



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS /
INGENIERÍA EN SONIDO Y ACÚSTICA

IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO PARA LA REPRESENTACIÓN
GRÁFICA DE LA DENSIDAD SUPERFICIAL DE ENERGÍA ACÚSTICA DE UN
RECINTO PARA EL SOFTWARE DE SIMULACIÓN NUMÉRICA ACÚSTICA
DE RECINTOS RAIOS.

Trabajo de Titulación presentado en conformidad a los requisitos establecidos
para optar por el título de Ingeniero en Sonido y Acústica.

Profesor Guía
Ing. José Francisco Lucio Naranjo, M.Sc.

Autor
Galo César Ortega Pulles

Año
2012

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos para un adecuado desarrollo del tema escogido, y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.”

Lucio, José Francisco
Ingeniero en Sistemas y Computación
Mestre em Modelagem Computacional (M.Sc.)
1707211742

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes”

Ortega, Galo

1003164462

RESUMEN

La presente tesis detalla el proceso realizado para implementar un módulo de simulación visual de la densidad superficial de energía acústica en el interior de un recinto mediante una gama de colores pintados sobre las superficies de contorno, simulado previamente en el simulador numérico de acústica de recintos *RAIOS*. Este módulo servirá para tener una idea global del comportamiento de la sala de manera que, al poder visualizar la distribución energética, se podrá determinar falencias que tendrá el recinto en estudio, así, se podrán plantear soluciones para su diseño y construcción, como el cambio de geometría o de materiales de construcción.

Además de tener una simulación visual de la densidad de energía acústica, también se incluirá la simulación visual de parámetros de calidad acústica, de manera que sea posible evaluar objetivamente el desempeño que tiene el recinto en estudio, dependiendo del uso que tenga; presentando así una herramienta mucho mas completa dentro del campo de la simulación numérica acústica.

ABSTRACT

The present thesis details the process realized to implement a module of visual simulation of acoustic energy superficial density inside the room using a range of colors painted on the contour surfaces previously simulated in the numerical malingerer of room acoustics RAIOS. This module will serve to have a global idea of the behavior of the room so, it will be able to visualize the energetic distribution, it will be possible to determine failings that the room in study will have; this way, they will be able to raise solutions for their design and construction, as the change of geometry or construction materials.

Besides, having a visual simulation of the density of acoustic energy, also there will be included the visual simulation of parameters of acoustic quality, so that it is possible to objectively evaluate the performance that has the room in study, depending on the use that it has; presenting in this way a very complete tool in the field of the numerical acoustic simulation.

ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Alcance	4
1.4. Justificación	4
1.5. Hipótesis	5
2. Marco Teórico	6
2.1. Campo sonoro en estado estacionario.....	6
2.2. Simulación numérica acústica de una sala	9
2.2.1. Características Generales	9
2.2.2. Parámetros acústicos relevantes.....	13
2.2.2.1. Absorción de materiales.....	13
2.2.2.2. Reflexión Especular y Difusa	14
2.2.2.3. Modos Normales de Vibración	15
2.2.3. Descriptores de Acondicionamiento Acústico	16
2.2.3.1. Nivel de Presión Sonora	16
2.2.3.2. Tiempo de reverberación	17
2.2.3.3. Tiempo de Decaimiento Temprano	19
2.2.3.4. Calidez Acústica.....	19
2.2.3.5. Brillo	20
2.2.3.6. Claridad Tonal.....	20
2.2.3.7. Curva de Barron.....	23
2.2.3.8. Curva de energía reflejada acumulada	23
2.2.3.9. Definición	24
2.2.3.10. Relación de las Primeras Reflexiones	25
2.2.3.11. Nivel sonoro del habla.....	25
2.2.3.12. Tiempo Central.....	26
2.2.3.13. Factor de Ganancia.....	26
2.2.3.14. Soporte Objetivo.....	27
2.2.3.15. Eficiencia Lateral	28
2.3. El código computacional RAIOS	29
2.3.1. Características Generales	29
2.3.2. Modelaje de fuentes sonoras.....	30

2.3.3.	Modelaje del campo acústico.....	31
2.3.3.1.	Matriz de transición	34
2.3.4.	Modelaje de las superficies de contorno de la sala	36
2.3.5.	Modelaje de receptores	37
2.3.6.	Resultados de la simulación	38
2.4.	Lenguaje de programación C++	40
2.4.1.	Acerca del Lenguaje	40
2.4.2.	Características Generales	41
2.4.3.	Comandos Básicos.....	43
2.4.3.1.	Sentencias	43
2.4.3.2.	Operadores Lógicos.....	46
2.4.4.	Open GL	47
3.	Desarrollo Computacional	49
3.1.	Diseño del Software	49
3.1.1.	Programación del módulo de densidad de energía acústica.	49
3.1.2.	Programación de respuestas impulsivas y parámetros de calidad acústica en las superficies de contorno.	53
4.	Descripción de un caso de estudio	54
4.1.	Análisis de la sala escogida.	54
4.2.	Representación de la sala dentro RAIOS.	66
4.3.	Configuraciones previas a la simulación.	68
5.	Análisis de resultados.....	69
6.	Conclusiones y Recomendaciones	89
6.1.	Conclusiones.....	89
6.2.	Recomendaciones.....	90
	Referencias	91
	Anexos	94

1. Introducción

1.1. Antecedentes

El acondicionamiento acústico de un local, consiste en conseguir un grado de difusión acústica uniforme en todos los puntos del mismo, es decir, un campo sonoro homogéneo. Con ello se pretende mejorar la sonoridad del recinto, aumentando el confort acústico dentro del mismo.

Para que una sala tenga un buen desempeño acústico, es necesario considerar ciertos puntos en su diseño, como por ejemplo:

- a) El tiempo de reverberación que es el tiempo que tarda la señal en decaer 60 dB dentro de un recinto una vez que la fuente dejó de radiar presión sonora.
- b) ITDG (*Initial Time Delay Gap*) o tiempo de pre-delay que es el tiempo que existe entre el sonido directo y la primera reflexión temprana.
- c) Difusión, se usa para lograr un espacio sonoramente homogéneo especialmente en frecuencias medias y altas mediante difusores.
- d) MNV (Modos Normales de Vibración) son frecuencias de resonancias propias de los recintos, particularmente significativas para bajas frecuencias.

Además de estas propiedades acústicas, dependiendo del uso que vaya a darse al recinto, se pueden emplear criterios de diseño para que exista un buen comportamiento acústico. Para el caso de obtener un campo sonoro homogéneo, es posible usar dos tipos de control:

- a) Absorciones de reflexiones tempranas en forma especular. Para este método de control se usan materiales absorbentes para altas frecuencias y resonadores para bajas frecuencias.

b) Direccionamiento de reflexiones tempranas. Para este método de control se emplean cambios en la geometría del recinto, logrando así que las reflexiones se orienten en otras direcciones para tener un campo sonoro homogéneo.

Gracias a los avances tecnológicos ha sido posible simular el campo sonoro de un recinto. Mediante simulación numérica acústica es posible modelar una sala dentro de aplicaciones computacionales, determinando la respuesta impulsiva entre una fuente sonora y un receptor, teniendo en cuenta fenómenos acústicos como la reflexión, difracción, difusión y absorción de ondas sonoras, entre otros. Estas aplicaciones han hecho posible mejorar el comportamiento de una sala, haciendo ajustes que mejoren su respuesta acústica aún antes de construirla.

A partir de esta idea, en 1991 se empezó a desarrollar un software de simulación numérica de acústica de recintos en la *Universidad Federal de Rio de Janeiro*, Brasil; este software fue denominado *RAIOS (Room Acoustics Integrated and Optimized Software)*. Este software ha tenido mejoras desde entonces implementando nuevos modelos acústicos además de optimizar los existentes.

En el año 2002, el código computacional *RAIOS* ya contaba con un modelo híbrido de trazado de rayos (EMBRECHTS, 1982) y transición de energía (ALARCÃO et al., 2000) para simulación del campo acústico, alcanzando la versión 3.0. En estas condiciones el software participó en el *Round Robin 3*, una competencia internacional de simuladores de acústica de salas. Los resultados finales determinaron que el código computacional *RAIOS* fue uno de los dos mejores programas existentes en el área de simulación de acústica de salas (TENENBAUM et al., 2006).

En los últimos años, el desarrollo del código computacional *RAIOS* pasó a manos del Laboratorio de Instrumentación en Dinámica, Acústica y Vibraciones (*LIDAV*) de la Universidad del Estado de Rio de Janeiro. Los investigadores del *LIDAV* implementaron varias mejoras al software, como

por ejemplo: el módulo de importación de archivos desde un software de diseño gráfico como *AUTOCAD*, implantación de una base de datos de materiales de las superficies de contorno con sus respectivos coeficientes de absorción y difusión, cálculo de niveles de presión sonora con curvas de ponderación, nuevos parámetros de calidad acústica y, quizás la mejora más relevante, la inclusión de un módulo de auralización a través de transformadas *WAVELETS* (TORRES, 2004). El código computacional *RAIOS* se encuentra, ahora, en su versión 5.0.

El código computacional permite simular la respuesta impulsiva cuadrática para cada fuente receptor en cualquier tipo de sala, sin importar su geometría.

Por todo lo anterior, considerando especialmente el punto avanzado en el que se encuentra el código computacional *RAIOS*, se pensó en generar un módulo que permita visualizar el comportamiento del campo acústico en las superficies de contorno del recinto para este software, para auxiliar a los diseñadores en la concepción y posterior construcción de cualquier tipo de sala.

1.2. Objetivos

Objetivo General

Diseñar un módulo para el software *RAIOS* que permita una representación visual de la densidad superficial de energía acústica de un recinto.

Objetivos específicos

- Visualizar mediante una gama de colores pintados sobre los elementos de contorno, la densidad superficial de energía acústica presente en una sala.

- Calcular parámetros de calidad acústica sobre las superficies de contorno.
- Visualizar mediante una gama de colores pintados sobre las superficies de contorno, los parámetros principales de calidad acústica.
- Implementar sobre el módulo a desarrollar otros parámetros de calidad acústica para la evaluación de la sala.

1.3. Alcance

El módulo a desarrollar va a mapear, mediante una gama de colores, la densidad superficial de energía acústica de un recinto y estará diseñado para trabajar sobre cualquier simulación acústica realizada dentro del código *RAIOS*. A partir de estos resultados, es posible también levantar la respuesta impulsiva cuadrática a partir de la cual se puede elaborar mapas de colores de parámetros de calidad acústica, de manera que se evidencie el comportamiento que la sala tendrá en base a parámetros como: T30, tiempo de decaimiento temprano, claridad musical, claridad de la voz, definición, tiempo central, soporte objetivo y factor de ganancia.

1.4. Justificación

La simulación numérica es una alternativa mucho más económica y completa (comparada con otras opciones, como por ejemplo el modelo reducido, en donde se usan modelos a escala y ultrasonido (VORLÄNDER, 2008)) permite determinar la respuesta impulsiva de una sala, a partir de la cual se pueden calcular datos que determinarán el comportamiento acústico de la misma. Las ventajas de un simulador se hacen evidentes cuando se desea alterar la geometría de la sala, probar otros materiales de construcción o hasta implementar difusores acústicos en lugares

estratégicos para ajustar el comportamiento acústico del recinto. Los lugares donde se podía hacer este análisis estaba restringido a los puntos donde existía un receptor (micrófono). Gracias a la distribución superficial energética visualizados como una gama de colores sobre los elementos de contorno del recinto, se abre la puerta para el cálculo de otros parámetros de calidad acústica, que también se pueden mostrar gráficamente, lo que permitiría tener una idea global del campo acústico, de manera que si existen fallas en el diseño de la sala, estas sean evidentes.

El módulo a implementarse estará basado en el código computacional *RAIOS* y constituirá una herramienta adicional que permitirá, después de ejecutada una simulación, identificar factores importantes a ser tomados en cuenta antes de construir un recinto. De esta manera se podrá asegurar que su funcionamiento futuro sea óptimo, contándose así con un espacio adecuado, que cumpla con las condiciones que se requieran.

1.5. Hipótesis

Es posible representar gráficamente, mediante una gama de colores, la distribución de energía acústica dentro de un recinto y en base a esta información, definir parámetros de calidad acústica.

2. Marco Teórico

2.1. Campo sonoro en estado estacionario

En un principio, el campo sonoro en un recinto se estudió a base de métodos estadísticos que son relativamente fáciles de implementar y que entregan resultados con un grado razonable de precisión. Uno de estos métodos consiste en dividir el campo sonoro en tres estados (CARRION, 1998; MÖSER, M.; BARROS, J. L., 2009.) como se muestra en la Figura 2.1.

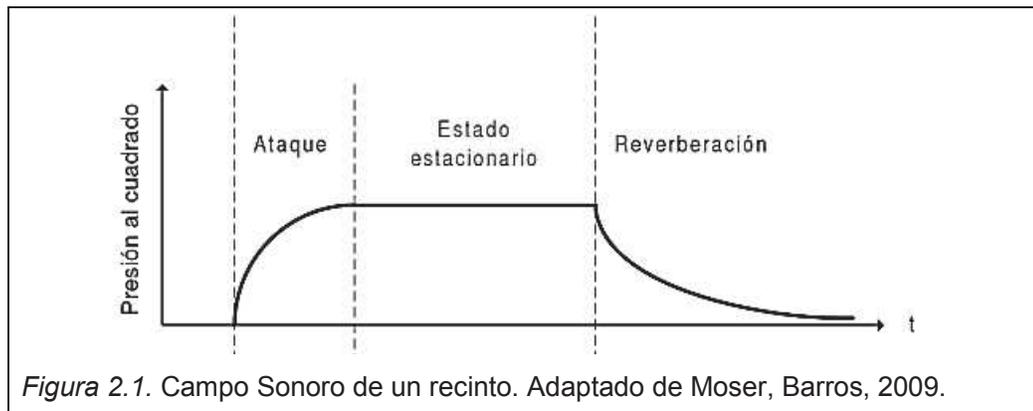


Figura 2.1. Campo Sonoro de un recinto. Adaptado de Moser, Barros, 2009.

Para analizar el campo sonoro dentro del recinto, basta con analizar el estado estacionario y el decaimiento, porque el ataque depende principalmente de las características de la fuente (potencia acústica y directividad) por lo tanto es irrelevante para el estudio del comportamiento del recinto.

Para determinar el campo sonoro, se realizaban varios ensayos usando ruido blanco y ruido rosa, en los cuales, se encendía la fuente sonora y se saturaba la sala con este ruido, tras llegar a este estado de equilibrio se apagaba la fuente para determinar el tiempo de reverberación. Esto se

repetía varias veces con el fin de obtener la curva de decaimiento (ISO 3382-1:2009, ISO 3382-2:2008).

El campo sonoro puede dividirse en dos campos, el *campo cercano* y el *campo lejano*.

En el campo cercano se cumple que en las cercanías de la fuente, la velocidad de las partículas no está necesariamente en la dirección de propagación, por lo tanto, la intensidad con la que radia de la fuente no es proporcional a la presión cuadrática, de manera que la intensidad no está en fase con la presión.

$$I \neq \frac{P^2}{\rho_0 c} \quad (2.1)$$

Donde:

$\rho_0 c$ es la impedancia característica del medio.

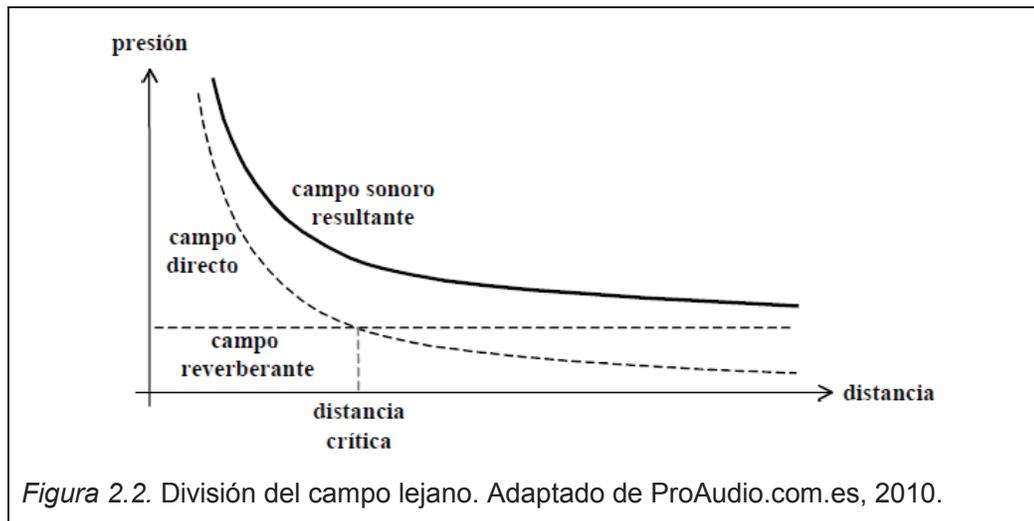
El campo lejano esta subdividido en dos campos; el campo directo y el campo reverberante. En campo directo se cumple que la presión del sonido directo es mayor que la presión del sonido reverberante y la propagación sonora se comporta de acuerdo a la ley del inverso cuadrático, la que establece que por cada vez que se duplica la distancia a la fuente, en NPS disminuye 6 dB. En campo directo se cumple además que la velocidad de las partículas está en la dirección de propagación y por lo tanto la intensidad sonora está en fase con la presión:

$$I = \frac{P^2}{\rho_0 c} = \frac{W_{ac} Q}{4\pi r^2} \quad (2.2)$$

Donde:

W_{ac} es la potencia acústica de la fuente, Q es el factor de directividad de la fuente y r es la distancia entre la fuente y el receptor.

En campo reverberante, la presión del sonido directo es menor que la del sonido reverberante. Este campo se origina a consecuencia de las múltiples reflexiones que se producen dentro del recinto, y debido a esto, la energía de este campo parece decaer de manera lineal. Un caso particular de campo reverberante es el campo sonoro difuso, que es aquel donde las reflexiones tienen la posibilidad de viajar en todas las direcciones, por lo tanto, es imposible localizar auditivamente la procedencia de la fuente ($I = 0$).



La ecuación (2.2) puede ser expresada en términos generales como:

$$I = \frac{P^2}{\rho_0 c} = \frac{W_{ac}}{A} \quad (2.3)$$

La presión cuadrática puede relacionarse con la potencia acústica de la fuente de la siguiente manera:

$$P^2 = \frac{W_{ac} \rho_0 c}{A} \quad (2.4)$$

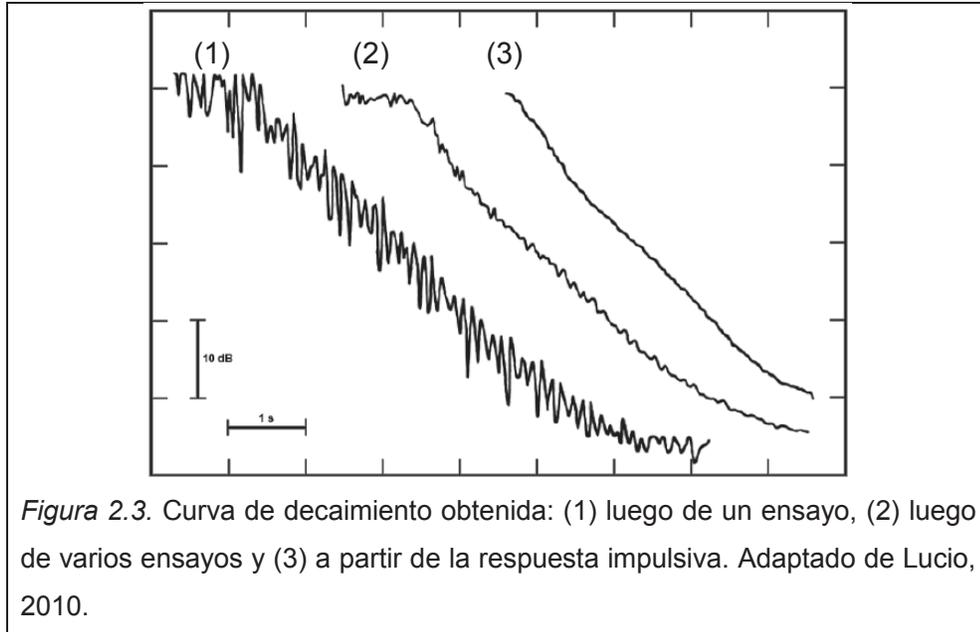
2.2. Simulación numérica acústica de una sala

2.2.1. Características Generales

Como se mencionó en el apartado anterior, la simulación numérica acústica de una sala implica el modelamiento de fuentes sonoras, receptores, superficies de contorno y para la simulación se deben tomar en cuenta fenómenos acústicos, tales como reflexión, difusión y absorción sonora dentro de un software. Mediante el uso de métodos numéricos ha sido posible transportar la realidad física al lenguaje de las computadoras.

Una simulación adecuada del campo acústico permitirá evaluar la funcionalidad de un recinto. Esto representa, una gran oportunidad para mejorar la calidad sonora de la sala y de optimizar los recursos disponibles. Para las salas existentes, la evaluación acústica dada por un simulador numérico permite, mediante diversos ensayos, identificar problemas acústicos con un costo relativamente pequeño. Por otra parte, mediante auralización, es posible simular la percepción humana de cualquier tipo de señal, pudiendo estar ser captada en varias partes de la habitación, proporcionando así una validación psicoacústica del diseño.

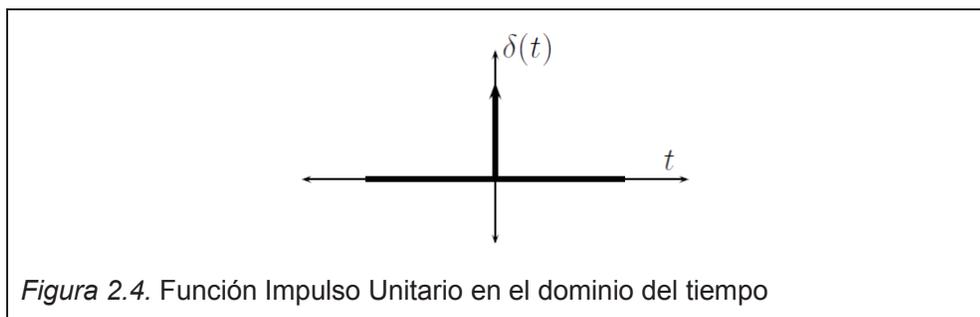
Schroeder (1965), demostró matemáticamente que con sólo una medición después de la excitar una sala con un impulso unitario, $\pm(t)$ y capturar la respuesta impulsiva, es posible obtener la curva de decaimiento de un sonido que había alcanzado el estado estacionario dentro de la sala. Lo anterior constituyó un importante progreso que reemplazó el método convencional de la época que consistía en realizar varios ensayos con ruido blanco (Figura 2.3.)



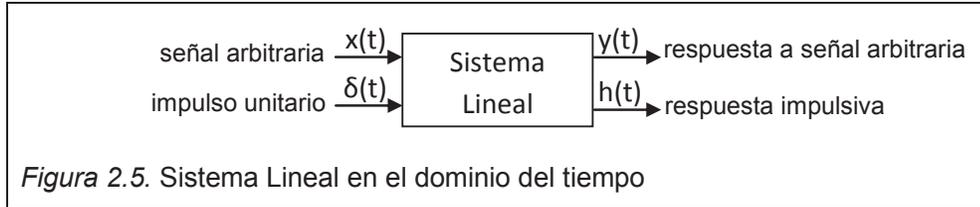
El procedimiento de Schroeder calcula la curva de decaimiento a partir de la respuesta impulsiva (respuesta al impulso unitario) mediante una integral invertida.

La función impulso unitario, también conocida como Delta de Dirac, es una función matemática definida de la siguiente forma:

$$\delta(t) \begin{cases} \infty \rightarrow t = 0 \\ 0 \rightarrow t \neq 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

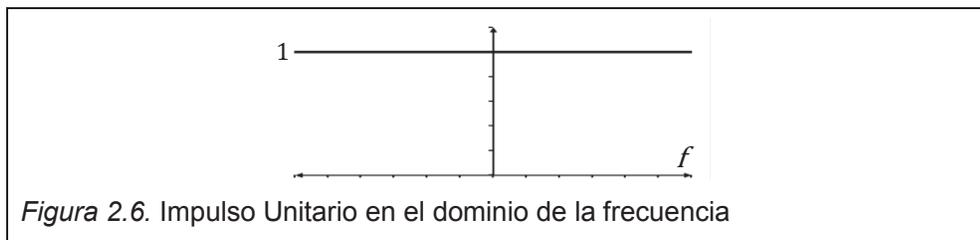


Esta función al ser sometida a un sistema lineal, nos da como resultado la respuesta al impulso unitario ($h(t)$).

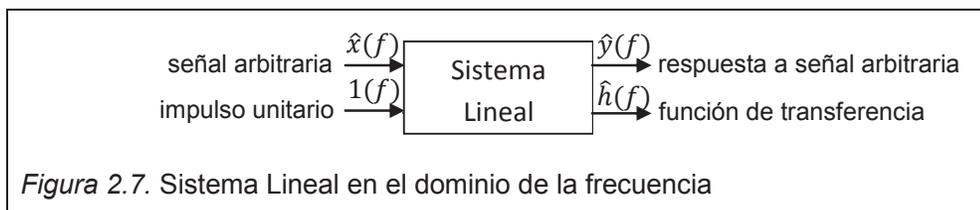


El impulso unitario al ser transferida al dominio de la frecuencia (via transformada de Fourier), se convierte en una función de tipo:

$$1(f) \quad (2.6)$$



Y al ser sometida al mismo sistema lineal da como resultado la función de transferencia.



Esta función, presenta el valor constante 1 en todo el espectro de frecuencia. Esto indica que, al excitar un sistema lineal con un Delta de Dirac, estamos excitando todas las frecuencias. Esta información se encuentra en la respuesta impulsiva.

Ahora, a partir de la respuesta impulsiva trasladada al dominio de la frecuencia (función de transferencia), usando el teorema de la convolución, es posible obtener la respuesta a cualquier señal que ingrese al sistema lineal.

$$y(t) = x(t) * h(t) \quad (2.7)$$

$$\hat{y}(f) = \hat{x}(f) \cdot \hat{h}(f) \quad (2.8)$$

Es por esta razón que es posible determinar el comportamiento de una sala ante cualquier señal usando simulación numérica acústica, ya que es simple generar un Delta de Dirac computacional y definirlo como la señal que la fuente emite. La señal que se capte en los receptores será la respuesta impulsiva. Aplicando a esta última la transformada de Fourier, se obtiene el comportamiento frecuencial de la sala y simplemente basta multiplicarla por una señal arbitraria para obtener la respuesta a dicha señal para un par fuente – receptor dentro del recinto.

Tras obtener la respuesta impulsiva se puede calcular la curva de decaimiento y con estas dos funciones, es posible realizar el cálculo de algunos parámetros de calidad acústica, tales como el tiempo de reverberación (T30), tiempo de decaimiento inicial (EDT), Definición (D50 y D80), Claridad Tonal (C50 y C80), tiempo central (TS), factor de ganancia (G), soporte objetivo (ST1). Incluso se puede determinar el nivel de presión sonora para un par fuente-receptor.

Una simulación precisa debe considerar parámetros acústicos relevantes, los cuales se detallan en la Sección 2.2.2. En la Sección 2.2.3. se detallan parámetros que pueden ser calculados a partir de los resultados que arroje la simulación.

2.2.2. Parámetros acústicos relevantes

2.2.2.1. Absorción de materiales

La magnitud de la absorción sonora, depende del material utilizado y de la frecuencia analizada, por lo tanto, los materiales que se usen como revestimiento interno deben ser escogidos criteriosamente para proporcionar la absorción adecuada para cada banda de frecuencia.

Existen tres tipos de elementos que producen absorción sonora.

Materiales Porosos: se caracterizan por presentar una curva de absorción tipo LPF (Low Pass Filter). Se usan para el tratamiento de frecuencias medias y altas (± 1 kHz). Generalmente se trata de materiales altamente porosos, de densidad media o baja, donde la energía acústica se transforma en calor, cuando el frente de onda hace vibrar a las partículas dentro de los poros generando fricción. Los tipos de materiales absorbentes porosos más importantes son: lana de vidrio, lana mineral, lana de roca volcánica, espuma de poliuretano y espuma a base de resina de melanina.

La absorción producida por este tipo de material depende del espesor del mismo, así como su porosidad, la densidad superficial y la distancia a la que este colocado respecto a los muros.

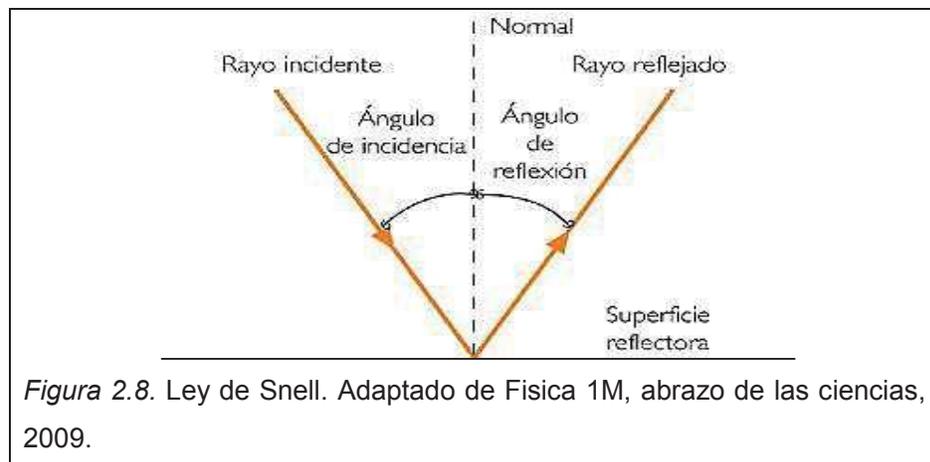
Existen materiales absorbentes suspendidos en el techo, conocidos como baffles acústicos, se los usa en aquellos recintos donde no existe espacio y es imprescindible aumentar la cantidad de superficie absorbente más allá de la superficie límite del recinto. Para aplicar esta técnica, el recinto debe tener gran altura. Esta técnica es típica de talleres industriales, fábricas, comedores, coliseos, salas de clase y galpones.

Resonadores de Membrana: se usan para el control de frecuencias medias y especialmente bajas, funcionan bajo el principio de resonancia, por lo tanto la curva de absorción es selectiva y presenta un máximo para la frecuencia de resonancia (la frecuencia de diseño).

Resonadores de Helmholtz: se basan en el artefacto acústico conocido como cavidad de Helmholtz; consistente en una cavidad con un orificio en el extremo, o en cuyo interior el aire se comporta como una masa resonante. Los tipos más comunes son: resonador unitario o de Helmholtz, resonador múltiple de Helmholtz o ranurado y resonador de listones.

2.2.2.2. Reflexión Especular y Difusa

La reflexión especular es un proceso acústico que se produce debido a la presencia de materiales capaces de reflejar la energía incidente siguiendo la ley de reflexión regular determinada por Snell (SEMAT; BAUMEL, 1976), en donde el ángulo generado entre el rayo incidente y la normal a la superficie es igual al ángulo generado entre la normal de la superficie y el rayo reflejado, tal y como se muestra en la Figura 2.8.



La difusión se debe a la presencia de materiales rígidos e irregulares que rompen el frente de onda generándose infinitos frentes más pequeños que se propagan en múltiples direcciones. De estos materiales, los difusores son dispositivos específicamente diseñados para crear dicho efecto, distribuir la energía en el tiempo y el espacio.

2.2.2.3. Modos Normales de Vibración

Son frecuencias de resonancia propias del recinto y están distribuidos en todo el espectro de frecuencia. El fenómeno de los modos normales se transforma en un problema cuando dos o más modos coinciden en una frecuencia, elevando el NPS en forma excesiva comparado con el nivel del resto de las componentes del espectro. Auditivamente, este fenómeno genera molestias en el rango comprendido entre 20 y 300 Hz, debido a la gran cantidad de energía que poseen las bajas frecuencias. Para atacar el problema de los modos normales de vibración en forma eficiente se aconseja medir el espectro de la sala y diseñar resonadores sintonizados a las frecuencias conflictivas de tal forma que la respuesta de la sala se equilibre.

El modelamiento matemático del fenómeno modal es bastante complejo si la geometría de la sala es irregular, en cuyo caso se utiliza el método FEM/BEM (BANERJEE, 1994), sin embargo, para recintos rectangulares, el problema se puede modelar completamente de forma analítica.

Cuando una fuente sonora genera señales dentro de una sala con componentes de frecuencia iguales o muy parecidos a las de uno o varios modos normales, el NPS aumentará considerablemente para dichos componentes, producto de la resonancia del recinto con la

fuelle (KUTTRUFF, 2000). Las frecuencias de los modos normales vienen dadas por:

$$f(n) = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (2.9)$$

Donde:

c es la velocidad del sonido en el aire; n_x, n_y, n_z son las coordenadas rectangulares para denotar un punto dentro de la sala y l_x, l_y, l_z : dimensiones de la sala.

2.2.3. Descriptores de Acondicionamiento Acústico

2.2.3.1. Nivel de Presión Sonora

La presión sonora constituye la manera más habitual de expresar la magnitud de un campo sonoro (CARRION, 1998). El valor a ser considerado es la diferencia entre la presión sonora total P_T y el valor de equilibrio P_0 , conocido como valor eficaz o RMS (*Root Mean Square*). Sin embargo, el uso del valor eficaz da origen a una serie de problemas debido al comportamiento del oído humano como:

- La escala lineal de presiones audibles cubre una gama dinámica de aproximadamente 5000000 de valores, lo que significaría el uso de números inmanejables.
- Nuestro sistema auditivo no responde de manera lineal, más bien lo hace de forma logarítmica.

Por estas dos razones, se usan los decibeles para representar el nivel de presión sonora, en donde 0 dB corresponden al umbral auditivo (nivel de presión sonora mínimo para que empiece la

escucha), y 135 dB representan el umbral aproximado de dolor. Así, el rango de valores usados es mucho más simple y manejable, y se puede obtener las siguientes relaciones de nivel sonoro con su efecto subjetivo:

- 1 dB: mínimo cambio de nivel sonoro perceptible.
- 5 dB: cambio de nivel claramente percibido.
- 10 dB: incremento asociado a una percepción de sonoridad doble.

A continuación se muestran valores de nivel de presión sonora de distintos sonidos, asociados con su valoración subjetiva.

Tabla 1

Nivel de Presión Sonora de distintos sonidos

FUENTE SONORA	NIVEL DE PRESIÓN SONORA SPL (dB)	VALORACIÓN SUBJETIVA DEL NIVEL
Despegue avión (a 60 m)	120	Muy elevado
Edificio en construcción	110	
Martillo neumático	100	
Camión pesado (a 15 m)	90	Elevado
Calle (ciudad)	80	
Interior automóvil	70	
Conversación normal (a 1 m)	60	Moderado
Oficina, aula	50	
Sala de estar	40	
Dormitorio (noche)	30	Bajo
Estudio de radiodifusión	20	

Tomado de Carrión, 1998.

2.2.3.2. Tiempo de reverberación

Está definido como el tiempo que transcurre desde el instante en que una fuente sonora se apaga hasta que su energía decae a 1/1.000.000 de su fuerza original (SABINE, 1992). Esta caída de

energía es cuantificada como nivel de presión sonora, que en escala logarítmica corresponde a 60 dB.

El T₆₀ se especifica por bandas de octava o tercio de octava desde 125 Hz a 4 KHz.

Según Sabine (CARRION, 1998), el T₆₀ está definido como:

$$T_{60} = \frac{0,161 * V}{A + 4mV} \quad (2.10)$$

Donde:

V es el volumen de la sala, A es la absorción de la sala y m es constante de atenuación del sonido.

Como el T_{60} se especifica por banda de octava, entonces se define:

$$T_{60(low)} = \frac{T_{60(125Hz)} + T_{60(250Hz)}}{2} \quad (2.11)$$

$$T_{60(mid)} = \frac{T_{60(500Hz)} + T_{60(1KHz)}}{2} \quad (2.12)$$

$$T_{60(high)} = \frac{T_{60(2KHz)} + T_{60(4KHz)}}{2} \quad (2.13)$$

En general, se usa la absorción Sabine para el calculo de T_{60} , sin embargo, se puede usar la absorción de Norris – Eyring, la absorción de Millington y la absorción de Kuttruff.

$$A_{EYR} = -S_T \ln(1 - \bar{\alpha}) \quad (2.14)$$

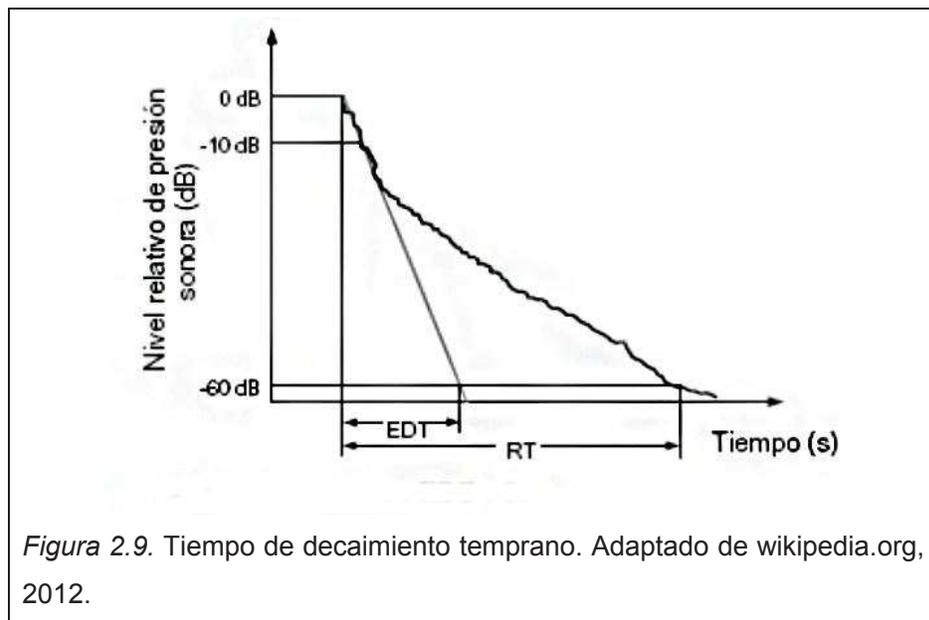
$$A_{MIL} = -\sum S_N \ln(1 - \bar{\alpha}) \quad (2.15)$$

$$A_{KUT} = aS_T \quad (2.16)$$

$$a = \ln \frac{1}{1 - \bar{\alpha}} + \ln \left(1 + \frac{\sum^i S_i^2 (1 - \alpha_i)(\bar{\alpha} - \alpha_i)}{S_T^2 (1 - \bar{\alpha})^2 - \sum^i S_i^2 (1 - \alpha_i)^2} \right) \quad (2.17)$$

2.2.3.3. Tiempo de Decaimiento Temprano

Es otra medida de la reverberación que considera la importancia subjetiva de la parte inicial del decaimiento de la reverberación. Durante este período las reflexiones sonoras con mucha energía contribuyen considerablemente a la sensación de intimidad y envolvimiento en el local (BERANEK, 1996). Se calcula sobre la curva de decaimiento energético, a partir de 0 dB hasta -10 dB, extrapolando la recta entre los dos puntos hasta alcanzar un decaimiento de 60 dB, como se muestra en la Figura 2.9.



2.2.3.4. Calidez Acústica

Es el refuerzo natural que aporta la sala en baja frecuencia (BERANEK, 1996), se define como:

$$BR = \frac{T_{60(low)}}{T_{60(mid)}} \quad (2.18)$$

Según Beranek, si $BR > 1$, se dice que la sala es cálida.

2.2.3.5. Brillo

Es el refuerzo natural que aporta la sala sobre el espectro de alta frecuencia (BERANEK, 1996), se define como:

$$Br = \frac{T_{60(high)}}{T_{60(mid)}} \quad (2.19)$$

En la práctica es muy difícil que el $T_{60(high)}$ sea mayor que el $T_{60(mid)}$ por lo tanto Beranek establece que una sala se puede considerar brillante cuando $Br \geq 0,7$.

2.2.3.6. Claridad Tonal

La claridad o plenitud tonal, cuantifica el grado de fusión entre las frases (musicales y/o habladas). Se refiere a la sensación subjetiva de fusión de un sonido con otro dentro de una sala debido al campo reverberante (CARRION, 1998).

Matemáticamente se define como la relación logarítmica entre la energía que llega a un oyente dentro de los primeros t segundos desde la llegada del sonido directo (incluyendo la energía del sonido directo) y la energía que llega con posterioridad.

$$C_t = 10 \log \left[\frac{\int_0^t P^2(t) dt}{\int_t^\infty P^2(t) dt} \right] \quad (2.20)$$

Donde:

$P^2(t)$ es la presión cuadrática como función del tiempo.

Tres parámetros se derivan de este:

2.2.3.6.1. Claridad de la voz

Corresponde al valor de la claridad tonal cuando $t = 50$ ms, que es la persistencia acústica para sonidos hablados (CARRION, 1998).

$$C_{50} = 10 \log \left[\frac{\int_0^{0,05} P^2(t) dt}{\int_{0,05}^\infty P^2(t) dt} \right] \quad (2.21)$$

Habitualmente se usa el promedio ponderado de C_{50} , llamado *speech average*, definido como:

$$C_{50} = 0,15C_{50(500Hz)} + 0,25C_{50(1KHz)} + 0,35C_{50(2KHz)} + 0,25C_{50(4KHz)} \quad (2.22)$$

Las ponderaciones usadas para cada banda, dan cuenta de la importancia relativa que estas tienen para la voz.

2.2.3.6.2. Claridad musical

Corresponde al valor de la claridad tonal cuando $t = 80$ ms, que es el tiempo de persistencia acústica para instrumentos musicales (CARRION, 1998).

$$C_{80} = 10 \log \left[\frac{\int_0^{0,08} P^2(t) dt}{\int_{0,08}^{\infty} P^2(t) dt} \right] \quad (2.23)$$

Al igual que el caso anterior, se usa el promedio ponderado de C_{80} , llamado *music average*, definido como:

$$C_{80} = \frac{C_{80(500Hz)} + C_{80(1KHz)} + C_{80(2KHz)}}{3} \quad (2.24)$$

2.2.3.6.3. C_{t0}

Corresponde al valor de la claridad tonal excluyendo la energía del sonido directo (CARRION, 1998).

$$C_{t0} = 10 \log \left[\frac{\int_{0,005}^{t0} P_{rev}^2(t) dt}{\int_{t0}^{\infty} P_{rev}^2(t) dt} \right] \quad (2.25)$$

Donde:

P_{rev}^2 es la presión cuadrática del campo reverberante sin incluir la energía asociada al sonido directo.

La elección de t depende de lo que se está tratando de cuantificar y de si la sala es seca o viva.

2.2.3.7. Curva de Barron

Teóricamente es una aproximación para campos difusos, sin embargo se la usa para cuantificar cualquier tipo de campo reverberante (BARRON, 1993). Esto se debe a que junto con considerar el T_{60} y volumen de la sala, considera además la distancia fuente – receptor y por lo tanto la disminución de NPS al aumentar esta distancia.

Se define como:

$$C_b = 10 \log \left[e^{\frac{13,82t}{T_{60}}} - 1 + \frac{V e^{\frac{0,45+13,82t}{T_{60}}}}{312T_{60}r^2} \right] \quad (2.26)$$

Donde:

r es la distancia fuente – receptor; V es el volumen de la sala y T_{60} es el tiempo de reverberación de la sala.

2.2.3.8. Curva de energía reflejada acumulada

Su teoría fue desarrollada en Japón, para cuantificar el campo reverberante de un recinto. Se define como la relación logarítmica entre la energía que llega a un oyente dentro de los primeros t segundos desde la llegada del sonido directo sin incluir dicha energía (CARRION, 1998). Se calcula por bandas de octava desde 250 Hz a 2 KHz.

$$RECC = 10 \log \int_{0,005}^t P^2(t) dt \quad (2.27)$$

2.2.3.9. Definición

La definición es el grado de separación entre las frases musicales u orales. Es lo contrario a la claridad tonal.

Para las frases orales, se define como la relación entre la energía que llega al oyente dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo y la energía total percibida por el mismo oyente (VORLÄNDER, 2008).

$$D_{50} = \frac{\int_0^{0,05} P^2(t) dt}{\int_{0,05}^{\infty} P^2(t) dt} \quad (2.28)$$

La relación entre la definición y la claridad de la voz para una banda de frecuencia cualquiera viene dada por:

$$D_{50} = \frac{1}{1 + 10^{-\frac{c_{50}}{10}}} \quad (2.29)$$

Para las frases musicales, se define como la relación entre la energía que llega al oyente dentro de los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo y la energía total percibida por el mismo oyente (VORLÄNDER, 2008).

$$D_{80} = \frac{\int_0^{0,08} P^2(t) dt}{\int_{0,08}^{\infty} P^2(t) dt} \quad (2.30)$$

La relación entre la definición y la claridad musical para una banda de frecuencia cualquiera viene dada por:

$$D_{80} = \frac{1}{1 + 10^{\frac{c_{80}}{10}}} \quad (2.31)$$

2.2.3.10. Relación de las Primeras Reflexiones

Se define como la relación entre la energía que llega al oyente dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo y la energía del sonido directo (BARRON, 1993).

$$ERR = \frac{\int_0^{0,05} P^2(t) dt}{E_{SD}} \quad (2.32)$$

Donde:

E_{SD} es la energía del sonido directo.

Este parámetro se calcula por bandas de octava desde 125 Hz a 4 KHz.

2.2.3.11. Nivel sonoro del habla

Este descriptor fue desarrollado para medir la eficiencia del mensaje hablado, especialmente en salas de conferencia y teatros. Se define como:

$$S = 10 \log \left[\frac{\int_0^{\infty} P^2(t) dt}{\int_0^{\infty} P_{ref}^2(t) dt} \right] \quad (2.33)$$

Donde:

P_{ref}^2 es la presión cuadrada instantánea de referencia.

2.2.3.12. Tiempo Central

Es el tiempo en milisegundos donde el nivel de energía integrado antes del tiempo central es igual a la energía recibida después de él. Fue propuesto por Cremer y Müller (1978) y definido como el centro de gravedad de la energía de la respuesta impulsiva.

Se define como:

$$TS = 10 \log \left[\frac{\int_0^{\infty} tP^2(t)dt}{\int_0^{\infty} P^2(t)dt} \right] \quad (2.34)$$

Un tiempo central corto provee una mayor claridad, mientras que un tiempo central largo correspondería a una mayor reverberación.

2.2.3.13. Factor de Ganancia

Se define como la relación entre la presión cuadrática generada por una fuente omnidireccional en un determinado punto de la sala y el la presión cuadrática producida por la misma fuente situada en campo libre, medida a 10 m de ella (BERANEK, 1996), se lo usa solo en salas de concierto (ISO 3382-1:2009).

$$G = 10 \log \left[\frac{\int_0^{\infty} P^2(t)dt}{\int_0^{\infty} P_{10}^2(t)dt} \right] \quad (2.35)$$

Donde:

$P^2(t)$ es la presión cuadrática generada por la fuente omnidireccional en el recinto y $P_{10}^2(t)$ es la presión cuadrática generada por la misma fuente en campo libre y a 10 m de distancia.

Habitualmente se usa el promedio de G para las bandas de 500 Hz y 1 KHz denominado G_{mid} .

$$G_{mid} = \frac{G_{(500Hz)} + G_{(1KHz)}}{2} \quad (2.36)$$

2.2.3.14. Soporte Objetivo

Este parámetro representa la capacidad de los músicos de escucharse a si mismos y a la orquesta, con o sin concha acústica (VORLÄNDER, 2008).

El ST1 se define como la relación entre la energía asociada a las primeras reflexiones (entre 20 y 100 ms) proporcionadas por las paredes y el techo del escenario, y la energía recibida en los primeros 20 ms, ambos valores obtenidos a 1 m de distancia de una fuente omnidireccional situada en el escenario.

$$ST1 = 10 \log \left[\frac{\int_{0,02}^{0,1} P^2(t) dt}{\int_0^{0,02} P^2(t) dt} \right] \quad (2.37)$$

Donde:

$P^2(t)$ es la presión cuadrática generada por la fuente omnidireccional en el recinto.

Habitualmente se usa el soporte objetivo medio $ST1_{mid}$ definido como:

$$ST1_{mid} = \frac{ST1_{(250Hz)} + ST1_{(500Hz)} + ST1_{(1KHz)} + ST1_{(2KHz)}}{4} \quad (2.38)$$

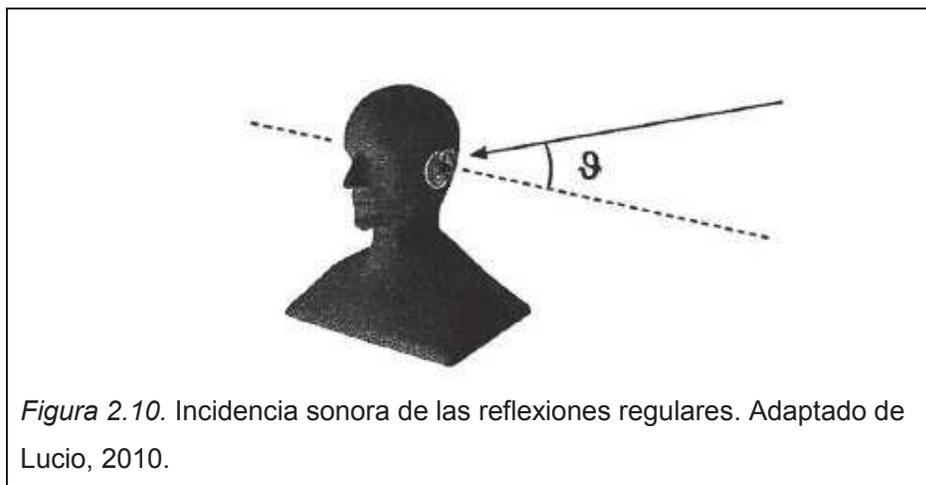
2.2.3.15. Eficiencia Lateral

Esta definida como la relación entre la energía que llega lateralmente a un oyente dentro de los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo y la energía recibida en todas las direcciones para dicho intervalo de tiempo (BERANEK, 1996). En ambos casos se excluye la energía del sonido directo.

$$LF = 10 \log \left[\frac{\int_0^{\infty} P^2(t) \cos^2 \theta^2 dt}{\int_0^{\infty} P^2(t) dt} \right] \quad (2.39)$$

Donde:

θ es el ángulo de incidencia lateral en radianes (Figura 2.10.).



Generalmente se usa el promedio de los valores obtenidos para las bandas de octava desde 125 Hz hasta 1 KHz.

$$LF = \frac{LF_{(125Hz)} + LF_{(250Hz)} + LF_{(500Hz)} + LF_{(1KHz)}}{4} \quad (2.40)$$

2.3. El código computacional RAIOS

2.3.1. Características Generales

El código computacional *RAIOS* (*Room Acoustics Integrated and Optimized Software*) modela el comportamiento acústico de un recinto de cualquier geometría mediante el cálculo de la respuesta impulsiva de transiente. Para esto, utiliza dos métodos, el primero consiste en un método de trazado de rayos acústicos (EMBRECHTS, 1982), y el segundo modela las reflexiones difusas, utilizando un método de transición de energía (ALARCAO et al. 2000). Al combinar estos dos métodos se obtiene una representación del campo acústico más precisa.

El método de trazado de rayos obedece a los supuestos de acústica geométrica (KUTTRUFF, 2000); en donde, cada uno de los rayos posee información tanto del espectro de potencia como de la distancia recorrida por la onda. Cada rayo se propaga en línea recta, sometiéndose a los efectos de: disipación por el medio (en este caso el aire), absorción en cada reflexión sobre una superficie de contorno.

El método de transición de energía por otra parte, es utilizado para la simulación de las reflexiones difusas, este se basa en el intercambio de energía entre la fuente, las superficies de la sala y el receptor en un intervalo de tiempo τ , igual al tiempo característico de la sala (ALARCÃO et al., 2000).

$$\tau = \frac{4V}{CS} \quad (2.41)$$

Donde:

V es el volumen de la sala; C es la velocidad del sonido y S es el área total de todas las superficies de contorno de la sala.

2.3.2. Modelaje de fuentes sonoras

El código RAIOS trabaja con fuentes omnidireccionales, mediante un modelo que procura tener la máxima homogeneidad direccional posible en los rayos emitidos desde el punto donde se ubica la fuente. Para esto se da la forma de un icosaedro regular al espacio próximo alrededor de la posición de la fuente. A continuación se aplica un proceso recursivo (LEWERS, 1993), el cual consiste en dividir a cada cara del icosaedro en triángulos equiláteros cada vez más pequeños, usando la siguiente ecuación matemática.

$$V = 2 + 10 (4^n) \quad (2.42)$$

Donde:

n es el número de triángulos inscritos en cada cara del icosaedro.

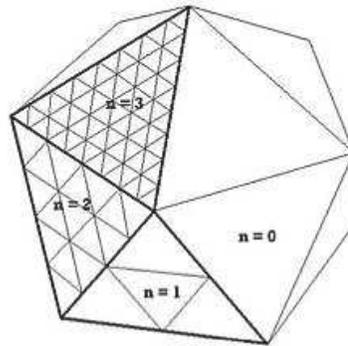
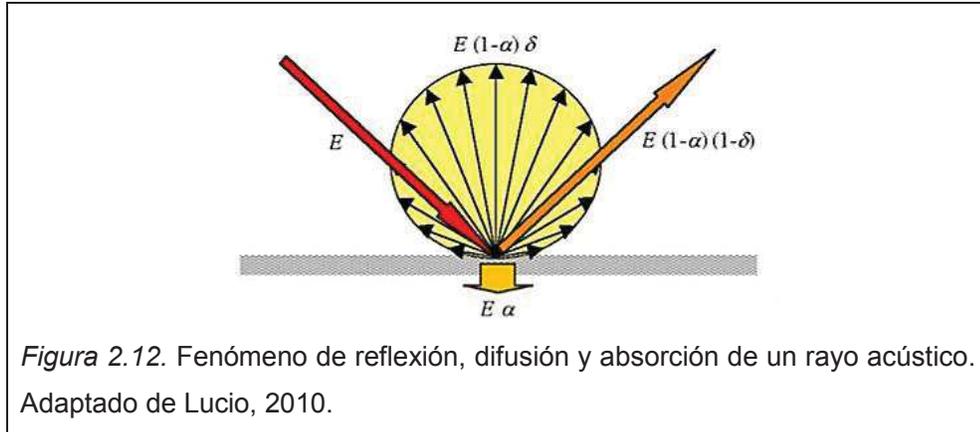


Figura 2.11. Icosaedro regular dividido en n triángulos equiláteros. Adaptado de Lucio, 2010.

Proyectando los vértices de cada triángulo en una superficie esférica concéntrica al icosaedro, es posible obtener los cosenos directores y por tanto las direcciones de los rayos emitidos. La energía sonora de la fuente se reparte equitativamente dependiendo del número de rayos acústicos.

2.3.3. Modelaje del campo acústico

El modelaje del campo acústico se realiza en base a un enfoque energético. Cada rayo transporta una fracción de la energía. Cuando este alcanza una superficie de la sala, se inicia el proceso de absorción, reflexión y difusión sonora. Parte de la energía incidente sobre una superficie es reflejada de forma especular, de manera que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de la reflexión; parte de la energía se refleja en todas las direcciones, lo que se conoce como reflexiones difusas, y parte de la energía es absorbida por la superficie.



El fenómeno de reflexión de un rayo acústico sobre una superficie de contorno de la sala debe modelarse cuidadosamente, dado su grado de importancia en la simulación numérica acústica de salas. La energía de un rayo acústico después de N reflexiones especulares esta dada por la siguiente ecuación:

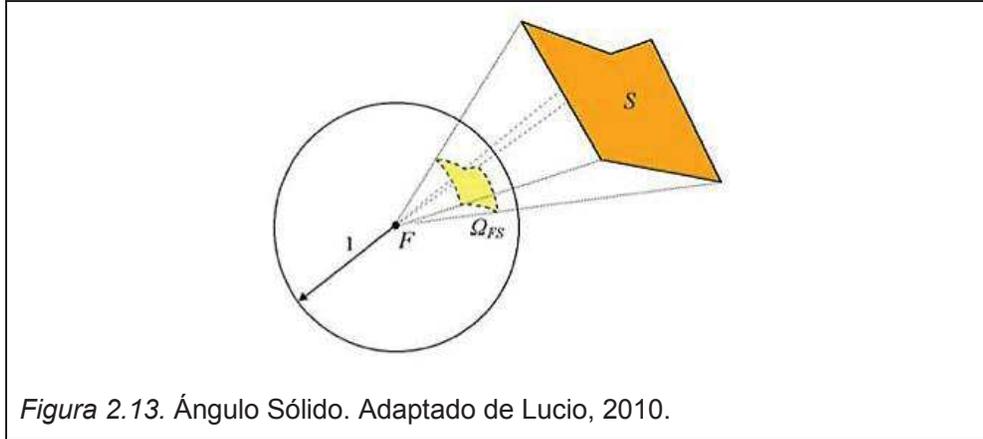
$$E_N = \frac{E_F}{N_R} D_{\theta\phi} e^{-\gamma d} \prod_i^N (1 - \alpha_i)(1 - \delta_i) \quad (2.43)$$

Donde:

E_F es la energía total emitida por la fuente; N_R es el número de rayos usados; $D_{\theta\phi}$ es la directividad de la fuente, en función de las coordenadas esféricas de azimut θ , y elevación ϕ ; γ es el coeficiente de atenuación del aire; d es la distancia recorrida por el rayo; α_i es el coeficiente de absorción del material y δ_i es el coeficiente de difusión del material por banda de frecuencia.

Para el método de transición de energía, cada una de las superficies del recinto (que recibió energía al instante en que se dio una reflexión de un rayo acústico) actúa como una nueva fuente sonora, propagando energía hacia las demás superficies en proporción a los

ángulos sólidos de las últimas con relación al centro geométrico de la primera, tal y como se muestra en la Figura 2.13.



La energía recibida por la superficie S después de N reflexiones especulares esta dada por la ecuación:

$$E_S = \frac{E_F}{N_R} D_{\theta\phi} e^{-\gamma d} \left(\prod_i^N (1 - \alpha_i)(1 - \delta_i) \right) (1 - \alpha_S) \delta_S \quad (2.44)$$

Donde:

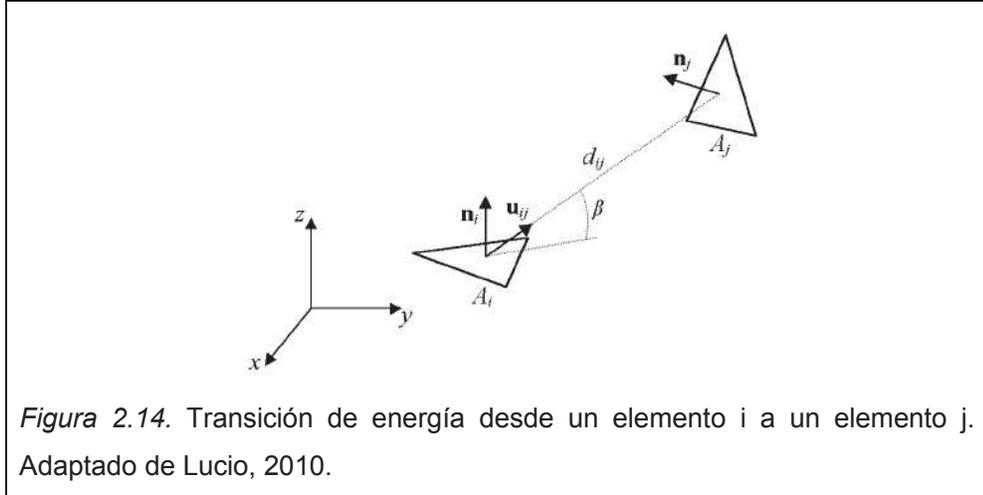
α_S es el coeficiente de absorción de la superficie S y δ_S es el coeficiente de difusión de la superficie S .

Por otro lado, la parte de la energía transmitida entre dos elementos está dada por la siguiente ecuación.

$$\psi_{ij} = (1 - \alpha_i) \frac{\Omega_{ij}}{\pi} \sin \beta e^{-\gamma d_{ij}} \quad (2.45)$$

Donde:

Ω_{ij} es el ángulo sólido del elemento de superficie j , relativo al elemento de superficie i ; β es el ángulo de elevación del elemento j , relativo al elemento de superficie i y d_{ij} es la distancia entre los elementos.



Mientras mayor es el ángulo β , mayor es la proporción de transferencia de energía del elemento i respecto al elemento j , debido a que la visibilidad entre dichos elementos aumenta.

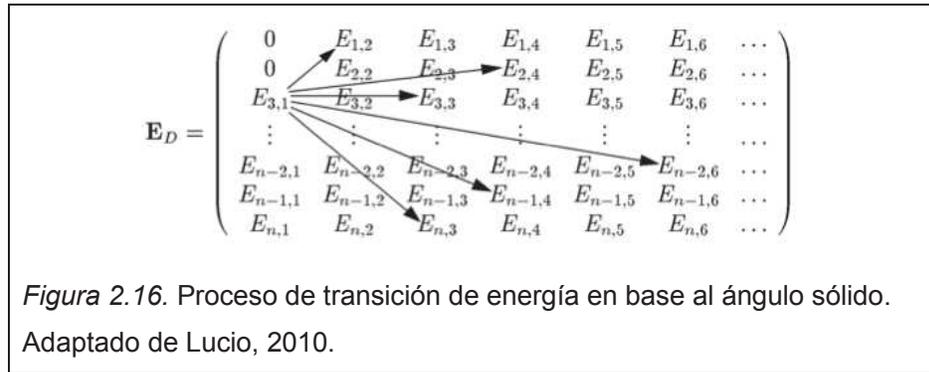
2.3.3.1. Matriz de transición

Computacionalmente, la implementación de lo anterior se da de la siguiente manera. La energía distribuida por el método de trazado de rayos acústicos es almacenada en una matriz de orden $n \times m$ (Figura 2.15.), donde n es el número de todos los elementos triangulares (superficies de contorno), y m es un número entero, que representa una aproximación del tiempo de reverberación de la sala ($T60$), dado en milisegundos.

$$\mathbf{E}_D = \begin{pmatrix} E_{1,1} & E_{1,2} & E_{1,3} & \dots & E_{1,m-2} & E_{1,m-1} & E_{1,m} \\ E_{2,1} & E_{2,2} & E_{2,3} & \dots & E_{2,m-2} & E_{2,m-1} & E_{2,m} \\ E_{3,1} & E_{3,2} & E_{3,3} & \dots & E_{3,m-2} & E_{3,m-1} & E_{3,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ E_{n-2,1} & E_{n-2,2} & E_{n-2,3} & \dots & E_{n-2,m-2} & E_{n-2,m-1} & E_{n-2,m} \\ E_{n-1,1} & E_{n-1,2} & E_{n-1,3} & \dots & E_{n-1,m-2} & E_{n-1,m-1} & E_{n-1,m} \\ E_{n,1} & E_{n,2} & E_{n,3} & \dots & E_{n,m-2} & E_{n,m-1} & E_{n,m} \end{pmatrix}$$

Figura 2.15. Matriz de transición de energía. Adaptado de Lucio, 2010.

La matriz será una representación espacio – temporal de la energía almacenada en las superficies, para posteriormente, reflejar la energía a otras superficies en forma de energía difusa, si estas son visibles para cada elemento (Figura 2.16.); entendiéndose como elemento visible aquel que posee un ángulo sólido positivo en relación al primer elemento (TENEMBAUM, 2008).



Este proceso se repite hasta que $t = T_{60}$ usando la siguiente relación recursiva.

$$E_{j,t+\tau} \leftarrow E_{j,t+\tau} + E_{i,t} \cdot \psi_{ij} \quad \text{para } i = 1, 2, \dots \quad (2.46)$$

Donde:

ψ_{ij} es parte de la energía transmitida.

Ahora, cada transición de energía hacia el receptor debe ser calculada para cada discretización del tiempo; siempre y cuando el receptor sea visible por el elemento que está siendo considerado, usando la siguiente fórmula matemática.

$$I_R(t + t') = \frac{E_{i,t}}{\pi d_{iR}^2} \sin \beta \quad (2.47)$$

Donde:

$I_R(t + t')$ es la intensidad del receptor en el instante $t + t'$, con $t' = \frac{d_{iR}}{c}$, siendo c la velocidad de propagación del sonido, y d_{iR} la distancia entre el centro geométrico del elemento y el receptor.

El ángulo β determina la proporción de energía transmitida por cada superficie de contorno hacia el receptor en base al ángulo sólido existente entre ellos.

2.3.4. Modelaje de las superficies de contorno de la sala

El código presenta un modelo para simular las superficies de un recinto basado en la división de estas en triángulos, cada vez más pequeños. Se realiza esta división, debido a que es mucho más fácil comprobar si un rayo durante la simulación incide sobre un elemento triangular.

El código *RAIOS* posee un algoritmo con el cual se determina si un rayo acústico pasa por un triángulo, empleando la siguiente ecuación matemática:

$$P_0 = \sum_{i=1}^3 \lambda_i P_i \quad (2.48)$$

Donde:

P_0 es el punto de intersección entre el rayo y la superficie y P_i son los vértices del triángulo formado.

Con este modelo se reduce notablemente la complejidad del código, así como se produce una mejora para el método de trazado de rayos y también el de transición de energía, puesto que el cálculo de los ángulos sólidos se simplifica.

2.3.5. Modelaje de receptores

Tras el proceso de reflexión especular, algunos rayos acústicos pasarán por el o los puntos de recepción. El código *RAIOS* usa un disco virtual que gira, sobre el punto de recepción, de manera que cualquier rayo que llegue a este punto incida de manera ortogonal al mismo.

La energía que llega al receptor es transformada en intensidad, la cual en un instante de tiempo t esta dada por la siguiente ecuación matemática.

$$I_R(t) = \frac{\sum_i E_i}{\pi r^2} \quad (2.49)$$

Donde:

$\sum_i E_i$ es la sumatoria de la potencia acústica de todos los rayos acústicos que llegan al receptor en un instante de tiempo t y r es el radio del disco de recepción.

Durante el proceso de transición de energía entre los elementos triangulares de las superficies de contorno de la sala, existe también el intercambio de energía entre cada elemento triangular y el receptor, siempre y cuando este último sea visible al mismo.

La cantidad de energía que llega hasta el receptor esta dada por la siguiente fórmula matemática.

$$I_R((k+1)\tau) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{E_{ki}}{\pi d_{iR}^2} \sin \beta \right) \quad (2.50)$$

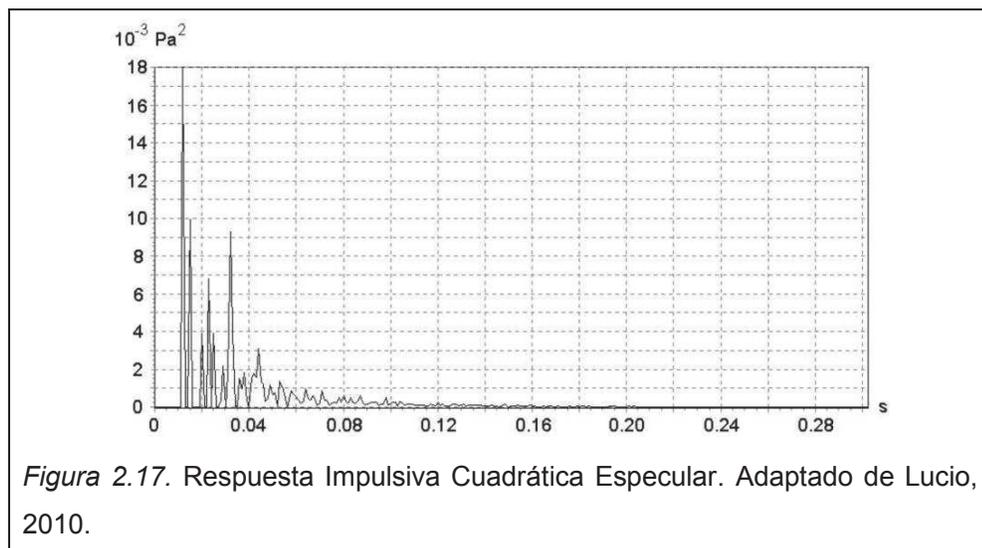
Donde:

n es el número total de elementos triangulares; E_{ki} es la energía asociada al elemento i después de la k -ésima transición y d_{iR} es la distancia entre el centro geométrico del elemento i y el receptor R .

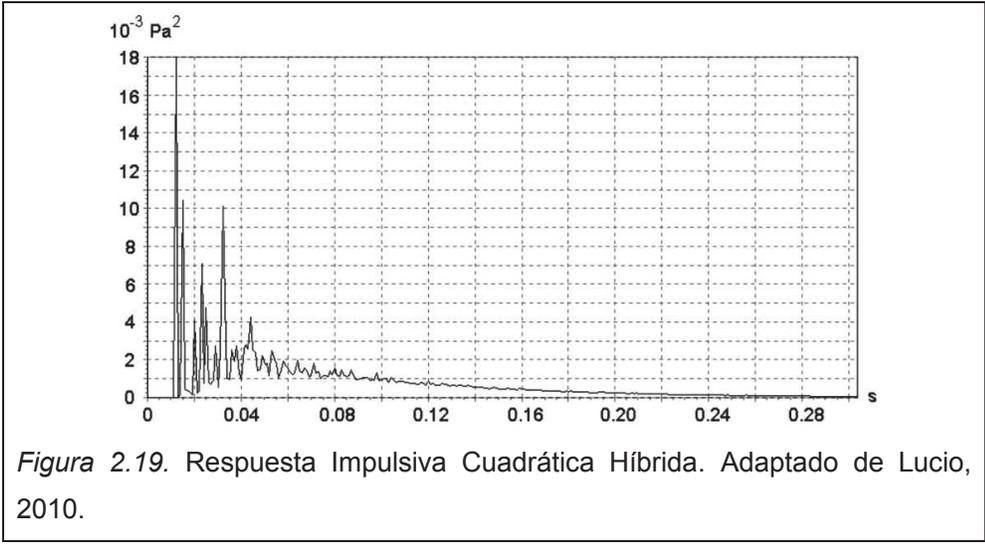
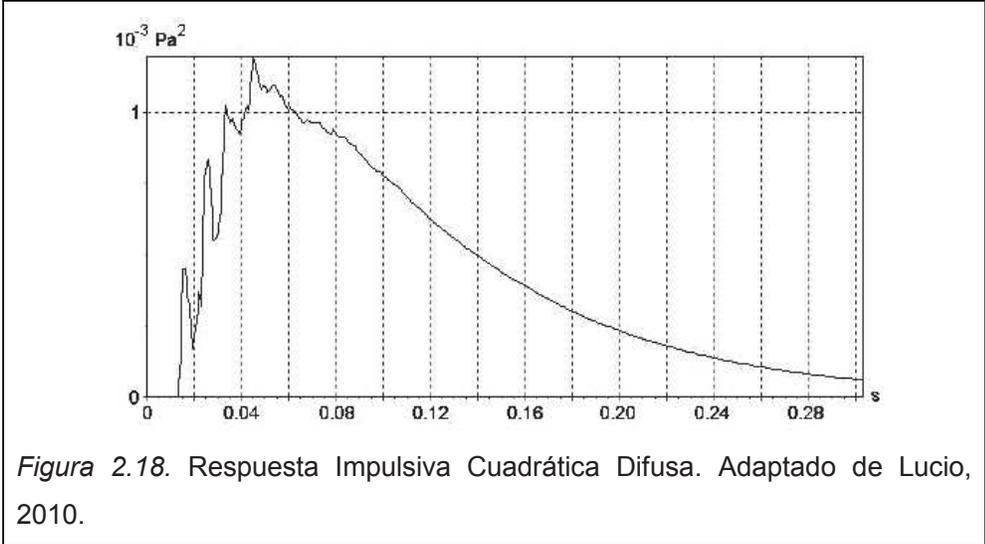
El ángulo β limita cuanta energía es transmitida por cada superficie de contorno hacia el receptor en base al ángulo sólido entre ellos.

2.3.6. Resultados de la simulación

Finalmente, para obtener los resultados, el programa une los dos métodos que posee, sumando los resultados del método de trazado de rayos (Figura 2.17.) y del método de transición de energía (Figura 2.18.), para alcanzar una simulación más precisa, obteniendo así, una respuesta impulsiva cuadrática que proviene de un método híbrido (Figura 2.19.).



Vale resaltar que la información captada por los receptores es Intensidad Sonora la misma que puede convertirse en presión cuadrática mediante la ecuación (2.4) vista en la Sección 2.1.



2.4. Lenguaje de programación C++

2.4.1. Acerca del Lenguaje

Dennis Ritchie inventó e implementó el lenguaje de programación C en un DEC PDP-11 que utilizaba el sistema operativo UNIX. El lenguaje es el resultado de un proceso de desarrollo que se inició con un lenguaje más antiguo llamado BCPL. Martin Richards desarrolló BCPL, que influenció la invención de Ken Thompson de un lenguaje llamado B, lo que llevó al desarrollo de C en la década de 1970.

Durante muchos años, el estándar para C fue la versión suministrada con el sistema operativo UNIX. Fue descrita por primera vez en *El Lenguaje de Programación C* de Brian Kernighan y Dennis Ritchie (1978). El proceso de estandarización duró seis años.

El estándar ANSI C fue finalmente adoptado en diciembre de 1989, con los primeros ejemplares disponibles a principios de 1990. La norma también fue adoptado por la ISO (*International Standards Organization*), y la norma resultante se hace referencia generalmente como ANSI / ISO C. En 1995, la enmienda 1 a la norma C fue adoptada, la cual, entre otras cosas, añade varias funciones nuevas de la biblioteca. La norma de 1989 para C, junto con la enmienda 1, se convirtieron en un documento base para el estándar C++, que define el subconjunto C de C++.

El lenguaje de programación C++ es uno de los más empleados en la actualidad. Se puede decir que C++ es un lenguaje híbrido ya que permite programar tanto en estilo procedimental (como si fuese C), como en estilo orientado a objetos. Además también se puede emplear mediante programación basada en eventos, para crear programas que usen interfaz gráfica.

El nacimiento de C++ se sitúa en el año 1980, cuando Bjarne Stroustrup, de los laboratorios Bell, desarrolló una extensión de C llamada “*C with Classes*”, que permitiría aplicar los conceptos de la programación orientada a objetos con el lenguaje C.

Durante los siguientes años Stroustrup continuó el desarrollo del nuevo lenguaje y en 1983 se lo llamó C++.

En 1985, Stroustrup publicó la primera versión de *The C++ Programming Language* (1985) que se convirtió en el libro de referencia del lenguaje.

Actualmente, el lenguaje se encuentra estandarizado a nivel internacional con el estándar ISO/IEC 14882:1998 con el título *Information Technology – Programming Languages – C++ (1998)*. En el año 2003 se publicó una versión corregida del estándar (ISO/IEC 14882:2003).

2.4.2. Características Generales

En C++, es posible crear funciones, clases, objetos y tal vez la parte que diferencia al programa de los demás compiladores es la declaración y utilización de punteros.

Una función es un módulo de un programa separado del cuerpo principal, que realiza una tarea específica y que puede regresar un valor a la parte principal del programa o a otra función o procedimiento que la invoque.

Una clase define un nuevo tipo de dato que especifica la forma de un objeto. Una clase incluye los datos y el código que operarán sobre esos datos. Además, una clase enlaza datos y código. C++ usa una especificación de una clase para construir objetos. Los objetos son

instancias de una clase. En definitiva, una clase es una serie de planes que especifican cómo construir un objeto.

La programación orientada a objetos es un paradigma de programación que usa objetos y sus interacciones, para diseñar aplicaciones y programas informáticos. Está basado en varias técnicas, incluyendo herencia, abstracción, polimorfismo y encapsulamiento. Los objetos son entidades que tienen un determinado estado, comportamiento e identidad:

- El estado está compuesto de datos, será uno o varios atributos a los que se habrán asignado unos valores concretos.
- El comportamiento está definido por los métodos o mensajes a los que sabe responder dicho objeto, es decir, qué operaciones se pueden realizar con él.
- La identidad es una propiedad de un objeto que lo diferencia del resto, dicho con otras palabras, es su identificador.

Un objeto contiene toda la información que permite definirlo e identificarlo frente a otros objetos pertenecientes a otras clases e incluso frente a objetos de una misma clase, al poder tener valores bien diferenciados en sus atributos.

Lo que marca la diferencia en el lenguaje de programación C++, es que permite al usuario el manejo dinámico de memoria, mediante el uso de punteros. Un puntero es una variable que referencia una región de memoria, es decir, es una variable cuyo valor es una dirección de memoria. El uso de punteros reside en manejar datos alojados en la zona de memoria dinámica, mas no en la zona de memoria estática.

Para el desarrollo del software, se empleó el compilador C++Builder, el cual es un entorno de desarrollo rápido de aplicaciones en lenguaje C++ para Windows. C++Builder combina la biblioteca Visual Component Library y el IDE escrito en Delphi con un compilador de C++; incluye herramientas que permiten el desarrollo visual de

aplicaciones, es decir, permite arrastrar y soltar componentes sobre la aplicación, haciendo el acto de programar algo mucho más fácil al incorporar un constructor de interfaz gráfica, además, esta extensión de C++ posee ventajas como son:

- Usa el concepto de RAD (*Rapid Application Development*).
- Gran cantidad de componentes incluidos en la distribución básica (más de 200 vs menos de 20 en un entorno Visual Basic 6).
- La biblioteca VCL y el código generado usan código nativo lo que le permite ejecutarse con gran velocidad.
- El compilador de C++ es de reciente actualización, incluye soporte al estándar ISO C++98, C++0x y TR1.
- Soporta las reconocidas bibliotecas Boost.

Borland C++ Builder posee la biblioteca que permite el uso de funciones generadas en código Open GL, el cual se explicará más adelante.

2.4.3. Comandos Básicos

2.4.3.1. Sentencias

El lenguaje de programación C++ posee sentencias para el desarrollo de los algoritmos informáticos, estas se dividen en sentencias de decisión y sentencias de iteración.

Las sentencias de decisión o también llamadas de control de flujo son estructuras de control que realizan una pregunta la cual retorna verdadero o falso (evalúa una condición) y selecciona la siguiente instrucción a ejecutar dependiendo la respuesta o resultado. Dentro de este grupo de sentencias se encuentra la sentencia *if*, y *switch*.

Las sentencias de iteración son estructuras de control en las que se repiten la ejecución de un grupo de instrucciones. Básicamente, una sentencia de iteración es una estructura de control condicional, ya que dentro de la misma se repite la ejecución de una o más instrucciones mientras que una a condición específica se cumpla. Dentro de este grupo de sentencias se encuentra la sentencia *for*, *while* y *do while*.

2.4.3.1.1. Sentencia if

La sentencia if permite tomar una decisión en cuanto a la instrucción que debe ser ejecutada; basándose en una respuesta de tipo booleana, es decir, verdadero o falso; funciona de la siguiente manera:

```
if (condición){  
  Instrucciones           //Parte verdadera  
}  
else{  
  Instrucciones           //Parte falsa  
}
```

- Las instrucciones comienzan a ejecutarse de forma secuencial hasta que se llega a una estructura condicional, donde, se decide que camino tomar dependiendo siempre del resultado de la condición siendo esta falsa o verdadera.
- Cuando se termina de ejecutar este bloque de instrucciones se reanuda la ejecución en la instrucción siguiente a la de la condicional.

2.4.3.1.2. Sentencia switch

Es otra de las instrucciones que permiten la construcción de estructuras de control. A diferencia de *if*, para controlar el flujo por medio de una sentencia *switch* se debe de combinar con el uso de las sentencias *case* y *break*.

```
switch (condición){
    case primer_caso:
        Instrucciones
        break;

    case segundo_caso:
        Instrucciones
        break;

    case caso_n:
        Instrucciones
        break;

    default: bloque de instrucciones por defecto
}
```

2.4.3.1.3. Sentencia for

La sentencia *for* es útil para los casos en donde se conoce de antemano el número de veces que una o más sentencias han de repetirse.

```
for(contador; final; incremento){
    Código iterativo;
}
```

2.4.3.1.4. Sentencia while y do while

La sentencia *while* es útil en aquellos casos en donde no se conoce de antemano el número de veces que una o más sentencias se tienen que repetir.

```
while(condición){  
    Código iterativo  
}
```

La diferencia entre la sentencia *while* y *do while* es que la sentencia *do while* garantiza que una o más instrucciones se ejecuten al menos una vez.

```
do{  
    Código iterativo  
}while(condición);
```

2.4.3.2. Operadores Lógicos

El lenguaje de programación C++ presenta además la posibilidad de usar operadores lógicos, los operadores lógicos permiten realizar comparaciones entre datos y son tres principales; dos de ellos son binarios *and* y *or*, y el último es unario *not*. Los operadores lógicos producen un resultado booleano y sus operandos son también valores lógicos o asimilables a ellos. Se los usa con sentencias.

2.4.3.2.1. Operador Lógico and

Este operador entrega un resultado verdadero solo si las condiciones de comparación son verdaderas.

```
if (condicion1 && condicion2){  
    Instrucciones  
}
```

2.4.3.2.2. Operador Lógico or

Este operador entrega un resultado verdadero si al menos una de las condiciones de comparación es verdadera.

```
if (condicion1 || condicion2){  
  Instrucciones  
}
```

2.4.3.2.3. Operador Lógico not

Este operador sirve para negar a cualquier operador.

```
if (a!=b){  
  Instrucciones  
}
```

2.4.4. Open GL

Open GL (Open Graphics Library) es una interfaz de software encargada de la parte gráfica de una aplicación; la interfaz posee una serie de procedimientos y funciones que permiten al usuario realizar gráficos de alta calidad, específicamente imágenes en tres dimensiones.

Open GL corresponde a un conjunto de comandos que permiten usar objetos geométricos en dos o tres dimensiones, junto con los comandos que controlan como estos objetos se representan en el uso de este dispositivo. En su mayor parte, Open GL proporciona una interfaz de modo inmediato, es decir, dibuja lo que el programador especifique.

Se uso esta librería para el desarrollo visual del software, debido a que también es usada en el código computacional *RAIOS*. De esta manera

se adaptó el programa que fue desarrollado para esta tesis a la programación realizada en el código computacional *RAIOS*, para permitir una futura integración entre ambos.

A continuación se presenta un ejemplo del código open GL para realizar el gráfico de un triángulo:

```
glColor3f(1.0,0.0,0.0);
  glBegin(GL_TRIANGLES);
    glVertex3f(1.0,0.0,0.0);
    glVertex3f(1.0,1.0,0.0);
    glVertex3f(0.0,1.0,0.0);
  glEnd();
```

`glBegin(GL_TRIANGLES)` se usa para graficar triángulos especificados por coordenadas espaciales en dos o tres dimensiones.

`glVertex3f(punto x, punto y, punto z)`, es el comando empleado para especificar cada vértices en dos o tres dimensiones del triángulo.

`glColor3f(color R, color G, color B)`, permite dar color a cada triángulo en base al modelo de color RGB (*Red, Green, Blue*), correspondiente a la combinación aditiva de colores Rojo, Verde y Azul.

`glEnd()`; es el comando usado para cerrar el lazo de dibujo.

3. Desarrollo Computacional

3.1. Diseño del Software

3.1.1. Programación del módulo de densidad de energía acústica.

Para la programación del módulo, se partió por la revisión completa del código computacional *RAIOS*, para aprender como implementar el código que se iba a generar para graficar los mapas de densidad superficial de energía acústica.

Tras la revisión y comprensión del código, se procedió a crear una matriz de las mismas características de la matriz de transición de energía. En esta matriz se almacenó la energía incidente que llegaba a cada elemento triangular; para posteriormente, en base a la energía total que llegó a dicho elemento, crear un mapa de colores y asignarle a cada elemento un color dependiendo del valor energético que este almacene.

$$\mathbf{E}_D = \begin{pmatrix} E_{1,1} & E_{1,2} & E_{1,3} & \dots & E_{1,m-2} & E_{1,m-1} & E_{1,m} \\ E_{2,1} & E_{2,2} & E_{2,3} & \dots & E_{2,m-2} & E_{2,m-1} & E_{2,m} \\ E_{3,1} & E_{3,2} & E_{3,3} & \dots & E_{3,m-2} & E_{3,m-1} & E_{3,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ E_{n-2,1} & E_{n-2,2} & E_{n-2,3} & \dots & E_{n-2,m-2} & E_{n-2,m-1} & E_{n-2,m} \\ E_{n-1,1} & E_{n-1,2} & E_{n-1,3} & \dots & E_{n-1,m-2} & E_{n-1,m-1} & E_{n-1,m} \\ E_{n,1} & E_{n,2} & E_{n,3} & \dots & E_{n,m-2} & E_{n,m-1} & E_{n,m} \end{pmatrix}$$

Figura 3.1. Matriz de energía global. Adaptado de Lucio, 2010.

Luego de revisar el código *RAIOS* y tener la matriz de energía global, se creó un nuevo programa para realizar el mapa de colores. Con este fin, se procedió a exportar los datos necesarios generados con la simulación de *RAIOS*.

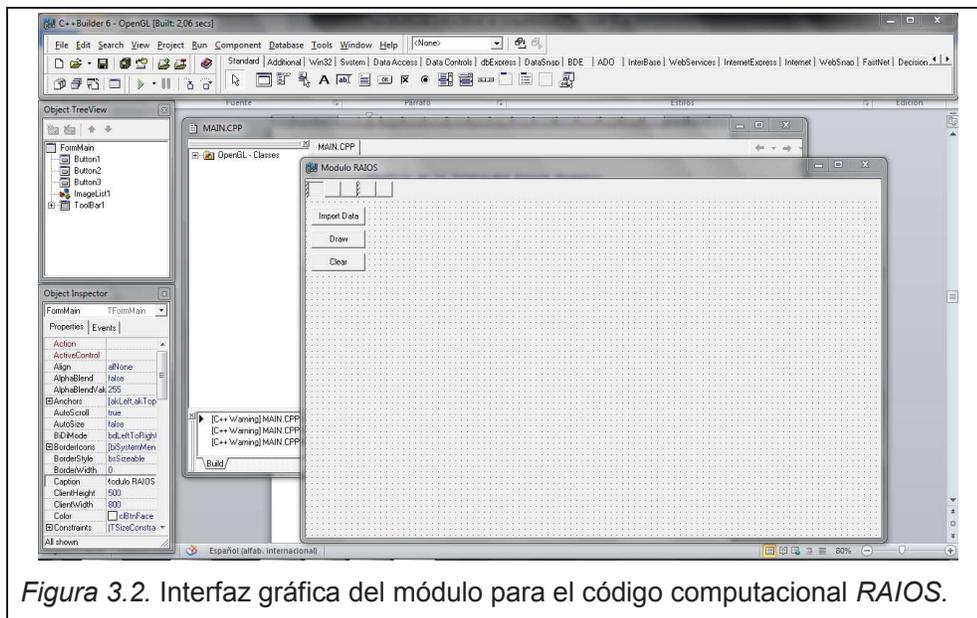


Figura 3.2. Interfaz gráfica del módulo para el código computacional RAIOS.

Dentro del algoritmo se crearon tres funciones principales, la primera (*Calc*), encargada de realizar todos los cálculos matemáticos, la segunda (*Colors*) de crear los mapas de colores y la tercera (*Draw*) de graficar y pintar los elementos.

Dentro de la primera función, se creó un algoritmo que toma como datos de entrada las matrices generadas por el código computacional RAIOS; dentro de las cuales se encuentran: el número de elementos generados por el código, los vértices en tres dimensiones de cada elemento, el área de cada elemento, el tiempo de decaimiento por banda de frecuencia y la potencia acústica asociada a cada uno de ellos.

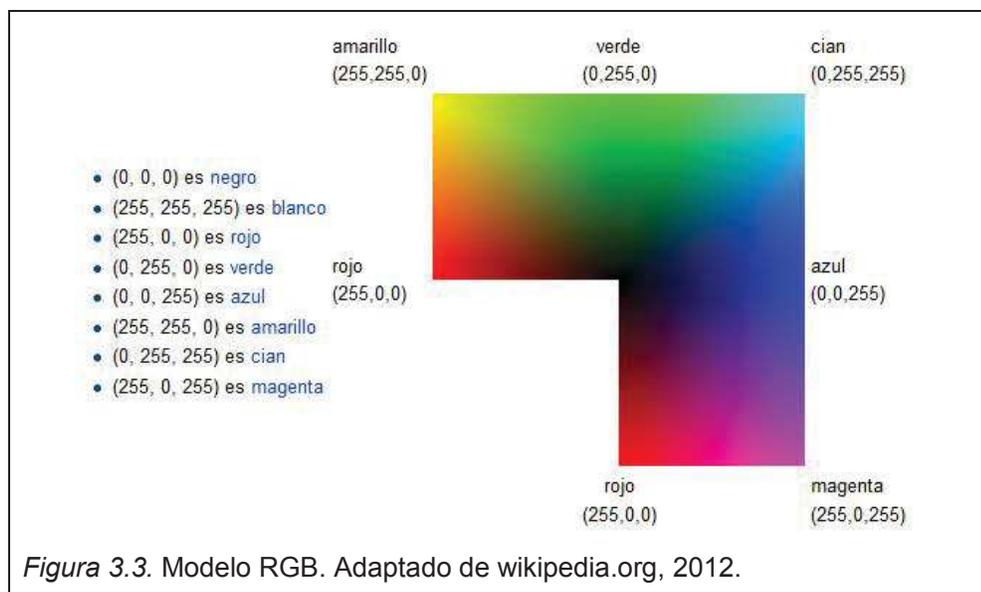
Ahora, la matriz de energía global por banda de frecuencia, es transformada en una matriz de intensidad sonora, de igual manera, por banda de frecuencia, usando la ecuación (2.3).

Tras tener la matriz de intensidad sonora, se creó una función, la cual toma del rango de todos los valores de intensidad, el valor máximo y el

valor mínimo, para posteriormente representarlos con los colores rojo y azul respectivamente.

Para simplificar el código y obtener una mayor facilidad para la representación grafica de los mapas de colores, se procedió a implementar una función en la cual se compara si el valor mínimo de intensidad sonora se encuentra dentro de un rango de valores, se procede a multiplicar todos los valores de la matriz de intensidad por una constante de tipo 10^n , donde n es el número de posiciones decimales que tiene el valor de intensidad sonora mínimo; de manera que todos los valores se transformen en enteros.

Tras tener la matriz de intensidad sonora modificada, se procedió a crear la segunda función principal, en ella se creó una matriz que contiene un mapa de colores en escala RGB (*Red, Green, Blue*). Esta matriz contiene todos los colores para todos los valores comprendidos entre la energía máxima y mínima.

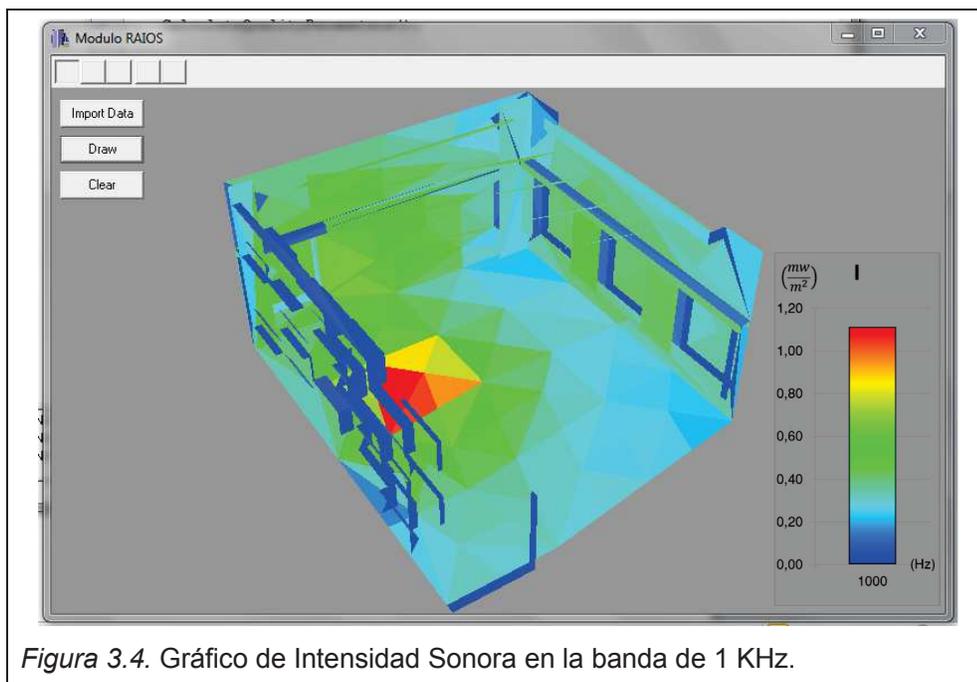


OpenGL posee un algoritmo en el que el valor máximo por color que corresponde al valor 255, se representa con 1; y el valor mínimo con 0.

Es decir, el color rojo corresponde al valor (1,0,0) en escala RGB, el color verde a (0,1,0) y el color azul a (0,0,1).

Finalmente, tras tener la matriz del mapa de colores, se creó otra matriz que almacenará los colores de cada elemento dependiendo de la intensidad sonora, para esto, se procedió a comparar el valor de intensidad que posee cada elemento, con el índice de cada color dentro del mapa de colores, y si estos dos eran iguales, se le asignaba ese color a ese elemento dentro de la nueva matriz de colores.

Ahora, al tener el mapa de colores, se procedió a crear la tercera función principal. Esta toma como datos de entrada las coordenadas de los elementos generados por el código computacional *RAIOS*, y el mapa de colores generado por el módulo para que se dibuje el recinto usando OpenGL como se explicó en el apartado 2.4.4.



3.1.2. Programación de respuestas impulsivas y parámetros de calidad acústica en las superficies de contorno.

Para la programación de los parámetros de calidad acústica, se usó la formulación matemática (2.4) de la sección 2.1. que ya había sido implementada en *RAIOS* para calcular los parámetros de calidad en los receptores. Luego se modificó el algoritmo para que estos parámetros se calculen para cada elemento triangular de las superficies de contorno.

Como los parámetros de calidad seleccionados usan integrales de tipo $\int_0^{\infty} P^2(t) dt$, era necesario transformar todos los valores de intensidad sonora a presión cuadrática, para esto, se usó la ecuación (2.4).

El código computacional *RAIOS* usa la P^2 para determinar la respuesta impulsiva de la sala, las curvas de decaimiento y los parámetros de calidad acústica; de manera que se empleó el mismo algoritmo de este código para el programa en desarrollo.

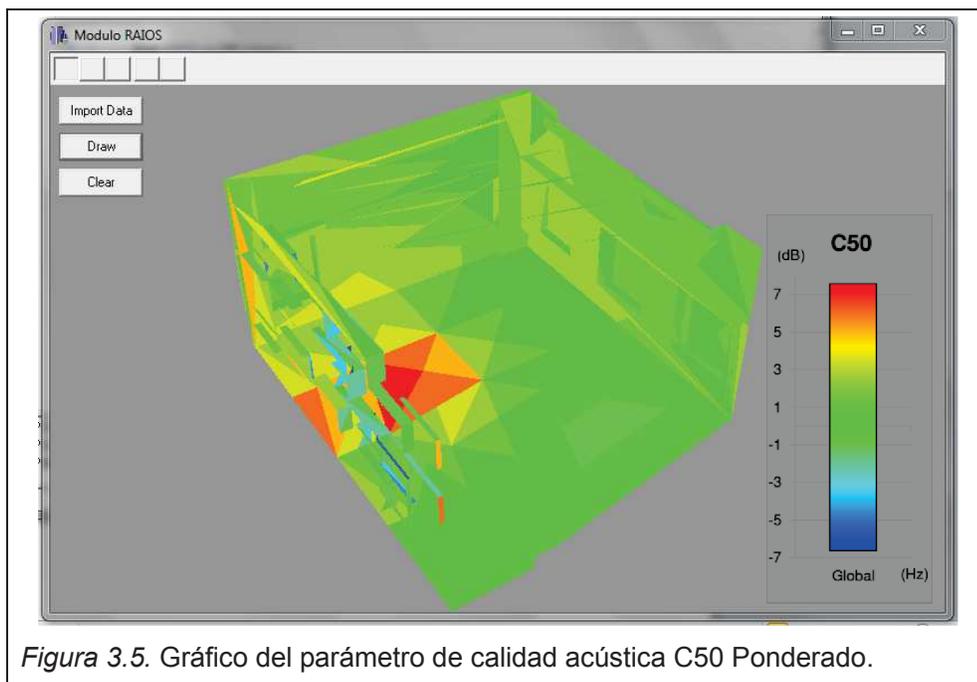


Figura 3.5. Gráfico del parámetro de calidad acústica C50 Ponderado.

4. Descripción de un caso de estudio

4.1. Análisis de la sala escogida.

Para probar los resultados del programa, se procedió a realizar la misma simulación utilizada por el código computacional *RAIOS 3.0* para Round Robin 3, debido a que los resultados que el programa arrojó en la competencia internacional de simuladores acústicos fueron satisfactorios si comparados con las mediciones reales realizadas (TENENBAUM, R. A.; CAMILO, T. S.; TORRES J. C. B.; STUTZ, L. T., 2006b). Para esta competencia, *RAIOS* precedió a hacer la simulación del estudio PTB de Alemania, donde se ubicó como el segundo mejor simulador de acústica de salas.

El Round Robin 3 de simulación acústica de salas (1999), tuvo 21 participantes, procedentes de 15 países, con 9 diferentes programas. Para este proyecto, el estudio de grabación de música de PTB fue adoptado como la sala de referencia, destinada a ser analizada en tres fases de complejidad. En la primera fase, el estudio de la música fue modelado físicamente con una configuración muy cruda. El modelo consistió en siete paredes planas con el mismo coeficiente de absorción y difusión en todas las bandas de octava (de 125 Hz a 4 kHz).

El PTB en Aachen, Alemania puso puntos de referencia para probar la acústica del recinto mediante métodos de simulación, con un registro completo de la actuación de los participantes. Estos puntos de referencia comprenden un indicador del rendimiento de los programas que llevan a cabo la simulación numérica acústica. Dos fuentes y tres receptores fueron considerados para la simulación, (seis combinaciones fuente-receptor) y nueve parámetros acústicos: T30, EDT, C80, D50, TS, G, LF, LFC y el IACC. Esta fase estaba destinada a comprobar el software bajo condiciones bien definidas.

A continuación se muestra la configuración de la primera fase, las fuentes corresponden al punto rosado (fuente encendida) y gris (fuente apagada), y los receptores a los tres puntos de color verde.

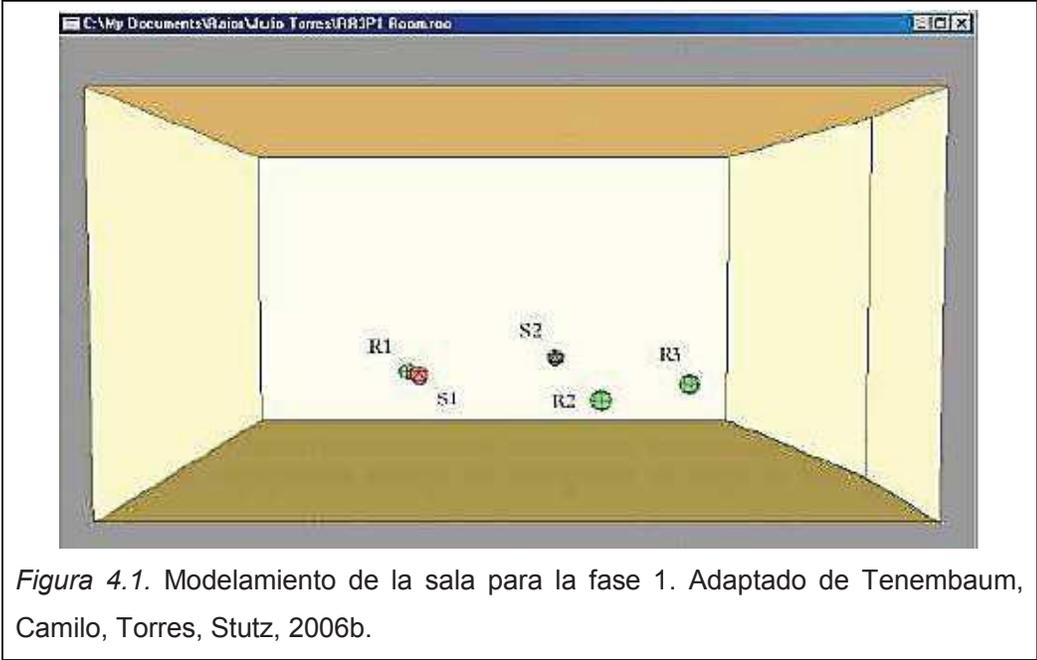


Figura 4.1. Modelamiento de la sala para la fase 1. Adaptado de Tenenbaum, Camilo, Torres, Stutz, 2006b.

En la segunda fase, los coeficientes de absorción y difusión fueron dados y algunos detalles geométricos de la sala se incluyeron también. En esta fase, a diferencia de la primera, se consideraron dos configuraciones: habitación con las cortinas abiertas y con las cortinas cerradas.

A continuación se muestra la sala simulada para la segunda fase.

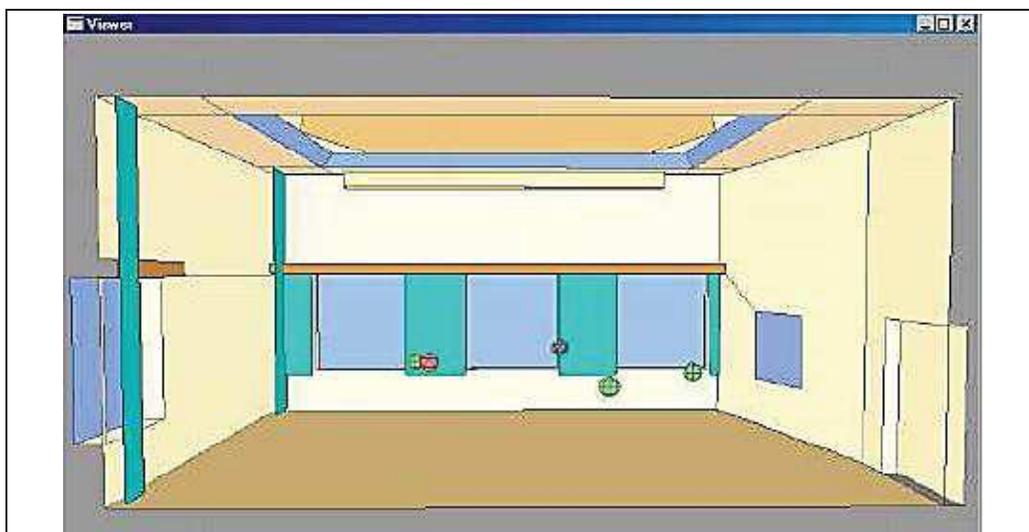


Figura 4.2. Modelamiento de la sala para la fase 2. Adaptado de Tenenbaum, Camilo, Torres, Stutz, 2006b.

Finalmente, en la tercera fase, se incluyeron casi todos los detalles geométricos del estudio de música, incluyendo difusores en el techo y en una de las paredes de la habitación. A continuación se muestra la configuración de la sala simulada en la tercera fase del Round Robin 3.

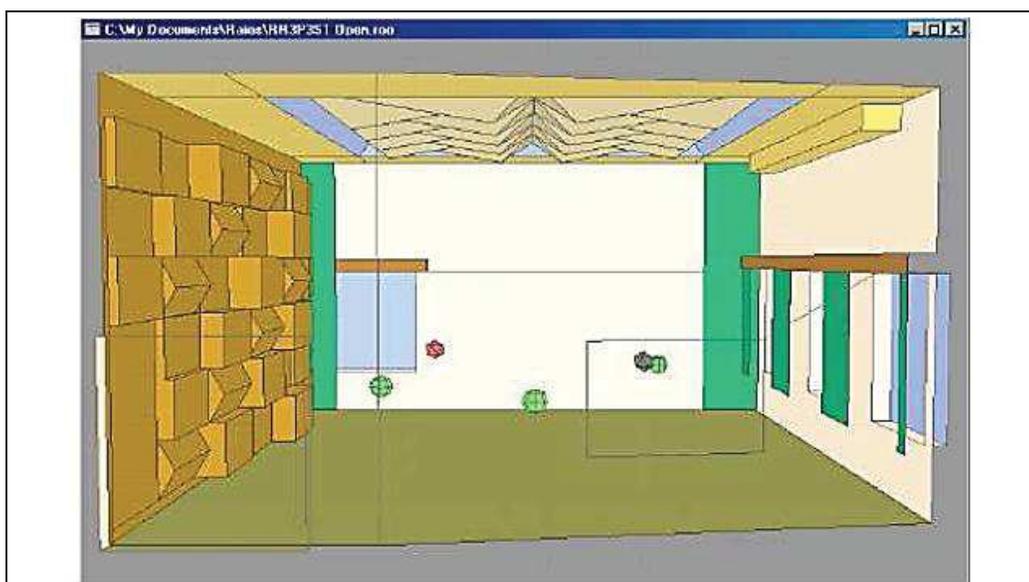
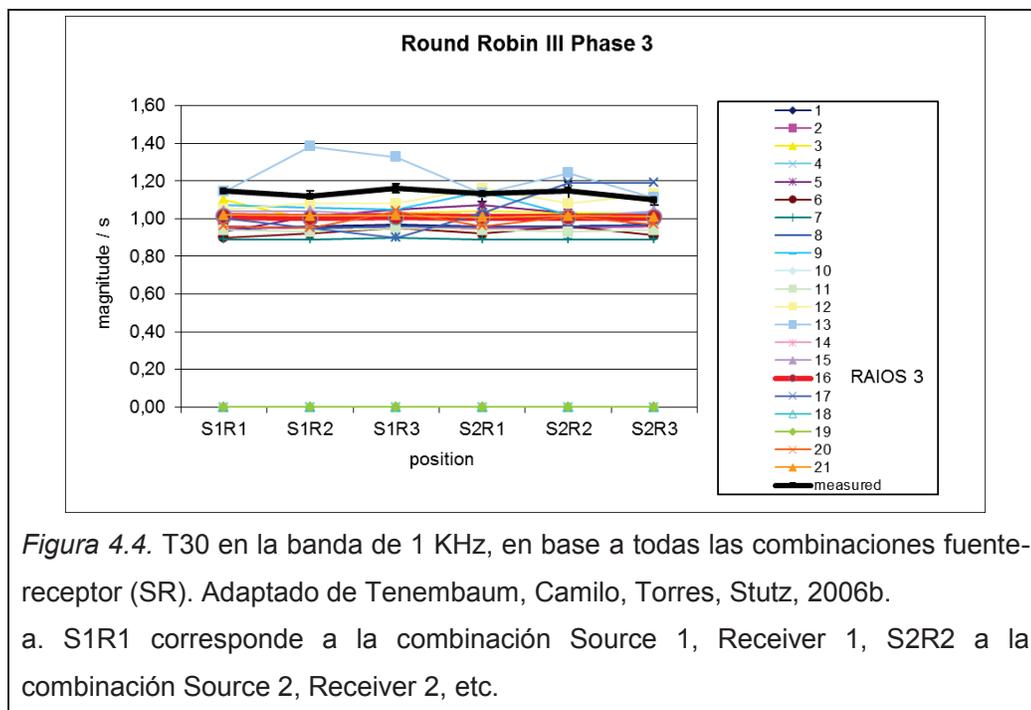


Figura 4.3. Modelamiento de la sala para la fase 3. Adaptado de Tenenbaum, Camilo, Torres, Stutz, 2006b.

Cada equipo participante en Round Robin 3 recibió un número de identificación, conocido sólo por los organizadores y, por supuesto, el propio participante. Al final de cada fase, los resultados proporcionados por todos los participantes estaban disponibles en el sitio web del proyecto (www.ptb.de), por lo que cualquiera podría evaluar, por comparación, si algún parámetro fue mal ajustado. Los datos experimentales también fueron publicados, dando la posibilidad real para verificar los resultados de las simulaciones numéricas con los datos reales, permitiendo tener una validación fiable de los métodos propuestos y del software.

En los gráficos que siguen, se presentan los resultados numéricos obtenidos por los programas participantes, los resultados del código computacional *RAIOS 3.0* se presentan con líneas continuas gruesas, los resultados numéricos obtenidos por otros participantes se presentan como líneas finas, y los resultados de la medición como líneas continuas gruesas. Los parámetros acústicos que se presentan a continuación son: T30, EDT, C80, D50, TS y G.



En la Figura 4.4. se presenta el T30 en la banda de 1 KHz en base a todas las combinaciones SR. Es interesante observar que la curva de tiempo de reverberación es casi plana. Esto se debe principalmente al alto grado de difusión de la habitación. Se puede apreciar que existen diferencias poco significativas en todas las posiciones, de manera que el software presenta una buena simulación de este parámetro de calidad acústica.

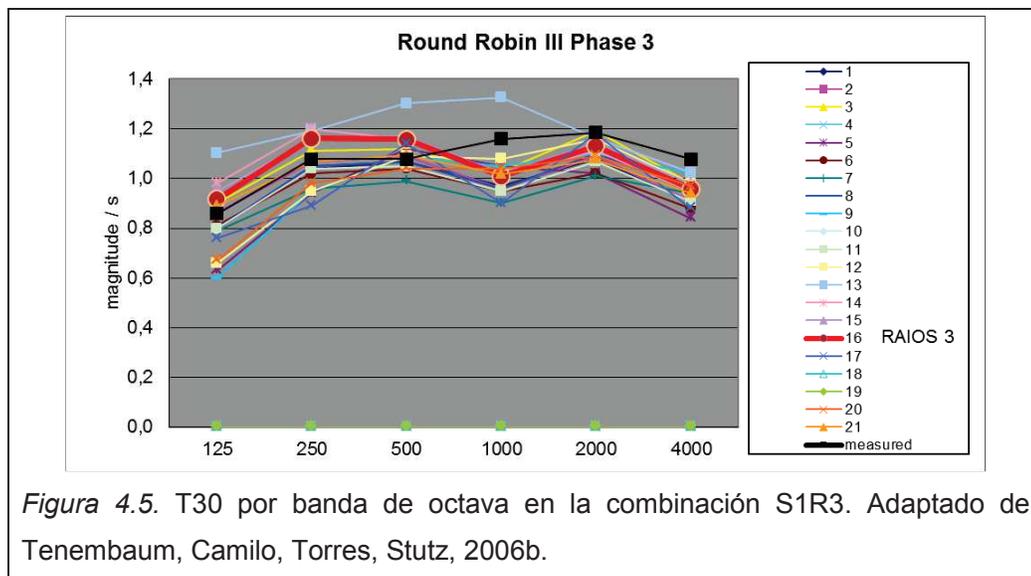


Figura 4.5. T30 por banda de octava en la combinación S1R3. Adaptado de Tenenbaum, Camilo, Torres, Stutz, 2006b.

En la Figura 4.5. se presenta el T30 por banda de octava en la combinación S1R3. Se puede observar que los valores obtenidos por *RAIOS* son ahora ligeramente mayores que los experimentales en las tres bandas de octavas más bajas (125, 250 y 500 Hz) y ligeramente inferior en las tres bandas más altas (1, 2 y 4 KHz). Los valores obtenidos se aproximan a los datos medidos, con un error promedio de alrededor de $\pm 0,04$ s.

En las bandas de alta frecuencia (de 1 a 4 KHz), los datos de medición presentan mayor magnitud que los simulados. En esta región de frecuencias, la buena predicción de difusión sonora del método híbrido, muestra que los resultados obtenidos por *RAIOS* se aproximan a los resultados medidos.

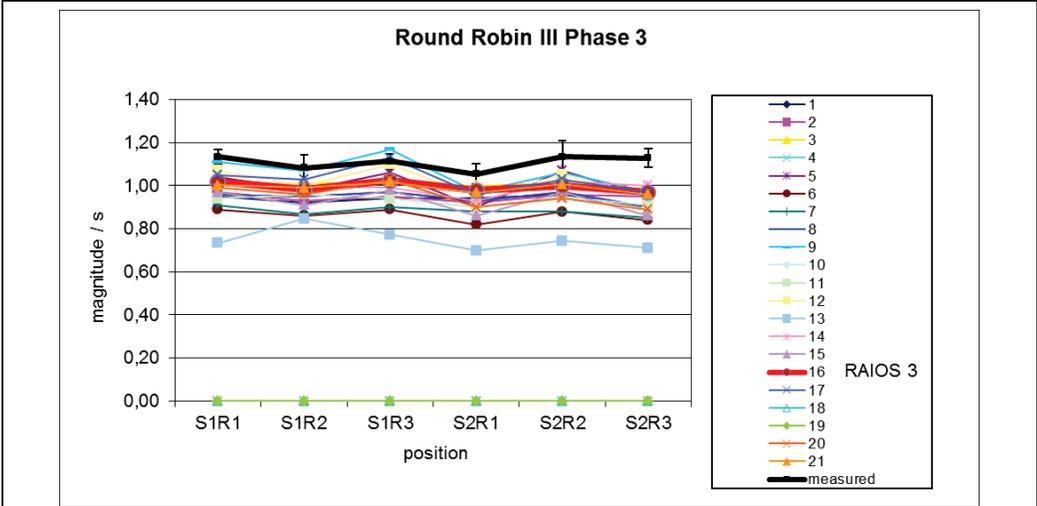


Figura 4.6. EDT en la banda de 1 KHz, en base a todas las combinaciones SR. Adaptado de Tenenbaum, Camilo, Torres, Stutz, 2006b.

En la Figura 4.6. se presenta el parámetro EDT en la banda de 1 KHz, en base a todas las combinaciones SR. La diferencia media entre los resultados de simulación obtenidos por *RAIOS* y los datos de medición es de alrededor de 0,1 s. En la posición S2R3, la diferencia es mayor, alrededor de 0,15 s. manteniéndose una tendencia en la curva respecto a los resultados experimentales.

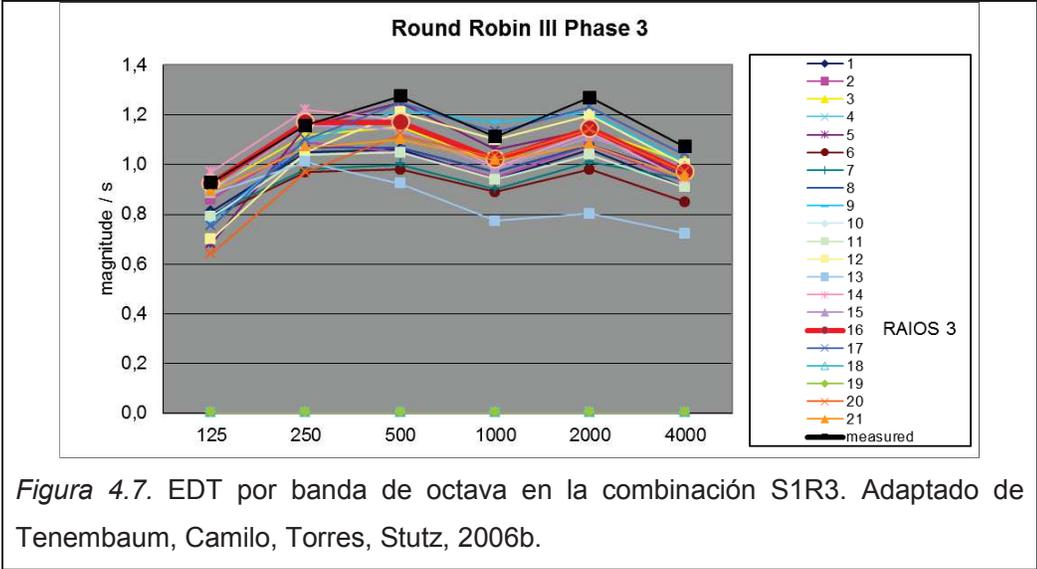


Figura 4.7. EDT por banda de octava en la combinación S1R3. Adaptado de Tenenbaum, Camilo, Torres, Stutz, 2006b.

En la Figura 4.7. se presenta el EDT por banda de octava en la combinación S1R3. Se puede apreciar que existe una similitud entre la curva de datos experimentales y la curva obtenida por el software *RAIOS*, donde las variaciones más significativas se encuentran en las bandas de 500 Hz y 2 KHz, con una desviación de alrededor de 0,1 s. En las bandas de 125 y 250 Hz, el error es mínimo. Mientras que en las bandas de 1 y 4 KHz, la desviación es de alrededor de 0,05 ms.

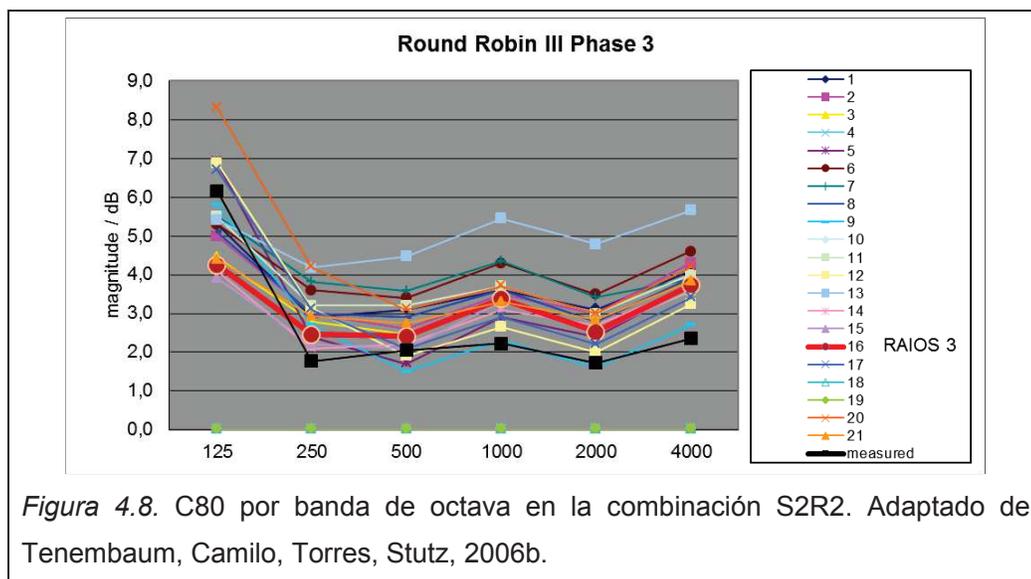


Figura 4.8. C80 por banda de octava en la combinación S2R2. Adaptado de Tenenbaum, Camilo, Torres, Stutz, 2006b.

En la Figura 4.8. los resultados de C80, por banda de octava en la combinación S2R2 presentan un error muy bajo, a excepción de las banda de 125 Hz, donde el error es de aproximadamente 2 dB, y de las bandas de 1 y 4 KHz, donde la diferencia es de aproximadamente 1 dB, valores que se encuentran dentro de un rango de error tolerable. Para todas las otras bandas de octava, los resultados obtenidos por *RAIOS* estaban muy cerca de los resultados experimentales.

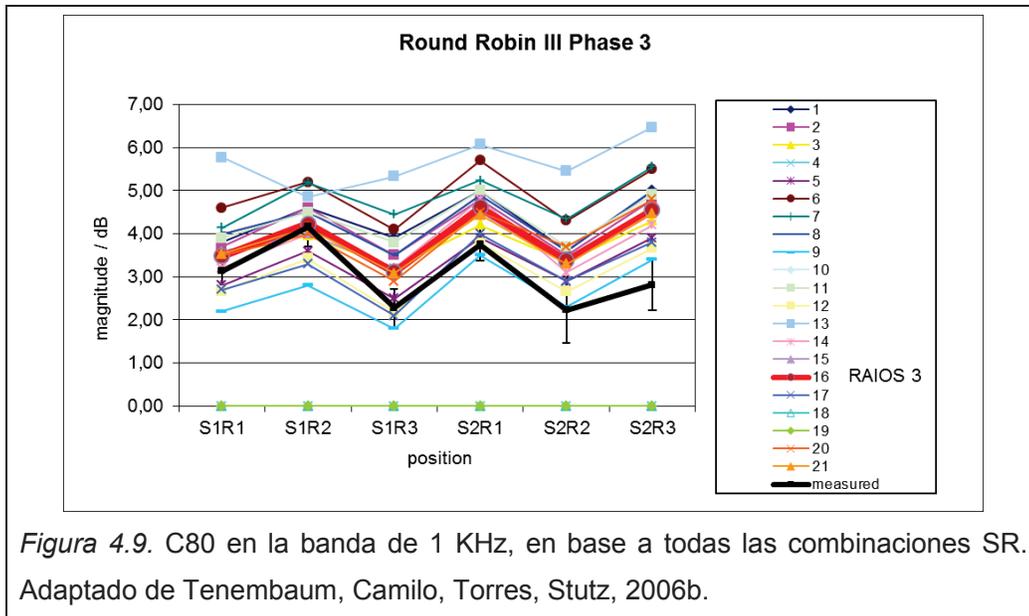


Figura 4.9. C80 en la banda de 1 KHz, en base a todas las combinaciones SR. Adaptado de Tenenbaum, Camilo, Torres, Stutz, 2006b.

En la Figura 4.9. se presenta el parámetro C80 en la banda de frecuencia de 1 KHz, en base a todas las combinaciones SR. Los resultados obtenidos por *RAIOS* en las combinaciones S2R1, S2R2 y S2R3, muestran una desviación de 1 y 2 dB, considerándose estos valores dentro de un rango de error tolerable. En las otras combinaciones, la diferencia es poco notable.

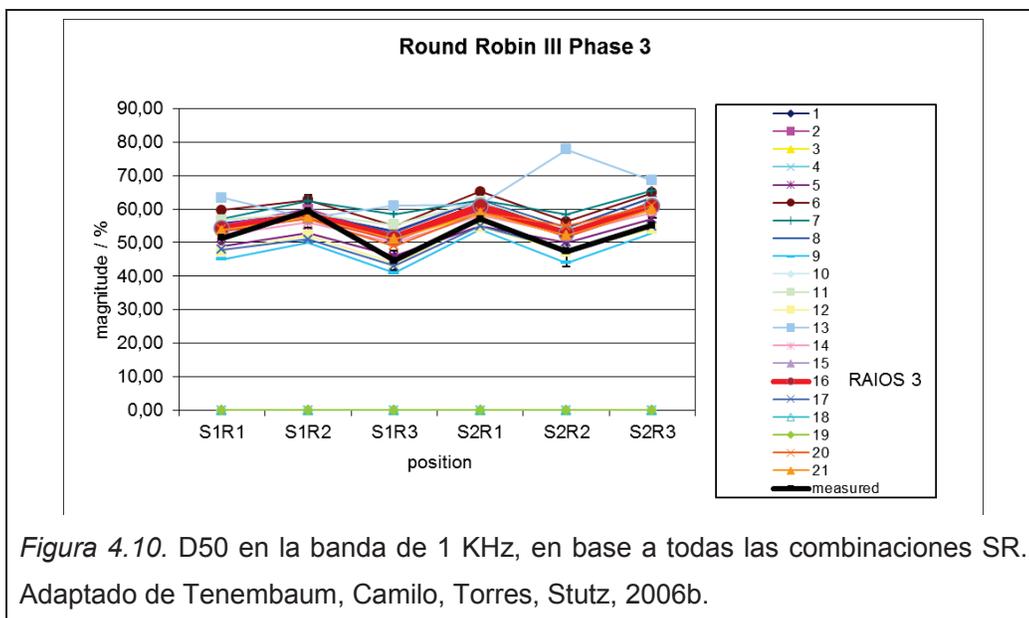
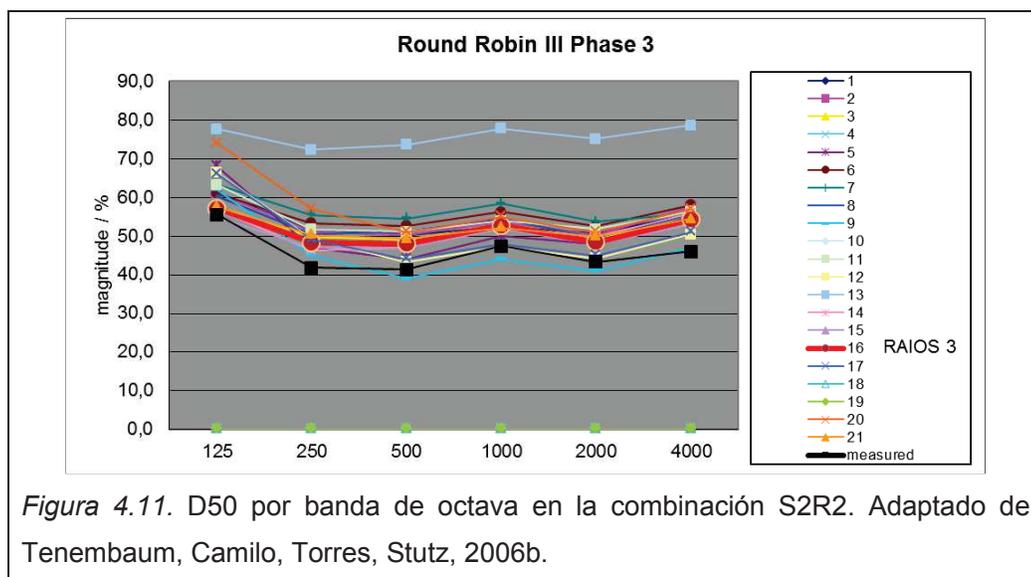


Figura 4.10. D50 en la banda de 1 KHz, en base a todas las combinaciones SR. Adaptado de Tenenbaum, Camilo, Torres, Stutz, 2006b.

En la Figura 4.10. los resultados para D50 en la banda de 1KHz, en base a todas las combinaciones SR están muy próximos a los resultados medidos, conservando la misma tendencia en la curva obtenida. Donde las variaciones más significativas se pueden apreciar en las combinaciones S1R3, S2R2 y S2R3, con un error del 5 %.



En la figura 4.11. se presenta el parámetro D50 por banda de octava en la combinación S2R2, donde se observa un error muy bajo en las bandas de frecuencia, a excepción de la banda de 125 Hz, donde el error es de aproximadamente el 20 %. Este error se debe a que en esta banda de frecuencia predomina la acústica modal sobre la acústica geométrica.

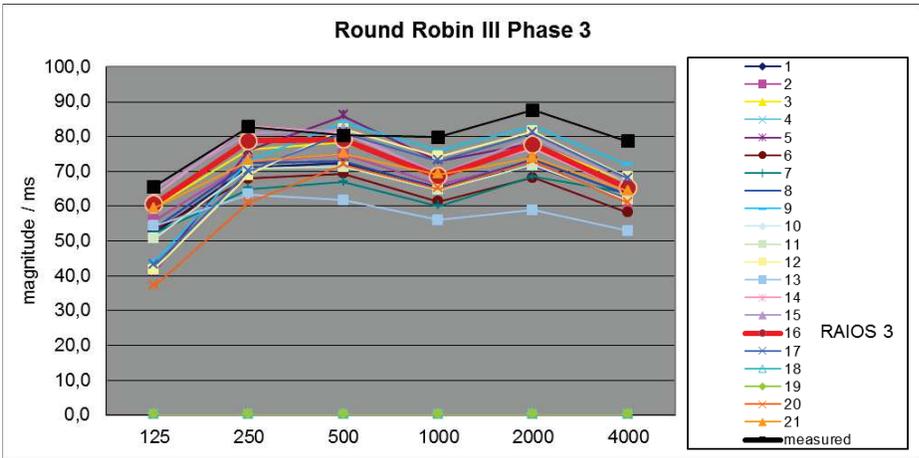


Figura 4.12. TS por banda de octava en la combinación S2R2. Adaptado de Tenenbaum, Camilo, Torres, Stutz, 2006b.

En la Figura 4.12. se presenta el parámetro TS por banda de octava en la combinación S2R2. Los resultados de la simulación para TS presentados por RAIOS en las tres bandas de frecuencia mas bajas, fueron uno de los más cercanos, sin embargo, en las tres bandas de frecuencia mas altas, los resultados de la simulación presentan un error relativo del alrededor del 20 %.

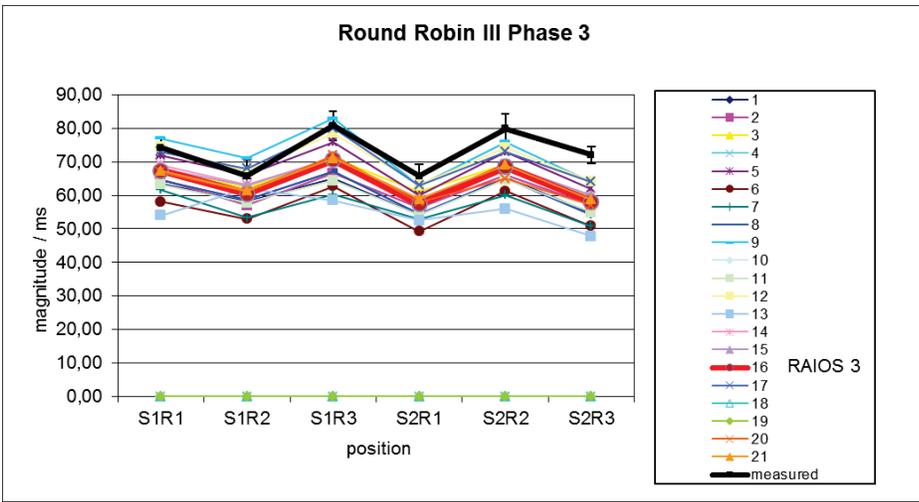
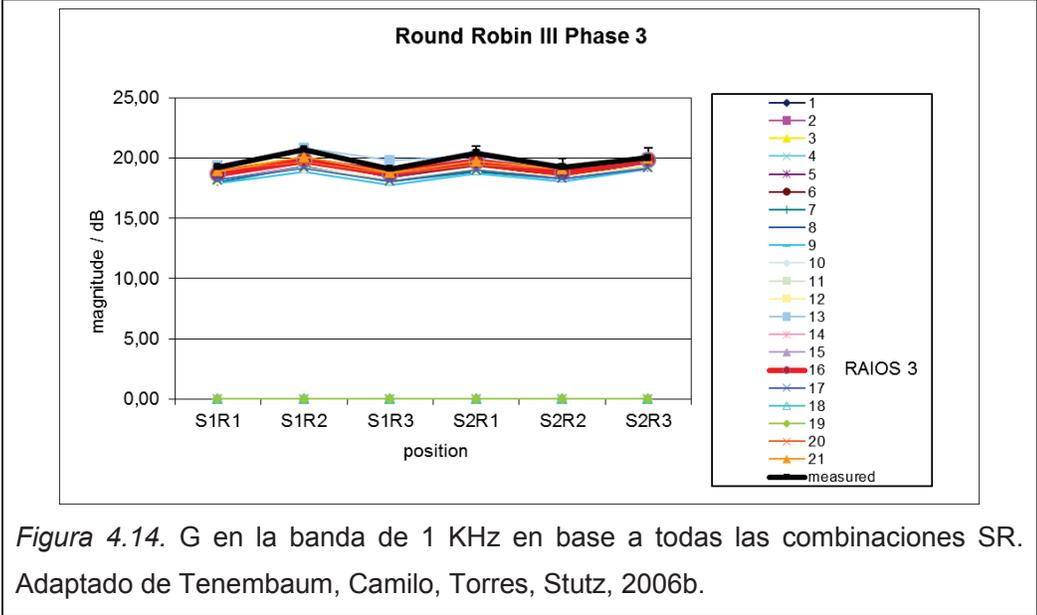


Figura 4.13. TS en la banda de 1 KHz, en base a todas las combinaciones SR. Adaptado de Tenenbaum, Camilo, Torres, Stutz, 2006b.

En la Figura 4.13. se presenta el parámetro TS en la banda de 1 KHz en base a todas las combinaciones SR. Los resultados obtenidos por *RAIOS* presentan una curva muy similar a la de los datos experimentales, con una desviación estándar del 10 %.



En la Figura 4.4. se presenta el parámetro G en la banda de frecuencia de 1 KHz en base a todas las combinaciones SR. Los resultados de este parámetro fueron los más exactos que arrojaron todos los programas, donde a penas se nota la diferencia entre los valores medidos y los valores de la simulación.

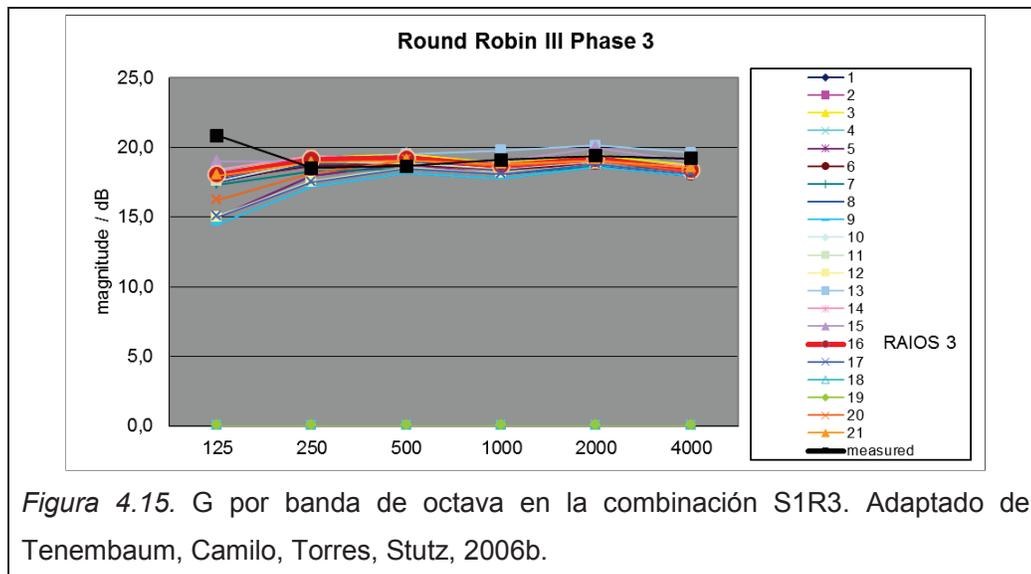


Figura 4.15. G por banda de octava en la combinación S1R3. Adaptado de Tenenbaum, Camilo, Torres, Stutz, 2006b.

En la Figura 4.15. se presenta G por banda de octava en la combinación S1R2. Se puede notar claramente que todos los programas presentaron un error significativo en la banda de 125 Hz, donde *RAIOS* tuvo un error de 3 dB. Sin embargo en las demás bandas de frecuencia, el error tiene una desviación estándar de 0,5 dB. Esto se debe a que *RAIOS* aún no cuenta con un módulo que calcule los modos normales de vibración presentes en las bandas de frecuencia bajas.

A continuación se presenta una tabla con los resultados de todos los programas participantes en el Round Robin 3, en la cual se presenta el error relativo para cada parámetro evaluado. Se puede apreciar que el código computacional *RAIOS*, presenta los mejores resultados en la simulación efectuada con las cortinas cerradas.

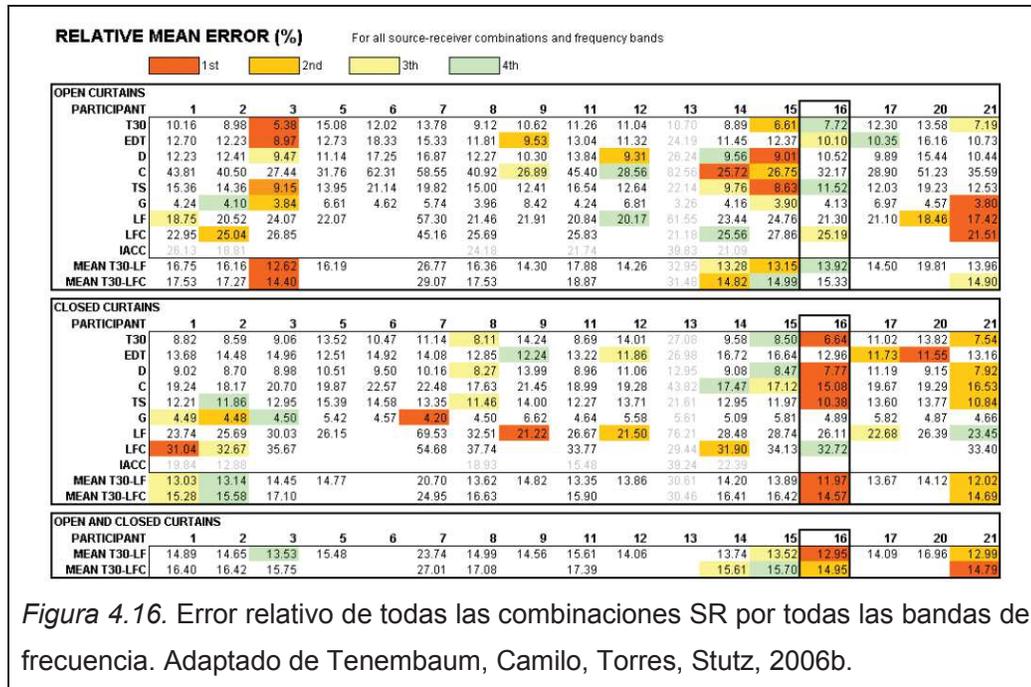


Figura 4.16. Error relativo de todas las combinaciones SR por todas las bandas de frecuencia. Adaptado de Tenenbaum, Camilo, Torres, Stutz, 2006b.

A partir de los resultados obtenidos en todas estas gráficas, en el siguiente capítulo, va a ser posible analizar los resultados que entrega el módulo desarrollado para el código computacional *RAIOS*, para esto, se va a presentar una apreciación subjetiva de la distribución del mapa de colores sobre las superficies de contorno del recinto simulado.

4.2. Representación de la sala dentro RAIOS.

Para la simulación fueron entregados a cada participante del Round Robin 3 los coeficientes de absorción y difusión de los materiales usados en la construcción del estudio de música PTB, así como las ubicaciones de fuentes, receptores y superficies.

A partir de estos datos, se procedió a dibujar la sala en el código computacional *RAIOS*, usando las herramientas que posee el código, como la posibilidad de dibujar polígonos en 3 dimensiones. Para realizar el

gráfico de planos en el código, se deben conocer las coordenadas tridimensionales de cada uno de los vértices.

Tras dibujar la sala, se procedió a asignar los materiales de construcción dados por el PTB, vale la pena mencionar que *RAIOS* cuenta con una base de datos de alrededor de 1000 materiales, los cuales tienen sus respectivos coeficientes de absorción y difusión sonora.

Finalmente, al tener la sala diseñada y con materiales de construcción, se pueden implementar las fuentes y los receptores, para posteriormente, proceder con la simulación acústica.

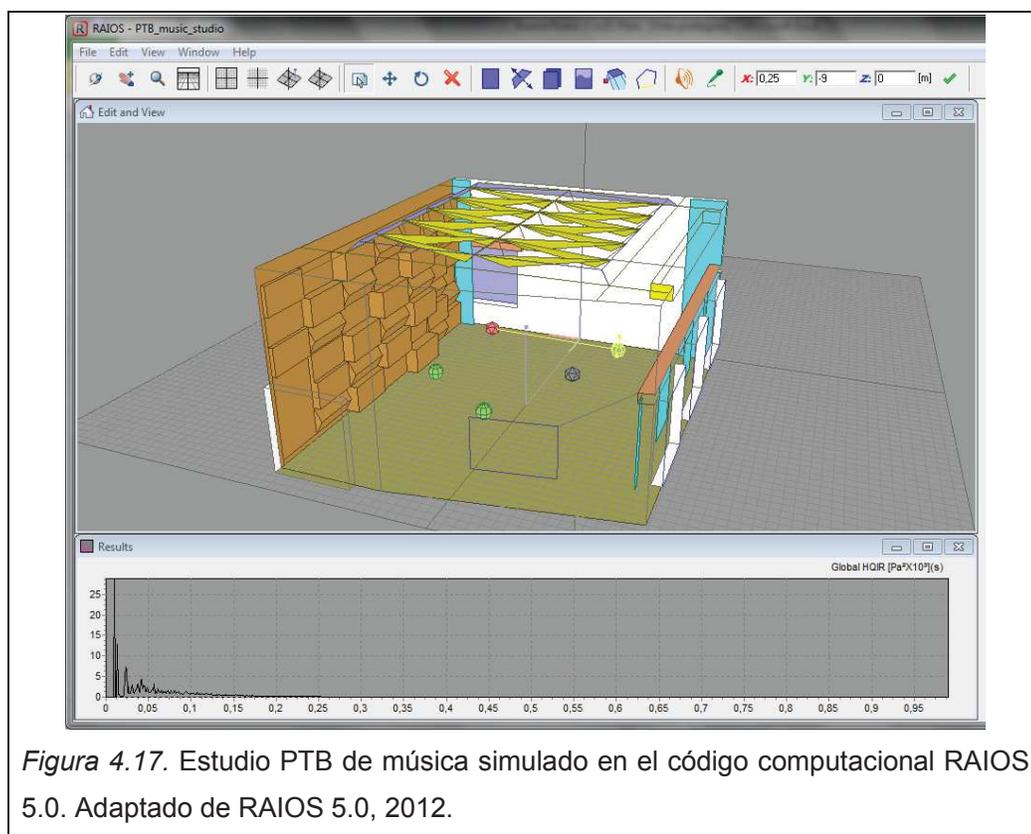


Figura 4.17. Estudio PTB de música simulado en el código computacional RAIOS 5.0. Adaptado de RAIOS 5.0, 2012.

4.3. Configuraciones previas a la simulación.

Como ya se habló en los dos apartados anteriores, para realizar las simulaciones, fueron entregados a cada participante los datos con los cuales se iba a modelar la sala y a correr la simulación.

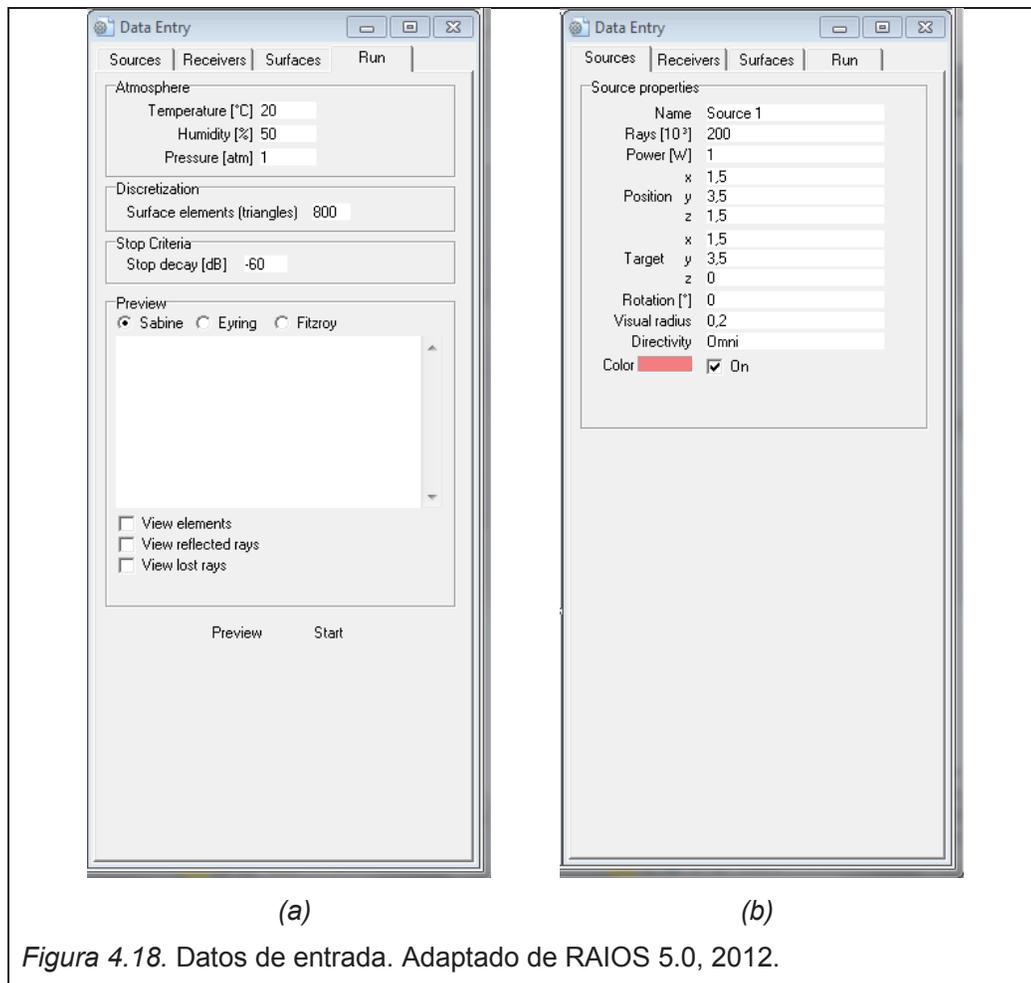
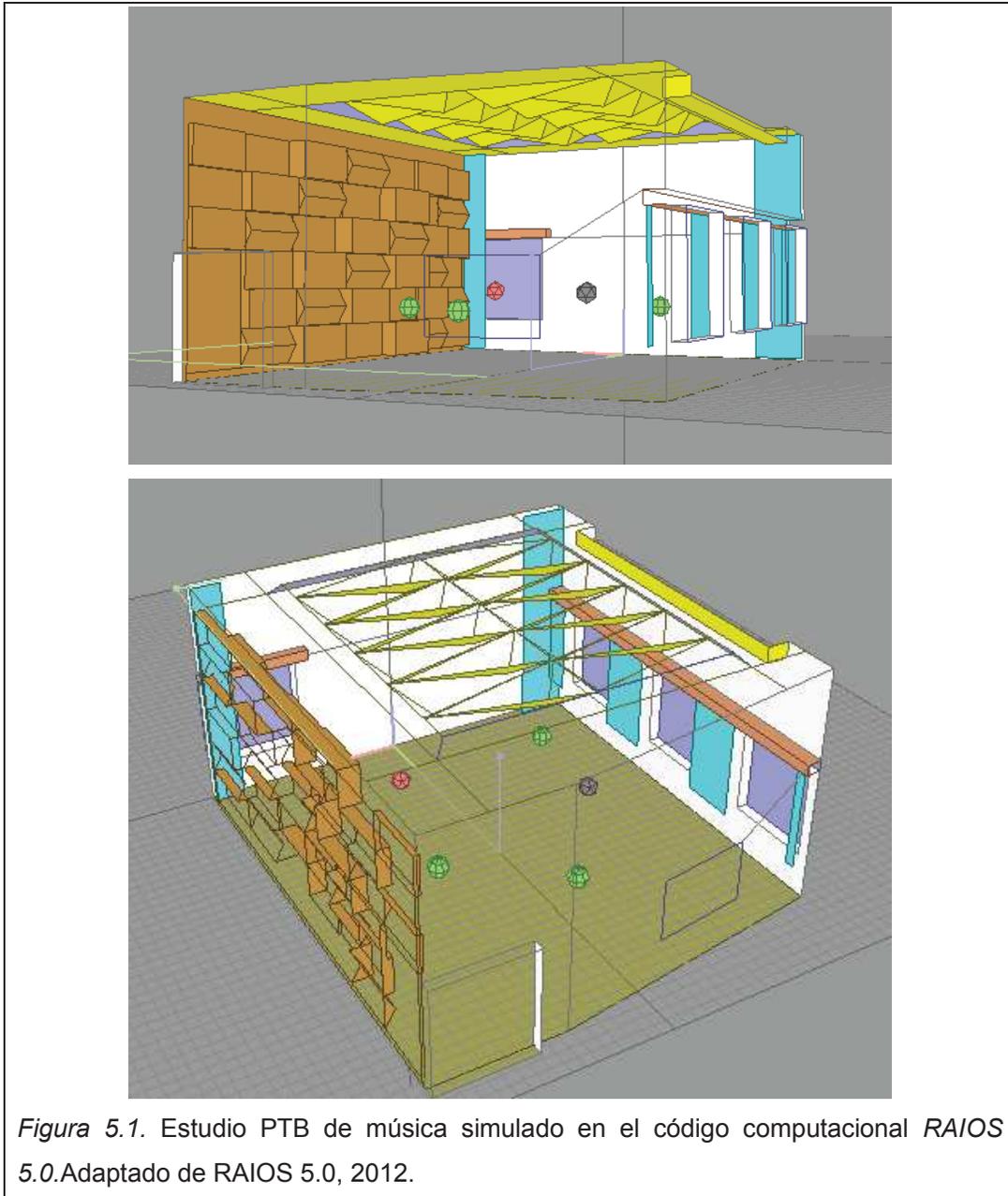


Figura 4.18. Datos de entrada. Adaptado de RAIOS 5.0, 2012.

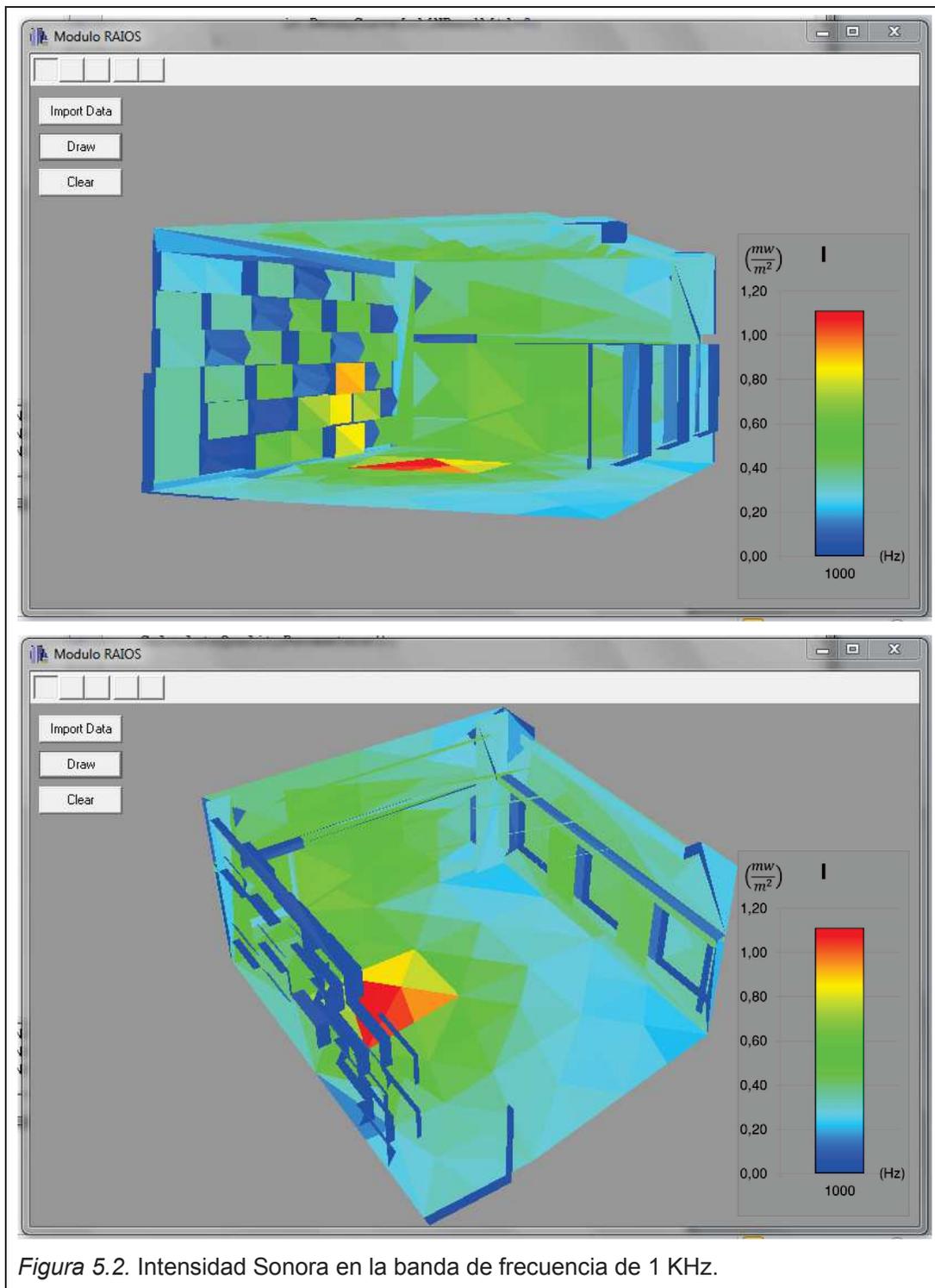
En la Figura 4.18 (a), se pueden apreciar los valores de Temperatura, Humedad y Presión, correspondientes a condiciones atmosféricas, así como el número de triángulos a ser usados por el programa a partir de las superficies de contorno y el criterio de tiempo de decaimiento. En la Figura 4.18 (b), se presentan las condiciones de la fuente como el número de rayos, la potencia acústica de la fuente, el posicionamiento espacial, etc.

5. Análisis de resultados

A continuación se procederá a analizar los resultados obtenidos por el programa, para esto, se presentaran dos gráficas de la sala de la siguiente manera:



Los resultados a analizarse en las gráficas, fueron evaluados para la banda de frecuencia de 1 KHz, frecuencia muy usada tanto en audio como en acústica.



Las figuras de los resultados obtenidos en las bandas de frecuencia, 125, 250, 500, 2K y 4K Hz, así como un valor global, se presentan como anexos.

La simulación fue efectuada con una potencia acústica de la fuente correspondiente a 1 w, la misma que es distribuida para el número de rayos acústicos emitidos, esta potencia al dividirse para el área de cada elemento de contorno se transforma en intensidad sonora.

La intensidad sonora representa la cantidad de energía acústica que atraviesa una superficie, en la Figura 5.2. correspondiente a la intensidad sonora en la banda de frecuencia de 1 KHz, se puede apreciar una coherencia respecto a la distribución energética presente en la sala, debido a que en las cercanías de la fuente se observa una mayor cantidad de energía, y a medida que la distancia hacia la fuente aumenta, es notorio que la energía disminuye. Esto se aprecia en el gráfico, debido a la variación en la tonalidad de colores, del color rojo hacia el azul, presentes en las superficies de contorno de la sala.

Al lado derecho de la representación gráfica de la sala, se muestra la escala de colores con sus respectivos valores de intensidad sonora mw/m^2 , a través de esta, podemos identificar si la variación de colores dentro de la sala corresponden a un incremento o disminución de la intensidad sonora.

En la Figura 5.2. se aprecia que en las cercanías de la fuente la intensidad sonora corresponde al valor de $1,1 \text{ mw/m}^2$.

PARAMETROS DE CALIDAD ACUSTICA

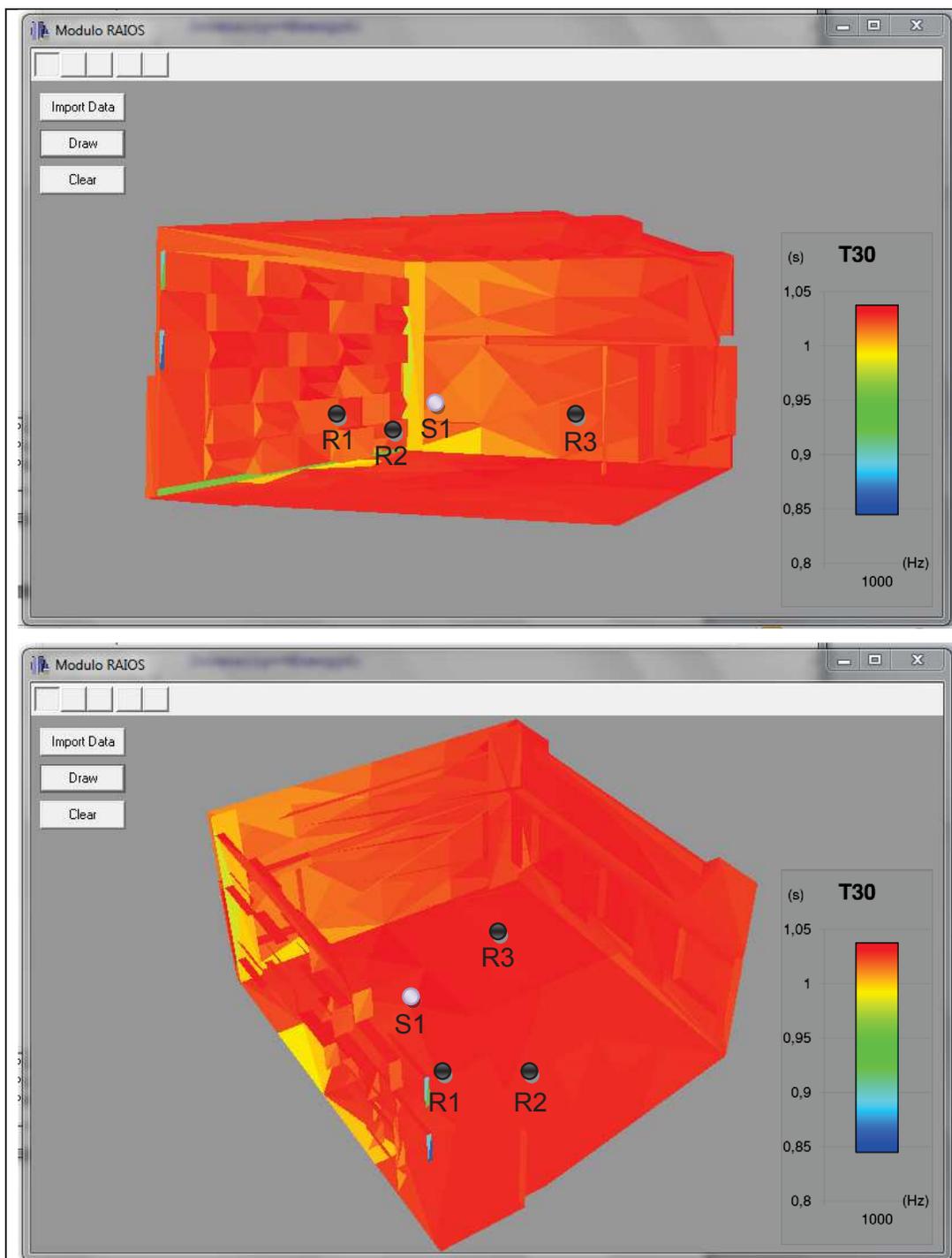


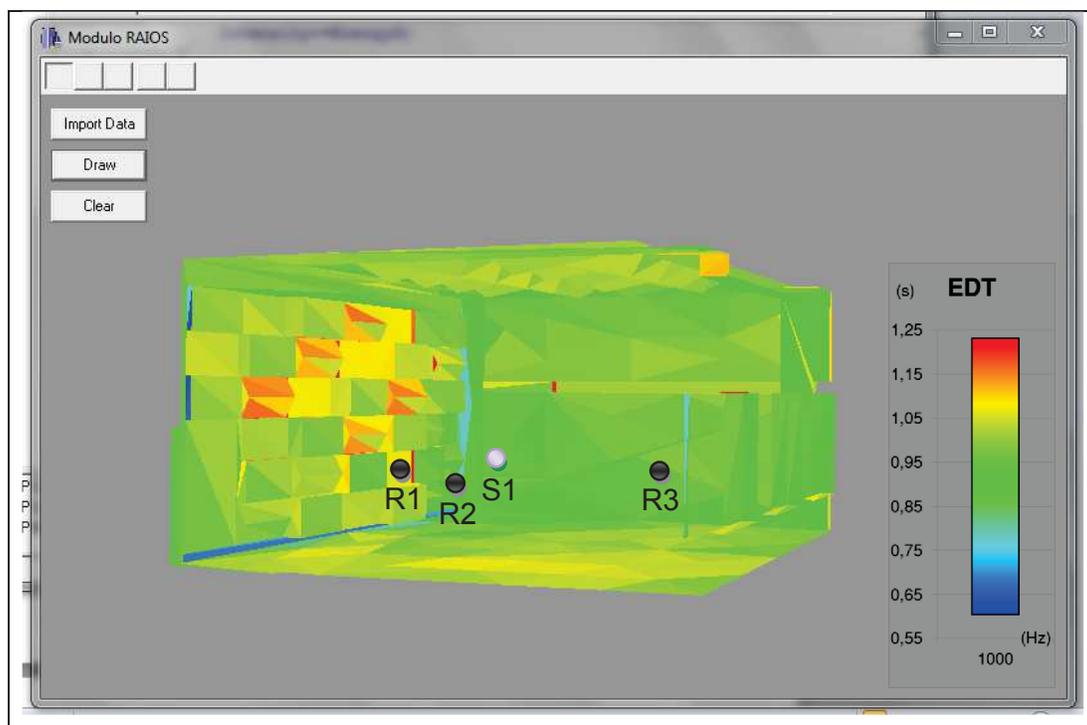
Figura 5.3. T30 en la banda de frecuencia de 1 KHz.

a. S1 corresponde a la fuente 1.

b. R1, R2 y R3 corresponden a los receptores 1, 2 y 3 respectivamente.

El parámetro T30, cuantifica el tiempo de reverberación de la sala. En la Figura 5.3. correspondiente a T30 para la banda de frecuencia de 1 KHz, se puede observar que los resultados obtenidos tras la simulación en los puntos R1, R2 y R3 (correspondientes a los 3 receptores) son de 1 s aproximadamente en las tres posiciones y los valores obtenidos en la gráfica se los puede estimar entre 1,02 y 1,03 s aproximadamente. La diferencia entre estos valores pueden ser debido a que los valores numéricos se encuentran a una altura de 1,2 m sobre el suelo, mientras que los valores obtenidos por el módulo, son los valores correspondientes a cada elemento de la subdivisión en triángulos de las superficies de contorno generada por el programa, sin embargo, estos resultados sirven para tener una idea global y visual del comportamiento de la sala.

Esta es la gráfica en la que es casi inapreciable la gama de colores; sin embargo, en las gráficas de los siguientes parámetros se va a observar una distribución de cada parámetro con una variación de colores más marcada.



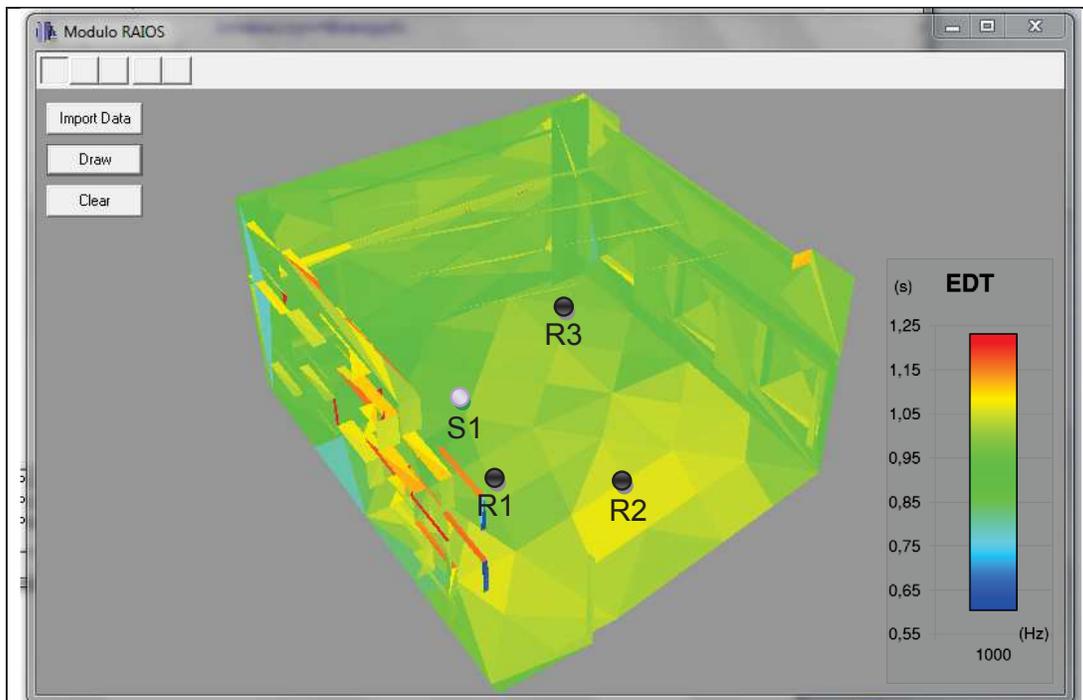


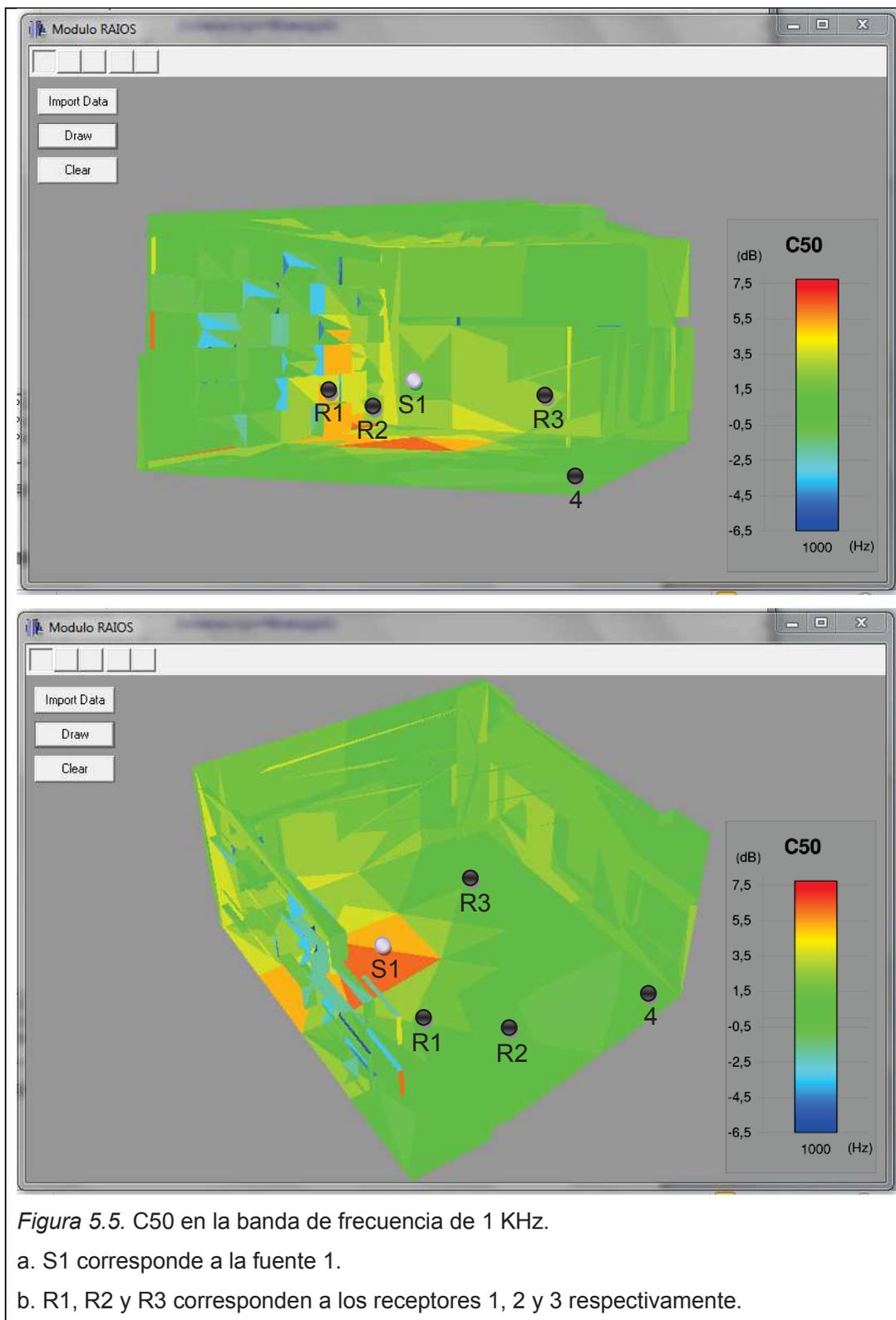
Figura 5.4. EDT en la banda de frecuencia de 1 KHz.

a. S1 corresponde a la fuente 1.

b. R1, R2 y R3 corresponden a los receptores 1, 2 y 3 respectivamente.

Al ser el EDT, un descriptor del tiempo de reverberación, en la Figura 5.4. correspondiente al EDT en la banda de frecuencia de 1 KHz, es posible observar en la gráfica que el tiempo de decaimiento temprano es homogéneo en toda la sala, existiendo una variación de alrededor de 0,2 s.

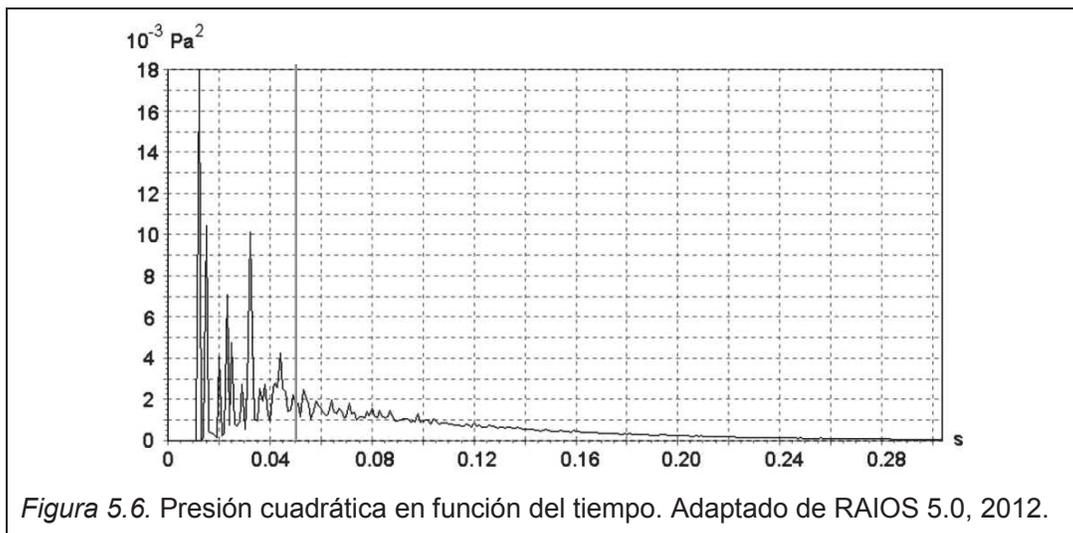
Los resultados obtenidos en la gráfica presentan una concordancia con los resultados numéricos entregados por la simulación efectuada en el código computacional *RAIOS*, donde en los puntos R1, R2 y R3, los valores numéricos corresponden a los valores de 1,11, 1,09 y 1,1 s, respectivamente; y en base a el cuadro de colores empleado por el módulo, se puede observar que en los puntos R1, R2 y R3, los valores estimados son 1,02, 1,04 y 1,03 s.



En la Figura 5.5. correspondiente al parámetro C50 en la banda de frecuencia de 1 KHz, el mismo que cuantifica el grado de fusión entre las frases habladas, es posible observar que a medida que existe una mayor distancia respecto a la fuente, el valor va disminuyendo, debido a que, igual que en la realidad, se va perdiendo la claridad del mensaje hablado.

Analizando los puntos R1, R2 y R3, donde los resultados obtenidos en la simulación por el código computacional *RAIOS* son 1,3, 0,5 y 1 dB respectivamente; se puede apreciar que los resultados estimados del módulo corresponden a los valores de 1,2, 0,3 y 1 dB; así que, existe una concordancia respecto a la simulación.

Analizando la ecuación (2.21) correspondiente a este parámetro, donde se relaciona la presión cuadrática que llega en los primeros 50 ms respecto a la que llega desde los 50 ms hasta el T60. Se puede notar en la Figura 5.6. que mientras mayor es la presión cuadrática en los primeros 50 milisegundos, mayor va a ser el parámetro debido a que estamos en el campo directo, como puede apreciarse la gama de colores rojo a amarillo en la Figura 5.5. y a medida que nos alejamos de la fuente nos vamos adentrando en el campo reverberante como puede apreciarse en la Figura 5.5. en las zonas donde se presenta el color verde ya que la presión cuadrática va disminuyendo así como el parámetro C50.



En la Figura 5.5. se puede observar una homogeneidad en la sala, la misma que puede ser consecuencia de que el recinto en estudio, es una sala tratada acústicamente, es decir, los materiales de construcción, así como su geometría y el uso de difusores en las paredes y techo fueron escogidos correctamente de manera que aporten a que exista un campo sonoro homogéneo, esto se debe a que la sala es un estudio de música y al ser utilizada para realizar grabaciones sonoras, es necesario contar con un espacio con un correcto funcionamiento acústico.

Se puede observar que no existen puntos de deficiencia en la construcción de la sala, debido a que el color azul, color correspondiente al valor mínimo, no se encuentra presente en ningún punto significativo de la sala.

Si se analiza el comportamiento del punto 4, se puede apreciar que en lugar de obedecer a una tendencia, como fue mencionado anteriormente, existe un nivel de ganancia; eso es visible ya que en este punto, en lugar de pasar del color celeste al color azul, se pasa de celeste a verde; esto se debe a que los puntos de mayor concentración energética en una sala se encuentran en los vértices, debido al aporte energético que realizan las tres paredes que intervienen en el fenómeno de reflexión sonora.

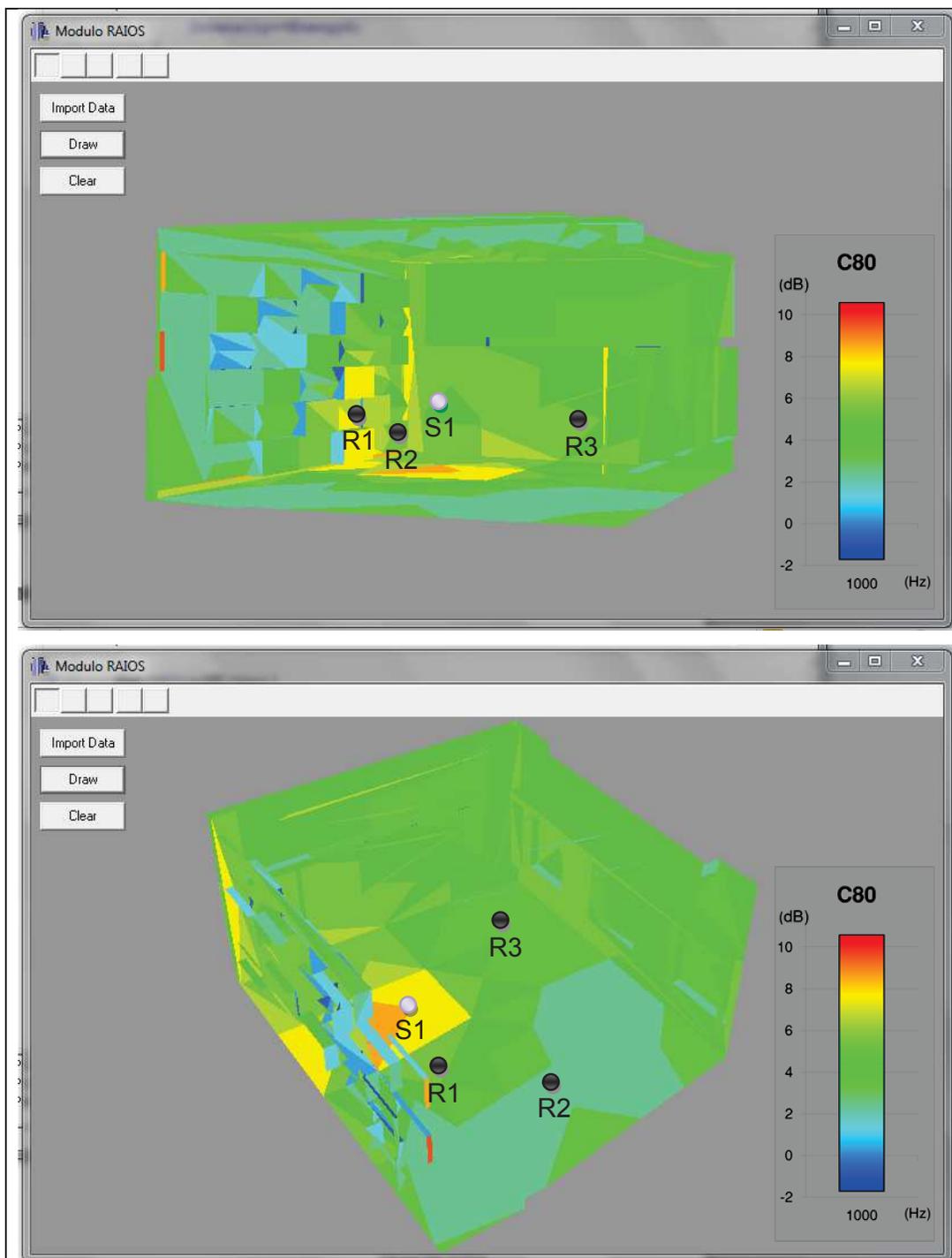


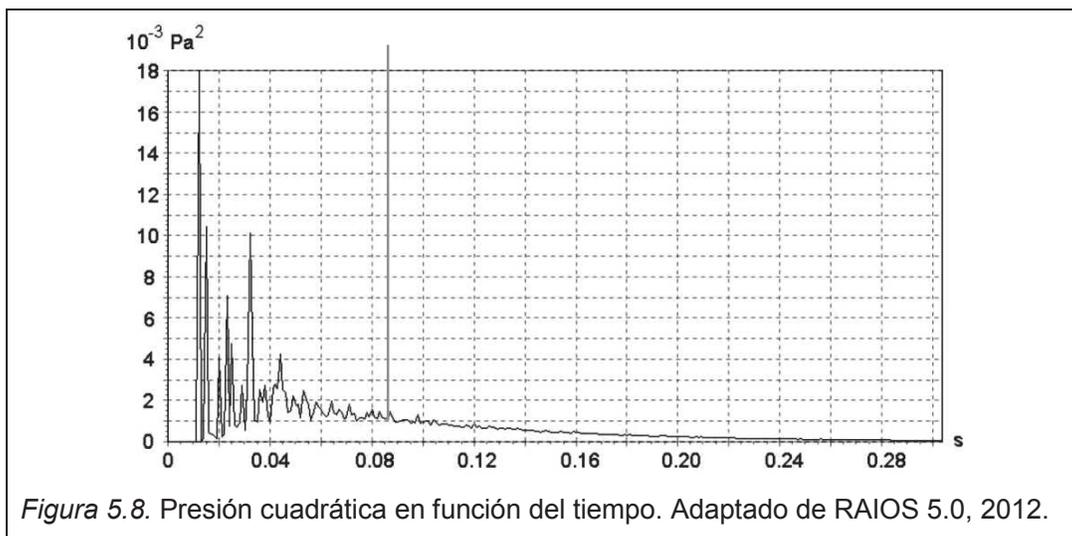
Figura 5.7. C80 en la banda de frecuencia de 1 KHz.

a. S1 corresponde a la fuente 1.

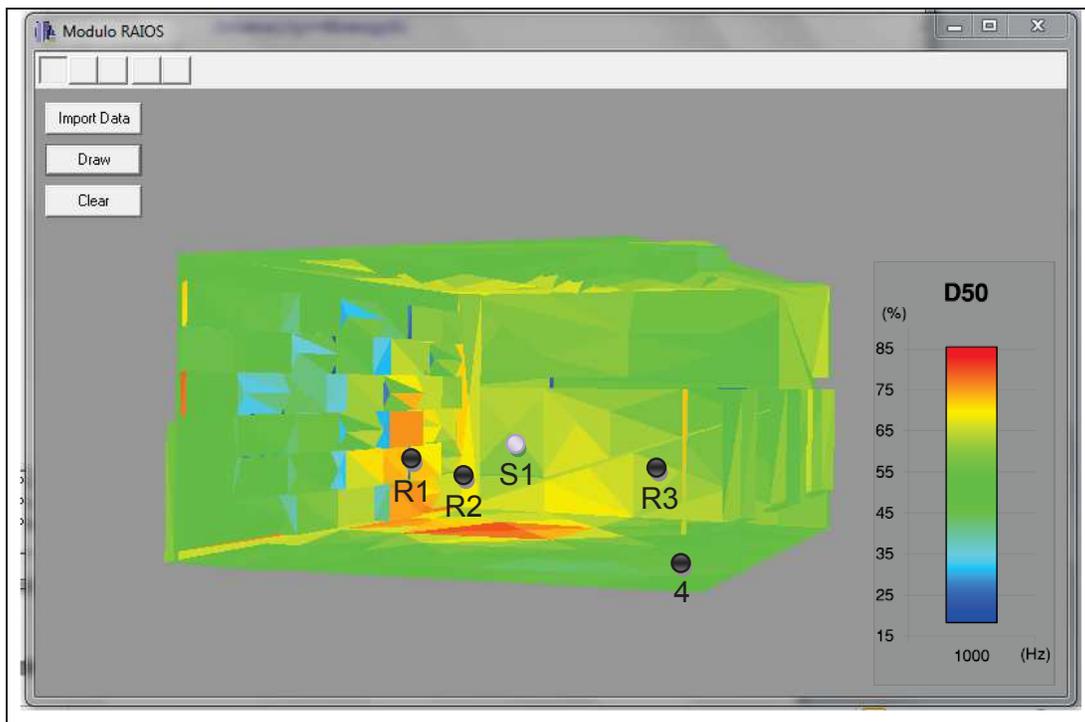
b. R1, R2 y R3 corresponden a los receptores 1, 2 y 3 respectivamente.

El parámetro C80, que cuantifica el grado de fusión entre las frases musicales, presenta un comportamiento muy similar al parámetro C50, debido a que la diferencia existente entre los mismos son los límites usados en la integral para el cálculo de cada uno de ellos, ya que el parámetro C50 usa 50 ms, que es el tiempo de persistencia acústica para sonidos hablados y el parámetro C80 usa 80 ms, que es el tiempo de persistencia acústica para sonidos de instrumentos musicales.

De igual manera que con el C80, analizando la ecuación (2.23) correspondiente a este parámetro, donde se relaciona la presión cuadrática que llega en los primeros 80 ms respecto a la que llega desde los 80 ms hasta el T60. Se puede notar en la Figura 5.8. que mientras mayor es la presión cuadrática en los primeros 80 milisegundos, mayor va a ser el parámetro debido a que estamos en el campo directo, como puede apreciarse la gama de colores naranja a amarillo en la Figura 5.7. y a medida que nos alejamos de la fuente nos vamos adentrando en el campo reverberante como puede apreciarse en la Figura 5.7. en las zonas donde se presenta el color verde y celeste ya que la presión cuadrática va disminuyendo así como el parámetro C80.



Los resultados obtenidos en la Figura 5.7. correspondiente al parámetro C80 en la banda de frecuencia de 1 KHz, presentan una concordancia con los resultados numéricos entregados por la simulación efectuada en el código computacional *RAIOS*, donde en los puntos R1, R2 y R3, los valores numéricos corresponden a los valores de 4,1, 3,3 y 3,7 dB, respectivamente; y en base a el cuadro de colores empleado por el módulo, se puede observar que los valores estimados son 4, 3 y 3,5 dB respectivamente.



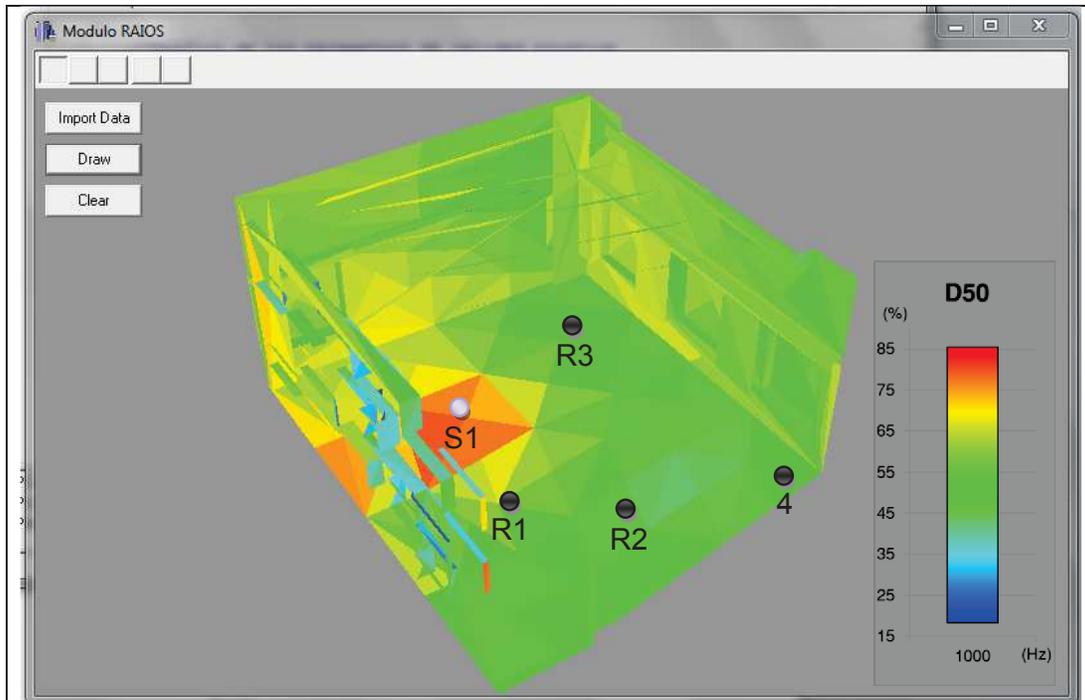


Figura 5.9. D50 en la banda de frecuencia de 1 KHz.

a. S1 corresponde a la fuente 1.

b. R1, R2 y R3 corresponden a los receptores 1, 2 y 3 respectivamente.

En la Figura 5.9. correspondiente al parámetro D50 en la banda de frecuencia de 1 KHz, el mismo que cuantifica el grado de separación entre las frases habladas, y que esta relacionado con C50; es posible observar que a medida que existe una mayor distancia respecto a la fuente, el valor va disminuyendo, el comportamiento es muy similar a los dos parámetros anteriores, sin embargo, la escala usada para el mapa de colores no es logarítmica, sino porcentual.

Analizando los puntos R1, R2 y R3, donde los resultados obtenidos en la simulación por el código computacional *RAIOS* son 57,6, 52,9 y 55,5 % respectivamente; se puede apreciar que los resultados estimados del módulo corresponden a los valores de 55, 52 y 55 %; así que, existe una concordancia respecto a la simulación.

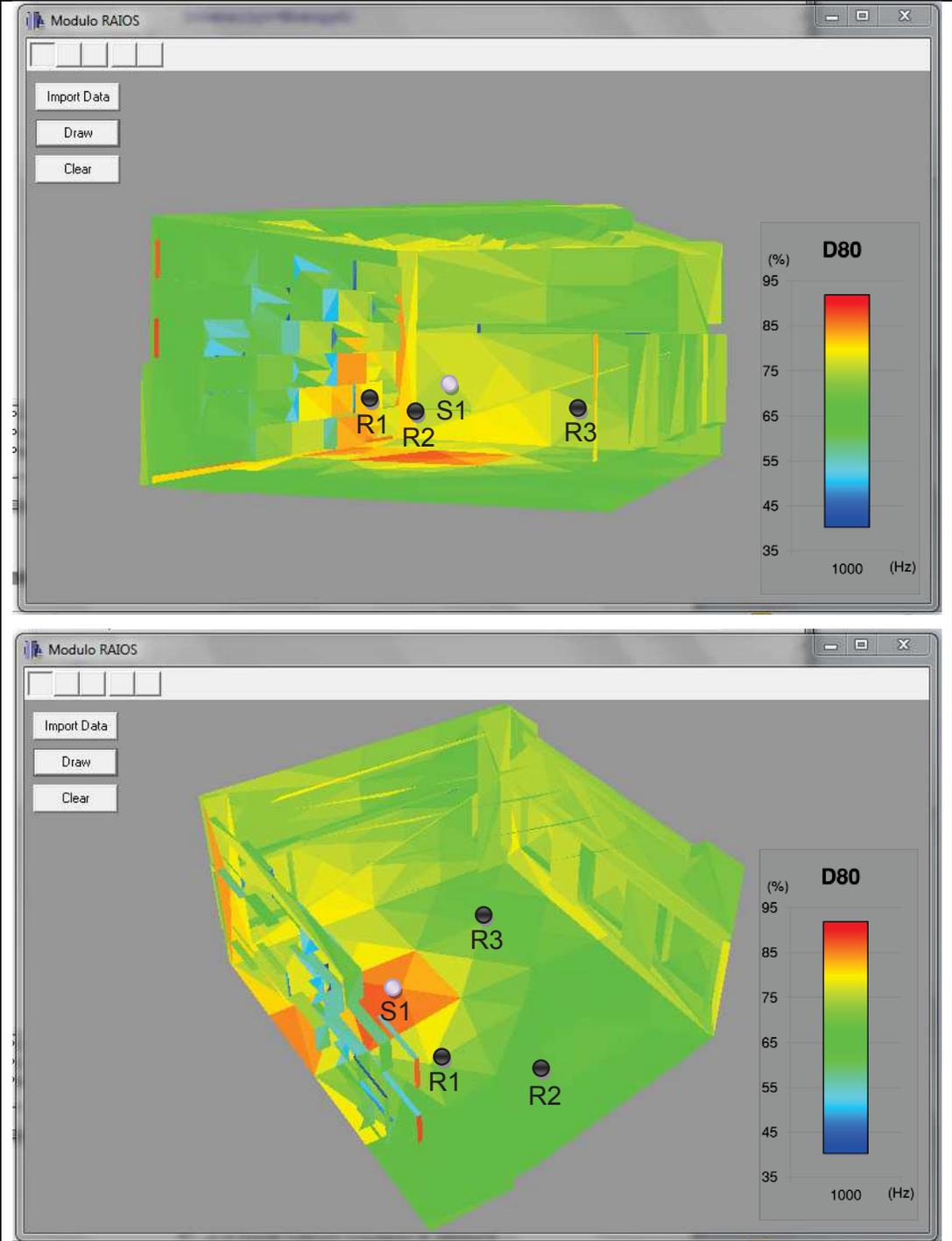
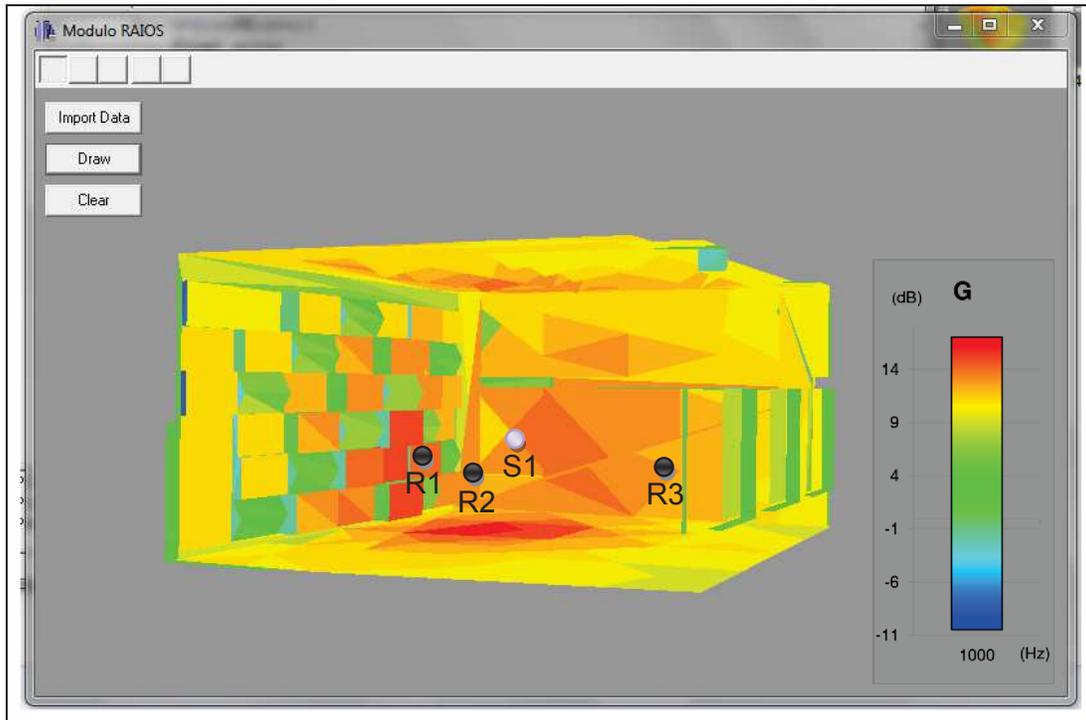


Figura 5.10. D80 en la banda de frecuencia de 1 KHz.

- a. S1 corresponde a la fuente 1.
- b. R1, R2 y R3 corresponden a los receptores 1, 2 y 3 respectivamente.

De la misma manera que fue citada la diferencia entre los parámetros C50 y C80; El parámetro D80 que cuantifica el grado de separación de las frases musicales, presenta un comportamiento muy similar al parámetro D50, debido a que la diferencia existente entre los mismos son los límites usados en la integral para el cálculo de cada uno de ellos.

Los resultados obtenidos en la Figura 5.10. correspondiente a D80 en la banda de frecuencia de 1 KHz, presentan una concordancia con los resultados numéricos entregados por la simulación efectuada en el código computacional *RAIOS*, donde en los puntos R1, R2 y R3, los valores numéricos corresponden a los valores de 71,9, 69,3 y 70 %, respectivamente; y en base a el cuadro de colores empleado por el módulo, los valores estimados son 73, 70 y 70 %.



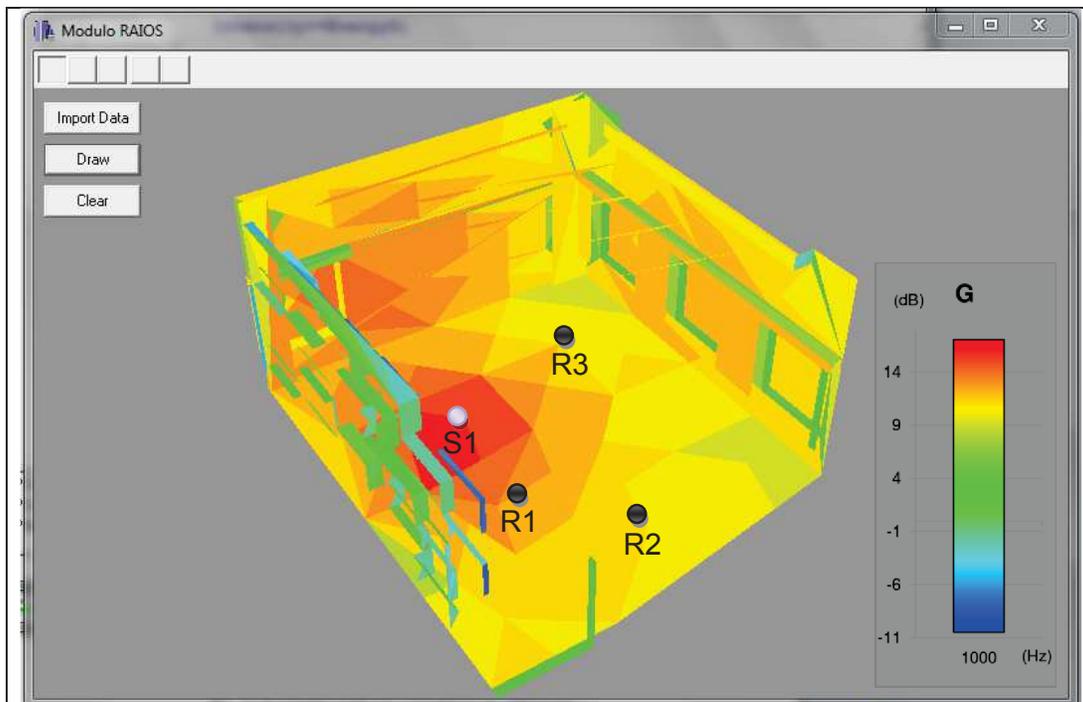


Figura 5.11. G en la banda de frecuencia de 1 KHz.

a. S1 corresponde a la fuente 1.

b. R1, R2 y R3 corresponden a los receptores 1, 2 y 3 respectivamente.

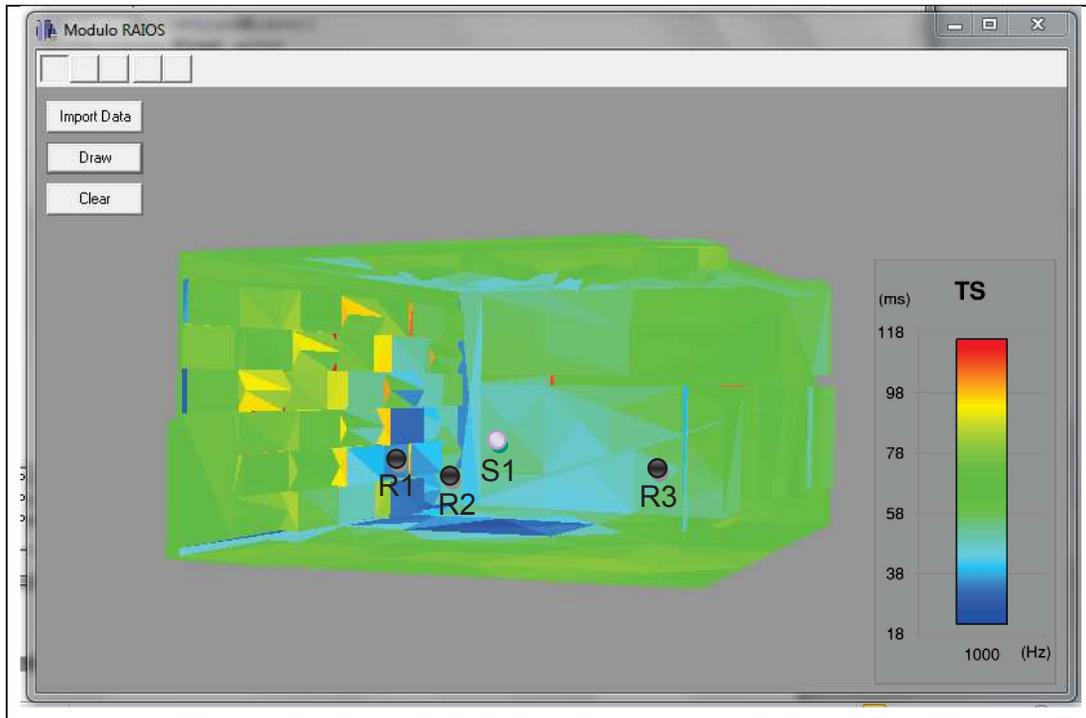
Los resultados obtenidos en la Figura 5.11. correspondiente al parámetro G en la banda de frecuencia de 1 KHz, el mismo que cuantifica la ganancia de la sala respecto a la fuente en campo libre y a 10 m de distancia, presentan una similitud respecto a la intensidad sonora. En este gráfico, se puede apreciar que existe una distribución mas marcada respecto a la variación de colores.

Se nota claramente que, al ser una sala acústicamente bien tratada, el color azul, correspondiente al valor mínimo en la escala de colores, no está presente en puntos significativos de la sala, mas bien, se nota un dominio del color amarillo y naranja, correspondientes a los valores de 9 a 12 dB, los mismos que dan una idea de la ganancia que aporta la sala.

Analizando los puntos R1, R2 y R3, donde los resultados obtenidos en la simulación por el código computacional *RAIOS* son 9,4, 8,7 y 8,9 dB respectivamente; se puede apreciar que los resultados estimados del módulo

corresponden a los valores de 11, 9,5 y 9 dB; así que, existe una concordancia respecto a la simulación.

En los dos últimos parámetros de calidad acústica simulados por el módulo, se va a apreciar una variación respecto a la distribución de la gama de colores, en donde, en lugar de tener una variación desde el color rojo hacia el azul, la distribución se presentará inversamente.



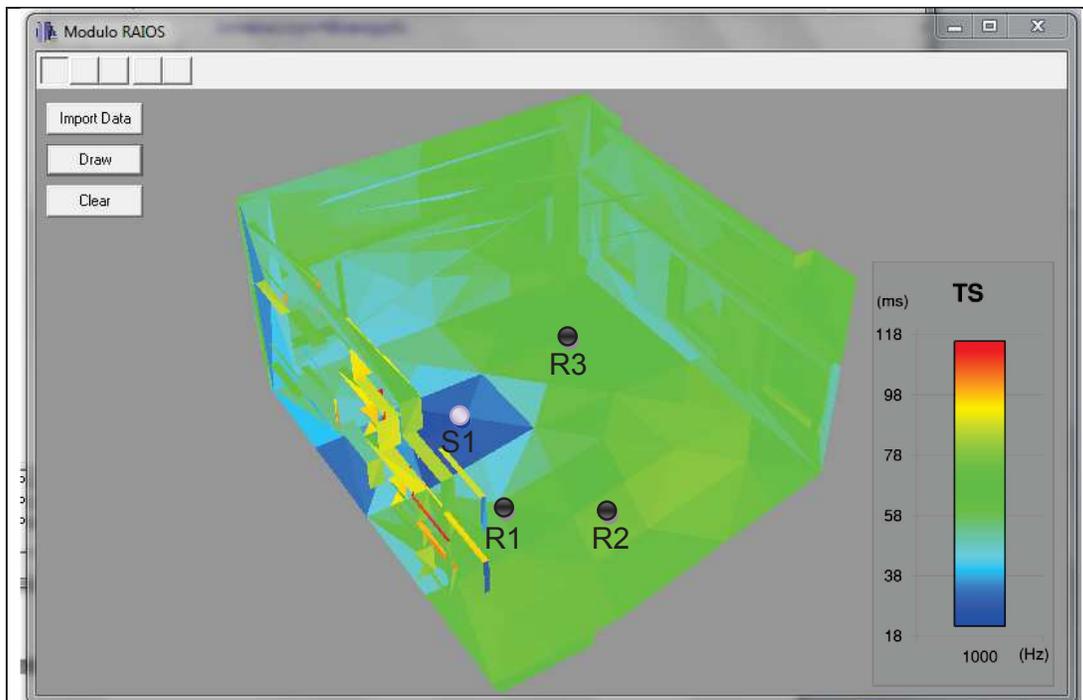


Figura 5.12. TS en la banda de frecuencia de 1 KHz.

a. S1 corresponde a la fuente 1.

b. R1, R2 y R3 corresponden a los receptores 1, 2 y 3 respectivamente.

En la figura 5.12. se presenta el parámetro TS en la banda de frecuencia de 1 KHz. Este parámetro se basa en la distribución temporal de la energía, donde un tiempo corto de TS corresponde a una claridad tonal y un tiempo largo a un aporte de la reverberación de la sala, los resultados gráficos tienen una coherencia, debido a que en las cercanías de la fuente el tiempo es muy corto, alrededor de 22 ms, y a medida de que existe una distancia mayor respecto a la fuente, este tiempo va aumentando, debido a que se va adentrando en el campo reverberante de la sala.

Este fue uno de los parámetros que entregó los mejores resultados en el Round Robin 3, donde los valores obtenidos en los puntos R1, R2 y R3, tras efectuada la simulación fueron de 78, 69 y 81 ms, respectivamente, los valores de la medición experimental fueron de 75, 67 y 80 ms; y los colores obtenidos por el módulo en los puntos R1, R2 y R3, corresponden a los valores estimados de 73, 72 y 78 ms respectivamente.

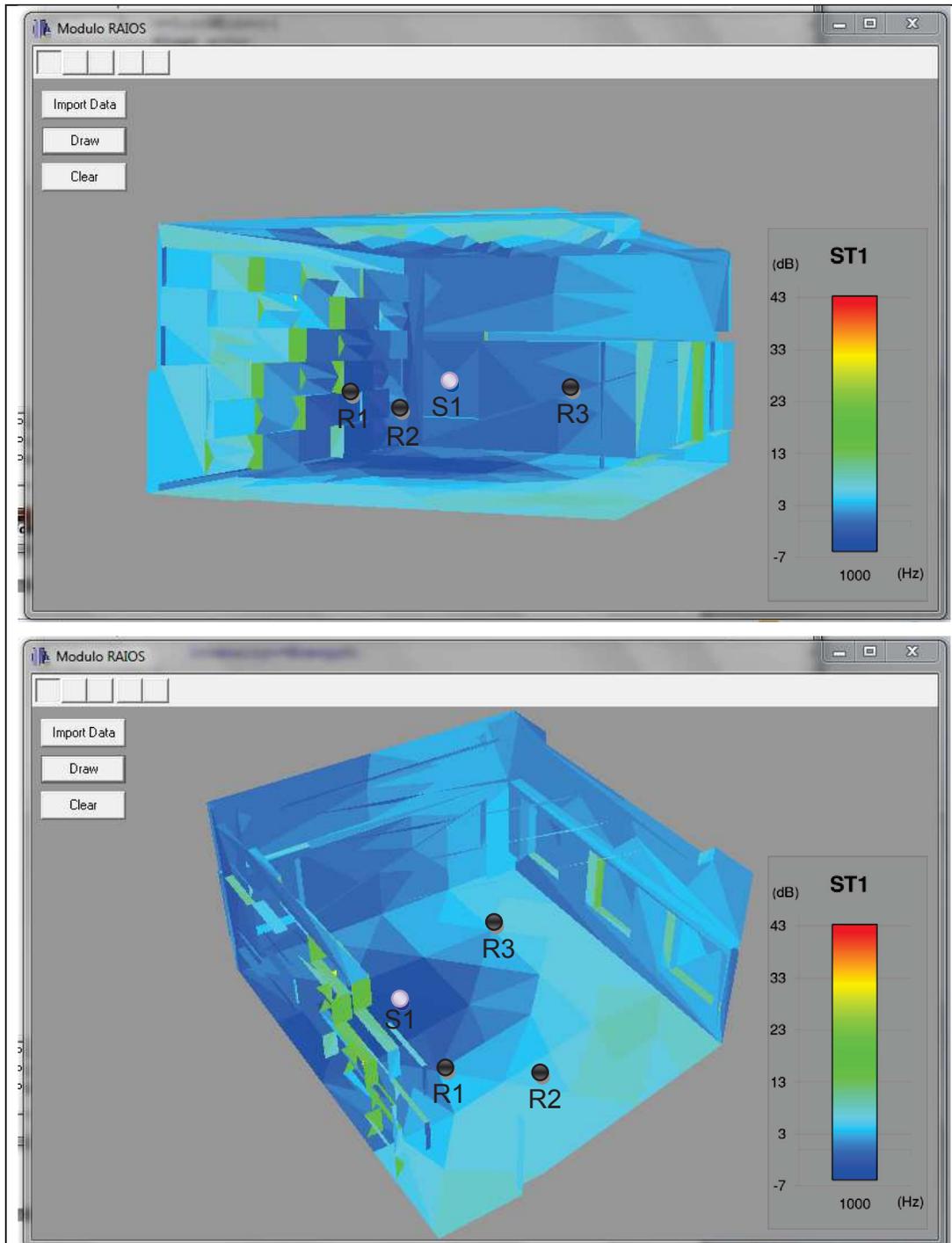


Figura 5.13. ST1 en la banda de frecuencia de 1 KHz

a. S1 corresponde a la fuente 1.

b. R1, R2 y R3 corresponden a los receptores 1, 2 y 3 respectivamente.

Finalmente, el parámetro ST1, cuantifica el grado de escucha que tienen los músicos de escucharse a si mismos y a la orquesta; usando la energía asociada a las primeras reflexiones proporcionadas por las paredes y el techo del escenario. En la grafica 5.13. correspondiente a ST1 en la banda de frecuencia de 1 KHz, se puede observar que los resultados obtenidos para este parámetro muestran que el aporte de las primeras reflexiones correspondientes a los puntos R1, R2 y R3, son de 1, 5 y 4 dB, resultados que son coherentes a los obtenidos por el software *RAIOS*. Donde el valor de ST1 en estos puntos es de 2,3, 5,4 y 4 dB respectivamente.

Se puede apreciar que mientras más distantes se encuentran los músicos, mayor es el aporte de las reflexiones tempranas que presenta la sala, de manera que existe un mayor nivel de ganancia en la escucha de los demás instrumentos musicales.

6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

- El módulo desarrollado, al ser visual, permite realizar un análisis rápido y preciso de cualquier parámetro, ya que, al ser posible observar la distribución de energía acústica en una gama de colores, se puede también calcular y representar gráficamente parámetros que den una idea global del comportamiento de la sala. De esta manera es posible identificar las zonas acústicamente problemáticas del recinto en estudio.
- Al poder observar las zonas acústicamente ambiguas en la construcción del recinto, es posible evaluar sonoramente esos puntos usando el módulo de auralización dentro del código computacional RAIOS lo que complementa el análisis para hacer una evaluación sonora subjetiva en estas zonas.
- En base a la distribución de colores obtenida de la intensidad sonora generada por este módulo, se puede visualizar y obtener una idea general de que tipo de resultado es mejor en el acondicionamiento acústico de un recinto: cambio de geometría de la sala para redireccionar las ondas sonoras, cambio de materiales de construcción, uso de difusores, o la combinación de todos los anteriores.
- Al ser la sala en estudio, un recinto bien tratado acústicamente, las graficas obtenidas son bastante homogéneas en cuanto a la distribución de la energía acústica; pero, se debería probar el programa con otro tipo de sala, la cual no tenga un acondicionamiento adecuado para observar el comportamiento del campo acústico.
- Los resultados obtenidos para las bandas de frecuencias medias y altas son bastante fiables, sin embargo, la simulación numérica acústica de

frecuencias bajas aún no es tan exacta, debido a la dificultad que implica modelar el fenómeno modal.

6.2. Recomendaciones

- Se podría implementar el módulo desarrollado para la presente tesis dentro del código computacional RAIOS, para que este no se presente como una aplicación externa, sino que sea una función dentro de RAIOS, así no se tendrían que exportar los resultados de la simulación para crear los mapas de color.
- Se podría mejorar las gráficas tanto de los mapas de intensidad sonora como de los parámetros de calidad acústica, si se consigue que el código computacional RAIOS entregue una subdivisión de triángulos de las superficies de contorno más homogénea.
- Se podría implementar más parámetros de calidad acústica como la Curva de Barron, Curva de energía reflejada acumulada y Nivel sonoro del habla, así se tendrá una herramienta mucho mas completa y se podrá evaluar de mejor manera el comportamiento del recinto.
- Ejecutar una serie de experimentos en salas reales, donde se realicen mediciones en las superficies de contorno usando micrófonos, para comparar los datos reales con los obtenidos en las gráficas generadas por el módulo, para verificar la precisión que entrega la simulación.
- Se podría mejorar el algoritmo del módulo, implementando una función en la cual, cuando se coloque el puntero del mouse sobre un elemento, se muestre el valor energético exacto, para que no se tenga que estimar a que valor corresponde en base al color de ese elemento.

Referencias

- ALARCÃO, D.; COELHO, J. L. B.; TENENBAUM, R. A. On modeling of room acoustics by a sound energy transition approach. *Proceedings of EEA Symposium on Architectural Acoustics*, Madrid, 2000.
- BARRON, M. *Auditorium Acoustic and Architectural Design*. E & Fn Spoon, 1° Ed. 1993.
- BANERJEE, P. K. *The Boundary Element Methods in Engineering*. McGraw-Hill College, 1994.
- BERANEK, L. *Concert and Opera Halls: How They Sound*. 1° Ed. New York: Acoustical Society of America, 1996.
- CARRION, A. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Ediciones UPC, 1° Ed. 1998.
- CREMER, L.; MÜLLER H, *Principles and Applications of Room Acoustics. Vol1*, Applied Science Publishers Ltd., 1982.
- EMBRECHTS, J. J. Randomly traced sound ray techniques. *Acústica*, v. 51, 1982.
- ISO/WD17487. Acoustics - measurement of the sound scattering properties of surfaces, 2001.
- ISO/IEC14882. Programming languages – C++, 1998.
- ISO 3382-1. Acoustics -- Measurement of room acoustic parameters -- Part 1: Performance spaces, 2009.
- ISO 3382-2. Acoustics -- Measurement of room acoustic parameters -- Part 2: Reverberation time in ordinary rooms, 2008.
- KERNIGHAN, B.; RITCHIE, D. M. *The C Programming Language*, Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1978.

LEWERS, T. A combined beam tracing and radiant exchange computer model of room acoustics. *Applied Acoustics*, v. 38, 1993.

LUCIO NARANJO, José Francisco. *Aperfeiçoamentos no código computacional RAIOS incluindo Autilização*. (Tesis de Masterado - Universidade do Estado do Rio de Janeiro), 2010.

MÖSER, M.; BARROS, J. L.; *Ingeniería Acústica: Teoría y Aplicaciones*, Editorial Springer, 2° Ed. 2009.

SABINE, P. E. *Acoustics and Architecture*. New York: McGraw-Hill, 1932.

SCHROEDER, M. R. New method for measuring reverberation time. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 37, n. 6, p. 1187-1188, 1965.

SEMAT, H.; BAUMEL, P. *Fundamentos de Física*. México: Nueva Editorial Interamericana, 1976.

STROUSTRUP, B. *The C++ Programming Language*, Addison-Wesley, 3° Ed. 1997.

TENENBAUM, R. A.; CAMILO, T. S.; TORRES J. C. B.; GERGES, S. N. Y. Hybrid method for numerical simulation of room acoustics: Part 1 - theoretical and numerical aspects. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 29, n. 2, 2006a.

TENENBAUM, R. A.; CAMILO, T. S.; TORRES J. C. B.; STUTZ, L. T. Hybrid method for numerical simulation of room acoustics: Part 2 - validation of the computational code RAIOS 3. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 29, n. 2, 2006b.

TENENBAUM, R. A.; SLAMA, J. G.; BALLESTEROS, M. L. Numerical simulation of room acoustics: A new approach for source modeling. Paper F6-11. *Proceedings of 14th International Congress on Acoustics, Beijing, China*, v. 3, 1992.

TORRES, J. C. B. Sistema de aurilização eciente utilizando transformadas wavelets. Tese de doutorado. PEE/COPPE, UFRJ, 2004.

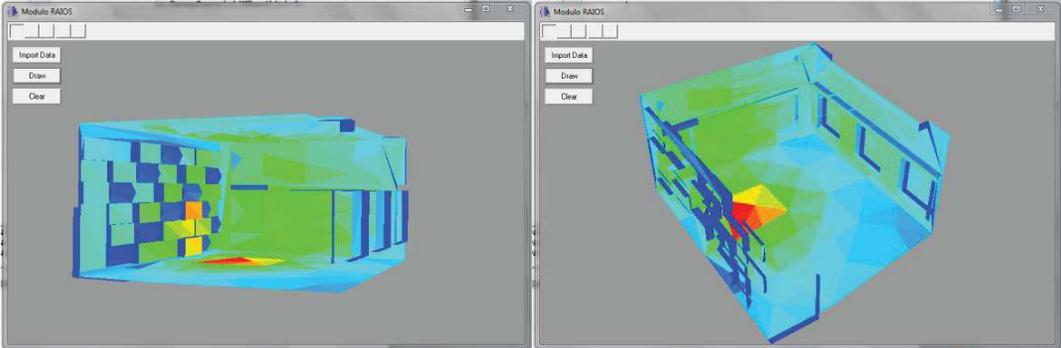
VORLÄNDER, M. Building acoustics: From prediction models to auralization. *Proceedings of Acoustics*, Christchurch, New Zealand, 2006.

VORLÄNDER, M.; MOMMERTZ, E. Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients. *Applied Acoustics*, 2000.

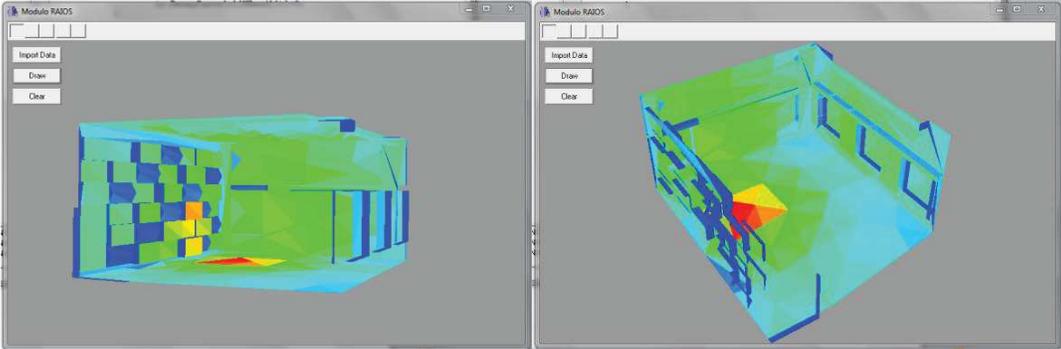
VORLÄNDER, M. *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. Berlin Heidelberg: Springer, 2008.

Anexos

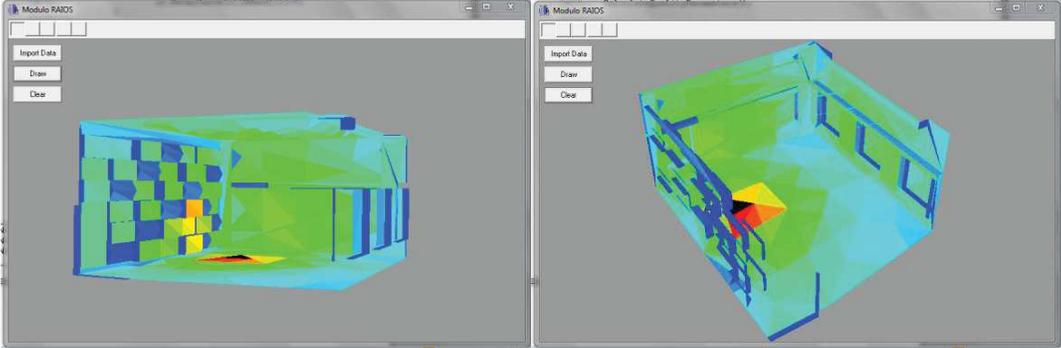
Intensidad Sonora



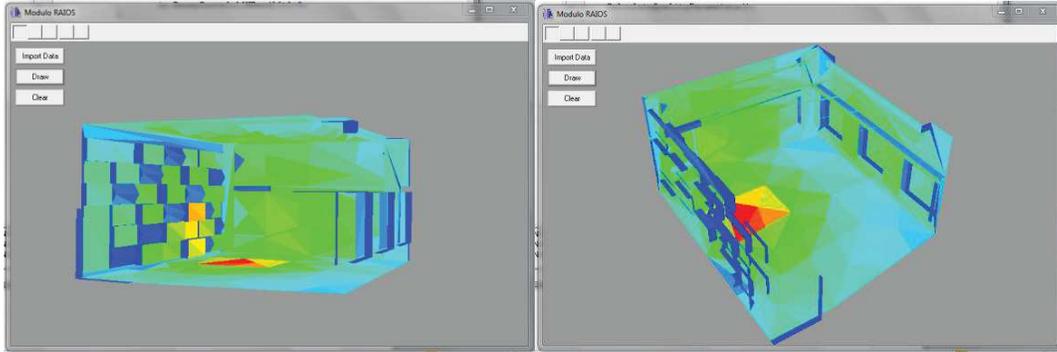
Banda de frecuencia 125 Hz



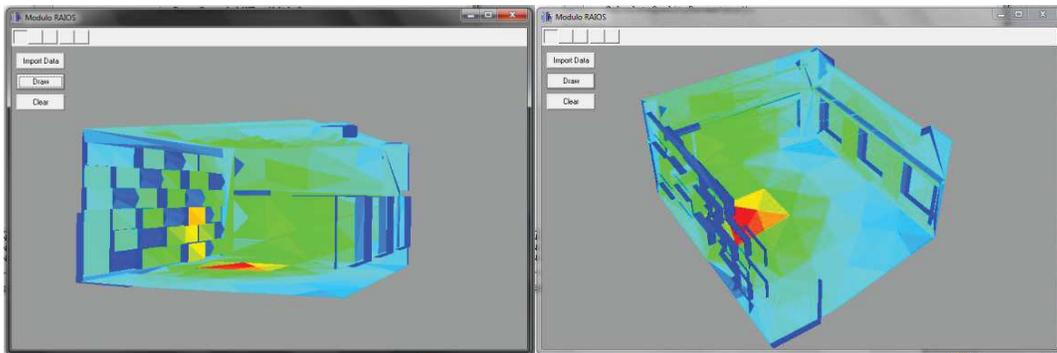
Banda de frecuencia 250 Hz



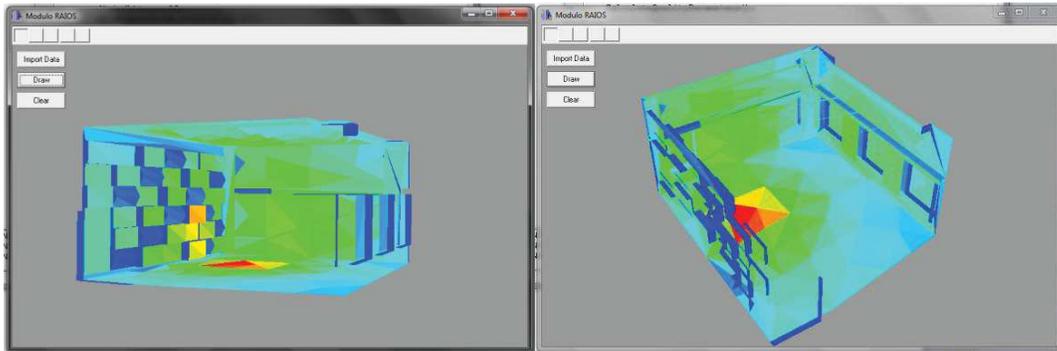
Banda de frecuencia 500 Hz



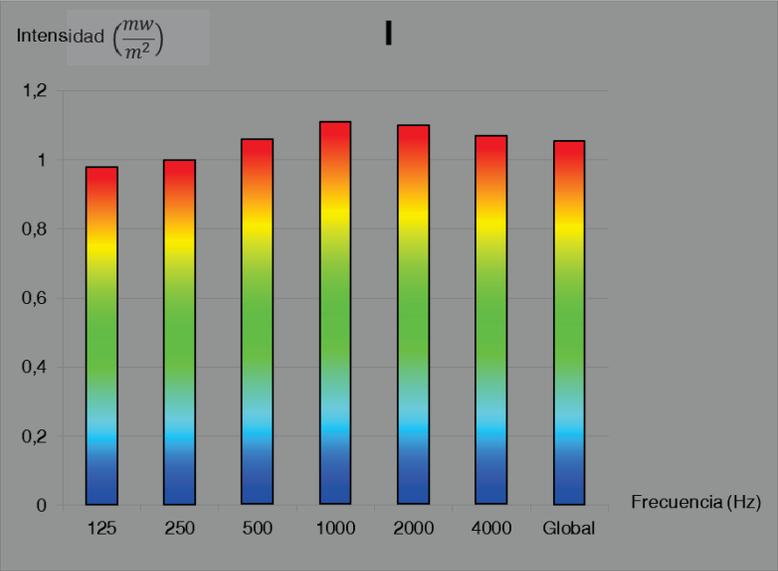
Banda de frecuencia 2 KHz



Banda de frecuencia 4 KHz

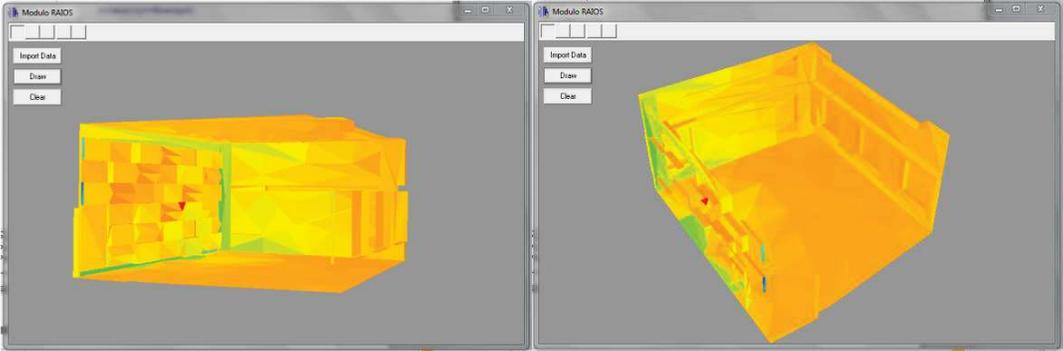


Global

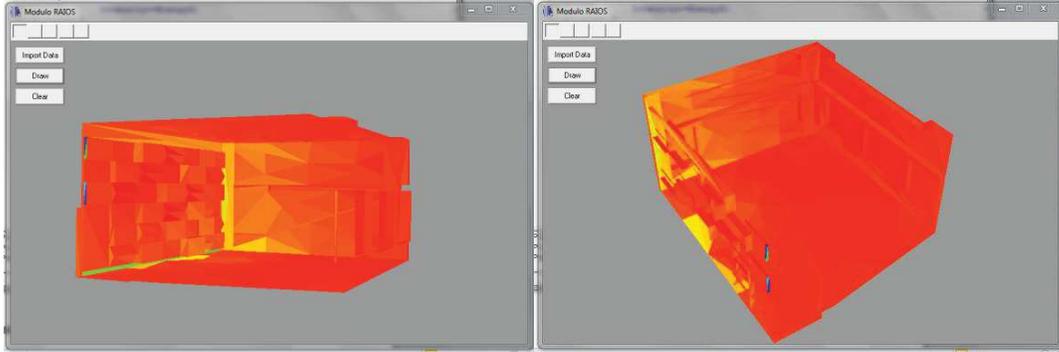


Parámetros de calidad acústica

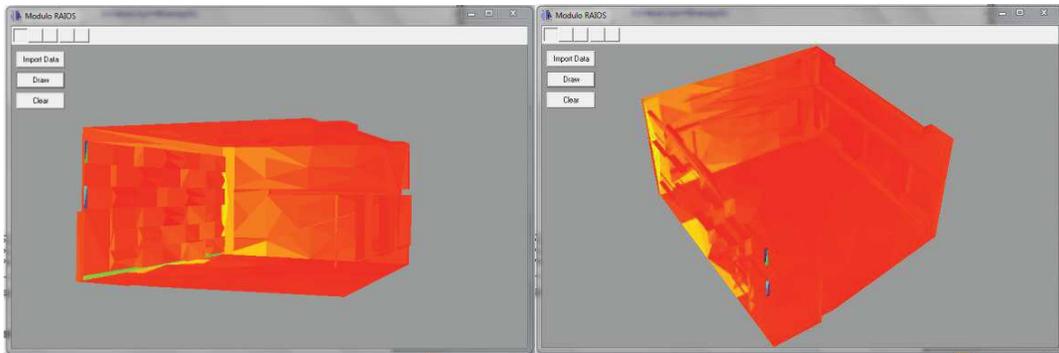
T30



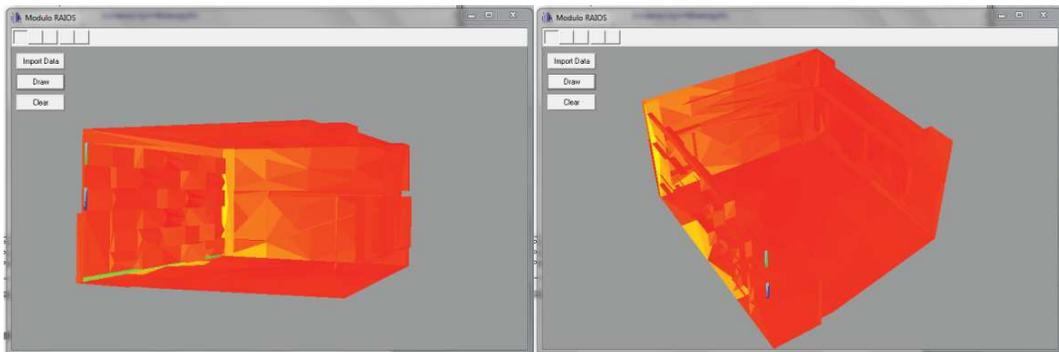
Banda de frecuencia 125 Hz



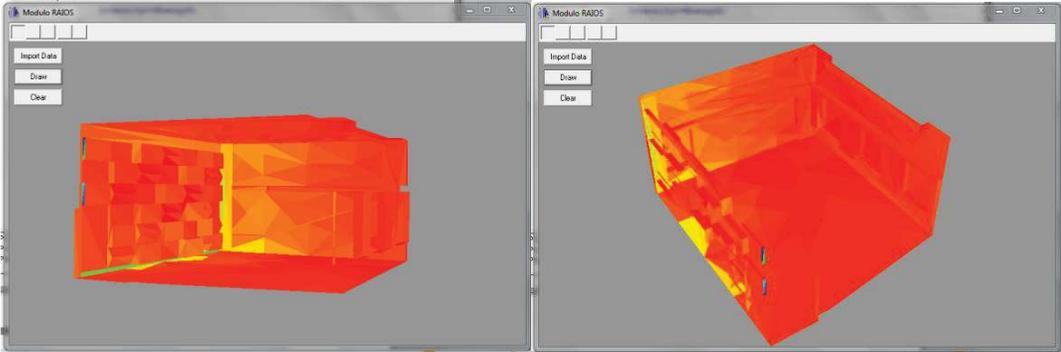
Banda de frecuencia 250 Hz



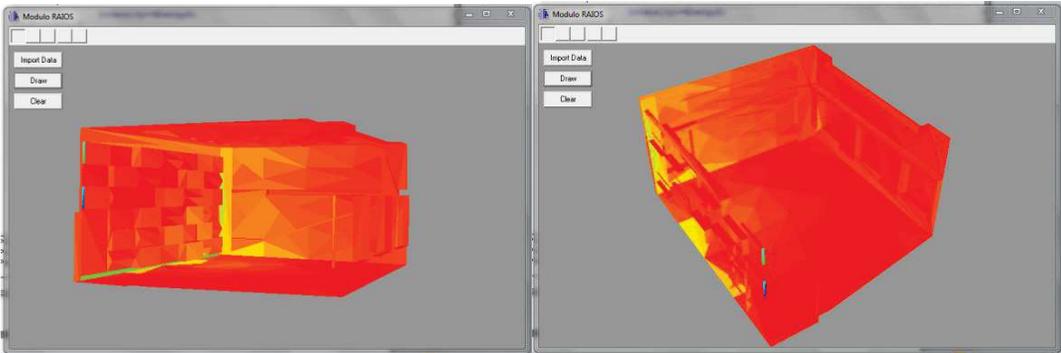
Banda de frecuencia 500 Hz



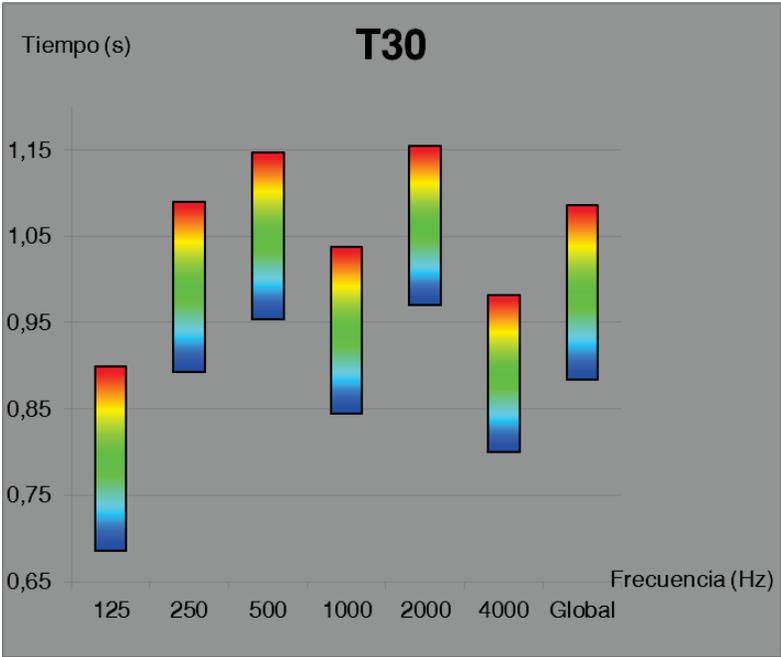
Banda de frecuencia 2 KHz



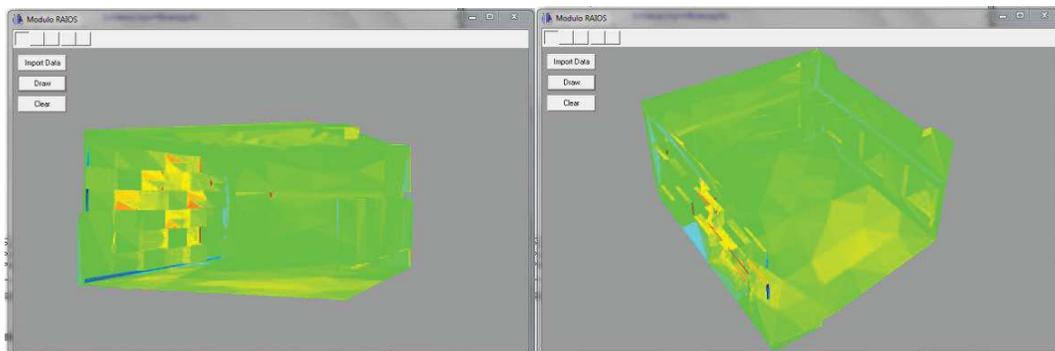
Banda de frecuencia 4 KHz



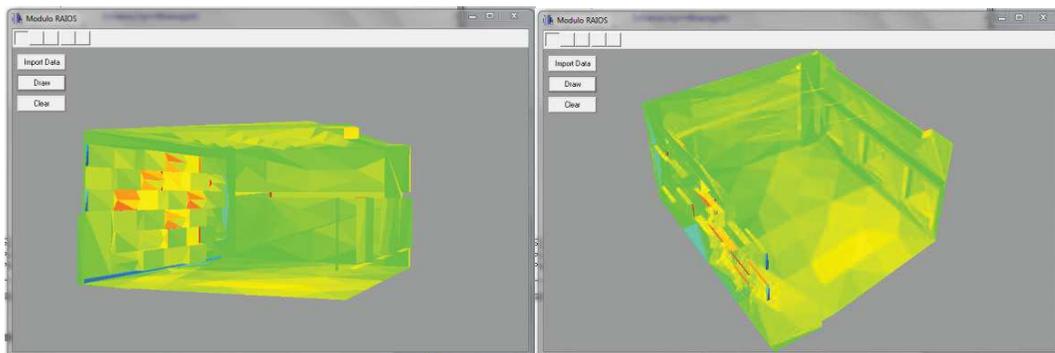
Global



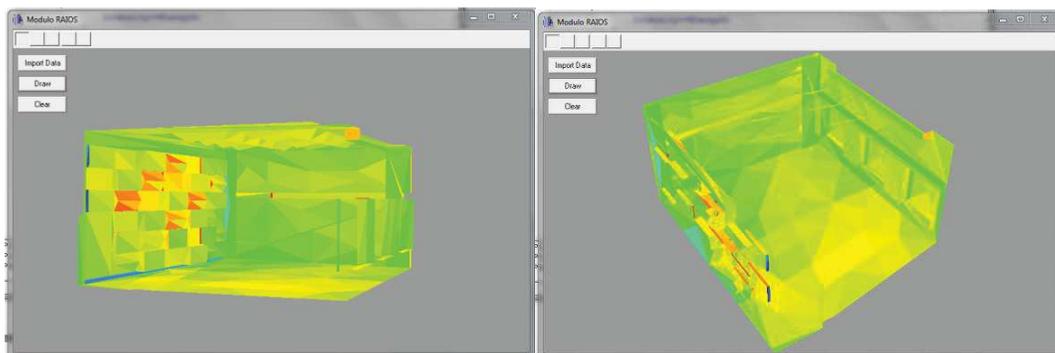
EDT



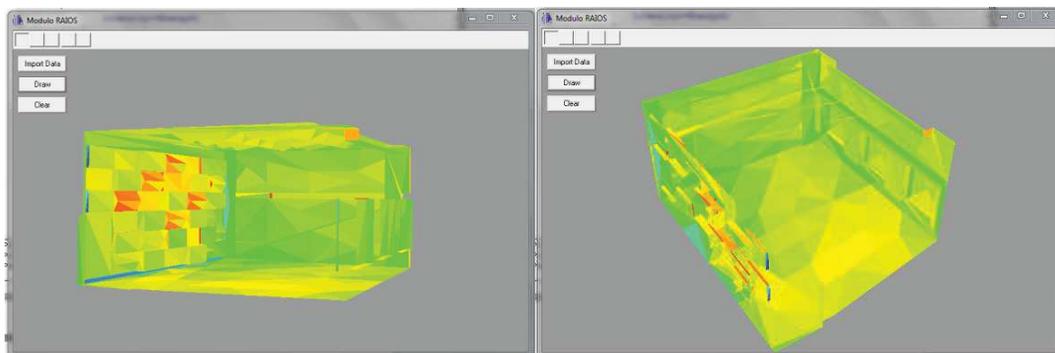
Banda de frecuencia 125 Hz



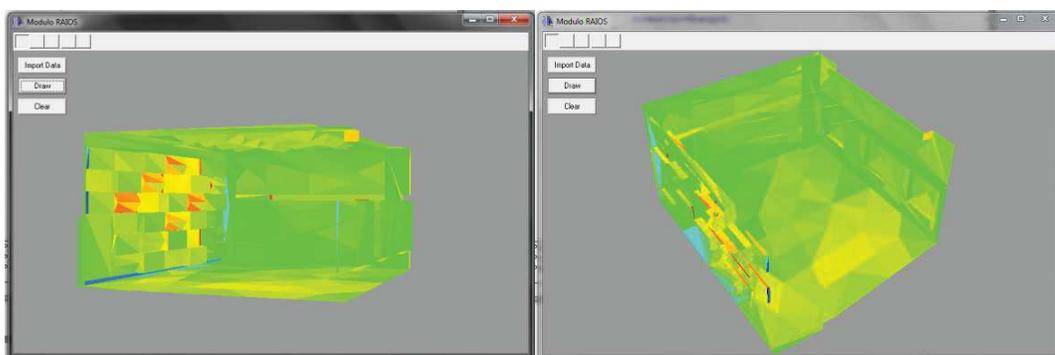
Banda de frecuencia 250 Hz



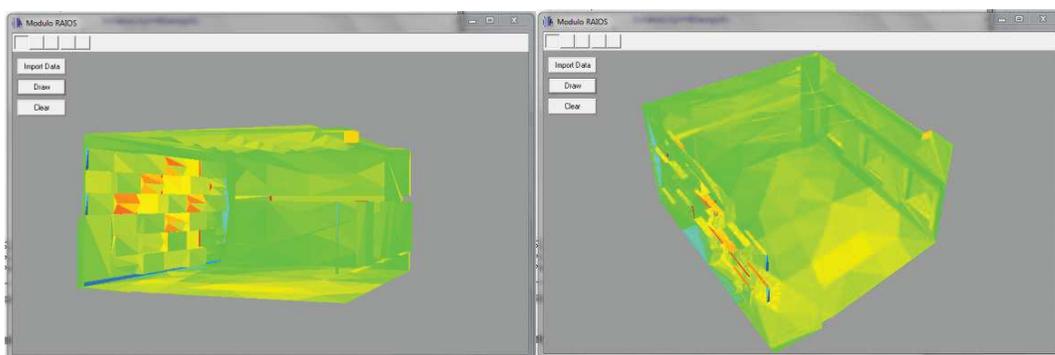
Banda de frecuencia 500 Hz



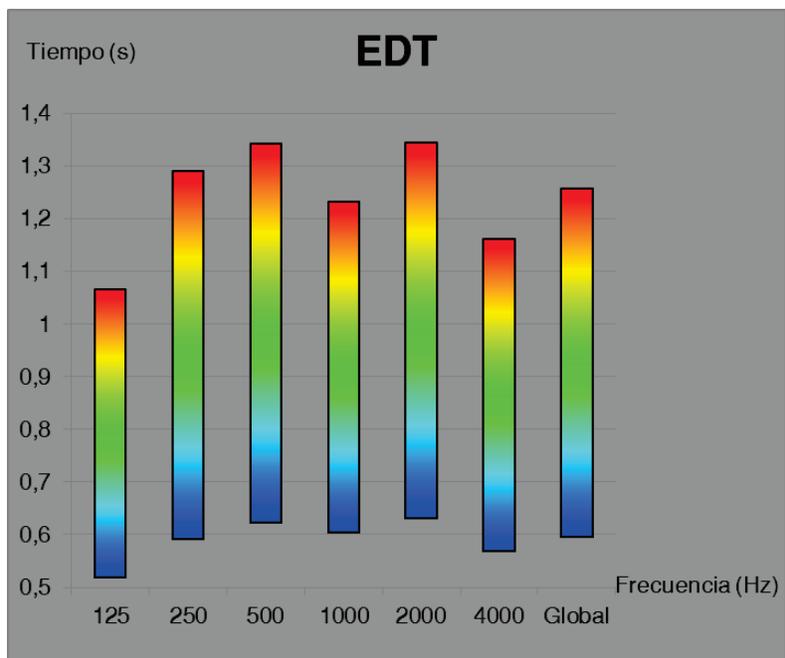
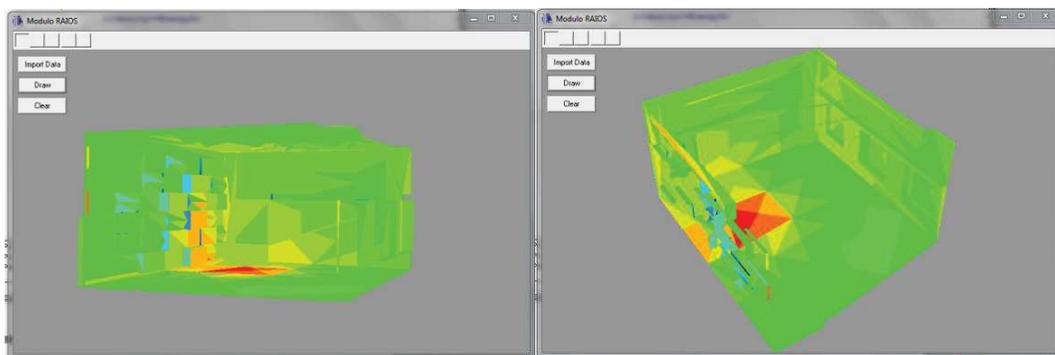
Banda de frecuencia 2 KHz



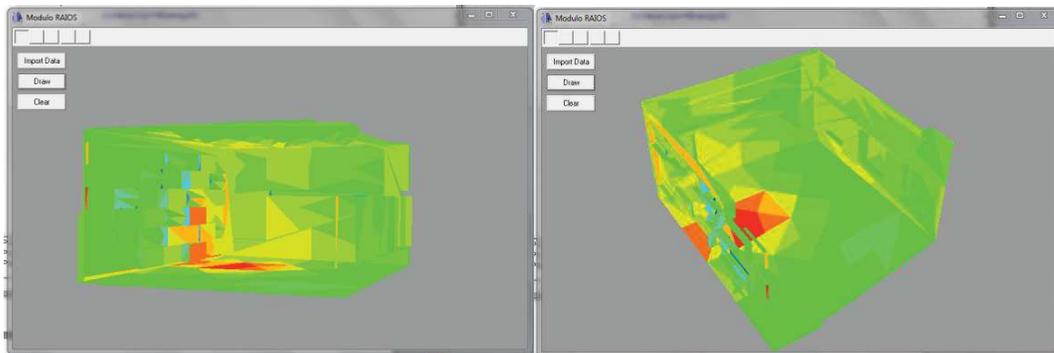
Banda de frecuencia 4 KHz



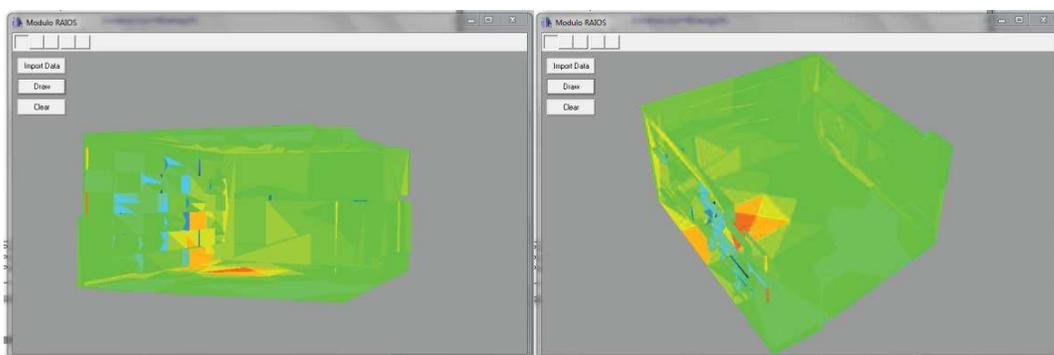
Global

**C50**

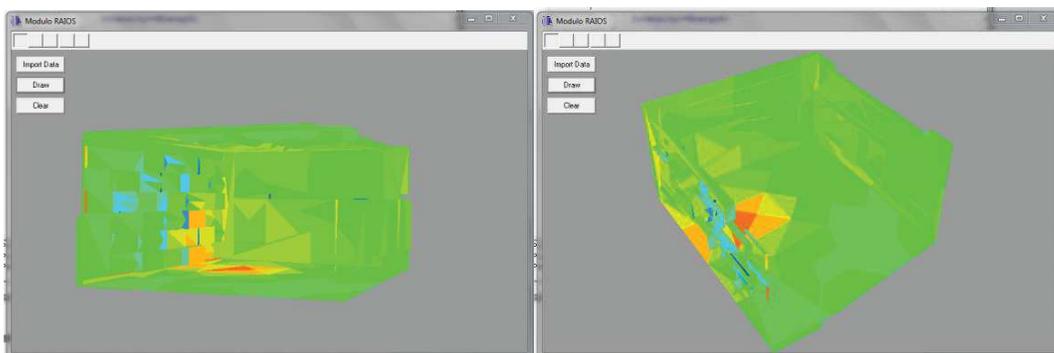
Banda de frecuencia 125 Hz



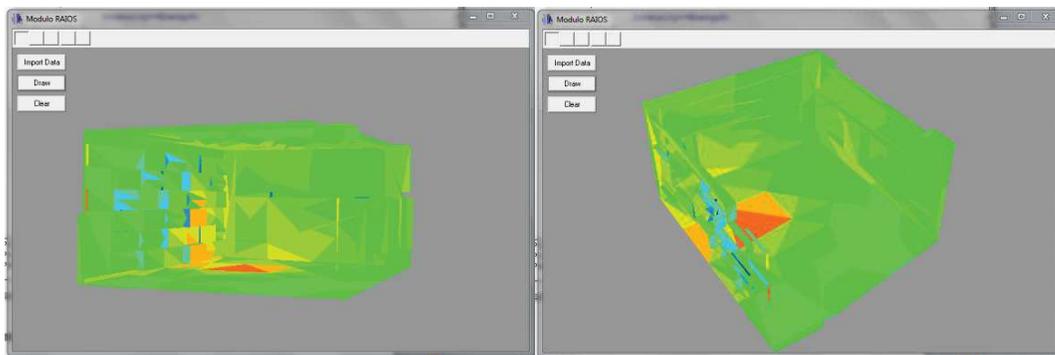
Banda de frecuencia 250 Hz



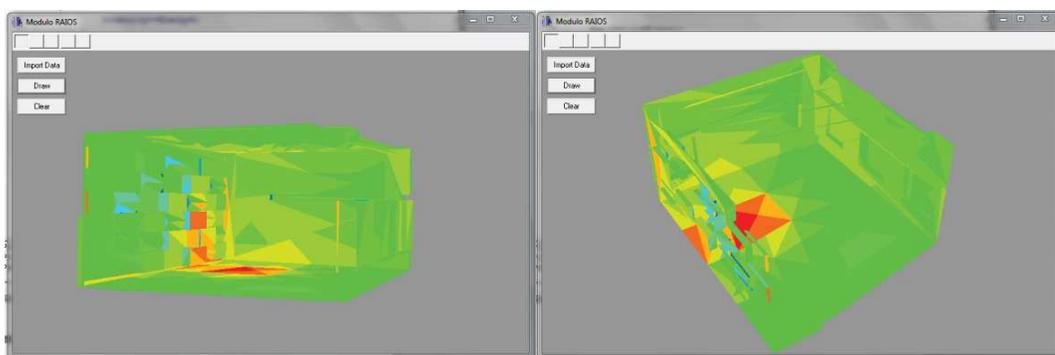
Banda de frecuencia 500 Hz



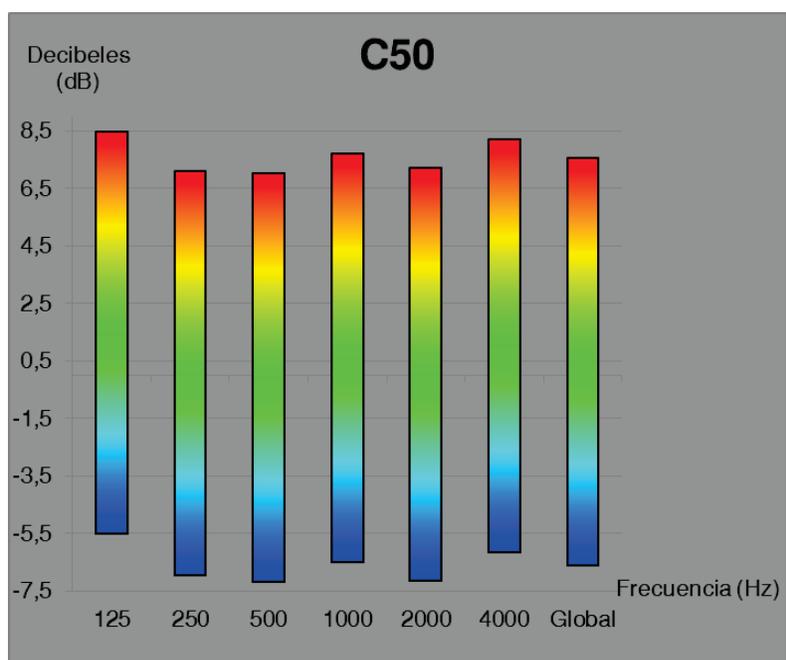
Banda de frecuencia 2 KHz



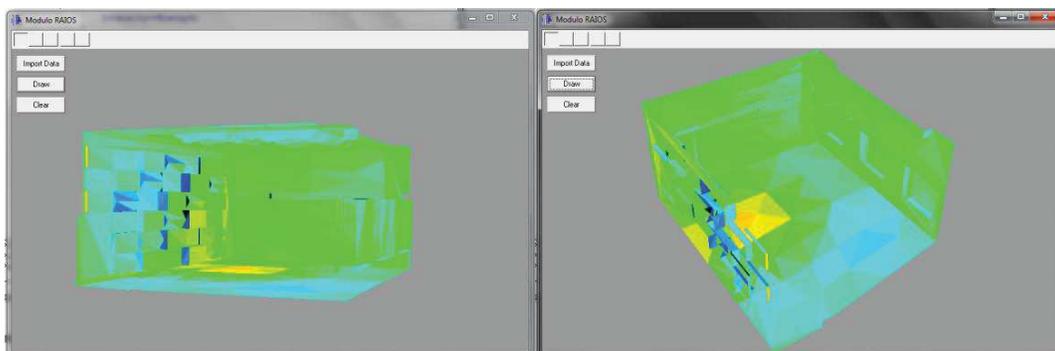
Banda de frecuencia 4 KHz



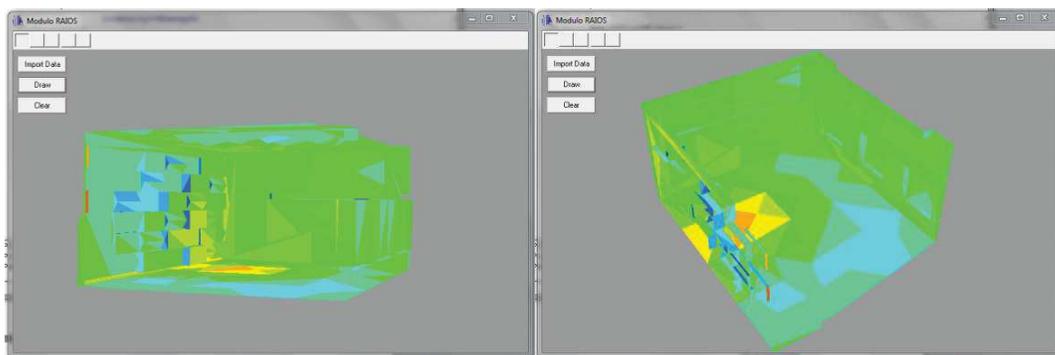
Global



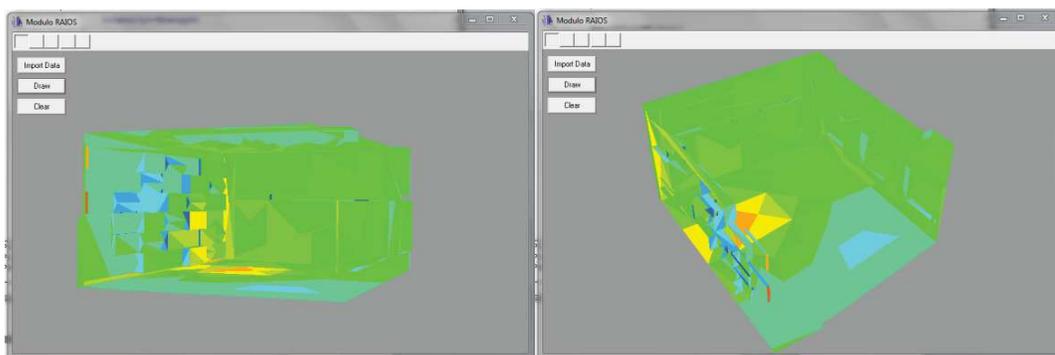
C80



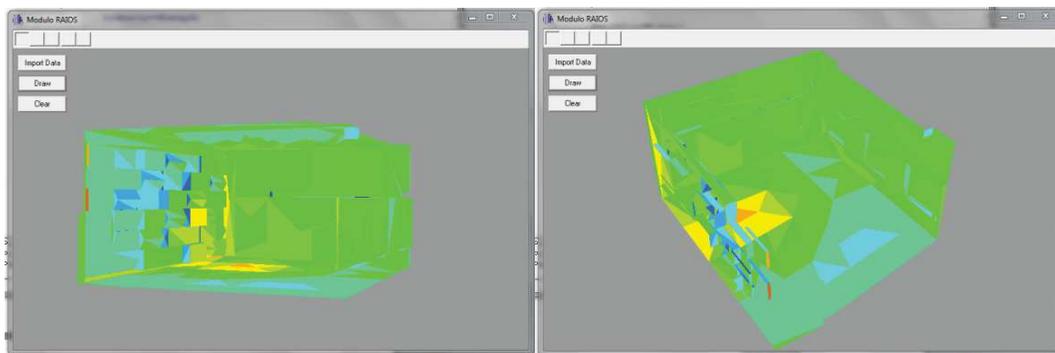
Banda de frecuencia 125 Hz



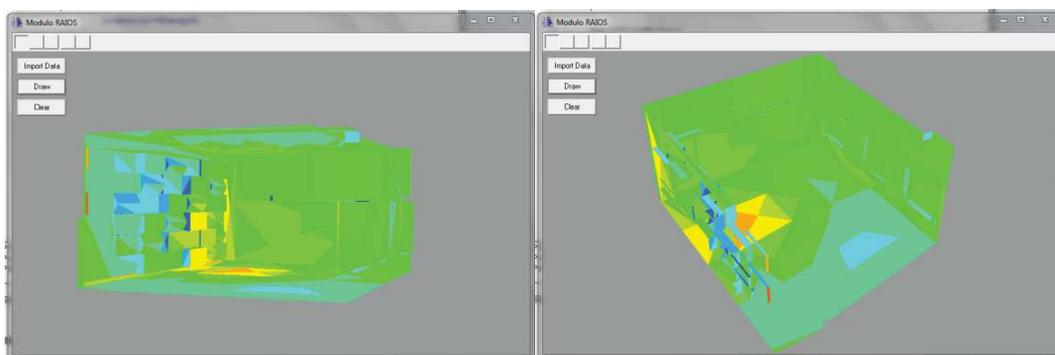
Banda de frecuencia 250 Hz



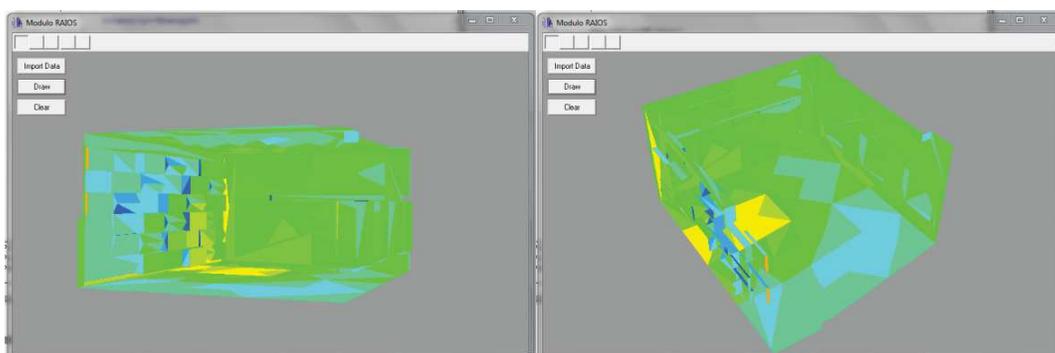
Banda de frecuencia 500 Hz



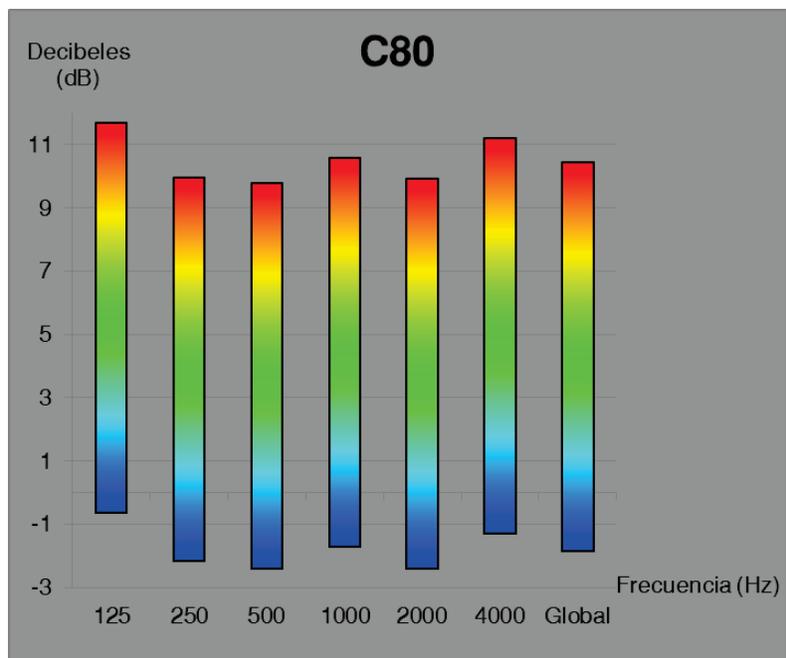
Banda de frecuencia 2 KHz



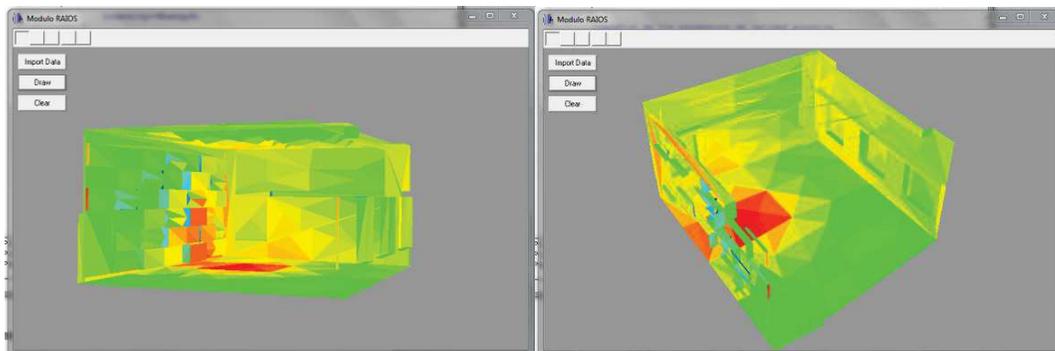
Banda de frecuencia 4 KHz



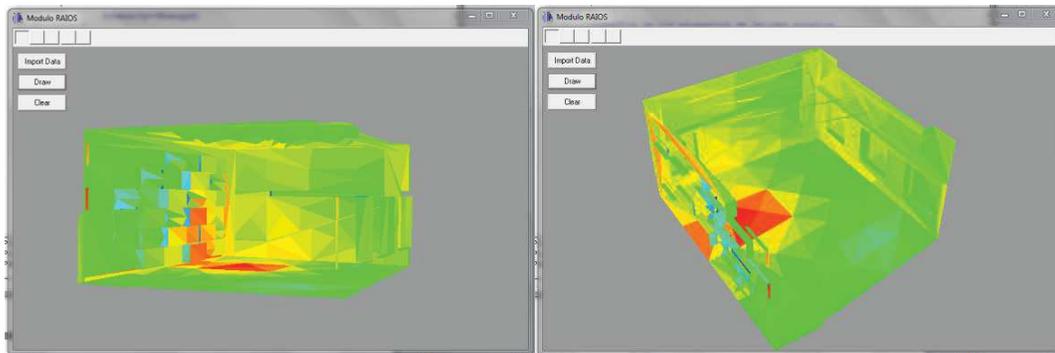
Global



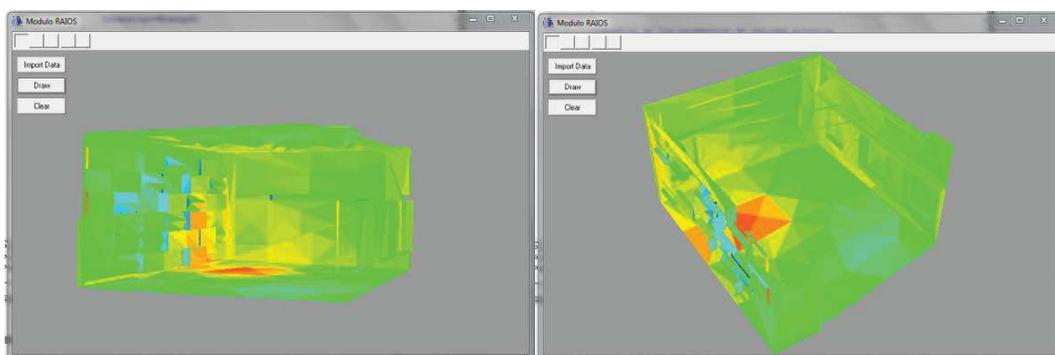
D50



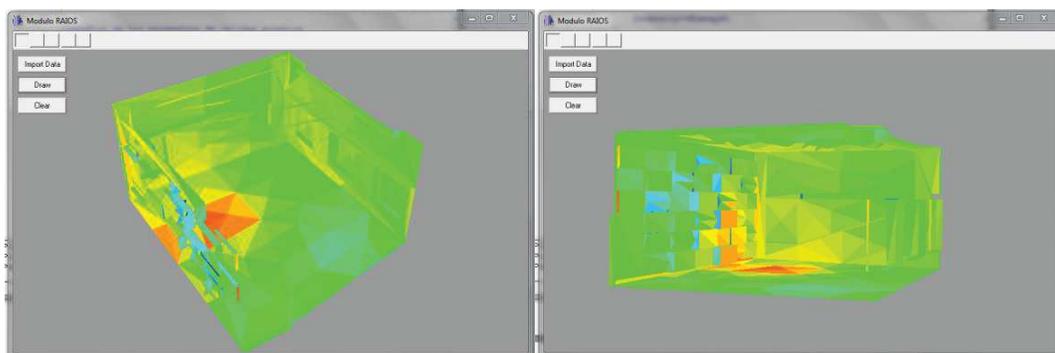
Banda de frecuencia 125 Hz



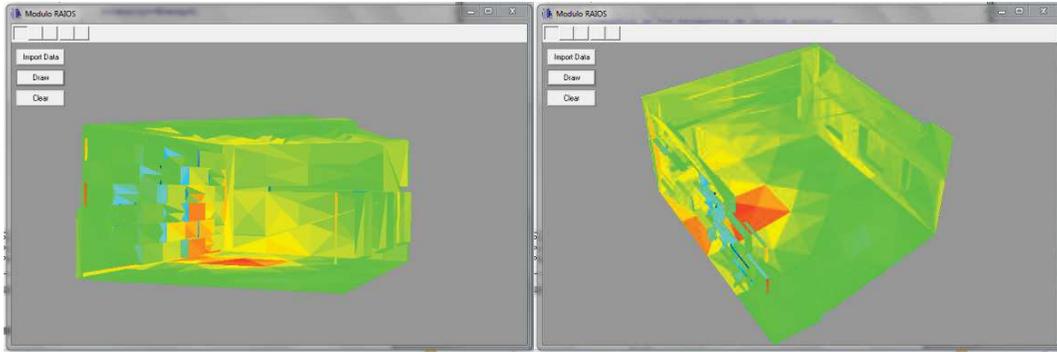
Banda de frecuencia 250 Hz



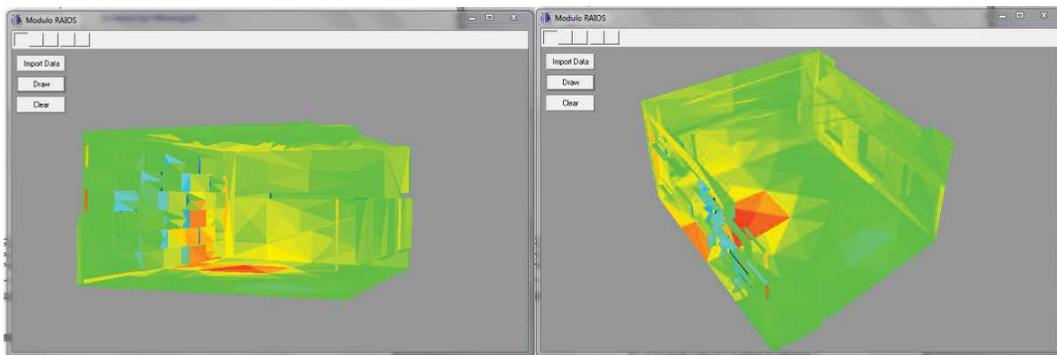
Banda de frecuencia 500 Hz



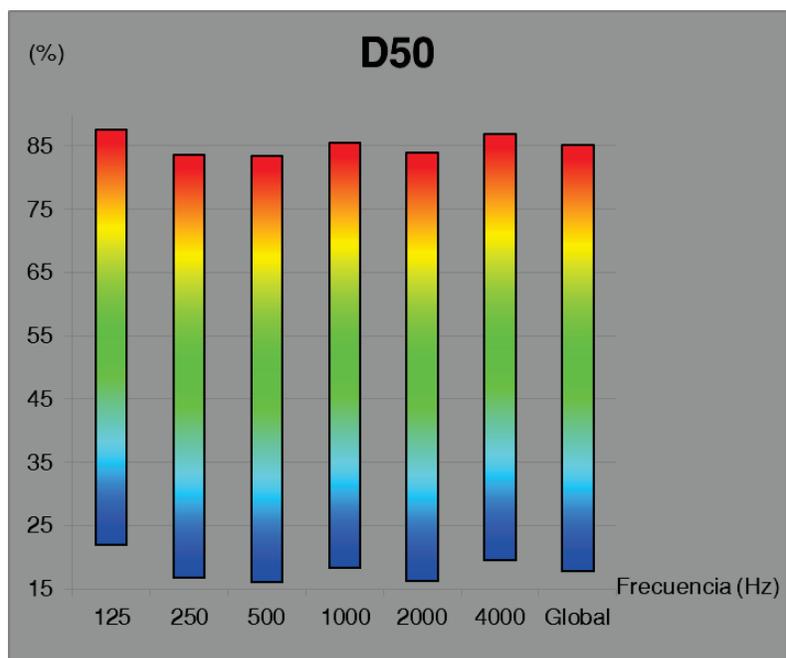
Banda de frecuencia 2 KHz



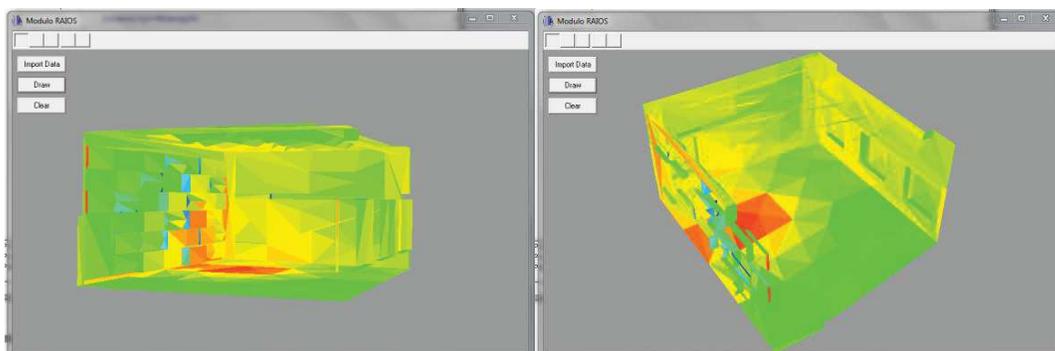
Banda de frecuencia 4 KHz



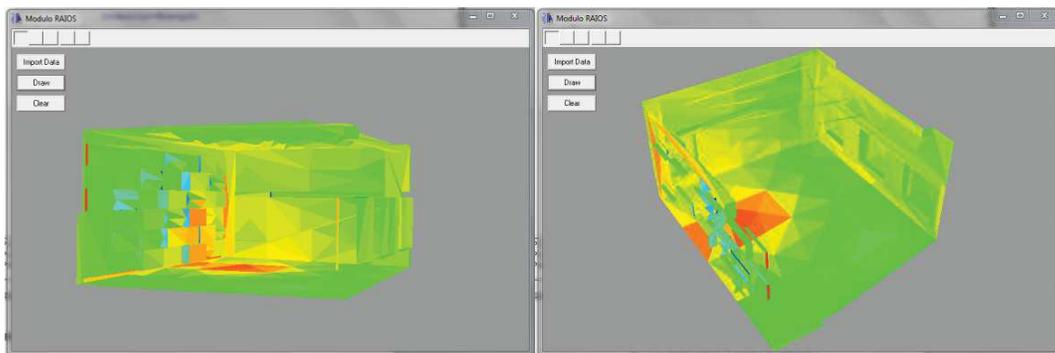
Global



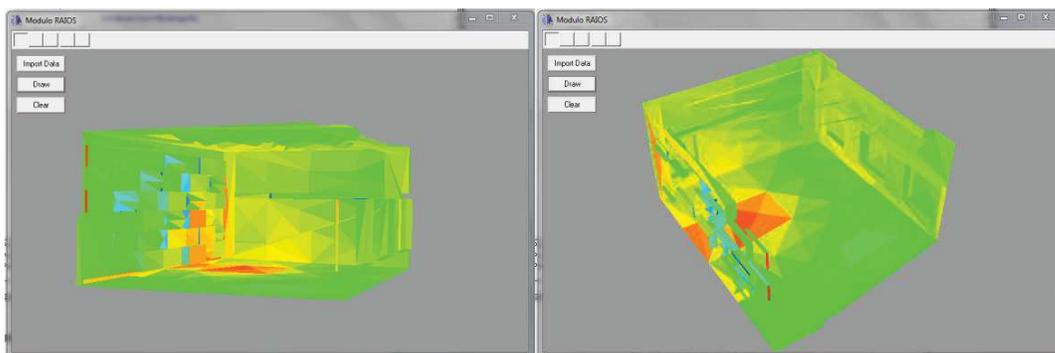
D80



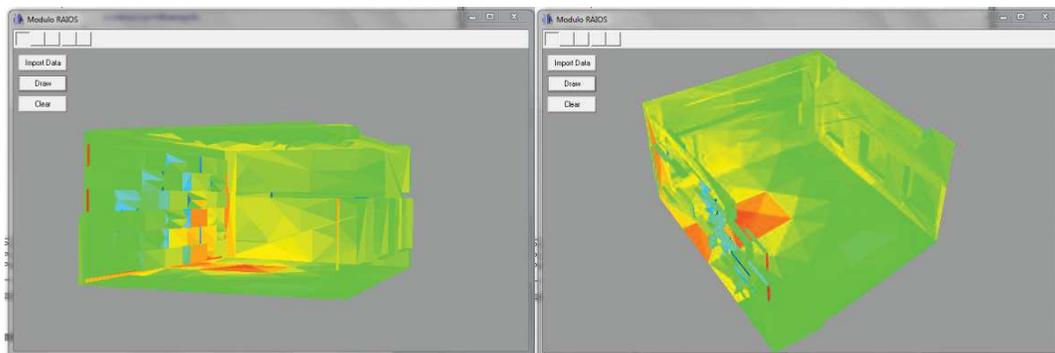
Banda de frecuencia 125 Hz



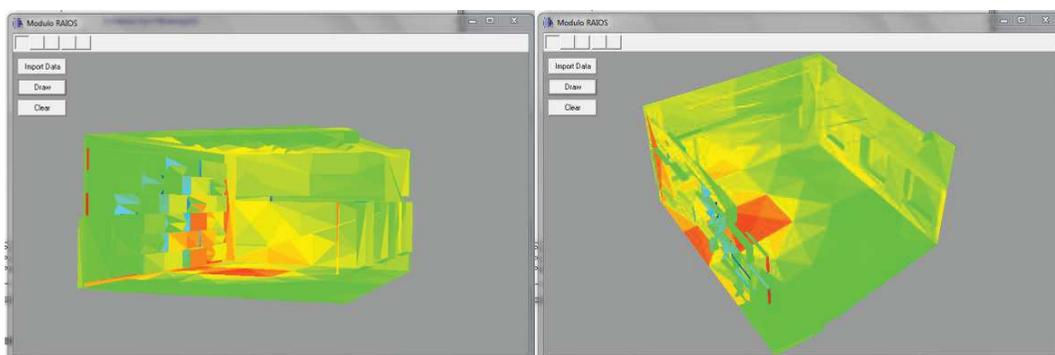
Banda de frecuencia 250 Hz



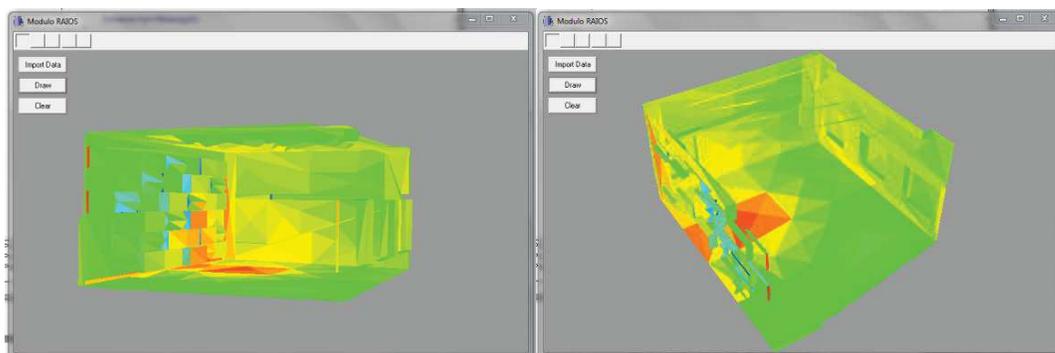
Banda de frecuencia 500 Hz



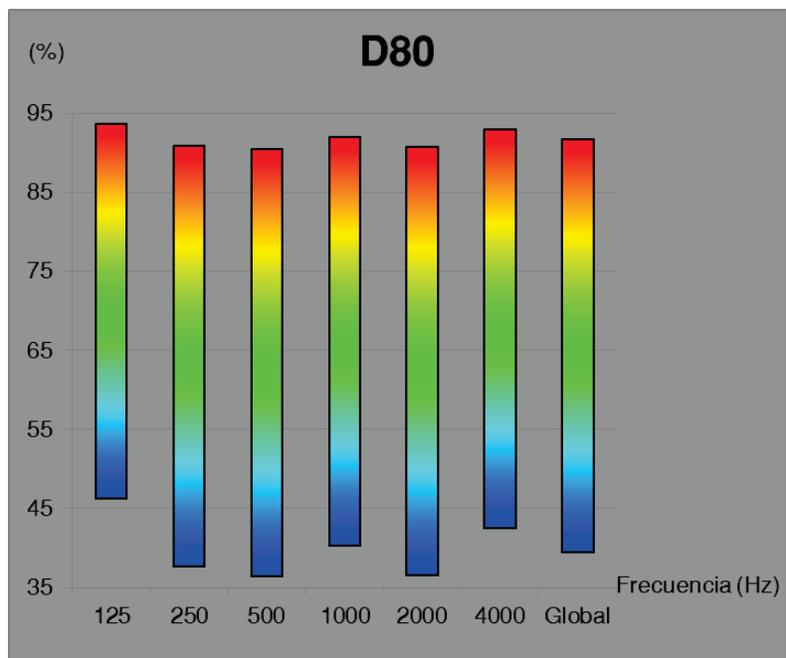
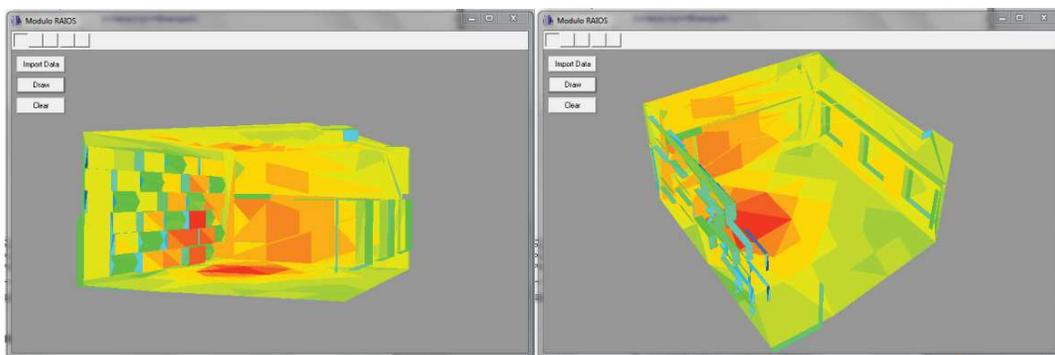
Banda de frecuencia 2 KHz



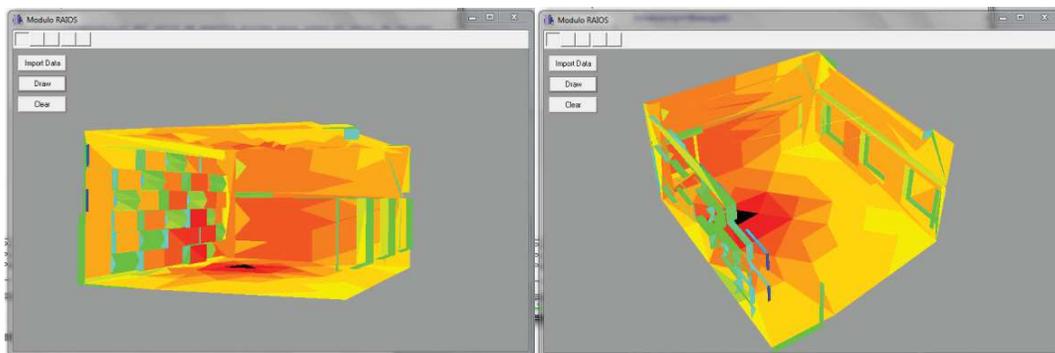
Banda de frecuencia 4 KHz



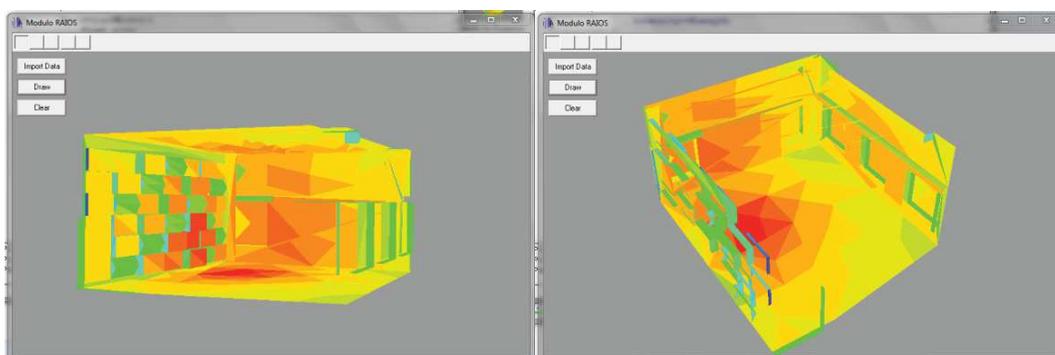
Global

**G**

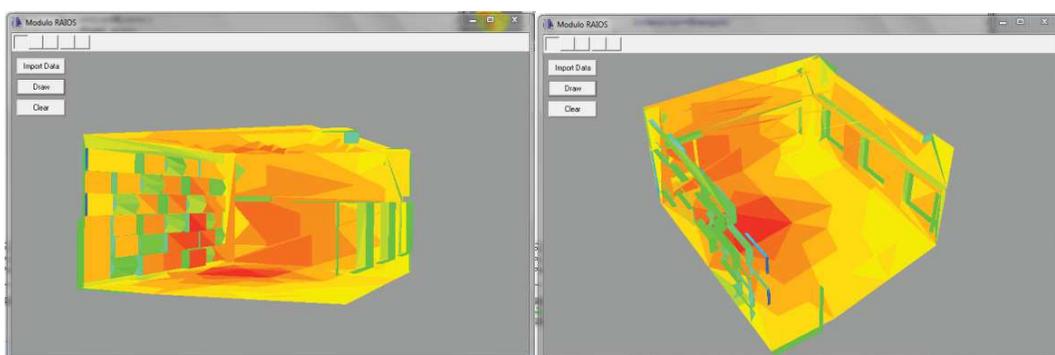
Banda de frecuencia 125 Hz



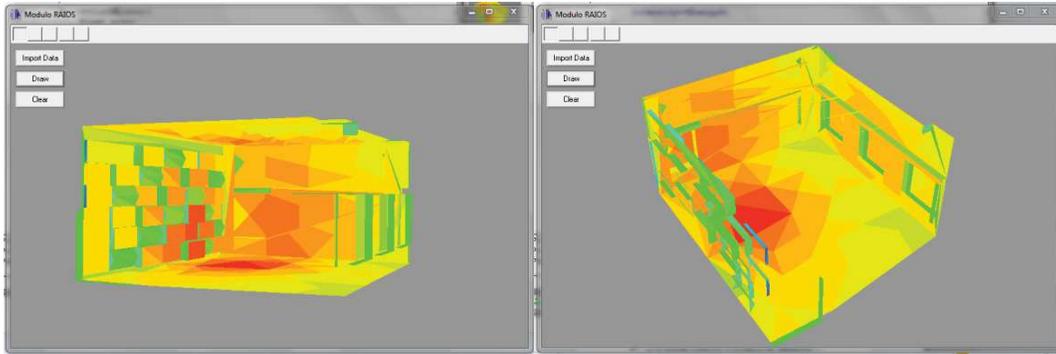
Banda de frecuencia 250 Hz



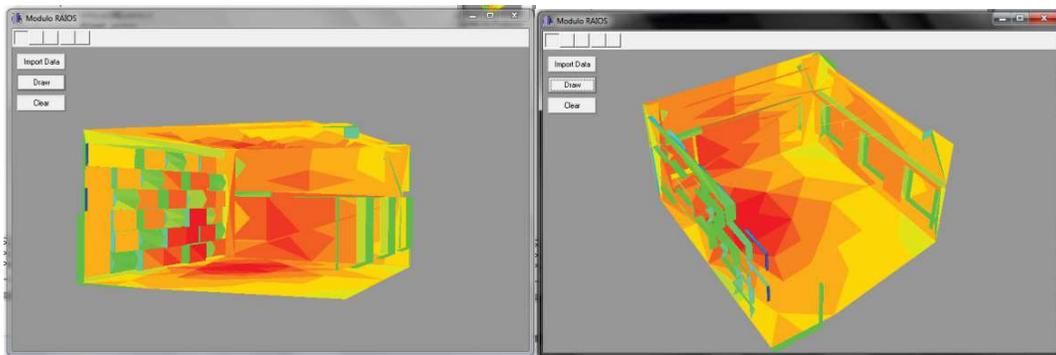
Banda de frecuencia 500 Hz



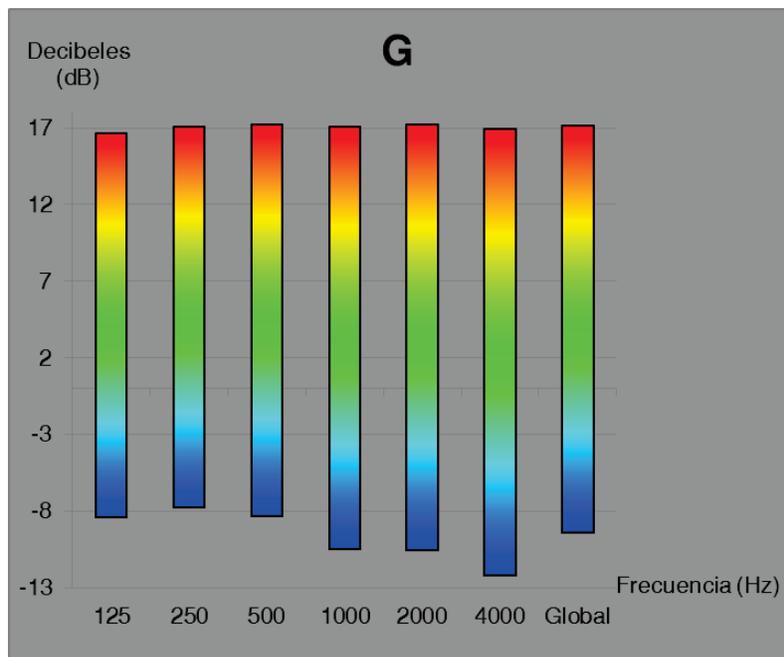
Banda de frecuencia 2 KHz



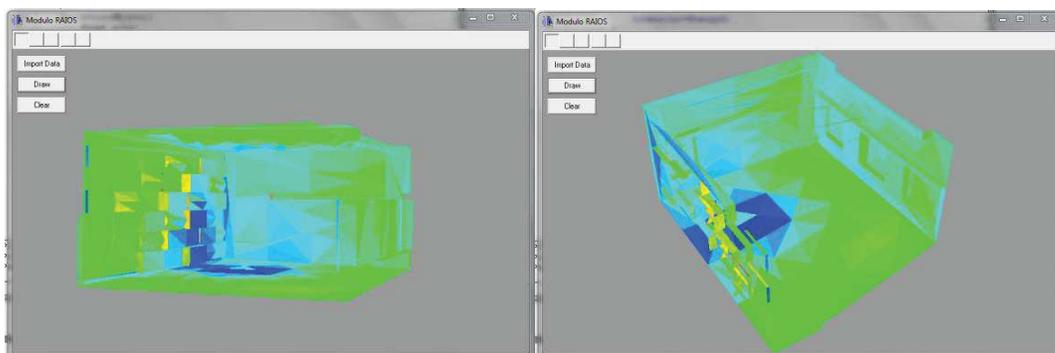
Banda de frecuencia 4 KHz



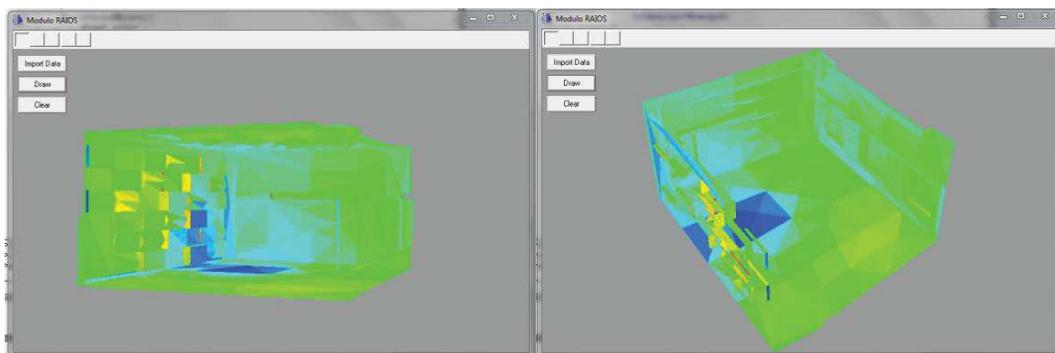
Global



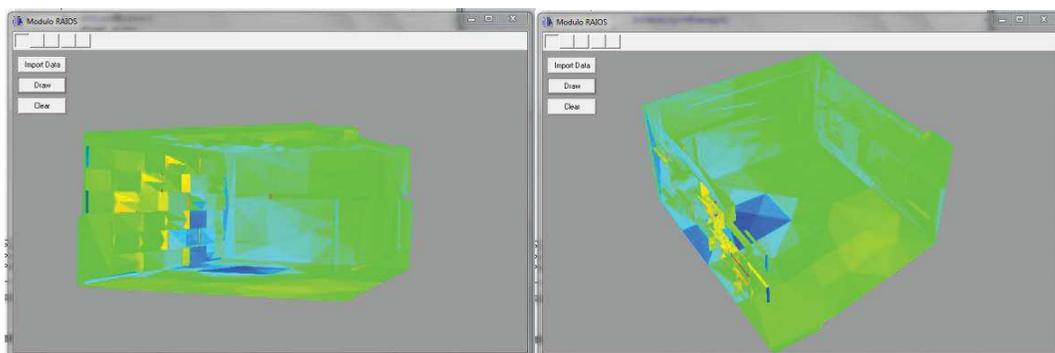
TS



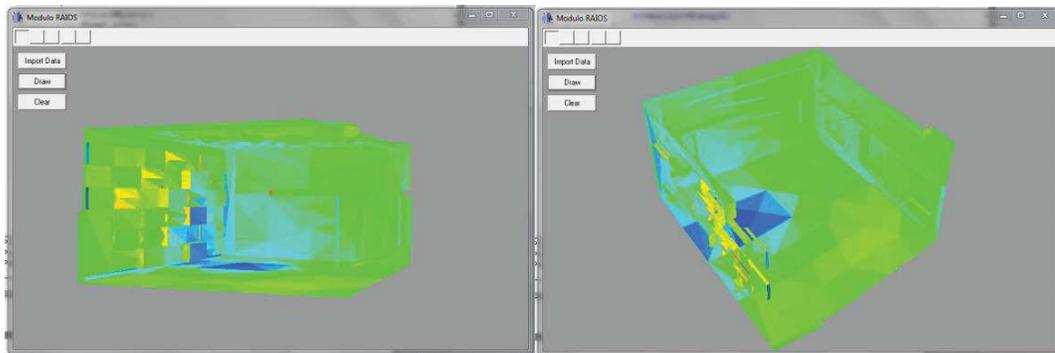
Banda de frecuencia 125 Hz



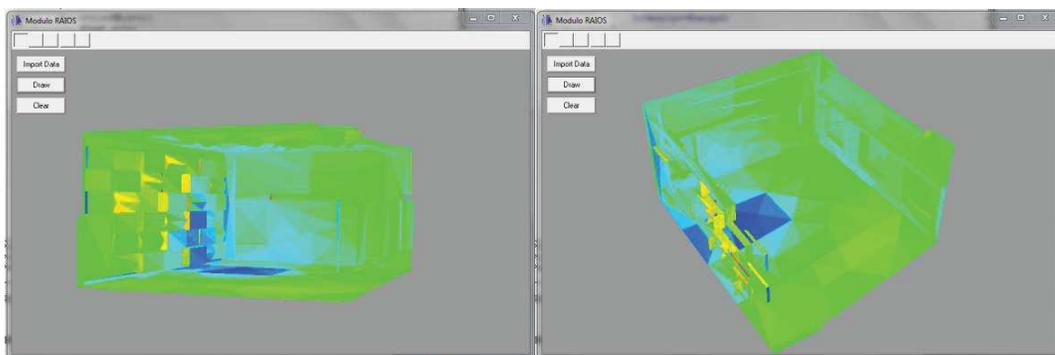
Banda de frecuencia 250 Hz



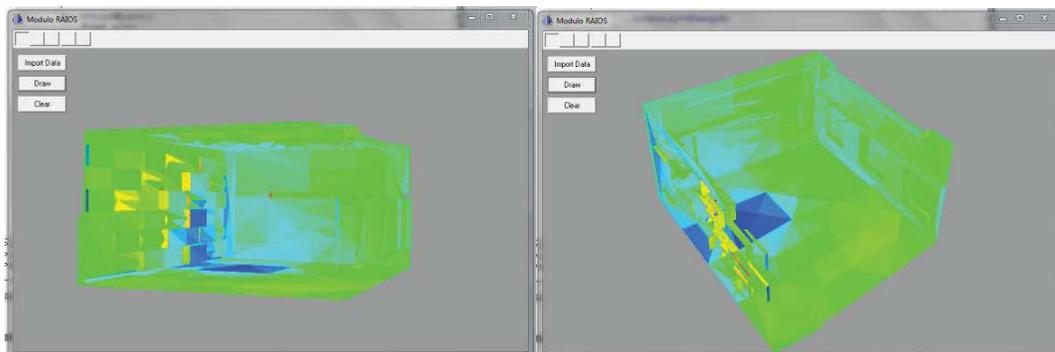
Banda de frecuencia 500 Hz



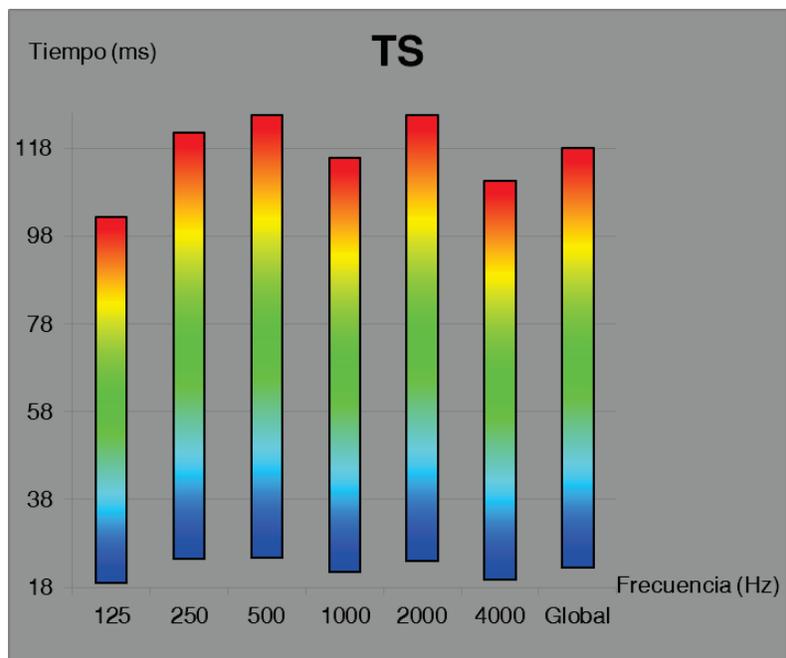
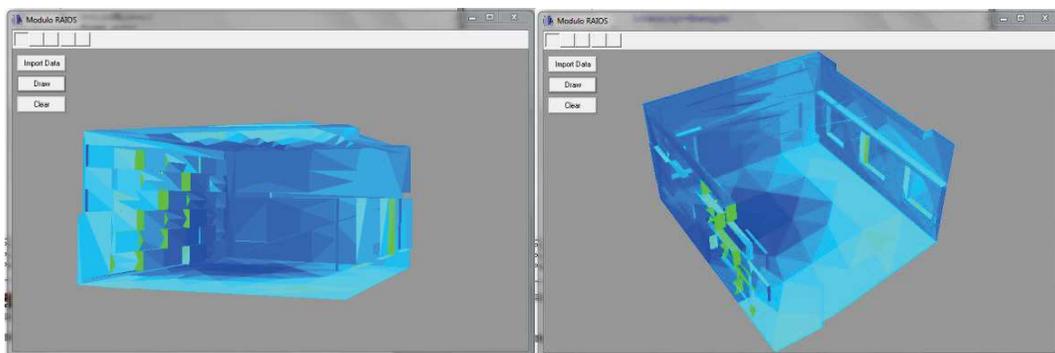
Banda de frecuencia 2 KHz



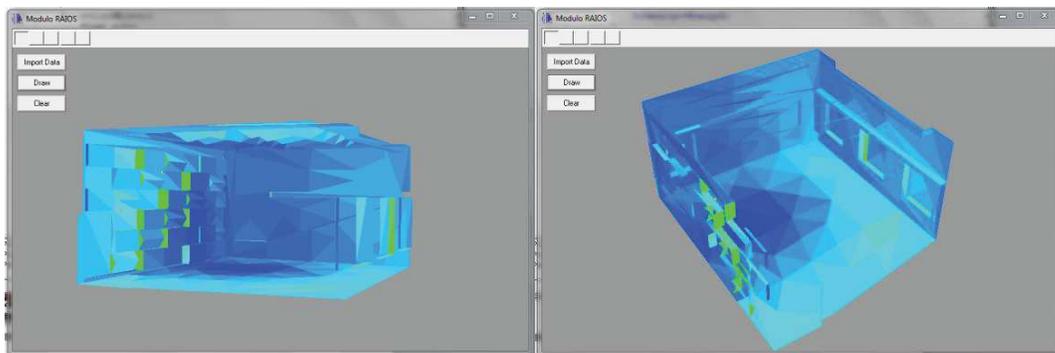
Banda de frecuencia 4 KHz



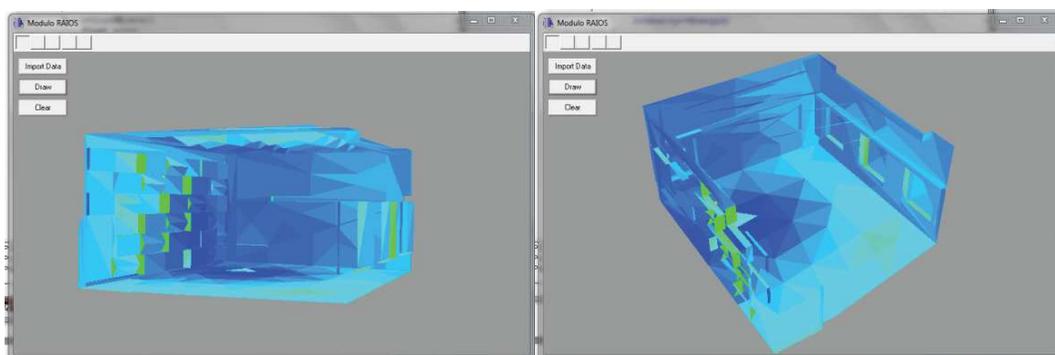
Global

**ST1**

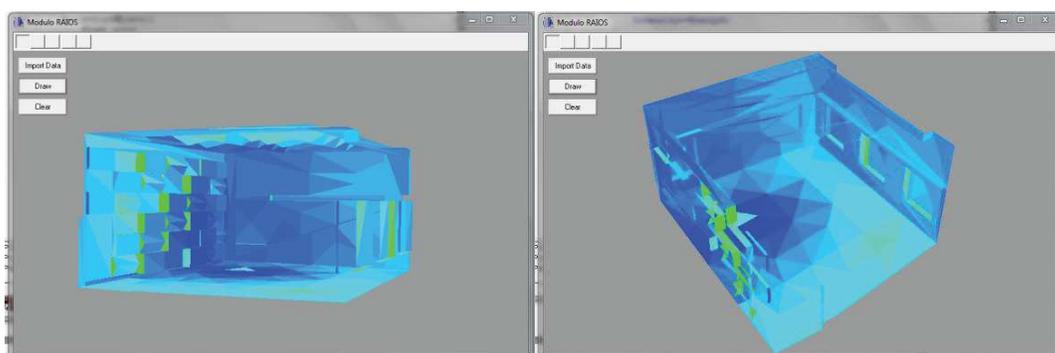
Banda de frecuencia 125 Hz



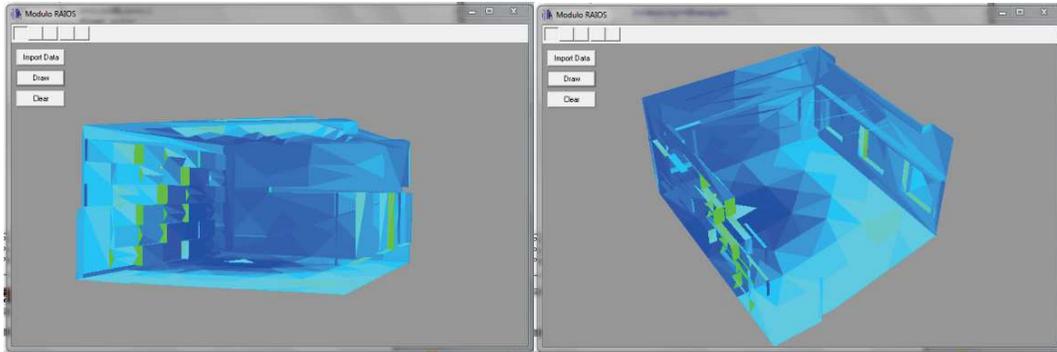
Banda de frecuencia 250 Hz



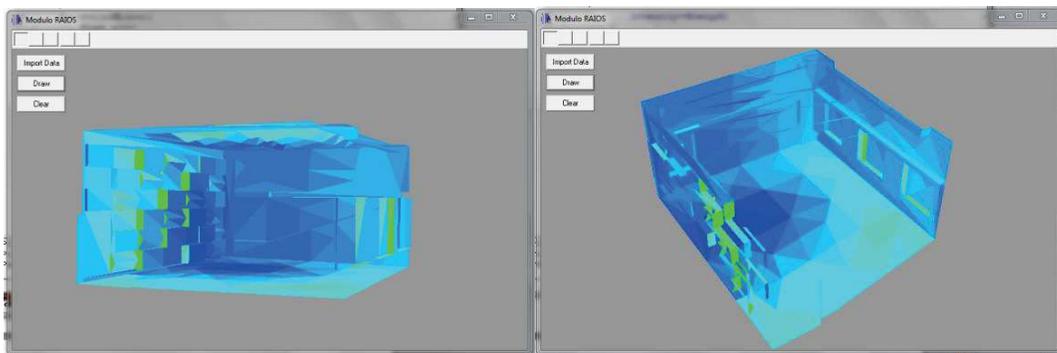
Banda de frecuencia 500 Hz



Banda de frecuencia 2 KHz



Banda de frecuencia 4 KHz



Global

