

Análisis de parámetros acústicos de recintos para dos condiciones de ocupación: estudio de caso de un aula universitaria

G.A. Cravero^a, S.P. Ferreyra^a, H.C. Longoni^a, M.D. Flores^a, O.A. Ramos^{a,b}, F.C. Tommasini^{a,c}

^a *Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), Unidad Asociada al CONICET Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional. Maestro López esq. Av. Cruz Roja Argentina. CP:X5016ZAA, Córdoba, República Argentina, gacravero@gmail.com*

^b *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Av. Rivadavia 1917, CP:C1033AAJ, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Republica Argentina.*

^c *Facultad de Matemática, Astronomía y Física, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, Av. Medina Allende s/n, Ciudad Universitaria, CP:X5000HUA Córdoba, República Argentina.*

RESUMEN: El campo sonoro de un aula depende de múltiples factores tales como: absorción y difusión sonora, ruido de fondo, entre otros. La respuesta impulsiva del recinto caracteriza completamente dicho campo sonoro para cada ubicación de la fuente y el receptor. En este trabajo, se presentan los resultados del análisis espacial de parámetros acústicos monoaurales y binaurales de recintos siguiendo las directrices de la norma ISO 3382, para el caso de estudio de un aula de la Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional en dos condiciones de ocupación (sala vacía y 60 % de ocupación).

KEYWORDS: acústica de aulas, parámetros acústicos de recintos, respuesta impulsiva, ISO 3382.

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo se desarrolló en el marco del Proyecto de Investigación y Desarrollo homologado por la Universidad Tecnológica Nacional de la República Argentina, PID UTN N°1658: *Estudio de características principales de campos sonoros en aulas y auditorios* (2012-2014). El objetivo general de este proyecto es estudiar y evaluar las características acústicas del campo sonoro de aulas y pequeños auditorios utilizados en el nivel universitario, mediante métodos objetivos y subjetivos.

Actualmente la medición de parámetros acústicos monoaurales y binaurales considera realizar múltiples mediciones de curvas de decrecimiento energéticas para diferentes posiciones de fuente y receptor, calcular el parámetro para cada una de ellas y finalmente obtener la media aritmética de todos los puntos medidos. En este trabajo experimental se presenta un análisis de resultados obtenidos en la medición de parámetros acústicos monoaurales como lo son el *Tiempo de Reverberación*, *Tiempo de Decrecimiento Temprano*, *Centro de Tiempo*, *Definición* y un parámetro binaural el *Coefficiente Interaural de Correlación Cruzada* en un aula universitaria. Las variables bajo análisis son, el comportamiento de estos parámetros para las múltiples posiciones de medición (*análisis espacial*) y una comparación de resultados obtenidos en dos condiciones de ocupación, “*aula vacía*” y “*aula ocupada*”.

2. AULA UNIVERSITARIA

El estudio experimental se realizó en un aula típica del nivel universitario perteneciente a la Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, República Argentina. En la Figura 1 se presenta un modelo 3D del aula con sus dimensiones expresadas en metros.

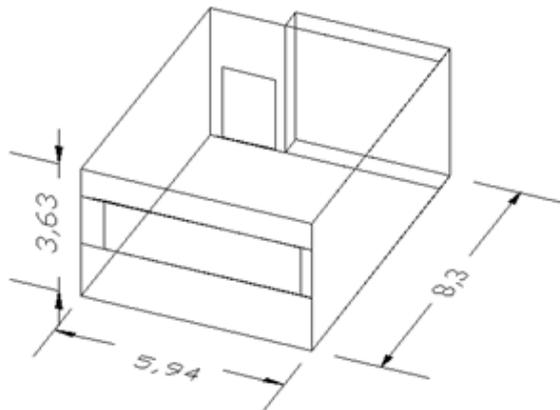


Figura 1: Modelo 3D del aula.

2.1 Relevamiento acústico arquitectónico

Recinto de base rectangular, ver Tabla 1, las paredes están construidas con diversos materiales, siendo una de las transversales de hormigón y el resto de tabique doble de placa roca yeso (12,5 mm espesor c/u rellena con fieltro liviano de lana de vidrio 50 mm de espesor). Presenta ventanas con aberturas de carpintería de aluminio y paños de vidrio de 4 mm de espesor. El techo está construido con vigas de hormigón pre moldeado. Equipada con 35 bancos construidos de madera y caño. En la Figura 2 se muestran dos imágenes del interior

del aula en las dos condiciones de ocupación.



a)



b)

Figura 2: Imágenes del recinto en las dos condiciones de ocupación: a) ocupada; b) desocupada.

Tabla 1: Características básicas del aula.

Volumen	178,96 [m ³]
Superficie Cubierta	49,30 [m ²]
Largo	8,30 [m]
Ancho	5,94 [m]
Altura media	3,63 [m]
Capacidad (número de bancos)	35

3. MEDICIÓN DE LA RESPUESTA IMPULSIVA

Las mediciones de respuesta impulsiva de recintos (RIR) se realizaron siguiendo las recomendaciones de la norma IRAM 4109-2:2011 (compatible con ISO 3382-2:2008) [1], [2]. La RIR fue obtenida aplicando la técnica de deconvolución de señales determinísticas, utilizando como señal de excitación un barrido de frecuencia sinusoidal de variación exponencial, debido a las ventajas que esta presenta [3]. Las curvas de decrecimiento fueron obtenidas mediante la integración inversa del cuadrado de la respuesta impulsiva del recinto (método de la respuesta impulsiva integrada, [4]).

3.1 Sistema de medición

Las mediciones se realizaron utilizando un sistema de medición optimizado para tal fin [5] el cual se detalla en Tabla 2.

Tabla 2: Componentes del sistema de medición.

Descripción	Marca, modelo
Micrófono de medición	Brüel & Kjær, type 4134
Placa de adquisición de sonido	Presonus, Audio box 44VSL
Fuente sonora omnidireccional	Cintra, FSO D -12

Descripción	Marca, modelo
(dodecaedro)	
Sistema de gestión de altavoces	dBx, Drive Rack PA+
Pre-amplificador para micrófono, 200V	Brüel & Kjær, type 2804
Amplificador de audio	Samson, Servo 300
Simulador de cabeza y torso	Brüel & Kjær, Type 4128
PC Notebook	Bangho, Intel i3 Duo / RAM 4 GB

3.2 Posiciones de medición

La cantidad de puntos utilizados corresponde al método de precisión especificado en la norma, registrándose un total de 12 RIR correspondientes a 6 posiciones de micrófono y 2 posiciones de fuente sonora omnidireccional tal como se puede ver en la Figura 3. El criterio de selección de puntos consideró las condiciones habituales de funcionamiento, es decir la fuente sonora en posibles ubicaciones del orador y el micrófono omnidireccional o simulador de cabeza y torso en posibles ubicaciones de los alumnos.

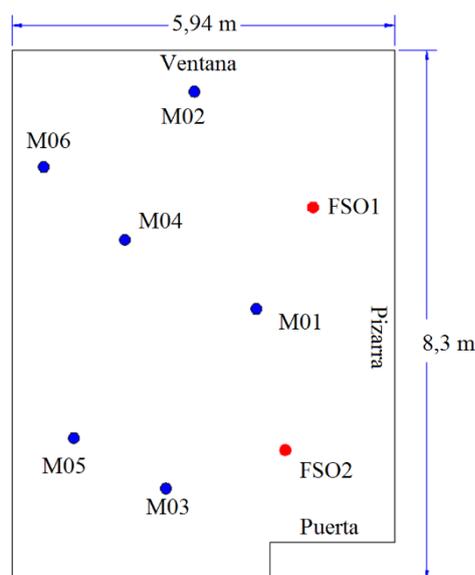


Figura 3: Posiciones de medición de Fuente (FSOx) y Receptor (Mxx).

3.3 Condiciones de ocupación

Las mediciones fueron realizadas en dos condiciones de ocupación. La primera condición fue a sala vacía, donde en el interior del aula se encontraba el equipamiento de medición y dos personas encargadas de la medición. La segunda condición fue a sala ocupada permaneciendo dentro del recinto en el momento de la medición 21 alumnos. La capacidad total del aula es de 35 asientos por lo que el índice de ocupación es del 60 %.

4. ANALISIS ESPACIAL EN DOS CONDICIONES DE OCUPACIÓN

Se presentan los resultados obtenidos en la medición de parámetros acústicos monoaurales y binaurales con una resolución espectral de octavas entre 63 y 16000 Hz. El valor para cada frecuencia fue obtenido como la media aritmética de los valores medidos para las 12 combinaciones de fuente-receptor.

Las variables involucradas en el análisis son el comportamiento espacial de estos parámetros para las 12 combinaciones de fuente receptor (*análisis espacial*) y las dos condiciones de ocupación descritas en el apartado 3.3. El *análisis espacial* se llevará a cabo utilizando el coeficiente de variación porcentual (CV %), este es un parámetro estadístico que permite expresar la desviación estándar de las 12 posiciones como porcentaje del promedio del parámetro acústico estudiado. En cuanto al comportamiento de los parámetros en las diferentes condiciones de ocupación se presentan los resultados en gráficos de barra para las dos que permitiendo hacer una comparación directa entre ambas.

4.1 Tiempo de reverberación.

En relación a la variación de este parámetro para las diferentes posiciones de medición, se puede observar en la Figura 4 que los desvíos más importantes ocurren a bajas frecuencias hasta 250 Hz, alcanzando valores superiores a 10 de CV%. Mientras que por encima de 250 Hz en ninguna frecuencia se supera el 5%. En cuanto a la variación del tiempo de reverberación para las dos condiciones de ocupación, se observa que la absorción sonora introducida en la condición de “aula ocupada” por los alumnos disminuye el valor de este parámetro hasta un 50 % respecto de la condición “aula ocupada”, para bandas de frecuencia superiores a 125 Hz [6].

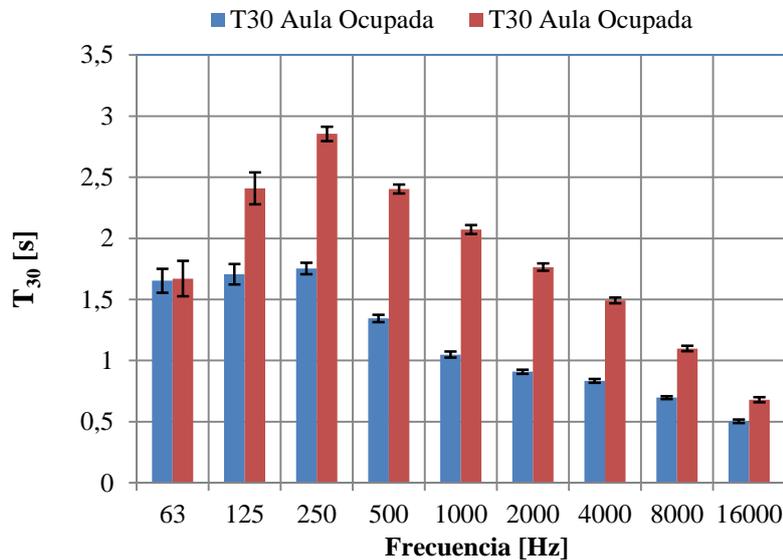


Figura 4: Tiempo de reverberación (T_{30}) para dos condiciones de ocupación.

4.2 Tiempo de Decrecimiento Temprano (EDT)

Este parámetro se asocia con la percepción subjetiva de la reverberación. Para el caso de estudio se observa en la Figura 5 que el mayor valor de CV% ocurre en la frecuencia de 125 Hz donde su valor es 26% en la condición “Aula Ocupada” y 27% en la condición “Aula Vacía”.

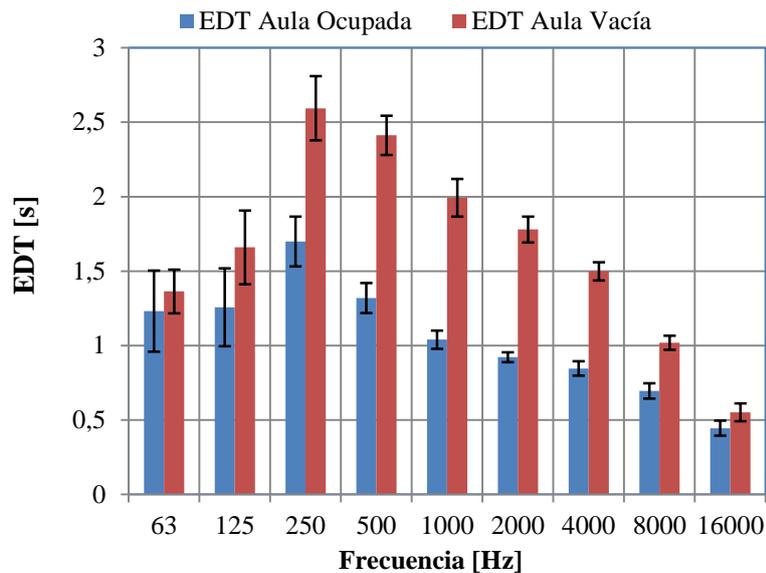


Figura 5: Tiempo de decrecimiento temprano (EDT) en dos condiciones de ocupación.

4.3 Centro de Tiempo (Ts)

Este parámetro indica el punto en el tiempo en el que la energía temprana es igual a la energía tardía, también conocido como el centro de gravedad de la respuesta impulsiva. Se observa en la Figura 6 que este parámetro en la condición de “aula ocupada” disminuye un 42% en 1000 Hz y un 36% en 2000 Hz.

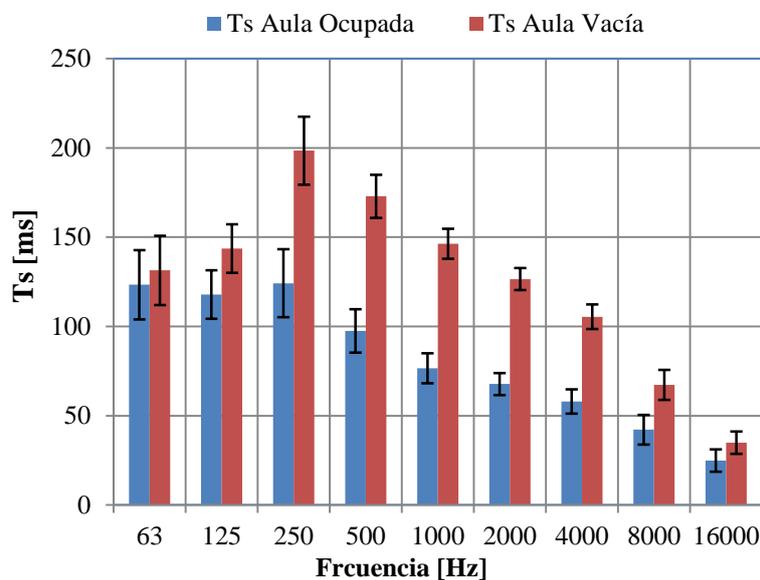


Figura 6: Centro de tiempo (Ts) en dos condiciones de ocupación.

4.3 Definición (D50)

Este parámetro relaciona la energía en los primeros 50 ms (sonido directo y primeras reflexiones) respecto de la energía total recibida. En en la Figura 7. Se puede observar que como en frecuencias de 250, 500 y 1000 Hz el CV% toma valores mayores en la condición de

“aula ocupada” respecto de la condición de “aula vacía”. A su vez en cuanto a la condición de “aula ocupada” se observa como este parámetro valores superiores a 50 % para frecuencias superiores mayores a 1000 Hz.

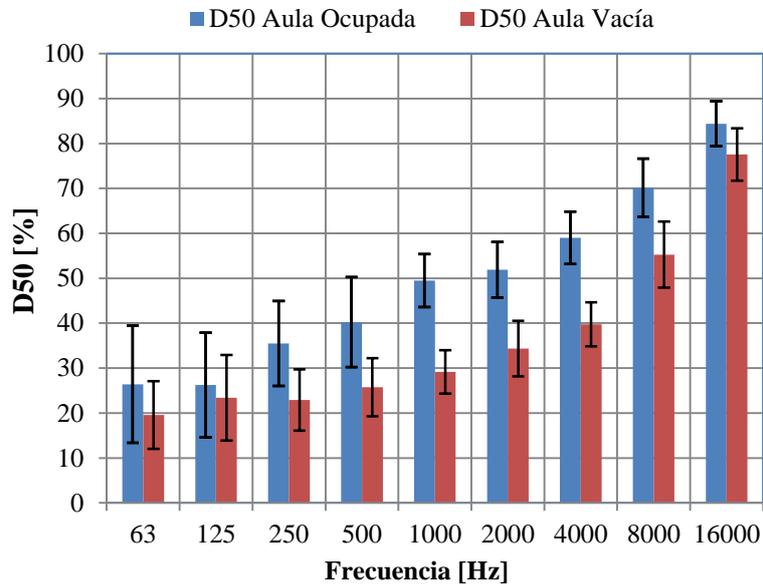


Figura 7: Definición (D50) en dos condiciones de ocupación.

4.4 Coeficiente interaural de correlación cruzada (IACC)

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en la medición del *Coficiente Interaural de Correlación Cruzada* ($IACC_{Tot}$). El subíndice *Tot* indica que se utiliza la RIR completa para realizar la operación de correlación.

Para medir la respuesta impulsiva binaural se reemplazó el micrófono omnidireccional en cada posición por un simulador de cabeza y torso artificial (Brüel & Kjør, Type 4128) como se puede ver en la Figura 8. Este fue colocado sobre los bancos a la altura promedio de los alumnos (1,25 m).



Figura 8: Simulador de cabeza y torso utilizado en la medición de RIR binaural.

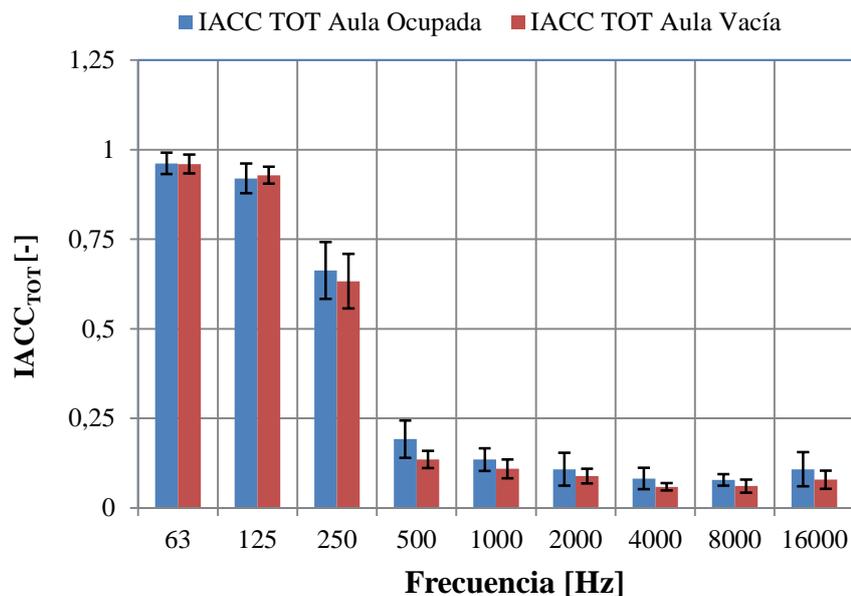


Figura 9: Coeficiente interaural de correlación cruzada (IACC) para dos condiciones de ocupación.

5. CONCLUSIONES

Según los resultados presentados en la sección anterior en primer lugar se concluye que en el “análisis espacial” de los parámetros $T30$, EDT y TS no se evidenciaron desvíos significativos que permitan emitir una conclusión entre las dos condiciones de ocupación. Por otra parte, los desvíos más importantes ocurrieron en bajas frecuencias, lo que se puede atribuir al efecto de los modos propios del recinto [8].

En segundo lugar en cuanto al *análisis en dos condiciones* de ocupación, se puso en evidencia que los parámetros $T30$, EDT y TS varían significativamente llegando a duplicar su valor en la condición de “aula ocupada”. Por otra parte el tiempo de reverberación en ambas condiciones de ocupación se encuentra por encima de los valores recomendados por normas internacionales para este tipo de recintos [7], resultando inapropiado para el proceso enseñanza aprendizaje.

El parámetro $D50$ en la condición de “aula vacía” toma valores inferiores al recomendado (50%) [8]. En la condición de “aula ocupada” en 1000 Hz toma un valor de 49% y en frecuencias superiores se mantiene por encima de 50%.

Por último en cuanto al $IACC_{TOT}$ se puede observar en la Figura 8 que este parámetro no es afectado de manera significativa por la presencia de alumnos en la condición de “aula ocupada”, la variación que presenta en las dos condiciones de ocupación es comparable con los desvíos en los diferentes puntos de medición.

6. AGRADECIMIENTOS

A la Secretaria de Ciencia, Tecnología y Posgrado de la Universidad Tecnológica Nacional. Al Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), Unidad Asociada al CONICET, de la Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ISO 3382-1:2009: Acoustics — Measurement of room acoustic parameters — Part 1: Performance spaces. ISO 3382-2:2008, Acoustics — Measurements of room acoustics parameters - Part 2: Reverberation time in ordinary rooms. 2008.
- [2] IRAM 4109-2 Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2 – Tiempo de reverberación de recintos communes (2011).
- [3] Farina, A., Simultaneous measurements of impulse response and distortion with a swept-sine technique. Proc. 108th Convention of Audio Engineering Society, Paris, Francia, (2000).
- [4] Schroeder M., New method of measuring reverberation time, Journal Acoustical Society of America, 37:409-412 (1965).
- [5] Ferreyra S.P., Esquinas P.B., Orecchia I., Elías J.M. “Diseño y construcción de una cadena de instrumentación electroacústica para la medición de la respuesta al impulso de recintos según norma ISO 3382. Mecánica Computacional, Vol. XXVIII, págs. 63-72. Actas del 18vo Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones ENIEF (2009).
- [6] Cravero G A, Ferreyra S P, Flores M D, Budde L, Longoni H C, Ramos O A, y Tommasini F C. Medición y simulación de tiempo de reverberación y otros parámetros acústicos de aulas. Mecánica Computacional Vol XXXII, págs. 2889-2900 (2013).
- [7] Carrión Isbert, A. Diseño acústico de espacios acústicos arquitectónicos. Alfaomega (2001).
- [8] Ferreyra S P., Cravero G A., Flores M D., Budde L, Longoni H C, Ramos O A., y Tommasini F C. Análisis modal de aulas universitarias. Mecánica Computacional Vol XXXII. págs. 3978-3993. Mendoza, Argentina, 19 al 22 (2013).