

# Caracterización de aula a partir de la medición de respuesta impulsiva con Sine-sweep

Castelli Corina<sup>1</sup>, Espindola Agustin<sup>2</sup>, Passano Nahuel<sup>3</sup>

Señales & Sistemas, Ingeniería de sonido

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

<sup>1</sup> castellicr2111@gmail.com, <sup>2</sup> agustinespindola96@gmail.com, <sup>3</sup> n.passano@hotmail.com

## Resumen

En el presente trabajo se realizó el estudio de las propiedades acústicas del Taller de Ingeniería en Informática de la Universidad Nacional de Tres de Febrero. El estudio consiste en una caracterización del recinto mediante la obtención de una serie de parámetros asociados al decaimiento energético de una señal de excitación. El procedimiento incluyó un relevamiento de las dimensiones del aula y la implementación de un software realizado en MatLab. El mismo se encarga de grabar en simultaneo con la reproducción de un sine-sweep dentro del recinto, obtener la respuesta al impulso mediante convolución y procesar dicha señal en busca de los parámetros. En vistas del objetivo principal del trabajo, se concluye que el tiempo de reverberación del recinto es adecuado para la buena inteligibilidad de la palabra hablada.

**Keywords:** ISO 3382

## 1. INTRODUCCIÓN

En este estudio se tiene como objetivo la obtención de parámetros acústicos correspondientes al recinto tales como EDT, T10, T20 y T30, para luego extrapolar los resultados en busca del T60. Para ello, se llevó a cabo el desarrollo de un software en la plataforma MatLab articulado mediante una interfaz gráfica para el usuario. El mismo consta de dos fragmentos principales: en primer lugar una instancia de adquisición de datos contemplando la generación del estímulo (sine-sweep) y calibración de la fuente a utilizar; y en segundo lugar, el procesamiento digital de las señales, donde se abarca la generación del impulso, el filtrado (tanto en octava o tercio de octava), suavizado (con el método de Schroeder) y obtención de los parámetros acústicos mencionados anteriormente.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Ruido de fondo (RF)

Se define ruido de fondo como todo aquel emitido por cualquier fuente que no sea aplicada a la medición, incluyendo aquel proveniente del aire, por vibraciones estructurales o ruido eléctrico generado por el instrumental. En el presente estudio, es

de suma importancia considerar el ruido de fondo, ya que afectará notablemente las mediciones obtenidas.

### 2.2. Ruido rosa

Señal aleatoria caracterizada por tener igual magnitud de energía en toda banda de octava. De esta manera, presenta una densidad espectral inversamente proporcional a cada frecuencia. Esta característica se refleja en un decaimiento no lineal de 3 [dB] por octava

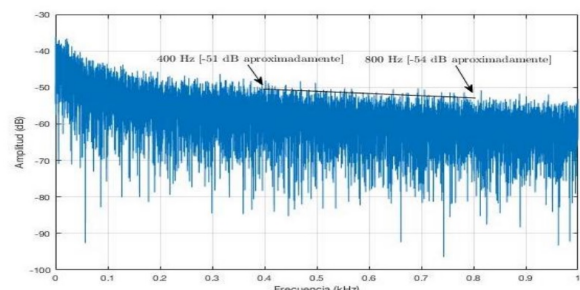


Figura 1: Espectro de Ruido Rosa

En el estudio propuesto, se utilizó ruido rosa para la calibración de la fuente, de modo tal que se supere el nivel de ruido de fondo en al menos 45 [dB] según lo establecido por la norma ISO 3382:1997<sup>1</sup>.

### 2.3. Tiempo de reverberación (TR)

Se define el tiempo de reverberación como aquel requerido para que el nivel de presión sonora (SPL) decaiga 60 [dB] luego de que la fuente emisora deje de actuar. También es conocido con la abreviatura T60. La normativa ISO 354<sup>2</sup> a su vez afirma que es posible 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). Se define EDT (Early Decay Time) como seis veces el tiempo que tarda en caer 10 [dB] la presión sonora desde el momento en el que la fuente deja de emitir. El T10, está definido como el tiempo que tarda en caer la señal de -5 [dB] a -15 [dB], el T20 el tiempo que tarda en caer de -5 [dB] a -25 [dB] y el T30 el tiempo que tarda en caer la señal de -5 [dB] a -35 [dB].

### 2.4. Respuesta al impulso

La respuesta al impulso de un recinto se define como la evolución en el tiempo de la presión sonora observada en un determinado punto de la sala, como el resultado de la emisión de un impulso de Dirac efectuado en otro punto. En este estudio se evalúa la respuesta al impulso del aula obtenida mediante el proceso de convolución entre una grabación de la sala respondiendo a un sine-sweep exponencial y su respectivo filtro inverso<sup>3</sup>.

### 2.5. Sine-sweep y filtro inverso

El sine-sweep exponencial es una señal sinusoidal de amplitud constante, cuya frecuencia varía en función del tiempo. Es caracterizado por excitar una frecuencia a la vez de manera ascendente considerando un rango entre las frecuencias angulares  $w_1$  y  $w_2$ , y un tiempo  $T$  de duración. Su espectro presenta una disminución de 3 [dB] por octava. Se define la expresión matemática correspondiente:

$$x(t) = \sin\left[\frac{Tw_1}{\ln(\frac{w_2}{w_1})}(e^{t\ln(\frac{w_2}{w_1})/T} - 1)\right] \quad (1)$$

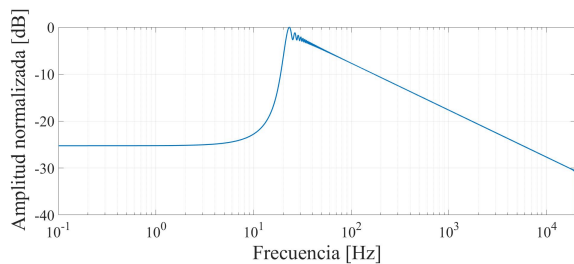


Figura 2: Espectro de Sine-Sweep

El filtro inverso consiste la inversión en tiempo del Sine-Sweep de modo que se obtiene  $x(-t)$ . A su vez conlleva una modulación en amplitud que compensa la diferencia de energías respecto de la señal de entrada original. El filtro inverso  $k(t)$  se define como:

$$k(t) = m(t)x(-t) = \frac{1}{2\pi e^{t\ln(\frac{w_2}{w_1})/T}}x(-t) \quad (2)$$

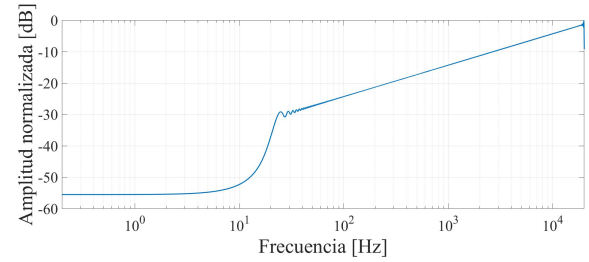


Figura 3: Espectro del filtro inverso

### 2.6. Suavizado

Se analizaron tres técnicas de suavizado sobre las señales obtenidas como respuesta al impulso ( $h(t)$ ). La primera técnica, se basa en aplicar la transformada de Hilbert, luego al tomar su valor absoluto y llevar la escala logarítmica se obtiene como resultado la envolvente suavizada ( $E(t)$ )<sup>4</sup>. Como segundo método de análisis, surge el filtro de media móvil, el cual es aplicado sobre la envolvente suavizada, y por último, la técnica comunmente mas utilizada consiste en aplicar la integral de Schroeder<sup>5</sup> (3).

$$\int_t^\infty h^2(\tau) d\tau \quad (3)$$

## 3. DESARROLLO

El trabajo consiste de dos partes, la primera en la cual se realiza el relevamiento del recinto a estudiar, con sus respectivas mediciones. En la segunda etapa se utiliza el software desarrollado para la adquisición de los parametros que se desean obtener.

### 3.1. Mediciones y adquisición

En primer lugar, se tomaron datos respecto a las condiciones meteorológicas del recinto para contextualizar el aula al momento de la realización de las tomas. Se registró una temperatura ambiente de 25 [°C] y una humedad de 42[%] mediante el servicio meteorológico Windguru. Se calculó que la velocidad del sonido dado el contexto corresponde a 346,175 [ $\frac{m}{s}$ ].

Se tomaron medidas del recinto utilizando un medidor láser de distancia Bosch Dle 70, a partir de las cuales se realizó un plano correspondiente en el software AutoCAD 2018 (Figura 4). El volumen del aula se calculó en  $229,71 [m^3]$ . Con respecto a la disposición del amoblado, se registraron quince escritorios de melamina y 31 sillas.

Para la adquisición de las grabaciones se utilizó un micrófono Earthworks M50 dispuesto en cinco posiciones seleccionadas dentro del recinto. Dichas posiciones fueron determinadas considerando una distancia mínima entre sí dada por la ecuación descrita en la norma para un tiempo de reverberación esperado de  $TR = 0,6 [s]$ ,  $c$  la velocidad del sonido a  $25 [^{\circ}C]$  y  $v$  el volumen de la sala. Con dicho parámetros se obtuvo una distancia mínima de  $2,1 [m]$ .

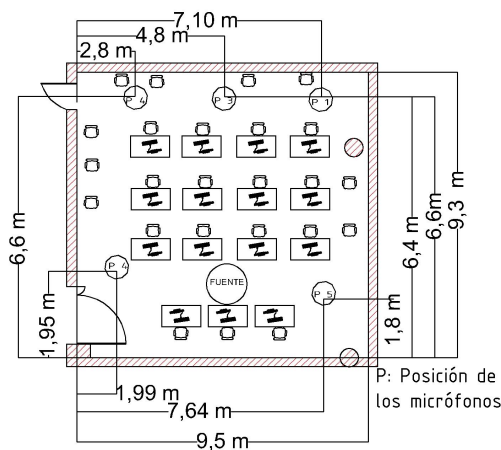


Figura 4: Plano del recinto con disposición de fuente y micrófonos

El instrumento de medición utilizado fue un sonómetro integrador SVAN 949 de clase 1, calibrado en un factor de  $94 \pm 0,2 [dB]$  a  $1 [kHz]$ .

Se midió el ruido de fondo de la sala con tiempo de integración *slow* en ponderación A. Se repitió la medición tres veces y luego se obtuvo un promedio logarítmico de los valores registrados.

Gran parte la energía del ruido de fondo es de contenido en baja frecuencia. Considerando a que el presente estudio es orientado al rango de la palabra hablada, se decidió aplicar la ponderación mencionada tal que se desprece en parte la energía aportada por el contenido frecuencial que no es de interés. Finalmente, la medición promediada resultó en  $37,34 [dBA]$ . Cabe destacar que la ponderación aplicada no es teóricamente correcta, en su defecto se debe utilizar ponderación Z y analizar por bandas el ruido de fondo, ya que al contener energía en gran parte para frecuencias bajas, sube considerablemente el  $L_{eq}$  medido, esto quiere decir que en

las bandas de estudio el ruido de fondo es mucho menor al  $L_{eq}$  obtenido, por lo tanto la normativa se puede aplicar tranquilamente.

Se utilizó una fuente omnidireccional compuesta por un dodecaedro y un subwoofer Outline S5WM16NPP. Dicha fuente cumple con los estándares de directividad exigidos por la normativa ISO 3382 tanto en banda de octava y tercios de octava. Para la calibración de la misma, se reprodujo ruido rosa y se ajustó el nivel a  $91 [dB]$ , cumpliendo con el requisito de  $45 [dB]$  por sobre el ruido de fondo indicado en la normativa.

Las tomas se efectuaron utilizando una placa Focusrite Scarlett 2i4 acoplada a una computadora para manipular el software de adquisición diseñado en MatLab. El mismo permite generar el sine-sweep en un rango deseado para luego reproducirlo y grabar en simultáneo la respuesta de la sala.

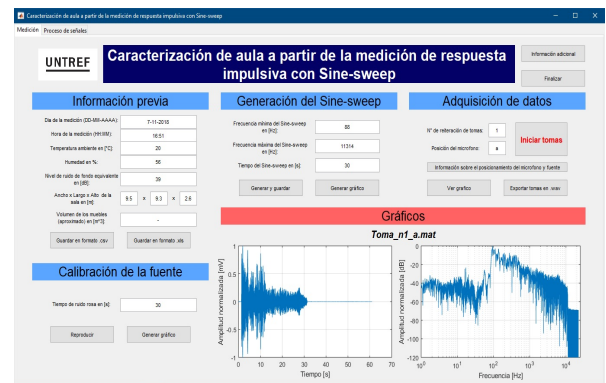


Figura 5: Interfaz Gráfica de usuario. Sección de Medición

Se realizaron tres repeticiones para cada posición de micrófono. Cada toma consiste en un segundo inicial para control de latencia, 30 segundos de sine-sweep generado de  $88 [Hz]$  a  $11314 [Hz]$  (tal que se cubriera desde la banda de octava de  $125 [Hz]$  hasta la banda de octava de  $8000 [Hz]$ ), y otros 30 segundos finales, para captar el decaimiento. Dicha selección de bandas corresponde a las frecuencias que abarca la voz humana, teniendo en cuenta que van desde los  $200 [Hz]$  hasta los  $4000 [Hz]$  aproximadamente.

### 3.2. Procesamiento de señales

Una vez adquiridas las tomas se procede a hallar los parámetros acústicos buscados. Para esta segunda instancia se diseñó una interfaz que permite al usuario seleccionar los archivos de audio que desea procesar para luego calcular los descriptores. Se ofrece la opción de procesar los datos filtrando por octava, o bien tercios de octava. La interfaz incluye una tabla en la cual se exponen los resultados

correspondientes a los parámetros, así como también su respectiva representación gráfica en barras.

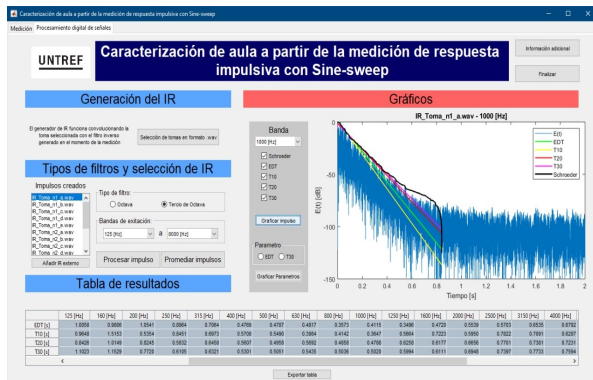


Figura 6: Interfaz Gráfica de usuario. Sección de procesamiento de datos.

En primer lugar se aplicó un proceso equivalente a la convolución entre la señal grabada y el filtro inverso modulado. El procedimiento consiste en efectuar la multiplicación entre las transformadas de Fourier de ambas señales (dominio frecuencial) dando como resultado la respuesta al impulso de la sala.

A continuación se procedió a realizar el filtrado de la señal bajo los lineamientos de la norma CEI 61260<sup>6</sup>. Para ello se utilizó la función *filtbutterwav*, la cual opera con las herramientas del *DSP Toolbox*, propio de MatLab, como la función *f.desing*. Justamente, esta función mencionada está diseñada específicamente para los requerimientos de la norma dicha. Se aplicó un filtro de orden 6 en el caso de banda de octava y de orden 8 en caso de tercios de octava. Esto se debe a que cuanto más reducida sea la fracción de octava que se desea filtrar, mayor debe ser el orden. Para visualizar dicho filtro, se utilizó la función *fvttool*, propia de MatLab, como se ve en la Figura (7).

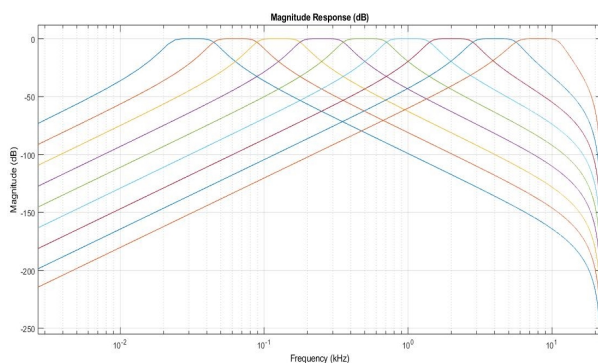


Figura 7: Filtros por banda de octava

Como segunda instancia se llevo a cabo el suavizado de la señal a través de la transformada de

Hilbert, para así luego obtener la envolvente suavizada. Luego se aplicó el filtro de media móvil sobre  $E(t)$ , y finalmente, para el correcto y más eficiente suavizado de la señal, se procedió a calcular la integral de Schroeder, de esta manera se obtuvo la envolvente de la respuesta al impulso. En el desarrollo posterior del código se utilizó el resultado de dicha integral. No obstante, el filtro de media móvil aplicado sobre  $E(t)$  se empleó para definir el límite correcto de la integral anteriormente mencionada. Considerando que el ruido de fondo es una fuente de error que no debe pasarse por alto, se recurrió a un procedimiento basado en el método de compensación de ruido de fondo por Lundebey<sup>7</sup>. El mismo consiste en utilizar el resultado del filtro de media móvil, tomar el último 10 [%] de la señal resultante, promediarlo para así sacar un valor estimativo del ruido de fondo en [dB], luego por medio de un ajuste por cuadrados mínimos<sup>8</sup> sobre la señal filtrada por media móvil se buscaron todos los valores que se encuentran desde el máximo hasta el  $RF + 10$  [dB]. Finalmente, el instante donde la regresión lineal sobrepasa el ruido de fondo, se selecciona como límite de la integral de Schroeder. Todo el procedimiento descrito se puede interpretar con el diagrama de la Figura (9).

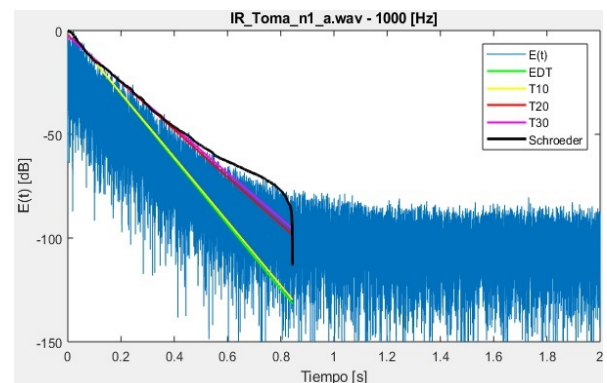


Figura 8: Respuesta al impulso de Toma 1.a y parámetros acústicos asociados

### 3.3. Cálculo de los parámetros

Una vez que la señal ya pasó por el proceso de suavizado, se procede a encontrar los parámetros acústicos deseados. Para hallar los descriptores mencionados, se llevó a cabo el diseño de un algoritmo que se encarga de trazar una regresión lineal por cuadrados mínimos de la señal suavizada acotada por los valores correspondientes a cada caída.

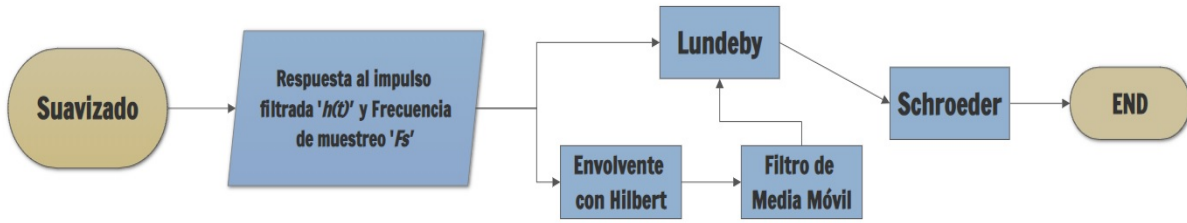


Figura 9: Diagrama de flujo del suavizado de la señal.

De esta manera, se obtiene la pendiente y ordenada al origen que caracteriza a cada parámetro considerando la expresión:

$$y = a_0 + a_1x \quad (4)$$

Como estos parámetros son utilizados para calcular el tiempo de reberveración, los mismos se obtienen por medio de la siguiente relación:

$$T = \frac{-60 - a_0}{a_1} \quad (5)$$

Con  $a_0$  y  $a_1$  correspondiente a cada parámetro. Para este tipo de procesamiento el término independiente de la regresión lineal se lo toma igual a 0.

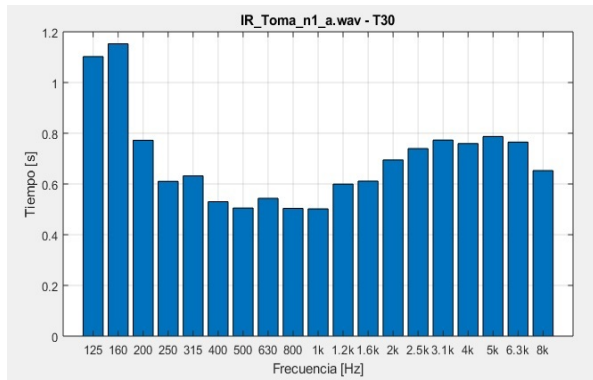


Figura 10: Gráfico de barra de T30 de la toma 1.a

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Cabe destacar que también se utilizó como influencia los lineamientos de la norma ISO 18233<sup>9</sup>, la cual especifica más profundamente el método aplicado (Método de barrido sinusoidal). Esta consideración se cree que es beneficiosa para el resultado final, ya que al ser una norma reciente, proporciona mayor fidelidad en cuanto a los avances tecnológicos de la época y los posibles errores o desconsideraciones en normas anteriores.

Para la validación del código creado se realizó una comparación con el software *Audacity* y el plug-in *Aurora*. A continuación, a modo de ejemplo se exponen una serie de tablas correspondientes a los parámetros hallados para tres tomas correspondientes a distintas posiciones. Dichas tomas fueron seleccionadas de manera arbitraria dentro de las posibles a modo de ilustrar la respuesta del programa diseñado.

A su vez, también se comparó los resultados con impulsos externos a la medición, provenientes de sitios como *OpenAirLib*<sup>10</sup> o *AcouSP*<sup>11</sup>.

El desempeño general del código se refleja en los valores promedio de los parámetros buscados.

Tabla 1: Valores de TR y EDT calculados con **Aurora** - Toma 1.b

	125 Hz	250Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
EDT [s]	1.142	0.551	0.542	0.670	0.633	0.733	0.577
TR20 [s]	1.205	0.535	0.542	0.493	0.657	0.748	0.715
TR30 [s]	1.136	0.655	0.534	0.535	0.711	0.799	0.751



Tabla 2: Valores de TR y EDT calculados con el **software diseñado** - Toma 1.b

	<i>125 Hz</i>	<i>250 Hz</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1000 Hz</i>	<i>2000 Hz</i>	<i>4000 Hz</i>	<i>8000 Hz</i>
EDT [s]	1.098	0.577	0.545	0.648	0.636	0.716	0.581
TR10 [s]	1.313	0.596	0.569	0.488	0.614	0.744	0.704
TR20 [s]	1.200	0.553	0.538	0.498	0.661	0.748	0.717
TR30 [s]	1.146	0.665	0.532	0.542	0.716	0.798	0.754

Tabla 3: Valores de TR y EDT calculados con **Aurora** - Toma 2.e

	<i>125 Hz</i>	<i>250 Hz</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1000 Hz</i>	<i>2000 Hz</i>	<i>4000 Hz</i>	<i>8000 Hz</i>
EDT [s]	0.874	0.663	0.378	0.466	0.565	0.655	0.657
TR20 [s]	1.112	0.773	0.606	0.512	0.668	0.765	0.709
TR30 [s]	1.397	0.782	0.596	0.535	0.717	0.817	0.742

Tabla 4: Valores de TR y EDT calculados con el **software diseñado** - Toma 2.e

	<i>125 Hz</i>	<i>250 Hz</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1000 Hz</i>	<i>2000 Hz</i>	<i>4000 Hz</i>	<i>8000 Hz</i>
EDT [s]	0.873	0.625	0.389	0.465	0.560	0.655	0.655
TR10 [s]	1.282	0.736	0.655	0.498	0.668	0.718	0.697
TR20 [s]	1.107	0.769	0.604	0.526	0.669	0.761	0.712
TR30 [s]	1.390	0.776	0.595	0.550	0.720	0.814	0.745

Tabla 5: Valores de TR y EDT calculados con **Aurora** - Toma 3.d

	<i>125 Hz</i>	<i>250 Hz</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1000 Hz</i>	<i>2000 Hz</i>	<i>4000 Hz</i>	<i>8000 Hz</i>
EDT [s]	1.140	0.551	0.545	0.667	0.638	0.745	0.575
TR20 [s]	1.205	0.528	0.544	0.496	0.662	0.746	0.722
TR30 [s]	1.145	0.646	0.530	0.535	0.711	0.802	0.751

Tabla 6: Valores de TR y EDT calculados con el **software diseñado** - Toma 3.d

	<i>125 Hz</i>	<i>250 Hz</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1000 Hz</i>	<i>2000 Hz</i>	<i>4000 Hz</i>	<i>8000 Hz</i>
EDT [s]	1.097	0.578	0.548	0.647	0.642	0.727	0.580
TR10 [s]	1.314	0.585	0.563	0.491	0.604	0.731	0.693
TR20 [s]	1.200	0.546	0.539	0.502	0.666	0.747	0.723
TR30 [s]	1.155	0.660	0.527	0.541	0.716	0.801	0.754

En vistas del objetivo principal del trabajo, se promediaron todas las tomas realizadas el día de la medición, para así obtener promedios generales de los parámetros buscados como se puede observar en la Tabla (7).

Tabla 7: Valores de TR y EDT promediados de las 15 tomas realizadas

	<i>125 Hz</i>	<i>250 Hz</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1000 Hz</i>	<i>2000 Hz</i>	<i>4000 Hz</i>	<i>8000 Hz</i>
EDT [s]	0.957	0.649	0.494	0.511	0.579	0.680	0.604
TR10 [s]	1.099	0.641	0.581	0.482	0.652	0.718	0.691
TR20 [s]	1.080	0.645	0.555	0.513	0.670	0.754	0.717
TR30 [s]	1.178	0.697	0.550	0.536	0.705	0.796	0.742

Para concluir el análisis de resultados, se calculó el error medio en comparación con *Aurora*. Para ello se consideraron tres bandas de análisis: 125 [Hz], 1000 [Hz] y 4000 [Hz]. Tomando cinco muestras (una por cada posición de micrófono), se evaluó la diferencia entre los resultados obtenidos en *Aurora* con respecto al código diseñado. Luego se obtuvo un promedio para cada parámetro entre las cinco posiciones. Dichos cálculos se muestran en la Tabla (8).

Tabla 8: Error promedio con respecto a *Aurora*

	125 Hz	1000 Hz	4000 Hz
EDT [s]	0.041	0.009	0.006
T20 [s]	0.012	0.013	0.002
T30 [s]	0.029	0.013	0.002

Para una mejor aproximación del error generado por el software en general, se deben generar impulsos simulados, y analizar los resultados del procesamiento de los mismos. Los impulsos simulados son señales creadas de manera digital en donde uno define y conoce exactamente como se comporta el impulso, junto con sus propiedades acústicas, tales como los parámetros buscados en este trabajo. A continuación, se muestra una lista de pasos a seguir para obtener impulsos simulados en vistas de la evaluación del código.

1. Se determina el T60 deseado
2. Se inicializa ruido blanco  $W(t)$
3. Se calcula la caída: Ya que la envolvente debe caer 60 [dB], se debe multiplicar el ruido blanco por una exponencial decreciente del tipo:

$$C(t) = e^{\frac{\log(e-3)}{T60}t}$$

4. Entonces, la simulación del impulso viene dada por la ecuación:

$$W(t) \cdot C(t)$$

Una vez que se obtiene el impulso simulado, se procesa por el código, para poder estimar el error mas certeramente. En la Tabla (9) se muestran los resultados de algunas bandas de octava del procesamiento de un impulso simulado con un T60 igual a 1 [s].

Tabla 9: Procesamiento digital del impulso simulado con un T60 de 1[s]

	125 Hz	1000 Hz	4000 Hz
EDT [s]	1.085	1.049	0.966
T10 [s]	0.922	0.952	1.029
T20 [s]	0.962	1.015	1.025
T30 [s]	0.976	1.003	1.017

$$Error\ promedio = 0.058 [s]$$

## 5. CONCLUSIÓN

En base a las observaciones realizadas sobre el desempeño del programa, se concluye que el tiempo de reverberación del recinto es adecuado para la buena inteligibilidad de la palabra hablada, ya que es mínima la proporción de ensayos que superan el TR en 1 [s].

Con respecto a las bandas de octava de 31,5 [Hz] y 63 [Hz], estas no fueron consideradas en términos de análisis ya que no son representativas del rango frecuencial de interés, además que el Sine-sweep no excitó dichas bandas.

Cabe aclarar que la decisión de no exitar las bandas inferiores se debe a la poca fidelidad por parte de la propia fuente, y en el hecho de que en baja frecuencia, la señal tomada tendría en gran parte ruido de fondo y ruido provocado por las estructuras de dicha sala. En términos de eficiencia, los resultados demuestran ser similares a los otorgados por el software de referencia (*Aurora*) y en comparación con los impulsos simulados.

Las diferencias percibidas con respecto a los resultados esperados son adjudicadas a diversas fuentes de error. La precisión del instrumental aplicado al momento de las tomas pudo haber influido en los resultados. Cabe destacar que durante la grabación, se observaron sutiles ruidos indeseados provenientes de imperfecciones técnicas de la fuente.

Otro factor a considerar acerca de la disparidad en la comparación de resultados es el hecho de que se desconocen los algoritmos de acción que ejecuta *Aurora* y sus respectivos errores asociados. Si bien dicho software se consideró como referencia, debe considerarse una posible distorsión en los resultados. También, procesando los impulsos simulados en *Aurora* se notan diferencias en los resultados, por lo cual el software de referencia también manipula un cierto error en los cálculos.

Para finalizar, observando los resultados en comparación con *Aurora* y los impulsos simulados, se nota la gran eficiencia del código proporcionado.

## 6. REFERENCIAS

[1] ISO. 3382:1997. Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters.

[2] ISO. 354:2003. Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room - Part 3: Terms and definitions. 2003.

[3] Farina, Angelo. Advancements in impulse response measurements by sine sweeps. @ *Audio Engineering Society Convention 122*. Audio Engineering Society. 2007.

[4] DSP Stack Exchange. Calculation of Reverberation Time (RT60) from the Impulse Response @ <http://dsp.stackexchange.com>

[5] Schroeder, M.R. New Method of Measuring

Reverberation Time @ *Bell Telephone Laboratories*. 1964.

[6] CEI. 61260:2001. Electroacoustics - Octave-band and fractional-octave-band filters. 2001.

[7] Venturi, Farina, Tronchin. Architectural Acoustics. Session 1aAAa: Advanced Analysis of Room Acoustics: Looking Beyond ISO 3382 I. ICA 2013 @ Canada. 2 - 7 June 2013

[8] Sassano, Miryam. Apuntes de Señales y Sistemas, Cuadrados mínimos @ Universidad Nacional de Tres de Febrero. Buenos Aires. 2018.

[9] ISO 18233:2006. Acoustics. Application of new measurement method in building and room acoustics. 2006.

[10] OpenAir Lib (<http://openairlib.net>)

[11] AcouSP (<http://commssp.ee.ic.ac.uk>)