

**Universidad Tecnológica Nacional**  
**Facultad Regional Buenos Aires**



**Teoría de circuitos II**

**R4001**

**Trabajo práctico de laboratorio N°2**

**Filtros digitales**

**Autores:**

- Albanesi, Tomás Agustín (Legajo Nro. 171.604-9)

**Docentes:**

- Dr. Ing. Llamedo Soria, Mariano
- Ing. Fuoco, César
- Ing. Pavelek, Israel

12 de octubre de 2023

## Contenido

1	Objetivos.....	3
2	Descripción del trabajo práctico de laboratorio.....	3
3	Desarrollo analítico y simulaciones de los filtros digitales .....	4
3.1	Diseño de filtro FIR Equiripple .....	4
3.2	Diseño de filtro FIR Least Squares .....	8
3.3	Diseño de filtro IIR Butterworth .....	9
4	Desarrollo analítico y simulaciones de filtros analógicos adicionales.....	10
4.1	Diseño de filtro analógico de entrada (Antialiasing) .....	10
4.2	Diseño de filtro analógico de salida (Antirebote).....	11
5	Diagrama en bloques del sistema.....	12
6	Armado del circuito .....	12
7	Laboratorio y mediciones .....	13
7.1	Setup de medición.....	13
7.2	Medición inicial con generador y osciloscopio.....	15
7.3	Medición en modo TALKTHROUGH .....	16
7.4	Medición de FIR EQUIRIPPLE en modo FIR.....	19
7.5	Medición de FIR LEAST SQUARES en modo FIR.....	21
7.6	Medición de IIR BUTTERWORTH en modo IIR.....	24
7.7	Medición con analizador .....	26
8	Datasheets.....	30
9	Conclusiones.....	31
10	Bibliografía.....	32

## 1 Objetivos

- Consolidar los conceptos de los sistemas muestreados mediante el uso de ADC y DACs.
- Simular e implementar un filtro digital con el LPC1769 LPCXpresso.
- Familiarizarse con el uso de librerías para procesamiento digital de señales.
- Medir las partes de la función transferencia  $H[z]$  para frecuencias menores a 10 kHz.

## 2 Descripción del trabajo práctico de laboratorio

El trabajo práctico consiste en el diseño, análisis, medición y discusión de los siguientes filtros digitales:

### Plantillas FIR:

Filtro	Tipo	Frecuencia de corte	Frecuencia de stop	Atenuación máxima en banda de paso	Atenuación mínima en banda de stop
A	FIR Equiripple	1 kHz	2 kHz	1 dB	20 dB

Filtro	Tipo	Freq Pass Band 1	Att @FPB1	Frec Stop Band	Att @FSB	Freq Pass Band 2	Att @FPB2
B	FIR Least Squares	2 kHz	1 dB	4 a 6 kHz	20 dB	8 kHz	1 dB

### Plantilla IIR:

Filtro	Tipo	Frecuencia de corte	Frecuencia de stop	Atenuación máxima en banda de paso	Atenuación mínima en banda de stop
C	IIR Butterworth	2 kHz	3 kHz	1 dB	20 dB

@Fs 44.1 kHz @blocksize:1024

### 3 Desarrollo analítico y simulaciones de los filtros digitales

#### 3.1 Diseño de filtro FIR Equiripple

En primer lugar, se llevó a cabo el diseño del primer filtro digital, cuya plantilla es la siguiente:

Filtro	Tipo	Frecuencia de corte	Frecuencia de stop	Atenuación máxima en banda de paso	Atenuación mínima en banda de stop
A	FIR Equiripple	1 kHz	2 kHz	1 dB	20 dB

Este diseño se realizó en ambas tecnologías, tanto Python como Matlab, para poder comparar que tipo de herramienta generaba filtros óptimos.

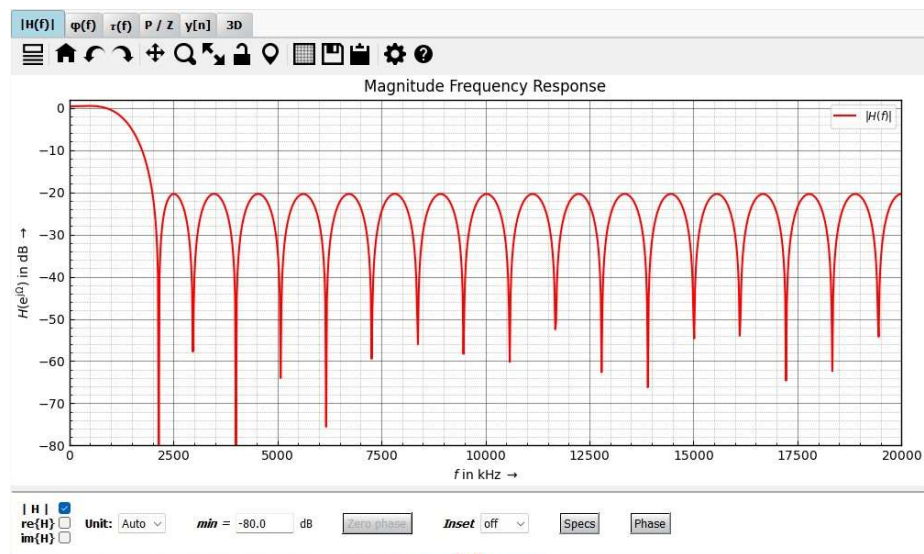
##### Python

En el caso de Python, se utilizó la extensión/aplicación de Python denominada PyFDA.

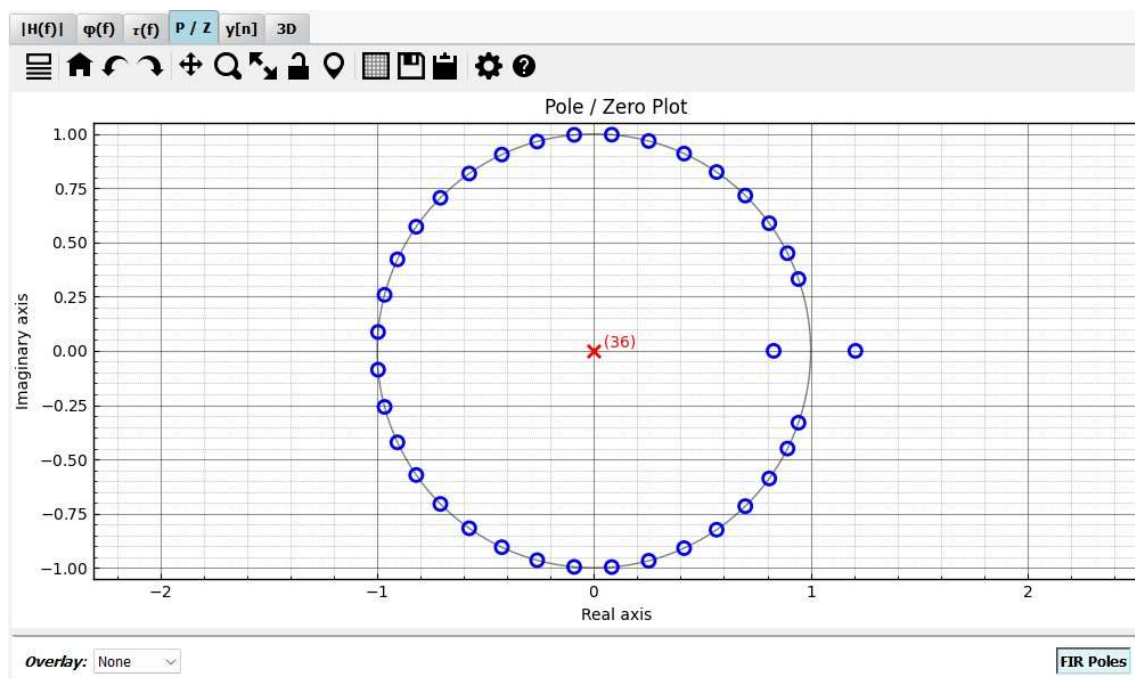
En primer lugar, seleccionamos el tipo de filtro, en este caso, FIR Equiripple como se muestra a continuación, en donde se seleccionó que se diseñe con el mínimo orden posible:

Luego, cargamos la frecuencia de muestreo, y la frecuencia de corte de la banda de paso y la frecuencia de stop de la banda de paso, como se muestra a continuación, con los datos de la plantilla:

Luego, diseñamos el filtro, del cual obtuvimos la siguiente respuesta en frecuencia:



Además, obtuvimos el siguiente diagrama de polos y ceros:



Una vez verificado, exportamos los coeficientes del filtro, los cuales se muestran a continuación:

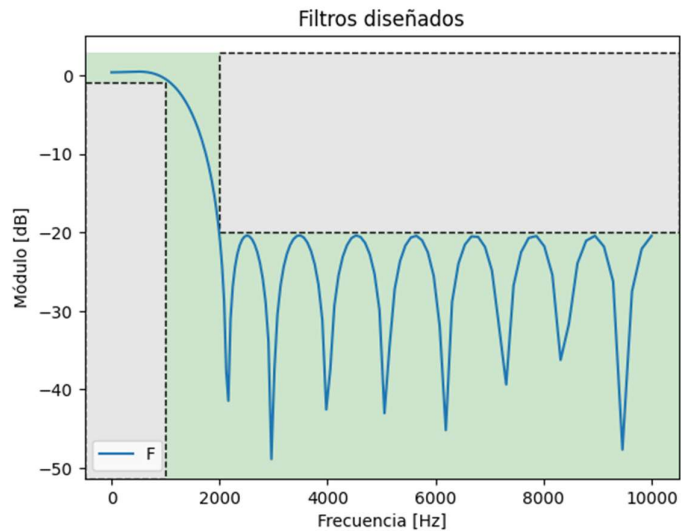
```
b,-0.05162433733236522,-0.007672519422928516,-0.00678880781242267,-  
0.004898142125166312,-  
0.0018130222403740636,0.0023430473577484546,0.007554643562306183,0.01383997033273236  
6,0.02085058754485809,0.02841826251623787,0.0363856965421772,0.04440887725675523,0.052  
207713769222654,0.05945363169895248,0.06583915761165324,0.07108412576908336,0.0750377  
8800290847,0.07746972104699341,0.078299568689035,0.07746972104699341,0.07503778800290  
847,0.07108412576908336,0.06583915761165324,0.05945363169895248,0.052207713769222654,  
0.04440887725675523,0.0363856965421772,0.02841826251623787,0.02085058754485809,0.0138  
39970332732366,0.007554643562306183,0.0023430473577484546,-0.0018130222403740636,-  
0.004898142125166312,-0.00678880781242267,-0.007672519422928516,-0.05162433733236522
```

Luego, para corroborar que el filtro diseñado cumpla con la plantilla, cargamos los coeficientes en un script de Python, donde se muestra la plantilla y la respuesta en frecuencia del filtro superpuestas para observar las diferencias.

El script se encuentra en el siguiente Jupyter Notebook:

[https://nbviewer.org/github/tomasalbanesi/TC2\\_2023/blob/master/Laboratorios/TP\\_Laboratorio\\_2/Notebooks/TPLab2\\_Notebook\\_Albanesi\\_FIR\\_Equiripple\\_Python.ipynb?flush\\_cache=true](https://nbviewer.org/github/tomasalbanesi/TC2_2023/blob/master/Laboratorios/TP_Laboratorio_2/Notebooks/TPLab2_Notebook_Albanesi_FIR_Equiripple_Python.ipynb?flush_cache=true)

La respuesta de modulo en frecuencia comparada con la plantilla de diseño es la siguiente:



Como se puede observar el filtro diseñado cumple con la planilla solicitada, en este caso, un filtro PASA BAJOS.

## Matlab

Para realizar el diseño del mismo filtro digital con Matlab, utilizamos la herramienta FDATool.

Especificamos las mismas condiciones que para el filtro diseñado en Python:

Response Type: ☒ Lowpass, ☐ Highpass, ☐ Bandpass, ☐ Bandstop, ☐ Differentiator

Design Method: ☐ IIR Butterworth, ☒ FIR Equiripple

Filter Order: ☐ Specify order: 10, ☒ Minimum order

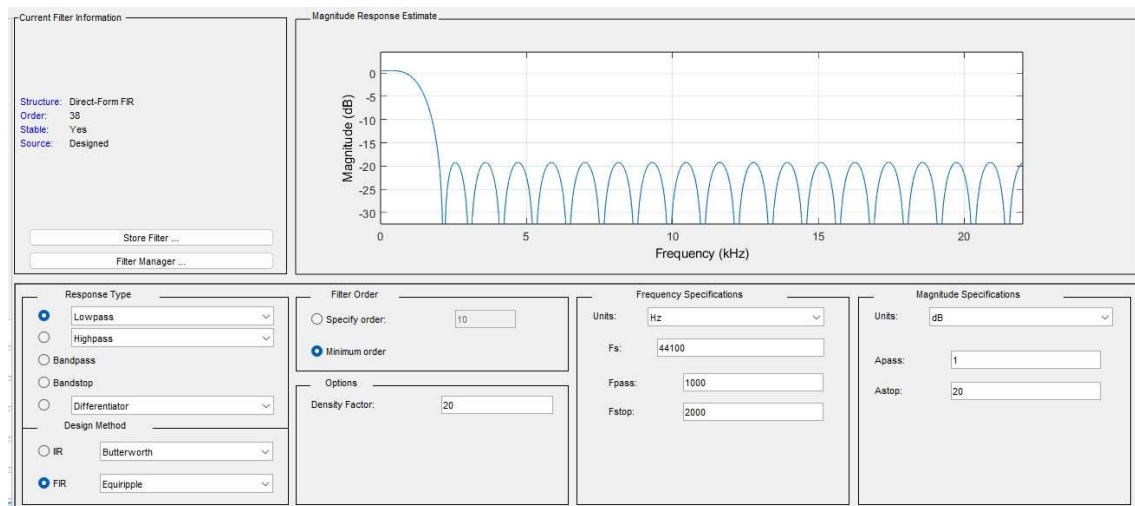
Options: Density Factor: 20

Frequency Specifications: Units: Hz, Fs: 44100, Fpass: 1000, Fstop: 2000

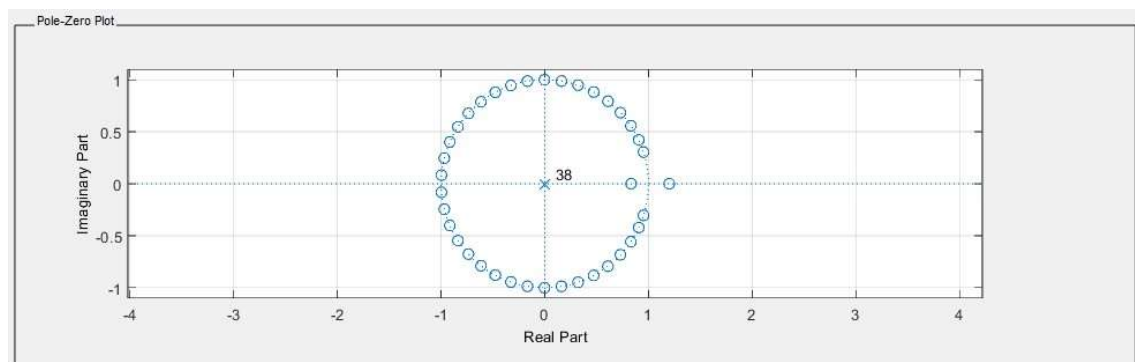
Magnitude Specifications: Units: dB, Apass: 1, Astop: 20

En este caso, Matlab lo diseño con orden 38, es decir, dos ordenes mas que el filtro diseñado con Python, cuyo orden fue de 36.

Obtuvimos la respuesta de modulo en frecuencia:



Además, el diagrama de polos y ceros:



Al igual que en el caso anterior del filtro diseñado en Python, lo comprobamos exportando los coeficientes y verificándolo en el script de Python.

El script de verificación con los coeficientes cargados se encuentra en el siguiente Jupyter Notebook:

[https://nbviewer.org/github/tomasalbanesi/TC2\\_2023/blob/master/Laboratorios/TP\\_Laboratorio\\_2/Notebooks/TPLab2\\_Notebook\\_Albanesi\\_FIR\\_Equiripple\\_Matlab.ipynb?flush\\_cache=true](https://nbviewer.org/github/tomasalbanesi/TC2_2023/blob/master/Laboratorios/TP_Laboratorio_2/Notebooks/TPLab2_Notebook_Albanesi_FIR_Equiripple_Matlab.ipynb?flush_cache=true)

### 3.2 Diseño de filtro FIR Least Squares

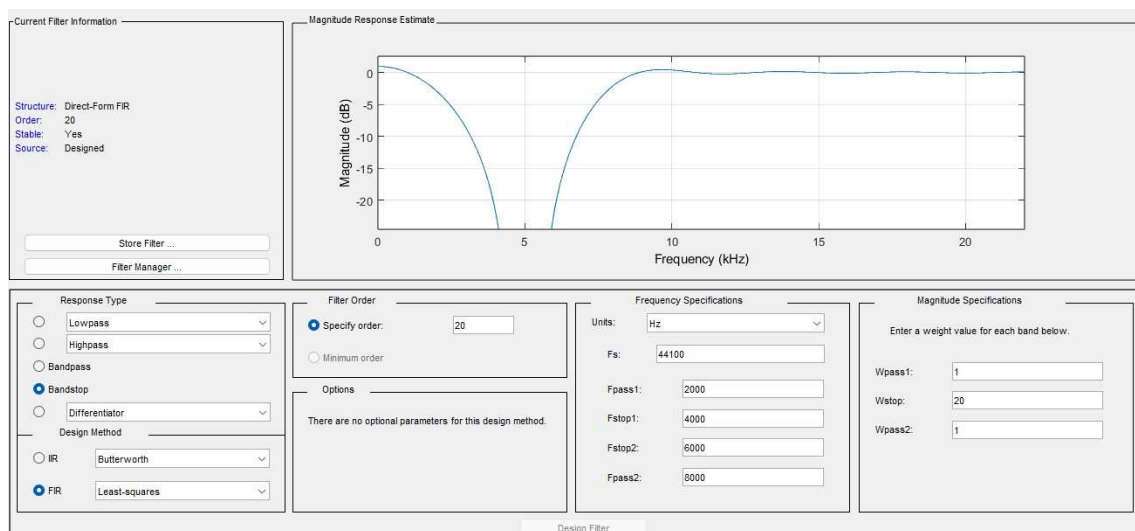
La plantilla por diseñar para este filtro (FILTRO ELIMINA BANDA) es la siguiente:

Filtro	Tipo	Freq Pass Band 1	Att @FPB1	Frec Stop Band	Att @FSB	Freq Pass Band 2	Att @FPB2
B	FIR Least Squares	2 kHz	1 dB	4 a 6 kHz	20 dB	8 kHz	1 dB

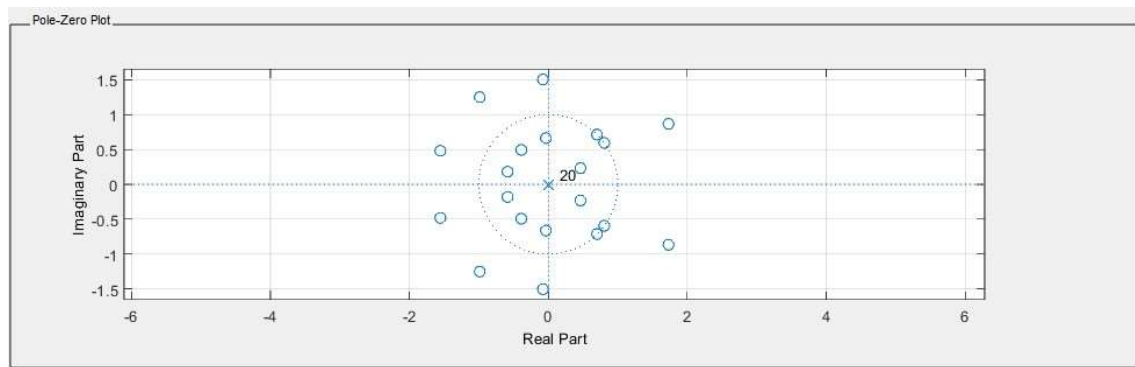
En este caso, solamente diseñamos el filtro utilizando la herramienta FDATool del software Matlab.

Siguiendo los mismos pasos detallados para el filtro anterior, en primer lugar, definimos en FDATool las frecuencias y las atenuaciones en las distintas bandas, como se muestra a continuación, además de seleccionar el tipo de filtro:

Luego, obtuvimos la respuesta en frecuencia y el diagrama de polos y ceros:







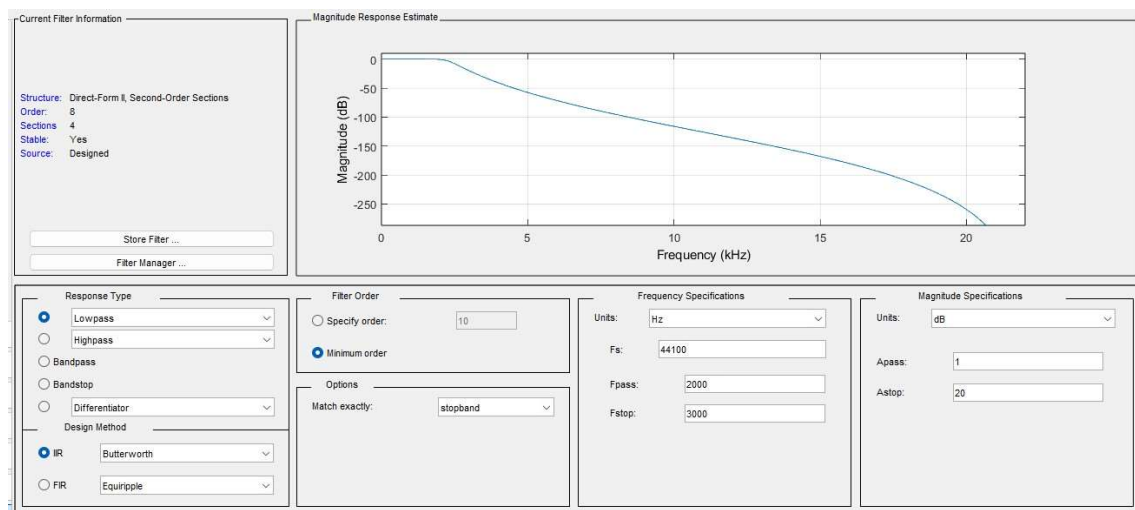
### 3.3 Diseño de filtro IIR Butterworth

En este caso, también lo diseñamos con Matlab ya que resulta más eficaz que Python. Sin embargo, también fue diseñado en Python, aunque finalmente utilizamos el diseñado mediante el software Matlab.

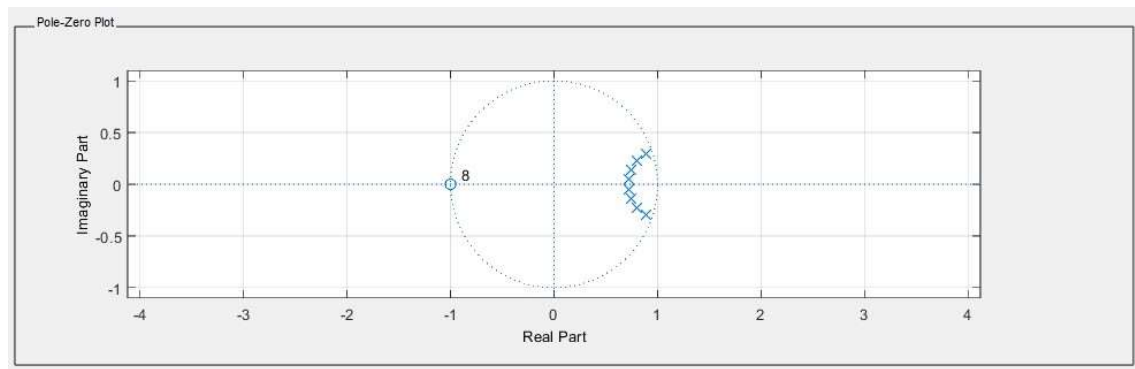
Cargamos los datos, frecuencias y atenuaciones:

<b>Response Type</b> <input checked="" type="radio"/> Lowpass <input type="radio"/> Highpass <input type="radio"/> Bandpass <input type="radio"/> Bandstop <input type="radio"/> Differentiator <b>Design Method</b> <input checked="" type="radio"/> IR Butterworth <input type="radio"/> FIR Equiripple	<b>Filter Order</b> <input type="radio"/> Specify order: 10 <input checked="" type="radio"/> Minimum order <b>Options</b> Match exactly: stopband	<b>Frequency Specifications</b> Units: Hz Fs: 44100 Fpass: 2000 Fstop: 3000	<b>Magnitude Specifications</b> Units: dB Apass: 1 Astop: 20
---	---	---	---

Luego, obtuvimos la siguiente respuesta en frecuencia:



Además, obtuvimos el diagrama de polos y ceros:



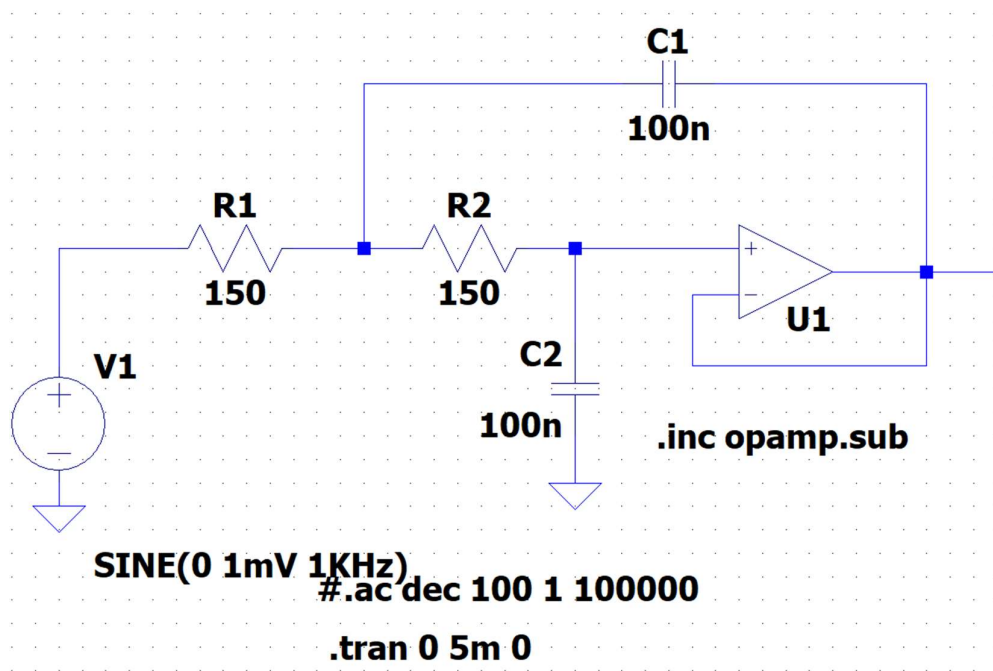
## 4 Desarrollo analítico y simulaciones de filtros analógicos adicionales

### 4.1 Diseño de filtro analógico de entrada (Antialiasing)

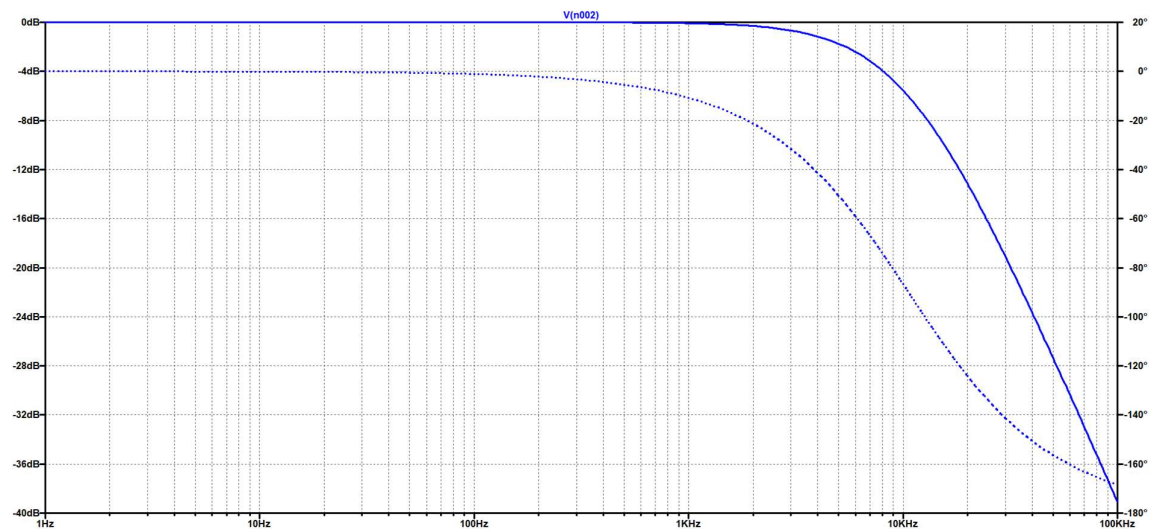
Para diseñar el filtro antialiasing, en primer lugar, quisimos realizar un filtro activo Sallen Key para también aplicar lo aprendido durante el primer cuatrimestre.

La frecuencia de corte del filtro pasa bajo Antialiasing, se debería ubicar entre la frecuencia de stop de los filtros diseñados y la frecuencia de Nyquist que en este caso se aproximadamente 22KHz.

El filtro diseñado fue el siguiente:



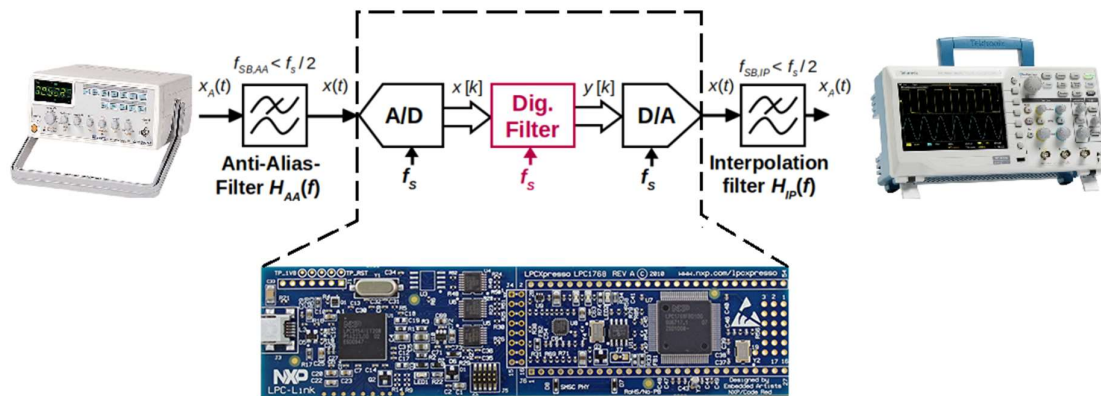
Cuya respuesta en frecuencia es la siguiente:



## 4.2 Diseño de filtro analógico de salida (Antirebote)

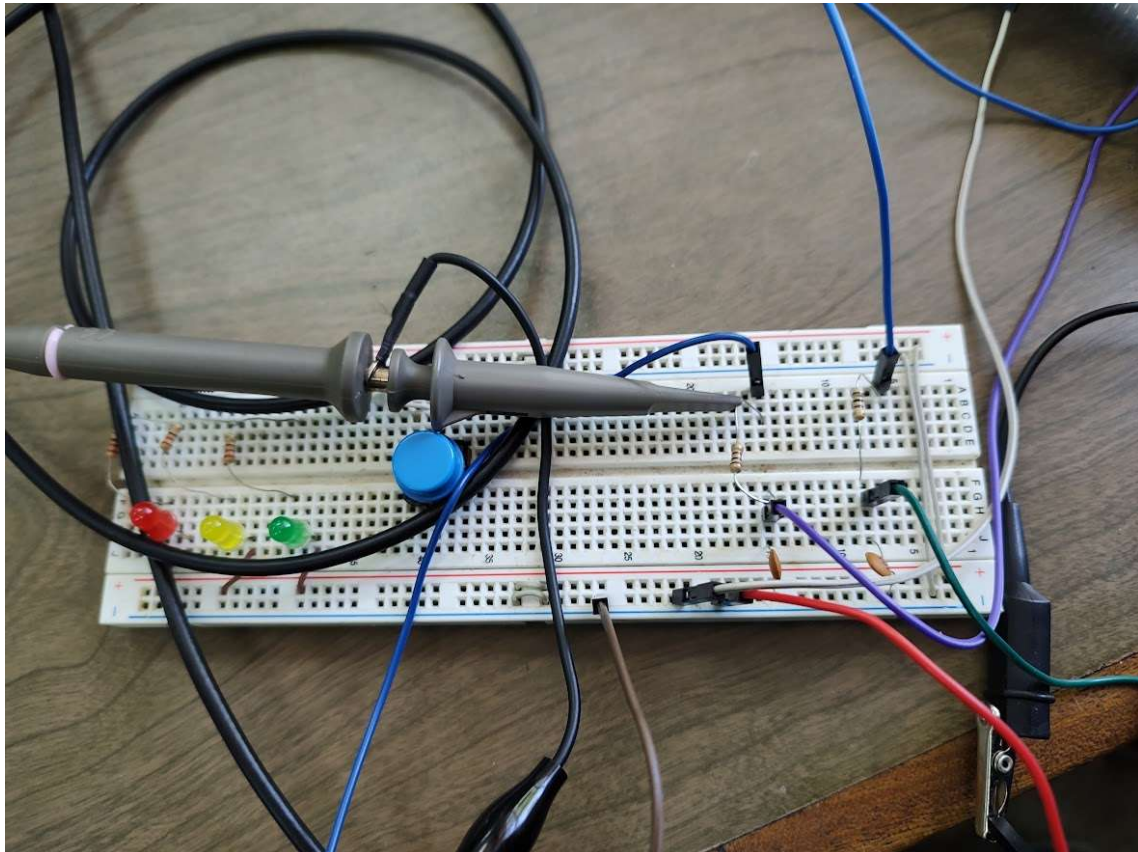
Para el diseño de este filtro, siguiendo la instrucción del anexo de la consigna del trabajo practico, se replicaría el filtro de entrada.

## 5 Diagrama en bloques del sistema



## 6 Armado del circuito

En el caso del filtro Sallen Key habíamos realizado un PCB, pero si bien lo habíamos probado previamente en protoboard y funcionaba, cuando realizamos el PCB no logramos que funcione. Por lo tanto, optamos por la opción de colocar un filtro RC clásico, tanto a la entrada como a la salida.





## 7 Laboratorio y mediciones

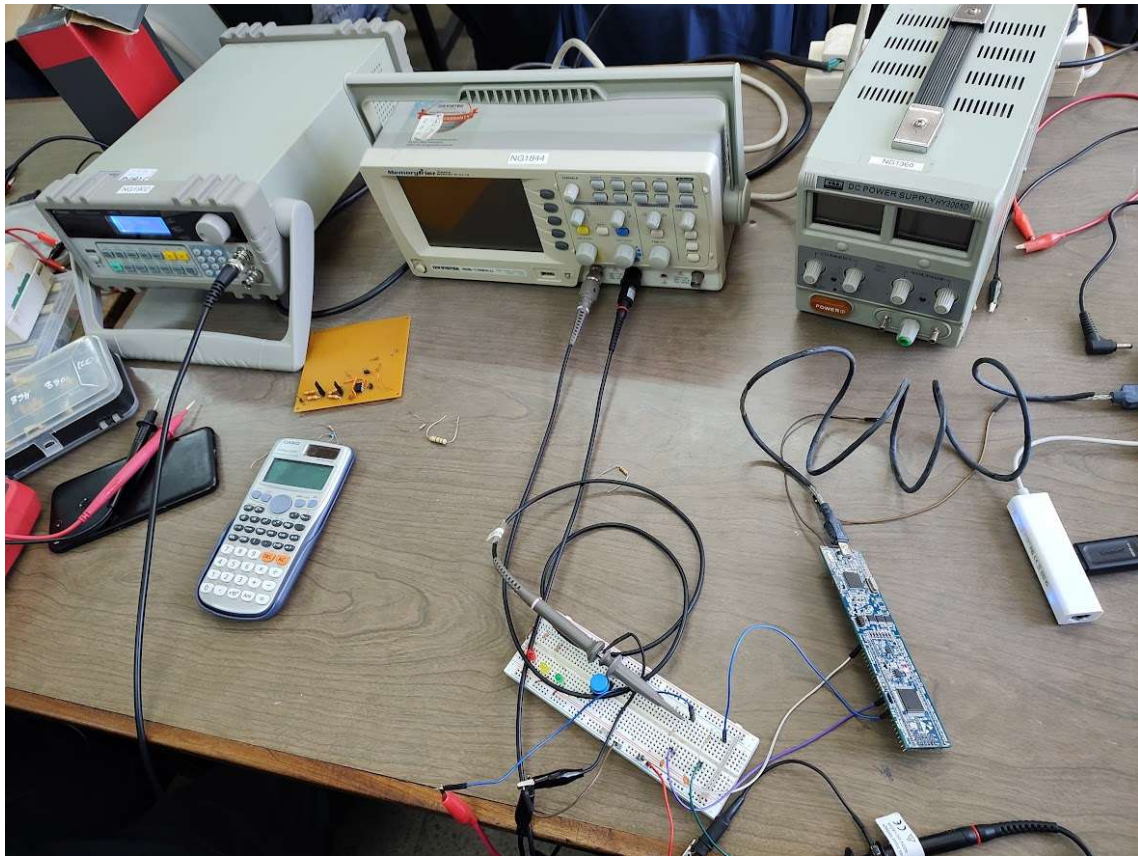
### 7.1 Setup de medición

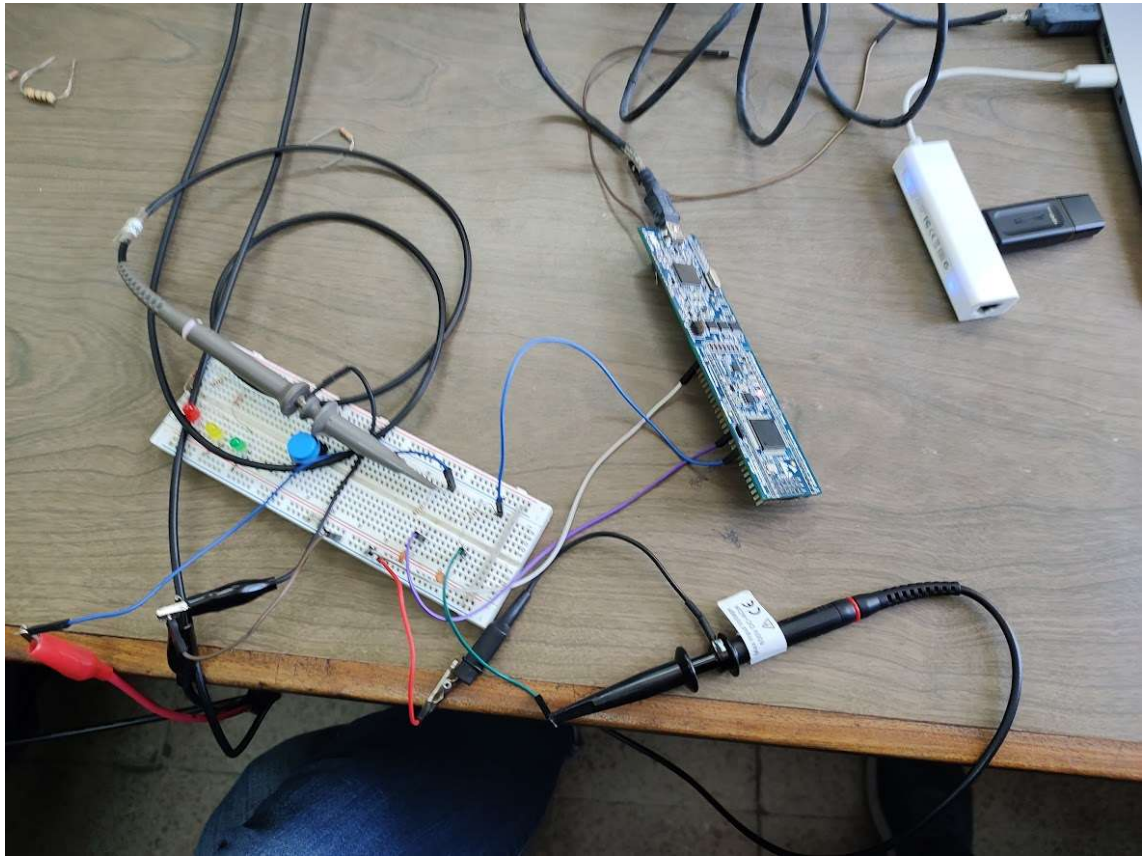
El setup de medición utilizado fue el siguiente:

- 1 generador de señales con una punta
- 1 osciloscopio digital con dos puntas
- 1 multímetro con puntas
- Varias puntas cocodrilo-cocodrilo para conexiones de equipos con protoboard
- 2 fuentes de tensión
- 1 analizador de frecuencia (modulo y fase)

A continuación, se podrán observar imágenes de lo mencionado anteriormente.

Setup general:



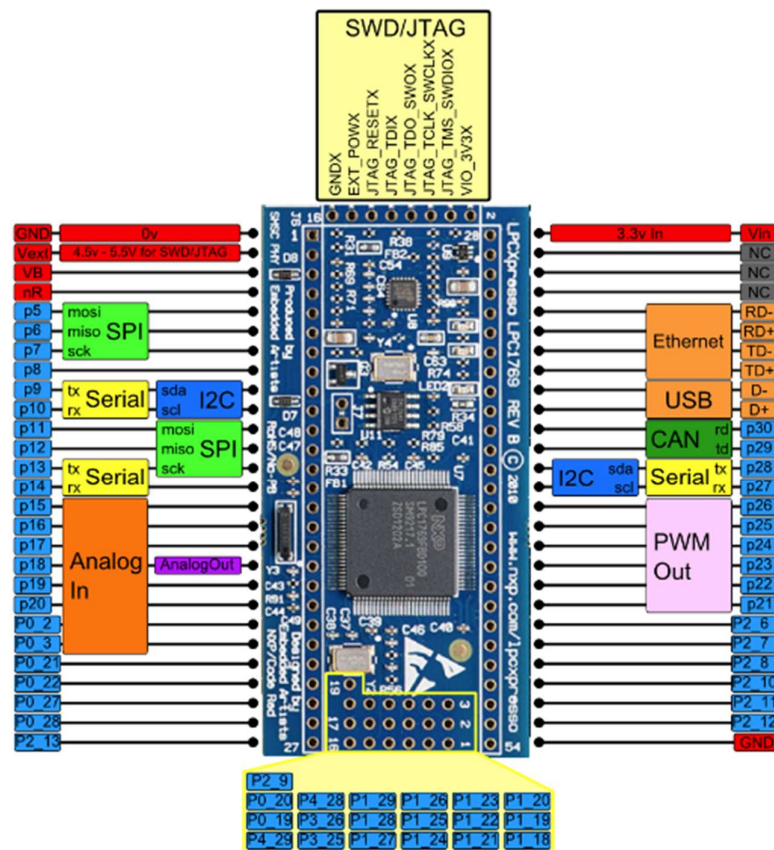


## 7.2 Medición inicial con generador y osciloscopio

Para realizar este tipo de medición se realizó el conexionado del generador a la entrada del filtro analógico antialiasing, cuya salida se incorporaba al microcontrolador y luego el osciloscopio en la salida del filtro.

El esquema de conexión del microcontrolador es el siguiente:

# PIN	DESCRIPCIÓN
1	GND
2	+5 VDC
15	AD_IN
18	DAC_OUT



Luego, una vez conectado todo se realizaron las siguientes verificaciones previo a la realización del laboratorio:

- Medimos con un multímetro las tensiones.
- Colocamos un canal del osciloscopio en la entrada para poder comprobar en toda medición que la señal de entrada no se modificó, o en el caso de que se haya modificado, ajustarlo al nivel de tensión de entrada correspondiente.

- El otro canal de osciloscopio lo conectamos a la salida del filtro, para poder observar las variaciones de amplitud.

Luego de realizar las verificaciones pertinentes, se realizó un “barrido de frecuencias”, donde para cada frecuencia tomada se realizaron las siguientes mediciones:

- Entrada Vpp (Tensión pico a pico de la señal de entrada)
- Entrada Vrms (Tensión eficaz de la señal de entrada)
- Salida Vpp (Tensión pico a pico de la señal de salida)
- Salida Vrms (Tensión eficaz de la señal de salida)
- Atenuación en dB calculada con los datos tomados de entrada y salida

### 7.3 Medición en modo TALKTHROUGH

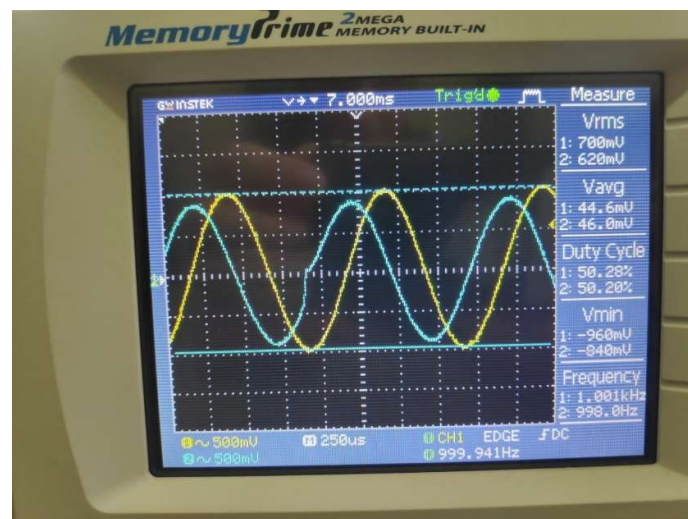
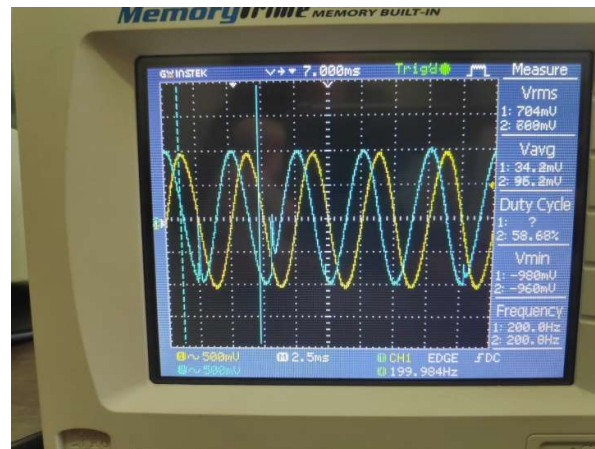
En este modo, simplemente la señal se traspa de la entrada a la salida, para de esta forma, poder caracterizar el sistema, que como es de esperar, su naturaleza será pasa bajos, debido a los filtros antialiasing.

Mediciones realizadas:

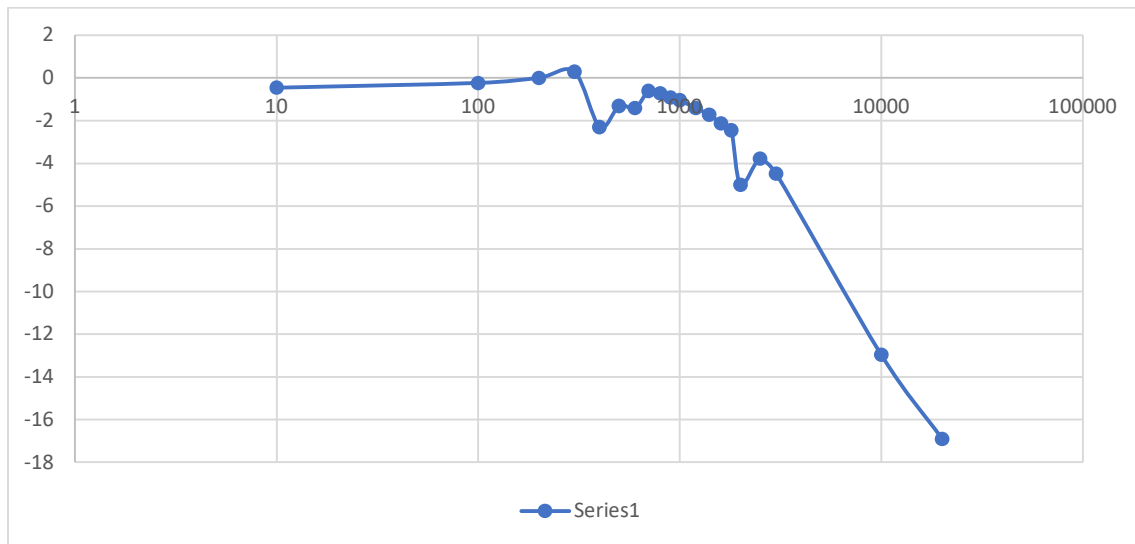
Frecuencia [Hz]	Entrada Vrms [V]	Salida Vrms [V]	Atenuacion [dB]
10	0,675	0,64	-0,462475977
100	0,73	0,71	-0,241290228
200	0,7	0,7	0
300	0,89	0,92	0,287956414
400	0,56	0,43	-2,294391429
500	1	0,86	-1,310030975
600	0,777	0,66	-1,417541665
700	0,7	0,652	-0,617008886
800	0,7	0,644	-0,724243453
900	0,7	0,63	-0,915149811
1000	0,7	0,62	-1,05412701
1200	0,7	0,595	-1,411621486
1400	0,695	0,57	-1,722198978
1600	0,69	0,54	-2,129106618
1800	0,69	0,52	-2,456914942
2000	0,89	0,5	-5,008400046
2500	0,68	0,44	-3,781124724
3000	0,67	0,4	-4,480296227
10000	0,512	0,115	-12,97144241
20000	0,35	0,05	-16,9019608



A continuación, se muestran una serie de oscilogramas capturados, los cuales hacen referencia a los puntos más importantes de la transferencia:



Con los datos relevados y tomando como eje X al rango de frecuencias y al eje Y al rango de atenuaciones, los que nos da la curva de transferencia en módulo:



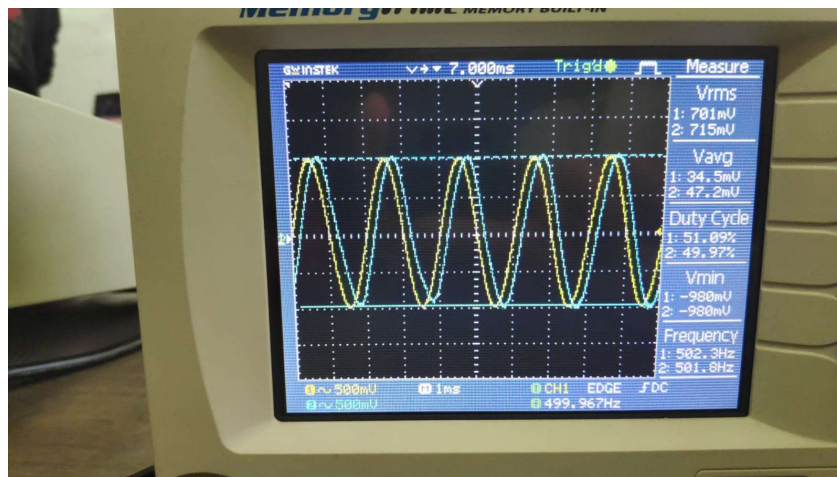
Con respecto a la fase del sistema, debido a problemas en la implementación del workspace utilizado este año se tomó la decisión de no tomar sus mediciones.

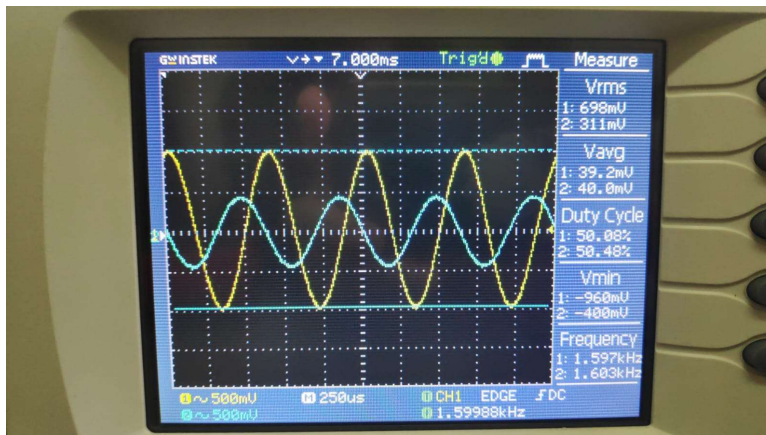
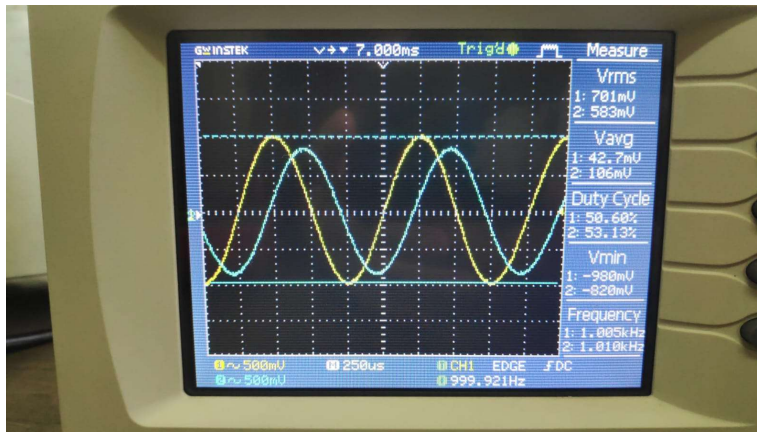
## 7.4 Medición de FIR EQUIRIPPLE en modo FIR

Mediciones realizadas:

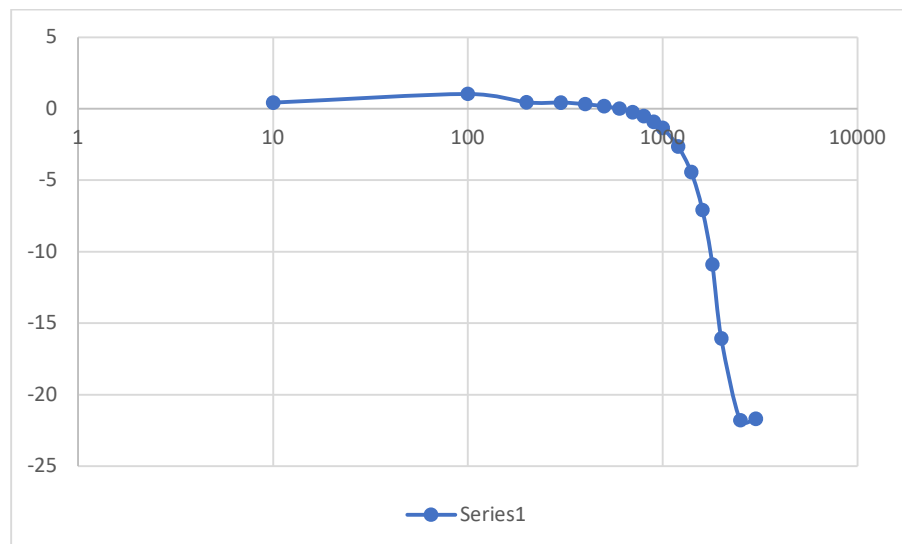
Frecuencia [Hz]	Entrada Vrms [V]	Salida Vrms [V]	Atenuacion [dB]
10	0,658	0,691	0,425043075
100	0,632	0,712	1,035258307
200	0,703	0,74	0,445527894
300	0,7	0,736	0,435595486
400	0,7	0,726	0,316771614
500	0,7	0,714	0,172003435
600	0,7	0,7	0
700	0,7	0,68	-0,251782546
800	0,7	0,659	-0,524252508
900	0,7	0,63	-0,915149811
1000	0,7	0,6	-1,338935793
1200	0,7	0,517	-2,632149938
1400	0,7	0,42	-4,436974992
1600	0,7	0,31	-7,074726924
1800	0,7	0,2	-10,88136089
2000	0,7	0,11	-16,0741071
2500	0,7	0,057	-21,78446369
3000	0,68	0,056	-21,68641771

A continuación, se muestran una serie de oscilogramas capturados, los cuales hacen referencia a los puntos más importantes de la transferencia:





Con los datos relevados y tomando como eje X al rango de frecuencias y al eje Y al rango de atenuaciones, los que nos da la curva de transferencia en módulo:



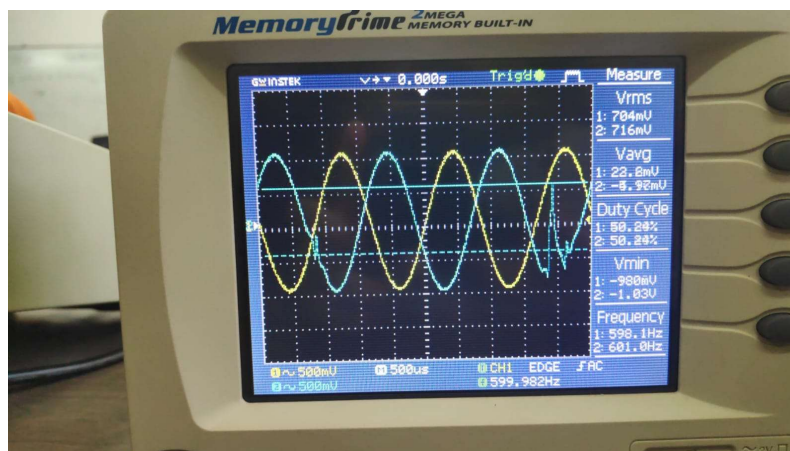
Con respecto a la fase del sistema, debido a problemas en la implementación del workspace utilizado este año se tomó la decisión de no tomar sus mediciones.

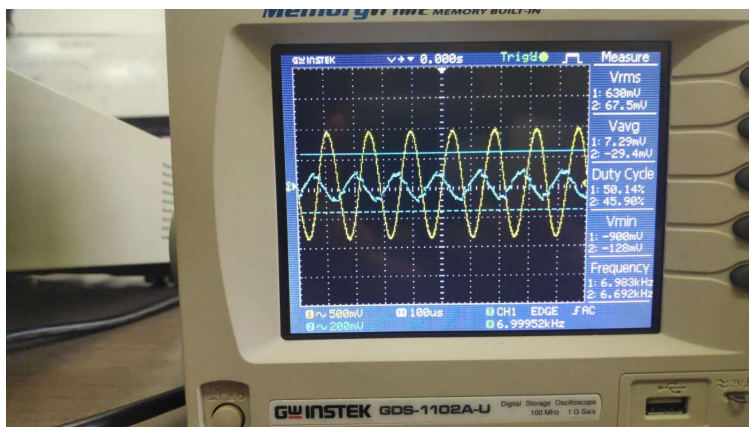
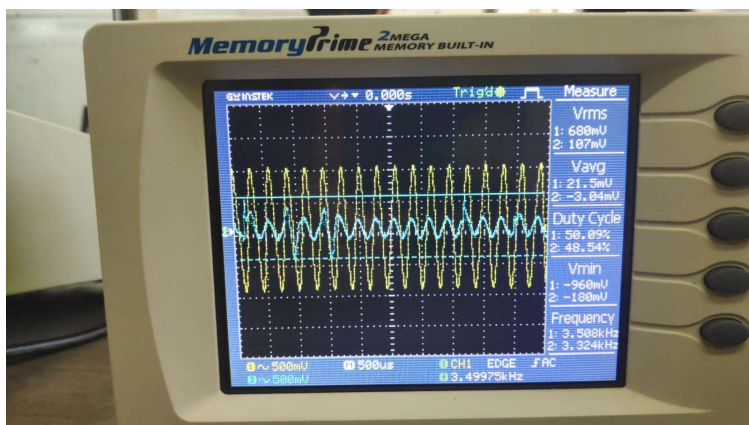
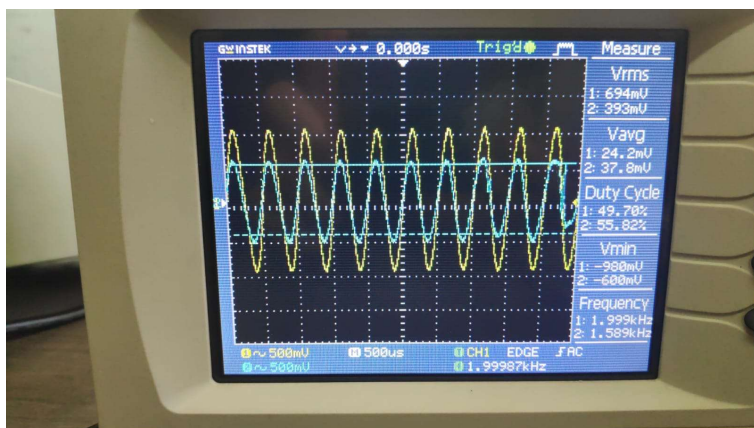
## 7.5 Medición de FIR LEAST SQUARES en modo FIR

Mediciones realizadas:

Frecuencia [Hz]	Entrada Vrms [V]	Salida Vrms [V]	Atenuacion [dB]
10	0,657	0,76	1,264964454
100	0,72	0,8	0,915149811
200	0,7	0,77	0,827853703
300	0,7	0,76	0,714311045
400	0,7	0,75	0,599264468
500	0,7	0,73	0,364496402
600	0,7	0,718	0,220528085
700	0,7	0,69	-0,124978986
800	0,7	0,6	-1,338935793
900	0,7	0,65	-0,643693667
1000	0,7	0,63	-0,915149811
1200	0,7	0,58	-1,633400929
2000	0,69	0,39	-4,955689674
3000	0,68	0,18	-11,54472815
3500	0,68	0,13	-14,37131121
4000	0,67	0,05	-22,54209597
4500	0,66	0,01	-36,39087871
5000	0,65	0,01	-36,25826713
5500	0,65	0,02	-30,23766722
6000	0,65	0,09	-17,17341694
7000	0,63	0,1	-15,98681099
8000	0,617	0,13	-13,52683623
9000	0,6	0,226	-8,480856225
10000	0,59	0,272	-6,725662152

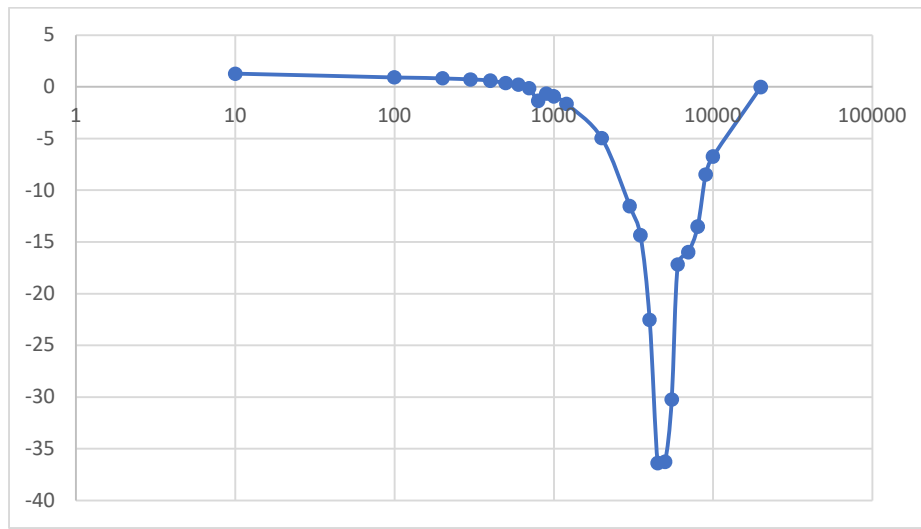
A continuación, se muestran una serie de oscilogramas capturados, los cuales hacen referencia a los puntos más importantes de la transferencia:







Con los datos relevados y tomando como eje X al rango de frecuencias y al eje Y al rango de atenuaciones, los que nos da la curva de transferencia en módulo:



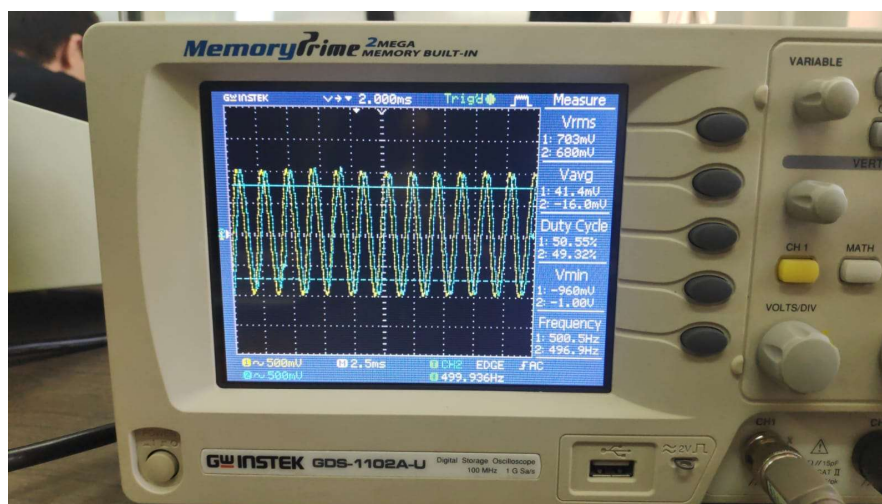
Con respecto a la fase del sistema, debido a problemas en la implementación del workspace utilizado este año se tomó la decisión de no tomar sus mediciones.

## 7.6 Medición de IIR BUTTERWORTH en modo IIR

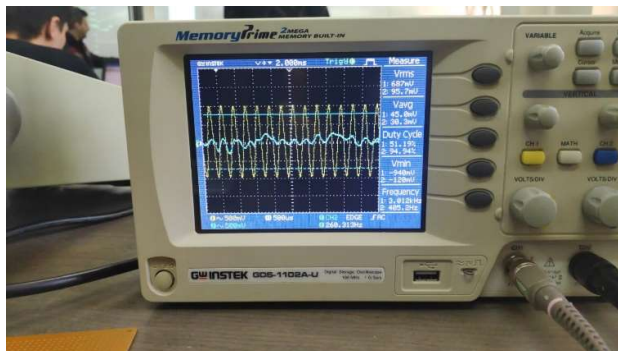
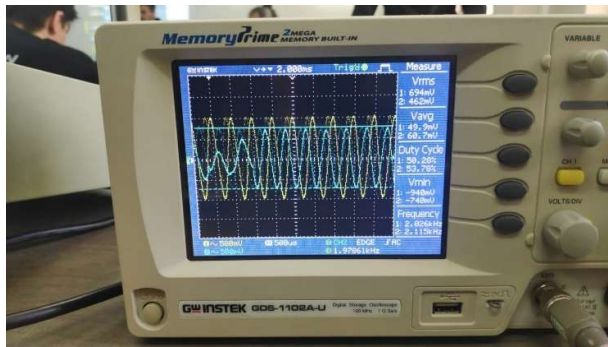
Mediciones realizadas:

Frecuencia [Hz]	Entrada Vrms [V]	Salida Vrms [V]	Atenuacion [dB]
10	0,65	0,68	0,391911121
100	0,722	0,709	-0,157819248
200	0,705	0,725	0,242977792
300	0,703	0,698	-0,061998048
400	0,703	0,688	-0,187337736
500	0,7	0,683	-0,213546727
600	0,7	0,67	-0,380464746
700	0,7	0,66	-0,511082089
800	0,7	0,65	-0,643693667
900	0,7	0,64	-0,778361321
1000	0,7	0,636	-0,832818487
1200	0,7	0,61	-1,1953641
1400	0,7	0,58	-1,633400929
1600	0,7	0,554	-2,031765506
1800	0,7	0,513	-2,699613498
2000	0,7	0,5	-2,922560714
2500	0,693	0,23	-9,580107972
3000	0,688	0,05	-22,77236868
3200	0,68	0,035	-25,76881737
3500	0,68	0,02	-30,62957834
3800	0,68	0,015	-33,12835307
4000	0,68	0,01	-36,65017825
5000	0,68	0,005	-42,67077817

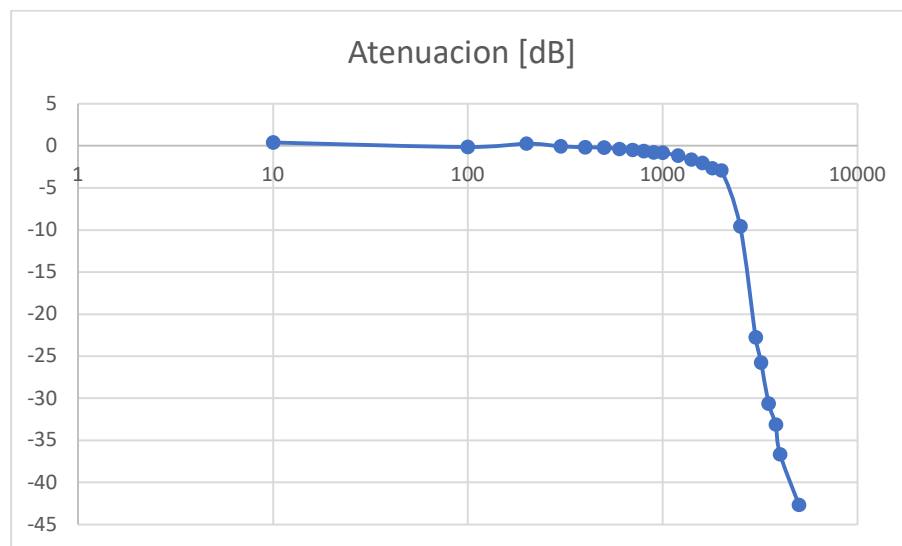
A continuación, se muestran una serie de oscilogramas capturados, los cuales hacen referencia a los puntos más importantes de la transferencia:







Con los datos relevados y tomando como eje X al rango de frecuencias y al eje Y al rango de atenuaciones, los que nos da la curva de transferencia en módulo:



Con respecto a la fase del sistema, debido a problemas en la implementación del workspace utilizado este año se tomó la decisión de no tomar sus mediciones.

## 7.7 Medición con analizador

Luego, se realizó una toma de mediciones “automática” utilizando como instrumental un analizador de audio, cuyo modelo es el siguiente:



Con este analizador de audio, se conectaron 3 canales: una señal inyectora en la entrada del filtro (simulando el generador), y 2 canales de toma de muestras, simulando los dos canales de un osciloscopio los cuales se conectaron a la entrada y a la salida del filtro respectivamente.

El setup utilizado fue el siguiente:

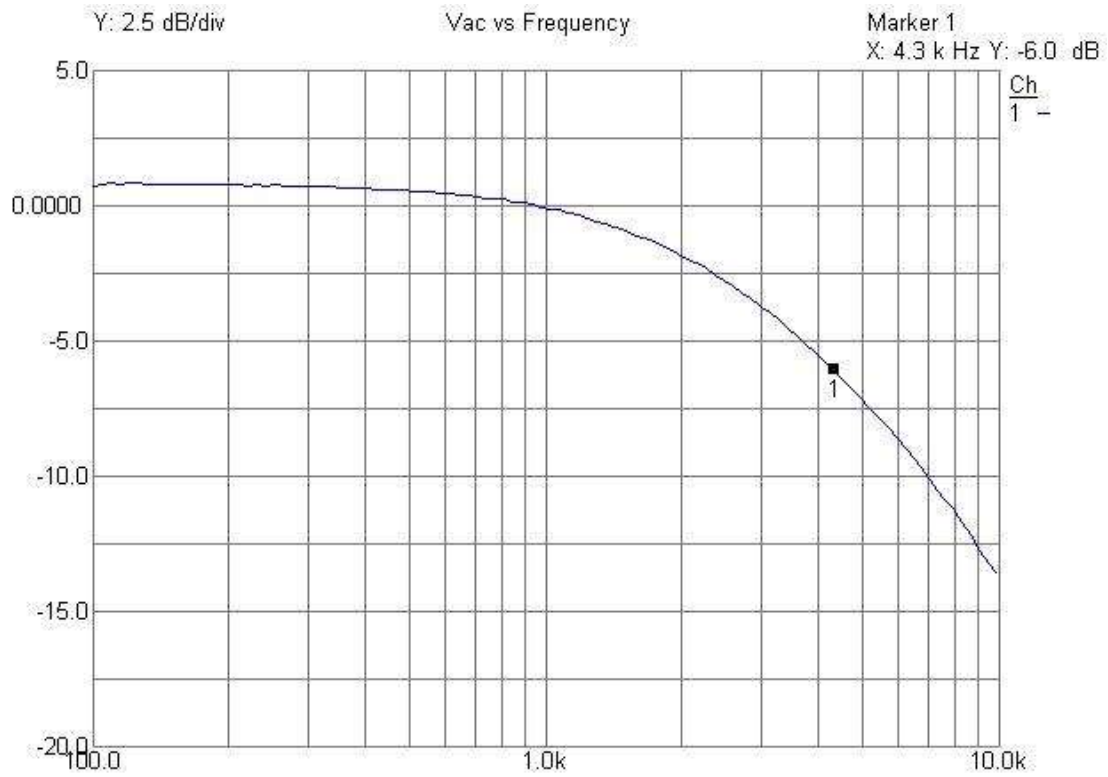
Una vez realizada las conexiones correspondientes, se realizó la configuración del equipo, entre las cuales se realizó la configuración de los tipos de mediciones a realizar (modulo, fase) y los puntos de muestreo, principalmente.

Luego, las mediciones se exportaron a imagen y hacia un archivo csv, para tener los datos.

Las curvas brindadas por el dispositivo fueron las siguientes:

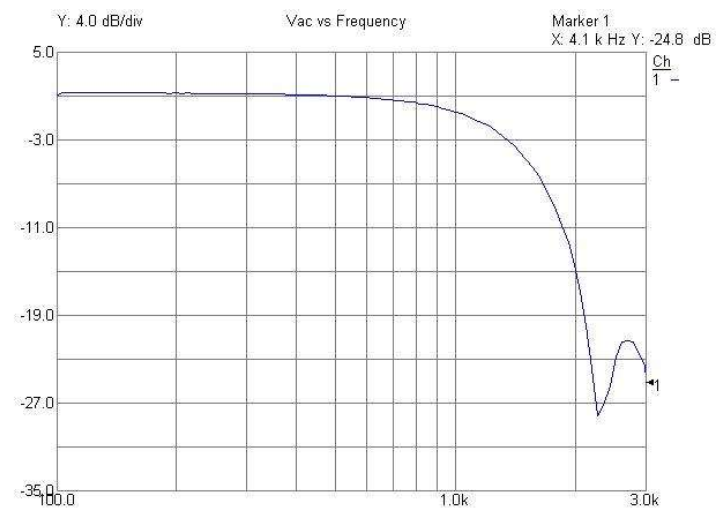
## TALKTHROUGH

### Gráfico de módulo



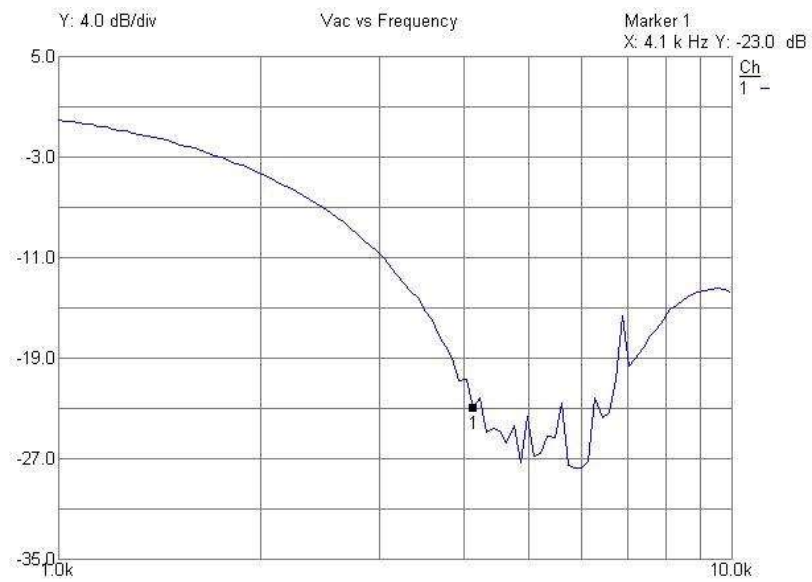
## FIR EQUI RIPPLE

### Gráfico de módulo



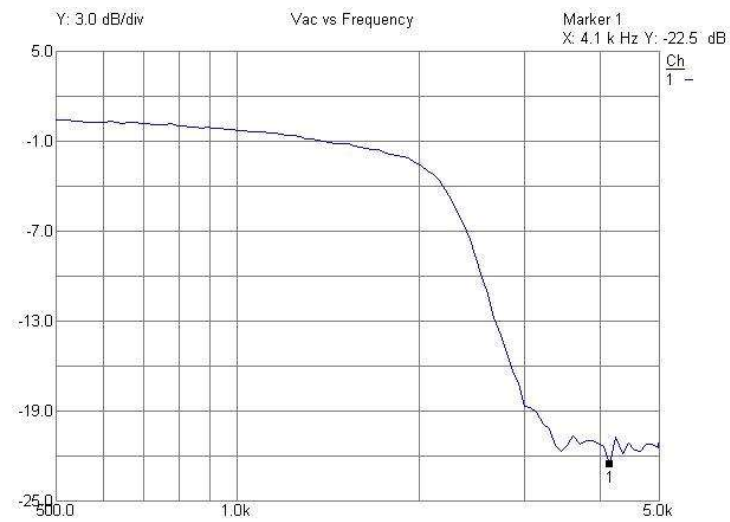
## FIR LEAST SQUARES

### Gráfico de módulo



## IIR BUTTERWORTH

### Gráfico de módulo



Las mediciones de modulo realizadas se encuentran en el siguiente directorio:

**Mediciones\Analizador\**

## **8 Datasheets**

Las hojas de datos de los principales componentes y equipos utilizados se encuentran en el siguiente directorio:

**Datasheets**

## 9 Conclusiones

Como conclusión, en general, se logró cumplir con los objetivos del trabajo practico. Con mi grupo pudimos llevar a cabo el diseño de todos los filtros, diseño y carga de los filtros digitales, pruebas en laboratorio abierto, y posterior toma de mediciones.

Sin embargo, debo remarcar que la implementación de filtros digitales sobre hardware es bastante mas complicada que a nivel de software con procesamiento de señales. Es por eso, que, en nuestro caso, por ejemplo, demoramos en tomar las mediciones, ya que requerimos en principio realizar todas las comprobaciones pertinentes al laboratorio y al funcionamiento del MCU.

A pesar de estas “complicaciones”, pudimos visualizar y entender lo visto teóricamente en clase sobre el diseño directo de filtros digitales, y comprobar empíricamente su utilización.

## **10 Bibliografía**

Las principales fuentes de bibliografía fueron las hojas de datos previamente enunciadas.

También, se utilizaron todos los recursos disponibles de la materia, como tareas semanales realizadas, simulaciones previas realizadas, etc.