

Desarrollo de software para el cálculo de parámetros acústicos ISO 3382

Florencia Ferreyra¹, Jerónimo Scafati², Stefano Corzini³, Lara Molina⁴

3 de junio de 2025

Señales & Sistemas, Ingeniería de sonido

Universidad Nacional de Tres de Febrero, Buenos Aires, Argentina.

¹ flopyferreyra@gmail.com, ² jeroscafati@gmail.com, ³ stefanountref@gmail.com, ⁴ laraeugenia23@gmail.com,

Resumen

El propósito del presente trabajo, es crear un código en Python que permita, a través de funciones, realizar diversas tareas en relación al cálculo de parámetros acústicos, a partir de la norma ISO 3382. En primer lugar se realizó una función para cargar archivos de audio, de manera que fuera posible descargar la respuesta al impulso de un recinto, un sine sweep y su respectivo filtro inverso. Luego, se desarrolló una función capaz de sintetizar la respuesta al impulso teniendo en cuenta la norma IEC61260. Posteriormente, se creó otra función con la finalidad de, a partir de un sine sweep y su filtro inverso, obtener la respuesta al impulso en formato de señal de audio. Además, se incluyó un filtro, bajo la norma ya mencionada, para analizar los parámetros en función de la frecuencia. Por último, se realizó una función para convertir la respuesta al impulso a escala logarítmica normalizada.

Keywords: ISO 3382, IR

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este proyecto es desarrollar un software modular para el cálculo de parámetros acústicos de acuerdo a la normativa ISO 3382 [1]. Esta normativa indica métodos de medición del tiempo de reverberación de un recinto cerrado. Para ello, utiliza respuestas al impulso. Este impulso puede generarse con una fuente impulsiva (disparo, globo) o con la generación de un barrido de frecuencias sinusoidal o sine sweep.

A lo largo de este trabajo se desarrollan y analizan señales digitales para así caracterizar recintos a través de la obtención de parámetros acústicos del mismo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. RUIDO ROSA

El ruido rosa o ruido $\frac{1}{\sqrt{f}}$, donde f es la frecuencia en Hz, es un ruido cuyo nivel en función de la frecuencia cae 3 dB por octava [2]. De este modo, su densidad espectral de potencia es proporcional a la inversa de la frecuencia; lo que resulta en un

nivel constante por banda de tercio de octava (tiene igual potencia por tercio de octava). Esto lleva a que tenga más energía en frecuencias bajas y que refleje mejor la audición de tipo logarítmico del oído humano. Además, resulta más sencillo de producir que el ruido blanco.

Por estas razones, es muy utilizado en mediciones acústicas para calibrar equipos: empleando este ruido, se ajusta el nivel de la fuente al menos a 45 dB por encima del piso de ruido, teniendo en cuenta el rango de frecuencias que se está analizando.

2.2. SINE SWEEP LOGARÍTMICO Y FILTRO INVERSO

Para obtener la respuesta al impulso de un sistema, se utiliza un barrido de frecuencias que, al reproducirlo, permite grabar la respuesta que tiene el recinto en todo el espectro. Así, se evita usar fuentes impulsivas que pueden ocasionar distorsiones o saturación en los equipos de medición y presentan complicaciones al momento de reproducirlas. Este barrido es logarítmico debido a la relación entre frecuencia y longitud de onda (se le da más tiempo de reproducción a las frecuencias más graves y menos a las agudas).

El sine sweep se caracteriza por tener un decaimiento de 3 dB por octava debido a la distribución de energía en el espectro. Por ello, para obtener una respuesta al impulso plana, es necesario compensar esta caída con un filtro inverso. El mismo aumenta 3 dB por octava, y es empleado luego de grabar la respuesta al sine sweep en el recinto. Al convolucionar la señal grabada con el filtro inverso, se obtiene la respuesta al impulso del sistema.

2.3. RESPUESTA AL IMPULSO

La respuesta al impulso de un sistema es, como indica su nombre, la salida del sistema cuando se le inserta un impulso en la entrada. Debido a las características de un impulso (en teoría, su duración tiende a cero y su amplitud a infinito, lo que resulta en un espectro de frecuencias plano), permite caracterizar el sistema. Es decir, convolucionar una señal de entrada con la respuesta al impulso resulta en la señal de salida del sistema, o en este caso, del recinto.

Por lo tanto, obtener la respuesta al impulso de un recinto nos permite calcular los parámetros acústicos del mismo.

2.4. PARÁMETROS ACÚSTICOS Y RT60

La normativa ISO 3382 define el tiempo de reverberación como la duración requerida para que la energía promedio de la señal en un recinto cerrado decaiga 60 dB luego de que se haya dejado de emitir la misma [1]. Este parámetro es conocido como RT60 y se expresa en segundos. Sin embargo, en muchos casos no se tiene una diferencia señal-ruido de más de 60 dB, por lo que la normativa se basa en el cálculo de parámetros como el T20 (se calcula extrapolando el tiempo de decaimiento de -5 a -25 dB) o el T30 (-5 a -35 dB).

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1. SINTETIZACIÓN DE RUIDO ROSA

Para generar el ruido rosa se emplea el algoritmo de Voss y Clarke [3]. El mismo crea una matriz con fuentes de números aleatorios, los cuales varían a distintas velocidades. Sumando las filas, se consigue un vector de ruido rosa: más energía en bajas frecuencias debido a una menor variación de fuentes. La entrada de la función es el tiempo en segundos (resulta del cociente entre muestras

y frecuencia de muestreo). Tiene como parámetros opcionales la frecuencia de muestreo (44100 Hz) y la cantidad de fuentes aleatorias (16). Devuelve un array normalizado, con valores entre 1 y -1.

Una vez sintetizada la señal, se define una función que permite visualizar el dominio temporal de la misma. Por otro lado, se corrobora el dominio espectral de la misma con la herramienta de ploteo del software Audacity. Por último, se reproduce la señal mediante el uso de la librería sound device.

3.2. GENERACIÓN DE SINE SWEEP LOGARÍTMICO + FILTRO INVERSO

Para generar el sine sweep se utiliza la siguiente ecuación:

$$f(x) = \sin[\theta(t)] = \sin[K(e^{\frac{t}{L}} - 1)] \quad (1)$$

Donde $K = \frac{T w_1}{R}$ y $L = \frac{T}{R}$.

T es el tiempo de duración del sine sweep en segundos y R el sweep rate $R = \ln\left(\frac{w_2}{w_1}\right)$, donde w_1 es la frecuencia inferior y w_2 la superior del barrido.

Por otro lado, la ecuación para generar el filtro inverso que ajuste el decaimiento del sine sweep es:

$$k(t) = m(t)x(-t) \quad (2)$$

Donde $m(t)$ es la modulación dada por:

$$m(t) = \frac{w_1}{2\pi w(t)} \quad (3)$$

$w(t)$ es la frecuencia instantánea, es decir, la derivada de la amplitud en función de la frecuencia:

$$w(t) = \frac{d[\theta(t)]}{dt} = \frac{K}{L} e^{\frac{t}{L}} \quad (4)$$

A partir de estas ecuaciones, se definieron funciones para sintetizar un sine sweep y su filtro inverso. Ambas funciones tienen como parámetro de entrada la duración en segundos, y como parámetros opcionales la frecuencia de muestreo (44100 Hz), la frecuencia inferior (20 Hz) y la frecuencia superior (20000 Hz). Se reprodujeron las señales con sound device, y se visualizó su dominio en frecuencias con Audacity.

3.3. FUNCIÓN ADQUISICIÓN Y REPRODUCCIÓN

Se definió una función para la reproducción y adquisición de manera simultánea. Para ello se utilizó la función playrec de sound device. Su parámetro de entrada era la señal, con la frecuencia de muestreo como parámetro opcional (44100 Hz).

La función definida reproduce y graba la señal, guardándola en un archivo wav.

Asimismo, se desarrolló otra función para medir la latencia de playrec. Sus parámetros opcionales son la frecuencia de muestreo (44100 Hz) y la duración (1 segundo). Devuelve la latencia e imprime su valor en términos de muestras y de milisegundos.

3.4. SINTETIZACIÓN DE RESPUESTA AL IMPULSO

Desarrollamos una función que, a partir de un diccionario de frecuencias centrales, sus respectivos tiempos de reverberación T60 y amplitudes, sintetiza una respuesta al impulso.

Para ello, primero determinamos la duración de la respuesta al impulso, siendo esta un 20 % mayor al T60 más alto del diccionario, asegurándonos de esta manera que incluya toda la reverberación. La respuesta al impulso, se definió teniendo en cuenta la ecuación:

$$y_i = A_i e^{-\tau_i t} \cos(2\pi f_i t) \quad (5)$$

Donde A es la amplitud de la banda, y τ define la el decaimiento exponencial en función del tiempo de reverberación, ambas para la frecuencia f_i con la que se esté trabajando.

$$\tau_i = -\frac{\ln(10^{-3})}{T_{60_i}} \quad (6)$$

Luego, la sumatoria de las respuestas al impulso para cada frecuencia central, genera una aproximación a la respuesta al impulso total del recinto, siendo n la cantidad de frecuencias centrales del filtro.

$$y = \sum_{y=1}^n y_i \quad (7)$$

Para finalizar, se normalizó el vector de la respuesta al impulso, de manera que se pueda guardar en un archivo de audio .wav.

3.5. OBTENCIÓN DE LA RESPUESTA AL IMPULSO CON UN SINE SWEEP

Partiendo de la base que, al excitar un recinto con un sinewep logarítmico $x(t)$, se obtiene la respuesta al impulso del mismo $h(t)$ captado por un micrófono $y(t)$:

$$y(t) = x(t) * h(t) \quad (8)$$

Se puede deducir que:

$$h(t) = F^{-1}[H(jw)] = F^{-1}[Y(jw)K(jw)] \quad (9)$$

Con $k(t)$ el filtro inverso y $K(jw)$ su respectiva transformada de Fourier.

De esta manera, realizamos una función que obtiene la respuesta al impulso de un recinto a través de la multiplicación de espectros.

Por último, normalizamos la respuesta al impulso con el objetivo de poder exportarla como un archivo de audio .wav.

3.6. FILTRO DE OCTAVA Y TERCIO DE OCTAVA

Para calcular los parámetros acústicos en función de sus frecuencias, realizamos una función que filtra todas las señales en octavas y tercios de octavas según la norma IEC61260. Para ello, definimos una variable G para determinar el ancho de banda tanto para los filtros de octava como para los de tercio de octava y se realizaron dos listas con las frecuencias centrales de ambos filtros. Luego, se calcularon los límites de las bandas y, a través del módulo scipy, se realizó un filtro pasabandas.

Finalmente, el código imprime qué banda se filtró, sus cortes y devuelve un diccionario que contiene la frecuencia central y la señal filtrada para esa banda.

3.7. CONVERSIÓN A ESCALA LOGARÍTMICA

A razón de visualizar la señal adecuadamente, es necesario convertirla a escala logarítmica. Realizamos entonces, una función que se encargue de ello a partir de la siguiente ecuación:

$$R(t) = 20 \log_{10} \frac{A(t)}{A(t)_{max}} \quad (10)$$

Donde A(t) es la señal que se quiere escalar.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. SINTETIZACIÓN DE RUIDO ROSA

A partir del código realizado, pudimos obtener la señal de ruido rosa de 10 segundos que se observa en la figura 1.

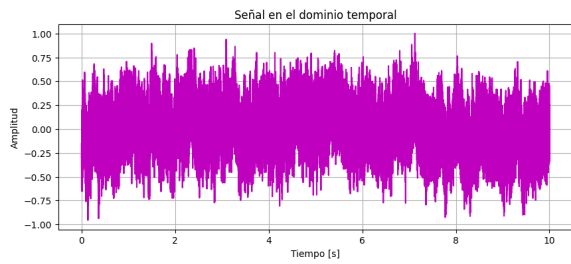


Figura 1: Señal de ruido rosa en dominio temporal.

En la figura 2, se puede apreciar el espectro del ruido rosa, el cual decrece aproximadamente 3 dB por octava.

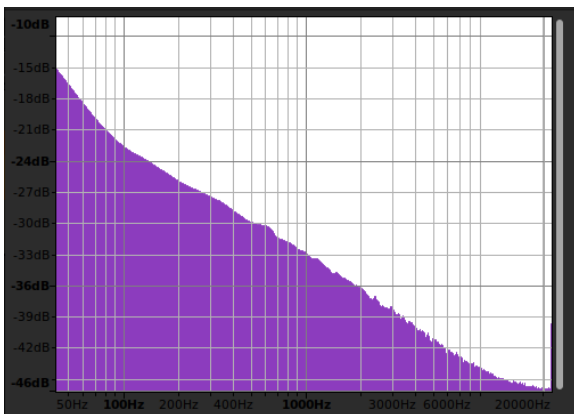


Figura 2: Espectro de la señal de ruido rosa.

4.2. SINE SWEEP LOGARÍTMICO Y RUIDO ROSA

Logramos obtener el sinewave logarítmico así como su filtro inverso, como se observa en la figura 3. En esta, se puede advertir el decaimiento en amplitud del filtro inverso debido a su característica inversamente exponencial.

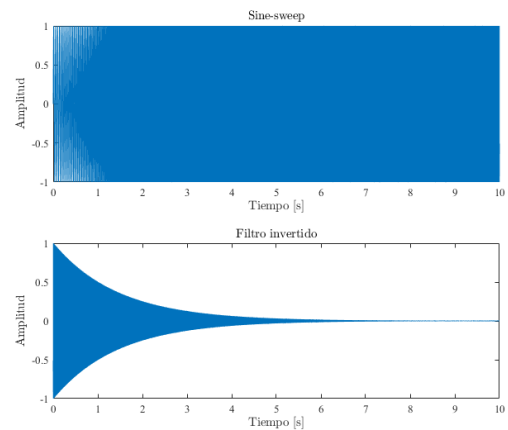


Figura 3: Sine sweep y su correspondiente filtro inverso.

La figura 4, es un gráfico del filtro inverso teniendo en cuenta la amplitud en función de la frecuencia. Se puede observar como la amplitud aumenta a medida que la frecuencia se incrementa. La energía distribuida en el filtro se relaciona con la amplitud, por lo tanto, también tendrá un comportamiento ascendente respecto a la frecuencia.

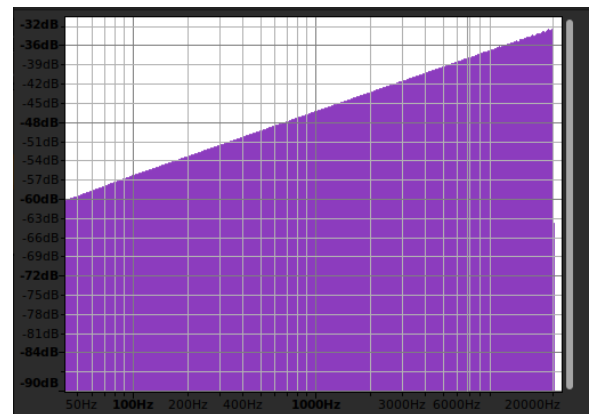


Figura 4: Filtro inverso con la amplitud en función de la frecuencia.

4.3. SINTETIZACIÓN DE LA RESPUESTA AL IMPULSO

Partiendo del T60 de cada frecuencia central de cierto recinto, obtuvimos la respuesta al impulso del mismo, como se puede apreciar en la figura 5.

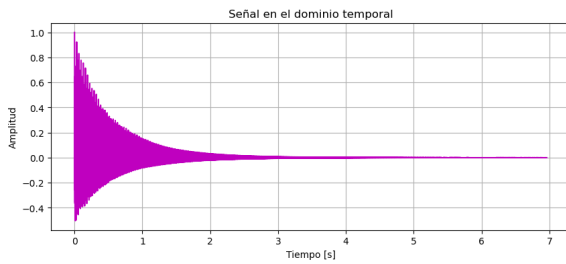


Figura 5: Respuesta al impulso a partir del T60.

La señal no es del todo limpia, ya que el método utilizado da como resultado una aproximación a la respuesta al impulso del recinto. A pesar de ser una buena aproximación, no deja de ser una modulación a partir de condiciones teóricas. De esta manera, se entiende que es más exacto y confiable obtener la respuesta al impulso de un recinto con un sine sweep que a partir del T60.

4.4. OBTENCIÓN DE LA RESPUESTA AL IMPULSO

A partir del sine sweep logarítmico grabado y su filtro inverso, logramos obtener la respuesta al impulso en formato de señal de audio como se muestra en la figura 6.

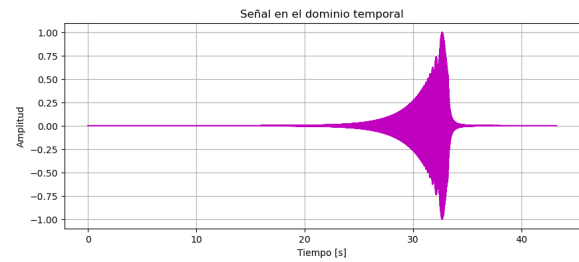


Figura 6: Respuesta al impulso en formato de señal de audio.

5. CONCLUSIONES

Se logró definir funciones que generen señales utilizadas en el área de mediciones acústicas. Se obtuvo una respuesta al impulso a partir de valores de RT60 por banda de octava, que resultó coherente al rango de valores esperados en un recinto cerrado.

A partir de las señales analizadas y representadas, se podrá lograr en próximas entregas desarrollar un algoritmo en donde se calcularán parámetros acústicos de un recinto.

Referencias

- [1] ISO 3382-2. Measurement of room acoustic parameters, 2008.
- [2] Universidad Nacional de Tres de Febrero. Trabajo práctico: “desarrollo de software para el cálculo de parámetros acústicos iso 3382”. Señales y Sistemas.
- [3] Clarke J. Voss, R. F. "1/f noise in music: Music from 1/f noise. *Journal of the Acoustical Society of America* 63: 258–263, 63:258–263, 1978.