



UBA
1821 Universidad
de Buenos Aires

.UBA **fiuba**
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
mlema@fi.uba.ar
edei@fi.uba.ar

Índice

1	Introducción	3
2	Dominio de frecuencia	3
2.1	Filtrado	4
2.2	Espectrogramas	8
2.3	Efectos musicales en términos de sistemas	18

Índice de figuras

1	Espectro de 'cancion1.wav'	3
2	Espectro de 'cancion2.wav'	4
3	Transformada de Fourier del primer filtro	4
4	Transformada de Fourier del segundo filtro	5
5	Espectro de 'cancion1.wav' con filtro 1 aplicado	5
6	Espectro de 'cancion1.wav' con filtro 2 aplicado	6
7	Espectro de 'cancion2.wav' con filtro 1 aplicado	6
8	Espectro de 'cancion2.wav' con filtro 2 aplicado	7
9	Espectrograma primer muestra de ventana rectangular de 512 puntos	8
10	Espectrograma primer muestra de ventana rectangular de 1024 puntos	9
11	Espectrograma primer muestra de ventana rectangular de 2048 puntos	9
12	Espectrograma segunda muestra de ventana rectangular de 512 puntos	10
13	Espectrograma segunda muestra de ventana rectangular de 1024 puntos	10
14	Espectrograma segunda muestra de ventana rectangular de 2048 puntos	11
15	Espectrograma primer muestra de ventana triangular de 512 puntos	12
16	Espectrograma primer muestra de ventana triangular de 1024 puntos	12
17	Espectrograma primer muestra de ventana triangular de 2048 puntos	13
18	Espectrograma segunda muestra de ventana triangular de 512 puntos	13
19	Espectrograma segunda muestra de ventana triangular de 1024 puntos	14
20	Espectrograma segunda muestra de ventana triangular de 2048 puntos	14
21	Espectrograma primer muestra con ventana Hann de 512 puntos	15
22	Espectrograma primer muestra con ventana Hann de 1024 puntos	15
23	Espectrograma primer muestra con ventana Hann de 2048 puntos	16
24	Espectrograma segunda muestra con ventana Hann de 512 puntos	16
25	Espectrograma segunda muestra con ventana Hann de 1024 puntos	17
26	Espectrograma segunda muestra con ventana Hann de 2048 puntos	17
27	Espectro con original	18
28	Espectro con efecto delay	18
29	Espectro con original	19
30	Espectro con efecto distorsión	19
31	Espectro nota original	20
32	Espectro nota con efecto tremolo	20

33 Efecto: Vibrato - Espectro original	21
34 Efecto: Vibrato - Espectro con efecto	21
35 Efecto: Chorus - Espectro original	21
36 Efecto: Chorus - Espectro con efecto	22

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 quasi-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 de frecuencia

En esta sección se analizan las mismas señales de audio que en la sección anterior, correspondientes a los archivos `cancion1.wav` y `cancion2.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 1 y 2 para la señal de audio de las canciones 1 y 2 respectivamente.

Se puede ver en la figura 1 correspondiente a la primer canción picos angostos en frecuencias determinadas, en cambio para la segunda canción en la figura 2, 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.

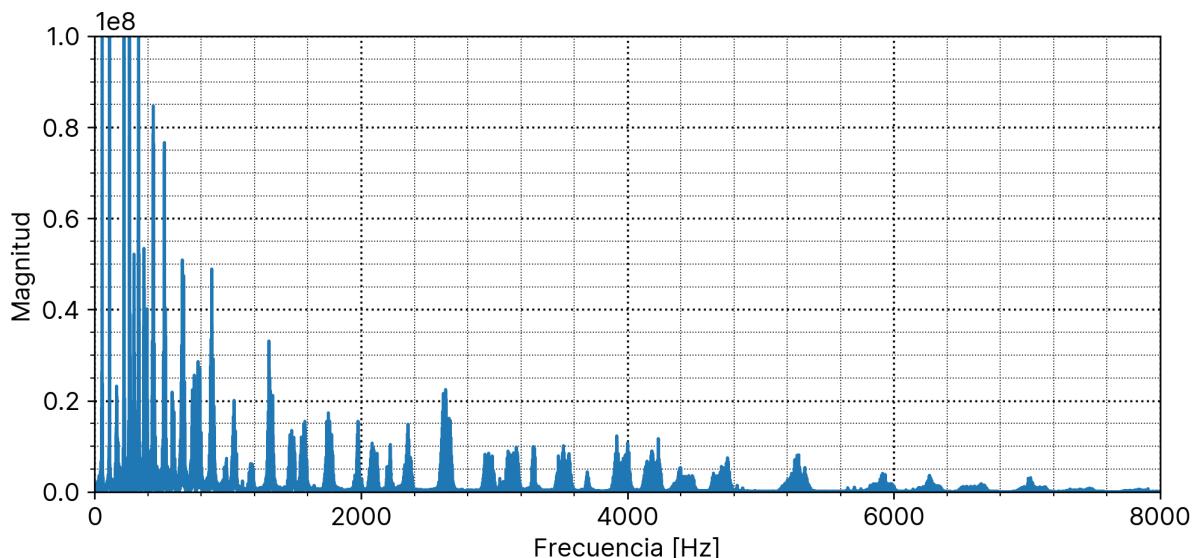


Figura 1: Espectro de ‘cancion1.wav’

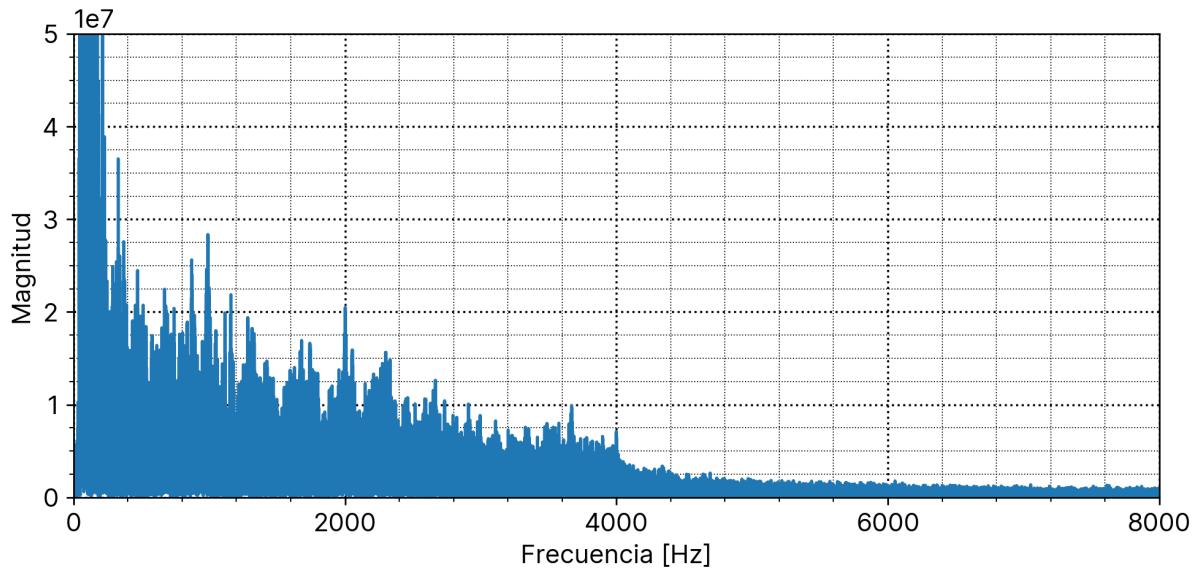


Figura 2: Espectro de 'cancion2.wav'

2.1. Filtrado

A continuación se utilizaron las señales filtradas obtenidas en la primera parte y se graficaron sus espectros en frecuencia, como se puede observar en las figuras 5, 6, 7 y 8. Los gráficos 3 y 4 corresponden a las transformadas de Fourier de los filtros utilizados anteriormente.

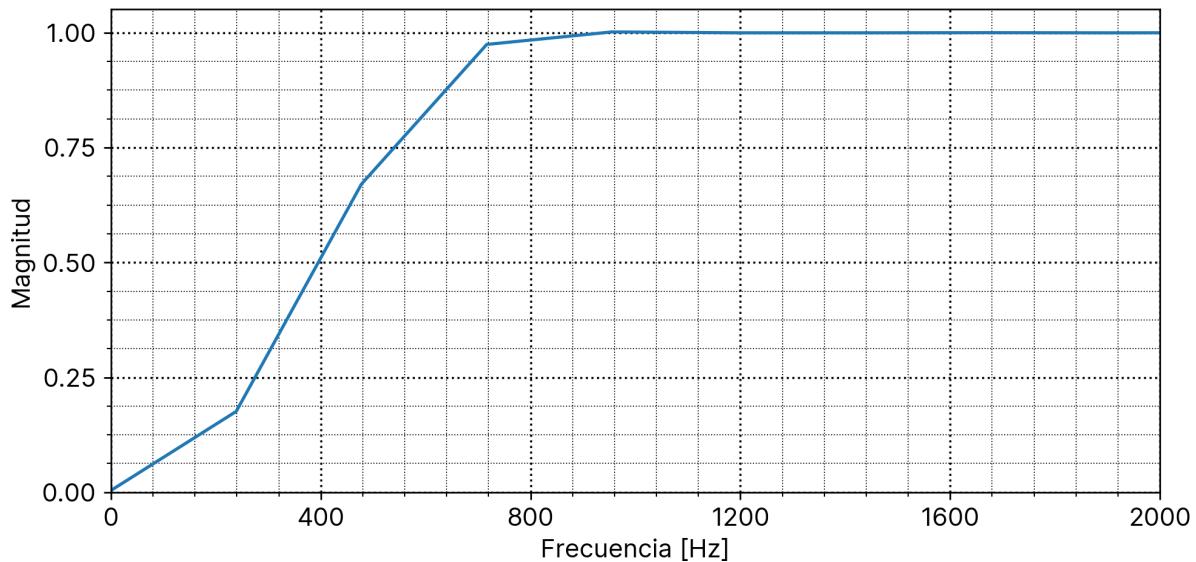


Figura 3: Transformada de Fourier del primer filtro

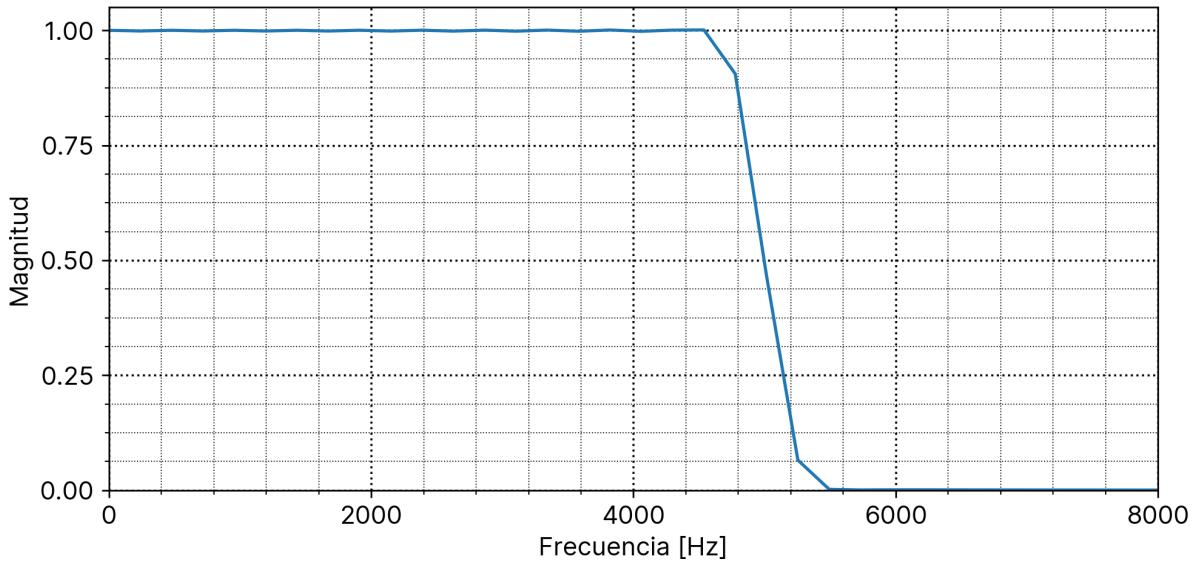


Figura 4: Transformada de Fourier del segundo filtro

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.

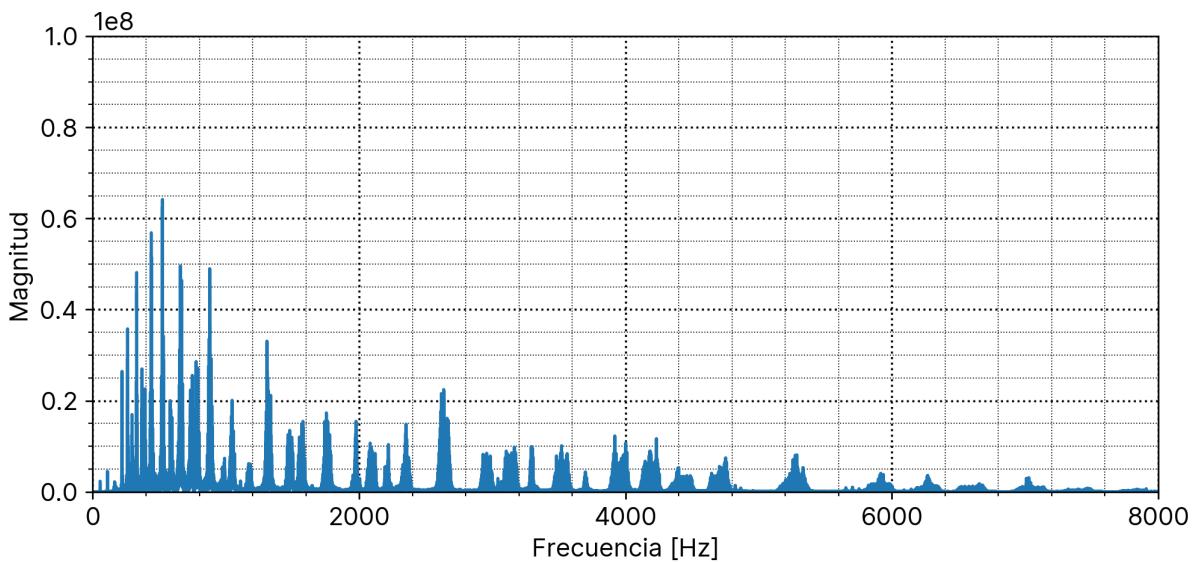


Figura 5: Espectro de 'cancion1.wav' con filtro 1 aplicado

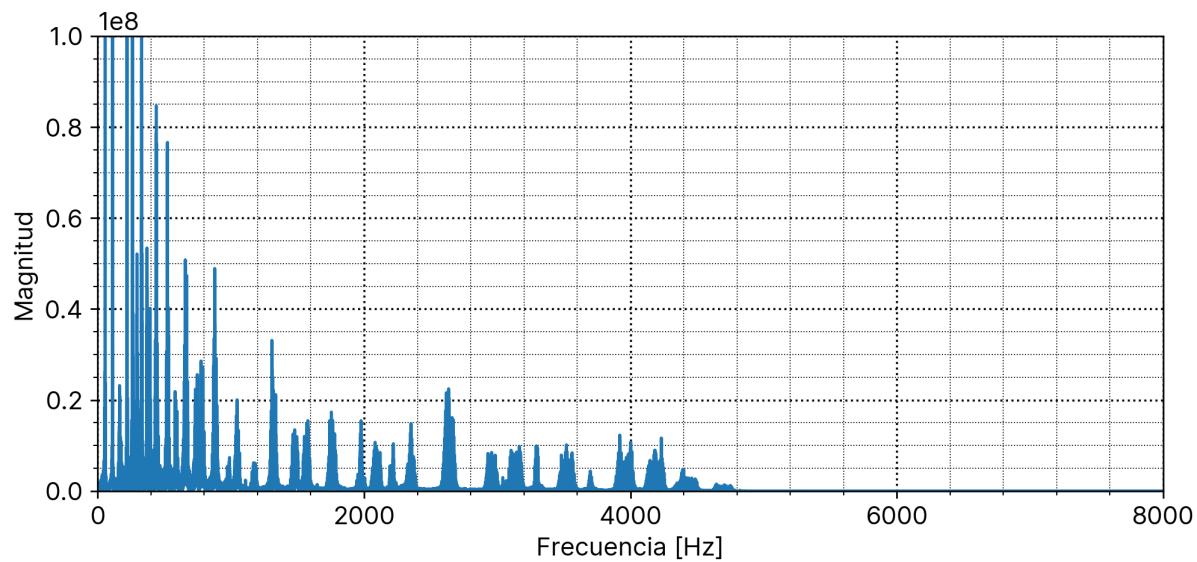


Figura 6: Espectro de 'cancion1.wav' con filtro 2 aplicado

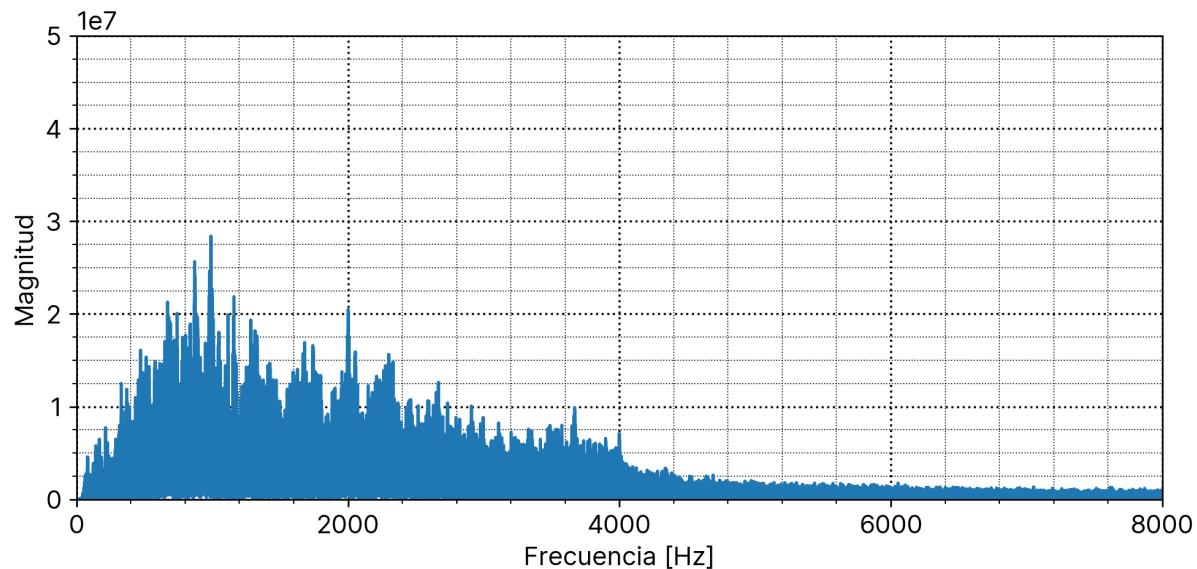


Figura 7: Espectro de 'cancion2.wav' con filtro 1 aplicado

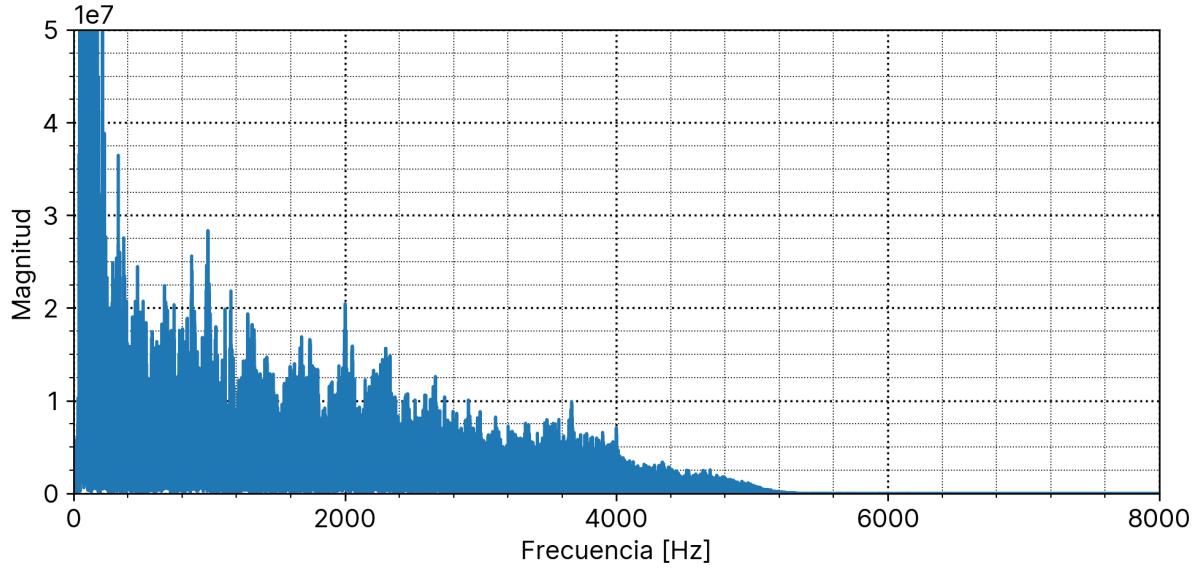


Figura 8: Espectro de 'cancion2.wav' con filtro 2 aplicado

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.

2.2. 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.

2.2.1. Espectrograma con ventana rectangular

En las figuras 9, 10 y 11 se gráfica el espectrograma de la primer canción, utilizando una ventana rectangular en todos los casos, tomando 512, 1024 y 2048 puntos respectivamente.

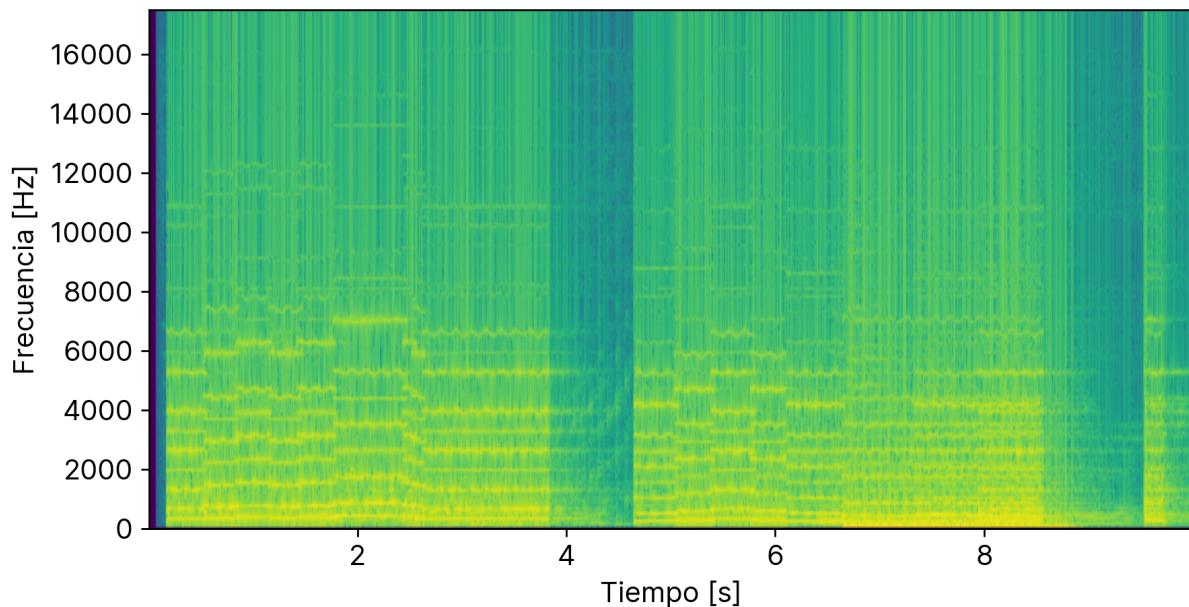


Figura 9: Espectrograma primer muestra de ventana rectangular de 512 puntos

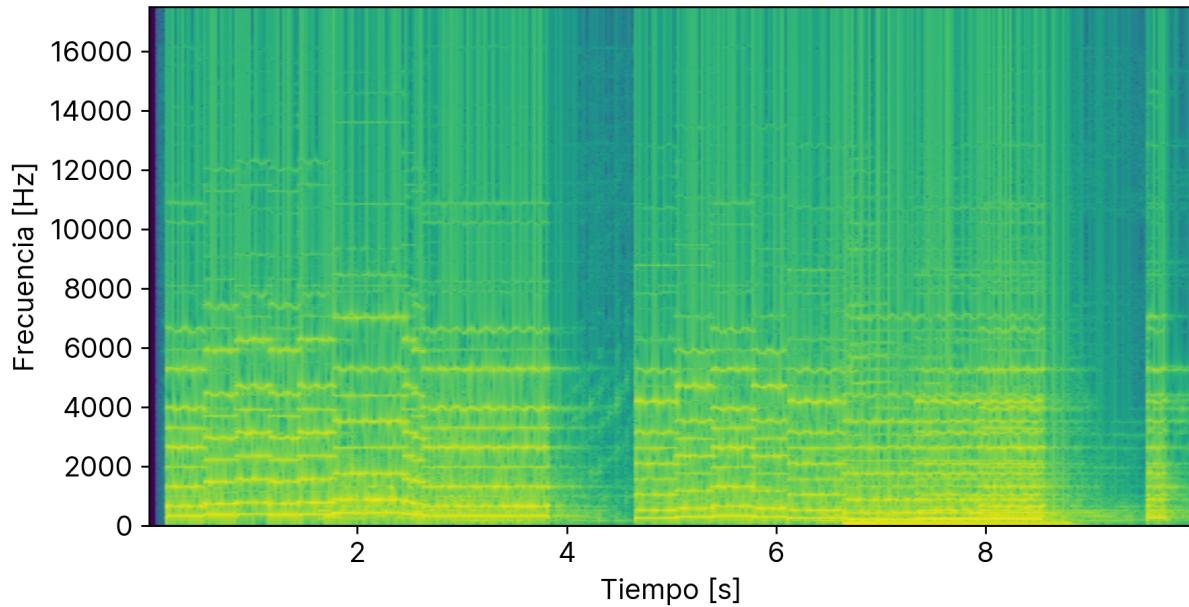


Figura 10: Espectrograma primer muestra de ventana rectangular de 1024 puntos

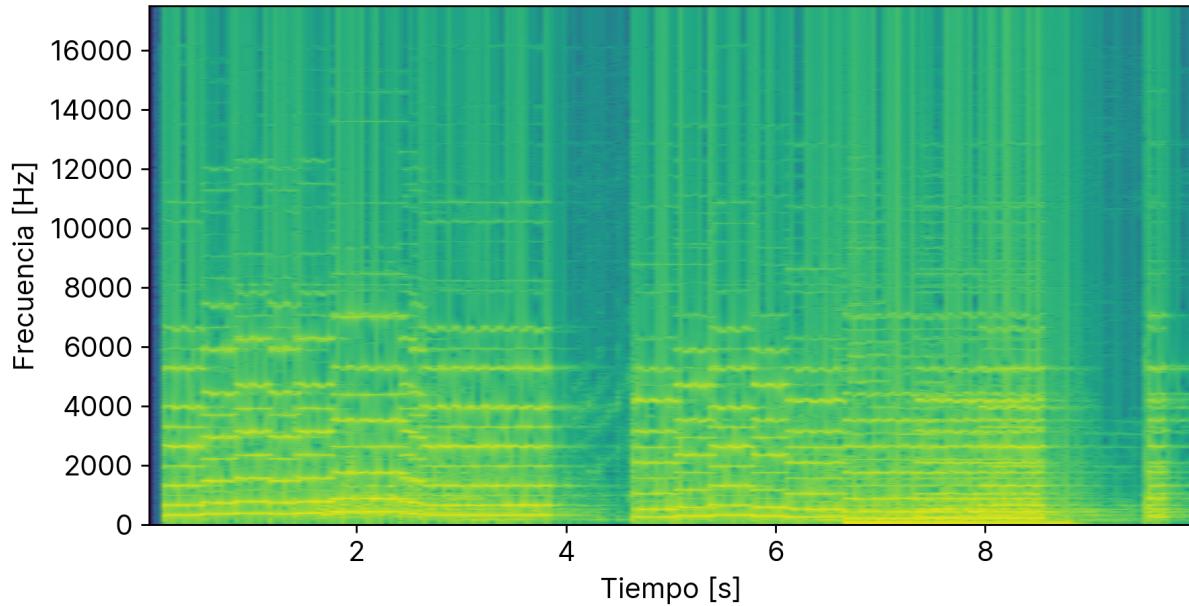


Figura 11: Espectrograma primer muestra de ventana rectangular de 2048 puntos

De manera análoga, en las figuras 12, 13 y 14 se gráfica el espectrograma de la segunda canción, utilizando una ventana rectangular en todos los casos, tomando 512, 1024 y 2048 puntos respectivamente.

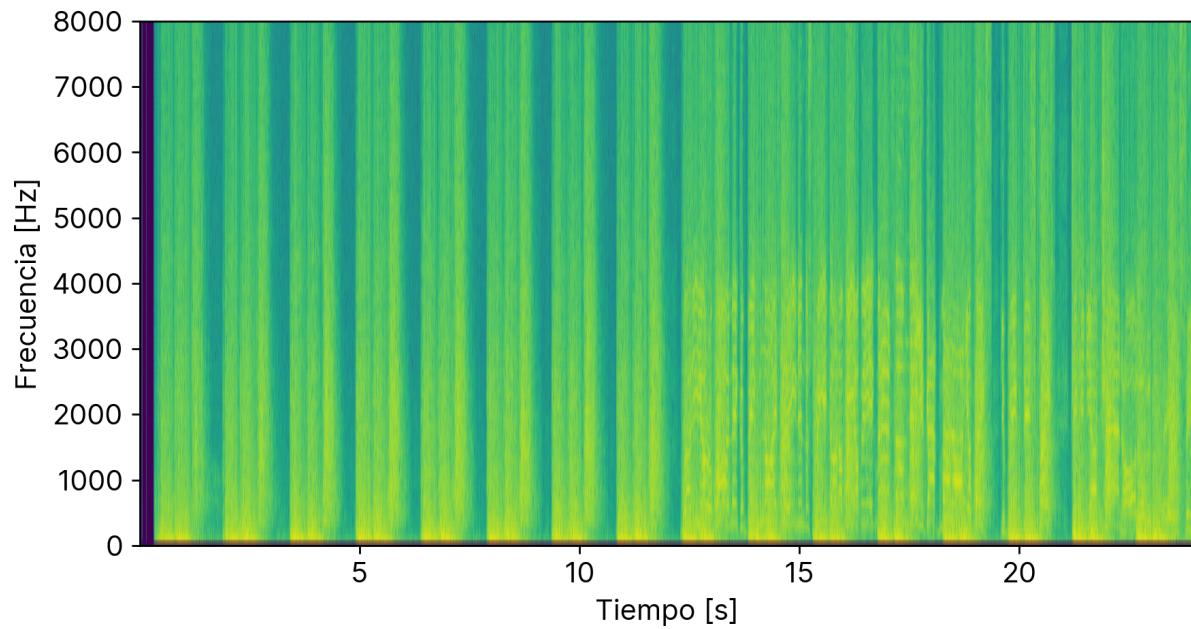


Figura 12: Espectrograma segunda muestra de ventana rectangular de 512 puntos

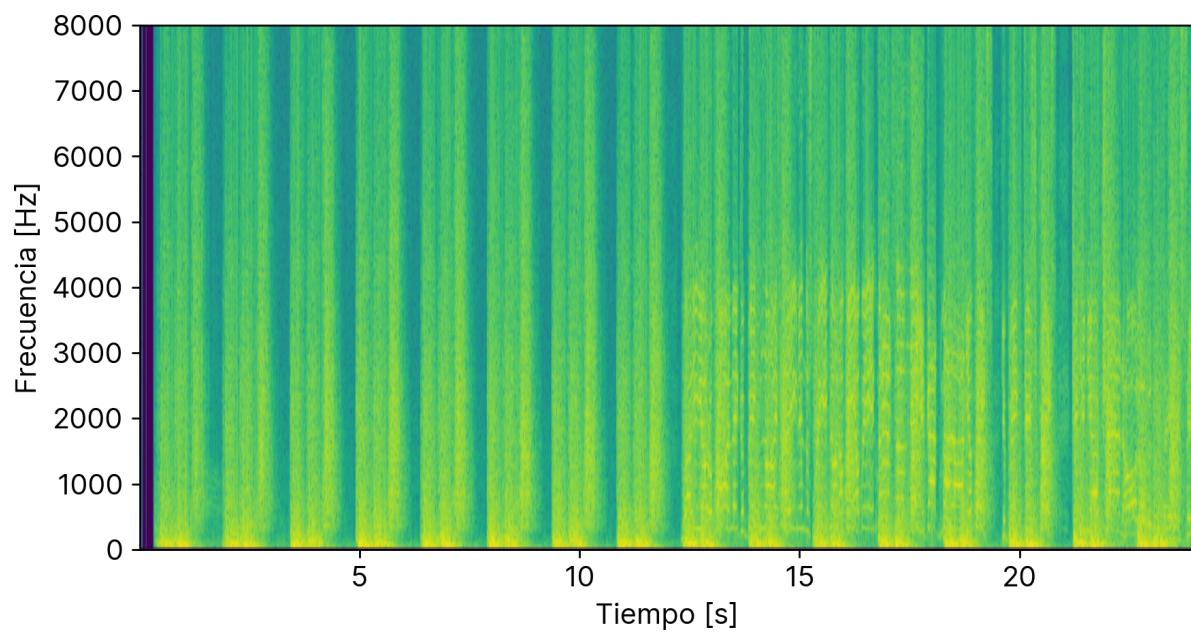


Figura 13: Espectrograma segunda muestra de ventana rectangular de 1024 puntos

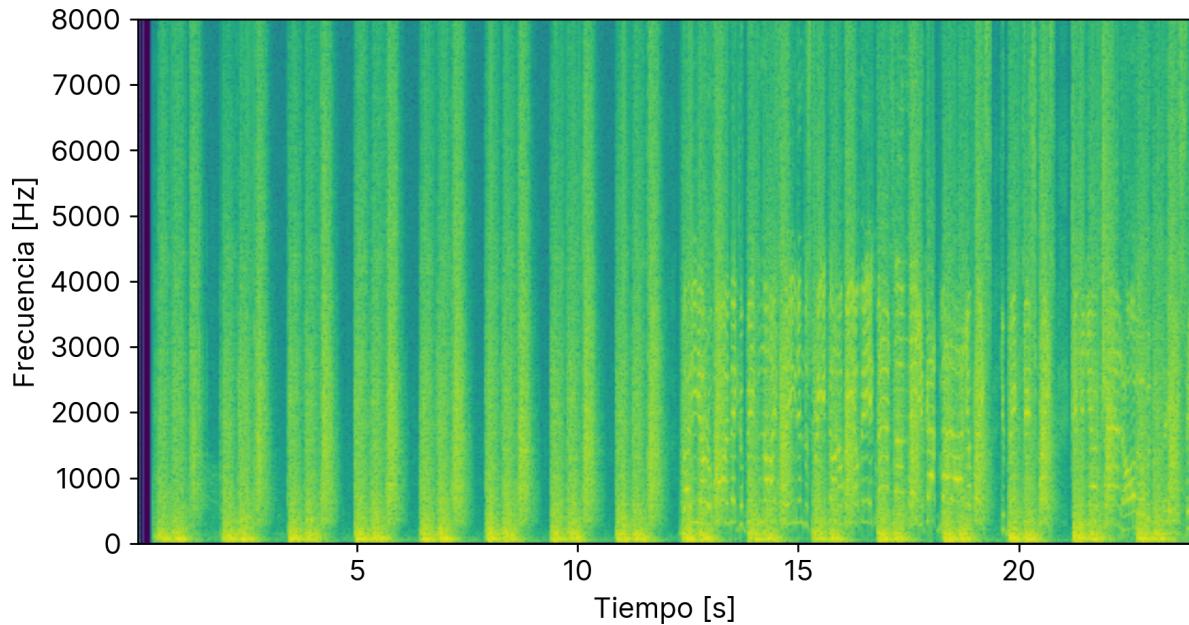


Figura 14: Espectrograma segunda muestra de ventana rectangular de 2048 puntos

2.2.2. Espectrograma con ventana triangular

A continuación se vuelve a graficar los espectrogramas de las canciones 1 y 2 tomando la misma cantidad de puntos, 512, 1024 y 2048, pero la diferencia siendo que se utiliza una ventana triangular. La diferencia entre ambas ventanas en la práctica es que la ventana rectangular tiene mejor resolución en frecuencia ya que su DFT 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 DFT de la función triangular, que es una sinc pero al cuadrado, lo que hace que los lóbulos secundarios disminuyan. Para la primera muestra las figuras resultantes son 15, 16 y 17, para el espectrograma utilizando ventana triangular y tomando 512, 1024 y 2048 puntos respectivamente. Para la segunda muestra, las figuras resultantes son 18, 19 y 20 para el espectrograma utilizando ventana triangular y tomando 512, 1024 y 2048 puntos respectivamente.

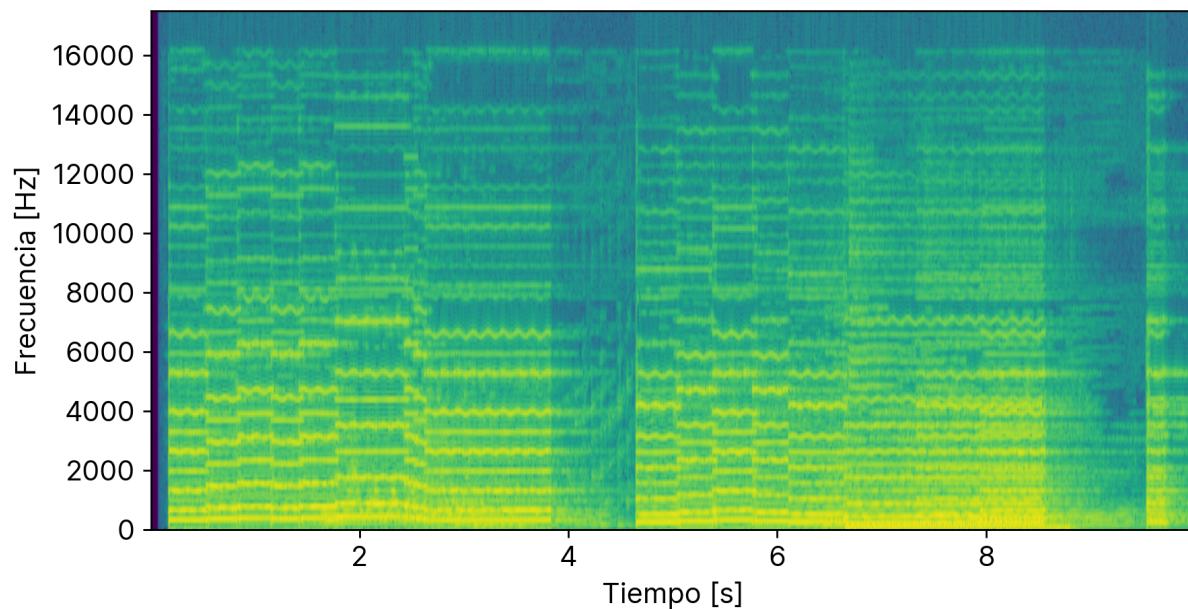


Figura 15: Espectrograma primer muestra de ventana triangular de 512 puntos

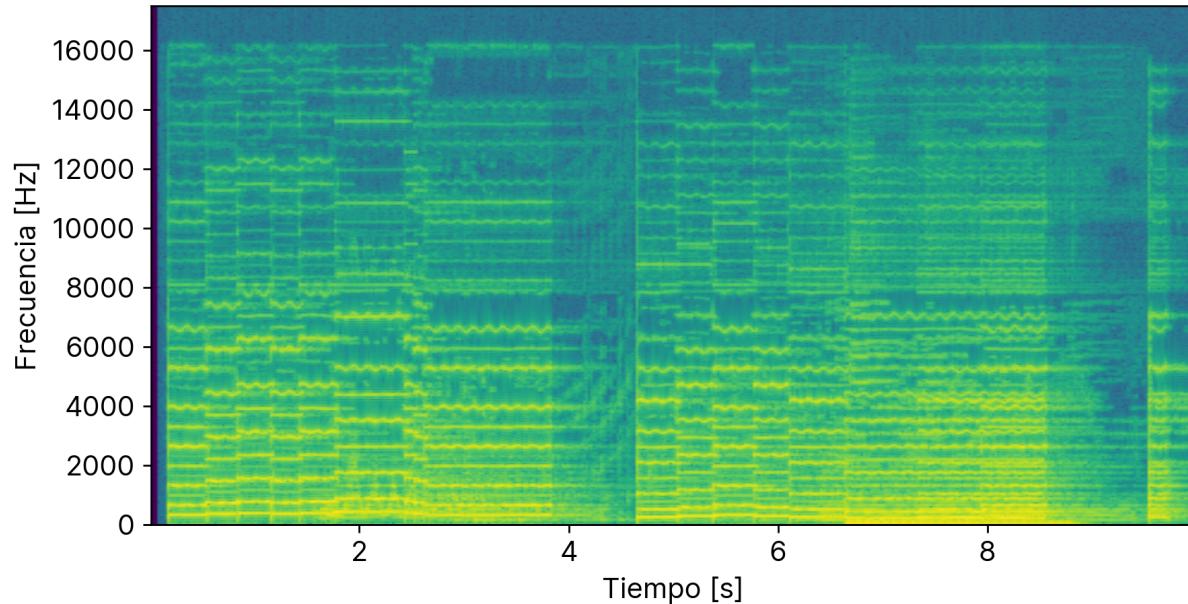


Figura 16: Espectrograma primer muestra de ventana triangular de 1024 puntos

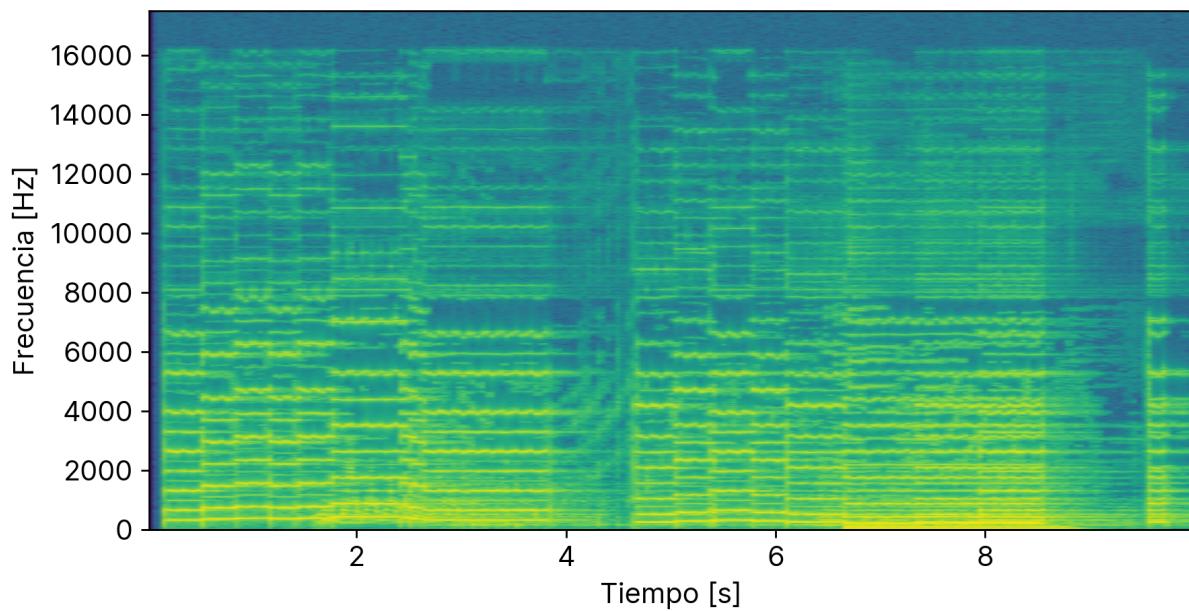


Figura 17: Espectrograma primer muestra de ventana triangular de 2048 puntos

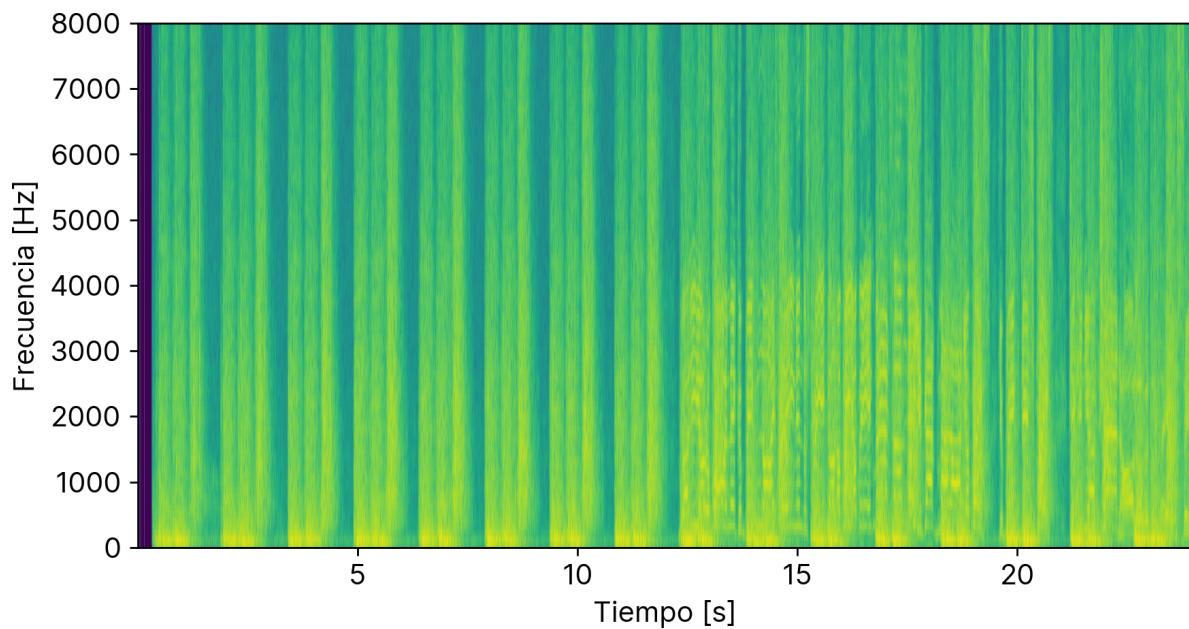


Figura 18: Espectrograma segunda muestra de ventana triangular de 512 puntos

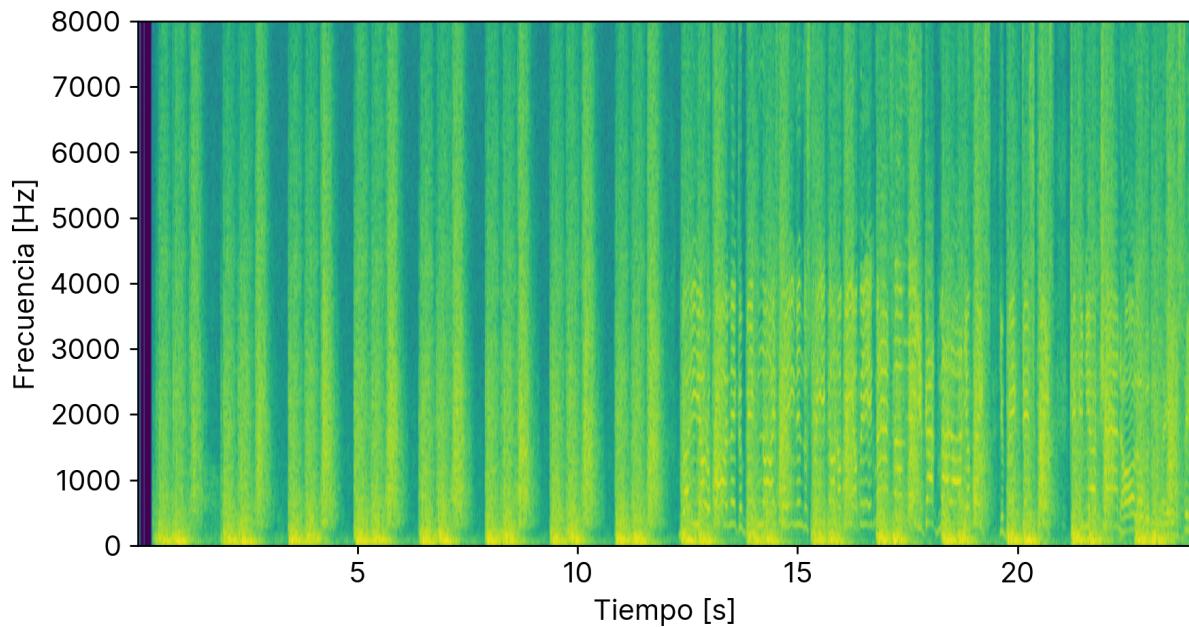


Figura 19: Espectrograma segunda muestra de ventana triangular de 1024 puntos

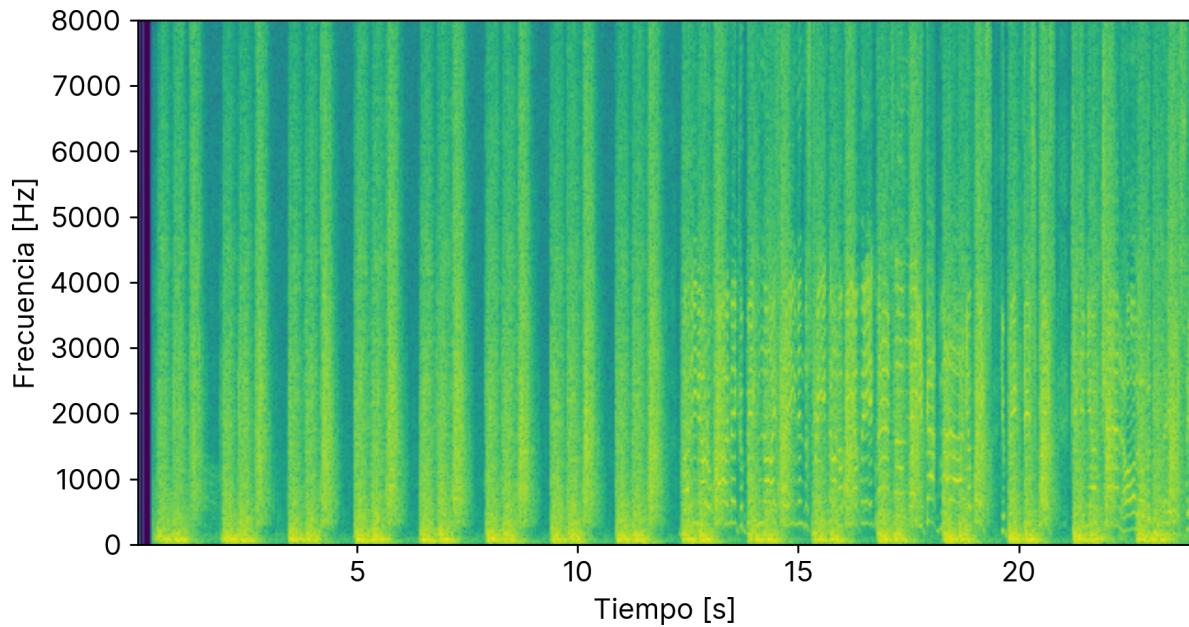


Figura 20: Espectrograma segunda muestra de ventana triangular de 2048 puntos

2.2.3. 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 lobulo principal, pero este mas ancho que el de la rectangular, esto implica menor resolucion en frecuencia; ademas el espectro de la ventana de Hann tiene lobulos laterales menores.

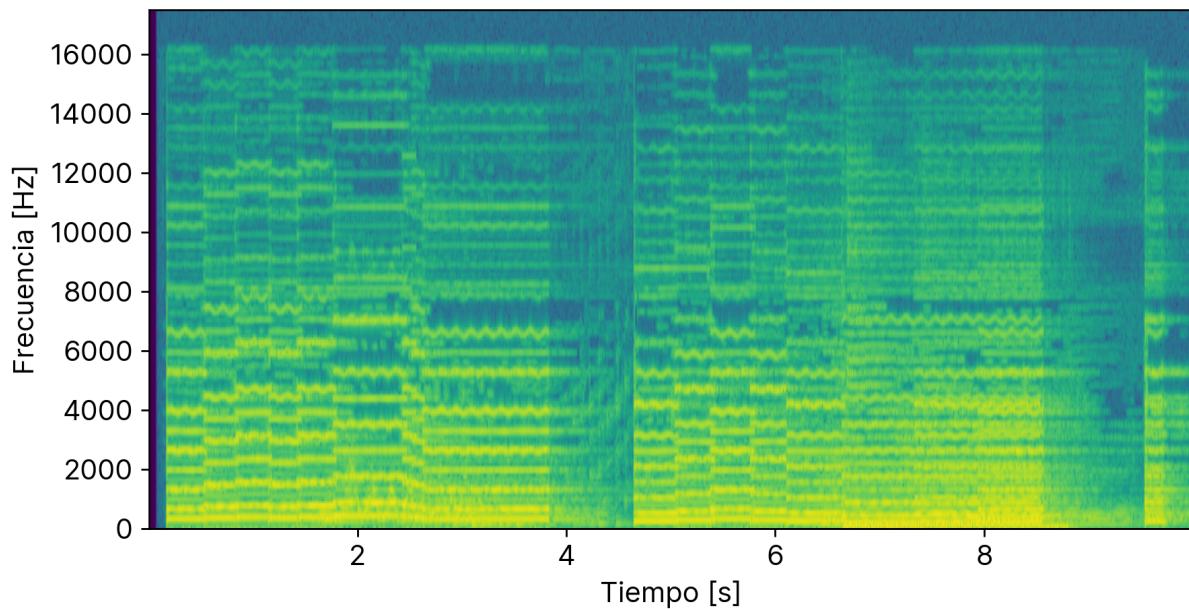


Figura 21: Espectrograma primer muestra con ventana Hann de 512 puntos

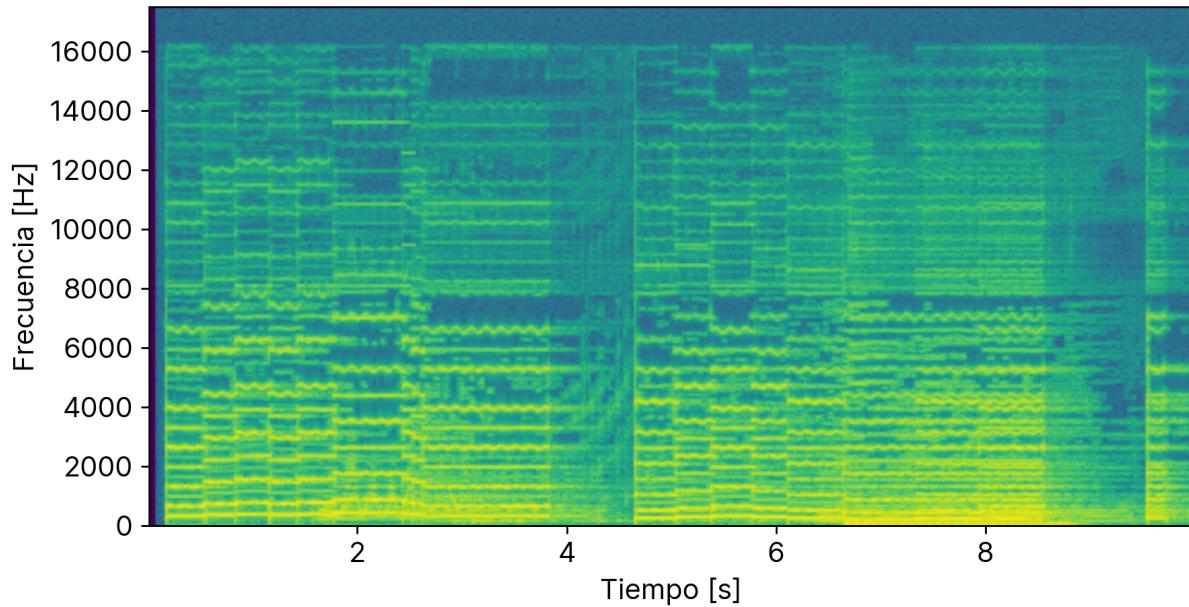


Figura 22: Espectrograma primer muestra con ventana Hann de 1024 puntos

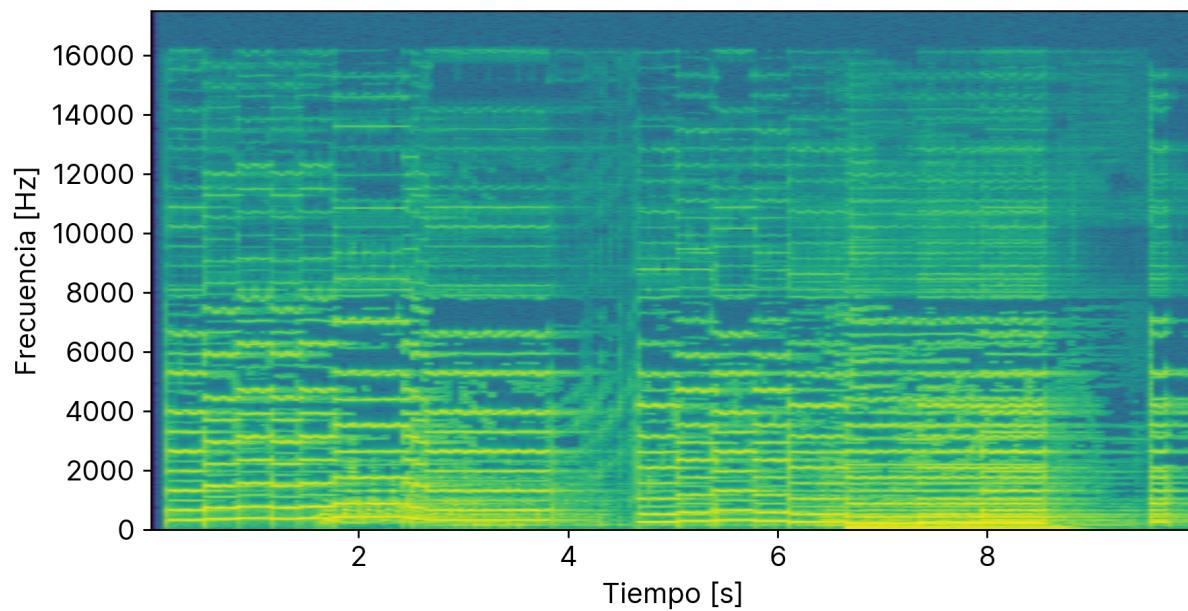


Figura 23: Espectrograma primer muestra con ventana Hann de 2048 puntos

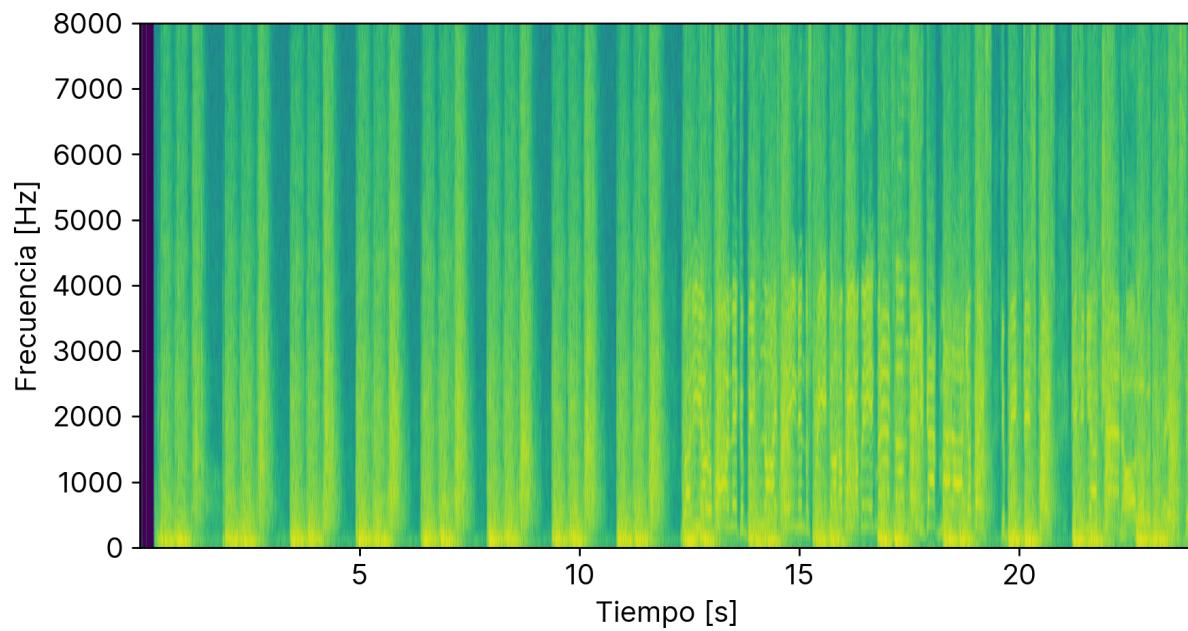


Figura 24: Espectrograma segunda muestra con ventana Hann de 512 puntos

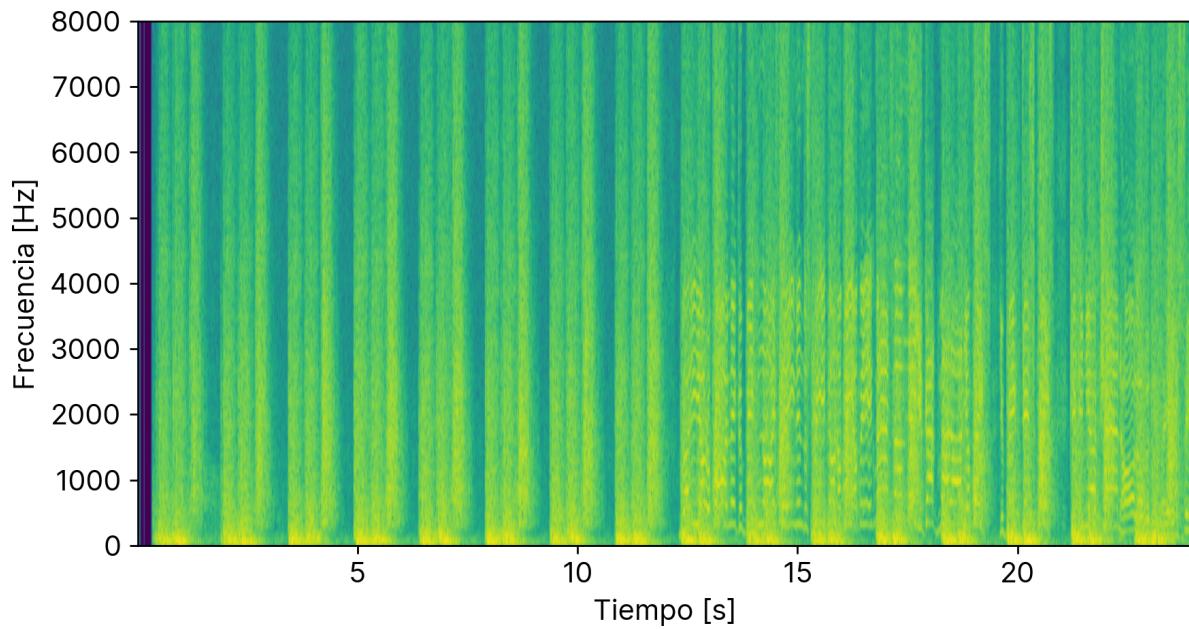


Figura 25: Espectrograma segunda muestra con ventana Hann de 1024 puntos

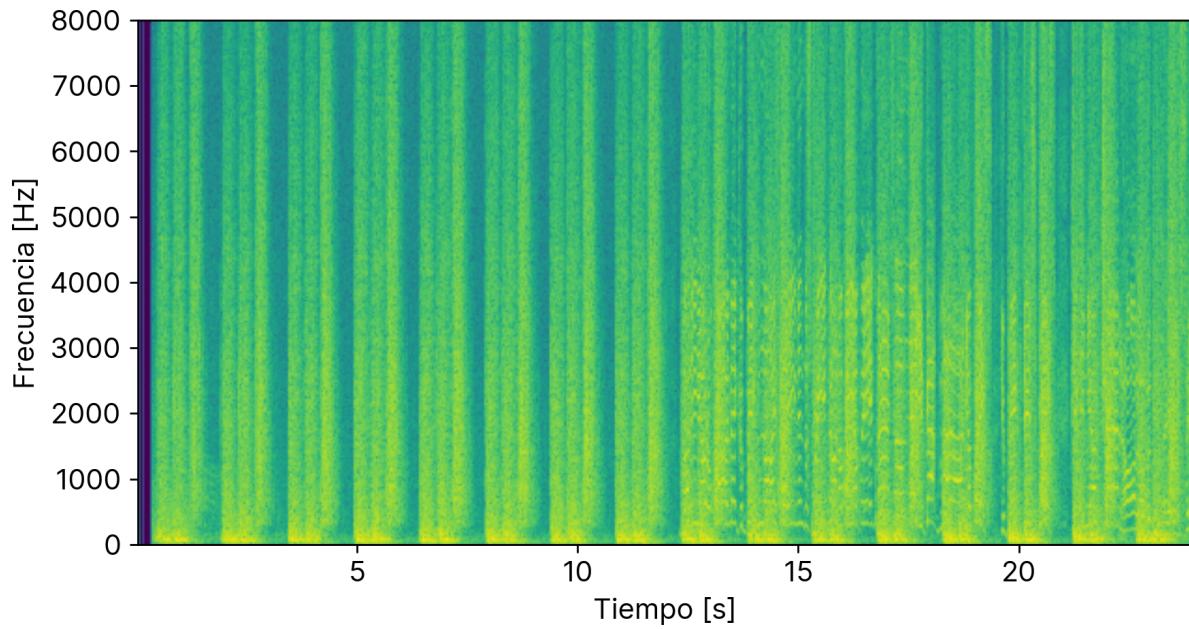


Figura 26: Espectrograma segunda muestra con ventana Hann de 2048 puntos

Analizando el espectrograma de la primer canción, en particular el de la figura 17, 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 observar u analizar la figura 15 en la cual se toman menos puntos, por lo tanto se tiene mayor resolución temporal.

2.3. 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 $y(t)$. Se trabaja con una señal senoidal pura de 440Hz, implementando los efectos de manera digital mediante código. En cada caso se grafican los espectros resultantes de aplicar los distintos efectos a la señal original.

2.3.1. Delay

El efecto del *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 α es el coeficiente de retroalimentación.

Analizando las propiedades de este sistema, se observa que es un sistema **lineal**, 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.

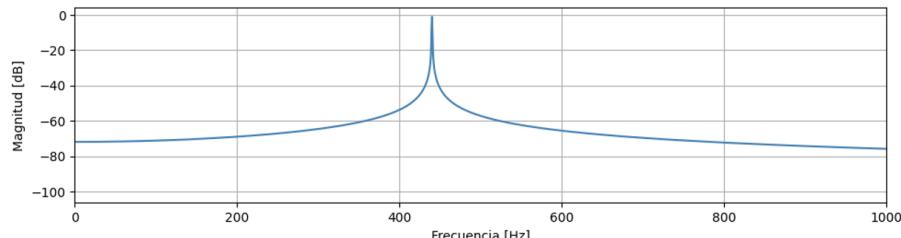


Figura 27: Espectro original

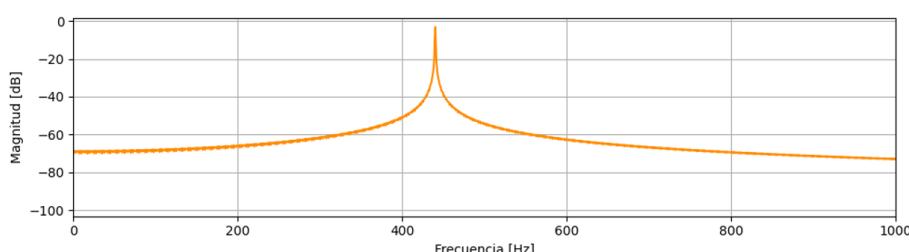


Figura 28: Espectro con efecto delay

2.3.2. 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 más brillante y Enriquecido.

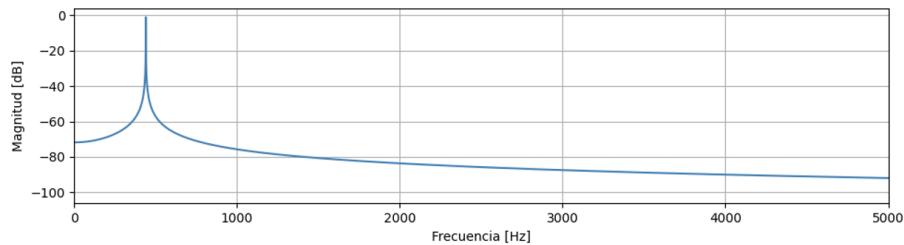


Figura 29: Espectro original

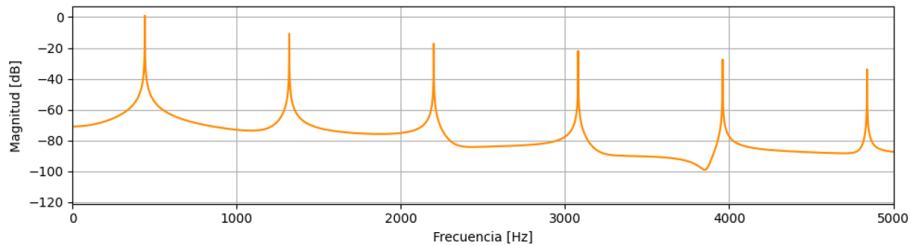


Figura 30: Espectro con efecto distorsión

2.3.3. 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.

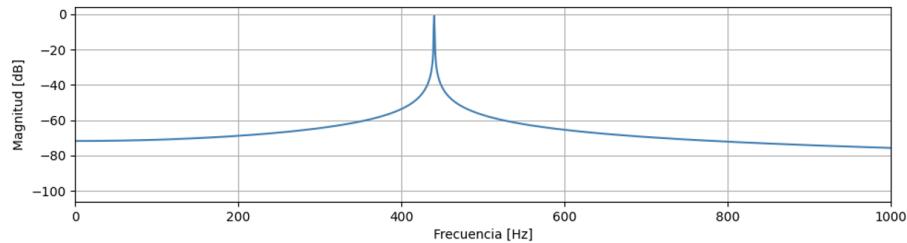


Figura 31: Espectro nota original

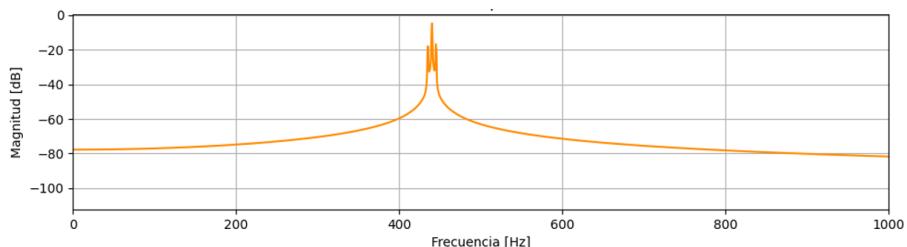


Figura 32: Espectro nota con efecto tremolo

2.3.4. 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.

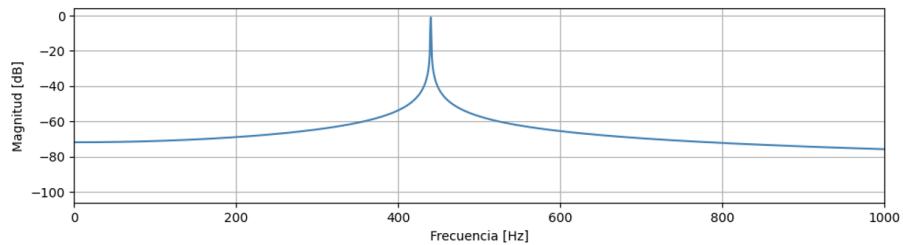


Figura 33: Espectro original

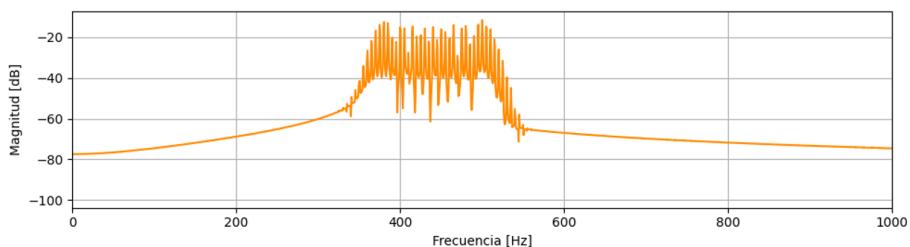


Figura 34: Espectro con efecto vibrato

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:

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

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.

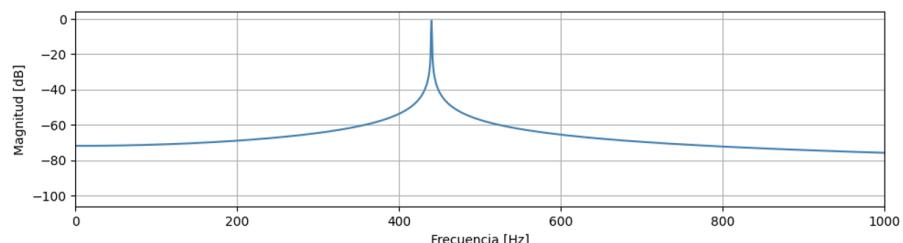


Figura 35: Espectro original

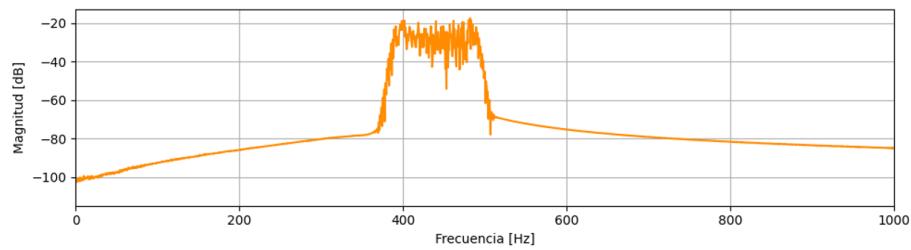


Figura 36: Espectro con efecto chorus

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