

LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS EN LAS CIUDADES INTELIGENTES: APLICACIÓN A LA MONITORIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA MOLESTIA DEL RUIDO DE TRÁFICO

Juan Miguel Navarro Ruiz
Juan Emilio Noriega Linares

1. INTRODUCCIÓN

El siglo XXI está llamado a ser el siglo de las ciudades. A comienzos del año 2014, la población humana alcanzó los siete mil doscientos millones de personas, y ya a finales de 2008 más del 50 % de la población era urbana, superando por primera vez a la población rural¹. La población urbana mundial experimentará un crecimiento muy rápido en los próximos años, llegando a ser el 75 % de la población mundial para el año 2050². En esta situación, las ciudades deben desarrollar un crecimiento ambiental y, a la vez, económicamente sostenible, con el fin de mejorar la calidad de vida de los ciudadanos.

El constante cambio en los entornos urbanos requiere de una mejora de la gestión de los recursos, un aumento de la calidad de vida y el desarrollo de un sistema sostenible y eficiente. En el año 2010, Europa se planteó la necesidad de enfrentarse a una transformación general, tanto económica como social, provocada en gran parte por la crisis económica. Por este motivo, se publicó la Estrategia Europa 2020, que constituye una visión de la economía social de mercado de Europa para el siglo XXI, enfocada hacia tres pilares. En primer lugar, plantea la necesidad de una economía basada en el conocimiento y la innovación. Como segunda prioridad, propone una economía que haga un uso más eficaz de los recursos, que sea más ecológica y competitiva. Finalmente, es imprescindible una economía con alto nivel de empleo que tenga cohesión a nivel social y territorial.

¹ TABAH, L., United Nations Population Division, pp. 275-80.

² UNITED NATIONS. DEPT. OF ECONOMIC, *World population ageing, 1950-2050*. New York 2002.

Esto ha dado lugar a una evolución en los modelos de gestión de las ciudades. Para lograr este paso, la aplicación de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) tiene un papel protagonista. Esto se traduce en el concepto Smart City y el llamado Internet de las Cosas. Se define Smart City como aquella ciudad que usa las TIC para hacer que, tanto su infraestructura crítica como sus componentes y servicios públicos ofrecidos, sean más interactivos y eficientes y los ciudadanos puedan ser más conscientes de ellos³.

Para el desarrollo del Internet de las Cosas^{4,5} y de las Smart Cities⁶, se están utilizando las llamadas Redes de Sensores Inalámbricas⁷. Una red de sensores es una red de pequeños ordenadores o nodos, equipados con sensores, que colaboran en una tarea común. Este tipo de nodos pueden estar conectados entre sí a través de tecnologías inalámbricas. El uso de estas redes de sensores permite la monitorización en tiempo real de muchos parámetros que pueden ser usados para facilitar estilos de vida sostenible, ahorrar costes y mejorar la calidad de vida de las personas.

Los habitantes de las ciudades actuales se encuentran expuestos a niveles de ruido excesivos que les provocan molestia⁸. Esta molestia acústica es el resultado de la exposición repetida y prolongada a estos elevados niveles de ruido, lo que conlleva una disminución de la calidad de vida, interfiriendo en sus labores cotidianas, aumentando el estrés y la fatiga, disminuyendo la concentración y el descanso, y llegando a producir afecciones en la salud⁹. El ruido de tráfico es el principal causante de molestias por ruido en entornos urbanos, poniendo en peligro la salud de miles de personas sin que éstas siquiera lo perciban¹⁰. Es por ello que será el caso de estudio en esta investigación.

³ FUNDACIÓN TELEFÓNICA, *Smart Cities: un primer paso hacia la Internet de las Cosas*. 2011.

⁴ CONNER, M., «Sensors empower the» Internet of Things», en *EDN (Electrical Design News)*, 55(10), 32, 2010.

⁵ ATZORI, L., IERA, A., & MORABITO, «The internet of things: A survey», en *Computer networks*, 54 (15), 2010, pp. 2787-2805.

⁶ SU, K., LI, J., & FU, H. «Smart city and the applications», en *Electronics, Communications and Control (ICECC), International Conference on*. IEEE 2011.

⁷ AKYILDIZ, I. F., & VURAN, M. C., *Wireless sensor networks* (Vol. 4). 2010.

⁸ BERGLUND, B., LINDVALL, T., & SCHWELA, D. H., *Guidelines for community noise. Guidelines for community noise*, 1999.

⁹ VIDA, J., «Valoración de la molestia por contaminación acústica mediante relaciones dosis-efecto», en *CONAMA 8, comunicado técnico*, 2006.

¹⁰ MORILLAS, J. M. B., GÓMEZ, R. V., ESCOBAR, V. G., SIERRA, J. A. M., VIDAL, C. T., BUENO, L. A., ET AL. «Presentación de una encuesta para la realización de estudios sociales sobre el impacto del ruido urbano», en *Revista de Acústica*, 33 (1), 2002, pp. 27-31.

En anteriores trabajos de investigación publicados, las redes de sensores inalámbricas se han usado para realizar medidas acústicas, centrándose en la obtención de parámetros básicos como el nivel de presión sonora^{11, 12} para, principalmente, realizar mapas de ruido en ciudades. En este trabajo de investigación, con el uso de redes de sensores inalámbricas se pretenden obtener unos datos más completos y avanzados sobre la señal de sonido, no sólo el nivel de presión sonora, llevando los resultados a unas conclusiones que dibujan lo que, en términos del canadiense Murray Schafer, se denomina paisaje sonoro¹³. Este concepto, que ubicó en el congreso nacional de medio ambiente en el 2012, nos pone de manifiesto que en un paisaje sonoro contaminado encontramos afecciones a la salud de las personas a través de reacciones fisiológicas y psicológicas que surgen como consecuencia del deseo natural de auto-protección generado por sonidos elevados.

Para llevar a cabo este estudio, ha sido necesario diseñar una metodología completa de evaluación de la contaminación acústica en las ciudades. Tal y como se muestra en la Figura 1, esta metodología incluye la monitorización, el procesamiento, la valoración y la caracterización de los ambientes sonoros. Para lograr este propósito, se deben obtener datos de muchos puntos de manera simultánea y de forma continua en el tiempo, para lo que se usarán las redes de sensores inalámbricas.

Para la evaluación de la molestia se proponen unos parámetros de medición avanzados que tengan en cuenta el carácter cambiante y subjetivo de la contaminación



Figura 1. Diagrama de bloques con las distintas fases de la metodología propuesta.

¹¹ PRABAHAR, A. A. «Development of high performance wireless sensor node for acoustic applications», en *Green High Performance Computing (ICGHPC)*, 2013 *IEEE International Conference on*. IEEE.

¹² YOU, Y., YOO, J., & CHA, H. «Event region for effective distributed acoustic source localization in wireless sensor networks», en *Wireless Communications and Networking Conference, 2007. WCNC 2007. IEEE*. IEEE.

¹³ SCHAFFER, R. M., *The soundscape: Our sonic environment and the tuning of the world*, 1993, Inner Traditions/Bear & Co.

acústica, así como el carácter objetivo de ésta. Estos parámetros son calculados in situ en la red de sensores y los resultados son transmitidos a una plataforma intermedia que permite almacenar y mostrar los datos para su análisis más detallado.

Este documento está dividido en varios apartados que se explican a continuación. En primer lugar, se introduce desde un punto de vista técnico el concepto de Smart City y cómo las redes de sensores inalámbricas juegan un papel fundamental para el desarrollo de las mismas, mostrándolo con una aplicación concreta de monitorización de ruido. Para ello, es necesario definir los conceptos básicos sobre contaminación acústica y los parámetros acústicos que se proponen para la caracterización de la molestia por ruido en el apartado siguiente. Posteriormente, se describen los dispositivos electrónicos creados como sensores acústicos, analizando las etapas de procesamiento de sonido requeridas. Finalmente, se presenta un caso práctico de utilización de estos sensores y la discusión sobre los resultados obtenidos.

2. ASPECTOS TÉCNICOS DE UNA SMART CITY

2.1. Concepto de una Smart City

Ante el nuevo escenario mundial donde, tal y como se ha presentado en el apartado 1, se nos muestra un entorno urbano con una demanda creciente de eficiencia, desarrollo sostenible, calidad de vida y gestión de los recursos escasos, se hace necesario que las administraciones se planteen una evolución en los modelos de gestión de las ciudades. En estos nuevos modelos, la aplicación de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) se convierte en imprescindible. De este modo, en los últimos años ha aparecido el concepto de Smart City, también llamada Ciudad Inteligente o Ciudad Eficiente. Tal y como se expone en este apartado, el concepto de Ciudad Inteligente está muy ligado, a través de sus servicios, con lo se denomina Internet de las Cosas, así como con la Internet del Futuro.

Una Smart City ha sido definida desde diferentes aproximaciones física, social y humana^{14, 15} aunque la mayoría de estas definiciones contienen

¹⁴ CARAGLIU, A., DEL BO, C., & NIJKAMP, P., «Smart cities in Europe», en *Journal of urban technology*, 18 (2), 2011, pp. 65-82.

¹⁵ ALBINO, V., BERARDI, U., & DANGELICO, R. M., «Smart cities: Definitions, dimensions, performance, and initiatives», en *Journal of Urban Technology*, 22 (1), 2015, pp. 3-21.

como elemento común el uso de las tecnologías para la mejora de la calidad de la vida de sus habitantes, asegurar el desarrollo económico, social y ambiental, así como la sostenibilidad y eficiencia de los servicios públicos¹⁶. Destacar a continuación la propuesta por la Comisión Europea¹⁷:

«Una Smart City tiene tres áreas prioritarias de actuación: energía, transporte y TIC. El objetivo de la aplicación de la tecnología a estas áreas, es la mejora de la eficacia, así como la reducción de consumo energético y de la emisión de gases de efecto invernadero».

Sin embargo, no existe aún un acuerdo sobre los elementos mínimos que deben estar presentes en una ciudad para poder ser considerada como inteligente. En España, a través del Plan Nacional de Ciudades Inteligentes¹⁸, descrito en el Agenda Digital, se sigue la definición propuesta por el Grupo Técnico de Normalización 178 de la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), con el apoyo de la Secretaría de Estado de Telecomunicaciones y para la Sociedad de la Información (SETSI) y coordinado por la Red Española de Ciudades Inteligentes (RECI), que se describe a continuación:

«Ciudad Inteligente (Smart City) es la visión holística de una ciudad que aplica las TIC para la mejora de la calidad de vida y la accesibilidad de sus habitantes y asegura un desarrollo sostenible, social y ambiental en mejora permanente. Una ciudad inteligente permite a los ciudadanos interactuar con ella de forma multidisciplinar y se adapta en tiempo real a sus necesidades de forma eficiente, en calidad y en costes, ofreciendo datos abiertos, soluciones y servicios orientados a los ciudadanos como personas, para resolver lo efectos del crecimiento de las ciudades, en ámbitos públicos y privados, a través de la integración innovadora de infraestructuras con sistemas de gestión inteligente».

2.2. Ecosistema que compone una Smart City

En la actualidad estamos siendo partícipes en una revolución determinada por el Internet de las Cosas (*Internet of Things* (IoT) en termino-

¹⁶ KOMNINOS, N., *Intelligent cities: innovation, knowledge systems, and digital spaces*. 2002-Taylor & Francis.

¹⁷ SCHAFFERS, H., KOMNINOS, N., PALLOT, M., TROUSSE, B., NILSSON, M., & OLIVEIRA, A., «Smart Cities and the Future Internet: Towards Cooperation Frameworks for Open Innovation», en *Future Internet Assembly*, 6656, 2011, pp. 431-446.

¹⁸ (2015). Plan Nacional de Ciudades Inteligentes - Agenda Digital.

logía anglosajona), teniendo esta tecnología un gran impacto en nuestra sociedad y ofreciendo nuevas posibilidad a la administración y a las empresas alineadas de manera vertical mejorando el rendimiento y la rentabilidad. El espacio de las soluciones de IoT se expandirá exponencialmente y ofrecerá a todos los negocios infinitas soluciones centradas en esta tecnología.

La estrategia de este nuevo concepto de sociedad pasa por integrar varias capas de los servicios de distintos sectores en un solo sitio. A partir de ellos se incorporan nuevas capas, aprovechando las posibles sinergias que deriven en una reducción de costes o en una mayor visibilidad. La ventaja que supone la implantación de esta nueva tecnología es que se capitaliza el conocimiento y el funcionamiento de un entorno, extendiéndose a otros nuevos.

En la Figura 2 se muestra un diagrama que describe las capas horizontales en las que se divide el ecosistema IoT. Estas capas son las siguientes: sensores y adquisición de datos, conectividad y red de comunicación, gestión y análisis de datos, y arquitectura de soporte a servicios y aplicaciones. Además, en esta figura aparecen algunos de los ejemplos de mercados verticales del IoT como son: energía y recursos naturales, medioambiente y agricultura, automoción, salud y bienestar, comercio, industria, administración pública, seguridad, transporte y logística, y electrónica de consumo.

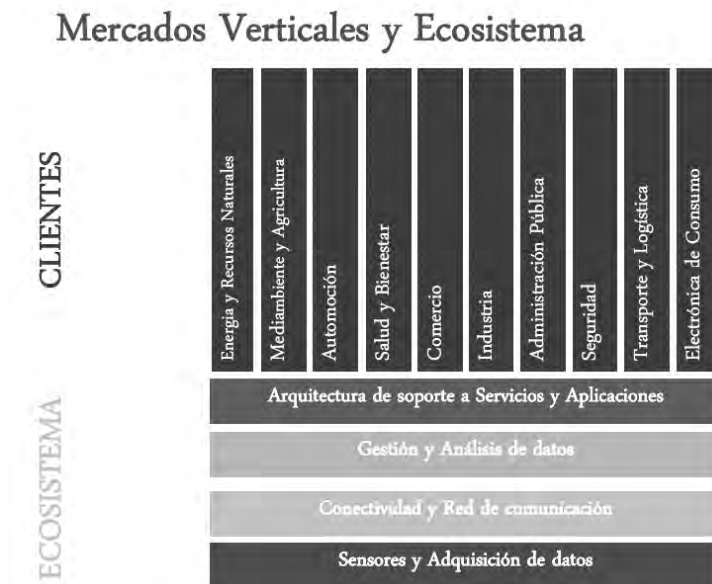


Figura 2. Modelo del ecosistema de IoT y verticales asociados.

El ecosistema IoT se ha personalizado y tiene una enorme aplicación en las Smart Cities. En la Figura 3 se observa la distribución por capas del modelo smart de ciudad.

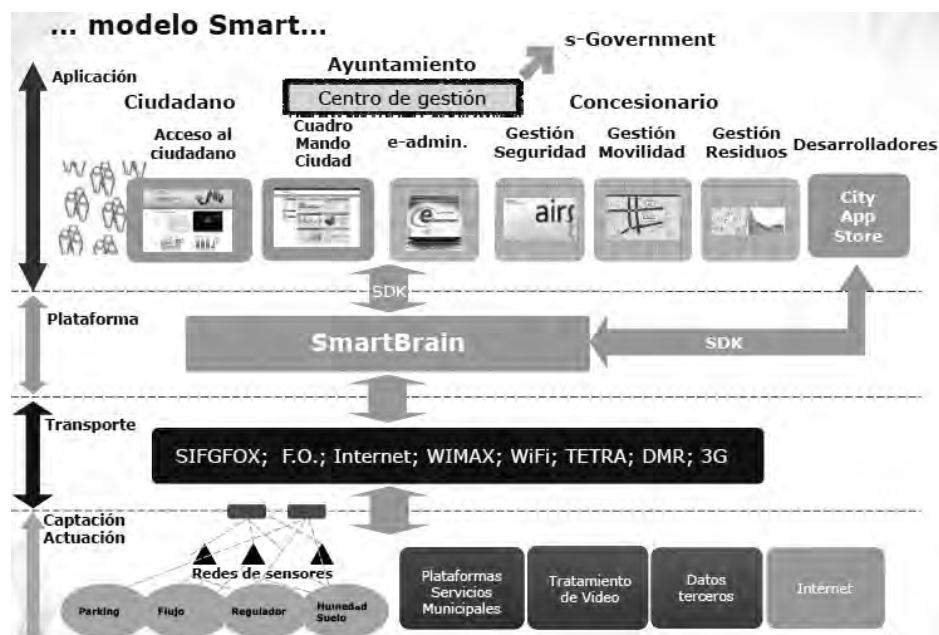


Figura 3. Modelo de Smart City mediante ecosistema de IoT personalizado.

Como se puede ver en la Figura 3, el modelo Smart se divide en cuatro sustratos:

- La capa de captación/actuación donde se encuentran las diferentes interfaces de entrada y salida de datos. Generalmente, utilizaremos redes de sensores encargadas de recoger los datos, con la frecuencia y los rangos establecidos. Algunos sensores también disponen de la capacidad de actuar sobre el entorno, por ejemplo, abriendo y cerrando una válvula de riego. Además, también contaremos con la información recogida de otras fuentes de datos como plataformas de servicios municipales, red de seguridad de vídeo, datos de terceros y hasta redes sociales e internet.
- La capa de transporte se encarga de los protocolos de envío y recepción de la información de la capa de captación hacia la capa intermedia donde se encuentra la plataforma de ciudad. Aquí nos podemos encontrar con multitud de sistemas de telecomunicación

que pueden ser propiedad de la administración o alquilados a compañías de telecomunicación.

- La plataforma intermedia, llamada plataforma de ciudad o *Smart Brain* cuando se aplica a una Smart City, es la encargada de recibir y almacenar los datos, así como procesar los datos albergando la lógica del sistema y enviando los datos tratados hacia la capa de aplicación o de nuevo hacia la capa de actuación.
- Finalmente, nos encontramos con la capa más alta y cercana a los ciudadanos y trabajadores del ayuntamiento. Es la conocida como capa de aplicación encargada de ser la parte visible para el usuario del sistema y permite la gestión de los diferentes servicios integrados y la toma de decisiones a través de paneles con información relevante.

2.3. La aplicación de las TIC en una Smart City

La aplicación de las TIC en este nuevo modelo de ciudad es de vital importancia. Tal y como se muestra en la Figura 4, este concepto se refiere a un tipo de desarrollo urbano basado en la sostenibilidad, que es capaz de responder de manera adecuada a las necesidades básicas de instituciones, empresas, y de los propios habitantes, tanto en el plano económico, como en los aspectos operativos, sociales y ambientales.

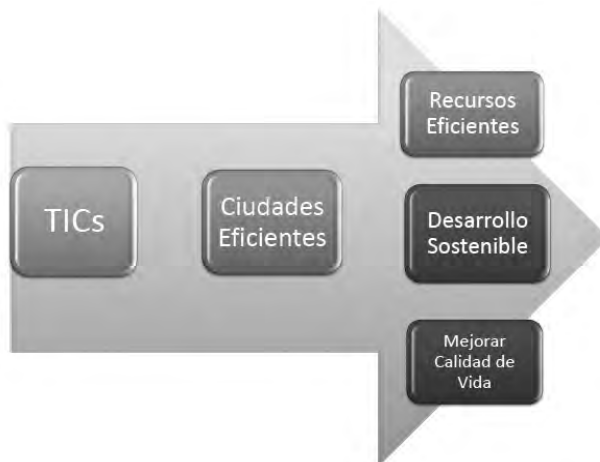


Figura 4. Concepto de Smart City

Las ciudades modernas que están basadas en infraestructuras eficientes en materia de distribución y tratamiento de agua, diferentes sistemas

de energía como gas o electricidad, transportes, seguridad ciudadana, equipamientos públicos, edificios inteligentes, etc., deben ser orientadas a mejorar el confort de los ciudadanos, siendo cada vez más eficaces y brindando nuevos servicios de calidad, respetando en todo momento la sostenibilidad, el medio ambiente y el uso responsable de los recursos naturales no renovables.

Las bondades de una ciudad no dependen exclusivamente de la dotación en cuanto a infraestructuras físicas, servicios y apoyos institucionales, sino que en ello incide cada vez más la disponibilidad y calidad de las comunicaciones, así como de la capacidad cultural y transmisión del saber, así como la dotación en infraestructuras sociales. La idea de Smart City se ha basado principalmente en los conceptos de capital social y capital intelectual, habiendo sido ésta introducida como herramienta para manejar y englobar factores característicos de una zona urbana moderna, poniendo así en valor la importancia creciente de las TIC.

Debido al continuo crecimiento de las urbes, muchos conceptos que antes pasaban desapercibidos se están convirtiendo en un grave problema que afecta a los habitantes de éstas, no sólo en aspectos fisiológicos, sino también en problemas psicológicos. Dentro de estos problemas se puede englobar al ruido o contaminación acústica. Aprovechando los beneficios de las TIC en la actualidad, e integrando así a éstas en el concepto de Smart City, se está empezando a controlar la contaminación acústica en las ciudades con mayor frecuencia, así como en avanzar en las investigaciones de las tecnologías y sistemas de prevención, la reducción y el tratamiento del ruido.

2.4. Las redes de sensores inalámbricas en una Smart City

Durante los últimos años, las TICs han revolucionado el concepto del intercambio de información entre personas, empresas, organizaciones.... El rápido avance de la tecnología, su abaratamiento y el aumento de la oferta entre otros, han dado lugar a la creación de nuevos conceptos de redes, usando para ello pequeños computadores con sensores, construyendo entre sí pequeñas redes de comunicaciones inalámbricas de baja potencia¹⁹, pudiendo llevar a cabo miles de distintas

¹⁹ RAGHAVENDRA, C. S., SIVALINGAM, K. M., & ZNATI, T., *Wireless sensor networks*. 2006. Springer.

aplicaciones diferentes que pueden ir desde seguridad, control hasta monitorización medioambiental, como temperatura, velocidad del viento, su dirección, humedad...²⁰. En el caso que nos abarca, capturaremos la señal de sonido ambiental para calcular diferentes parámetros relacionados con la molestia que permitirán evaluar la contaminación acústica. Estas pequeñas redes son denominadas redes de sensores inalámbricas.

Los elementos, o nodos, de estas pequeñas redes son pequeños sensores autónomos que son capaces de establecer comunicaciones entre sí, recoger datos, transmitirlos y si llega a ser necesario, la reconfiguración de estos. Estas redes se comunican a través de señales de radio, las cuales están fijadas por un estándar. El estándar que fija las condiciones para estos enlaces es el IEEE 802.15.4^{21,22}. Este estándar fue definido para la tecnología de la información, telecomunicaciones e intercambio de información entre sistemas locales y redes de área metropolitana. Una característica importante de este tipo de redes frente a otras más complejas es su facilidad de despliegue y su autonomía, y además por ser capaces de registrar datos referentes a los sensores locales de cada nodo. Además de esto, la autonomía energética que tienen, proporciona una mayor vida útil de la red, siendo ésta operativa durante mucho más tiempo. La idea final de este tipo de redes es repartir aleatoriamente estos nodos en un territorio grande, en el cual, los nodos se encargan de captar datos a través de sus sensores.

Las redes de sensores es un concepto nuevo cuyas propiedades y versatilidad los hacen muy interesantes en aplicaciones industriales y científicas^{23,24}, con múltiples aplicaciones como gestión de calefacción, controladores de volumen e información de tráfico, seguridad y control

²⁰ LEWIS, F. L., «Wireless sensor networks», en *Smart environments: technologies, protocols, and applications*, 2004, pp. 11-46.

²¹ ZHENG, J., & LEE, M. J., *A comprehensive performance study of IEEE 802.15. 4*. 49. 2004.

²² PETROVA, M., RIIHJÄRVI, J., MÄHÖNEN, P., & LABELLA, S., «Performance study of IEEE 802.15. 4 using measurements and simulations», en *Wireless communications and networking conference, 2006. WCNC 2006. IEEE*. IEEE.

²³ ROMERO ACERO, A., MARIN CANOL, A., OROZCO QUICENO, J. A., BULIES, J., & ALBERTO, J., «Integration in wireless sensor networks (WSN) IEEE 802.15. 4-802.11 for industrial automation» en *Engineering Mechatronics and Automation (CIIMA), 2013 II International Congress of*. IEEE.

²⁴ SOSA, E. O., & GODOY, D. A., «Generando entornos de investigación y desarrollo utilizando redes inalámbricas de sensores (WSN)», en *XVIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*. 2013.

de una cadena de producción industrial, etc.^{25,26,27}. En el campo de la acústica ambiental, el uso de redes de sensores ha sido usado principalmente para la obtención de niveles de presión sonora, localización de fuentes o adquisición de audio sencilla, es decir, sin tener en cuenta detalles de la señal como su espectro, su variación temporal, etc.^{28,29}.

3. LA EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA EN LAS CIUDADES

3.1. El problema de la contaminación acústica en las ciudades

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. Se define el ruido como la sensación auditiva inarticulada, generalmente desagradable. A partir del concepto de ruido se define el término de contaminación acústica como el exceso de sonido que altera las condiciones normales del ambiente en una determinada zona. Si bien el ruido no se acumula, traslada o mantiene en el tiempo como las otras contaminaciones, también puede causar grandes daños en la calidad de vida de las personas si no se controla bien o adecuadamente.

En el entorno de las ciudades se denomina como ruido urbano al emitido por todas las fuentes que en ella conviven, a excepción de las áreas industriales. En el interior de los edificios, las principales fuentes de ruido son los aparatos del hogar, sistemas de aire acondicionado, máquinas de oficina, etc. así como el producido por las personas que los habitan. En exteriores, las fuentes de ruido tienen una naturaleza mucho

²⁵ AKYILDIZ, I. F., SU, W., SANKARASUBRAMANIAM, Y., & CAYIRCI, E., «Wireless sensor networks: a survey», en *Computer networks*, 38(4), 2002, pp. 393-422.

²⁶ SUÁREZ REYES, A., SIT-WSN: Sistema de información de tráfico mediante WSN. 2012.

²⁷ CORRAL, P., CORONADO, B., & LUDWIG, O., «Design of automatic meter reading based on Zigbee», en *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, 10 (1), 2012, pp. 1150-1155.

²⁸ Prabahar, A. A. (2013). Development of high performance wireless sensor node for acoustic applications. *Green High Performance Computing (ICGHPC), 2013 IEEE International Conference on*. IEEE.

²⁹ YOU, Y., YOO, J., & CHA, H., «Event region for effective distributed acoustic source localization in wireless sensor networks» en *Wireless Communications and Networking Conference, 2007. WCNC 2007. IEEE*. IEEE.

más heterogénea, y puede provenir desde de locales de ocio y comerciales, tráfico rodado, aéreo, ferroviario, competiciones deportivas, animales domésticos, etc.

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. 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, etc., el problema del ruido de tráfico se ha visto acrecentado³⁰.

El ruido de un paisaje sonoro contaminado provoca como agente estresante diferentes reacciones conductuales que normalmente duran el tiempo del estímulo auditivo, afectando, si persisten, a la salud y a la calidad de vida de las personas. La comunidad científica respecto a las consecuencias que genera una exposición elevada y prolongada al ruido coinciden en diagnosticar posibles alteraciones cardiovasculares, hormonales y alteraciones en el sueño con carácter general, siendo las posibles reacciones frente al ruido: inquietud, inseguridad, impotencia, agresividad, desinterés, abulia o falta de iniciativa, variables según el tipo de personalidad. Todo ello explica que el ruido sea objeto de regulación jurídica.

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^{31,32}. 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 55 dB(A), y que un 16% están expuestos a ruido de tráfico nocturno sobre 55 dB(A)³³, el cual afecta de manera importante en la calidad del sueño con independencia de la molestia acústica percibida³⁴.

³⁰ LI, BENGANG, SHU TAO, AND RW DAWSON., «Evaluation and analysis of traffic noise from the main urban roads in Beijing», en *Applied Acoustics* 63.10, 2002, pp. 1137-1142.

³¹ GOLDSMITH, JOHN R, AND ERLAND JONSSON, «Health effects of community noise», en *American journal of public health* 63.9, 1973, pp. 782-793.

³² STANSFELD, STEPHEN A, AND MARK P MATHESON, «Noise pollution: non-auditory effects on health», en *British medical bulletin* 68.1, 2003, pp. 243-257.

³³ BRAUBACH, MATTHIAS, DAVID E JACOBS, AND DAVID ORMANDY, «Environmental burden of disease associated with inadequate housing», en *World Health Organization*, 2011.

³⁴ FREI, PATRIZIA, EVELYN MOHLER, AND MARTIN RÖÖSLI, «Effect of nocturnal road traffic noise exposure and annoyance on objective and subjective sleep quality», en *International journal of hygiene and environmental health* 217.2, 2014, pp. 188-195.

La exposición repetida y prolongada a niveles elevados de ruido resulta, en muchos de los casos, en un empeoramiento general de la calidad de vida de las personas que lo sufren, interfiriendo en sus labores cotidianas y dando lugar a lo que comúnmente se denomina *molestia acústica*. Esta molestia es la sensación de desagrado que afecta negativamente a nuestro confort o bienestar.

En los últimos años 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 evaluación directa con parámetros básicos como el nivel de presión sonora o niveles equivalentes. Además, el parámetro de la molestia acústica puede llegar a ser un mejor marcador para la evaluación del estrés que el ruido objetivo, ya que este incluye la percepción y molestia del individuo³⁵. Este parámetro puede llegar a ser muy complejo de caracterizar con precisión dado las numerosas variables que engloba, algunas de ellas subjetivas como la satisfacción residencial, el control ejercido sobre la fuente sonora, la predicción del estímulo acústico, las actitudes y creencias respecto al ruido, así como el grado de sensibilidad de los individuos expuestos a la contaminación acústica³⁶. Para conocer y valorar el malestar de una persona o de un colectivo frente al ruido, sería necesario crear una escala que relaciona la respuesta subjetiva de las personas con los valores que alcanzan las características físicas del ruido

3.2. Los mapas de ruido en las ciudades

Para poder evaluar el campo sonoro en las ciudades, el método tradicionalmente llevado a cabo ha sido la creación de mapas de ruido. Según la *Directiva Europea sobre Evaluación y Gestión del Ruido Ambiental*³⁷, un mapa de ruido se puede definir como:

«La presentación de datos sobre una situación acústica existente o pronosticada en función de un indicador de ruido, en la que se indicará

³⁵ NIVISON, MARY ELLEN, AND INGER M ENDRESEN, «An analysis of relationships among environmental noise, annoyance and sensitivity to noise, and the consequences for health and sleep», en *Journal of behavioral medicine* 16.3, 1993, pp. 257-276.

³⁶ MARTIMPORTUGUÉS, CLARA, JAVIER GALLEGO, AND F DOMINGO RUIZ, «Efectos del ruido comunitario», en *Revista de Acústica* 34.1, 2003, pp. 31-39.

³⁷ CONSEJO DE EUROPA, «DIRECTIVA 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de junio de 2002, sobre evaluación y gestión del ruido ambiental.» (2002).

el rebasamiento de cualquier valor límite pertinente vigente, el número de personas afectadas en una zona específica o el número de viviendas expuestas a determinados valores de un indicador de ruido en una zona específica». Igualmente también se da la definición de mapa estratégico de ruido como «un mapa diseñado para poder evaluar globalmente la exposición al ruido en una zona determinada, debido a la existencia de distintas fuentes de ruido, o para poder realizar predicciones globales para dicha zona».



Figura 5. Mapa estratégico de ruido de tráfico de la ciudad de Murcia realizado con técnicas de predicción.

Hoy en día, los mapas de ruido son una herramienta muy útil para las administraciones públicas y demás organismos encargados de velar por la salud de la gente, debido a que permiten adoptar planes de acción necesarios para prevenir y reducir el ruido ambiental, mejorando así su calidad de vida. Según la Directiva Europea 2002/49/CE³⁸ referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental, los Estados miembros se comprometen a la elaboración, o aprobación por las autoridades competentes, de mapas estratégicos de ruido correspondientes a grandes aglomera-

³⁸ CONSEJO DE EUROPA, «DIRECTIVA 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de junio de 2002, sobre evaluación y gestión del ruido ambiental.» (2002).

raciones de habitantes, y a todos los grandes ejes viarios de vehículos y ferroviarios, así como de grandes aeropuertos presentes en su territorio.

Un mapa estratégico de ruido debe representar datos relativos a la situación acústica existente, anterior o prevista expresada en función de un indicador o parámetro de ruido. Tal y como se puede observar en la Figura 5, los resultados de los mapas suelen ser representados al público en forma de gráficos, datos numéricos en cuadros o en formato electrónico. En los mapas para aglomeraciones se hará especial hincapié en el ruido procedente del tráfico rodado, del tráfico ferroviario, y de los aeropuertos. El cartografiado estratégico del ruido servirá de base para los datos que deben ser enviados a la Comisión Europea, así como servirán de fuente de información destinada al público y como fundamento de los planes de acción.

A la hora de realizar un mapa de ruido nos encontramos con dos metodologías diferenciadas pero que pueden llegar a ser usadas en conjunto. En el primer tipo se encuentran los mapas de ruido elaborados mediante medidas en campo experimentales. Para estos, se realiza un muestreo del área a medir y se toma medidas en diferentes puntos y en diferentes intervalos del día y año, siguiendo así un muestreo espacial y temporal. Las metodologías de muestreo espacial mediante medidas experimentales más usadas son la de retícula, la de viales de tráfico, la de zonas específicas, la de zonas en función del suelo y la de zonas aleatorias³⁹.

Dado el alto coste económico y temporal que puede llegar a acarrear un mapa de ruido realizado con mediciones experimentales, en los últimos años ha aparecido otra metodología basada en modelos matemáticos de predicción de ruido. Según las normas Europeas los mapas de ruido deben estar basados en medidas experimentales, aunque la tendencia es partir de una simulación usando un modelo matemático y a partir de ahí, validar los datos posteriormente con medidas experimentales⁴⁰. La Directiva Europea de Ruido Ambiental establece distintos métodos de cálculo en función de cuál sea la fuente de ruido:

— Ruido Industrial: ISO 9613-2⁴¹

³⁹ AUSEJO, M., *Estudio de la validación, errores e incertidumbre en la elaboración de mapas de ruido*, Madrid 2009.

⁴⁰ MANVELL, DOUGLAS., «Current trends in environmental noise calculation software in Europe», en *Proceedings of INCE–Japan autumn conference*, 2005.

⁴¹ ISO 9613-2:1996 «Acoustics -- Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 2: General method of calculation». (1996)

- Ruido de aviones: ECAC.CEAC 1997⁴²
- Ruido de tráfico rodado: método francés NMPB 2008⁴³
- Ruido de trenes: método holandés SMR II 2002⁴⁴

3.3. Parámetros para evaluación de la molestia del ruido

A lo largo de la literatura se pueden encontrar una serie de índices que permiten valorar de forma objetiva una sensación tan subjetiva como es la molestia. Los índices de molestia más utilizados son:

Nivel sonoro ponderado A: Con la intención de ajustar la respuesta en frecuencia del equipo de medida a la respuesta subjetiva del oído humano medio, se aplica una red de ponderación o filtro que modifica la respuesta en frecuencia del sonómetro para seguir aproximadamente la curva de igual sonoridad de 40 fonios. Aunque es la ponderación más extendida, no deja de ser una aproximación muy básica que no tiene en cuenta, entre otras cosas, el tipo de fuente sonora o el nivel del mismo.

Nivel sonoro equivalente ponderado A: Se define como la media energética, ponderada en la escala A, del nivel de ruido promediado en el intervalo de tiempo de medida. Puede considerarse como el ruido continuo que tendría el mismo contenido en energía acústica, ponderado en escala A, que el ruido real variable, en el mismo período de tiempo,

$$L_{eq,T} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{T} \cdot \int_0^T \left(\frac{p^2(t)}{P_{ref}^2} \right) \cdot dt \right] (dB(A))$$

donde P_{ref} es la presión sonora de referencia $20 \cdot 10^{-6}$ pascales.

Nivel sonoro equivalente día-tarde-noche (L_{DEN}): Es el nivel sonoro equivalente ponderado A, medido sobre un periodo de 24 horas, en el que se le introduce una corrección de 10 dB para ponderar la mayor molestia que produce el ruido por la noche y 5 dB se añaden al periodo de la tarde.

Nivel de contaminación acústica: Este nivel está constituido por dos términos, el primero de ellos es el nivel sonoro equivalente y el segundo

⁴² « ECAC.CEAC Doc 29 Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports». ECAC.CEAC 1997.

⁴³ «Road noise prediction - NMPB 2008». Sétra. (2008).

⁴⁴ «Technische Regeling Emissiemeetmethoden Railverkeer». CROW. (2006).

representa el incremento de molestia causado por la fluctuaciones de nivel,

$$L_{NP} = L_{eq,T} + 2,56 \sigma (dB(A))$$

donde σ es la desviación típica del nivel instantáneo durante el periodo de medida.

Índice del ruido de tráfico: Está definido por la siguiente ecuación,

$$L_{IN} = 4(L_{10} - L_{90}) + L_{90} - 30 (dB(A))$$

siendo L_{10} y L_{90} definidos como los percentiles, o el nivel que se sobrepasa durante el 10% y el 90% del tiempo de medida, respectivamente.

Como se ha presentado hasta ahora, existen diferentes parámetros utilizados para la medida de la molestia en relación a parámetros objetivos, como son el nivel sonoro ponderado, el nivel de contaminación acústica y el índice del ruido de tráfico, aunque están lejos de representar con precisión lo que realmente se percibe por la persona. Por el lado objetivo, la sensibilidad del oído depende fuertemente de la frecuencia, del nivel y la duración del sonido. A esto debemos añadirle el aspecto subjetivo añadido por la persona en el cual afectan cosas como el tipo de ruido, el periodo del día, la edad, etc. A continuación, se proponen unos parámetros psicoacústicos que buscan una mejor adaptación a la subjetividad de este fenómeno y que se han utilizado, además de los anteriores, en los sensores creados para esta investigación.

Parámetros psicoacústicos para la evaluación de la molestia

En este trabajo de investigación se propone el uso del modelo de Zwicker^{45, 46} para describir la molestia subjetiva del ruido urbano, principalmente de tráfico rodado. En este modelo, la molestia se obtiene mediante el índice Nuisance (N) que se calcula a través de otros parámetros; Loudness (L), Sharpness (S), Roughness (R) y Fluctuation Strength (F).

⁴⁵ FASTL, HUGO, AND EBERHARD ZWICKER., *Psychoacoustics: Facts and models*. Springer Science & Business Media, 2007.

⁴⁶ SEGURA, JAUME ET AL., «Psychoacoustic Annoyance Monitoring with WASN for Assessment in Urban Areas», en *Audio Engineering Society Convention 138* 6, 2015.

En todos estos índices psicoacústicos es necesario contar con un análisis en frecuencia, lo cual no se tiene en cuenta en los parámetros más básicos. Para realizar el análisis espectral de un sonido, el rango audible (20 – 20.000 Hz) se divide en bandas de frecuencia. Una banda de frecuencia es una zona del espectro caracterizada por dos frecuencias límite (inferior y superior) y una frecuencia central, siendo su ancho la diferencia entre las dos frecuencias límite. En acústica se suele realizar a través de lo que se conoce como bandas de octava o bandas de tercio de octava, que consisten en bandas de frecuencia cuyo ancho aumenta proporcionalmente con la frecuencia. En una banda de octavas la frecuencia superior es el doble de la inferior y una banda de tercios de octava es la tercera parte de una banda de octava. El análisis espectral realizado en tercios de octava es más detallado que en octavas.

Loudness: El loudness o sonoridad de un sonido es una medida subjetiva del efecto de la cantidad de energía acústica contenida en un sonido para el sistema auditivo humano⁴⁷. Gracias a este parámetro, la sensación humana al volumen del sonido se puede visualizar de manera lineal. La unidad en que se mide es el sono. 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 del loudness, el algoritmo creado está basado en la ISO 532 B⁴⁸, el cual estandariza un procedimiento basado en el modelo de Zwicker, 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.

Sharpness: El sharpness, o agudeza, 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, aunque su medida no está estandarizada. 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 dB⁴⁵.

⁴⁷ GENUIT, KLAUS, AND ANDRÉ FIEBIG., «Psychoacoustics and its benefit for the soundscape approach», en *Acta Acustica united with Acustica* 92.6, 2006, pp. 952-958.

⁴⁸ ZWICKER, EBERHARD, HUGO FASTL, AND CHR DALLMAYR. «BASIC-PROGRAM FOR CALCULATING THE LOUDNESS OF SOUNDS FROM THEIR 1/3-OCT BAND SPECTRA ACCORDING TO ISO-532-B», en *Acustica* 55.1, 1984, pp. 63-67.

Para el cálculo del parámetro Sharpness se ha seguido el método de Zwicker y Fastl⁴⁹.

Las variaciones temporales del sonido pueden hacer percibir distintas sensaciones en el sistema auditivo humano. En variaciones de alta frecuencia, alrededor de 70 Hz, se mide usando el parámetro roughness, y en variaciones de baja frecuencia, sobre unos 4 Hz, se usa el parámetro fluctuation strength.

Roughness (R): o aspereza está relacionado con el loudness y describe la percepción de la variación de amplitud del sonido incluso cuando el nivel de presión sonora o el nivel de presión sonora equivalente permanece sin cambios. La unidad de medida de este parámetro es el asper y actualmente no existe una estandarización para su medición. Para su cálculo, se analizan los efectos provocados por distintos grados de modulaciones en las bandas críticas y las compone energéticamente para obtener un valor roughness total. La señal se divide en 24 subbandas con un ancho de 2 bandas críticas, solapandose 1 banda con las vecinas, detectando así modulaciones de frecuencia grandes dentro de una subbanda. El valor total R se calcula como la suma de todos los valores parciales.

Fluctuation Strength (F): o fuerza de fluctuación, es un parámetro psicoacústico que describe cómo varía en amplitud un sonido, de manera más o menos intensa. Al igual que el roughness, depende de la frecuencia y de la profundidad de las fluctuaciones del parámetro loudness. Para determinar F es necesario analizar las variaciones de la señal con modulaciones de la frecuencia muy pequeñas, sobre unos 4 Hz. La unidad de este es el vacils. En este caso, para calcular F la señal se divide en subbandas de 1 de ancho de banda crítica y no superpuestas dado que se consideran modulaciones de frecuencias bajas. La suma de las contribuciones parciales para cada banda crítica dan el valor F.

Finalmente, el parámetro **Nuisance (N)** o molestia es una índice perceptual que permite una cuantificación objetiva y medible de las características físicas de la señal. Para su cálculo se utilizan todos los parámetros psicoacústicos anteriormente descritos:

$$N = L \cdot (1 + \sqrt{W_s^2 + W_f^2})$$

⁴⁹ FASTL, HUGO, «Psycho-acoustics and sound quality», en *Communication acoustics*, 2005, pp. 139-162.

donde

$$W_s = 0,75 \cdot (S - 1,75) \cdot \log_{10}(L + 10)$$

$$W_f = \frac{2,18}{L^{0,34}} \cdot (0,4F + 0,6R)$$

Es importante resaltar que la dependencia principal del parámetro loudness en el índice nuisance.

De todo lo presentado anteriormente, resulta interesante el uso de redes de sensores acústicos distribuidos por toda la ciudad que permitan una monitorización continua de los niveles de ruido y molestia. Esto ayudaría a la administración a la gestión ambiental y mejoraría y complementaría los datos para un método de predicción y extrapolación. Además, mediante el uso de una plataforma de ciudad se pueden hacer públicos de forma dinámica los datos más relevantes a los ciudadanos tanto mapas, gráficas y tablas interactivas.

4. LAS REDES DE SENSORES ACÚSTICOS INALÁMBRICOS

4.1. Redes de sensores acústicos inalámbricos

Tal y como se ha presentado en el Apartado 2.4., el campo de las redes de sensores inalámbricos (WSN) ha mostrado grandes potenciales en campos tales como la industria, y se ha abierto el camino a otro tipo de usos y aplicaciones para estas redes. En el caso que se describe a continuación, se ha particularizado este tipo de redes enfocándose en el ruido; concretamente, en la contaminación acústica por ruido de tráfico. Para ello, se ha particularizado una red de sensores inalámbricos usando sensores acústicos para un uso enfocado de manera concreta al análisis de sonido. En la actualidad, las redes de sensores acústicos inalámbricos se usan principalmente para la creación de mapas sonoros en tiempo real^{50, 51, 52} y control

⁵⁰ SANTINI, SILVIA, BENEDIKT OSTERMAIER, AND ANDREA VITALETTI. «First experiences using wireless sensor networks for noise pollution monitoring», en *Proceedings of the workshop on Real-world wireless sensor networks*, Apr. 2008, pp. 61-65.

⁵¹ FILIPPONI, LUCA, SILVIA SANTINI, AND ANDREA VITALETTI. «Data collection in wireless sensor networks for noise pollution monitoring», en *Distributed Computing in Sensor Systems*, 2008, pp. 492-497.

⁵² GUBBI, JAYAVARDHANA ET AL. «A pilot study of urban noise monitoring architectu-

de actividades calculando nivel de presión sonora equivalente. En recientes artículos se empiezan a proponer el uso de estas redes para la creación de sistemas para la captación de la señal de audio, cálculo de parámetros, así como de la evaluación de la molestia subjetiva del ruido⁵³.

4.2. Nodo acústico

Las redes de sensores acústicos permiten monitorizar en distintos puntos en el espacio así como también en distintos momentos de tiempo. En la figura 6 se muestra una fotografía del aspecto exterior del prototipo de sensor acústico creado, el cual está basado en la plataforma Raspberry Pi⁵⁴. Se observa en la parte inferior de la caja estanca el micrófono externo.

La plataforma Raspberry Pi como núcleo principal del sensor ha sido elegida debido a su alta versatilidad, facilidad de implementación de los algoritmos usando un lenguaje de programación conocido, en este caso, C adaptado de Matlab, así como por características como su reducido tamaño y su bajo precio, permitiendo así la idea de ser una plataforma de bajo coste. También tiene un consumo energético reducido, equilibrado con una potencia de cálculo suficiente, adecuada para las tareas empleadas en este proyecto. Otra de las grandes ventajas al trabajar con desarrollos en Raspberry Pi es la posibilidad de operar sobre un sistema operativo libre. Por ejemplo, se recomienda la utilización de una distribución *Raspbian*⁵⁵, una distribución del SO GNU/Linux para Raspberry Pi. Los algoritmos son desarrollados en Matlab y



Figura 6. Diseño final del sensor acústico encapsulado en caja estanca para su instalación en exteriores.

re using wireless sensor networks», en *Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, 2013 International Conference on, 2013, pp. 1047-1052.

⁵³ SEGURA, JAUME ET AL. «Psychoacoustic Annoyance Monitoring with WASN for Assessment in Urban Areas», en *Audio Engineering Society Convention 138*, 2015.

⁵⁴ «RASPBERRY PI - Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi.» 2011.

⁵⁵ «RASPBIAN: FrontPage.» 2012.

compilados en C, y éstos son ejecutados en *Raspbian*. Al estar la placa conectada en red, otra ventaja ligada al uso de este sistema operativo es la capacidad de controlar remotamente la placa a través de SSH (*Secure Shell*, en español: intérprete de órdenes segura). A través de un terminal de comandos se accede al sistema y se llevan a cabo tareas remotas como la actualización de los algoritmos o la comprobación del correcto funcionamiento del sistema, entre otras.

En la figura 7 se observa un diagrama de bloques del sistema usado por el sensor acústico donde se identifican los bloques del sistema formado por la Raspberry Pi, con módulo de adquisición de sonido y adecuación de la señal así como de extracción de parámetros

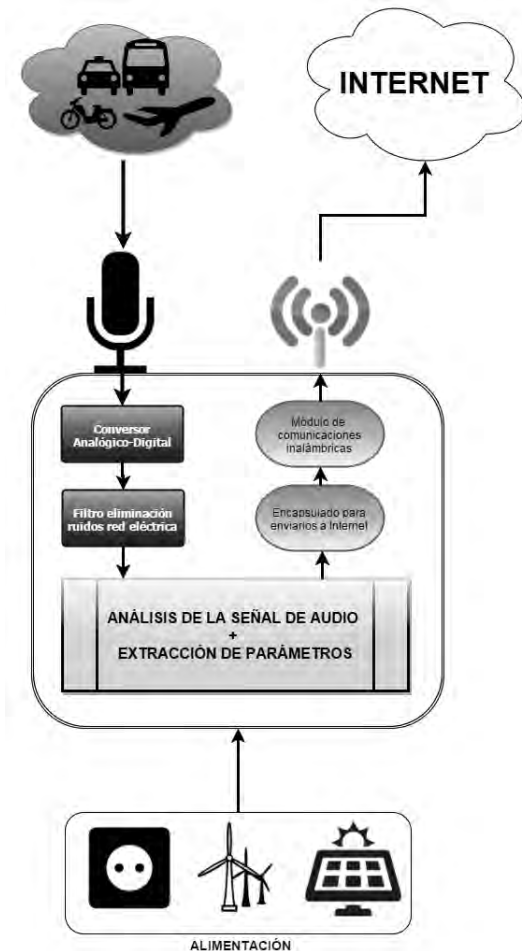


Figura 7. Diagrama de bloques del sistema.

y el canal de salida a la plataforma de ciudad. También se observan las conexiones de datos y conexión eléctrica. A continuación se describen las fases del proceso:

Fase de captación/captura: El sonido ambiente es registrado por un micrófono que se encuentra normalmente expuesto al aire libre para capturar los sonidos del exterior sin la distorsión que produciría encapsularlo. Para proteger estos delicados instrumentos contra inclemencias del tiempo se suelen usar pantallas antiviento y cubiertas antilluvia para preservar así la respuesta acústica en campo libre de los micrófonos. También se suelen añadir varillas antipájaros y desecadores para absorber la humedad.

Adecuación de la señal: La señal de audio es conver-

tida en una señal digital usando un conversor analógico a digital. Normalmente éstos son tarjetas de sonido, externas, internas, o incorporadas en los propios micrófonos. Las señales analógicas que se capturan y se digitalizan tienen un ruido de fondo presente y quizás los niveles de amplificación y calibración no son los adecuados para el posterior análisis de la señal de audio, es por ello que para preparar la señal, ésta es pasada a través de varios filtros que eliminan esos ruidos no deseados y se amplifica a un nivel apropiado para el posterior análisis.

Análisis y extracción de parámetros: Esta es la fase en la que se extraen los parámetros acústicos que se usarán para analizar el ambiente sonoro en el cual se encuentra el sensor. Estos parámetros se calculan en tiempo real cada periodo de tiempo fijado, por ejemplo cada 10 segundos, para una mejor comprensión de la evolución temporal del sonido en un punto concreto.

Envío de resultados

Una vez que los parámetros deseados han sido calculados, el siguiente paso es prepararlos para el envío de manera inalámbrica en unos casos a un nodo servidor, o en otros directamente a la plataforma de ciudad en internet, donde pueden ser consultados o reprocesados para otros propósitos.

Alimentación

El conjunto del sistema necesita alimentación eléctrica, y para ello se pueden usar desde conexión permanente a la red eléctrica (por ejemplo, sensores instalados en luminarias en las ciudades) hasta sistemas autónomos con baterías recargables mediante fuentes renovables (por ejemplo, un sensor para monitorización de humedad y temperatura de uso agrónomo que deba estar alimentado mediante baterías, las cuales se recarguen mediante una placa fotovoltaica).

4.3. Utilización de micrófonos para la monitorización ambiental

La producción masiva de micrófonos para la electrónica de consumo ha abierto el camino para usar estos micrófonos en aplicaciones asequibles de medida de ruido. Estas aplicaciones pueden ir desde monitorización del campo sonoro hasta la validación de mapas de ruido calculados. Los micró-

fonos son uno de los puntos críticos en los dispositivos de medición, ya que sus características afectan directamente al resultado final de las medidas.

En un reciente estudio⁵⁶, en el que se analizan diversos micrófonos de bajo coste, se observó una desviación en las mediciones de alrededor de 1 dBA a lo largo de 6 meses de mediciones continuas. En el mismo estudio se concluye también, que los micrófonos de bajo coste de electrónica de consumo pueden ser utilizados en tareas de monitorización del campo sonoro aunque con ciertos inconvenientes. A largo plazo, en las pruebas en exteriores, los micrófonos tendían a variar sus resultados frente a los de referencia. Probablemente, debido a causas del medio como la temperatura del aire o la humedad ambiente. Aunque se concluye que estos errores son pequeños ante la diferencia de precio existente entre micrófonos profesionales para mediciones y estos micrófonos. El reemplazo de los micrófonos que, tras un cierto periodo de tiempo, hayan fallado, es una opción viable. Se concluye también que la intervención humana se hace necesaria para, por ejemplo, la calibración periódica, así que la sustitución de estos micrófonos de bajo coste podría formar parte de una rutina de mantenimiento de los sensores. Para este diseño, como se puede observar en la Figura 8, se optó por un micrófono USB electret, el cual incorpora el módulo conversor analógico-digital (ADC) integrado y añade un nivel bajo de ruido eléctrico a las mediciones. La tarea de calibración de los dispositivos también es una fase muy importante en el desarrollo de estos dispositivos. En el caso del sensor construido, se realizó una corrección espectral de la respuesta en frecuencia del micrófono después de una medición de la misma en laboratorio.



Figura 8. Micrófono electret en detalle.

⁵⁶ VAN RENTERGHEM, TIMOTHY ET AL. «On the ability of consumer electronics microphones for environmental noise monitoring», en *Journal of Environmental Monitoring* 13.3, 2011, pp. 544-552.

4.4. Accesibilidad y gestión de los datos

La potencia real de este tipo de sistemas analizadores de audio reside en la capacidad de llevar a cabo los cálculos en distintas posiciones en distintos instantes de tiempo, y también en la capacidad para estar interconectados unos con otros. Esto dota a los nodos de conectividad, permitiendo su monitorización y gestión remota. Un paso más allá es la conexión directamente con la nube y los servicios que en ella se pueden gestionar⁵⁷.

Al sensor desarrollado se le ha dotado de conectividad con Internet mediante la conexión inalámbrica y se ha aprovechado esta conexión a la nube para almacenar y mostrar los resultados de los parámetros acústicos calculados sobre una plataforma web para el IoT, situándose en las últimas capas del ecosistema. Usando las posibilidades de visualización de la capa de aplicación se han creado diversas gráficas para visualizar en tiempo real los datos que el sensor está calculando y enviando a la nube. Un ejemplo se muestra en la Figura 9. También se pueden extraer los datos de un canal en diversos formatos (JSON, XML o CSV) para su análisis posterior.

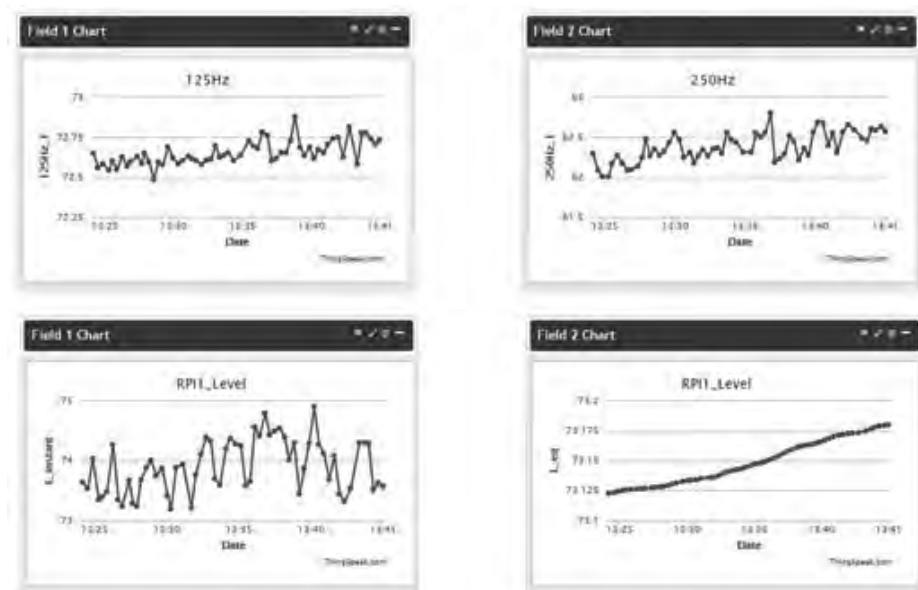


Figura 9. Ejemplos de visualización online de variables en la plataforma online.

⁵⁷ CUSUMANO, MICHAEL., «Cloud computing and SaaS as new computing platforms», en *Communications of the ACM* 53.4, 2010, pp. 27-29.

5. EXPERIMENTACIÓN PRÁCTICA

5.1. Configuración de la prueba

Se ha llevado a cabo una prueba experimental mediante la realización de una serie de medidas de ruido a través de varios nodos captadores simultáneos de 24 horas en el interior de un vivienda y en la fachada de ésta. Estas mediciones fueron tomadas en varias alturas de un edificio situado en una avenida principal de Molina de Segura, Murcia. Esta calle está muy transitada tanto por vehículos privados como autobuses, debido a las dos paradas a ambos lados de la calle que acogen distintas líneas de transporte, así como camiones y vehículos de servicios municipales.

Los nodos en el interior de la vivienda fueron situados a un mínimo de 2 metros del cerramiento de la fachada y a 2 metros de las paredes laterales. Los sensores receptores del exterior se emplazaron a una distancia aproximada de 1,5 metros de la fachada. Para llevar a cabo este análisis, se utilizó un proceso de calibración acústica previa. Durante el proceso, como ya se ha detallado en el Apartado 4.2, a partir de la señal de sonido adquirida, mediante una serie de algoritmos se realiza el cálculo de los diferentes parámetros acústicos en periodos de 10 segundos.

5.2. Resultados y discusión

Para el análisis de los parámetros psicoacústicos, se ha planteado como ejemplo 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.

Tal y como muestra la Figura 10, es interesante observar cómo los L_{eq} exteriores son atenuados por el aislamiento de la fachada. Así se corrobora en los niveles máximos de ruido por la noche del camión dentro y fuera. Los niveles en el exterior superan los 65 dB, nivel recomendado por la OMS como tolerable, aunque los niveles en el interior, gracias a la protección acústica de la vivienda no superan los 60 dB de pico. Sin embargo, para conocer la molestia es necesario contemplar el espectro y variabilidad del ruido, no solo su nivel.

En la Figura 11 se puede observar el espectro frecuencial en bandas de tercio de octava, promediado durante los 5 minutos en los que el

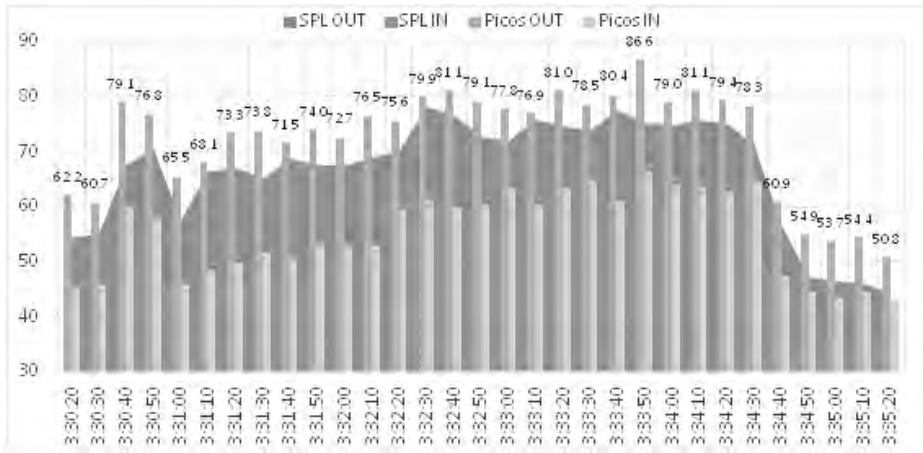


Figura 10. Evolución temporal de los niveles de presión sonora equivalente (10s,dB) promedio de los nodos interiores y exteriores así como los picos máximos registrados.

camión estuvo en marcha y trabajando en la avenida. Los niveles en las bajas y medias frecuencias, hasta la banda de 2.500 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

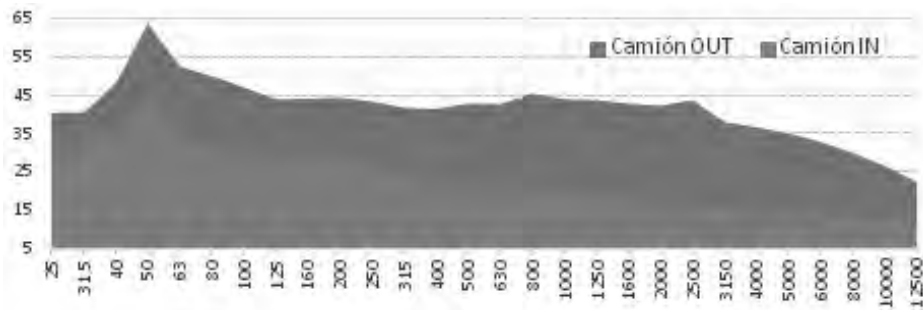


Figura 11. Espectro promedio en bandas de tercio de octava durante el transcurso del evento del camión en los nodos interiores y exteriores.

En la Figura 12 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 3:30h de la madrugada. Aunque los niveles de ruido interiores fueron de 66,26 dB (una caída de 20 dB),

segúan 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.

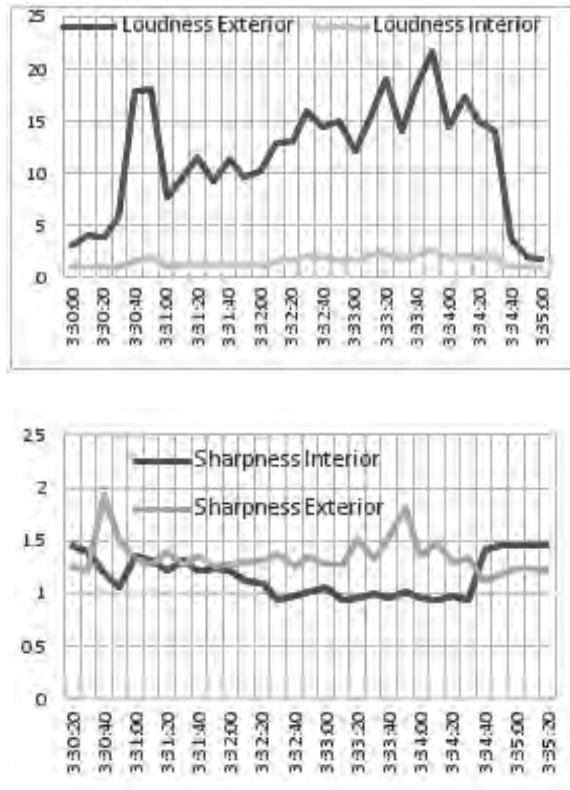


Figura 12. Niveles de loudness y sharpness promedio del interior y exterior durante el transcurso del evento del camión

Para comprender mejor la molestia percibida, se muestra una comparativa de distintos ruidos según el nivel de presión sonora y el loudness en la Tabla 1. Comparando los resultados de la Figura 12 con los valores de la Tabla 1, se puede observar que el ruido producido por el camión en la medición de los nodos exteriores 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.

Tabla 1. Niveles de presión sonora y nivel de sonoridad (loudness) de diferentes ambientes acústicos		
<i>Fuente Sonora</i>	<i>Nivel de Presión Sonora (dB)</i>	<i>Loudness (son)</i>
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

También en la Figura 12 se pueden observar los niveles de sharpness en acum de esta franja de audio con el ruido producido por el 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.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado las redes de sensores inalámbricas como una herramienta para la monitorización y evaluación de parámetros en las ciudades inteligentes. En concreto, se ha analizado la posibilidad de utilizar redes de sensores acústicos inalámbricos para la evaluación de la molestia al ruido de los ciudadanos. Después de

describirlos los aspectos técnicos de una ciudad inteligente y la aplicación de las tecnologías de la información y las comunicaciones en ellas, se introduce el problema de la contaminación acústica en las ciudades y los diferentes métodos y parámetros para cuantificarla. Destacar que para una adecuada evaluación de la molestia al ruido es necesario tener en cuenta diversos factores y características del mismo además del nivel, como son, componentes frecuenciales, así como variación temporal y de amplitud. Para la monitorización y cálculo de parámetros psicoacústicos sobre la molestia se ha diseñado y desarrollado un sensor acústico inalámbrico que transmite los resultados procesado a Internet, hacia una plataforma de ciudad. Finalmente, se presenta y discute un ejemplo experimental del uso de estos sensores mostrando su utilidad y ventaja sobre los sistemas tradicionales de medida.