

1 Introducción

En este informe presentamos el filtro que se va a usar en cada canal de entrada analógica al conversor AD del proyecto.[1][2][3]

2 Especificaciones

[4]

A continuación explicamos la elección de las especificaciones del filtro. La frecuencia de muestreo del ADC será de $250kHz$, por lo que la frecuencia de la banda de atenuación la elegimos en $125kHz$. Como tenemos $20V$ ($\pm 10V$) de rango de entrada y 16 bits, la mitad del bit menos significativo es de $LSB/2 = 20V/(2 * 65536) = 152\mu V$. Elegimos ubicar la frecuencia de corte en $25kHz$. De esta forma, dejamos pasar hasta por lo menos la quinta armónica de señal de frecuencia. La SNR ideal para un sistema de 16bits es $SNR = 6.02N + 1.76dB = 98.08dB$. [9] Semejante atenuación necesita un filtro de alto orden, o mucha banda de transición con un filtro de bajo orden. [5]

3 Diseño

[6][7][8]

Pretendemos que el filtro tenga una banda de paso plana, sin ripple. Como la frecuencia de corte es 25kHz y la frecuencia de la banda de atenuación es 125kHz , ambas frecuencias están a menos de una década de distancia. Se diseña el filtro fijando el orden en 8 y f_c en 25kHz . El tipo elegido será Butterworth ya que redondea mejor las características buscadas, con una banda de transición más pronunciada que un Bessel y sin el ripple de un Chebyshev.

El filtro se implementará con topología Multiple Feedback (MFB) ya que tiene mejor respuesta en alta frecuencia que la topología Sallen-Key y es menos sensible a las variaciones de los componentes pasivos.

Utilizando el eDesign Suite de ST, diagramamos el circuito y determinamos los valores de los componentes pasivos a utilizar. Determinamos que los resistores tengan 1 de tolerancia y los capacitores 5 ya que se consiguen en el mercado local.

A continuación mostramos los resultados de diseño del eDesign Suite.

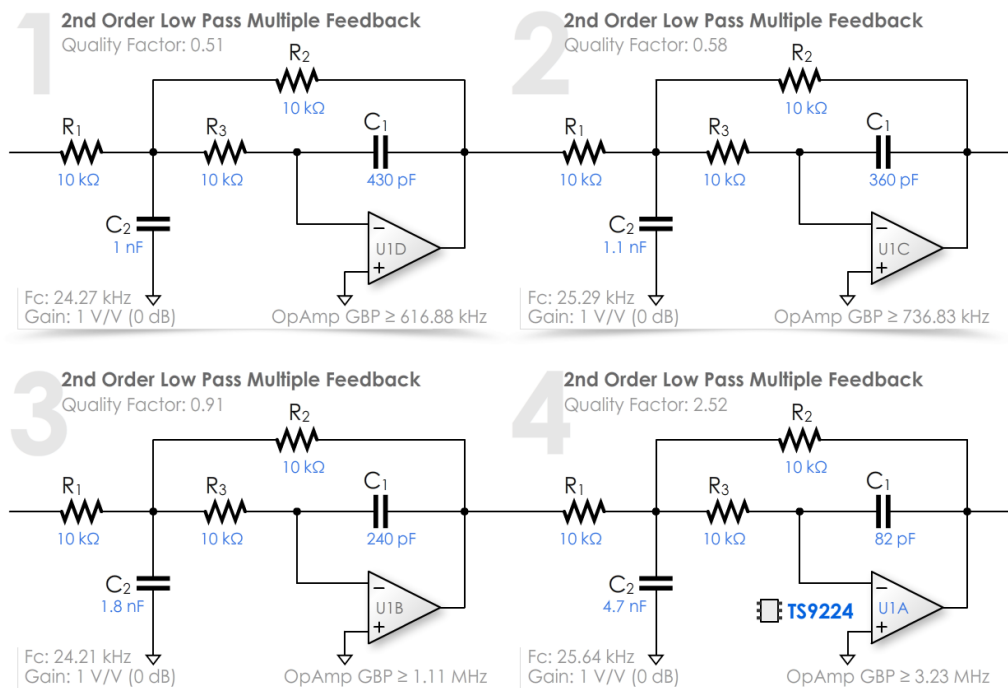


Figure 1: Esquemático

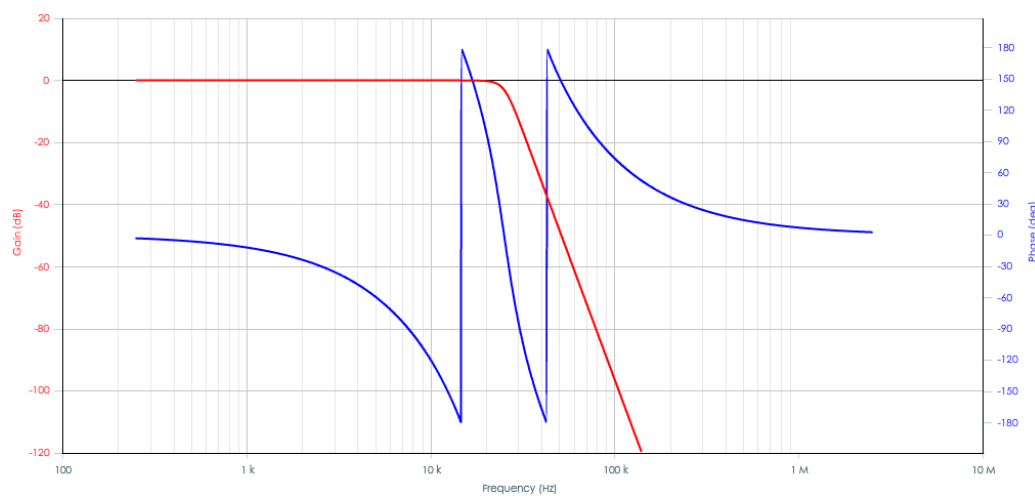


Figure 2: Respuesta en frecuencia

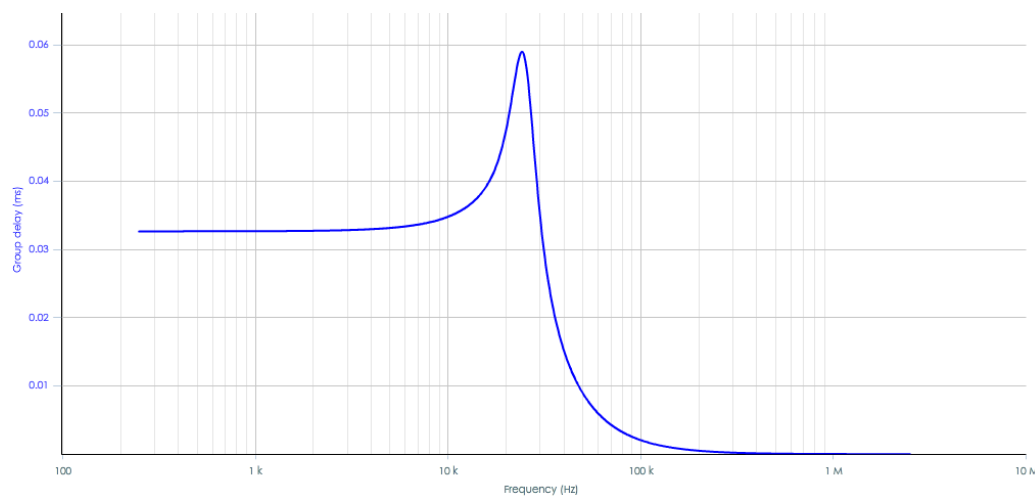


Figure 3: Retardo de grupo

3.1 Valores de los componentes pasivos

Resistores		
Valor	Tolerancia	Cantidad
$10k\Omega$	1%	8
Capacitores		
Valor	Tolerancia	Cantidad
82pF	5%	1
220pF	5%	1
390pF	5%	1
440pF	5%	1
1nF	5%	1
1.2nF	5%	1
1.8nF	5%	1
4.7nF	5%	1
$0.1\ \mu F$	5%	2

3.2 Componentes activos

[10][12][13][14]

Para elegir el amplificador operacional a utilizar, usaremos dos criterios principales:

- El producto Ganancia-Ancho de Banda (GBWP)
- El Slew Rate

En la configuración MFB, el GBWP se calcula como $100(-A_c + 1)f_c$ (con A_c la ganancia en lazo cerrado del MFB, en este caso, $A_c = -1$). Por lo tanto, $GBWP \geq 5MHz$.

$$SR \geq 2\pi V_{pp}f_c = 2\pi 20V 25kHz = 3.14V/\mu s$$

Como criterio de espacio, buscaremos un encapsulado que traiga los cuatro amplificadores operacionales requeridos juntos, para implementar cada filtro con un solo integrado. El TL074 cumple todos los requisitos anteriores, es de bajo ruido, viene en encapsulado SOIC-14 y se consigue localmente.

4 Análisis de Ruido

[11]

Reconocemos tres regiones en el espectro del ruido que afecta a un filtro pasabajos:

- Ruido rosado o $1/f$
- Ruido blanco
- Filtro pasabajos

La hoja de datos nos dice que:

$$e_n = 4.5nV/\sqrt{Hz}$$

$$i_n = 0.5pA/\sqrt{Hz}$$

Nuestro rango de operación es de $25kHz$, entonces, el ruido a la salida se calcula como

$$e_o = e_n\sqrt{25kHzG} = 0.71uVrms$$

$i_o = i_n\sqrt{kHzR_{eq}} = 1.58uVrms$ (por etapa) Donde R_{eq} es la resistencia equivalente vista desde la entrada del operacional.

Finalmente calculamos el ruido incorporado por los resistores. Los resistores incorporan ruido térmico, $e_r = \sqrt{4kTR_{eq}f_c}$

$$\text{Cada etapa incorpora: } \sqrt{4 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} 300K 25kHz 10k\Omega} = 2.04uVrms$$

Calculamos el ruido rms para cada etapa:

$$(e_n)^2 = (0.71uV)^2 + (1.58uV)^2 + (2.04uV)^2 = 7.16uV^2$$

Finalmente calculamos al ruido a la salida

$$N = \sqrt{(e_1)^2 + (e_2)^2 + (e_3)^2 + (e_4)^2} = 14.32uVrms$$

Para tener el ruido N_{pp} a la salida, se lo puede estimar multiplicando el rms por 6.

$$N_{pp} = 85.92uV_{pp}$$

Como $LSB/2 = 20V/(2 * 65536) = 152uV$, el ruido no tiene amplitud suficiente para taparlo.

5 Simulación

5.1 Esquemático

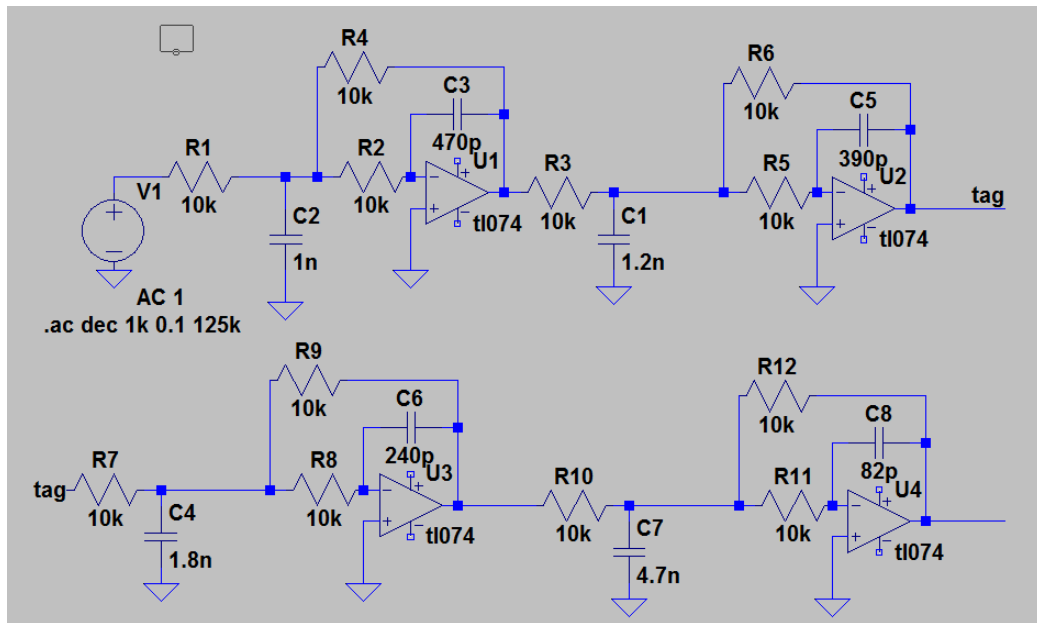


Figure 4: Esquemático

5.2 Simulaciones

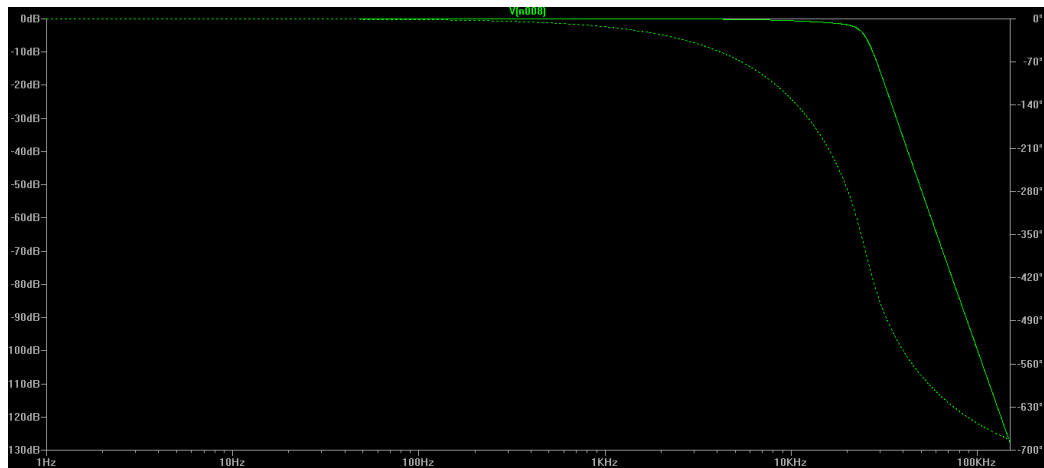


Figure 5: Modulo y fase

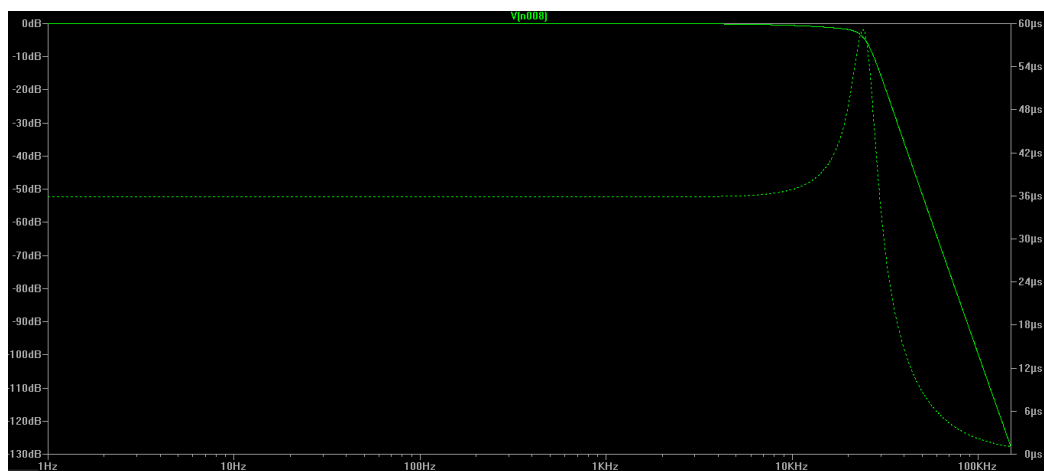


Figure 6: Modulo y retardo de grupo

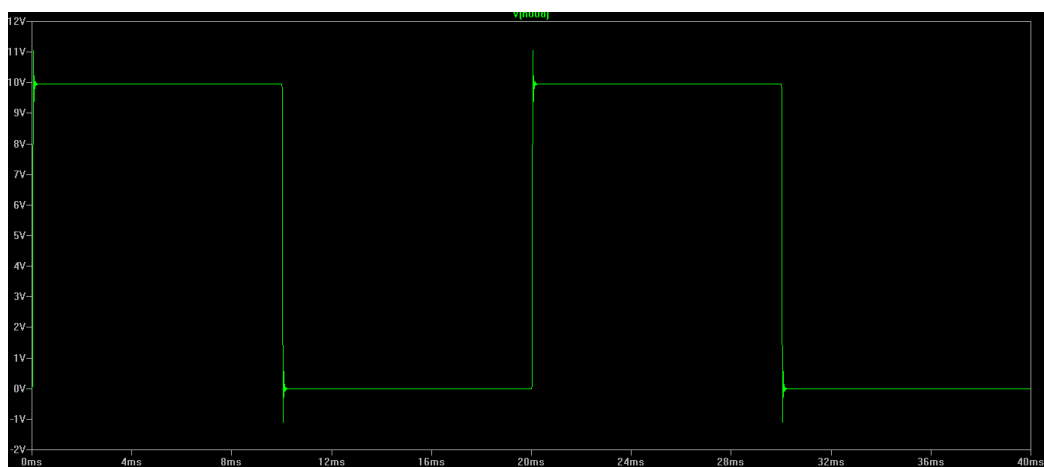


Figure 7: Respuesta al escalon - 50Hz

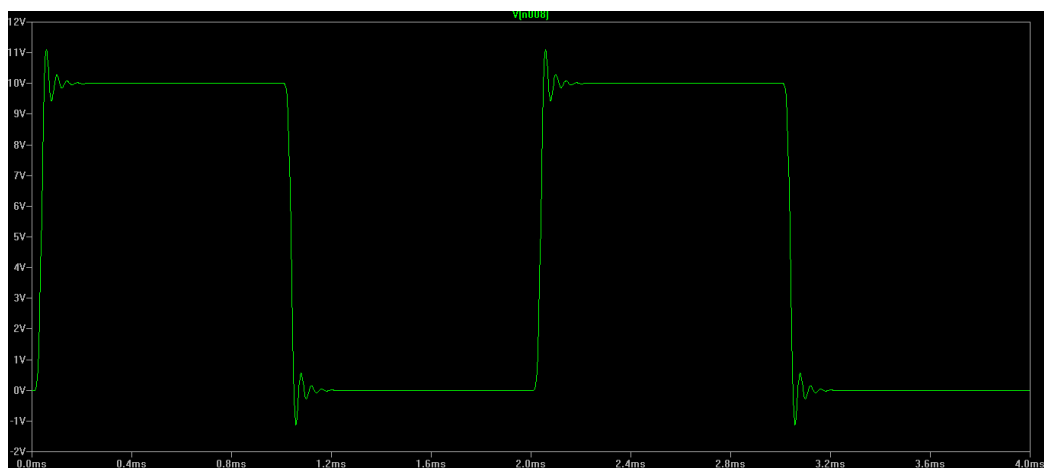


Figure 8: Respuesta al escalon - 500Hz

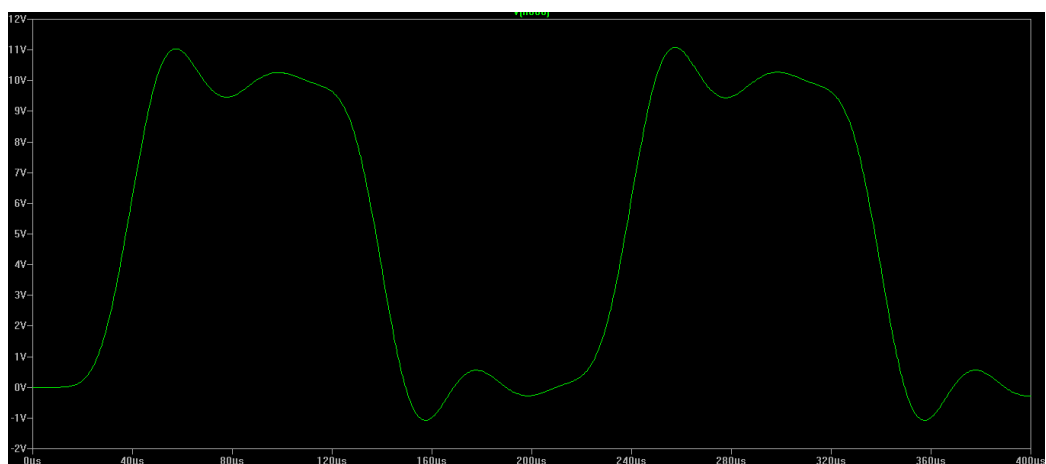


Figure 9: Respuesta al escalon - 5kHz

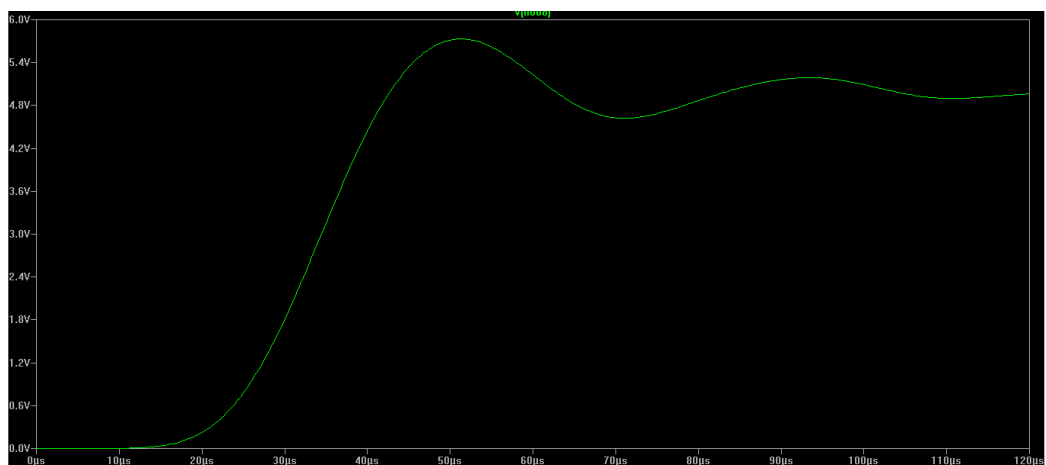


Figure 10: Respuesta al escalon - 50kHz

6 Prototipo

6.1 Esquemático

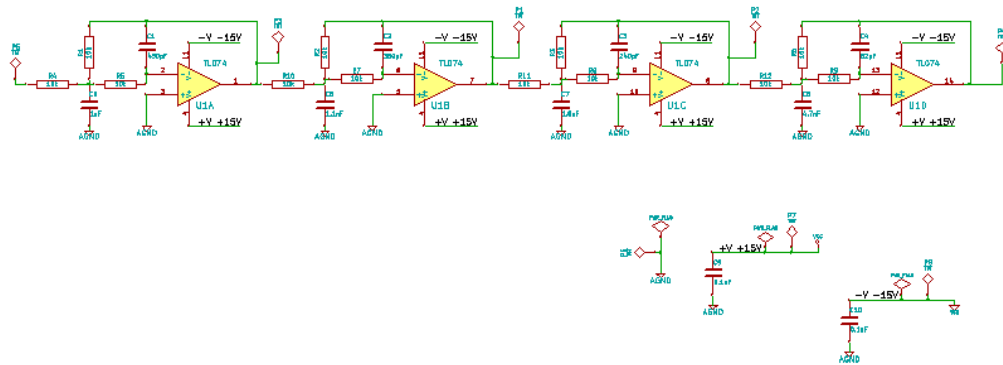


Figure 11: Esqumático

7 Mediciones

Banco de Medición:

- Fuente de Tensión Fair FR-305A
- Fuente de Tensión Zurich DF1730SB5A
- Osciloscopio Fluke 192B 60MHz
- Punta Fluke VP200 10:1 200MHz
- Generador de Funciones Hing Chang Sweep 9205

Rise-time del conjunto punta-osciloscopio: $56.8ns$.

7.1 Barrido en frecuencia

Se realizó un barrido de frecuencias discretas con una señal de entrada senoidal de $10V$ pico, y alimentación de $\pm 15V$. A continuación mostramos los resultados medidos y una interpolación gráfica de los mismos. Luego de los $50kHz$ el valor de la amplitud era muy bajo para poder seguir realizando mediciones.

7.1.1 Valores medidos

Frecuencia (Hz)	Amplitud (V)	Fase (grados)
1	10	0
2	10	0
3	10	0
4	10	0
5	10	0
6	10	0
7	10	0
8	10	0
9	10	0
10	10	0
20	10	0
30	10	0
40	10	0
50	10	0
60	10	0
70	10	0
80	10	0
90	10	0
100	10	0
200	10	0
300	10	0
400	10	-7.2
500	10	-7.2
600	10	-0.864
700	10	-1
800	10	-1.15
900	10	-12.96
1k	10	-11.52
2k	10	-24.48
3k	10	-38.88
4k	10	-47.52
5k	10	-61.2

Frecuencia (Hz)	Amplitud (V)	Fase (grados)
6k	10	−75.6
7k	10	−88.2
8k	10	−100.8
9k	10	−113.4
10k	10.2	−126
11k	10.4	−134.64
12k	10.4	−146.88
13k	10.6	−163.8
14k	10.6	178.56
15k	10.8	165.6
16k	10.8	146.88
17k	11	133.56
18k	11	113.76
19k	10.8	93.24
20k	10.4	−72
21k	9.8	−52.92
22k	8.8	31.32
23k	7.6	12.24
24k	6.4	−25.92
25k	5.2	−31.5
26k	4	−56.16
27k	3.6	−54.43
28k	2.4	−88.7
29k	2	−79.34
30k	1.6	−95.04
40k	0.2	−167.04
50k	0.04	−169.2

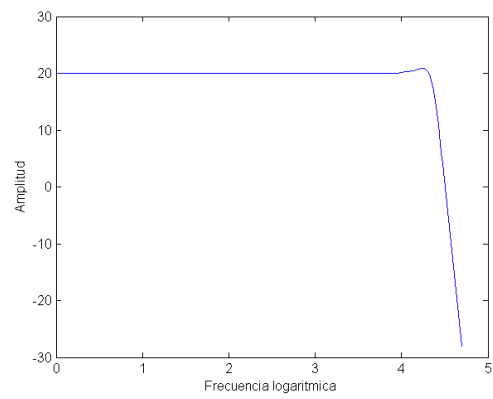


Figure 12: Respuesta en amplitud

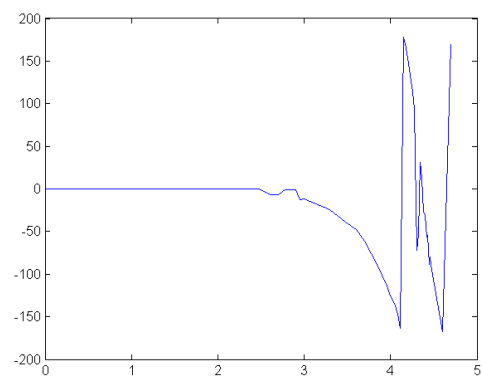


Figure 13: Respuesta en fase

7.2 Respuesta a la onda cuadrada

Se somete al filtro a una respuesta en tiempo, entrando con una señal cuadrada y mostrando su rise-time a la salida para distintas frecuencias.

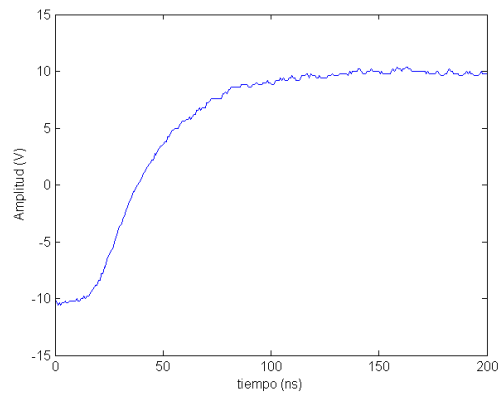


Figure 14: Rise time del conjunto punta-osciloscopio

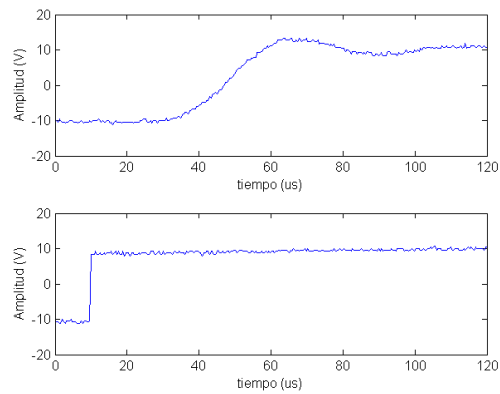


Figure 15: Onda cuadrada de 10Hz

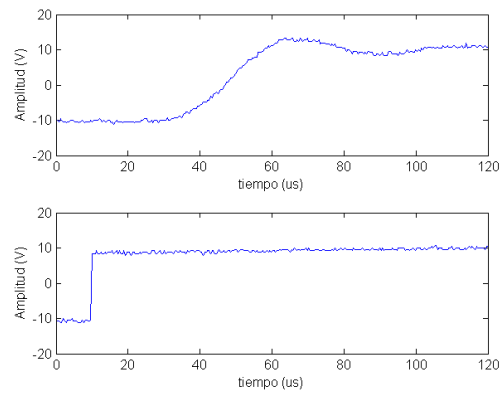


Figure 16: Onda cuadrada de 50Hz

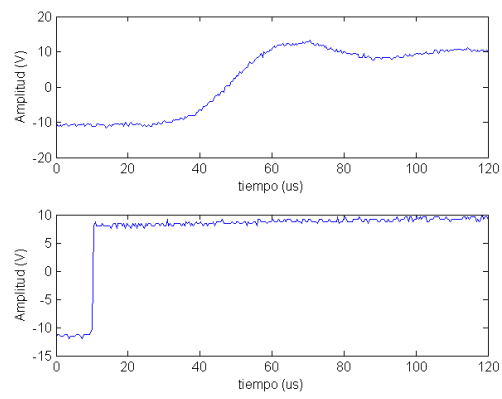


Figure 17: Onda cuadrada de 100Hz

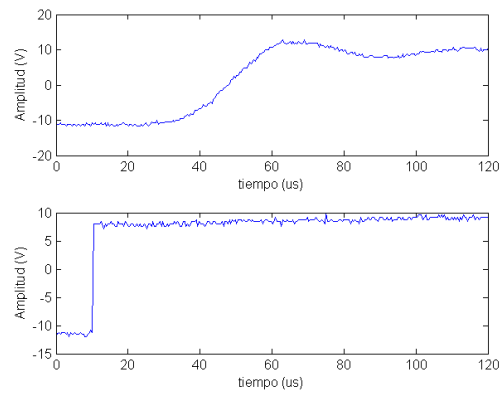


Figure 18: Onda cuadrada de 1kHz

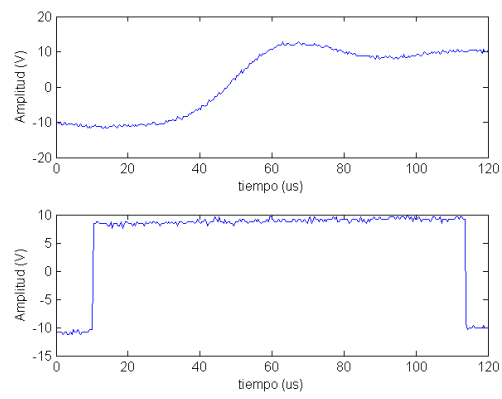


Figure 19: Onda cuadrada de 10kHz

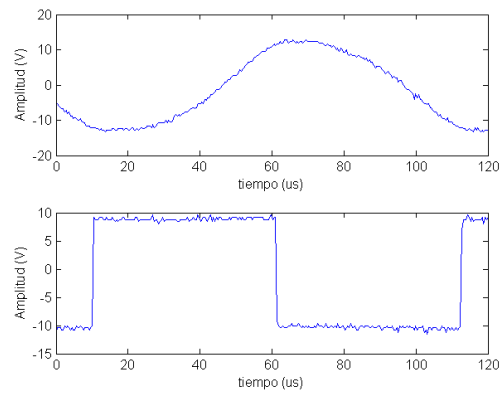


Figure 20: Onda cuadrada de 20kHz

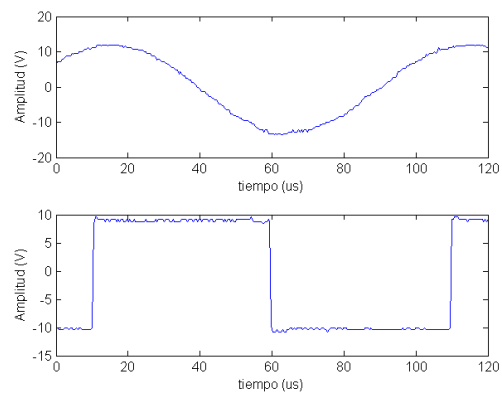


Figure 21: Onda cuadrada de 50kHz

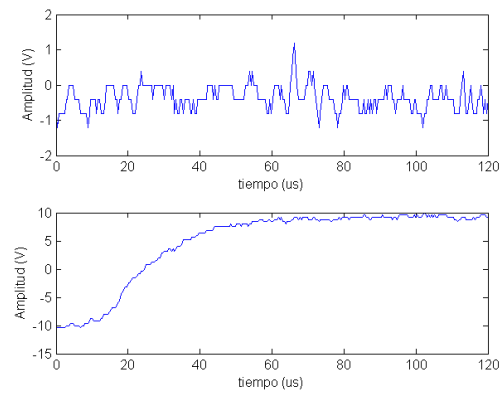


Figure 22: Onda cuadrada de 100kHz

References

- [1] Active Low-Pass Filter Design. Application Report SLOA049B.
- [2] Op Amps for Everyone. Application Report SLOD006B.
- [3] <http://www.maximintegrated.com/app-notes/index.mvp/id/928>
- [4] Design and Implementation of Active Filter for Data Acquisition System - Ms.Mya Thandar Kyu , Dr.Zaw Min Aung and Dr.Zaw Min Naing
- [5] AN699 - Anti-Aliasing, Analog Filters for Data Acquisition Systems - Bonnie Baker.
- [6] Measurement Computing - Data Acquisition Handbook. 3rd ed.
- [7] The ABCs Of ADCs - Martin Mason.
- [8] Evaluation Board for 16-Bit, 6-Channel Simultaneous Sampling ADC - EVAL-AD7656
- [9] MT-001: Taking the Mystery out of the Infamous Formula, "SNR=6.02N + 1.76dB," and Why You Should Care - Walt Kester
- [10] Select the Right Operational Amplifier for your Filtering Circuits - Bonnie C. Baker, Microchip Technology Inc.
- [11] Op-Amp Noise Calculation and Measurement
- [12] <http://www.google.com.ar/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCkQFjAA&url=ftp%3A%2F%2Fftp.ti.com%2Fpub%2Flinear_apps%2Fnoise%2520power%2520point%2F0p%2520Amp%2520Noise%2520Calc_Sim_Meas_TG92309.ppt&ei=fCUEU4S1NcedkQekwYGgDA&usg=AFQjCNGD7FopV9T7c1rdfjlpegkHed70ng&sig2=eNrNEmaMPMICADRHt0wPJg&bvm=bv.61535280,d.eW0>
- [13] <http://www.ti.com/lit/ml/sloa082/sloa082.pdf>
- [14] <http://www.hep.ph.ic.ac.uk/hallg/Instrumentation/Lectures/Lecture19.pdf>