} en función de la entrada v_i :

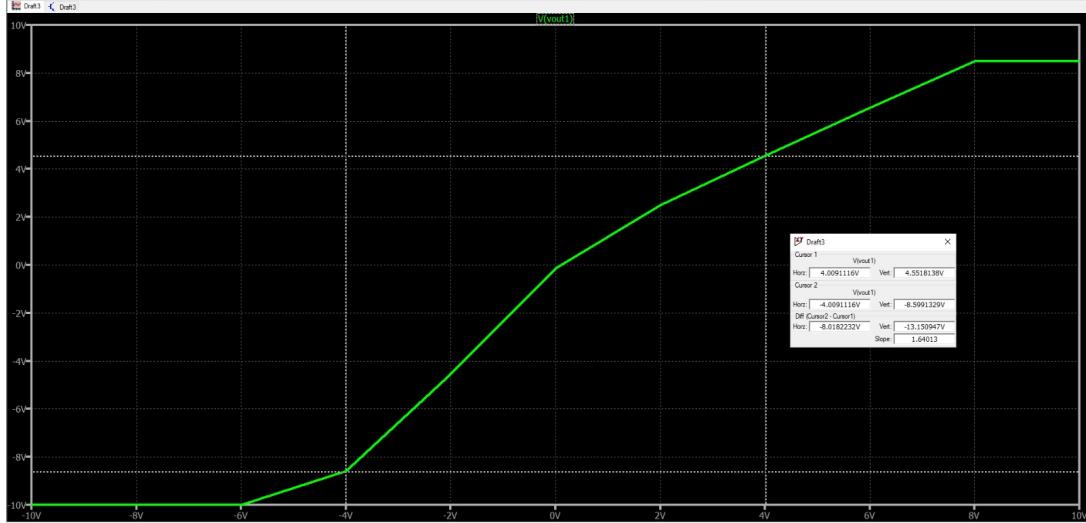


Figura 13: Barrido para $v_{o1} = f(v_i)$

Se observa que la señal replica los semicírculos positivos tal cual, mientras que los negativos se amplifican por un factor de 2. Además, para pequeñas excursiones de la señal, se presenta una ganancia elevada y ciertas no linealidades.

2.3.2. Transferencia para v_{o2}

A continuación se muestra el barrido para la salida v_{o2} en función de la entrada v_i :

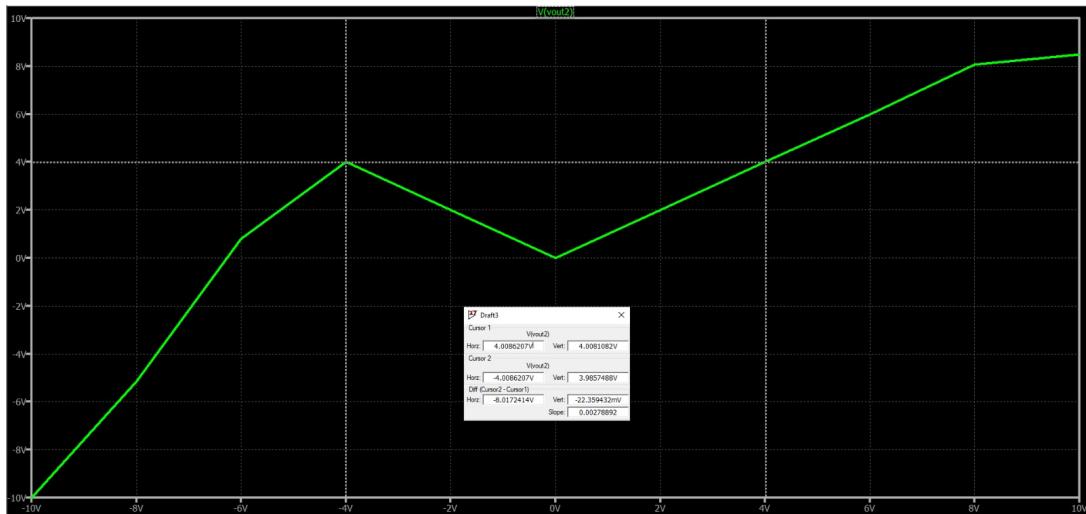


Figura 14: Barrido para $v_{o2} = f(v_i)$

En el rango de -4 a 4 V , la salida corresponde al valor absoluto de la entrada, lo que equivale a una rectificación de onda completa de una señal senoidal.

2.3.3. Análisis temporal para v_{o2}

En este caso se simuló un transitorio utilizando una señal de entrada senoidal de 1 kHz con amplitudes de 26 mV, 1 V, 4 V y 9 V, con el fin de observar la respuesta de la salida en el tiempo, tanto dentro como fuera de los rangos de funcionamiento.

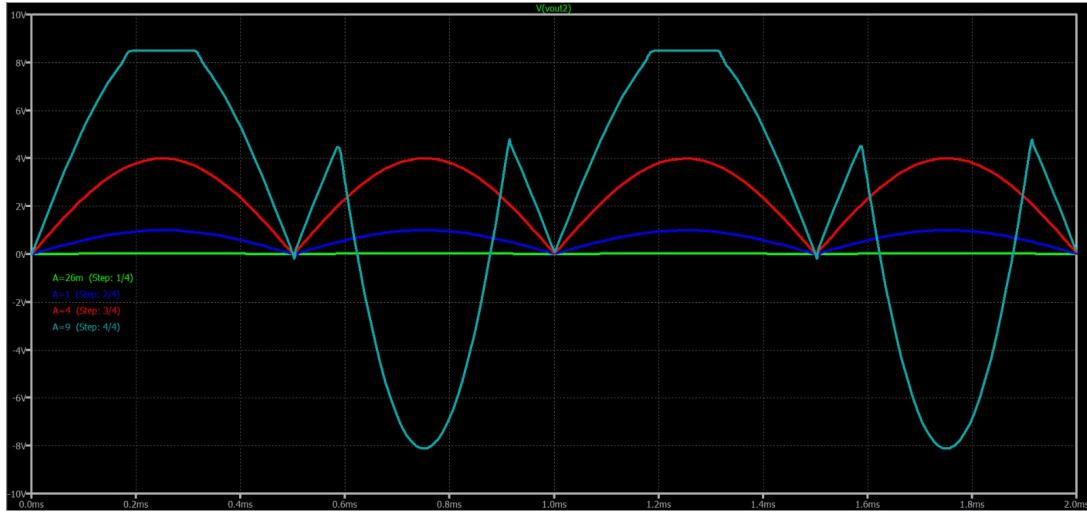


Figura 15: Análisis temporal

Se observó que, para amplitudes entre 1 V y 4 V, la señal se encuentra rectificada de manera precisa, mientras que a 9 V, fuera del rango de funcionamiento, esta precisión se pierde.

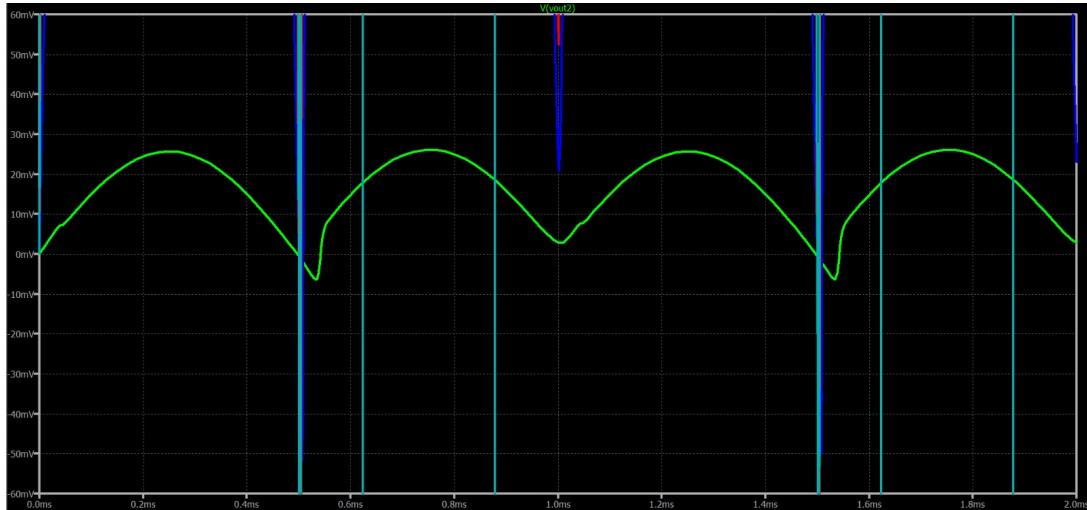


Figura 16: Análisis temporal de señal débil

En el caso de una entrada de 26 mV, se aprecia una mayor distorsión y asimetría, atribuible a las no linealidades cercanas al origen mencionadas en la curva de transferencia.

2.4. Mediciones Físicas

Se realizaron barridos en corriente continua (DC) para v_i en el rango de -10 V a $+10 \text{ V}$, y se graficaron las salidas v_{o1} y v_{o2} para todos los casos.

2.4.1. Transferencia para v_{o1}

A continuación se muestra el barrido para la salida v_{o1} en función de la entrada v_i :

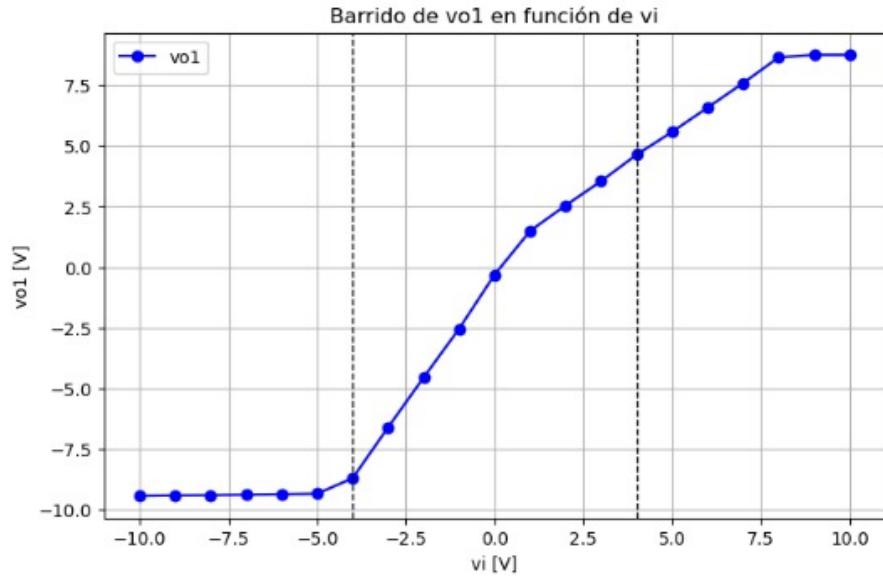


Figura 17: Barrido para $v_{o2} = f(v_i)$

Como puede verse, la gráfica obtenida es bastante similar a la de la simulación.

2.4.2. Transferencia para v_{o2}

A continuación se muestra el barrido para la salida v_{o2} en función de la entrada v_i :

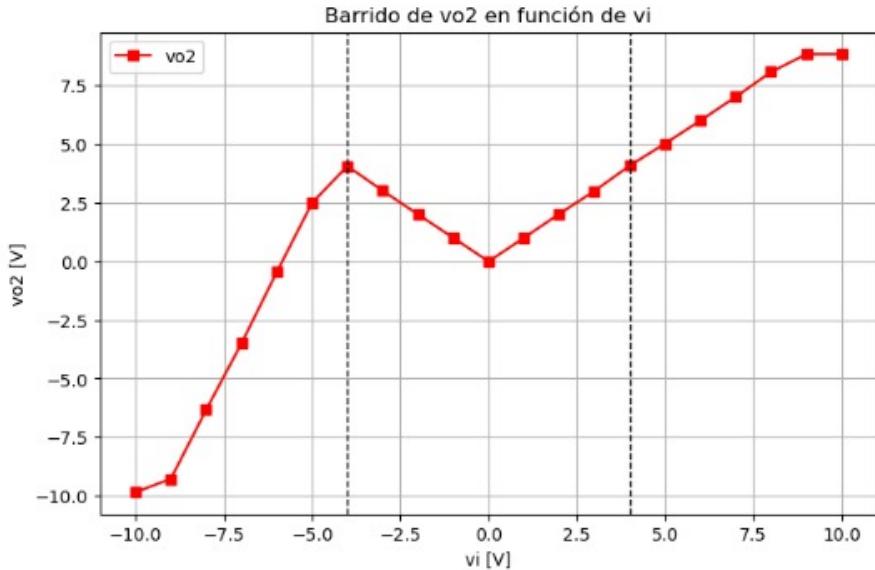


Figura 18: Barrido para $v_{o2} = f(v_i)$

Como puede verse, la gráfica obtenida es bastante similar a la de la simulación.

2.4.3. Análisis temporal para v_{o2}

En este caso se realizó un transitorio utilizando una señal de entrada senoidal de 1 kHz con amplitudes de 78 mV, 1 V, 2 V y 9 V, con el fin de observar la respuesta de la salida en el tiempo, tanto dentro como fuera de los rangos de funcionamiento.

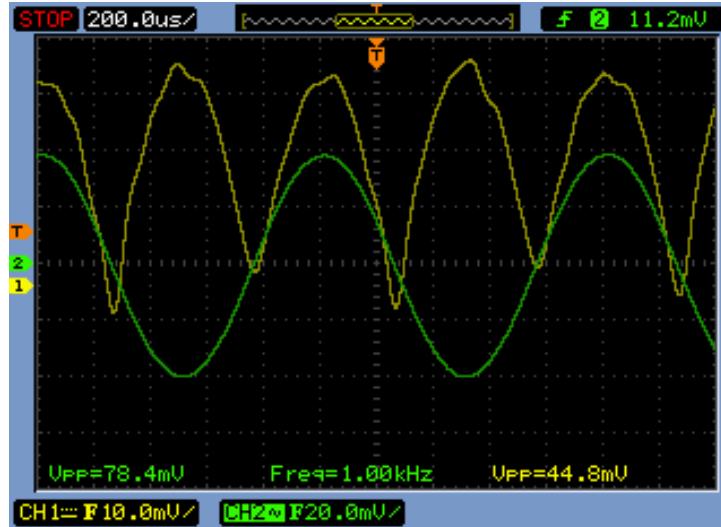


Figura 19: Análisis temporal para 26 mV

En el caso de una entrada de 78 mV, se aprecia una mayor distorsión y asimetría, atribuible a las no linealidades cercanas al origen mencionadas en la curva de transferencia.

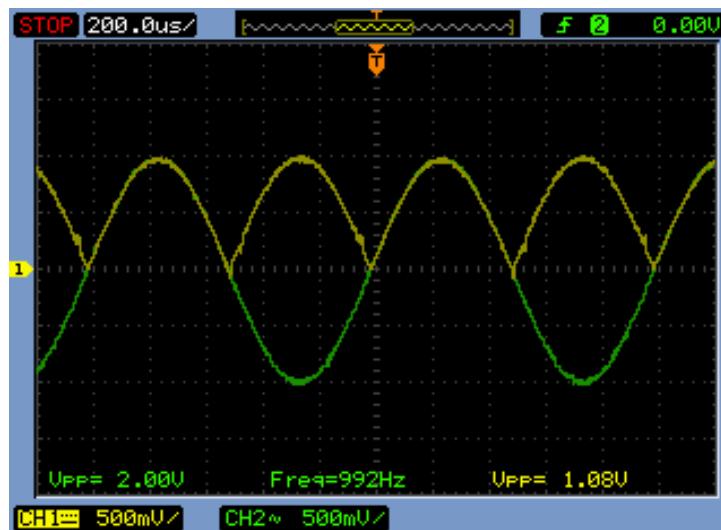


Figura 20: Análisis temporal para 1V

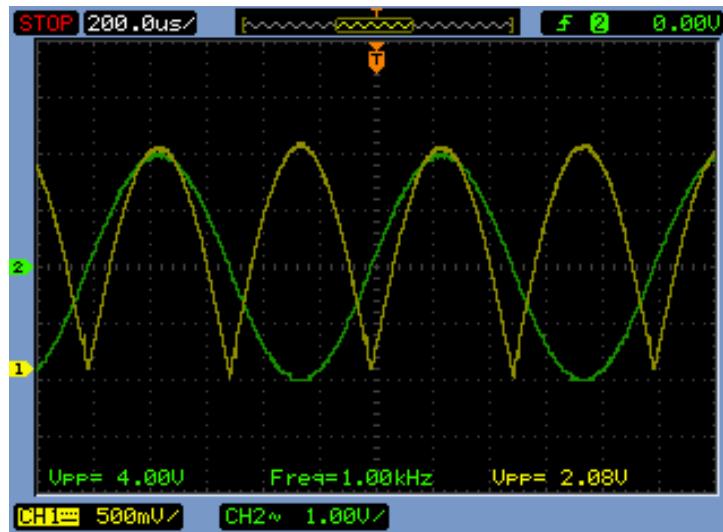


Figura 21: Análisis temporal para 2V

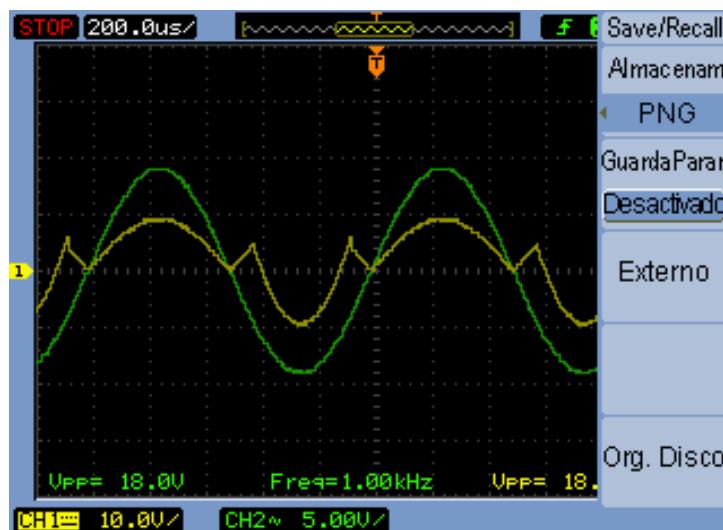


Figura 22: Análisis temporal para 9V

Se observó que, para amplitudes entre 1 V y 2 V, la señal se encuentra rectificada de manera precisa, mientras que a 9 V, fuera del rango de funcionamiento, esta precisión se pierde.