



Título:	TP LAB 2			
---------	----------	--	--	--

Ciclo Lectivo 2023	Curso N°	4001	Grupo N°	1
--------------------	----------	------	----------	---

Alumna	Legajo	Calificación individual	Fecha
Nuñez, Ana	175.599-7		21/10/2023
Lugano, Damián Gabriel	175.699-0		
Fiasche, Nahuel Facundo	175.647-3		

Calificación:		Fecha:
---------------	--	--------

Profesor:	Llamedo Soria, Mariano
-----------	------------------------

Observaciones primera entrega	
Observaciones segunda entrega	



Contents

1	Introducción	4
2	Objetivos	5
3	Desarrollo en MATLAB	5
3.1	Código	5
3.2	Resultados plantilla A	6
3.3	Resultados plantilla B	7
3.4	Resultados plantilla C	9
4	Resolución circuital	11
4.1	Diagrama en bloques y planificación	11
4.2	Cálculo de los componentes para los filtros pasivos.....	12
5	Simulación circuital	13
6	Armado del circuito	14
6.1	Bill of Materials (BOM).....	15
6.2	Diagrama y esquema de conexión.....	15
6.3	Laboratorio abierto	16
7	Laboratorio.....	17
7.1	Armado y calibración	17
7.2	Medición de módulo	19
7.3	Resultado de las mediciones	20
8	Medición con el analizador de audio	23
8.1	Resultados de la medición con el analizador de audio.....	23
8.2	Diagrama de tiempos.....	26



9	Análisis de los resultados	26
10	Conclusión	30
11	Anexo	32
11.1	[1] Datasheet LPC1769 LPCXpresso	32
11.2	Instrumental utilizado	32
11.3	Librería CMSIS-DSP	32
11.4	Workspace	32
11.5	Link al repositorio de github	32



1 Introducción

El trabajo práctico consiste en el diseño, análisis, medición y discusión de tres filtros digitales. Dichos filtros estan dados por la siguiente plantilla:

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

La plantilla A especifica que la frecuencia de corte es menor a la frecuencia de stop, por lo tanto, se trata de un filtro pasa-bajos FIR Equiripple. Por otro lado, la plantilla B también se trata de un filtro FIR, sin embargo, este es del tipo Least Squares y dado que las frecuencias relevantes se encuentran en el orden $fp ; fs ; fs ; fp$, se trata de un eliminabanda. Finalmente, la plantilla C, al igual que la A, describe un filtro pasa bajos, sin embargo, se trata de un filtro IIR Butterworth.

La implementación práctica debe hacerse con el LPC1769 LPCXpresso [1], el cual posee un conversor analógico/digital y otro digital/analógico.



2 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.

3 Desarrollo en MATLAB

3.1 Código

Para realizar el diseño de los filtros de manera óptima y sencilla, se utilizó la herramienta de MATLAB “FDAtool”, o “filterDesigner” según la versión, y se completaron los casilleros con los datos de cada plantilla.

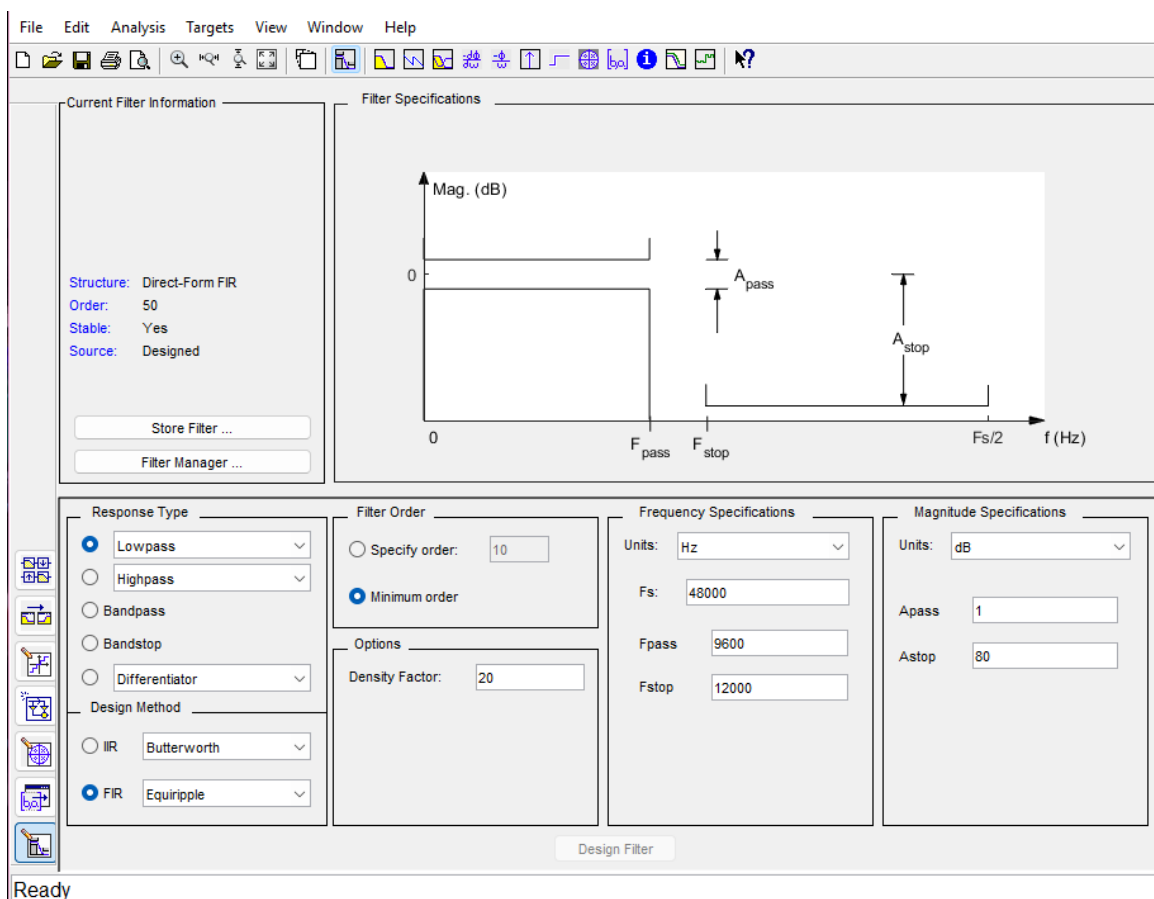


Figura 3.1.1 – Interfaz de la herramienta utilizada para diseñar



Nota: todos los coeficientes obtenidos se encuentran en el Anexo dentro del repositorio de github [5].

3.2 Resultados plantilla A

El filtro pasabajos FIR Equiripple diseñado posee la siguiente respuesta de módulo, fase, retardo de grupo y diagrama de polos y ceros. Cabe destacar que se utilizó la opción de mínimo orden, en este caso, $N = 38$.

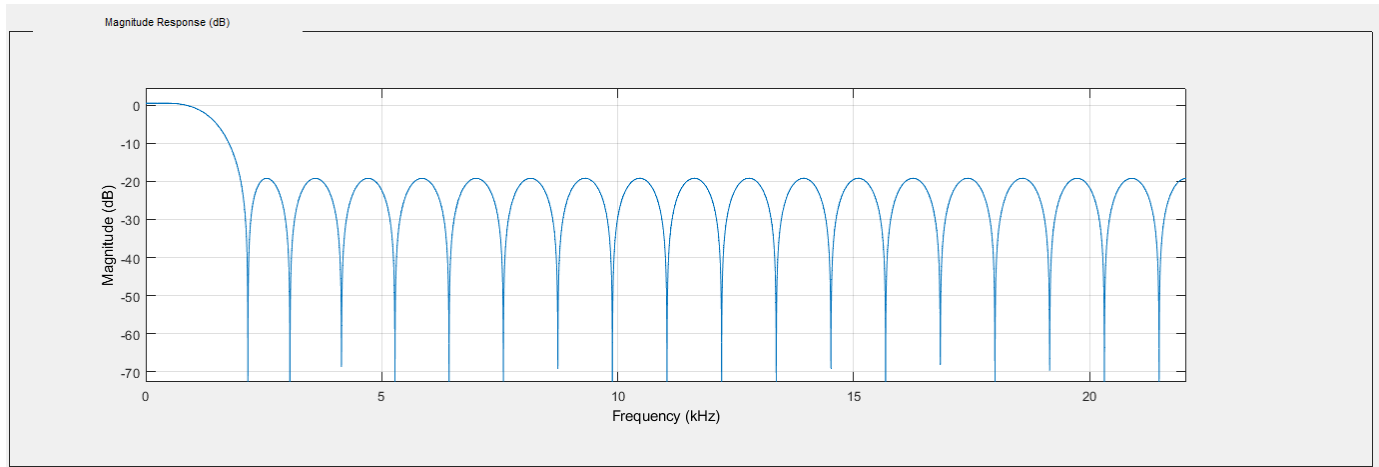


Figura 3.2.1 - Respuesta de módulo

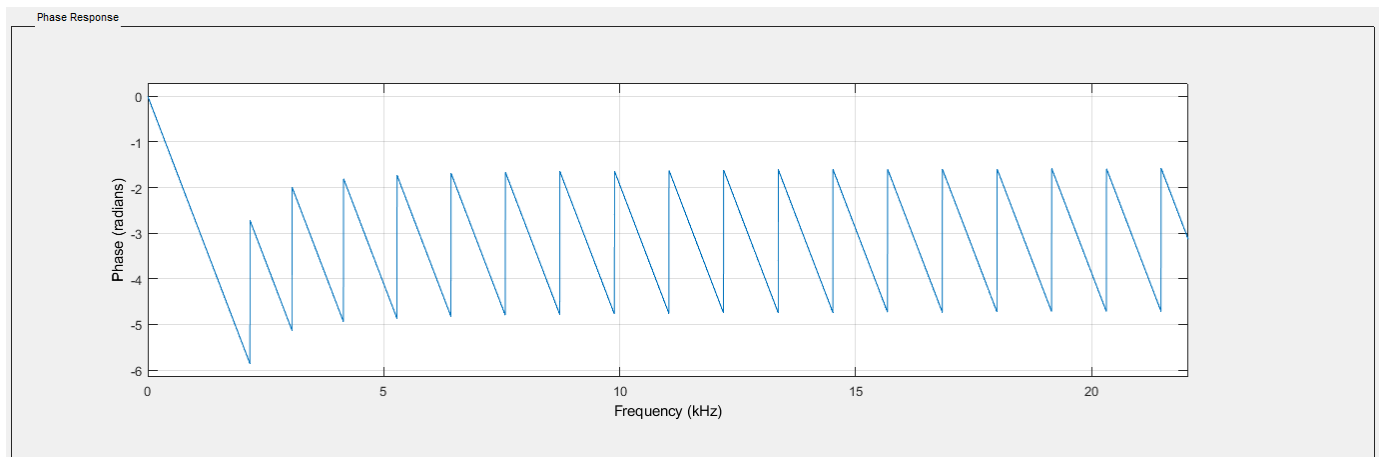


Figura 3.2.2 - Respuesta de fase

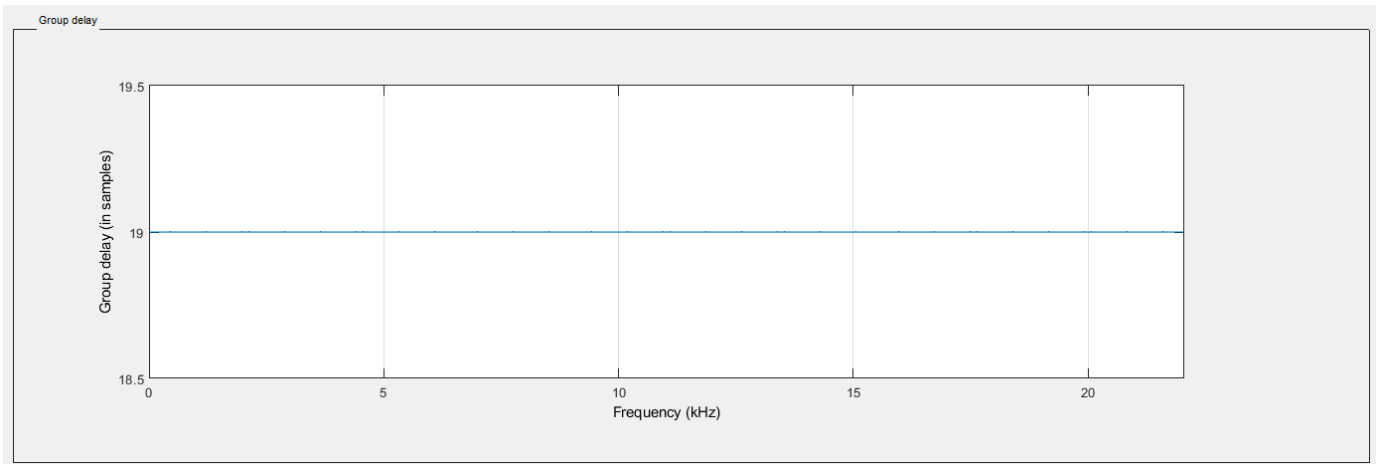


Figura 3.2.3 - Retardo de grupo

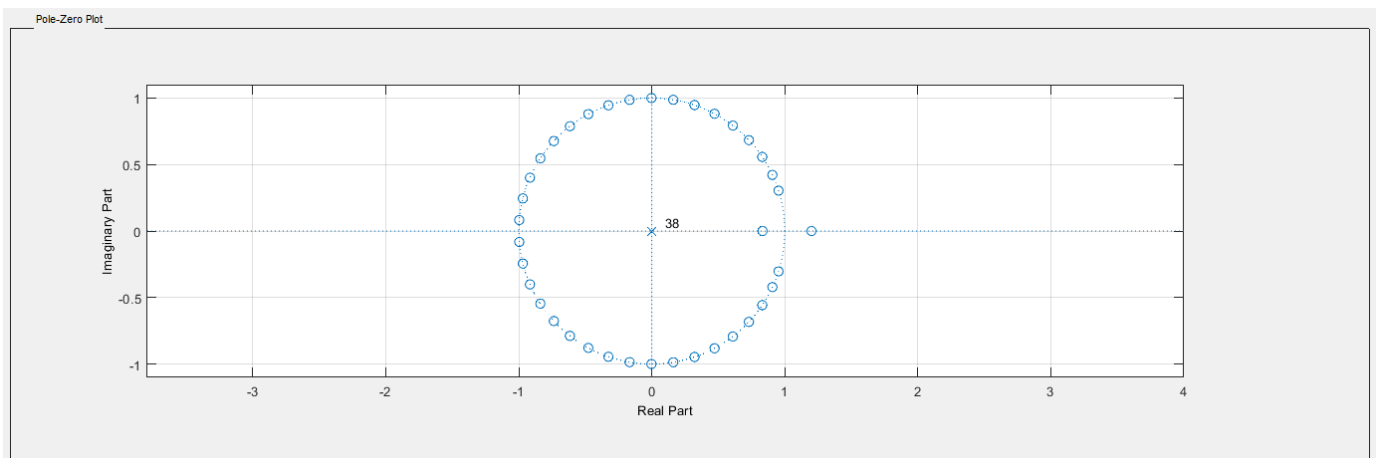


Figura 3.2.4 - Diagrama de polos y ceros

3.3 Resultados plantilla B

El filtro eliminabanda FIR Least Squares posee la siguiente respuesta de módulo, fase, retardo de grupo y diagrama de polos y ceros. Se seleccionó $N = 40$.

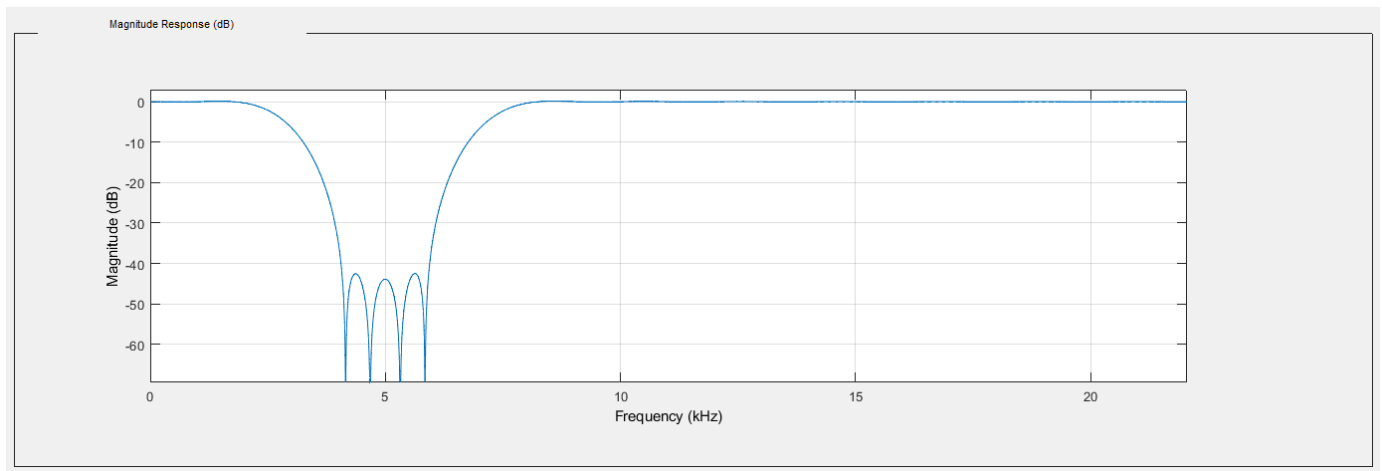


Figura 3.3.1 - Respuesta de módulo

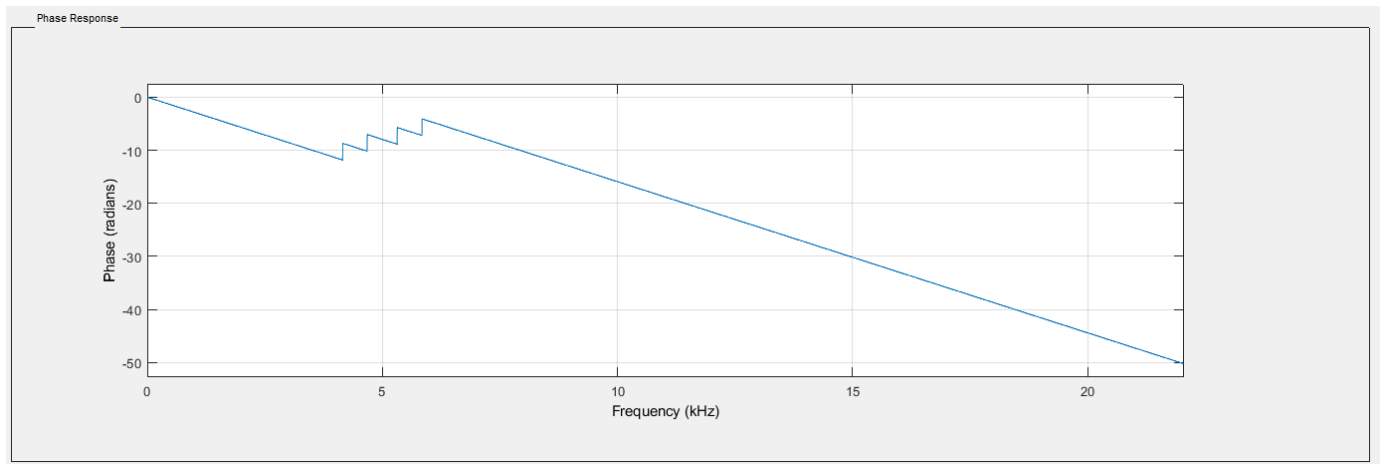


Figura 3.3.2 - Respuesta de fase

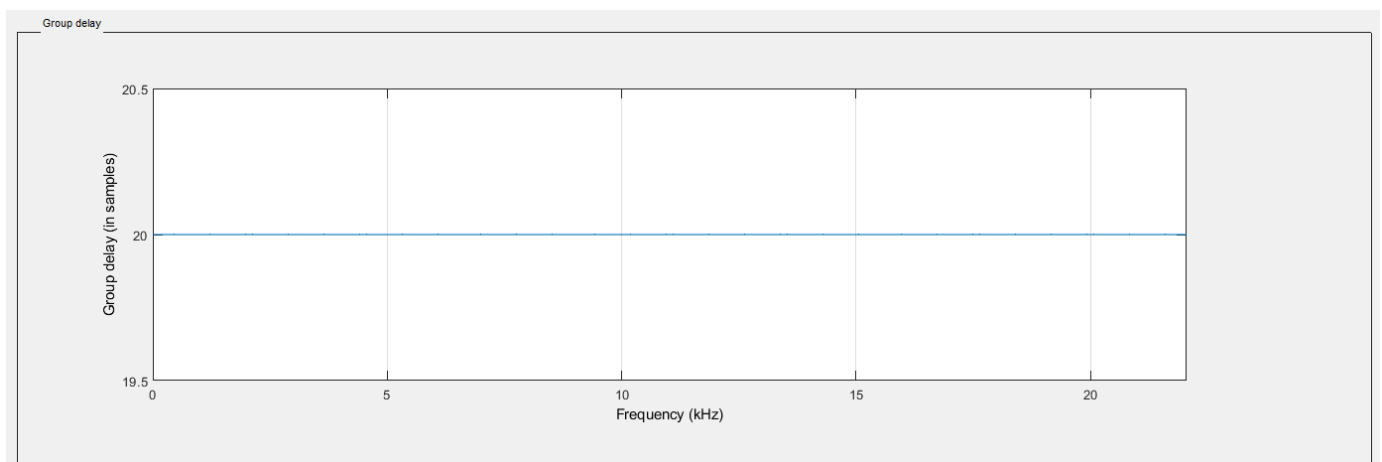


Figura 3.3.3 - Retardo de grupo

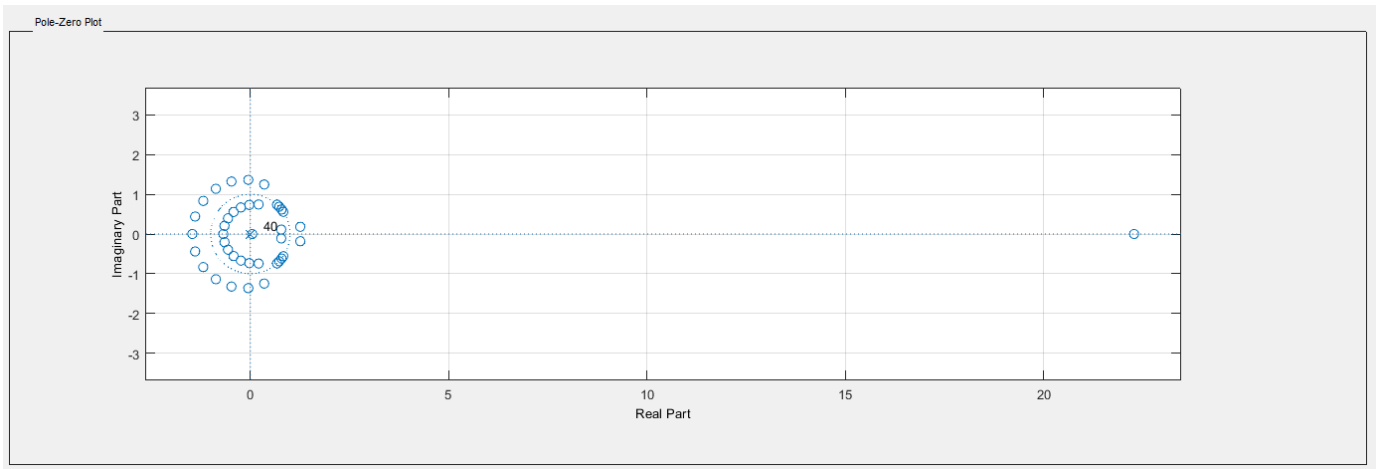


Figura 3.3.4 - Diagrama de polos y ceros

3.4 Resultados plantilla C

El filtro pasabajos IIR Butterworth diseñado posee la siguiente respuesta de módulo, fase, retardo de grupo y diagrama de polos y ceros. . Cabe destacar que se utilizó la opción de mínimo orden, en este caso, $N = 4$.

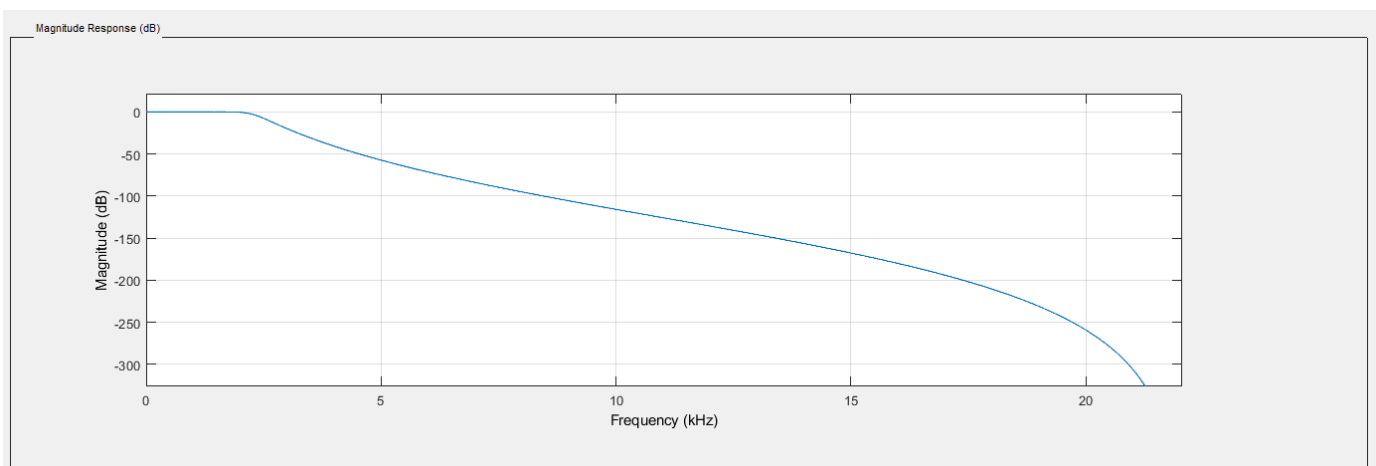


Figura 3.4.1 - Respuesta de módulo

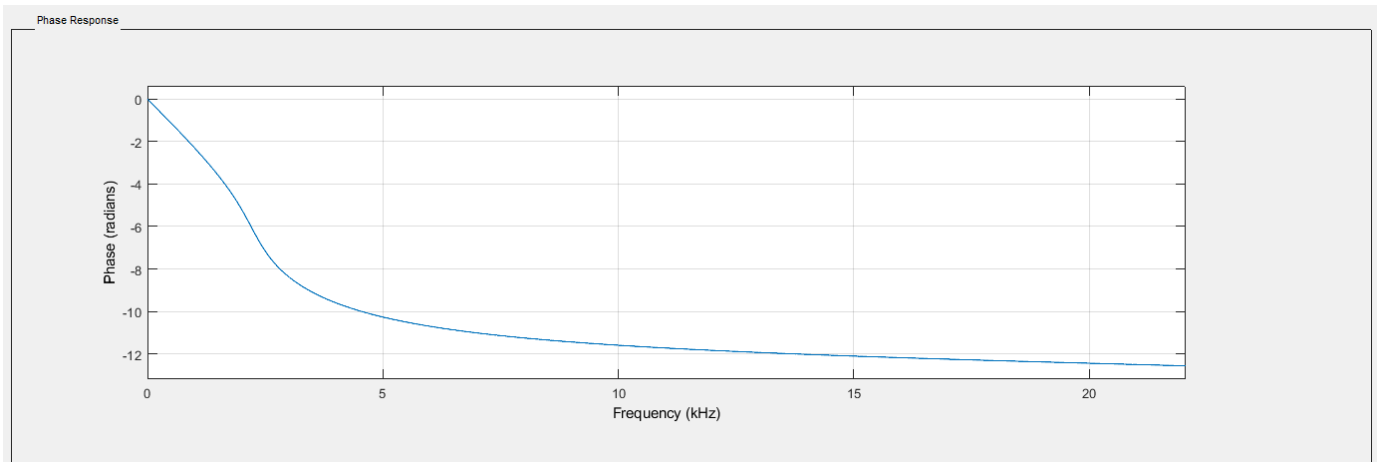


Figura 3.4.2 - Respuesta de fase

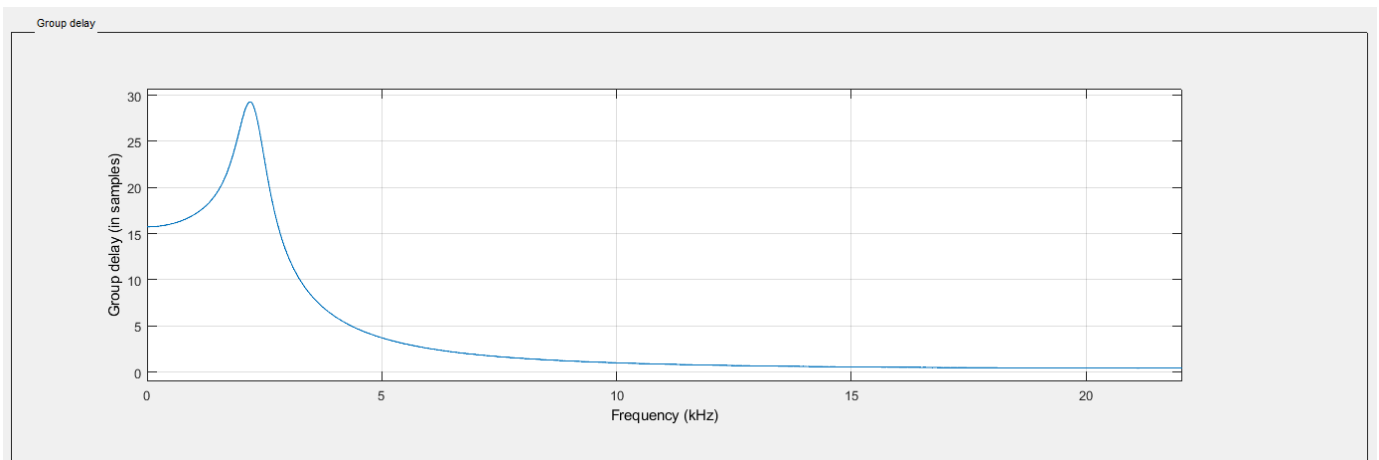


Figura 3.4.3 - Retardo de grupo

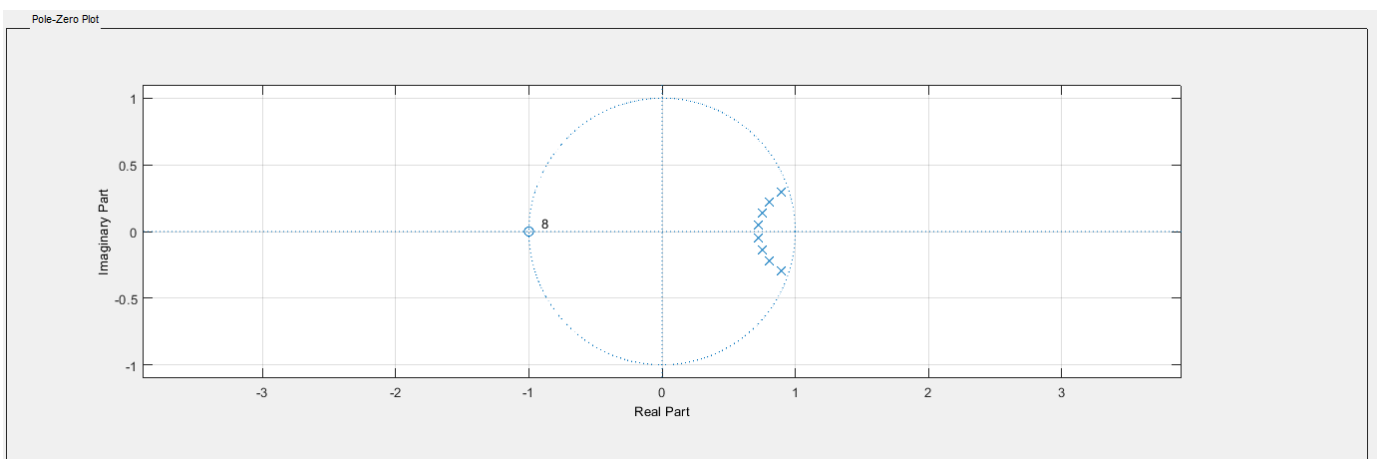


Figura 3.4.4 - Diagrama de polos y ceros



4 Resolución circuital

4.1 Diagrama en bloques y planificación

Para la implementación circuital del circuito, se propuso utilizar dos filtros pasivos RC (resistencia-capacitor) para resolver los filtros Anti-Alias y de interpolación. Se cargaron en el LPC1769 LPCXpresso los coeficientes a_n y b_n de los filtros diseñados utilizando el programa “MCU expresso” y el código otorgado por la cátedra.

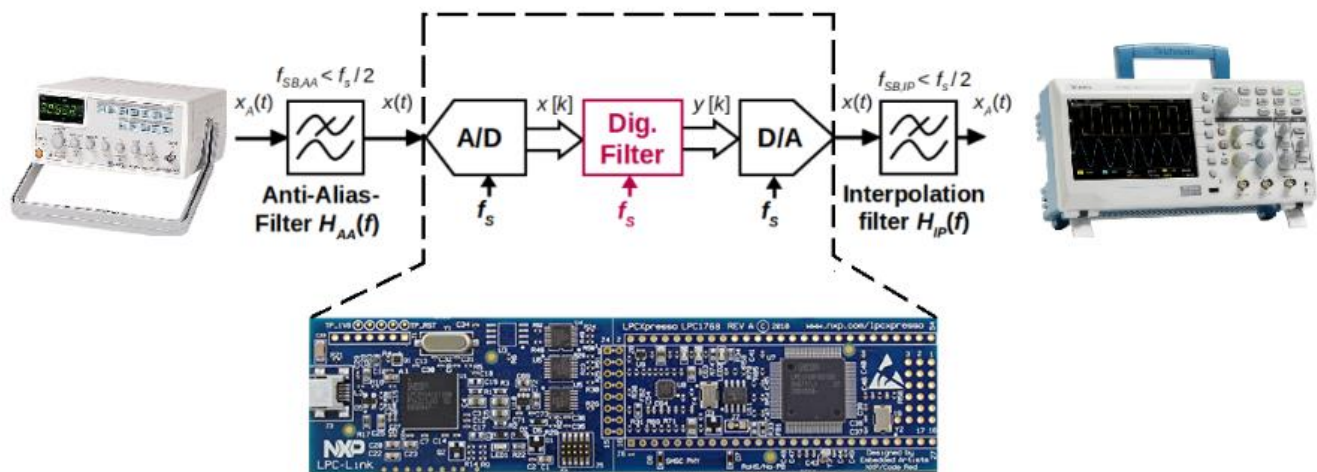


Figura 4.1.1 - Diagrama en bloques de la implementación de los filtros

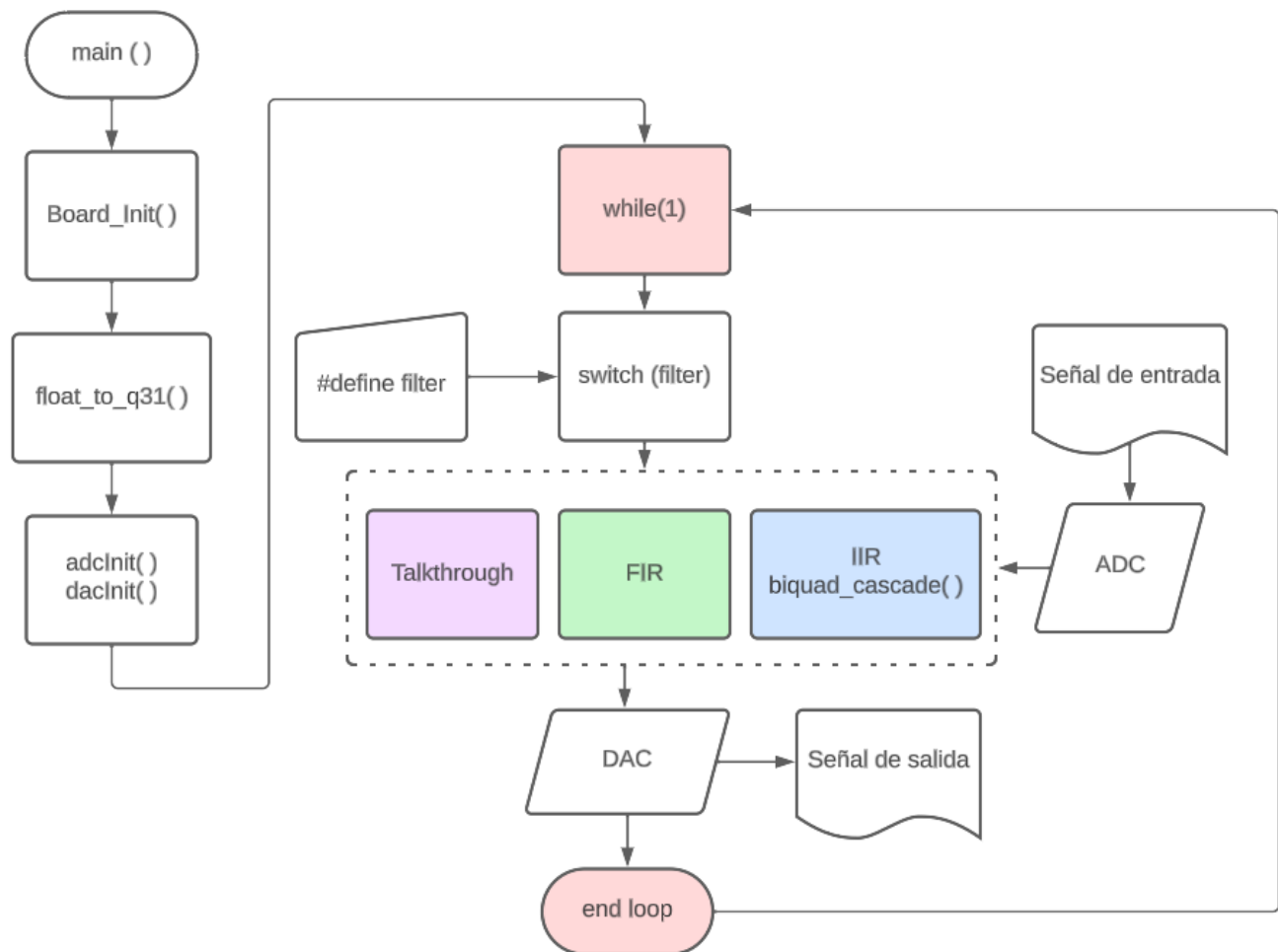


Figura 4.1.2 – Diagrama en bloques del código

4.2 Cálculo de los componentes para los filtros pasivos

Para poder ingresar la señal proveniente del generador de funciones correctamente en el procesador, se deberá colocar el ya mencionado filtro anti-alias a la entrada. Además, se deberá proporcionar un nivel de continua donde montar la señal de manera que quede en el medio del rango dinámico de la entrada del ADC de 3,3V, es decir, el nivel de continua deberá ser de 1,65V. En la salida, basta con replicar el filtro de entrada.

El criterio de diseño para el filtro pasabajos anti-alias implica que su frecuencia de corte debe situarse por debajo de $f_s/2 \cong 22\text{KHz}$ pero por encima de las frecuencias de interés de los filtros digitales. En consecuencia, si se pretende que el diseño sea válido para los tres casos, es necesario seleccionar una frecuencia de corte que esté también por encima de 8 kHz. Considerando estos factores, se seleccionó que



la frecuencia de corte para el filtro pasabajos sea de alrededor de 12 kHz. Además, se decidió implementarlo como pasivo, dado que no se requiere amplificación y su implementación resulta más sencilla. La fórmula de frecuencia de corte para un filtro pasabajos RC se expresa como:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Para su diseño, se realizó una iteración con valores de componentes comerciales hasta alcanzar la frecuencia deseada. En este caso específico, se eligió utilizar una resistencia de 1,2KΩ y un capacitor de 10nF. De esta manera, la frecuencia de corte del filtro se calculó como

$$f_c = \frac{1}{2\pi * 1.2K\Omega * 10nF} = 13.26KHz$$

5 Simulación circuital

Se analizó el valor del módulo de los filtros en las frecuencias relevantes al análisis en MATLAB para poder compararlo con el del laboratorio y se volcaron en una tabla.

FIR Equiripple		FIR Least Squares		IIR Butterworth	
Frecuencia [KHz]	Modulo [dB]	Frecuencia [KHz]	Modulo [dB]	Frecuencia [KHz]	Modulo [dB]
0,5	0,4951	1	0	0,5	0
0,9	-0,1765	1,5	0,1	1	0
1	-0,57	1,9	-0,158	1,5	0
1,1	-1,1	2	-0,32	1,9	-0,24
1,3	-2,6	2,1	-0,54	2	-0,54
1,5	-4,97	3	-6,53	2,1	-1,11
1,7	-8,57	3,9	-28,62	2,5	-7,8
1,9	-14,42	4	-34,84	2,9	-17,58
2	-19,38	4,1	-46	3	-20
2,1	-28,15	5	-43,9	3,1	-22,3
2,15	-42,125	5,9	-45,66	3,5	-31
2,2	-34	6	-34,76	-	-
2,5	-19,4	6,1	-28,64	-	-
3	-35	7	-6,64	-	-
5	-22,4	7,9	-0,63	-	-
-	-	8	-0,38	-	-
-	-	8,1	-0,2	-	-
-	-	9	0,018	-	-
-	-	10	0	-	-

Tabla 5.1 – Valor del módulo para los tres filtros



6 Armado del circuito

La conexión de la salida del filtro anti-aliasing se dirigirá al pin ADC_IN, mientras que la salida del filtro digital se manifestará en el pin DAC_OUT. Este último se conectará a la entrada del filtro de interpolación, permitiendo así la medición de la señal resultante en la salida mediante el osciloscopio.

Las conexiones con el stick se detallan a continuación:

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

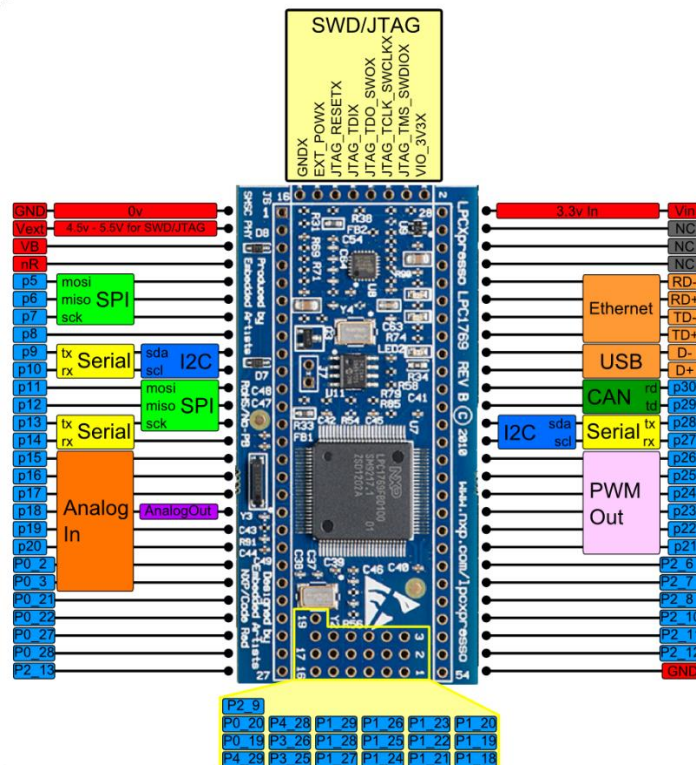


Figura 4.2.1 - Pinout del LPCXpresso1769



6.1 Bill of Materials (BOM)

Una vez seleccionados los componentes, se armó la tabla de materiales utilizados junto a sus respectivos precios.

Bill of Materials			
Componente	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Res 1,2K - 1/2W - 5%	2	\$ 14,00	\$ 28,00
Cap 10nF -50V	2	\$ 10,00	\$ 20,00
LPC1769 LPCXpresso	1	\$ 95.451,00	\$ 95.451,00
Cantidad de componentes total		5	
Presupuesto Total		\$ 95.499,00	

Figura 6.1.1 - Bill of Materials

6.2 Diagrama y esquema de conexión

Se realizó un esquema de conexión con el objetivo de esclarecer el proceso de medición.

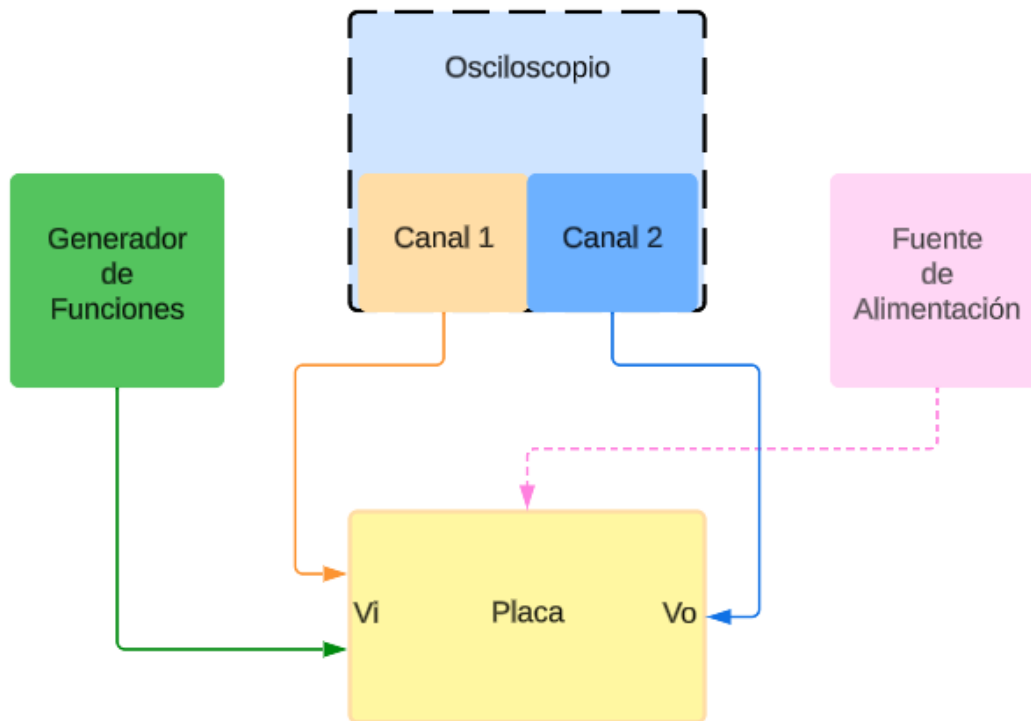


Figura 6.2.1 - Esquema de conexionado general

6.3 Laboratorio abierto

El 11/10 se llevó a cabo la primera prueba del sistema en el laboratorio abierto con el objetivo de descartar posibles errores de diseño en los filtros analógicos, digitales o en el software. En primer lugar, se realizaron pruebas en el modo TALKTHROUGH, que opera como un seguidor digital reproduciendo en la salida lo que el micro percibe en la entrada. Este modo permite verificar el correcto funcionamiento de los filtros anti-alias e interpolación. Los resultados obtenidos fueron conforme a lo esperado. No obstante, se observó que, al aumentar la frecuencia de la señal de entrada, la señal de salida experimentaba una atenuación creciente inesperada. Este fenómeno puede explicarse debido a que los filtros de entrada, el digital y el de salida, están en cascada, multiplicando sus ganancias o atenuaciones. En este caso, ambos filtros analógicos presentan una atenuación de 3dB a 13KHz, por lo que la señal a la salida debería tener una atenuación de 6dB aproximadamente a esa frecuencia. Sin embargo, esta atenuación comienza a tener efecto una década antes, a 3KHz, lo que resulta en una atenuación significativa para frecuencias mayores.

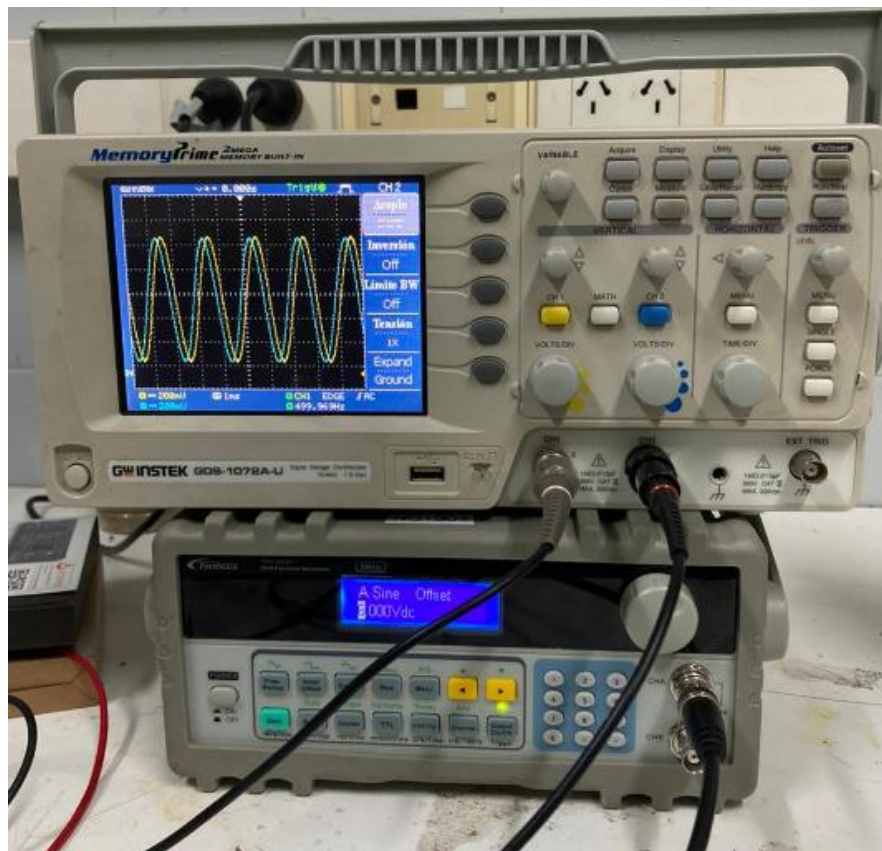


Figura 6.3.1 – Modo Talkthrough para una senoidal $V_{pp}=1V$ de 500Hz

En cuanto a la medición de los filtros FIR, se observó que la atenuación en la banda de stop era 14dB, es decir menos de los 20dB esperados. Sin embargo, se descartó un error de diseño ya que en MATLAB dicha atenuación cumple con la plantilla de ambos filtros. Por último, al probar el filtro IIR en la banda de paso, se notó que la señal de salida no se parecía en nada a la señal de entrada, sino que parecía ruido. Por lo tanto, se consultó con otro grupo para validar los valores de los coeficientes y descartar un posible error de diseño. Una vez hecha la comparación, se determinó que el valor de los coeficientes eran aproximadamente los mismos. Sin embargo, se identificó un error en el signo de los coeficientes del denominador. El programa de diseño de MATLAB los proporciona con el signo opuesto al necesario para que la librería CMSIS-DSP pueda interpretarlos correctamente.

7 Laboratorio

7.1 Armado y calibración

El día del laboratorio, se conectaron los terminales de la placa tal como se había hecho en la última prueba. Se calibraron las puntas del osciloscopio y se verificó el correcto funcionamiento del generador de señales.



Se conectó el canal 1 del osciloscopio (amarillo) a la señal de entrada y el canal 2 (celeste) a la salida del filtro.

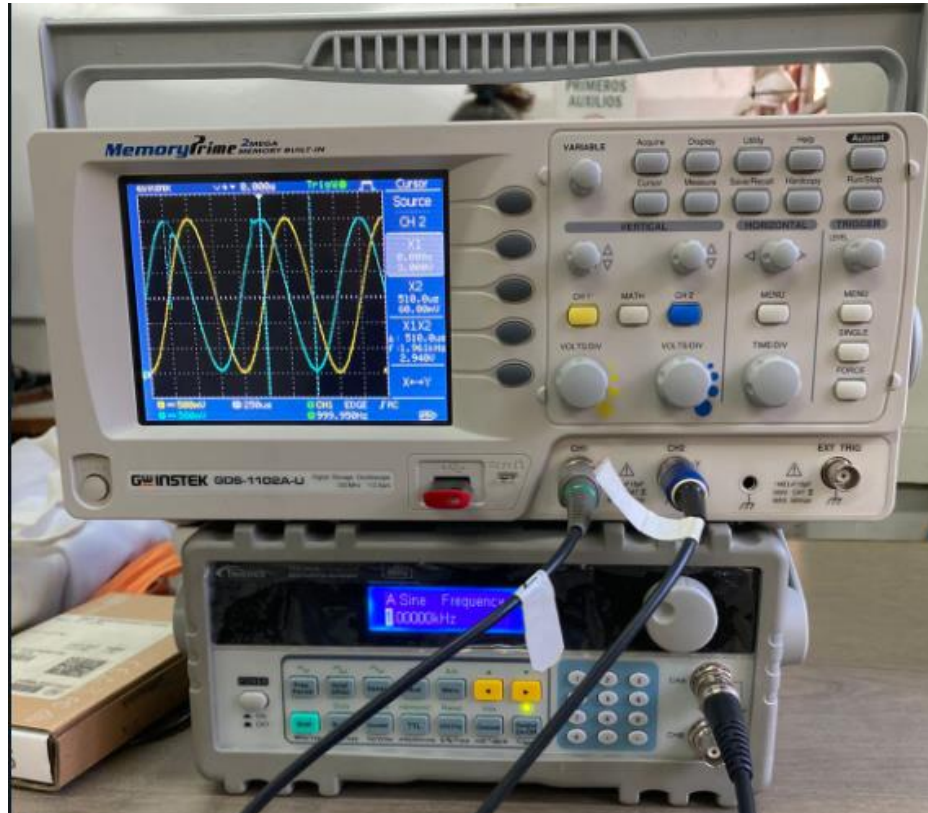


Figura 7.1.1 - Set Up de medición

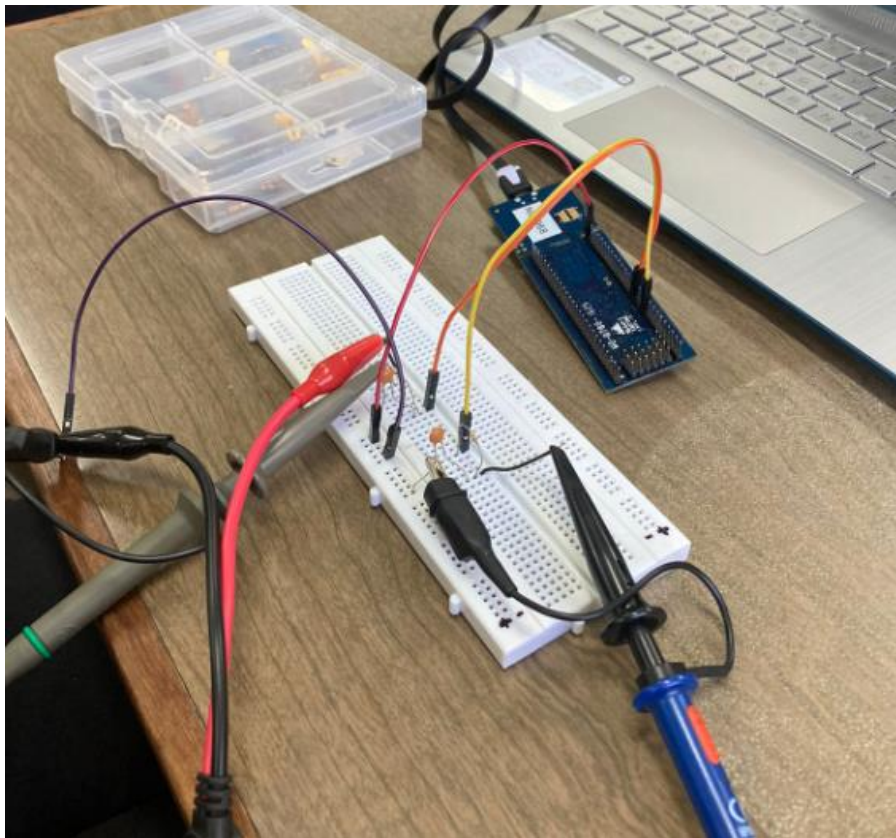


Figura 7.1.2 – Conexionado

Al igual que en el laboratorio abierto, primero se verificó que el sistema funcione correctamente en modo TALKTHROUGH. Sin embargo, en este caso, además de presentar la atenuación, ahora ya esperada, también se observó que la señal a la salida para frecuencias altas (cercanas a la frecuencia de corte del filtro analógico) estaba muy deteriorada.

Luego de verificar que este error no se debiera al instrumental utilizado, se concluyó que la señal a la salida del stick no era lo suficientemente estable como para que en el osciloscopio se pueda observar una señal limpia. Para solucionar este problema, se configuró al instrumental para que haga un promedio de 32 mediciones.

Cabe destacar que no se realizaron mediciones de fase ya que la variación entre muestras era muy grande.

7.2 Medición de módulo

Dado que las mediciones automáticas del osciloscopio no siempre son confiables, para realizar las mediciones de módulo y fase se utilizaron los cursores. Se coloca uno de los cursores en el valor pico positivo y el otro en el pico negativo y se lee el valor de la diferencia en la sección “X1X2”

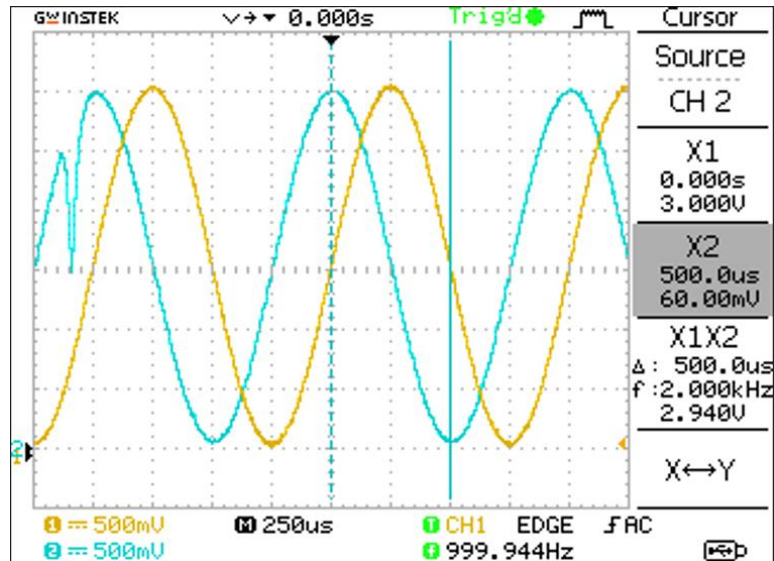


Figura 7.2.1 – Referencia de medición de módulo

7.3 Resultado de las mediciones

A continuación, se adjuntan los resultados de las mediciones. Se puede visualizar la tabla completa en la carpeta “Informe\Mediciones y extras\Tabla_de_mediciones.xlsx”

FIR Equiripple			
Frecuencia [KHz]	Vi [Vpp]	Vo[Vpp]	Ganancia [dB]
0,5	2,5	2,6	0,340666786
0,9	2,5	2,44	-0,211003647
1	2,5	2,36	-0,500560114
1,1	2,5	2,26	-0,87663139
1,3	2,5	1,94	-2,202765575
1,5	2,5	1,5	-4,436974992
1,7	2,5	1,12	-6,97443972
1,9	2,5	0,68	-11,30862192
2	2,5	0,488	-14,19040373
2,1	2,5	0,3	-18,41637508
2,15	2,5	0,2	-21,93820026
2,2	2,5	0,138	-25,16121845
2,5	2,5	0,19	-22,38372815
3	2,5	0,16	-23,87640052
5	2,5	0,21	-21,51441428



FIR Least Squares			
Frecuencia [KHz]	Vi [Vpp]	Vo[Vpp]	Ganancia [dB]
1	2,5	2,4	-0,354575339
1,5	2,5	2,48	-0,069766557
1,9	2,5	2,4	-0,354575339
2	2,5	2,46	-0,140098031
2,1	2,5	2,42	-0,282492854
3	2,5	1,74	-3,147815208
3,9	2,5	0,68	-11,30862192
4	2,5	0,624	-12,05510838
4,1	2,5	0,536	-13,37550438
5	2,5	0,436	-15,16907039
5,9	2,5	0,436	-15,16907039
6	2,5	0,44	-15,08974664
6,1	2,5	0,45	-14,8945499
7	2,5	0,51	-13,80739665
7,9	2,5	0,72	-10,81215024
8	2,5	0,8	-9,897000434
8,1	2,5	0,85	-9,370421659
9	2,5	1	-7,958800173
10	2,5	1	-7,958800173

IIR Butterworth			
Frecuencia [KHz]	Vi [V]	Vo [Vpp]	Ganancia [dB]
0,5	2,5	2,42	-0,282492854
1	2,5	2,42	-0,282492854
1,5	2,5	2,36	-0,500560114
1,9	2,5	2,36	-0,500560114
2	2,5	2,32	-0,649040476
2,1	2,5	2,24	-0,953839807
2,5	2,5	1,368	-5,237078226
2,9	2,5	0,48	-14,33397543
3	2,5	0,37	-16,59476569
3,1	2,5	0,28	-19,01563955
3,5	2,5	0,1	-27,95880017



Para facilitar la lectura de los resultados, se los vuelca en los siguientes gráficos junto a las mediciones esperadas obtenidas a partir de la simulación en MATLAB.

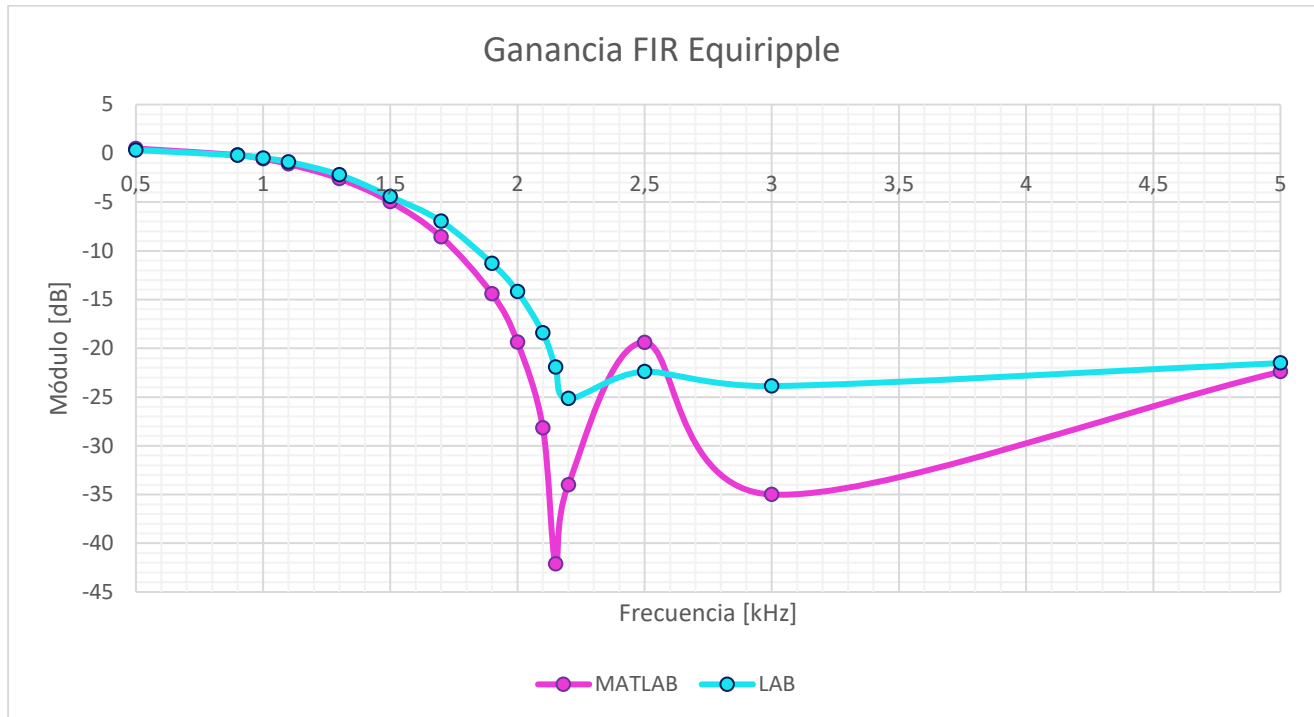


Figura 7.3.1 – Gráfico del módulo en escala logarítmica del filtro FIR Equiripple

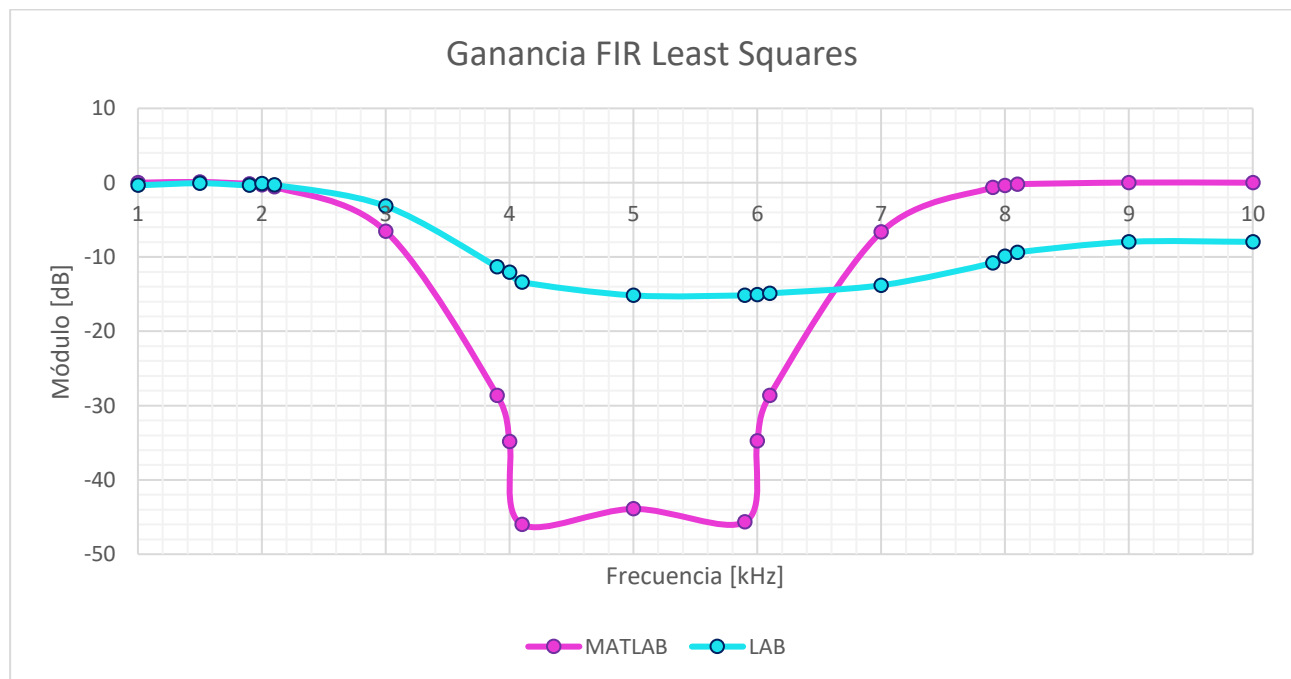


Figura 7.3.2 – Gráfico del módulo en escala logarítmica del filtro FIR Least Squares

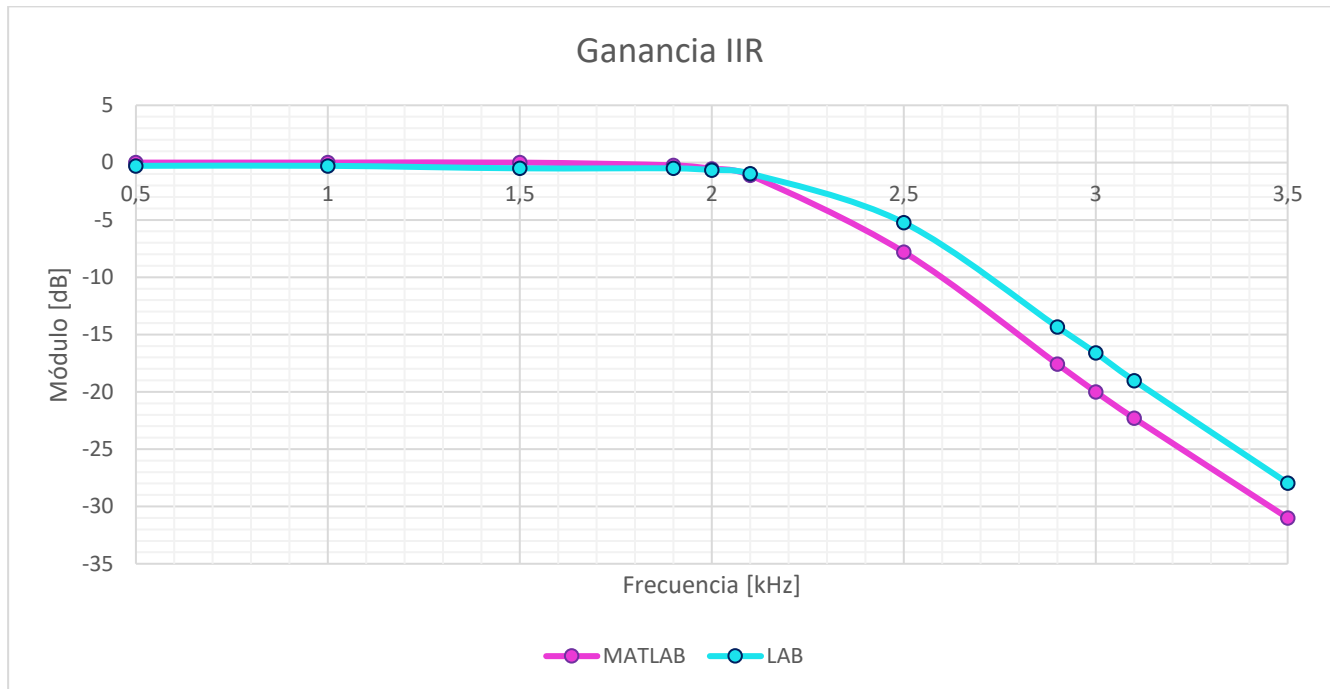


Figura 7.3.3 – Gráfico del módulo en escala logarítmica del filtro IIR Butterworth

Se observa que para altas frecuencias se debe realizar una corrección en la ganancia ya que existe una atenuación como consecuencia de los filtros RC.

8 Medición con el analizador de audio

Se realizó la medición con el analizador de audio para hacer un análisis más detallado de los filtros, este reconstruye la respuesta en frecuencia del sistema a partir de una serie de muestras. Para obtener el módulo de la respuesta en frecuencia del filtro, se configuró al equipo para que tome 100 muestras en un rango de frecuencias entre 100Hz y 10KHz para la configuración Talkthrough. Al obtener el valor de ganancia en esta configuración, se pueden corregir los valores obtenidos en el resto de las configuraciones.

Luego se hicieron 100 mediciones para un rango más acotado de frecuencias, entre 100Hz y 3KHz, para analizar el filtro FIR Equiripple. Posteriormente se acotaron las frecuencias entre 100Hz y 10KHz para el FIR Least Squares. Finalmente, se hicieron 100 mediciones entre 100Hz y 4KHz para observar la respuesta del filtro IIR Butterworth.

8.1 Resultados de la medición con el analizador de audio

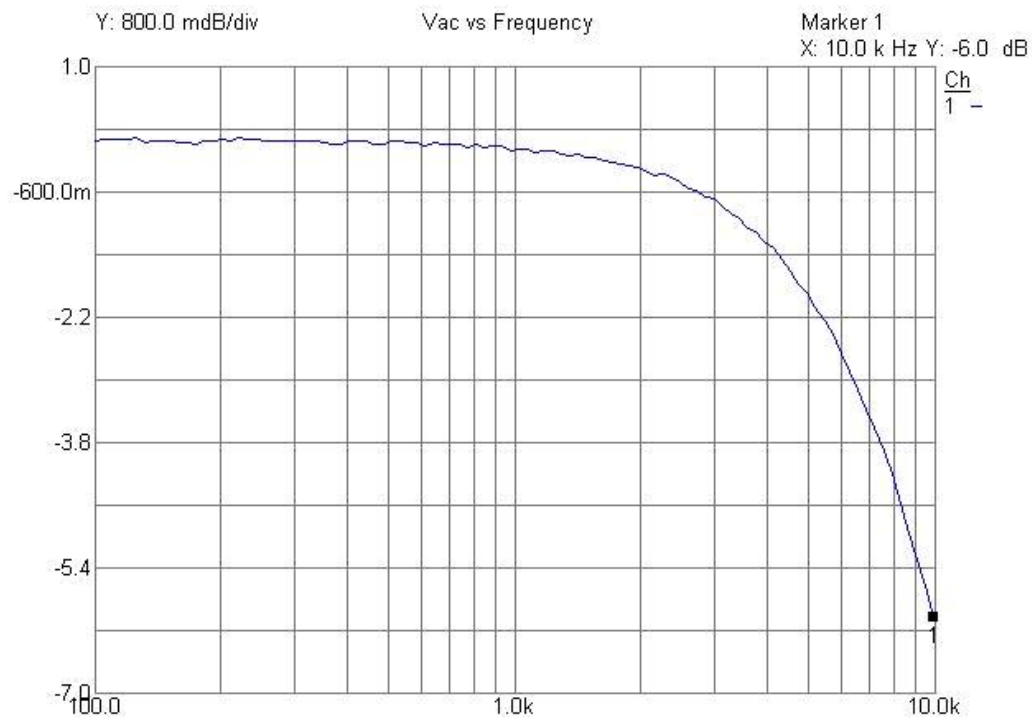


Figura 8.1.1 – Gráfico de la ganancia Talkthrough

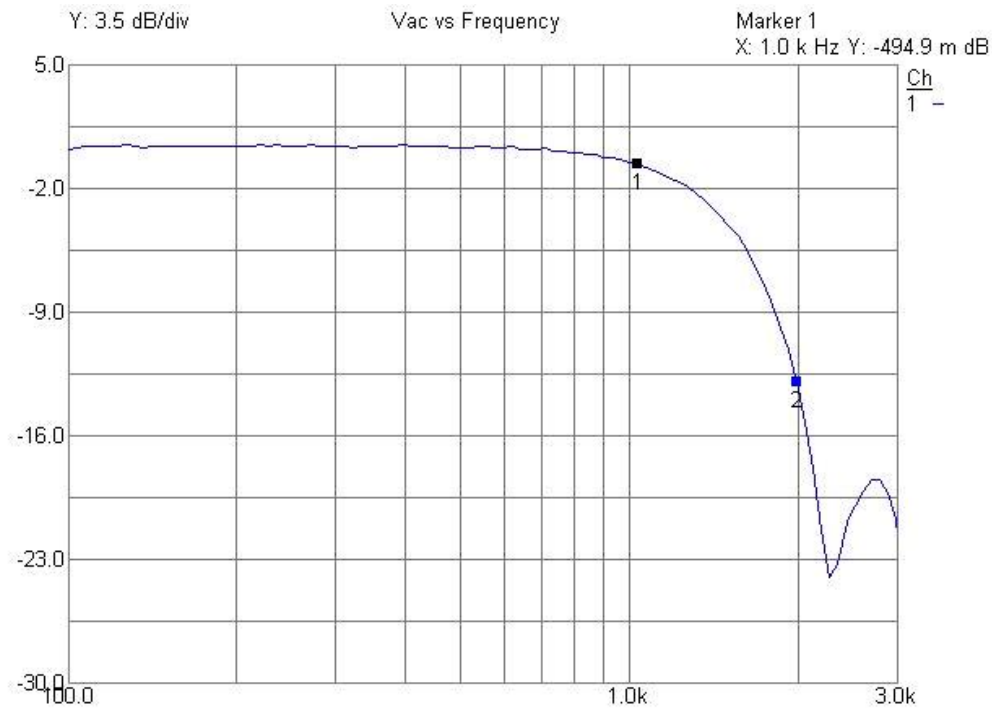


Figura 8.1.2 - Gráfico de la ganancia FIR Equiripple con el marcador en la frecuencia de corte

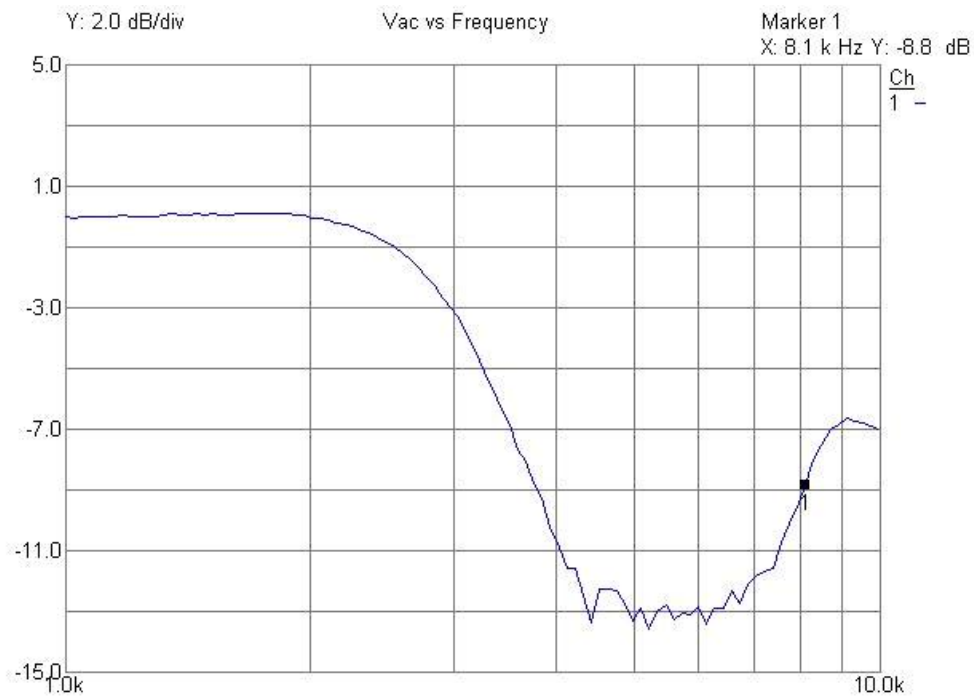


Figura 8.1.3 – Gráfico de la ganancia FIR Least Squares con el marcador en la frecuencia de corte superior

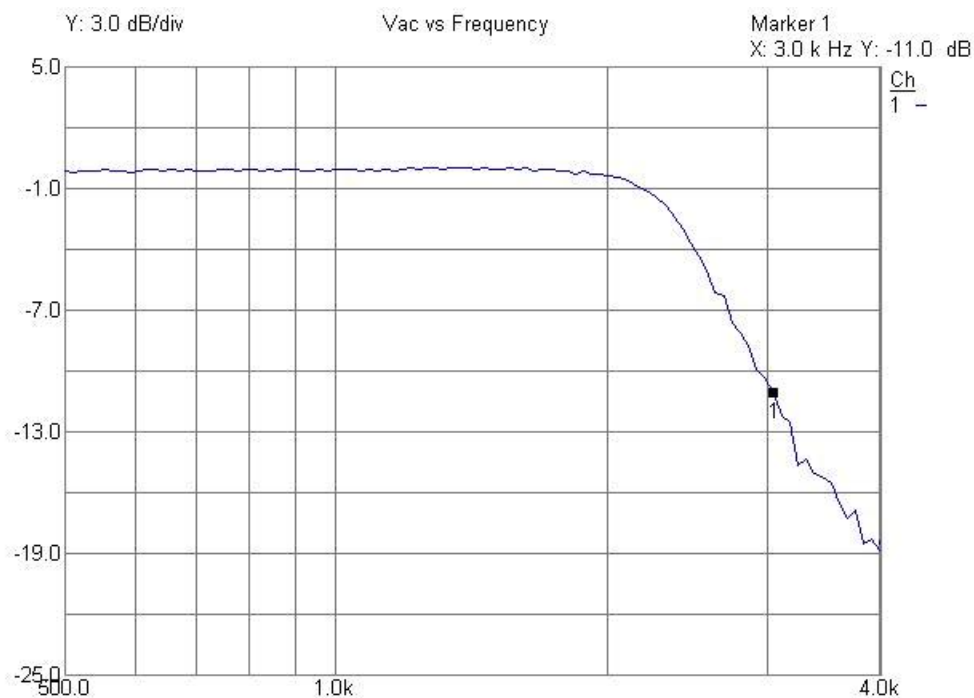


Figura 8.1.4 - Gráfico de la ganancia IIR con el marcador en la frecuencia de stop



Para facilitar la lectura de este informe, no se incluirá el listado de los datos obtenidos, si no que se adjuntarán gráficos en los cuales se comparan los resultados de los tres métodos de medición.

8.2 Diagrama de tiempos

Finalmente, se adjunta una tabla con el tiempo aproximado que requirió cada paso.

Categoría	Tarea	Tiempo [min]
SetUp	Conexión del Instrumental	10
SetUp	Testeo del Instrumental	10
SetUp	Configuración del Instrumental	40
Medición	Medición de Mod y Fase	120
Medición	Medición del analizador de Audio	20
Desarmado	Desarmado del setup	10

TOTAL [min]	210
TOTAL[h]	3,5

9 Análisis de los resultados

Se realizaron gráficos comparativos con los valores obtenidos en el laboratorio y los simulados.

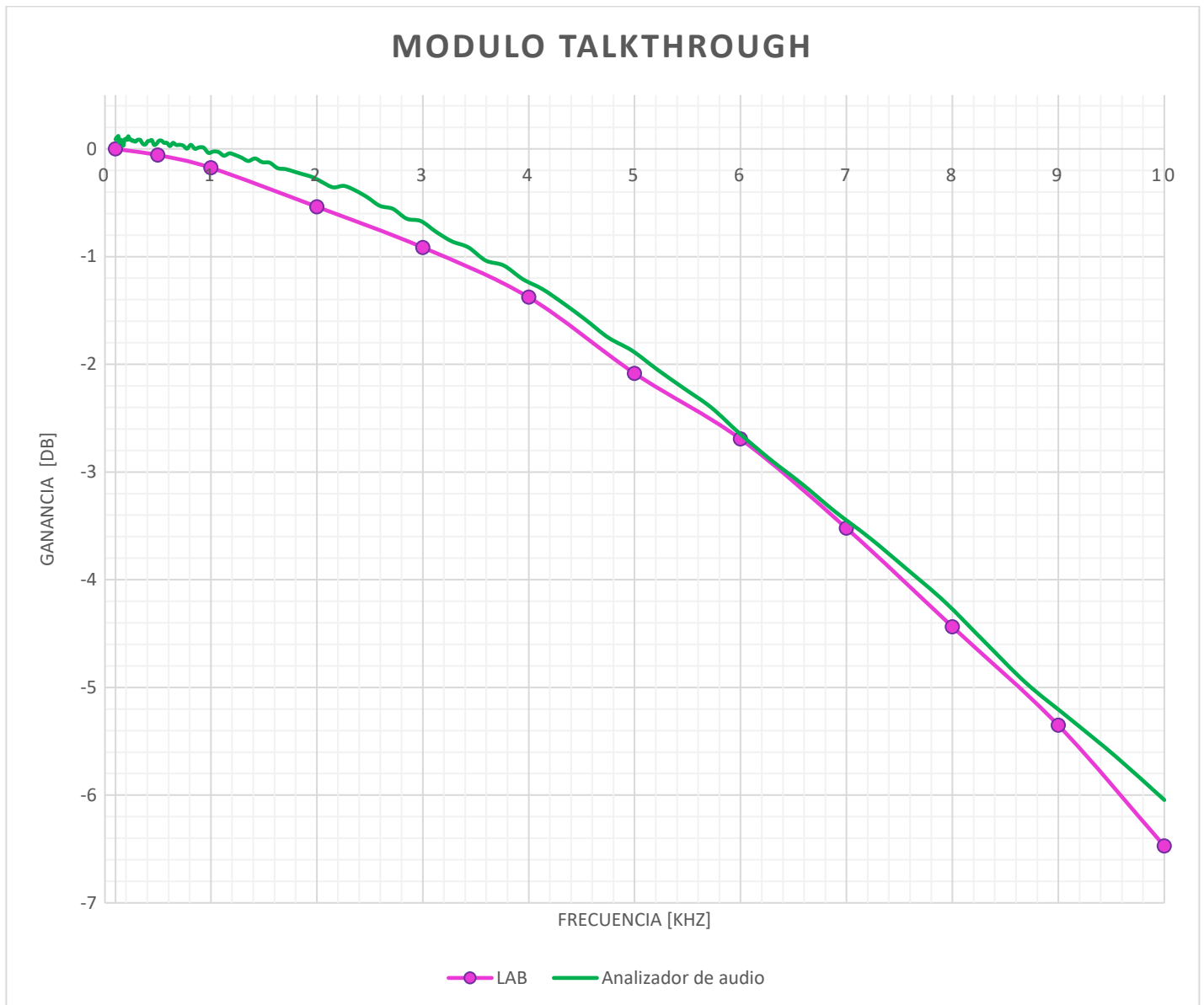


Figura 9.8.2.1 – Módulo Talkthrough

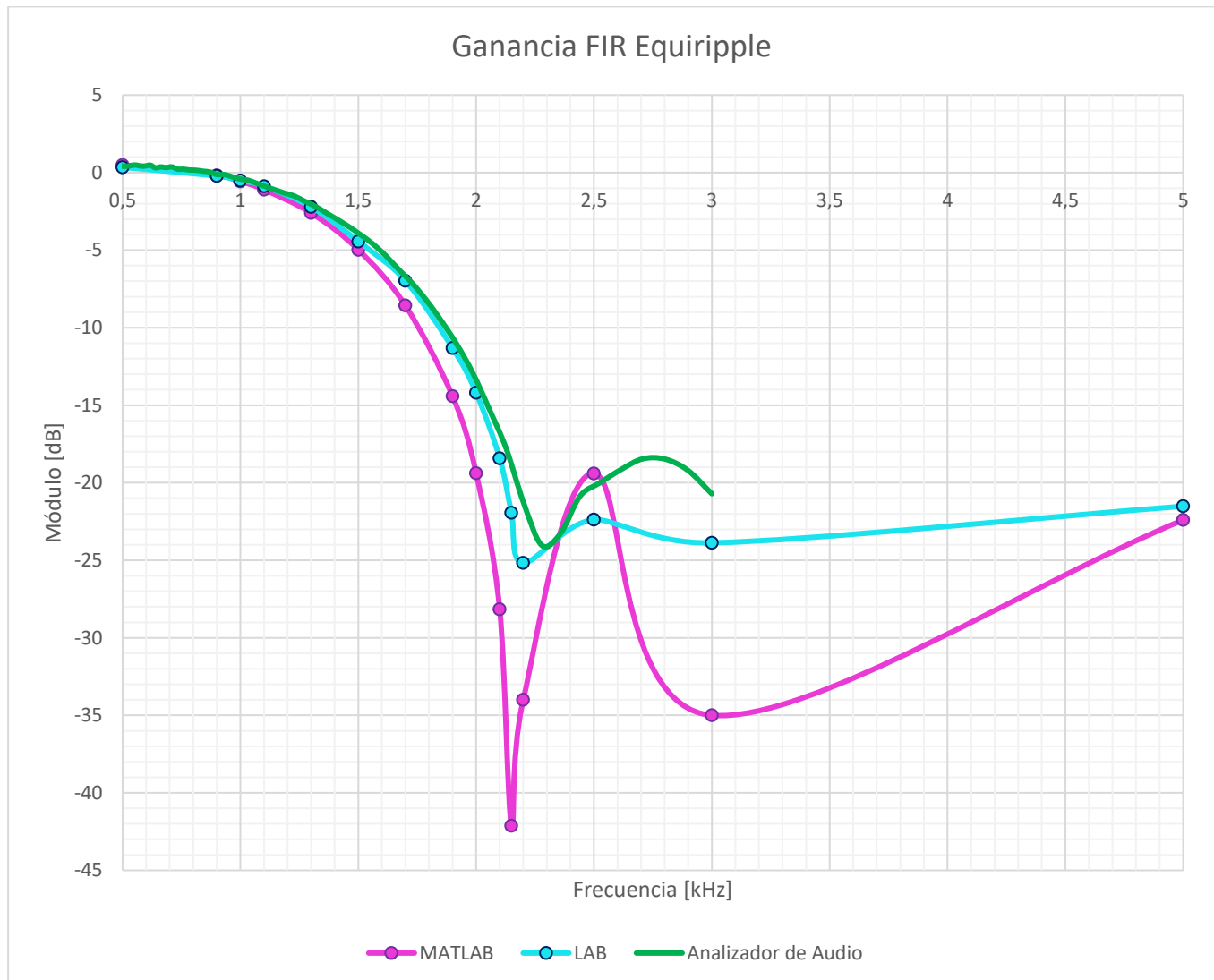


Figura 9.8.2.2 – Módulo de la ganancia del FIR Equiripple

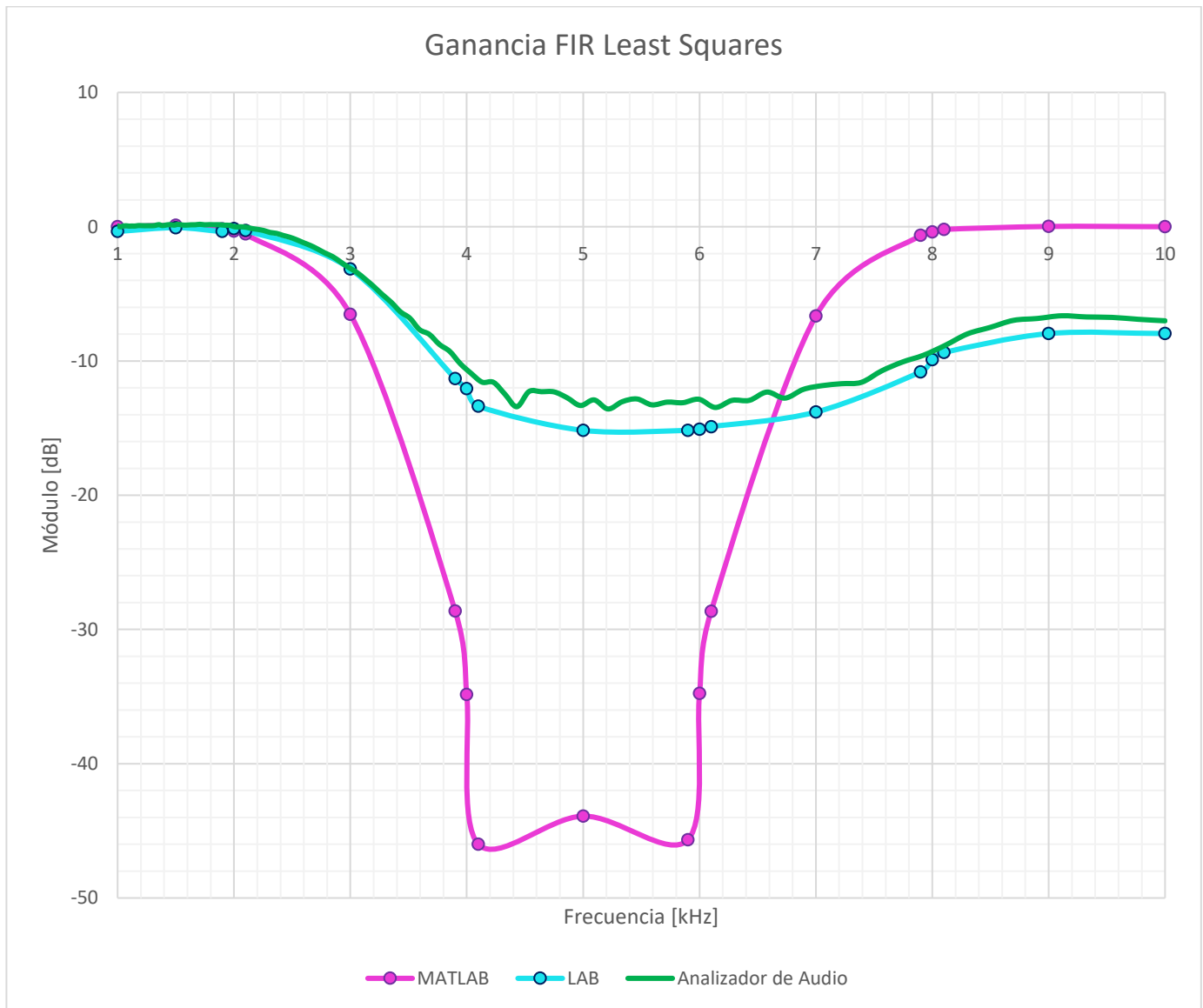


Figura 9.8.2.3 – Módulo de la ganancia FIR Least Squares

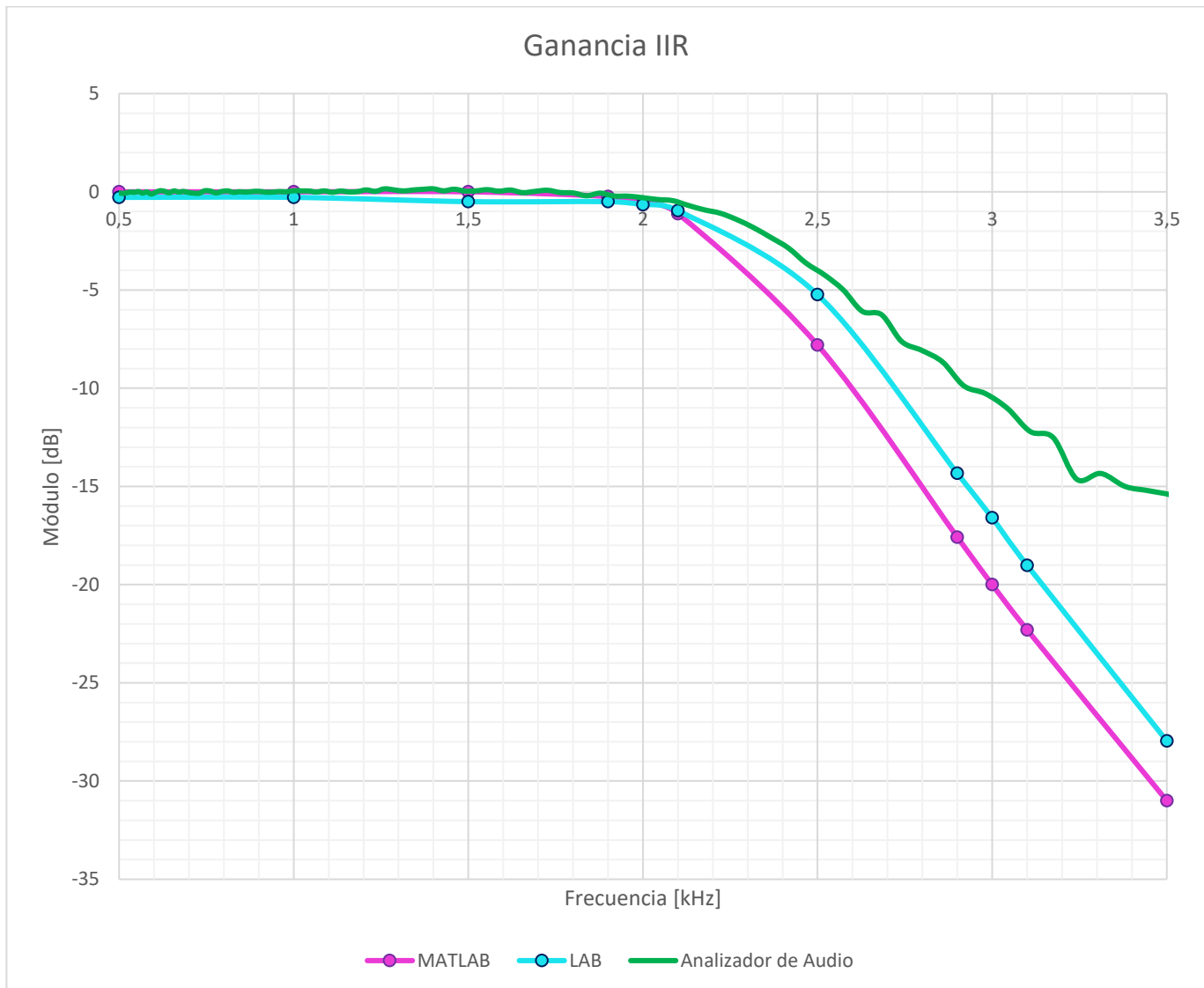


Figura 9.4 – Módulo del IIR Butterworth

10 Conclusión

A partir de lo observado en los distintos laboratorios, se destaca que es de suma importancia corregir los valores de ganancia utilizando la respuesta obtenida en el Talkthrough, especialmente cuando no se desea atenuar altas frecuencias. Esto se debe a que los filtros de Anti-alias e interpolación no son filtros Brickwall, por lo tanto, se atenúan frecuencias previas a los 10KHz, a pesar de que el usuario no lo desee.

Además, se observa que los filtros diseñados no cumplen con la plantilla en las frecuencias de stop, rodeando los -13dB en vez de los -20dB propuestos originalmente. Este error se le puede adjudicar al redondeo de coeficientes durante la conversión de punto flotante a punto fijo o al LPC1769, ya que incluso para -5dB se observaba distorsión en la señal de salida del ADC. Es por esto, que, para futuros diseños de filtros, habría



que optar por cambiar el sistema embebido por otro con mayor capacidad de procesamiento, para crear un software más robusto para DSP.

Finalmente, se concluye que el filtrado digital es más sencillo de implementar que el filtrado analógico cuando se tiene un sistema embebido adecuado para DSP. Además, como el diseño del filtro se realiza exclusivamente por software, la dispersión de los componentes no afecta a la respuesta de la misma manera que lo hace en los filtros analógicos.



11 Anexo

11.1 [1] [Datasheet LPC1769 LPCXpresso](#)

11.2 Instrumental utilizado

Número de serie del instrumental utilizado

- Osciloscopio : NG1851
- Generador de señales : NG1907

11.3 [Librería CMSIS-DSP](#)

11.4 [Workspace](#)

11.5 [Link al repositorio de github](#)