TECNIACUSTICA MURCIA · 2014

45º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
8º CONGRESO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON SMART CITIES AND ENVIRONMENTAL ACOUSTICS

URBAN NOISE NUISANCE MONITORING USING WIRELESS SENSOR NETWORKS

PACS: 43.55.Ka

Segura, J.[1]; Felici, S.[1]; Pérez, J.J.[1]; Cobos, M.[1]; Navarro, J.M.[2]
1 Dpt. Informática - ETSE, Universitat de València
Avda Universitat s/n
E-mail: jsegura@uv.es
2 Dpt. Tecnología, Universidad Católica San Antonio de Murcia
Avda Universitat s/n
E-mail: jsegura@uv.es

ABSTRACT
Noise pollution caused by vehicular traffic is a common problem in urban environments. In the last decades several studies have been conducted to assess this noise, by measuring the Leq to obtain accurate sound maps using wireless networks with acoustic sensors. However, even with similar values for Leq, people can feel the noise differently according to spectral features. Thus, indexes expressing people's subjective response are required.

In this paper we analyze the psycho-acoustic metrics given by the Zwicker's model. The goal is to evaluate hardware limitations of a low-cost WASN to measure the annoyance using two types of commercial and off-the shelf sensor nodes (Tmote-Invent nodes and Raspberry Pi platforms). To evaluate different alternatives, we tested these nodes in a traffic congested area of Valencia City in a network deployment both in vertical and in horizontal.

RESUMEN
La contaminación Sonora ocasionada por el tráfico vehicular es un problema común en entornos urbanos. En las últimas décadas, se han realizado multiples estudios para evaluar este ruido, mediante la medición del Leq para obtener mapas sonoros precisos usando redes inalámbricas con sensores acústicos. Sin embargo, incluso con valores similares de Leq, se puede percibir una molestia por el ruido diferente dependiendo de las características espectrales de este. Así, se hace necesario expresar índices que tengan en cuenta la respuesta subjetiva de la gente.

En este artículo, se analizan las métricas psicoacústicas dadas por el modelo de Zwicker. El propósito principal ha sido evaluar las limitaciones del hardware de las redes inalámbricas de sensores acústicos de bajo coste para medir la molestia usando dos tipos de nodos comerciales (nodos Tmote-Invent y plataformas Raspberry Pi). Se ha probado estas plataformas en un área congestionada de Valencia para evaluar parámetros mediante una red que se extiende horizontal y verticalmente.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación acústica es un problema muy extendido en entornos urbanos y afecta al comportamiento, el bienestar y la salud humanas, además afecta a procesos cognitivos en niños. La Comisión Europea le dio la debida importancia adoptando la conocida directiva END

[1], en la que se demanda a las ciudades principales (con más de 250000 habitantes) la recogida de datos reales sobre ruido y exposición a él, con el fin de producir planes de acción local y proporcionar mapeados precisos de los niveles de ruido. Diversas ciudades alrededor del mundo (como New York [2], London [3], Munich [4], Beijing [5]) proporcionan este tipo de mapas.

El procedimiento tradicional para la realización de medidas de ruido es mediante la recogida manual de muestras de ruido con un sonómetro, pero esta técnica tiene muchos inconvenientes. Por una parte, sólo se toman medidas locales y dispersas y por otra parte, puede resultar cara una campaña de medidas debido al coste de los equipos de medidas y de personal. Con estas medidas y mediante el uso de herramientas numéricas y modelos propagación se pueden estimar los mapas sonoros [6]. Sin embargo, la Comisión Europea recomienda para una mayor granularidad de datos de ruido, tanto espacialmente como temporalmente. En este escenario, las redes de sensores inalámbricos (WSN) representan una alternativa que puede afrontar los inconvenientes de los procedimientos actuales de recolección de datos de ruido.

Las WSN son redes inalámbricas de pequeños nodos autónomos con capacidades sensoras. Cada nodo tiene su propia alimentación, CPU y memoria. Los nodos se comunican usando protocolos de enrutamiento multi-hop y al menos un nodo (llamado sink) actúa como un Gateway para realizar conexión externa. Sin embargo, estas redes y sus aplicaciones son aún poco maduras, debido a las restricciones en los recursos tales como energía, memoria, velocidad computacional y ancho de banda de comunicaciones. En la última década, se han hecho diversos estudios usando WSN para monitorización de la contaminación sonora. Todos estos estudios están basados en el nivel de presión sonora equivalente en el tiempo T (denotado como $L_{eq;T}$ [7]). Aunque estas medidas proporcionan suficiente información sobre el nivel sonoro, fallan cuando se les demanda suficiente información sobre la molestia subjetiva [8].

El propósito de este trabajo es medir parámetros psicoacústicos de acuerdo con el modelo de molestia de Zwicker [9] aplicado al ruido urbano producido por el tráfico y analizar la idoneidad de diferentes alternativas hardware de bajo coste. Esta puede ser una manera de conseguir los propósitos de las smart cities. Para ello, se consideran nodos WSN comerciales de bajo coste, en particular plataformas Tmote-Invent (TmI) y Rasberry Pi (RPi). Este modelo mide la molestia (N) basada en parámetros como: Loudness (L), Sharpness (S), Roughness (R) y Fluctuation Strength (F). El cálculo de estos parámetros requiere una etapa de procesado de señal muy costosa para estos nodos, por lo que pueden ser necesarias algunas simplificaciones para aproximar estos parámetros teniendo en cuenta las características de ruido de tráfico rodado, tales como rango dinámico en la fase de adquisición (bits por muestra), la frecuencia de muestreo y el número de bandas críticas usadas en el modelo. Los nodos muestrean el ruido, estiman N (midiendo L, S, R y F) y finalmente envían los resultados en un paquete de datos al sink a través de la red multihop.

2. PARÁMETROS PSICOACÚSTICOS Y ANÁLISIS DE RUIDO URBANO

Los parámetros psicoacústicos son una alternativa a la expresión de los sentimientos de la gente mediante medidas subjetivas más que mediante la medida del $L_{eq;T}$ [7]. Aquí se describe el modelo de molestia de Zwicker [9] aplicado al tráfico rodado midiendo N, S, L y F. También se realiza un análisis estadístico usando técnicas de correlación con medidas de $L_{eq;T}$.

2.1 Modelo psicoacústico de Zwicker

Este modelo está basado en la anatomía del oído humano. Cuando se consideran sonidos complejos, como el ruido de tráfico rodado, el espectro en frecuencia de los parámetros psicoacústico es determina en términos de banda crítica (CB) [20], esto se refiere al ancho de banda en frecuencia del filtro auditivo creado por la cóclea. El oído humano combina los estímulos sonoros que se sitúan en proximidad de cada uno en términos de frecuencia en

particular CB. Cuando se serializan estas CBs, se crea una escala de frecuencia llamada escala de tasa de CB y se mide en Barks En [9], esto se define como un mapeo de la escala física de frecuencia a la escala de tasa de CB (o escala Bark) de 1 a 24.

La Tabla I resume las expresiones de cálculo usadas para estimar los diferentes parámetros definidos para medir N, L, S, R y F[9]. El procesado de señal que necesitan estos parámetros no es el propósito de este artículo. Estos parámetros se han medido usando tamaños de ventana temporal diferentes sobre la señal de audio. Las definiciones de estos parámetros son:

- Molestia (N) es un atributo perceptivo que permite una cuantificación objetiva de las características físicas de la señal, basado en los valores de L, S, R y F
- Loudness (L) es el valor que está relacionado con el volumen sonoro (sensaciones de intensidad), medido en Sones con escala lineal. Está estandarizado en la norma ISO 532B. El proceso usado para calcular L está basado en el Loudness Específico L'(z) o la contribución de L para cada CB, donde z identifica el número de CB), medido en Sone/Bark. El L total es el resultado de la suma de las diferentes contribuciones. Δz es el ancho de banda de cada Bark.
- Sharpness (S) es un valor de percepción sensorial humana de desagrado sonoro que viene originado por componentes de alta frecuencia. Se suele medir en Aures y tiene escala lineal.
- Roughness (R) describe la percepción de la fluctuación sonora incluso cuando L (o $L_{eq;T}$) se mantiene inmutables. Analiza los efectos con diferentes grados de modilación en frecuencia (con ancho de banda de alrededor de 70 Hz) en cada CB. La unidad básica es el Asper. Para cada Bark, $f_{mod}(z)$ es la frecuencia de modulación (estimada analizando la respuesta en frecuencia y $\Delta L_E(z) = 20 \cdot log\left(\frac{L'_{max}(z)}{L'_{min}(z)}\right)$, donde $L'_{max}(z)$ y $L'_{min}(z)$ son los valores máximo y mínimo de L'(z).
- Fluctuation Strength (F) describe cuanto fluctúa el sonido. Depende de la frecuencia y de la profundidad de las fluctuaciones de L, alrededor de 4 Hz en cada CB. Se mide en Vacils.

$N = L(1 + \sqrt{(\frac{3(S-1.75)log(L+10)}{4})^2 + (\frac{2.18(0.4F+0.6R)}{L^{0.4}})^2})$
$L = \sum_{z=0}^{24Bark} L'(z) \cdot \Delta z$
$S = 0.11 \cdot \frac{\sum_{z=0}^{24Bark} L'(z) \cdot e^{0.171 \cdot z} \cdot z \cdot \Delta z}{L}$
$R = 0.0003 \cdot \sum_{z=0}^{24Bark} f_{mod}(z) \cdot \Delta L_E(z) \cdot \Delta z$
$F = 0.032 \cdot \sum_{z=0}^{24Bark} \frac{\Delta L_E(z) \cdot \Delta z}{\frac{f_{mod}(z)}{4} + \frac{4}{f_{mod}(z)}}$

Tabla I: Expresiones de cálculo de N, L, S, R y F

2.2 Análisis del ruido urbano

A fin de implementar el modelo de Zwicker [9] en una plataforma de bajo coste, son necesarias una serie de simplificaciones para reducir los requisitos computacionales, tales como el rango dinámico en la etapa de adquisición (bits por muestra), la frecuencia de muestreo y el número de CBs usado. La Figura 1 muestra el espectro en frecuencia del ruido de tráfico medido en la

fachada de una torre de 50 metros en una zona de mucho tráfico en Valencia, en una hora punta en los pisos 0, 4 y 9.

El espectro está limitado en banda para frecuencias bajas y medias, y por encima de 8kHz el nivel de potencia decrece en más de 40 dB. Por ello, teniendo en cuenta esta información, hemos seleccionado las frecuencias de muestreo adecuadas en cada plataforma. El número de CBs analizado está relacionado con esta frecuencia de muestreo. La Tabla II muestra, para cada frecuencia de muestreo, la última CB (o Bark) incluida, especificando las frecuencias central y máxima de estas CB. Como las ventanas temporales requeridas por cada parámetro son diferentes, en la Tabla III se muestra el número de valores obtenidos para los diferentes parámetros psicoacústicos con 10s, 200ms y 500 ms de registros de audio.

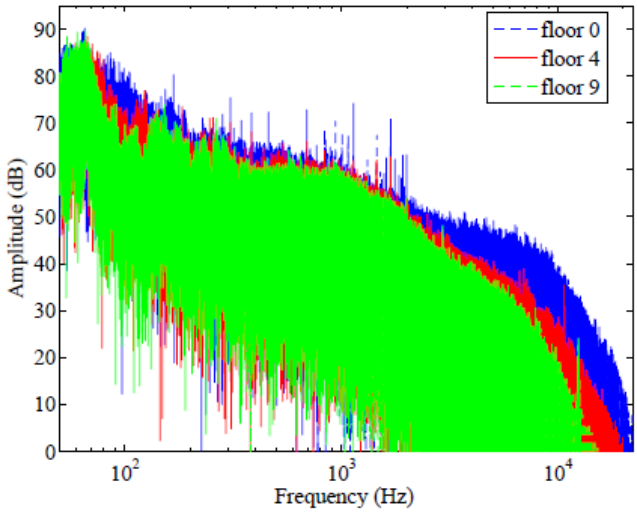

Figura 1: Espectro de ruido de tráfico medido en la fachada de una torre de 50m en una zona de mucho tráfico en los pisos 0, 4 y 9

Finalmente, para calibrar los sistemas de grabación se ha medido el $L_{eqA;10s}$ con un sonómetro estándar de tipo I (CESVA SC-310) obteniendo lecturas en el rango entre 65 y 75 dBA aproximadamente.

f_s (kHz)	Last CB	f_c (kHz)	f_{max} (kHz)
22.05	24	13.50	15.50
20	23	10.50	12.00
8	19	4.80	5.30

Tabla II: Número de CB analizado para cada frecuencia de muestreo (f_s) Detalladas las frecuencias central y máxima de la última CB

f_s (kHz), duration	L	S	R	F
44.1, 10s	215	215	13728	574
22.05, 10s	107	107	13728	574
20, 10s	98	98	12500	574
8, 10s	40	40	10000	574
20, 0.2s	1	1	250	12
8, 0.5s	1	1	500	29

Tabla III: Número de valores de L, S, R y F para cada frecuencia de muestreo (f_s) con 10s, 200ms y 500ms de registro de audio

3. DISEÑO DE LA RED DE SENSORES Y LIMITACIONES

Las redes de sensores inalámbricos acústicos (WASN) permiten una monitorización del ruido de manera distribuida, tanto espacial como temporalmente a través de una red multi-hop. La

Figura 2 muestra a la derecha, el dispositivo TmI con un micrófono embebido y a la izquierda, la RPi sobre su encapsulamiento y el micrófono externo. La comunicación de los nodos TmI está basada en IEEE 802.15.4, mientras que los RPi lo está en IEEE 802.11b (WiFi). Para la medida de la contamicación acústica usando parámetros psicoacústicos, se consideran las siguientes características para evaluar estas plataformas: frecuencia de muestreo, tamaño de memoria, calidad sonora (rango dinámico o bits por muestra) y capacidades de procesado en CPU. Todos estos nodos monitorizan el ruido de tráfico rodado, adquiriendo y procesando el ruido periódicamente cada 10 minutos, calculando L, S, R y F para estimar N, y finalmente enviando los resultados (con los parámetros psicoacústicos) en un paquete de datos al sink a través de la red multihop.

Figura 2: Vista de la Tmote-Invent (derecha) y la Raspberry Pi (izquierda) con micrófono externo y un adaptador WiFi

3.1 Plataforma TmI

1) Hardware: la plataforma Tmote-Invent (TmI), fabricada por MoteIV es una adaptación de las motas comerciales TelosB [14], con soporte para registro de audio (con un micrófono electret omnidireccional) y un conjunto de sensores integrados, equipado con baterías recargables de 750mAh (3V) e integrado en un encapsulamiento protector (Figura 2, derecha). TmI tiene un microcontrolador de 16 bits (TI MSP430) con un reloj externo de 32kHz, un transceptor TI CC2420, 10KB de RAM, 48 KB de memoria Flash y una antena microstrip embebida en forma de F-invertida que permite alcanzar distancias en interior y exterior de 50 a 125m respectivamente. Del datasheet de TmI, la señal de salida del micrófono es procesada por un preamplificador AD SSM-2167, filtrado mediante un filtro pasabaja (LPF) con frecuencia de corte de 10 kHz, posteriormente se conecta al conversor analógico-digital de 12 bits (ADC) del microcontrolador TI MSP430. El micrófono tiene una sensibilidad de -35±4 dB (0dB=1V/Pascal a 1 kHz) con una frecuencia aproximadamente plana entre 20 y 20000Hz. La principal restricción de estos nodos es la memoria RAM de 10KB (de la cual sólo se puede disponer de 8KB). Esta pequeña cantidad de memoria RAM limita el tiempo de registro. Para cubrir el rango dinámico de la entrada de audio, que es entre 65 y 75 dBA, se necesita los 12bits completos del ADC para compensa un rango dinámico de $20 \cdot \log_{10}(2^{12})$=72.24 dB, con 2 bytes por muestra, se usan 8 kHz y 20 kHz para registrar 500ms y 200ms respectivamente. La frecuencia de muestreo de 8kHz se selecciona para testeo, ya que es demasiado baja para medir los parámetros psicoacústicos debido a que: la frecuencia máxima del ruido de tráfico está en torno a 8kHz [10] (ver Figura 1) y que la frecuencia de corte del LPF en la primera etapa del ADC, puede introducir aliasing. La frecuencia de muestreo de 20kHz es una solución intermedio para evitar el aliasing y maximizar el tiempo de registro. La Figura 3 muestra un registro de 200ms de la TmI a 20 kHz con 12bits/muestra. Cabe notar que incluso con el ADC de 12bits, aún existen algunos problemas de saturación como se ve en t=45ms.

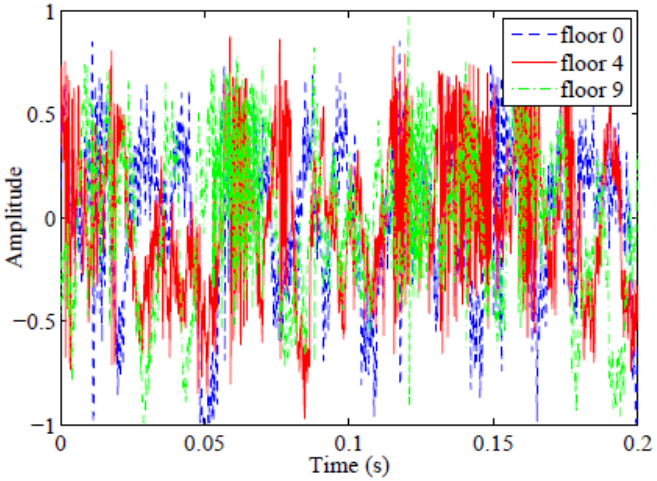

Figura 3: Ejemplo de registro de 200ms de ruido de tráfico con la TmI con una frecuencia de muestreo de 20kHz, 12 bits/muestra, medido en la fachada de la torre de 50m en un área congestionada de tráfico en los pisos 0, 4 y 9

2) Software: Como los indicadores de ruido necesitan procesado de audio largos, no es conveniente transmitir los registros al sink y procesarlos allí, ya que la energía necesaria para enviar y retransmitir todos estos paquetes es elevada. Por ello, se ha adaptado una aplicación de recogida de datos que está disponible en el repositorio TinyOS v1.0 [21], llamada Delta, con un protocolo de routing multihop, llamado MultihopLQI [22]. Esta aplicación permite una escucha síncrona de baja potencia que coordina los ciclos de trabajo de todos las motas, encendiéndolas y apagándolas periódicamente. Se ha de notar que este software ya se usó en [23], aunque para un propósito diferente, para una aplicación de monitorización larga medioambiental. La aplicación insertada en TmI, tiene un consumo medio de 0.4 mAh con un ciclo activo del 1% (11ms en el período de trabajo frente a 1 segundo de período latente). Cabe notar que esta aplicación no ejecuta registros continuos de audio, sino que sólo registra 200 o 500ms (dependiendo de la frecuencia de muestreo) cada 10 minutos. En particular, con el consumo medido y teniendo en cuenta la carga normal de 750mAh de las baterías de la TmI, permite un tiempo de vida de 78.12 días aproximadamente.

3.2 Plataforma RPi

1) Hardware: La plataforma Raspberry Pi (RPi) esta basada en Broadcom BCM2835 System on a Chip (SOC), que incluye un processador ARM1176JZF-S a 700MHz, una Unidad de Procesado Gráfico (GPU) y 256 MB de RAM, con un slot para una tarjeta de memoria SD. Se instaló en las RPi una tarjeta de sonido Logilink UA0053 USB con un micrófono electret omnidireccional (Figura 2, izquierda) y un adaptador WiFi TP-Link TL-WN725N compatible con los estándares IEEE 802.11 b/g/n. Esta configuración permite a cada nodo adquirir 10s de audio con 16bits/muestra (permitiendo un rango dinámico de $20 \cdot \log_{10}(2^{16})$=96.33 dB) a una frecuencia de muestreo de 22.05 kHz. Las RPi han sido encapsulades en cajas protectores, cada una de elles con 3 pilas Kodak 1.5V KD LR20 (19500 mAh). Deshabilitando todos los servicios, se ha medido un promedio de consumo de corriente de 400 mAh (4.5 V), lo cual permite al dispositivo un tiempo de vida de 39 horas considerando un 80% de eficiencia en las bateries.
2) Software: Se ha instalado un sistema operativo Raspbian que es una versión GNU/Linux optimizada para RPi, basada en una distribución Debian. Para implementar una red mallada inalámbrica, se ha usado el protocolo de routing Babel [24], que es un protocolo que evita bucles, proactivo y basado en el algoritmo de vector distancia. Para ello se ha instalado el software Quagga [24], que implementa el protocolo Babel, con licencia GPL.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y TEST BEDS

Con los dispositives descritos en el apartado anterior, se ha evaluado la molèstia subjetiva siguiendo el modelo de molèstia de Zwicker [9]. Inicialmente, se simularon las restriccions

impuestas por las diferentes opciones hardware y después se procesaron los datos para analizar las plataformas reales en la red, comparando las medidas de ruido con el equipo calibrado.
Se han usado los siguientes dispositivos en estos experimentos: a) nodos RPi con una frecuencia de muestreo de 22050 Hz y 16 bits/muestra, b) motas TmI con frecuencia de muestreo de 8 y 20 kHz y 12 bits/muestra (notadas como TmI8 y TmI20 respectivamente), c) un grabador digital profesional (DR) Sound Lab Zoom H6, usando una frecuencia de muestreo de 44.1 kHz y 24 bits/muestra, y d) un sonómetro estándar de tipo I (CESVA SC-310). El DR se usa para registrar diferentes audios y calcular y medir los parámetros psicoacústicos. El sonómetro CESVA SC-310 se usa para calibrar y comprobar las diferentes medidas al mismo tiempo que los experimentos.

4.1 Resultados de simulación

Usando los ficheros de audio previamente registrados de un ruido de tráfico con el DR, se analizan el promedio y desviación estándar del $L_{eqA;10s}$ y N, con las restricciones impuestas por las plataformas RPi y TmI de frecuencia de muestreo, bits/muestra y duración del audio registrado. Se muestra en la fila del DR(24) los valores exactos (sin restricciones) y en las filas sifuientes, los resultados para cada opción: la RPi, TmI8 y TmI20. En particular para el TmI, ya que la RAM disponible para el registro de audio es sólo 8KB, por los que se han analizado estos parámetros sobre secuencias de audio de 500 y 200 ms, para la TmI8 y la TmI20 respectivamente, así como secuencias de audio 10s partido, notado como c10s (c: concatenado). Se ha creado una secuencia de audio mediante la concatenación de diversos trozos de audio de 500 y 200 ms, suponiendo que se registra los trozos en la RAM de 8KB y los grabamos en la memoria Flash. Si se analizan las medidas y los errores relativos comparados con el DR(24), los valores $L_{eqA;10s}$ están en ±1 dBA. Sin embargo en la molestia, tenemos errores relativos de 1.2% usando RPi y más del 30% usando la TmI. Cabe notarse que usando secuencias de audio concatenadas de 10s en la TmI, las medidas de $L_{eqA;10s}$ son correctas, pero no las de N. La razón para ello es que el experimento no se realiza sobre una secuencia de audio continua y eso afecta fuertemente a los parámetros psicoacústicos. Además la Tabla V muestra los valores promedio de L, S, R y F, que se calcularon para estimar N. Se puede ver las similitudes entre el DR(24) y RPi, y las diferencias existentes con las motas TmI, en particular para L, S y R. Cabe notar que usando secuencias de audio de 200 y 500 ms, no podemos calcular desviaciones estándar (n/a) para N, L y S en las Tablas IV y V, ya que sólo tenemos un valor del parámetro como se ve en la Tabla III.

Device (bits)/$f_s(kHz)$/size	$\overline{N}$(std. deviation)	$L_{eqA,10s}$
DR (24)/44.1/(10s)	17.12 (5.10)	73.94
RPi (16)/22/(10s)	17.34 (5.33)	73.93
TmI (12)/20/(0.2s)	11.20 (n/a)	n/a
TmI (12)/8 /(0.5s)	10.93 (n/a)	n/a
TmI (12)/20/(c10s)	158.08 (44.90)	73.90
TmI (12)/8/(c10s)	118.08 (28.55)	73.81

Tabla IV: Análisis del promedio y desv.std de N y $L_{eqA;10s}$ con una secuencia de 10s de audio de ruido de tráfico, usando las restricciones simuladas impuestas por la RPi y la TmI. La grabadora digital (DR) muestra valores exactos. Para la dispositivo se especifica la resolución (bits/muestra) y la frecuencia de muestreo f_s(kHz). Para la TmI, se incluyen los resultados de las secuencias de 200ms y 500ms

Device	$\overline{L}$	$\overline{S}$	$\overline{R}$	$\overline{F}$
DR	7.41(3.27)	1.20(0.27)	0.96(0.27)	0.04(0.02)
RPi	7.54(3.08)	1.18(0.26)	0.95(0.26)	0.04(0.01)
TmI20(0.2s)	7.75(n/a)	0.71(n/a)	0.23(0.19)	0(0)
TmI8(0.5s)	6.24(n/a)	0.83(n/a)	0.53(0.27)	0(0)
TmI20	12.92(6.41)	1.44(0.35)	8.57(3.47)	0(0)
TmI8	12.46(4.60)	0.92(0.16)	6.46(2.42)	0.01(0.01)

Tabla V: Análisis del promedio y desv.std de L, S, R y F con una secuencia de 10s de audio de ruido de tráfico, usando las restricciones simuladas impuestas por la RPi y la TmI. La grabadora digital (DR) muestra valores exactos. Para la TmI, se incluyen los resultados de las secuencias de 200ms y 500ms

4.2 Calibración de nodos sensores

Antes de preparar el test de red, se ha realizado una calibración estándar usando un pistófono, para evitar el desalineamiento en los parámetros de medida debido a los desajustes en las sensibilidades de los micrófonos y las respuestas en frecuencia. Se compararon las medidas con las de un sonómetro estándar de Tipo I (CESVA SC-310) y mostró un error menor a ±2dB, tanto para las medidas cortas como las largas, excepto en el caso de la TmI que sólo mantuvo la calibración unos pocos minutos. Diversas razones pueden explicar este problema con las TmI: a) un mal apantallamiento entre los circuitos analógicos y digitales y b) un voltaje de referencia inestable debido a fluctuaciones de la batería.

4.3 Desarrollo de la red y evaluación del ruido del tráfico

El test de la red fue realizado en una implementación vertical y horizontal. En la Figura 4, la línea negra detalla el desarrollo y los círculos blancos indican las localizaciones de los nodos. En vertical, se usó la fachada de una torre de 50 metros de altura (llamada “Torre Miramar”), como puede verse en la parte izquierda de la Figura 4, cerca de la autovía A7 en un área congestionada de tráfico de Valencia. Esta torre tiene 10 pisos, del 0 (piso bajo) al 9, y está situada en el medio de una rotonda. La rotonda tiene diversas cascadas y fuentes, y en la base de la torre están los inyectores de agua. En horizontal, se ha medido cada 20 metros sobre una distancia de 290 metros desde la base de esta torre, con el fin de crear un mapa sonoro. Inicialmente, una vez se ha hecho la calibración, para evaluar el funcionamiento de los dispositivos reales (RPi y TmI), se midió el ruido en diferentes pisos, entre las 8:00 y la 9:00 (hora punta) en la semana 11 del año 2014.

Figura 4: Detalle del desarrollo de red vertical y horizontal a las afueras de Valencia (salida hacia Barcelona – Autovía A7). En vertical, sobre la “Torre de Miramar” (de 50 m), en horizontal sobre una distancia de 290 m

La Tabla VI muestra el promedio N, con el valor de $L_{eqA,T}$ obtenido con el CESVA SC-310, en los pisos 0, 4 y 9 para la RPi, DR, TmI8 y TmI20. Si analizamos otra vez las medidas y los errores relativos comparados con el DR(24), la RPi tiene un 12% de error aproximadamente (debido al micrófono, su orientación y la plataforma en sí misma), pero la TmI tiene un error mayor del 22%. Se puede considerar razonable valores de alrededor del 10-12%. La tabla VII muestra también los promedios de L, S, R y F. Como se esperaba, vemos similitudes entre el DR y RPi y las diferencias usando las TmIs (TmI8 y TmI20).

Floor	$L_{eqA,10s}$	*DR*	*RPi*	*TmI8*	*TmI20*
0	71.0	126.48	142.6	98.58	52.94
4	68.3	98.28	110.47	145.45	139.13
9	67.2	88.73	99.80	101.32	42.13

Tabla VI: $L_{eqA,10s}$ y N promedio en los pisos 0, 4 y 9 con DR, RPi, TmI8 y TmI20 reales

La tabla VII muestra los percentiles L10 y L90 para N, los cuales son niveles de molestia excedidos durante el 10% y el 90% del tiempo respectivamente. Los valores de las TmIs son muy diferentes de aquellos del RPi y DR.

Floor	*DR*	*RPi*	*TmI8*	*TmI20*
0	153.03/107.02	174.97/120.45	131.92/26.64	77.45/6.04
4	116.02/81.77	130.31/91.54	180.83/52.22	219.56/24.09
9	102.55/75.86	114.62/86.23	132.14/40.47	54.62/8.64

Tabla VII: Niveles estadísticos en los pisos 0, 4 y 9 con DR, RPi, TmI8 y TmI20 reales

Finalmente, debido a sus pobres y poco fiables medidas, las opciones de TmI8 y TmI20 no se han considerado para realizar otras pruebas. Las Figuras 5 y 6, muestran los valores promedio usando el RPi y DR para $L_{eqA,10s}$ y N, en el desarrollo vertical y horizontal respectivamente. En cada posición podemos medir durante 2 minutos con el RPi y el DR. La desviación estándar se introduce como barras de error para los diferentes valores. Cabe notar que RPi y DR utilizan micrófonos diferentes con orientaciones ligeramente distintas, lo que explica la desviación en los valores de las medidas. Basándose en los resultados, es posible confirmar que la RPi y DR tienen una precisión similar para medir los parámetros psicoacústicos, por lo que se puede decir que las RPis son plataformas de bajo coste capaces de realizar monitorización de la contaminación sonora.

Además, se realizó un análisis de correlación entre las diferentes variables psicoacústicas, la molestia y el $L_{eqA,10s}$ (ver Figura 7) y en él se puede observar una correlación adecuada entre el $L_{eqA,10s}$ y los parámetros psicoacústicos para el ruido de tráfico. En particular, N y L muestran una correlación alta con $L_{eqA,10s}$, mientras que S, R y F muestran baja correlación

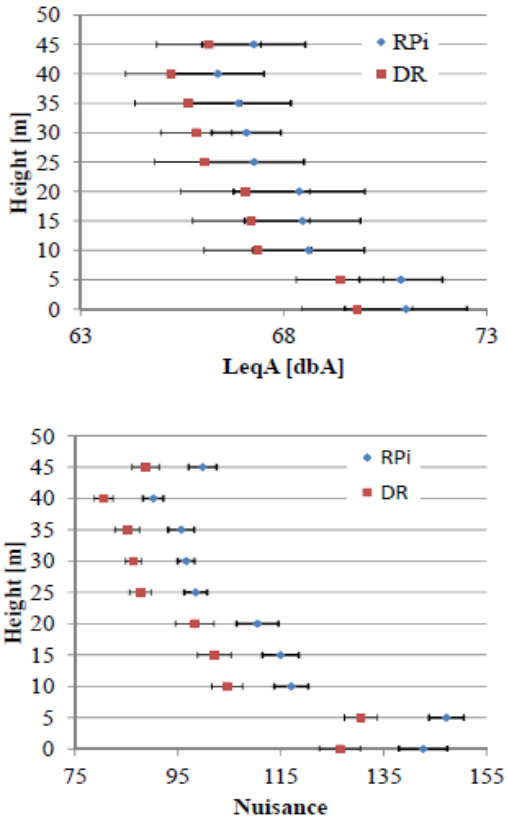

Figura 5: Medidas de L_{eqA} y N en el desarrollo vertical con las RPi y DR

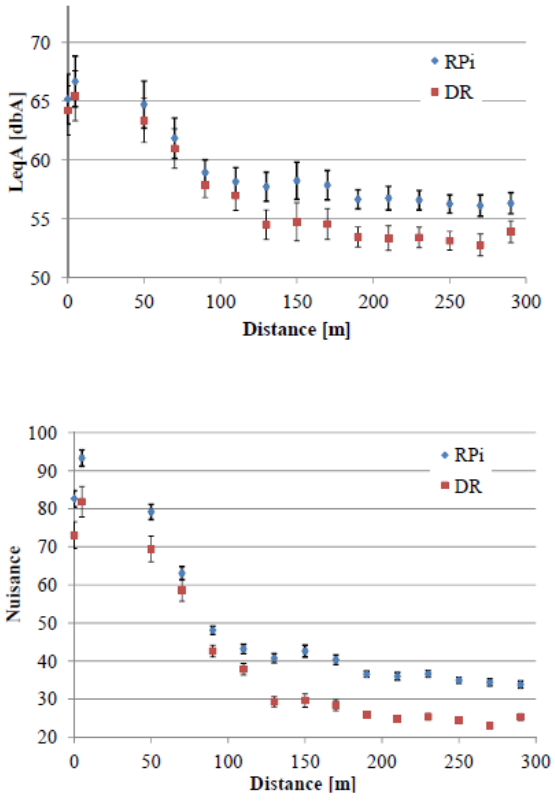

Figura 6: Medidas de L_{eqA} y N en el desarrollo horizontal con las RPi y DR

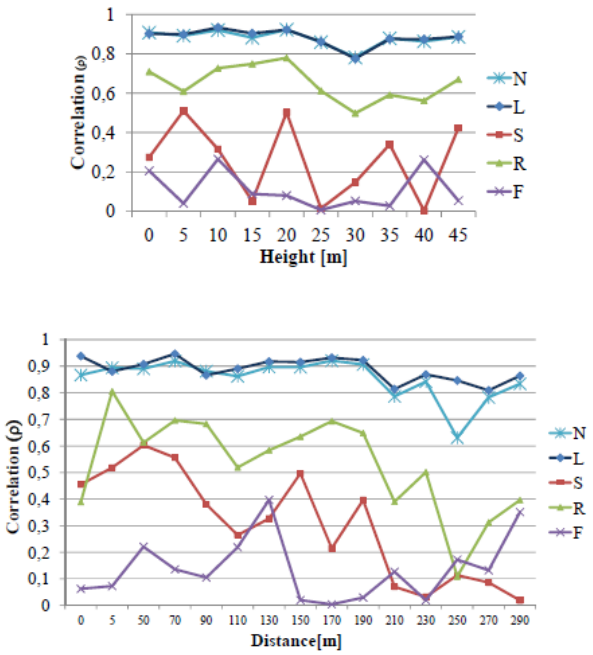

Figura 7: Análisis del coeficiente de correlación (ρ) entre el LeqA y los parámetros psicoacústicos (N, L, S, R, F) en cada posición de los nodos, tanto en el desarrollo de red vertical (arriba) como en el horizontal (abajo)

5. CONCLUSIONES

En este artículo se conjugan una serie de experiencias usando las plataformas TmI y RPi para la toma de datos de contaminación acústica por ruido de tráfico en exteriores, midiendo la molestia subjetiva y apuntando los potenciales y limitaciones de estas dos opciones hardware. Aunque que los resultados mostraron la adecuación de uso de las WASN como sensores de contaminación sonora, en particular basadas en plataformas RPi, también se plantearon limitaciones prácticas en las plataformas comerciales. La opción basada en la plataforma TmI no permitía por ella misma obtener medidas de los parámetros psicoacústicos debido a su poca memoria RAM y si circuito de registro de audio que resultó poco útil. También se vió que la concatenación de secuencias de audio (para evitar los problemas de RAM) afectaban seriamente a los valores de los parámetros psicoacústicos.

Se exploró la información adicional en relación a la monitorización de ruido del tráfico mediante un análisis de correlación con el $L_{eqA,10s}$. A partir de él se vió que, para el ruido de tráfico, $L_{eqA,10s}$ correlaciona con N y L, pero no lo hace con S, R y F. Esto confirma que el modelo de Zwicker proporciona más información que las medidas basadas en el nivel de ruido equivalente ($L_{eqA,10s}$), para evaluar la molestia subjetiva.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y el programa FEDER mediante el proyecto con referencia TEC2012-37945-C02-02.

7. REFERENCIAS

[1] END, “Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the Assessment and Management of Environmental Noise,” July 2002.
[2] “New York City, Noise map,” acceso: 02/01/2014.
URL: http://nycopendata.socrata.com/Social-Services/ 2012-NYC-Noise-Complaints-Heat-Map/sw33-t3vk
[3] “The London Road Traffic Noise Map,” acceso: 02/01/2014.
URL: http://www.londonnoisemap.com

[4] "Department for Health and Environment of the City of Munich (Germany)," acceso: 02/01/2014. URL: http://tinyurl.com/2gg7dl
[5] B. Li, S. Tao, and R. Dawson, "Evaluation and analysis of traffic noise from the main urban roads in Beijing ," Applied Acoustics, vol. 63, no. 10, pp. 1137 – 1142, 2002.
[6] M. Mircea, I. Kovacs, I. Stoian, A. Marichescu, and A. Tepes-Bobescu, "Strategic mapping of the ambient noise produced by road traffic, accordingly to European Regulations," in Automation, Quality and Testing, Robotics, 2008. AQTR 2008. IEEE International Conference on, vol. 3. IEEE, 2008, pp. 321–326.
[7] International Electrotechnical Commission, "61672: Sound level meters Standard."
[8] M. Raimbault, "Urban soundscapes: Experiences and knowledge," Cities, vol. 22, no. 5, 2005.
[9] H. Fastl and E. Zwicker, Psychoacoustics: Facts and Models, ser. Springer series in information sciences. Springer, 2007.
[10] D. Ouis, "Annoyance from road traffic noise: a review," Journal of environmental psychology, vol. 21, no. 1, pp. 101–120, 2001.
[11] M. Rychtáriková and G. Vermeir, "Soundscape categorization on the basis of objective acoustical parameters," Applied Acoustics, vol. 74, no. 2, pp. 240–247, Feb. 2013.
[12] S. Santini and A. Vitaletti, "Wireless Sensor Networks for Environmental Noise Monitoring," Aachen, Germany, pp. 98–101, Jul 2007.
[13] S. Santini, B. Ostermaier, and A. Vitaletti, "First Experiences Using Wireless Sensor Networks for Noise Pollution Monitoring," in Proceedings of the 3rd ACM Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks (REALWSN'08), Glasgow, United Kingdom, Apr 2008.
[14] J. Polastre, R. Szewczyk, and D. Culler, "Telos: enabling ultra-low power wireless research," in Information Processing in Sensor Networks, 2005. IPSN 2005. Fourth International Symposium on, april 2005, pp. 364 – 369.
[15] I. Hakala, I. Kivela, J. Ihalainen, J. Luomala, and C. Gao, "Design of low-cost noise measurement sensor network: Sensor function design," in Sensor Device Technologies and Applications (SensorDevices), 2010 First International Conference on. IEEE, 2010, pp. 172–179.
[16] J. L. Ilkka Kivela, Chao Gao and I. Hakala, "Design of noise measurement sensor network: Networking and communication part," in The Fifth International Conference on Sensor Technologies and Applications, 2011, pp. 280–287.
[17] S. Santini, B. Ostermaier, and R. Adelmann, "On the Use of Sensor Nodes and Mobile Phones for the Assessment of Noise Pollution Levels in Urban Environments," in Proceedings of the Sixth International Conference on Networked Sensing Systems (INSS 2009), Pittsburgh, PA, USA, Jun 2009.
[18] N. Maisonneuve, M. Stevens, M. Niessen, and L. Steels, "NoiseTube: Measuring and mapping noise pollution with mobile phones," in Information Technologies in Environmental Engineering, ser. Environmental Science and Engineering, I. Athanasiadis, A. Rizzoli, P. Mitkas, and J. Gmez, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2009, pp. 215–228.
[19] N. Maisonneuve, M. Stevens, M. E. Niessen, P. Hanappe, and L. Steels, "Citizen noise pollution monitoring," in Proceedings of the 10th Annual International Conference on Digital Government Research: Social Networks: Making Connections between Citizens, Data and Government. Digital Government Society of North America, 2009, pp. 96–103.
[20] S. Gelfand, Hearing: An Introduction to Psychological and Physiological Acoustics, Fourth Edition. Taylor & Francis, 2004.
[21] J. Hill, R. Szewczyk, A. Woo, S. Hollar, D. Culler, and K. Pister, "System architecture directions for networked sensors," SIGARCH Comput. Archit. News, vol. 28, no. 5, pp. 93–104, Nov. 2000.
[22] "The MultiHopLQI protocol," 2009, acceso: 02/01/2014. URL: http://www.tinyos.net/tinyos-1.x/tos/lib/MultiHopLQI/
[23] V. Gallart, S. Felici-Castell, M. Delamo, A. Foster, and J. J. Perez, "Evaluation of a real, low cost, urban wsn deployment for accurate environmental monitoring," in Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS), 2011 IEEE 8th International Conference on. IEEE, 2011, pp. 634–639.
[24] J. Chroboczek, "The Babel Routing Protocol, RFC 6126," Quagga Routing Software Suite, GPL licensed, April. 2011, accessed: 02/03/2014. Available: http://www.quagga.net