
XIII Congreso Argentino de Acústica
VII Jornadas de Acústica, Electroacústica y Áreas Vinculadas
Buenos Aires, 29 y 30 de octubre de 2015

AdAA2015-Xnmn

**Calidad Acústica de Aulas en la Facultad de Ingeniería
(UdelaR)**

Pablo Gianoli Kovar^(a),
Joaquín Montero Crouccié^(a),
Alice Elizabeth González^(a).

(a) Departamento de Ingeniería Ambiental - IMFIA, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Av. Julio Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay. E-mail: pgianoli@fing.edu.uy

Abstract

A study of acoustic quality of classrooms in the Faculty of Engineering, Universidad de la República (Montevideo, Uruguay) is presented. Measurements of background noise and reverberation time in 15 classrooms have been done, covering the facilities of the central building and the annex building. The measurement equipment was a Class 1 sound level meter, Brüel & Kjaer 2250. Processing of data was done by applying the free software Audacity and ad-hoc spreadsheets as well. Values of SIL and PSIL have been obtained. The NR, PNC and RC curve numbers have been found for each case and the limiting frequencies have been determined. Finally, some proposals to improve the acoustic quality of the studied classrooms are provided.

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados de un estudio de calidad acústica de aulas en la Facultad de Ingeniería, UdelaR (Montevideo, Uruguay). Se efectuaron mediciones de ruido de fondo y tiempo de reverberación en 15 aulas, cubriendo las instalaciones del edificio central y del Anexo. Se empleó para ello un sonómetro Brüel&Kjaer 2250. Para el procesamiento se empleó el software libre Audacity y planillas de cálculo ad-hoc. Esto permitió obtener también los valores de SIL y PSIL, así como identificar las curvas NR, PNC y RC correspondientes en cada caso y las frecuencias limitantes que determinan dicha clasificación. A partir de estas evaluaciones se proponen medidas para contribuir a mejorar las condiciones acústicas en las aulas con el objetivo de que cumplan idóneamente su función.

1 Introducción

En la actualidad, la mayoría de los edificios destinados a actividades educativas cumplen con los requisitos estructurales y de funcionalidad para ello. Sin embargo, pocas veces se toma explícitamente en cuenta la calidad acústica de las aulas en los centros de enseñanza. Esta calidad acústica es un aspecto fundamental, ya que determina directamente las condiciones necesarias para impartir y recibir clases de forma adecuada y segura sin que existan molestias ni interferencias en la relación alumno-profesor. Puede incidir en múltiples aspectos que van desde la correcta comprensión de la palabra hablada al esfuerzo vocal que debe realizar el docente.

Esta comunicación expone el estudio realizado en las aulas de la Facultad de Ingeniería (UdelaR), comparando los locales ya existentes del Edificio Central con las más recientes y modernas construidas en sus entresijos metálicos, que permitieron “colonizar” grandes volúmenes ociosos generando múltiples salas de diferentes dimensiones con materiales livianos. El Edificio Central es una imponente construcción de mediados del siglo XX diseñada por el Arquitecto Julio Vilamajó, una de las más prominentes figuras de la arquitectura uruguaya; los entresijos se sitúan en el antiguo Laboratorio del Instituto de Máquinas que más tarde formó parte del área de modelos físicos del Laboratorio de Hidráulica del IMFIA. Asimismo, también fueron estudiadas las aulas y la Sala de Conferencias del nuevo Edificio Polifuncional “José Luis Massera” (más usualmente conocido como “el Aulario”). Este edificio se destina a aulas que utilizan las Facultades de Ingeniería, Arquitectura y Ciencias Económicas de la UdelaR, y físicamente está ubicado muy próximo a la primera de las tres. El edificio tiene la particularidad de estar construido en su mayoría con elementos prefabricados, por lo que tiene características muy diferentes a las del Edificio Central.

Este trabajo es parte de un estudio más amplio que se ha propuesto llevar adelante el Grupo de Investigación sobre Contaminación Sonora (DIA-IMFIA), en que se aspira a caracterizar y comparar la calidad acústica de aulas de locales de enseñanza primaria, secundaria y terciaria.

2 Propuesta metodológica

2.1 Parámetros considerados

Aunque podrían considerarse otros, se seleccionaron los siguientes parámetros para caracterizar la calidad acústica de las aulas estudiadas: tiempo de reverberación, SIL y PSIL (González et al., 2008). Asimismo, se consideraron los criterios de confort dados por las curvas NR, se estudió la presencia de tonos puros y de elevado contenido energético en bajas frecuencias.

El **tiempo de reverberación (T_R)** es el tiempo que tarda la energía acústica presente en un local en reducirse a una millonésima parte de la que existía en el momento en que se interrumpe la emisión desde una fuente sonora. Dicho de otra forma, es el tiempo que demora el nivel de presión sonora en decaer 60 dB una vez que se interrumpe la emisión. La persistencia del sonido una vez que la fuente sonora se interrumpe es consecuencia de las múltiples reflexiones que experimentan las ondas en el interior del recinto. Esta disminución de la energía acústica en la sala no es igual para todas las frecuencias, y depende tanto del volumen del local como del revestimiento de las superficies. Este parámetro es uno de los más importantes para calificar la calidad acústica de locales destinados a enseñanza, ya que condiciona la

inteligibilidad de la palabra hablada. Los valores de T_R en las bandas de octava centradas en 500 Hz y 1000 Hz recomendados para aulas se encuentran en el intervalo de 0,5 s a 0,9 s.

El **SIL (Sound Interference Level)** es un parámetro que procura cuantificar la interferencia que puede generar un ruido estable (ruido de fondo) en la comunicación verbal, en un entorno libre de superficies reflectantes. Representa la inteligibilidad de la palabra hablada en el ambiente considerado y la relaciona con la distancia máxima entre dicente y oyente a la que se considera se puede mantener una conversación en un tono de voz normal. Se obtiene como el promedio aritmético de los niveles de presión sonora en dBZ registrados en las bandas de octava de 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz y 4000 Hz.

El **PSIL (Preferred Sound Interference Level)** es un parámetro análogo al anterior, pero que sólo considera las bandas de octava de 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz.

Se aplicó el criterio **Noise Rating** que permite caracterizar el ruido de fondo de un local a partir de su espectro en las bandas de octava de 31,5 Hz a 8000 Hz, comparándolo con un conjunto de curvas conocidas como **curvas NR**. Según este criterio, se recomienda que el nivel de ruido de fondo en aulas se encuentre en el intervalo de 30 dBA a 40 dBA, en tanto las curvas NR recomendadas son de 20 a 30.

Por último, se buscaron **tonos puros** y se verificaron las diferencias **C-A** en las mediciones de ruido de fondo de cada salón estudiado. Lo deseable es no registrar tonos y tener valores **C-A** inferiores a 10 dB.

2.2 Trabajo de campo

Las mediciones se realizaron con un sonómetro marca Brüel & Kjær modelo 2250 de precisión (clase 1 según norma IEC-61672) con analizador en bandas de tercio de octava en tiempo real, de propiedad de la Facultad de Ingeniería (IMFIA – Departamento de Ingeniería Ambiental), Universidad de la República. La calibración de este equipo se verificó antes y después de la campaña, empleando tonos puros de 250 Hz y 1000 Hz a 94 dB y 114 dB.

Una vez verificada la calibración, se instalaron el sonómetro y el computador en un punto próximo al fondo del salón, procurando estar retirado al menos 1,5 metros de las paredes (Figura 1).



Figura 1. Equipos instalados en el salón 601.

Las mediciones se efectuaron sin presencia de estudiantes, con puerta cerrada y procurando mantener el interior en silencio. En uno de los salones las mediciones se repitieron con 30 estudiantes sentados distribuidos uniformemente en su interior (un 27 % de la capacidad, que es de 110 butacas). Esto permitió compara los resultados obtenidos en ambas configuraciones.

Al comienzo de la medición se grabó aproximadamente 1 minuto de ruido de fondo con el software libre AudaCity, registrando simultáneamente los niveles de presión sonora con el sonómetro. Luego se explotó un globo desde la zona en que el docente imparte su clase (Figura 2) y se continuó midiendo en silencio por unos 30 segundos más (Basso, 2015).



Figura 2. Medición del tiempo de reverberación

En cada aula se repitió todo el procedimiento en un punto ubicado próximo a la otra esquina del fondo del salón.

2.3 Procesamiento de datos

Los tiempos de reverberación se obtuvieron empleando el software libre AudaCity (Basso, 2015). Previamente se empleó un tono puro de 1000 Hz a 94 dB y a 114 dB emitido por un calibrador para ajustar con esa diferencia conocida la escala del gráfico que el programa despliega.

Los valores de SIL, PSIL, NR y C-A se obtuvieron a partir de los datos registrados por el sonómetro (González et al., 2008). La presencia de tonos puros se estudió siguiendo la metodología del Real Decreto 1367 del Reino de España (BOE, 2007).

3 Resultados

3.1 Aulas ensayadas

Las tablas que se presentan a continuación muestran los resultados de los diferentes parámetros analizados para la determinación de la calidad acústica de las aulas de la Facultad de Ingeniería. Para ello, se clasificaron los salones ensayados en tres grupos dependiendo de su ubicación espacial en Facultad: la primer área es el Edificio Central, en el que se ensayaron 9 salones y uno de ellos (601) fue ensayado en dos condiciones, con estudiantes y sin estudiantes; la segunda área estudiada es la zona de entresijos metálicos (cuerpo norte), en la cual se ensayaron 4 salones; por último, se realizaron ensayos en el Aulario, en donde se estudiaron dos salones de clases y la sala de conferencias que éste dispone.

3.2 Tiempos de reverberación

En la Tabla 1 se presentan los resultados de los tiempos de reverberación determinados en las aulas ensayadas. Además, se presenta el nivel equivalente en escala A de ruido de fondo en los respectivos salones.

Tabla 1. Tiempos de reverberación y nivel de ruido de fondo en los salones estudiados.

	Ruido de fondo (L_{Aeq}, dBA)	T_R medido (s)	T_R recomendado (s)
Edificio Central			
601	53,2	1,9	0,5 a 0,9
601 (ocupación 27 %)	56,0	1,0	
501	64,6	1,7	
311	38,6	2,0	
309	44,0	2,2	
308	38,2	1,4	
307	37,7	2,0	
303	40,6	1,8	
301	61,3	1,9	
102	40,8	1,2	
Entrepisos metálicos (cuerpo Norte)			
031	49	1,5	0,5 a 0,9
Salón Posgrado IMFIA	56	1,6	
115	56	1,1	
Salón Posgrado (111)	60	0,8	
Edificio Polifuncional			
B23	50	0,7	0,5 a 0,9
B11	64,8	2,4	
Sala de conferencias	35	0,7	0,8 a 1,4

Los tiempos de reverberación recomendados para aulas se encuentran entre 0,5 a 0,9 segundos. Los valores medidos en los diferentes salones de Facultad de Ingeniería muestran que solamente 2 de los 16 salones ensayados presentan tiempos de reverberación dentro de lo recomendado para lograr una correcta inteligibilidad de la palabra hablada (en la tabla se resaltan en negrita).

Los salones del Edificio Central presentan tiempos de reverberación por encima de los valores recomendados. Cabe señalar que aulas de dimensiones y características muy similares en cuanto a su equipamiento y configuración, como 501 y 601 (ambos son tipo anfiteatros) o 301 y 303 (estos últimos son tipo “caja de zapatos” de 16 m de largo y 8 m de ancho), arrojaron tiempos de reverberación también muy próximos.

Al momento de realizar los ensayos, se esperaba obtener elevados tiempos de reverberación en los salones 307, 309 y 311 debido a que la percepción subjetiva era la de estar en un ambiente de recogimiento (como una iglesia).

También debe indicarse que el tiempo de reverberación del salón 601 se reduce casi a la mitad (de 1,9 s a 1,0 s) cuando en él se encuentran presentes 30 estudiantes, que significan un 27 % de su capacidad locativa. Si bien las mediciones se realizaron en invierno y las personas estaban abrigadas, la absorción es muy importante en relación al bajo nivel de ocupación.

Los salones ensayados en los entresijos metálicos presentaron tiempos de reverberación menores a los medidos en el edificio central, lo cual es de esperar ya que al ser recintos prefabricados de madera y pisos con moquete, la absorción es mayor. Estos recintos en un principio fueron diseñados para albergar oficinas, pero con el tiempo muchos de ellos han pasado a utilizarse como aulas de clase. En cambio, los salones del edificio central son aulas

con pisos de mosaico sin moquete y con paredes lisas donde predomina el hormigón, lo que aumenta los tiempos de reverberación.

En cuanto a los salones ensayados en el Edificio Polifuncional, la percepción del equipo al momento de realizar el ensayo en los salones B23 y B11 era de una marcada diferencia entre ambos locales, lo cual se confirmó al analizar los datos obtenidos: en tanto el salón B23 es “muy seco” pues presenta un cielorraso con buen desempeño acústico, el B11 no tiene un tratamiento similar.

Por otra parte, la sala de conferencias del Edificio Polifuncional es un poco más seca de lo recomendable (0,7 s a sala vacía, contra un valor mínimo recomendado de 0,8 s), lo que explica por qué en presencia aún de poco público se vuelve necesario recurrir a equipos de amplificación.

3.3 Ruido de fondo

Durante las campañas de medición se determinó el ruido de fondo en cada uno de los salones. En la Figura 3 se presenta el nivel sonoro continuo equivalente en escala A medido en cada uno de los salones ensayados. Se puede apreciar que los salones del Edificio Central presentan niveles menores de ruido de fondo en comparación con las otras áreas de estudio. Se debe mencionar que los niveles en los salones del tercer piso en este edificio pueden llegar a variar ampliamente, ya que a todos ellos se accede desde el mismo pasillo central. Por lo tanto, en las horas de entrada y salida de clases, el recambio de estudiantes hace que el nivel de ruido de fondo se eleve considerablemente; aunque esto se da por un periodo muy breve de tiempo, en una clase de 2 horas de duración podría llegar a ocurrir hasta 2 o 3 veces.

En los salones de los entresijos metálicos los niveles de ruido de fondo expresados como $L_{A,eq}$ son elevados y poco adecuados para dictar clases. Esto es esperable ya que, como se mencionó anteriormente, no fueron diseñados para este fin y, a pesar de tener una razonable absorción interior, presentan un aislamiento muy deficitario.

Los salones del Edificio Polifuncional también poseen niveles altos de ruido de fondo indicando un mal aislamiento acústico. Nuevamente aquí el problema de recambio de estudiantes es el principal factor que eleva los niveles sonoros en el interior de las aulas y aunque ocurra durante períodos breves éstos pueden repetirse varias veces durante una clase.

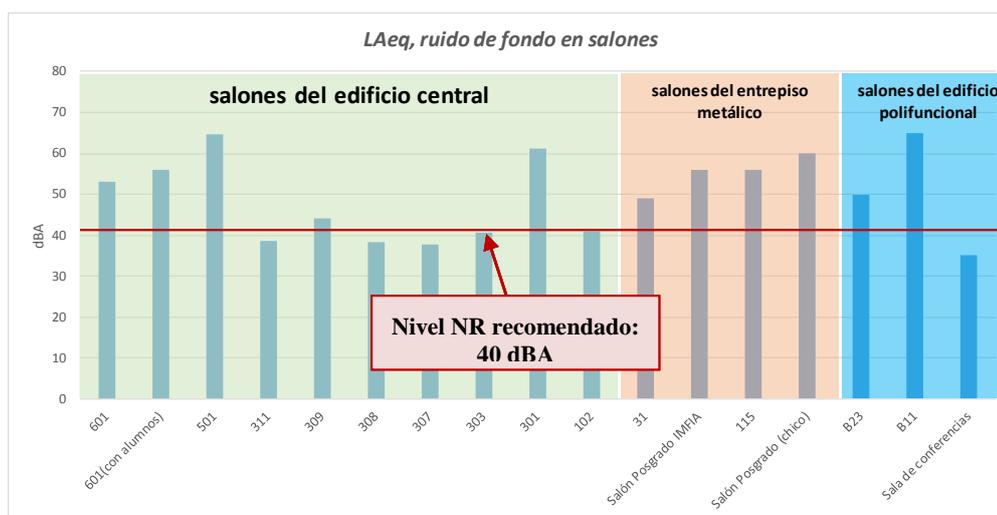


Figura 3. Niveles de ruido de fondo medidos (como $L_{A,eq}$) en los salones ensayados

Se realizó un análisis de tonos puros y diferencias C-A en el ruido de fondo en todos los salones estudiados. No se encontraron diferencias C - A que acusaran elevado contenido energético en bajas frecuencias. Sin embargo, se encontraron tonos puros en más del 40 % de los casos ensayados, según el siguiente detalle:

- Salón 311, en 25 Hz y 50 Hz.
- Salón 303, en 50 Hz.
- Salón 308, en 50 Hz y 3150 Hz.
- Salón 102, en 50 Hz.
- Salón 501, en 16 Hz.
- Salón 601 (con estudiantes), en 2000 Hz.
- Salón B11, en 4000 Hz.

Puede ser de interés tomar en cuenta que la frecuencia de la corriente eléctrica en Uruguay es de 50 Hz. Si los tonos que aparecen en 50 Hz y 25 Hz estuvieran vinculados a ella, sólo quedaría por establecer la causa de los tonos registrados en las aulas 308 (3150 Hz), 501, 601 y B11.

3.4 SIL y PSIL

En la Tabla 2 se presentan los resultados de los parámetros SIL y PSIL de cada salón ensayado. En la última columna se indica el grado de esfuerzo vocal que debería realizar el docente de acuerdo con las dimensiones del salón para ser escuchado correctamente desde el fondo del salón.

Tabla 2. Valores de SIL, PSIL y grado de esfuerzo vocal en los salones estudiados.

Salones	SIL(dB)	PSIL(dB)	Grado de esfuerzo vocal
Edificio Central			
601	49	52	Fuerte
601 (ocupación 27 %)	43	45	Fuerte
501	52	54	Muy Fuerte
311	23	25	Suave
309	31	34	Normal
308	24	26	Suave
307	22	25	Normal
303	52	55	Muy Fuerte
301	56	59	Muy Fuerte
102	29	31	Normal
Entrepisos metálicos (cuerpo Norte)			
031	45	48	Moderadamente fuerte
Salón Posgrado IMFIA	38	41	Moderadamente fuerte
115	39	42	Moderadamente fuerte
Salón Posgrado (111)	53	55	Fuerte
Edificio Polifuncional			
B23	35	38	Moderadamente fuerte
B11	38	40	Moderadamente fuerte
Sala de Conferencias	31	34	Normal

La mayoría de los salones estudiados indican que el docente debe recurrir a voz fuerte e incluso muy fuerte para hacerse entender por los estudiantes ubicados en el fondo del salón.

3.5 Criterio NR

En la Tabla 3 se presentan los números de curva NR determinada para cada salón estudiado, junto con la curva NR recomendada para los tipos de recintos analizados (aulas de clase y salas de conferencias). Además se presentan las frecuencias que resultaron ser las limitantes de cada aula, que orientan acerca de por dónde se deberá comenzar a introducir correcciones en caso de querer mejorar la calidad acústica del recinto evaluado.

Como primer comentario, cabe señalar que ninguno de los locales ensayados cumple con los números de curva NR recomendados. Por otra parte, en la mayoría de los casos la frecuencia limitante corresponde a las frecuencias conversacionales, lo que agrava la situación en relación a la funcionalidad de los locales ensayados en relación a su uso.

Tabla 3. Números de curva NR calculada, recomendada y frecuencia limitante

Salones	NR	NR recomendado	Frecuencia limitante (Hz)
Edificio Central			
601	55	Valor recomendado para aulas y salas de conferencias: 20 a 30	2000
601 (ocupación 27 %)	58		4000
501	56		1000
311	44		2000
309	46		1000
308	47		63
307	38		1000
303	50		2000
301	62		125
102	54		2000
Entrepiso metálico (cuerpo Norte)			
031	39	Valor recomendado para aulas y salas de conferencias: 20 a 30	250
Salón Posgrado IMFIA	45		1000
115	48		1000
Salón Posgrado (111)	62		2000
Edificio Polifuncional			
B23	49	Valor recomendado para aulas y salas de conferencias: 20 a 30	125
B11	58		250
Sala de conferencias	23		1000

4 Conclusiones y recomendaciones

En la Tabla 4 se resumen en los valores de los diferentes parámetros obtenidos para cada uno de los locales ensayados. Los valores destacados en negrita son los que se satisfacen las recomendaciones adoptadas en cada caso.

Tabla 4. Resumen de parámetros obtenidos en cada local ensayado

Salón	L _{A,eq} (dBA)	T _R (s)	SIL (dB)	PSIL (dB)	NR	Frecuencia limitante (Hz)	Tonos puros (Hz)
Edificio Central							
601	53	1,9	49	52	55	2000	--
601 (ocupación 27 %)	56	1,0	43	45	58	4000	2000
501	65	1,7	52	54	56	1000	16
311	39	2,0	23	25	44	2000	25, 50
309	44	2,2	31	34	46	1000	--
308	38	1,4	24	26	47	63	50, 3150
307	38	2,0	22	25	38	1000	--
303	41	1,8	52	55	50	2000	50
301	61	1,9	56	59	62	125	--
102	41	1,2	29	31	54	2000	50
Entrepiso metálico (cuerpo Norte)							
031	49	1,5	45	48	39	250	--
Salón Posgrado IMFIA	56	1,6	51	55	45	1000	--
115	56	1,1	52	56	48	1000	--
Salón Posgrado (111)	60	0,8	70	72	62	2000	--
Edificio Polifuncional							
B23	50	0,7	50	53	49	125	--
B11	65	2,4	53	55	58	250	4000
Sala de conferencias	35	0,7	48	51	23	1000	--

De los resultados obtenidos, debe concluirse que la calidad acústica de las aulas es en general deficitaria. Tanto los elevados niveles de ruido de fondo como los altos tiempos de reverberación son dos de los aspectos más recurrentes. Además, se encontraron tonos puros en gran parte de los salones estudiados del edificio central y en uno de los salones del edificio polifuncional, aunque en ningún caso se tuvo elevado contenido energético en bajas frecuencias (medido a través de la diferencia C-A).

Sumado a que las frecuencias que limitan más la calificación de los locales ensayados en cuanto a su número de curva NR son las frecuencias conversacionales, queda en evidencia la necesidad de realizar actuaciones efectivas a la brevedad.

Entre tales acciones, se sugiere comenzar por las siguientes:

- Diseñar e implementar soluciones de absorción acústica en los salones que acusan tiempos de reverberación elevados y a la vez la frecuencia limitante de acuerdo con el criterio NR pertenece al rango de las frecuencias conversacionales.
- Considerar alternativas al dictado de clases en los entresijos metálicos, debido a su pobre desempeño acústico.
- Analizar el comportamiento del cielorraso del salón B23, que muestra ser efectivo para el control del tiempo de reverberación y no acusa problemas en las frecuencias conversacionales, con vistas a replicar esta solución en otras aulas.

Referencias

- Basso, Gustavo (2015). Disertación previa y comunicaciones personales durante el ensayo de la sala del Teatro El Círculo, Semana del Sonido, Rosario, Argentina.
- Boletín del Estado Español. BOE núm. 254, martes 23 de octubre de 2007. Real Decreto 1367/2007 por el que se desarrolla la Ley 37/2003, del Ruido, pp. 42952-42973. España, 2007.
- González, Alice Elizabeth; Indarte, Enrique; Lisboa, Marcos (2008). “Acústica Urbana. Módulo II. Manual de acondicionamiento acústico orientado a la gestión municipal”. MVOTMA DINAMA-FING IMFIA, Montevideo, Uruguay. 116 pp. 2008. ISBN 978-9974-7610-3-2.