

Proyecto Instrumentación: Circuitos Rectificadores de onda completa de alta precisión

Fecha : Viernes, Noviembre 10, 2017

Rubén Ortega González

Diego Siamel Barón Hernández

Jorge Gómez Reus

Fernando Jair Pacheco Díaz

1. Objetivo

Analizar y simular diferentes circuitos rectificadores de onda completa, lo cuales usan un elemento llamado: *Current Conveyor*

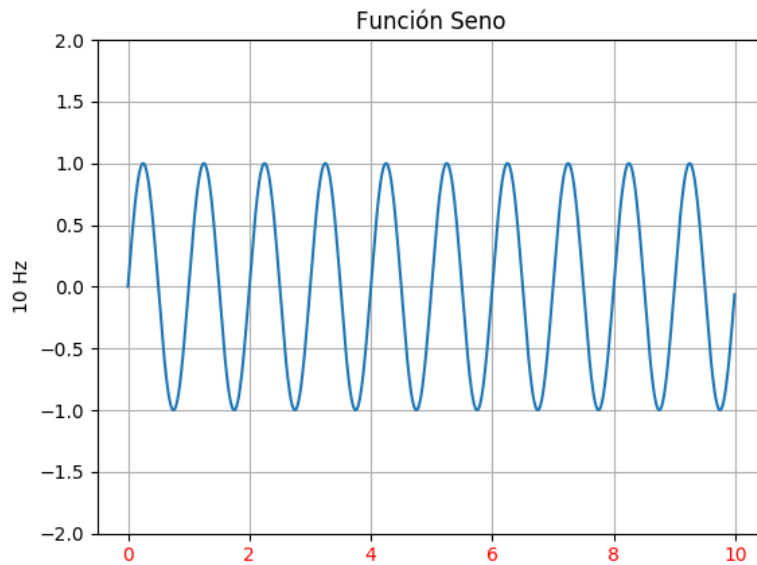
2. Definición de Rectificador de Onda completa

La rectificación de onda completa está descrita por la función:

$$V_0 = \begin{cases} -v_s & \text{para } v_s < 0 \\ v_s & \text{para } v_s > 0 \end{cases}$$

El procedimiento es el siguiente:

- Se tiene una señal sinusoidal



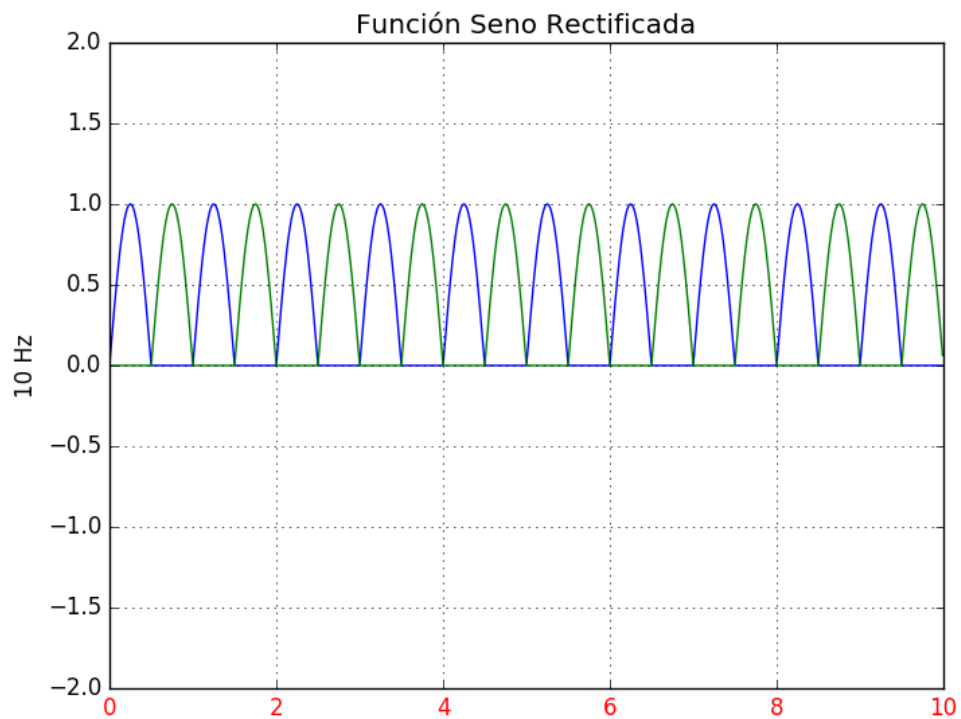
- Se rectifica la parte positiva de la señal:



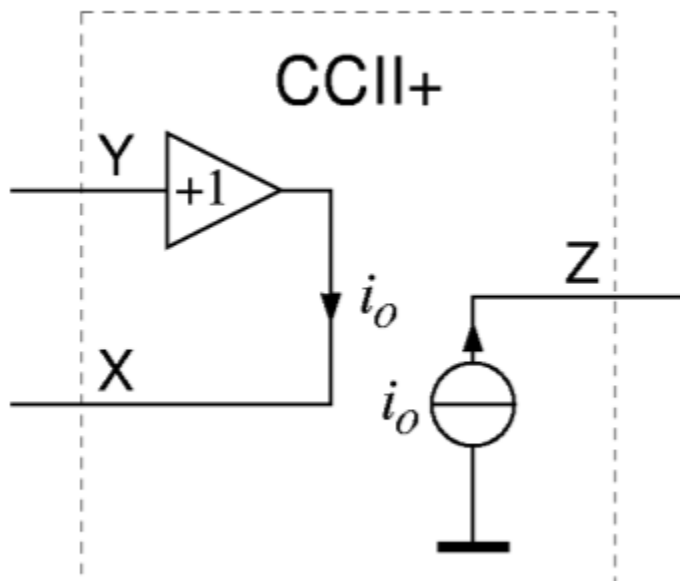
- Se rectifica la parte negativa de la señal:



- La suma de las dos señales rectificadas:



Para entender este reporte se debe tener conocimiento del *Current Conveyor II+*

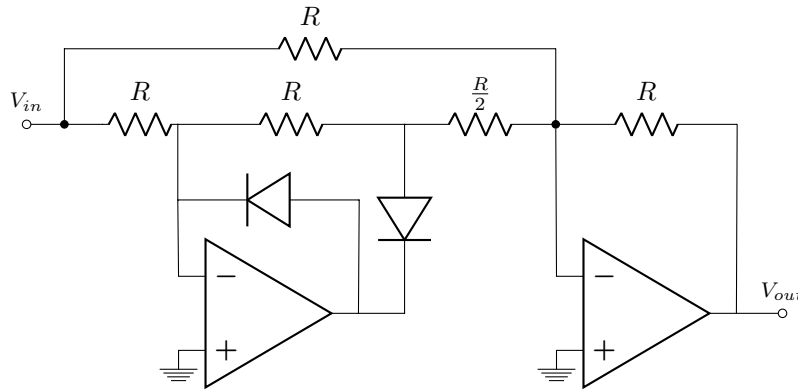


En el siguiente enlace se puede encontrar información extra: [CCII+](#)

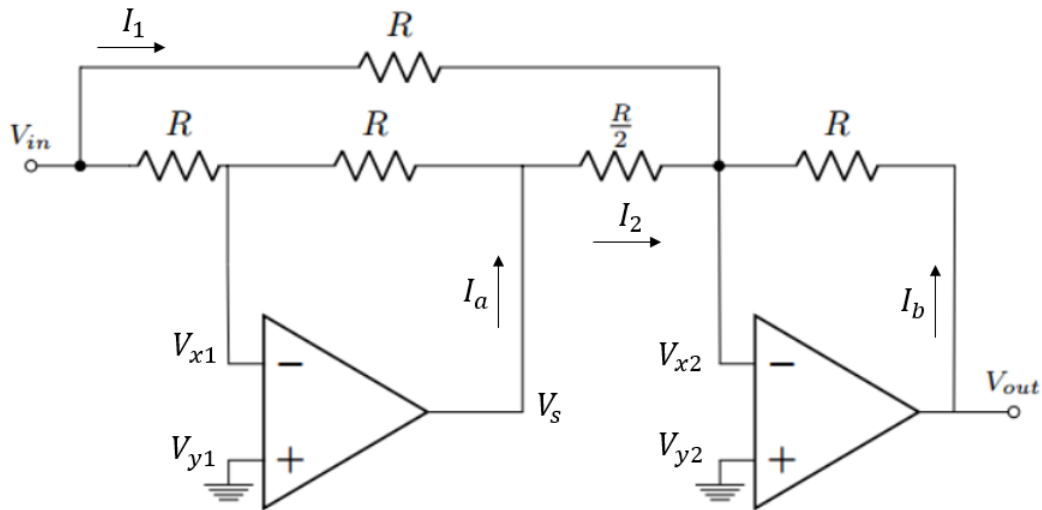
3. Primer Circuito

3.1. Descripción

Es un rectificador de onda completa, funciona bien a frecuencias menores a 1 khz ya que dada la función de transferencia de los OPAMP's $A = \frac{k}{1+\tau s}$ donde k es su ganancia a baja frecuencia y τ es la constante de tiempo que define su frecuencia de corte a lazo abierto, la distorsión para cuando en el punto de cruce de la señal, los diodos están apagados, y debido al *Slew Rate* de los amplificadores, a medida que la frecuencia de la señal aumenta hay distorsiones de la señal.



3.2. Análisis en el ciclo Positivo de una señal sinusoidal



$$I_a = \frac{V_s - V_{x1}}{R} = \frac{V_{x1} - V_{in}}{R}$$

$$\frac{V_s}{R} = -\frac{V_{in}}{R}$$

$$V_{x1} = V_{y1} = 0$$

$$\therefore V_s = -V_{in}$$

$$I_1 + I_2 + I_b = 0$$

$$I_1 = \frac{V_{in}}{R}$$

$$I_2 = \frac{-2V_{in}}{R}$$

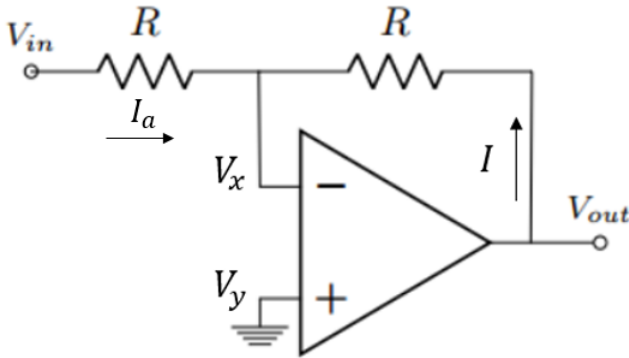
$$I_b = \frac{V_{out} - V_s}{R}$$

$$\therefore \frac{V_{in}}{R} - \frac{2V_{in}}{R} + \frac{V_{out}}{R} = 0$$

El voltaje de salida en el ciclo **positivo** de la señal está dado por:

$$V_{in} = V_{out}$$

3.3. Análisis en el ciclo Negativo de una señal sinusoidal



$$I + I_a = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{V_{in} - V_x}{R} + \frac{V_{out} - V_x}{R} \\ \frac{V_{out}}{R} = -\frac{V_{in}}{R} \end{aligned}$$

$$V_x = V_y = 0$$

$$\therefore V_{out} = -V_{in}$$

Y ya que estamos analizando en ciclo **Negativo** de la señal:

$$V_{out} = V_{in}$$

3.4. Función de Transferencia

$$V_0 = \begin{cases} V_i & \text{para } V_i < 0 \\ -V_i & \text{para } V_i > 0 \end{cases}$$

4. Segundo Circuito

4.1. Descripción

Es un rectificador de onda completa, debido al uso de un transportador de corriente, la terminal X de este tiene baja impedancia y una resistencia implícita R_x ; la entrada Y tiene alta impedancia y la salida Z tiene alta impedancia, por ende idealmente no hay paso de corriente lo cual permite que el slew rate sea "sobrepasado". Dada la función de transferencia $A = \frac{k}{1+s\tau_s}$. El bloque que permite que este rectificador sea mejor en frecuencias mayores 1 khz es:

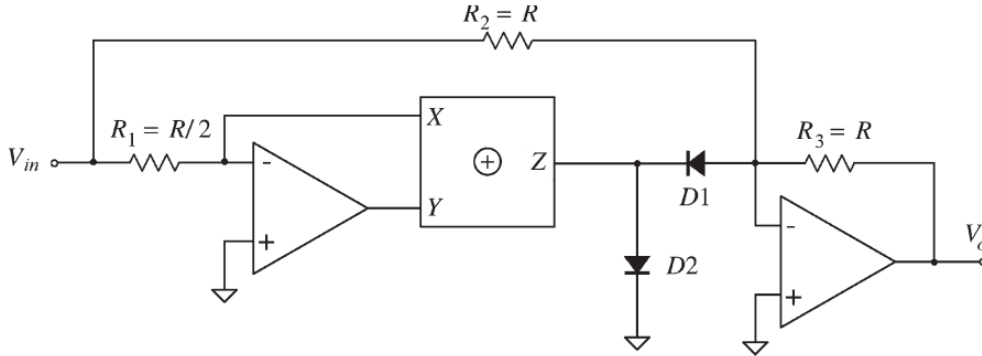
$$\frac{I_z}{V_{in}} = -\frac{1+k}{r_x + (1+k)R_1} \frac{1+s\tau/(1+k)}{1+s\tau/(1+k\beta)}$$

$$\beta = \frac{R_1}{r_x + R_1}$$

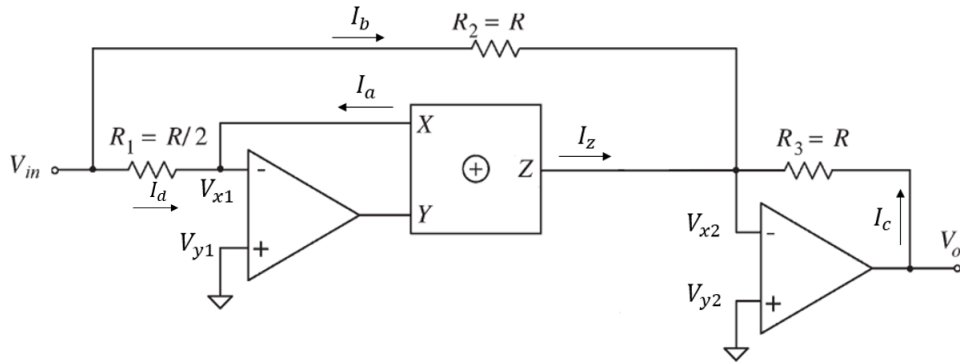
I_z es la corriente de salida del transportador de corriente. Ya que $k \gg 1$, este circuito opera sin distorsiones a frecuencias mayores a 1kHz:

$$\frac{I_z}{V_{in}} = -\frac{1}{R_1} \frac{1 + s\tau/(1+k)}{1 + s\tau/(1+k\beta)}$$

Por esto se puede ver que debido a la gran ganancia del amplificador operacional, resulta en la eliminación de R_x de la función de transferencia. El ancho de banda del sistema está dado por $f_p = f_0(1 + k\beta)$



4.2. Análisis en el ciclo Positivo de una señal sinusoidal



$$I_a + I_d = 0 \quad I_a = \frac{V_s - V_{x1}}{R} \quad I_d = \frac{2(V_{in} - V_{x1})}{R}$$

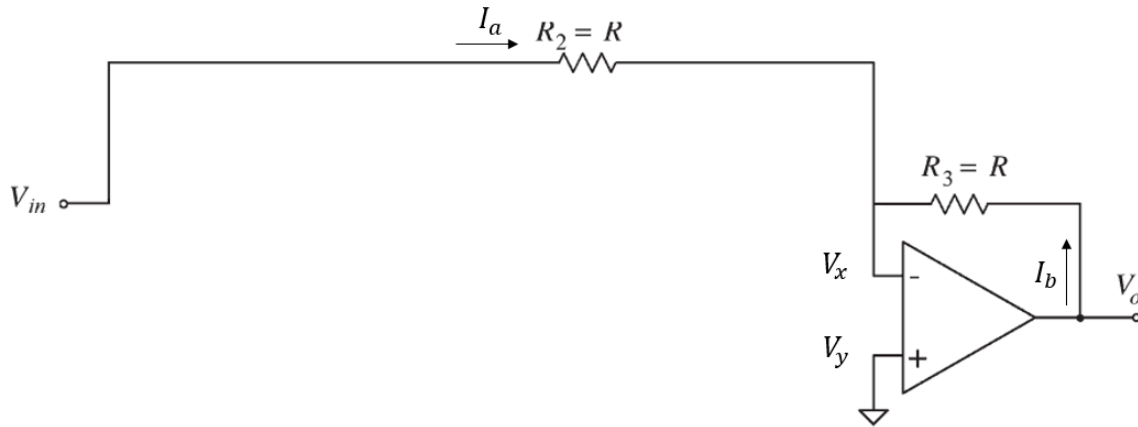
$$V_{x1} = V_{y1} = 0$$

$$\frac{V_o - V_{x2}}{R} + \frac{-2V_i - V_{x1}}{R} + \frac{V_{in} - V_{x2}}{R} = 0$$

$$\frac{V_o}{R} + \frac{-2V_i}{R} + \frac{V_{in}}{R} = 0$$

$$V_o = V_{in}$$

4.3. Análisis en el ciclo Negativo de una señal sinusoidal



$$I_a + I_b = 0 \qquad I_a = \frac{V_{in}}{R} \qquad I_d = \frac{V_o - V_x}{R}$$

$$V_x = V_y = 0$$

$$\frac{V_{in}}{R} + \frac{V_o}{R} = 0$$

Y ya que estamos analizando en ciclo **Negativo** de la señal:

$$V_o = V_{in}$$

4.4. Función de Transferencia

$$V_o = \begin{cases} V_i & \text{para } V_i < 0 \\ -V_i & \text{para } V_i > 0 \end{cases}$$

5. Tercer Circuito

5.1. Descripción

Este circuito es una simplificación del anterior, pero el amplificador es eliminado y el transportador opera como amplificador, en este bloque debe cumplirse $R_1 + r_x = \frac{R}{2}$, dado esta condición este circuito es menos preciso que el anterior.

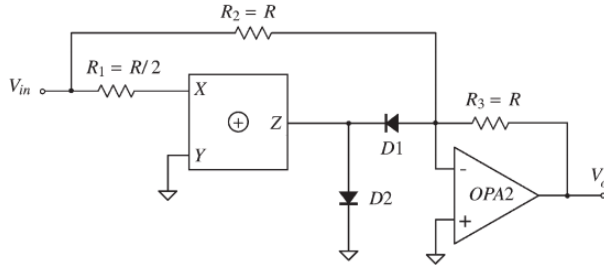
$$\frac{I_z}{V_{in}} = -\frac{1+k}{r_x + (1+k)R_1} \frac{1+s\tau/(1+k)}{1+s\tau/(1+k\beta)}$$

$$\beta = \frac{R_1}{r_x + R_1}$$

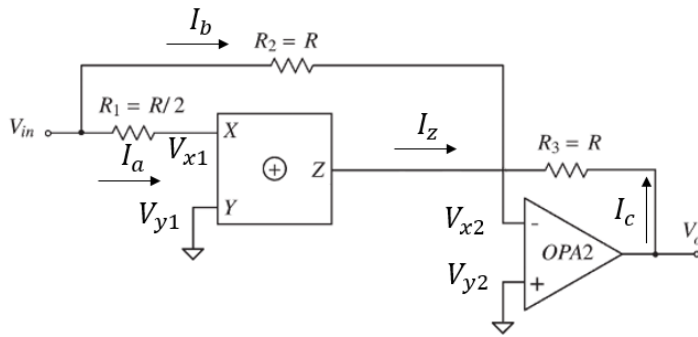
I_z es la corriente de salida del transportador de corriente. Ya que $k \gg 1$:

$$\frac{I_z}{V_{in}} = -\frac{1}{R_1} \frac{1+s\tau/(1+k)}{1+s\tau/(1+k\beta)}$$

Por esto se puede ver que debido a la gran ganancia del amplificador operacional, resulta en la eliminación de R_x de la función de transferencia. El ancho de banda del sistema está dado por $f_p = f_0(1 + k\beta)$



5.2. Análisis en el ciclo Positivo de una señal sinusoidal



Debido a que V_{in} entra por la entrada inversora del CC.

$$I_z = -I_a \quad V_{x1} = V_{y1} = 0 \quad I_a = \frac{2(V_{in} - V_{x1})}{R}$$

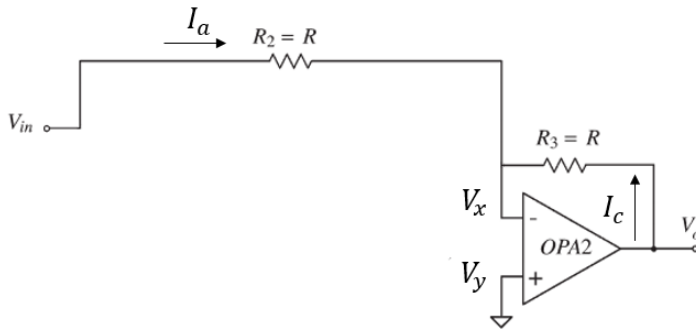
$$I_b + I_z + I_c = 0 \quad V_{x2} = V_{y2} = 0 \quad I_b = \frac{V_{in} - V_{x2}}{R} \quad I_c = \frac{V_o - V_{x2}}{R}$$

$$\frac{V_{in} - V_{x2}}{R} - \frac{2(V_{in} - V_{x1})}{R} + \frac{V_o - V_{x2}}{R} = 0$$

$$\frac{V_{in}}{R} - \frac{2V_{in}}{R} + \frac{V_o}{R} = 0$$

$$V_o = V_{in}$$

5.3. Análisis en el ciclo Negativo de una señal sinusoidal



$$I_a + I_b = 0$$

$$V_x = V_y = 0$$

$$I_a = \frac{V_{in} - V_x}{R}$$

$$I_b = \frac{V_o - V_x}{R}$$

$$\frac{V_{in} - V_x}{R} + \frac{V_o - V_x}{R} = 0$$

$$\frac{V_{in}}{R} + \frac{V_o}{R} = 0$$

Y ya que estamos analizando en ciclo **Negativo** de la señal:

$$V_o = V_{in}$$

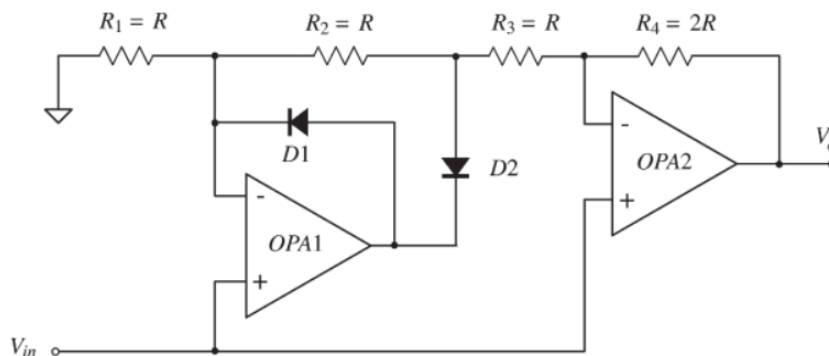
5.4. Función de Transferencia

$$V_o = \begin{cases} V_i & \text{para } V_i < 0 \\ -V_i & \text{para } V_i > 0 \end{cases}$$

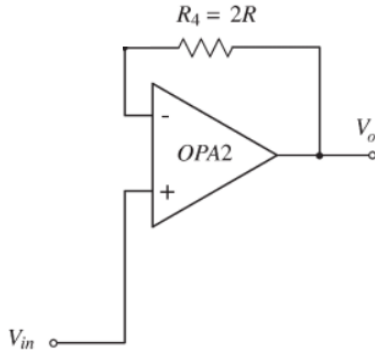
6. Cuarto Circuito

6.1. Descripción

Este circuito es una generalización del primero, pero este tiene una impedancia de entrada alta, también tiene deformaciones en la señal de salida a frecuencias mayores a 1 khz.

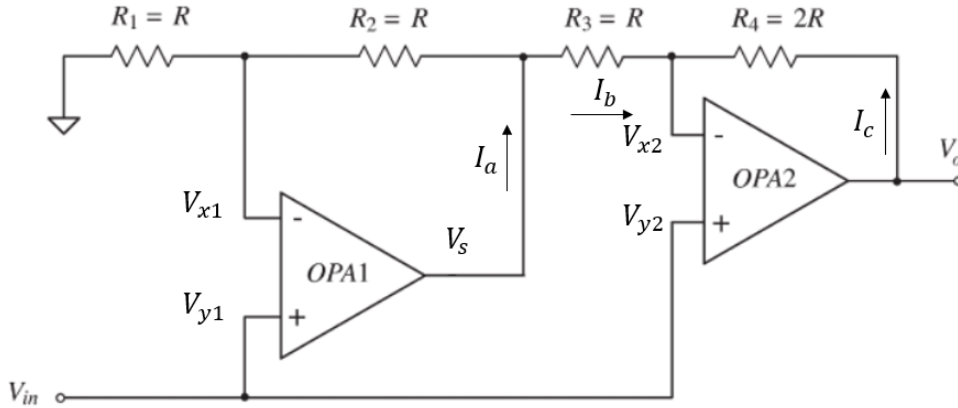


6.2. Análisis en el ciclo Positivo de una señal sinusoidal



Al no haber una diferencia de voltajes en las entradas se comporta como un seguidor de voltaje: $V_o = V_i$

6.3. Análisis en el ciclo Negativo de una señal sinusoidal



$$I_a = \frac{V_s - V_{x1}}{R} = \frac{V_{x1}}{R}$$

$$V_{x1} = V_{y1} = V_{in}$$

$$\therefore V_s - V_i = V_i$$

$$V_s = 2V_i$$

$$I_c + I_b = 0$$

$$V_{x2} = V_{y2} = V_{in}$$

$$\frac{V_o - V_{x2}}{2R} + \frac{V_s - V_{x2}}{R} = 0$$

$$\frac{V_o - V_i}{2R} + \frac{2V_i - V_i}{R} = 0$$

$$\frac{V_o - V_i}{2} + V_i = 0$$

Y ya que estamos analizando en ciclo **Negativo** de la señal:

$$V_o = V_{in}$$

6.4. Función de Transferencia

$$V_0 = \begin{cases} V_i & \text{para } V_i < 0 \\ V_i & \text{para } V_i > 0 \end{cases}$$

7. Quinto Circuito

7.1. Descripción

Usando un transportador de corriente se deriva del circuito anterior:

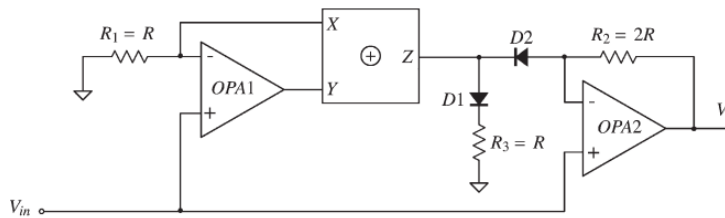
$$\frac{I_z}{V_{in}} = \frac{k}{r_x + (1+k)R_1} \frac{1 + s\tau/(1+k)}{1 + s\tau/(1+k\beta)}$$

Ya que $k \gg 1$:

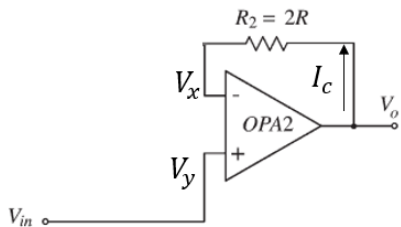
$$\frac{I_z}{V_{in}} = \frac{1}{R_1} \frac{1 + s\tau/(1+k)}{1 + s\tau/(1+k\beta)}$$

La frecuencia del circuito está dada por $f_p = f_0(1+k\beta)$ y como $f \ll f_0$, la corriente de salida está dada por:

$$I_z = \frac{V_i}{R_1}$$

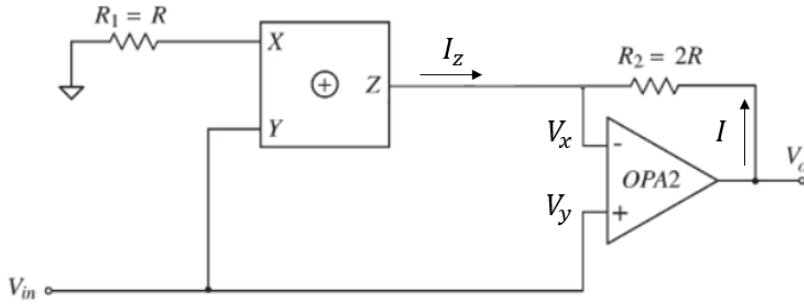


7.2. Análisis en el ciclo Positivo de una señal sinusoidal



Al no haber diferencia de voltajes en las entradas, se comporta como en seguidor de voltaje: $V_o = V_i$

7.3. Análisis en el ciclo Negativo de una señal sinusoidal



$$I_z = \frac{V_i}{R}$$

$$I_c + I_z = 0$$

$$I_c = \frac{V_o - V_{x2}}{2R}$$

$$V_{x2} = V_{y2} = V_{in}$$

$$\frac{V_o - V_{x2}}{2R} + \frac{V_{in}}{R} = 0$$

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

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

$$V_o = -V_{in}$$

Y ya qué estamos analizando en ciclo **Negativo** de la señal:

$$V_o = V_{in}$$

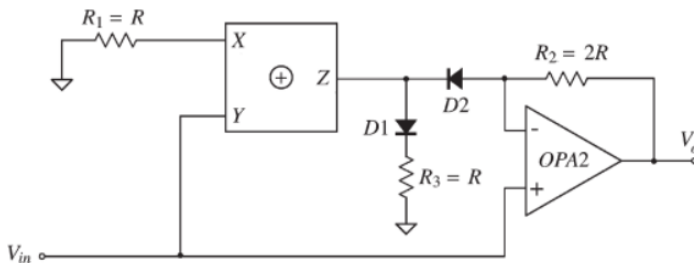
7.4. Función de Transferencia

$$V_o = \begin{cases} V_i & \text{para } V_i < 0 \\ -V_i & \text{para } V_i > 0 \end{cases}$$

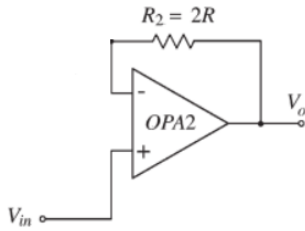
8. Sexto Circuito

8.1. Descripción

Este circuito es una simplificación del anterior, pero menos preciso dado que $R_1 + r_x = \frac{R}{2}$

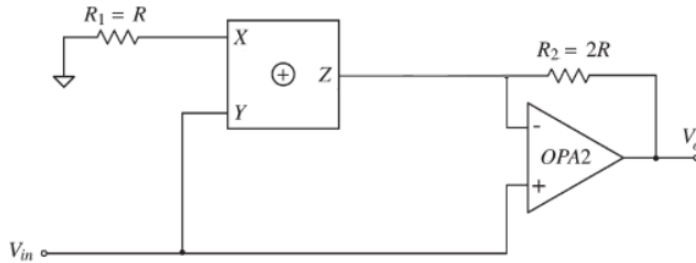


8.2. Análisis en el ciclo Positivo de una señal sinusoidal



Al no haber diferencia de voltajes en las entradas, se comporta como en seguidor de voltaje: $V_o = V_i$

8.3. Análisis en el ciclo Negativo de una señal sinusoidal



$$I_z = \frac{V_i}{R}$$

$$I + I_z = 0$$

$$I = \frac{V_o - V_x}{2R}$$

$$V_x = V_y = V_{in}$$

$$\frac{V_o - V_x}{2R} + \frac{V_{in}}{R} = 0$$

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

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

$$V_o = -V_{in}$$

Y ya que estamos analizando en ciclo **Negativo** de la señal:

$$V_o = V_{in}$$

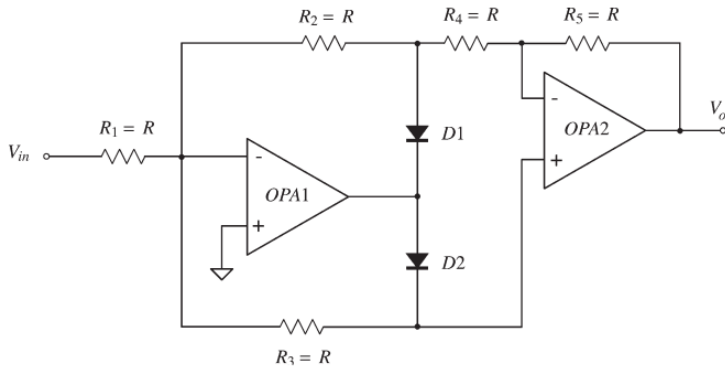
8.4. Función de Transferencia

$$V_0 = \begin{cases} V_i & \text{para } V_i < 0 \\ V_i & \text{para } V_i > 0 \end{cases}$$

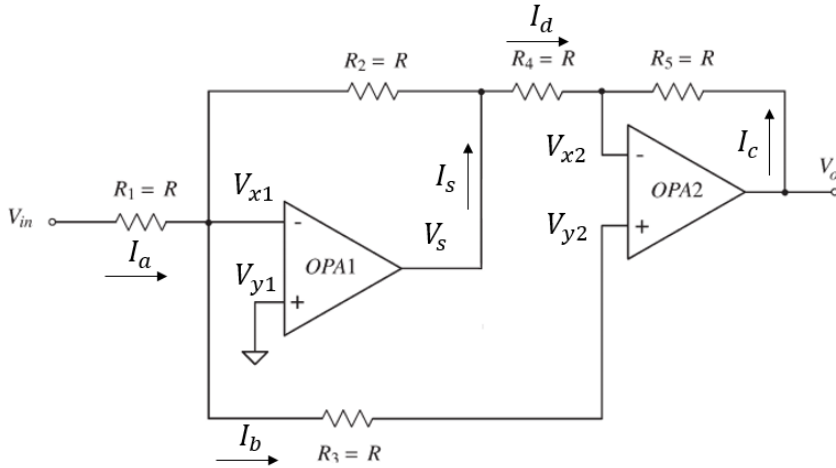
9. Séptimo Circuito

9.1. Descripción

Es una generalización del primer circuito pero con una impedancia de entrada más alta.



9.2. Análisis en el ciclo Positivo de una señal sinusoidal



$$I_s + I_a = I_b$$

$$I_b = 0$$

$$V_{x1} = V_{y1} = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{V_s - V_{x1}}{R} + \frac{V_{in} - V_{x1}}{R} &= 0 \\ \frac{V_s}{R} + \frac{V_{in}}{R} &= 0 \\ V_s &= -V_{in} \end{aligned}$$

Ya que $I_b = 0 \therefore V_{y2} = V_{x2} = 0$

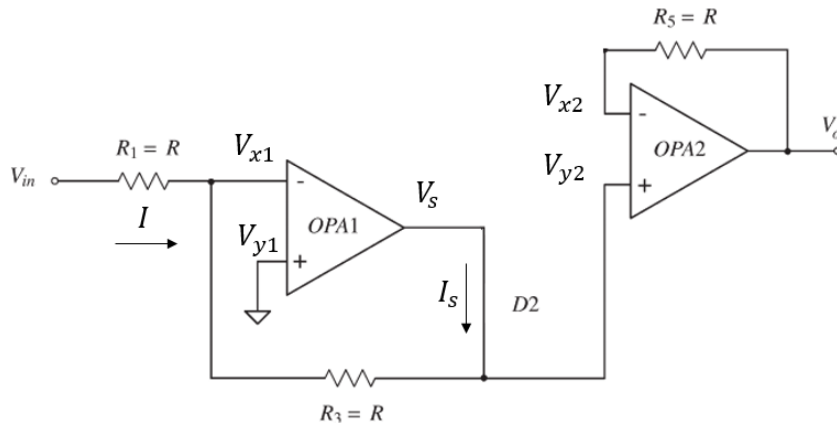
$$I_c + I_d = 0 \quad I_c = \frac{V_o - V_{in}}{R} \quad I_d = \frac{V_s - V_{x2}}{R}$$

$$\frac{V_o - V_{in}}{R} + \frac{-V_{in} - V_{x2}}{R} = 0$$

$$\frac{V_o}{R} + \frac{-V_{in}}{R} = 0$$

$$V_o = V_{in}$$

9.3. Análisis en el ciclo Negativo de una señal sinusoidal



$$I_s + I = 0 \quad V_{x1} = V_{y1} = 0 \quad I_s = \frac{V_s - V_{x1}}{R} \quad I = \frac{V_{in} - V_{x1}}{R}$$

$$\frac{V_s - V_{x1}}{R} + \frac{V_{in} - V_{x1}}{R} = 0$$

$$\frac{V_s}{R} + \frac{V_{in}}{R} = 0$$

$$V_s = -V_{in}$$

Y ya qué estamos analizando en ciclo **Negativo** de la señal:

$$V_o = V_{in}$$

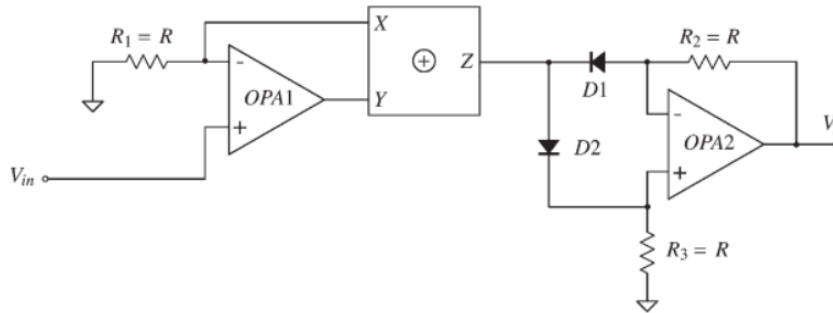
9.4. Función de Transferencia

$$V_0 = \begin{cases} V_i & \text{para } V_i < 0 \\ -V_i & \text{para } V_i > 0 \end{cases}$$

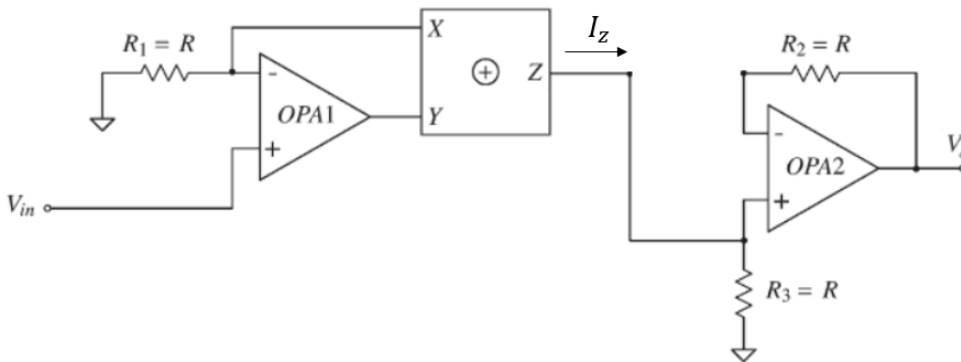
10. Octavo Circuito

10.1. Descripción

Usando la configuración de el transportador operacional tenemos un circuito que trabaja bien a frecuencias altas.



10.2. Análisis en el ciclo Positivo de una señal sinusoidal

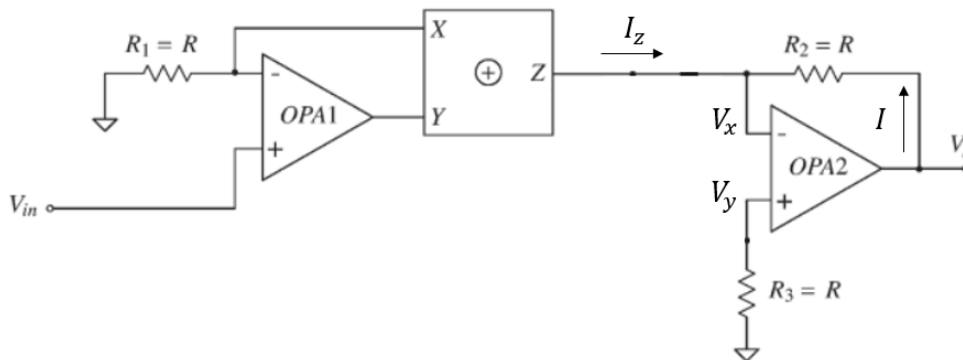


$$I_z = \frac{V_{in}}{R}$$

El último opam está configurado como un seguidor de volaje, por lo tanto:

$$V_o = V_{in}$$

10.3. Análisis en el ciclo Negativo de una señal sinusoidal



$$I_z = \frac{V_{in}}{R}$$

$$I_z + I = 0$$

$$I = \frac{V_o - V_x}{R}$$

$$V_x = V_y = 0$$

$$\frac{V_o - V_x}{R} + \frac{V_{in}}{R} = 0 \quad V_o = -V_{in}$$

Y ya qué estamos analizando en ciclo **Negativo** de la señal:

$$V_o = V_{in}$$

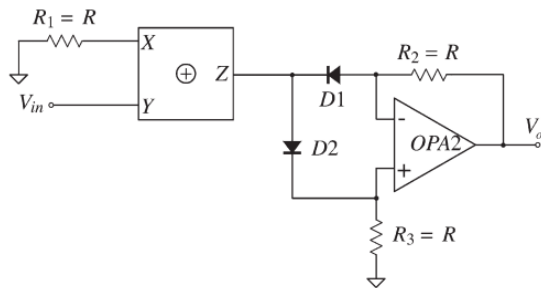
10.4. Función de Transferencia

$$V_o = \begin{cases} V_i & \text{para } V_i < 0 \\ V_i & \text{para } V_i > 0 \end{cases}$$

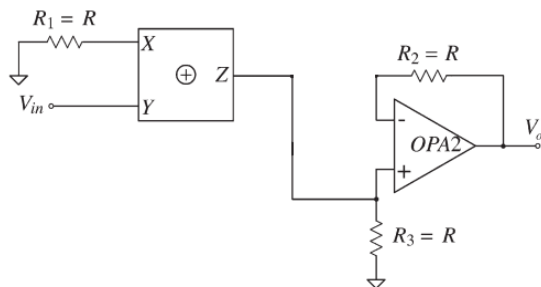
11. Noveno Circuito

11.1. Descripción

Una simplificación del circuito anterior pero menos preciso dado que: $R_1 + r_x = R$



11.2. Análisis en el ciclo Positivo de una señal sinusoidal

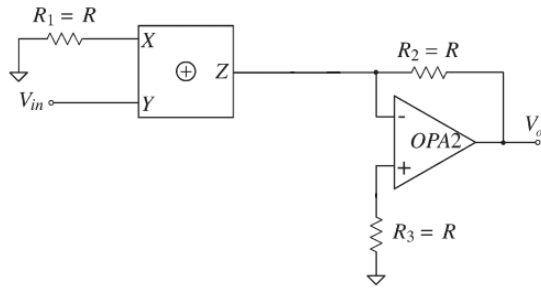


$$I_z = \frac{V_{in}}{R}$$

El último opam está configurado como un seguidor de volaje, por lo tanto:

$$V_o = V_{in}$$

11.3. Análisis en el ciclo Negativo de una señal sinusoidal



$$I_z = \frac{V_{in}}{R} \quad I = \frac{V_o - V_x}{R} \quad V_x = V_y = 0$$

$$I_z + I = 0$$

$$\frac{V_o - V_x}{R} + \frac{V_{in}}{R} = 0 \quad V_o = -V_{in}$$

Y ya qué estamos analizando en ciclo **Negativo** de la señal:

$$V_o = V_{in}$$

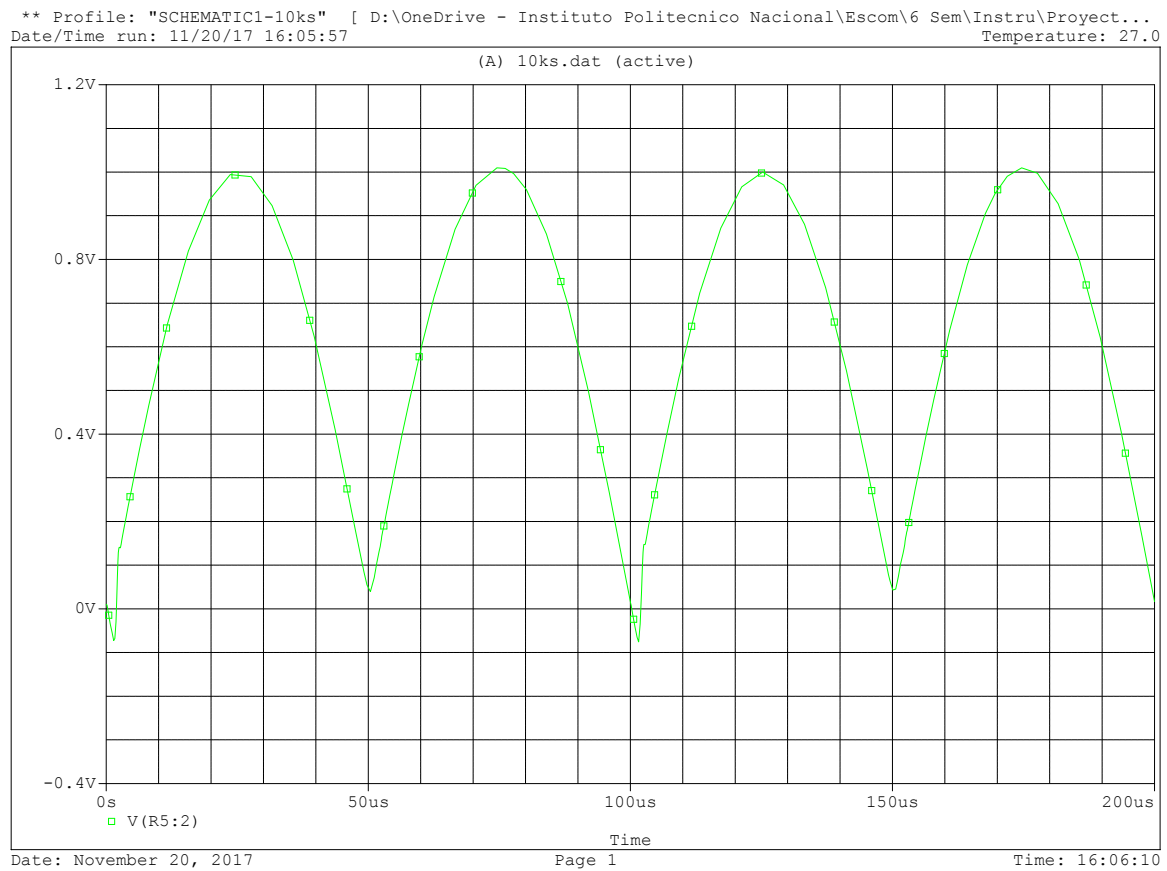
11.4. Función de Transferencia

$$V_0 = \begin{cases} V_i & \text{para } V_i < 0 \\ -V_i & \text{para } V_i > 0 \end{cases}$$

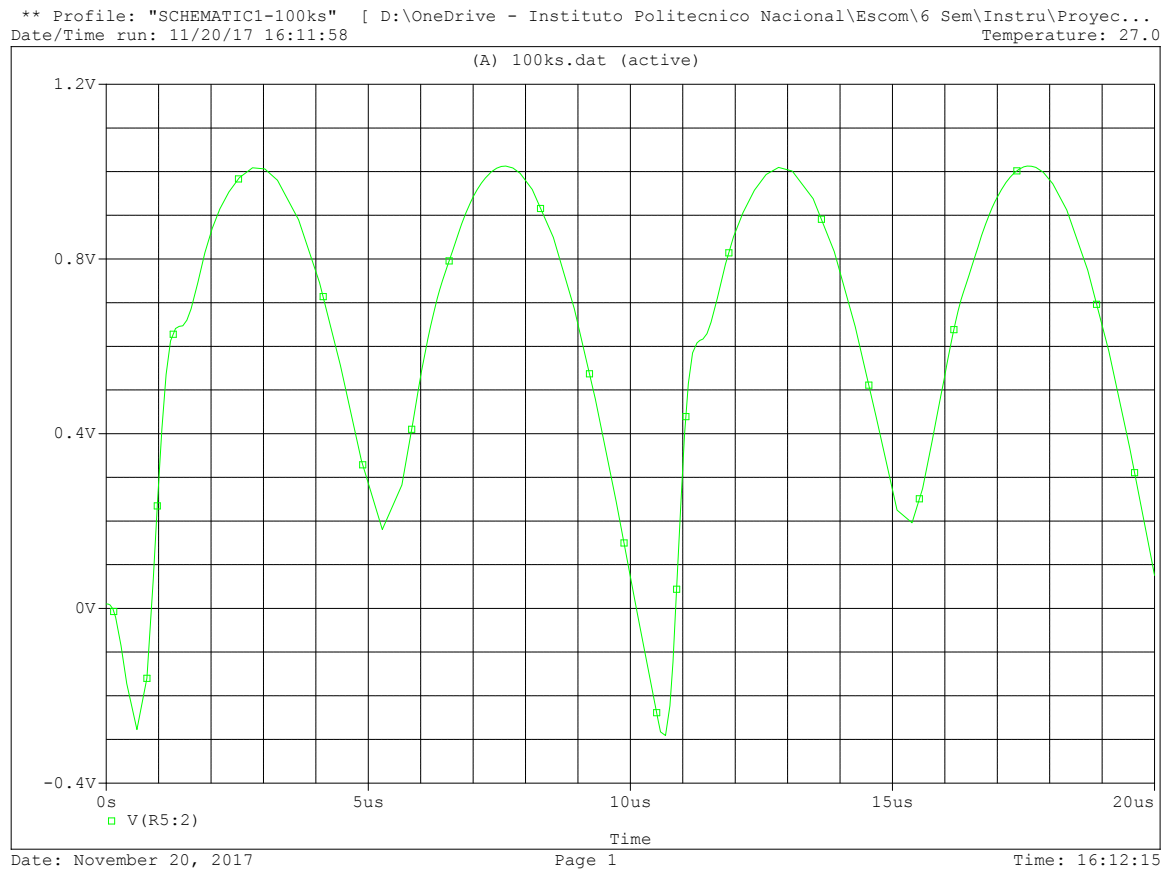
12. Simulaciones

12.1. Primer Circuito

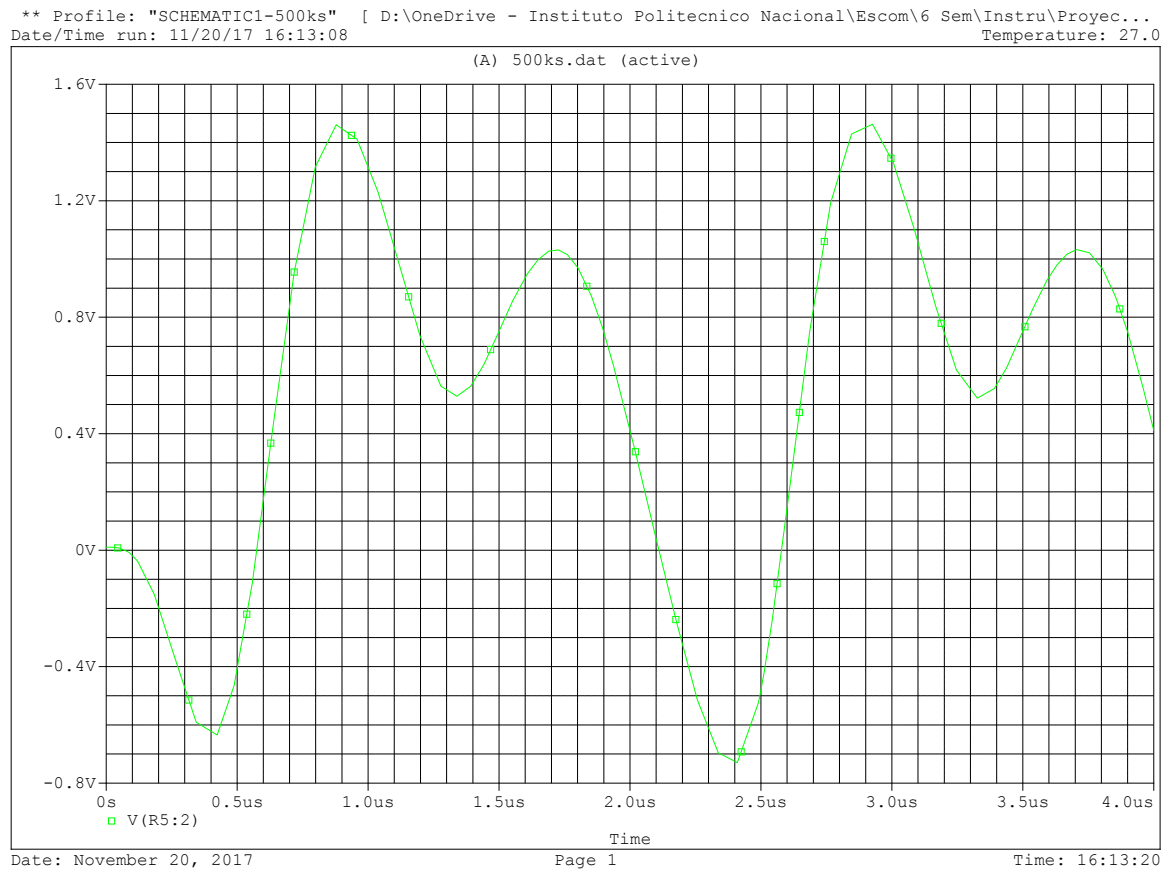
12.1.1. Frecuencia de Vin: 10khz



12.1.2. Frecuencia de Vin: 100khz

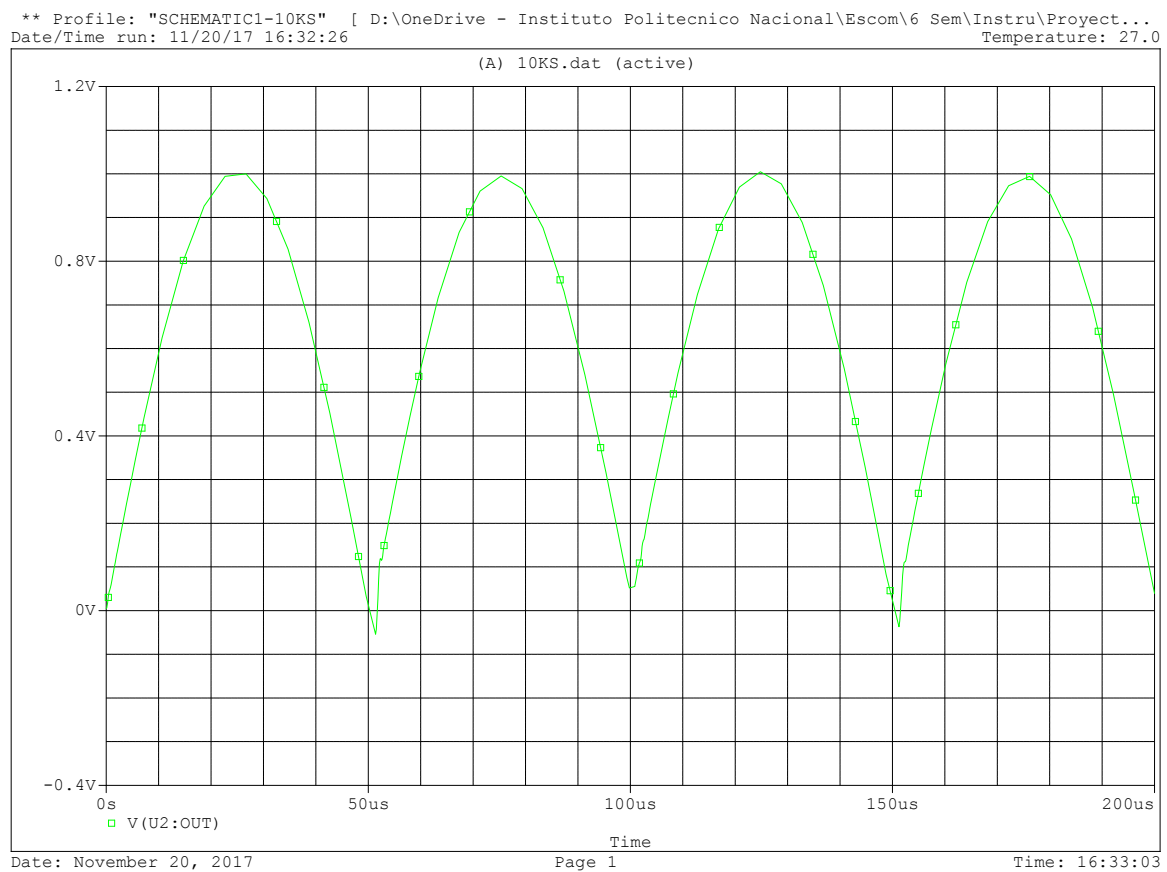


12.1.3. Frecuencia de Vin: 500khz

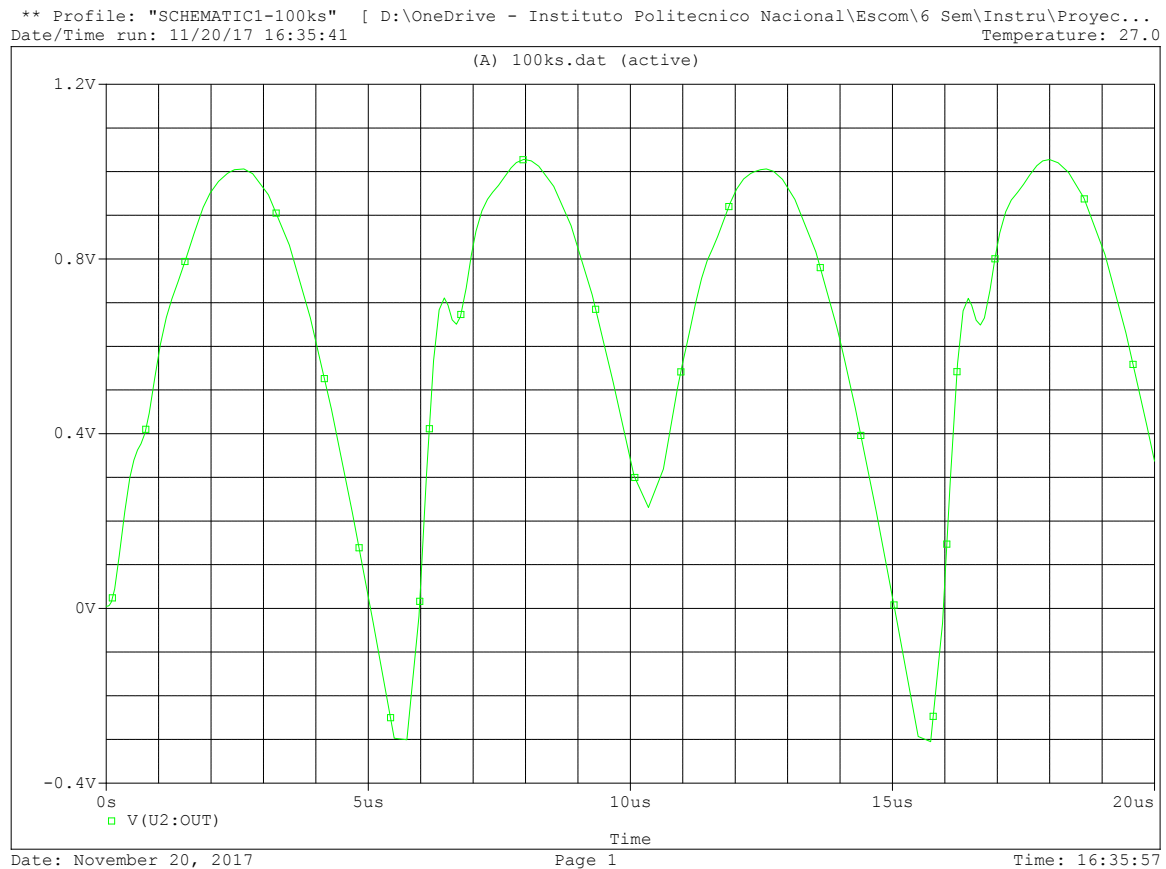


12.2. Cuarto Circuito

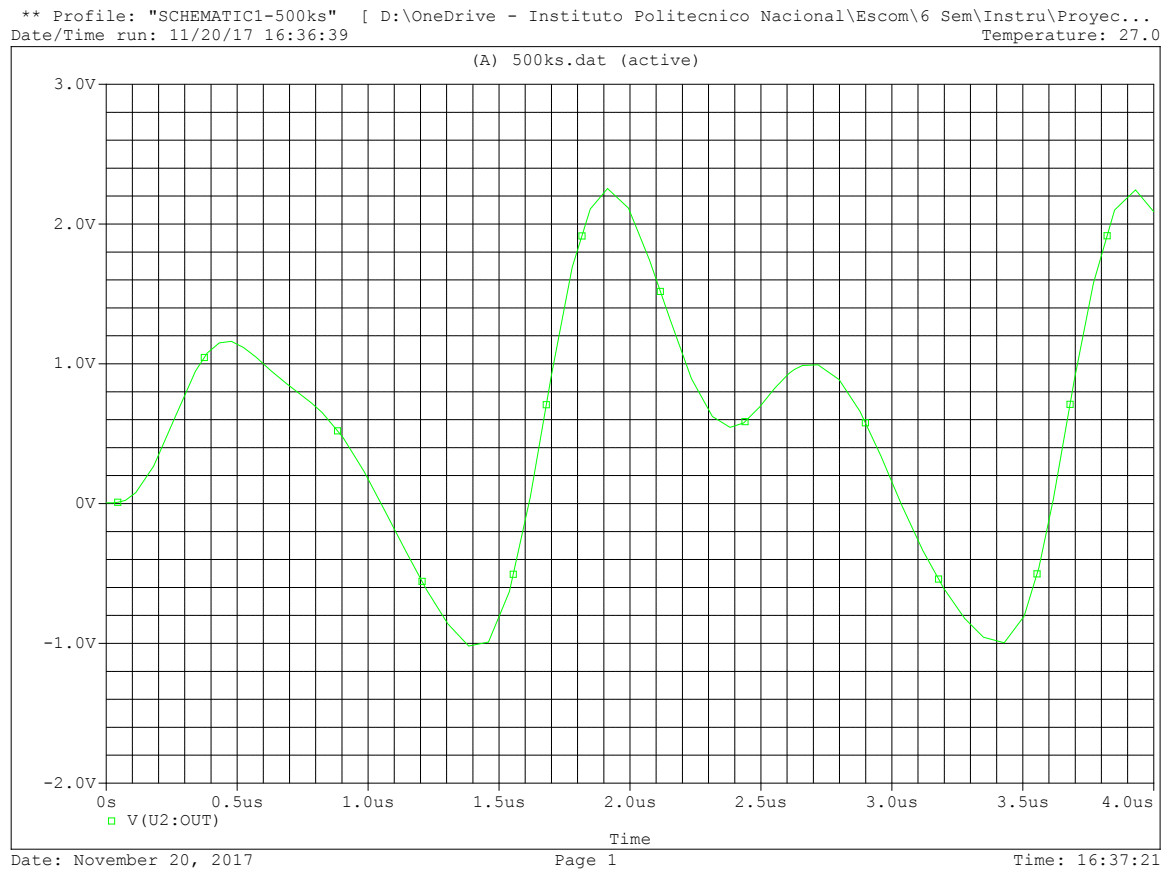
12.2.1. Frecuencia de Vin: 10khz



12.2.2. Frecuencia de Vin: 100khz

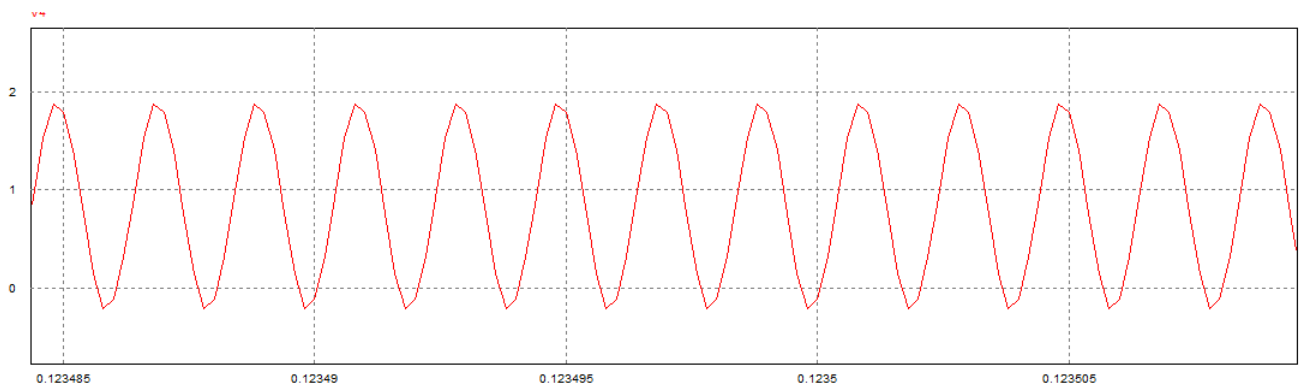


12.2.3. Frecuencia de Vin: 500khz



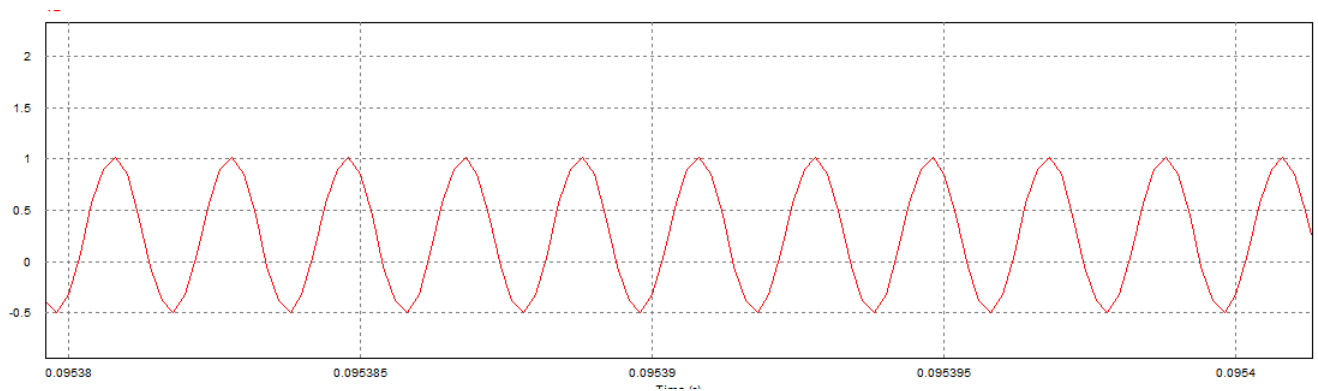
12.3. Quinto Circuito

12.3.1. Frecuencia de Vin: 500khz



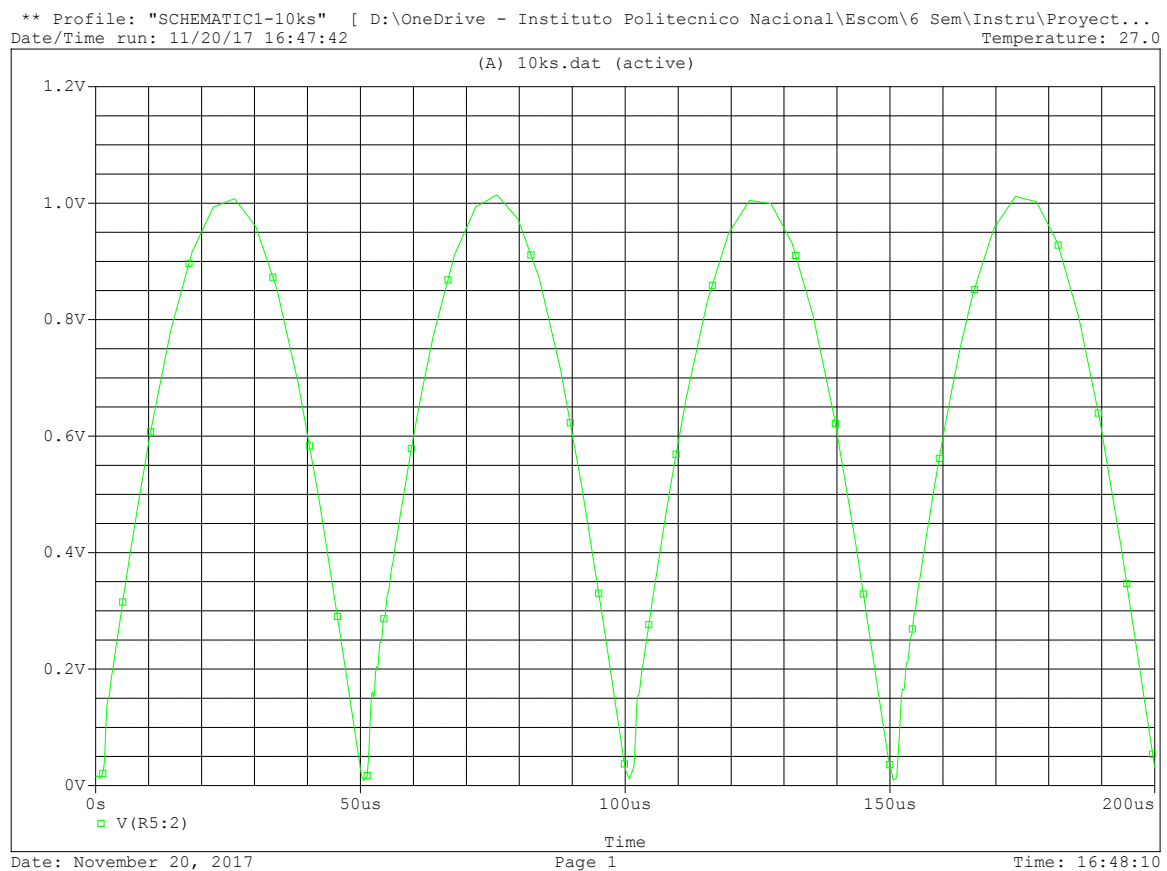
12.4. Sexto Circuito

12.4.1. Frecuencia de Vin: 500khz

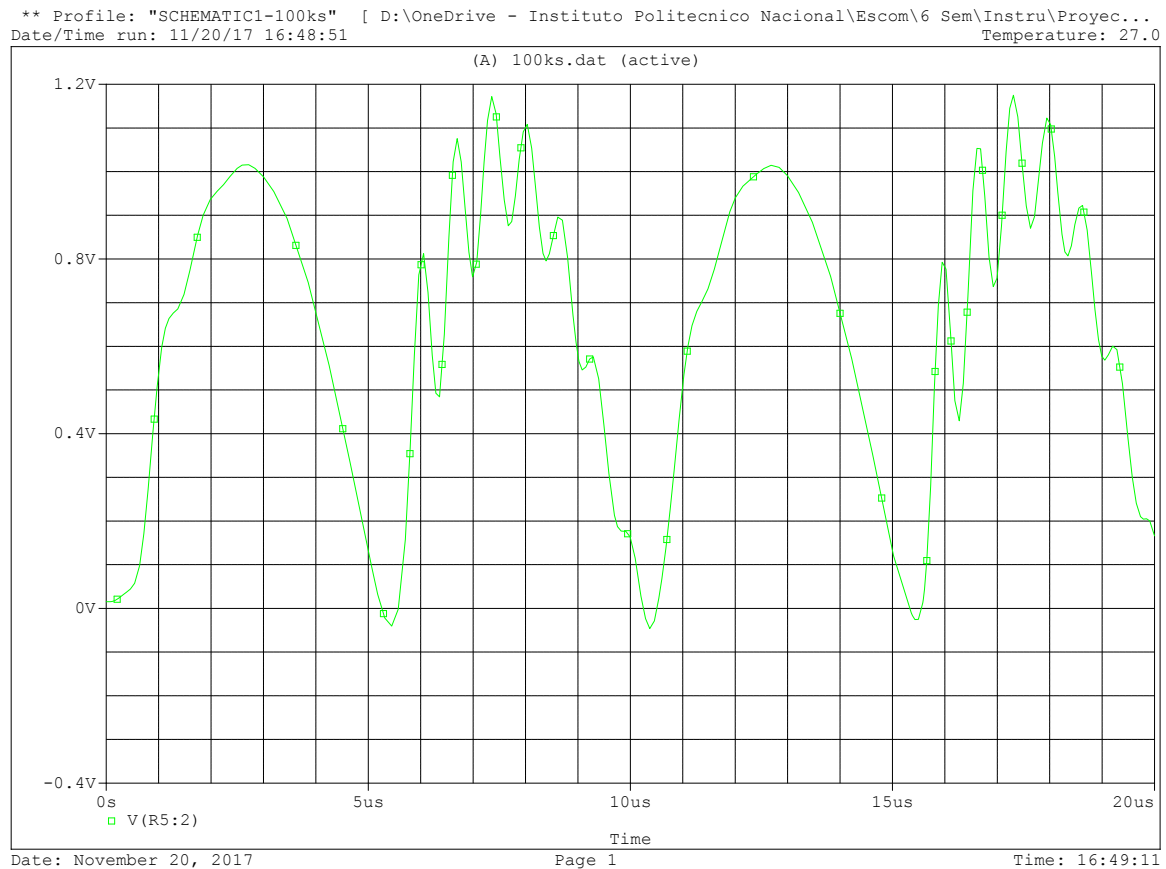


12.5. Séptimo Circuito

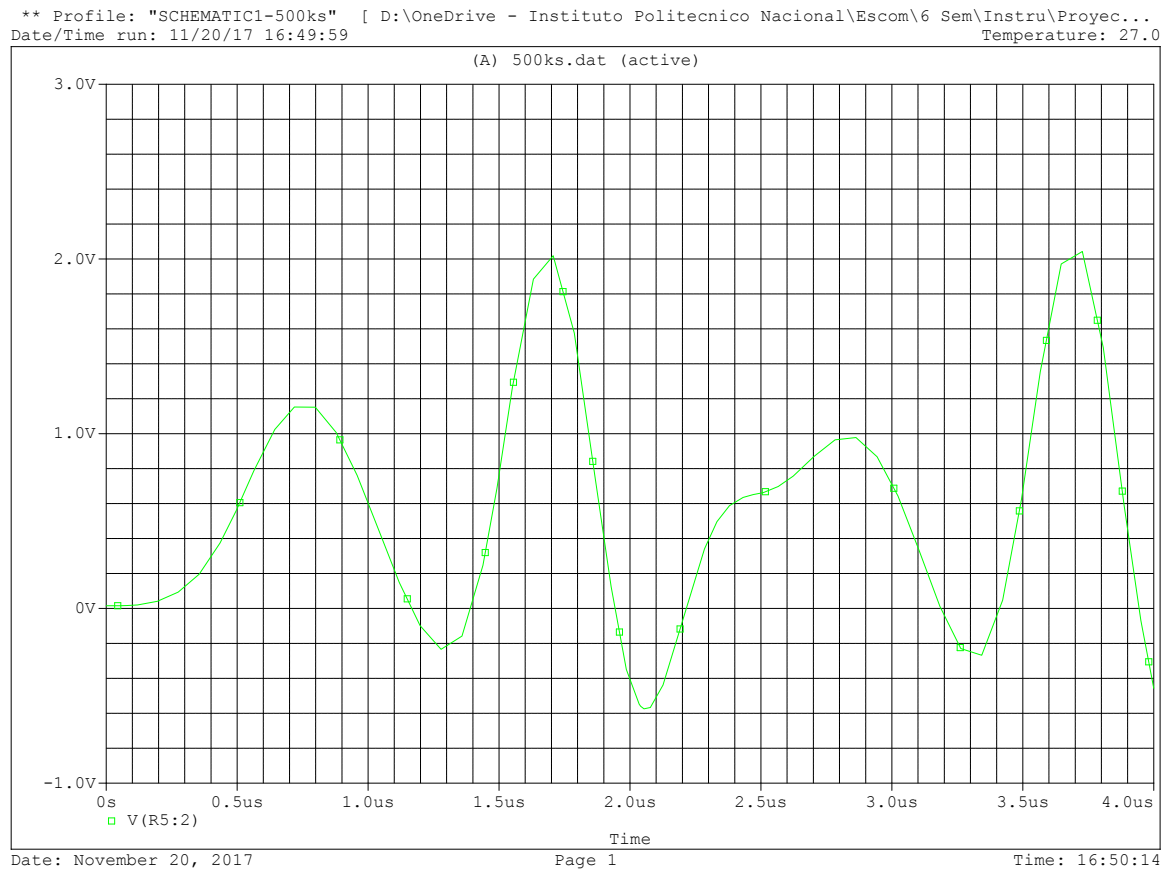
12.5.1. Frecuencia de Vin: 10khz



12.5.2. Frecuencia de Vin: 100khz



12.5.3. Frecuencia de Vin: 500khz



13. Conclusión

Cómo se puede observar en la simulaciones cada circuito de comporta de manera diferente para las frecuencias empleadas, el artículo en el que nos basamos propone diferentes circuitos para diferentes usos, usando CC's, estos dispositivos tienen un ancho de banda mucho mayor a los amplificadores operacionales convencionales, lo cual permite que haya menos distorsiones de la señal a frecuencias altas.