

MONITORIZACIÓN DEL AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO MEDIANTE REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS.

PACS 43.58.-e

Noriega Linares, Juan Emilio¹; Navarro Ruiz, Juan Miguel¹; Felici Castell, Santiago²; Segura García, Jaime³
1 Dpt Telecomunicación, Univ. Católica San Antonio de Murcia (UCAM)
Avda. de los Jerónimos, s/n, 30.107 Guadalupe (Murcia), España
jenoriega@ucam.edu, jmnavarro@ucam.edu
2 Dpt Informática, ETSE, Universidad de Valencia
Polígono de la Coma s/n, 46.980 Paterna (Valencia), España
felici@uv.es
3 Instituto de Robótica. Universidad de Valencia
Polígono de la Coma s/n, 46.980 Paterna (Valencia), España
jsegura@uv.es

RESUMEN

En la actualidad, las redes de sensores inalámbricas acústicas (WASN) se usan principalmente para creación de mapas sonoros en tiempo real y control de actividades calculando nivel de presión sonora equivalente. En esta investigación, proponemos el uso de WASN para crear un sistema para la captación y la evaluación del aislamiento acústico a ruido aéreo de fachadas. A través de mediciones de larga duración, tanto dentro como fuera del recinto, es posible realizar análisis estadísticos avanzados de parámetros, tanto de contaminación acústica como de aislamientos.

Como prueba experimental se han realizado una serie de medidas de ruido a través de dos nodos captadores simultáneos de 24 horas tanto en el interior como en el exterior de una vivienda. Los resultados obtenidos muestran que este método de evaluación puede contribuir a aportar datos complementarios a los conseguidos mediante métodos normalizados.

ABSTRACT

Nowadays, wireless acoustic sensor networks (WASN) are mainly used for doing real-time noise maps and to control activities by calculating the equivalent sound pressure level. In this study, a new use for WASN is proposed, creating a system for the caption of sound and the evaluation of airborne sound isolation of façades. Through long-term audio recordings on the inside of the house and in the outside of it, at the façade, it is possible to carry out advanced statistical analysis of some parameters, for isolation and for noise pollution.

As an experiment, some noise measurements have been carried out by using two simultaneous capturing nodes through 24 hours inside and outside a house. Results show that this evaluation method might provide complementary data to those obtained by standard methods.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación acústica ambiental es una consecuencia inevitable del estilo de vida actual y su impacto en la salud es un tema de creciente interés en la actualidad. En ambientes urbanos, el ruido de tráfico es la fuente de ruido ambiental más extendida. El coste de este problema es pagado por la población, ligada a una política de no intervención por parte de las Autoridades, tanto locales, regionales y nacionales [1]. En muchas ciudades, debido a un desarrollo urbano desequilibrado en el cual la diferencia en las infraestructuras de las carreteras, el ancho de éstas, el distinto tráfico existente, cambios en la textura de la carretera [1], etc., el problema del ruido de tráfico se ha visto acrecentado.

Se ha demostrado en numerosos estudios que la exposición al ruido de tráfico puede llegar a producir interrupciones en el sueño y otros problemas relacionados con él [2]. La Organización Mundial de la Salud ha estimado que aproximadamente un 50% de la población de la Unión Europea vive expuesta a una presión sonora equivalente día-tarde-noche que excede los 55dB(A), y que un 16% están expuestos a ruido de tráfico nocturno sobre 55dB(A) (OMS, 2011), el cual afecta de manera importante en la calidad del sueño con independencia de la molestia acústica percibida [3].

Se ha planteado que el efecto de la exposición al ruido puede ser expresado de manera más precisa a través de la *molestia acústica* que a través de exposición directa. Además, la molestia acústica es un marcador más preciso para la evaluación del estrés debido a ruido por impactos que el ruido objetivo, ya que este incluye la percepción y molestia del individuo [3, 4].

El efecto de la exposición al ruido puede ser mediado a través de la molestia acústica en vez de a través de parámetros directos/objetivos de exposición al ruido, además de que el parámetro de la molestia es un mejor marcador del impacto del estrés por ruido que los objetivos como el nivel de presión sonora, niveles equivalentes y distintos percentiles, ya que éste incluye la percepción y la molestia percibida por el individuo expuesto al ruido [3, 4].

En los últimos años, la *Smart City* ha emergido como una infraestructura eficiente basada sobre todo en la sostenibilidad [5]. Este nuevo modelo de urbe debe de ser capaz de responder de manera adecuada a las necesidades básicas de las instituciones, empresas y, sobre todo, de los ciudadanos. Para ello, la base en la que se sustentan estas ciudades inteligentes es en la información, mucha de ella obtenida de una capa de sensorización en la cual está sustentado este nuevo modelo de ciudad. El campo de las redes de sensores inalámbricos (WSN) ha mostrado grandes potenciales en campos tales como la seguridad, y se ha allanado el camino a otro tipo de usos y aplicaciones para estas redes de sensores.

En el estudio que nos concierne, se ha particularizado este tipo de redes enfocando el objetivo en el ruido; concretamente, el ruido de tráfico. Para ello, una particularización de las redes de sensores inalámbricos son las redes de sensores acústicos inalámbricos (WASN) los cuales se basan en el mismo modelo que un sensor de una WSN pero con uso enfocado de manera concreta al análisis de sonido, con los sensores pertinentes y modos de comunicación específicos para este tipo de datos. En la actualidad, las redes de sensores acústicos inalámbricos se usan principalmente para la creación de mapas sonoros en tiempo real [7, 8, 9] y control de actividades calculando nivel de presión sonora equivalente. En esta investigación, proponemos el uso de WASN para la creación de un sistema para la captación de la señal de audio y la evaluación, entre otros parámetros, del aislamiento acústico a ruido aéreo de fachadas y la molestia. A través de mediciones simultáneas de 24 horas, tanto dentro como fuera del recinto de manera simultánea, es posible realizar análisis estadísticos avanzados de parámetros, tanto de contaminación acústica como de aislamientos.

El objetivo de este artículo es evaluar la viabilidad de este método de monitorización del aislamiento y analizar los resultados obtenidos para comprobar si muestran que este método

puede contribuir a aportar datos complementarios a los conseguidos mediante métodos normalizados.

Este artículo se estructura en diferentes apartados comenzando por la metodología seguida para las mediciones, material usado, emplazamiento, método de adquisición, etc.; un apartado para el análisis de los resultados, en el cual se exponen los parámetros a analizar así como el estudio de un caso particular; y un último apartado de conclusiones en el que se dictan algunas de las conclusiones más relevantes.

2. EXPERIMENTO REALIZADO

La prueba experimental llevada a cabo en este trabajo ha sido la realización de una serie de medidas de ruido a través de dos nodos captadores simultáneos de 24 horas en el interior de la vivienda y en la fachada de ésta, situada en frente de una avenida transitada.

Estas mediciones fueron tomadas en una quinta planta de un edificio situado en una avenida principal de Molina de Segura, Murcia, muy transitada tanto por vehículos privados como autobuses, debido a las dos paradas situadas enfrentadas que acogen distintas líneas de transporte, así como camiones de recogida de desechos, vehículos y operarios de limpieza municipal, etc. El inicio de estas mediciones fue a las 20:07 del 09/07/2014 y la duración de éstas fue de 24 horas completas.

El punto receptor de audio situado en el interior de la vivienda fue emplazado a 2 metros del cerramiento de la fachada y a 2 metros de una de las paredes laterales. El nodo receptor exterior fue situado a una distancia aproximada de 1.5 metros separado de la fachada. La fachada que servía como separación entre la habitación y el exterior disponía de tres ventanas.

Para llevar a cabo este análisis se utilizaron dos micrófonos Behringer ECM8000 [10], un calibrador acústico Rion NC-74 [11] para la calibración previa del sistema y una tarjeta de sonido Alesis IO2 [12] conectada a un ordenador para realizar las grabaciones. El software utilizado para las grabaciones fue Audacity [13], software libre de adquisición y edición de audio, y éstas fueron realizadas con una frecuencia de muestreo de 48 kHz, una resolución de 16 bits y en mono. Previamente a la grabación se calibró el sistema usando el calibrado.

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS

Para llevar a cabo los distintos análisis de los datos adquiridos se han creado una serie de algoritmos para la extracción de los parámetros a analizar a partir del audio grabado. Estos algoritmos se encargan de extraer, en bloques de 10 segundos, diferentes parámetros acústicos. Además de este tipo de parámetros también se han calculado diferencias de nivel sonoro entre el audio del nodo interior y el exterior, pudiendo evaluar también el aislamiento de la fachada.

Las mediciones realizadas a analizar en este estudio estuvieron desde las 20:07:00 con una duración de 24 horas. De estas mediciones se extrajeron diversos parámetros a través de unos algoritmos automatizados que se encargaron de calcular los diferentes datos.

Los parámetros calculados fueron:

- L_{eq} (dB).
- L_{pico} (dB).
- Nivel de presión sonora (dB).
- Nivel de presión sonora por tercio de octava, desde 25 Hz hasta 12.500 Hz (dB).
- Entire Loudness (Sonos).

- Specific Loudness (Sones/Bark).
- Sharpness (Acum).
- Diferencia de niveles estandarizada ($D_{2m,nT}$).
- Términos de adaptación espectral a ruido rosa y ruido de tráfico (C ; C_{tr}).

Los parámetros *Loudness* y *Sharpness* se incluyen en el análisis acústico con el fin de evaluar la molestia psicoacústica posible inducida en los habitantes de la vivienda.

El loudness de un sonido es una medida subjetiva del efecto de la cantidad de energía acústica contenida en un sonido para el sistema auditivo humano [14, 15]. Gracias a este parámetro, la sensación humana al volumen del sonido se puede visualizar de manera lineal. La unidad en que se mide es en “sonos”. Un tono de frecuencia 1 kHz con un nivel de 40 dB tiene por definición, un Loudness de 1 son. Este parámetro es dependiente de la frecuencia, ya que, por ejemplo, un sonido de 20 Hz a 40 dB sería percibido más silencioso que un sonido a 1 kHz de 40 dB.

Para el cálculo de Loudness, el algoritmo creado está basado en la ISO 532 B / DIN 45631, el cual estandariza un procedimiento basado en el modelo de Zwicker [16], a través del cual se calcula el loudness específico para cada banda de tercio de octava y posteriormente se integra para conseguir el nivel de Loudness total.

El parámetro Sharpness es un valor de sensación que mide las componentes de alta frecuencia en un sonido dado. Cuanto más alta sea la componente de alta frecuencia, el sonido tendrá un nivel de sharpness mayor. La unidad de medida de este parámetro es el “acum”. Sharpness también expresa la sensación humana de una manera lineal, al igual que Loudness. El valor de 1 acum es atribuido a un tono de banda estrecha de 1 kHz con un ancho de banda menor a 150 Hz y un nivel de 60 dB [16]. Para el cálculo del parámetro Sharpness se ha seguido el método Fastl, 1991, que además, según las aproximaciones de Zwicker y Fastl, se puede calcular el sharpness a partir del Loudness [16].

3.1. Análisis

Para el análisis del aislamiento, dado que para la medición de este parámetro se usa un procedimiento de mediciones de larga duración, se debe tener en cuenta que los niveles interiores varían en función de la actividad de los habitantes de la vivienda. Al ser las medidas de larga duración y debido a que la vivienda está habitada, se deben detectar los niveles interiores más bajos (no hay actividad humana en ese momento dentro de la vivienda) así como los máximos exteriores (con los niveles máximos asumimos un nivel sonoro suficiente para el cálculo del aislamiento) para que los resultados calculados sean razonables y estén basados en las condiciones de medida estándar.

La grabación desatendida de audio dentro de las viviendas puede inducir a un error en la evaluación del aislamiento debido a los sonidos normales en el interior de éstas, con personas en su interior y las diferentes fuentes sonoras que podemos encontrar normalmente dentro de una casa. Aun así, esto puede ser fácilmente solventable con una petición previa a los usuarios de la misma para asegurar un periodo de tiempo suficiente en una franja horaria con nivel de tráfico adecuado. Al ser la naturaleza de estas medidas de larga duración, existe una flexibilidad para los usuarios de la vivienda para cumplir esos requisitos.

Además, se puede realizar una búsqueda estudiando la medición de largo plazo para encontrar un tramo idóneo de audio para la correcta medida del aislamiento acústico: buscando niveles de ruido de tráfico suficientes (máximos exteriores) y nivel de presión sonora interior sin

contaminación acústica producida por fuentes sonoras del interior de la vivienda (mínimos interiores).

La franja horaria escogida en este caso para el análisis del aislamiento de la fachada (10:03:30 a 13:03:30) ha sido elegida en base a que en este horario el interior de la vivienda presentaba los menores niveles de ruido y continuos en el tiempo, tal y como se observa en la estabilización de la diferencia de niveles en este intervalo de tiempo (Figura 1). Además el nivel en el exterior era óptimo debido a que en ese horario el nivel de tráfico era moderado/elevado, tal y como se observa en el análisis espectral de las grabaciones.

La duración de las grabaciones usadas para este cálculo (3 horas) ha posibilitado la realización de una media de los niveles de presión sonora que se mantuvieron estables durante el periodo escogido, para así poder eliminar errores producidos por picos o valles en algún momento del periodo escogido.

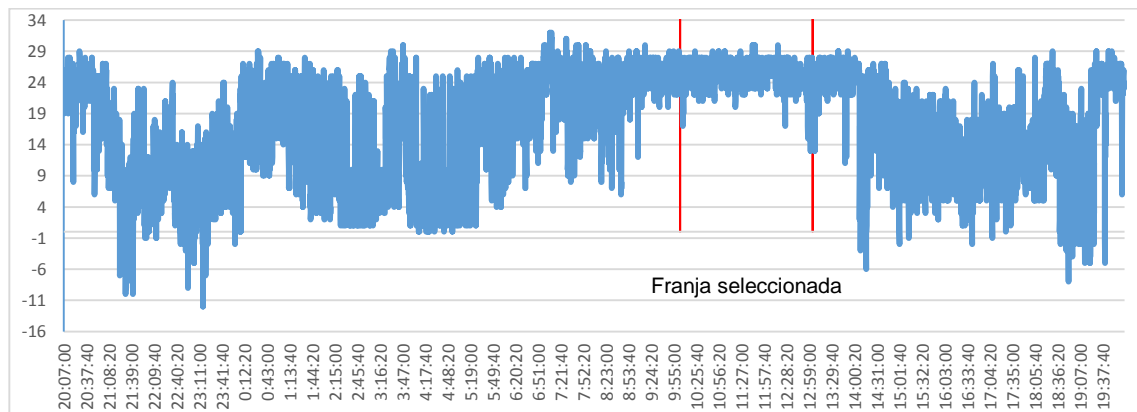


Figura 1. Diferencia de niveles estandarizada en bloques de 10 segundos

En el aspecto frecuencial, en esta franja, se observa que la mayor diferencia de niveles ocurre a partir de los 250 Hz siendo en rangos de bajas frecuencias donde existe una diferencia menor, siendo por tanto el aislamiento resultante, menor. Debido al efecto de las ventanas, se puede comprender el valle de aislamiento en bajas frecuencias.

Tras los cálculos pertinentes del $D_{2m,nT}$ y de los parámetros de adaptación espectral para este periodo de tiempo escogido, se extrae, promediando los valores en la franja seleccionada (Figura 1) y aplicando los cálculos, que: $D_{2m,nT,w}$ (C; Ctr) = 26 (-1; -3) dB;

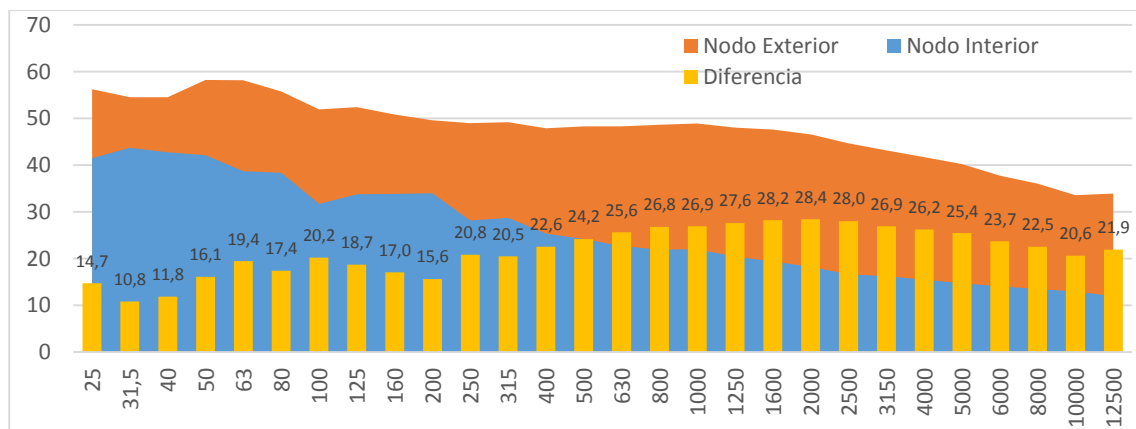


Figura 2. Media de SPL por tercio de octava desde las 10:03:30 a 13:03:30 en el nodo interior y exterior y diferencia media de niveles.

3.2. Caso Específico: Camión De Tratamiento De Residuos Sólidos Urbanos

Para el análisis de los parámetros psicoacústicos loudness y sharpness, se ha planteado el estudio del caso de una fuente de ruido, particular y periódico diariamente en horario nocturno, considerado generalmente como molesto. Es el caso del ruido generado por los camiones de tratamiento de residuos sólidos urbanos. Se analizará un periodo de 5 minutos desde las 3:30 AM hasta las 3:35 AM.

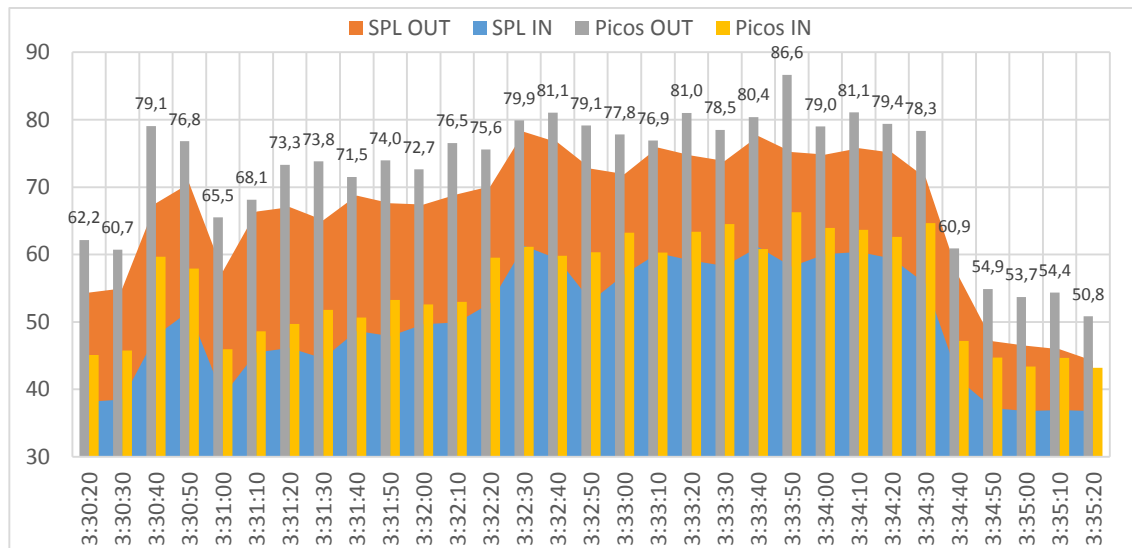


Figura 3. Evolución temporal de los niveles de presión sonora en los nodos interior y exterior así como los picos registrados.

Es interesante observar como los niveles de SPL exteriores son atenuados por el aislamiento de la fachada viendo los niveles máximos de ruido por la noche del camión dentro y fuera (Figura 3).

En la Figura 4 se puede observar el espectro frecuencial medio, durante los 5 minutos en los que el camión estuvo en marcha y trabajando en la avenida enfrentada donde estaba situado el micrófono de la fachada realizando la medición, tanto en el interior de la vivienda, como directamente en el exterior, donde se obtuvieron los datos más directos. Los niveles en las bajas y medias frecuencias (hasta la banda de 2500 Hz) predominan sobre las altas, que decaen rápidamente. Existe una componente en la banda de los 50 Hz que tiene un nivel mayor de decibelios, debido probablemente al ruido del motor del camión

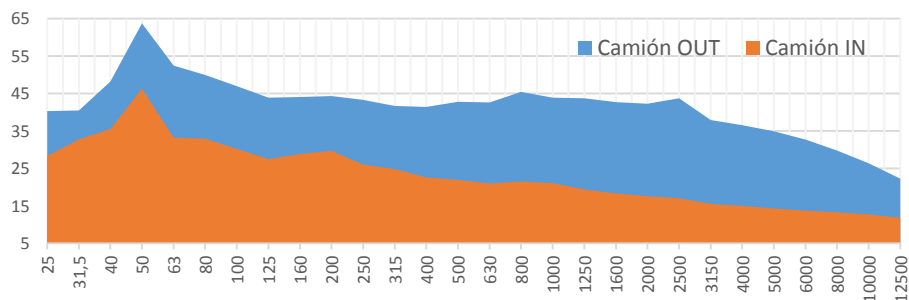


Figura 4. Espectro de la media de los SPL durante el transcurso del evento del camión en los nodos interior y exterior.

En la Figura 5 se puede observar la gran reducción de los niveles de loudness entre el interior y exterior de la vivienda, del orden de casi 9 veces menos, en el momento que se producía el pico de ruido del camión de tratamiento de residuos, que llegó a producir unos niveles de presión sonora de hasta 86,6 dB a las 3:30 de la madrugada. Aunque los niveles de ruido interiores fueron de 66,26 dB (una caída de 20 dB), seguían siendo aun así altos para el momento de la medición (3:33 AM), se observa que el parámetro loudness se ha reducido significativamente, lo cual da mejores indicativos de la molestia que puedan sufrir los habitantes de la vivienda. Para comprender mejor la molestia percibida, se puede observar una comparativa de distintos ruidos según el nivel de presión sonora y el loudness:

Fuente Sonora	Nivel de Presión Sonora (dB)	Loudness (son)
Umbral de dolor	134	~ 676
Daños auditivos producidos por evento de corta duración	aprox. 120	~ 256
Jet a 100 metros de distancia	110 ... 140	~ 128 ... 1024
Martillo neumático a 1 metro de distancia / discoteca	aprox. 100	~ 64
Daños auditivos producidos por evento de larga duración	aprox. 90	~ 32
Carretera principal, 10 m de distancia	80 ... 90	~ 16 ... 32
Coche a 10 m de distancia	60 ... 80	~ 4 ... 16
TV a un volumen normal a 1 metro de distancia	aprox. 60	~ 4
Charla normal a 1 metro de distancia	40 ... 60	~ 1 ... 4
Habitación en calma	20 ... 30	~ 0.15 ... 0.4
Ruido de hojas, respiración calmada	10	~ 0.02
Umbral de audición a 1 kHz	0	0

Tabla 2. Loudness de distintos sonidos

Comparando con los valores de la Tabla 2, se puede observar que el ruido producido por el camión en la medición del micrófono exterior alcanza valores similares al caso de una carretera principal a 10 metros de distancia. Los valores interiores de loudness sin embargo, alcanzan picos no mayores a 3 sonos, siendo este un valor similar al de una conversación normal a 1 metro de distancia. Estos resultados son un buen indicativo del aislamiento de la fachada en función de este parámetro psicoacústico. En la Figura 6 se pueden observar los niveles de sharpness en acum de esta franja de audio con el ruido producido por el camión.

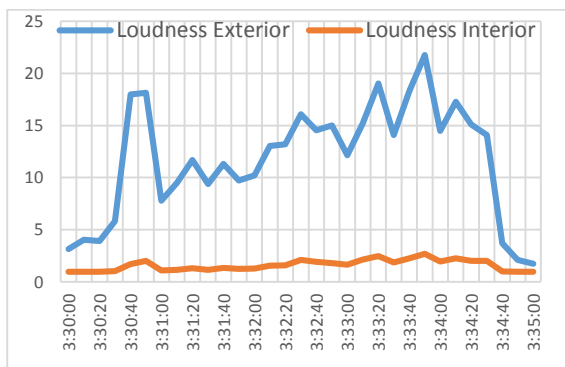


Figura 5. Niveles de loudness en ambos nodos durante el transcurso del evento del camión

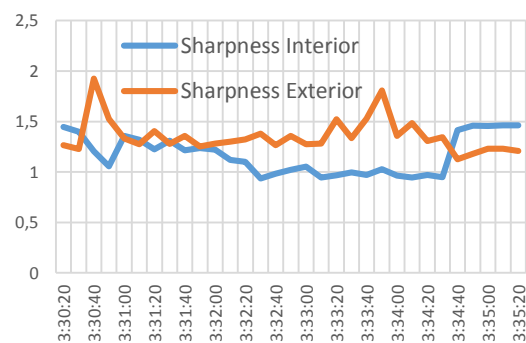


Figura 6. Niveles de sharpness en ambos nodos durante el transcurso del evento del camión

Aunque la componente de alta frecuencia en el ruido del camión no es predominante, los altos niveles de presión sonora que se producen hacen que se considere tener en cuenta no sólo el loudness, sino también el sharpness, para la estimación de la molestia acústica global de este evento.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha evaluado la posibilidad de utilizar WASN para el cálculo de diversos parámetros. Concretamente en este artículo se han evaluado el aislamiento, diferencia de niveles estandarizada, y de parámetros psicoacústicos, Loudness y Sharpness. Se han realizado unos experimentos donde se ha tomado una medición de larga duración en el interior y exterior de la fachada de un edificio. Los resultados obtenidos muestran en general el interés de contar con un sistema automático de monitorización continua. En concreto, las conclusiones más relevantes de estudio son:

Debido a que el ruido urbano presenta falta de estabilidad temporal, el uso de mediciones de larga duración desatendidas presenta la ventaja de poder escoger el mejor intervalo temporal para la medición del aislamiento acústico. Además, las fluctuaciones del ruido urbano se pueden solventar de cierta forma tomando medias de periodos estables del ruido interior y exterior para el cálculo del aislamiento.

De igual manera se reduce la problemática de que las medidas in situ se alarguen para evaluar adecuadamente los indicadores sonoros. También la grabación del audio en alta calidad permite la extracción de numerosos parámetros más avanzados, como los parámetros psicoacústicos. Gracias al registro de larga duración se pueden detectar eventos singulares que produzcan una gran molestia aun en intervalos de tiempo muy pequeños.

En un futuro se analizará la viabilidad de la inclusión de un detector de densidad de tráfico para mejorar la precisión del cálculo del aislamiento usando de fuente el ruido de tráfico además de crear un sistema usando una red de sensores plenamente funcional.

AGRADECIMIENTOS

Financiado por el Ministerio Español de Ciencia e Innovación, proyecto TEC2012-37945-C01.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Li, B., Tao, S.; Dawson, R. W. (2002). Evaluation and analysis of traffic noise from the main urban roads in Beijing. *Applied Acoustics*, 63(10), 1137-1142.)
- [2] Öhrström. (1990). Health effects of community noise.
- [3] Frei, P., Mohler, E.; Röösli, M. (2014). Effect of nocturnal road traffic noise exposure and annoyance on objective and subjective sleep quality. *International journal of hygiene and environmental health*, 217(2), 188-195.
- [4] Nivison, M. E.; Endresen, I. M. (1993). An analysis of relationships among environmental noise, annoyance and sensitivity to noise, and the consequences for health and sleep. *Journal of behavioral medicine*, 16(3), 257-276.
- [5] Fundación Mapfre (2009) Ciudades y pueblos sostenibles. Introducción Revista Seguridad y Medio Ambiente, Madrid. ISSN1888-5438)
- [6] Hollosi, D., Nagy, G., Rodigast, R., Goetze, S.; Cousin, P. (2013, August). Enhancing Wireless Sensor Networks with Acoustic Sensing Technology: Use Cases, Applications & Experiments. In *Green Computing and Communications (GreenCom), 2013 IEEE and Internet of Things (iThings/CPSCOM), IEEE International Conference on and IEEE Cyber, Physical and Social Computing* (pp. 335-342). IEEE.)
- [7] Santini, S., Ostermaier, B.; Vitaletti, A. (2008, April). First experiences using wireless sensor networks for noise pollution monitoring. In *Proceedings of the workshop on Real-world wireless sensor networks* (pp. 61-65). ACM.
- [8] Filippini, L., Santini, S.; Vitaletti, A. (2008). Data collection in wireless sensor networks for noise pollution monitoring. In *Distributed Computing in Sensor Systems* (pp. 492-497). Springer Berlin Heidelberg.

- [9] Gubbi, J., Marusic, S., Rao, A. S., Law, Y. W.; Palaniswami, M. (2013, August). A pilot study of urban noise monitoring architecture using wireless sensor networks. In Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), 2013 International Conference on (pp. 1047-1052). IEEE.
- [10] ECM8000 Datasheet - http://www.behringerdownload.de/ECM8000/ECM8000_C_Specs.pdf
- [11] NC-74 Datasheet - <http://www.noise-and-vibration.co.uk/files/pdfs/NC-74.pdf>
- [12] Alesis Official Website - <http://www.alesis.com/io2>
- [13] Audacity. Free open source digital audio editor. <http://audacity.sourceforge.net/>
- [14] <http://www.salford.ac.uk/computing-science-engineering/research/acoustics/psychoacoustics/sound-quality-making-products-sound-better/sound-quality-testing/loudness>
- [15] Head Acoustics Application Note 12/13. Psychoacoustic Analyses I
- [16] Fastl, H.; Zwicker, E. (2001). Psychoacoustics: facts and models.