

Determinación de diferencia por simplificación de diseño de salas en predicciones computacionales con técnicas de acústica geométrica

G. Moreira.^a

*^aÁrea de Proyectos, dBA Ingeniería Limitada. Francisco Javier 468, Santiago, Chile,
germanmoreira04@gmail.com*

RESUMEN: Actualmente la mayor parte del diseño acústico se realiza con programas computacionales que son capaces de realizar predicciones del comportamiento que tendrá el sonido en distintos recintos y ambientes. Para diseño de salas, las técnicas más utilizadas son los métodos por fuente imagen (Mirror Image) y trazado de rayos (Ray Tracing), que tienen rangos de eficiencia acotados por distintas condiciones físicas y conceptuales. Así mismo, los modelos arquitectónicos de una sala usados para acústica computacional suelen tener varias simplificaciones de dibujo y diseño respecto de los recintos reales, por distintas razones. El objetivo de este estudio es determinar las diferencias acústicas entre los valores medidos en un recinto real y los modelos proyectados, tanto idéntica (o muy similar) al recinto, como con simplificaciones acotadas y justificadas. De esta forma se busca establecer las ventajas y desventajas de las simulaciones computacionales y que técnicas de acústica geométrica son más eficientes considerando estos factores.

KEYWORDS: Ray tracing, Mirror image, acústica computacional, acústica de locales, parámetros acústicos.

1. Introducción

En el presente trabajo se realiza un análisis comparativo entre la eficiencia de la predicción utilizando métodos de acústica geométrica (Mirror image y Ray tracing) para salas que han sido analizadas y modeladas con simplificaciones en sus características constructivas.

Las técnicas de acústica geométrica computacionales son ampliamente utilizadas para predicción de campo sonoro y también como un buen complemento a la teoría estadística de Sabine, Eyring – Norris, y sus distintas derivaciones.

La técnica mirror image es usada generalmente en salas con superficies rectas y planas, para el modelado de reflexiones especulares. El principio de funcionamiento de esta técnica se basa en que las distintas reflexiones sonoras en las paredes son generadas por fuentes sonoras imagen que se encuentran simétricamente posicionadas respecto de la fuente original. De acuerdo a esto, la fuente sonora se sitúa frente a una pared rígida, que a su vez genera una onda reflejada cuya dirección e intensidad son idénticas a las de una onda directa creada por una fuente imaginaria situada al otro lado de la pared, y que empezó a emitir en el mismo instante que la fuente real. Para realizar estos cálculos es necesario considerar la absorción propia del muro, pues cada reflexión que se genere a partir la primera, se verá disminuida en cuanto a su intensidad. Esta técnica permite el uso de múltiples fuentes imagen, con las limitantes del coste computacional y del tiempo de cálculo.

A su vez el trazado de rayos (ray tracing) es una técnica computacional que considera la difusión que se genera en cada reflexión en las distintas paredes de un recinto, lo cual implica que es preciso para frecuencias medias – altas (generalmente se considera valido determinar rango de eficiencia mediante la frecuencia de Schroeder) donde las longitudes de onda son pequeñas. En este método cada vez que un rayo se refleja en una superficie, se refleja a su vez en una nueva dirección, con una energía menor determinada por el coeficiente de absorción que tenga la superficie (s) de cada recinto. De esta forma es posible determinar y trazar la trayectoria de un rayo hasta que su energía sonora se extinga. Así, se puede calcular el tiempo requerido que tarda en extinguirse el sonido o tenga un valor lo suficientemente pequeño para obtener el tiempo de reverberación.

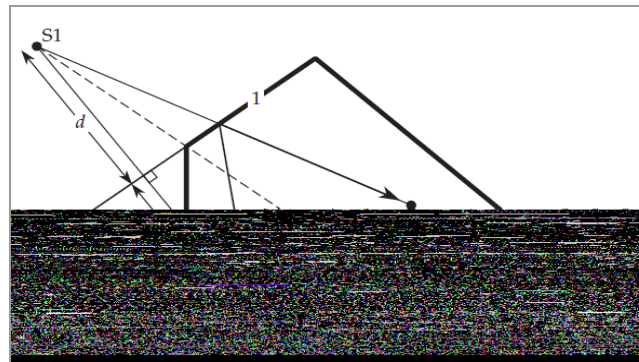


Figura 1.- Esquema referencial Fuente - Imagen “Mirror image”.

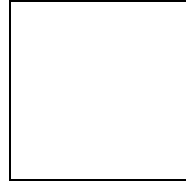


Figura 2.- Esquema referencial método trazado de rayos “Ray tracing”.

Por otro lado, las simplificaciones al modelar la arquitectura de una sala para la obtención de sus parámetros acústicos son de uso común, pues se estima que ciertas condiciones arquitectónicas no influyen mayormente en las predicciones del campo sonoro. Esto se asume generalmente por la longitud de onda del rango de frecuencias que se consideran importantes para el análisis acústico y por la validez práctica de dibujar idéntica una sala considerando el beneficio acústico v/s los tiempos de trabajo y dificultad de diseño.

2. ANTECEDENTES Y METODOLOGÍA

2.1 Antecedentes del Recinto.

Para desarrollar este trabajo se escogió un recinto con geometría compleja, que sirve como punto de referencia para el estudio con técnicas computacionales de acústica geométrica. Este recinto fue diseñado con criterios específicos para tener el mejor confort acústico posible.

2.1.1 Descripción del Recinto: El recinto es el auditorio central del Instituto Santo Tomás San Joaquín (Santiago, Chile). Fue diseñado y construido para usos de presentaciones musicales, artísticas, ceremonias, conferencias, proyección de cine, entre otros. Por ello, sus características acústicas de diseño son muy precisas y específicas, considerando varios parámetros técnicos específicos del campo sonoro.

Superficie [m ²]	810,45
Volumen [m ³]	842,2
Asientos (Butacas)	170
Año de Diseño y Construcción	2012 – 2013
Arquitecto	Enrique Browne
Proyecto Acústico	Germán Moreira L / Alonso Ramírez F.

Tabla 1.- Tabla de información referencial del recinto.

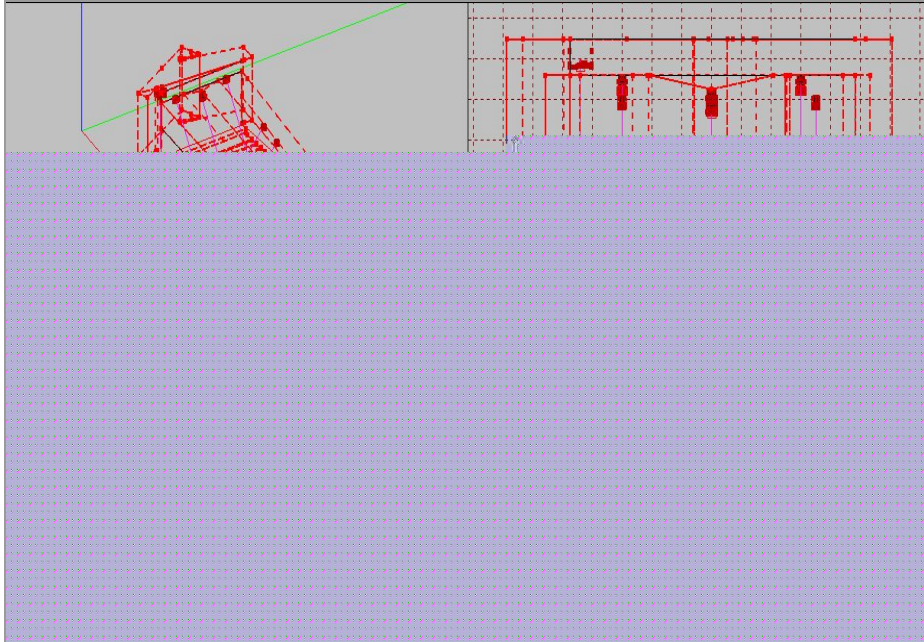


Figura 3.- Modelo arquitectónico para modelación de parámetros acústicos.

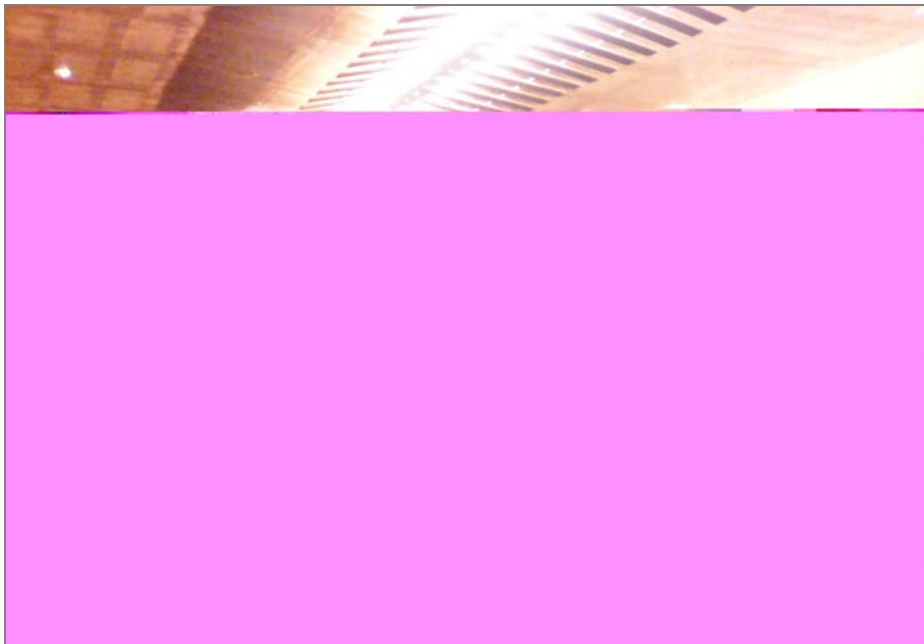


Figura 4.- Vista del recinto con construcción final.

2.2 Metodología

Para la realización de este trabajo se utilizó la siguiente metodología:

- Diseño del modelo arquitectónico en software CAD. (En base a espacio constructivo disponible) y establecimiento de objetivos acústicos en la modelación.
- Mediciones acústicas en la sala una vez construida, considerando varios parámetros propios de la acústica de salas como Tiempo de reverberación (T30), Inteligibilidad (STI), entre otros.
- Comparación de resultados obtenidos y análisis posterior.

2.3 Materiales Constructivos del Recinto

Piso (área audiencia)	Alfombra
Piso (área escenario)	Piso flotante
Cielo (área audiencia)	Revestimiento de madera ranurado
Cielo (área escenario)	Yeso cartón pintado
Muro (área audiencia)	Revestimiento de madera ranurado Ventana de vidrio (termopanel)
Muro (área escenario)	Revestimiento de madera ranurado Tabique yeso cartón

Tabla 2.- *Materiales constructivos en las superficies interiores del recinto.*

3. DESARROLLO

3.1 Resultados de Modelaciones en Diseño

De acuerdo a la modelación del recinto, se obtienen los siguientes valores para el tiempo de reverberación. Este modelo CAD tiene las siguientes simplificaciones propias de la etapa de diseño y proyecto.

- Butacas (No existía precisión ni del tipo ni de la cantidad de este elemento, ni sus características acústicas, como coeficiente de absorción)
- Variación cielo sector escenario (cambio de altura)
- Modificación en peldaños sector audiencia (no se precisaron dimensiones, solo se asignó coeficiente de absorción al material correspondiente y pendiente de nivel constructiva)

Frecuencia [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Tiempo [S]	0,61	0,65	0,55	0,62	0,66	0,33

Tabla 3.- *Tiempo de reverberación del recinto (modelación).*

3.2. Resultados de Mediciones Acústicas

Para la validación de los resultados, una vez construida la sala se realizó medición de parámetros acústicos del recinto de acuerdo a la metodología propuesta en la norma ISO 3382/97, con el método de respuesta impulsiva. Los resultados obtenidos son los siguientes.

3.2.1 Tiempo de Reverberación

Frecuencia [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Tiempo [S]	0,6	0,44	0,5	0,6	0,6	0,55

Tabla 4.- *Tiempo de reverberación del recinto (medición in situ).*

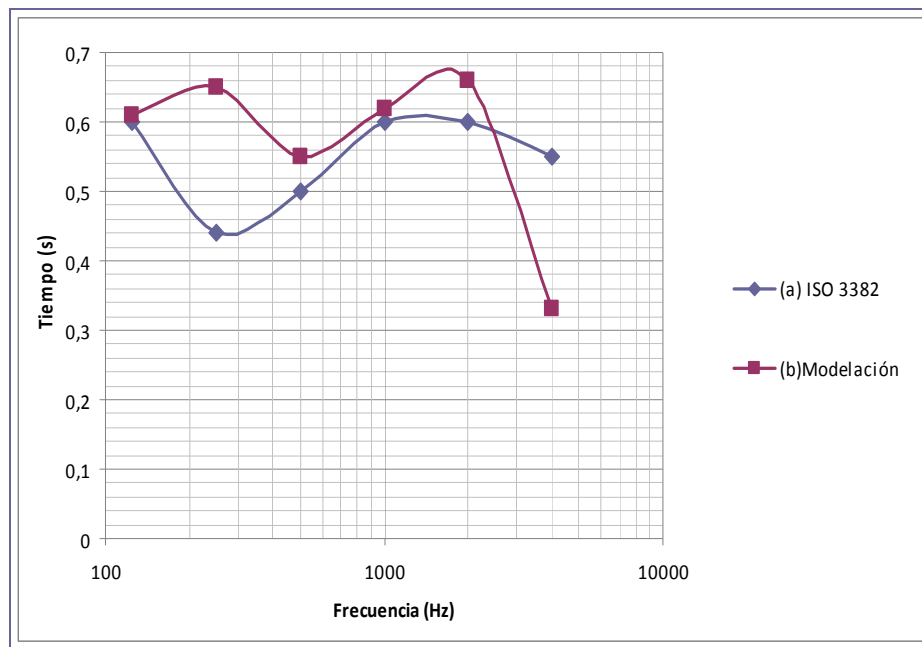


Gráfico 1.- *Comparación tiempo de reverberación medidos in situ y modelados.*

3.2.2 Parámetros Acústicos Generales

Parámetro (@ 2Khz)	STI	ITDG	C80	EDT
Medición	0,74	23 [ms]	6,8 [dB]	0,67 [s]
Modelación	0,741	15,12 [ms]	7,1 [dB]	0,69 [s]

Tabla 5.- *Comparación entre parámetros acústicos medidos in situ y modelados.*

4. DETERMINACIÓN DE RESULTADOS CON CAMBIOS EN SIMPLIFICACIONES DE MODELO ARQUITECTÓNICO CAD

El modelo acústico original fue calculado con método de teoría estadística (Eyring-Norris), pues solo se consideró necesario obtener el tiempo de reverberación considerando el volumen de la sala y la absorción sonora de sus superficies.

Para fines de este estudio, y poder predecir el campo sonoro de acuerdo a los métodos de acústica geométrica, al modelo arquitectónico se le realizaron las siguientes modificaciones:

- Inserción de butacas, considerando número, dimensiones, área a cubrir y especificaciones técnicas aproximadas.
- Peldaños en todo el sector del área de audiencia. Se consideró la altura y las dimensiones de esta superficie, además de las características del material.
- Se realizó cambio en la altura del cielo del sector escenario, pues este descendió aproximadamente 1 [mt].

De acuerdo a esto se obtuvieron los siguientes resultados de tiempo de reverberación:

Frecuencia [Hz]	ISO 3382	Modelación (Eyring-Norris)	Ray Tracing	Mirror Image
125	0,6	0,65	0,61	0,39
250	0,44	0,7	0,63	0,41
500	0,5	0,58	0,55	0,43
1000	0,6	0,69	0,62	0,45
2000	0,6	0,73	0,66	0,47
4000	0,55	0,47	0,31	0,43

Tabla 6.- Comparación entre resultados de tiempo de reverberación medidos in situ y modelados de acuerdo a técnicas de acústica geométrica computacional.

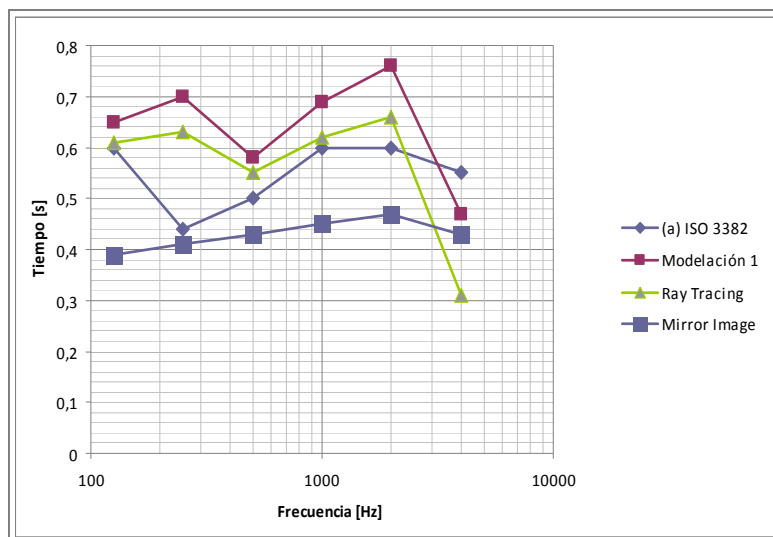


Gráfico 2.- Comparación tiempo de reverberación medidos in situ y modelados.

Respecto de otros parámetros acústicos relevantes, se realizó una predicción del comportamiento de la inteligibilidad en el recinto.

STI (Frecuencia [Hz])	125	250	500	1000	2000	4000
Ray Tracing	0,76	0,75	0,77	0,754	0,753	0,82
Mirror Image	0,68	0,66	0,69	0,67	0,66	0,76
Medición In Situ	0,82	0,79	0,76	0,71	0,77	0,73

Tabla 7.- Comparación entre resultados de inteligibilidad STI medida in situ y modelados de acuerdo a técnicas de acústica geométrica computacional.

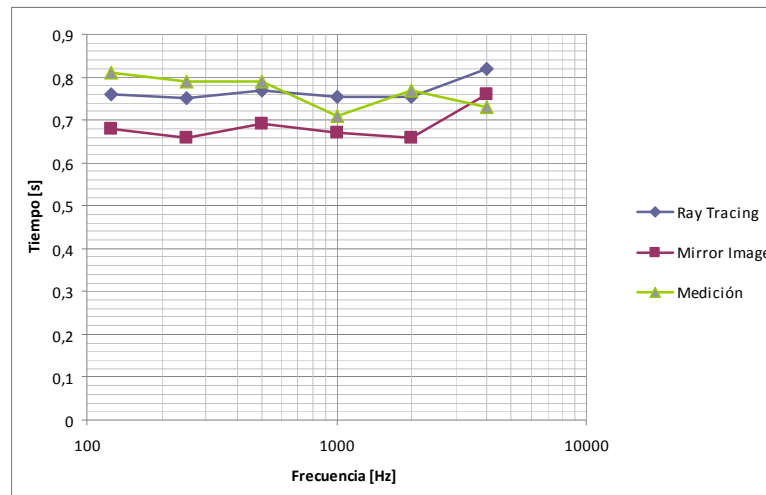


Gráfico 3.- Comparación entre resultados de inteligibilidad STI medida in situ y modelados de acuerdo a técnicas de acústica geométrica computacional.

5. ANÁLISIS DE DATOS OBTENIDOS

5.1. Análisis Generales

- Los coeficientes de absorción de los materiales empleados en la construcción de los recintos, no siempre son similares a los disponibles en las bases de datos o especificaciones técnicas de productos.
- Todos los modelos de predicción acústica, ya sean modelos estadísticos, ondulatorios o geométricos son aproximaciones al fenómeno de propagación sonora, pero no son exactos una vez que se comparan con resultados experimentales (estos también tienen un grado de incertidumbre en los resultados, producto del procedimiento e instrumental de medición)
- El modelo de predicción “ray tracing” fue más preciso en este estudio. Esto es atribuible al principio de funcionamiento de esta técnica, pues la geometría de esta sala tiene variaciones en sus distintas superficies y prácticamente no hay superficies paralelas en el recinto.

- El modelo “ray tracing” fue más preciso tanto en la predicción del tiempo de reverberación e inteligibilidad, superando a la técnica “mirror image” y a la tradicional predicción estadística de las ecuaciones de Eyring – Norris.
- Para el uso del trazado de rayos se consideró el uso de 10000 rayos por fuente sonora. Este valor se consideró válido y equilibrado en relación tiempo / coste computacional. No tuvo variaciones significativas respecto de modelar con 100000 rayos, pero el tiempo de cálculo fue considerablemente menor.
- El algoritmo “mirror image” no tuvo buen rendimiento en la predicción del campo sonoro, siendo no recomendable para una sala con geometría completa. La posibilidad de generar fuente – imagen simétrica fuera del recinto se complica en una sala de este tipo, donde no existe paralelismo entre las superficies.
- En frecuencias bajo los 500 [Hz] ambos modelos entregaron valores distintos de las mediciones (excepción en 125 [Hz], método de trazado de rayos). Esto es coincidente con el criterio de uso de estas técnicas, ya que en frecuencias donde la longitud de onda es mayor, es recomendable realizar análisis ondulatorio o considerar el margen de variabilidad al momento de diseñar un recinto.

5.2. Análisis Respecto de Simplificación del Modelo Arquitectónico

Considerando que este trabajo se realizó una vez construida la sala, existen antecedentes definitivos de las características del recinto. En concreto se obtienen los siguientes resultados:

- Existe mejor resultado añadiendo precisión al dibujo, es decir los parámetros obtenidos en la modelación con trazado de rayos es más precisa que si no se consideran las variaciones geométricas de las superficies.
- Este resultado es más claro en frecuencias entre los 500 y 2000 [Hz].
- Se recomienda que el modelo CAD de un recinto sea lo más preciso posible, considerando que las simplificaciones que se mantuvieron respecto del modelo original fueron aplicadas solo a superficies con variaciones inferiores a [10 cm], y no en el sector donde se ubicará el público objetivo. Este es un buen criterio básico, asumiendo las longitudes de onda de las frecuencias altas, que es donde se encuentra la inteligibilidad de la palabra.
- La precisión aumentó en el sector de audiencia de público, y esto debe ser tomado en cuenta para proyectos de este tipo, pues en estos sectores es donde se obtuvo la mayor ventaja al corregir el modelo arquitectónico.
- Tomando el punto anterior, las simplificaciones del modelo, si no es posible evitarlas, es preferible realizarlas en sectores donde no se encuentre la audiencia, para no tener una predicción insuficiente del campo sonoro.
- También se debe considerar, que para el caso de este recinto específico, la sala tiene una gran cantidad de material absorbente y baja reverberación, lo cual simplifica la predicción. Es importante evaluar estos criterios para el caso de salas que tengan un caso opuesto.
- Para complementar este trabajo, sería importante realizar predicciones de campo sonoro en puntos específicos de un recinto y realizar las comparaciones correspondientes para evaluar los recintos considerando otros parámetros como EDT, ITDG y posibles focalizaciones de sonido.

6. CONCLUSIONES

Se concluye, que para el caso de una sala con geometría compleja, y sin superficies paralelas entre si, es superior la predicción realizada con el método de trazado de rayos respecto del método de fuente – imagen.

En el caso de simplificar los modelos arquitectónicos utilizados para predicción acústica, es preferible evitar este tipo de ajustes y dibujar la sala con la menor variación posible respecto del diseño original. En el caso de superficies de alta complejidad de dibujo, es preferible que estas simplificaciones se realicen en sectores alejados de la audiencia o se evite que estas variaciones sean de dimensiones que perjudiquen la predicción sonora considerando la relación frecuencia / longitud de onda.

Todos estos resultados se deben valorar en su medida, pues este trabajo no valida esta situación para recintos con tiempos de reverberación mayores. Para tener una mejor aproximación y una referencia valida es altamente recomendable realizar un cálculo estadístico del tiempo de reverberación esperable en el recinto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Recuero, M. “*Acondicionamiento acústico*”, 1ra edición Editorial Paraninfo Thomson Learning (2001)
- [2] Lacatis, R., Cerda, S., Giménez, A., Romero J. “*Comparación de los parámetros acústicos obtenidos mediante dos programas de simulación con modelos geométricos de diferente complejidad de una sala*”, Revista de acústica Vol 42, 1-2, 2011.
- [3] Arau, H. “*ABC de la acústica arquitectónica*”, Ediciones CEAC (1999).
- [4] Bastián, N. “*Comparación entre diferentes métodos de modelación del software EASE*”, Revista SONAC 2012.
- [5] Moreira G., Ramírez A. “*Simulación computacional de recintos arquitectónicos y modelos matemáticos v/s condiciones reales*”. Congreso Internacional de Acústica y Audio Profesional Ingeacus 2011.
- [6] Alton Everest, F., Polhmann, K. “*Master Handbook of Acoustics*”. Fifth edition, Mc Graw Hill (2009).
- [7] Carrión, A. “*Diseño acústico de espacios arquitectónicos*”. 1era edición, Ediciones UPC (1998).
- [8] ISO 3382. “*Acoustics – Measurement of the reverberation time of with reference to other acoustical parameters*”. International organization for standardization (1997).
- [9] Gerges, S.N.Y. & Arenas, J.P. “*Fundamentos y Control del Ruido y Vibraciones*”, 2da Ed., NR Editora, Florianópolis (2010).
- [10] Svensson, P. “*The early history of ray tracing in room acoustics*”, Norwegian University of science and technology (2008).
- [11] Allen, J., Berkley, D. “*Image method for efficiently simulating room acoustics*”. Acoustics research department, Bell Laboratories (1978).
- [12] Vörländer, M. “*Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm*”, Journal of acoustical society of America (1989).