

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES DE AUDIO

Práctico 2

Autor:

Federico BELLO

28 de septiembre de 2025



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Índice

| | |
|------------------------|----------|
| 1. Ejercicio 1 | 2 |
| 1.1. Parte 1 | 2 |
| 1.2. Parte 2 | 3 |
| 2. Ejercicio 2 | 3 |
| 2.1. Parte 1 | 3 |
| 2.2. Parte 2 | 4 |
| 2.3. Parte 3 | 4 |
| 2.4. Parte 4 | 5 |

| Banda | f_{low} (Hz) | f_{high} (Hz) | Tipo |
|-------|----------------|-----------------|------------|
| 1 | - | 100 | pasa-bajo |
| 2 | 100 | 200 | pasa-banda |
| 3 | 200 | 400 | pasa-banda |
| 4 | 400 | 800 | pasa-banda |
| 5 | 800 | 1600 | pasa-banda |
| 6 | 1600 | - | pasa-alto |

Cuadro 1: Tabla de bandas de frecuencia

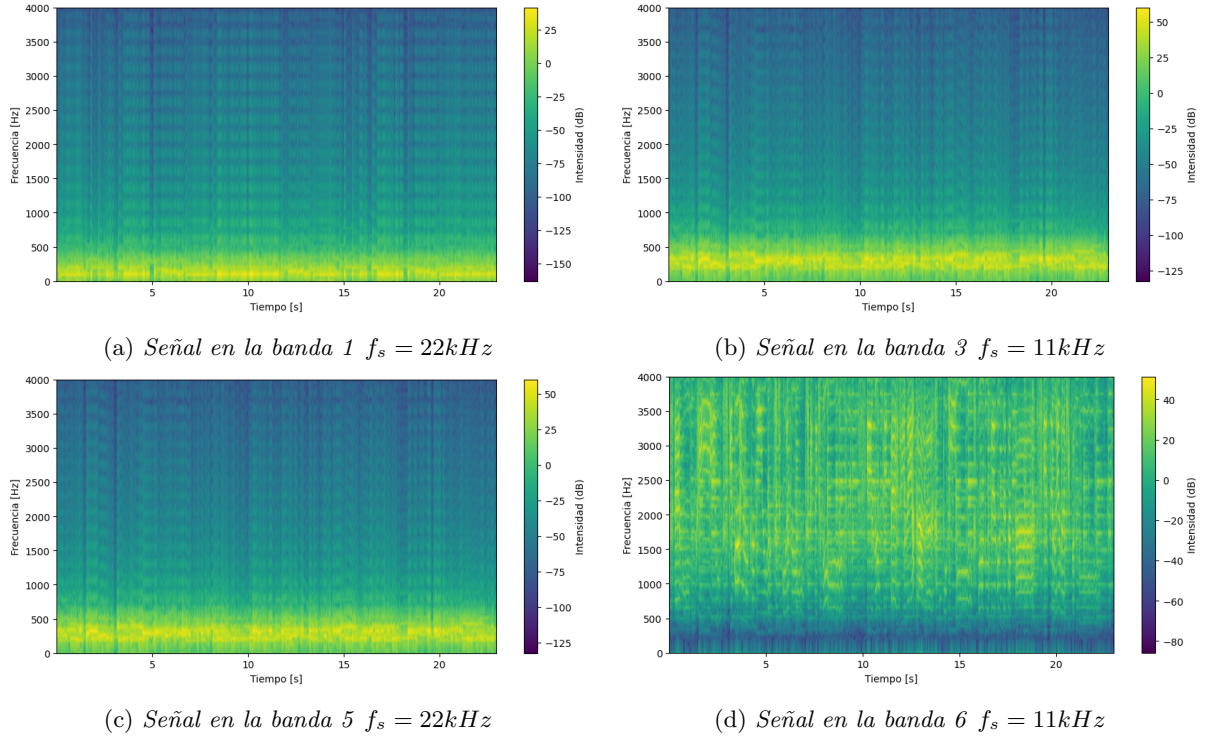


Figura 1: Señal luego de pasar por las distintas bandas del filtro

1. Ejercicio 1

1.1. Parte 1

Para extraer los contenidos rítmicos de la señal se comenzó armando un banco filtros *Butterworth* según la tabla 1.

Luego de pasar la señal por las distintas bandas del filtro, se ve como cada banda captura un rango de frecuencias distinto. La primera banda captura la señal a bajas frecuencias, mientras que las bandas mayores capturan las altas frecuencias de la señal.

Posteriormente, se extrajo la envolvente de las distintas señales después de procesarlas a través de cada filtro del banco de filtros. La extracción de la envolvente consistió en rectificar la señal tomando el valor absoluto y, posteriormente, filtrarla con un filtro pasa-bajos.

Por otro lado, se generó una señal de ruido blanco con media nula y desviación estándar unitaria para ser procesada mediante el mismo banco de filtros. Estas bandas de ruido se emplearon para modular cada banda

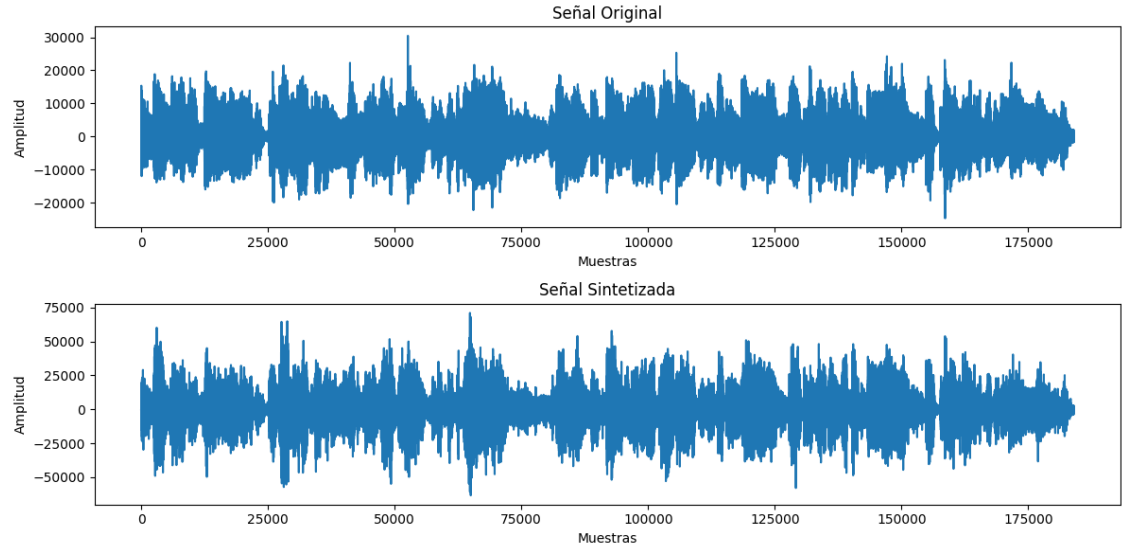


Figura 2: Señal original y sintetizada de voz cantada y guitarra (sin instrumentos de percusión)

de la señal original, proporcionando así una representación del contenido rítmico de cada banda. Al escuchar la modulación de cada banda individualmente, se confirmaron las observaciones previas: las bandas bajas capturaban las frecuencias más bajas de la señal, mientras que los filtros de frecuencias más altas revelaban más detalles de esta.

Finalmente, al sumar las salidas de todas las bandas, se obtuvo una señal que, a pesar de ser algo ruidosa, se asemeja a la señal original.

1.2. Parte 2

Al replicar el procedimiento para una señal solamente cantada y con una guitarra, los resultados no son los mismos. El audio obtenido al final no permite identificar la melodía de la voz ni de la guitarra. En particular, no encontré ningún patrón con los fonemas de la voz, pareciendo ser ignorados. Sin embargo, si parece escucharse un “pum” el cual coincide con los golpes de la guitarra. Esto se puede observar en la figura 2, donde tanto la señal original como la extraída mantiene ciertas propiedades en común, manteniendo la forma de la señal.

2. Ejercicio 2

2.1. Parte 1

El diagrama de bloques correspondiente al filtro peine esta dado por la figura 3 y su ecuación en recurrencia del filtro peine se puede escribir como:

$$y[n] = x[n] + R^L y[n - L]$$

donde L es el retardo y R la atenuación por muestra. La frecuencia fundamental de la respuesta al impulso es:

$$f_0 = \frac{f_s}{L}$$

como f_s viene dado y L es un retardo en muestras ($L \in \mathbb{Z}$), no es posible generar una frecuencia fundamental

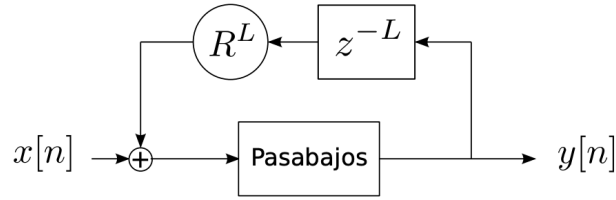


Figura 3: Diagrama de bloques de un filtro peine

arbitraria.

Con esto, el objetivo es sintetizar las 12 notas de una octava de la escala igualmente temperada. Es decir, se divide la octava en 12 intervalos iguales, de modo que las frecuencias de dos notas consecutivas cumplen la relación $f_{n+1} = f_n 2^{(\frac{1}{12})}$ comenzando en 110 Hz (A2). Primero, se calcularon los valores de L para obtener las frecuencias deseadas. Con esto, se obtuvieron los 12 filtros peines deseados. Luego, un pulso se filtra cada uno de los peines. La salida de esto se concatena, y con esto se obtiene las cuerdas sintetizadas.

En la figura 4 se observa el comportamiento del espectrograma al variar el parámetro de atenuación R . Se ve como al ir disminuyendo el el espectrograma se “apaga” cada vez mas rápido. Sin embargo, cuando este es cercano a 1, el espectrograma tiende a ser casi constante. Al analizar las pistas de audio se observa el mismo comportamiento. Cuando la atenuación es alta (bajo valor de R) el sonido de la cuerda es corto. Por otro lado, si la atenuación es baja el sonido aumenta su duración, pareciendo un sonido continuo para $R = 1 - 1 \times 10^{-20}$.

Sin embargo, independientemente del valor de R elegido, el resultado obtenido no es el mejor. Es posible identificar los pulsos, pero se nota fácilmente que son sintetizados.

2.2. Parte 2

El diagrama de bloques correspondiente al filtro peine con pasa-bajos esta dado por la figura 5. Si el filtro pasa-bajos es un filtro de media móvil de primer orden se tiene que la ecuación de recurrencia total es

$$y[n] = \frac{1}{2}[x[n] + R_L y[n - L] + x[n - 1] + R_L y[n - L - 1]]$$

lo que sale de imponer el filtro pasa-bajos y tomar una señal auxiliar a la entrada del pasa-bajos. La frecuencia fundamental de la respuesta al impulso es

$$f_0 = \frac{f_s}{L + \frac{1}{2}}$$

ya que el retardo que introduce el pasa-bajos de media móvil de primer orden es $\frac{1}{2}$

Se repitió el procedimiento anterior utilizando una nueva función que filtra los impulsos mediante una ecuación recurrente que incorpora un filtro pasa-bajos. Tras concatenar todas las señales procesadas, se obtuvo una señal que reproduce un sonido muy similar al de una cuerda pulsada. El siguiente paso consiste en realizar ajustes adicionales para mejorar la afinación de las frecuencias fundamentales representadas.

2.3. Parte 3

Al comparar la señal sintetizada con la señal real de la nota A2 ($f_0 = 110 \text{ Hz}$) en una guitarra, se observan diferencias significativas en tres aspectos. Primero, el ataque de la señal en el espectrograma real es más suave y progresivo, mientras que en la señal sintetizada tiende a ser más abrupto, lo que refleja un comportamiento más controlado y menos natural. Segundo, la atenuación de las frecuencias altas en la señal

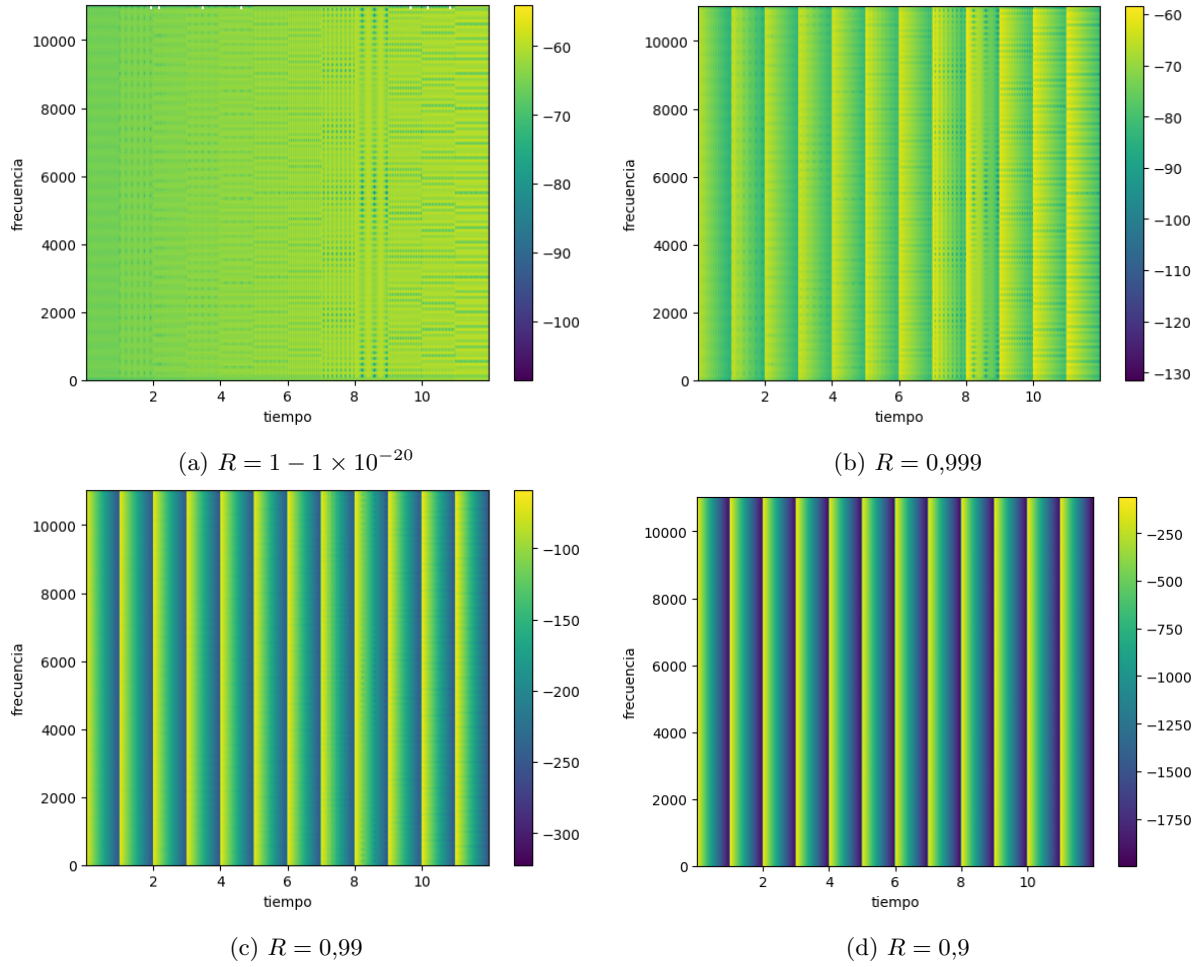


Figura 4: Espectrograma de las cuerdas sintetizadas para distintos R s

real es gradual, mostrando un decaimiento natural de las componentes de alta frecuencia conforme la cuerda pierde energía; en cambio, en la señal sintetizada, las frecuencias altas se atenúan de forma más abrupta o uniforme, lo que se puede ver en las figuras 6.

2.4. Parte 4

El diagrama de bloques correspondiente al filtro peine con pasa-bajos y pasa-todos esta dado por la figura 7.

Imponiendo que el filtro pasa-todos tiene un polo en a y un cero en $\frac{1}{a}$ y llamando B al punto previo al pasa-todos y A al punto previo al pasa-bajos, se llega a que:

$$B[n] = \frac{1}{2}A[n] + \frac{1}{2}A[n-1]$$

$$y[n] = ay[n-1] - aB[n] + B[n-1]$$

Desarrollando los términos, se llega a que la relación de recurrencia viene dada por:

$$y[n] = ay[n-1] - \frac{a}{2}(x[n] + R^L y[n-L] + x[n-1] + R^L y[n-L-1]) + \frac{1}{2}(x[n-1] + R^L y[n-L-1] + x[n-2] + R^L y[n-L-2])$$

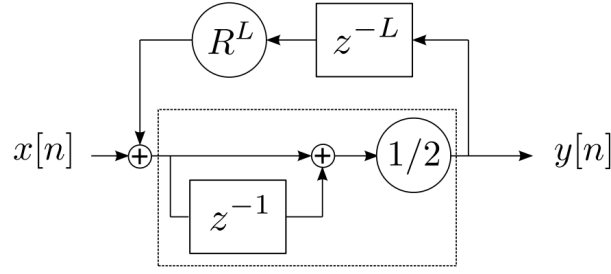


Figura 5: Diagrama de bloques de un filtro peine con pasa-bajos

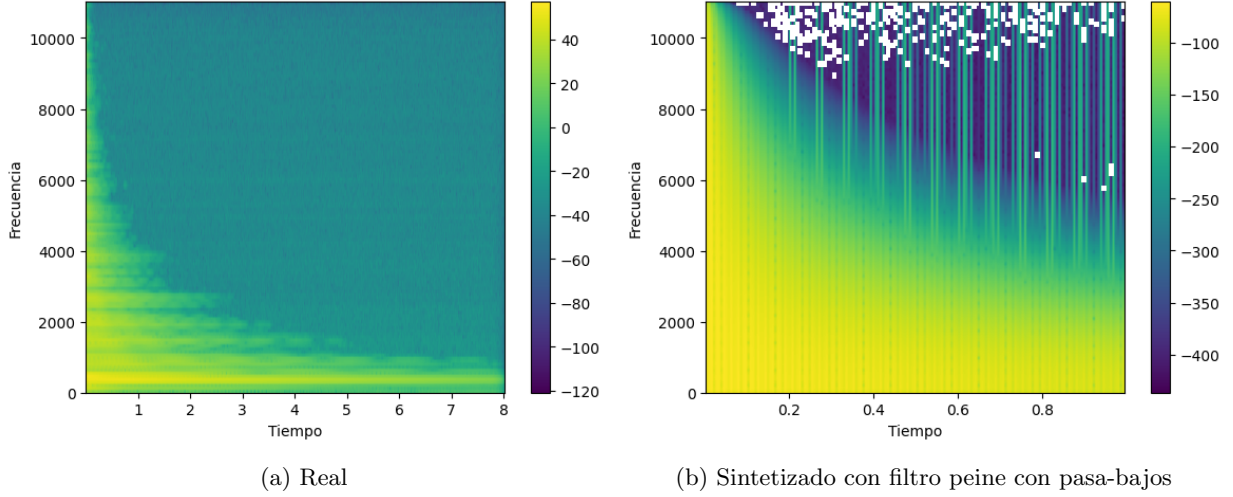


Figura 6: Espectrograma real y sintetizado de una nota en A2

y tomando el retardo que agrega el pasa todos $\delta = \frac{1+a}{1-a}$ se tiene que la frecuencia fundamental de la respuesta al impulso es

$$f_0 = \frac{f_s}{L + \frac{1}{2} + \delta}$$

Dado que mientras $a < 1$ se mantiene la estabilidad, el valor de δ permite obtener la frecuencia fundamental de manera precisa.

Por último, se intentó estimar el error entre la frecuencia fundamental objetivo y la frecuencia fundamental de la nota, tanto con el filtro pasa-todos como sin él. Para realizar este cálculo, se estimó el primer pico de la DFT, dado que la frecuencia fundamental no varía con el tiempo. Los resultados se encuentran en la figura 8.

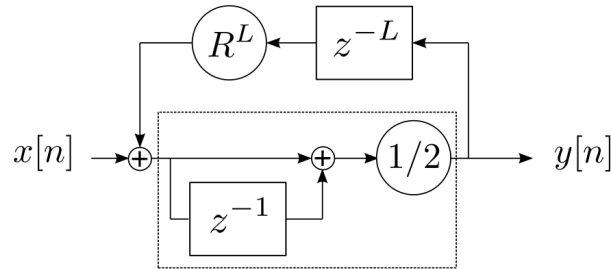


Figura 7: Diagrama de bloques de un filtro peine con pasa-bajos y pasa-todos

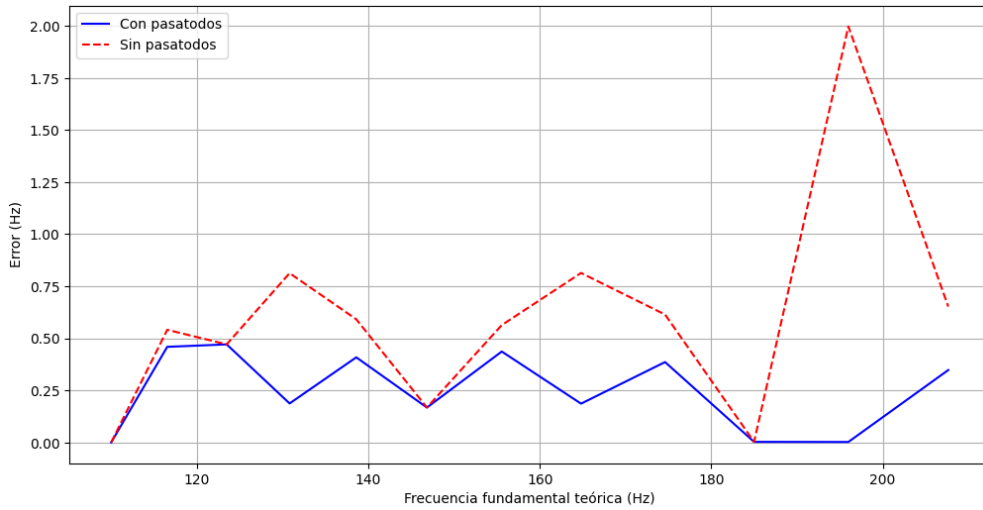


Figura 8: Error en la frecuencia fundamental

Los errores observados tienen dos causas principales. La primera se debe al cálculo de la DFT, es decir, hay un error en la estimación de la posición del pico, que se podría minimizar incrementando la resolución de la DFT. La segunda causa de error está relacionada con el uso exclusivo del filtro pasa-bajos, ya que la frecuencia en la que se trabaja no coincide exactamente con la buscada. Esto ocurre porque el retardo de fase introducido es constante y no corrige el hecho de que el parámetro L , que controla la f_0 , debe ser un valor entero.

Sin embargo, incluso en el caso donde se utiliza el filtro pasa-todos, se observan errores a pesar de que se esperaba mayor exactitud. Esto se debe a que dicha exactitud proviene de una aproximación lineal de la respuesta de fase en bajas frecuencias.