

Desarrollo de software para el cálculo de parámetros acústicos ISO 3382

Doce Fausto¹, Falchini Luca², Romeo Martin Sebastian³, Achulli Romulo⁴

12 de mayo de 2020

Señales & Sistemas, Ingeniería de sonido

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

¹ faustodoceinfo@gmail.com, ² lucafalchini@gmail.com, ³ martinsebastianromeo@gmail.com,

⁴ achulli46350@estudiantes.untref.edu.ar,

Resumen

El presente informe expondrá el desarrollo de un software para el cálculo de parámetros acústicos el EDT, T10, T20, T30, C80 y D50 para las frecuencias centrales por filtro de octava y tercio de octava. En una primera instancia, se desarrollaron los audios de ruido rosa, Sine Sweep logarítmico y el filtro inverso en referencia a dicho Sine Sweep. En una segunda instancia se utilizaron las características de los audios de Sine Sweep y su filtro inverso generados para sintetizar la respuesta al impulso o, en caso de que la señal de entrada sea un Sine Sweep grabado, generar una respuesta al impulso. En una tercera instancia se aplicaron los filtros correspondientes de octava, se aplicaron los procesos de suavizado por medio de la transformada de Hilbert y el filtro promedio móvil, se aplicó la interfaz de Hilbert, se aplicó la regresión lineal por medio del método de mínimos cuadrados y finalmente se generó una función que produce como resultado los valores de los parámetros acústicos mencionados. Como agregado, se presentará un prototipo de una interfaz gráfica para mejorar la comunicación del software con el usuario.

Keywords: ISO 3382, IR

1. Introducción

Para obtener los parámetros acústicos que caracterizan la respuesta de un recinto ante una excitación sonora como puede ser el EDT, T10, T20, T30 o T60, existen diferentes métodos de reproducir un impulso con el objetivo de caracterizar un recinto, entre los cuales se encuentran: explosión de globo, golpe entre maderas, petardos, etc. El problema con estos métodos es que carecen de reproducibilidad, es decir, de habilidad de generar cada vez un impulso idéntico independientemente de cuáles sean las condiciones. En este proyecto se desarrollará un software que sea capaz de obtener los parámetros acústicos de un recinto dispuestos en la normativa ISO 3382 por medio de la adquisición y procesamiento de señales digitales a través de la reproducción y manipulación del Sine Sweep.

2. Marco Teórico

2.1. Tiempo de Reverberación

El tiempo, medido en segundos, de reverberación es un parámetro acústico que describe la duración de la reverberación o el sonido reflejado en un espacio cerrado después de que se detiene la emisión de la fuente de sonido. Más específicamente, es el tiempo en el cual el nivel de presión sonora decae 60 dB (T60) desde que la emisión fue interrumpida. Con respecto a lo dicho, se puede definir el T20 como tiempo que tarda el sonido en disminuir en intensidad en un 95 %, el decaimiento de -5 dB a -25 dB. Asimismo, el parámetro T30 mide el tiempo que tarda el sonido en decaer en un 97 %, es decir el decaimiento de -5 dB a -35 dB, en base a las normas IEC 61260 y la norma ISO 3382.

2.2. Ruido Rosa

Entiéndase ruido rosa como una señal de valores aleatorios que tiene la característica de contar con la misma cantidad de energía por octava en su

distribución frecuencial. Así, en función de reflejar la misma cantidad de energía por octava, el ruido rosa cuenta con un decaimiento de 3 dB por octava.

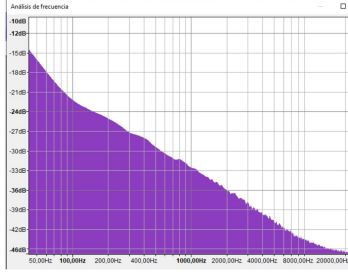


Figura 1: Espectro Ruido Rosa

2.3. Sine Sweep y Filtro Inverso

El sine-sweep, o barrido senoidal, es una señal de audio que varía en frecuencia y exponencialmente en función del tiempo, es decir, que excita en forma ascendente un rango de frecuencias en un tiempo t . Tiene la característica de que su espectro tiene una disminución de 3 dB por octava.

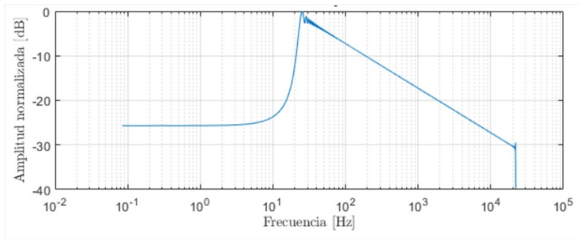


Figura 2: Espectro del Sine Sweep

Asimismo, el filtro inverso asociado con el Sine Sweep se refiere a una técnica utilizada para obtener una respuesta de frecuencia plana y uniforme en un sistema de audio mediante la corrección de la respuesta de frecuencia no uniforme medida a través de un Sine Sweep agregándole una modulación de amplitud para compensar diferencias de energía generada en bajas y altas frecuencias.

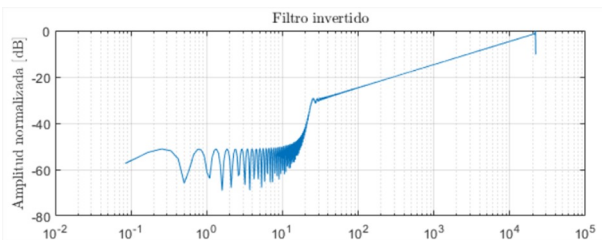


Figura 3: Espectro del filtro inverso

Se puede notar la inversión en el comportamiento de la amplitud a medida que aumenta la frecuencia en las figuras 2 y 3.

2.4. Respuesta al Impulso

La respuesta al impulso de un recinto es el comportamiento en el tiempo con respecto a la presión sonora que una sala tiene luego de ser excitada por un impulso. Este impulso tiene la característica de contener toda la energía del mismo en un punto de tiempo cero. Se define como:

$$\delta(x) = \begin{cases} \infty, & \text{si } x = 0 \\ 0, & \text{si } x \neq 0 \end{cases} \quad (1)$$

Se podrá obtener la respuesta al impulso de un recinto convolucionando la grabación del audio Sine Sweep dentro de la sala y su filtro inverso asociado.

3. Desarrollo

3.1. Generación de ruido rosa

Para la generación de ruido utilizamos el algoritmo de Voss y Clarke¹, sabiendo que la duración del audio de ruido rosa será la frecuencia de muestreo fs por el tiempo t de la misma que concluirá en la longitud de la señal. Dicho algoritmo genera aleatoriamente un valor de amplitud entre -1 y 1 normalizado con una distribución en frecuencia como la de la figura 1.

3.2. Generación de Sine Sweep logarítmico

La ecuación de un Sine Sweep Logarítmico está dada por:

$$f(x) = \sin(K(e^{\frac{t}{T}} - 1)) \quad (2)$$

donde se definen:

$$K = \frac{T w_1}{R} \quad (3)$$

$$L = \frac{T}{R} \quad (4)$$

$$R = \ln\left(\frac{w_2}{w_1}\right) \quad (5)$$

en donde w_1 y w_2 serán las frecuencias angulares inferior y superior y donde T será el tiempo de duración del sine sweep en segundos. Se utilizó la librería Numpy definiéndose así una función que

¹(<https://github.com/AllenDowney/ThinkDSP/blob/master/code/voss.ipynb>)

tiene una entrada de la frecuencia inferior y superior del Sine Sweep y la duración en segundos del mismo. Se configuró una frecuencia de muestreo de 44100 Hz común para todos los casos. Una vez definido en Sine Sweep logarítmico, se pudo plantear el desarrollo del filtro inverso como una función invertida de la ecuación 2.

$$k(t) = x(-t) \quad (6)$$

Sin embargo fue necesario tener en cuenta que el Sine Sweep logarítmico tiene un decaimiento de -3 dB/octava, al igual que el ruido rosa. Esto quiere decir que la energía no se distribuye uniformemente a través de todas las frecuencias de reproducción, de allí el comportamiento logarítmico del mismo. Así, se debe compensar dicho decaimiento con un aumento en 3 dB/octava en su filtro inverso. Así, la ecuación 6 se suplantó por:

$$k(t) = m(t)x(-t) \quad (7)$$

donde

$$m(t) = \frac{w_1}{2\pi w(t)} \quad (8)$$

$$\frac{K}{L} = e^{\frac{t}{L}} \quad (9)$$

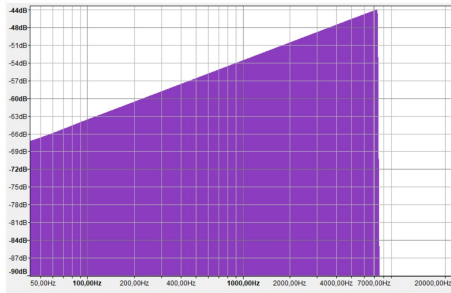


Figura 4: Filtro Inverso Amplitud vs Frecuencia

En el gráfico 4 de amplitud con respecto a la frecuencia se puede notar cómo la amplitud, y por lo tanto la energía distribuida a través del filtro inverso, varía ascendentemente con respecto a la frecuencia.

3.3. Sintetización de Respuesta al Impulso

Realizamos una función capaz de generar una respuesta al impulso recibiendo como parámetro inicial el T60 particular de un recinto. Este parámetro dará cuenta de su comportamiento particular

en términos de reverberación y, una vez sintetizado con un impulso, se obtuvo una respuesta al impulso que pretende simular la respuesta al impulso del recinto. Para ésta prueba se utilizó el T60 del Salon Principal de la Universidad de Nueva York². Utilizando la librería Numpy, definimos la respuesta al impulso para una frecuencia variable f_i :

$$y_i = A_i e^{\tau_i t} \cos(2\pi f_i t) \quad (10)$$

donde se definió la amplitud $A_i = 1$. Además, τ_i corresponde al decaimiento exponencial que define, para cada $T60_i$ correspondiente a cada f_i , el comportamiento en reverberación del recinto.

$$\tau_{60i} = -\frac{\ln(10^{-3})}{T_{60i}} \quad (11)$$

Finalmente, sumamos todas las respuestas al impulso de cada frecuencia central f_i devenidos de la ecuación 10 para generar una aproximación de la respuesta al impulso total del recinto mediante la ecuación 18.

$$y = \sum_{i=1}^n y_i \quad (12)$$

donde n será la cantidad de frecuencias centrales que contenga el T60.

3.4. Obtención de la Respuesta al Impulso con una Entrada Sine Sweep

A partir de un recinto excitado por una señal Sine Sweep logarítmica $x(t)$, es posible obtener una respuesta $y(t)$ al grabar dicho Sine Sweep dentro del recinto. Para llegar a la respuesta al impulso $h(t)$ del recinto se utilizó la siguiente ecuación:

$$h(t) = y(t) * x(-t) \quad (13)$$

en la cual $x(-t)$ será el filtro inverso. Así, se convolucionó el Sine Sweep grabado dentro del recinto con su filtro inverso utilizando la librería Scipy para concluir en la respuesta al impulso del recinto $h(t)$.

3.5. Generación de Filtros de Octava y Tercio de Octava

Teniendo como objetivo final calcular los parámetros acústicos para cada una frecuencia, fue necesario hacer una discriminación y separación entre las mismas para puntualizar el análisis del T10, T20, T30, etc, en cada una de ellas. De ésta manera se generó una función capaz de aplicar un

²(https://www.openair.hosted.york.ac.uk/?page_id=435)

filtro pasa-banda ya sea de octava o de tercio de octava sobre una señal bajo la norma IEC61260³. Los filtros se generaron de manera que tengan un decaimiento de 3 dB por octava con respecto a un rango de frecuencias centrales. Según la norma IEC61260, la elección de un decaimiento de 3 dB y la de frecuencias centrales garantiza la separación de dichas frecuencias en el análisis de parámetros acústicos particulares para cada frecuencia. Si, por ejemplo, el decaimiento fuera más suave que el propuesto describiendo menos de 3 dB por octava, componentes de otras frecuencias dentro de la misma señal podrían entorpecer el cálculo de los parámetros acústicos. La figura 5 muestra el espectro de la aplicación de un filtro pasa-banda de octava centrada en la frecuencia central 1000 Hz a una respuesta al impulso de un salón de clases como un ejemplo de la aplicación del filtro.

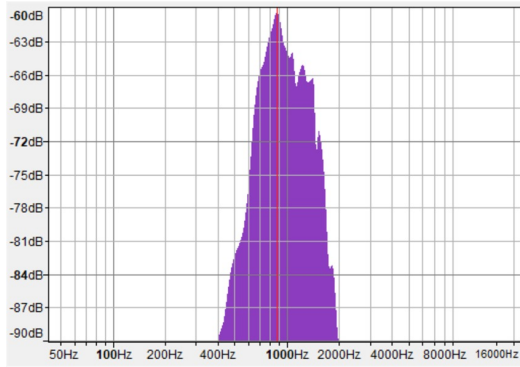


Figura 5: Filtro pasa-banda de octava centrada en 1 kHz

3.6. Implementación de Funciones de Suavizado

Con el objetivo final de aplicar el método de regresión lineal por mínimos cuadrados para obtener un promedio del decaimiento lineal de la señal respuesta al impulso grabada, se implementaron dos métodos para el suavizado de la señal. Dicho suavizado se realizó con la intención de que los valores del array que definen la respuesta al impulso no se encuentren tan dispersos, provocando que la recta de la regresión lineal sea más exacta y el error cuadrático medio asociado con la misma sea menor, lo que consecuentemente equivale a mayor precisión en el cálculo de los parámetros acústicos.

3.6.1. Transformada de Hilbert

La Transformada de Hilbert es una generalización de la Transformada de Fourier y se utiliza para calcular la parte imaginaria de una señal a partir

de su parte real. En otras palabras, toma una señal en el dominio del tiempo y la convierte en una señal en el dominio de la frecuencia. De ésta manera, se definirá la Transformada de Hilbert $S(w)$ a la convolución de una señal de entrada a transformar $s(t)$ con una función $p(t) = \frac{1}{\pi t}$ como es mostrada en la ecuación 14.

$$H\{s(t)\} = s(t) * \frac{1}{\pi t} \quad (14)$$

Posteriormente calculamos la Transformada de Hilbert de la señal original en el dominio de la frecuencia $H\{S(w)\}$. Esto se puede hacer multiplicando la Transformada de Fourier por una función que representa la parte imaginaria del operador de Hilbert $sgn(w)$ de manera:

$$H\{S(w)\} = -j.sgn(w).S(w) \quad (15)$$

En donde j será el operador imaginario y

$$sgn(w) = \begin{cases} -1, & \text{si } w < 1 \\ 0, & \text{si } w = 0 \\ 1, & \text{si } w > 1 \end{cases} \quad (16)$$

Entiendase como señal analítica de $s(t)$ una señal $sa(t)$ que contiene exclusivamente los componentes reales de $s(t)$ que se obtiene sumando las partes reales y las partes imaginarias correspondientes de cada componente de frecuencia como es mostrado en la ecuación 17:

$$sa(t) = s(t) + j.H\{s(t)\} \quad (17)$$

Finalmente, la magnitud y módulo, es decir la envolvente, de la señal analítica $sa(t)$ será la señal suavizada de una señal $s(t)$. Este proceso puede entenderse como el hecho de suavizar las fluctuaciones rápidas y resaltar las tendencias o cambios lentos en la amplitud de la señal original entrante.

3.6.2. Filtro de Promedio Móvil

Es importante destacar que la envolvente obtenida mediante la Transformada de Hilbert puede considerarse una versión suavizada de la señal original, pero no es un proceso de suavizado en el sentido tradicional de filtrado. En contraste, el filtro de promedio móvil es efectivamente una técnica de filtrado. El filtro de media móvil calcula el promedio de una ventana deslizante de muestras adyacentes para suavizar la señal. El filtro de suavizado exponencial asigna pesos exponenciales a las muestras anteriores y utiliza una combinación ponderada por

³IS 6964 (2001): Electroacoustics - Octave-Band and Fractional-Octave-Band Filters

medio de la sumatoria mostrada en la ecuación para obtener una versión suavizada de la señal lo que reduce las variaciones rápidas de altas frecuencias.

$$y(i) = \frac{1}{L} \sum_{j=0}^{L-1} x(i-j) \quad (18)$$

Donde L será el total de muestras de la señal entrante y i la muestra actual en la suamtoria hasta L muestras.

3.7. Funcion Integral de Schroeder

Una vez suavizada la respuesta al impulso del sistema, como la señal tiene una caída exponencial de la presión acústica la curva de la integral de Schroeder en función del tiempo tiene la misma pendiente que la caída original y resulta adecuada para caracterizar la respuesta en frecuencia de un impulso $p(t)$, ya que proporciona información sobre la distribución de energía a lo largo del espectro de frecuencia. De ésta manera, a la respuesta al impulso suavizada se le aplicó la ecuación 12.

$$E(t) = \int_t^{\infty} p^2(\tau) \cdot d\tau - \int_0^t p^2(\tau) \cdot d\tau \quad (19)$$

Cabe destacar que la integración numérica de la caída exponencial se interrumpe por la interseccion con el ruido de fondo que interviene en la parte final de la caída para evitar integrar sobre valores que representan al ruido de fondo y no intervienen en la respuesta al impulso. Este parámetro de corte de la integral será dado por el usuario como un parámetro de entrada en segundos siendo éste el punto en el tiempo donde comienza el ruido de fondo y termina la respuesta al impulso. Para la etapa de Integral de Schroeder se eligió 3 segundos por la señal utilizada para su evaluación.

3.8. Aplicación de Regresión Lineal por Mínimos Cuadrados

Luego del proceso de suavizado y una vez aplicada la función Integral de Schroeder a la señal respuesta al impulso, aplicamos una recta de regresión lineal por el método de cuadrados mínimos para aproximar la tendencia de decaimiento de la señal a una recta específica de pendiente negativa. Esta recta tendrá en cuenta las desviaciones individuales de cada muestra con respecto al promedio de las mismas para generar una aproximación lineal del decaimiento de la señal. Como es de esperar, tendrá la forma de:

$$y(x) = m * x + b \quad (20)$$

Para crear ésta recta tomamos el conjunto de datos de la señal respuesta al impulso y calculamos las medias de x e y , siendo las medias X y Y respectivamente, junto con sus desviaciones dx y dy . Posteriormente calculamos el producto de las desviaciones para cada par de muestras, calculamos la suma de los productos de las desviaciones y la suma de los cuadrados de las desviaciones de X . Con éstos valore de pueden utilizar las ecuaciones 21 y 22 para hallar los valores de pendiente m y constante b que conforman las recta de regresión lineal.

$$m = \frac{\sum_0^n (dx \cdot dy)}{\sum_0^n (dx^2)} \quad (21)$$

$$b = Y - m \cdot X \quad (22)$$

Donde n son la cantidad de par de muestras incluyendo en la recta de la ecuación 20.

3.9. Cálculo de Parámetros Acústicos

A través del uso de la librería numpy, el último proceso del software fue el cálculo de los parámetros de T10, T20, T30, el Early Decay Time EDT, D50 y C80 a partir del uso de la integral de Shroeder y la regresión lineal, definiendo una recta diferente para cada parámetro. Para la prueba de ésta función se utilizó la respuesta al impulso grabada en una iglesia de San Nicola localizada en el parque arqueológico de Apigliano. La sala fue excitada por la explosión de un globo. La entrada de la respuesta al impulso en el software fue en el proceso de filtrado por octava y tercio de octava de acuerdo a la norma IEC61260, ya que el audio grabado en el recinto ya contaba con el comportamiento de una RI, donde los procesos anteriores de sintetización o adquisición de una RI quedaron obsoletos por el tipo de entrada al sistema. Así, esta señal de entrada pasó por los procesos de filtrado en octava y tercio de octava donde se separan las frecuencias centrales. Este proceso es muy importante ya que indica que para cada frecuencia central (ya sea dividido por octava o tercio de octava) existirá un array de valores designados en la función de obtención de los parámetros acústicos antes mencionados. En otras palabras, existirá un T10, T20, T30, un Early Decay Time EDT, D50 y C80 para cada frecuencia central y no exclusivamente un sólo valor para toda una RI. Luego la señal pasará por el proceso de suavizado, por la implementación de la integral de Shroeder (en este caso elegimos limitar la integral en un 1 segundo), la linealización por cuadrados mínimos y finalmente por la función de obtención de los parámetros acústicos.

3.10. Prototipo de Interfaz Gráfica

Adicionalmente, se comenzó el desarrollo de una interfaz gráfica para que el usuario tenga una mejor comunicación con el programa y su uso resulte más dinámico. Esta interfaz fue inicialmente desarrollada por medio de la librería tkinter en Python3.

4. Resultados y Análisis

El proceso experimental se muestra en el diagrama 6 que recorre las diferentes etapas de desa-

rollo del software hasta concluir en la obtención de los parámetros acústicos con respecto a una señal de entrada. Dicha entrada puede ser el Sine Sweep grabado es un recinto específico obteniendo la respuesta al impulso mediante la función desarrollada o el parámetro acústico T60 como vector para el proceso de sintetización de respuesta al impulso combinando la señal Sine Sweep, el filtro inverso asociado y el ruido rosa generado.

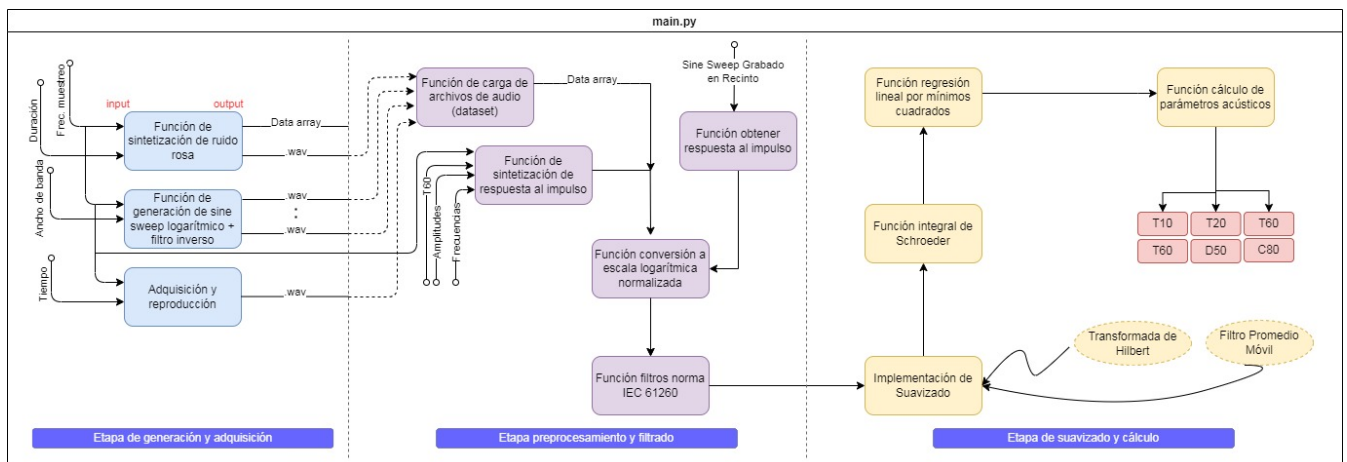


Figura 6: Diagrama de Flujo

4.1. Ruido Rosa y Sine Sweep

Fue posible obtener un audio de ruido rosa de duración 10 segundos con un decaimiento de 3 dB idéntico a aquel que se muestra en la figura 1. Los gráficos de la figuras 7 y 8 muestran el Sine sweep logarítmico junto con tu filtro inverso asociado obtenido. Nótese como el filtro inverso decae en amplitud por su característica inversamente exponencial a medida que el audio aumenta en tiempo y frecuencia.

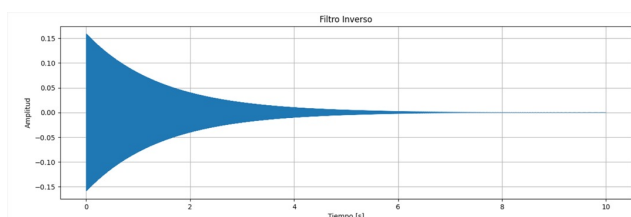


Figura 7: Filtro Inverso

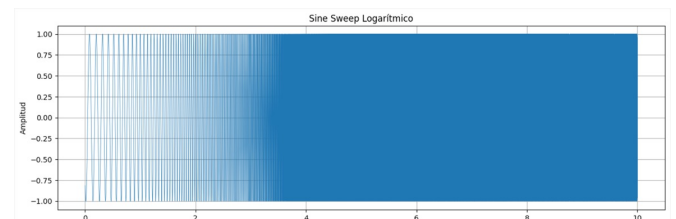


Figura 8: Sine Sweep logarítmico

El resultado de los espectros fueron los esperados, donde el nivel en dB del filtro inverso aumenta a medida que se eleva la frecuencia (figura 4) y el nivel del Sine Sweep logarítmico decrece a medida que se eleva la frecuencia.

4.2. Respuesta al Impulso y Filtro de Octava y Tercio de Octava

Mediante la entrada del T60 para cada frecuencia central, lo cual es definitiva será un vector de entrada, se realizó el desarrollo para obtener una aproximación de la respuesta al impulso del recinto del cual se obtuvo los valores del parámetro acústico. En otras palabras, se moduló aproximadamente,

y mediante manipulación digital, cómo respondería el recinto en cuestión al ser excitado con un impulso, describiendo un comportamiento característico. El resultado se expone en la figura 9.

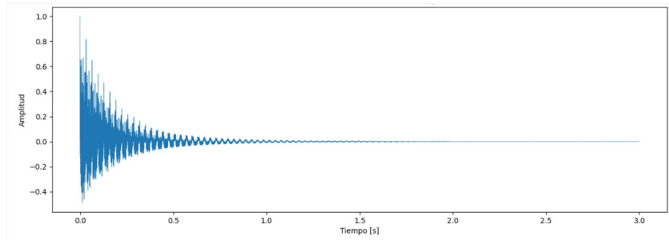


Figura 9: RI con T60 como Entrada

Nótese como la función de sintetización de respuesta al impulso le adjudica una cola reverberante característica con respecto al parámetro acústico de entrada. Es importante destacar que este proceso, aunque es una aproximación válida, no debería tomarse como una equivalencia a la grabación manual de la respuesta al impulso en un recinto. Existen factores que exceden a un proceso teórico que podrían generar diferencias entre los mismos, como índices de temperatura o humedad, nivel del ruido de fondo al momento de la grabación tipo de micrófono con el que se realizó la grabación, distancias del micrófono a paredes, techo y piso, entre otros factores.

En contraste, la obtención de la respuesta al impulso con una entrada Sine Sweep no es una aproximación. El Sine Sweep grabado tiene cargado los factores antes mencionados, lo cual genera que este proceso sea más fehaciente que el anterior.

Con respecto al filtro seguido por la norma IEC61260, nos concentramos en que el filtro cumpla las especificaciones de decaimiento ya sea para octava o tercio de octava, de no ser así el cálculo de los parámetros acústicos de la RI se podrían ver entorpecidos. Como muestra la figura 5, se puede observar que alrededor de 1000 Hz (una de las frecuencias centrales en el filtro de octava) la señal decae 3 dB tanto para la frecuencia de corte superior de 1414 Hz como para la frecuencia de corte inferior de 707 Hz. Este resultado se comprueba al constatar que la frecuencia central posterior con respecto a 1000 Hz cuenta con una frecuencia de corte inferior de 1414 Hz y que la frecuencia central anterior cuenta con una frecuencia de corte superior de 707 Hz, lo que describe el decaimiento de 3 dB por octava. El mismo caso sucede para el filtro de tercio de octava.

4.3. Suavizado

Con respecto a los dos procesos realizados sobre la señal para su suavizado, notamos una diferencia significativa entre ambos. De manera que los dos procesos no trabajan sobre la función de la misma manera, los resultados diferirán:

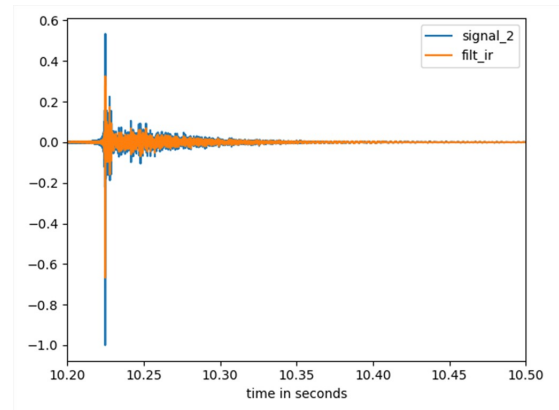


Figura 10: Filtro de Promedio Móvil sobre la RI

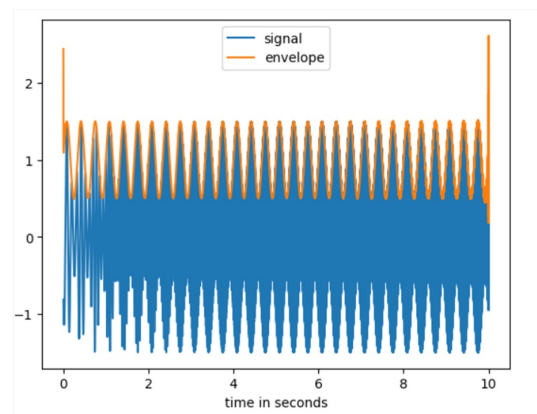


Figura 11: Transformada de Hilbert sobre RI

Las figuras 10 y 11 muestran la aplicación del filtro de promedio móvil y la envolvente de la transformada de Hilbert de la RI respectivamente (naranja) sobre la señal de entrada RI (azul). Resultó más efectivo la aplicación del filtro de promedio móvil que la transformada de Hilbert gracias al hecho de que ésta segunda trabaja exclusivamente con la envolvente de la transformada la cual es, a fin de cuentas, el módulo y magnitud de la misma. Si nos hubiera interesado conocer parámetros como la amplitud o fase de la señal, el proceso que realiza la envolvente de la transformada de Hilbert resultaría de mayor utilidad. Mientras tanto, el hecho de que el filtro de promedio móvil trabaje como un filtro pasa-bajos recortando frecuencias altas en el ruido le agrega mayor valor a su aplicación. Efectivamente, en la figura 10 se puede notar las diferencias en

los picos de amplitud entre la señal suavizada y la señal no suavizada por efecto del filtro.

4.4. Integral de Schroeder

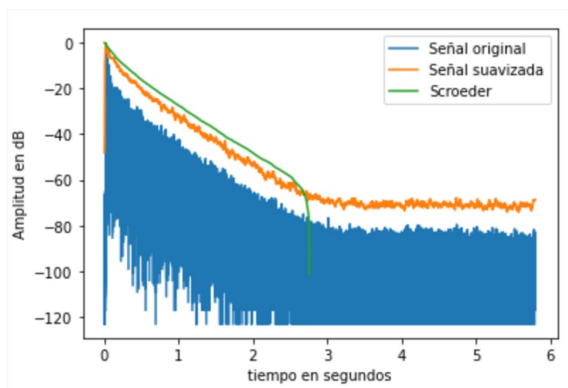


Figura 12: Integral de Schroeder Aplicada a RI

La figura 12 muestra el resultado de aplicar la integral de Schroeder sobre la señal RI suavizada. Nótese como la curva de la integral se detiene para su cálculo a los 3 segundos de comenzada la RI. La implementación de un punto de corte a la integral fue una decisión para facilitar el proceso de cálculo. Sin embargo, una alternativa más acertada sería el uso de la función Lundebly⁴ para calcular el punto de corte de la integral de Schroeder con respecto al ruido de fondo y a la RI específica con que se esté trabajando.

4.5. Regresión Lineal por Mínimos Cuadrados

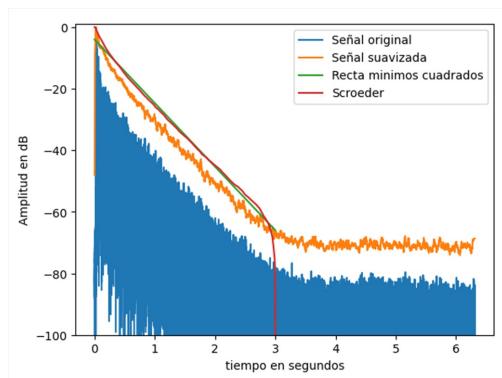


Figura 13: Regresión Lineal por Mínimos Cuadrados

La curva verde en la figura 13 representa la recta aproximada de valores de decaimiento en la

⁴(Y. Hirata,1982)

RI del recinto. Nótese que la recta de cuadrados mínimos aproxima el decaimiento en el intervalo dispuesto por la integral de Schroeder y no toma en cuenta los valores que representan al ruido de fondo una vez terminada la cola reverberante de la RI. A modo de ejemplo, la figura 14 muestra el comportamiento erróneo de la recta de regresión en el caso de que la integral de Schroeder se hubiera realizado por sobre toda la RI con la curva verde. Al existir más valores en consideración arraigados al ruido de fondo, la recta ya no es una aproximación de la pendiente de decaimiento del impulso sino un promedio de toda la señal. Este valor no aporta al cálculo de los parámetros acústicos porque no tiene que ver con ellos.

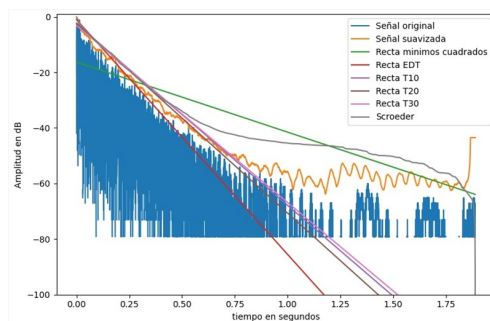


Figura 14: Cuadrados Mínimos sobre toda la señal

4.6. Parámetros Acústicos

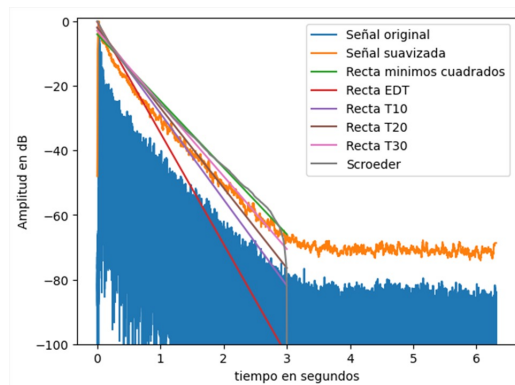


Figura 15: Rectas para el cálculo de los Parámetros Acústicos

La figura 15 es una ejemplificación del método de cálculo de los parámetros acústicos y como éstos se comportan por medio de la regresión lineal con respecto a la RI. Este resultado no ayuda a cuantificar dichos parámetros ya que las rectas están generadas sobre la señal en su totalidad sin hacer una discriminación en las frecuencias centrales, pero ayuda a entender su comportamiento.

La tabla siguiente expone los resultados obtenidos por medio del presente software para el cálculo de

parámetros acústicos ISO 3382 con respecto a la respuesta al impulso mencionada:

Parámetro Acústico	31.5 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	16000 Hz
EDT [s]	3.017407	2.285740	0.771127	1.066073	0.857571	0.723928	0.686518	0.547929	0.492108	0.413235
T10 [s]	2.683079	2.326096	1.654409	0.949736	1.021569	1.052179	0.699474	0.613610	0.539271	0.455457
T20 [s]	2.228255	2.096816	1.203924	0.828378	0.898348	0.940167	0.777793	0.699949	0.564765	0.477479
T30 [s]	2.061247	1.920892	1.143967	0.868430	0.947745	0.974111	0.818350	0.739501	0.596194	0.497164
C80 [dB]	-6.320393	-3.282751	5.923898	1.577824	6.320606	7.331002	7.131997	9.413684	10.374635	13.421264
D50	0.079833	0.174331	0.476111	0.422558	0.678787	0.719689	0.707725	0.742041	0.799083	0.866072

En contraste, la siguiente tabla muestra la salida del software Aurora de la misma respuesta al

impulso. Esto permite hacer una comparación entre los dos programas.

Parámetro Acústico	31.5 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	16000 Hz
EDT [s]	2.868	2.332	0.757	1.065	0.855	0.750	0.704	0.553	0.497	0.346
T10 [s]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T20 [s]	2.303	2.409	1.240	0.831	0.897	0.941	0.784	0.703	0.564	0.436
T30 [s]	2.047	2.282	1.166	0.873	0.974	0.973	0.819	0.741	0.594	0.435
C80 [dB]	-2.173	-1.189	6.143	2.461	6.590	7.337	7.057	9.470	10.538	14.887
D50 [%]	22.638	28.281	56.463	46.192	70.215	72.303	71.247	75.232	80.027	89.613

Aunque no contamos con los valores de T10 para las frecuencias centrales en octavas, nótese que los resultados del módulo Aurora conciden en gran medida con la del presente software. En general, el error como la diferencia entre un resultado y otro no excede el 8 % con respecto al original. La mayor discrepancia se encuentra en el cálculo del parámetro C80 en la frecuencia central 31.5 Hz con un error del 65 % y en la frecuencia central 63 Hz con un error del 63 %. Sin embargo, a medida que la frecuencia aumenta los índices de error vuelven a ser menores al 8 %. De ésta manera, suponemos que éste error se debe a un comportamiento adjudicado a las frecuencias bajas con respecto al parámetro C80 en esas frecuencias en específico. Por último, las escalas del parámetro D50 no indican un error en el cálculo o en la comparación sino una escala diferente, ya que el módulo aurora muestra el D50 como un porcentaje.

5. Conclusiones

En primer lugar, la experiencia resultó satisfactoria al poder concluir en resultados con error mínimo con respecto al módulo Aurora desde el uso de Python3. Sin embargo, dichas diferencias existen y podrían ser resueltas con un mayor entendimiento de los procesos y manipulaciones digitales que realiza el módulo y lo diferencian de los procesos realizados por presente software.

Así, el software tiene mucho margen de mejora:

- Tenemos dos valores del parámetro C80 inconclusos de gran error con respecto al módulo

lo Aurora explicados en la sección de resultados.

- Los valores de los parámetros D50 son incómodos de leer bajo nuestra forma de presentarlos y sería mucho más cómodo visualizarlos en la forma de porcentaje.
- La decisión de generar una entrada para delimitar el cálculo de la integral de Schroeder, aunque práctica, no es muy exacta ya que confía en el buen criterio del usuario para encontrar el punto donde termina la cola reverberante del impulso y comienza el ruido de fondo de la señal. Lo correcto y más efectivo sería aplicar la función Lundebey.
- El desarrollo de una interfaz gráfica podría ser continuada en un futuro.

Referencias

- [1] IEC 61260, *Electroacoustics Octave Band and Fractional Octave Band Filters*, Indian Standard, 1995.
- [2] ISO 3382-2, *Measurement of Room Acoustic Parameters*, International Standard, 2008.
- [3] UNE-EN ISO 3382-1, *Medición de Parámetros Acústicos en Recintos*, European Standard, 2010.
- [4] DSP Stack Exchange. *Calculation of Reverberation Time (RT60) from the Impulse Response*.
[Link a Sitio Web](#)

- [5] Schroeder, *M.R. New Method of Measuring Reverberation Time*, Bell Telephone Laboratories, 1964.