

PRIMERAS JORNADAS REGIONALES DE ACÚSTICA AdAA 2009

19 y 20 de noviembre de 2009, Rosario, Argentina



AdAA2009-A026R

Herramientas para el estudio de la percepción, valoración y efectos en el ser humano en relación al contenido espectral y envolvente temporal del ruido

Ernesto Accolti^(a), Federico Miyara^(b)

Laboratorio de Acústica y Electroacústica, Facultad de Ciencias Económicas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina.

(a) eaccolti@fceia.unr.edu.ar

(b) fmiyara@fceia.unr.edu.ar

Abstract

A new paradigm for the research on the perception, assessment and global effect of environmental noise in the human being is presented. It is based on the analysis of the sounds of diverse nature that compose this environmental noise. This paradigm studies the instantaneous psychoacoustic parameters of every sound that composes the environmental noise and its relation with global versions of those parameters, both in a time-integration sense and in the sense of the superposition of several simultaneous sources of environmental noise. Algorithms published elsewhere are described emphasizing their applications to the study of the effects of the noise in the human being. The tools developed within this paradigm framework are: an algorithm for the controlled combination of sounds (in the sense of achieving a target spectrum), spectral analyzers (octave band, 1/3 octave band and critical-band), a system of virtual auralización and a visual interactive platform for experiments of magnitude estimation of psychoacoustics parameters, among others.

Resumen

Se expone un paradigma de investigación de la percepción, valoración y efecto global del ruido ambiente en el ser humano basado en el análisis de los sonidos de diversas naturalezas que lo componen. Este paradigma estudia parámetros psicoacústicos instantáneos de cada sonido que compone el ruido ambiente y su relación con versiones globales de dichos parámetros, tanto en el sentido de integración temporal como de superposición de fuentes simultáneas de ruido ambiental. Se describen algoritmos publicados en otras reuniones científicas con un enfoque que enfatiza sus aplicaciones al estudio de los efectos del ruido en el ser humano. Las herramientas desarrolladas para el estudio enmarcado en este paradigma son: un algoritmo de combinación controlada de sonidos, analizadores espectrales y de bandas de octava, tercios de octava y críticas, un sistema de auralización virtual y una plataforma visual interactiva para estudios de estimación de magnitud de parámetros psicoacústicos, entre otras.

1 Introducción

En la actualidad se trabaja activamente en la mejora de la calidad sonora de diversos equipos, máquinas, vehículos, etc., de uso doméstico, tales como electrodomésticos, juguetes y automóviles (Jekosch et al. 1996; Blauert et al., 1997; Miralles et al., 2005, Sato et al., 2007; Wang, 2009). El paradigma suele ser el uso de ciertas variables psicoacústicas desarrolladas por Terhardt, Fastl, Bismarck y otros investigadores (Zwicker et al., 2007) tales como la aspereza (roughness), la agudeza (sharpness) y la fuerza de fluctuación (fluctuation strength). Estos parámetros tienen una fuerte base espectral a través de la sonoridad específica (Schöll, 1962; Chalupper, 2000; Chalupper et al., 2002; Anweiler, 2006; Cabrera et al., 2007; Zwicker et al., 2007; Ries et al., 2008).

En cambio los trabajos que se refieran a la valoración humana del ruido ambiental generalmente se basan en parámetros como el nivel sonoro con ponderación A (y eventualmente otras ponderaciones o correcciones según determinadas circunstancias). Existen numerosos trabajos que conducen a relaciones dosis-respuesta (Schultz, 1978; Fidell, 1991; Miedema et al., 1998; Stassen et al., 2008; Brown et al., 2009 & 2009b; Van Kempen et al., 2009 & 2007), centrándose en ruidos cuya naturaleza espectral puede considerarse relativamente homogénea, tal como el ruido del transporte automotor, aéreo o ferroviario, cada uno de los cuales presenta diferencias con respecto a los otros en cuanto a espectro, evolución temporal y, previsiblemente, en cuanto a la respuesta humana (Miedema, 1998). Estos trabajos se basan en la síntesis y homogeneización de los resultados de diversas encuestas simultáneas con mediciones de ruido realizadas en numerosos países (Fields, 2001; Furukawa 2008).

También se ha prestado mucha atención a ruidos de naturaleza muy particular en lo espectral (ruido de baja frecuencia) y en lo temporal (ruido impulsivo). Existe una gran cantidad de trabajos (Berglund, 1996; Schomer, 1997; Beaman, 2005; Moorhouse, 2005) que los tratan específicamente.

Además se han intentado aproximaciones, aún no concluyentes, a la objetivación de cualidades físicas de señales con alto contenido semántico, en donde a la distribución espectral expresada en términos de bandas críticas se agrega su evolución temporal (Fastl 2001; Cabanellas et al., 2006).

Actualmente se trabaja en un paradigma llamado paisaje sonoro (soundscape) que es, a priori, bastante diferente a los paradigmas clásicos ya que la idea es preservar aquellos sonidos bien valorados y controlar aquellos que interfieren con estos o que no son bien valorados. Este paradigma se encuentra en fase de desarrollo y en cuanto al estudio de la valoración agrega categorías con connotaciones positivas en contraposición a los paradigmas clásicos que solo evalúan los ruidos con categorías con connotaciones negativas como ser el grado de molestia expresado en categorías verbales (Raimbault et al., 2005; Botteldooren et al., 2006; Gustavino, 2006; Maffei, 2008). Si bien hasta el momento el enfoque referido al contenido espectral o a la evolución temporal de estos ruidos no es explícito, las bases de selectividad de sonidos bien valorados es muy posible que estén implícitamente relacionadas en cuanto son precisamente la evolución temporal y el contenido espectral los parámetros objetivos relacionados con la noción de timbre que permite, subjetivamente, diferenciar sonidos de una u otra naturaleza.

2 Paradigma de investigación

El propósito general de investigación, para el cual se desarrollan e implementan las herramientas expuestas en este trabajo, es el estudio de la percepción y valoración humana del ruido en relación a su contenido espectral y a su envolvente temporal.

De este propósito general se desprenden otros específicos como el estudio de efectos del ruido que interfieren en la concentración o el desarrollo de tareas y otros más ambiciosos como el de desarrollar un modelo matemático capaz de explicar en forma objetiva las relaciones subjetivas anteriormente mencionadas, encontrar un modelo válido para cuantizar el parámetro subjetivo de contenido semántico del ruido y su relación con el objeto de estudio.

Este nuevo paradigma se encuentra en desarrollo y combina nociones de los trabajos clásicos como así también de la corriente de paisaje sonoro. En cuanto a los trabajos clásicos se adoptan los modelos objetivos de percepción psicoacústica como variables independientes generadas a partir de una transformación de las características de las señales que representan el ruido. De las corrientes clásicas se pretende englobar los estudios de sonidos impulsivos tratando además otros tipos de envolventes como así también sonidos de bajas frecuencias buscando relaciones con contenido espectral en otras bandas de frecuencia. Del paradigma de paisaje sonoro se toma la idea de estudiar el sonido ambiental como una combinación de sonidos de diferente naturaleza. El tipo de categorías de valoración (connotación solo negativa o positiva y negativa) es uno de los aspectos que sigue en desarrollo.

Dentro de la corriente de los parámetros psicoacústicos, se buscará ampliar su alcance para casos globales. Sucede que los parámetros psicoacústicos objetivos están definidos en forma casi instantánea representando bastante bien los parámetros subjetivos en intervalos de tiempo cortos (del orden de unos pocos milisegundos) pero no existe aún un modelo que relacione estos parámetros cuasi-instantáneos con esos mismos parámetros subjetivos en forma global para un tiempo más largo. Algunos trabajos de carácter exploratorio demuestran que no se trata simplemente de un promedio (Hastings et al., 2001; Kuwano et al., 2003; Accolti et al., 2009b). Por otra parte los modelos psicoacústicos están definidos para una sola fuente sonora y no para sonidos ambientales que combinan más fuentes. También existen trabajos que demuestran que los modelos válidos para una sola fuente sonora no son extensibles a sonidos formados por más fuentes (Accolti et al., 2009b).

El tipo de enfoque expuesto requiere técnicas de simulación aural y combinación controlada de sonidos a modo de poder estudiar en conjunto y por separado los sonidos que componen el sonido ambiente.

3 Herramientas

A modo de estado de avance de este estudio se presenta el instrumental desarrollado e implementado. Se implementó un algoritmo de combinación de sonidos para generar un sonido ambiental con características especificadas por el usuario. Se implementaron herramientas computacionales de análisis de amplitud y análisis espectral para el análisis de sonidos individuales que componen el sonido ambiental como así también de su combinación. Se implementó un sistema de auralización virtual por auriculares desarrollando algunas técnicas para poder implementar algunos de los bloques que componen el sistema. Además se diseñó e implementó una plataforma interactiva para experimentación en psicoacústica.

3.1 Análisis espectral

La herramienta de análisis espectral fue diseñada en un principio para obtener los datos espectrales de todos los sonidos correspondientes a la base de sonido del algoritmo de

combinación controlada. Sin embargo esta herramienta es de continua utilidad a lo largo de la experimentación y es reutilizada para verificar los resultados de la combinación de sonidos como así también para estudiar muestras de ruido ambiental tomadas de la realidad.

3.1.1 Espectro completo

El análisis espectral se realiza promediando energéticamente los datos de porciones sucesivas de $N = 4096$ muestras, cada una previamente multiplicada por una ventana de Blackman, dada por la ecuación (1).

$$v(n) = v_0 - v_1 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + v_2 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right);$$

$$v_0 = \frac{1-\alpha}{2}; \quad v_1 = \frac{1}{2}; \quad v_2 = \frac{\alpha}{2}; \quad (1)$$

$$\alpha = 0,16$$

Este proceso de ponderar los cuadros por ventanas se utiliza para evitar o reducir el derrame espectral (leakage) producido por el hecho de calcular la transformada rápida de Fourier en segmentos no periódicos dentro del cuadro. La elección de la ventana de Blackman responde al compromiso existente entre disminuir las pérdidas (bajos lóbulos laterales y menor ensanchamiento del lóbulo central en el dominio de la frecuencia) y disminuir el costo computacional.

La transformada rápida de Fourier se calcula mediante la ecuación (2).

$$FFT(m) = \sum_{k=0}^{n-1} a_k e^{-\frac{2\pi i}{N}mk}, \quad m = 0, \dots, N-1 \quad (2)$$

donde $FFT(m)$ es el punto m de la transformada rápida de Fourier del sonido en porciones de muestras a_k en el dominio temporal $k = 0, \dots, 4095$.

La frecuencia correspondiente a cada punto de la transformada rápida se puede obtener con la ecuación (3)

$$f_m = \frac{Fs}{N}m \quad (3)$$

de donde se puede deducir que la resolución será Fs/N .

Dado que la mayoría de los sonidos individuales están muestreados a 44100 Hz, y por lo tanto la resolución en bajas frecuencias será muy pobre (aproximadamente 10 Hz), se implementa además una técnica para mejorar la resolución en frecuencia para frecuencias inferiores a 680 Hz. La técnica consiste en submuestrear el sonido en un factor de 32, aplicando previamente un filtro antialias de alto rechazo, alcanzando una resolución 0,3 Hz para sonidos originalmente muestreados a 44100 Hz. De esa forma se define el cuadro de análisis en $4096 \times 32 = 131072$ muestras, para el cual se promedian energéticamente las 32 transformadas de la señal en la tasa de muestreo original y se calcula una única transformada para la señal submuestreada. Finalmente se promedian todos los cuadros de análisis, o porciones sucesivas, en los cuales se dividió el sonido.

3.1.2 Espectro de bandas

Una vez obtenidos los espectros, la energía en una banda cualquiera se puede estimar sumando los valores correspondientes a los puntos m que se encuentran dentro del rango de frecuencias de dicha banda siguiendo la ecuación (3). Con dicho método se calculan los niveles en bandas de tercio de octava y sumando energéticamente los tres valores de bandas de tercio de octava correspondientes se obtienen los niveles por bandas de octava.

Para estimar los niveles en bandas críticas se determinan los extremos de frecuencia f_{ik} y f_{sk} de cada banda utilizando un algoritmo que implementa la función inversa de la ecuación (4) (Zwicker, 2007),

$$z = 13 \operatorname{atan}(0,00076 f) + 3,5 \operatorname{atan}((f/7500)^2) \quad (4)$$

donde f está en Hz y z en bark. Luego, igual que en el caso anterior, se suman las energías de todas las líneas espectrales comprendidas entre f_{ik} y f_{sk} .

3.2 Envoltentes de amplitud espectrales

Por otra parte, para tener en cuenta la evolución temporal de las bandas de frecuencia se realiza un filtrado de la señal para cada banda, utilizando la misma técnica de mejora de la resolución espectral usada en la sección anterior (submuestreo para frecuencias bajas). El banco de filtros se diseñó previamente en este caso y consiste en filtros de respuesta finita (FIR) calculados según el método de muestreo en frecuencia (Mitra; 1998).

El filtrado se implementa mediante un algoritmo que utiliza la técnica de overlap-add. Esta técnica consiste en una forma rápida de convolucionar la señal con la respuesta al impulso o los coeficientes del filtro FIR correspondiente. La implementación y validación de estos algoritmos puede verse con mayor detalle en Miyara et al., 2009.

Luego la extracción de la envolvente de cada banda se realiza utilizando un filtro pasabajos de primer orden con constante temporal $\tau = 4$ ms aplicado a la señal al cuadrado, seguido por un procedimiento de submuestreo con un factor de 88. El filtro antialias involucrado en el procedimiento de submuestro remueve el rizado remanente que pueda quedar manteniendo las características relevantes de la envolvente.

Por ejemplo para un análisis de envoltentes en bandas críticas se tendrá 24 señales, correspondientes a las 24 bandas críticas, en una tasa de muestreo 88 veces menor que la de la señal original.

3.3 Combinación controlada de sonidos

Existen varias razones que fundamentan la aplicación de algoritmos que combinen sonidos de diversas naturalezas para lograr un sonido ambiental con características espectrales y de evolución temporal controladas.

Una de estas razones es la posibilidad que brinda esta herramienta de explorar los mecanismos de percepción global de parámetros psicoacústicos en función de esos mismos parámetros pero en forma individual en cada uno de los sonidos que componen el sonido ambiente.

Además el control de estas características es muy importante al momento de diseñar experimentos para el estudio de las respuestas del ser humano frente al ruido ambiental. Si bien es mucho más sencillo controlar estas características utilizando por ejemplo ruido blanco modificado, la arista de realismo que brinda esta nueva herramienta es de gran interés pues en estas señales el contenido semántico, que es de gran influencia en ciertas respuestas humanas frente al ruido, será más similar a los casos reales.

Recientemente se han desarrollado algoritmos para la combinación de sonidos con un espectro global controlado (Accolti et al., 2008) y se están actualizando para incorporar controles sobre la evolución temporal y el tipo de ambiente en el cual pueden encontrarse sonidos de distinta naturaleza.

La combinación de espectro controlado se logra resolviendo un sistema sobre-determinado de ecuaciones lineales. Cada ecuación del sistema es una combinación lineal de la energía en cada banda de frecuencias para todos los sonidos de la base de sonidos pesados por el valor de amplificación que se deberá dar a cada sonido a modo de obtener la energía sonora especificada por el usuario. La incógnita es la amplificación de cada sonido (igual para todas las bandas) y se resuelve bajo la restricción de que esta sea positiva. Además, usando criterios de aleatoriedad, se realiza la repetición de algunos sonidos individuales modificando, según corresponde, el nivel de amplificación necesario. En la Figura 2 se muestran los sonidos individuales x_{p_i} con su patrón de repeticiones y amplificados usados para generar el sonido ambiente p_{ru} según la resolución del algoritmo para un espectro pre-establecido en forma arbitraria. En la Figura 1 se muestran los espectros de octava especificados por el usuario (azul), obtenidos según la predicción del algoritmo (rojo) y calculados mediante análisis espectral del sonido resultante de la combinación (verde).

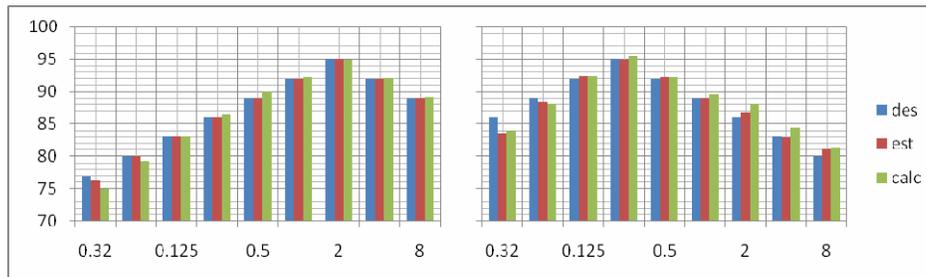


Figura 1. Niveles estimados al resolver las ecuaciones lineales que describen el problema (est) y calculados después de combinar digitalmente los sonidos (calc) para los niveles deseados (des) de. Prueba 1 (izq) y Prueba 2 (der).

El algoritmo se describe en forma más detallada en Accolti et al., 2008.

3.3.1 Simulación aural de ruido de tráfico rodado

Se presta especial atención al tráfico rodado dado que es actualmente una de las fuentes sonoras con mayor presencia en los ambientes urbanos de la mayoría de las ciudades alrededor del mundo. Actualmente se utilizan grabaciones de sonidos de esta naturaleza, pero en forma simultánea se desarrollan herramientas de simulación de ruido de tráfico.

En una primera aproximación al problema se logró implementar la simulación del sonido de un automóvil que se mueve a velocidad constante en una ruta libre de obstáculos (Ver Figura 3) y otra para una ruta que atraviesa un perfil “U” constituido por fachadas de edificios (Miyara et al., 2003; Marengo Rodriguez and Miyara, 2008, 2009b y 2009c). Esta herramienta sigue en desarrollo con el propósito de incorporar los efectos de cambios de velocidad o de marcha así como el de modelar situaciones reales de ruido de tránsito basadas a su vez en simulaciones de flujo vehicular.

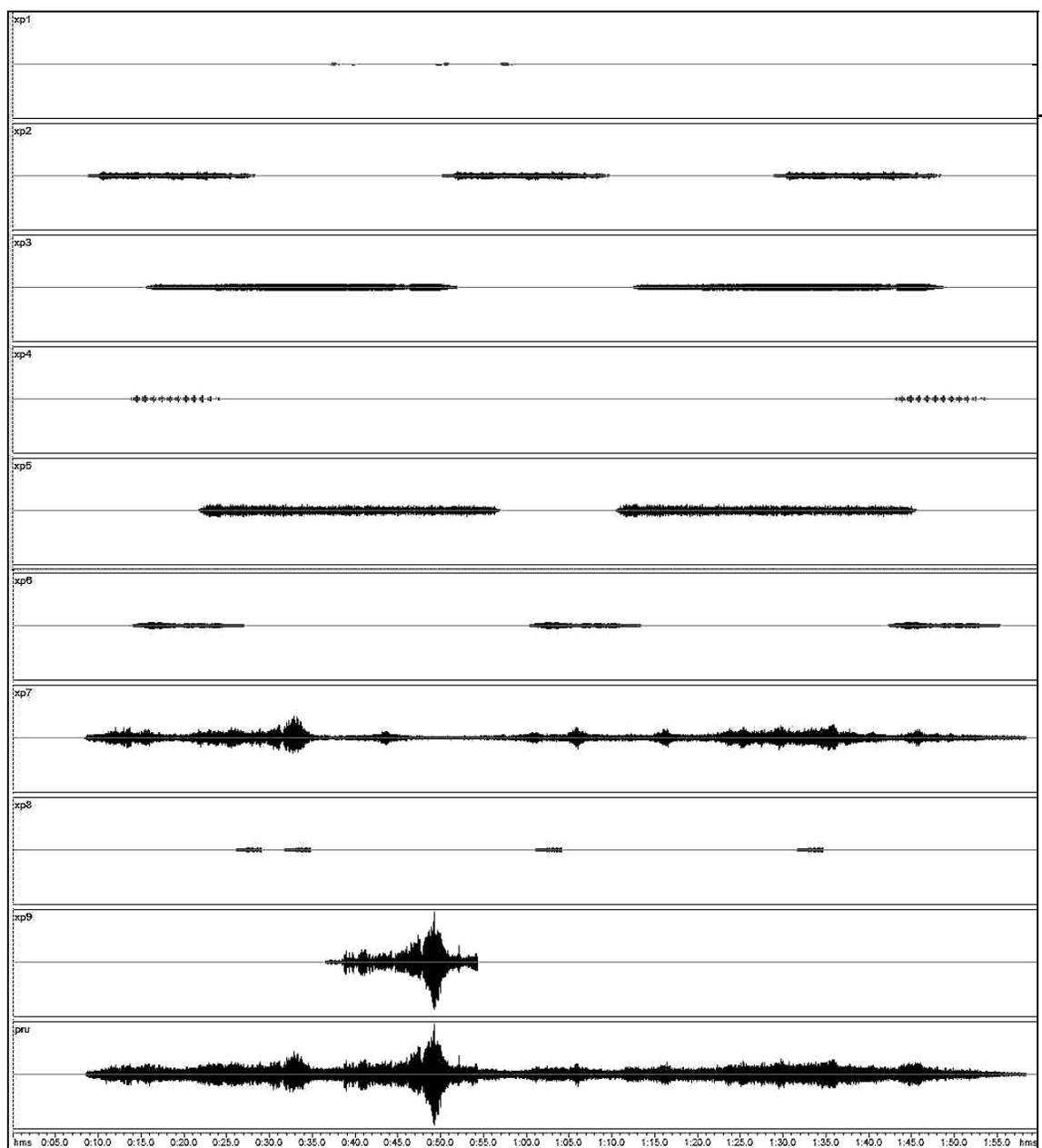


Figura 2. Patrón de repetición de cada archivo xp_i usado en la combinación del sonido pru (última fila). En unidades codificadas proporcionales a la presión sonora en función del tiempo (min:s)

Incorporar este novedoso tipo de herramientas permite estudiar los efectos en el ser humano en función de varios parámetros como ser el sonido ambiente del contexto de este ruido de tráfico, las restricciones de velocidad para cierta vía e indicadores del flujo vehicular entre otros.

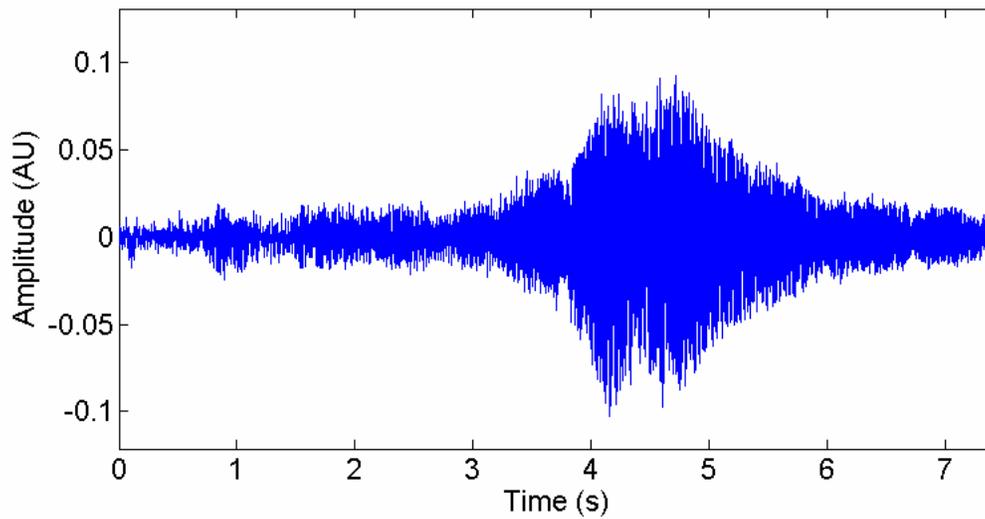


Figura 3. Evolución temporal de la simulación (Marengo Rodriguez and Miyara, 2009).

3.4 Sistema de auralización virtual

El sistema de auralización virtual está actualmente en desarrollo, hasta el momento se avanzó en el desarrollo de un protocolo de calibración de auriculares (Accolti et al., 2009c) y un algoritmo para simulación de respuesta impulsiva para salas de forma paralelepípeda (Accolti et al., 2009).

El protocolo de calibración ofrece un sistema de auralización virtual para presentar en auriculares sonidos ajustados a como serían medidos en campo sonoro libre, ofreciendo la posibilidad de ser reproducido para distintos modelos de auriculares audiométricos. El protocolo también tiene en cuenta una calibración para campo sonoro difuso, que generalmente se debe complementar con la simulación de la respuesta impulsiva de la sala.

Cuando es necesario simular auralizaciones en condiciones de una sala virtual se incorpora el algoritmo de simulación de respuesta impulsiva utilizando el esquema de la Figura 4.

La respuesta impulsiva se basa en el clásico método de las fuentes imágenes (ISM) para las primeras reflexiones y utilizando ruido de fase aleatoria modulado en amplitud para la reverberación tardía. En Accolti et al., 2009 se presentan algunas técnicas nuevas que permiten un cálculo más rápido de estas respuestas impulsivas sin perder realismo. Una de las modificaciones consiste en utilizar las respuestas impulsivas de un set de filtros de octava y realizar una combinación lineal pesando estas respuestas con los coeficientes de reflexión sonora resultantes de la reflexión en las superficies correspondientes a cada rayo. La otra técnica corresponde a modelar la transición entre la reverberación temprana y la reverberación tardía a partir de la extracción de valores de un ruido bimodal en las muestras de audio que corresponda siguiendo el patrón temporal de reflexiones obtenido mediante ISM.

Además el algoritmo prevé la incorporación de patrones direccionales de las fuentes sonoras con lo cual se puede modelar no solo los efectos direccionales de las fuentes sonoras dentro del recinto sino también, por ejemplo, modelar el efecto de una superficie como si fuese una fuente sonora con un nivel de potencia sonora L_w calculable a partir del nivel de presión sonora L_p del sonido que se trasmite a través de esa pared y sus coeficientes de pérdidas por transmisión.

También se utilizan filtros correspondientes a direcciones discretas para simular el efecto de las funciones de transferencia relativas a la cabeza y el torso (HRTF) de los receptores. El campo de investigación de las HRTF es un campo que sigue abierto pues cada sujeto tiene su propia HRTF y usar la de otro genera cierta confusión. Medir la HRTF de cada sujeto es un procedimiento muy costoso en cuanto a instrumental y tiempo, por lo cual se está trabajando con modelos que estiman estas transferencias a partir de datos antropométricos o fotografías de los sujetos (Algazi et al., 2001).

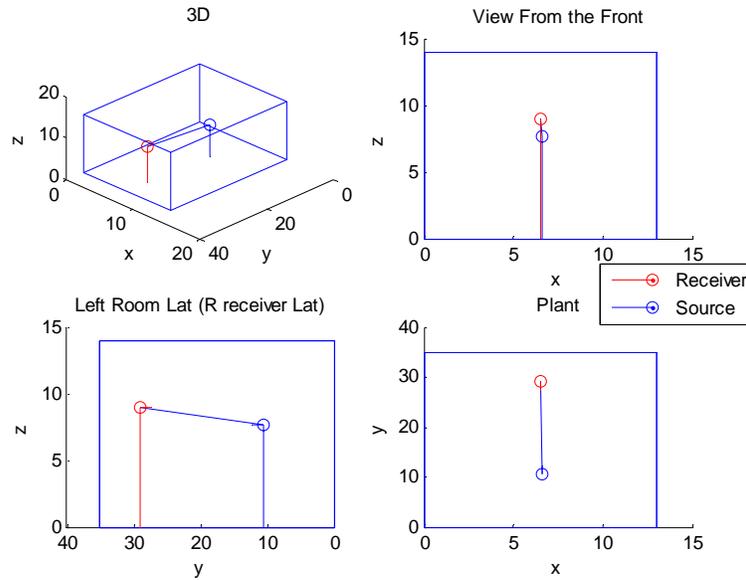


Figura 4. Esquema de la sala simulada

La razón de ser de este algoritmo es la posibilidad de controlar los efectos vinculados con distintos tipos de salas sobre los sonidos ambientes y de esa manera poder explorar los efectos conjuntos en el ser humano. Por ejemplo, uno de los fenómenos de gran interés para la psicoacústica y que influye notablemente en la mayoría de los parámetros psicoacústicos es el post-enmascaramiento. El post-enmascaramiento se puede definir como el nivel necesario de un sonido de prueba de corta duración ubicado después de un sonido enmascarador, en función del tiempo, para ser apenas perceptible. Sucede que cuando un sonido termina abruptamente en condiciones de campo libre sin reverberación este se percibe con un decaimiento del orden de cientos de milisegundos causado por el fenómeno de post-enmascaramiento, pero en una sala con reverberación el post-enmascaramiento se ve afectado por el decaimiento de la respuesta de la sala. Otro de los propósitos del estudio es explorar modelos capaces de describir este fenómeno conjunto.

3.5 Interfaces interactivas para experimentos por estimación de magnitud

Estas interfaces representan en si un nuevo método que complementa los métodos existentes de experimentación en psicoacústica. A continuación se describen los métodos existentes y la interfaz interactiva con una aplicación enfocada al entrenamiento.

3.5.1 Método de estimación de magnitud

El método de estimación de magnitud, en el contexto de experimentos psicoacústicos, consiste en asignar un valor a un estímulo en función de una referencia. Usualmente se utilizan dos sonidos, a la referencia se le asigna un valor y el sujeto debe contestar cual es la relación con ese número del segundo sonido (Zwicker et al., 2007).

Muchas veces es de utilidad presentar más de un sonido de referencia, sobre todo si la relación entre el sonido en prueba y la referencia es extrema (por ejemplo el 5 % o el 95 %). Es muy común el uso de comparación pareada de estímulos y en el caso de usar más de una referencia la cantidad de pruebas crece en función del número de referencias.

La relación entre el estímulo, descrito físicamente, y la sensación de escucha percibida se estudia mediante los rangos de estímulo y sensación como así también nociones de umbral, razones e igualdad de sensación. La relación entre una escala de sensación y las mismas escalas de estímulo son no lineales.

La relación entre los parámetros físicos de nivel, frecuencia y duración de los estímulos pueden ser correlacionados con las sensaciones de escucha de sonoridad, frecuencia y duración subjetivas. Sin embargo es necesario mencionar que, si bien la frecuencia subjetiva de un tono puro está mayormente vinculada a la frecuencia del estímulo, también guarda relación con el nivel del estímulo. Además, sonidos fuera del rango de los 20 Hz a 20 kHz no son escuchados, fuere cual fuere el valor de los demás parámetros del estímulo.

En general un incremento Δe en un parámetro del estímulo puede no ser advertido si transformado en sensación de escucha no supera un incremento de Δs correspondiente al intervalo mínimo percibido sensorialmente, que se llamará umbral de diferenciación o simplemente umbral. Un ejemplo extremo del umbral es el umbral absoluto, que es aquel a partir del cual el estímulo es percibido.

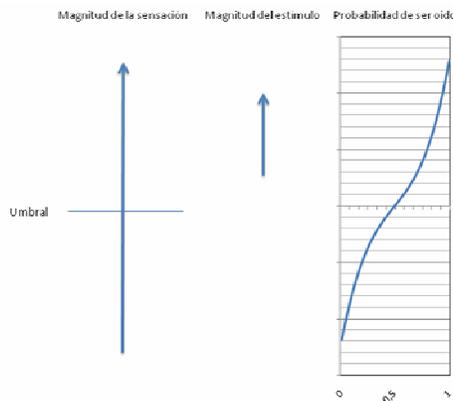


Figura 5. Determinación del umbral (corresponde al 50 % de observaciones escuchadas o al 50 % de las no escuchadas).

En la Figura 5 se puede observar que el umbral, ya sea absoluto o de un incremento, es un dato estadístico correspondiente a una probabilidad de 0,5 o decir que el 50% de las observaciones superaron dicho umbral. En general se puede decir que es más fácil para un sujeto identificar un umbral.

Un poco más complicado es asignar igualdad a un sonido. En la Figura 6 se explica el concepto por el cual el sujeto debe contestar si el sonido 2 es más sonoro, menos o igual que el primero. No se encuentra dificultad en asignar estos valores verbales. La curva de

probabilidad es un tanto más recta que la del caso anterior, aunque en las figuras ambas son esquemáticas.

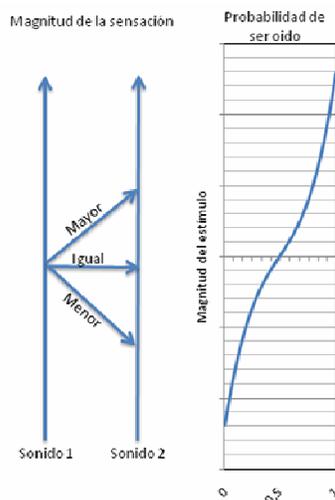


Figura 6: Determinación de la Igualdad de Sensación

Un poco más complicado aún es describir razones de sensación. En el esquema de la Figura 7 se da un ejemplo en el cual se puede apreciar que el valor de mitad también corresponde a una probabilidad de 0,5. El sonido 1 se fija a un valor de magnitud del estímulo y el segundo debe variarse hasta encontrar el valor que causa la sensación de haber disminuido a la mitad el sonido 2 referido al primero claro está.

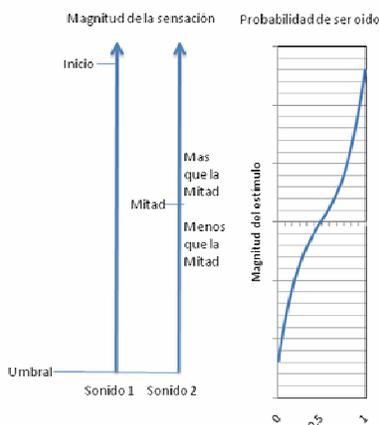


Figura 7. Determinación de la sensación de razón mitad de la referencia

Como las diferencias tanto entre distintos intentos en el mismo sujeto como entre distintos sujetos son variables entre cada intento, se utiliza el promedio de varios intentos para asignar un valor.

Datos interesantes para describir el valor son la media, los cuartiles y los promedios aritméticos y geométricos. Sin embargo se utiliza normalmente la media y los cuartiles ya que estos indicadores no son variables respecto a las transformaciones de la escala. Por ejemplo si la escala se transforma de razones de intensidad (I/I_0) a niveles de intensidad $10\log_{10}(I/I_0)$.

3.5.2 Interfaces interactivas

Algunas experiencias preliminares (Accolti et al., 2009b) reforzaron la observación de que el método de estimación de magnitud es bastante complicado para los sujetos. Por otra parte, en el mencionado trabajo se realizaron experimentos de estimación de igualdad los cuales no presentaron mayores inconvenientes para los sujetos pero condiciona los resultados en función de la cantidad de pruebas a realizar. A partir de esta dificultad se decidió usar 10 de sonidos de referencia y para sortear el problema de la cantidad de pruebas, que crecería proporcionalmente a este número, se desarrolló una interfaz interactiva que permite al usuario elegir con que sonido de referencia comparará el sonido en prueba (véase Figura 8).

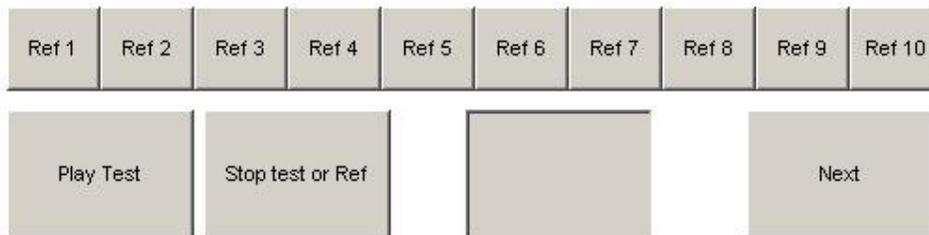


Figura 8. Plataforma interactiva

Los botones Ref1 hasta Ref10 reproducen sonidos con valores conocidos y equidistantes del parámetro en estudio. El botón Play Test reproduce el sonido en prueba. El sujeto debe introducir su estimación en el cuadro de texto y presionar el botón Next para pasar al siguiente sonido en prueba, previamente escuchando el sonido en prueba al menos una vez y las referencias elegidas la cantidad de veces que desee. Además, una vez cargados los sonidos en prueba, la interfaz los reproduce en una secuencia aleatoria que forma parte de los datos de salida junto a los valores estimados por el sujeto.

Es importante mencionar que se debe conocer previamente la relación entre los parámetros objetivos que varían entre cada uno de los sonidos de referencia y la respuesta subjetiva. También es necesario conocer los umbrales de diferenciación para evitar utilizar sonidos de referencia que sean percibidos como de igual magnitud.

Además esta interfaz se utilizó exitosamente como plataforma de entrenamiento utilizando sonidos de prueba con valores conocidos del parámetro estudiado (fuerza de fluctuación). En este entrenamiento se utilizaron tonos puros de 1 kHz modulados en amplitud con una moduladora de 4 Hz, usando diferentes índices de modulación en cada referencia.

Para lograr que los sonidos de referencia se encuentren equiespaciados en el parámetro psicoacústico, que en este caso fue la fuerza de fluctuación (FS), se implementó el modelo de Zwicker et al., 2007 para obtener la fuerza de fluctuación en función del índice de modulación desde 0,1 a 1 en pasos de 0,01. Luego se generó un vector con 10 valores de FS equiespaciados y se interpoló los índices de modulación usando splines obteniendo los valores que se muestran en la Figura 9.

Luego para los sonidos en prueba se utilizaron ruidos de banda ancha modulados en amplitud con FS conocido a partir del modelo de Zwicker. El entrenamiento consistió en un procedimiento similar al de experimentación salvo que se mostraba al sujeto el valor conocido después de realizada la estimación. El entrenamiento concluía cuando el sujeto decidía que el concepto de FS estaba claro.

En la Figura 10 se muestran los resultados del entrenamiento en términos del error relativo para cada sujeto (los sujetos se codificaron como AS, FE, JN, EX y EO) en función del orden secuencial en el cual se reprodujeron los sonidos en prueba. Al error absoluto

máximo se le asignó el valor del 100 %. Visualmente se puede constatar que el error va disminuyendo a medida que cada sujeto realiza más pruebas de entrenamiento.

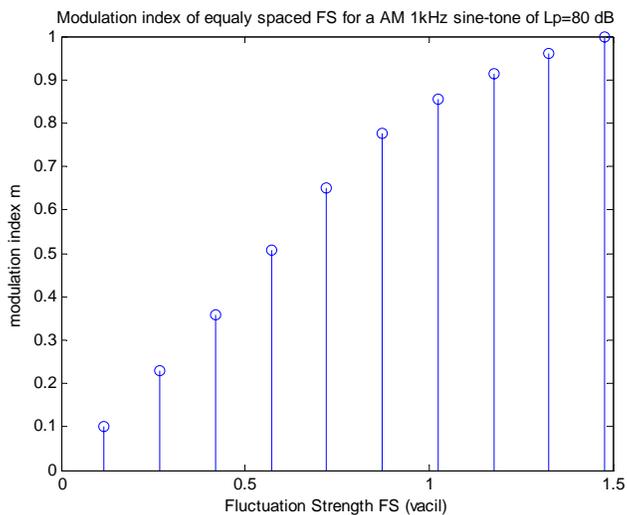


Figura 9. Sonidos de referencia

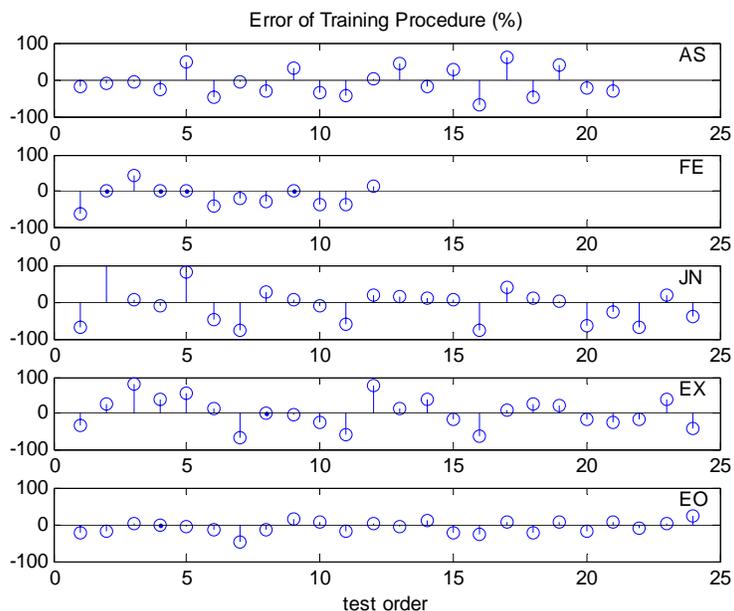


Figura 10. Resultados del entrenamiento en orden secuencial.

4 Conclusiones

Se logró diseñar un set de herramientas ad hoc al nuevo paradigma de investigación referido al estudio de la percepción, valoración y efectos en el ser humano en relación al contenido espectral y envolvente temporal del ruido. Este nuevo paradigma toma sus bases de paradigmas clásicos y trata de exponer nuevas aristas que se pueden explorar en la actualidad aprovechando los avances de la tecnología y los resultados obtenidos en los paradigmas clásicos. Además este nuevo paradigma se vincula y comparte no solo el carácter de actual

sino también elementos técnicos y metodológicos con otros paradigmas gestados recientemente como lo es el de paisaje sonoro.

Se reportan los datos de configuración y mejoramiento utilizados en las herramientas de análisis espectral y envolventes espectrales.

Se exponen algunas potencialidades de la aplicación del algoritmo de combinación controlada de sonidos. Esta es una herramienta fundamental para estudiar la respuesta subjetiva frente a sonidos ambientales con parámetros psicoacústicos globales (en el sentido poli-tímbrico) estimados objetivamente. La característica que diferencia este estudio con ruidos tomados de la realidad frente a estudios que se basan en ruidos es que no se deslinda del contenido semántico asociado a las fuentes sonoras. Otra potencialidad de este algoritmo, en un acercamiento al paradigma de paisaje sonoro, es la de estudiar la influencia de un sonido de determinada naturaleza en el contexto de un ruido ambiente formado por varios sonidos de diversa naturaleza.

En el marco de la simulación virtual de ruidos ambientales, se describe el modo en el cual se complementan los resultados de la calibración de auriculares audiométricos siguiendo un protocolo y de la simulación de respuestas impulsivas de salas mediante algoritmos rápidos pero realistas. El sistema de auralización se sigue mejorando en vías de incorporar los efectos asociados a la inmisión de sonidos externos en el interior de un recinto.

El desarrollo de las interfaces interactivas trae aparejado un nuevo método de experimentación en psicoacústica. Este nuevo método, al igual que otros, se nutre de diversos métodos pre-existentes como ser el de estimación de magnitud y el de comparación pareada, de hecho se podría llamar de estimación de magnitud por comparación libre con múltiples referencias. Se expone además otra aplicación interesante de estas interfaces que es su uso en entrenamiento psicoacústico. En psicoacústica suele tener mucha importancia, al momento de analizar los resultados, que los datos de experimentación sean sesgados a sujetos entrenados.

5 Agradecimientos

Al Ing. Ezequiel Mignini por sus observaciones.

NOTA: El presente trabajo es parte de un proyecto de investigación financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT - PICT N° 38109)

Referencias

- Accolti, Ernesto; Miyara, Federico (2008). "Combinación digital controlada de ruidos diversos" VI Congreso Iberoamericano de Acústica, FIA 2008, Pg. A090. Bs As, Argentina.
- Accolti, Ernesto; Miyara, Federico (2009). "Fast and controllable box-shaped room impulse response algorithm" XIII Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control RPIC 2009. Rosario, Argentina.
- Accolti, Ernesto; Miyara, Federico (2009b). "Fluctuation Strength of Mixed Fluctuating sound Sources" Mecánica Computacional Vol XXVIII, Pg. 9-22. ENIEF 2009. Tandil, Argentina.
- Accolti, Ernesto; Miyara, Federico; Mignini, Ezequiel (2009c). "Protocolo de calibración de auriculares audiométricos para su uso en investigación psicoacústica" Primeras Jornadas Regionales de Acústica AdAA 2009. Pg. A025 Rosario, Argentina.
- Algazi V. R., Duda R. O. y Thompson D. M. (2001). "The CIPIC HRTF database". IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, NY.

- ANSI S12.9-1996/Part 4 Quantities and Procedures for Description and Measurement of Environmental Sound - Part 4: Noise Assessment and Prediction of Long-Term Community Response
- Anweiler A., Verhey, J. (2006). "Spectral loudness summation for short and long signals as a function of level" *Journal of the Acoustical Society of America* Vol 119 (5).
- Beaman, P. (2005). "Auditory distraction from low-intensity noise: a review of the consequences for learning and workplace environments" *Applied Cognitive Psychology*, Vol. 19, Pg. 1041 – 1064.
- Berglund, B., Hassmén, P., Soames R. F. (1996). "Sources and effects of low-frequency noise" *Journal of the Acoustic Society of America*, Vol 99 (5), Pg. 2985-3002.
- Blauert, J., Jekosch, U. (1997). "Sound-Quality Evaluation-A Multilayered Problem" *Acústica*, Vol. 83, Pg. 747-753.
- Botteldooren, D., De Coensel, B., De Muer, T. (2006). "The temporal structure of urban soundscapes" *Journal of Sound and Vibration* 292 Pg. 105–123
- Brown A., Van Kamp, I. (2009). "Response to a change in transport noise exposure: Competing explanations of change effects" *Journal of the Acoustic Society of America* Vol. 125.
- Brown A., Van Kamp, I. (2009b). "Response to a change in transport noise exposure: A review of evidence of a change effect" *Journal of the Acoustic Society of America* Vol. 125.
- Cabanellas S., Pasch V., Yanitelli M., & Miyara F. (2006). "Estudio exploratorio de algunos parámetros perceptivos del ruido vinculados al contenido semántico". FIA 2006. Santiago, Chile.
- Cabrera, D., Ferguson, S., Schubert, E., (2007). "Psysound3: Software for acoustical and psychoacoustical analysis of sound recordings" *Proceedings of the 13th International Conference on Auditory Display, Montréal, Canada.*
- Chalupper, J. (2000). "Modellierung der Lautstärkeschwankung für Normal- und Schwerhörige" *Tagungsband DAGA 2000.*
- Chalupper, J., Fastl, H. (2002). "Dynamic loudness model (DLM) for normal and hearing-impaired listeners" *Acustica united with Acta Acustica*, Vol 88. Pg. 378-386.
- Fastl, Hugo. (2001) "Neutralizing the meaning of sound for sound quality evaluations" 17th International Congress on Acoustics, Rome.
- Fidell, S., Barber, D., Schultz, T. (1991). "Updating a Dosage-effect Relationship for the Prevalence of Annoyance due to General Transportation Noise " *Journal of the Acoustic Society of America* Vol 88, Pg. 221-233.
- Fields, James M. (2001). "An Updated Catalog of 521 Social Surveys of Residents' Reactions to Environmental Noise (1943-2000)" *Wyle Laboratories, El Segundo, California. NASA/CR-211257.*
- Furukawa, T., Takehira, O., Nagamiya, M., Kuwano, S., Namba, S., Fastl H. (2008). "Comparison of subjective impression of copy machine noise between Japanese, American and German participants" *Proc. Acoustics 08, Paris, France*, pp. 1175–1180. Abstract: *JASA* Vol. 123, No. 5, Pt 2, p. 3160, 2008. 29.06.-04.07.
- Guastavino, C (2006). "The Ideal Urban Soundscape: Investigating the Sound Quality of French Cities" *Acta Acustica united with Acustica* Vol. 92 Pg. 945 – 951.
- Hastings, A., Davies P. and Takata, H. (2001). "Effects of Modulation on the Quality of Diesel Engine Noise" *Proceedings of the 17th International Congress of Acoustics ICA 2001, Rome.*
- Jekosch, U., Blauert, J. (1996). "A semiotic approach toward product sound quality" *Internoise 1996.*
- Kuwano, S., Namba, S., Kato, T., Hellbrück, J. (2003). "Memory of the loudness of sounds in relation to overall impression" *Acoust. Sci. & Tech.* 24, 4.
- Maffei, Luigi. (2008). "Urban and quiet areas soundscape preservation" *Conferencia Plenaria. VI Congreso Iberoamericano de Acústica, FIA 2008, Pg. CP1, Bs As.*
- Marengo Rodriguez, F. A., Miyara, F., (2008) "Caracterización de ruido vehicular por supresión del efecto Doppler" *VI Congreso Iberoamericano de Acústica FIA 2008, A034, Buenos Aires, Argentina.*

- Marengo Rodriguez, F. A., F., Miyara, F., (2009) "Design and implementation of a doppler removal method for parameters extraction and aural simulation of traffic noise" *Mecánica Computacional Vol XXVIII*, pg. 89-100. ENIEF 2009. Tandil, Argentina.
- Marengo Rodriguez, F. A., Miyara, F., (2009b) "Parameters extraction and aural simulation of traffic noise by means of a novel Doppler removal method" XIII Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control, RPIC 2009, Rosario, Argentina.
- Miedema, H., Vos, H. (1998). "Exposure-response relations for transportation noise" *Journal of the Acoustic Society of America Vol 104*(6).
- Miyara, F., Cabanellas, S., Mosconi, P., Pasch, V., Yanitelli, M., Vazquez, J., (2003). "Aural simulation of the effect of façades on vehicle noise" *SePaViAm*, Buenos Aires, Argentina.
- Miyara, F., Cabanellas, M., Pasch, V., Yanitelli, S., Accolti, E.; Miechi, P. (2009). "Contrastación de algoritmos de análisis de espectro sonoro con un instrumento normalizado" *Primeras Jornadas Regionales de Acústica AdAA 2009*. Pg. A032. Rosario, Argentina.
- Miedema H., Vos H. (2004). "Noise annoyance from stationary sources: Relationships with exposure metric day--evening--night level (DENL) and their confidence intervals" *Journal of the Acoustic Society of America Vol. 116*.
- Miedema H. (2007). "Annoyance Caused by Environmental Noise: Elements for Evidence-Based Noise Policies" *Journal of Social Issues*, Vol. 63, No. 1, Pg. 41-57.
- Miralles, J., Garrigues, J., Giménez, A., Romero, J., Navasquillo, J., Cerdá, S (2005). "Medida de la calidad sonora en función de la duración" *Tecniacústica-Terrassa*, Vol. 5, Pg. 1-5,
- Mitra, Sanjit (1998). "Digital signal processing: A computer based approach" McGraw Hill.
- Moorhouse, A., Waddington, D., Adams, M. (2005). "Proposed criteria for the assessment of low frequency noise disturbance" *Acoustics Research Centre, Salford University, Inglaterra*.
- Raimbault, M. y Dubois, D. (2005). "Urban soundscapes: Experiences and knowledge" *Cities*, Vol. 22, No. 5, Pg. 339–350. Elsevier.
- Ries D., Schlauch, R., DiGiovanni, J. (2008). "The role of temporal-masking patterns in the determination of subjective duration and loudness for ramped and damped sounds" *Journal of the Acoustical Society of America Vol. 124* (6).
- Sato, S., You, J., Yong J. (2007). "Sound quality characteristics of refrigerator noise in real living environments with relation to psychoacoustical and autocorrelation function parameters" *Journal of the Acoustic Society of America Vol 122*(1), Pg. 314-325.
- Schöll, H. (1962). "On production of absolute threshold and masked threshold of impulses" *Acústica*, Vol 12 Pg. 91-101.
- Schomer, P. (1997). "Evaluation of a re-analysis of the relationship between the results obtained in laboratory and field studies on the annoyance caused by high-energy impulsive sounds" *Noise Control Engineering Journal*, Vol. 45 (6), Pg. 251-255.
- Schultz, T. (1978). "Synthesis of social surveys on noise annoyance" *Journal of the Acoustic Society of America Vol 64*(2).
- Stassen K., Collier P., Torfs R. (2008). "Environmental burden of disease due to transportation noise in Flanders (Belgium)" *Transportation Research Part D* 13 Pg. 355–358.
- Van Kempen, E., Van Kamp, I., Stellato R., et al. (2009). "Children's annoyance reactions to aircraft and road traffic noise" *Journal of the Acoustic Society of America Vol. 125* (2), Pg. 895-904.
- Wang, Y. (2009). "Sound quality estimation for non-stationary vehicle noises based on discrete wavelet transform" *Journal of Sound and Vibration Vol 324* Pg. 1124–1140.
- Zwicker, E.; Fastl, H. (2007). "Psychoacoustics. Facts and Models" Springer. Berlin Heidelberg.