

**Diseño de un sistema de instrumentación para un convertir una señal de CA a CC
(Corriente Alterna-Corriente Continua) que opere para una señal con frecuencia de
entrada variable**

Demetrio Manuel Roa Perdomo

&

Kevin Eduardo Pérez Contreras

Notas del autor

Demetrio Manuel Roa Perdomo, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad
Autónoma de Nuevo León

Esta investigación ha sido financiada por el propio alumno

La correspondencia relacionada con esta investigación debe ser dirigida a Demetrio Roa
Universidad Autónoma de Nuevo León, Pedro de Alba S/N, Niños Héroes, Ciudad Universitaria,
San Nicolás de los Garza, N.L.

Contacto: demetrio.roap@uanl.edu.mx

Diseño de un sistema de instrumentación para un convertir una señal de CA a CC (Corriente Alterna- Corriente Continua) que opere para una señal con frecuencia de entrada variable

Pérez Contreras, K. E. & Roa Perdomo, D. M.

Resumen – Los amplificadores operacionales tienen diversas características que les permiten ser de mucha utilidad para realizar diversos circuitos. Es por ello que se desarrolló el interés en crear un diseño de instrumentación que integre en un mismo circuito distintas configuraciones con amplificadores operacionales. En este caso se realizó con un oscilador senoidal, rectificador de precisión y un filtro analógico activo. El diseñar este sistema permite visualizar el potencial que tienen dichos sistemas con amplificadores para poder obtener un sistema que pueda utilizarse, finalmente, en alguna clase de dispositivo útil en la vida común, laboratorios y más.

I. INTRODUCCIÓN

Los amplificadores operacionales (OpAmp) son una serie de dispositivos electrónicos activados a través de la corriente continua. Funcionan conforme a su arreglo, que puede ser uno inversor, no inversor, seguidor de voltaje, seguidor de corriente, sumadores, diferenciadores, entre otros. En conjunto su uso puede ser incluso más variado y, en combinación con componentes no lineales, es capaz de actuar como circuitos que presentan un funcionamiento más amplio en corriente alterna, como lo son los osciladores, rectificadores, o filtros.

Los osciladores son un formato de distintas configuraciones que se ocupan de generar una onda con una frecuencia, forma de onda y amplitud específica. Estos circuitos no requieren de una alimentación de entrada, fuera de la alimentación proveída al amplificador operacional, siendo característico de su forma el que su oscilación se vea generada por inestabilidades del circuito. Dicha inestabilidad es la que finalmente permite al circuito comenzar una oscilación que es totalmente dependiente del tipo de configuración en la que se encuentre y los valores de sus componentes, tanto los que componen la alimentación principal como los que se encuentran en su sistema de retroalimentación, necesario para terminar de definir el funcionamiento del oscilador.

Los rectificadores de precisión se utilizan porque la mayoría de los rectificadores comunes son incapaces de rectificar ondas de pequeña amplitud. Al ser un sistema rectificador, este requiere de diodos rectificadores que, dependiendo de la configuración propuesta, permiten el paso solamente de los semiciclos positivos, negativos o ambos. Es este último, el rectificador de precisión de onda completa el que es de nuestro interés y se caracteriza por mantener el sistema dentro de un formato sencillo donde las entradas y

las salidas se pueden graficar de manera lineal en una gráfica “Vi/Vo”. Esto permite que el sistema rectificador mantenga cuidadosamente una relación lineal entre la entrada y salida que permite ver, finalmente, esa onda completamente rectificada. Adicionalmente, se pueden asignar componentes con valores que permitan que el circuito presente ganancia, además de ser capaz de asignar diferentes ganancias según el semiciclo.

Los filtros son circuitos que modifican las señales que transcurren a través de ellos. De este modo, los filtros analógicos son capaces de permitir la entrada de ciertas señales y las modifican acorde a los parámetros establecidos en el diseño del circuito. Lo que caracteriza a éstos es su capacidad de permitir el paso de ciertas señales que se encuentren en un rango específico de frecuencia. Es por eso por lo que existen diversos tipos de filtros, en este caso activos debido a la presencia del amplificador operacional, como lo es el filtro paso bajo, paso alto, rechaza banda, o paso banda. Por lo que el filtro reducirá la señal percibida mientras esté más cercana al punto de corte o paso que se le haya asignado aniquilando la señal que se recibe y enviando otra señal de salida que no contenga los valores fuera de las frecuencias admitidas por el filtro.

Debido a la utilidad de estos circuitos expuestos anteriormente es que podemos realizar diversas clases de dispositivos. Y su comprensión en el funcionamiento y propósito de cada uno de ellos resulta de extrema importancia. Haciendo que, finalmente, obtengamos las bases para nuestro sistema propuesto: un convertidor de señal de CA a CC con función dentro de una frecuencia variable.

II. DESARROLLO

Etapas 1-Oscilador senoidal

Para el oscilador senoidal se eligió utilizar el diseño del oscilador de Puente de Wein, debido a su facilidad de diseño y uso. En conjunto con eso, el oscilador cuenta con rangos de oscilación desde los 100Hz hasta los 100kHz, haciéndolo una opción perfecta para nuestros parámetros de oscilación de 100Hz hasta 1kHz.

De ahí se partió para llevar a cabo su análisis apropiado para demostrar correctamente cuál es la ecuación que define a la frecuencia a la que el sistema va a oscilar conforme a los valores de los capacitores y resistencias. Donde se realizó para $C1=C2$ y $R1=R2$. Entonces se definieron del mismo modo las resistencias del sistema de retroalimentación conforme a la condición donde $R_F > 2R_A$. En adelante se consistió en confirmar y sustituir los valores obtenidos y asignados a las distintas ecuaciones para comprobar que el circuito es capaz de manejar frecuencias de 100Hz a 1kHz. Para que las condiciones del diseño se cumplieran $R1$ y $R2$ fueron puestas como resistencias variables, que igualmente se pueden asignar como potenciómetros.

Etapas 2-Rectificador de precisión de onda completa

Al tomar el diagrama recomendado por el profesor realizamos el debido análisis. Comenzando por diferenciar qué diodos rectificadores están activos según los valores

voltaje de entrada cuando esté sea positivo o negativo. De igual modo se consideró el uso de diodos rectificadores capaces de manejar mayores frecuencias, por lo que se decidió por los 1N5400, que puede aceptar frecuencias de hasta 1MHz.

Para el desarrollo de este tomamos como consideración que ninguno de los semiciclos, ni positivos ni negativos, presentaría ganancia. De ese modo el circuito se dedicaría únicamente a rectificar la señal que entra al sistema. Igualmente, seguimos la definición propuesta por el diagrama del libro donde todas las resistencias adquirirían su valor respecto a otro valor "R", que se definió a 10k Ω por facilidad de diseño.

Etapas 3-Filtro Butterworth

Se ha tomado como base lo explicado por el profesor en uno de los videos de clase, específicamente aquellos dos videos en los que se toca el tema de los filtros Butterworth, sin embargo, estos se han tomado como base inicialmente, ya que en lo que respecta al procedimiento como tal para la implementación del mismo, en base a los criterios solicitados, se ha tenido que proceder a hacer una extensa investigación en diversos medio para asegurar que el desarrollo de los cálculos, estuvieran siempre correctamente orientados a la correcta implementación del circuito.

Para esto es que se han consultado fuentes proveídas en clase y en internet para analizar las distintas definiciones que se les daban a conceptos como frecuencia de corte, y cómo difería esta de los conceptos que se manejaron en la explicación de los videos del profesor, y si había que tomarse en cuenta esto para el desarrollo de los cálculos, a su vez, también nos hemos asegurado que el concepto de la ganancia, estuviera bien implementado, lo que nos ha llevado a notar que los conceptos vistos en clase, se basaban en una ganancia fija de 3dB y que de tomar en cuenta otro valor, se debían consultar fuentes alternas.

Finalmente, en lo que respecta a como tal la implementación en el simulador, esto ha sido la parte más simple, sin embargo, esto no significa que no hayamos tenido inconvenientes, ya que hemos visto como la más mínima diferencia causaba que el resultado final no fuera el esperado.

Etapas 4-Diseño de instrumentación

En lo que respecta como tal a la combinación e implementación final, solo ha consistido en juntar las etapas 1, 2 y 3, a manera de que la salida de la etapa 1 fuera la entrada de la etapa 2, mientras que la salida de la etapa 2 fuera la entrada de la etapa 3, proceso que al estar implementando todo únicamente en simulador, no ha sido de mayor complicación.

Al menos para nosotros el mayor de los problemas ha sido como tal notar que la salida estuviera correcta, proceso en el que hemos fallado inicialmente debido a una incorrecta implementación de la etapa 3, sin embargo, posterior a las correcciones

necesarias, se ha llegado a apreciar el resultado deseado sin ningún tipo de modificación a las etapas previas.

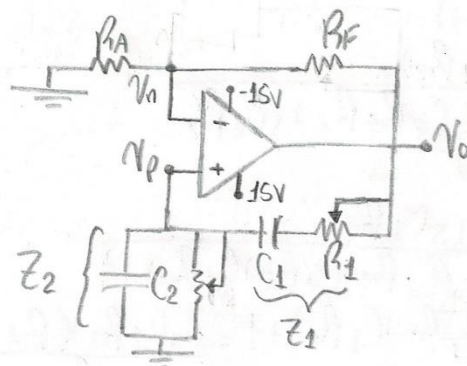
III. ANÁLISIS Y DISEÑO

Etapas 1-Oscilador senoidal

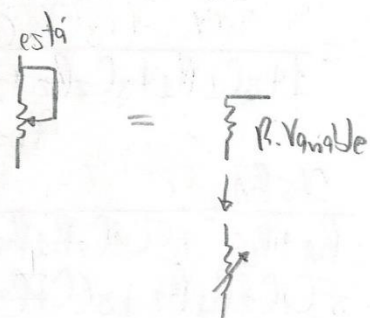
Primero obtenemos las ecuaciones que determinan el valor del voltaje del pin no inversor (V_p) y el pin inversor (V_n). Para ello tomamos a los capacitores por su impedancia y los unimos en paralelo o en serie con las resistencias según corresponda.

Etapas 1. Oscilador

Utilizamos un oscilador de puente de Wien con un potenciómetro



Cuando un Pot.



- Análisis. El circuito es no inversor por lo que
 $V_n = V_p$ $V_n = \frac{V_o R_A}{R_A + R_F} = V_p$

Sabemos que $C \rightarrow Z_c = 1/sC$

Por lo que $C_2 // R_2$ sería $Z_2 = \frac{Z_{C_2} R_2}{Z_{C_2} + R_2}$

y $Z_1 = Z_{C_1} + R_1$

$$Z_1 = \frac{1}{sC_1} + R_1 = \frac{1 + sC_1 R_1}{sC_1} \quad Z_2 = \frac{(1/sC_2)R_2}{1/sC_2 + R_2} \cdot \frac{sC_2}{sC_2} = \frac{R_2}{1 + sC_2 R_2}$$

$$V_p = \frac{V_o Z_1}{Z_1 + Z_2} = \frac{V_o \left(\frac{R_2}{1 + sC_2 R_2} \right)}{\left(\frac{1 + sC_1 R_1}{sC_1} \right) + \left(\frac{R_2}{1 + sC_2 R_2} \right)} =$$

$$= \frac{V_o \left(\frac{R_2}{1 + sC_2 R_2} \right)}{\frac{(1 + sC_1 R_1)(1 + sC_2 R_2) + sC_1 R_2}{sC_1 (1 + sC_2 R_2)}} = \frac{V_o (sC_1 R_2)}{1 + sC_1 R_1 + sC_2 R_2 + s^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + sC_1 R_2}$$

Una vez obtenidos los igualamos y sustituimos en los valores de las ecuaciones "s" por "jw". Después de ello manejamos la ecuación de modo que obtenemos la fórmula de la frecuencia de oscilación del circuito.

$$V_n = V_p$$

$$\frac{V_o R_A}{R_A + R_F} = \frac{V_o (s C_1 R_2)}{s^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + s(C_1 R_1 + C_2 R_2 + C_1 R_2) + 1}$$

$$s^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + s(C_1 R_1 + C_2 R_2 + C_1 R_2) + 1 = \frac{(s C_1 R_2)(R_A + R_F)}{R_A}$$

$$\text{Si } s = j\omega_0 \text{ y } j = \sqrt{-1}$$

$$-\omega_0^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + j\omega_0 (C_1 R_1 + C_2 R_2 + C_1 R_2) + 1 = \frac{j\omega_0 C_1 R_2 (R_A + R_F)}{R_A}$$

Igualemos las partes reales

$$1 - \omega_0^2 C_1 C_2 R_1 R_2 = 0 \rightarrow \omega_0^2 = \frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}} \text{ y con } \omega_0 = \omega = 2\pi f_0 \rightarrow f_0 = \omega / 2\pi$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}} \text{ } \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \text{ Frec. de oscilación}$$

Si hacemos $C_1 R_1 = C_2 R_2$ entonces

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_1^2 R_1^2}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_2^2 R_2^2}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{\tau^2}} = \frac{1}{2\pi \tau}$$

$$\tau = C_1 R_1 = C_2 R_2$$

Comprobamos la fórmula de la condición de oscilación del circuito sustituyendo valores en $V_n = V_p$. Una vez obtenida dicha fórmula empezamos con el diseño haciendo diversas consideraciones.

$$s = j\omega = j \cdot \frac{1}{\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad \text{y sustituimos}$$

$$\frac{R_A}{R_A + R_F} = \frac{j C_2 R_2 / \sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}}{\underbrace{(C_1 C_2 R_1 R_2)(-1)}_{-1} + j \frac{(C_1 R_1 + C_2 R_2 + C_1 R_2)}{\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}} + 1}$$

$$\frac{R_A}{R_A + R_F} = \frac{j C_1 R_2 \sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}}{j (C_1 R_1 + C_2 R_2 + C_1 R_2) \sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}}$$

$$\frac{R_A}{R_A + R_F} = \frac{C_1 R_2}{C_1 (R_1 + R_2) + C_2 R_2} \quad \text{con } C_1 R_1 = C_2 R_2$$

$$\frac{R_A}{R_A + R_F} = \frac{C_1 R_2}{C_1 (R_1 + R_2 + R_1)} = \frac{R_2}{2R_1 + R_2}$$

$$Q = -\frac{R_A}{R_A + R_F} + \frac{R_2}{2R_1 + R_2}, \quad \text{sin embargo, la oscilación sólo ocurre si su valor es menor a 1 y mayor a 0}$$

$$0 < \frac{R_2}{2R_1 + R_2} - \frac{R_A}{R_A + R_F} < 1 \quad \left. \vphantom{\frac{R_2}{2R_1 + R_2} - \frac{R_A}{R_A + R_F}} \right\} \text{Condición para oscilación}$$

• Diseño

$$R_{eq} \quad f_0 = 100 \text{ Hz}, \quad \text{con } C_1 = C_2 = 10 \text{ nF}, \quad \text{y } R_1 = R_2$$

$$f_0 = 100 \text{ Hz} = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_1 R_1 C_2 R_2}} = \frac{1}{2\pi C_1 R_1}$$

$$100 \text{ Hz} = \frac{1}{2\pi (10 \text{ nF}) R_1} \rightarrow \frac{1}{R_1} = (100 \text{ Hz})(2\pi)(10 \text{ nF})$$

$$R_1 = \frac{1}{(100 \text{ Hz})(2\pi)(10 \text{ nF})}$$

Dentro de las condiciones del circuito consideramos una que se obtiene específicamente del lugar exacto de las raíces de la función de transferencia. Una vez obtenidos o asignados los valores finales del diseño, los incluimos al diseño esquemático final.

$$R_1 = R_2 = 159154.9431 \Omega \approx 160k\Omega \quad \text{para } 100\text{Hz}$$

Para $f_0 = 1\text{kHz}$

$$R_1 = \frac{1}{(1\text{kHz})(2\pi)(10\text{nF})}$$

$$R_1 = R_2 = 15915.49431 \Omega \approx 16k\Omega \quad \text{para } 1\text{kHz}$$

Por lo que

$$16k\Omega < R_1 = R_2 < 160k\Omega //$$

Si analizáramos las raíces de la función de transferencia

$$\frac{R_F}{2R_A} - 1 > 0 \rightarrow R_F > 2R_A$$

$$\text{Suponemos } R_A = 100\Omega$$

$$\text{por lo que } R_F > 2(100\Omega) \rightarrow R_F = 205\Omega //$$

y comprobamos con

$$\frac{160k\Omega}{2(160k\Omega) + 100k\Omega} - \frac{100\Omega}{100\Omega + 205\Omega} = 0.$$

$$\frac{16k\Omega}{2(16k\Omega) + 16k\Omega} - \frac{100\Omega}{100\Omega + 205\Omega} = 0.$$

$$0 < 0.0158 < 1$$

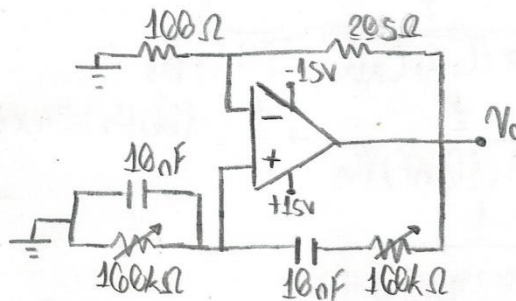
Por lo que sí es capaz de oscilar

Diseño Final

$$R_A = R_F = 160k\Omega$$

$$A \ 10\% \rightarrow 100\text{Hz}$$

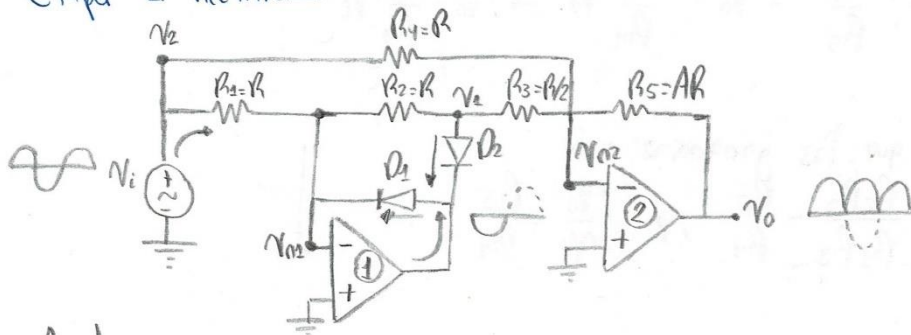
$$A \ 100\% \rightarrow 1\text{kHz}$$



Etapas 2-Rectificador de precisión de onda completa

Para el rectificador comenzamos analizando cuándo y cuál diodo se apaga según el valor de voltaje de entrada. Cada uno de estos tiene su propia fórmula debido a cómo interactúan las distintas partes del sistema una vez uno de los diodos ha sido apagado.

Etapa 2 Rectificador



• Analisis

Cuando $V_i > 0V$, D_1 conduce y D_2 se apaga

Cuando $V_i < 0V$, D_2 conduce y D_1 se apaga

$V_i > 0V$

$$\frac{V_i - V_{n1}}{R_1} = \frac{V_{n1} - V_1}{R_2} \quad V_{n1} = V_{p1} = 0V \quad \frac{V_i}{R_1} = -\frac{V_1}{R_2} \rightarrow V_1 = -\frac{R_2}{R_1} V_i$$

$V_2 = V_i$ (al no pasar por una resistencia)

$$\frac{V_1 - V_{n2}}{R_3} + \frac{V_2 - V_{n2}}{R_4} = \frac{V_{n2} - V_0}{R_5} + 0 \quad V_{n2} = V_{p2} = 0V$$

$$\frac{V_1}{R_3} + \frac{V_2}{R_4} = -\frac{V_0}{R_5} \rightarrow V_0 = -\frac{R_5}{R_3} V_1 - \frac{R_5}{R_4} V_2$$

$$V_0 = -\frac{R_5}{R_3} \left(-\frac{R_2}{R_1} V_i \right) - \frac{R_5}{R_4} V_i \quad V_0 = \left[\frac{R_2 R_5}{R_1 R_3} - \frac{R_5}{R_4} \right] V_i$$

$V_i < 0V$

Como D_1 se apaga $V_1 = 0V$, y $V_2 = -V_i$

$$(V_2 - V_{n2})/R_4 = (V_{n2} - V_0)/R_5 \quad V_{n2} = V_{p2} = 0V$$

Una vez obtenidas las fórmulas de salida según cada semiciclo se evalúa cuánta ganancia se requiere presentar para que el sistema sea funcional. En nuestro caso, ambas ganancias son unitarias $|1|$, por lo que los semiciclos negativos presentan ganancia "-1" y en los semiciclos positivos se presenta ganancia "+1". Entonces seguimos las condiciones propuestas por el diagrama esquemático del libro "Diseño con

amplificadores operacionales y circuitos integrados analógicos". Donde $R_1=R_2=R_4=R$, $R_3=R/2$, y $R_5=AR$. $A=1$ debido a que la ganancia de ambos semiciclos es igual a 1. Esto hace que, al hacer $R=1k\Omega$, los demás valores sean $R_1=R_2=R_4=R_5=1k\Omega$, y $R_3=500\Omega$. Al hacer estas asignaciones comprobamos que la ganancia de ambos semiciclos es igual a $|1|$. Y finalmente añadimos dichos valores al diagrama del diseño final realizado para el rectificador de precisión de onda completa.

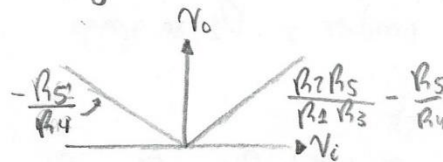
$$\frac{V_2}{R_4} = -\frac{V_0}{R_5} \rightarrow V_0 = -\frac{R_5}{R_4} V_2 \rightarrow V_0 = \frac{R_5}{R_4} V_i$$

Por lo que las ganancias son

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{R_2 R_5}{R_1 R_3} - \frac{R_5}{R_4}, \text{ y } \frac{V_0}{V_i} = \frac{R_5}{R_4}$$

• Diseño

Se quiere que las ganancias sean $|1|$ para cada semiciclo, por lo que



Consideramos

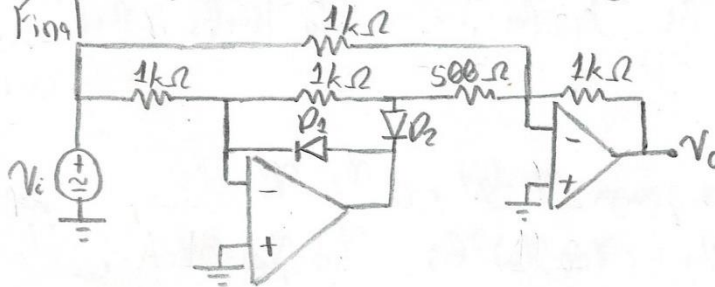
$$-\frac{R_5}{R_4} = -1 \quad \frac{R_2 R_5}{R_1 R_3} - \frac{R_5}{R_4} = 1$$

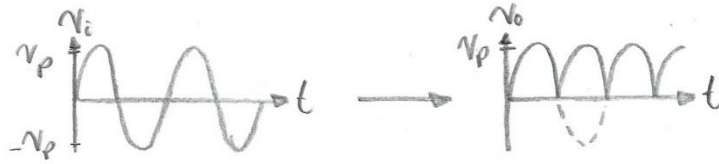
ta que $A=1$, y $R_1=R_2=R_4=R$, $R_3=R/2$ y $R_5=AR=(1)R$

$$\frac{R \cdot (1)R}{R \cdot (R/2)} - 1 = 1 \rightarrow \frac{R/1}{R/2} = 2 \rightarrow \frac{1}{1/2} = 2$$

Entonces se cumple la condición. Por ello asignamos $R=1k\Omega$

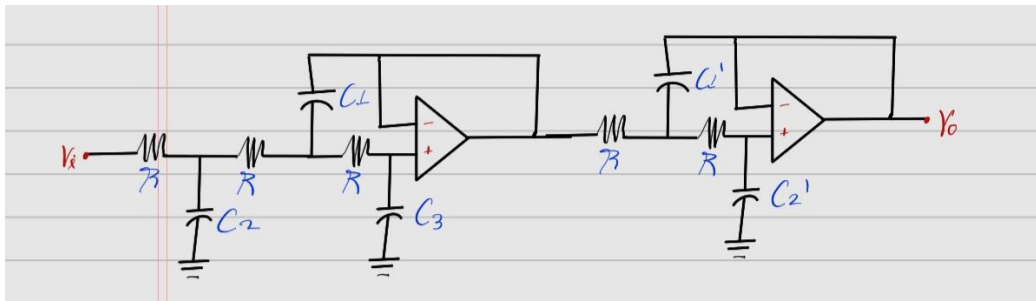
Diseño Final





Etapas 3-Filtro Butterworth

Para empezar con esta etapa, se ha analizado a detalle lo solicitado, que realmente, no deja mucho margen de libertad, esto ya que es en extremo específico lo que se desea, siendo esto claro, un filtro analógico, pero más que esto es un filtro de 5to orden paso bajo del estilo Butterworth, esto en sí, ya nos dice que estamos manejando con dos partes de un mismo circuito, siendo esto claro, un filtro de 3er orden cuya salida estaría conectado a la entrada de un filtro de 2do orden, que en conjunto nos estaría dando como tal el filtro de 5to orden, en lo que respecta como tal al filtro paso bajo, esto ya nos dice que no es necesario más que hacer un circuito como el que se muestra a continuación, donde nuestra labor es encontrar, o asignar valores a los capacitores y resistencias.



Esto se logra con dos cosas cruciales, primero que nada, una consulta rápida de la tabla de valores de filtros activos Butterworth, misma que para los propósitos de estos cálculos es la que permite una ganancia de -3dB, misma que es la que se ha solicitado, está la vemos a continuación. De la cual hemos de tomar para los cálculos, la fila marcada con 5, ya que esta es la de un filtro de 5to orden.

Orden, n	$C_1/C \text{ o } R/R_1$	$C_2/C \text{ o } R/R_2$	$C_3/C \text{ o } R/R_3$
2	1.414	0.7071	
3	3.546	1.392	0.2024
4	1.082	0.9241	
	2.613	0.3825	
5	1.753	1.354	0.4214
	3.235	0.3090	
6	1.035	0.9660	
	1.414	0.7071	
	3.863	0.2588	
7	1.531	1.335	0.4885
	1.604	0.6235	
	4.493	0.2225	
8	1.020	0.9809	
	1.202	0.8313	
	1.800	0.5557	
	5.125	0.1950	
9	1.455	1.327	0.5170
	1.305	0.7661	
	2.000	0.5000	
	5.758	0.1736	
10	1.012	0.9874	
	1.122	0.8908	
	1.414	0.7071	
	2.202	0.4540	
	6.390	0.1563	

Tabla 12.2 Valores de filtros activos Butterworth.

También, es crucial tener en consideración la fórmula de Factor de escala, misma que nos va a permitir, que en base a valores de resistencia que nosotros deseemos, así como una frecuencia de paso, que en este caso consideraremos la frecuencia de corte de 1000Hz, podemos calcular un valor de capacitancia que nos servirá de referencia para calcular todos los valores de capacitores de ambos filtros, el de 2do orden y el de 3er orden, para este punto también ya hemos asumido un valor fijo para todas las resistencia, que para este caso ha sido el de 10,000Ohms.

Factor de Escala

$$C = \frac{1}{2\pi f_p R}$$

Suponer $R = 10 \text{ K}\Omega$ * $f_p = f_c = 1000 \text{ Hz}$

$$\Rightarrow \frac{1}{2\pi (1000 \text{ Hz}) (10 \times 10^3 \Omega)} = 1.5915 \times 10^{-8} \text{ F}$$

11
15.915 nF

Y finalmente, con este valor de capacitancia, simplemente es cuestión de despejar cada uno de los valores de capacitores, en lo que se muestra a continuación hacemos esto por partes, siendo la Etapa 1 los cálculos para el filtro de tercer orden, mientras que la Etapa 2, es la sección en la que hacemos los cálculos del filtro de segundo orden, cabe recordar que los valores ya fijos, son aquellos de la tabla mostrada previamente.

Etapas

Etapas 1

$$\frac{C_1}{C} = 1.753 \quad \frac{C_2}{C} = 1.354 \quad \frac{C_3}{C} = 0.9214$$

$$C_1 = (1.753)(15.45 \text{ nF}) \quad C_2 = (1.354)(15.45 \text{ nF}) \quad C_3 = (0.9214)(15.45 \text{ nF})$$

$$C_1 = 27.8999 \text{ nF} \quad C_2 = 21.5496 \text{ nF} \quad C_3 = 6.7118 \text{ nF}$$

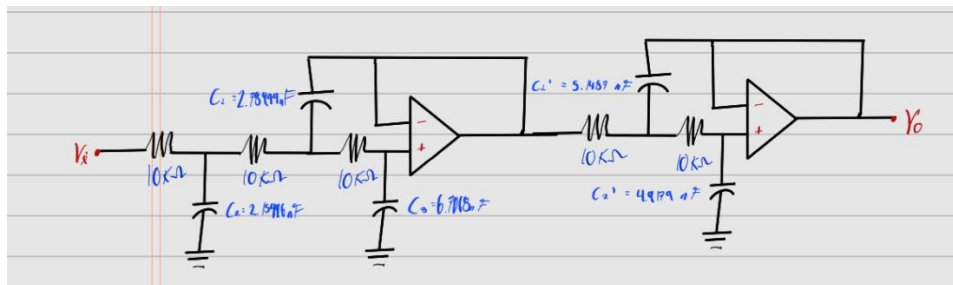
Etapas 2

$$\frac{C_1'}{C} = 3.235 \quad \frac{C_2'}{C} = 0.3090$$

$$C_1' = (3.235)(15.915) \quad C_2' = (0.3090)(15.915)$$

$$C_1' = 51.487 \text{ nF} \quad C_2' = 4.9179 \text{ nF}$$

Y con esto ya tenemos todo para reemplazar en la imagen del circuito propuesta originalmente, los valores que serían para el filtro



Etapas 4-Diseño de instrumentación

Debido a que el diseño final de instrumentación es una integración de los tres sistemas anteriores, no es necesario hacer algún análisis específico de este. Solamente se tiene en cuenta los valores de las salidas, que serían entradas para la siguiente etapa del diseño, con la excepción del filtro, al ser este el último integrante del diseño de instrumentación. También se tiene en cuenta el filtrado que esta causa a la onda rectificada y el voltaje de rizo que eso conlleva.

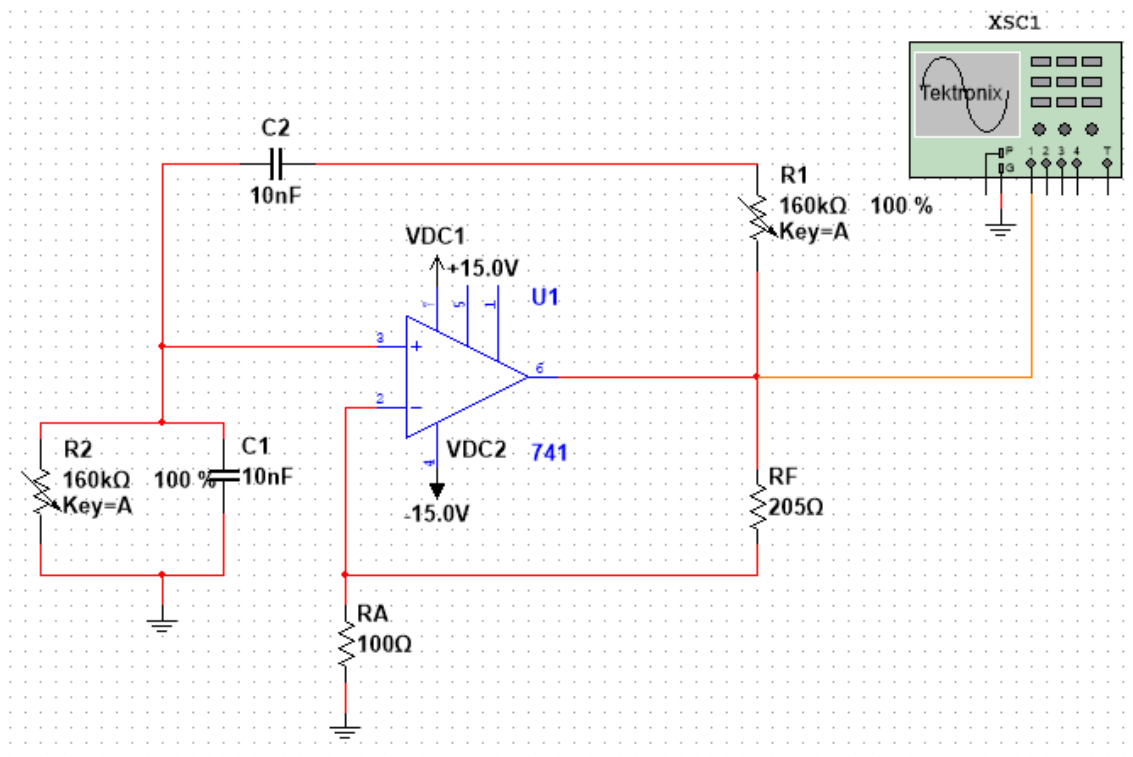
IV. RESULTADOS

Etapas 1-Oscilador senoidal

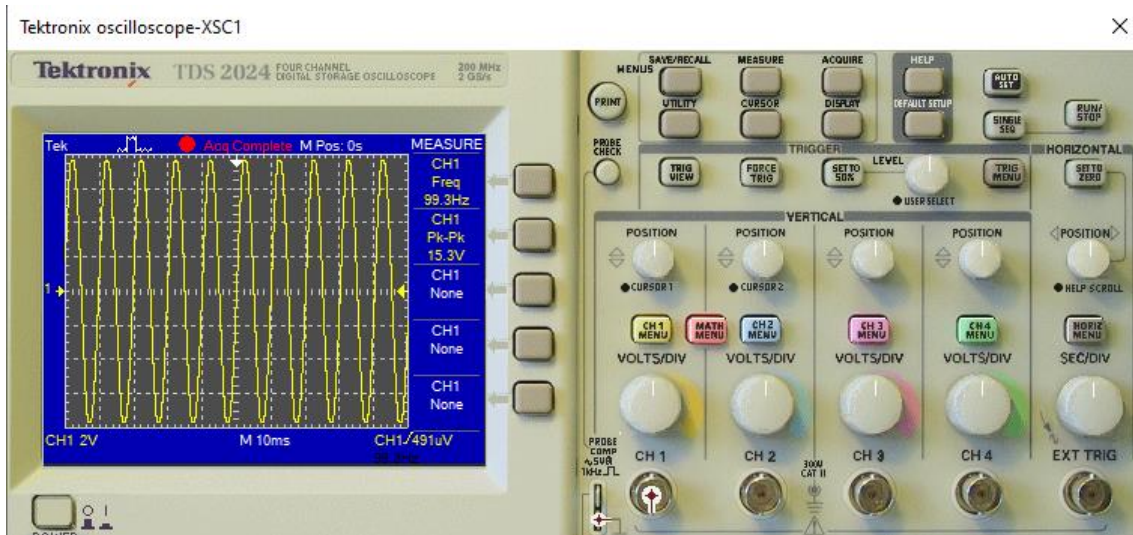
Diseño final obtenido:

El diseño final del oscilador con puente de Wein cuenta con dos capacitores de valores de 10nF, dos resistencias variables de 160kΩ, y dos resistencias en retroalimentación de 205Ω y 100Ω. Esto último se debe a que usar resistencias de mayor

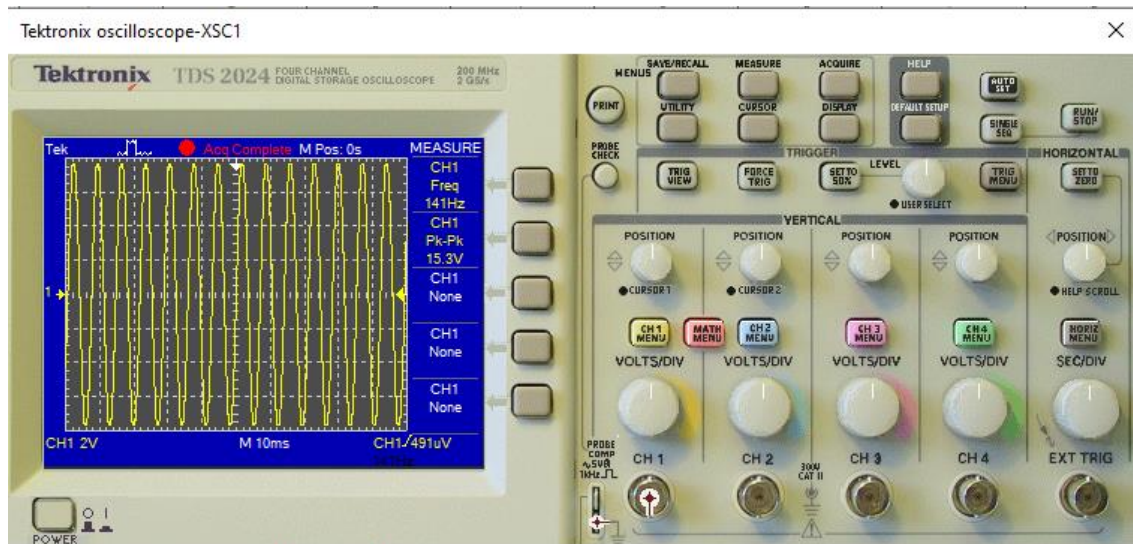
valor saturaba al amplificador, haciendo que la señal de salida apareciese recortada. Es necesario evitar esto ya que, una vez acoplado al rectificador, la onda que se busca es una que muestre al completo su forma senoidal. Igualmente, las $R1$ y $R2$ ($R1=R2=R$) de $160k\Omega$ determinan el valor de la frecuencia del oscilador, siendo $100Hz$ cuando están al 100% y $1kHz$ cuando están al 10% .



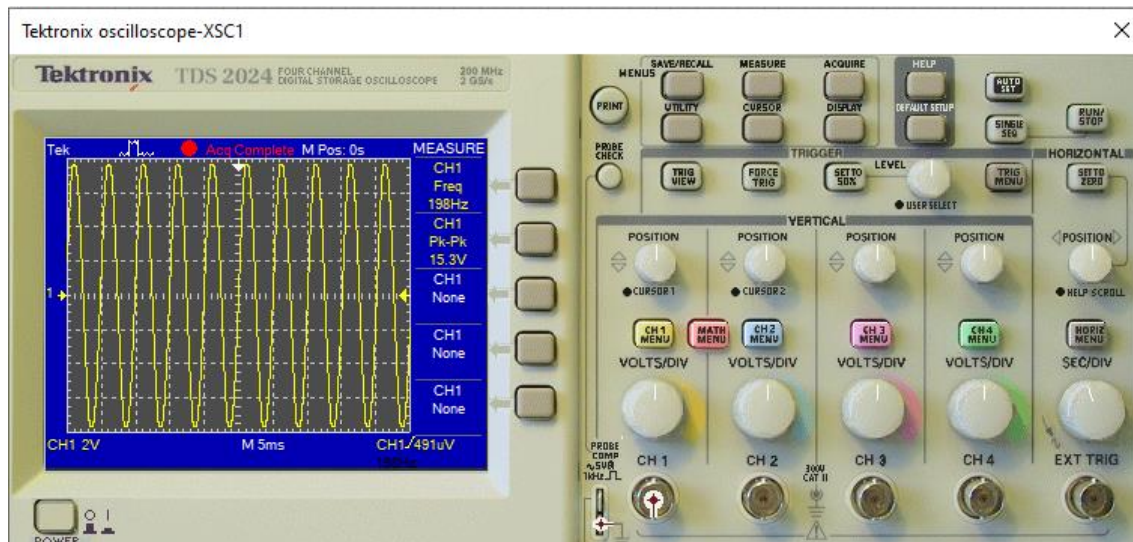
En la siguiente imagen se puede observar cuando R está al 100% . Obtenemos una oscilación de $15V_{pp}$, que se mantiene siempre al no haber cambios en el valor de RF o RA . Y la frecuencia obtenida es de $99.3Hz$, aproximado al esperado $100Hz$.



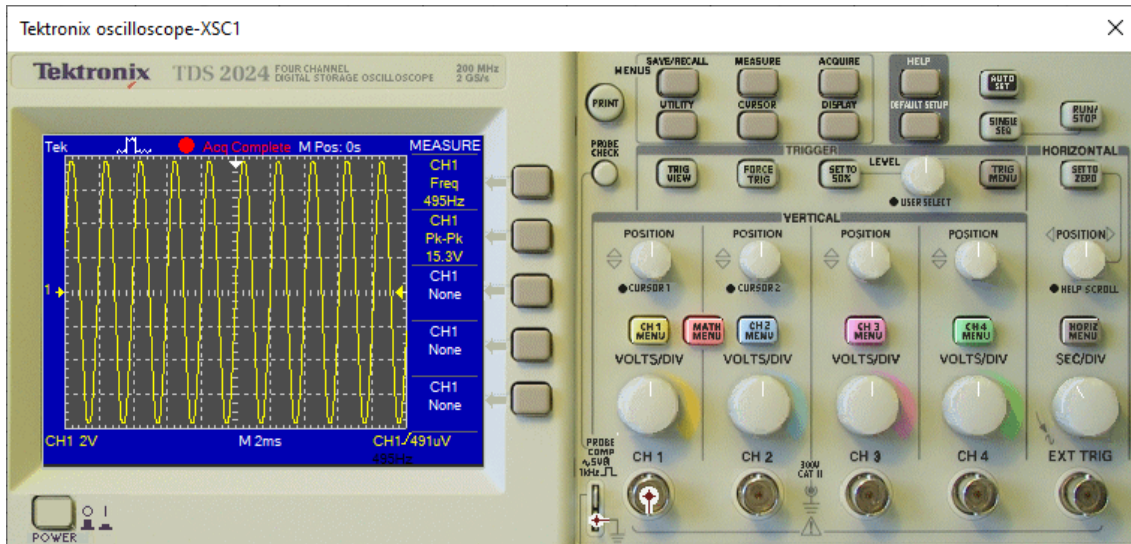
A continuación, el oscilador muestra un valor de 141Hz en su salida. Que ocurre cuando R está en su 80% ($R=R_1=R_2=128k\Omega$).



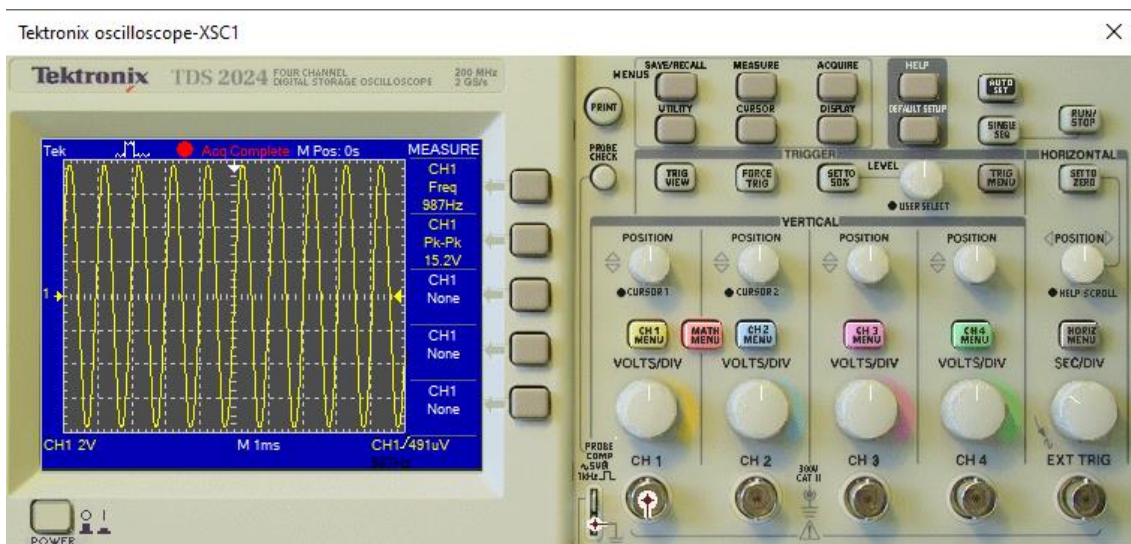
Del mismo modo, la frecuencia de oscilación " f_o " es igual a 198Hz, aproximadamente 200Hz, cuando R está en el 50% ($R=80k\Omega$).



Entonces, el oscilador presenta una $f_o=495Hz$, aproximado a los 500Hz (que se utilizarán para el modelo final), cuando $R=32k\Omega$ (20%).



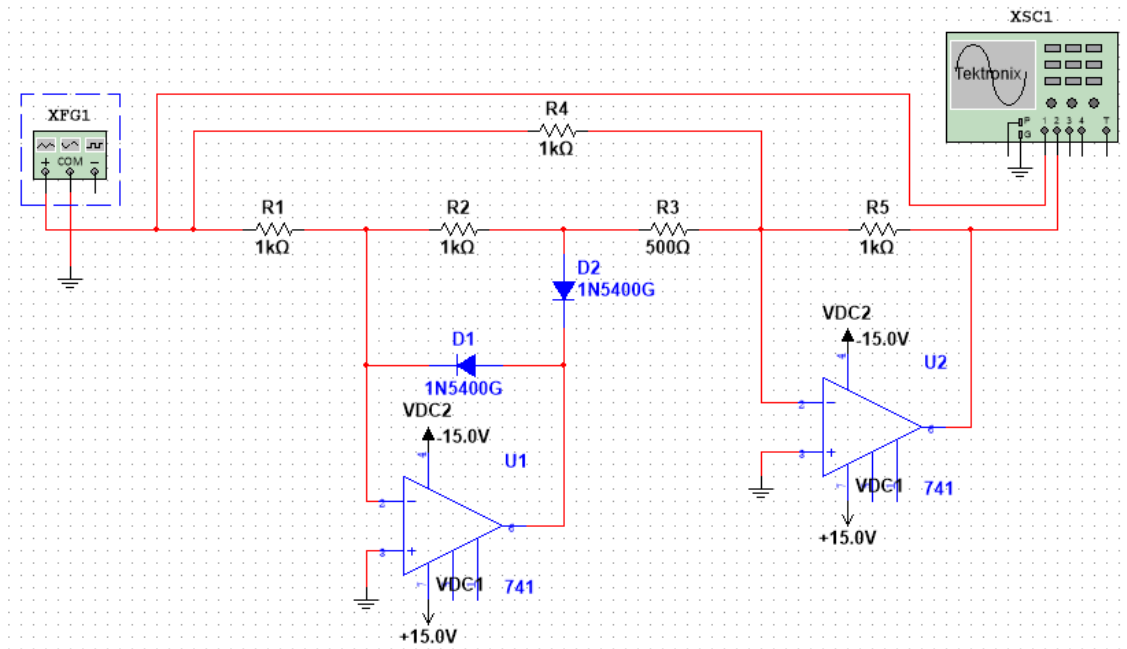
Finalmente, el oscilador presentará los 1kHz de frecuencia de oscilación cuando R esté a su 10% ($R=16k\Omega$), como se había definido previamente.



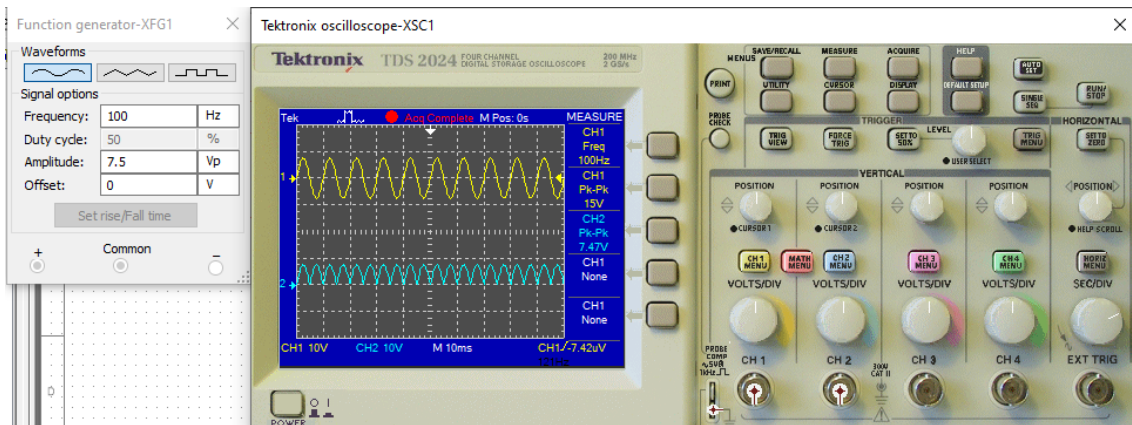
Etapas 2-Rectificador de precisión de onda completa

Diseño final obtenido:

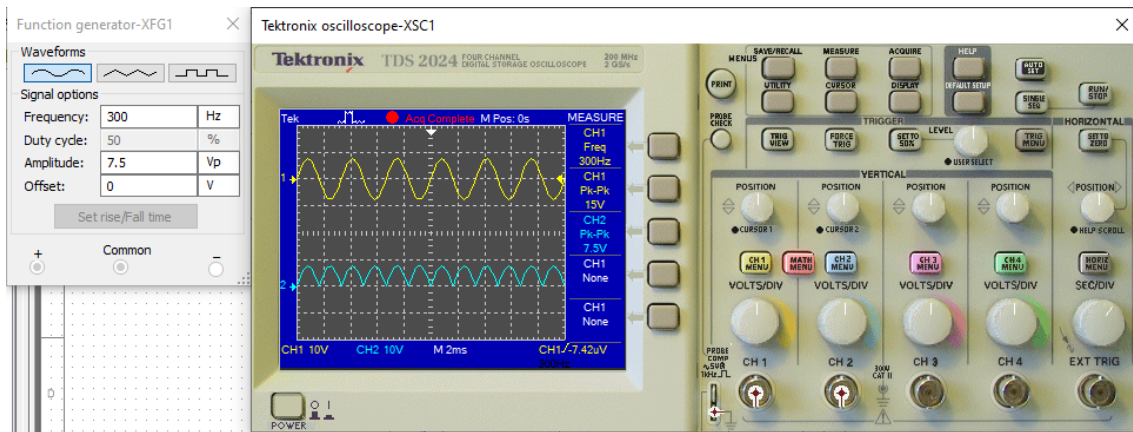
El diseño final presenta únicamente resistencias de $1k\Omega$, a excepción de R_3 , que cuenta con 500Ω . Adicionalmente, los diodos utilizados son el 1N5400 debido a que son capaces de manejar frecuencias de hasta 1MHz. Entonces se aplicó un voltaje de 15Vpp a diversas frecuencias.



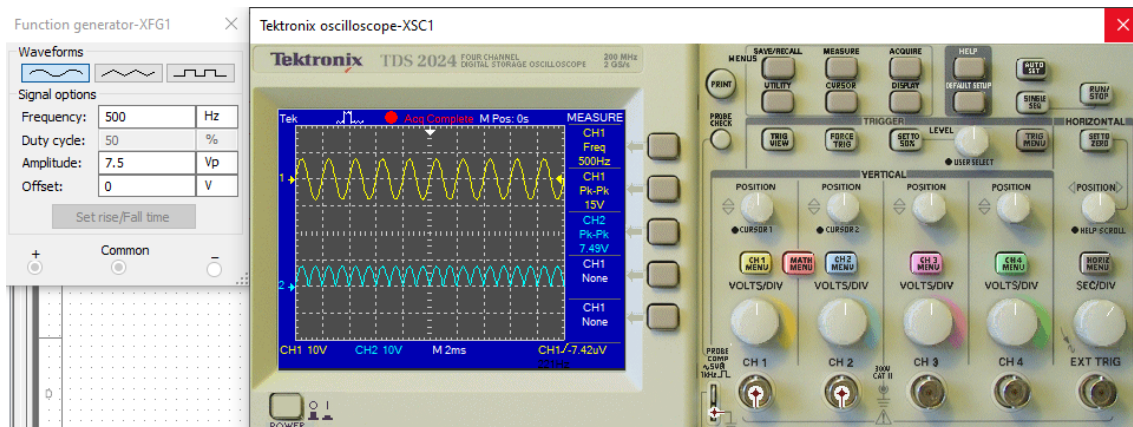
Al aplicarle 100Hz de frecuencia se observa que el circuito se mantiene en ese rango tanto en la entrada como en la salida. Sin embargo, la señal de salida presenta un Vpp de 7.47V, a diferencia del Vpp de 15V de entrada. Esto nos demuestra que el circuito es capaz de rectificar la onda sin presentar alteraciones a la fase manteniendo una ganancia de $|1|$.



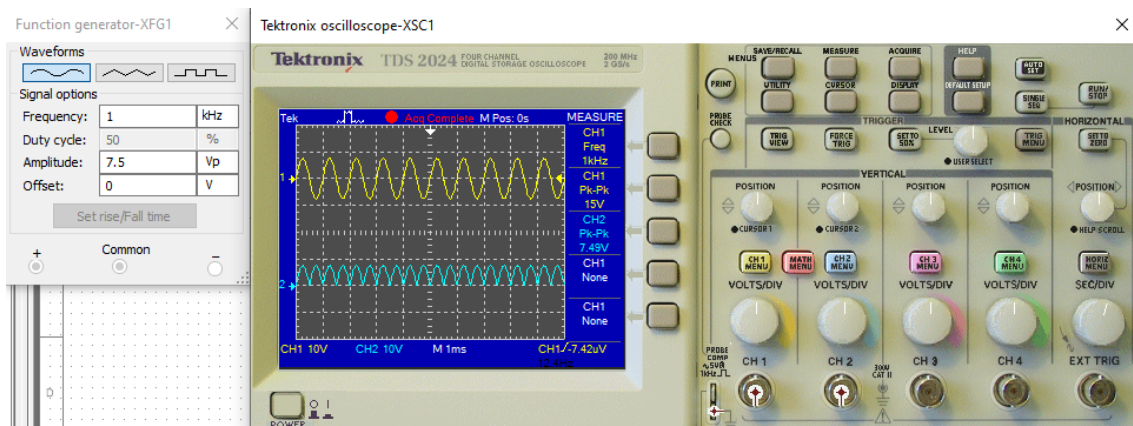
El funcionamiento a los 300Hz se mantiene acorde, manteniendo los 7.5Vpp en la salida esperados del sistema.



Igualmente, a los 500Hz no se cuenta con alteraciones en la señal más allá del rectificado, mostrando una señal de salida de 7.49Vpp con sólo semiciclos positivos dentro de dicha frecuencia.



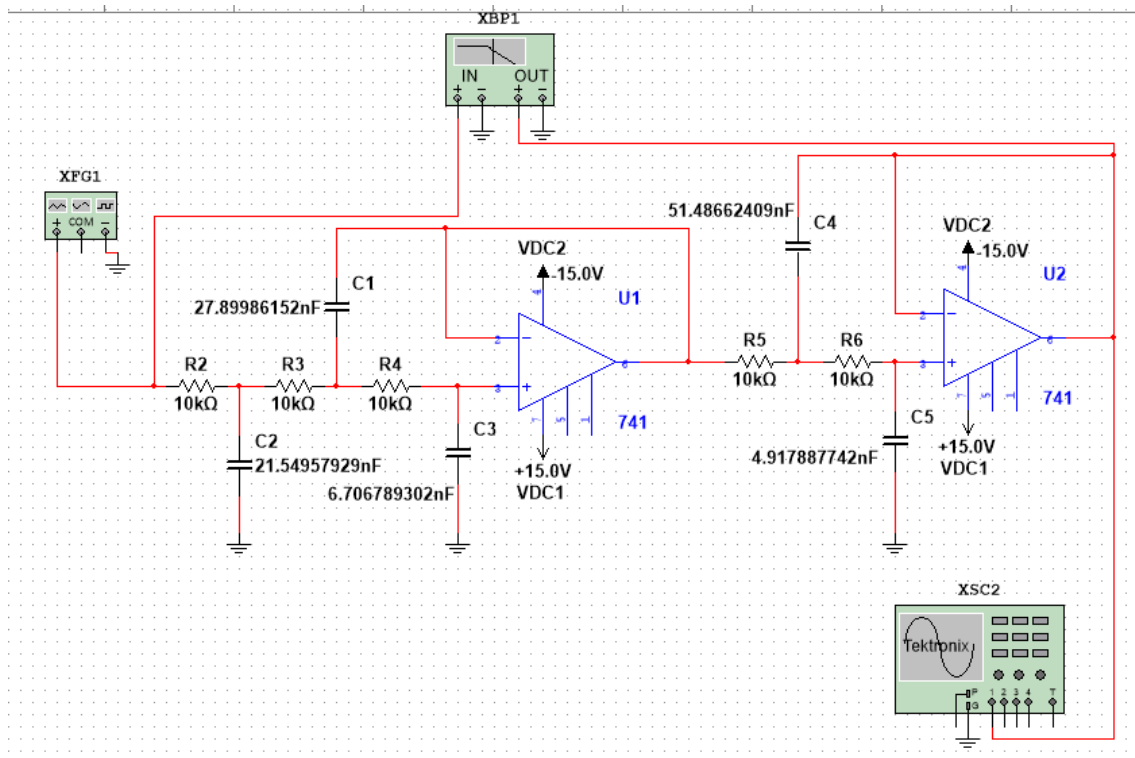
Finalmente, en 1kHz se siguen manteniendo los valores de salida esperados. Por ello es por lo que podemos decir que el circuito funciona dentro del rango desde 100Hz hasta 1kHz.



Etapas 3-Filtro Butterworth

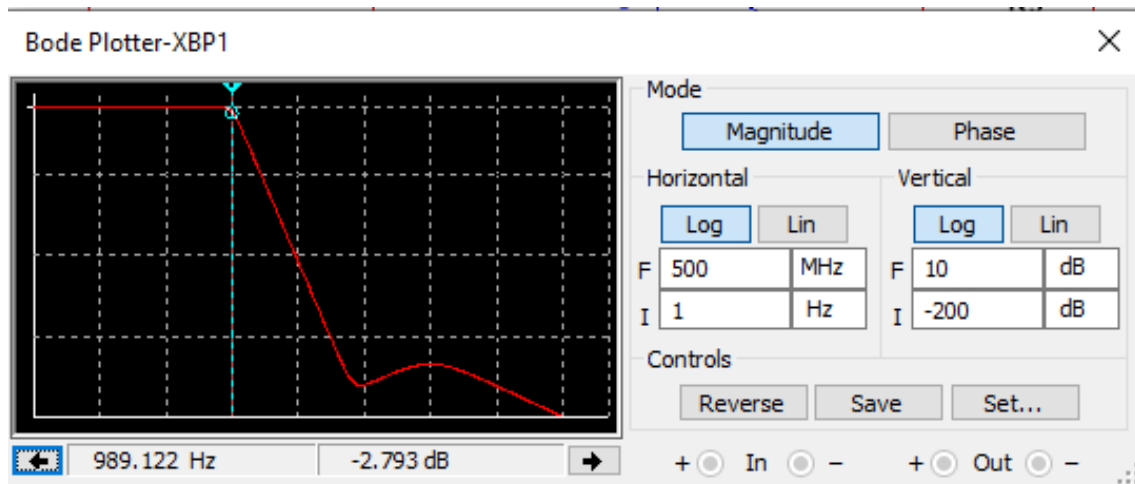
Diseño final obtenido:

El diseño obtenido se realizó de acuerdo con las tablas de coeficientes para el diseño de filtros Butterworth. Se asignó un valor de $10\text{k}\Omega$ para todas las resistencias. Entonces se obtuvo el valor de C para luego adquirir los valores de los demás capacitores.

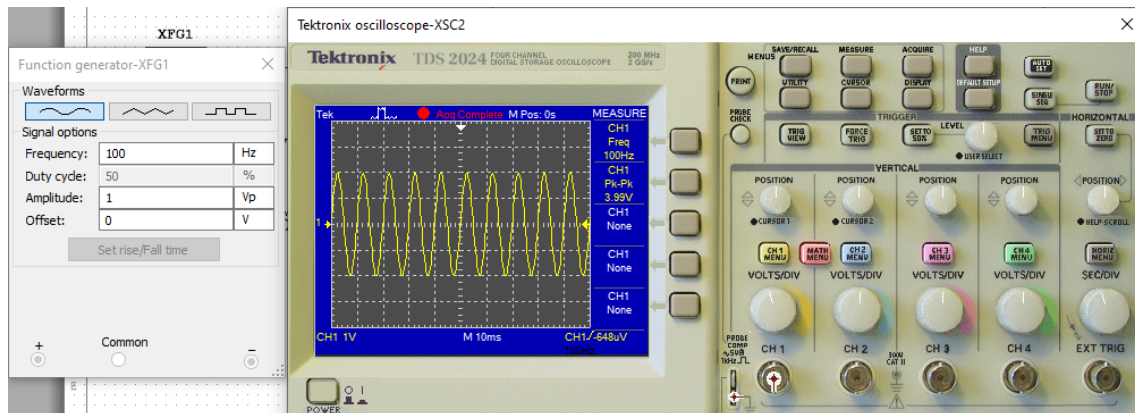


Gráfica de Bode:

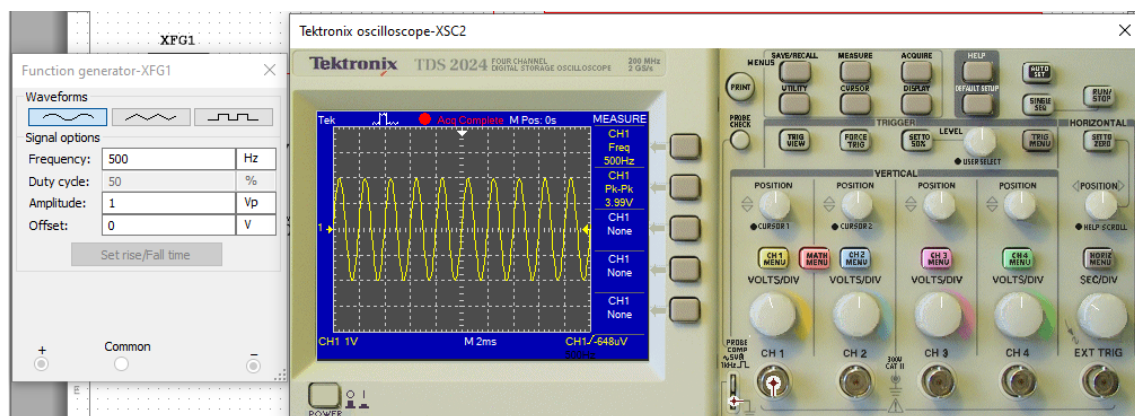
La gráfica de Bode donde se muestra que el circuito está ajustado para que en la frecuencia de corte de 1kHz se presente una magnitud de -3dB .



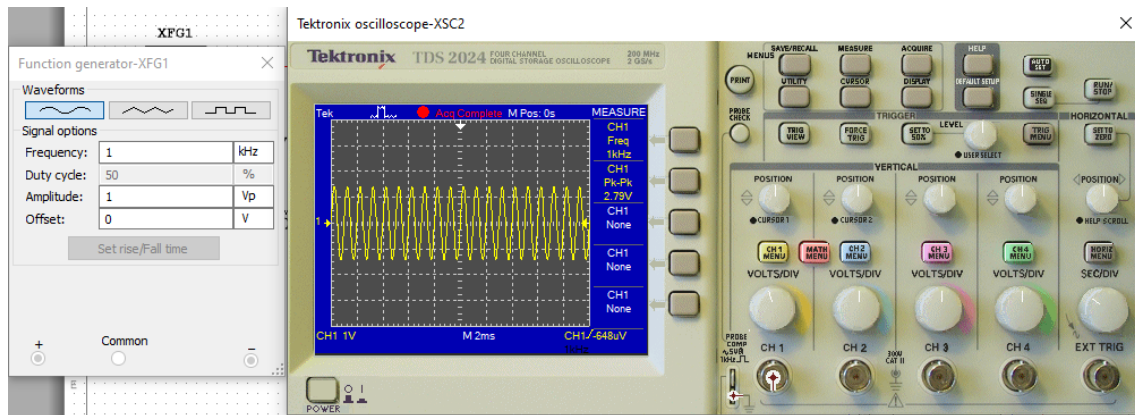
Podemos observar que a los 100Hz el sistema presenta una ganancia de 2, haciendo que la entrada de 2Vpp se convierta en una de 4Vpp.



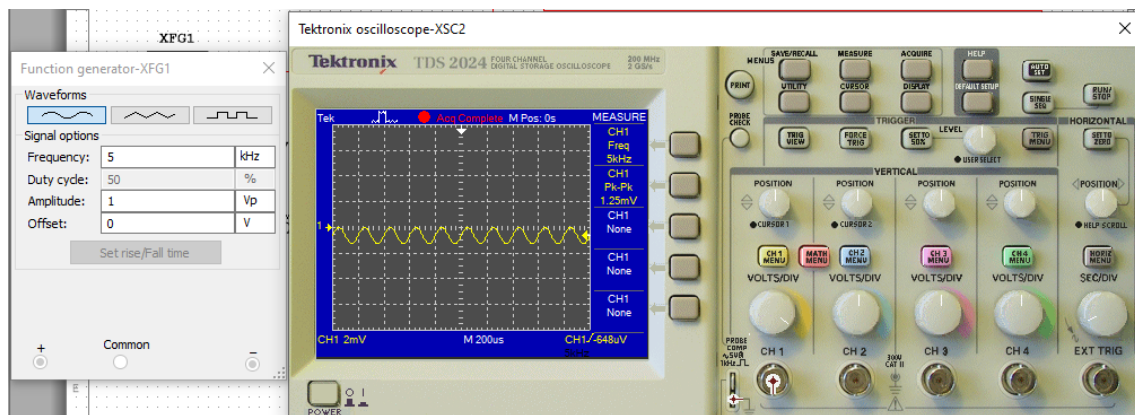
A los 500Hz se mantiene el funcionamiento normal del sistema, presentando la misma ganancia de 2 respecto a la frecuencia de 100Hz.



A la frecuencia de 1kHz se empieza a visualizar el efecto del filtro, haciendo que la ganancia de 2 se vea reducida. Por ello el valor de la salida pasó de 4Vpp a 2.8Vpp.



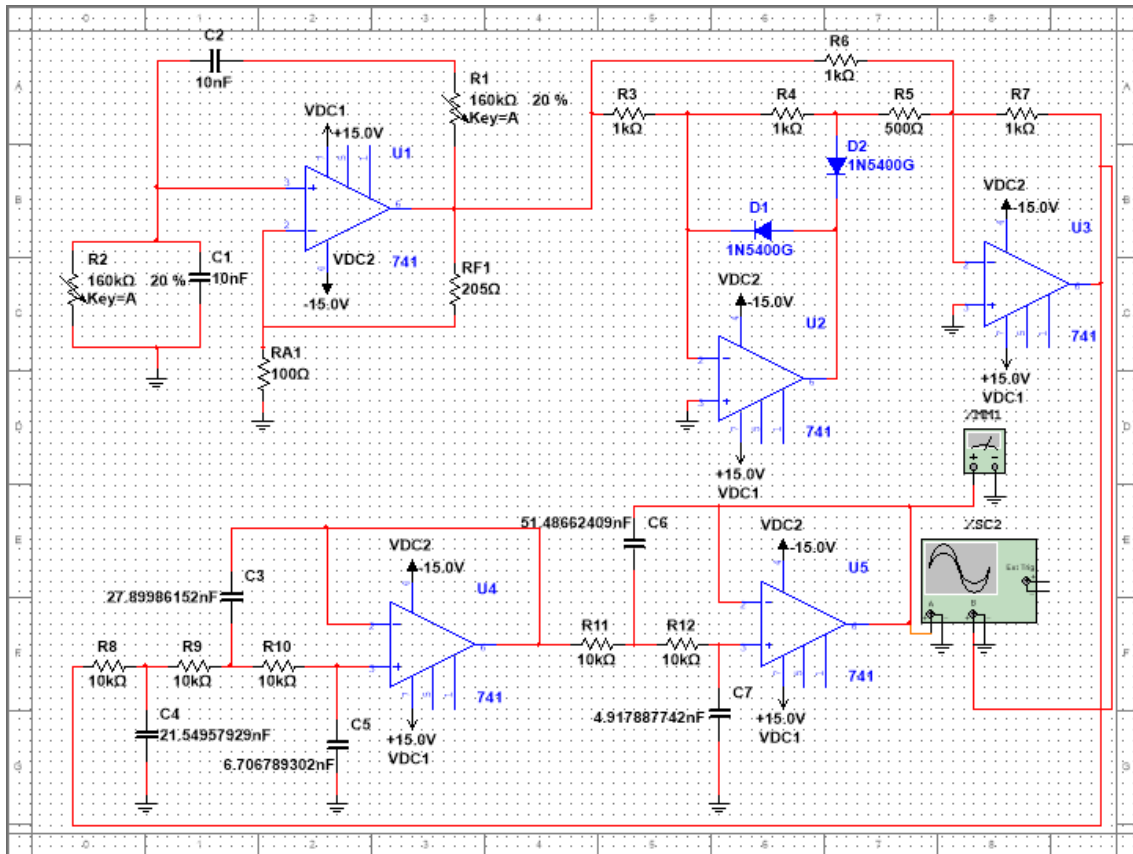
Finalmente, en frecuencias de 5kHz el filtro reduce significativamente la señal de salida. Haciendo que el circuito reduzca el voltaje de la entrada, pasando de 2Vpp hasta valores de 1.23mVpp. Siendo, por lo tanto, casi 2000 veces menor al valor original de la entrada.



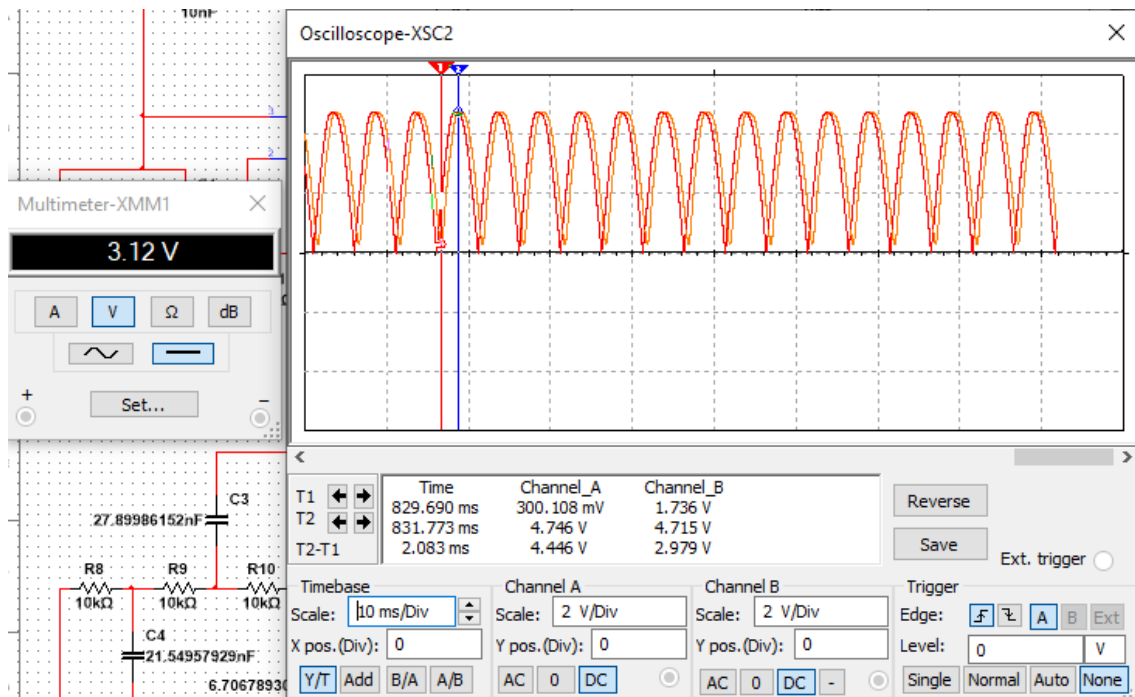
Etapas 4-Diseño de instrumentación

Diseño final obtenido:

En este tenemos a los mismos circuitos obtenidos anteriormente. Están distribuidos de modo que la salida del oscilador se dirige al rectificador como su entrada, entonces su salida se dirige a la entrada del filtro, y, finalmente, la salida del filtro se conecta a un multímetro y a un osciloscopio. El osciloscopio, en este caso, se conectó también a la entrada del filtro para visualizar el cambio que este realiza a la señal.



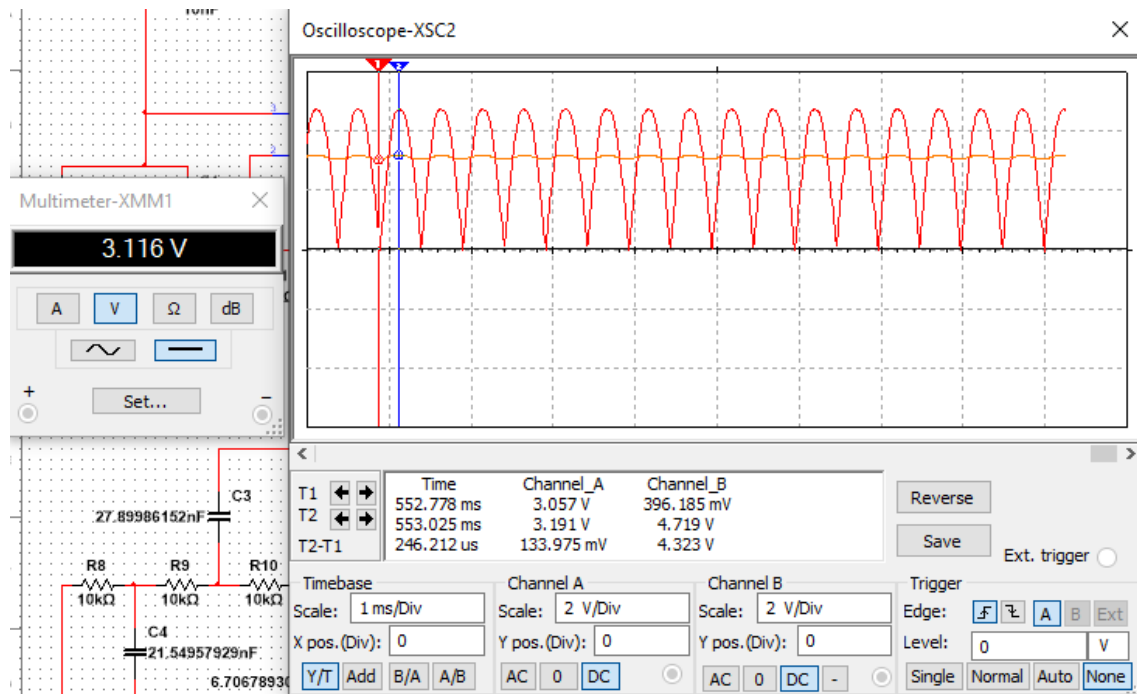
Vemos un cierto cambio en la fase debido a un pequeño aumento esperado por parte del rectificador y el filtro, donde el pico negativo de la señal se incrementa de 0V hasta un rango aproximado de 0.3V y 0.7V. Igualmente, se presenta un valor de 3.12V para la salida detectada en formato CC. Esto es cuando el oscilador está en una frecuencia de 100Hz.



A los 500Hz la salida en CC se mantiene dentro de valores de 3.12V. La salida del filtro empieza a adquirir otra apariencia debido a que el filtro le provee de cierta característica de rizo a su apariencia. Esta señal está suavizada y desfasada debido a las características del filtro. Éstas provocan que la señal no tenga el aspecto triangular común de muchas señales con rizo debido a capacitores.



A una señal de 1kHz el rizo de la salida se ve reducido significativamente, mostrando una señal casi plana respecto a frecuencias menores. Igualmente, el filtro demuestra un valor de 3.12V en CC aproximadamente. Por ello el filtro se puede considerar exitoso en sus características de CC y en el osciloscopio se puede visualizar los cambios que la acción de un mayor filtrado (un acercamiento mayor a la frecuencia de corte) permite realizar en la señal. Por ello el diseño de instrumentación, finalmente, causa lecturas relativamente constantes en CC con comportamientos acordes en el osciloscopio.



V. APLICACIONES EN INGENIERÍA

Oscilador senoidal

Cuando se habla como tal de un Oscilador Senoidal, realmente se habla de un concepto muy amplio, que en términos generales es un dispositivo o circuito electrónico que genera una señal de salida con una forma de onda sinusoidal, y ya, en nuestro caso el tipo de estos que se ha optado por usar ha sido el Puente de Wein, mismo que usa utiliza un circuito basado en componentes resistivos, capacitivos y amplificadores operacionales para generar la señal senoidal, dentro de estos las aplicaciones de las que se pueden hablar son extensas en extremos, sin embargo, uno muy simple pero que todos usamos casi todo el tiempo al manejar cualquier circuito en electrónica es el de la generación de una señal de referencia precisa y estable para la calibración y ajuste de instrumentos de medición.

En muchos sistemas de instrumentación electrónica, es necesario contar con una señal de referencia que sirva como punto de comparación para calibrar y ajustar la

precisión de los instrumentos de medición, como multímetros, osciloscopios, analizadores de espectro, entre otros, son en estos, donde se puede llegar a usar el puente de Wein de manera efectiva, proporcionando siempre una señal estable para el correcto ajuste de cualquier aparato.

Siguiendo con el ejemplo, de usar un oscilador senoidal, en específico un Puente de Wein para tener una señal estable que nos sirva para ajustar cualquier aparato, digamos en este caso un osciloscopio, podemos decir entonces, que para un osciloscopio queremos una salida estable de 2000Hz en onda senoidal, la cual nos sirva como referencia para que al encender el osciloscopio nos sirva para tener las configuraciones adecuadas para cualquier prueba posterior.

Inicialmente hay que proponer un circuito que nos sirva como base para hacer el análisis correspondiente, afortunadamente ya hay antecedentes de esto mismo en nuestro reporte, tan solo es cuestión de modificar los valores de los cálculos, esto para generar la frecuencia de oscilación de 2000Hz.

Entonces, retomando como tal nuestros análisis previos, el punto desde el cual vamos a partir, es como tal, es en el cual, en base a una capacitancia y una resistencia, se puede hacer el cálculo de la frecuencia resultante de salida, esto a través de la fórmula:

$$f_o = \frac{1}{2\pi CR}$$

Sin embargo, para los propósitos de estos cálculos, vamos a hacer el despeje correspondiente para que en base a la frecuencia que deseamos en la salida en nuestra onda senoidal, y un valor de capacitancia cualquiera, podamos hacer los cálculos de los valores de resistencia necesarios para el diagrama como tal, estos serán los valores de las resistencias que estarán en paralelo y en serie de los capacitores como tal.

Diseño de un oscilador senoidal de 2000Hz

↳ Esto lo haremos considerando $C_1 = C_2 = 10\text{ nF}$ y también que $R_1 = R_2$

$*f_0 = 2000\text{ Hz}$

$$f_0 = 2000\text{ Hz} = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_1 R_1 C_2 R_2}} = \frac{1}{2\pi C R}$$

$$2000\text{ Hz} = \frac{1}{2\pi (10\text{ nF}) R} \rightarrow \frac{1}{R} = (2000\text{ Hz})(2\pi)(10\text{ nF})$$

$$R = \frac{1}{(2000\text{ Hz})(2\pi)(10\text{ nF})}$$

$$R = R_1 = R_2 = 7957.74 \approx 8000\ \Omega$$

Todo lo mostrado previamente es referente a la retroalimentación positiva necesario del amplificador, sin embargo, en lo que se refiere a la retroalimentación negativa del amplificador, y los valores de las resistencias que encontramos en estas, lo que hemos de hacer es un análisis de las raíces de la función de transferencia, donde asumimos un valor de referencia para una resistencia y en base a esta hacemos el calcula de la segunda resistencia necesaria, como se muestra a continuación:

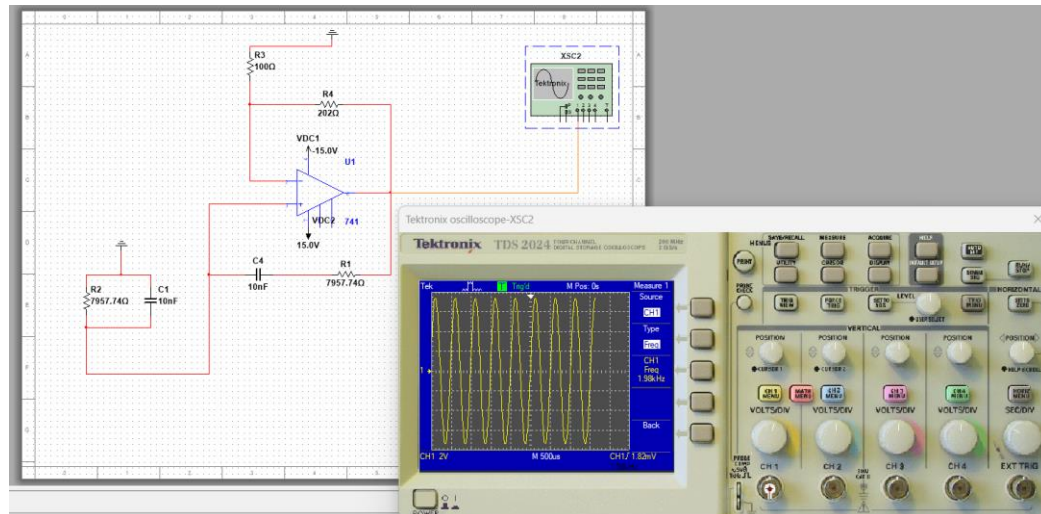
Se hace el análisis de las raíces de la función de transferencia donde:

$$\frac{R_F}{2R_A} - 1 > 0 \Rightarrow R_F > 2R_A$$

Le damos el valor de $100\ \Omega$ a R_A , dando así que $R_F > 2(100\ \Omega)$

$$\hookrightarrow R_F = 205\ \Omega$$

Teniendo finalmente la siguiente simulación con la onda senoidal con frecuencia de 1.98kHz que son casi los 2000Hz que buscábamos.



Rectificador de precisión de onda completa

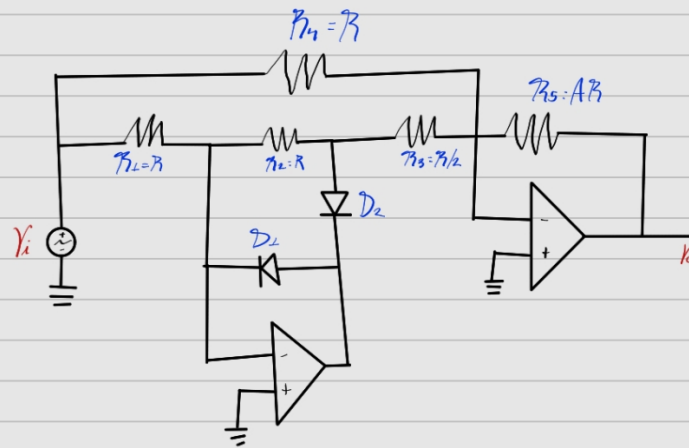
Cuando hablamos como tal de un rectificado de precisión de onda completa, decimos que esto es un circuito utilizado para convertir una señal de corriente alterna (CA) en una señal de corriente continua (CC) de forma más precisa y eficiente que los rectificadores convencionales de media onda.

En lo que a aplicaciones se refiere, cualquiera que involucre la conversión de una señal de entrada en alterna a una de corriente directa es lo más claro, tomemos como ejemplo para los propósitos de explorar las aplicaciones, los sistemas de iluminación LED, los cuales, incluso llegan a funcionar tan solo conectándolos directamente a la luz, para este tipo de circuitos, es posible usar un rectificador de precisión de onda completa para poder hacer que la señal del entrada, sea posible usarse en cualquier LED con la configuración adecuada.

Tomemos como ejemplo una cinta de LED de 5mm, estas tienden a necesitar un voltaje de entrada en corriente directa de alrededor de 12V, en este caso usando un simulador, hemos visto que usando un rectificador de precisión de onda completa ha sido posible, pasar una señal simulando aquella de entrada de cualquier toma de luz, en lo que viene siendo una señal de corriente directa de alrededor de los 14V que es más que suficiente para alimentar cualquier circuito LED.

Realmente aquí la manera en que hemos hecho los cálculos correspondientes es partir de los que se han hecho previamente, partiendo del circuito propuesto del cual ya se había hecho el análisis correspondiente, cambiando los valores de las resistencias como tal, a manera de que permitieran rectificar la onda de entrada a un voltaje en corriente directa que permitiera una salida del rango requerido por los LEDS, mismo para lo que hemos propuesto un circuito con resistencias de 100k ohms y la consiguiente resistencia de 50k ohms.

Este es el circuito del cual partimos:



Es importante notar que se siguen las siguientes condiciones:

$$A = 1 \quad R_1 = R_2 = R_4 = R \quad R_3 = R/2$$

$$R_5 = AR$$

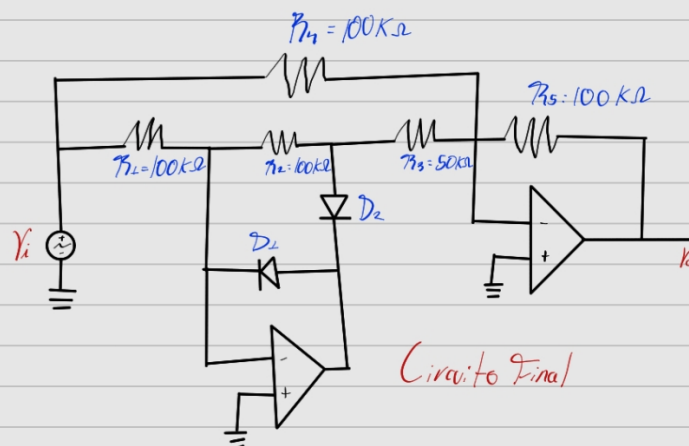
$$R_5 = (1)(R)$$

$$R_5 = R$$

$$R = 100 \text{ K}\Omega$$

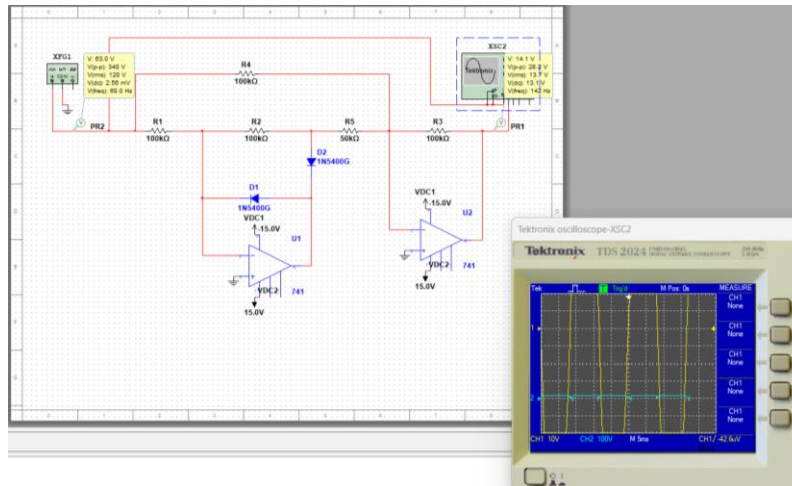
$$R_3 = \frac{100 \text{ K}\Omega}{2}$$

$$R_3 = 50 \text{ K}\Omega$$



Circuito Final

Finalmente hemos implementado esto en un simulador como se ve a continuación.



Filtro analógico

Un filtro analógico, es en pocos términos, un dispositivo electrónico que se utiliza para seleccionar o eliminar ciertas frecuencias de una señal eléctrica, dentro de estos hay grandes ramificaciones de los que llegan a existir, entre los que tenemos al que hemos usado, que es el Filtro paso bajo Butterworth de 5º orden, que es un tipo de filtro analógico que atenúa gradualmente las frecuencias más altas y permite el paso de las frecuencias más bajas. Su respuesta en frecuencia muestra una caída suave a medida que la frecuencia se acerca a la frecuencia de corte. Este tipo de filtro es utilizado en diversas aplicaciones donde se requiere una atenuación gradual y una respuesta en frecuencia plana en la región de paso.

Un claro uso de este filtro es para un sistema de altavoces o auriculares de alta fidelidad, el filtro paso bajo Butterworth de 5º orden se coloca en la etapa de salida del amplificador de audio. Su función es eliminar las frecuencias que están por encima del rango audible, que generalmente está entre 20 Hz y 20 kHz, para evitar la reproducción de señales no deseadas o distorsionadas que puedan afectar la calidad del sonido.

Para esto, solo hemos aplicado los principios mostrados previamente, reemplazando los valores de la frecuencia de corte, esta vez a los 20000Hz, y hemos desarrollado los cálculos como se muestra a continuación:

$$C = \frac{1}{2\pi f_p R}$$

Suponer $R = 10 \text{ K}\Omega$ * $f_p = f_c = 20000 \text{ Hz}$

$$\frac{1}{2\pi (20000 \text{ Hz}) (10 \times 10^3 \Omega)} = 7.9577 \times 10^{-10} \text{ s}$$

$$\frac{1}{0.79577 \text{ nF}}$$

E-tapa 1

$$\frac{C_1}{C} = 1.753$$

$$\frac{C_2}{C} = 1.354$$

$$\frac{C_3}{C} = 0.4214$$

$$C_1 = (1.753)(0.7958 \text{ nF}) \quad C_2 = (1.354)(0.7958 \text{ nF}) \quad C_3 = (0.4214)(0.7958 \text{ nF})$$

$$C_1 = 1.395 \text{ nF} \quad C_2 = 1.0775 \text{ nF} \quad C_3 = 0.3353 \text{ nF}$$

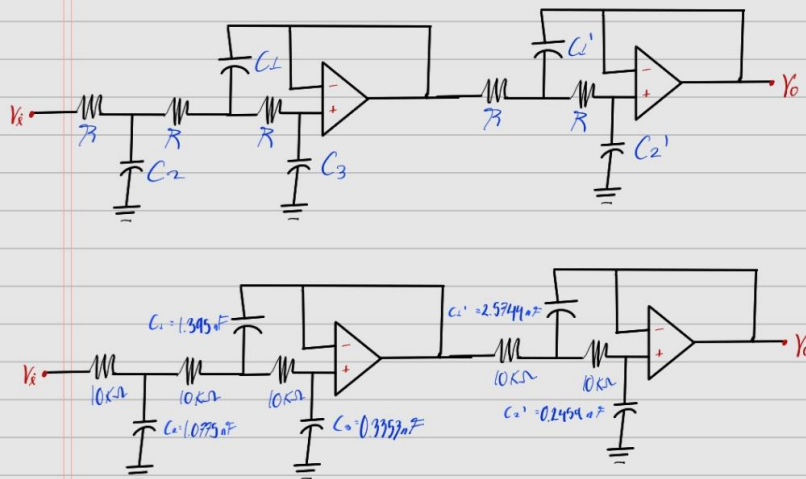
E-tapa 2

$$\frac{C_1'}{C} = 3.235$$

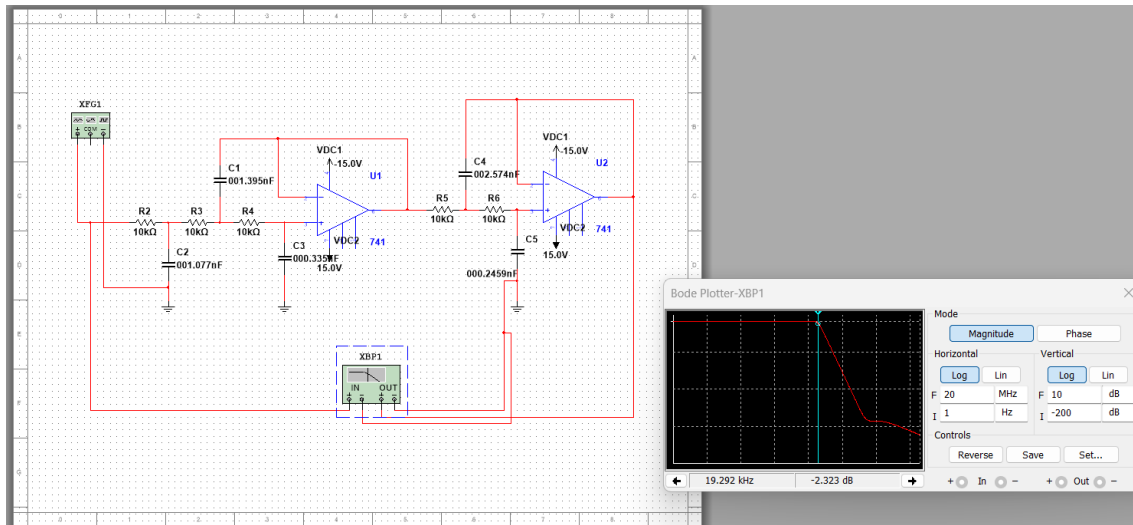
$$\frac{C_2'}{C} = 0.3090$$

$$C_1' = (3.235)(0.79577 \text{ nF}) \quad C_2' = (0.3090)(0.79577 \text{ nF})$$

$$C_1' = 2.5744 \text{ nF} \quad C_2' = 0.2464 \text{ nF}$$



Concluyendo como tal con la simulación del circuito que hemos creado a través de los cálculos, culminando en una correcta implementación de lo deseado, un filtro que nos serviría para optimizar cualquier amplificador musical.



CONCLUSIONES

Como se pudo observar a través de todo el documento: los amplificadores operacionales tienen diversas formas de conjuntarse para formar un arreglo de diversos circuitos que funcionen para un propósito específico para el que se han diseñado. En este caso la conjunción de un sistema de oscilador senoidal, rectificador de precisión, y filtro analógico Butterworth permitieron el obtener un dispositivo capaz de generar una señal en CD de valor fijo a distintas frecuencias.

Al final el diseño fue hecho de un modo que se considera satisfactorio para los parámetros de diseño propuestos y que funciona en conjunto de forma efectiva. Con él se observa el potencial de los diversos circuitos con amplificadores operacionales, lineales o no lineales, para poder generar distintas configuraciones según el propósito requerido y las capacidades de los propios amplificadores.

BIBLIOGRAFÍA

1. *Amplificador operacional*. (2022, febrero 25). Industrias GSL.
<https://industriasgsl.com/blogs/automatizacion/amplificador-operacional>
2. Fiore, J. M. (2022, octubre 30). *7.2: Rectificadores de precisión*. LibreTexts Español; Libretexts.
[https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Amplificadores_Operacionales_y_Circuitos_Integrados_Lineales_-_Teor%C3%ADa_y_Aplicaci%C3%B3n_\(Fiore\)/07%3A_Circuitos_no_lineales/7.02%3A_A_Rectificadores_de_precisi%C3%B3n](https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Amplificadores_Operacionales_y_Circuitos_Integrados_Lineales_-_Teor%C3%ADa_y_Aplicaci%C3%B3n_(Fiore)/07%3A_Circuitos_no_lineales/7.02%3A_A_Rectificadores_de_precisi%C3%B3n)
3. Franco, S. (2005). *Diseño con amplificadores operacionales y circuitos integrados analógicos* (3a.ed.). México: McGraw-Hill.
4. Miyara, F. (2004, abril). *FILTROS ACTIVOS*. Edu.ar. Recuperado el 5 de junio de 2023, de <https://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/filtros-t.pdf>
5. Miyara, F. (2004). *OSCILADORES SENOIDALES*. Edu.ar. Recuperado el 29 de mayo de 2023, de <https://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/oscilad.pdf>
6. Vishay General Semiconductor. (s/f). *1N5400, 1N5401, 1N5402, 1N5403, 1N5404, 1N5405, 1N5406, 1N5407, 1N5408*. Vishay.com. Recuperado el 4 de junio de 2023, de <https://www.vishay.com/docs/88516/1n5400.pdf>
7. Led, B. (2022). *Guía para elegir una tira de LED – I parte*. B-LED - Blog.
<https://www.barcelonaed.com/blog/informacion-led/guia-para-elegir-una-tira-de-led-i-parte/>
8. ¿Qué es el Voltaje Pico a Pico? (s. f.).
<http://www.learningaboutelectronics.com/Articulos/Voltaje-pico-a-pico.php>