

ANÁLISIS ESPACIAL DE TIEMPO DE REVERBERACIÓN EN AULAS Y AUDITORIOS UNIVERSITARIOS

**Gabriel A. Cravero^a, Sebastián P. Ferreyra^a, Hugo C. Longoni^a, Mario D. Flores^a,
Oscar A. Ramos^{a,b} y Fabian C. Tommasini^a**

^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 5016ZAA, Córdoba, Rep. Argentina. e-mail: gacravero@gmail.com,
<http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/cintra/>*

^b*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Av. Rivadavia 1917, CP:
C1033AAJ, CABA, Rep. Argentina. <http://www.conicet.gov.ar>*

Palabras clave: acústica estadística, tiempo de reverberación, modos propios de vibración, inteligibilidad de la palabra.

Resumen. La teoría acústica estadística establece que el tiempo de reverberación de un recinto es único e independiente de la posición de la fuente y el receptor. Las ecuaciones desarrolladas según esta teoría vinculan parámetros como la absorción sonora de los materiales intervinientes, el volumen del recinto, la velocidad del sonido, entre otros. Actualmente la medición del tiempo de reverberación (norma ISO 3382) considera realizar múltiples mediciones de curvas de decrecimiento energéticas para diferentes posiciones de la fuente y el receptor, calcular el tiempo de reverberación para cada una de ellas y finalmente obtener la media aritmética. En la última década, diferentes investigaciones han observado que dependiendo de las características del campo sonoro este parámetro puede presentar variaciones significativas, principalmente por el efecto que introducen los modos propios de vibración del recinto. En este trabajo se presenta un análisis espacial del tiempo de reverberación en un conjunto de aulas y auditorios universitarios comparando las diferencias obtenidas entre los distintos puntos y su variación respecto de la diferencia mínima notable (Just Noticeable Difference: JND) establecida para este parámetro. Finalmente, se analizan los factores que influyen en la desviación de este parámetro.

1. INTRODUCCIÓN.

Este trabajo se desarrolló en el marco del Proyecto de Investigación y Desarrollo homologado por la Universidad Tecnológica Nacional 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.

La teoría acústica estadística establece que el tiempo de reverberación de un recinto es único e independiente de la posición de la fuente y el receptor. Las ecuaciones desarrolladas según esta teoría asumen que este parámetro depende de la absorción sonora de los materiales intervinientes y el aire, el volumen del recinto y la velocidad del sonido. Actualmente la medición del tiempo de reverberación (norma ISO 3382) considera realizar múltiples mediciones de curvas de decrecimiento energéticas para diferentes posiciones de fuente y receptor, calcular el tiempo de reverberación para cada una de ellas y finalmente obtener la media aritmética de todos los puntos medidos. En la última década, diferentes investigaciones han observado que dependiendo de las características del campo sonoro este parámetro puede presentar variaciones significativas, principalmente por el efecto que introducen los modos propios de vibración del recinto (Ferreyra et al, 2013). En este trabajo se presentan los resultados de la medición del tiempo de reverberación a través del parámetro T_{10} por tercios de octava en 7 aulas y 2 auditorios de la Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional. Estas fueron realizadas siguiendo las recomendaciones de la norma IRAM 4109-2 compatible con ISO 3382-2 registrando un total de 12 respuestas impulsivas en cada recinto, correspondientes a 2 posiciones de fuente sonora omnidireccional y 6 posiciones de micrófono.

El trabajo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta la medición de la respuesta impulsiva de los recintos, 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 espacial presentándose resultados en banda ancha y espectrales por tercio de octava. Finalmente, se presentan las conclusiones.

2. MEDICIÓN DE LA RESPUESTA IMPULSIVA

Todas las mediciones fueron realizadas cumplimentando las recomendaciones sugeridas en la norma IRAM 4109-2 equivalente a ISO 3382-2. Las curvas de decrecimiento fueron obtenidas mediante la integración inversa del cuadrado de la respuesta impulsiva del recinto (método de la Respuesta Impulsiva Integrada, IIR, Schröder 1965, ISO 3382). Registrando un total de 12 combinaciones fuente-receptor en 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. La fuente sonora omnidireccional fue compensada en frecuencia mediante la utilización de un proceso de ecualización aplicado filtros digitales de tercio de octava.

Descripción	Marca/Modelo
Placa de adquisición de sonido	Presonus, AudioBox 44 VSL
Micrófono electrostático de medición	Brüel&Kjær, type 4133
Pre-amplificador para micrófono, 200V	Brüel&Kjær, type 2804
Calibrador sonoro de referencia	Brüel&Kjær, 4231
Software de aplicación	Brüel&Kjær, 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	CPU Intel Core i3
Auriculares	Sennheiser, HD280 PRO

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

2.2 TIEMPO DE REVERBERACIÓN

El tiempo de reverberación fue obtenido a partir de la pendiente de -10 dB de la curva de decrecimiento energética, tal como lo define T_{10} . Esto último, permitió que la relación señal/ruido (SNR) medida cumpliera los valores recomendados para el cálculo del tiempo de reverberación.

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 1,2,3,4,5,6,7,8,9.

3. RECINTOS

La muestra de 9 recintos estudiados, corresponden a 7 aulas y 2 auditorios de la Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, 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 9 (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.

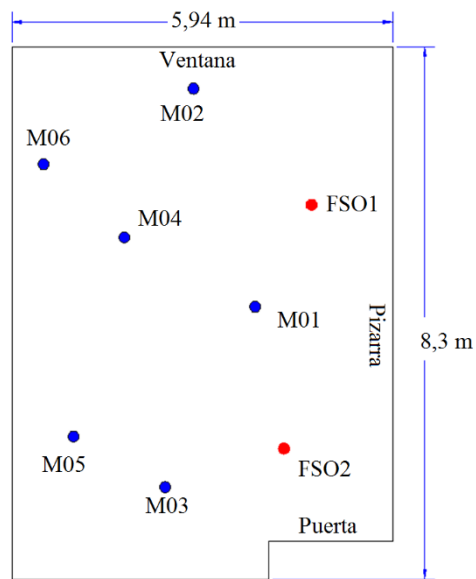


Figura 1: Vista en planta y coordenadas de medición, Aula 608.

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. 2.

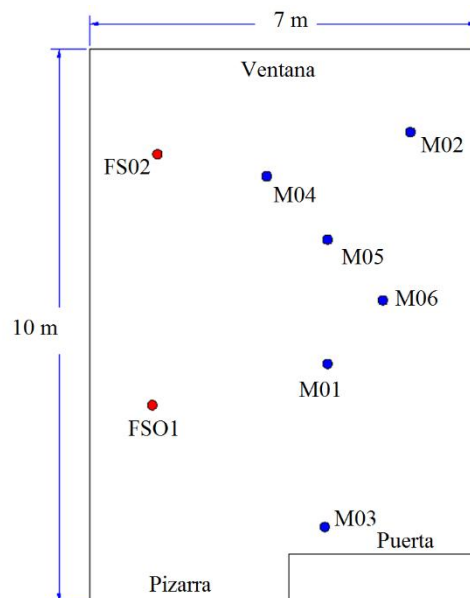


Figura 2: Vista en planta y coordenadas de medición, Aula 015.

Aula 011: de base rectangular y volumen de $93,45 \text{ m}^3$. Las paredes están construidas con ladrillo macizo de barro cocido de $0,30 \text{ m}$ 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. 3.

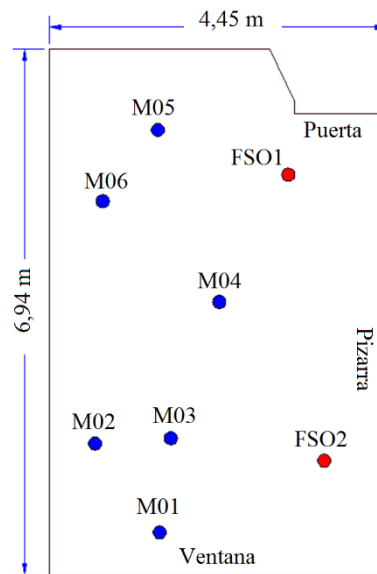


Figura 3: Vista en planta y coordenadas de medición, Aula 011.

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. 4.

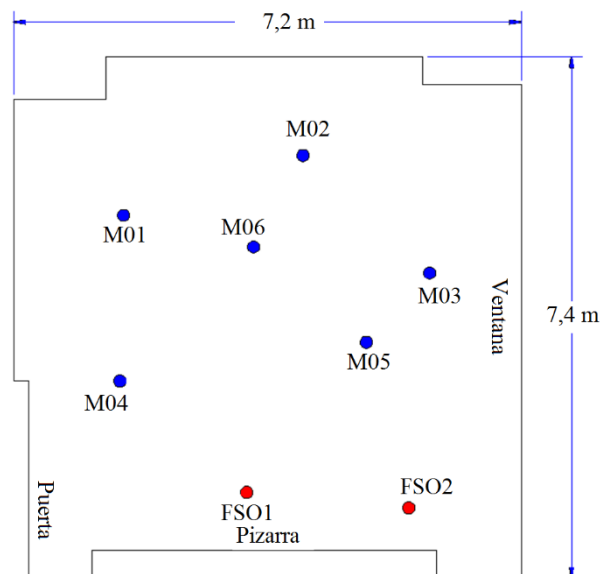


Figura 4: Vista en planta y coordenadas de medición, Aula 154.

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. 5.

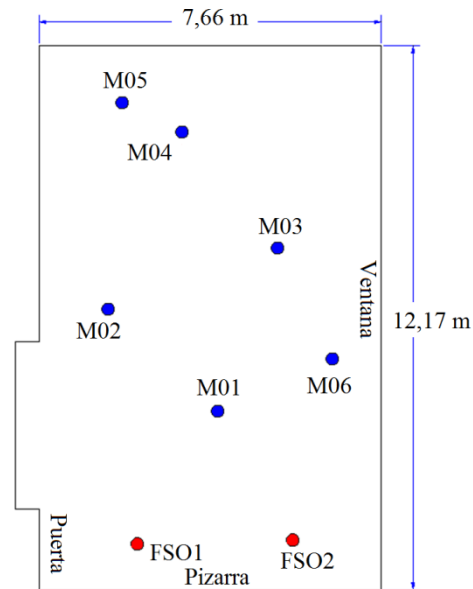


Figura 5: Vista en planta y coordenadas de medición, Aula 708.

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. 6.

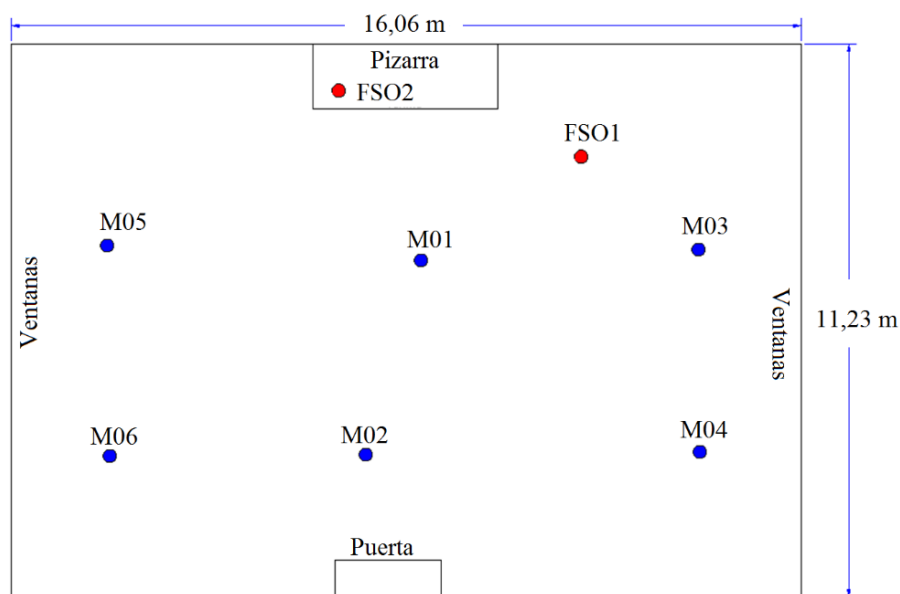


Figura 6: Vista en planta y coordenadas de medición, Aula 405.

Aula 225: de base rectangular y con un volumen de $240,45 \text{ m}^3$. 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. 7.

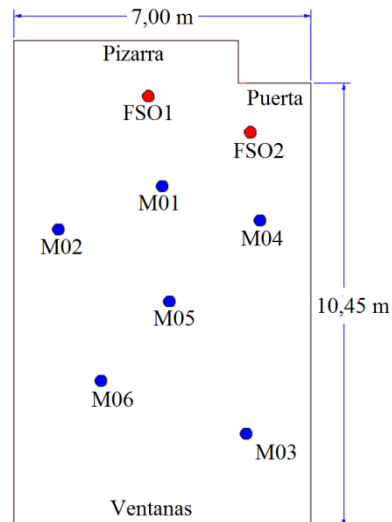


Figura 7: Distribución espacial de los puntos de medición, Aula 225.

Aula Magna: de base rectangular con un volumen de 540 m^3 . 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. 8.

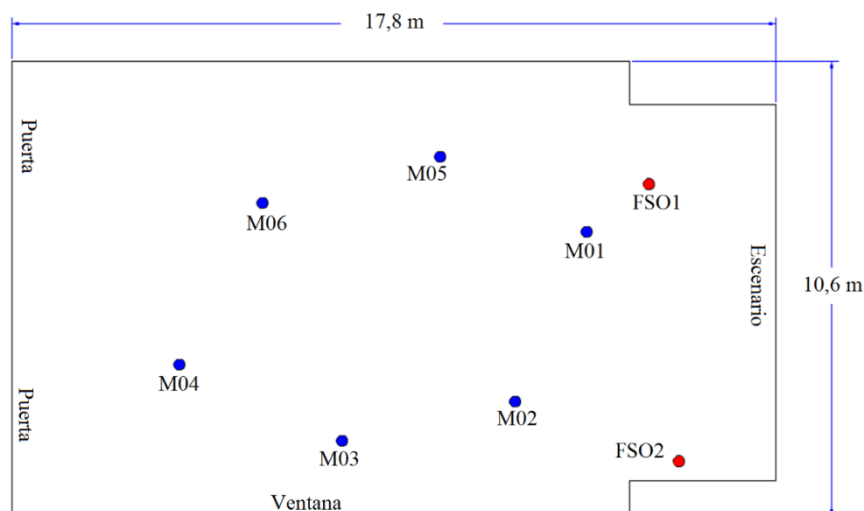


Figura 8: Vista en planta y coordenadas de medición, Aula Magna.

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 19mm 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. 9.

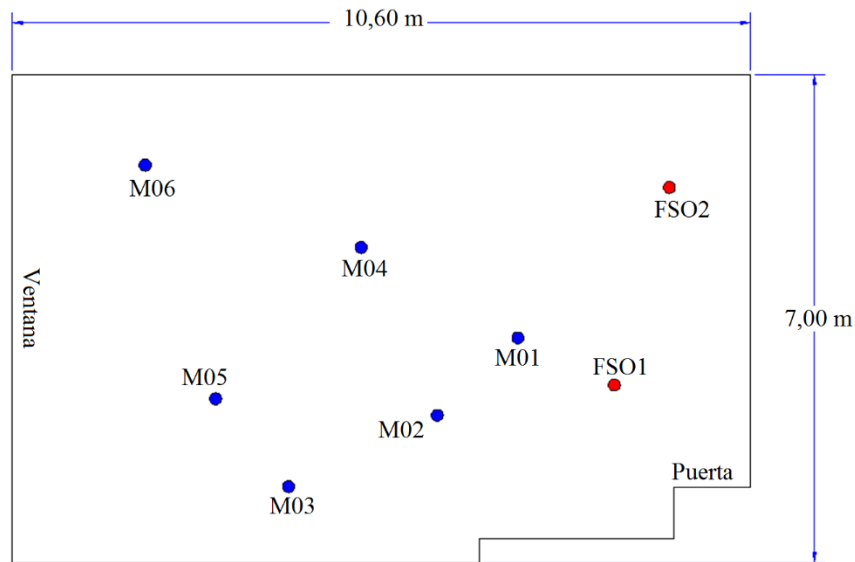


Figura 9: Vista en planta y coordenadas de medición, SUM.

4. ANÁLISIS ESPACIAL

En este apartado se presenta un análisis espacial del tiempo de reverberación, dividido en dos etapas, en la primera se presentan *resultados en banda ancha* y en la segunda se presentan *resultados espectrales*.

4.1 Resultados en banda ancha

En la Figura 10 se presentan los resultados de T_{10} , obtenido como la media aritmética de los valores medidos en los tercios de octava de 63 a 20.000 Hz en cada recinto para las doce combinaciones de fuente-receptor. También se presenta el Coeficiente de Variación porcentual (CV%) para cada recinto a través de una línea vertical. Este expresa la desviación estándar de las 12 posiciones como porcentaje del promedio tiempo de reverberación.

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 tiempo de reverberación según ISO 3382-1 es del 5%. En la Tabla 2 se presenta una comparación del coeficiente de variación porcentual calculado en cada recinto con el valor de JND especificado para este parámetro.

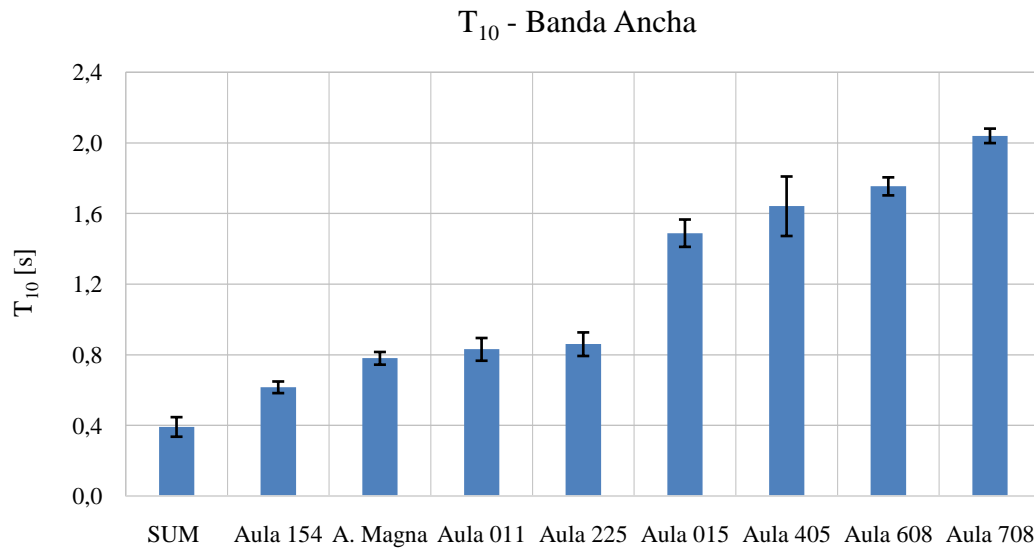


Figura 10: Tiempo de reverberación y coeficiente de variación porcentual en banda ancha para cada recinto.

Recinto	CV%	Comparación
Aula 708	2	< JND
Aula 608	3	< JND
Aula 154	5	= JND
A. Magna	5	= JND
Aula 015	5	= JND
Aula 225	7	> JND
Aula 011	8	> JND
Aula 405	10	> JND
SUM	14	>JND

Tabla 2. Comparación de CV% con JND

4.2 Resultados espectrales

En las figuras 10 a 18 se presentan los resultados del tiempo de reverberación, en tercios de octava de 63 a 20.000 Hz. Este fue calculado en cada banda de frecuencia como la media aritmética de los valores obtenidos en 12 combinaciones fuente receptor. En este caso la línea vertical negra representa la desviación estándar.

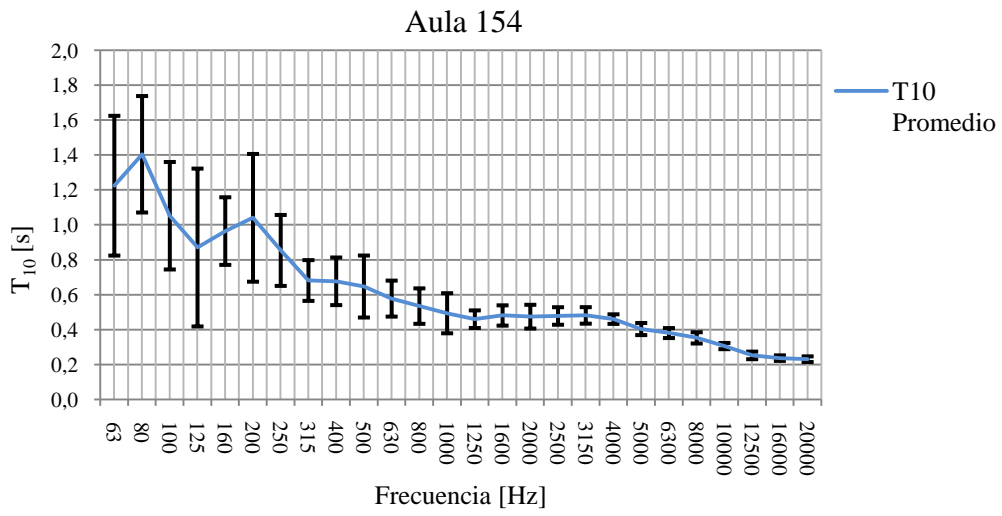


Figura 10: Aula 011 tiempo de reverberación promedio y desviación estándar.

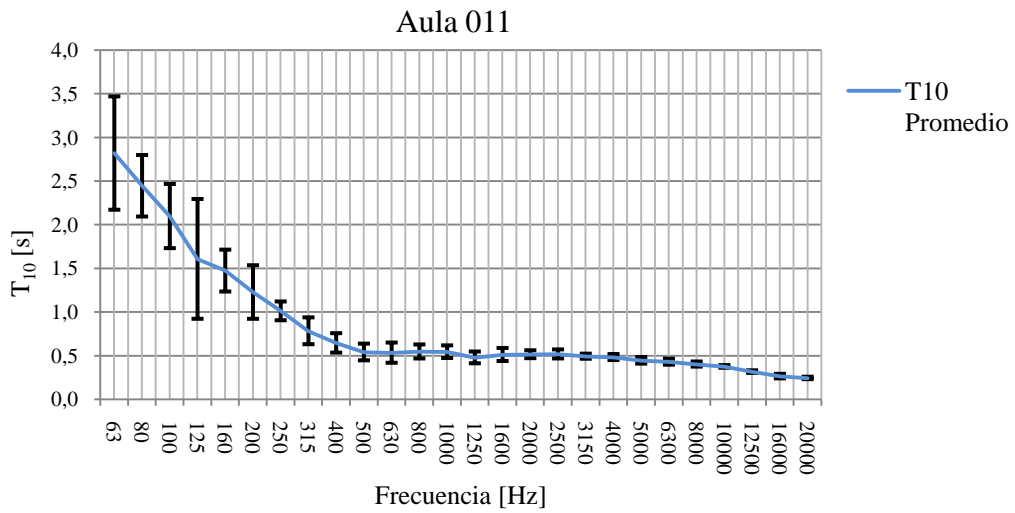


Figura 11: Aula 011 tiempo de reverberación promedio y desviación estándar.

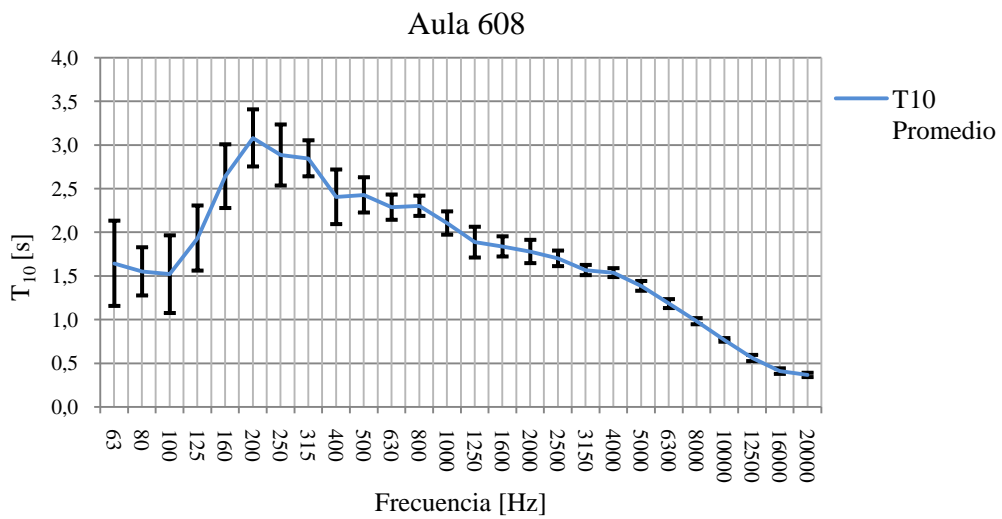


Figura 12: Aula 608 tiempo de reverberación promedio y desviación estándar.

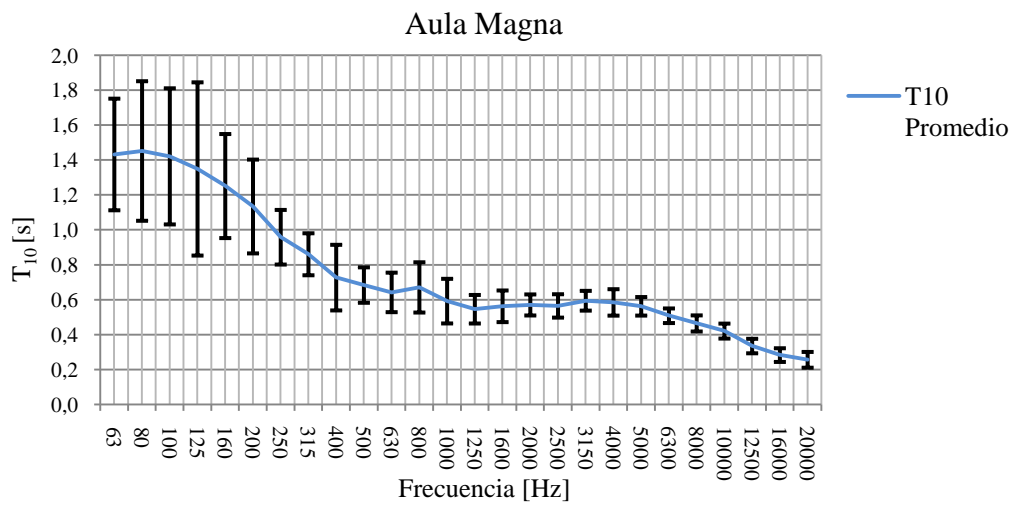


Figura 13: A Magna, tiempo de reverberación promedio y desviación estándar.

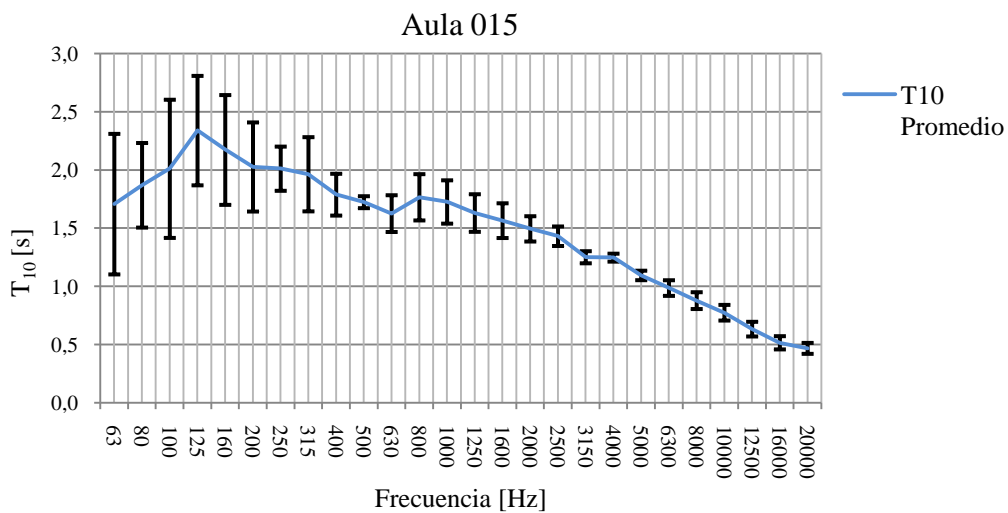


Figura 14: Aula 015 tiempo de reverberación promedio y desviación estándar.

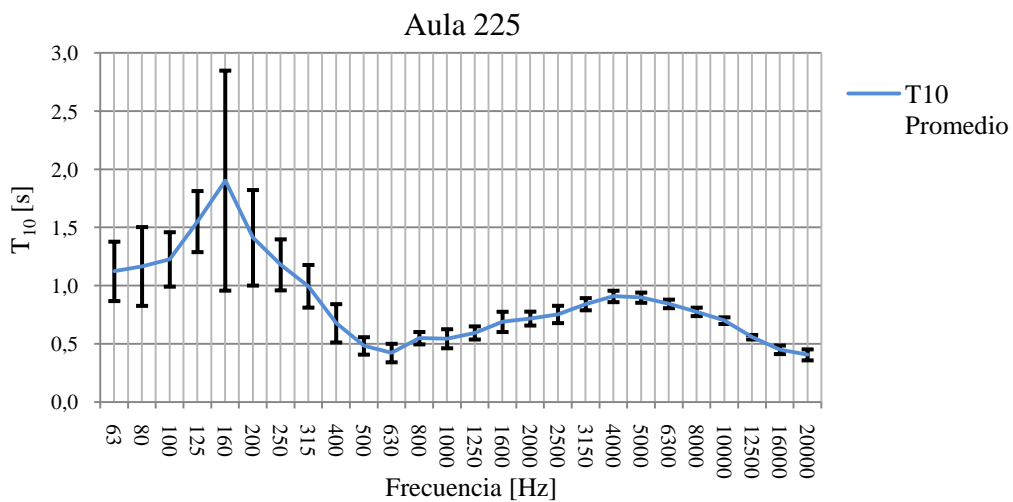


Figura 15: SUM, tiempo de reverberación promedio y desviación estándar.

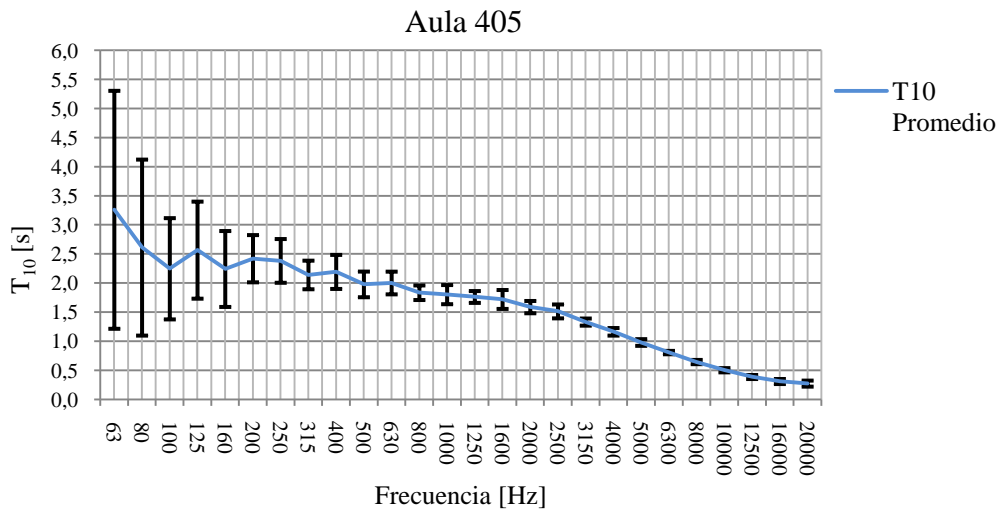


Figura 16: Aula 405, tiempo de reverberación promedio y desviación estándar.

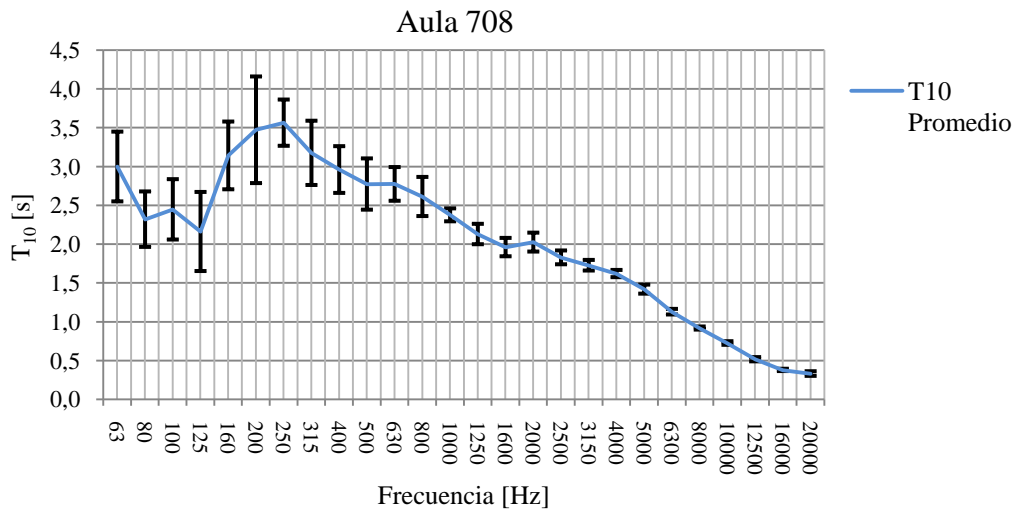


Figura 17: Aula 708, tiempo de reverberación promedio y desviación estándar.

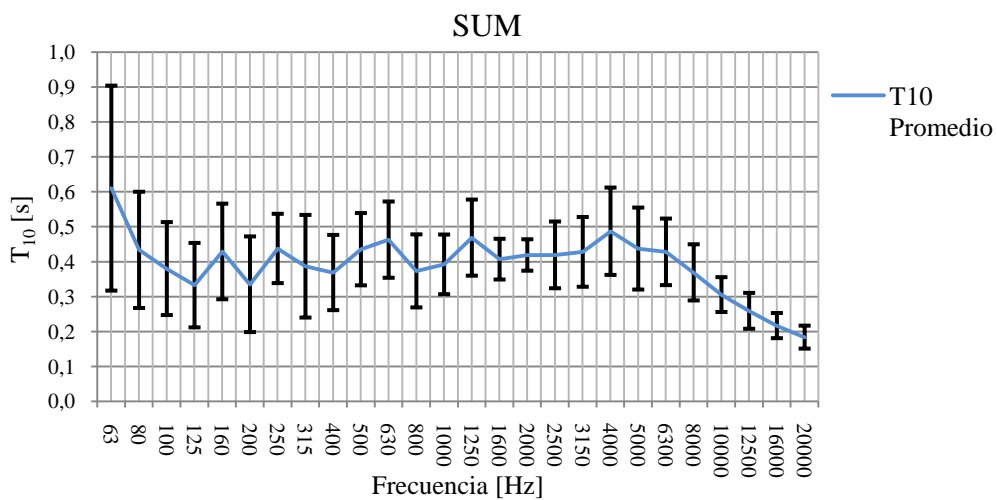


Figura 18: SUM, tiempo de reverberación promedio y desviación estándar.

A partir de estos descriptores estadísticos como, la media y la desviación estándar, es posible poner en evidencia las variaciones que sufre el tiempo de reverberación en las diferentes posiciones de medición. En las Figuras 10 a 17 se observa que la desviación estándar disminuye a valores bajos a medida que la frecuencia aumenta, en cambio en bajas frecuencias toma valores elevados en los 9 recintos.

En las tablas 2 y 3 se presenta valores del coeficiente de variación porcentual, CV%, el cual expresa la desviación estándar como porcentaje del promedio tiempo de reverberación en cada banda de frecuencia. En el caso del Aula 405, recinto que presenta el valor de CV% más elevado (63%) en la frecuencia de 63 Hz, se verifica que estos desvíos mantienen valores elevados por encima de la *Frecuencia de Schröder, f_s* (Schröder 1996) para este recinto (108,2 Hz). Esto ocurre de manera similar en todos los recintos estudiados, donde por encima de la f_s se verifican desvíos muy superiores al 5%.

Recinto	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000
Aula 011	23%	14%	18%	43%	16%	25%	11%	20%	17%	18%	22%	15%	13%
Aula 015	35%	19%	30%	20%	22%	19%	9%	16%	10%	3%	10%	11%	11%
Aula 154	33%	24%	29%	52%	20%	35%	24%	17%	20%	27%	18%	19%	23%
Aula 225	23%	29%	19%	17%	50%	29%	19%	18%	24%	15%	19%	10%	15%
Aula 608	30%	18%	29%	19%	14%	11%	12%	7%	13%	8%	6%	5%	6%
Aula 708	15%	15%	16%	24%	14%	20%	8%	13%	10%	12%	8%	10%	4%
Aula 405	63%	58%	39%	32%	29%	17%	16%	11%	13%	11%	10%	7%	9%
A. Magna	22%	28%	27%	37%	24%	24%	16%	14%	26%	15%	18%	21%	22%
SUM	48%	38%	35%	36%	32%	41%	23%	38%	29%	24%	24%	28%	22%

Tabla 2. Coeficiente de variación porcentual (CV%)

Recinto	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	12500	16000	20000
Aula 011	14%	15%	9%	10%	6%	7%	8%	8%	7%	4%	5%	10%	6%
Aula 015	10%	10%	7%	6%	4%	3%	4%	7%	8%	9%	10%	11%	10%
Aula 154	11%	12%	14%	10%	10%	6%	9%	8%	9%	6%	9%	7%	7%
Aula 225	9%	13%	8%	10%	6%	5%	5%	4%	5%	4%	3%	8%	12%
Aula 608	9%	6%	8%	5%	4%	3%	4%	4%	4%	3%	6%	8%	7%
Aula 708	6%	6%	6%	5%	4%	3%	4%	3%	2%	3%	5%	4%	9%
Aula 405	6%	9%	7%	8%	5%	6%	6%	4%	6%	7%	9%	14%	19%
A. Magna	15%	16%	11%	12%	10%	13%	9%	8%	10%	10%	12%	14%	18%
SUM	23%	14%	11%	23%	23%	26%	27%	22%	22%	16%	20%	17%	18%

Tabla 3. Coeficiente de variación porcentual (CV%)

En la tabla 4, se presentan los valores calculados de la *frecuencia de Schröder* de cada recinto estudiado.

Recinto	Frecuencia de Shröder, f_s [Hz]
SUM	85,3
Aula 154	130,0
A. Magna	65,7
Aula 011	289,0
Aula 225	120,1
Aula 015	171,4
Aula 405	108,2
Aula 608	201,7
Aula 708	160,0

Tabla 4. Frecuencia de Schröder en Hz

5 CONCLUSIONES

Según los resultados presentados en la sección anterior se concluye que el tiempo de reverberación calculado en *banda anchap* presenta desviaciones del orden de la JND en 3 recintos, 4 recintos superan este valor y 2 están por debajo.

Por otra parte, según los *resultados espectrales* se concluye que el tiempo de reverberación es altamente dependiente de la posición de medición en bajas frecuencias presentando marcadas coloraciones provocadas por los modos propios de vibración (Ferreyra et al, 2012). En las tablas 2 y 3 para frecuencias menores a 1000 Hz el 45% de los puntos presenta un CV% con valores mayores al 20%.

En el caso particular del SUM analizado se observan desviaciones significativas que superan el 10% en todo el espectro de frecuencias, esto es debido al alto grado de difusión que posee el mismo. Cabe destacar que en éste recinto el tiempo de reverberación presenta valores por debajo de 0,6 s en todo el ancho de banda estudiado, por haber sido diseñada considerando diversos criterios acústicos y cumplimenta con lo establecido por diferentes normas y criterios a nivel internacional para este tipo de recinto (Cravero et al, 2013).

Finalmente, cabe mencionar que la muestra estudiada es representativa de una población de 78 recintos (Aulas ordinarias, Aula Magna y SUM de nivel universitario) de la Facultad Regional Córdoba de la Universidad Tecnológica Nacional, Republica Argentina.

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

- Cravero Gabriel A, Ferreyra Sebastián P, Flores Mario D, Budde Leopoldo, Hugo C Longoni, Ramos Oscar A, y Tommasini Fabián C. Medición y simulación de tiempo de reverberación y otros parámetros acústicos de aulas. *Mecánica Computacional* Vol XXXII, págs. 2889-2900. Mendoza, Argentina, 19 al 22 Noviembre 2013
- Ferreyra Sebastián P., Cravero Gabriel A., Flores Mario D., Budde Leopoldo., Hugo C Longoni, Ramos Oscar A., y Tommasini Fabián C. Análisis modal de aulas universitarias. *Mecánica Computacional* Vol XXXII. págs. 3978-3993. Mendoza, Argentina, 19 al 22 Noviembre 2013
- Ferreyra S. P., Cravero G. A, Ramos Oscar A., Tommasini, Fabián C., Araneda Mariano. Identificación y análisis de modos propios de recintos a partir de sus respuestas impulsivas. *Mecánica Computacional* Vol. XXXI, págs. 3969-3989. Actas del 10^{mo} Congreso Argentino de Mecánica Computacional (Mecom2012). Salta. República Argentina. 13 al 16 Noviembre de 2012.
- IRAM 4109-2:2011 Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2 – Tiempo de reverberación de recintos comunes.
- ISO 3382-1:2009: Acoustics — Measurement of room acoustic parameters — Part 1: Performance spaces. ISO 3382-2:2008, Acoustics — Measurements of room acoustic parameters - Part 2: Reverberation time in ordinary rooms. 2008.
- Schroeder M., New method of measuring reverberation time, *Journal Acoustical Society of America*, 37:409-412, 1965
- Schroeder M., The Schroeder frequency revisited. *Journal Acoustical Society of America*, 99 (5) pp. 3240, 1996.