

Análisis espacial del índice energético temprano-tardío en aulas universitarias

S.P. Ferreyra^a, G.A. Cravero^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, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, Maestro López esq. Cruz Roja Argentina, Córdoba, CP:X5016ZAA, Córdoba, República Argentina, sferreyra@scdt.frc.utn.edu.ar

^b Consejo Nacional de Investigaciones Científico y Técnicas (CONICET), Av. Rivadavia 1917, CP: C1033AAJ, CABA, República Argentina

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

RESUMEN: Por lo general, la claridad con que se percibe la voz en un aula no es constante para toda el área de audición. Los principales factores que la afectan son la reverberación y la relación señal-ruido. El índice energético temprano-tardío es un indicador objetivo que permite evaluar mediante fracciones energéticas de la respuesta impulsiva del recinto la claridad con que la señal original es percibida. En este trabajo, se presentan los resultados del análisis espectral de este índice para el caso de la palabra hablada en una muestra de 9 aulas universitarias representativa, en términos de dimensiones y características constructivas, de una población de 78 aulas. Finalmente, se realiza el análisis espacial en un recinto seleccionado.

KEYWORDS: Índice energético temprano-tardío, reverberación, aulas, palabra hablada, respuesta impulsiva.

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 del 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.

Diversos estudios científicos demuestran que la inteligibilidad de la palabra está vinculada con la correcta percepción de las consonantes. Elevados valores de tiempo de reverberación (T) pueden degradarla significativamente provocando el enmascaramiento de las consonantes [1]. Es por esto que el T es uno de los parámetros críticos en recintos destinados al proceso de enseñanza-aprendizaje basados en la palabra hablada. Por lo general, la construcción de este tipo de recintos en la República Argentina no considera criterios acústicos, utilizándose materiales con bajos coeficientes de absorción sonora. En la actualidad el T y otros parámetros acústicos de recintos se obtienen a partir de la medición de la Respuesta Impulsiva del Recinto (RIR), siendo la norma ISO 3382 el documento de referencia que establece las recomendaciones para realizar dicha medición a nivel internacional [2].

El índice energético temprano tardío (C_x), es un parámetro acústico normalizado que permite determinar la relación entre la energía sonora temprana y tardía que arriba a una posición determinada. Cuando este descriptor es calculado empleando como límite de integración el valor de 50 ms, su resultado se correlaciona en buena medida con la “claridad de la palabra hablada”.

El trabajo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta la medición de la respuesta impulsiva de recinto, el sistema de medición utilizado y el parámetro acústico seleccionado para el estudio; en la sección 3 se presenta una breve descripción de las características acústicas arquitectónicas de los recintos y su vista en planta; en la sección 4 se presenta el análisis espectral por banda de octava para los nueve recintos y seguidamente el análisis espacial en un recinto seleccionado. Finalmente, se presentan las conclusiones.

2. MEDICION DE LA RESPUESTA IMPULSIVA DE RECINTO

Todas las mediciones fueron realizadas cumplimentando las recomendaciones sugeridas en la norma ISO 3382-2. Las respuestas impulsivas fueron obtenidas por el método de la Respuesta Impulsiva Integrada (IIR), [2][3], registrando un total de 12 combinaciones fuente-receptor para 6 posiciones de micrófono y 2 de fuente sonora omnidireccional.

2.1 Sistema de medición

El sistema de medición utilizado se detalla en la Tabla 1 [4]. La fuente sonora omnidireccional fue compensada en frecuencia mediante la utilización de un proceso de ecualización aplicado filtros digitales de tercio de octava.

Tabla 1: Sistema de medición utilizado para la medición de RIR.

Descripción	Marca	Modelo
Placa de adquisición de sonido	Presonus,	AudioBox 44 VSL

Descripción	Marca	Modelo
Micrófono electrostático de medición	Brüel & Kjær,	Type 4133
Pre-amplificador para micrófono, 200V	Brüel & Kjær,	Type 2804
Calibrador sonoro de referencia	Brüel & Kjær,	Type 4231
Software de aplicación	Brüel & Kjær,	Type 7841
Amplificador de audio de potencia	Samson,	Servo 300
Sistema de gestión de altavoces (DSP)	dBx,	Drive Rack PA+
Fuente sonora omnidireccional, FSO (dodecaedro)	Cintra,	OSS D-12
PC Notebook	HP	Pavillon dv3
Auriculares	Sennheiser,	HD 280 PRO

2.2 Índice energético temprano-tardío

Propuesto por Reichard et al [5], es un indicador de la relación de la energía temprana-tardía, se define como 10 veces el logaritmo entre la energía que llega a un oyente dentro de los primeros “t” segundos desde la llegada del sonido directo (incluyéndolo) y la energía que le llega con posterioridad a una posición espacial determinada (1), donde p representa la presión sonora instantánea de la RIR.

$$C_t = 10 \log \frac{\int_0^t p^2(t) dt}{\int_t^\infty p^2(t) dt} \quad (\text{en dB}) \quad (1)$$

En este trabajo el índice energético temprano-tardío (C_x), fue obtenido a partir de la respuesta impulsiva integrada utilizando como límite de integración el valor de 50 ms, este valor es el utilizado para evaluaciones de la palabra hablada (C_{50}), según la expresión (2).

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{0,05} p^2(t) dt}{\int_{0,05}^\infty p^2(t) dt} \quad (\text{en dB}) \quad (2)$$

2.3 Posiciones de medición

Para la selección de las coordenadas de los puntos de medición se tuvieron en cuenta las condiciones de funcionamiento habitual de las aulas y auditorios. De este modo, se localizó la fuente sonora omnidireccional en dos posibles posiciones que pueda tomar el orador dentro del recinto. Y en cuanto los puntos de recepción se tuvieron en cuenta posiciones tales como, la más cercana al orador, la más lejana y algunas posiciones intermedias. Registrando en cada recinto 2 posiciones de fuente sonora y 6 de micrófono, ver Figuras 1 a 5.

3. RECINTOS

La muestra de 9 recintos estudiados, corresponden a 7 aulas y 2 auditorios de la Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, República Argentina. La selección se llevó a cabo teniendo en cuenta características constructivas, materiales y el entorno de cada recinto, obteniendo una muestra representativa de un total de 78 aulas. A continuación se presenta una breve descripción de los recintos seleccionados donde se detallan las características constructivas y las posiciones de medición, ver Figuras 1 a 5 (con puntos rojos las posiciones de fuente sonora omnidireccional (FSO) y con puntos azules las posiciones de Micrófono).

Aula 608: de base rectangular y con un volumen de $179,46 \text{ m}^3$. 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. Posiciones de medición, ver Figura 1.

Aula 015: de base rectangular y con un volumen de $194,25 \text{ m}^3$. Las paredes están construidas con ladrillo hueco revocado, pintado con látex. Posee una puerta placa de madera tipo doble hoja y ventanas de carpintería de aluminio con paños de vidrio de 4 mm de espesor. Estas últimas están equipadas con una cortina liviana. El techo está construido con vigas de hormigón, cubierto por un cielorraso de placa de roca yeso de 9 mm de espesor. El piso es de baldosas cerámicas de granito (20 cm x 20 cm). Posiciones de medición, ver Figura 1.

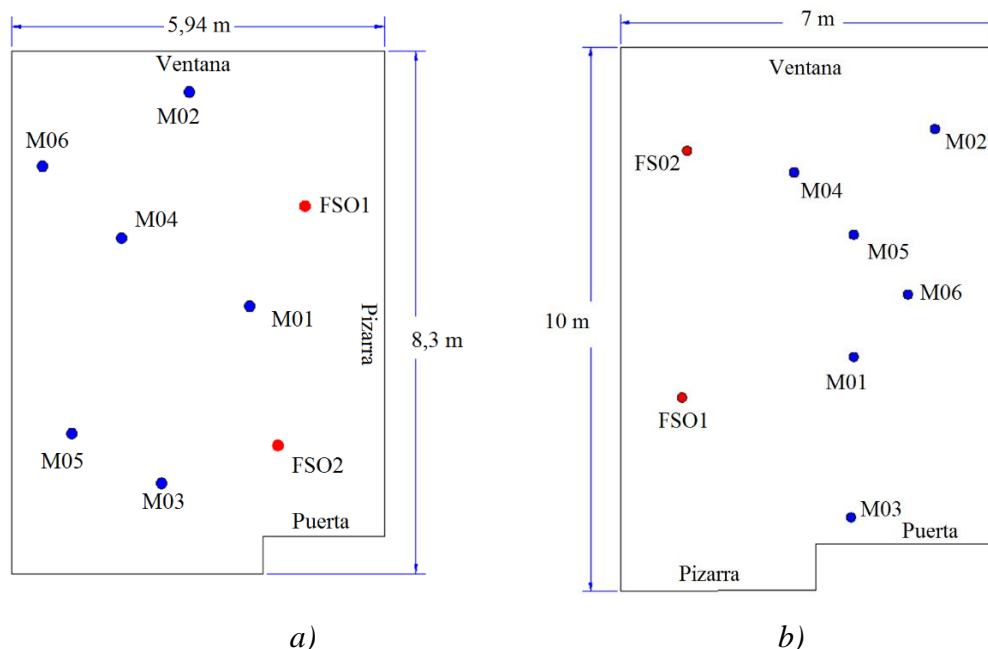


Figura 1: Vista en planta y coordenadas de medición: a) Aula 608; b) Aula 015.

Aula 011: de base rectangular y volumen de $93,45 \text{ m}^3$. Las paredes están construidas con ladrillo macizo de barro cocido de 0,30 m de espesor, con revoque cementico de 2 cm de espesor. Posee una puerta placa de madera tipo doble hoja y ventanas de carpintería de aluminio con paños de vidrio de 4 mm de espesor. El techo, está construido con losa de hormigón, cubierto con un cielorraso de placas de yeso de 9 mm de espesor. Posiciones de medición, ver Figura 2.

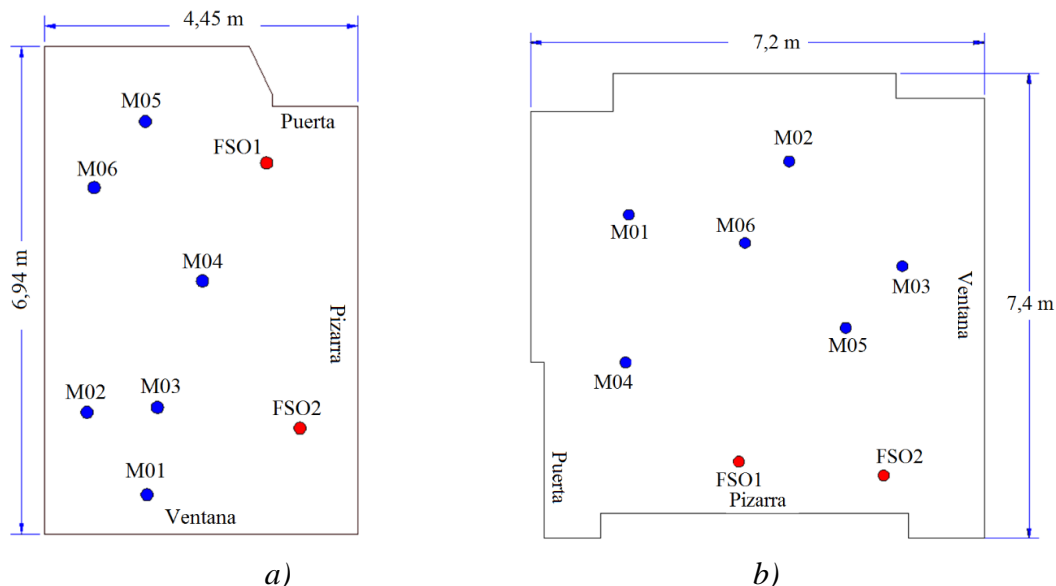


Figura 2: Vista en planta y coordenadas de medición: a) Aula 011; b) Aula 154.

Aula 154: de base rectangular con un volumen de $143,32 \text{ m}^3$. Las paredes están construidas con ladrillo hueco revocado pintado con látex, puerta placa de madera tipo doble hoja y ventanas de carpintería de aluminio con paños de vidrio de 4 mm de espesor. El techo, presenta losa de hormigón armado revocado. Posee además un cielorraso de paneles rígidos de lana de vidrio de 20 mm de espesor, a una distancia de 1 m respecto de la losa. Posiciones de medición, ver Figura 2.

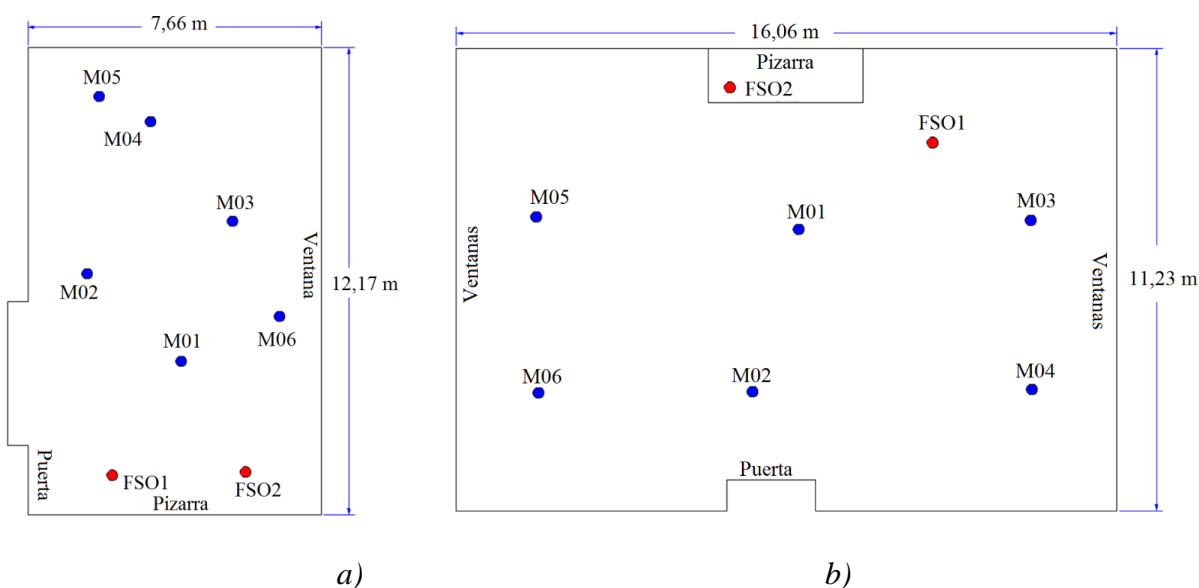


Figura 3: Vista en planta y coordenadas de medición: a) Aula 708; b) Aula 405

Aula 708: de base rectangular con un volumen de 318,82 m³. Tres paredes están construidas con tabique doble de placa de roca yeso de 12,5 mm de espesor, mientras que la restante es de hormigón. Posee una puerta placa de madera tipo doble hoja y ventanas de carpintería de aluminio con paños de vidrio de 4 mm de espesor. El techo, está construido con vigas tipo doble T de hormigón premoldeado. Posiciones de medición, ver Figura 3.

Aula 405: de base rectangular, con un volumen de 561,02 m³. Construidos con ladrillo block de hormigón revocado y con pintura látex. Ventanas de carpintería de aluminio con paños de vidrio de 4 mm de espesor, y cortina de un paño. El techo, está construido con losa de hormigón y ladrillo. El mismo presenta un cielorraso de placa yeso de 12,5mm de espesor. Posiciones de medición ver Figura 3.

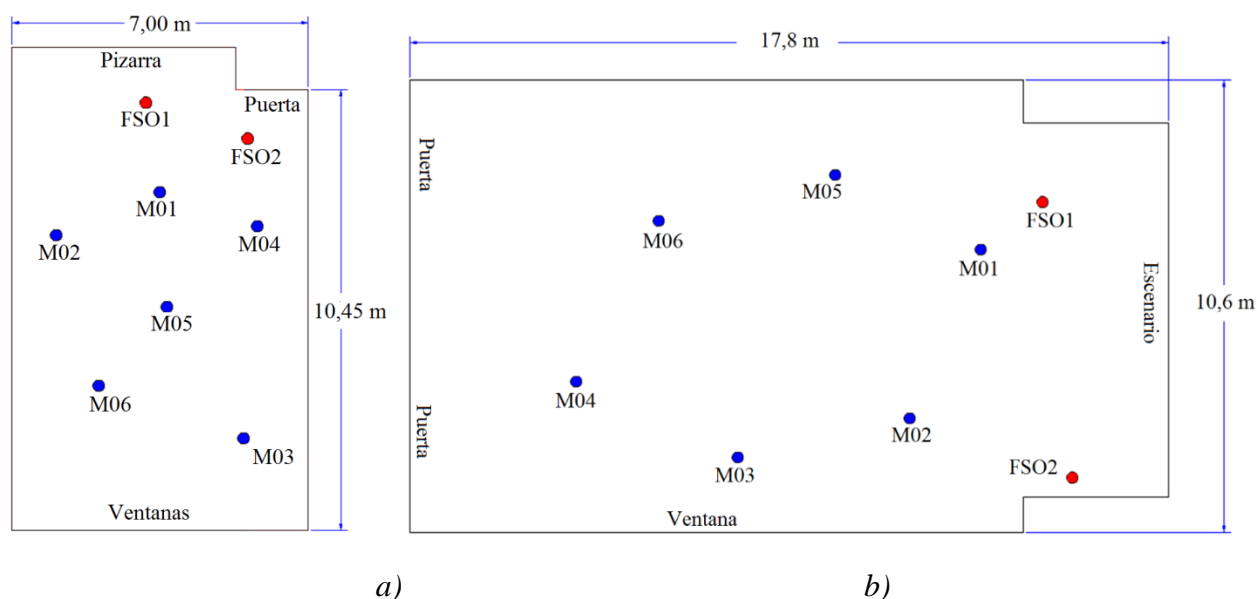


Figura 4: Vista en planta y coordenadas de medición: a) Aula 225; b) Aula Magna

Aula 225: de base rectangular y con un volumen de 240,45 m³. Las paredes están construidas con ladrillo hueco revocado y terminado con pintura látex. Posee una puerta placa de madera tipo doble hoja y ventanas de carpintería de aluminio con paños de vidrio de 4 mm de espesor. El techo es de chapa de acero galvanizada y posee un cielorraso de placa rígida de lana de vidrio de 20 mm de espesor, a una distancia de 1 m respecto de la chapa. Posiciones de medición, ver Figura 4.

Aula Magna: de base rectangular con un volumen de 540 m³. Los muros son de ladrillo macizo de 0,3 m de espesor con revoque de cemento de 20 mm de espesor; combinados en algunos sectores con hormigón armado. Una de las paredes longitudinales cuenta con aberturas de carpintería de aluminio equipadas con paños de vidrio de 6 mm de espesor y cortinado doble de tela de algodón. El techo es de hormigón armado con vigas del mismo material de 1 m por 0,4 m, dispuestas en sentido longitudinal. Las puertas son de madera. El piso está recubierto con alfombra tipo bucle de 10 m de espesor. Las localidades se presentan en dos naves de 22 filas cada una, con 10 butacas por fila. Las mismas poseen respaldo y base de goma espuma con terminación en cuero. Posiciones de medición ver Figura 4.

S.U.M: de base rectangular con un volumen de $211,88 \text{ m}^3$. Construido con tabique doble con cámara interior de 70mm, con placa de madera MDF enchapado de 19 mm de espesor; ventanas de carpintería de aluminio con paños de vidrio de 4 mm de espesor, y cortina doble de tela sintética. Techo de losa de hormigón y ladrillo. El mismo presenta un cielorraso de placa perforada de 12,5mm de espesor. Posiciones de medición, ver Figura 5.

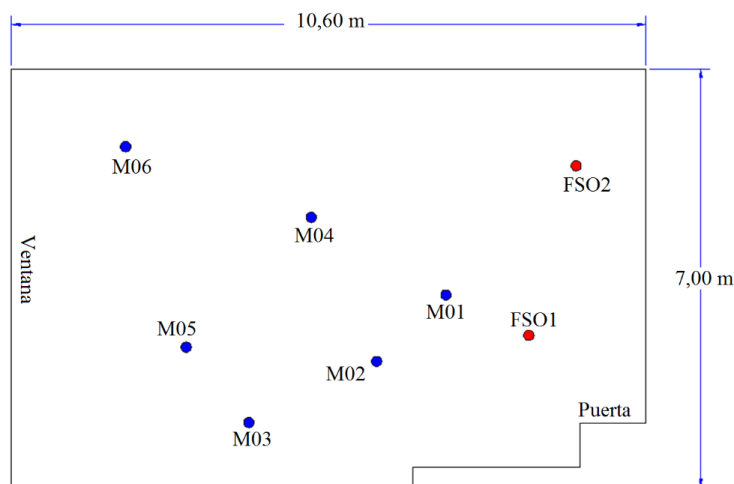


Figura 5: Vista en planta y coordenadas de medición, SUM.

4. ANÁLISIS ESPECTRAL Y ESPACIAL

Por cuestiones de espacio se presentan los resultados algunos recintos en relación al análisis espectral y espacial del índice energético temprano-tardío. En primer lugar, se analizan los valores espectrales por banda de octava de todos los recintos. En segundo lugar, se analiza la variación espacial para diferentes posiciones de la fuente respecto de un único punto de recepción.

4.1 Análisis espectral

En la Figura 6 se presentan los resultados de C_{50} , obtenido como la media aritmética de los valores medidos en bandas de octava de 31,5 a 16.000 Hz en cada recinto para las doce combinaciones de fuente-receptor. Se observa la gran dispersión del parámetro C_{50} por bandas de octava que asumen este para los 9 recintos. Dicha variación resulta en algunas bandas de octava superior a 10 dB.

Por otra parte, existen diversos estudios psicoacústicos que determinan las diferencias mínimas notables (JND) de diversos parámetros acústicos de recintos. Es decir, la mínima variación de un parámetro acústico que un oyente es capaz de discriminar. La JND definida para el índice energético temprano-tardío según ISO 3382-1 es de ± 1 dB. Por otra parte los valores típicos del C_{50} son del orden de ± 5 dB.

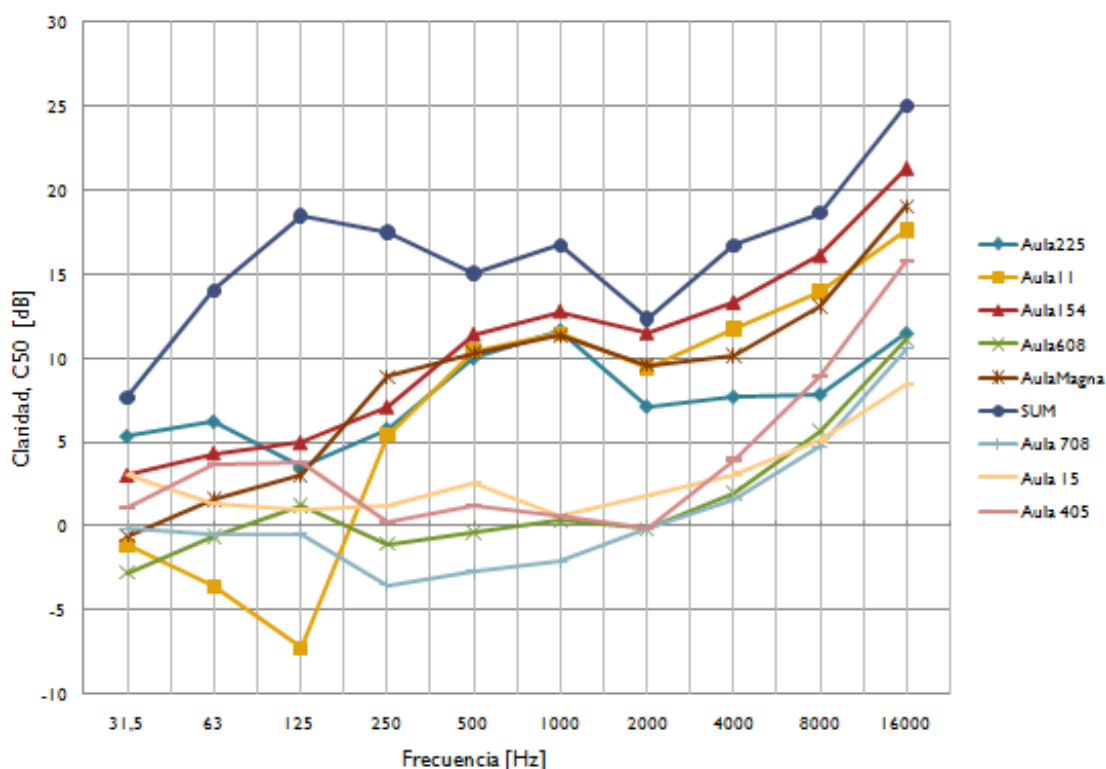


Figura 6: Valores promedio del índice energético temprano-tardío en banda ancha para cada recinto.

4.1 Análisis espacial

Se presentan los resultados del análisis espacial en el aula 608 para un total de 9 RIR monoaurales correspondientes a 9 posiciones de fuente y 1 posición de micrófono. En la Figura 7 se presentan las configuraciones de medición de los pares fuente-receptor (FSO_i-M_1). El micrófono siempre estuvo orientado en dirección hacia la fuente sonora. Se mantuvo constante la ganancia del sistema. Por lo cual, la única variable identificada se atribuye al cambio de posición de la fuente sonora en el recinto en el plano x - y .

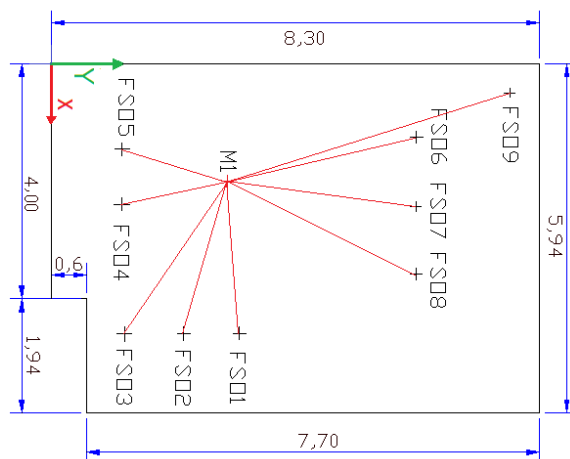


Figura 7: Configuraciones de medición, vista superior del recinto.

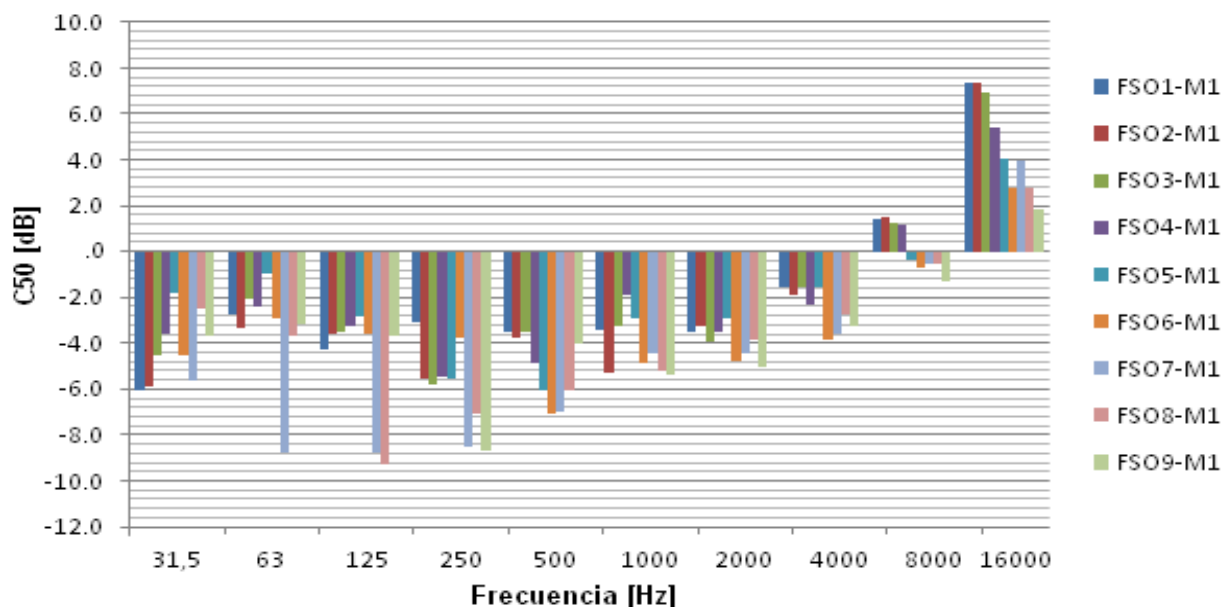


Figura 8: Análisis espacial de índice temprano tardío para 9 posiciones Fuente-Receptor

En la Figura 8, en primer lugar se observa que C_{50} , evidencia significativas variaciones en todo el espectro de frecuencias, siendo de hasta 9 dB en la banda de octava de 63 Hz; 4 dB para 125, 250, 500, 1000 Hz; y 2 dB por encima de 2 kHz, con excepción de la banda de 16 kHz con variaciones de 4 dB. En segundo lugar, el estudio demuestra que a pesar de ser un recinto pequeño, el campo sonoro resulta altamente heterogéneo en función de la posición, pudiéndose concluir que la inteligibilidad de la palabra será afectada significativamente en aquellas posiciones donde este parámetro asume valores máximos negativos. Este efecto observado se debe al efecto que introducen los modos propios de vibración del recinto.

5. CONCLUSIONES

En primer lugar, según el estudio experimental realizado el índice energético temprano-tardío C_{50} calculado en *banda ancha* presenta significativas variaciones que superan en varios órdenes de magnitud la JND conocida, al comparar resultados entre la muestra seleccionada, la cual es representativa de una población de 78 aulas universitarias.

Por otra parte, del análisis espacial efectuado se concluye que el índice energético temprano tardío es altamente dependiente de la posición de medición en bajas y medias frecuencias presentando marcadas coloraciones provocadas por los modos propios de vibración [6], verificándose variaciones de hasta 4 dB, en bandas de octava de baja y media frecuencia, que componen el espectro de la palabra hablada.

6. AGRADECIMENTOS

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] Carrión Isbert, A. Diseño acústico de espacios acústicos arquitectónicos. Alfaomega (2001).
- [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).
- [3] Schröder M., New method of measuring reverberation time, Journal Acoustical Society of America, 37:409-412 (1965).
- [4] 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).
- [5] Riechardt, W., Abdel A., O. & Schmidt W., “Definition and basis of making an objective evaluation to distinguish between useful and useless clarity defining musical performances”, Acustica, 32:126-137. (1975)
- [6] Ferreyra S.P., Cravero G.A., Flores M. D., Budde L., Longoni H.C., Ramos O.A., & Tommasini F.C. Análisis modal de aulas universitarias. *Mecánica Computacional* Vol XXXII. págs. 3978-3993. Mendoza, Argentina, 19 al 22 Noviembre 2013