

PROTOTIPO EXPERIMENTAL PARA LA MONITORIZACIÓN DE RUIDO EN TIEMPO REAL EN ENTORNOS URBANOS

Juan Andrés Mariscal-Ramírez

José Ángel Fernández-Prieto

Joaquín Cañada-Bago

Manuel Ángel Gadeo-Martos

UNIVERSIDAD DE JAÉN

Resumen

Numerosos estudios ponen de manifiesto los riesgos que la exposición a entornos ruidosos puede ocasionar en las personas, como hipertensión, pérdidas auditivas, estrés, insomnio y baja productividad. En los últimos años, la comunidad europea ha mostrado un gran interés en controlar y regular la contaminación acústica redactando la directiva 2002/49/EC que impone a los estados miembros la obligación de disponer de mapas de ruido en determinadas zonas como grandes ciudades, principales aeropuertos, importantes vías ferroviarias y carreteras.

El método clásico para la generación de mapas de ruido se basa en la medida del nivel de presión sonora equivalente realizada por sonómetros. El principal inconveniente de este método es que los mapas de ruido están basados en medidas puntuales. Además, no puede obtener la evolución temporal de las medidas.

El presente trabajo propone la utilización de redes de sensores inalámbricos para la elaboración de los mapas de ruido. Las redes de sensores inalámbricas están formadas por un número importante de nodos sensores, dispositivos de bajo coste con capacidad restringida de proceso de información y comunicación, y alimentados normalmente por baterías.

La principal ventaja de la propuesta es que se pueden obtener mapas espaciales y temporales basados en medidas reales del nivel de presión sonora, así como medidas en tiempo real de las zonas a medir (calles, aeropuertos, etc.).

En este sentido, presentamos un prototipo de sensor, que utiliza un algoritmo basado en análisis en frecuencia para la obtención del indicador de ruido. En la actualidad, no se conocen trabajos relacionados con la adaptación de algoritmos basados en análisis en frecuencia en redes de sensores para el cálculo de indicadores de ruido.

Para verificar el comportamiento del prototipo, se han llevado a cabo una serie de pruebas comparativas con un sonómetro comercial, entre las que destacan las realizadas en una zona urbana. Los resultados muestran que las diferencias entre el dispositivo y el sonómetro son inferiores al 1%, mostrando la validez de nuestro prototipo para la generación de mapas de ruido en tiempo real en un entorno urbano.

Abstract

Many studies have demonstrated that exposure to environmental noise can cause problems in people, such as hypertension, hearing loss, stress, insomnia and low productivity. According to the European Union (EU), noise pollution is a serious risk to public health and productivity. For this reason, the EC approved a policy to reduce environmental noise in 1996. This policy resulted in Directive 2002/49/EC, which requires member states to provide accurate mappings of noise levels throughout all urban centers with more than 250,000 inhabitants, main airports, major railways and roads.

Noise maps can be computed using commercial sound level meters, measuring the equivalent sound level. These devices have a number of inherent technological disadvantages, such as the lack of real-time data. Therefore, it is not possible to achieve a temporal evolution of the measured data.

This work proposes to use Wireless Sensor Networks (WSNs) to create accurate maps of noise levels in real time and space (streets, airports, etc.). WSNs are networks composed of a large number of sensor nodes, low cost devices with limited computational capability and communications, and normally powered by batteries. In this sense, we present a sensor prototype, which uses an algorithm based on frequency domain analysis for calculating the noise indicator.

To the best of our knowledge, the approach presented in this paper is the first one to propose an algorithm based on frequency domain analysis to calculate noise indicators in a sensor node of a WSN.

In order to verify the performance of the proposed system, several experiments have been carried-out using a variety of scenarios to compare the differences between the noise indicators calculated by the sensor and those from a commercial sound level meter. The results show that the difference between the sensor and the SLM is less than 1%, and it demonstrates that the proposed prototype can be used to create noise maps in real time for urban areas.

Palabras clave: ruido acústico, monitorización, tiempo real, mapas ruido

Área temática: Actuaciones sostenibles del espacio urbano.

1. Introducción

La contaminación acústica es un problema que afecta a millones de persona en todo el mundo. Numerosos estudios ponen de manifiesto los riesgos que puede acarrear la exposición al ruido, pérdidas auditivas, insomnio, estrés, reducción de la productividad y desordenes en las relaciones sociales. A raíz de estos estudios, surge la necesidad de controlar el ruido en áreas de especial sensibilidad como colegios, hospitales y guarderías. Según Organización Mundial de la Salud la contaminación acústica es

responsable cada año de 50.000 ataques al corazón en Europa. Niveles de ruido por encima de 60 decibelios son los causantes del 1,8 % de dichos ataques al corazón. De acuerdo con la Comisión Europea (CE), la contaminación acústica es un serio riesgo para la salud y la productividad. Por este motivo, en 1996 la CE puso en marcha políticas para la reducción del ruido (European Commission, 1996). Estas políticas derivaron en la Directiva 2002/49/EC (Directive 2002/49/EC, 2002), requiriendo a los estados miembros mapas precisos de ruido en zonas como:

- Núcleos urbanos con una población mayor de 250.000 habitantes.
- Principales carreteras con más de 6 millones de desplazamientos al año.
- Vías ferroviarias que superen los 60.000 pasajeros al año.
- Aeropuertos con más de 50.000 despegues o aterrizajes anuales.

Normalmente los mapas de ruido se generan mediante el uso de simuladores, que utilizan parámetros de tráfico, como el tipo de vía, tipo de vehículo, patrón de propagación del ruido y tipo de entorno. Aunque, los datos proporcionados por este tipo de simulaciones carecen del grado de precisión necesario. En 2006, el grupo de trabajo de la comisión europea para la evaluación de la exposición al ruido (WG-AEN) redactó un artículo (European Commission, 2006), en el cual se resalta la importancia de disponer de datos reales de ruido en las zonas de interés. Para ello, se pueden utilizar sonómetros comerciales distribuidos por las diferentes zonas a monitorizar. Aunque, este tipo de implementación posee numerosas limitaciones derivadas de la tecnología utilizada, tales como falta de conocimiento de la situación en tiempo real, incapacidad para hacer previsiones de ruido en tiempo real y toma de acciones preventivas o correcciones en tiempo real.

Teniendo en cuenta las limitaciones anteriores, numerosos autores recomiendan la utilización de redes de sensores inalámbricos para la monitorización de la contaminación acústica y creación de mapas de ruido en tiempo real (Santini, 2008; Bhusari, 2013; Gubbi, 2013; Santini, 2009; Santini, 2007; Filipponi, 2008). Sin embargo, no se han encontrado trabajos de investigación que hagan uso de algoritmos basados en el dominio de la frecuencia mediante sensores inalámbricos, con el fin de obtener indicadores de ruido.

Este trabajo de investigación, presenta el desarrollo de un prototipo de sensor que hace uso de un algoritmo experimental basado en el dominio de la frecuencia, para obtener un indicador de ruido en tiempo real.

El resto del artículo dispone de la siguiente estructura. Sección 2 el estado del arte. Sección 3 los objetivos propuestos. Sección 4 la metodología. Sección 5 los resultados experimentales, y finalmente, las conclusiones en la Sección 6.

2. Estado del arte

El indicador de ruido utilizado como criterio para evaluar el ruido y elaboración de mapas de ruido, de acuerdo con el estándar ISO 1999 (ISO Standard, 1999), es L_{eq} ,

denominado “nivel del presión sonora continuo equivalente”. Este indicador se define como:

$$L_{eq,T} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right) \quad (1)$$

donde $p(t)$ representa la media de la raíz cuadrada del nivel de presión sonora instantáneo producido por la onda acústica, p_0 , es el valor de referencia correspondiente a la mínima variación que es capaz de detectar el oído humano a 1KHz, $2 \times 10^{-5} Pa$ y T es el intervalo temporal. Para simular la respuesta en frecuencia del oído humano, $p(t)$ es filtrado ($p_A(t)$), mediante un filtro de ponderación que para el caso del oído humano se denomina tipo A (Figura 1).

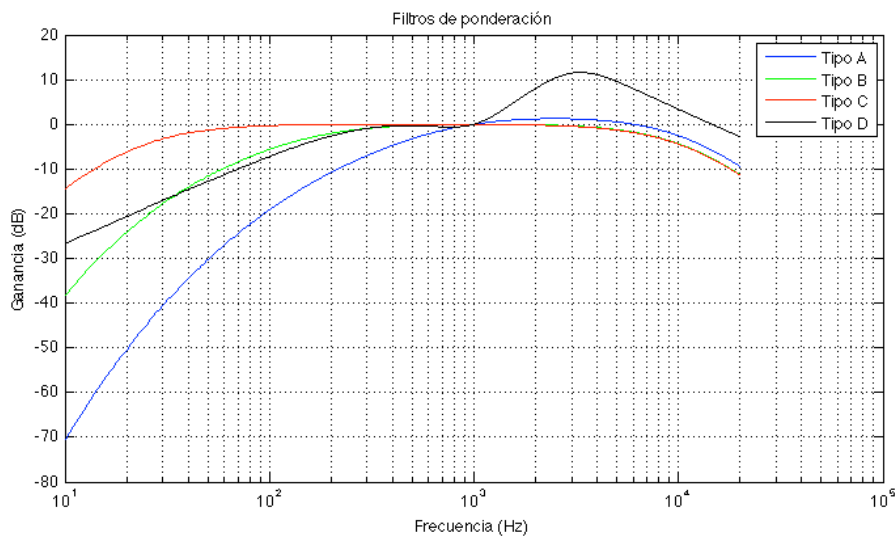


Figura 1. Filtros de ponderación.

El indicador L_{Aeq} se mide en decibelios (dBA), y se obtiene calculando el nivel de presión sonora ponderado de una fuente de ruido constante sobre un intervalo temporal T . La energía de la onda acústica es igual a la variación de presión sonora sobre dicho intervalo (Kumar-Rana, 2010). Por lo que, el nivel de presión sonora continuo ponderado (filtro tipo A), viene definido por la expresión:

$$L_{Aeq,T} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_A(t)^2}{p_0^2} dt \right) \quad (2)$$

Este algoritmo se basa en un análisis en el dominio temporal, lo que permite el cálculo del nivel de presión sonora con un bajo coste computacional. Sin embargo, este tipo de implementación depende en gran medida del tipo de micrófono utilizado y sobre todo de su sensibilidad. Por lo tanto, al hacer uso de este tipo de análisis, no se puede obtener información que permita caracterizar de forma precisa la señal acústica. Otra

desventaja importante, está relacionada con la implementación de los filtros de ponderación. En la mayoría de los casos debido a su complejidad, es recomendable la utilización de filtros hardware. Lo que supone un incremento en los costes de diseño y fabricación, así como, la pérdida de información de la señal acústica original. Debido a esto, los sonómetros comerciales no hacen uso de este tipo de algoritmo.

El algoritmo integrado en los sonómetros comerciales para el cálculo de L_{Aeq} , utiliza un análisis en el dominio de la frecuencia mediante la transformada rápida de Fourier (FFT). Este algoritmo se basa en la relación de Parseval,

$$\epsilon_x = \sum_{n=0}^{N-1} |x[n]|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X[k]|^2 \quad (3)$$

donde $x[n]$ es la señal acústica en tiempo discreto, $X[k]$ es la transformada de Fourier en tiempo discreto (DTFT en inglés), y N es el número de muestras. La relación de la Parseval determina que la energía total de la señal en el dominio del tiempo es equivalente a la energía total en el dominio de la frecuencia. Este tipo de análisis, posee un gran número de ventajas con respecto al análisis en el dominio del tiempo. Estas ventajas, se basan en la capacidad de caracterizar la señal acústica mediante el conocimiento de la respuesta en frecuencia, detección de picos en frecuencia, detección de patrones de frecuencia, y la facilidad de aplicar filtros de ponderación. Por el contrario, este tipo de algoritmo es más complejo y tiene asociado un mayor coste computacional.

Algunos autores resaltan la importancia de las redes de sensores y la capacidad de esta tecnología para sobreponerse a las limitaciones de los actuales sistemas de monitorización acústica (Santini, 2008), (Bhusari, 2013), (Gubbi, 2013). El rango de aplicación de este tipo de dispositivos es muy amplio. Por ejemplo, pueden ser utilizados en monitorización de parámetros medioambientales, aplicaciones meteorológicas, detección de desastres naturales, medidas de ruido, monitorización de edificios inteligentes, monitorización médica, monitorización de parámetros en de calidad de la tierra y cultivos (aplicaciones agrícolas), y automatización industrial.

Debido a esto, estudios recientes han propuesto la utilización de redes de sensores inalámbricos para la generación de mapas de ruido (Santini, 2008; Bhusari, 2013; Gubbi, 2013; Santini, 2009; Santini, 2007; Filipponi, 2008; Kumar-Rana, 2010). Lo que se traduce en una evolución con respecto a las soluciones con sonómetros. Estas mejoras se basan en: conocimiento de la situación en tiempo real, realizar estimaciones de ruido en tiempo real, capacidad de tomar decisiones preventivas y correctivas en tiempo real, toma de decisión de forma autónoma en tiempo real, utilizan protocolos de comunicaciones estándar, facilidad de instalación en cualquier tipo de entorno, y la posibilidad de integrar inteligencia artificial en los nodos.

Los trabajos de investigación relacionados con la contaminación acústica en redes de sensores son bastantes escasos. Uno de los primeros trabajos de investigación (Santini, 2007), se enfocaba en conceptos generales de ruido y expresiones matemáticas necesarias para el cálculo de indicadores de ruido en cada nodo. Este trabajo junto con (Filipponi, 2008), establecen las bases teóricas para el desarrollo de sistemas de monitorización acústica mediante redes de sensores. En resumen, los autores detallan

los requerimientos mínimos relacionados con el tipo de hardware, frecuencia de muestreo, arquitectura de red, protocolos de comunicaciones, sincronización y localización.

En cuanto a trabajos donde se realizan medidas reales en entornos urbanos, existen trabajos como (Santini, 2008) y (Santini, 2009). La plataforma de desarrollo utilizada fue Tmote Invent (Moteiv, 2013). Estos sensores disponen de un micrófono integrado y de un software específico para la obtención de niveles de presión sonora. La arquitectura de red utilizada fue de tipo centralizada, y mediante tinyLAB (Santini, 2009) se agregaba la información de cada nodo para posteriormente mostrarla gráficamente. El algoritmo software utilizado para el cálculo del indicador de ruido hace uso de un análisis en el dominio del tiempo, lo que conlleva una serie de limitaciones comentadas anteriormente. Por otro lado, los autores no tuvieron en cuenta la respuesta del oído humano y no utilizaron ningún tipo de filtro de ponderación.

En 2013, se publicó un trabajo (Gubbi, 2013) donde se presentaba un sistema para la monitorización continua de ruido en entornos urbanos. Dicho sistema procesa la información de la señal de audio de forma analógica y la convierte en niveles de presión sonora para garantizar la privacidad de los datos. Esto proporciona una triple ventaja en cuanto a la monitorización de ruido: a) captura continua de la señal acústica en tiempo real, b) costes de CPU y memoria mínimos en los nodos, y c) permite disponer de todo el rango de frecuencias audibles. Sin embargo, todo el procesamiento se realiza vía hardware, lo que lleva consigo las siguientes desventajas:

- 1) No es posible obtener información sobre la respuesta en frecuencia de la señal.
- 2) No es posible la detección de picos o patrones de frecuencia.
- 3) No es posible aplicar ventanas temporales.
- 4) Imposibilidad de utilizar varios tipos de filtros de ponderación.

El presente trabajo de investigación, es el primero en proponer un prototipo experimental que hace uso de un algoritmo basado en un análisis en el dominio de la frecuencia para calcular un indicador de ruido (L_{Aeq}) en tiempo real. Nuestro sistema dispone de ventajas significativas que permiten resolver las limitaciones de los sistemas clásicos y además, todo es configurable vía software.

3. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo de investigación, se basa en el diseño e integración de un algoritmo experimental en un prototipo de sensor, para el cálculo de un indicador de ruido en tiempo real. Este algoritmo, hace uso de un análisis en el dominio de la frecuencia basado en la FFT.

Para llevarlo a cabo, se fijaron los siguientes objetivos:

- Utilización de un sensor basado en hardware/software libre y estándar, para realizar las medidas de los niveles de presión sonora. El algoritmo será capaz de

configurar el convertor analógico digital integrado en el sensor y llevar a cabo el muestreo de la señal acústica.

- Integración de un pequeño micrófono en el sensor.
- Cálculo de la FFT en el sensor. Debido a las limitaciones del sensor, se tendrá que diseñar y adaptar un nuevo algoritmo que permita obtener el espectro de frecuencia de la señal acústica.
- Aplicar filtro de ponderación tipo A, para simular respuesta del oído humano. Posibilidad de aplicar otro tipo de filtros de ponderación.
- Cálculo del nivel de presión sonora en tiempo real, mediante el cómputo de las diferentes componentes en frecuencia.

4. Metodología

4.1 Plataforma experimental

El dispositivo elegido como prototipo fue un modelo de la plataforma Arduino (Arduino, 2014). Arduino es una plataforma de código abierto diseñada para el desarrollo de soluciones relacionadas con redes de sensores. Su hardware utiliza componentes estándar y su software se basa en C/C++. Teniendo en cuenta los objetivos propuestos en la sección 3, se ha decidido utilizar un Arduino Due (Arduino Due, 2014). En la Figura 2, se muestra el dispositivo elegido como prototipo.

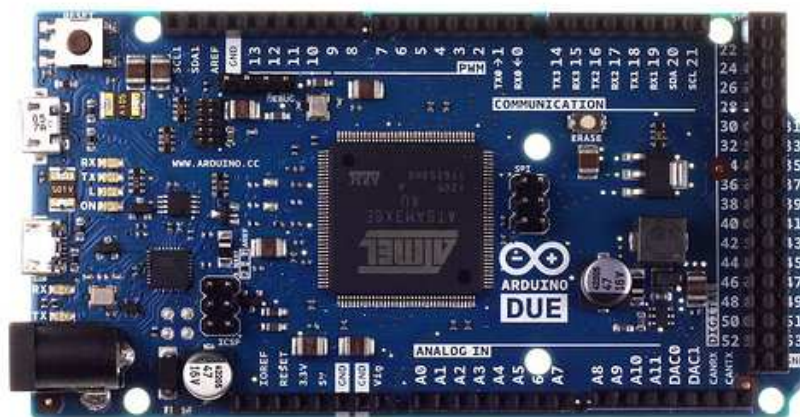


Figura 2: Arduino Due

Este dispositivo dispone de las siguientes especificaciones técnicas:

- Procesador Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3, características:
 - 32 bit.
 - Velocidad de reloj de 82 MHz.

- SRAM de 96 KBytes.
- 512 KBytes de memoria Flash.

- 54 puertos de entrada/salida digitales.
- 12 puertos analógicos de entrada con una resolución de dato hasta 12 bit.
- 2 puertos analógicos de salida.

La alimentación del sensor se ha llevado a cabo mediante una pequeña batería recargable de ión de litio de 3,7V con una capacidad de 770mAh. En cuanto su capacidad de comunicación, dispone de varias opciones mediante el uso de distintos módulos, como GPRS/3G, IEEE 802.11b/g, IEEE 802.15.4 y Bluetooth. Por otro lado, es necesaria la utilización de un micrófono para poder realizar las medidas de ruido. Para ello, se ha hecho uso de un pequeño micrófono tipo electret (Figura 3) que se ha conectado a uno de los puertos de entrada analógicos del Arduino Due.



Figura 3: Micrófono

4.2 Algoritmo basado en análisis en frecuencia

Como se comenta en la Sección 3, el objetivo de este trabajo es el diseño un prototipo de sensor, que utiliza un algoritmo basado en análisis en frecuencia para la obtención del indicador de ruido en tiempo real.

Teniendo en cuenta las limitaciones del sensor, se han llevado a cabo una serie de modificaciones y adaptaciones mediante diferentes técnicas de optimización para reducir el consumo de recursos. Esto se traduce en una reducción del coste computacional, memoria y del consumo de batería.

A continuación, se detalla la estructura del sistema propuesto. En la Figura 4, se pueden ver los diferentes bloques funcionales que componen el algoritmo.

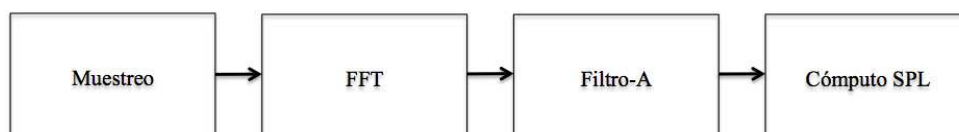


Figura 4: Bloques funcionales del algoritmo

El *primero bloque* funcional es el responsable de realizar el muestreo de la señal acústica; por lo que, se debe de configurar el conversor A/D. El estándar IEC651 Type 2 SLM (Standard IEC651, 1979), en el caso de mediciones de ruido, obliga a disponer como mínimo del espectro entre 0 KHz y 8 KHz. Por lo tanto, es necesaria una frecuencia de muestreo de 16 KHz. En nuestra propuesta, se ha optado por una frecuencia de muestreo de 33 KHz con una resolución de dato de 12 bit, ampliando el espectro de frecuencia mínimo marcado en el estándar. En cuanto al tiempo de integración o tiempo de captura, el estándar internacional fija dos clases: a) respuesta lenta (1s) y b) respuesta rápida (125 ms).

Este bloque envía las muestras al siguiente bloque, incluyendo información adicional como el tipo de ventana, frecuencia de muestreo, y la resolución de dato de bit dada por el conversor A/D.

El *segundo bloque* recibe las muestras de audio del primer bloque y las procesa para calcular la FFT. Este bloque funcional es el más importante debido a que es el encargado de realizar el análisis de la señal acústica en el dominio de la frecuencia. Por este motivo, es el bloque requiere de una mayor cantidad de memoria y CPU. Por esta razón, se llevaron a cabo numerosas pruebas de rendimiento para determinar la longitud óptima de la FFT, y de esta forma ganar en eficiencia. Además, se realizó un análisis exhaustivo de las funciones software, para reducir en memoria y en tiempo de ejecución. Para reducir el tiempo de ejecución, se propuso la siguiente configuración en el bloque de muestreo: 4.096 muestras para una respuesta rápida y 32.768 muestras para la respuesta lenta. Este tipo de optimización se basa en la propia naturaleza de la FFT, debido a que es más eficiente en cuanto al tiempo de ejecución, la utilización de vectores de datos con longitudes en base dos. Esto supone una pequeña variación en el tiempo de ambas ventanas temporales, 124 ms para la respuesta rápida y 0,99 s para la ventana lenta. Estas variaciones en las ventanas temporales son despreciables, porque no superan el 3%. Debido a las limitaciones de memoria en el sensor, no es posible obtener la FFT para una ventana temporal de respuesta lenta (0,99 s). Por lo tanto, se implementó el cálculo de la FFT únicamente para la ventana temporal de respuesta rápida (124 ms). Esto supone una disminución significativa en cuanto a consumo de recursos, una mayor autonomía, y una reducción del tiempo de ejecución. A su vez, permite utilizar la memoria restante para su uso en otros bloques funcionales.

El *tercer bloque* funcional, recibe las muestras del espectro de frecuencia de la señal acústica y se les aplica un filtrado de ponderación tipo A. Esta etapa de filtrado, permite simular la respuesta del oído humano. La expresión matemática que se utiliza normalmente para calcular las componentes del filtro de ponderación, depende de la frecuencia y obedece a la normativa IEC 61672:2003 (Normativa IEC 61672, 2003). La expresión viene definida por:

$$A(f) = 10 \log \left[\frac{1,562339^2 \cdot f^4}{(f^2 + 107,65265^2)(f^2 + 737,86223^2)} \right] + 10 \log \left[\frac{2,242881 \cdot 10^{16} \cdot f^4}{(f^2 + 20,598997^2)(f^2 + 12194,22^2)} \right]$$

Donde f es la frecuencia, y $A(f)$ es el valor de atenuación asociado.

Sin embargo, la utilización de operaciones con números de gran tamaño es una limitación para estos dispositivos. Por lo que, se propuso la utilización de una expresión

equivalente para reducir la complejidad de las operaciones matemáticas requeridas. La expresión propuesta es:

$$R_A(f) = \frac{12.200^2 - f^4}{(f^2 + 20,6^2)\sqrt{(f^2 + 107,7^2)(f^2 + 737,9^2)}(f^2 + 12.200^2)}$$
$$A(f) = 2 + 20 \log_{10}(R_A(f)) \quad (5)$$

Mediante este tipo de adaptación, es viable la integración del filtro de ponderación tipo A en el sensor. Lo que supone, una ganancia en cuanto a eficiencia en el consumo de CPU y memoria, y de esta forma, no penalizar tanto la autonomía de la batería.

Finalmente, el *cuarto bloque* realiza el cálculo de la energía de las componentes en frecuencia ya ponderadas, para obtener el nivel de presión sonora en dBA. Para ello, se hace uso de la siguiente expresión:

$$\bar{\epsilon}_x \approx \frac{2}{N \cdot \Delta t} \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}} |X_A[k]|^2 \quad (6)$$

donde $X_A[k]$ son las muestras en frecuencia ya ponderadas, N es el número de muestras y Δt es el intervalo de la ventana temporal en segundos. Desde el punto de vista de consumo de memoria y CPU, este bloque es el menos exigente. Sin embargo, se han utilizado técnicas de optimización de software (Bacon, 1994) (Muchnick, 1997) para reducir en la medida de lo posible el coste computacional, memoria necesaria y consumo de batería. Dicha optimización se basa en técnicas de codificación de bucle, como: expansión de bucles, reducción de potencia y eliminación de variables de inducción.

5. Resultados

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas realizadas para diferentes escenarios, comparando nuestro prototipo con un sonómetro comercial (PCE-353, 2014). En primer lugar, se muestra la arquitectura de red utilizada durante las pruebas. La Sección 2 con las medidas con ruido blanco. La Sección 3 las medidas con música. Y finalmente, la Sección 4 con medidas de ruido en una zona urbana.

5.1 Arquitectura de red

La arquitectura de red utilizada en los experimentos se muestra en la figura 5. Está formada por el prototipo de sensor con un micrófono integrado y un sonómetro comercial SLM PCE-353. El prototipo y el sonómetro se conectan vía USB al PC. Sólo se ha utilizado un prototipo para minimizar el error debido a la posición de este y el sonómetro con respecto a la fuente sonora.

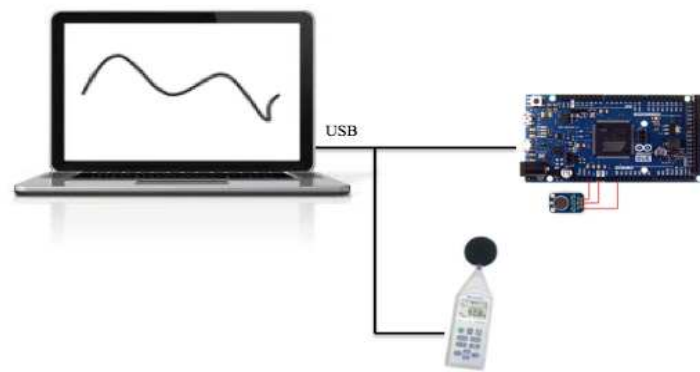


Figura 5: Arquitectura de red utilizada en los experimentos

5.2 Ruido blanco

En este experimento, se ha utilizado una señal acústica de ruido blanco (30 Hz – 20 KHz). De esta forma, se puede verificar el comportamiento del sensor para todo el rango de frecuencias audibles. Además, se han generado tres señales distintas con tres niveles de intensidad sonora: 60 dBA, 70 dBA y 85 dBA. Para cada nivel de intensidad se ha calculado el L_{Aeq} , repitiendo el experimento 29 veces. El tiempo de exposición para cada experimento ha sido de 5 segundos. Para ello, se ha utilizado una fuente sonora compuesta por dos altavoces. En la figura 6, se pueden ver las diferencias entre las medidas del prototipo y del sonómetro comercial.

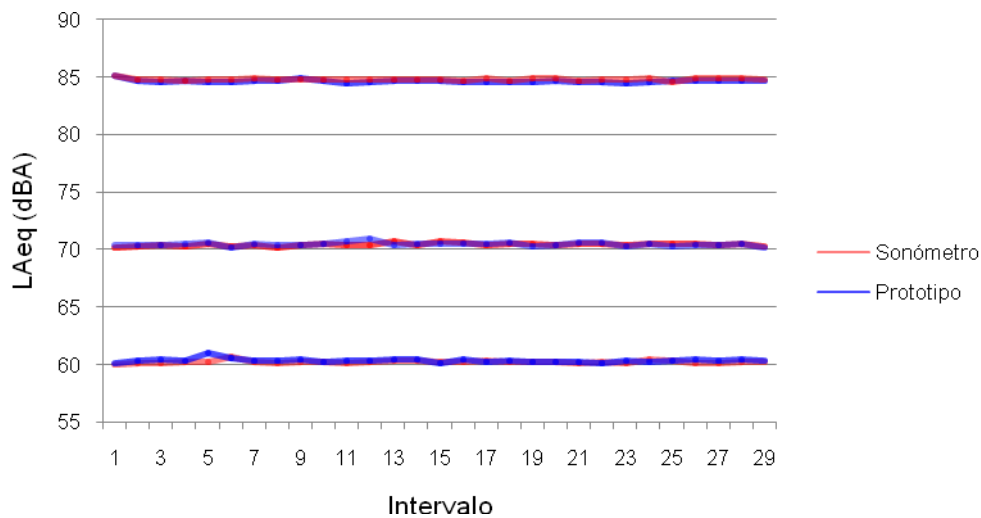


Figura 6: Test con ruido blanco

Una vez que se realizaron las medias, fue necesario cuantificar el margen de error del prototipo. Por lo que, se obtuvo la media de las 29 medidas del indicador L_{Aeq} , para cada nivel de intensidad sonora. Luego, se calculó el error absoluto (Dif) y el error relativo (%Error) entre ambos dispositivos. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Test con ruido blanco

	L_{eqA} SLM (dBA)	L_{eqA} Sensor (dBA)	Dif (dBA)	%Error
Intensidad 1	60,25	60,37	0,15	0,25
Intensidad 2	70,44	70,46	0,15	0,21
Intensidad 3	84,65	84,80	0,16	0,19
	Media:		0,15	0,22

En la tabla 1, se puede apreciar que las mayores diferencias entre ambos dispositivos se dan para el nivel de intensidad 3. Dichas diferencias se traducen en 0,15 dBA y 0,22 dBA, respectivamente. Si se tiene en cuenta la media obtenida para los tres niveles de intensidad sonora, la diferencia entre el prototipo y el sonómetro no supera el 0,23% o 0,16 dBA.

A raíz de los resultados obtenidos con ruido blanco, se puede apreciar que la respuesta del sonómetro es muy buena. Se tiene que tener en cuenta, que no se captura todo el espectro audible ($f_s=33$ KHz) y la sincronización entre ambos dispositivos no es perfecta. Aun así, la diferencia respecto del sonómetro es muy inferior a 1 dBA, lo que se puede considerar despreciable.

5.3 Música

En este escenario de prueba, se ha utilizado una pista de audio de un concierto de Michael Jackson y se han realizado medidas durante 30 minutos. La frecuencia de muestreo del audio fue de 44,1 KHz, con lo que se cubre sobradamente el espectro audible. Los niveles de presión sonora se han calculado cada segundo. El indicador de ruido L_{Aeq} , se ha calculado para intervalos de 1 minuto hasta un total de 29 intervalos (Figura 7).

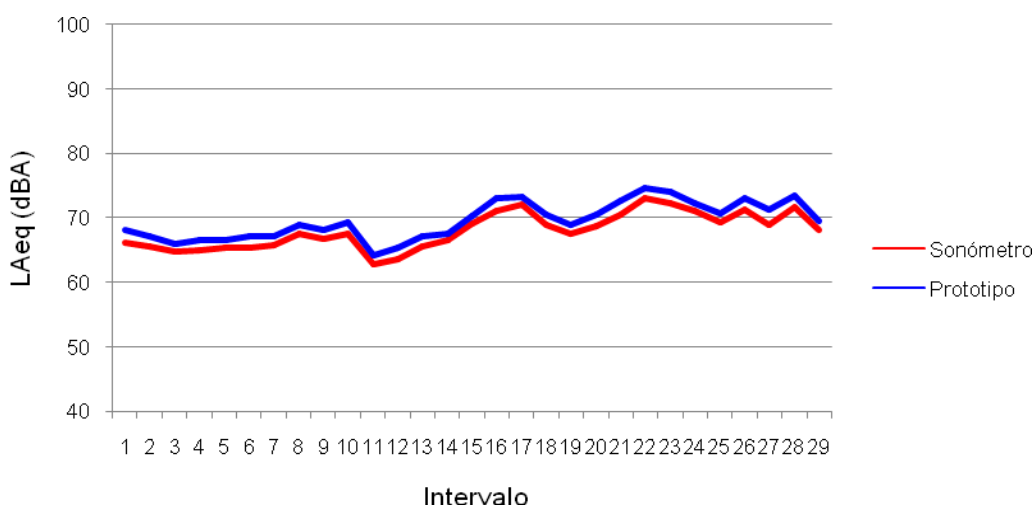


Figura 7: Test con música

Los resultados se muestran en la Tabla 2, donde se puede apreciar los márgenes de error del sensor para cada uno de los intervalos. Se puede ver, que la diferencia entre el prototipo y el sonómetro en cada intervalo, no supera el 3,2 % o 2,4 dBA.

Tabla 2. Test con música

	L_{eqA} SLM (dBA)	L_{eqA} Sensor (dBA)	Dif (dBA)	%Error
Intervalo 1	66,16	68,18	2,02	3,05
Intervalo 2	65,64	67,11	1,48	2,25
Intervalo 3	64,84	66,03	1,19	1,84
Intervalo 4	64,95	66,50	1,55	2,39
Intervalo 5	65,38	66,51	1,14	1,74
Intervalo 6	65,48	67,18	1,70	2,59
Intervalo 7	65,78	67,21	1,43	2,18
Intervalo 8	67,55	68,87	1,32	1,96
Intervalo 9	66,82	68,22	1,40	2,10
Intervalo 10	67,58	69,32	1,74	2,57
Intervalo 11	62,82	64,23	1,41	2,25
Intervalo 12	63,67	65,46	1,79	2,82
Intervalo 13	65,69	67,23	1,54	2,35
Intervalo 14	66,66	67,58	0,93	1,39
Intervalo 15	69,21	70,28	1,07	1,55
Intervalo 16	71,04	73,05	2,00	2,82
Intervalo 17	72,17	73,35	1,18	1,63
Intervalo 18	68,96	70,48	1,52	2,21
Intervalo 19	67,59	68,96	1,37	2,03
Intervalo 20	68,81	70,45	1,64	2,39
Intervalo 21	70,45	72,63	2,19	3,10
Intervalo 22	73,01	74,72	1,71	2,34
Intervalo 23	72,24	74,26	1,93	2,67
Intervalo 24	71,07	72,28	1,21	1,71
Intervalo 25	69,31	70,80	1,49	2,15
Intervalo 26	71,41	73,02	1,61	2,25
Intervalo 27	69,03	71,42	2,39	3,46
Intervalo 28	71,64	73,56	1,92	2,67
Intervalo 29	68,14	69,54	1,40	2,05
		Media:	1,57	2,28

Al igual que en el caso de ruido blanco, la sincronización no es perfecta y no se captura todo el espectro audible, lo que repercute directamente en el error. Aunque en este caso, la variabilidad temporal de la señal es muy alta, lo que provoca que la problemática de la sincronización adquiera una mayor influencia en los resultados. Por

este motivo, el error obtenido en este escenario de pruebas, es mayor que en el caso de ruido blanco.

5.4 Entorno urbano

El último escenario de pruebas, se ha llevado a cabo en una calle de una zona urbana. El prototipo y el sonómetro se han colocado a unos 8 metros de distancia de la calzada. Se han tomado medidas durante una hora (12:30 PM -13:30 PM), calculándose el nivel de presión sonora cada segundo.

El indicador de ruido L_{Aeq} , se ha obtenido para cada uno de los cuatro intervalos de 15 minutos (Figura 8).

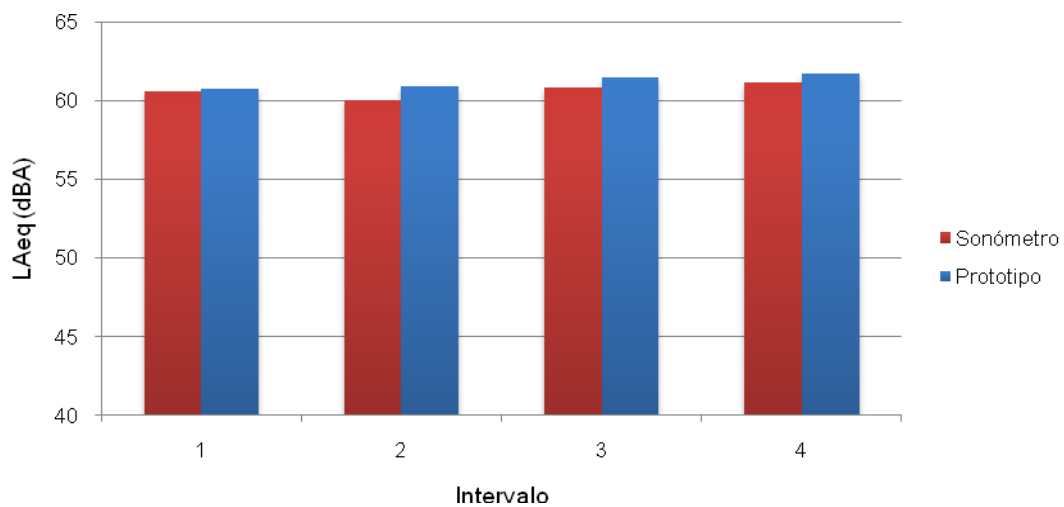


Figura 8: Zona urbana

En la Tabla 3, se muestra la media de L_{Aeq} , el error medio absoluto (Dif) y el error medio relativo (%Error) entre el prototipo y el sonómetro.

Tabla 3. Medidas zona urbana

	L_{eqA} SLM (dBA)	L_{eqA} Sensor (dBA)	Dif (dBA)	%Error
Intervalo 1	60,59	60,71	0,12	0,20
Intervalo 2	60,02	60,90	0,89	1,48
Intervalo 3	60,85	61,44	0,59	0,97
Intervalo 4	61,15	61,70	0,55	0,90
		Media:	0,55	0,90

Las señales acústicas en entornos urbanos suelen tener un carácter no estacionario, aunque como se puede apreciar en los resultados, la variabilidad temporal es menor que en el escenario anterior. Por este motivo, el error derivado de la sincronización es

relativamente bajo. Todo esto permite, que las diferencias medias entre el prototipo y el sonómetro sean inferiores a 0,6 dBA o 0,9 %. Lo que viene a confirmar, el buen comportamiento del prototipo en entornos urbanos.

6. Conclusiones

En este trabajo de investigación, se ha presentado un prototipo que hace uso de un algoritmo experimental basado en un análisis en frecuencia, para la monitorización de ruido en tiempo real. El algoritmo fue integrado de forma satisfactoria en un Arduino Due. Dicho algoritmo utiliza la FFT y un filtrado de ponderación tipo A, adaptados a los recursos limitados del Arduino Due. Para verificar la respuesta del prototipo, se realizó una serie de pruebas comparando los resultados obtenidos con un sonómetro comercial. Las pruebas ponen de manifiesto que los resultados obtenidos por el Arduino Due y el sonómetro, son muy parecidos. Las medidas tomadas por el prototipo en una calle de una zona urbana, muestran que las diferencias con respecto al sonómetro son inferiores al 1 % o 0,6 dBA. Los resultados obtenidos, no dejan lugar a la duda en cuanto a la viabilidad del prototipo para su uso en aplicaciones de monitorización de ruido en tiempo real. Siendo posible generar mapas espaciales y temporales de ruido, para cualquier tipo de entorno (zonas urbanas, aeropuertos, etc.) en tiempo real.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente subvencionado por el Centro de Estudios Avanzados en Tecnologías de la Información y Comunicación – Universidad de Jaén (Proyecto CEATIC-2013-001).

8. Referencias

Arduino (2014) <http://arduino.cc> (último acceso, Junio 2014).

Arduino Due (2014) <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardDue> (último acceso, Junio 2014).

Bacon D, Graham S, Sharp O (1994) Compiler Transformations for High-Performance Computing. ACM Computing Surveys, Vol 26, Nº 4.

Bhusari P, Asutkar GM and Tech M (2013) Design of Noise Pollution Monitoring System Using Wireless Sensor Network. International Journal of Software and Web Sciences (IJSWS), pp. 55-58.

European Commission. Green Paper on Future Noise Policy. Com (96) 540 final, November 1996.

European Commission Working Group Assessment of Exposure to Noise. Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure, January 2006.

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. Official Journal of the European Communities, July 2002.

Filipponi L, Santini S, Vitaletti A. (2008) Data Collection in Wireless Sensor Networks for Noise Pollution Monitoring. Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS '08), pp. 492-497.

Gubbi J, Marusic S, Law Y, Rao A.S. and Palaniswami (2013) A Pilot Study of Urban Noise Monitoring Architecture using Wireless Sensor Networks. International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), August.

ISO Standard 1999:1990. Acoustics–Determination of occupational noise exposure and estimation of noise-induced hearing impairment.

Karl H, Willig A (2007) Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. John Wiley & Sons: Chichester, West Sussex, UK.

Kumar-Rana R, Tung-Chou C, Kanhere S, Bulusu N, Hu W (2010) Ear-Phone: An End-to-End Participatory Urban Noise Mapping System. Proc. 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'10) pp 105-116. DOI:10.1145/1791212.1791226.

Moteiv Corporation (2013). <http://www.sentilla.com> (último acceso, Junio2014).

Muchnick S (1997) Avanced Compiler Design Impementation. Morgan Kaufmann: San Diego, USA.

Normativa IEC 61672:2003.

PCE-353 Sound Level Meter (2014). <http://www.industrial-needs.com/technical-data/datalogging-leq-sound-level-meter.htm> (último acceso, Junio 2014).

Santini S, Ostermaier B and Vitaletti A (2008) First Experiences Using Wireless Sensor Networks for Noise Pollution Monitoring. Proc. Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks, pp 61-65.

Santini S, Ostermaier B and Adelman R (2009) On the use of sensor nodes and mobile phones for the assessment of noise pollution levels in urban environments. Proc. 6th International Conference on Networked Sensing Systems, pp 1-8.

Santini S, Vitaletti A (2007) Wireless Sensor Networks for Noise pollution Monitoring. 6. GI/ITG KuVS Fachgesprach Drahtlose Sensornetze. Aachen, Germany, 16-17 July 2007.

Santini A (2009) TinyLAB: A Matlab-Based Framework for Interaction with Wireless Sensor Networks. The First European TinyOS Technology Exchange (ETTX 2009), Cork.

Standard IEC651 Type 2 SLM (1979).

Correspondencia (Para más información contacte con):

Nombre y Apellido: José Ángel Fernández Prieto
Teléfono: +34 953648628
Fax: +34 953648608
E-mail: jan@ujaen.es