



Desarrollo de software para el cálculo de parámetros acústicos ISO 3382

Alejo Cohen¹, Agustín Rapetti², Luciano de la Vega³

22 de junio de 2021

Señales & Sistemas, Ingeniería de Sonido

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

¹ alecohen00@gmail.com, ² agustin_rape@hotmail.com, ³ luchorock100@gmail.com,

Resumen

En el presente trabajo se realiza el desarrollo de un software para el cálculo y análisis de parámetros acústicos contemplados en la norma ISO-3382, con el objetivo de entender las características acústicas de un determinado recinto. Los descriptores acústicos medidos son el EDT, el T60, el C80 y el D50. El trabajo consta de tres etapas principales, que consisten, en general, en la adquisición de una respuesta al impulso del recinto a estudiar, para luego aplicarle los filtros y procesos pertinentes para el propio cálculo de los parámetros característicos. Para el diseño del programa, se implementó el lenguaje de programación Python 3. Los resultados obtenidos no fueron los esperados, a la hora de comparar con los valores provistos por el sitio Openair, del cuál se extrajo la respuesta al impulso utilizada. Por lo tanto, se concluyó en que el software pudo haber presentado defectos en la etapa final de estimación de parámetros.

Keywords: ISO 3382, IR

1. INTRODUCCIÓN

En el presente estudio, se desarrolla un programa con el objetivo de determinar las características acústicas de un recinto. Los parámetros acústicos que lo caracterizan son EDT, T_{60} , C_{80} y D_{50} , presentados por la normativa ISO 3382 [2]. Para la realización del software, se utilizó el lenguaje de programación Python 3.

En primer lugar, empleando Ruido Rosa, se calibra la fuente que emitirá la señal sonora. Posteriormente, a partir de un barrido en frecuencia de tipo senoidal (Sine-Sweep) grabado en un recinto, y su correspondiente filtro inverso, se obtiene la respuesta al impulso del mismo. Por último, procesando debidamente a la señal para su análisis, se estiman los parámetros especificados.

2. Marco teórico

A continuación, se definen los conceptos tratados para la producción del trabajo.

2.1. Ruido Rosa

El Ruido Rosa es una señal con una distribución de frecuencias tal que su densidad espectral de potencia es inversamente proporcional a la frecuencia. Entonces, se puede ver que su nivel de presión sonora, por banda de tercios de octava, es constante. Por lo tanto, el ruido rosa decae a razón de 3 dB por octava. En general, se utiliza para calibrar una fuente sonora.

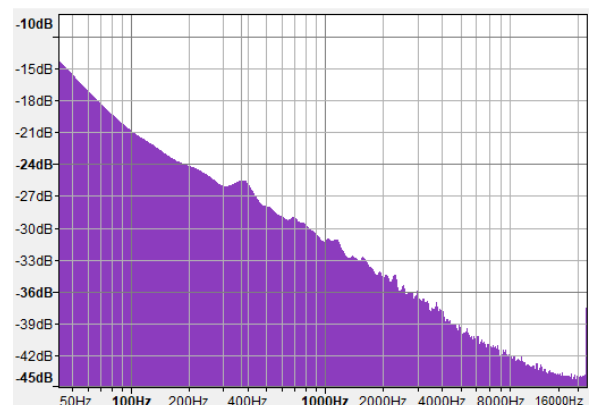


Figura 1: Espectro del ruido rosa

2.2. Sine Sweep Logarítmico y Filtro Inverso

El Sine Sweep Logarítmico es una señal sinusoidal que excita todas las frecuencias angulares entre ω_1 y ω_2 , en un determinado tiempo T . Su amplitud es constante y disminuye en 3 dB por banda de octava. Su ecuación está dada por

$$x(t) = \sin\left(\frac{T\omega_1}{\ln(\omega_2/\omega_1)} e^{\frac{t \ln(\omega_2/\omega_1)}{T}} - 1\right) \quad (1)$$

Donde t es la variable temporal de la función.

Por otro lado, el Filtro Inverso se define como la inversión en el tiempo de la señal de entrada (obteniendo $x(-t)$). En el caso del Sine Sweep logarítmico, se debe agregar una modulación en amplitud $m(t)$, compensando diferencias de energía respecto a la señal original, dada por la siguiente expresión:

$$m(t) = \frac{\omega_1}{2\pi w(t)} \quad (2)$$

Donde $w(t)$ es la frecuencia instantánea, dada por

$$w(t) = \omega_1 e^{\frac{t \ln(\omega_2/\omega_1)}{T}} \quad (3)$$

Luego, el filtro inverso $k(t)$, queda definido como:

$$k(t) = m(t)x(-t) \quad (4)$$

2.3. Respuesta al impulso

Si se realiza la convolución entre el sine sweep logarítmico generado por la ecuación (1) y su correspondiente filtro inverso, se obtiene la respuesta al impulso del recinto[3]. Este tipo de señal resulta práctica para calcular y evaluar diversos parámetros acústicos del recinto. Se debe a que es una señal de corta duración (impulsiva) que excita todas las frecuencias de interés (el rango estará contenido entre ω_1 y ω_2 de la ecuación (1)).

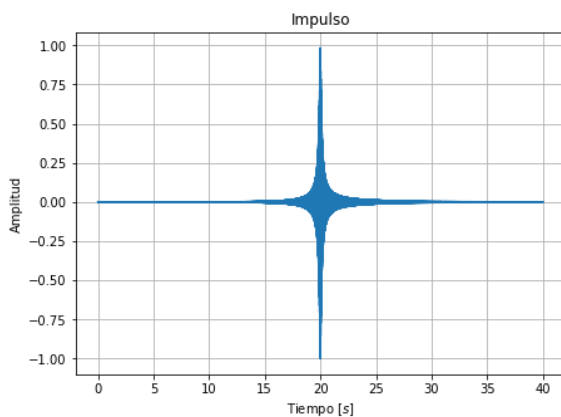


Figura 2: Respuesta al impulso

2.4. Conversión a Escala Logarítmica Normalizada

Para una correcta visualización de la señal, se realiza una conversión de la respuesta al impulso a escala logarítmica. La función que le realiza la conversión a la señal $A(t)$ viene dada por la siguiente expresión:

$$R(t) = 20 \log\left(\frac{A(t)}{|A(t)_{max}|}\right) \quad (5)$$

2.5. Filtro de promedio móvil

El filtro de promedio móvil es una función que se encarga de suavizar una señal, a través de realizar un promedio de la misma por ventanas de L muestras. Actúa como un filtro pasa bajo, es decir, filtra las frecuencias altas, y obtenemos para cada muestra de la señal, un valor de la función a partir de la siguiente ecuación.

$$y[i] = \frac{1}{L} \sum_{j=0}^{L-1} x[i-j] \quad (6)$$

Donde i es la muestra en que se evalúa, x la señal original e y la señal filtrada.

2.6. Transformada de Schroeder

Realiza la aproximación de un impulso a una señal más suavizada, para facilitar cálculos. Viene dada por la ecuación

$$E(t) = \int_t^{\infty} p^2(\tau) d\tau \quad (7)$$

Donde $p(\tau)$ es la respuesta al impulso y t es la variable temporal.

Si bien el límite superior de la integral es "infinito", en la práctica, su límite es el tiempo en el que termina el impulso. De acuerdo con el método que se utilice, ese tiempo final puede variar. Mientras más tiempo con "silencio" se encuentre en el rango de la integral (por silencio puede entenderse que dejan de escucharse las reflexiones del impulso o todavía éste no se ejecuto), menos precisa será la aproximación de la misma. Entonces, por ejemplo, sería una posibilidad, para evitar esto, considerar el final de la señal como el tiempo en el que decayó 60 dB, o en el momento en que el nivel de presión sonora es igual al del ruido de fondo.

2.7. Regresión lineal por mínimos cuadrados

Muchas veces al realizar mediciones, se llega a una nube de muestras que se asemeja a una función. Cuando ese patrón es similar a una recta o a una curva, se opta por aproximar dichos valores a una función lineal, ya que es una función simple y permite predecir fenómenos con facilidad.

Este es el caso de una señal impulsiva a la que se le aplicó la Transformada de Schroeder. La señal resultante es una curva con una pendiente casi recta, lo cual permite realizar una aproximación lineal y confiar en que aproximará bien al impulso.

Sea la recta de regresión lineal que aproxima a la función $y = at + b$, por el método de mínimos cuadrados los coeficientes se calculan como

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

$$b = y - a\bar{x} \quad (9)$$

Donde x_i es el número de muestra en la posición i de la señal, y_i es el valor de la muestra en la posición i , n es el número total de muestras, \bar{x} es el promedio del número de muestras e \bar{y} es el promedio de valor de las muestras. El error cuadrático medio (ECM) es una forma de varias para medir la precisión de la aproximación lineal, y su ecuación es

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_i)^2 \quad (10)$$

2.8. Parámetros acústicos

Para caracterizar un recinto, hay diversos parámetros acústicos que resultan muy buenos descriptores del espacio, por lo cual son de amplio uso. Los parámetros que interesan para este trabajo son:

2.8.1. EDT (Early Decay Time)

Es el tiempo de decaimiento para las reflexiones tempranas. Es el tiempo en que la señal decae de 0 dBFS a -10 dBFS.

2.8.2. Tiempo de reverberación (T_{60})

Es el tiempo en que tarda la señal en disminuir su nivel de intensidad acústica 60 dB, por debajo de su valor inicial. Para evitar las reflexiones tempranas, se lo toma entre -5 dBFS y -65 dBFS. Depende del uso, pueden ser aceptables diversos valores. En el caso del habla, por ejemplo, un alto tiempo de reverberación hace que la palabra sea menos inteligible.

El problema para este parámetro reside en que, para obtener su valor, la señal debe estar por lo menos a 70 dB por encima del nivel de ruido de fondo. Como esto resulta imposible en la mayoría de las mediciones, se utilizan otros parámetros como T_{10} , T_{20} o T_{30} , de los cuales luego se calcula el T_{60} [4]. Su medición es igual, con la diferencia de que van de -5 dBFS a -15dBFS, -25 dBFS y -35 dBFS, respectivamente. Haciendo una aproximación lineal, se encuentra que, según el parámetro que se utilice:

$$T_{60} = 6T_{10} \quad (11)$$

$$T_{60} = 3T_{20} \quad (12)$$

$$T_{60} = 2T_{30} \quad (13)$$

Como se sabe que el decaimiento sigue una forma del tipo exponencial, en lugar de lineal, usar una franja corta de dB puede conducir a resultados más imprecisos. Por eso, suele usarse principalmente el T_{30} , ya que tiene un rango medianamente amplio de dB.

2.8.3. Clarity 80 (C_{80})

Es un cociente entre la energía acumulada de la señal en las primeras reflexiones (hasta los primeros 80 ms.) y la energía luego de esos 80 ms. Se utiliza para indicar la claridad del sonido en el recinto. A mayor energía temprana, mayor claridad. Viene dado por la ecuación

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{0,08} p^2(t) dt}{\int_{0,08}^{\infty} p^2(t) dt} dB \quad (14)$$

Donde $p(t)$ es la presión acústica instantánea de la respuesta al impulso.

2.8.4. Definition 50 (D_{50})

Es similar al C_{80} , y relaciona la energía acumulada durante los primeros 50ms. con la energía total de la señal. Tiene como objetivo evaluar la inteligibilidad en un determinado recinto. Su ecuación es

$$D_{50} = \frac{\int_0^{0,05} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (15)$$

3. Desarrollo Experimental

El trabajo se compone de tres etapas principales. La primera, consiste en la generación y adquisición de la respuesta al impulso en el recinto. La siguiente, se ocupa del pre-procesamiento y filtrado de la señal. Luego, se realiza el suavizado de la misma para finalmente poder efectuar el cálculo de los parámetros. En el siguiente diagrama, se pueden observar las funciones, que integran las diferentes etapas mencionadas, y su relación entre la entrada y la salida de cada una. Vale aclarar que, previo a la realización de las mediciones, hay una etapa previa de calibración de la fuente sonora, utilizando ruido rosa.

Se desarrolló un script en Python 3, titulado main.py, el cual calcula los parámetros acústicos a partir de una respuesta al impulso en formato .wav; o a través de la generación de un sine sweep y filtro inverso logarítmico, con su grabación en el recinto.

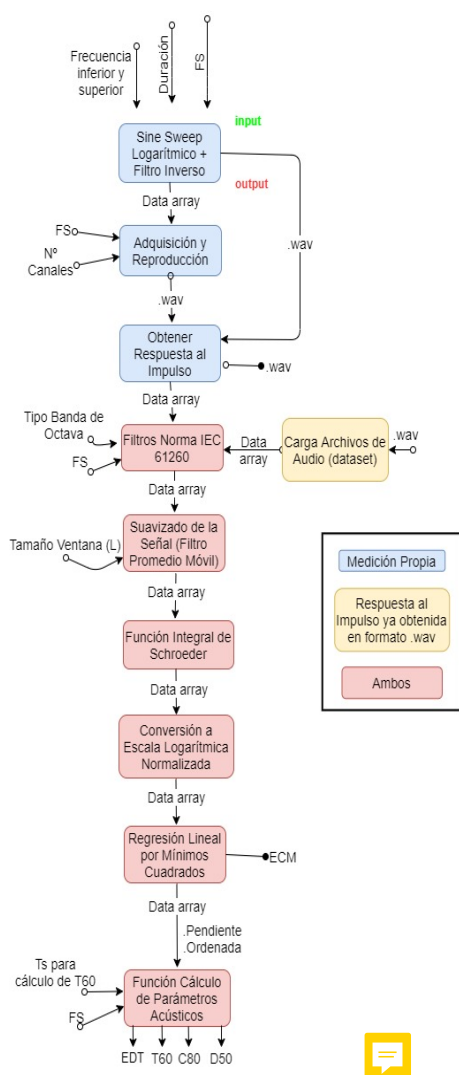


Figura 3: Diagrama de Bloques del software.

3.1. Adquisición

En esta etapa, el objetivo es obtener la respuesta al impulso del recinto a analizar, para lo cual hay dos opciones. Por un lado, se ofrece la opción de obtenerla a partir de la convolución entre la grabación de la reproducción del sine sweep, dado por la ecuación (1), en el recinto, y su filtro inverso, de la ecuación (4). Por otro lado, también está la posibilidad de ingresar una respuesta al impulso grabada, cargando un archivo .wav.

3.2. Pre-procesamiento y Filtrado

En un segundo momento, se realiza el filtrado de la señal, aplicando una función que la filtra en octavas y tercios de octava (según la norma IEC61260)[1], para así luego poder calcular los parámetros acústicos discriminando las frecuencias.

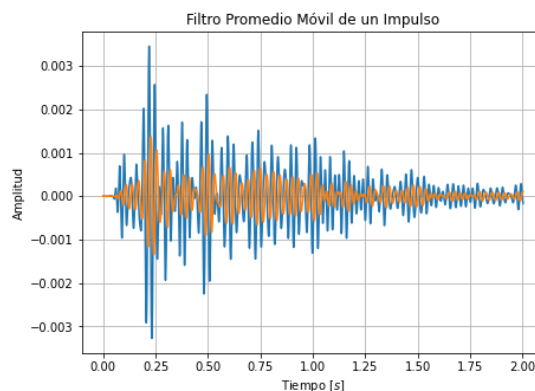


Figura 4: Comparación de la señal original y la filtrada

3.3. Suavizado de la Señal y Cálculo de Parámetros

Para el suavizado de la señal, se utiliza una función que lo realiza mediante la técnica de "Filtro Promedio Móvil". Luego, con el objetivo de adecuar la señal para el posterior cálculo de parámetros, se emplea una función que aplica el proceso dado por la expresión (7) a una señal suavizada. De esta forma, usando la ecuación (5), realizamos la conversión a escala logarítmica del impulso, para poder visualizarla correctamente.

Previo a realizar el cálculo de parámetros, se hace la aproximación lineal por una recta mediante el método de Regresión Lineal por cuadrados mínimos, obteniendo su pendiente a y ordenada al origen b a partir de las expresiones (8) y (9), respectivamente. Además, se estima el Error Cuadrático Medio de la aproximación lineal mediante la ecuación (10).

Por último, utilizamos la función desarrollada que estima los parámetros acústicos especificados, para así, a partir de la recta obtenida, calcularlos. El T_{60} , según se elija medirlo por el T_{10} , T_{20} o T_{30} , se obtiene mediante las expresiones (11), (12) o (13), respectivamente. El C_{80} y el D_{50} , se calculan por medio de las ecuaciones (14) y (15), respectivamente.

4. Resultados y análisis

Se realizó un análisis de los parámetros acústicos para la respuesta al impulso del R1 Nuclear Reactor Hall, ubicado en Suecia, adquirido del sitio web Openair. En las siguientes tablas pueden verse los resultados obtenidos a través del script main.py, el cuál calcula los parámetros acústicos.

Frecuencia (Hz)	EDT (s)	T_{60} (s)
31.25	0.340	2.04
62.5	0.324	1.95
125	0.289	1.74
250	0.318	1.91
500	0.328	1.97
1000	0.323	1.94
2000	0.265	1.59
4000	0.203	1.22
8000	0.147	0.884

Tabla 1: EDT y T_{60} para las frecuencias.

Frecuencia (Hz)	D_{50}	C_{80} (dB)
31.25	0.0250	-13.8
62.5	0.0250	-13.8
125	0.0250	-13.8
250	0.0250	-13.8
500	0.0250	-13.8
1000	0.0250	-13.8
2000	0.0250	-13.8
4000	0.0250	-13.8
8000	0.0250	-13.8

Tabla 2: D_{50} y C_{80} para las frecuencias.

En la siguiente figura, pueden verse los parámetros acústicos de las mediciones, que la propia página brinda.

Octave Band	31.25 Hz	62.5 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
Reverberation Time RT60 T30 (seconds)	6.98	5.45	4.49	5.15	5.43	4.78	3.6	2.51	1.45
Early Decay Time EDT (seconds)	6.15	5.12	3.84	4.35	4.35	4.1	2.82	1.92	1.03
Definition D50	0.02	0.11	0.13	0.17	0.22	0.24	0.4	0.5	0.59
Clarity C50 (dB)	-17.33	-9.15	-8.29	-6.82	-5.61	-4.93	-1.73	-0.03	1.53
Clarity C80 (dB)	-15.65	-7.04	-4.51	-1.4	-3.53	-3.24	-0.01	2.06	5.07

Figura 5: Tabla atribuida de Openair.

Puede verse que los resultados difieren significativamente a los descriptos en el sitio. Salvo para el D_{50} y el C_{80} en la frecuencia de 31.25 Hz que son similares, el resto difiere considerablemente. Puede verse en la Figura 4 que el Tiempo de Reverberación (T_{60}) es bastante alto para la mayoría de las frecuencias. Esto se debe a que el reactor se encuentra vacío y es de proporciones bastante grandes, de unos $3500 m^3$. De igual manera, el Early Decay Time (EDT), que define el tiempo de la caída de 10 dB de las reflexiones tempranas, resulta bastante alto; lo cual atribuye a disminuir el nivel de inteligibilidad tanto musical como de la palabra. Esto se ve también en el D_{50} , que es cercano a 0 para las frecuencias graves, y en el C_{80} , que para las bandas donde se suele concentrar el habla es negativo.

En cuanto a los valores obtenidos, el tiempo de reverberación (obtenido a través del T_{30} como en el sitio) en función de la frecuencia dio valores un poco arriba de los normales, a pesar de que en lo visto y en la práctica, en el reactor se escucha una reverberación mucho mayor. Por otro lado, vale destacar que los resultados arrojados por el software para el C_{80} y el D_{50} , fueron iguales para todas las frecuencias. Esto posiblemente se deba a un error en la función que se encarga del cálculo de los parámetros.

5. Conclusiones

Como conclusión, se puede ver que los resultados obtenidos no fueron los esperados, por lo tanto, se entiende que el software no cumple con una correcta precisión. Esto puede deberse fuertemente a que exista un error de código en la función de adquisición de los parámetros acústicos ya que, al realizar diversas pruebas, las demás etapas del proceso tuvieron resultados correctos. A pesar de ello, no se pudo encontrar cuál fue exactamente el error que ocasionó esto. Por otro lado, la adquisición de los conceptos tratados y herramientas utilizadas durante este trabajo resultó de mucha utilidad para futuros trabajos en la carrera.

Referencias

- [1] *IEC 61260. Electroacoustics—Octave-Band and Fractional-Octave-Band Filters. International Electrotechnical Commission Geneva, Switzerland, 1995.* 1995.
- [2] *ISO 3382:2008. Acoustics - Measurement of rooms acoustic parameters - Annex C: Formulas for the least-squares fit method.* 2008.
- [3] Angelo Farina. *Advancements in impulse response measurements by sine sweeps. @ Audio Engeneering Society Convention 122.* Audio Engeneering Society. 2007.
- [4] M.R.Schroeder. *New Method of Measuring Reverberation Time.* Bell Telephone Laboratories.