

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

Castelli Corina<sup>1</sup>, Espindola Agustin<sup>2</sup>, Lareo Matías Federico<sup>3</sup>, Passano Nahuel<sup>4</sup>

Señales & Sistemas, Ingeniería de sonido

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

<sup>1</sup> castellcr2111@gmail.com, <sup>2</sup> agustinespindola96@gmail.com, <sup>3</sup> matilareo@gmail.com, <sup>4</sup> n.passano@hotmail.com

## Resumen

En el presente trabajo se realizó el estudio de las propiedades acústicas del Taller de Ingeniería en Informatica 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 exponencial dentro del recinto, obtener la respuesta al impulso mediante convolución y procesar dicha señal en busca de los parámetros.

**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, T30, T60. Para ello, se llevo 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, en donde se ponen en manifiesto 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. Con el objetivo de obtener resultados más representativos, se aplicó un método de compensación que consiste en hallar el extremo adecuado para la integral de Schroeder en base a una regresión lineal sobre la respuesta al impulso

filtrada, por octava o tercio de octava, y suavizada.

### 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

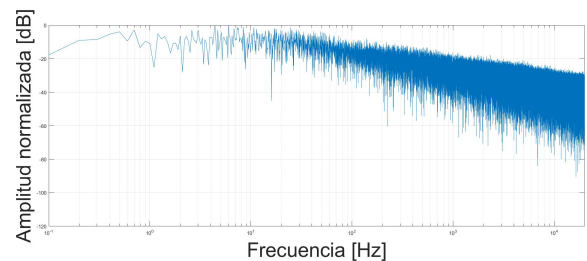


Figura 1: Espectro de Ruido Rosa

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. Se lo denomina 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 en 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:

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

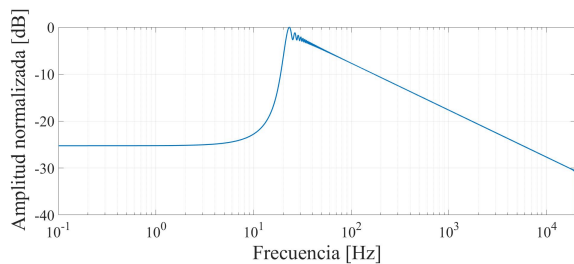


Figura 2: Espectro de Sine-Sweep

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:

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

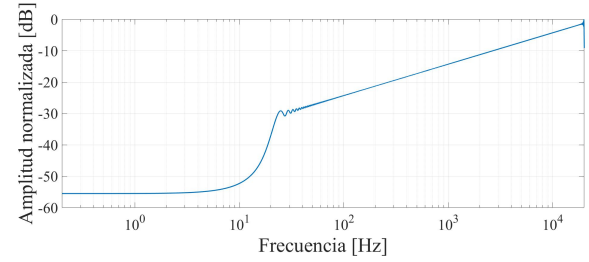


Figura 3: Espectro del filtro inverso

### 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 más eficiente 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 parámetros 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 (4) 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  $2,1 [m]$ .

$$d_{min} = 2\sqrt{\frac{V}{cTR}} \quad (4)$$

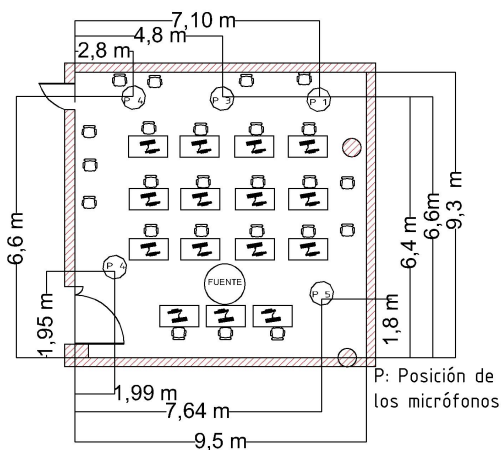


Figura 4: Plano del recinto con disposición de fuente y micrófonos

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. Dicha ponderación fue aplicada ya que al medir inicialmente en ponderación Z, el valor obtenido era de orden superior a los 70 dB. Debido a que la normativa ISO 3382 especifica que la fuente debe ser calibrada tal que supere en 45 [dB] el ruido de fondo, esto implicaría exigir la fuente por sobre los 100 [dB] lo cual no es recomendado para evitar ruido indeseado en las grabaciones. 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  $37,34 [dBA]$ .

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 un sine-sweep exponencial en un rango deseado para luego reproducirlo y grabar en simultáneo la respuesta de la sala.

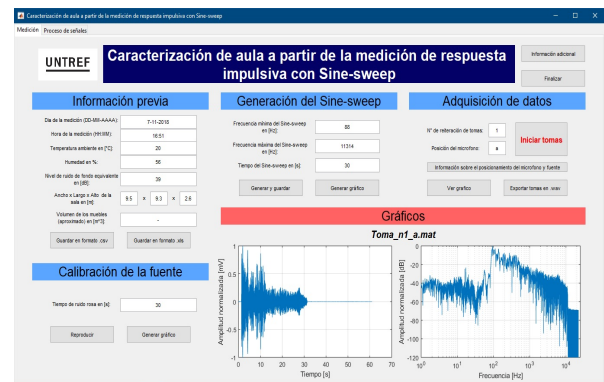


Figura 5: Interfaz Gráfica de usuario. Sección de Medición

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.

### 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 según el

filtro aplicado, así como también su respectiva representación gráfica.

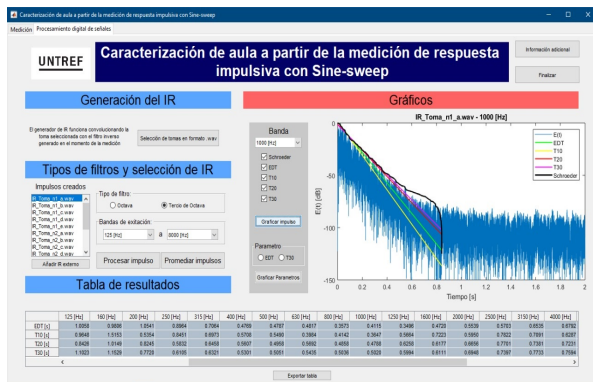


Figura 6: Interfaz Gráfica de usuario. Sección de procesamiento de datos.

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 esta diseñada específicamente para los requerimientos de la norma mencionada. 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)

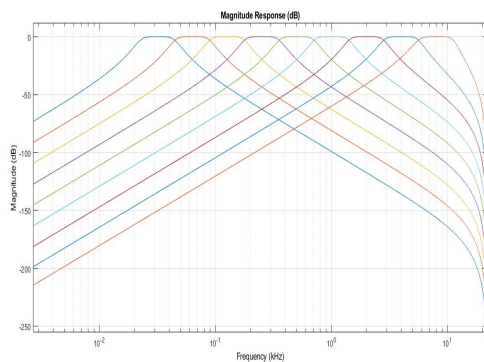


Figura 7: Filtros por banda de octava

Como segunda instancia se llevo a cabo el su-

vizado 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 Lundebly<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 el filtro de 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.

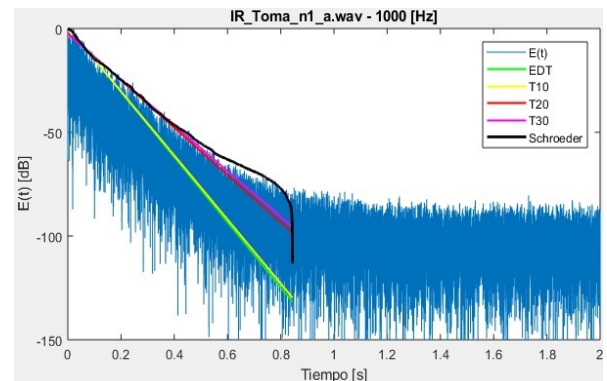


Figura 8: Respuesta al impulso de Toma 1 a y parámetros acústicos asociados

### 3.3. Cálculo de los parámetros

Los parámetros acústicos se calculan una vez que la señal ya pasó por el proceso de suavizado.

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.

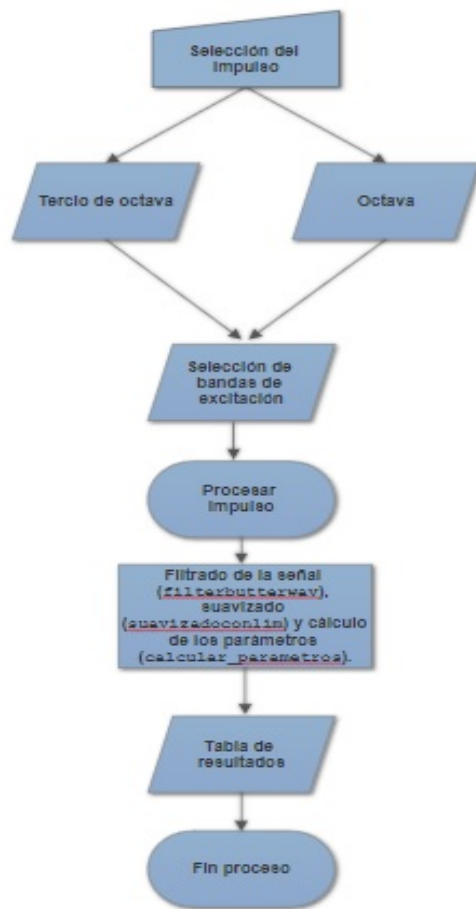


Figura 9: Diagrama de flujo del procesamiento del impulso.

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

$$y = a_0 + a_1x \quad (5)$$

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

$$T = \frac{-60 - a_0}{a_1} \quad (6)$$

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.

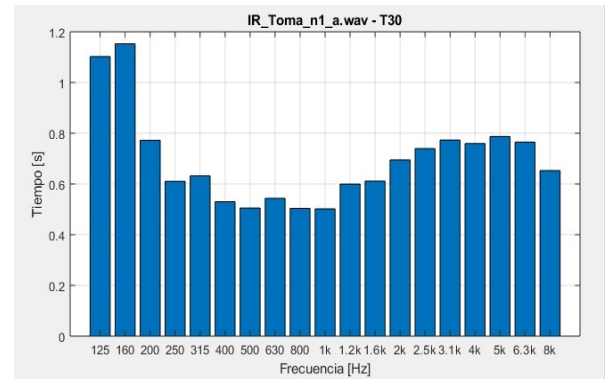


Figura 10: Grafico de barra de TR30 de la toma 1a

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Cabe destacar que 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 creemos que fue beneficiosa para el resultado final, ya que al ser una norma reciente, nos 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. 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

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
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

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
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]	0.397	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

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
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

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
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

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
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



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

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
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. Dicho valor fue considerado el error medio asociado.

Tabla 8: Error promedio

	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

## 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. En términos de eficiencia, los resultados demuestran ser similares a los otorgados por el software de referencia (*Aurora*).

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.

Como se puede ver en la Tabla (8), se destaca la eficiencia del código en alta frecuencia, con una precisión de dos decimales exactos en la banda de 4000 Hz.

## 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.