

Desarrollo de software para el cálculo de parámetros acústicos bajo norma ISO 3382

Lautaro Musolino¹

Señales & Sistemas, Ingeniería de sonido
Universidad Nacional de Tres de Febrero, Buenos Aires, Argentina.

¹ lautaromusolino@yahoo.com.ar,

2º Cuatrimestre 2019

Resumen

En el presente trabajo se expone el desarrollo de un software modular que permite el estudio de propiedades acústicas, propuestas por la normativa ISO 3382. Este software posibilita obtener la respuesta al impulso de un recinto mediante la excitación de este con un barrido senoidal. Además, el programa ofrece una etapa de procesamiento de la señal, donde se calculan los descriptores EDT, T10, T20, T30, C80 y D50, en bandas de octava y tercios de octava. El lenguaje de programación que se utiliza es Matlab. Los resultados obtenidos se comparan de forma cualitativa con los resultados que determina la extensión Aurora del software Audacity. Finalmente, se concluye que el software diseñado posee un nivel de precisión aceptable.

Keywords: ISO 3382, IR, TR60

1. INTRODUCCIÓN

Para determinar si un establecimiento permite una correcta inteligibilidad de la voz, se estudian sus características acústicas y se obtiene el tiempo de reverberación correspondiente. En primer lugar se realiza un relevamiento del recinto a evaluar y se preparan los materiales para la medición. Para calibrar la fuente omnidireccional se utiliza una señal de ruido rosa. Por otra parte, se utiliza el método propuesto por Angelo Farina [1], que consiste en la excitación del lugar con un barrido senoidal logarítmico. De esta forma se logra obtener la respuesta del lugar a la excitación. Una vez que se obtiene la respuesta al impulso se calcula la curva de decaimiento de la señal y así se obtienen los parámetros descriptores que permiten extrapolar el valor del TR60. Por último, se debe mencionar que cada uno de los procedimientos realizados, tanto en la etapa de medición como en la etapa de procesamiento de la señal, siguieron los lineamientos especificados bajo la normativa ISO 3382:1997 [2].

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Ruido de Fondo

Se define como ruido de fondo a todo aquel emitido por cualquier fuente sonora que no sea la utilizada para la medición acústica. Conocer el ruido de fondo permite determinar la relación señal ruido, es decir, la diferencia en decibelios entre el piso de ruido y el nivel de presión sonora de la fuente. La normativa ISO 3382 establece que la relación debe ser de al menos de 10 dB para garantizar una correcta precisión de la medición.

2.2. Ruido Rosa

El ruido rosa o ruido $1/\sqrt{f}$ es un ruido cuyo nivel de presión sonora está caracterizado por una densidad espectral inversamente proporcional a la frecuencia, es decir que posee un decaimiento de 3 dB por octava. En el presente trabajo se utiliza esta señal para ajustar el nivel de presión sonora de la fuente y poder garantizar así una buena relación señal ruido.



2.3. Sine Sweep y Filtro Inverso

El sine sweep logarítmico es una señal sinusoidal que varía su frecuencia en función del tiempo. Su expresión matemática es la siguiente:

$$x(t) = \sin[\theta(t)] = \sin\left[K \cdot \left(e^{\frac{t}{T}} - 1\right)\right] \quad (1)$$

Donde:

$$K = \frac{T \omega_1}{\ln\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)} \quad (2)$$

$$L = \frac{T}{\ln\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)} \quad (3)$$

Con ω_1 y ω_2 las frecuencias angulares inferior y superior respectivamente, y T el tiempo de duración del sine sweep en segundos.

Para obtener el filtro inverso correspondiente al sine sweep logarítmico, en primer lugar hay que invertirlo en el tiempo, obteniendo $x(-t)$. A su vez es necesaria una modulación en amplitud ($m(t)$) que compense la diferencia de energía respecto de la señal de entrada original. La expresión matemática entonces del filtro inverso ($k(t)$) es la siguiente:

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

Donde:

$$m(t) = \frac{\omega_1}{2\pi w(t)} \quad (5)$$

$$w(t) = \frac{d[\theta(t)]}{dt} = \frac{K}{L} e^{\frac{t}{T}} \quad (6)$$

2.4. Respuesta al Impulso

La respuesta al impulso (IR) contiene información necesaria para determinar las características acústicas de un sistema. Además, los recintos pueden ser considerados como sistemas lineales e invariantes en el tiempo sin inducir errores considerables. Con lo cual, en el presente trabajo se obtiene la Respuesta al Impulso realizando la convolución de la respuesta de la sala al barrido senoidal y su respectivo filtro inverso.

2.5. Tiempo de Reverberación

La normativa ISO 354:2003 [3] define al tiempo de reverberación (T60 o RT60) como el tiempo necesario para que el nivel de presión sonora decaiga

60 dB luego del cese de la fuente. Éste parámetro se expresa en segundos. Se puede evaluar en un rango dinámico menor que 60 dB y extrapolar a un tiempo de atenuación de mismo valor. Lo anteriormente mencionado corresponde a la dificultad de obtener el TR60, debido a que se necesita un rango dinámico de 75 dB para una correcta medición. La normativa ISO 354:2003 afirma la posibilidad de obtener el T60 mediante la extrapolación de mediciones correspondientes al decaimiento temprano de la señal, tales como caídas de 10 dB (T10), 20 dB (T20), o 30 dB (T30). Por otra parte, El Early Decay Time (EDT) se define como seis veces el tiempo que tarda en caer 10 dB el nivel de presión sonora desde el momento en el que la fuente deja de emitir. El T10, se define como seis veces el tiempo que tarda en caer la señal de -5 dB a -15 dB, por lo cual debe existir 25 dB de rango dinámico. El T20, se define como tres veces el tiempo que tarda en caer la señal de -5 dB a -25 dB, por lo cual debe existir 35 dB de rango dinámico. Por último, el T30 se define como dos veces el tiempo que tarda en caer la señal de -5 dB a -35 dB, por lo cual debe existir 45 dB de rango dinámico. La norma anteriormente mencionada especifica valores de referencia recomendados para salas de conferencia que garantizan, entre otras cosas, una correcta inteligibilidad de la voz. Estos valores son de 0,7 – 1,0 segundos para el rango de frecuencias entre 500 Hz y 1000 Hz (RTmid).

2.6. Suavizado de la Señal

Existen diversos métodos para suavizar una señal. En el presente trabajo se utiliza primeramente la transformada de Hilbert para obtener la envolvente de la señal y posteriormente se emplea la integral de Schroeder de forma inversa. Esta integral, expresada en (7), representa la curva de decaimiento de la energía obtenida una vez apagada la fuente emisora. Por otro lado, se ofrece al usuario del software la posibilidad de utilizar el método de Lundeby [4] como método de compensación. Este método permite determinar automáticamente los extremos de la integral de Schroeder, reduciendo los errores producidos por el ruido de fondo.

$$\int_t^\infty p^2(\tau) d\tau \quad (7)$$

Con $p(\tau)$ la respuesta al sine sweep de la sala

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El desarrollo del trabajo se divide en el principio de funcionamiento del software y el relevamiento de

un recinto con el fin de validar el software.

3.1. Primera Parte

3.1.1. funcionamiento del software

En primer lugar, es necesario comentar que el software cuenta con un diseño dinámico y se realiza mediante la programación por bloques. Consta de un menú principal que contiene cinco secciones básicas (Figura 1), donde cada una contiene una función determinada. Utilizando las secciones “Medición de ruido de fondo” y “Medición de respuesta impulsiva” el usuario podrá llevar a cabo la medición para obtener la respuesta al impulso. Por otra parte, el programa ofrece la sección “Adquisición de respuesta impulsiva” (Figura 2) donde se puede obtener la respuesta al impulso, ya sea producto de una medición o de forma sintetizada.

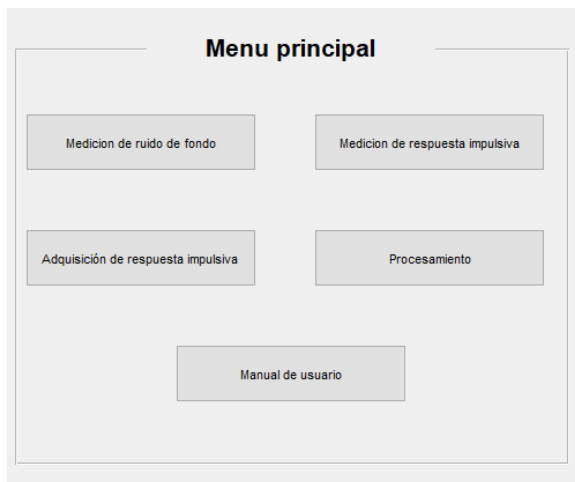


Figura 1: Menu principal

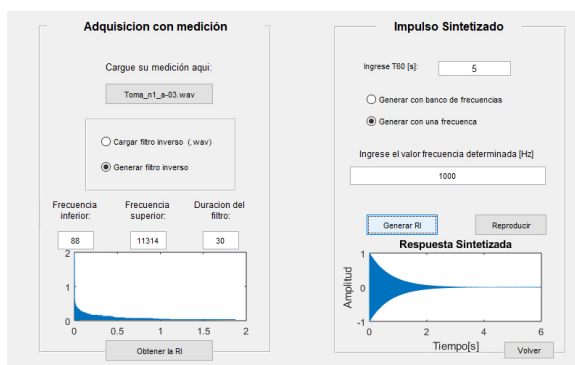


Figura 2: Sección “Adquisición de respuesta impulsiva”

La sección “Procesamiento” permite al usuario poder obtener los descriptores acústicos arrojados en un tabla (Figura 3).

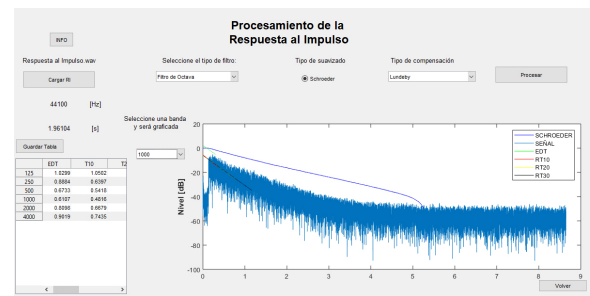


Figura 3: Sección “Procesamiento de la RI”

3.1.2. Obtención de la respuesta al impulso

Se aplica un proceso equivalente a la convolución entre la señal cargada por el usuario y el filtro inverso seleccionado. Primero se realiza la transformada de Fourier de ambas señales mediante la función *fft* de Matlab, luego se realiza el de las señales obteniendo de esta forma la respuesta al impulso. Una vez obtenida la respuesta al impulso, la misma se recorta en la zona de interés, es decir, a partir del impulso. En las Figuras 4 y 5 respectivamente, se puede ver la respuesta al impulso sin el proceso de recorte y finalmente normalizada y recortada en la zona de interés.

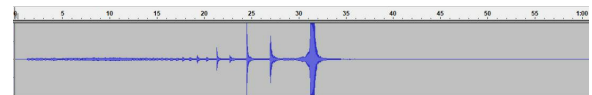


Figura 4: Respuesta al Impulso sin recortar

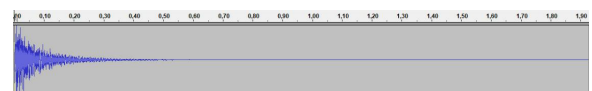


Figura 5: Respuesta al Impulso normalizada y recortada en la zona de interés

3.1.3. Filtrado de la señal

Dentro del procesamiento, la interfaz permite al usuario elegir un filtrado por octava o tercio de octava. Para diseñar el filtro se siguieron los lineamientos mencionados en la normativa CEI 61260 [5] y se utilizó la función *designfilt* del Toolbox Signal Processing de MATLAB. Se utilizó un filtro de orden 6 para el filtrado en banda de octava y de orden 8 en caso de tercios de octava. Para aplicar el filtro creado a la señal, se utilizó la función *filter*, la cual cumple los requerimientos de la norma mencionada. En la Figura 4 se observa el filtro diseñado para la banda de 1 KHz.

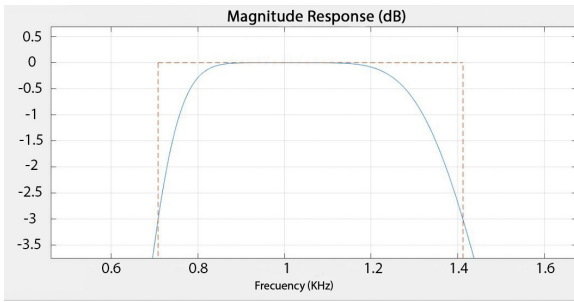


Figura 6: Filtrado de la señal en 1 KHz

3.1.4. Suavizado de la señal

Para el suavizado de la señal se recurre como primer instancia a la transformada de Hilbert, utilizando función hilbert, propia de MATLAB. Dicha función devuelve una señal compleja, por lo que se debe tomar su módulo, obteniendo así la envolvente suavizada de la señal. En segundo lugar, se realiza el suavizado de la señal aplicando la integral de Schroeder, con la posibilidad de utilizar la compensación del ruido de fondo mediante el método de Lundebay.

3.1.5. Cálculo de descriptores

La obtención de los descriptores se realiza mediante la aproximación de los datos por regresión lineal por el método de cuadrados mínimos. Para el EDT, el software toma el tiempo necesario para que la recta de aproximación decaiga desde 0 dB a -10 dB, para el T10 el tiempo necesario para que la recta decaiga de -5dB a -15dB y se lo multiplica por seis, para el T20 el tiempo necesario para que decaiga desde -5 dB a -25 dB y se lo multiplica por tres, y para el T30 el tiempo necesario para que decaiga de -5 dB hasta -35 dB y se lo multiplica por dos. De forma adicional se agrega el parámetro de claridad C80 y definición D50 [6].

3.2. relevamiento de un recinto

Para poder ejecutar y validar el software se utiliza como prueba un dataset con mediciones de respuestas al impulso. El mismo es proporcionado por la empresa Isophonics [7]. y las mediciones fueron creadas utilizando la técnica de barrido senoidal. Además, se utilizó un Altavoz marca Genelec modelo 8250A y dos micrófonos, un DPA 4006 omnidireccional y un Soundfield SPS422B de formato

B. El dataset proporciona también datos significativos como las dimensiones del recinto, las ubicaciones específicas de los micrófonos entre otras cosas (figura 7) (figura 8). En lo que respecta a las posiciones, la empresa aclara que se midieron 169 posiciones del receptor con ambos micrófonos con el altavoz mantenido estáticamente.



Figura 7: Recinto donde fueron realizadas las mediciones.

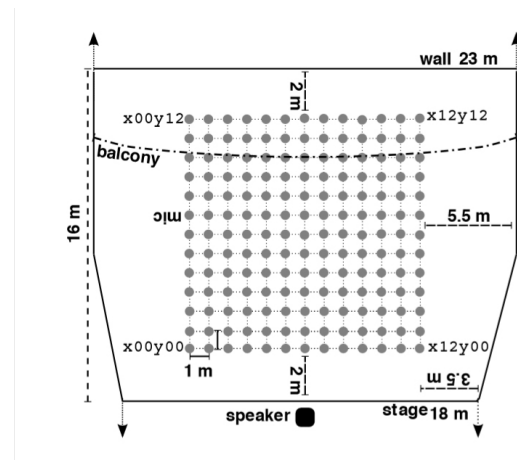


Figura 8: Dimensiones del recinto.

4. RESULTADOS

Como método de validación de los resultados obtenidos, se realizó una comparación con el software Audacity y el plugin Aurora. A continuación, se exponen una serie de tablas correspondientes a los resultados de los descriptores calculados con nuestro software y con el plugin Aurora.

Tabla 1: Descriptores calculados con software diseñado - Toma x00y04

| <i>Descriptor</i> | <i>125 Hz</i> | <i>250 Hz</i> | <i>500 Hz</i> | <i>1000 Hz</i> | <i>2000 Hz</i> | <i>4000 Hz</i> |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| EDT [s] | 4,7114 | 5,1971 | 5,7912 | 5,0160 | 4,1525 | 2,9323 |
| T10 [s] | 4,4868 | 5,0355 | 5,4307 | 4,8670 | 3,9455 | 2,5363 |
| T20 [s] | 4,2005 | 5,1834 | 5,1771 | 4,8583 | 4,05 | 2,7404 |
| T30 [s] | 3,6327 | 4,9439 | 4,9604 | 4,7272 | 4,1099 | 2,8609 |
| D50 [Porc.] | 13,5727 | 12,2059 | 11,2207 | 12,9189 | 14,9343 | 19,4990 |
| C80 [dB] | -5,6123 | -6,2088 | -6,6668 | -5,9341 | -5,1425 | -3,5916 |

Tabla 2: Descriptores calculados con Aurora - Toma x00y04

| <i>Descriptor</i> | <i>125 Hz</i> | <i>250 Hz</i> | <i>500 Hz</i> | <i>1000 Hz</i> | <i>2000 Hz</i> | <i>4000 Hz</i> |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| EDT [s] | 4,19 | 5,113 | 5,111 | 4,110 | 3,166 | 2,381 |
| T20 [s] | 5,115 | 5,268 | 5,378 | 4,846 | 3,868 | 2,228 |
| T30 [s] | 5,006 | 5,329 | 5,267 | 4,942 | 4,019 | 2,463 |
| D50 [Porc.] | 30,877 | 41,296 | 42,011 | 44,293 | 56,100 | 72,327 |
| C80 [dB] | -2,843 | -1,299 | -1,305 | -0,734 | -1,305 | -4,409 |

Tabla 3: Descriptores calculados con software diseñado - Toma n1 a-03

| <i>Descriptor</i> | <i>125 Hz</i> | <i>250 Hz</i> | <i>500 Hz</i> | <i>1000 Hz</i> | <i>2000 Hz</i> | <i>4000 Hz</i> |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| EDT [s] | 0,9056 | 0,7233 | 0,5007 | 0,4299 | 0,6316 | 0,7170 |
| T10 [s] | 1,0095 | 0,6426 | 0,5512 | 0,4903 | 0,6716 | 0,7457 |
| T20 [s] | 1,0258 | 0,6705 | 0,5501 | 0,5210 | 0,6875 | 0,7656 |
| T30 [s] | 1,0612 | 0,7146 | 0,5629 | 0,5243 | 0,6906 | 0,7928 |
| D50 [Porc.] | 48,41 | 55,1034 | 69,4075 | 71,3547 | 61,5156 | 56,5725 |
| C80 [dB] | 3,1493 | 4,8610 | 7,8555 | 8,9559 | 6,1051 | 4,9171 |

Tabla 4: Descriptores calculados con Aurora - Toma n1 a-03

| <i>Descriptor</i> | <i>125 Hz</i> | <i>250 Hz</i> | <i>500 Hz</i> | <i>1000 Hz</i> | <i>2000 Hz</i> | <i>4000 Hz</i> |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| EDT [s] | 0,830 | 0,724 | 0,458 | 0,371 | 0,524 | 0,678 |
| T20 [s] | 1,096 | 0,640 | 0,535 | 0,515 | 0,690 | 0,748 |
| T30 [s] | 1,390 | 0,656 | 0,532 | 0,536 | 0,689 | 0,775 |
| D50 [Porc.] | 53,157 | 48,303 | 81,478 | 81,435 | 69,248 | 63,498 |
| C80 [dB] | 4,023 | 3,651 | 10,174 | 11,717 | 8,244 | 5,918 |

Se incluye una tabla con el error medio para las frecuencias de 125 Hz, 1000 Hz y 4000 Hz. Se toman estas frecuencias ya que se considera que son las más significativas por estar en los extremos del rango considerados y en un punto intermedio. El análisis del error se realiza promediando las diferencias entre los resultados para cada descriptor brindados por el software Aurora y el software realizado por los alumnos, para un total de cinco mediciones seleccionadas al azar. Por último, como se puede visibilizar en los resultados, el descriptor de definición contiene un gran margen de error. Con lo cual se ha decidido evaluar los resultados tomando otra medición y los resultados son arrojados por las tablas 3 y 4.

Tabla 5: Error promedio por descriptor

| Descriptor | 125 Hz | 1000 Hz | 4000 Hz |
|------------|--------|---------|---------|
| EDT [s] | 0,0577 | 0.0672 | 0,0142 |
| T20 [s] | 0,0333 | 0.0238 | 0,0125 |
| T30 [s] | 0,0289 | 0.0247 | 0,0197 |

5. CONCLUSIONES

Al visualizar la respuesta al impulso obtenida (Figura 4 y 5) se puede concluir que el método de compensación del sine sweep dispuesto por Farina, no sólo resulta eficaz para obtener una respuesta al impulso óptima sino que además desplaza, fuera de la zona de análisis de la señal, las distorsiones armónicas introducidas por el sistema de adquisición de la respuesta al impulso, es decir, las distorsiones tanto de la fuente como del micrófono.

En segundo lugar los resultados obtenidos por las tablas 3 y 4 demuestran el correcto desempeño del programa para las bandas de frecuencia analizadas. El error promediado para todas las bandas del software presentado comparado con el de referencia es de aproximadamente 0,0313 segundos, lo cual no supone un error significativo a la hora de calcular los descriptores en cuestión.

Es interesante destacar que los resultados obte-

nidos cuando no se aplica el método de Lundeby a la integral de Schroeder, tienen un error promedio mayor a 0,6 segundos para todas las bandas. Esto demuestra la importancia y eficacia del método. Realizar la integral sin la compensación por el método de Lundeby es equivalente a sobrestimar el ruido de fondo que posee la señal impulsiva.

Además, resulta interesante el resultado obtenido de C80 y D50 para las mediciones del dataset. Con respecto a la claridad, el software presentado muestra diferencias de no más de 10db con respecto al software comercial. Estos valores son despreciables para el oído humano ya que se tratan de niveles muy bajos.

Por último, los resultados de D50 arrojados en la tabla 1 y 2 presentan diferencias porcentuales notorias. Pero si se analiza la tabla 3 y 4 se puede observar que la diferencia porcentual es mucho menor y más aceptable.

Referencias

- [1] A. Farina. *Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion With a Swept-Sine Technique*. 108 AES Convention, París, 19-22 February, 2000.
- [2] *ISO 3382:1997 Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters*.
- [3] *ISO 354:2003 Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room*.
- [4] T. E. Vigran A. Lundeby. *Uncertainties of Measurements in Room Acoustics*. 1995.
- [5] *CEI. 61260:2001. Electroacoustics - Octave-band and fractional-octave-band filters*. 2001.
- [6] Diego Fernando Hidalgo Patiño. *Medición y análisis de parámetros acústicos en diez salas de concierto y teatros de Bogotá*. 2009.
- [7] Isophonics Company. *Room Impulse Response Data Set*. 2010.