



Simulación Computacional de Recintos Arquitectónicos y Modelos Matemáticos V/S Condiciones Reales

G. Moreira L.^a, A. Ramírez F.^b

^a Ingeniero de Proyectos, Delta Ingeniería de Sonido y Acústica, +56 09 75802726, gmoreira@deltacustica.cl

^b Ingeniero de Proyectos, Delta Ingeniería de Sonido y Acústica, +56 09 99993253, aramirez@deltacustica.cl

Resumen

Un problema permanente en el diseño acústico de recintos o en su modelación computacional, es el margen de validez que tienen estas herramientas para realizar predicciones y en qué porcentaje de casos se alcanzan resultados estadísticamente válidos con respecto a las condiciones acústicas medibles en estos espacios arquitectónicos.

El objetivo de esta investigación es establecer los patrones óptimos al momento de realizar estos trabajos, además de comprobar que métodos obtienen los resultados más precisos. Para la obtención de estos se realizaron todas las mediciones acústicas y constructivas correspondientes de los recintos a analizar, y esto se contrasta con la simulación generada y los cálculos tradicionales. Los parámetros a comparar son tiempo de reverberación (RT60), inteligibilidad (RASTI/STI, %Alcons), análisis con teorías estadística, y ondulatoria, relación entre dimensiones, auralización de estos recintos, (por métodos de convolución), y parámetros de materiales constructivos, como absorción, difusión y scattering.

La importancia de este trabajo radica en la información que entrega a ingenieros proyectistas enfrentados a problemas reales, los cuales necesitan establecer criterios con altos niveles de precisión para sus diseños, especialmente en espacios reverberantes, o que deban ser acondicionados o requieran instalación de sistemas de sonido.

Conceptos Claves: Inteligibilidad, Reverberación, Modelación

■

1. Introducción

En el presente trabajo se establecen patrones de comparación para herramientas de diseño acústico de recintos. Se toman 3 modelos de recintos reales, para los cuales se diseñaron distintas soluciones electroacústicas. Los recintos escogidos son una sala de clases, una sala habilitada para danza y un auditorio / sala de concierto. Los patrones comparados son las formulas tradicionales para entender la reverberación y absorción en un recinto (Sabine, Eyring-Norris) que se pueden realizar tanto en un programa de modelación (en este caso Ease), como con las formulas tradicionales de cálculo, versus las mediciones in-situ realizadas.

Los patrones más importantes a obtener son los valores de RT60 e inteligibilidad, y con cual método se obtienen índices más aproximados a los que se pueden medir. De esta forma se recurrió a simulación por teoría estadística (distribución uniforme del material), geométrica y ondulatoria (análisis de modos normales) para el caso de los recintos más pequeños. Así mismo se realiza auralización de los recintos a partir de las respuestas impulsivas medidas y las que se generan computacionalmente.

De esta forma se obtienen conclusiones respecto de que métodos de diseño son más fiables, como influyen parámetros como absorción o scattering de materiales en estos cálculos, cuan eficientes son las predicciones, como influye la geometría y recomendaciones en el caso de instalar sistemas electroacústicos.

La utilidad de esta información está orientada a facilitar los criterios a considerar por ingenieros proyectistas, arquitectos y adicionalmente a diseñadores de software y algoritmos para optimización de cálculos.

2. Metodología

La metodología de trabajo se dividió en tres ejes centrales:

- Mediciones, toma de datos y condiciones de los recintos a modelar
- Calculo de variables y modelación
- Análisis de datos y conclusiones

En la primera etapa se realizaron mediciones de tiempo de reverberación de los locales a estudiar. Las mediciones se realizaron de acuerdo al protocolo ISO 3382, utilizando como fuente sonora una excitación por respuesta impulsiva. A partir de esta respuesta se obtiene, mediante convolución todos los parámetros asociados a la sala. Así mismo se realizaron medidas dimensionales de estos recintos, los materiales que la recubren, y las variables geométricas importantes.

Para la modelación computacional, se consideraron los coeficientes de absorción genéricos que entrega la base de datos de Ease y en el caso de no estar disponible se homologa según bibliografía. Estos valores son los mismos que se emplearon en las formulas de cálculo tradiciona-

les para uniformidad de criterio, lo que permite comparar en condiciones similares los métodos de predicción. En este caso, la diferencia en resultados obtenidos dependerá de los algoritmos específicos de cálculo del programa y de la ponderación que realice por reflexiones, geometría de las superficies y la exactitud de las dimensiones de volumen y superficies de los recintos. Los recintos a estudiar son; una sala de clases, una sala de auditorio y una sala de academia de danza. Se escogieron estos locales pues son lugares de trabajo habitual para acondicionamiento acústico. Sus características son las siguientes:

Caso N°1: Sala de clases

Este recinto es una sala de clases típica ubicada en el instituto profesional Santo Tomás, ubicado en Santiago, Chile. Este local posee una estructura geométrica aproximada a un paralelepípedo, con ciertas variaciones, presentando un volumen de 165.39 m³ y los materiales de las superficies se componen por:

Superficie	Material
Muros	Yeso-cartón / Pizarra
Cielo	Palmetas de Yeso-cartón
Suelo	Baldosa
Ventana	Vidrio

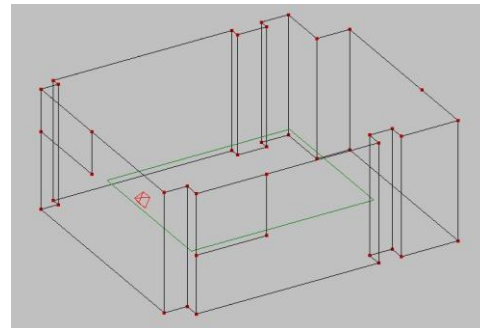


Tabla 2.1: Materiales existentes en recinto.

Figura 2.1: Vista 3D sala de clases modelada

Caso N° 2: Auditorios de la Universidad Metropolitana de Ciencias de la Educación (UMCE)

Esta sala cuenta con una geometría más compleja que la anterior, pues tiene cortes y variaciones entre alturas y profundidades. Su volumen es de 673,63 m³.

Superficie	Material
Muros	Concreto, cubierto con cortina y Alfombra
Cielo	Cielovit AC
Suelo	Alfombra
Ventana	Vidrio

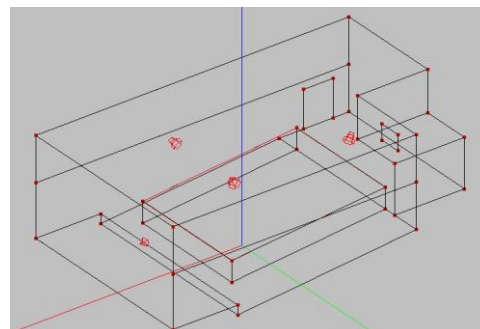


Tabla 2.2: Materiales existentes en recinto.

Figura 2.2: Vista 3D sala auditorio modelado

Caso N° 3: Sala para Danza

Este recinto es el más pequeño de todos los estudiados. Se encuentra ubicado en una academia particular, ubicado en San Felipe, Chile. Su volumen es de 93,4 m³.

Superficie	Material
Muros	Concreto, Vidrio
Cielo	Concreto
Suelo	Parquet

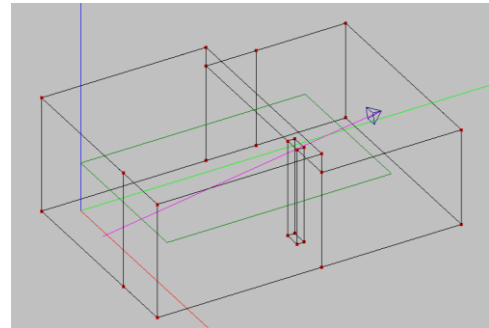


Tabla 2.3: Materiales existentes en recinto

Figura 2.3: Vista 3D sala de danza

El análisis de los datos se realiza obteniendo los valores medidos en las respuestas impulsivas. Así mismo se realizan los cálculos con las modelaciones en EASE y para cada frecuencia, en bandas de 8va de 125 [Hz] a 4 [KHz]. Los parámetros comparados fueron:

- T30 Eyring-Norris (2.1) / Sabine (2.2)
- STI (2.3)
- RASTI
- %ALCONS

Para el cálculo del tiempo de reverberación e inteligibilidad, se ocuparon los siguientes modelos matemáticos en cada banda de frecuencia, con cada coeficiente de absorción correspondiente.

$$RT = 0,16 \cdot \frac{V}{A} \quad (2.1)$$

Tiempo de reverberación según Sabine

$$RT = \frac{0,16 \cdot V}{-\ln(1-\alpha)S_{tot} + 4mV} \quad (2.2)$$

Tiempo de reverberación según Eyring-Norris

$$STI = \frac{\left(\frac{S}{N}\right)+15}{30} \quad (2.3)$$

Índice de transmisión del sonido (STI) según Houtgast-Steeneken

Los pasos para calcular el RASTI (Rapid Sound transmission index) son considerar un número menor de frecuencias moduladas y de bandas de 8va, considerando solo 500 [Hz] y 800 [HZ], para la formulación matemática.

$$\%ALCONS_{@2Khz} = \frac{200 \cdot r^2 \cdot T^2}{V \cdot Q} \quad (2.4)$$

Porcentaje de pérdida de consonantes

Para el análisis en baja frecuencia (modos normales) de los dos recintos más pequeños se realizó una predicción según criterio de Bonello, que tomando las dimensiones de los ejes (X, Y, Z) del recinto, calcula la distribución espacial de estos modos entre 1 [Hz] y 400 [Hz]. Solo se consideran los dos recintos más pequeños, pues la degeneración modal en un recinto suele desaparecer en espacios de tamaño mayor.

Las respuestas impulsivas fueron analizadas mediante un análisis convolutivo, y de estas se extrajeron parámetros adicionales a RT, STI, RASTI o %Alcons, como ITDG y EDT.

Adicionalmente, se realizó un proceso de auralización con las respuestas impulsivas. Con estos se procesaron archivos sonoros registrados en condiciones anecóicas para obtener la respuesta de frecuencia de los recintos analizados. Esta auralización fue contrastada con la que realiza el programa Ease. Para el cálculo del RT60 en software, se considero como fuente sonora un altavoz con patrón polar omnidireccional, ubicado en la misma posición que se efectuaron las mediciones en terreno.

3. Resultados

Los resultados tanto de las mediciones realizadas **(a)**, como de los cálculos realizados por aproximaciones de Sabine **(b)** y Eyring-Norris **(c)** y además de los modelos de diseño mediante software **(d)**, para Tiempos de reverberación, %Alcons, STI y RaSTI, los cuales se expresan para cada sala en las siguientes tablas y gráficos comparativos:

Caso N°1: Sala de clases

Frecuencia [Hz]	(a) ISO 3382 [seg]	(b) SABINE [seg]	(c) EYRING-NORRIS [seg]	(d) Software [seg]
125	0,983	0,63	0,55	0,57
250	1,502	0,77	0,69	0,62
500	1,766	1,3	1,23	0,83
1000	1,629	1,94	1,87	1,21
2000	1,687	2,19	2,12	1,36
4000	1,333	1,98	1,91	1,06

Tabla 3.1.- Valores comparativos de RT [s]

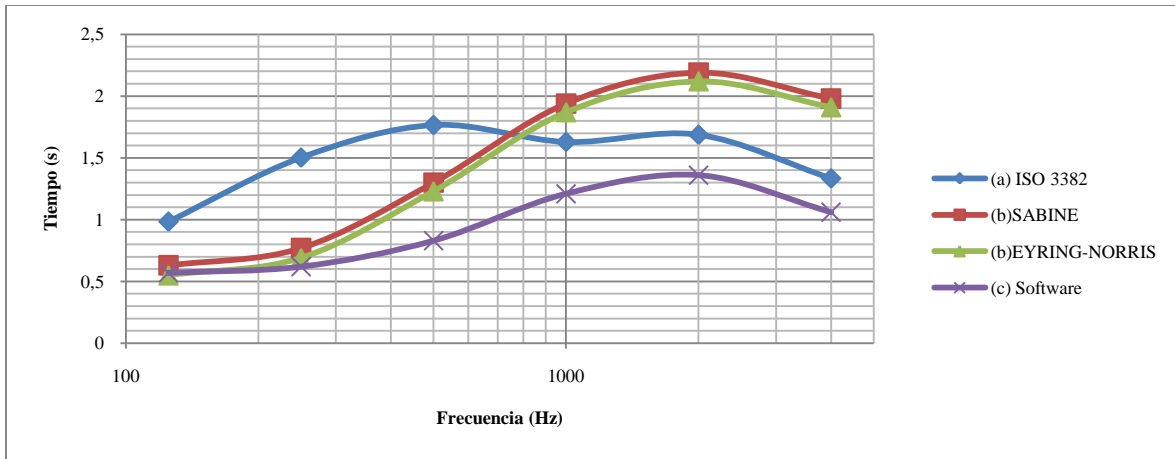


Figura 3.1.- Grafica comparativa de RT60 [s]

Procedimiento	RASTI	STI	% ALCONS	T30 MID [seg]
MEDIDO	0,46	0,49	11,8	1,69
CALCULADO	0,47	0,46	14,56	1,62
EASE	0,58	0,638	5,88	0,95

Tabla 3.2.- Comparación de T30Mid y parámetros de inteligibilidad.

Caso N° 2: Auditorios de la Universidad Metropolitana de Ciencias de la Educación (UMCE)

Frecuencia [Hz]	(a) IN-SITU [seg]	(b) SABINE [seg]	(c) EYRING-NORRIS [seg]	(d) Software [seg]
125	1,14	1,48	1,38	1,15
250	1,01	0,9	0,8	0,83
500	0,88	0,94	0,84	0,65
1000	0,54	0,65	0,55	0,51
2000	0,39	0,49	0,38	0,42
4000	0,39	0,35	0,24	0,3

Tabla 3.3.- Valores comparativos de RT60 [s]

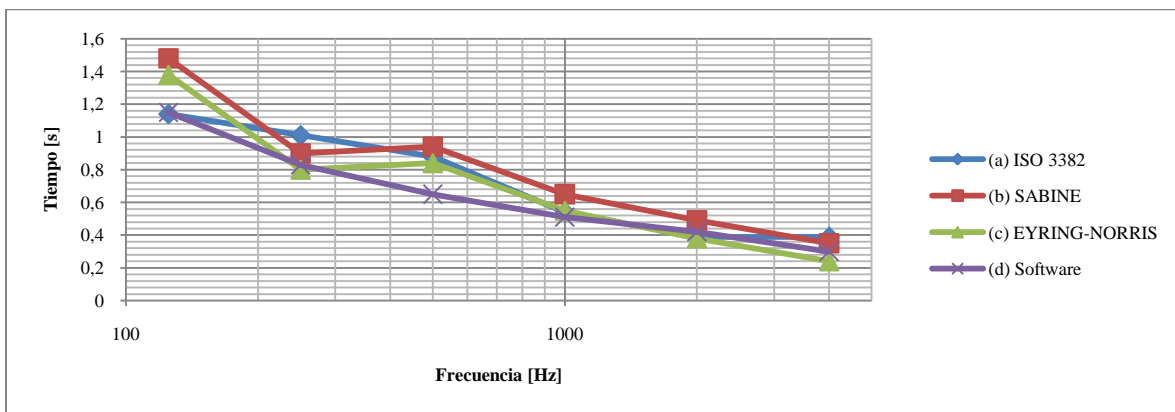


Figura 3.2.- Grafica comparativa de RT60 [s]

Procedimiento	RASTI	STI	% ALCONS	T30 MID
MEDIDO	0,71	0,65	4,1	0,6
CALCULADO	0,72	0,73	3,8	0,8
EASE	0,74	0,74	3	0,6

Tabla 3.4.- Comparación de T30Mid y parámetros de inteligibilidad

Caso N° 3: Sala para Danza

Frecuencia [Hz]	(a) IN-SITU [seg]	(b) SABINE [seg]	(c) EYRING-NORRIS [seg]	(d) Software [seg]
125	0,86	1,19	1,14	0,62
250	1,36	1	0,95	1,15
500	1,45	1,33	1,28	1,41
1000	1,9	1,42	1,37	1,73
2000	2,04	2,04	1,99	2,42
4000	1,6	1,48	1,43	1,71

Tabla 3.5.- Valores comparativos de RT60 [s]

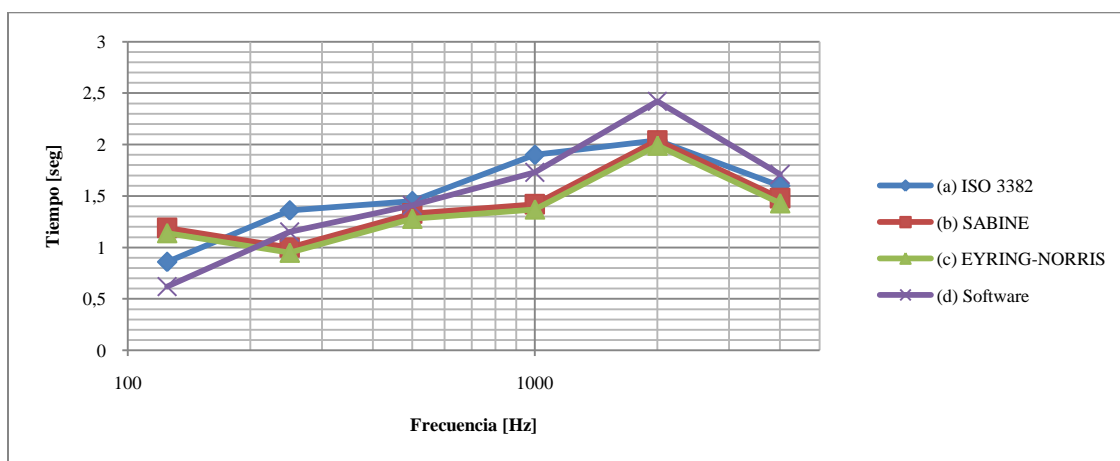


Figura 3.2.- Grafica comparativa de RT60

Procedimiento	RASTI	STI	% ALCONS	T30 MID [seg]
MEDIDO	0,45	0,54	13,85	1,74
CALCULADO	0,46	0,46	14,92	1,37
EASE	0,467	0,53	9,61	1,51

Tabla 3.6.- Comparación de T30Mid y parámetros de inteligibilidad

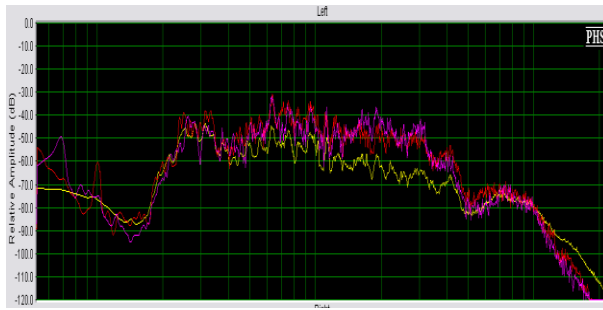


Figura 3.3: Análisis auralización sala de danza.

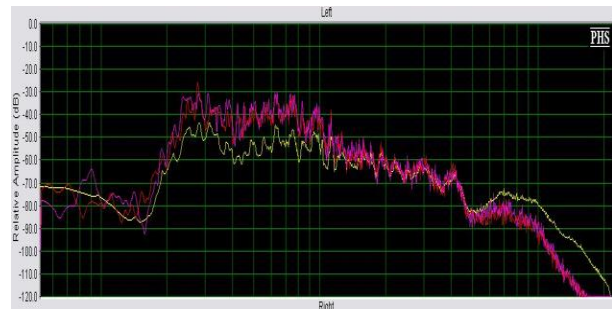


Figura 3.4: Análisis auralización sala de clases.

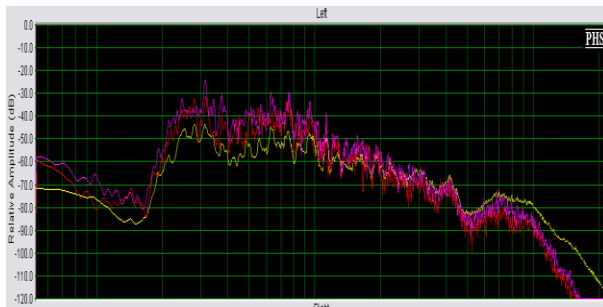


Figura 3.5: Análisis auralización auditorio.

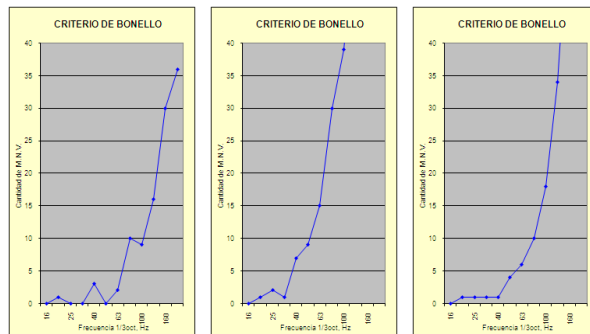


Figura 3.6: Análisis de salas por Criterio de Bonello

4. Discusión

De la información recabada y clasificada como relevante es posible considerar que las predicciones que se realizan en diseño acústico tienen una validez muy alta. Con respecto a la certeza en el cálculo de RT60, considerando los mismos materiales y dimensiones, la precisión en el rango de frecuencias medias-altas presenta aproximaciones importantes, lo cual se hace más evidente en los cálculos con las formulas tradicionales. La fiabilidad de estos modelos decae en frecuencias bajas (atribuibles a la longitud de onda) y altas (velocidad de propagación en la frontera del material), situación que se hace notoria en recintos más reverberantes y pequeños. La disparidad que se presenta en los resultados obtenidos entre el software y las aproximaciones tradicionales se estiman en las condiciones de cálculo. Los modelos de Eyring-Norris y Sabine trabajan sobre dimensiones de recintos simétricos, en contraposición con la simulación computacional. Así mismo estos modelos carecen de ponderación por reflexiones y las complejidades dimensionales de los recintos, como variables, lo cual lo aleja de la realidad arquitectónica. Si el recinto analizado es considerado reverberante y de dimensiones reducidas, es posible establecer como más exacta la aproximación de Sabine. En caso de tener tiempos de reverberación pequeños y las dimensiones mayores, el modelo de Eyring-Norris es mucho más eficaz. El siguiente problema encontrado tiene que ver con la uniformidad de criterios al momento de elegir los materiales para recubrir los recintos. La mayor parte de la literatura técnica (generalmente anglosajona) se refiere a materiales medidos no idénticos a los encontrados habitualmente. Los resultados, basados en la

base de datos del software, son muy precisos, pero este ejercicio se vuelve más confiable si existe un listado homologado por fabricantes de materiales constructivos disponibles en el mercado respectivo. Respecto a considerar el scattering de un material en estas evaluaciones, es muy poca la información existente en este tema, pero en la práctica, notamos que la influencia no es estadísticamente importante si las variaciones dimensionales no son mayores a 5 [cm] como mínimo. De hecho, considerando este parámetro en la simulación computacional y analizando sus resultados no se aprecian variaciones determinantes. Utilizando distintas configuraciones de la ubicación del material absorbente, no se encontraron cambios notorios, lo que indica que estos locales son generalmente “absorbentes” o “reflectantes”, en ningún caso difusos. Con respecto a las predicciones por inteligibilidad, la confiabilidad también es alta, específicamente con los modelos matemáticos clásicos. Esta situación se explica puesto que la fuente sonora utilizada en Ease es totalmente omnidireccional, con igual SPL en todas las frecuencias, situación que no es capaz de homologar la fuente impulsiva utilizada en las mediciones. Se sabe que el análisis de recintos en baja frecuencia (modos normales de vibración) es válido en recintos de dimensiones reducidas. En todos los recintos modelados se realizó este procedimiento y como era esperable, las salas de clases y danza tienen problemas de degeneración modal. Esto se realizó mediante análisis de Bonello y luego se corroboró con el análisis espectral realizado a los archivos. En las figuras 3.3, 3.4 y 3.5 se observa la respuesta de color amarilla como el archivo original y el resto son las respuestas auralizadas por convolución, apreciándose claramente los efectos del recinto.

5. Conclusiones

- Los modelos matemáticos tradicionales son altamente eficientes en su predicción de reverberación en un recinto. Esto se hace notorio en frecuencias medias-altas. (500 [Hz] - 8000 [Hz]).
- En salas grandes, y con mayor cantidad de material absorbente, Eyring-Norris exhibe mejores resultados, situación contraria a recintos pequeños y reverberantes, donde Sabine obtiene mejores resultados
- En términos de este estudio también se utilizaron en una primera etapa otros modelos matemáticos, como las aproximaciones de Millington-Sette, Kuttruff, y Kosten, pero no muestran mejores resultados que los anteriores, por lo que se omitieron de este trabajo.
- La simulación computacional es muy precisa, pero no muestra resultados tan exactos si la sala tiene un volumen pequeño, inferior a 200 m³. En el caso de que se diseñe un acondicionamiento acústico, es conveniente “calibrar” la sala modificando sus materiales, con un margen de tolerancia no superior al 20 %, en casos de recintos ya existentes o en etapa de diseño, pues este es el rango de tolerancia común en simuladores computacionales, y es la diferencia que observamos en este estudio.
- Para recintos con geometrías complejas, la modelación computacional es superior al método clásico.
- En etapa de diseño, en el caso de recintos pequeños, deben evitarse dimensiones de múltiplo común para evitar o minimizar la influencia de modos normales de vibración.

- Los indicadores STI y RASTI se muestran como mejores indicadores de la calidad acústica subjetiva en un recinto, pues consideran un mayor número de frecuencias respecto del %AICons, que suele calcularse para 2000 [Hz].
- La auralización de respuestas impulsivas mediante técnicas de convolución no solo sirve para obtener la “respuesta sonora” de un recinto. También puede utilizarse, mediante análisis espectral, para estudios en baja frecuencia, aumento de nivel de presión sonora, Localización del decaimiento sonoro en función del tiempo y la posición del auditorio, entre otros. Estos estudios son material para un siguiente trabajo de investigación.

Referencias Bibliográficas

Arau, H. (1999). *ABC Acústica Arquitectónica*. Editorial Ceac, Primera edición.

Trevor J. Cox, D'Antonio P. (2004). *Acoustic Absorbers and Diffusers. Theory, Design and application*. Spon Press, First Edition.

Alton, Everest F. (2001). *Master Handbook of Acoustics*. Mc Graw Hill, Fourth edition.

Kuttruff, H. (2000). *Room Acoustics*. Spon Press, Fourth edition

ISO 3382 (1997). *Acoustic, Measurement Time in Auditoria*. International Organization for Standardization.

Collarte P. (2004). *Sistemas de Sonorización en Espacios Altamente Reverberantes*. Encuentro AES Chile 2004.