

spanish



INSTITUTO TECNOLÓGICO  
DE  
BUENOS AIRES

INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
22.01 - TEORÍA DE CIRCUITOS

---

## TRABAJO PRÁCTICO N°1

---

*Grupo 4:*  
Álvarez, Lisandro  
Fogg, Matias  
Diaz, Ian  
Delgado, Milton  
Dieguez, Manuel  
Oh, Victor

*Legajos:*  
57771  
56252  
57515  
56451  
56273  
56679

APROBADO EN FECHA: .....

ENTREGADO EL 19 DE AGOSTO DE 2019

## 1. Ejercicio I

### 1.1. Análisis del circuito

En este ejercicio se busca crear un filtro Notch a partir del circuito 1.

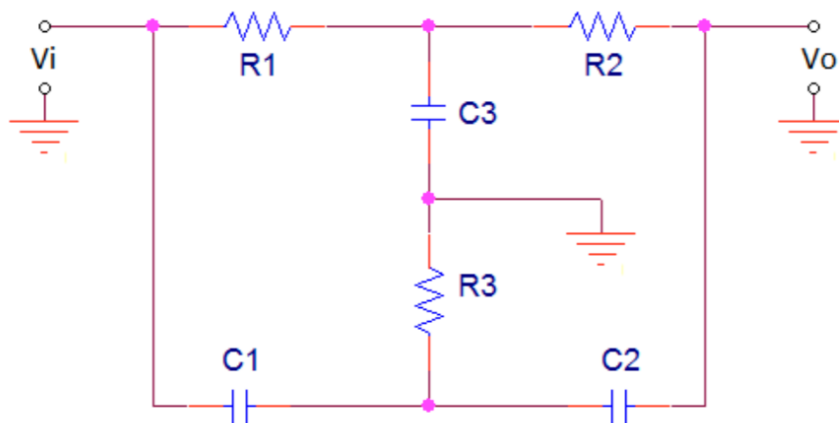


Figura 1: Filtro Notch Pasivo

En una primera instancia a través del uso de la herramienta MatLab se logró conseguir la función transferencia resolviendo un sistema de ecuaciones; luego se transformaron ambos circuitos tipo T en circuitos tipo PI mediante el teorema de Kennelly y se consiguió el circuito de la figura ??.



Figura 2: Mismo circuito con el teorema de Kennelly aplicado

Se notó que  $Z_2$  y  $Z_6$  se encontraban en paralelo, al igual que  $Z_3$  con  $Z_5$  y  $Z_1$  con  $Z_4$ , por lo que se calcularon las impedancias equivalentes y se obtuvo el circuito de la figura ??.

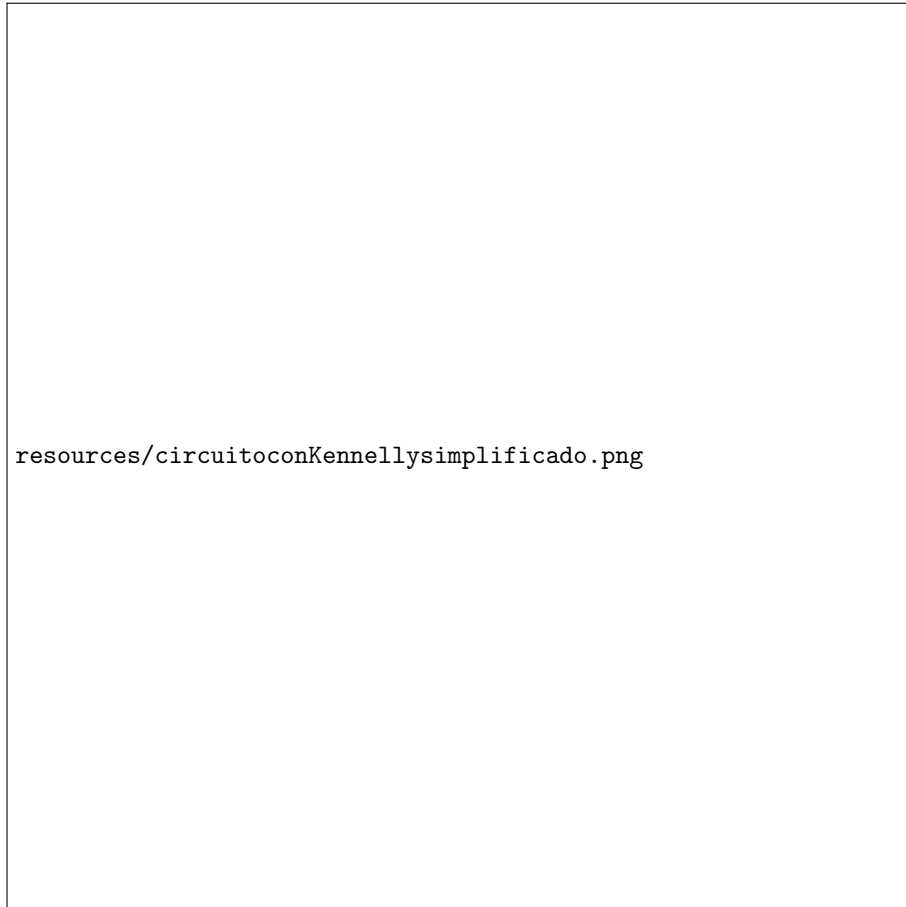


Figura 3: Circuito con el teorema de Kennelly aplicado (simplificado)

Con los valores:

$$Z_{p1} = Z_{p2} = \frac{C_3 R_3 s + 1}{C_3 s} ; Z_{p3} = \frac{4 R_3 (C_3 R_3 s + 1)}{C_3^2 R_3^2 s^2 + 1} \quad (1)$$

Una vez que se llegó a este punto fue más fácil encontrar la función transferencia y se obtuvo lo detallado en la ecuación 2. Cabe aclarar que se utilizó la ayuda propuesta por la cátedra y se consideró que  $R_1 = R_2 = 2 R_3$  y  $2 C_1 = 2 C_2 = C_3$ .

$$H(s) = \frac{\left(\frac{s}{1/C_3 R_3}\right)^2 + 1}{\left(\frac{s}{1/C_3 R_3}\right)^2 + 4 \frac{s}{C_3 R_3} + 1} \quad (2)$$

.

Como se puede observar, la función transferencia describe un filtro Notch. Su frecuencia de corte es  $\omega_0$  y su expresión se muestra en la ecuación 3

$$W_0 = \frac{1}{C_3 R_3} \quad (3)$$

La frecuencia de corte pedida es  $10,8kHz$ , obtenemos así la relación que se puede ver en la ecuación 4.

$$R_3 = \frac{1}{C_3 2\pi 10,8k} \quad (4)$$

Es posible fijar un valor para el capacitor y así obtener valores posibles para las resistencias. Teniendo en cuenta los valores comerciales disponibles en el pañol, se tomó  $C_3 = 10nF$  y se obtuvo  $R_3 = 1,47k\Omega$ . Al no haber disponibilidad de una resistencia fija de ese valor, se utilizó una  $R_3 = 1,5k\Omega$ . Tampoco se encontraron capacitores de  $C = 5nF$  por lo que se utilizaron tanto  $C_1 = 4,7nF$  como  $C_2 = 4,7nF$ . Estos valores se cargaron en LTSpice y se obtuvo el Bode de la figura 4.

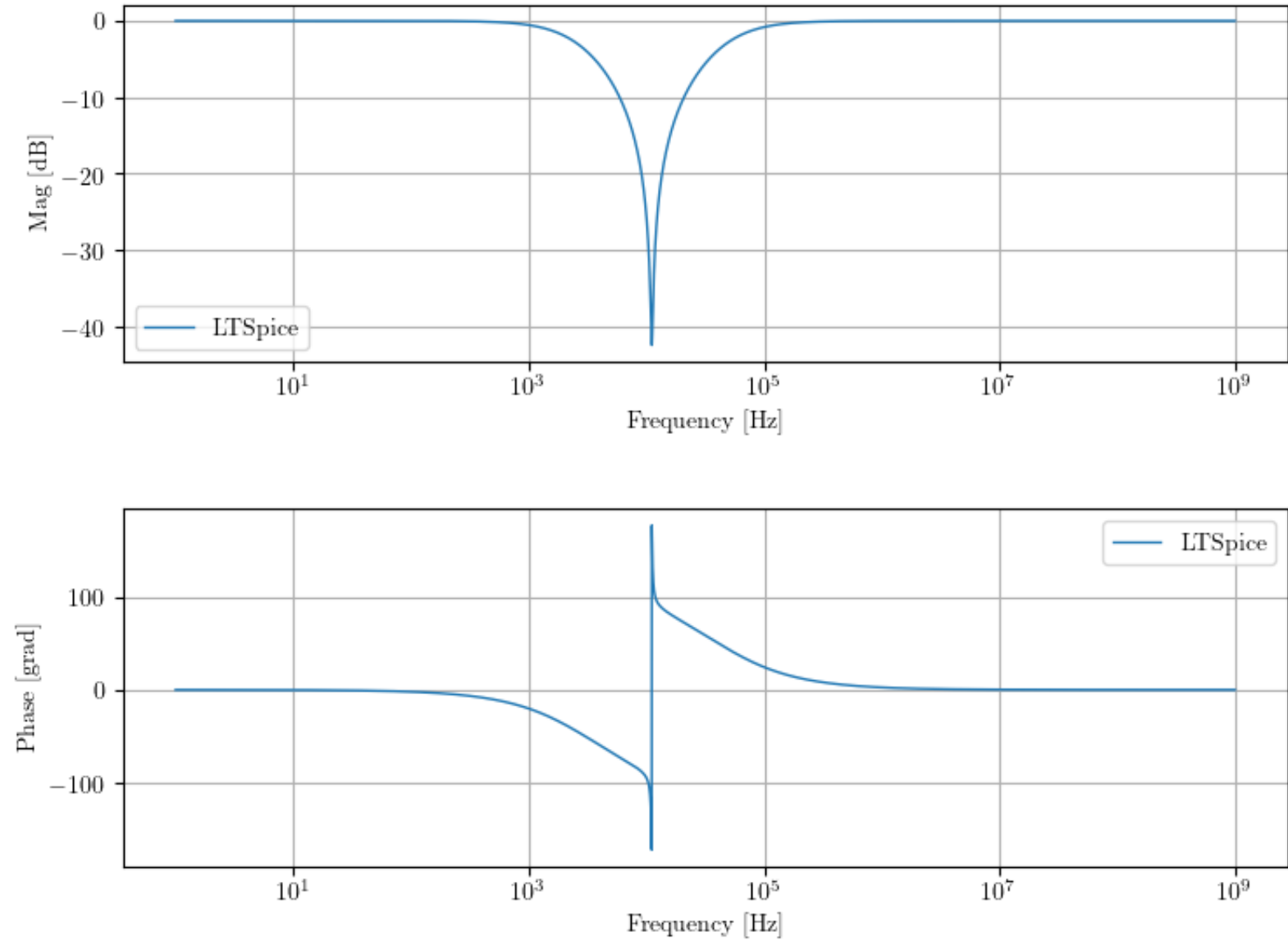


Figura 4: Circuito con los componentes definidos

Se puede observar que la respuesta en frecuencia del circuito es la de un filtro Notch y que la frecuencia de corte se ubica en  $11,1kHz$ . Si bien la frecuencia de corte pedida es  $10,8kHz$  nos vemos obligados a tomar  $11,1kHz$  por motivos de disponibilidad de componentes en el pañol. Luego las futuras mediciones se comparan respecto al Bode obtenido en la figura 4.

Para obtener la respuesta impulsiva  $h(t)$ , se utilizó la antitransformada de Laplace conseguida mediante el uso de MatLab. Esta resultó ser la que se muestra en la ecuación 5 y se puede ver graficada en la figura 5.

$$y(t) = \delta(t) - \frac{4 e^{-\frac{2t}{C3 R3}}}{C3 R3} \left( \cosh\left(\frac{\sqrt{3} t}{C3 R3}\right) - \frac{2 \sqrt{3} \sinh\left(\frac{\sqrt{3} t}{C3 R3}\right)}{3} \right) \quad (5)$$

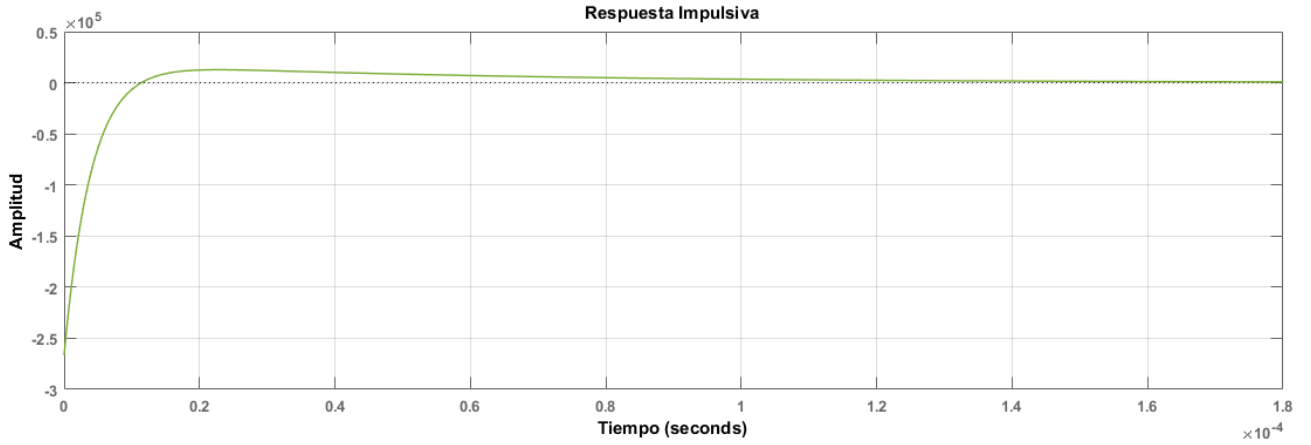


Figura 5: Respuesta impulsiva

Por último, para poder terminar de caracterizar el sistema hace falta el diagrama de polos y ceros. Los polos y ceros se obtienen fácilmente si reordenamos la función transferencia como se ve a continuación:

$$H(S) = \frac{(S - S_1)(S - S_2)}{(S - P_1)(S - P_2)S}$$

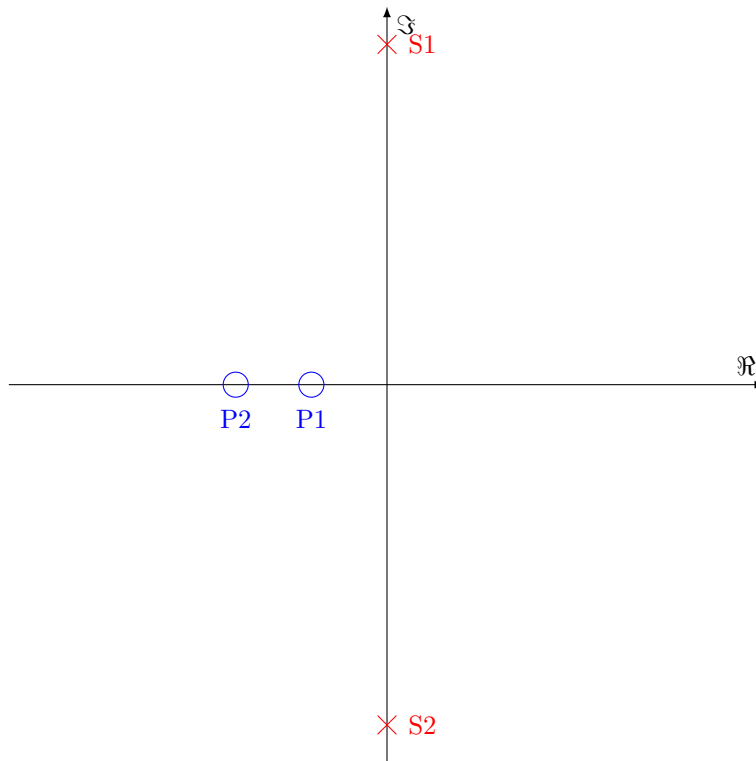
Hay dos ceros:

$$S_1 = 69743,35691j \quad S_2 = -69743,35691j$$

Hay dos polos:

$$P_1 = -18687,67616 \quad P_2 = -260285,7515$$

Como se puede ver, ambos ceros se encuentran sobre el eje imaginario y ambos polos en el eje real del semiplano negativo.



## 1.2. Respuesta en frecuencia

Con los valores de los componentes calculados anteriormente, se diseñó una placa utilizando el software Altium Designer. Su diseño se puede ver en la figura 6.



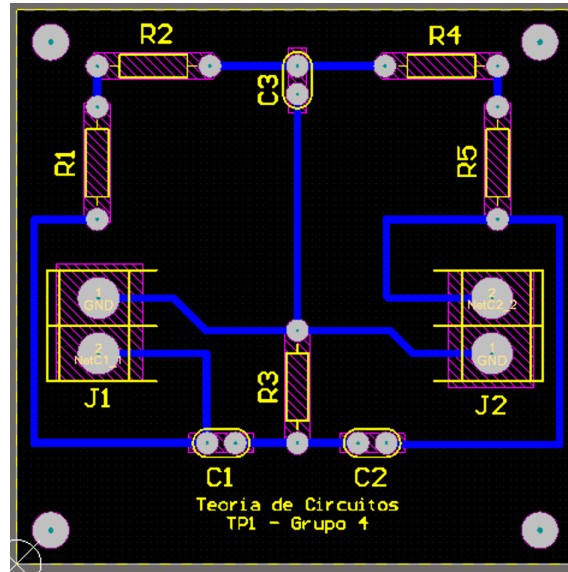


Figura 6: Placa diseñada en Altium

Nótese que se tuvieron que utilizar dos resistencias en serie de  $1,5k\Omega$  para obtener una resistencia de  $3k\Omega$ .

Para medir la respuesta en frecuencia se utilizó un generador de señales y se alimentó al circuito con una señal senoidal en  $V_{in}$  y se midió  $V_{out}$  con la ayuda de un osciloscopio.

En primer lugar, se excitó el circuito con una señal senoidal de  $10 V_{pp}$  a una frecuencia de  $11,1kHz$ , que es la frecuencia de corte buscada con nuestros componentes. Se esperaba ver una señal totalmente atenuada: la señal de entrada está en la frecuencia de corte. Se realizó un barrido rápido en las frecuencias cercanas a  $11,1kHz$  y notamos que nuestro filtro tenía la mayor atenuación en  $11,3kHz$ . Los resultados fueron los siguientes:  $V_{in} = 9,73V$  y  $V_{out} = 0,038V$  lo que da una atenuación de  $20 \log\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right) = -48,16db$ , representando la salida tan solo el 0,39 % de la entrada.

Puede considerarse que la señal de entrada fue totalmente atenuada a esta frecuencia. La susceptibilidad del osciloscopio al ruido explica por qué  $V_{out}$  no es cero en la frecuencia de corte del Notch. Lo que se está midiendo en esta situación es prácticamente ruido ya que este tiende a volverse relevante al ser tan pequeña la amplitud de la señal.

Si se considera la frecuencia de corte que se planeaba obtener con los componentes elegidos en comparación con la que se obtuvo, el filtro fabricado tiene un error de 1,82 %. Y si se compara con los  $10,8 kHz$  que se buscaban en un comienzo, este error es de un 4,63 %.

Se prosiguió a realizar el Bode completo. Para esto se mantuvo una senoide de  $10 V_{pp}$  pico a pico y se fue modificando su frecuencia. Sabiendo de antemano cómo es la curva que describe el Bode, se tomaron más puntos en las áreas más características del Bode, como lo es la cercana a la frecuencia de corte. Los resultados del Bode completo se pueden ver en la figura 7.

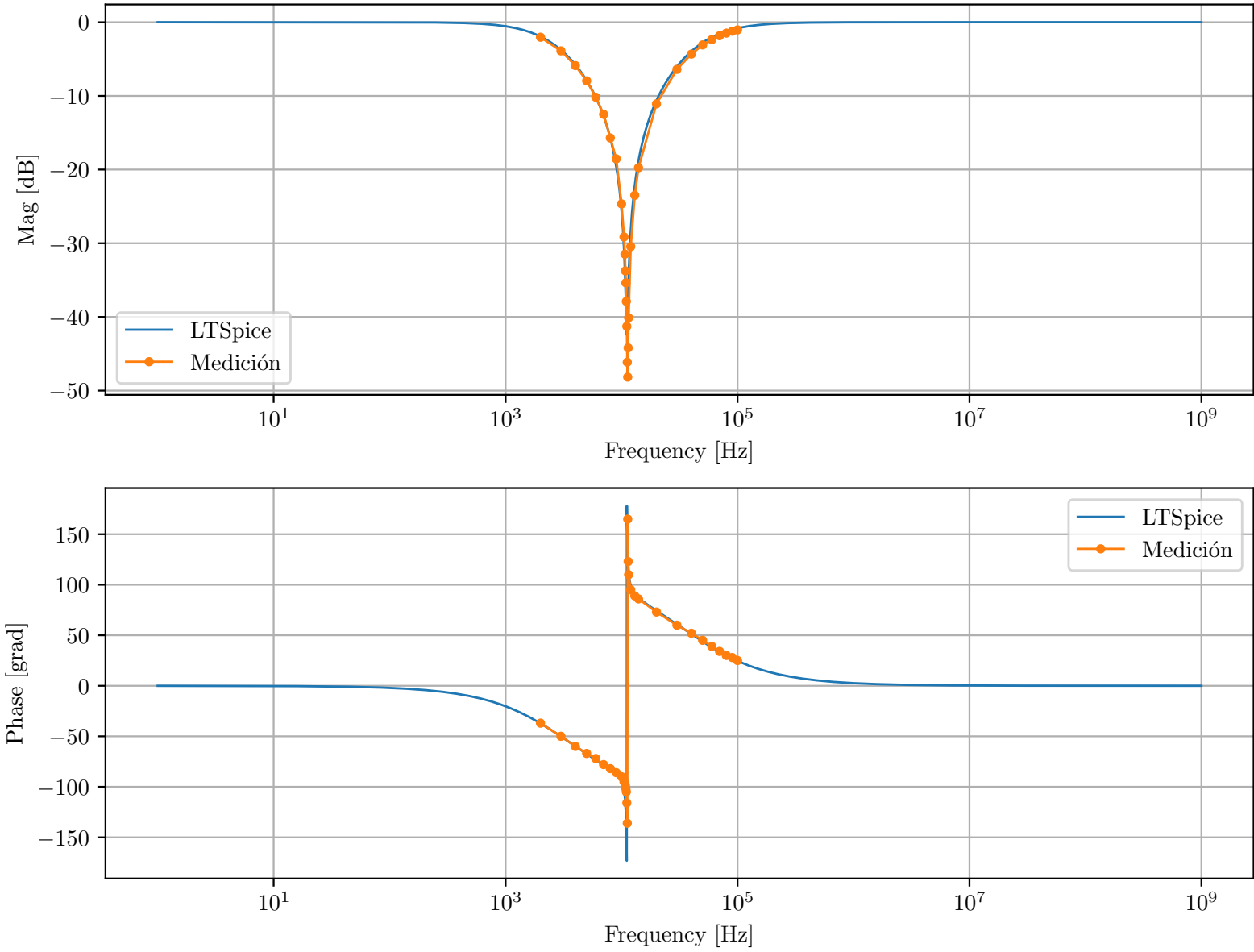


Figura 7: Filtro Notch Pasivo

Como se puede observar, la figura 7 tiene superpuesto el Bode de LTSpice (curva azul) que se mostró en la figura 4 y el Bode que se obtuvo de forma experimental (curva naranja). Los resultados son sumamente satisfactorios. En el Bode de la medición se puede apreciar la frecuencia de corte y cómo el resto de los puntos se asemejan a la curva teórica calculada en LTSpice.

### 1.3. Respuesta al escalón

Para la obtención de la respuesta teórica al escalón se aplicó el procedimiento mencionado anteriormente para la respuesta al impulso. Los resultados se muestran a continuación en la ecuación 6 y en la figura 8.

$$y(t) = 1 - \frac{4}{3} \sqrt{3} e^{-\frac{2t}{C3R3}} \sinh\left(\frac{\sqrt{3}t}{C3R3}\right) \quad (6)$$

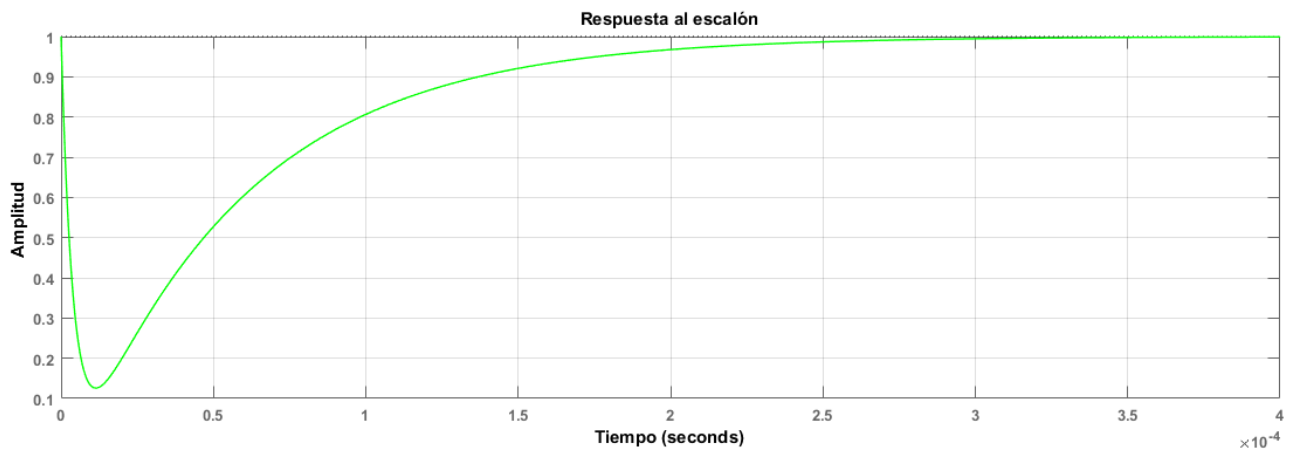


Figura 8: Respuesta al escalón

En la figura 9 se muestra la imagen tomada del osciloscopio al excitar el circuito con el escalón:

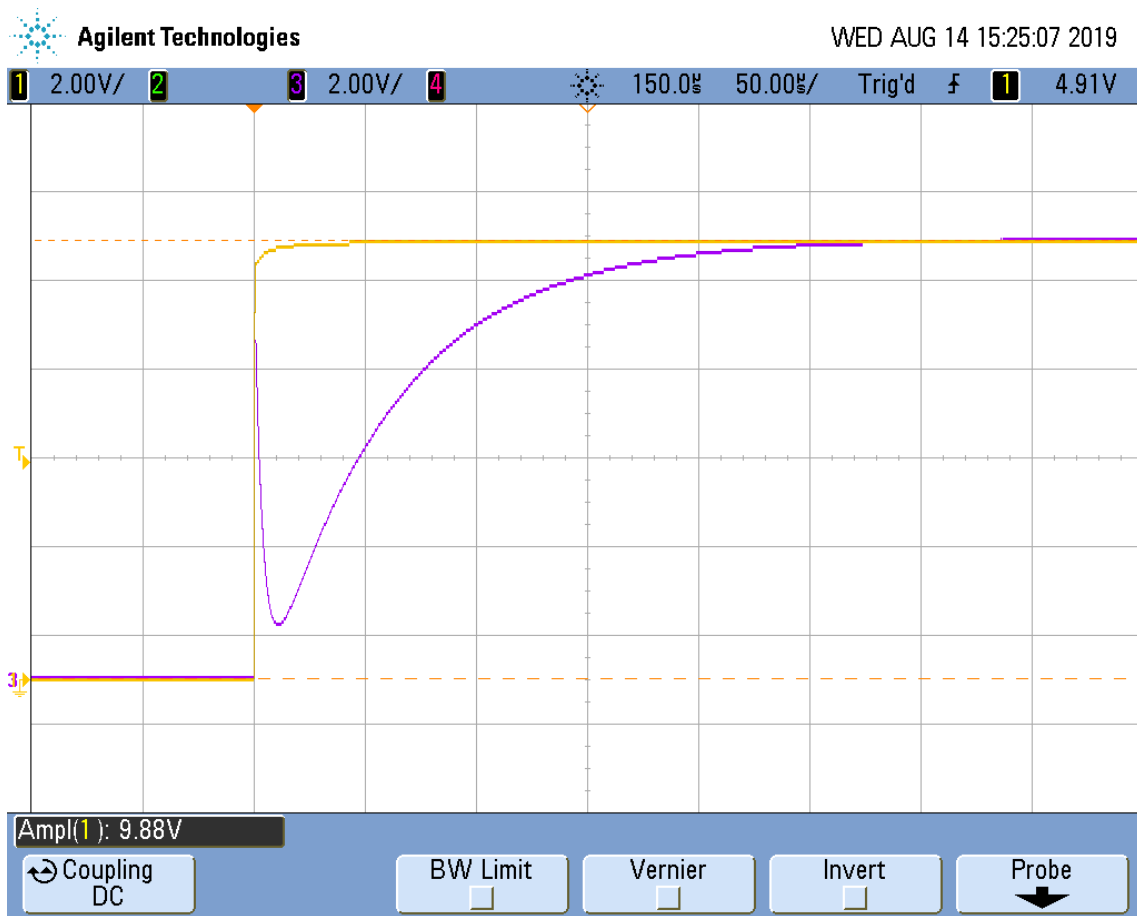


Figura 9: Respuesta al escalón medida

La línea violeta es la respuesta al escalón medida y la amarilla es el escalón. Podemos decir entonces que se corresponde de manera adecuada la respuesta medida con la teórica y que el circuito se comportó como se esperaba.

## 2. Filtro pasabajos

Se pidió aplicar a un filtro RC de frecuencia de corte  $f_0 = 64 \text{ (kHz)}$  una onda cuadrada de  $10 V_{pp}$  con frecuencia de  $f = 32 \text{ (kHz)}$ . Los resultados obtenidos empíricamente se muestran en las figuras 10 y 11. A su vez, se calculó la transferencia ideal del circuito, resultando ser:

$$H(s) = \frac{1}{1 + sRC} \quad (7)$$

La simulación de la transferencia del circuito en LTSpice se ve en las figuras 11 y 12.

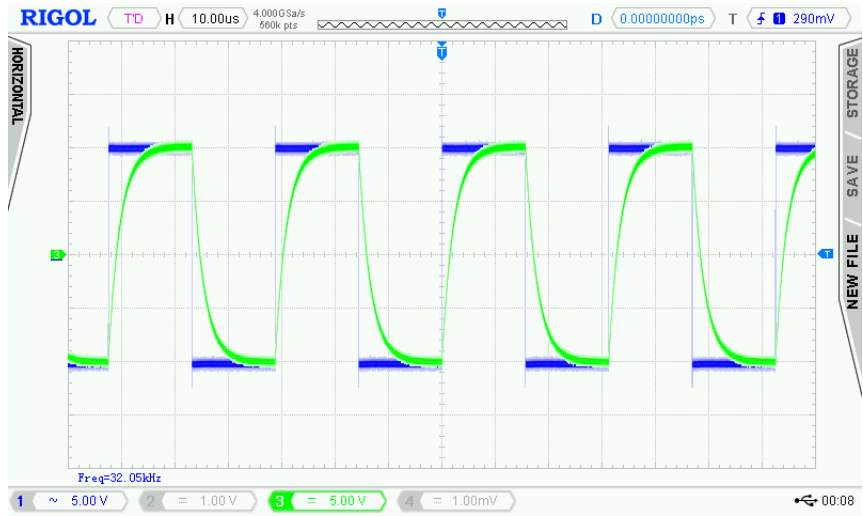


Figura 10: Resultados

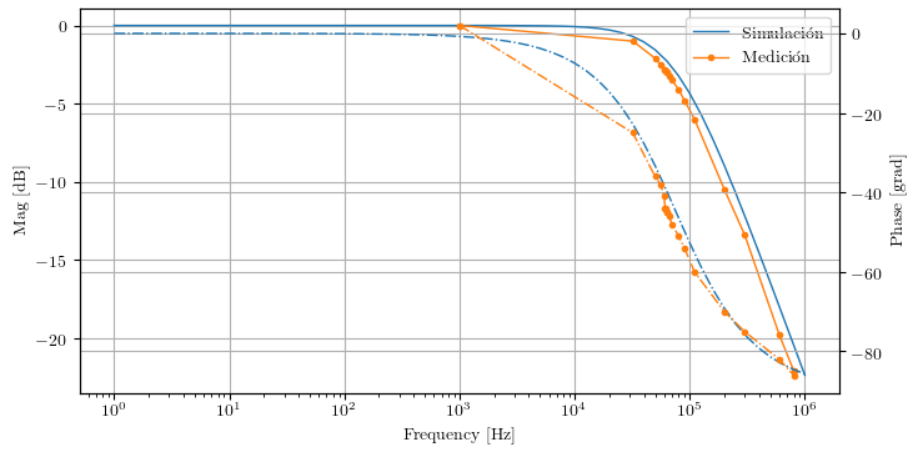


Figura 11: Simulación LTSpice y mediciones

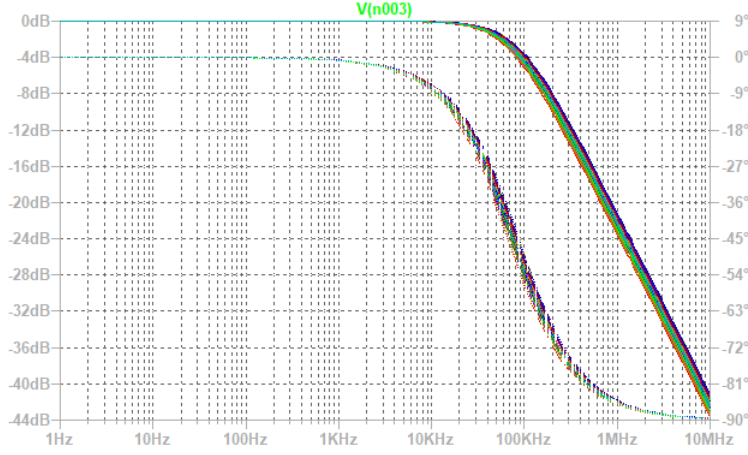


Figura 12: Análisis Montecarlo

## 2.1. Cálculo de armónicos

Para estudiar la respuesta del circuito a una señal cuadrada, se debe calcular primero cómo afecta el mismo a la onda de entrada. Como sabemos que la onda es una cuadrada, haciendo su descomposición en suma de señales trigonométricas los coeficientes de Fourier serán:

$$a_0 = 0$$

$$a_n = 0$$

$$b_{2n-1} = \frac{20}{(2n-1)\pi}$$

$$b_{2n} = 0$$

Por lo tanto, la entrada se puede expresar en el espacio temporal como se ve en la fórmula 8. Sin embargo, por temas de idealización, una señal cuadrada ideal se puede aproximar por una suma de términos finitos de senoidales: si se aproxima la cuadrada con 10 términos, se puede ver cómo se va reduciendo el error. Esto se observa en la figura 13.

A medida que se agreguen más términos a la suma, menos será la diferencia con una onda cuadrada ideal. No obstante, hay que tener en cuenta que al tener una discontinuidad no evitable cada  $\frac{T}{2}$ , siendo  $T$  el período de la señal, se generarán sobrepicos en los puntos de discontinuidad. Por ende, si se llama  $x(t)$  a la función cuadrada ideal e  $y(t)$  a su aproximación por senoides,  $x(t)$  será igual a  $y(t)$  en todos los números reales exceptuando los puntos de discontinuidad. Esto quiere decir que es posible que al trabajar con ondas cuadradas se encuentren sobrepicos.

$$x(t) \sim \sum_{n=1}^{\infty} \frac{20}{(2n-1)\pi} \sin(2\pi(2n-1)f_0 t) \quad (8)$$

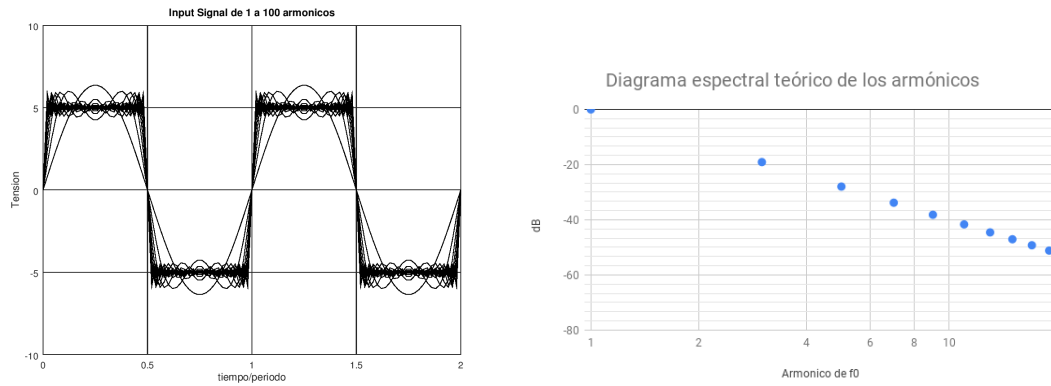


Figura 13: Representación de onda cuadrada mediante suma de senoidales y su diagrama espectral teórico.

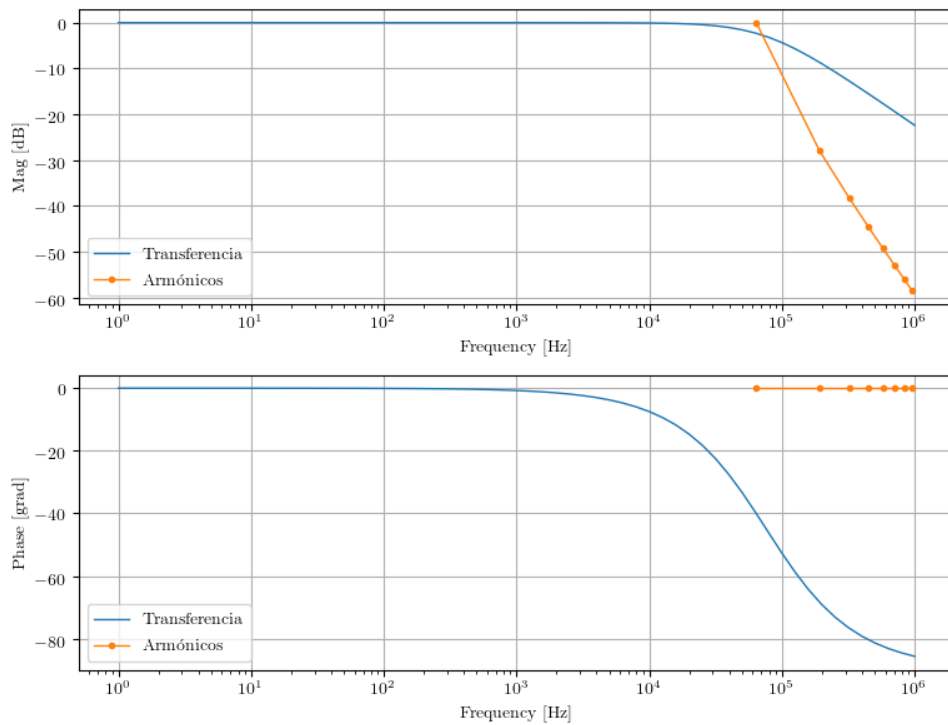


Figura 14: Transferencia superpuesta con los armónicos (los puntos de los armónicos están unidos por líneas)

Debido a que la entrada es una función continua a trozos de período  $T$ ,

$$y(t) \sim \sum_{n=1}^{\infty} |X_{2n-1}| |H((2n-1)f_0)| \cos[2\pi(2n-1)f_0t + \phi((2n-1)f_0) + \theta_{2n-1}]$$

$$X_{2n-1} = i \frac{b_{2n-1}}{2} \quad (9)$$

$$H(f) = |H(f)| e^{i\phi(f)}$$

A su vez,

$$H(f) = \frac{1}{1 + i2\pi fRC} \quad (10)$$

Por lo tanto, haciendo cálculos, de las ecuaciones 9 y 10, se concluye que:

$$\phi(f) = -\arctg(2\pi fRC)$$

$$H(f) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi fRC)^2 + 1}}$$

$$\theta_n = \frac{\pi}{2}$$

Se puede escribir la salida como la ecuación 11 y gráficamente se ve como la figura 15.

$$y(t) \sim \sum_{n=1}^{\infty} \frac{20}{(2n-1)\pi \sqrt{(2\pi(2n-1)f_0RC)^2 + 1}} \cos\left(2\pi(2n-1)f_0t - \arctg(2\pi(2n-1)f_0RC) + \frac{\pi}{2}\right) \quad (11)$$

Teniendo en cuenta que  $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ , y llamando  $k=2n-1$ ,

$$y(t) \sim \sum_{k \text{ impares}} \frac{20}{k\pi \sqrt{k^2 + 1}} \cos\left(2\pi k f_0 t - \arctg(k) + \frac{\pi}{2}\right)$$



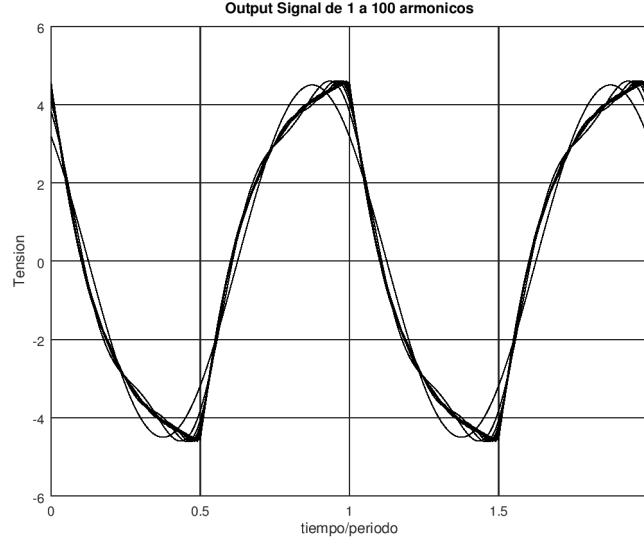


Figura 15: Salida del RC en armónicos

## 2.2. Circuito como Integrador

Un circuito integrador es aquel cuya función transferencia es de la forma  $H(s) = \frac{1}{s}$ . Como se ve en la ecuación 7, el circuito estudiado no posee esa transferencia; sin embargo, si se procura trabajar en un intervalo de frecuencias donde  $sRC$  sea lo suficientemente grande en comparación a la unidad, se puede aproximar la transferencia a la de un circuito integrador. Es decir:

$$\text{Si } sRC \gg 1 \implies H(s) = \frac{1}{1 + sRC} \approx \frac{1}{RC} \frac{1}{s}$$

Por ende, si se cambia al espacio de frecuencias, procurando que  $2\pi fRC \gg 1$  se puede obtener la transferencia de un circuito integrador. Si se eligen  $R = 3,68(k\Omega)$  y  $C = 560(pF)$  se espera que para una frecuencia  $f_a \gg 63(kHz)$ , el circuito se comporte como un integrador.

En particular, si se tiene una frecuencia  $f_i = 300(kHz)$ , se dará que  $2\pi f_a RC \gg 1$ , con lo cual podemos aproximar el denominador de la transferencia y usar nuestro circuito como integrador, como se puede observar en la figura 16.

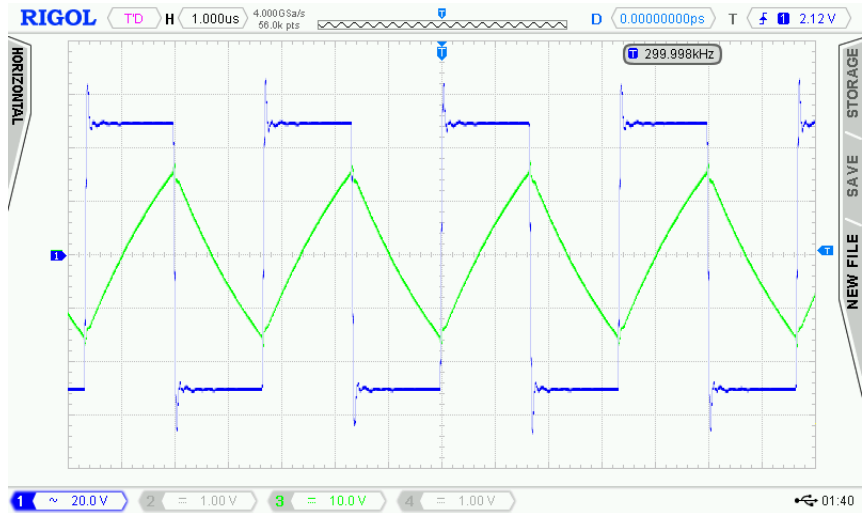


Figura 16: Circuito como integrador a 300 (kHz)

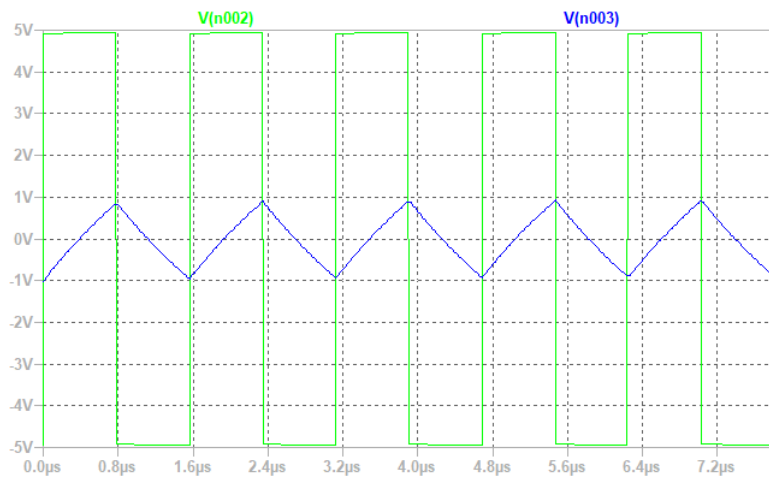


Figura 17: Simulación del circuito a 300 (kHz)

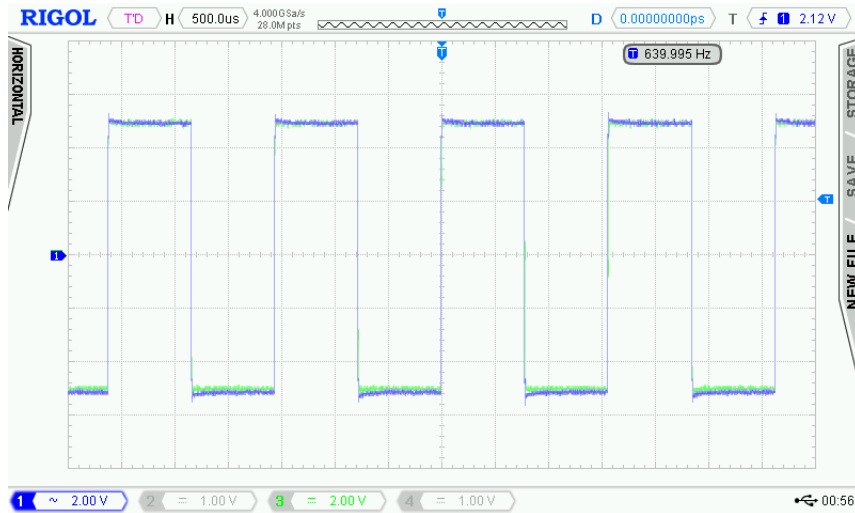


Figura 18: Circuito andando a 640(Hz)

### 3. Plot Tool

Se pidió desarrollar un programa con interfaz gráfica de usuario, cuyo propósito fuera el de facilitar la confección de gráficos mediante un método de ploteo automático. El programa debe implementarse en Python, y debe cumplir con los ciertos requisitos básicos. En primer lugar, respecto a fuentes desde las cuales se puede ingresar datos a graficar, las mismas deben ser:

- Función transferencia
- Archivo LTspice
- Plantilla de Excel o csv con mediciones

En segundo lugar, se le deben otorgar al usuario las siguientes capacidades:

- Especificar la etiqueta para el eje x.
- Especificar la etiqueta para el eje y.
- Guardar el gráfico como imagen.
- Borrar todos los gráficos anteriores.
- Graficar más de tres señales simultáneamente.

#### 3.1. Guía de usuario

A continuación se explicará detalladamente cada paso referente a la utilización de la GUI implementada. Los pasos a desarrollar son el ingreso de datos desde los distintos tipos de fuentes, edición de las etiquetas, la visualización del gráfico en una o dos figuras, la eliminación los gráficos anteriores y por ultimo, la exportación de los gráficos.

Previo a desarrollar los pasos se muestra una figura con el diseño de la interfaz gráfica, tal cual se muestra una vez que el usuario inicia el programa:

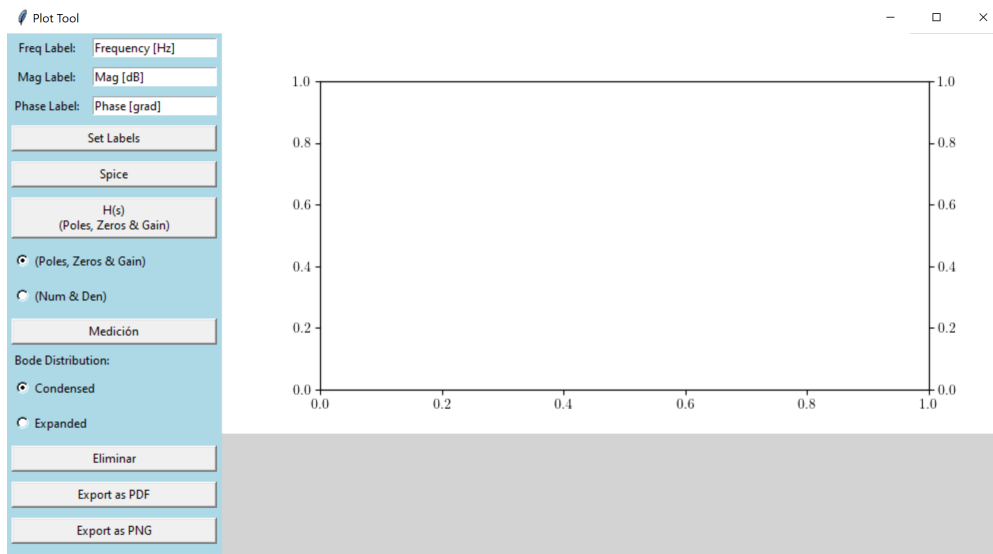


Figura 19: GUI al iniciar el programa

A la izquierda se encuentra el panel de controles, cuyo funcionamiento se explicará a continuación, mientras que a la derecha se encuentra la figura donde se graficarán los datos.

### 3.1.1. Ingresar datos

El programa permite ingresar datos desde tres fuentes: archivos de LTspice, transferencias analíticas o mediciones (en un formato determinado que se explicará posteriormente). Los tres botones para ingresar los mismos se muestran en la Figura 20.

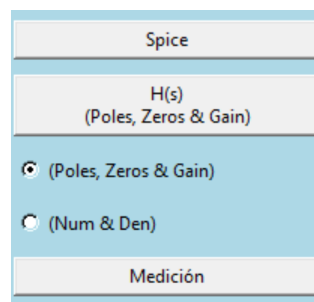


Figura 20: Elementos del panel de controles con referencias

El botón "Spice" abrirá un explorador de archivos, que permitirá seleccionar un archivo .txt previamente exportado desde una simulación de LTspice. El archivo debe corresponder a una simulación del tipo ".AC Analysis", que cuente con la transferencia de un solo nodo. Una vez seleccionado el archivo correspondiente, aparecerá el gráfico correspondiente en la figura.

Para ingresar una transferencia analítica, existen con dos posibilidades: puede ser ingresada mediante sus polos, ceros y ganancia ("Poles, Zeros & Gain") o bien mediante los polinomios del numerador y denominador ("Num & Den"). La opción se selecciona con los controles que se encuentran debajo del botón "H(s)", y se debe indicar previo a pulsar el botón. Si se selecciona la opción "Poles, Zeros & Gain", al pulsar el botón "H(s)" se abrirá una ventana (Figura 21) en la cual se deberán ingresar los datos. El formato de los polos y ceros es el siguiente: suponiendo que la función transferencia tiene  $n$  polos  $p1, p2, \dots, pn$ , se deberán ingresar separados por un espacio:  $p1\ p2\ \dots\ pn$ . De la misma forma para los ceros: si la transferencia cuenta con  $m$  ceros  $z1, z2, \dots, zm$ , se deberán ingresar separados por un espacio:  $z1\ z2\ \dots\ zm$ . El campo de la ganancia se llena con el valor de la ganancia correspondiente.

Figura 21: Prompt modo "Poles, Zeros & Gain"

Al seleccionar el modo "Num & Denz pulsar el botón "H(s)" se abrirá un prompt como el que se muestra en la Figura 22. Los datos se deben ingresar como un conjunto de coeficientes de polinomios ordenados (estilo polinomio de MatLab). Por ejemplo, si se quisiera ingresar el polinomio  $ax^2+bx+c$ , se deberán ingresar los coeficientes  $a, b$  y  $c$  en forma ordenada separados por un espacio, de la siguiente forma:  $a\ b\ c$ . Los campos Numerador y Denominador admiten el mismo formato.

Figura 22: Prompt modo "Num & Den"

La ultima opción de ingresar datos admite dos tipos de archivos: .csv y .xlsx. El formato de los mismos deberá ser el siguiente:

- **.csv:** Los datos deberán contener *headers*, el caracter de separación de columnas debe ser ; y el orden de las misma debe ser *frecuencia;magnitud;fase*; frecuencia en Hz, magnitud en dB y fase en grados.
- **.xlsx:** Los archivos de Excel deberán estar formateados de la siguiente manera: los datos *frecuencia, magnitud y fase* deberán colocarse en las columnas A, B y C, respectivamente, el archivo no debe contener *headers*, y el primer dato deberá colocarse en la fila 0

Cada vez que se cargue un dato a graficar, el programa abrirá automáticamente un *prompt* en el cual se podrá ingresar una etiqueta que describa el gráfico correspondiente.

### 3.1.2. Editar etiquetas

En la parte superior del panel de controles se encuentran tres cuadros de texto en los cuales se podrá ingresar las etiquetas de los ejes, como se muestra en la Figura 23. Por defecto, estas son *Frequency [Hz]*, *Mag [dB]* y *Phase [grad]* para frecuencia, magnitud y fase, respectivamente. Para modificarlas, debemos ingresar la etiqueta deseada y hacer click en "Set Labels".

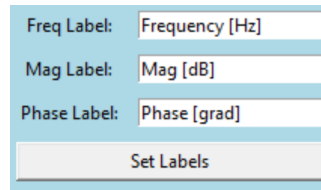


Figura 23: Controles para modificar etiquetas de ejes

### 3.1.3. Distribución de los gráficos

La interfaz cuenta con una herramienta para seleccionar la disposición de las curvas. Mediante este control se podrá disponer las curvas de magnitud y fase en una misma figura (Condensed), o separar las curvas de magnitud y fase en dos figuras diferentes (Expanded). Las figuras 24 y 25 muestran los gráficos en modo Condensed y Expanded, respectivamente.

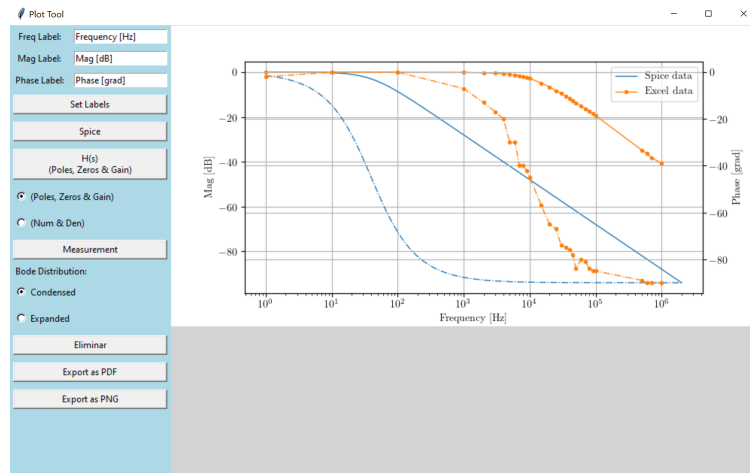


Figura 24: Gráficos en modo Condensed

### 3.1.4. Eliminar gráficos

Para eliminar los gráficos cargados, bastará con hacer click en la opción "Remove Plots". Esta herramienta borrará todos los trazos que estén graficados en la figura. No es posible remover los gráficos individualmente.

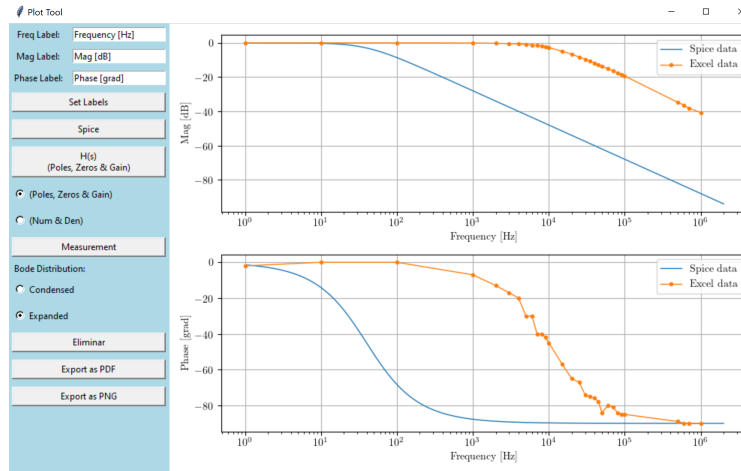


Figura 25: Gráficos en modo ".Expanded"

### 3.1.5. Exportar gráficos

La ultima herramienta de la interfaz permite exportar los gráficos en dos formatos: PDF y PNG. El archivo exportado tendrá el formato que se presente en la GUI según el modo seleccionado (Condensed.º Expanded"). Al seleccionar el botón de *Export as...* se abrirá un explorador de archivos para indicar la ubicación y nombre del archivo exportado. Las Figuras 26 y 27 muestran las figuras generadas en ambos modos:

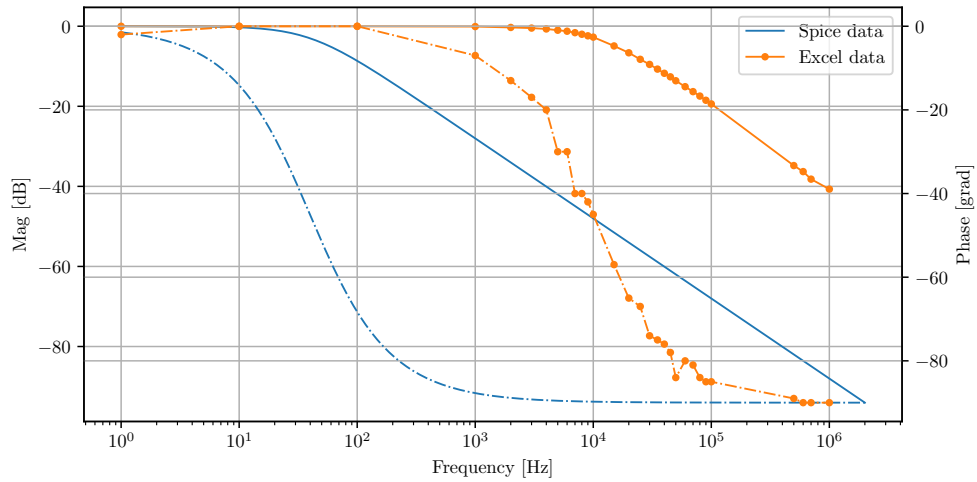


Figura 26: Resultado exportado en modo Condensed"

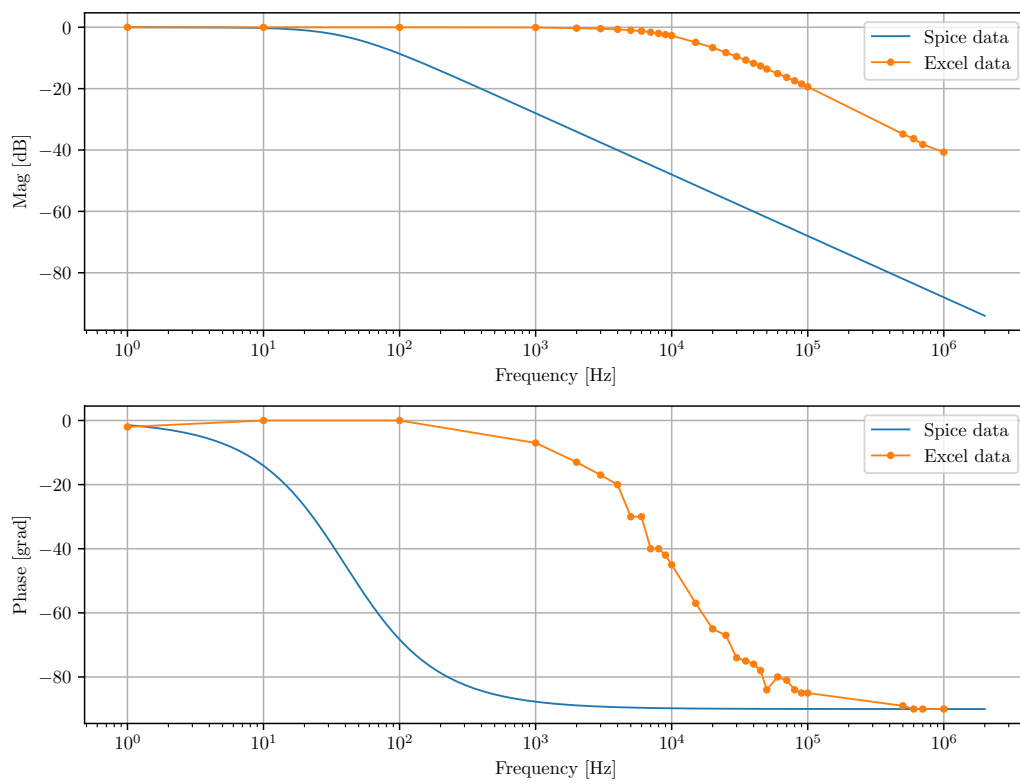


Figura 27: Resultado exportado en modo ".expanded"