

Medición de parámetros acústicos en un aula universitaria. Comparación de métodos.

Walter Díaz^{†1}, Ana Gómez Marigliano^{*2}, Manuel Lazarte[†]

diaz.walter@gmail.com

[†] *Laboratorio de Física Aplicada/Acústica, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán*

INFINOA / CONICET.

Avda. Independencia 1900, Tucumán, Argentina

RESUMEN

Uno de los factores importantes para el éxito del proceso de enseñanza- aprendizaje es que las aulas presenten, entre otras cosas, una buena calidad acústica. Nuestro grupo de investigación lleva adelante el proyecto PIUNT 26/E12, el cual tiene como uno de sus objetivos la medición y contrastación de distintos parámetros que ayudan a caracterizar acústicamente un ambiente. Los estudios realizados en aulas de establecimientos escolares y en distintas Facultades de la UNT muestran una muy mala calidad acústica, problema originado principalmente en el diseño y la construcción de dichos ambientes. Muchos de ellos, además, presentan valores muy elevados de ruido de fondo. Así, la mayoría de las instalaciones no cumple los requisitos acústicos para los que ha sido destinado. Este trabajo presenta las mediciones realizadas en un aula altamente reverberante, la cual presenta una distribución espacial del tiempo de reverberación variable con las diferentes frecuencias. Se discuten los resultados obtenidos con distintas metodologías usando programas de cálculos acústicos de uso libre, siendo similares dentro del error. Los resultados que usan los criterios de Sabine son distintos, aunque presentan una tendencia espacial similar.

Palabras claves: Acústica - Ruido – Reverberación - Aulas

ABSTRACT

One of the important factors for the success of the teaching-learning process is that the classrooms have, among other things, good acoustic quality. Our research group carries out the PIUNT 26 / E12 project, which has as one of its objectives the measurement and contrast of different parameters that help to acoustically characterize an environment. The studies carried out in classrooms of school establishments and in different Faculties of the UNT show a very poor acoustic quality, a problem originating mainly in the design and construction of these environments. Many of them also have very high background noise values. Thus, most installations do not meet the acoustic requirements for which it has been intended. This work presents the measurements made in a highly reverberating classroom, which presents a variable spatial distribution of reverberation time with different frequencies. The results obtained with different methodologies using free use acoustic calculation programs are discussed, being similar within the error. The results using Sabine's criteria are different, although they present a similar spatial trend.

Keywords: Acoustics – Noise - Reverberation - Classroom

1. INTRODUCCION

Al diseñar un aula se deben tener muy en cuenta consideraciones respecto a su desempeño acústico, dado que la comunicación verbal es el canal principal para la transmisión del conocimiento. Es decir, el diseño debe asegurar que los factores involucrados en la comunicación tengan los valores adecuados asegurando la transmisión exitosa del mensaje oral. [Hodgson (2013), Zanin (2007)]

El presente trabajo es motivado por una inquietud de un Instituto de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán, respecto a un aula docente que posee un comportamiento altamente reverberante.

Cuando una onda sonora se propaga en el aula y entra en contacto con las superficies presentes se ve modificada en su dirección, espectro y magnitud. Como resultado, el oyente recibirá primero el sonido directo, seguido de las reflexiones tempranas, especulares y difusas, y luego las reflexiones tardías o reverberación. La respuesta impulsiva (RI) del recinto, caracteriza en el dominio del tiempo el comportamiento de las ondas sonoras para una ubicación particular de fuente – receptor.

Si el recinto se puede considerar como un sistema lineal, la transformada de Fourier define su función transferencia (FT) la cual caracteriza al recinto en el dominio de la frecuencia, así como la RI lo hace en el dominio del tiempo. (Saposhkov, 1983)

Con la RI del recinto es posible conocer algunos parámetros acústicos de acuerdo con la norma ISO 3382. De estos parámetros nos interesan aquellos que permiten la obtención del tiempo de reverberación, aunque por la metodología utilizada también se pueden obtener aquellos que evalúan las relaciones de energía entre diferentes porciones de la RI, los cuales son necesarios para caracterizar la inteligibilidad del habla.

Los parámetros que se miden son los diferentes tiempos de reverberación: T_{20} (entre -5 y -25 dB), T_{30} (entre -5 y -35 dB) y el EDT (early decay time: EDT, entre 0 y -10 dB). El T_{20} y el T_{30} están relacionados con las propiedades físicas del recinto, mientras que el EDT está estrechamente vinculado con la percepción subjetiva de la reverberación.

Para obtener la RI de un recinto uno de los métodos utilizados propone como señal de excitación ráfagas de ruido filtrados por bandas, pero tiene el inconveniente que es altamente sensible a la relación señal ruido. En cambio, la utilización de señales continuas permite, mediante un procesamiento posterior, la RI del lugar en estudio minimizando la influencia de la relación señal ruido. Estos métodos indirectos han sido adoptados en la norma ISO 3382. Otro parámetro que se mide en el trabajo es el índice

de transmisión de la palabra (STI en inglés), el cual permite determinar la calidad de la transmisión de la palabra y puede predecir la inteligibilidad del mensaje en diferentes ambientes acústicos. (Steeneken, 1980) El método se basa en utilizar como excitación una señal modulada a través de una función de transferencia de modulación (MTF en inglés). Una vez decodificada en el receptor, se comparan ambas señales. Se parte del supuesto que la reducción de modulación de una señal modulada es causada por ruido y / o reverberación. Estas modulaciones reducidas en el habla conducen a una inteligibilidad deteriorada.

Se adopta este método porque aporta algunas ventajas respecto a otros parámetros acústicos propuestos para medir la inteligibilidad de la palabra en recintos. (Bistafa, 2000)

Este trabajo también aborda la medición del tiempo de reverberación (TR) a partir de la ecuación de Sabine el cual dependerá de las condiciones del aula (dimensiones y materiales de construcción).

$$TR_{60} = \frac{0,161 V}{A}$$

Donde TR_{60} es el tiempo de reverberación medido en segundos, V el volumen del aula en m^3 y A es el área total de absorción en sabin. Se utiliza esta ecuación en lugar de la de Eyring-Norris, por las condiciones de poca absorción de las paredes del aula.

Luego, se hacen mediciones con programas de computadora de uso libre cuyo procesamiento permite obtener todos los parámetros acústicos mencionados incluyendo el STI.

Con estas mediciones, se realiza una comparación de los valores obtenidos por los distintos métodos.

1 METODOS Y MATERIALES

1.1 Características del Aula

El uso principal del aula es la docencia y sus dimensiones son los que figuran en la tabla 1. El techo es de hormigón pintado y las paredes de mampostería son de revoque común. Su mobiliario consiste en un escritorio metálico y 8 sillas (de madera y metal) dispuestas en configuración típica de un aula. Un pizarrón se ubica cubriendo gran parte de una de las paredes.

Tabla 1. Dimensiones del Aula

Dimensiones	(m)
L_1 (ancho)	3,8
L_2 (largo)	7,8
L_3 (altura)	4,15
Volumen (m^3)	123

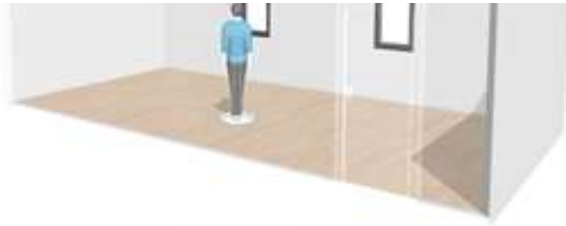


Figura 1: Vista del Aula estudiada

En las paredes se encuentran suspendidos canales metálicos que sostienen la instalación eléctrica. Hay dos ventanas vidriadas de marco de aluminio de dimensiones de 1 m x 0,4 m y una puerta de metal pintada de dimensiones de 2 m x 0,9 m. Se pueden apreciar en las figuras 2 y 3.



Figura 2: Vista frente al pizarrón del Aula estudiada



Figura 3: Vista del fondo del Aula estudiada

1.2 Parámetros por medir

Los parámetros por medir son:

El tiempo de reverberación TR se define como el tiempo transcurrido desde que la fuente sonora cesa su emisión hasta el instante en que el nivel de presión sonora decae 60 dB respecto de su valor inicial.

El tiempo de decrecimiento temprano (EDT, por sus siglas en inglés) es el parámetro que mejor se correlaciona con la percepción del tiempo de reverberación.

El índice energético temprano tardío, también llamado Claridad (Ct), es un indicador de la relación entre la energía temprana y la tardía de la Respuesta Impulsiva del Recinto.

Para medir la transmisión discursiva se utiliza el Speech Transmission Index (STI) o su versión más reducida Rapid Application Speech Transmission Index (RASTI).

1.3 Métodos

Se describen los métodos utilizados:

Formula de Sabine: método basado en la determinación indirecta del TR mediante la ecuación de Sabine.

Ruido interrumpido: se emite una señal de ancho de banda aleatoria, luego de que el campo acústico alcanza un equilibrio se interrumpe la señal midiendo la variación de la presión acústica en el tiempo.

Respuesta impulsiva: se utiliza una fuente impulsiva y se analiza la respuesta del ambiente a través de un software (Room EQ Wizard, disponible en www.roomeqwizard.com).

Se mide el índice RASTI a través del procesamiento que realiza el software ARTA. (disponible en <http://www.artalabs.hr/index.htm>)

1.4 Instrumental Utilizado

El equipamiento utilizado es el siguiente:

Tabla 2. Equipamiento utilizado

Las mediciones se realizaron con el aula vacía (sin personas) y el emisor de sonido omnidireccional se ubicó a 1 m del pizarrón a una altura de 1,60 m (estimación de altura de la boca de un docente parado). El micrófono de medición se ubicó en las

Sonómetro	Standard	IEC6172 - 1 Clase 2; Rango 31.5 Hz - 8kHz Precisión 1.4 dB
Pie de Micrófono		
Medidor ultrasónico de distancia	CP 3007	Rango 0,5 m a 18 m
		Apreciación 1 cm
Calibrador de nivel de sonido		Frecuencia: 1 kHz / ±0,1% Nivel de referencia: 94 dB y 114 dB Tolerancia: 0,3 dB (20°, 760 mm Hg)
Placa de sonido USB		Entrada de respuesta de frecuencia: 10 Hz - 30 kHz (0dB /-0.5dB)
Micrófono	Behringer ECM8000	Tecnología de condensador de electret. Característica omnidireccional
Medidor de parámetros ambientales		Mide temperatura y humedad relativa
Notebook Compaq N01 AR		

posiciones indicadas (a una altura de 1,2 m) en el esquema, a una distancia mínima de 1 m de la pared. Se eligieron cuatro posiciones, indicadas en la figura 4 en las intersecciones de las líneas: el punto (1,2), por ejemplo, es la intersección de la línea horizontal 1 con la línea vertical 2. Se realizaron tres mediciones por posición.

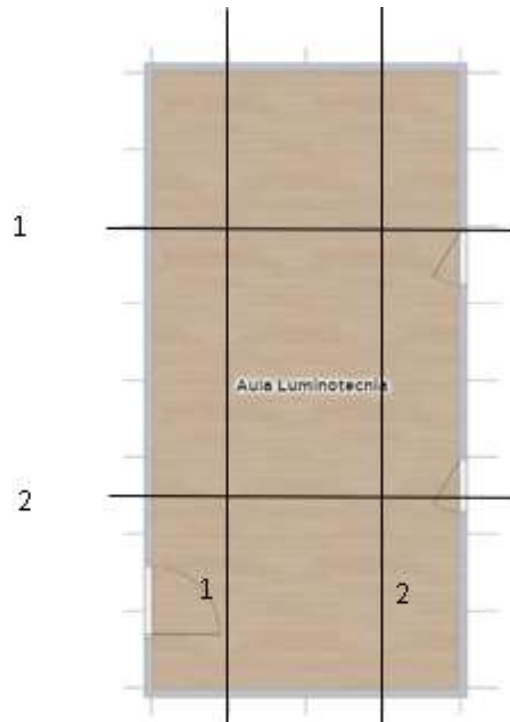


Figura 4: Vista de planta del Aula

2 MEDICIONES

La temperatura y humedad en el momento de realizar las mediciones arrojaron un valor de $T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $HR = 60\%$. El ruido de fondo se ubica en los 40,3 dBA. El tiempo de reverberación está definido como la duración en tiempo requerida para que la densidad de energía media en un recinto decrezca en 60 dB una vez que la emisión de la fuente ha cesado. Sin embargo, si el rango dinámico es menor que 60 dB, que es nuestro caso, se utiliza T_{30} o T_{20} evaluado sobre una disminución de 30 o 20 dB.

1.5 Fórmula de Sabine

El cálculo del tiempo de reverberación según el material presente en el aula, en bandas de octava

Tabla 3. Valores de TR según Sabine

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
TR60 Sabine	5,61	5,62	5,59	4,64	3,83	2,46

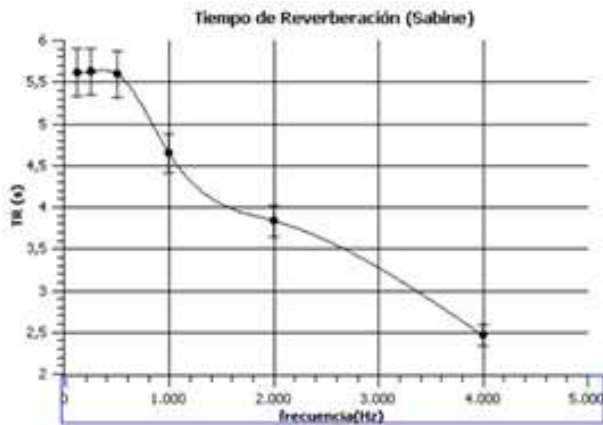


Figura 5: TR según Sabine

1.6 Método del Ruido Interrumpido

Se mide la intensidad en función del tiempo una vez que la fuente deja de emitir siguiendo las recomendaciones de la norma ISO. Se utiliza la definición de TR60 para el cálculo, pero como el nivel de ruido de fondo se ubica en los 40 dBA, es conveniente el cálculo de TR20 y TR30.

Los valores son:

Tabla 4. Valores de TR según el método de Ruido Interrumpido

Ubicación	TR20 (s)	TR30(s)	TR60(s)
1,1	2,5	3,7	7,5
1,2	2,2	3,3	6,6
2,1	2,5	3,7	7,5
2,2	1,8	2,7	5,4

1.7 Respuesta Impulsiva

El software RoomEq Wizard, utiliza el método de barrido sinusoidal logarítmico (Muller, 2001) el cual calcula las siguientes características acústicas a partir de la respuesta de la habitación a la señal emitida: Nivel de Presión Sonora (NPS) e impedancia; frecuencia y respuestas de impulso, gráficos de decaimiento espectral, espectrogramas y curvas de energía-tiempo; gráficos de analizador en tiempo real (RTA); calcula tiempos de reverberación, entre otras posibilidades. (Stan, 2002)

Los resultados para el tiempo de reverberación y otras magnitudes informados por el programa se informan en las tablas 5,6,7 y 8.

Tabla 5. Valores de Parámetros Acústicos de la Posición (1,1)

f (Hz)	125	250	500	1000
T20 (s)	2,833	2,470	2,489	2,112
T30 (s)	S/I	2,568	2,482	2,170

C50 (dB)	-1,55	-2,94	-3,52	-1,74
C80 (dB)	-0,35	-1,31	-2,56	0
D50 (%)	41,2	33,7	30,8	40,1
EDT (s)	2,374	2,100	2,453	2,307

Tabla 6. Valores de Parámetros Acústicos de la Posición (1,2)

f (Hz)	125	250	500	1000
T20 (s)	2,603	2,158	2,350	2,118
T30 (s)	2,687	2,343	2,258	2,089
C50 (dB)	-27,23	-25,75	-26,43	-24,39
C80 (dB)	-27,01	-24,86	-25,02	-23,35
D50 (%)	0,2	0,3	0,3	0,4
EDT (s)	4,798	4,739	5,073	4,782

Tabla 7. Valores de Parámetros Acústicos de la Posición (2,1)

f (Hz)	125	250	500	1000
T20 (s)	2,071	2,388	2,453	2,190
T30 (s)	S/D	2,471	2,461	2,156
C50 (dB)	-2,65	-4,19	-5,64	-4,03
C80 (dB)	-0,81	-1,97	-1,97	-1,90
D50 (%)	35,2	27,6	21,4	28,3
EDT (s)	1,706	2,100	2,108	2,061

Tabla 8. Valores de Parámetros Acústicos de la Posición (2,2)

F (Hz)	125	250	500	1000
T20 (s)	2,170	2,298	2,398	2,150
T30 (s)	2,074	2,205	2,323	2,207
C50 (dB)	-29,15	-28,25	-27,13	-25,28
C80 (dB)	-25,59	-25,33	-24,19	-23,25
D50 (%)	0,1	0,1	0,2	0,2
EDT (s)	5,421	4,777	5,012	4,869

1.8 Respuesta Impulsiva

Las mediciones ofrecidas por el software ARTA [10] permiten calcular los valores RASTI (Rapid Speech Transmission Index) en las distintas posiciones. El programa también brinda algunos de los parámetros acústicos medidos anteriormente. Los valores STI/RASTI se relacionan con una clasificación cualitativa mediante la tabla.

Tabla 9. Valores de STI relacionados con escala subjetiva

STI / RASTI	%AI Cons	Valoración Subjetiva
0,88 - 1	1,4 - 0	Excelente
0,66 - 0,86	4,8 - 1,6	Buena
0,50 - 0,54	11,4 - 5,3	Aceptable
0,36 - 0,49	24,2 - 12	Pobre
0,24 - 0,34	46,5 - 27	Mala

Las siguientes tablas informan de los valores en las posiciones determinadas anteriormente.

Tabla 10. Valores de Parámetros Acústicos en la posición (1,1)

F(Hz)	125	250	500	1000
T20 (s)	1,984	1,861	1,837	1,773
T30 (s)	1,761	1,637	1,590	1,540
C50 (dB)	-2,15	-4,31	-4,73	-3,47
D50 (%)	37,85	27,04	25,19	31,03
EDT (s)	2,144	1,778	2,045	2,038

Los valores de STI medidos son:

$$\text{RASTI} = 0,4077$$

$$\%ALcons = 18,7258$$

Rating: POBRE

Tabla 11. Valores de Parámetros Acústicos en la posición (1,2)

F(Hz)	125	250	500	1000
T20 (s)	2,681	2,232	2,320	2,111
T30 (s)	2,525	2,119	2,249	1,917
C50 (dB)	-1,99	-0,88	-2,63	0
D50 (%)	38,74	44,96	35,33	50,00
EDT (s)	1,996	2,029	2,519	2,226

Los valores de STI medidos son:

$$\text{RASTI} = 0,4966$$

$$\%ALcons = 11,5667$$

Rating: ACEPTABLE

Tabla 12. Valores de Parámetros Acústicos en la posición (2,1)

F(Hz)	125	250	500	1000
T20 (s)	2,063	2,136	2,204	2,129
T30 (s)	2,023	2,031	2,130	1,914
C50 (dB)	-2,60	-3,76	-2,82	-3,73
D50 (%)	35,45	29,60	34,34	29,77
EDT (s)	1,712	2,065	2,338	2,129

Los valores de STI medidos son:

$$\text{RASTI} = 0,4346$$

$$\%ALcons = 16,1818$$

Rating: POBRE

Tabla 13. Valores de Parámetros Acústicos en la posición (2,2)

F(Hz)	125	250	500	1000
T20 (s)	2,165	2,353	2,492	2,075
T30 (s)	2,041	2,165	2,361	1,896
C50 (dB)	-4,10	-3,59	-6,29	-4,34
D50 (%)	28,02	30,42	19,04	26,92
EDT (s)	2,306	2,351	2,541	2,125

Los valores de STI medidos son:

$$\text{RASTI} = 0,4055$$

$$\%ALcons = 18,9433$$

Rating: POBRE

3 CONCLUSIONES

El aula es altamente reverberante tal cual lo confirman las mediciones realizadas por todos los métodos. Los valores de reverberación aceptables para espacios destinados a la enseñanza se encuentran en un rango de 0,5 a 0,8 s con valores muy próximos en la zona audible del espectro, es decir casi independiente de la posición y de la frecuencia.

Si bien el cálculo del tiempo de reverberación hecho con la fórmula de Sabine ha sido tomado para estimar un valor, acuerda en buen grado con los valores obtenidos por los otros métodos.

Los valores obtenidos con los programas de PC muestran una dependencia de la posición de medición lo que puede estar indicando que las reflexiones no se realizan en forma uniforme. Por otro lado, comparando las tablas se demuestra buen acuerdo en los valores medidos en la misma posición y frecuencias.

Se ha sugerido un tratamiento acústico del aula para bajar tanto el valor del TR así como mejorar el STI.

4 REFERENCIAS

- Alton Everest F., Pohlmann K.C., *Master Handbook of Acoustics*, Mc Graw Hill Education, sixth edition
- Bistafa, S. R. and Bradley, J. S., "Reverberation time and maximum background-noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 107, no. 2, pp. 861–875, 2000.
- Cabrera, D., Xun, J., and Guski, M., "Calculating Reverberation Time from Impulse Responses: A Comparison of Software Implementations," *Acoust. Aust.*, vol. 44, no. 2, pp. 369–378, 2016.
- Hodgson, M., "Experimental investigation of the acoustical characteristics of university classrooms," *Journal Acoust. Soc. Am.*, vol. 106, no. October 1999, pp. 1810–1819, 2013.
- Muller, S. and Massarani, P., "Transfer-Function Measurement with Sweeps," *J. Audio Eng. Soc. Eng.*, vol. 49, no. 6, pp. 443–471, 2001.
- Saposhkov, M. A., *Electroacústica*, Reverté, Barcelona, 1983.
- Stan, G. B., Embrechts, J. J., and Archambeau, D., "Comparison of different impulse response

- measurement techniques,” *AES J. Audio Eng. Soc.*, vol. 50, no. 4, pp. 249–262, 2002.
- Steeneken, H. J. M. and Houtgast, T. , “A physical method for measuring speech-transmission quality,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 67, no. January 1979, pp. 318–326, 1980.
- Zannin, P. H. T. and Marcon, C. R. , “Objective and subjective evaluation of the acoustic comfort in classrooms,” *Appl. Ergon.*, vol. 38, no. 5, pp. 675–680, 2007.