



**UBA**  
1821 Universidad  
de Buenos Aires

.UBA   
FACULTAD DE INGENIERÍA

TB065  
SEÑALES Y SISTEMAS

# Análisis de Señales

## Trabajo Práctico Especial

---

**Integrante**

Martin Klöckner  
Mateo Lema Roveta  
Ernesto Dei Castelli

**Legajo**

123456  
123456  
123456

**Correo electrónico**

[mklockner@fi.uba.ar](mailto:mklockner@fi.uba.ar)  
[mlema@fi.uba.ar](mailto:mlema@fi.uba.ar)  
[edei@fi.uba.ar](mailto:edei@fi.uba.ar)

# Índice

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Dominio temporal</b>	<b>2</b>
2.1	Primer muestra . . . . .	2
2.2	Segunda muestra . . . . .	2
2.3	Filtrado . . . . .	4
2.4	Sonido de diferentes instrumentos . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Dominio de frecuencia</b>	<b>12</b>
3.1	Filtrado en frecuencia . . . . .	13
3.2	Espectrogramas . . . . .	17
3.3	Serie de Fourier tomando uno y varios periodos . . . . .	22
3.4	Filtrado de muestras . . . . .	24
3.5	Efectos musicales en términos de sistemas . . . . .	26

# Índice de figuras

1	Gráfico de archivo ‘cancion1.wav’ . . . . .	3
2	Sección cuasi-periódica archivo ‘cancion1.wav’ . . . . .	3
3	Otra sección cuasi-periódica archivo ‘cancion1.wav’ . . . . .	4
4	Gráfico de archivo ‘cancion2.wav’ . . . . .	5
5	Sección no periódica archivo ‘cancion2.wav’ . . . . .	5
6	Otra sección no periódica archivo ‘cancion2.wav’ . . . . .	6
7	Primer muestra salida de filtro 1 . . . . .	6
8	Primer muestra salida de filtro 1 intervalo 0.248 a 0.256s . . . . .	7
9	Primer muestra salida de filtro 2 . . . . .	7
10	Primer muestra salida de filtro 2 intervalo 0.248 a 0.256s . . . . .	8
11	Segunda muestra salida de filtro 1 . . . . .	9
12	Segunda muestra salida de filtro 1 intervalo 26.57 a 26.58s . . . . .	9
13	Segunda muestra salida de filtro 2 . . . . .	10
14	Segunda muestra salida de filtro 2 intervalo 26.57 a 26.58s . . . . .	10
15	Espectro de ‘cancion1.wav’ . . . . .	12
16	Espectro de ‘cancion2.wav’ . . . . .	13
17	Transformada de Fourier del primer filtro . . . . .	14
18	Transformada de Fourier del segundo filtro . . . . .	14
19	Espectro de ‘cancion1.wav’ con filtro 1 aplicado . . . . .	15
20	Espectro de ‘cancion1.wav’ con filtro 2 aplicado . . . . .	15
21	Espectro de ‘cancion2.wav’ con filtro 1 aplicado . . . . .	16
22	Espectro de ‘cancion2.wav’ con filtro 2 aplicado . . . . .	16
23	Espectrograma primer muestra de ventana rectangular de 512 puntos . . . . .	18
24	Espectrograma primer muestra de ventana rectangular de 1024 puntos . . . . .	18

25	Espectrograma primer muestra de ventana rectangular de 2048 puntos . . . . .	19
26	Espectrograma segunda muestra de ventana rectangular de 512 puntos . . . . .	19
27	Espectrograma segunda muestra de ventana rectangular de 1024 puntos . . . . .	20
28	Espectrograma segunda muestra de ventana rectangular de 2048 puntos . . . . .	20
29	Espectrograma primer muestra de ventana triangular de 2048 puntos . . . . .	21
30	Espectrograma primer muestra con ventana Hann de 2048 puntos . . . . .	22
31	Serie de Fourier tomando 1, 4 y 8 periodos nota A4 clarinete . . . . .	23
32	Serie de Fourier tomando 1, 4 y 8 periodos nota A4 flauta . . . . .	23
33	Serie de Fourier tomando 1, 4 y 8 periodos nota A4 violín . . . . .	24
34	Comparación entre señal original y filtrada en tiempo nota A4 violin . . . . .	25
35	Comparación entre señal original y filtrada en tiempo nota A4 clarinete . . . . .	25
36	Comparación entre señal original y filtrada en tiempo nota A4 flauta . . . . .	26

## 1. Introducción

En el presente trabajo se realiza un análisis en el dominio temporal de en principio dos señales musicales de muestra, en las cuales se buscan porciones cuasi-periódicas y no periódicas, y luego se filtran utilizando dos filtros diferentes. Por último, se generan mediante simulación de tres instrumentos musicales diferentes, tres señales, las cuales se analizan y comparan las formas de onda generadas.

## 2. Dominio temporal

### 2.1. Primer muestra

Para la primer muestra (archivo cancion1.wav) se realiza el gráfico de la misma en el dominio temporal, el resultado se muestra en la figura 1.

La frecuencia de muestreo de la misma es 44100 Hz, esto se obtiene del mismo script utilizado para graficar el archivo, en el cual se divide la cantidad de muestras por la duración del archivo.

#### 2.1.1. Secciones cuasi-periódicas

Cuando la señal tiene una estructura repetitiva, pero con variaciones en amplitud, fase o frecuencia se dice que la señal es cuasi-periódica.

Realizando un análisis visual en detalle de la muestra se buscan partes donde se comporte como tal, dos ejemplos se dan en las figuras 2 y 3. En la primera se gráfica el intervalo 0,248 s a 0,256 s, mientras que en la segunda se gráfica el intervalo 0,520 s a 0,528 s.

Dentro de los intervalos cuasi-periódicos graficados, se pueden detectar visualmente los períodos fundamentales, los cuales se ven resaltados en color celeste claro.

Curiosamente en ambos casos el período es igual y resulta  $T = 0,003$  s, lo cual corresponde con una frecuencia de aproximadamente 333 Hz. Comparando con notas musicales de tabla esto se asemeja a una nota E4, la cual tiene una frecuencia de 329,228 Hz. Siendo que el período se relaciona de manera inversa con la frecuencia y esta de manera directa con la nota musical, se puede asegurar que al disminuir este período la frecuencia aumentará y la nota musical será mas aguda, mientras que en el caso contrario si aumenta el período la frecuencia disminuye y también la nota musical.

### 2.2. Segunda muestra

Utilizando el mismo script de python utilizado para la primer muestra (archivo cancion1.wav) se gráfica la señal de la segunda muestra (correspondiente al archivo can-

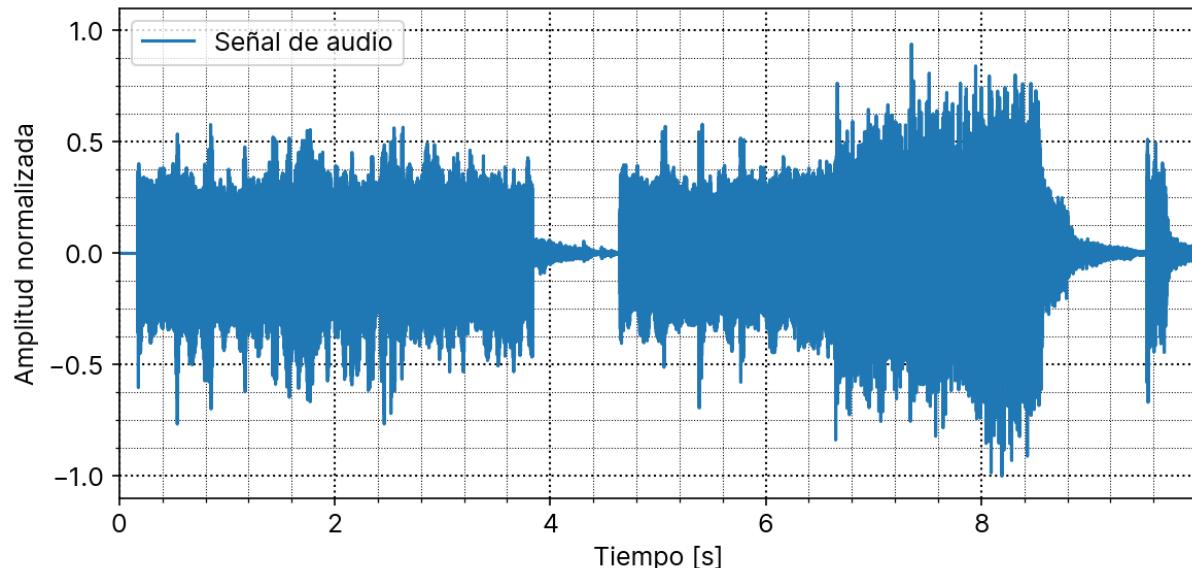


Figura 1: Gráfico de archivo 'cancion1.wav'

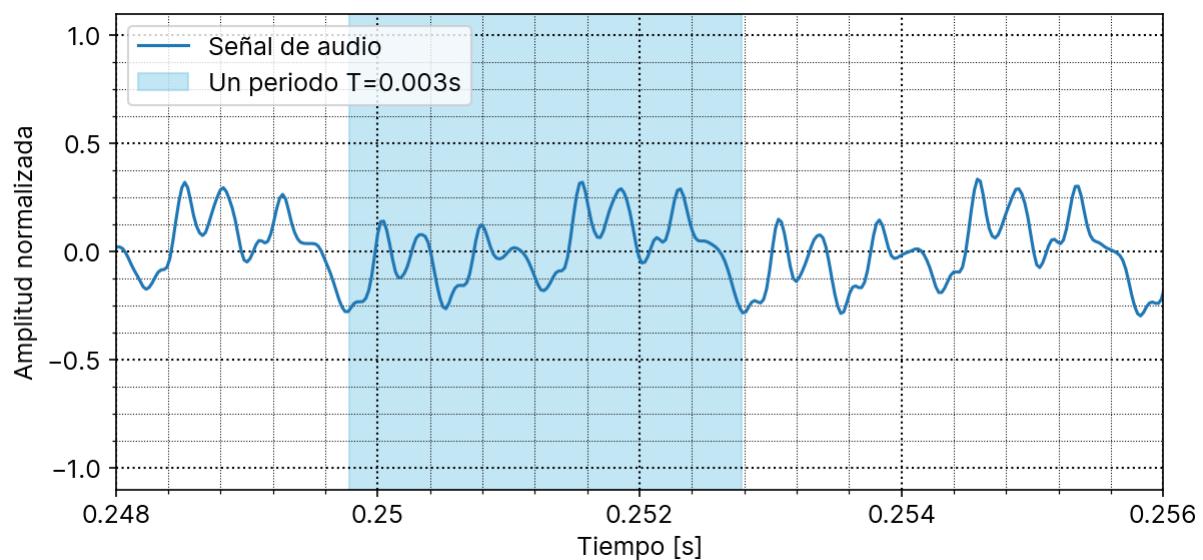


Figura 2: Sección cuasi-periódica archivo 'cancion1.wav'

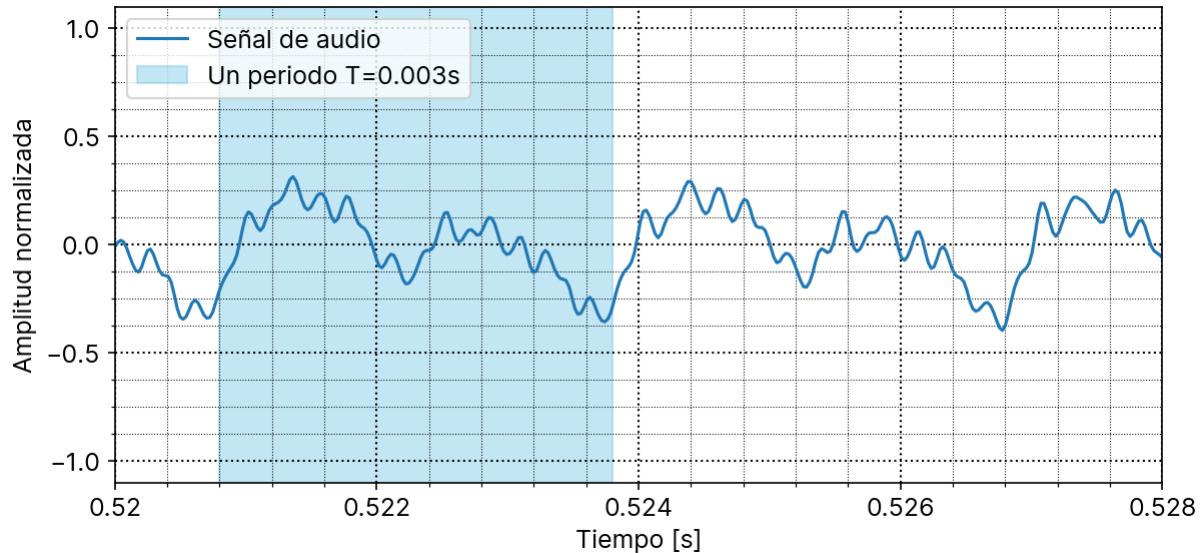


Figura 3: Otra sección cuasi-periódica archivo ‘cancion1.wav’

cion2.wav) en el dominio temporal, en este caso se gráfica a partir del segundo 6 ya que antes de esto la señal tiene amplitud nula, con lo cual no aporta información significativa, el gráfico resultante se muestra en la figura 4.

La frecuencia fundamental de esta segunda muestra resulta 48000 Hz, esto también se obtiene del script de python.

### 2.2.1. Secciones no-periódicas

A diferencia del análisis realizado sobre la primer muestra en busca de secciones cuasi-periódicas, para esta segunda muestra se buscan secciones no periódicas, esto es, secciones donde la señal no tiene un patrón repetitivo marcado. Se toman dos intervalos en los cuales la señal de muestra se comporta como tal, el intervalo de 14,72 s a 14,73 s y el intervalo 26,57 s a 26,58 s, ambos intervalos se muestran graficados en las figura 5 y 6 respectivamente.

Dado que las secciones son no periódicas, no se puede hablar de una frecuencia fundamental como si se podía en las secciones cuasi-periódicas en la primer muestra.

## 2.3. Filtrado

Para obtener la salida de la señal luego de pasarla por un filtro (respuesta al impulso del primer filtro correspondiente al archivo respuesta\_impulso\_1.txt y del segundo filtro correspondiente al archivo respuesta\_impulso\_2.txt) es necesario realizar una convolución entre la señal de entrada y la respuesta al impulso del filtro, esto suponiendo que

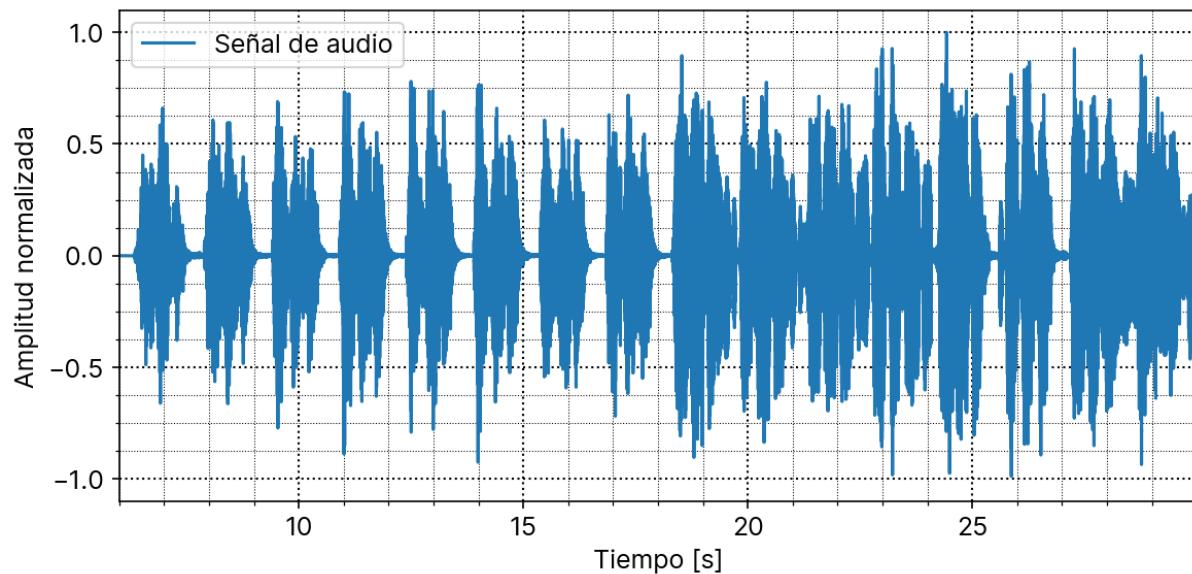


Figura 4: Gráfico de archivo 'cancion2.wav'

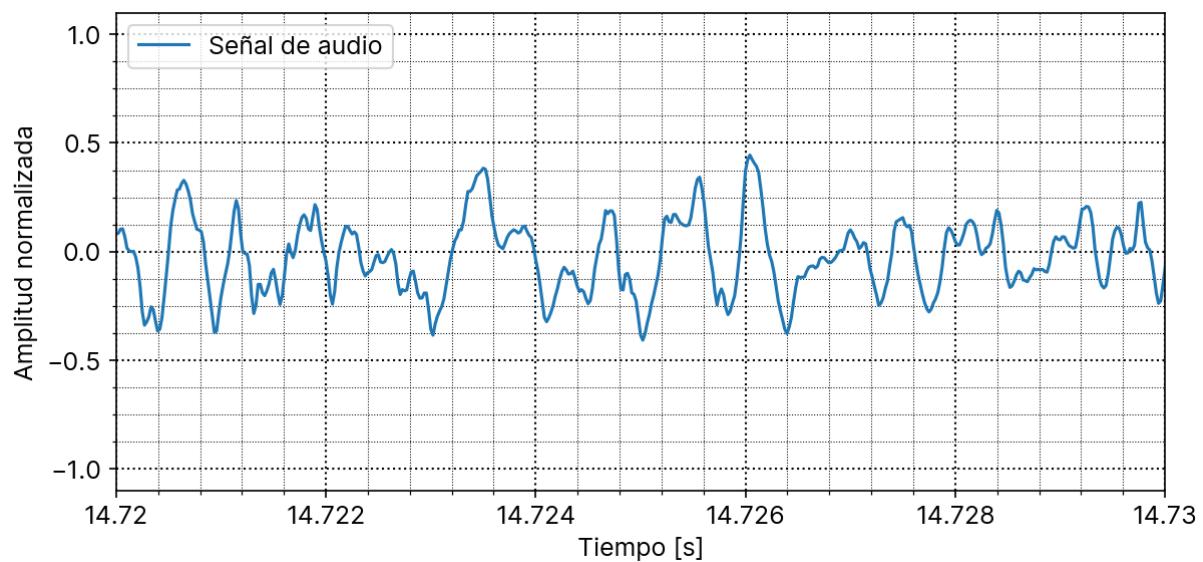


Figura 5: Sección no periódica archivo 'cancion2.wav'

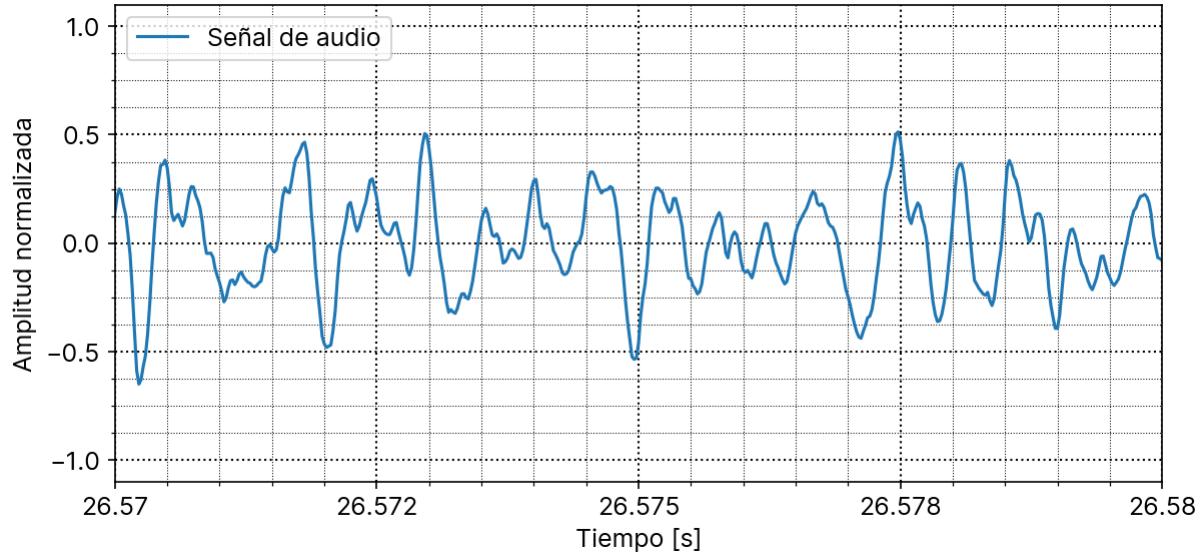


Figura 6: Otra sección no periódica archivo 'cancion2.wav'

el filtro es un sistema LTI (si no lo fuera no se podría calcular la salida solo teniendo la respuesta al impulso).

La salida del filtro 1 al aplicar la primer muestra se puede ver en la figura 7, en este gráfico de la señal completa se observa que atenúa partes de la señal y amplifica otras, en particular amplifica principalmente antes del segundo 6 y atenúa drásticamente luego. En mayor detalle como se observa en la figura 8 para el intervalo entre 0.248 y 0.256 segundos, se ve como actúa sobre la señal amplificando partes de la misma.

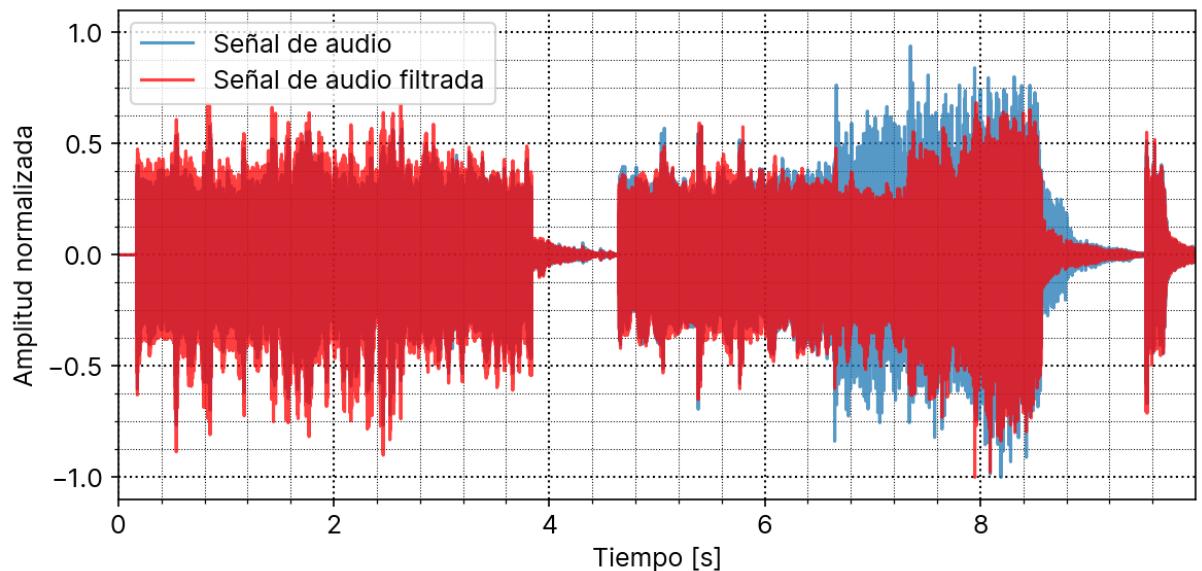


Figura 7: Primer muestra salida de filtro 1

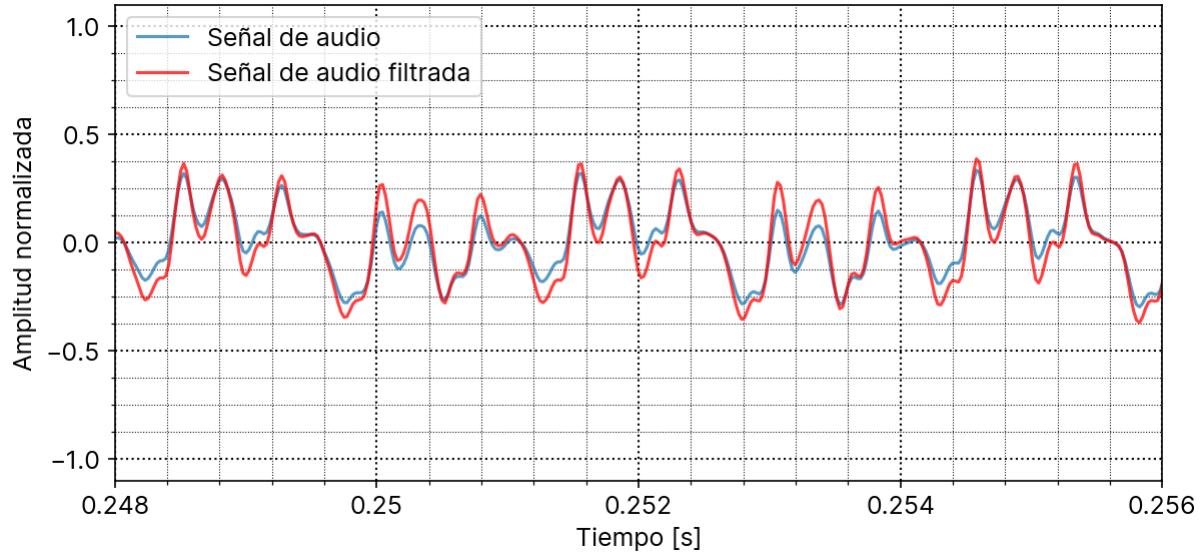


Figura 8: Primer muestra salida de filtro 1 intervalo 0.248 a 0.256s

Aplicando el segundo filtro a la primer muestra resulta como se muestra en el gráfico de figura 9. En esta figura de la señal completa Se puede ver que esta a diferencia del filtro 1, no atenúa o amplifica significativamente partes de la señal, si no que realiza una leve atenuación de toda la señal. Analizando en detalle como se ve en la figura 10 se puede ver el suavizado que realiza este filtro sobre la señal, esto sugiere que el filtro 2 es del tipo pasa bajos, ya que atenúa las frecuencias altas componentes en la señal original, haciendo que la señal resultante no tenga cambios abruptos.

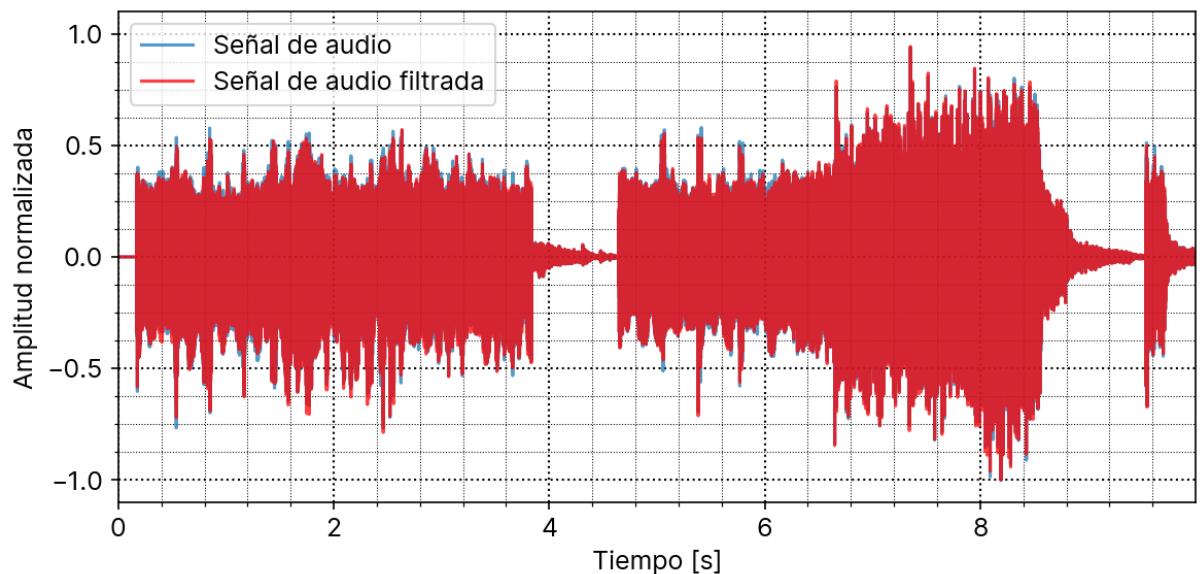


Figura 9: Primer muestra salida de filtro 2

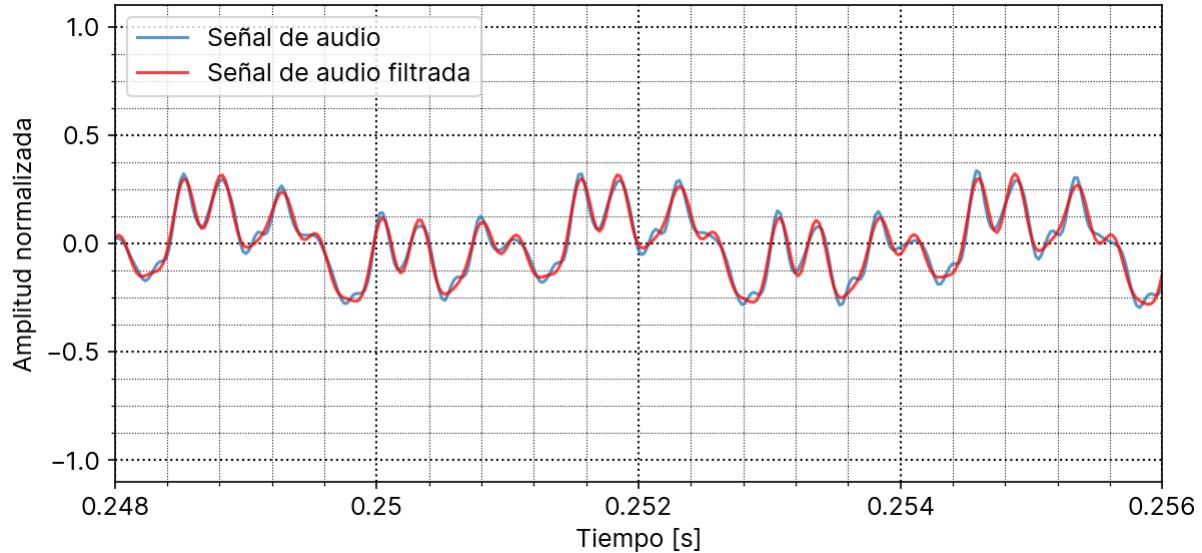


Figura 10: Primer muestra salida de filtro 2 intervalo 0.248 a 0.256s

De manera análoga para la segunda muestra se aplican los filtros mediante la convolución entre la señal y la respuesta al impulso del respectivo filtro.

La salida de la segunda muestra al aplicar el primer filtro se puede ver en la figura 11 en la cual se gráfica la señal completa y se aprecia como se atenúa la mayor parte, principalmente en la primera mitad (antes del segundo 18.5 aproximadamente) y en menor medida en la mitad restante, aunque en partes de la segunda mitad se atenúa drásticamente de todas formas, como por ejemplo en el segundo 29 en el que se atenúa aproximadamente un 70% de la señal.

En la figura 12 se analiza en mayor detalle la señal, en este caso el intervalo entre 26.57 y 26.58 segundos, en esta figura se observa como amplifica partes de la señal, en particular, se observa que amplifica los picos en donde la señal tiene cambios abruptos, es decir, donde la señal se compone de frecuencias altas, esto sugiere que el primer filtro es del tipo pasa altos, es decir atenúa las frecuencias bajas.

En la figura 13 se muestra la señal completa de la salida luego de aplicar el segundo filtro a la segunda muestra, de esta figura no se pueden sacar grandes conclusiones mas que una leve atenuación de toda la señal. Analizando en mayor detalle, por ejemplo el intervalo de 26.57 a 26.58 segundos, como se muestra en la figura 14 se observa algo similar a lo observado para la primer muestra luego de aplicar este filtro y es el suavizado que realiza.

En todos los casos, tanto para la primer muestra como para la segunda y tanto para el primer filtro como el segundo, escuchando la respectiva salida se confirma lo analizado desde el punto de vista del gráfico de la señal, pero ademas se aprecia que el primer filtro realiza una atenuación de las frecuencias mas altas (sonidos agudos) mientras

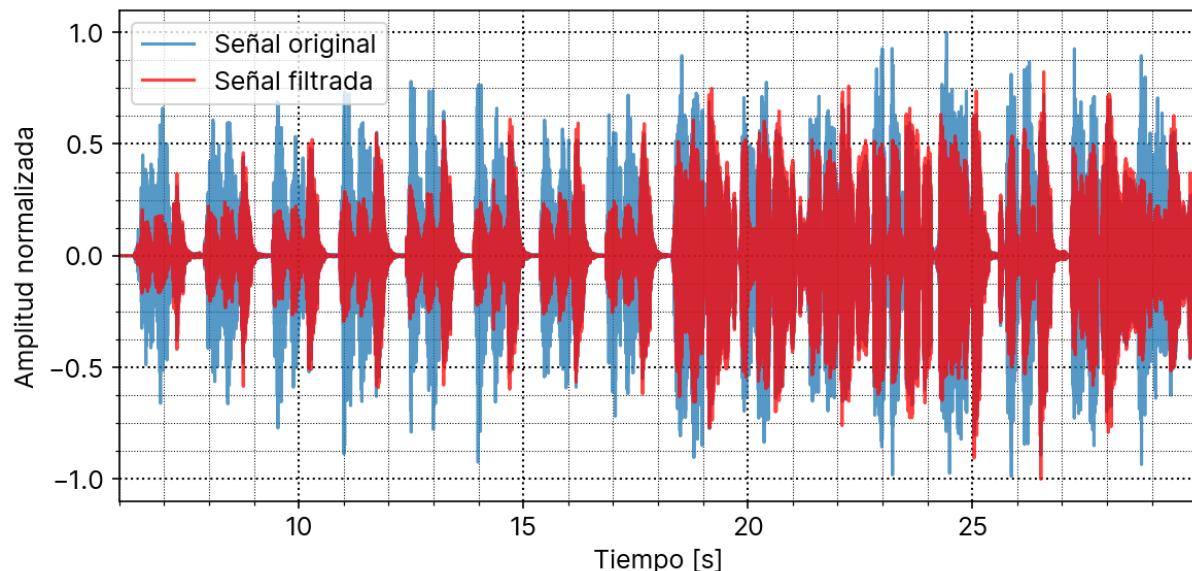


Figura 11: Segunda muestra salida de filtro 1

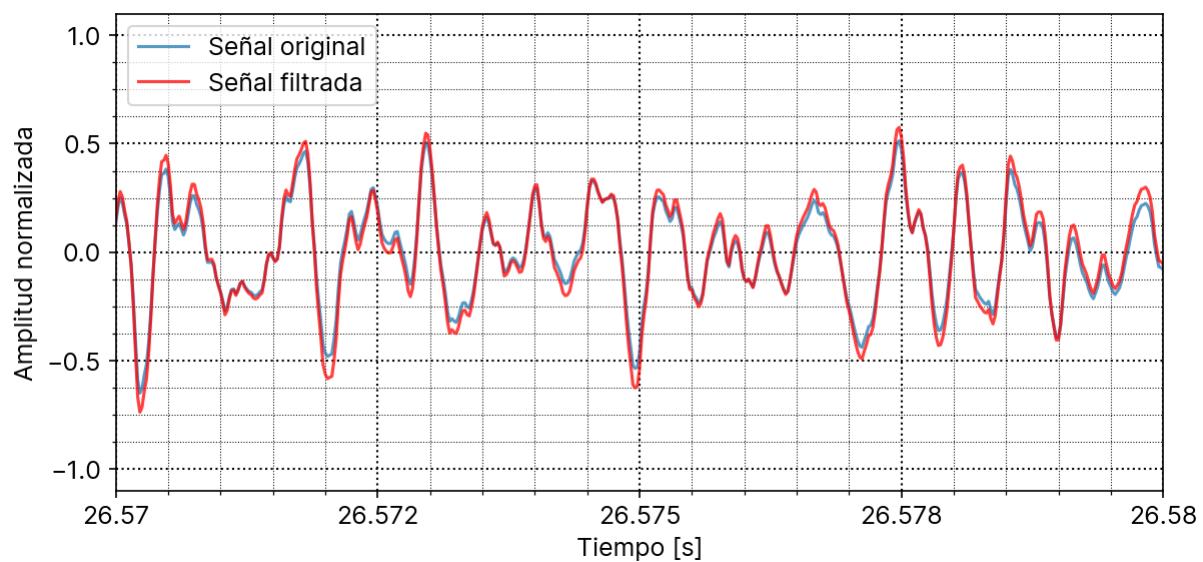


Figura 12: Segunda muestra salida de filtro 1 intervalo 26.57 a 26.58s

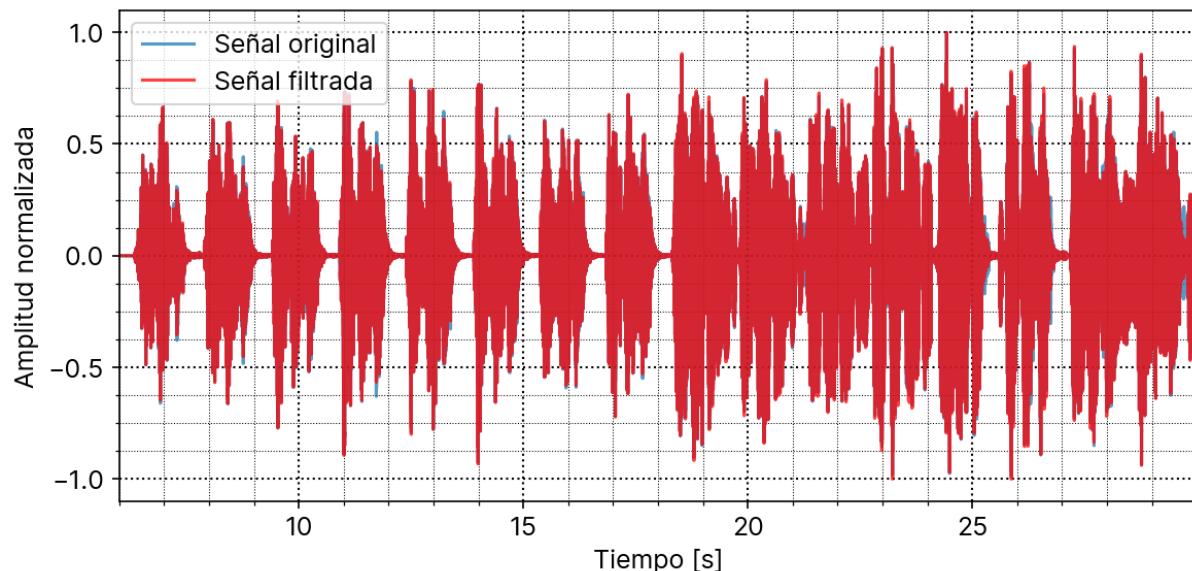


Figura 13: Segunda muestra salida de filtro 2

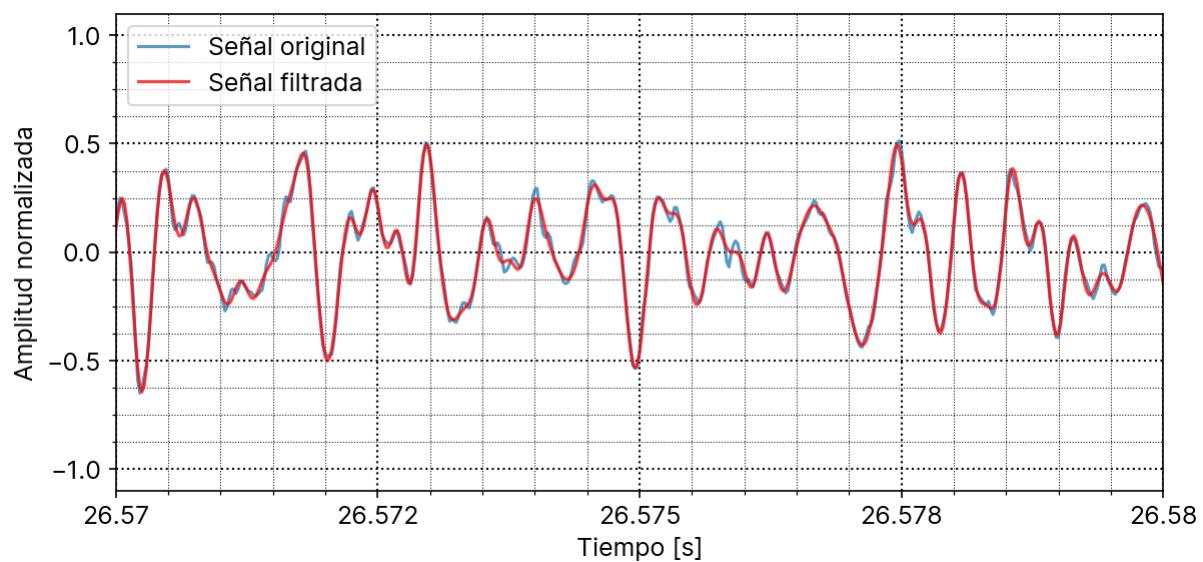


Figura 14: Segunda muestra salida de filtro 2 intervalo 26.57 a 26.58s

que el segundo disminuye las frecuencias bajas (o sonidos graves) esto ultimo no se aprecia en el gráfico de la señal, ya que parece no tener efecto mas que una leve atenuación.

## 2.4. Sonido de diferentes instrumentos

Se generaron tres muestras diferentes a las ya utilizadas, correspondientes con la nota A4 (La4, 440 Hz) mediante la simulación de tres instrumentos musicales distintos: un clarinete, una flauta y un violín. Las señales generadas corresponden con los archivos a4\_clarinete.wav, a4\_flauta.wav y a4\_violin.wav y los gráficos de cada señal se muestran en las figuras 35, 35 y 34 respectivamente.

Si bien todos los sonidos tienen la misma frecuencia, ya que es la misma nota musical, el sonido escuchado percibido es diferente, esto puede ser producto de la forma de onda generada por cada instrumento, lo cual queda clara la diferencia en los respectivos gráficos.

Cada sonido percibido tiene características diferentes, el mas apagado o neutro es el producido por la flauta, mientras que el mas agudo o “afilado” es el producido por el violín, el sonido del clarinete es un intermedio entre ambos, un sonido ni muy agudo ni muy grave o apagado, y con cierto carácter metálico.

Para el caso del clarinete, cuya señal se puede ver en la figura 35, se puede ver que la onda se parece a una onda cuadrada. En el dominio de frecuencia, las ondas cuadradas ideales se componen de armónicos impares.

Para la señal producida por la flauta que se puede ver en la figura 35, se puede ver que se asemeja a una señal senoidal pura, aunque no tan simétrica en los picos, las ondas sinodales en el dominio de frecuencia tienen un único armónico, y es el fundamental, es por esto que el sonido es mas neutro y no tan “brillante” o agudo dado que la frecuencia es la misma en todos los casos.

Por ultimo para la señal producida por el violín, la cual se puede ver en la figura 34, se asemeja a una onda triangular con pendiente decreciente, estas ondas triangulares en el dominio de frecuencia también tienen armónicos impares como la onda cuadrada, pero estos armónicos tienen mayor amplitud, es por esto que si bien tienen un sonido similar, el sonido del violín es mas agudo.

### 3. Dominio de frecuencia

En esta sección se analizan las mismas señales de audio que en la sección anterior, correspondientes a los archivos canción1.wav y canción2.wav, pero en el dominio de la frecuencia. Para esto se calcula la transformada discreta de fourier (DFT) de las mismas mediante un script de Python (que internamente utiliza el algoritmo FFT). El resultado se muestra en los figuras 15 y 16 para la señal de audio de las canciones 1 y 2 respectivamente.

Se puede ver en la figura 15 correspondiente a la primer canción picos angostos en frecuencias determinadas, en cambio para la segunda canción en la figura 16, se puede ver que la energía se distribuye en mas frecuencias ya que los picos no están tan definidos. Esto puede deberse a que en la primer canción se hallaban porciones periódicas de la señal en el dominio temporal mientras que para la segunda canción había mayor presencia de señales no periódicas.

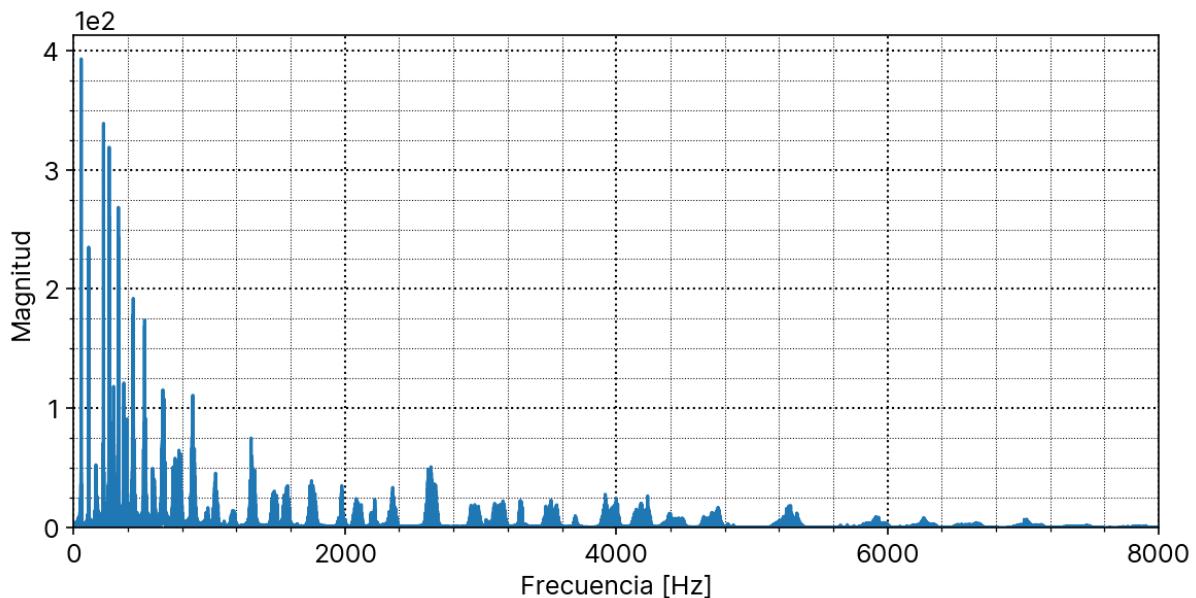


Figura 15: Espectro de ‘canción1.wav’

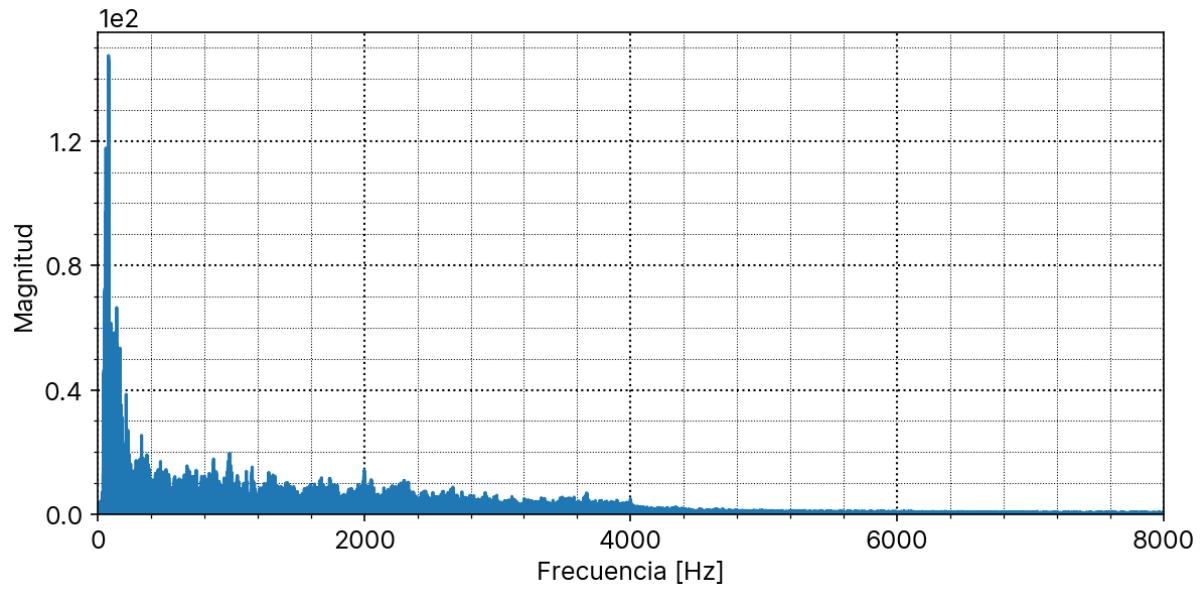


Figura 16: Espectro de 'cancion2.wav'

### 3.1. Filtrado en frecuencia

A continuación se utilizaron las señales filtradas obtenidas en la primera parte para las muestras de los archivos 'cancion1.wav' y 'cancion2.wav' y se graficaron sus espectros en frecuencia, como se puede observar en las figuras 19, 20, 21 y 22. Los gráficos 17 y 18 corresponden a las transformadas de Fourier de los filtros utilizados anteriormente.

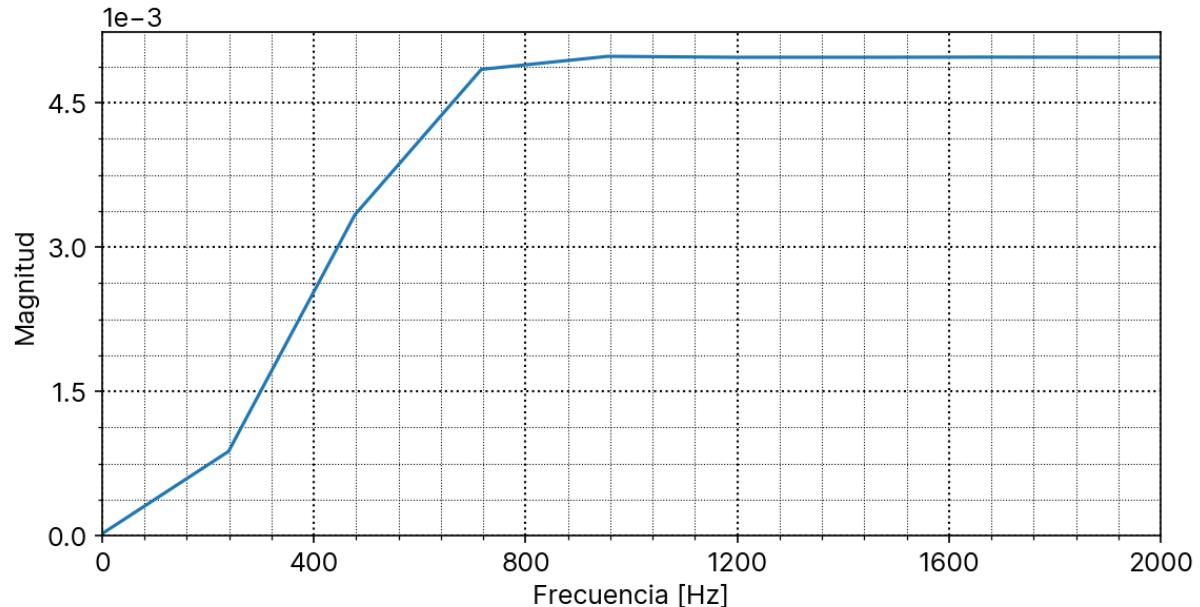


Figura 17: Transformada de Fourier del primer filtro

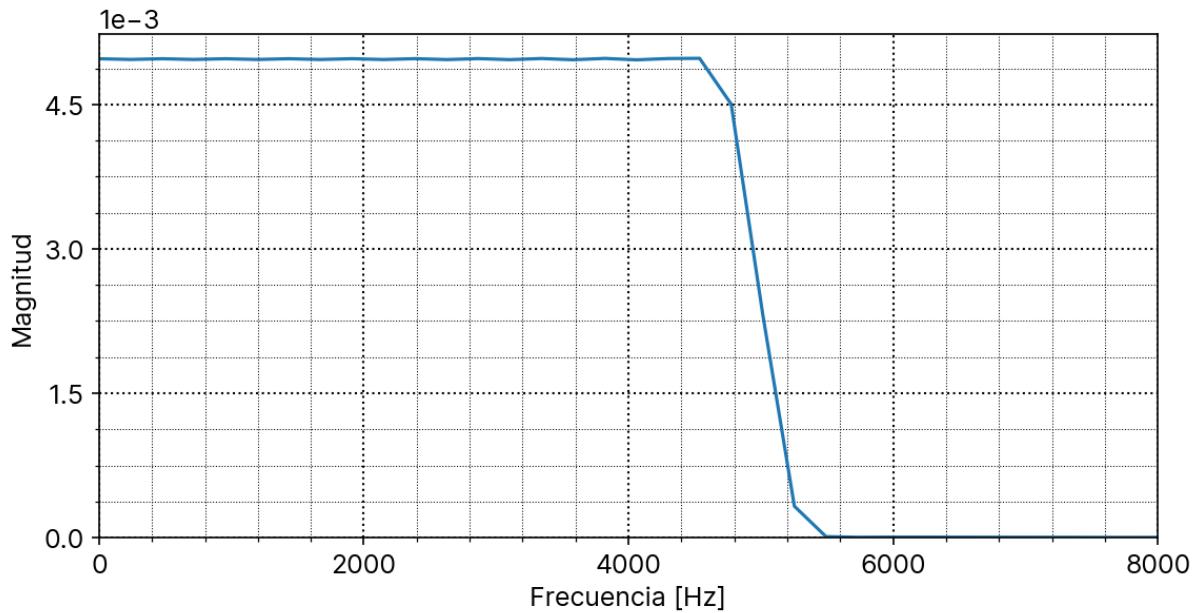


Figura 18: Transformada de Fourier del segundo filtro

Como era de esperarse y como se anticipó en la primera parte, el primer filtro corresponde a un filtro pasa altos mientras que el segundo es un filtro pasa bajos. En el caso del primero deja pasar por completo las frecuencias mayores a 800Hz aproximadamente y atenúa en mayor o menor medida las frecuencias restantes, mientras que el segundo deja pasar las frecuencias menores a 4600Hz aproximadamente, atenúa por completo las frecuencias mayores a 5600Hz aproximadamente y atenúa en mayor o menor medida las que están en el medio.

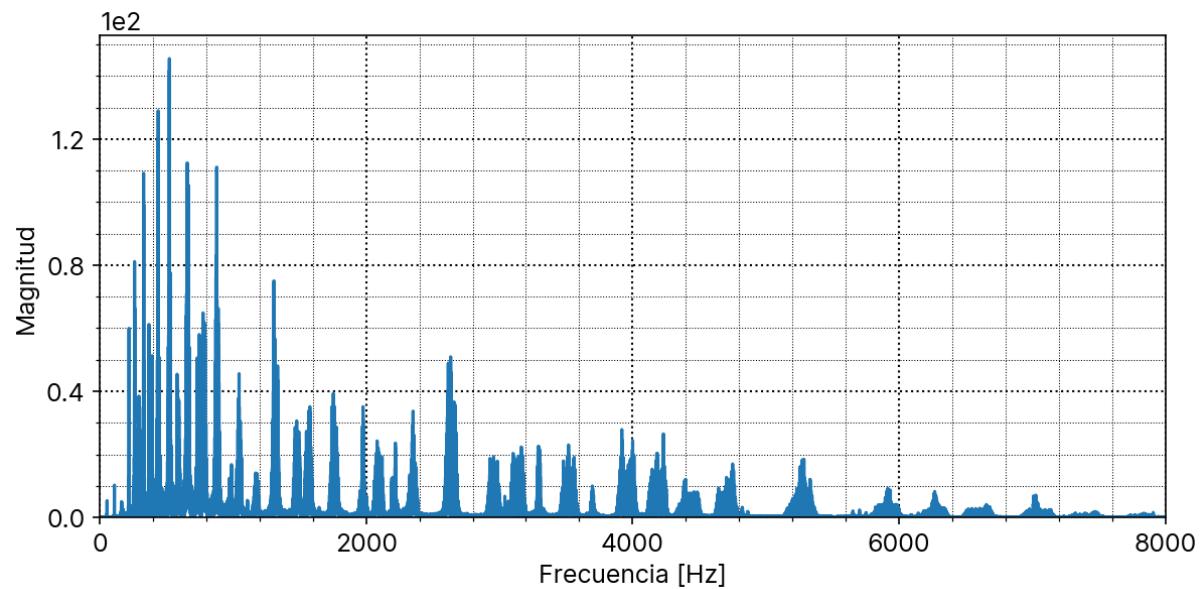


Figura 19: Espectro de 'cancion1.wav' con filtro 1 aplicado

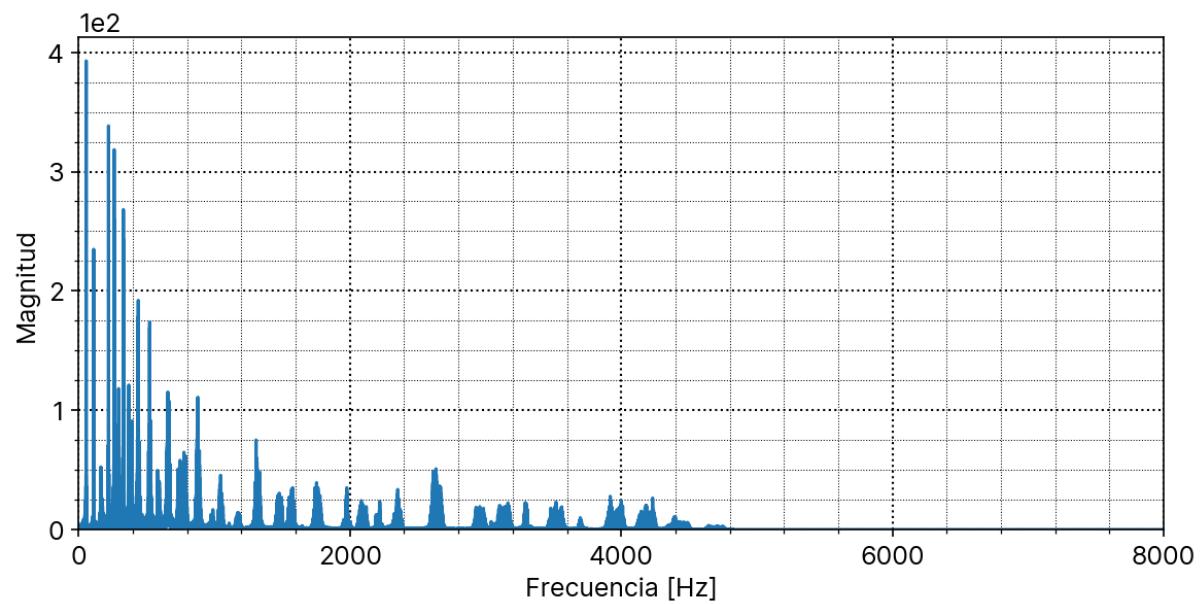


Figura 20: Espectro de 'cancion1.wav' con filtro 2 aplicado

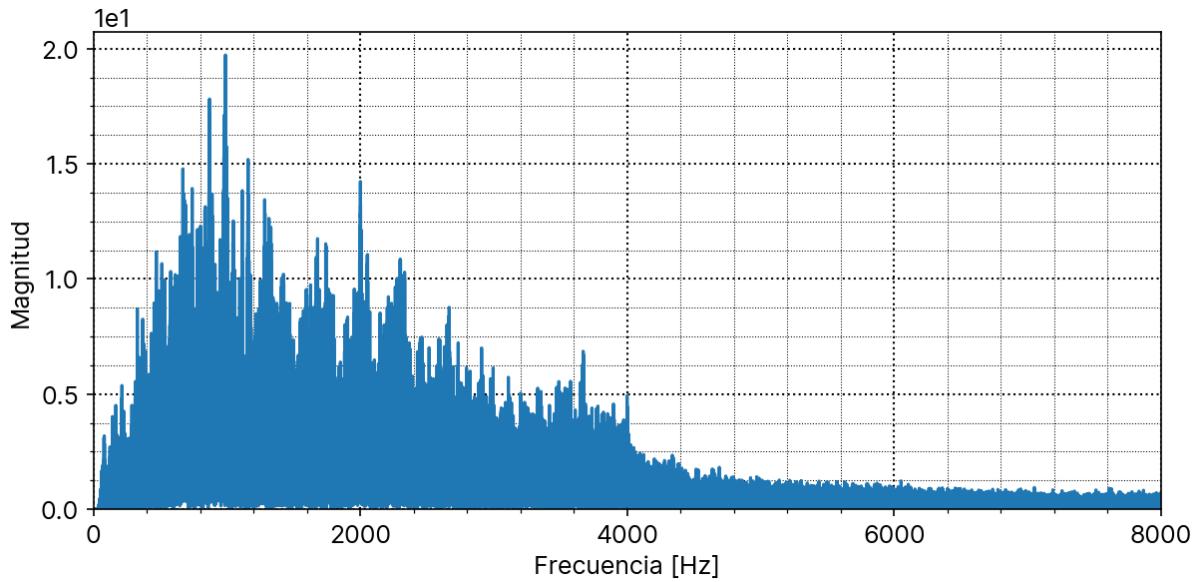


Figura 21: Espectro de 'cancion2.wav' con filtro 1 aplicado

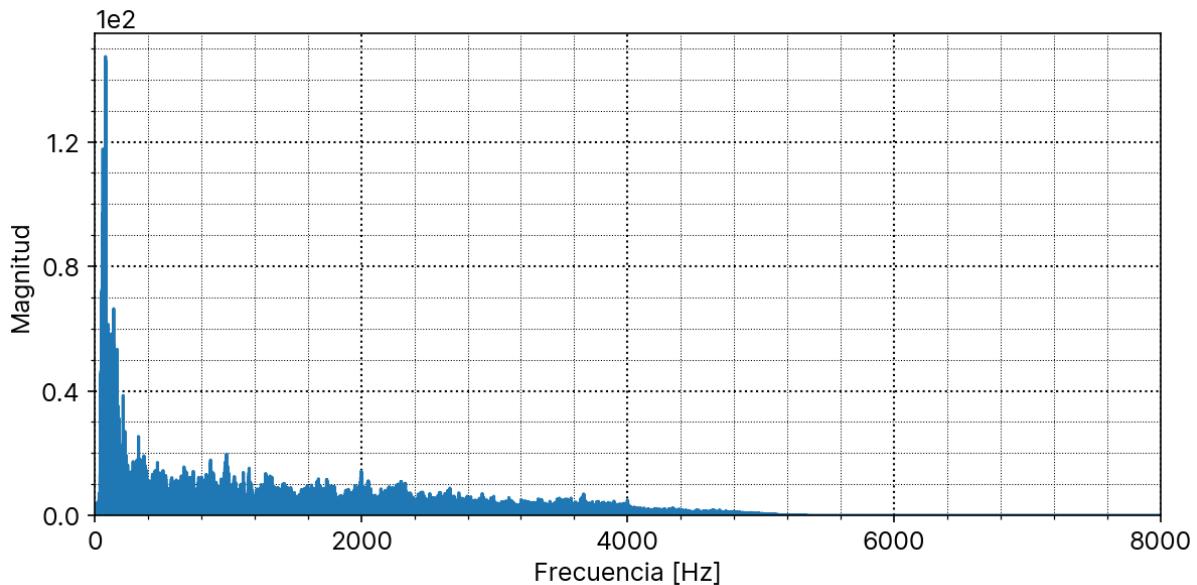


Figura 22: Espectro de 'cancion2.wav' con filtro 2 aplicado

Una de las formas de verificar si el sistema es LTI es con la siguiente relación:

$$y(t) = (h * x)(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) x(t - \tau) d\tau$$

ya que la salida  $y(t)$  está dada por la convolución entre la señal de entrada  $x(t)$  y la respuesta al impulso del sistema  $h(t)$ , al aplicar la transformada de Fourier a ambos lados de la ecuación, y utilizando la propiedad de que la convolución en el dominio del tiempo se convierte en una multiplicación en el dominio de la frecuencia, se obtiene:

$$Y(\omega) = H(\omega) \cdot X(\omega)$$

donde  $X(\omega)$ ,  $Y(\omega)$  y  $H(\omega)$  son las transformadas de Fourier de  $x(t)$ ,  $y(t)$  y  $h(t)$ , respectivamente. Por lo tanto, si existe una función  $H(\omega)$  tal que para una señal arbitraria  $x(t)$  se cumple:

$$Y(\omega) = H(\omega) X(\omega),$$

entonces el sistema puede describirse completamente mediante su respuesta al impulso  $h(t)$ , y se concluye que es un sistema **lineal e invariante en el tiempo (LTI)**.

En cambio, si la relación entre  $X(\omega)$  e  $Y(\omega)$  no puede expresarse como una multiplicación por una función fija  $H(\omega)$ , esto indica que el sistema no es LTI, ya sea porque es no lineal o porque su comportamiento varía en el tiempo.

Por lo tanto, de forma manual se tomaron valores a una determinada frecuencia para ver si cumplen con esta relación.

## 3.2. Espectrogramas

Un espectrograma es una representación de la transformada de Fourier en el tiempo, esto es una representación en tres dimensiones, pero en un plano con colores, en el eje X se representa el tiempo, en el eje Y se representa la frecuencia y el que seria el eje Z, saliente de la pantalla, en este caso representado por el color del pixel, se representa la magnitud del armónico.

Se tomaran diferentes longitudes de ventana, esto es la cantidad de muestras temporales que se toman de la señal para computar la DFT, un mayor numero implica mayor resolución en frecuencia pero menor resolución temporal, esto se manifiesta en el espectrograma por lineas o puntos bien definidos en el eje Y, pero difusos en las transiciones en el eje X, por el contrario un menor numero de puntos implica mayor resolución temporal pero menor resolución en frecuencia, esto es lineas o puntos cortantes en las transiciones en el eje X pero difusas en el eje Y.

### 3.2.1. Espectrograma con ventana rectangular

En las figuras 23, 24 y 25 se gráfica el espectrograma de la primer canción, utilizando una ventana rectangular en todos los casos, tomando 512, 1024 y 2048 puntos respectivamente.

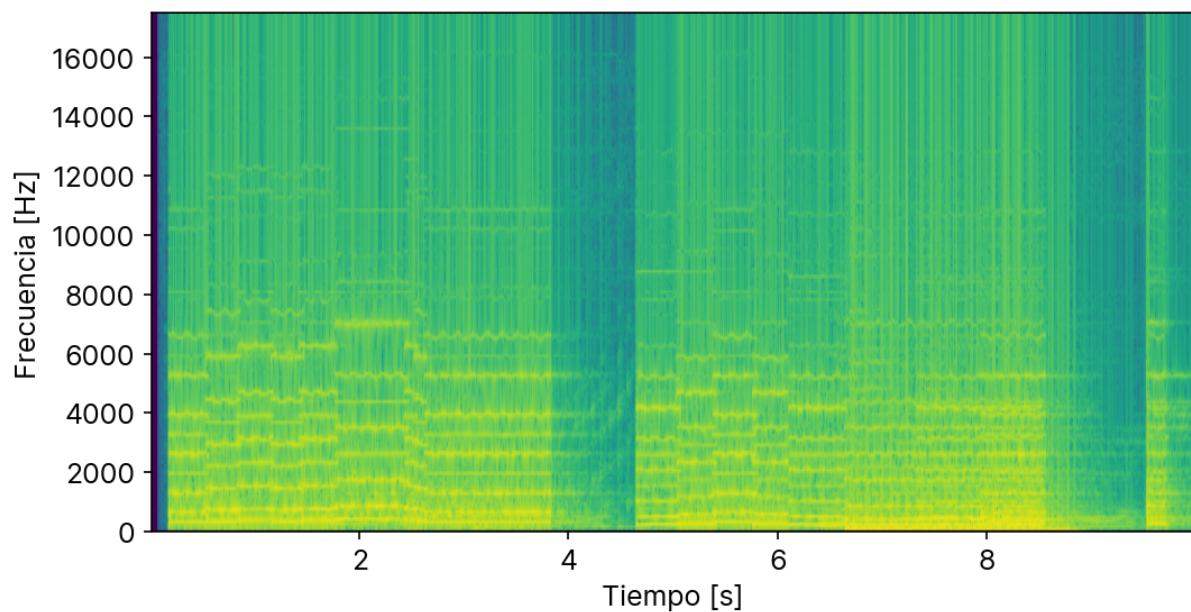


Figura 23: Espectrograma primer muestra de ventana rectangular de 512 puntos

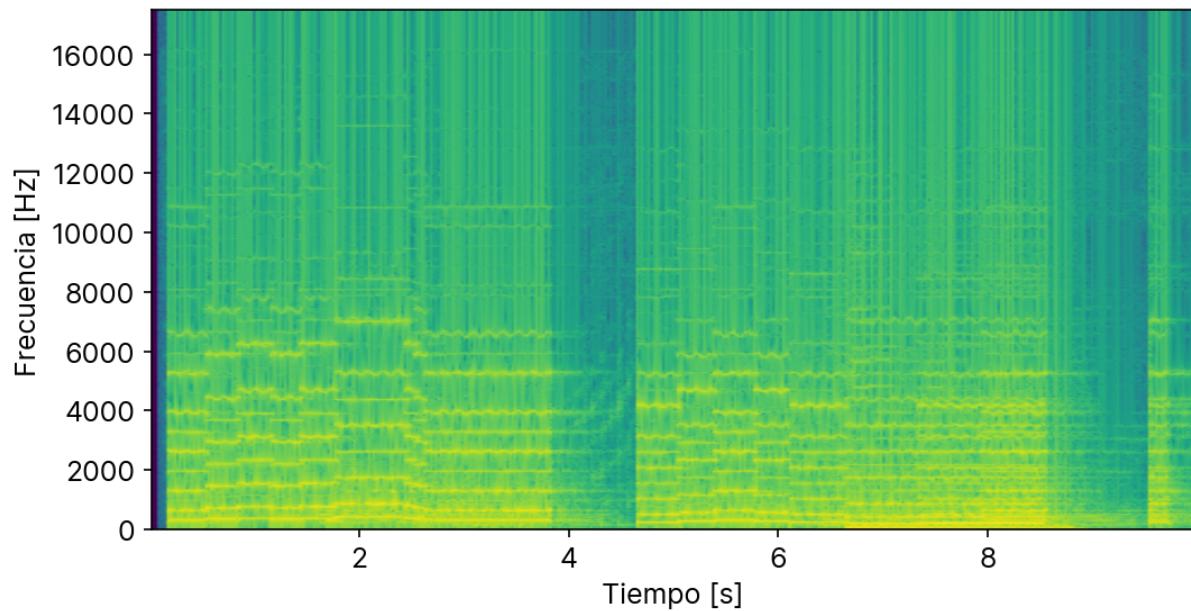


Figura 24: Espectrograma primer muestra de ventana rectangular de 1024 puntos

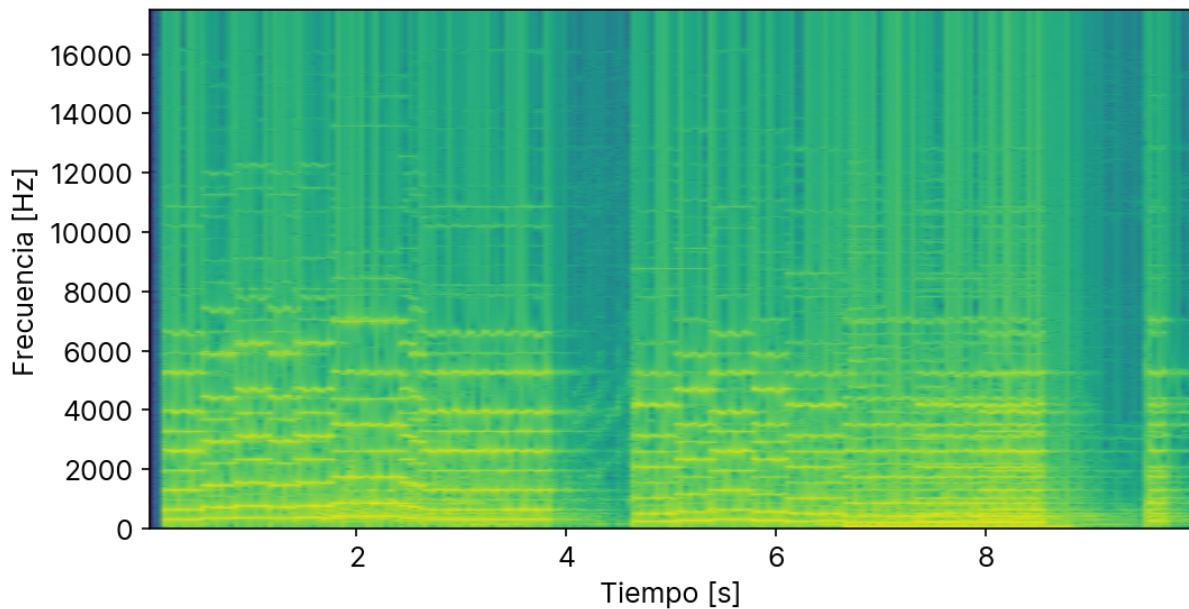


Figura 25: Espectrograma primer muestra de ventana rectangular de 2048 puntos

De manera análoga, en las figuras 26, 27 y 28 se gráfica el espectrograma de la segunda canción, utilizando una ventana rectangular en todos los casos, tomando 512, 1024 y 2048 puntos respectivamente.

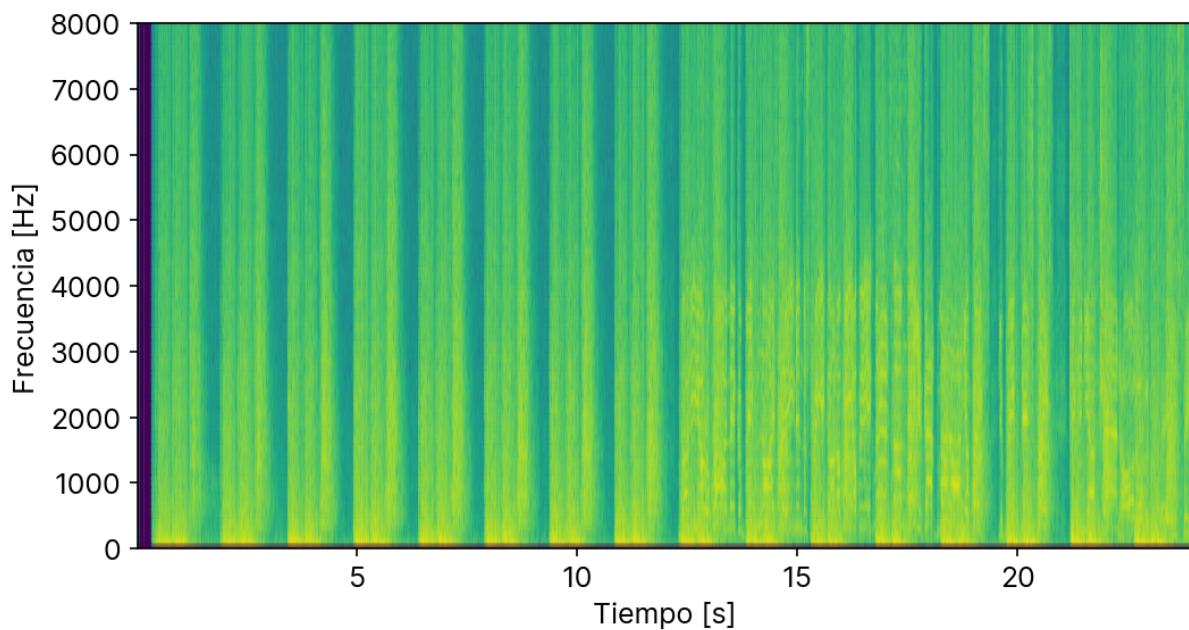


Figura 26: Espectrograma segunda muestra de ventana rectangular de 512 puntos

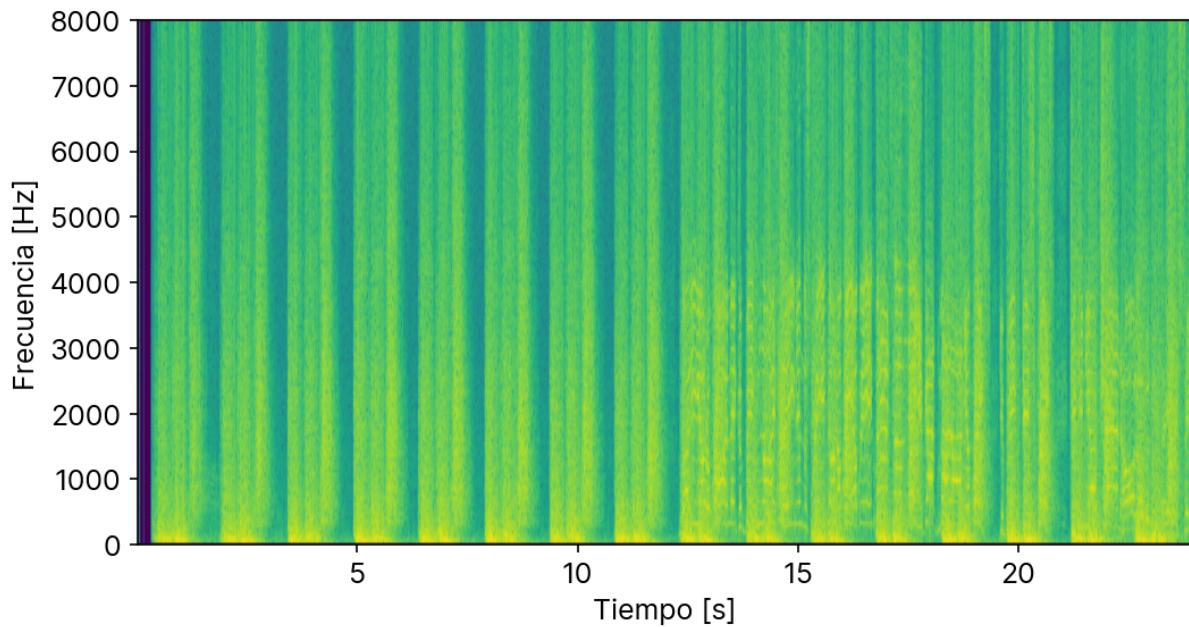


Figura 27: Espectrograma segunda muestra de ventana rectangular de 1024 puntos

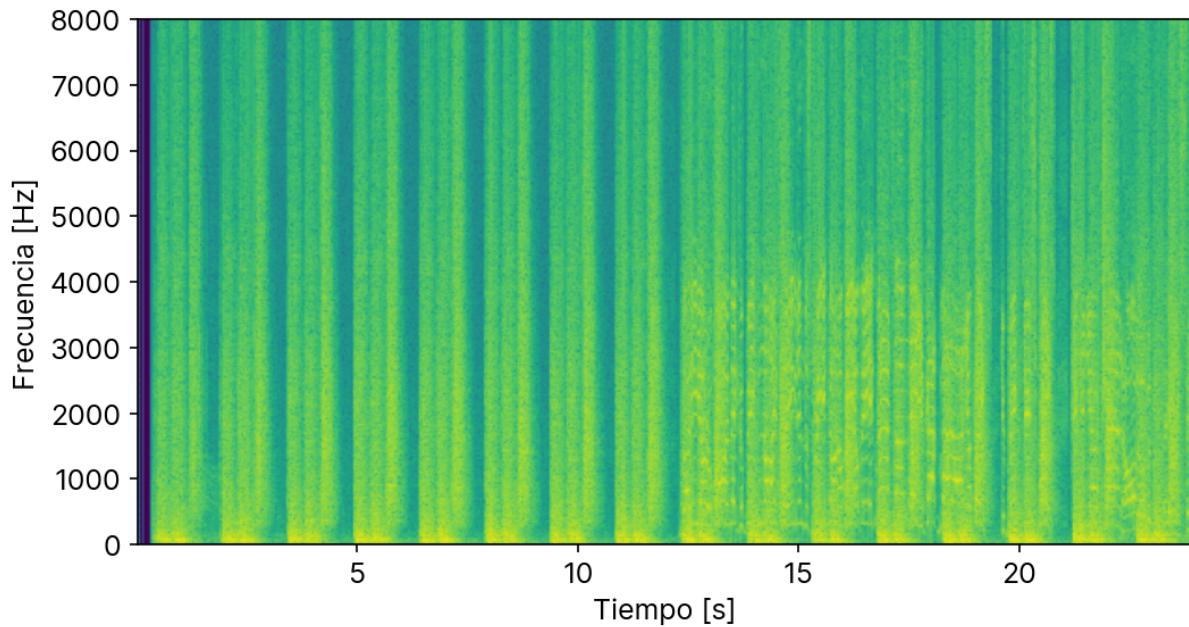


Figura 28: Espectrograma segunda muestra de ventana rectangular de 2048 puntos

### 3.2.2. Espectrograma con ventana triangular

En la figura 29 se muestra el espectrogramas de las canciones 1 tomando 2048 de puntos, pero utilizando una ventana triangular. La diferencia entre utilizar una ventana

triangular y una rectangular en la práctica es que la ventana rectangular tiene mejor resolución en frecuencia ya que su espectro es una función sinc (con la función sinc definida como  $\sin(\pi \cdot x)/\pi \cdot x$ ) pero mayor fuga espectral, ya que los lóbulos secundarios de las sinc son más fuertes que la del espectro de la función triangular, que es una sinc pero al cuadrado, lo que hace que los lóbulos secundarios disminuyan.

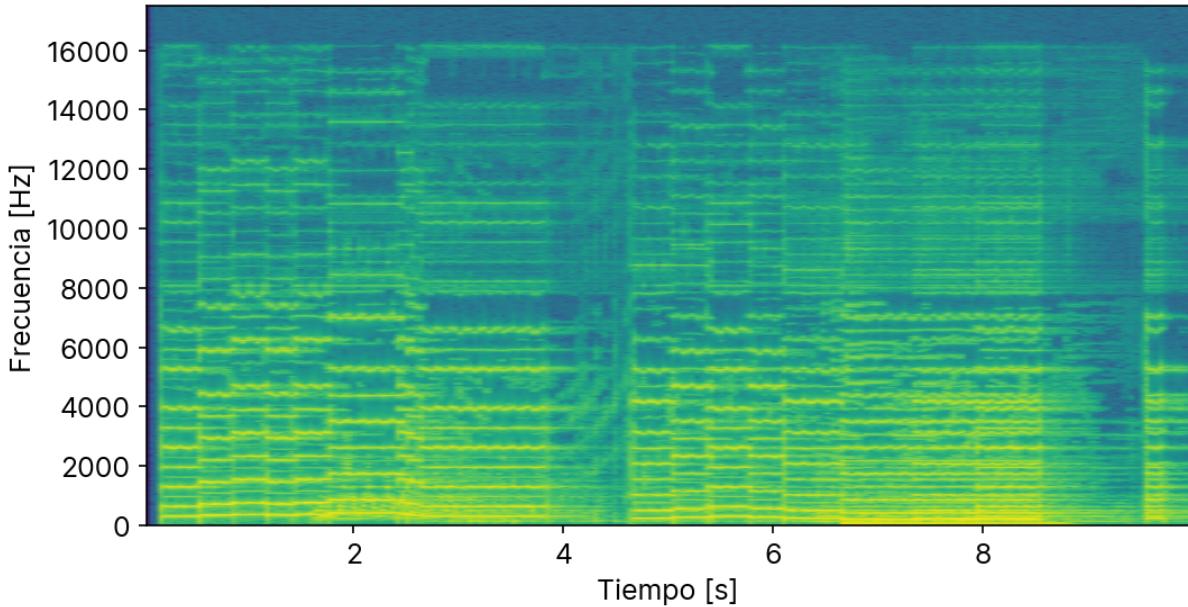


Figura 29: Espectrograma primer muestra de ventana triangular de 2048 puntos

### 3.2.3. Espectrograma con ventana de Hann

La ventana de Hann es una función que en el dominio temporal tiene una forma suave, no como la ventana rectangular o triangular que tiene puntos con derivada discontinua, la forma es parecida a medio ciclo de un seno. En el dominio de frecuencia, la ventana de Hann tiene una forma parecida a la de la ventana rectangular con un lóbulo principal, pero este más ancho que el de la rectangular, esto implica menor resolución en frecuencia; además el espectro de la ventana de Hann tiene lóbulos laterales menores, lo que reduce aún más la fuga espectral.

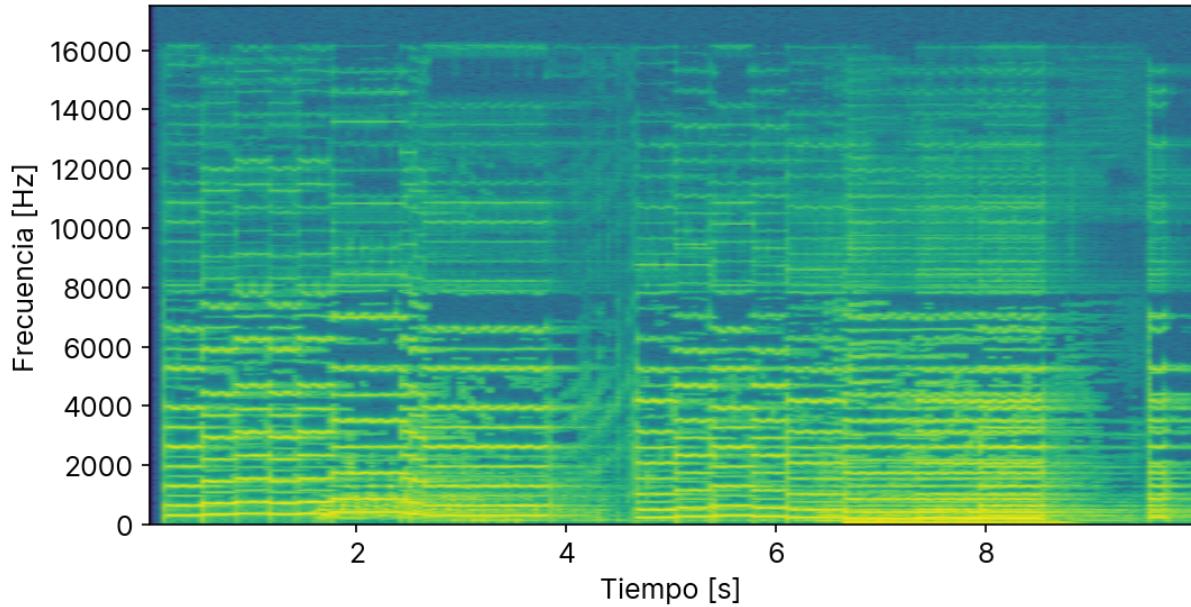


Figura 30: Espectrograma primer muestra con ventana Hann de 2048 puntos

Analizando el espectrograma de la primer canción, en particular el de la figura 29, en el cual se toman 2048 puntos y se utiliza una ventana triangular, se observa claramente las notas que componen la melodía, y ademas en que tiempo ocurre cada una de ellas. Ademas se observa que no es muy clara la resolución temporal pero de todas maneras se tiene una aproximación general de en que tiempo ocurre cada nota, para mayor resolución se puede analizar en detalle la figura 23 en la cual se toman menos puntos de ventana (y se utiliza una ventana rectangular) por lo tanto se tiene mayor resolución temporal.

### 3.3. Serie de Fourier tomando uno y varios periodos

Para señales musicales de la nota A4 generados generadas en la sección 2.4 para diferentes instrumentos, mediante un script de python, se analiza el espectro de cada una y se remueven altas frecuencias, intentando preservar el sonido generado pero utilizando menor información para obtener dicho sonido.

En primer lugar, se obtiene la serie de Fourier de cada una de las notas generada por los diferentes instrumentos, utilizando uno y mas periodos, para la generada por el clarinete, se muestra la serie de Fourier utilizando 1, 4 y 8 periodos en la figura 31, para la nota generada por la flauta la serie de Fourier se observa en la figura 32, finalmente en la figura 33 se observa la serie de Fourier para la nota A4 generada por el violín. Se puede ver en todos los casos que tomando mas periodos de la señal se tiene más resolución espectral, y tiene sentido ya que al tomar mas periodos se tiene mas información de la señal.

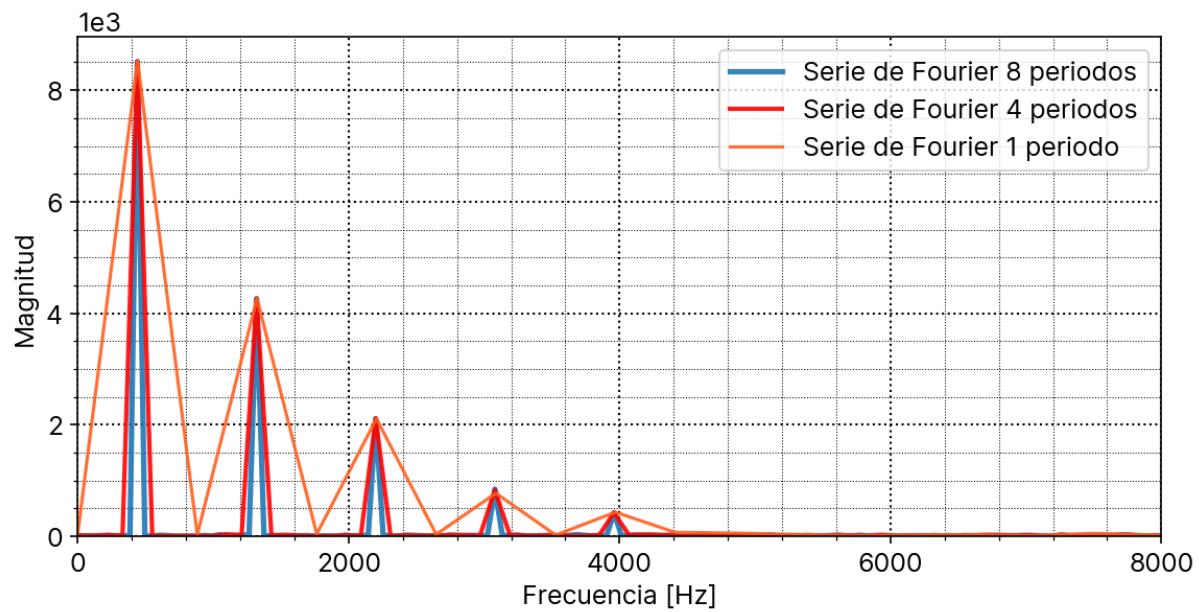


Figura 31: Serie de Fourier tomando 1, 4 y 8 periodos nota A4 clarinete

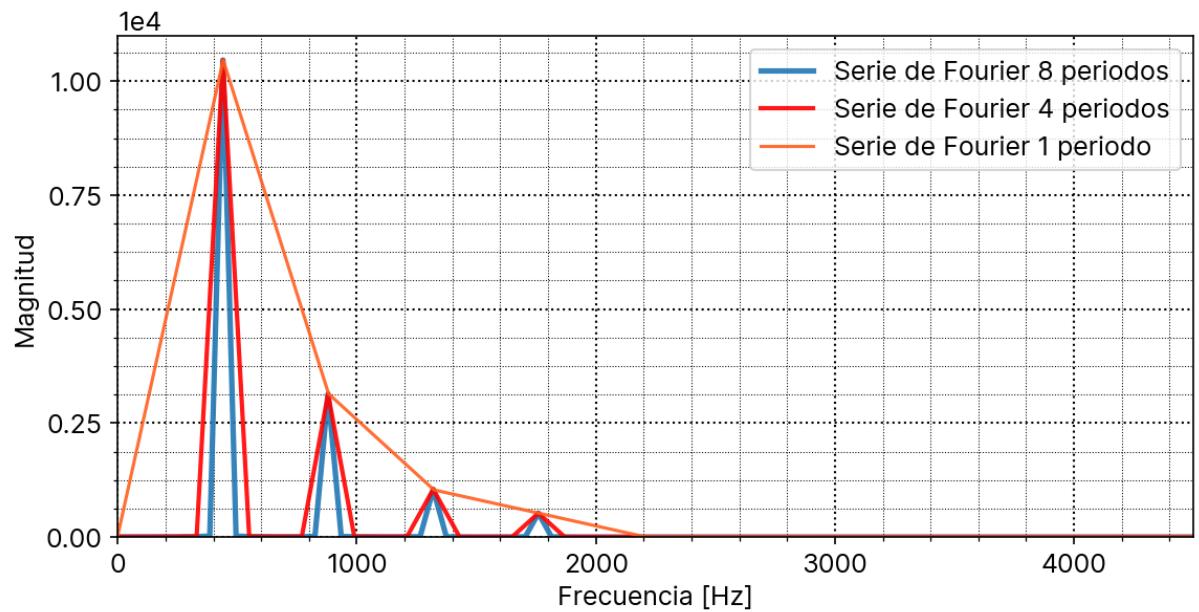


Figura 32: Serie de Fourier tomando 1, 4 y 8 periodos nota A4 flauta

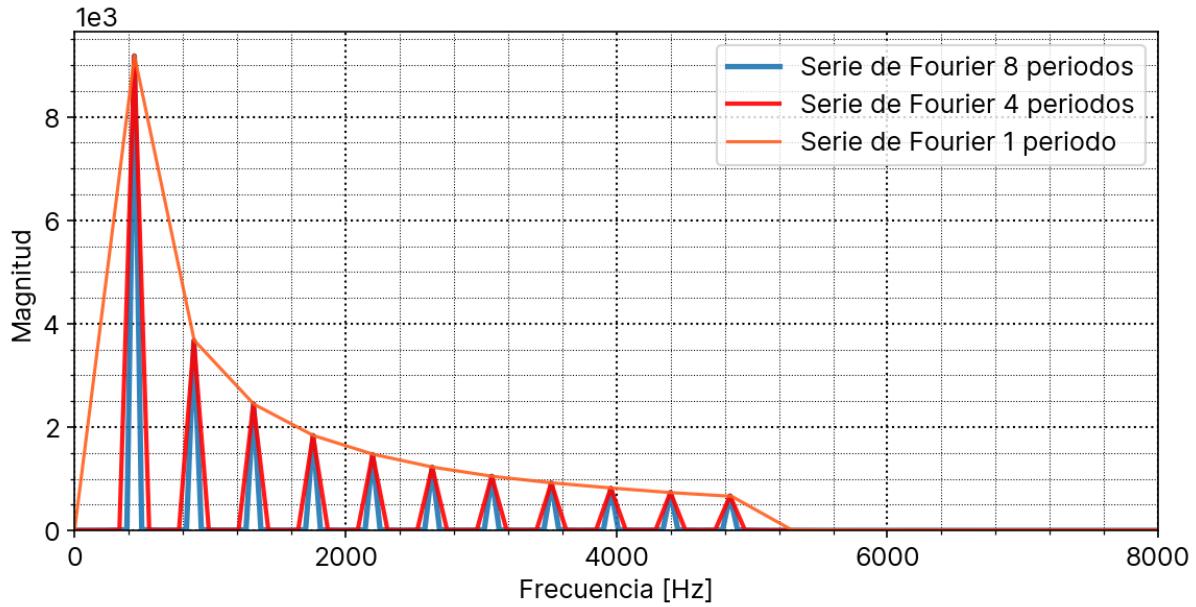


Figura 33: Serie de Fourier tomando 1, 4 y 8 periodos nota A4 violín

### 3.4. Filtrado de muestras

Para realizar el filtrado, se eliminan frecuencias mayores a un numero de frecuencia arbitrario, esto es análogo a aplicar un filtro pasa-bajos en la practica, pero mediante procesamiento digital. El numero arbitrario que define que frecuencias se deben eliminar queda determinado por como suena la señal luego de eliminar esas frecuencias mayores. En particular se ha detectado que para la flauta por tener un menor numero de armónicos, como se puede ver en la figura 32 de su serie de Fourier, este numero arbitrario puede ser tan bajo como 1000 Hz, sin modificar demasiado el sonido de la nota. En el otro extremo se tiene el violín, el cual se ve en su serie de Fourier (figura 33) que posee un gran numero de armónicos, esto hace que si se eliminan frecuencias bajas se modifica mucho el sonido de la nota. En todos los casos se observa que no se puede ‘comprimir’ demasiado la señal puesto que no poseen armónicos de alta frecuencia, ya de por si son muestras ‘limpias’ que ya poseen un procesamiento digital previo realizado por el programa generador.

Una comparación entre las señal temporal resultante de las notas musicales filtradas y la señal original se muestran en las figuras 34, 35 y 36, para la nota filtrada del violín, del clarinete y de la flauta, respectivamente.

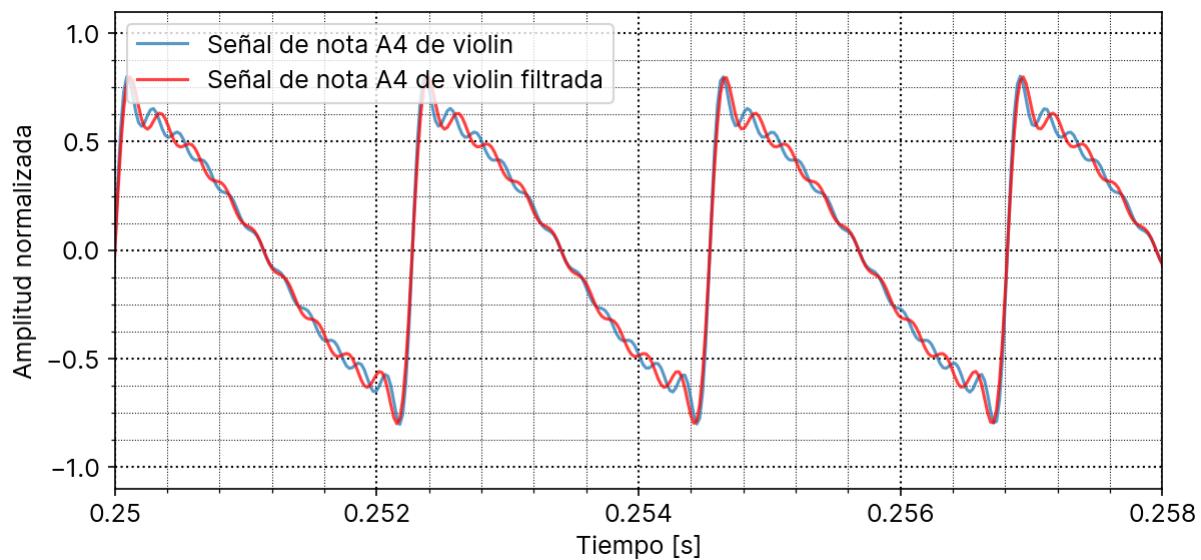


Figura 34: Comparación entre señal original y filtrada en tiempo nota A4 violin

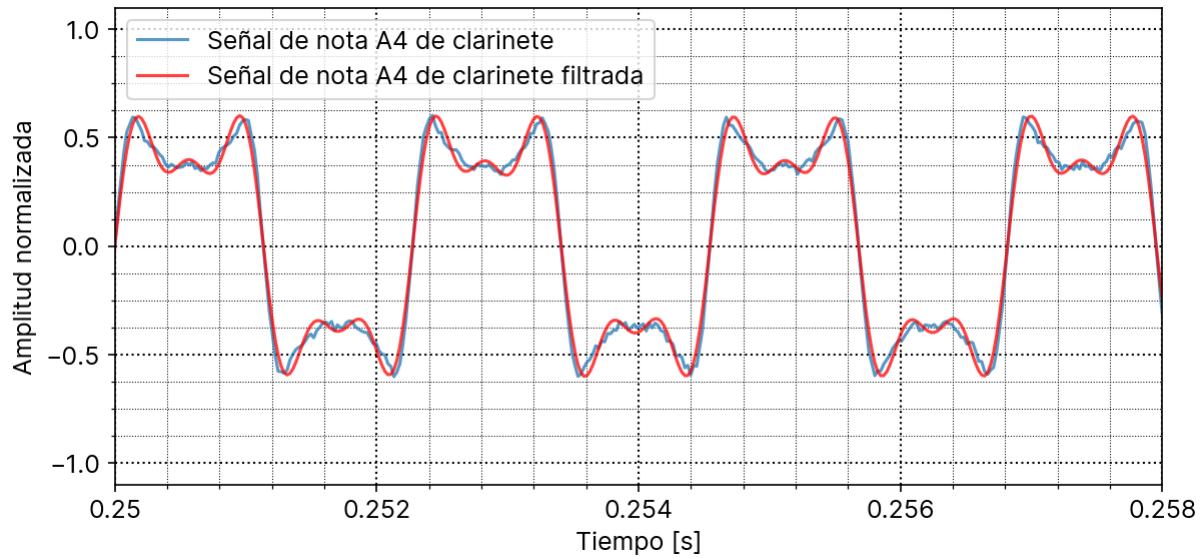


Figura 35: Comparación entre señal original y filtrada en tiempo nota A4 clarinete

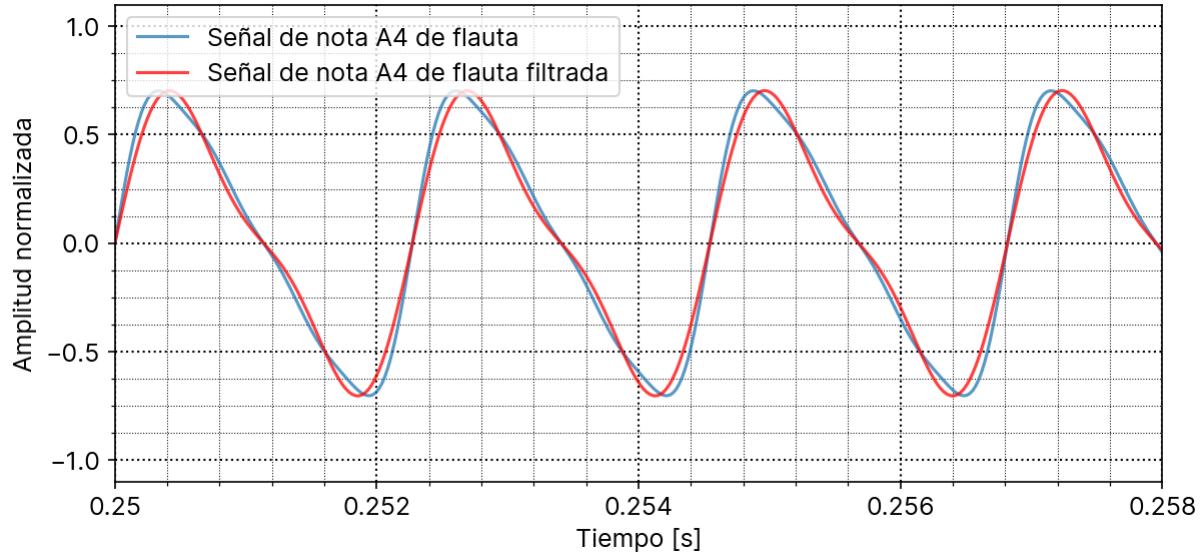


Figura 36: Comparación entre señal original y filtrada en tiempo nota A4 flauta

### 3.5. Efectos musicales en términos de sistemas

En esta sección se analizan distintos efectos interpretándolos como sistemas que procesan la señal de entrada  $x(t)$  dando en la salida una señal  $y(t)$ .

#### 3.5.1. Delay

El efecto *delay* consiste en sumar a la señal original una copia de sí misma con un factor de retroalimentación que genera repeticiones. Puede modelarse como:

$$y[n] = x[n] + \alpha y[n-D]$$

donde  $D$  representa el retardo en muestras y  $\alpha$  es el coeficiente de retroalimentación.

Analizando las propiedades de este sistema, se observa que es un sistema **lineal**, que posee **memoria** ya que depende de muestras pasadas, y es **invariante en el tiempo** debido a que el retardo no cambia a lo largo del tiempo.

#### 3.5.2. Distorsión

La distorsión consiste en aplicar una función no lineal sobre la amplitud de la señal, como puede ser un recorte (clipping). En este caso se utiliza la función tangente hiperbólica:

$$y[n] = \tanh(Gx[n])$$

Este sistema no es lineal ya que su salida no es proporcional a la entrada, es invariante en el tiempo ya que no cambia en el tiempo, y es sin memoria porque cada muestra depende solo de la muestra actual. Se observa la aparición de armónicos múltiples de la frecuencia fundamental, dando un tono mas brillante y Enriquecido.

### 3.5.3. Trémolo

Consiste en la modulación de la amplitud de la señal, es decir, en variar su volumen en forma periódica mediante un oscilador. Se implementa mediante

$$y[n] = \left(1 - d \sin\left(\frac{2\pi f_m n}{f_s}\right)\right) x[n]$$

donde  $d$  es la profundidad de modulación y  $f_m$  la frecuencia de modulación.

El sistema implementado es **lineal, invariante en el tiempo** (si la frecuencia de modulación es constante) y **tiene memoria**, ya que depende de una función periódica externa.

En el espectro de la señal se pueden observar *bandas laterales* que rodean la frecuencia fundamental, producidas por la modulación en amplitud.

### 3.5.4. Vibrato

Produce una modulación en frecuencia, alterando la frecuencia instantánea de la señal. Se lo puede expresar como un retardo variable en el tiempo:

$$y[n] = x\left[n + d \sin\left(\frac{2\pi f_m n}{f_s}\right)\right]$$

Se observa que este sistema **no es lineal**, ya que el desplazamiento depende de la señal moduladora. Es **invariante en el tiempo** (si el modulador es constante) y **tiene memoria**, ya que utiliza muestras pasadas.

En el espectro se puede apreciar un *ensanchamiento* en la frecuencia fundamental con variaciones periódicas alrededor de la misma, lo que refleja la modulación del tono.

### 3.5.5. Chorus

Combina múltiples copias de la señal, cada una con un retardo distinto. Simula varios instrumentos sonando al mismo tiempo. Se lo puede modelar como la suma de varios vibratos:

$$y[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x\left[n + d_k \sin\left(\frac{2\pi f_{m_k} n}{f_s}\right)\right]$$

Es un sistema **no lineal** debido a la interpolación variable, **invariante en el tiempo** (si los parámetros son constantes) y **tiene memoria** debido al retardo de cada instrumento.

En el espectro se observa un *ensanchamiento* alrededor de la frecuencia fundamental y una estructura densa debido a la suma de fuentes sonoras.

Cada efecto puede interpretarse como un sistema que transforma una señal de entrada aplicando operaciones de retardo, modulación o no linealidad. Los efectos que se caracterizaron como lineales e invariantes en el tiempo (delay y tremolo) modifican el espectro de manera predecible. Mientras que los no lineales introducen componentes que afectan la estructura armónica que se tenía en la señal original