



VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008
Buenos Aires, 5, 6 y 7 de noviembre de 2008

FIA2008-A090

Combinación digital controlada de ruidos diversos

Ernesto E. Accolti^(a)
Federico Miyara^(b)

Laboratorio de Acústica y Electroacústica, Facultad de Electrónica, Universidad Nacional de Rosario. Riobamba 245 bis, Rosario, Argentina.

(a) E-mail: eaccolti@fceia.unr.edu.ar

(b) E-mail: fmiyara@fceia.unr.edu.ar

Abstract

Algorithms are developed for digital combination of noises from sounds belonging to diverse corpuses classified by their spectrum and envelope. These algorithms try to achieve a realistic noise with controlled octave bands, third of octave or critical bands spectrum and envelope properties, as a tool for further researches. There are presented tests with synthetic noises and recorded real sounds. These algorithms form a part of the set of instruments for the experimental design on the effects of noise in the human being researching depending on frequency and temporary components of noises.

Resumen

Se desarrollaron algoritmos para la combinación digital de ruidos provenientes de ruidos pertenecientes a diversos corpus clasificados por su espectro y envolventes. Los algoritmos pretenden lograr un ruido realista de espectro y propiedades de envolventes controlados por bandas de octava, tercio de octava o bandas críticas, como base para investigación. Se presentan pruebas con ruidos sintéticos y sonidos reales grabados. Estos algoritmos forman parte del instrumental para el diseño experimental de la investigación de los efectos del ruido en el ser humano en función de las componentes de frecuencia y temporales del ruido.

1 Introducción

En la actualidad, y desde hace varias décadas, los efectos del ruido en el ser humano se investigan utilizando ya sea sonidos sintéticos o naturales con escasos parámetros de control, tanto en ambientes de laboratorio como en ambientes naturales no controlados. Se pueden citar en el primer caso los estudios realizados sobre la percepción y efectos cognitivos del ruido (Brambilla, Carretti, & Santoboni, 1988; Kjellberg & Wide, 1988) y en el segundo los estudios del riesgo de daño auditivo inducido por ruido (US-EPA, 1974; ISO 1999, 1990) y los estudios de efectos del ruido comunitario en función de diversos índices relacionados con el nivel de ruido de inmisión (Schultz, 1978; Fidell, Barber & Schultz, 1991; Miedema & Vos, 1988).

Si bien todos estos trabajos han permitido extender el conocimiento en el tema, una herramienta interesante para continuar en esta dirección sería contar con sonidos realistas, utilizables en campo y laboratorio, en los cuales tanto su espectro como sus evoluciones temporales pudieran ser controladas lo más posible con realismo. Con el estado actual de la tecnología electroacústica, bastaría con los sonidos deseados registrados en forma digital para reproducirlos en laboratorio o campo, tomando en cuenta la influencia del medio.

Este trabajo propone un algoritmo para combinar digitalmente diversos sonidos individuales generando así sonidos realistas de espectro controlado, ya sea de bandas de octava, de tercio de octava o críticas. En lo concerniente a la evolución temporal sólo nos proponemos lograr ruidos relativamente estacionarios.

2 Formulación del Problema

El problema consiste en combinar temporalmente sonidos individuales, provenientes de un banco de registros digitales de fuentes sonoras diversas, de tal modo que el contenido de frecuencias del sonido generado corresponda al especificado por el usuario.

El problema, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia se plantea como un sistema de ecuaciones lineales. En el dominio del tiempo, llamando $p_{i,j}(t)$ a la presión sonora en el instante t de la banda de frecuencia i del sonido individual j ; x_j al cuadrado del factor por el cual se debe multiplicar cada sonido j para que la combinación en la banda de frecuencias i tenga un valor final $p_{di}(t)$ se puede representar el problema según la ecuación (1).

$$\begin{aligned}
 p_{11}(t) \sqrt{x_1} + p_{12}(t) \sqrt{x_2} + \dots + p_{1M}(t) \sqrt{x_M} &= p_{d_1}(t) \\
 p_{21}(t) \sqrt{x_1} + p_{22}(t) \sqrt{x_2} + \dots + p_{2;M}(t) \sqrt{x_M} &= p_{d_2}(t) \\
 &\vdots \\
 p_{N1}(t) \sqrt{x_1} + p_{N;2}(t) \sqrt{x_2} + \dots + p_{N;M}(t) \sqrt{x_M} &= p_{d_N}(t)
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$x_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, M$$

El usuario ingresa los niveles sonoros por bandas de frecuencia y la duración final del sonido, con estos datos el problema se simplifica buscando el valor de x en el dominio de las bandas de frecuencia. Si bien el usuario ingresa las especificaciones como niveles de presión sonora L_p , la variable interna de trabajo del algoritmo es proporcional a la presión cuadrática media P^2 en cada una de las bandas de frecuencia, donde $P^2 = P_{ref}^2 \cdot 10^{L_p/10}$. A efectos de definir el problema en el dominio frecuencial, se analizan previamente los sonidos individuales

guardando su evolución temporal (a una tasa de muestreo acorde a su contenido en frecuencias), la presión cuadrática media en cada una de las bandas de frecuencia, su duración y una constante que relaciona el nivel de calibración con la codificación utilizada en el registro.

Luego, es posible reformular el problema en términos proporcionales a la energía de cada banda de frecuencias. Para ello llamamos A_{ij} a la presión sonora cuadrática media de la banda i multiplicada por la duración t_j del sonido j y d_i a la presión sonora cuadrática media deseada de la banda i multiplicada por el tiempo deseado final t_f .

$$\begin{aligned} A_{11} x_1 + A_{12} x_2 + \dots + A_{1M} x_M &= d_1 \\ A_{21} x_1 + A_{22} x_2 + \dots + A_{2M} x_M &= d_2 \\ &\vdots \\ A_{N1} x_1 + A_{N2} x_2 + \dots + A_{NM} x_M &= d_N \end{aligned}, \quad x_j \geq 0 \quad (2)$$

Este sistema de ecuaciones lineales se puede expresar en notación matricial de la siguiente manera:

$$A_{N \times M} x_{M \times 1} = d_N, \quad x_j \geq 0 \quad (3)$$

donde d es un vector columna de N filas que contiene la presión cuadrática deseada en las diversas bandas multiplicada por la duración deseada, en adelante llamada *energía objetivo* por ser proporcional a la energía total de cada banda del sonido deseado. La matriz A contiene en cada columna la presión cuadrática de cada uno de los M sonidos individuales multiplicada por la duración del sonido y desglosada en filas por cada una de las N bandas de frecuencia. El vector solución x contiene el factor por el cual debería ponderarse la energía sonora de cada sonido individual para satisfacer esta ecuación. Todos los elementos de la matriz y los vectores son positivos.

Esto será posible en tanto se respeten algunos supuestos detallados a continuación.

Para poder trasladar el problema a datos simples como lo son las energías sonoras de cada sonido en las diferentes bandas (en contraposición con las complejas evoluciones temporales de éstos), se deberá suponer, al establecer la combinación lineal de dos o más sonidos, que éstos son incoherentes entre sí. Tal supuesto es relativamente cierto en tanto no se utilicen sonidos con alto contenido tonal en frecuencias similares y en el caso que nos interesa estudiar esto se da pocas veces.

Un segundo supuesto es que los sonidos individuales son lo suficientemente estacionarios como para ser representados correctamente por promedios energéticos de la transformada de Fourier discreta de 4096 puntos sin solapamiento. Las características de la transformada rápida se fijan en esos valores por varios motivos, pero, como es sabido, mejorar la resolución temporal implica disminuir la resolución en frecuencia y viceversa. Es por esto que tal supuesto no se cumple siempre. El uso de ciertas técnicas, utilizadas para otros propósitos del trabajo, tiene el beneficio adicional de mejorar la robustez del modelo frente al no cumplimiento de este supuesto.

Al realizar las primeras pruebas con un pequeño banco de sonidos individuales, se observó que los sonidos generados presentaban una fluctuación muy importante, lo cual agrega una arista más a la formulación del problema: lograr que el sonido final sea más estacionario que el resultante de la simple solución de la ecuación (3).

Por otra parte, que la dimensión del vector solución sea $M \times 1$ significa que la cantidad de sonidos a combinar será igual al de la cantidad de bandas de frecuencia en las que el usuario especificó la energía objetivo, pudiendo además ser nulos los pesos de algunos de estos sonidos. Esta restricción se debe al planteo matemático del problema, pero no se relaciona con la perspectiva verdadera del problema. Esta condición no es necesaria esta e inclusive puede ser contraproducente, ya que para obtener un ruido realista en general es deseable combinar mayor cantidad de sonidos.

3 Metodología y técnicas empleadas

En esta sección se describen no sólo los métodos empleados, los cuales son conocidos, sino también algunas técnicas introducidas para lograr un mayor realismo y evitar anomalías en los sonidos finalmente combinados.

3.1 Solución del sistema lineal

La solución de este sistema lineal planteado en la ecuación (3), que tiene más ecuaciones que incógnitas, se realiza mediante el método de los mínimos cuadrados (Lawson & Hanson, 1995), algoritmo por el cual se minimiza la norma expresada en la ecuación (4).

$$\|A_{N \times M} x_{M \times 1} - d_N\|, \quad x_j \geq 0 \quad (4)$$

Además el método garantiza que la solución encontrada es aquella en la que menos cantidad de elementos x_j no nulos intervienen.

3.2 Análisis y almacenamiento de datos de los sonidos individuales

Para poder realizar la combinación se parte de un banco de sonidos proveniente de diversas fuentes (grabaciones propias y ajenas). Los sonidos individuales del banco se almacenan en formato WAV con diversas tasas de muestreo según su contenido espectral en un directorio designado para tal fin.

A efectos de poder trabajar directamente con el espectro se realiza un análisis de espectro por bandas de octava, tercio de octava y críticas. Esta operación consume tiempo, razón por la cual se optó por realizarla una sola vez y almacenar la información resultante de dicho análisis en una biblioteca que contiene los datos espectrales de todos los archivos del banco de sonidos para uso futuro. Se ha denominado a este proceso *importación*.

3.2.1 Análisis espectral

Edición de los sonidos

En esta primera etapa del trabajo, todos los archivos que se recopilaron en formato estereofónico se convierten a mono sumando ambos canales. Además se truncan temporalmente los archivos de tal modo que la cantidad de muestras total sea múltiplo de un cuadro de análisis, definido más adelante, para no introducir muestras sin analizar ni información no contenida en el sonido original. Una vez realizados los truncamientos se aplica una envolvente de amplitud inicial y final de duración menor a 3 ms, alcanzando amplitudes nulas en los extremos (fade-in y fade-out), para evitar efectos no deseados. Una vez realizada esta edición, se procede a analizar los sonidos.

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 (5).

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

$$v_0 = \frac{1-\alpha}{2}; \quad v_1 = \frac{1}{2}; \quad v_2 = \frac{\alpha}{2}; \quad (5)$$

$$\alpha = 0,16$$

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 (6).

$$FFT(m) = \sum_{k=0}^{n-1} a_k e^{-\frac{2\pi i}{N}mk}, \quad m = 0, \dots, N-1 \quad (6)$$

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 (7)

$$f_m = \frac{F_s}{N} m \quad (7)$$

de donde se puede deducir que la resolución será F_s/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 sola transformada para la señal submuestreada. Finalmente se promedian todos los cuadros de análisis, o porciones sucesivas, en los cuales se dividió el sonido.

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 (7). 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 (8) (Zwicker, 2007),

$$z = 13 \operatorname{atan}(0,00076f) + 3,5 \operatorname{atan}((f/7500)^2) \quad (8)$$

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} .

3.2.2 Calibración

Dado que los archivos de audio se codifican en forma discreta en amplitud, es muy importante poder aprovechar el rango dinámico implícito en dicha codificación. Para implementar los algoritmos de este trabajo se utilizó una recodificación de punto flotante entre 1 y -1 independientemente de la cantidad de bits usados para la discretización en amplitud del sonido. Todos los sonidos editados en el algoritmo, ya sea combinados o convertidos de estereofónicos a monofónicos, que superan el rango de trabajo $[1, -1]$ en alguna de sus muestras, se escalan introduciendo una modificación en su calibración según el factor por el cual se escalaron todas sus muestras.

3.2.3 Otros datos almacenados

Finalmente, para no tener que acceder a todos los archivos durante el cálculo de la combinación que satisface las condiciones deseadas, se guardan en la misma biblioteca los valores de tasa de muestreo, cantidad de muestras, cantidad de canales y, en caso de estar disponibles, información respecto a la naturaleza del sonido para emplear en trabajos futuros.

3.3 Control de la fluctuación del sonido generado

Como se planteó al formular el problema, los sonidos generados simplemente bajo las condiciones matemáticas planteadas resultan en sonidos combinados con un alto contenido de fluctuación. Para lograr atenuar este efecto se utilizan dos técnicas, bajo la restricción de que el sonido combinado sea realista. La primera es repetir los sonidos individuales de corta duración en comparación con la duración del sonido combinado y la segunda es la inclusión de mayor cantidad de sonidos frente a la cantidad resultante de la solución de la ecuación (3).

3.3.1 Repetición de los sonidos individuales

Con el fin de generar sonidos más estacionarios, se genera un patrón de repetición para cada sonido antes de definir la matriz A . De esa manera, se modifica la matriz para incluir este efecto. Para obtener una impresión realista se utilizan cantidades aleatorias de repeticiones y de inicio de cada repetición dentro del espacio temporal, del sonido combinado, definido previamente por el usuario.

Para evitar la coherencia entre las repeticiones de cada archivo, lo cual restaría validez a la superposición de energías, se restringe la cantidad y tiempo de inicio de las repeticiones de modo que el inicio de una repetición siempre es posterior al final de su precedente.

Auditivamente, si los sonidos repetidos están lo suficientemente espaciados en el tiempo, no se perciben como repetición, sobre todo si simultáneamente hay otros sonidos.

Este fenómeno sí se percibe en sonidos cortos a los cuales se les asignó una cantidad muy alta de repeticiones. Por ese motivo la cantidad máxima de repeticiones de sonidos con duraciones menores a cierto valor límite τ , y su separación mínima se igualaron a los valores devenidos para un sonido hipotético de duración τ . El valor de τ se fijó en 20 s en forma experimental.

Además el patrón temporal de repeticiones y la cantidad de repeticiones de cada archivo en la matriz A responden a sendos algoritmos de aleatorización con distribución uniforme. Dicho en otras palabras, tanto la cantidad de repeticiones como el retardo del inicio de cada repetición pueden tomar cualquier valor, con la misma probabilidad, dentro de los valores mínimos y máximos prefijados.

Para implementar esta técnica, se debe multiplicar cada columna de la matriz A de la ecuación (3) por la cantidad de repeticiones que fue asignada al sonido j . Esto admite la interpretación física de que la duración del sonido, o su energía, fue incrementada en un factor igual a la cantidad de repeticiones.

3.3.2 Modificaciones para incluir mayor cantidad de sonidos

Al contar con un gran banco de sonidos, el cual se pretende seguir ampliando a medida que se alcancen nuevos objetivos con el presente trabajo, el sistema de la ecuación (3) tiene muchas más ecuaciones que incógnitas, admitiendo más de una solución dentro de la hipercaña V que engendran los vectores de la matriz A (llamamos *hipercaña* al conjunto de todas las combinaciones lineales con coeficientes ≥ 0). En los casos en que la energía objetivo no se encuentre dentro de dicha hipercaña V , el método de los mínimos cuadrados estima el vector más cercano al de energía objetivo, dentro de V .

La técnica empleada para incluir mayor cantidad de sonidos se implementa buscando una nueva solución para la ecuación (3) eliminando de la matriz A las columnas correspondientes a los sonidos ya empleados en la solución anterior. Se repite este proceso en una cantidad que pasa a ser uno de los parámetros de control de la fluctuación. Finalmente se promedian energéticamente todos los vectores solución obtenidos. En adelante se llamará a este proceso *VariSon*.

4 Presentación de resultados

4.1 Análisis espectral

En la Figura 1, se presentan los resultados del análisis espectral para uno de los sonidos pertenecientes al banco, en este caso el evento sonoro corresponde al sonido provocado por un ciclomotor al pasar por una calle poco transitada. Se muestran los niveles sonoros en dB para dos transformadas discretas de Fourier del sonido con ventana Blackman de 4096 muestras a una tasa de muestreo de 44100 Hz (línea verde) la primera y 1378 Hz (línea púrpura) la segunda. También los niveles por bandas de octava (rombos azules) y tercio de octava (cuadros bordó).

Todos estos niveles fueron comparados con los softwares comerciales Cool Edit Pro y Spectralab, no encontrando diferencias significativas.

4.2 Control de la fluctuación

4.2.1 Repetición de los sonidos individuales

En cada fila de la Figura 2 se presenta la evolución temporal del patrón de repeticiones de cada sonido utilizado para la combinación presentada en la última fila de la figura. Estos sonidos están ponderados además por el peso que les corresponde en tal combinación.

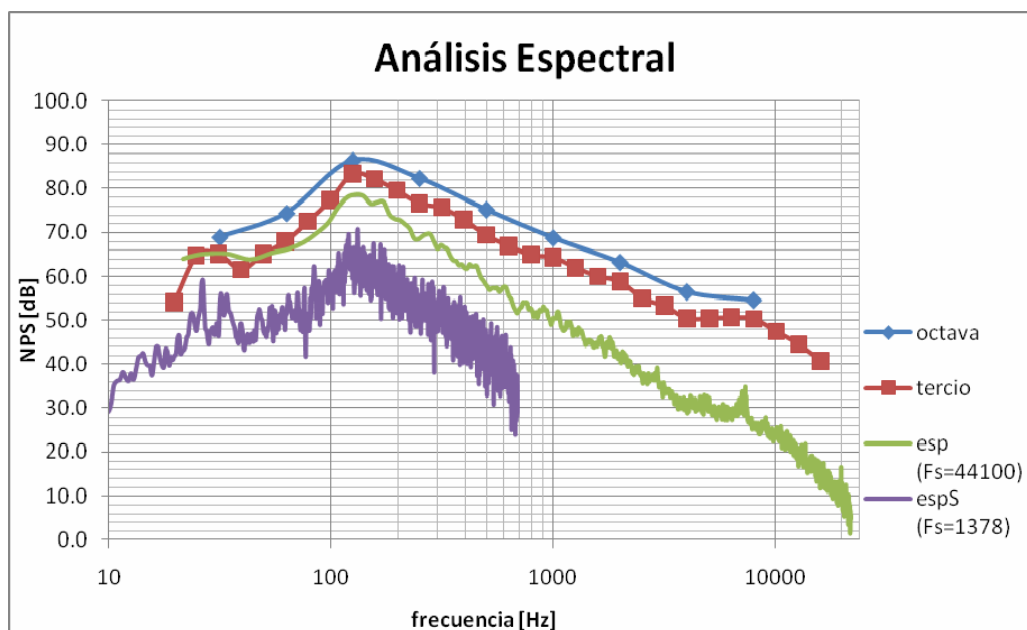


Figura 1. Análisis espectral de un sonido individual correspondiente a un ciclomotor en calle poco transitada.

4.2.2 Modificaciones para incluir mayor cantidad de sonidos (VariSon)

Se experimentó un primer prototipo de combinación digital para dos espectros deseados variando el parámetro *VariSon* (cantidad de soluciones diferentes a combinar). Los niveles deseados de esos espectros por bandas de octava pueden verse en la Tabla 1.

Tabla 1. Niveles Sonoros de las pruebas P1 y P2 por bandas de octava.

| f [kHz] | 0,32 | 0,63 | 0,125 | 0,25 | 0,5 | 1 | 2 | 4 | 8 |
|-----------|------|------|-------|------|-----|----|----|----|----|
| P1 [dB] | 77 | 80 | 83 | 86 | 89 | 92 | 95 | 92 | 89 |
| P2 [dB] | 86 | 89 | 92 | 95 | 92 | 89 | 86 | 83 | 80 |

Los resultados de esta prueba se presentan en las figuras 3 a 5. En la Figura 3 el parámetro *VariSon*, se fijó en la unidad, en la Figura 4 su valor fue *VariSon* = 4 y, finalmente, en la Figura 5, *VariSon* = 12.

A partir de estos valores se pueden observar dos consecuencias dadas por la variación del parámetro *VariSon*, la primera es que los niveles estimados por el algoritmo de mínimos cuadrados se alejan de los niveles deseados en la medida que la cantidad de iteraciones del proceso *VariSon* aumenta y la segunda es que los niveles calculados, una vez combinados los sonidos, se asemejan más a los niveles estimados en la medida que *VariSon* aumenta.

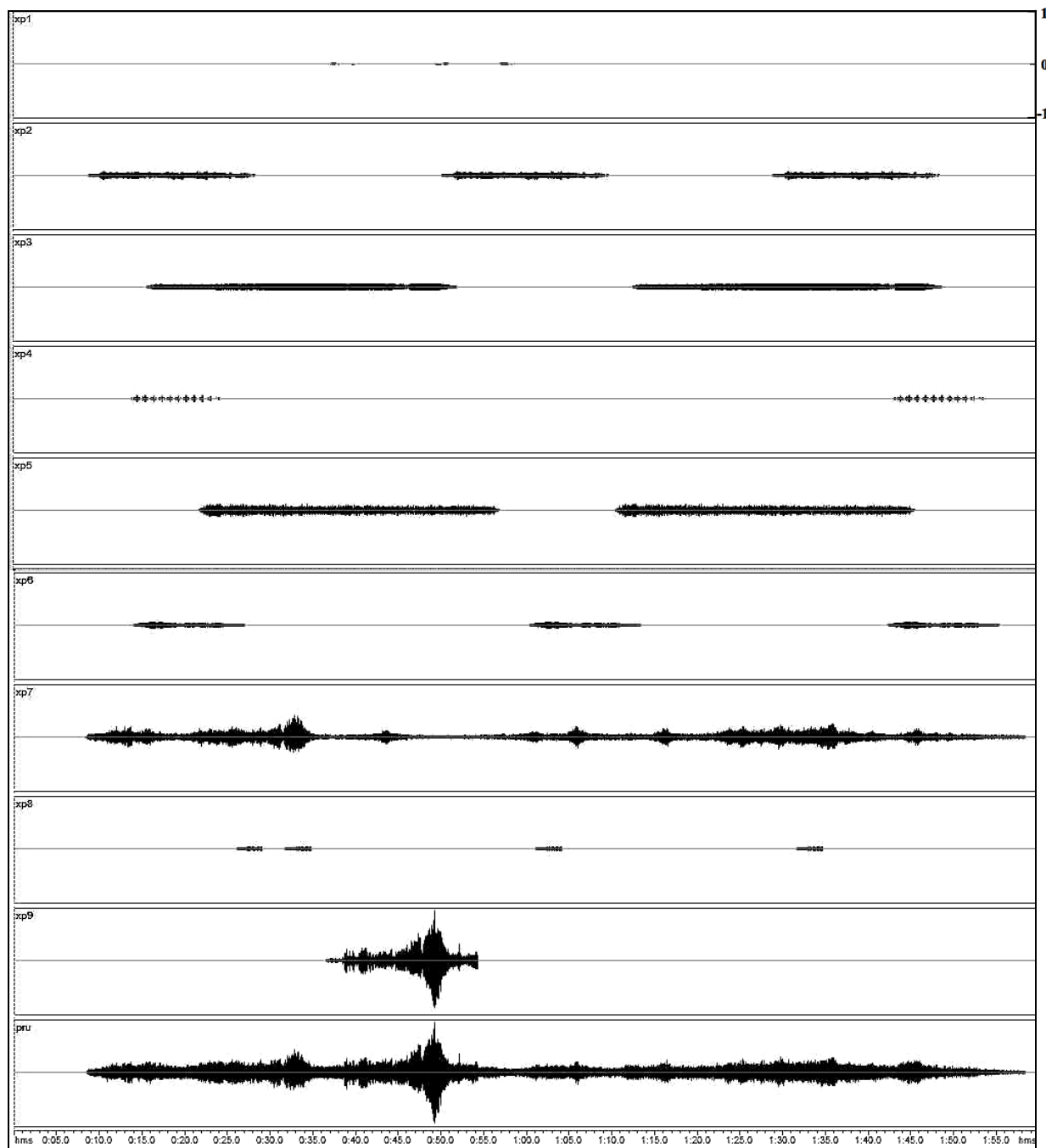


Figura 2. Patrón de repetición de cada archivo xp_i usado en la combinación del sonido pru . En unidades codificadas proporcionales a la presión sonora en función del tiempo [min:s]

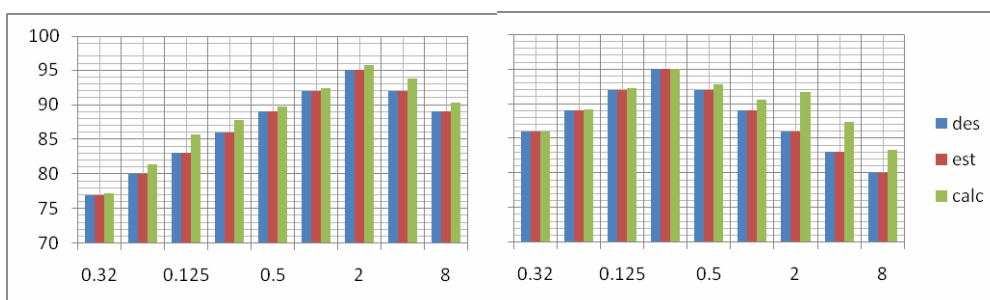


Figura 3. Niveles estimados mediante el método de los mínimos cuadrados (est) y calculados después de combinar digitalmente los sonidos (calc) para los niveles deseados (des) de. Prueba 1 (izq) y Prueba 2 (der). Parámetro *VariSon* = 1.

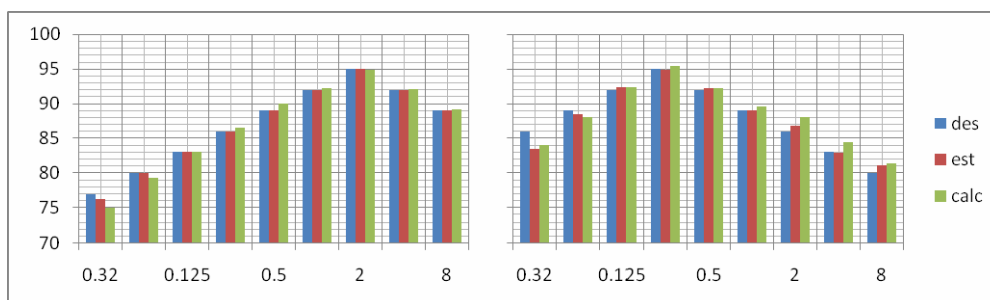


Figura 4. Niveles estimados mediante el método de los mínimos cuadrados (est) y calculados después de combinar digitalmente los sonidos (calc) para los niveles deseados (des) de. Prueba 1 (izq) y Prueba 2 (der). Parámetro *VariSon* = 4.

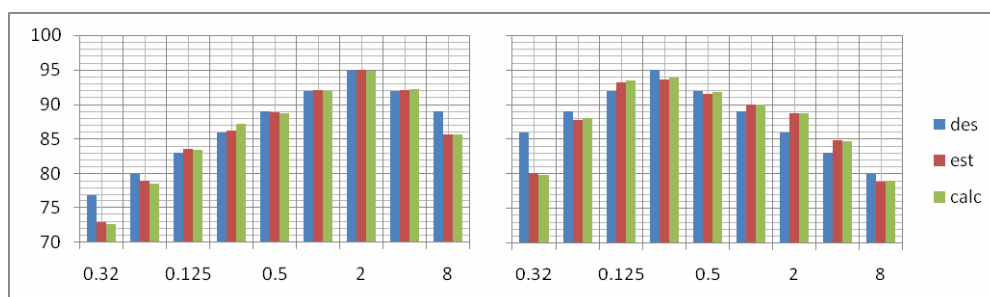


Figura 5. Niveles estimados mediante el método de los mínimos cuadrados (est) y calculados después de combinar digitalmente los sonidos (calc) para los niveles deseados (des) de Prueba 1 (izq) y Prueba 2 (der). Parámetro *VariSon* = 12.

En la figura 6 se presenta la evolución temporal del sonido combinado para los parámetros de la prueba 1 con el parámetro *VariSon* = 12.

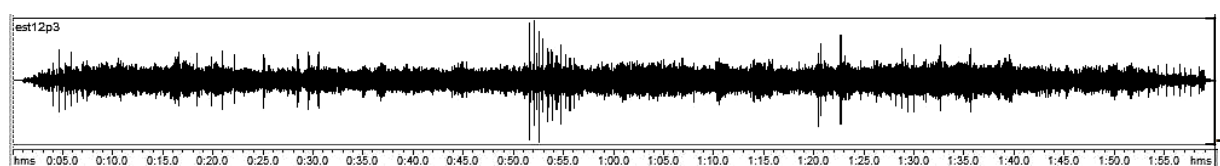


Figura 6. Evolución temporal de la Prueba 1. En unidades codificadas proporcionales a la presión sonora en función del tiempo [min:s]

En esta figura, en comparación con la última fila de la Figura 2 en el cual $VariSon = 1$, se puede apreciar que un subproducto beneficioso de aumentar las repeticiones de $VariSon$ es lograr sonidos combinados más estacionarios.

Otro dato analizado paralelamente en esta experiencia fue el valor de la norma de la ecuación (4) para cada repetición de $VariSon$. En la prueba P1 la norma fue despreciable sólo en las 2 primeras iteraciones del proceso $VariSon$ y en la prueba P2 sólo en la primera. Este hecho se puede apreciar en el experimento para $VariSon = 1$, en la Figura 3, donde los niveles estimados y deseados son idénticos con una resolución de 0,1 dB, no así en la Figura 4 y la Figura 5 ($VariSon = 4$ y $VariSon = 12$ respectivamente) donde se aprecian diferencias importantes entre tales valores. Estas diferencias pueden atribuirse al hecho de que las últimas iteraciones de $VariSon$ estimaron, dentro del espacio engendrado por los sonidos individuales que participan en cada iteración, los valores más próximos a los valores deseados.

4.3 Combinación

Para verificar el funcionamiento correcto del algoritmo se realizó una combinación con un banco de sonidos conocido para generar un sonido de espectro frecuentemente usado y conocido. El banco en este caso fue similar a una base compuesta por 9 sonidos con ruido rosa de 45 s de duración filtrados por bandas de octava correspondientes a las centradas entre 31,5 Hz y 8000 Hz. Los resultados se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Niveles sonoros objetivo, estimado y calculado.

| f_{central} [Hz] | 31.5 | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
|------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Lp_{objetivo} [dB] | 89.0 | 92.0 | 95.0 | 92.0 | 89.0 | 86.0 | 83.0 | 80.0 | 77.0 |
| Lp_{estimado} [dB] | 89.0 | 92.0 | 95.0 | 92.0 | 89.0 | 86.0 | 83.0 | 80.0 | 77.0 |
| $Lp_{\text{calculado}}$ [dB] | 88.8 | 92.2 | 95.1 | 92 | 89 | 86 | 83 | 80 | 77.1 |
| $Lp_{\text{calculado}} - Lp_{\text{estimado}}$ | -0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 |

Para cada frecuencia central de las bandas de octava utilizadas se muestran los niveles objetivo (Lp_{objetivo}) ingresados por el usuario, los niveles estimados (Lp_{estimado}) al resolver la Ecuación (3), los calculados ($Lp_{\text{calculado}}$) al analizar por bandas de octava el archivo generado y finalmente la diferencia entre $Lp_{\text{calculado}}$ y Lp_{estimado} . En este caso la norma de la ecuación (4) se minimizó a un valor de $2,4 \times 10^{-9}$; valor proporcional a la amplitud de la señal al cuadrado, el cual es despreciable frente a la resolución de amplitud dada por la codificación en 16 [bits] empleada para los archivos combinados. Cumpliendo la hipótesis de partida, por estar la estimación de la solución enmarcada dentro del espacio que engendra el banco, la estimación coincide con el objetivo al menos con una precisión de 0,1 dB para cada banda de octava. Las pequeñas diferencias $Lp_{\text{calculado}} - Lp_{\text{estimado}}$ se deben al no cumplimiento de los supuestos antes mencionados. Cumplir con los supuestos es una tarea que tiene un alto costo computacional, no justificado por las diferencias obtenidas empíricamente.

En la Tabla 3 se presenta la cantidad de repeticiones de cada sonido, correspondiente al ruido tratado por el filtro de octava centrado en la frecuencia que se indica para cada columna, y la proporción relativa de amplitud o peso relativo que se aplicó a cada sonido.

Tabla 3. Cantidad de repeticiones y proporción de amplitud ruido generado mediante la combinación temporal de ruidos filtrados por bandas de octava.

| f central [Hz] | 31.5 | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
|-------------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| # Repeticiones | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| Proporción de amplitud relativa [%] | 98 | 100 | 100 | 49 | 25 | 18 | 6 | 4 | 2 |

En la Figura 7 se presenta el sonido generado. Se pueden apreciar los cambios de envolventes o fluctuación de amplitud. En este caso el proceso *VariSon* solo se realizó una vez ya que los 9 sonidos se emplean en la solución, pues se utilizaron nueve bandas objetivo.

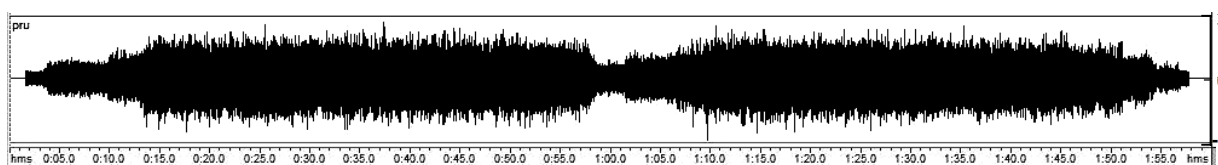


Figura 7. Evolución temporal de amplitud del sonido resultante con amplitud normalizada. En unidades codificadas proporcionales a la presión sonora en función del tiempo [m:s]

5 Análisis de resultados y trabajos futuros

Las diferentes soluciones de la ecuación (3) calculadas según el proceso *VariSon* estiman el mínimo de la ecuación (4) con un valor, de ese mínimo, mayor para cada nueva repetición de *VariSon*. Esto se debe a la naturaleza del método empleado y es razonable que así sea, un trabajo futuro será ponderar las soluciones de cada repetición de *VariSon* en proporción inversa a su número de repetición o el valor de dicho mínimo. De esta forma se pretende mejorar la estimación de la energía objetivo.

Si bien el proceso *VariSon* se incorpora para lograr sonidos combinados con un carácter más estacionario, existen otros beneficios en la combinación asociados a este proceso. Uno de ellos es la posibilidad de incorporar más fuentes sonoras, lo cual da una sensación mayor de realismo. Otro beneficio que se desprende del hecho de que el sonido combinado final sea menos estacionario es que el algoritmo se hace más robusto frente al supuesto de que los sonidos individuales analizados eran suficientemente estacionarios dentro de las ventanas utilizadas en la transformada de Fourier. Esto se puede observar en el experimento cuyos resultados se muestran en la sección 4.2.2, de donde también se puede apreciar la desventaja que significa el alejamiento de los niveles deseados al ir eliminando del banco los sonidos más necesarios para generar el sonido deseado. Esto se puede corregir de varias formas, los trabajos futuros incluirán la incorporación de una mayor cantidad de sonidos individuales, la ponderación favorable para las soluciones de las primeras repeticiones de *VariSon* y el estudio de los efectos psicoacústicos de un proceso de ecualización final para alcanzar la energía objetivo.

Para dar una sensación aún más real, se completará el algoritmo con criterios de decisión para incluir o no ciertos sonidos en función del contexto urbano donde se encuentran habitualmente esos sonidos, que será un dato ingresado por el usuario.

El trabajo futuro que imprime la razón de ser a este trabajo es la investigación de efectos causados por el ruido en el ser humano. Una ventaja interesante de este trabajo es la posibilidad de analizar las respuestas humanas al ruido donde los factores que influyen en esa respuesta pueden ser la fluctuación y el nivel de cada una de las bandas espectrales. De esta forma se pueden utilizar potentes herramientas estadísticas desde el diseño del experimento.

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

- Berglund, Birgitta. (Dic 1981). "Loudness (or annoyance) summation of combined community noises." *Journal of the Acoustical Society of America* 70 (6) 1628-1634.
- Brambilla, Giovanni, Maria Rosario Carretti, y Silvio Santoboni. (1988). "Laboratory subjective evaluation of environmental impulsive noise." *The 5th International Congress on Noise as a Public Health*. Stocholm, 159-164.
- ISO 1999 Acoustics: "Determination of occupational noise exposure and estimation of noise-induced hearing impairment." 1990.
- Fidell, S., D. S. Barber, y T. J. Schultz. (1991) "Updating a Dosage-effect Relationship for the Prevalence of Annoyance due to General Transportation Noise." *Journal of the Acoustical Society of America* 80 221-233.
- US Environmental Protection Agency, (1974). "Information on Levels of Environmental Noise Requisite to Protect Public Health and Welfare with an Adequate Margin of Safety." Vols. 550/9-74-004. Washington DC. 74-004.
- Kjellberg, Anders, y Pere Wide. 1988. "Effects of simulated ventilation noise on performance of a grammatical reasoning task." *The 5th International Congress on Noise as a Public Health Problem*. Stocholm, 31-36 .
- Kryter, Karl D., y Karl S. Pearsons. 1963. "Some Effects of Spectral Content and Duration on Perceived Noise level." *Journal of the Acoustical Society of America* 35, n° 6 866-883.
- Lawson, C. L., y R. J. Hanson. 1995. "Solving Least Square Problems". SIAM.
- Miedema, H.M.E., y H. Vos. (1988). "Exposure-response relations for transportation noise." *Journal of the Acoustical Society of America* 104 , n° 6
- Schultz, T. J. (1978) "Synthesis of social surveys on noise annoyance." *Journal of the Acoustical Society of America* 64, n° 2.
- Vos, Joos. (1992) "Annoyance caused by simultaneous impulse, road traffic, and aircraft sounds: A quantitative model." *Journal of the Acoustical Society of America* 91, n° 6: 3330-3345.
- Zwicker, E & Fastl, H. (2007). *Psychoacoustics: Facts and Models*. Springer.