

SÍNTESIS DE RESPUESTA IMPULSIVA DE RECINTOS A TRAVÉS DEL MÉTODO DE TRAZADO DE RAYOS

GUILLERMO ALONSO¹, LEOPOLDO BUDDE² y MABEL R. ZANNIER³

¹Ingeniero Electrónico, Telecom Argentina SA, Alvear 66 3° Piso. CP X5000ZAA. Córdoba, Argentina.

²Estudiante de Ingeniería Electrónica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba (FCEyN, UNC), Av. Vélez Sarsfield 1611. CP X5016ZAA. Córdoba, Argentina.

³Estudiante de Ingeniería en Sistemas, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional (FRC. UTN), Maestro López Esq. Cruz Roja Argentina. CP X5016ZAA. Córdoba, Argentina.

guillermo.alonso@ta.telecom.com.ar, polibudde@gmail.com, mzannier@yahoo.com.ar

Resumen – *La auralización es la técnica utilizada para recrear en los oídos de un oyente las sensaciones que este percibe en un espacio acústico virtual ó real. Habitualmente, esta técnica requiere la determinación de la respuesta impulsiva del recinto, entre otros factores, para lo cual se utilizan distintos métodos como el de fuentes imágenes ó el trazado de rayos. En éste trabajo se exponen las distintas características del método de trazado de rayos, analizando ventajas, desventajas y resaltando su principal aporte en la determinación de la respuesta impulsiva.*

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la auralización es una herramienta de gran utilidad para la evaluación de las propiedades acústicas de un recinto previo a su construcción ó posterior remodelación [1]. Debido a que el campo sonoro que se establece en un recinto puede modelarse como un sistema lineal invariante en el tiempo (*Linear Time Invariant System: LTIS*), la respuesta impulsiva del recinto (*Room Impulse Response: RIR*) caracteriza la transmisión de las ondas sonoras una ubicación dada de la fuente y el receptor [2].

Para determinar la RIR, en esta última década, se han desarrollado métodos híbridos, que combinan el método de trazado de rayos (*Ray Tracing Method: RTM*) y el de fuentes imágenes (*Image Source Method: ISM*), debido a las ventajas y desventajas que presenta cada uno.

El trabajo está organizado de la siguiente manera: en primer lugar se define la técnica de auralización, especificando los distintos aspectos a tener en cuenta para en la determinación de la RIR. En segundo lugar, se presentan sintéticamente algunas de las teorías que modelan la acústica de recintos, para luego profundizar en el método del trazado de rayos. En tercer lugar se comparan las ventajas y desventajas del método y se discute finalmente sobre su aplicación para la obtención de la RIR.

2. AURALIZACIÓN

M. Vorlander define la auralización como la técnica de crear archivos sonoros a partir de datos numéricos, ya sean simulados, medidos o sintetizados [3]. De esta forma, se puede realizar una escucha de

forma virtual en cualquier punto de un recinto utilizando altavoces o auriculares.

A partir de la RIR puede obtenerse la auralización monoaural, sin embargo se obtienen resultados más reales mediante la auralización binaural, la cual requiere la respuesta del oído izquierdo y derecho del receptor [1].

A continuación se presentan dos métodos para implementar la auralización destacando los parámetros relevantes para la determinación de la RIR.

2.1 Auralización por convolución

Si se obtiene por separado la señal de excitación y la función de transferencia del sistema (o su respuesta impulsiva equivalente en el dominio del tiempo) puede calcularse por convolución la señal de salida resultante. Dicha convolución puede ser procesada de diferentes maneras, ya sea en el dominio del tiempo utilizando filtros de respuesta finita al impulso (*Finite Impulse Response: FIR*), o aplicando convolución por transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform: FFT*). Este procesamiento es válido exclusivamente para sistemas lineales invariantes en el tiempo [3].

Convolucionando la señal anecoica con la respuesta impulsiva se obtiene la señal auralizada monoaural, mientras que para que sea binaural se deben obtener las funciones de transferencia relacionadas a la cabeza (*Head Related Transfer Function: HRTF*) de ambos oídos del receptor [1]. Debido a que la localización sonora y la audición espacial binaural son entendidas como efectos de la HRTF, es posible simular cualquier dirección del sonido incidente a partir de una muestra monoaural. De esta manera se puede localizar una fuente en el

espacio tridimensional, lo cual constituye una tarea fundamental en la auralización [3].

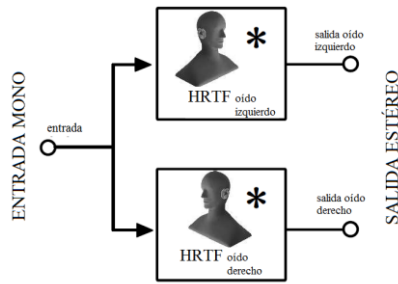


Figura 1: Auralización binaural

En la Figura 1 se muestra la obtención de una señal analizada de forma binaural mediante la convolución de una señal monoaural con las HRTF del oído izquierdo y derecho.

2.2 Auralización por redes digitales de reverberación

Partiendo de la respuesta impulsiva un software específico calcula ciertos parámetros acústicos representativos del campo sonoro en uno o varios puntos de estudio. Dichos parámetros son ingresados a una unidad de reverberación digital a la cual se aplica la señal anecoica, para obtener así la señal auralizada [1].

2.3 Parámetros relevantes

Al momento de simular la respuesta impulsiva de una determinada configuración fuente receptor en un recinto, existen ciertos parámetros cuyo conocimiento es indispensable para la obtención de resultados satisfactorios.

2.3.1 Coeficiente de absorción sonora

El coeficiente de absorción sonora α representa la fracción de la energía sonora incidente que no es reflejada por una superficie, ya sea porque es disipada o transmitida por la misma [4]. Dicho coeficiente depende de la frecuencia, por lo tanto esta consideración debe tenerse en cuenta para obtener mejores resultados.

2.3.2 Coeficiente de difusión sonora

En el estudio de la reflexión sonora el sonido incidente es representado por un rayo con un ángulo de incidencia ϕ_i , generándose un sonido reflejado que emerge con un ángulo ϕ_r . Si el sonido incide sobre una superficie lisa y sin poros la reflexión es especular, siendo $\phi_r = \phi_i$. Sin embargo, si la superficie es rugosa e irregular las partículas sonoras emergen en múltiples direcciones aleatorias produciéndose reflexión difusa [5]. El coeficiente de difusión s es el cociente entre la potencia sonora reflejada en direcciones no especulares, y la potencia sonora total [6].

2.3.3 Índice de reducción sonora

Cuando una onda sonora incide sobre una superficie, una parte de su energía es absorbida, otra reflejada y otra parte es transmitida [7]. Comparando las potencias de las ondas incidente y de la onda que atraviesa el material bajo ensayo, se obtiene el índice de reducción sonora

$$R_A = 10 \log \frac{P_0}{P_T} \quad (1)$$

Donde P_0 es la potencia total incidente y P_T la potencia transmitida [4].

2.3.4 Atenuación sonora atmosférica

Al propagarse en el espacio libre una onda experimenta atenuación debido a la viscosidad del aire, a la conducción calórica y al proceso de relajación térmica. Estos efectos extraen energía de la onda sonora de manera irreversible y son representados por el coeficiente de atenuación m [3].

3. ACÚSTICA DE RECINTOS

La energía que irradia una fuente sonora en un recinto cerrado llega al receptor en dos formas, una es a través del espacio libre (sonido directo) y la otra en forma indirecta (sonido reflejado). La energía correspondiente al sonido directo disminuye con la distancia a la fuente, mientras que la energía asociada al sonido reflejado depende de las propiedades de las superficies implicadas como así también de la cantidad de reflexiones. Es de particular interés para este trabajo el estudio temporal del sonido reflejado, el cual está compuesto por un primer grupo que incluye las reflexiones que llegan al receptor inmediatamente después del sonido directo (reflexiones tempranas), y un segundo grupo llamado cola reverberante que la constituyen las reflexiones tardías [1][8].

3.1 Acústica geométrica

Una reflexión es de orden “n” cuando ha incidido “n” veces en las superficies del recinto hasta alcanzar el receptor. Las primeras reflexiones presentan un nivel energético mayor y más discretizado que las correspondientes a la cola reverberante ya que son de menor orden [1].

Para caracterizar una habitación se debe seguir el camino histórico de las reflexiones sonoras a lo largo del tiempo, lo cual para un punto en particular es presentado en un gráfico llamado ecograma [9]. El cálculo del ecograma consiste en tratar los rayos sonoros considerando que las reflexiones sobre las distintas superficies son totalmente especulares, lo cual exige el cumplimiento de dos condiciones: que las dimensiones de la superficie sean grandes comparadas con la longitud de onda, y que la superficie sea lisa y poco absorbente [1]. Estas condiciones son válidas por encima de la frecuencia de Schroeder, f_s .

$$fs = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} [Hz] \quad (2)$$

Donde T es el tiempo de reverberación en s y V el volumen de la habitación en m^3 [10].

En el cálculo de las respuestas impulsivas de recintos hay varios métodos, los cuales se pueden clasificar en dos grupos principales como se puede observar en la Tabla 1. Los modelos basados en onda (*wave-based*) se caracterizan por obtener resultados muy precisos para frecuencias únicas y tienen aplicación en recintos pequeños a bajas frecuencias. El segundo grupo son los métodos basados en rayos (*ray-based*) los cuales son muy acertados para el modelado de alta frecuencia en salas de gran tamaño con una estructura complicada [8]. Básicamente, existen dos métodos, fuente imagen y trazado de rayos el cual se tratará con mayor detalle en las secciones siguientes.

Métodos basados en rayos	Métodos basados en ondas
Trazado de rayos (RTM)	Elementos Finitos (FEM)
Fuente Imagen (ISM)	Elementos de Contorno (BEM)
Método Híbrido (HM)	

Tabla 1: Los principales métodos utilizados para calcular la respuesta al impulso de un recinto.

4. MÉTODO DE TRAZADO DE RAYOS

La fuente irradia rayos sonoros en un tiempo inicial en varias direcciones, los cuales al incidir sobre una superficie pierden una parte de su energía inicial y cambian la dirección de propagación.

Si un sensor ó detector es afectado por un rayo, es posible almacenar en un sistema la energía del mismo, la dirección de incidencia y el tiempo transcurrido desde la radiación, para luego ser presentado en un histograma [10].

Básicamente, el proceso de simulación acústica consta de tres partes principales. La primera trata la fuente, estudiando la forma en que el sonido es emitido. La segunda, se enfoca en el modelado de la habitación, y la tercer parte abarca la caracterización del receptor [8]. Sin embargo además de estas tres partes principales es necesario tener en cuenta ciertos factores a incluir en el análisis, como por ejemplo la difusión, para obtener resultados que se asemejen más a las condiciones acústicas reales del recinto.

4.1 Modelo de fuente sonora

Los principales aspectos que caracterizan a una fuente son su potencia sonora y su directividad, las cuales son función de la frecuencia [3]. Un método para implementar la directividad consiste en definir la energía inicial de las partículas en función de la

frecuencia y dirección, manteniendo un patrón de radiación uniforme. Por otro lado, se puede optar por variar la densidad de partículas radiadas en función de la dirección, en donde todas las partículas presentan la misma energía inicial [10]. Las funciones de ponderación esféricas, ya sea de la densidad de rayos o de la energía de los mismos, pueden obtenerse de forma analítica o experimental, existiendo además la posibilidad de crear una radiación esférica uniforme.

4.2 Prueba del polígono

La etapa siguiente del método consiste en determinar si un rayo golpea un plano y si el punto de intersección se encuentra dentro o fuera de un polígono [3]. Esto se lleva a cabo creando imágenes bidimensionales del espacio tridimensional [11] y calculando productos vectoriales entre vectores desde el punto de intersección en el plano hasta los vértices del polígono. Si se comprueba que la intersección ocurre dentro del polígono, en la determinación del nuevo rayo reflejado deben tenerse en cuenta fenómenos tales como absorción y difusión [3].

4.3 Modelo de absorción sonora

Cuando un rayo golpea una superficie pierde energía debido a la absorción, ya sea por disipación o conversión de la energía sonora en otros tipos de energía [12]. Este proceso puede ser modelado de dos maneras en función de la precisión y tiempo de cómputo requerido. Un método consiste en multiplicar la energía incidente por el factor $(1-\alpha)$, siendo α el coeficiente de absorción, y el otro se basa en la aniquilación estocástica de las partículas.

La absorción por multiplicación es implementada entregando a cada partícula una energía inicial e_0 y continuando el trazado de rayos hasta que una energía mínima e_{min} o un tiempo máximo t_{max} sea alcanzado.

Por el contrario la absorción por aniquilación es modelada comparando un número aleatorio $z \in (0,1)$ con el coeficiente de absorción α . Si $z < \alpha$ la partícula es aniquilada.

En el cálculo de los principales parámetros que caracterizan la respuesta al impulso de un recinto, puede afirmarse que el método de aniquilación presenta un error mayor que el método de multiplicación. Sin embargo el tiempo de cómputo es mayor en el método de multiplicación [10].

La Figura 2 muestra los diagramas de flujo de ambos métodos.

4.4 Modelo de difusión sonora

Para obtener resultados más cercanos a la situación acústica real en un recinto utilizando el método de trazado de rayos, es necesario incluir el fenómeno de difusión cuando un rayo golpea una superficie.

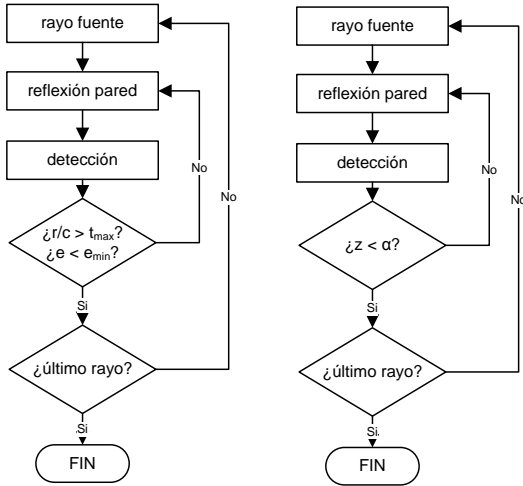


Figura 2: Izquierda: diagrama de flujo con el método de multiplicación. Derecha: diagrama de flujo con el método de aniquilación.

El coeficiente de difusión s se define como el cociente entre la potencia sonora reflejada en direcciones no especulares y la potencia total reflejada, donde $s = 0$ implica reflexión puramente especular, y $s = 1$ representa una especie de difusión ideal. Es importante destacar que esta definición no tiene en cuenta la distribución direccional de la potencia difundida.

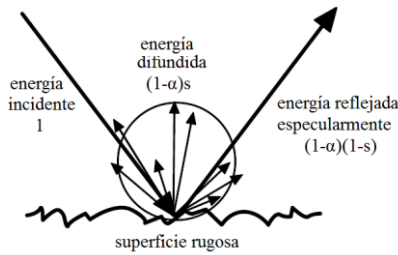


Figura 3: Reflexión especular y difusa sobre superficies rugosas.

En la Figura 3 se muestra un ejemplo de reflexión sobre una superficie rugosa, en donde parte de la energía es reflejada especularmente y parte de forma difusa. Al ser $(1-\alpha)s$ la porción de energía difundida, la energía reflejada de forma especular es $(1-\alpha)(1-s)$.

Las reflexiones difusas pueden simularse mediante métodos estadísticos [6]. La nueva dirección se obtiene a partir de dos números aleatorios, en donde los ángulos polares con respecto al vector normal a la pared deben ser distribuidos de acuerdo a la *ley del coseno de Lambert* [3].

Para determinar la dirección de los rayos reflejados especularmente se utiliza la *ley de Snell* [6].

4.5 Detector

Los detectores pueden ser superficiales o volumétricos, siendo estos últimos independientes del ángulo de incidencia. Esto presenta la ventaja de que la posición del detector brinda información suficiente. Una vez determinado el recorrido de los

rayos debe determinarse si los mismos golpean un detector, para lo cual es necesario calcular la distancia entre el rayo y el centro del detector y comprobar que sea menor que el radio del detector [3].

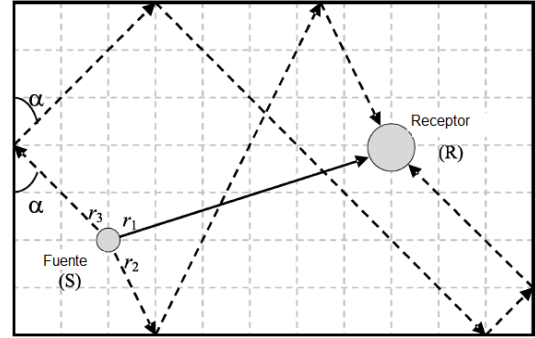


Figura 4: Trazado de rayos emitidos desde una fuente en ambiente bidimensional.

La Figura 4 muestra un ejemplo de trazado de rayos en un espacio de dos dimensiones, considerando solo tres rayos emitidos por la fuente.

Es de gran importancia la elección del volumen apropiado del receptor, para lo cual fueron propuestos distintos modelos. En uno de estos modelos, el volumen del receptor se calcula de la siguiente manera

$$Vr = w \times d_{sr} \times \sqrt{\frac{4}{N}} \quad (3)$$

Donde d_{sr} es la distancia entre la fuente y el receptor, N es el número de rayos y w es el factor de ponderación definido como

$$w = \log_{10}(V_{room}) \quad (4)$$

Siendo V_{room} el volumen de la habitación [8].

El método descrito hasta ahora representa un micrófono omnidireccional, lo cual presenta grandes diferencias con una audiencia real. Esto se debe a la negación de efectos físicos tales como la inmersión en el asiento del oyente (seat-dip) y la difusión hacia atrás de la cabeza del oyente. Para incluir estos efectos en las simulaciones es necesario analizar impedancias complejas y modelos de difracción, lo cual es más adecuado para modelos determinísticos [3].

4.6 Histograma

Los resultados obtenidos son presentados en un histograma de la energía de respuesta impulsiva, para lo cual es necesario que en cada detección sean almacenados la energía del rayo, su dirección de incidencia y el tiempo transcurrido. Se debe utilizar una tasa de muestreo que permita resolución temporal lo suficientemente alta, y al mismo tiempo intervalos de integración suficientemente grandes. Sin embargo es necesario aclarar que no es posible satisfacer los requerimientos de una tasa de muestreo necesaria

para implementar auralización utilizando solo el trazado de rayos [3].

4.7 Limitaciones del trazado de rayos

Debido a los elevados tiempos de cómputo requeridos, no es posible satisfacer los requerimientos de una tasa de muestreo adecuada para procesamiento de audio y auralización utilizando solamente el trazado de rayos. A pesar de que dicho problema podría ser resuelto con computadoras de mayor velocidad, esto no representa una verdadera solución, ya que el trazado de rayos es solo una aproximación al comportamiento de las ondas sonoras bajo determinadas condiciones [9].

Sin embargo este método resulta útil para la determinación de la cola reverberante, siendo de suma importancia la inclusión del fenómeno de difusión [12] [13].

La condición impuesta de que las dimensiones de la superficie sean grandes comparadas con la longitud de onda para poder aplicar correctamente el método de trazado de rayos, imposibilita su aplicación en bajas frecuencias. En este rango de frecuencias los fenómenos acústicos son explicados con la teoría ondulatoria [1].

Se debe destacar que es extremadamente útil visualizar un mapeo de la distribución espacial de los rayos para la prevención de ecos flotantes [8].

5. MÉTODO FUENTE IMAGEN

El método refleja la fuente S en cada superficie del recinto, generando tantas fuentes imágenes (Virtual Source: VS) como superficies. Cada VS, a su vez, genera otras VS que representan reflexiones de un rayo en más de una superficie. Posee la ventaja de ser muy preciso, pero si la habitación no es una caja rectangular simple presenta un problema. Con n superficies existen n posibles VS de primer orden, y cada una de estas puede crear $(n-1)$ VS de segundo orden. Los cálculos crecen de manera exponencial con el orden de las reflexiones, lo cual no es deseable debido al costo y tiempo de procesamiento [6] [14]. En la Figura 5 se muestra un ejemplo desarrollando fuentes imágenes correspondientes a primer y segundo orden.

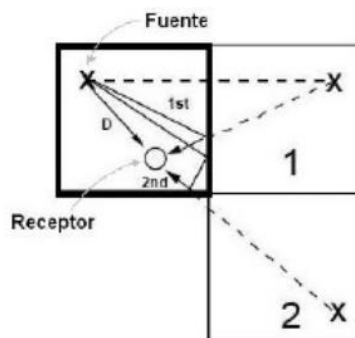


Figura 5: Fuentes imagen (VS) de primer y segundo orden

El método fuente imagen presenta un mejor desempeño en cuanto a la resolución temporal, sin embargo el método del trazado de rayos posibilita la inclusión de la difusión. Es por esto que una adecuada combinación de ambos métodos puede proporcionar mejores aproximaciones a la respuesta al impulso de un recinto real [10].

6. SOFTWARE DE SIMULACIÓN ODEON

El software de simulación ODEON permite obtener respuestas impulsivas mediante la utilización de métodos híbridos, combinando las ventajas de los métodos basados en rayos y en fuentes imágenes. Por lo general, los programas de simulación acústica actuales utilizan el ISM para determinar las reflexiones tempranas y el RTM para las tardías, siendo un tema de investigación científica actual el determinar el tiempo adecuado e transición entre ambos.

ODEON, utiliza el trazado de rayos para determinar la relevancia de una fuente en función de su posición, brindando una mejora en el tiempo de cálculo al descartar fuentes imágenes inaudibles. Además en el cálculo de reflexiones tempranas es de gran importancia una alta resolución temporal.

En cuanto a la cola de reverberación se utiliza un modelo estocástico como el trazado de rayos combinado con un nuevo método de fuentes secundarias [13].

7. CONCLUSIÓN

Para poder implementar la auralización es necesario determinar la respuesta impulsiva de un recinto, la cual se compone de las reflexiones tempranas y tardías (cola reverberante). Se concluye este trabajo afirmando que el trazado de rayos presenta el inconveniente de requerir elevados tiempos de cómputo, sin embargo permite tener en cuenta el fenómeno de difusión. Esta consideración hace que sea un método de gran utilidad para la evaluación de la cola reverberante, existiendo otros métodos más eficientes para la determinación de las reflexiones tempranas.

Al ser un método basado en la acústica geométrica, se debe tener en cuenta que el trazado de rayos ignora la naturaleza ondulatoria del sonido. De esta forma se desprecian efectos tales como difracción e interferencia de ondas, siendo esta la razón por la cual no es efectivo para bajas frecuencias.

8. REFERENCIAS

- [1] Carrión Isbert A, "Diseño acústico de espacios arquitectónicos", Editorial Alfaomega, Barcelona España, 2001.
- [2] Tommasini F C, Ramos O A, Ferreyra S P, "Comparación objetiva de respuestas impulsivas de recintos medidas y simuladas". VI Congreso Iberoamericano de Acústica. Buenos Aires, Argentina. 5, 6 y 7 de Noviembre, 2008.

- [3] Vorlander M., "Auralization". Springer. Aachen, Alemania. 2008.
- [4] Kuttruff H., "Acoustics". Taylor & Francis. 270 Madison Ave, New York, United States of America. 2007.
- [5] Ferreyra S P, Ramos O A, "Guía de la Cátedra Fundamentos de Acústica y Electroacústica". Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Córdoba, Argentina. 2012.
- [6] Rindel J. H., "The Use of Computer Modeling in Room Acoustics". Journal of Vibroengineering Number 3, p 41 – 72. Denmark. 2000.
- [7] Delgado A E, "Nuevas técnicas para la determinación del aislamiento acústico de materiales de construcción". Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. México. Febrero, 2008.
- [8] Alpkocak A, Kemal Malik, "Computing Impulse Response of Room Acoustics Using the Ray-Tracing Method in Time Domain". Dokuz Eylul University. Tinaztepe, Turquía. September, 2010.
- [9] Everest A, "The Master Handbook of Acoustics". McGraw Hill. United States of America. 2001
- [10] Forster Marius, "Auralization in Room Acoustics". Bachelor's Thesis. Graz University of Technology Institute of Broadband Communications. Graz, Austria. 2008.
- [11] Glassner A S, "An Introduction to Ray Tracing". Morgan Kaufmann Publishers. San Francisco, United States of America. 2002.
- [12] Acoustical Society of America, "American National Standard Acoustical Terminology". New York, United States of America. 1994.
- [13] Christensen C L, "Odeon Room Acoustics Program Manual". Versión 10.1. Dinamarca. 2009.
- [14] Tommasini F. C., Ramos O. A., Ferreyra S. P., "Modelado Eficiente y Validación Objetiva de la Respuesta Impulsiva de un Recinto". Mecánica Computacional Vol XXVII, p. 443-455. San Luis, Argentina. 10-13 Noviembre 2008.

DATOS BIOGRAFICOS

Guillermo Alonso, nacido en Resistencia, Chaco el 09/05/1981. Ingeniero en Electrónica egresado de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Argentina. Actualmente trabaja en Telecom Argentina SA. Sus intereses son: mediciones acústicas, acústica arquitectónica y electroacústica.

E-mail: guillermo.alonso@ta.telecom.com.ar

Leopoldo Budde, nacido en Córdoba el 22/05/1989. Estudiante de ingeniería electrónica, Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Córdoba. Argentina. Sus intereses son: realidad acústica virtual y electroacústica.

E-mail: polibudde@gmail.com

Mabel R. Zannier, nacida en Córdoba el 07/06/1974. Estudiante de ingeniería en sistemas de

información, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Argentina. Sus intereses son: grabación y producción digital de audio, masterización y electroacústica.

E-mail: mzannier@yahoo.com.ar