



UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE MURCIA

ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO

Programa de Doctorado en Urbanismo

Análisis del campo sonoro y la molestia de la contaminación
acústica en ciudades mediante el uso de redes de sensores.

Autor:

D. Juan Emilio Noriega Linares

Director:

Dr. D. Juan Miguel Navarro Ruiz

Murcia, mayo de 2017



UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE MURCIA

ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO

Programa de Doctorado en Urbanismo

Análisis del campo sonoro y la molestia de la contaminación
acústica en ciudades mediante el uso de redes de sensores.

Autor:

D. Juan Emilio Noriega Linares

Director:

Dr. D. Juan Miguel Navarro Ruiz

Murcia, mayo de 2017



UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE MURCIA

AUTORIZACIÓN DE LO/S DIRECTOR/ES DE LA TESIS

PARA SU PRESENTACIÓN

El Dr. D. Juan Miguel Navarro Ruiz como Director de la Tesis Doctoral titulada “Análisis del campo sonoro y la molestia de la contaminación acústica en ciudades mediante el uso de redes de sensores.” realizada por D. Juan Emilio Noriega Linares en el Departamento de Ciencias Politécnicas, **autoriza su presentación a trámite** dado que reúne las condiciones necesarias para su defensa.

Lo que firmo, para dar cumplimiento al Real Decreto 99/2011, 1393/2007, 56/2005 y 778/98, en Murcia a 31 de mayo de 2017

AGRADECIMIENTOS

A Raquel, gracias por tu apoyo, por enseñarme que a veces está bien agobiarse un poco, por estar dispuesta siempre a echarme una mano en todo. Sin ti esto no hubiera sido posible.

A mi familia que siempre han estado ahí junto a mí y dándome su apoyo desde el principio.

A Milo por todas esas horas de compañía incondicional y cariño verdaderos, además de servir de estufa de pies en invierno preparando papers.

A David por esos años de compañerismo transformados en una muy buena amistad, por esos piques sanos entrenando y esos festines merecidos en la Heiser BBQ.

A Juanmi, mi director de tesis, de TFM, de TFG y de PFC que son muchos años ya. Gracias a su inestimable ayuda he conseguido este gran hito en mi vida tras años de esfuerzo, aconsejándome desde su experiencia y, sobre todo, con paciencia.

Tampoco puedo olvidar a todas las personas que han pasado por la OPRI, compañeros de muchos países que me han enriquecido mucho como persona.

Y a todos mis amigos y compañeros que siempre han estado ahí para apoyarme cuando lo he necesitado.

Finalmente, agradecer a Bill, Olly y Trevor por acogerme durante meses en la Universidad de Salford y hacerme sentir como uno más de su grupo y valorar mis pequeñas aportaciones.

"El bien de la humanidad debe consistir en que cada uno goce al máximo de la felicidad que pueda, sin disminuir la felicidad de los demás." Aldous Huxley (1894-1963).

RESUMEN

En la constante evolución en la que viven las ciudades actuales, la preocupación por la contaminación acústica y la concienciación sobre el ruido se han incrementado en los últimos años. El aumento de los niveles de contaminación acústica ha hecho que se ponga más atención en el ruido y sus efectos en las personas, y cómo éstas pueden estar afectadas, ya no de manera directa con problemas de salud, pero sí en cómo el ruido afecta más subjetivamente de una manera negativa en la calidad de vida, percibiéndose como molestia acústica. Los decibelios se llevan midiendo desde hace décadas, pero la molestia percibida por las personas originada por el ruido se ha empezado a estudiar más recientemente.

La tendencia de las ciudades actuales a un cambio de modelo, adoptando el concepto de ciudad inteligente, ha hecho que éstas se empiecen a valer de una serie de herramientas tecnológicas para su avance y desarrollo. El crecimiento de las ciudades busca ser sostenible, a la vez que ser capaz de aumentar la calidad de vida de las personas que viven en ellas, siendo por ello necesarias nuevas fuentes de información sobre todos los aspectos de la ciudad y sus ciudadanos.

Esta tesis se enfoca en el uso de las tecnologías actuales de las redes de sensores y de los dispositivos de Internet of the Things y cómo se pueden usar estas tecnologías para la evaluación del ambiente sonoro de las ciudades, con el objetivo de poder evaluar la sensación de molestia que tendrían los habitantes de esas ciudades.

En el pasado, las redes de sensores se han utilizado en muchos campos, y en la acústica han sido utilizadas en diversas aplicaciones. Normalmente, estas aplicaciones se enfocan en la adquisición de niveles de presión sonora, y diversos parámetros estadísticos relacionado con estos niveles, pero las sensaciones de las personas no quedan englobadas en su totalidad con estos parámetros. Es por ello que en este trabajo se ha propuesto la implementación en dispositivos acústicos autónomos del cálculo de parámetros psicoacústicos con el objetivo de aportar contribuciones en este campo de investigación.

Para acercar aún más los análisis de estos dispositivos a la respuesta humana, se ha diseñado un sistema que realiza de manera previa una adaptación de las

señales capturadas para emular la señal binaural que captaría el sistema auditivo humano. Esto se hace por medio de la captación de señales monofónicas a través de un sistema de array de micrófonos en el dispositivo y procesando estas señales. Posteriormente, se ha implementado un proceso que permite calcular la molestia sonora provocada por la señal binaural sintetizada en la fase anterior.

Finalmente, se ha llevado a cabo una evaluación del dispositivo en varias aplicaciones tanto reales como de laboratorio. En estas pruebas se pone en funcionamiento el dispositivo propuesto en este trabajo de investigación, con el objetivo de estudiar el ambiente sonoro. También se compara la precisión de cómo el dispositivo es capaz de evaluar la molestia acústica a la que pueden estar expuestas las personas con respecto a los métodos de evaluación clásicos.

En general, los resultados muestran que el uso de las tecnologías de las redes de sensores acústicos y su implantación en ciudades es una herramienta de utilidad para conocer más sobre éstas. Además, la creación de un nuevo dispositivo que es capaz de evaluar por medio de parámetros psicoacústicos la sensación subjetiva de molestia acústica abre las puertas a obtener información valiosa sobre la calidad de vida de los habitantes de las ciudades.

Palabras clave: *acústica, ciudades, redes de sensores, internet de las cosas, array de micrófonos, molestia, psicoacústica.*

ABSTRACT

In the constant evolution in which nowadays cities live, the concern about noise pollution and the awareness about noise have increased in the last years. The rise of the noise pollution levels has resulted in more attention being paid to noise and its effects on people and how they can be affected and how noise affects the people in terms of acoustic discomfort and noise annoyance affecting their quality of life. Noise levels have been measured for decades, but the perceived noise annoyance is an opened research topic in our days.

The trend of today's cities is to change to a model of smart city, using new technological resources for its advanced and development. The growth of cities seeks to be sustainable, at the same time as it can help the citizens to improve their quality of life. For this reason, new data sources are necessary to cover all the new aspects of the cities and their inhabitants.

This thesis is focused on the use of current sensor network technologies and on the use of Internet of Things devices to seek how these tools can be used to evaluate the urban sound environment to assess the noise annoyance that the inhabitants of a city would have.

In the past, sensor networks have been used in different fields and, in acoustics, there exists some applications in which these networks have been used. Usually, these applications have the purpose of obtaining sound pressure levels, percentiles and parameters related to levels, but the subjective response of the people and their feelings are not totally covered with the use of these parameters. For this reason, in this research work, an implementation of the calculation of psychoacoustic parameters in standalone devices has been proposed.

To have a closer approach to the human response, a design which performs a binaural synthesis from the acquired audio signals has been carried out. This is done through the monophonic audio acquisition with the use of a 2-microphone array installed in the device and with the processing of these signals. Later, a process that allows the noise annoyance extraction produced by the binaural signal calculated in the previous stages is implemented.

Finally, an evaluation of the device has been carried out in several real and laboratory applications. In these tests, the proposed device is put into operation with the aim of studying the sound environment and how the proposed device can evaluate the noise annoyance based on the psychoacoustic parameter, compared to common evaluation methods. It also compares the accuracy of how the device is able to assess the acoustic discomfort to which people might be exposed.

The results show that the use of sensor networks technologies and its deployment in cities are powerful tools to gather more information about them. Moreover, the creation of a new device able to evaluate the subjective noise annoyance using a psychoacoustic parameter allows to get valuable information about the quality of life of the inhabitants of the cities.

ÍNDICE GENERAL

AUTORIZACIÓN DE LOS DIRECTORES	
AGRADECIMIENTOS	
RESUMEN	
ÍNDICE GENERAL	
SIGLAS Y ABREVIATURAS	
ÍNDICE DE FIGURAS DE TABLAS Y DE ANEXO	

CAPÍTULO I – INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	34
1.1. Introducción.....	36
1.2. Motivación y objetivo de la tesis	38
1.3. Organización de la tesis.....	41
CAPÍTULO II – EL PROBLEMA DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA EN LAS CIUDADES ACTUALES	44
2.1. Introducción.....	46
2.2. Breve repaso a la evolución de las ciudades	47
2.3. Los nuevos retos de las ciudades contemporáneas.....	55
2.3.1. Introducción.....	55
2.3.2. El reto de la contaminación ambiental en las ciudades	61
2.4. La contaminación acústica y la acústica medioambiental.....	65
2.4.1. Fuentes.....	77
2.4.2. Efectos	81
2.4.3. Métodos de evaluación, control y prevención	87
2.5. Resumen	95
CAPÍTULO III - TECNOLOGÍAS APLICADAS EN LAS CIUDADES INTELIGENTES PARA LA EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA	96
3.1. Introducción.....	99
3.2. La aplicación del Internet de las cosas en las ciudades inteligentes	100
3.2.1. Modelo de ciudad inteligente.....	105
3.2.2. Dispositivos de sensores y actuadores	108
3.2.3. Redes de telecomunicación.....	111
3.2.4. Plataforma de ciudad. Gestión y análisis de la información.....	113
3.2.5. Capa de aplicaciones.....	116
3.3. Redes de sensores acústicos.....	118
3.3.1. Sensor acústico.....	119

3.3.2. Aplicaciones de las redes de sensores acústicos	124
3.4. Molestia	126
3.4.1. Métodos de evaluación de la molestia	127
3.4.2. Modelo de loudness	132
3.4.3. Modelo binaural	137
3.5. Discusión	139
3.5.1. Sobre redes de sensores acústicos	139
3.5.2. Sobre evaluación de la molestia	140
CAPÍTULO IV - DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ACÚSTICO CONECTADO PARA LA EVALUACIÓN DE LA MOLESTIA DEL RUIDO	142
4.1. Introducción.....	144
4.2. Creación de nodo para una red de sensores acústicos inalámbricos para la evaluación de ruido	145
4.2.1. Consideraciones previas.....	146
4.2.2. Componentes	147
4.2.3. Implementación de los parámetros acústicos	157
4.2.4. Almacenamiento de los datos en repositorio online	158
4.2.5. Pruebas y certificación en laboratorio	160
4.2.6. Conclusiones y discusión del experimento	164
4.3. Evolución a modelo binaural.....	165
4.3.1. Síntesis de la señal binaural	166
4.3.2. Diseño del sensor	178
4.3.3. Conclusiones	184
4.4. Resumen	184
CAPÍTULO V - USOS Y EVALUACIÓN DEL DISPOSITIVO ACÚSTICO CONECTADO PARA LA EVALUACIÓN DE LA MOLESTIA DEL RUIDO	186
5.1. Introducción.....	188
5.2. Uso de redes de sensores acústicos inalámbricas para la monitorización del aislamiento a ruido aéreo en un edificio	189
5.2.1. Descripción del experimento realizado	190
5.2.2. Resultados del experimento	192
5.2.3. Estudio de molestia acústica en un evento	194
5.2.4. Conclusiones del experimento	197
5.3. Influencia de la difusión en el parámetro de molestia loudness	198
5.3.1. Experimentos	200
5.3.2. Resultados y discusión	205
5.3.3. Conclusiones	217

	17
5.4. Evaluación de entorno real con nodo acústico binaural.....	218
5.4.1. Descripción del experimento.....	219
5.4.2. Resultados.....	223
5.4.3. Rendimiento del dispositivo.....	237
5.4.4. Conclusiones.....	239
5.5. Resumen.....	241
CAPÍTULO VI – CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....	243
6.1. Resumen y conclusiones.....	245
6.2. Contribuciones de esta tesis.....	249
6.3. Líneas futuras.....	251
CAPÍTULO VII - BIBLIOGRAFÍA.....	253
CAPÍTULO VIII - ANEXOS.....	277

SIGLAS Y ABREVIATURAS

DOA: Direction of Arrival – Dirección de llegada

HRTF: Head Related Transfer Function – Función de transferencia de la cabeza

IOT: Internet of Things – Internet de las cosas

HATS: Head and Torso Simulator – Simulador de cabeza y torso

WDO: W-Disjoint Orthogonality

STFT: Short-time Fourier transform – Transformada de Fourier de tiempo reducido

WFS: Wave Field Synthesis

ÍNDICE DE FIGURAS, DE TABLAS Y DE ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Planta de la ciudad amurallada de estilo medieval, Carcassonne, en el siglo XIII (Viollet-le-Duc, 1868)

Figura 2. Joseph Heintz, *Pianta de Venezia*.

Figura 3. Pintura de Carl Gustav Carus, *Blick auf Florenz*

Figura 4. Vista de Dresden a final del siglo 19. Photochrom print.

Figura 5. La señal senoidal en rojo tiene una frecuencia del doble a la señal azul, ya que realiza dos ciclos donde la azul realiza uno.

Figura 6. Representación gráfica de una señal senoidal en la que se muestra que la longitud de onda.

Figura 7. Representación gráfica de dos señales senoidales con distinta amplitud.

Figura 8. Curvas de igual sonoridad para tonos puros, adaptada de (Suzuki & Takeshima, 2004).

Figura 9. Curvas de ponderación A, B y C según la norma IEC 61672-1:2002

Figura 10. Representación gráfica del número de personas en la Unión Europea expuestas a niveles de ruido mayores de L_{den} 55 dB. Los datos están basados en los informes oficiales de los países para la Unión Europea bajo la directiva de ruido medioambiental 2002/49/EC

Figura 11. Contribuciones de varias fuentes del ruido de tráfico. Figura extraída de (Bernhard, y otros, 2005). En ella se muestra la evolución del nivel de presión sonora, ponderado en decibelios A, en función de la velocidad, para distintas fuentes sonoras del vehículo.

Figura 12. Curva de audición en función de la edad de un sujeto tipo. Datos para sujetos tipo de 20, 40, 60 y 90 años.

Figura 13. Etiqueta europea de neumáticos.

Figura 14. Mapa de aglomeraciones de la primera fase de aplicación de la directiva 2002/49/CE.

Figura 15. Esquema con las partes principales de la estructura IoT.

Figura 16. El crecimiento de los dispositivos conectados ya superó al número de personas a nivel mundial, y se espera que el número siga creciendo. Original extraído de (Evans D. , 2011).

Figura 17. Capas de la arquitectura de las tecnologías de la información y las comunicaciones de una Smart City.

Figura 18. Esquema simplificado de funcionamiento de sensores y actuadores.

Figura 19. Infografía sobre sensores y actuadores. Extraída de Postscapes (Postscapes, 2017).

Figura 20. Tipos de datos de Big Data. Figura original extraída de (Soares, 2012).

Figura 21. Diagrama de bloques representando las principales partes de un dispositivo acústico para su uso en redes de sensores

Figura 22. Principales etapas del cálculo monoaural de loudness.

Figura 23. Función de transferencia desde el nivel de campo libre hasta el nivel en el tímpano. Extraída de Moore et al., 1997.

Figura 24. Función de transferencia del oído medio, representada como la atenuación efectiva en función de la frecuencia. Extraída de Moore et al., 1997.

Figura 25. Contorno del nivel de loudness en el umbral de audición en campo libre (ISO226, 2003).

Figura 26. Etapas de cálculo de loudness binaural.

Figura 27. Esquema de funcionamiento para la conectividad de datos y de alimentación a través del sistema Power over Ethernet (POE), IEEE 802.3af.

Figura 28. Respuesta en frecuencia del micrófono T Bone GC 100.

Figura 29. Diagrama polar de directividad del micrófono T Bone GC 100 para 1 kilohercio.

Figura 30. Diagrama de bloques del sistema completo del sensor acústico conectado.

Figura 31. Vistas del interior del prototipo construido. (a) Diseño final del dispositivo acústico. En la imagen, la Raspberry Pi y el resto de componentes están en el interior de la carcasa protectora. En la parte inferior de la caja estanca se puede observar el micrófono. (b) Vista interior de la caja estanca. Los componentes dentro de la caja son la Raspberry Pi junto con el splitter POE, y el micrófono en la parte inferior de la imagen, así como los cables de conexión.

Figura 32. Ejemplos de visualización de la plataforma ThingSpeak mostrando gráficos de distintos parámetros acústicos: nivel de presión sonora instantáneo, nivel de presión sonora equivalente y el análisis del nivel de presión sonora para las bandas de 125 y 250 hercios.

Figura 33. Evolución temporal de la señal generada y de las lecturas por parte del dispositivo acústico.

Figura 34. Muestra de los datos obtenidos desde el sonómetro (azul) y desde el dispositivo Raspberry Pi (rojo) en las pruebas en la fachada.

Figura 35. Array de dos micrófonos capturando la señal de una fuente desde la dirección θ .

Figura 36. Detalle de uno de los micrófonos binaurales en el simulador de cabeza.

Figura 37. Vista trasera del simulador de cabeza con el dispositivo PS3 Eye situado encima.

Figura 38. Vista frontal del simulador de cabeza con el dispositivo PS3 Eye situado encima.

Figura 39. Instalación del sistema de Wave Field Synthesis.

Figura 40. Vista aérea del esquema del array circular de 64 altavoces y 32 canales.

Figura 41. Diagrama de valores de loudness binaural normalizados para los tonos de frecuencia 125 y 250 hercios para la señal binaural generada del array de dos micrófonos de PS3 Eye y para la señal grabada por el HATS.

Figura 42. Diagrama de valores de loudness binaural normalizados para los tonos de frecuencia 500 y 1000 hercios para la señal binaural generada del array de dos micrófonos de PS3 Eye y para la señal grabada por el HATS.

Figura 43. Diagrama de valores de loudness binaural normalizados para los tonos de frecuencia 2000 y 4000 hercios para la señal binaural generada del array de dos micrófonos de PS3 Eye y para la señal grabada por el HATS.

Figura 44. Diagrama de valores de loudness binaural normalizados para el tono de frecuencia 6300 hercios y ruido blanco para la señal binaural generada del array de dos micrófonos de PS3 Eye y para la señal grabada por el HATS.

Figura 45. Diagrama de directividad del array de dos micrófonos para las frecuencias de 100 y 1000 hercios.

Figura 46. Diagrama de directividad del array de dos micrófonos para las frecuencias de 2000 y 4000 hercios.

Figura 47. Foto del dispositivo acústico.

Figura 48. Diferencia de niveles estandarizada en bloques de 10 segundos

Figura 49. Media de SPL por tercio de octava desde las 10:03:30 a 13:03:30 en el nodo interior y exterior y diferencia media de niveles.

Figura 50. Evolución temporal de los niveles de presión sonora (SPL) en los nodos interior y exterior, así como los picos registrados.

Figura 51. Niveles de loudness en los nodos interior y exterior durante el evento.

Figura 52. Niveles de sharpness en los nodos interior y exterior durante el evento.

Figura 53. Resultados de las respuestas al impulso binaurales calculadas por el software Odeon.

Figura 54. Loudness para un tono senoidal de 1 kHz a 40 dB en escala logarítmica y lineal.

Figura 55. Sala “caja de zapatos”.

Figura 56. Sala cúbica. (a) Caso con la fuente 1 y los receptores apuntando hacia esa fuente. (b) Caso con la fuente activa 2.

Figura 57. Evolución del loudness monoaural con el scattering para la fuente activa 1 y un coeficiente de absorción $\alpha=0,1$.

Figura 58. Evolución del loudness monoaural con el scattering para la fuente activa 1 y un coeficiente de absorción $\alpha=0,2$.

Figura 59. Evolución del loudness monoaural con el scattering para la fuente activa 2 y un coeficiente de absorción $\alpha=0,1$.

Figura 60. Evolución del loudness monoaural con el scattering para la fuente activa 2 y un coeficiente de absorción $\alpha=0,2$.

Figura 61. Evolución del loudness binaural con el scattering para la fuente activa 1 y un coeficiente de absorción $\alpha=0,1$.

Figura 62. Evolución del loudness binaural con el scattering para la fuente activa 1 y un coeficiente de absorción $\alpha=0,2$.

Figura 63. Evolución del loudness binaural con el scattering para la fuente activa 2 y un coeficiente de absorción $\alpha=0,1$.

Figura 64. Evolución del loudness binaural con el scattering para la fuente activa 2 y un coeficiente de absorción $\alpha=0,2$.

Figura 65. Evolución del loudness monoaural con el scattering para la sala paralelepípeda con el coeficiente de absorción $\alpha=0,1$.

Figura 66. Evolución del loudness binaural con el scattering para la sala paralelepípeda con el coeficiente de absorción $\alpha=0,1$.

Figura 67. Valores de loudness para los canales izquierdo y derecho en el caso de la sala paralelepípeda con $\alpha=0,1$.

Figura 68. Evolución del loudness monoaural con el scattering para la sala paralelepípeda con el coeficiente de absorción $\alpha=0,2$.

Figura 69. Evolución del loudness binaural con el scattering para la sala paralelepípeda con el coeficiente de absorción $\alpha=0,2$.

Figura 70. Valores de loudness para los canales izquierdo y derecho en el caso de la sala paralelepípeda con $\alpha=0,2$.

Figura 71. Vista de la fachada del edificio en el que se instaló el dispositivo.

Figura 72. Resultados de la pregunta 1 de la encuesta realizada.

Figura 73. Resultados de la pregunta 2 de la encuesta realizada.

Figura 74. Resultados de la pregunta 4 de la encuesta realizada.

Figura 75. Resultados de la pregunta 5 de la encuesta realizada.

Figura 76. Resultados de la pregunta 6 de la encuesta realizada.

Figura 77. Resultados de la pregunta 7 de la encuesta realizada.

Figura 78. Resultados de la pregunta 8 de la encuesta realizada.

Figura 79. Resultados de la pregunta 9 de la encuesta realizada.

Figura 80. Resultados de la pregunta 10 de la encuesta realizada.

Figura 81. Representación gráfica de los niveles de loudness binaural obtenidos por el dispositivo acústico en el experimento.

Figura 82. Representación gráfica de la evolución temporal de los niveles de presión sonora en decibelios A.

Figura 83. Evolución temporal promediada por horas de los niveles de presión sonora en decibelios A y el loudness binaural.

Figura 84. Representación de los valores por hora de loudness binaural y de los resultados de las encuestas con una valoración del uno al diez.

Figura 85. Tiempo de procesado de las medidas de esta prueba para los distintos procesos del algoritmo.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Lista de las ciudades en 2016 con más de 10 millones de habitantes.

Tabla 2. Vista de frecuencias por octava, tercios y medios de octava

Tabla 3. Número de personas en la Unión Europea expuestas a niveles de ruido mayores de L_{den} 55 dB. Los datos están basados en los informes oficiales de los países para la Unión Europea bajo la directiva de ruido medioambiental 2002/49/EC

Tabla 4. Población expuesta a los distintos niveles de L_{den} para los distintos tipos de tráfico en el municipio de Murcia.

Tabla 5. Especificaciones técnicas del SBC Raspberry Pi 3 Modelo B.

Tabla 6. Loudness de distintas fuentes sonoras.

Tabla 7. Lista de componentes usados en la versión final del prototipo.

Tabla 8. Niveles de presión sonora en decibelios leídos desde el dispositivo basado en la Raspberry Pi para 15 segundos de señal generada

Tabla 9. Valores de los niveles de presión sonora en decibelios para el sonómetro y el dispositivo Raspberry Pi en las pruebas en la fachada

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Encuesta para la evaluación de la molestia acústica y ruido.

I – INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

I – INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 INTRODUCCIÓN

Es de sobra conocido en el ámbito científico, y no tan científico, que el ruido es un agente contaminante muy extendido en la vida diaria de las personas, tanto en sus lugares de residencia como en sus lugares de trabajo. Existen normativas y decretos que regulan los niveles de presión sonora para distintos tipos de áreas, fuentes sonoras, tipo de contaminación acústica, bien aérea o bien por vibraciones... Sin embargo, la mayoría de las personas de a pie no están especializadas en el estudio, análisis y control del ruido, y es por ello que, en lugar de hablar sobre la contaminación acústica y decibelios, se habla más del término molestia.

¿Qué es la molestia acústica? Es la sensación subjetiva negativa que el ruido causa en las personas. El rápido crecimiento de las ciudades, siendo éstas cada vez más grandes y a su vez naciendo muchas otras, va ligado al aumento de los servicios a los ciudadanos, mayores infraestructuras de transporte, más oportunidades laborales... Todo esto sería algo positivo si no fuese por el aumento de otros factores, como lo son la contaminación. El crecimiento sostenible de las ciudades es un objetivo importante, y cada vez se crece de manera más sostenible, pero siguen existiendo estos problemas, como por ejemplo con los atascos de las vías de las ciudades, que cada vez están más masificadas, generando unas grandes cantidades de contaminación tanto del aire como acústica. El ruido de tráfico es una de las grandes fuentes de ruido que más ha crecido en los últimos años de manera casi paralela al aumento de la población, por lo que los efectos y la molestia producidos por el ruido de tráfico también han aumentado o se han acrecentado.

La contaminación acústica genera efectos en las personas que afectan tanto a su salud física como a la psicológica. La exposición constante a ruido, que tal vez no sobrepasarían los límites de niveles establecidos, hace que la salud de las personas se resienta poco a poco, ya que, aunque el ruido no se acumula en los espacios, sí se acumulan sus efectos en las personas. El apropiado control de la contaminación acústica en las ciudades puede ser una forma de aumentar la

calidad de vida mermada por el ruido en las personas, y es por ello que hace falta conocer cómo éste evoluciona a lo largo del tiempo, de dónde proviene, o cuánto afecta a los habitantes. En la evolución que están experimentando las ciudades de la actualidad, la monitorización activa y constante del ruido de éstas provee a los organismos públicos y a los mismos ciudadanos, con información muy valiosa que, tratada de manera correcta, puede ayudar a controlar y hasta ayudar a paliar los efectos que el ruido puede acabar produciendo a sus habitantes. El auge de la ciudad inteligente y el aumento de la monitorización ambiental en las ciudades ha hecho que el uso y desarrollo de las redes de sensores se haya convertido cada vez más en un recurso muy útil a la vez que fácilmente implementable con las tecnologías actuales, cada día más potentes y económicas.

En primer lugar, se ha abordado una revisión a la problemática de la contaminación acústica en las ciudades, repasando la historia y evolución de éstas y exponiendo los desafíos a los que se tienen que enfrentar en su crecimiento, las nuevas ciudades. Se introduce el concepto específico de la contaminación acústica en las ciudades y se da un breve repaso a la naturaleza y la física del sonido, así como de las fuentes más comunes en las ciudades y los efectos que el ruido produce en las personas. Una vez repasado el contexto histórico y dichas las bases del ruido, se pasa a definir las distintas tecnologías y herramientas que ayudan en la evaluación del ruido en las ciudades. La evolución a la ciudad inteligente, el uso del internet de las cosas y la herramienta de las redes de sensores, así como la definición y métodos de evaluación de la molestia, sirven para dar paso a las propuestas que se han desarrollado en este trabajo de investigación para acercarse a proponer una solución de las problemáticas expuestas. A continuación, se exponen y detallan las contribuciones que se han propuesto en este trabajo de investigación, las cuales comienzan con el diseño y construcción de un nodo acústico para su uso en una red de sensores con el propósito de la evaluación del ruido ambiental, y su evolución hacia un dispositivo que sea capaz de evaluar la molestia subjetiva a través de un parámetro psicoacústico, siendo además capaz este dispositivo de sintetizar una señal binaural a través de una entrada monofónica de dos canales mediante un array de micrófonos. Por último, se comprueba la validez de este dispositivo binaural, en ambientes reales, con el objetivo de evaluar la sensación de molestia subjetiva producida por el ruido, y

finalmente comparando las mediciones del dispositivo con testimonios de personas recogidos a través de encuestas sociales.

1.2 MOTIVACIÓN Y OBJETIVO DE LA TESIS

En la evolución y el crecimiento que están experimentando las ciudades, éstas han conseguido cosas que los habitantes de las ciudades de hace cien años considerarían imposibles. Millones de personas en las ciudades, extensiones de éstas de varios kilómetros cuadrados, innumerables servicios para los ciudadanos... Todo esto ha sido fruto de un progreso que se ha ido forjando a lo largo de siglos. Sin embargo, en el vasto crecimiento de las ciudades no todo ha sido gratuito. El hecho del crecimiento sin control puede dar lugar a que la sostenibilidad y el mismo progreso que sufran las ciudades se vean mermados, llegando a reducir así la calidad de vida de las personas que viven en ellas.

La contaminación es uno de los problemas más grandes a los que se enfrentan las ciudades que más se están desarrollando en la actualidad. El aumento de la población lleva consigo un aumento del transporte, el cual es una de las fuentes que más contaminación generan. Los gases que generan los vehículos contaminan la atmósfera, se acumulan, y generan situaciones críticas en las que los gobiernos de las ciudades deben llevar a cabo planes para solventarlas. Sin embargo, existe otro tipo de contaminación más infravalorada, al ser su naturaleza distinta a la de los otros contaminantes: la contaminación acústica. El problema del ruido en las ciudades siempre ha estado presente, pero se ha ido relegando a un segundo plano en el cual los habitantes se quejaban, pero aprendían a asumir su convivencia con ese agente contaminante, reduciendo así su calidad de vida, padeciendo problemas de salud físico y mentales, alteraciones del sueño, etc. En los últimos años el problema del ruido ha ido tomando un protagonismo mayor ya que las personas exigen mantener y mejorar su calidad de vida a los gobernantes de las ciudades y éstos deben trabajar en ellos. Además, con el crecimiento, este contaminante no ha hecho más que crecer con los años.

Comúnmente, el control del ruido y la evaluación de la contaminación acústica en las ciudades se ha llevado a cabo a través de la realización de mediciones con sonómetros o con modelos informáticos para crear unos mapas de niveles de ruido en ciertas zonas de las ciudades, y en ciertas ciudades,

dependiendo del número de habitantes. En estos mapas de ruido o en las mediciones que se realizan de forma puntual se analizan unos parámetros que miden unas unidades, como los niveles de presión sonora, que son representaciones de la presión que el sonido produce. Estos parámetros objetivos sirven como un indicativo, pero se encuentran limitados en cuanto a la sensación subjetiva que el ruido produce a las personas.

Cuando se pretende evaluar la sensación que una persona recibe ante un estímulo, un parámetro objetivo de medición puede no ser la mejor opción, y es por ello que una de las motivaciones de este trabajo de investigación ha sido la evaluación del ruido en las personas a través del concepto subjetivo de molestia, y se han llevado a cabo estudios en parámetros que tengan en cuenta esta subjetividad. Además, normalmente, las mediciones se realizan usando micrófonos de un solo canal. Esto difiere igualmente de la naturaleza del sistema auditivo del ser humano, que es binaural. Es por ello que en el estudio de los parámetros que tengan en cuenta la subjetividad, poder estudiar cómo afecta esa binauralidad es otro de los factores de importancia en esta tesis.

Dentro del objetivo de esta tesis, los esfuerzos se han enfocado en el desarrollo de nuevos dispositivos que se puedan integrar en las ciudades y su actual crecimiento y conversión hacia un tipo de ciudad inteligente sensorizada mediante redes de estos dispositivos, y que estos dispositivos sean capaces de evaluar de una manera más precisa la molestia del ruido de las personas en estas ciudades.

A partir de las consideraciones enunciadas anteriormente, los principales objetivos de esta tesis son:

- Desarrollar un método y algoritmo para el cálculo de un parámetro de molestia del ruido de manera binaural, en entornos urbanos que estén afectados por contaminación acústica. El diseño e implementación de algoritmos que permitan evaluar la sensación de molestia de las personas. Para ello, se desarrollará un modelo de cálculo de un parámetro psicoacústico con el propósito de poder evaluar la molestia de ruido según la fuente sonora.

- Contribuir a la creación de las redes de sensores acústicos con el diseño y creación de un dispositivo acústico que sea fácilmente desplegable en una red, sea autónomo, tenga un ensamblaje sencillo usando componentes de calidad y que a la vez sean asequibles, con el propósito de crear numerosos dispositivos para su despliegue en una red de muchos de ellos. Una evolución de los sistemas clásicos de medición de ruido es propuesta, con un sistema de captación mediante un array de micrófonos y que evaluará un parámetro psicoacústico además de parámetros de acústica ambiental.
- Evaluar el dispositivo y sus algoritmos para validar su aplicación en el análisis de entornos urbanos reales, con distintas fuentes de ruido que produzcan contaminación acústica, siendo los parámetros calculados por el dispositivo acústico de utilidad para obtener información útil para la evaluación de la molestia de ruido en las ciudades. Se evaluará el dispositivo a través de experimentos en entornos reales, usando también información proveniente de encuestas sobre molestia acústica.

En resumen, el principal objetivo de esta tesis es:

Contribuir a la evaluación del campo sonoro en las ciudades con un dispositivo autónomo, preciso y asequible y fácilmente escalable en una red, que sea capaz de emular el sistema binaural auditivo humano en la captura de audio para, de una manera cuantificable, analizar la molestia producida por la contaminación acústica en las personas.

1.3 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

Esta tesis está organizada de la siguiente forma:

- **Capítulo 2:** en este capítulo se trata de ofrecer información sobre las ciudades, su evolución a lo largo de la historia y cómo con su desarrollo y avances han ido surgiendo nuevos retos a los que se tienen que enfrentar. A su vez, se presenta el concepto de contaminación acústica, se define el sonido, sus propiedades y los parámetros de medida más usuales en la monitorización ambiental del ruido, así como también se muestran las fuentes más comunes en las ciudades y los efectos que el ruido produce en las personas. Este es un capítulo que apoyará al lector en la comprensión de los siguientes capítulos, sin embargo, un lector experimentado podrá avanzar rápidamente a través de este capítulo.
- **Capítulo 3:** debido a los nuevos desafíos a los que se enfrentan las ciudades, surgen unas necesidades que se traducen en el uso de unas herramientas y la implementación de ciertas tecnologías. En este capítulo, se pretende introducir la evolución del esquema tradicional de ciudad hacia un modelo de ciudad inteligente. La introducción del internet de las cosas y de las distintas capas de la ciudad inteligente es llevada a cabo en esta sección. Además, se ofrece un repaso a la tecnología de las redes de sensores y, concretamente, a las redes de sensores acústicos y, finalmente, se revisan los métodos de evaluación de la molestia más usuales, así como se muestran los modelos más conocidos para el cálculo de parámetros psicoacústicos.
- **Capítulo 4:** en este capítulo se pasa a desarrollar las aportaciones originales que se ofrecen en este trabajo de investigación. En una primera parte se presenta el diseño y creación de un dispositivo acústico, enfocando su uso como nodo de una red de sensores acústicos, capaz de monitorizar el ambiente sonoro con el análisis de parámetros de acústica ambiental. En una segunda parte de este capítulo se muestra la evolución del dispositivo acústico, con el cual se pretende evaluar a través de un parámetro psicoacústico la sensación de molestia subjetiva al ruido. Este dispositivo genera una señal binaural, con el propósito de asemejarse a la

respuesta del sistema auditivo humano, a través de dos entradas monofónicas capturadas por un array de micrófonos.

- **Capítulo 5:** en este capítulo se procede a la evaluación del dispositivo avanzado desarrollado en el capítulo anterior, así como se revisa cómo afectaría la difusión de un recinto a la medición del parámetro psicoacústico. Para ello, en una primera parte, se llevan a cabo una serie de experimentos en los cuales se simulan distintas salas con distintas propiedades acústicas para analizar la variación del parámetro loudness en función de éstas. A continuación, el despliegue del dispositivo acústico desarrollado es llevado a cabo en un entorno real, con el objetivo de evaluar su rendimiento. Finalmente, se instala un dispositivo acústico en un entorno urbano con el propósito de comparar sus resultados del análisis del parámetro psicoacústico binaural, con las respuestas proporcionadas por personas en ese entorno, recogidas a través de encuestas sociales sobre ruido y evaluación de la molestia acústica.
- **Capítulo 6:** finalmente, se muestran las conclusiones obtenidas en este trabajo de investigación y sus contribuciones, presentando además unas guías para futuras investigaciones partiendo de esta tesis.
- **Capítulo 7:** este capítulo está dedicado íntegramente a la presentación de las referencias bibliográficas usadas en este trabajo.

**II – EL PROBLEMA DE LA
CONTAMINACIÓN
ACÚSTICA EN LAS
CIUDADES ACTUALES**

II - EL PROBLEMA DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA EN LAS CIUDADES ACTUALES

2.1 INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia las ciudades han evolucionado, así como sus ventajas, población y servicios. Sin embargo, este avance no ha sido gratuito y han ido apareciendo distintos retos. La contaminación acústica es un problema de importancia en las ciudades actuales que deben lidiar con un crecimiento acelerado pero sostenible, a la vez que manteniendo y aumentando la calidad de vida de sus ciudadanos. Este capítulo da las bases que servirán para la correcta comprensión de los siguientes apartados de este trabajo de investigación.

Este capítulo se organiza de la siguiente manera: en el apartado 2.2 se ofrece un repaso a la historia de las ciudades. En el apartado 2.3 se presentan los retos de las ciudades actuales, con el foco puesto en la problemática del ruido en éstas. En el apartado 2.4 se trata la contaminación acústica exponiendo las definiciones de conceptos de acústica básica y mostrando las fuentes más usuales en las ciudades, así como los efectos que el ruido produce en las personas. También se da un repaso a los métodos de evaluación, control y prevención del ruido más utilizados.

2.2 BREVE REPASO A LA EVOLUCIÓN DE LAS CIUDADES

Aristóteles (384 a. C. – 322 a. C.) dijo:

“El ser humano es un ser social por naturaleza, y el insocial por naturaleza y no por azar o es mal humano o más que humano (...). La sociedad es por naturaleza anterior al individuo (...) el que no puede vivir en sociedad, o no necesita nada para su propia suficiencia, no es miembro de la sociedad, sino una bestia o un dios”.

De esta frase del filósofo griego se puede interpretar que un hombre o mujer que se encuentre aislado no se puede desarrollar como persona. Es una característica que va evolucionando a lo largo de la vida y hace crecer al ser humano necesitando de los demás para sobrevivir. También se interpreta que las personas tendemos a la agrupación en vez de al aislamiento. La sociabilización es una faceta de la naturaleza del ser humano, generando con ella una sociedad que debe ser organizada. De esta sociabilización y agrupación surgen las comunidades.

Una comunidad no es más que un conjunto o asociación de individuos que comparten elementos, propiedades, intereses u objetivos en común. Entre estos elementos en común se encuentran su situación geográfica en el mundo. También, tras la creación de una comunidad, los individuos empiezan a compartir y a socializar una identidad común, diferenciándose de otras comunidades.

Los antiguos griegos fueron más allá en cuanto a la concepción de sus comunidades. Al principio las comunidades no eran más que clanes familiares que con el tiempo fueron ampliándose a raíz de alianzas con otros clanes, surgiendo así comunidades más amplias, necesitadas de un espacio físico en el cual residir y convivir. El relieve de la Grecia antigua, montañoso, creando valles cerrados por montañas, con multitud de islas y costas accidentadas, favorecía este tipo de asentamientos independientes y aislados. Estos pequeños conjuntos de individuos viviendo en sociedad, que tenían un gobierno propio, fueron denominados como *polis*, traducido como *estado*, *ciudad* o como *ciudad-estado*.

El término *ciudad*, sin embargo, apuntaba hacia la convivencia entre los ciudadanos de una misma comunidad. La historia del ser humano, desde que empezaron a surgir las primeras comunidades y a vivir estos en grupos estables, ha estado ligada a la generación y posterior crecimiento de las ciudades. Actualmente, una ciudad se define como un establecimiento humano permanente y a gran escala (Goodall, 1987) (Kuper & Kuper, 1996).

El ser ciudadano significa participar en la ciudad. Según Aristóteles, la *eudaimonia*, o plenitud de ser, sólo podía ser alcanzada por el hombre a través de las ciudades. Cualquiera que no se preocupara por la vida pública no podría realizarse como individuo (Montgomery, 2013). En la antigua Grecia existía el gobierno de las *polis*. Sin embargo, las instituciones eran aquellas que conformaban las *polis*, y el ciudadano, a través de éstas, se integraba en la ciudad.

A través de esta analogía de la Grecia antigua se puede extrapolar a la época actual en la que la participación activa del ciudadano en la gestión de las ciudades es indispensable y, a la vez, necesaria. Las instituciones deben dar la posibilidad al ciudadano de involucrarse en la vida de la ciudad, para lo cual, debe estar informado sobre ella.

A lo largo de la historia, la ciudad se ha podido dividir en tres grandes grupos: la ciudad en el mundo antiguo, en la Edad Media y en la Edad Moderna. Actualmente se le denomina ciudad contemporánea, la cual es considerada por norma general y de manera simple como a aquellas aglomeraciones humanas que realizan actividades distintas de las agrarias, al contrario que en la antigüedad.

La ciudad de la Edad Media vino dada por una serie de condicionantes sociales y religiosos como lo fueron el feudalismo, el comercio y la Iglesia. La ciudad medieval es por norma una ciudad amurallada rodeada de un paisaje agrícola, en el cual los habitantes y campesinos viven y trabajan. Dentro de la muralla se desarrolla la mayoría del comercio y es donde los habitantes se refugian en caso de ataque. En la mayoría de estas ciudades, la iglesia tiene un papel de coprotagonista en estas, junto al mercado.

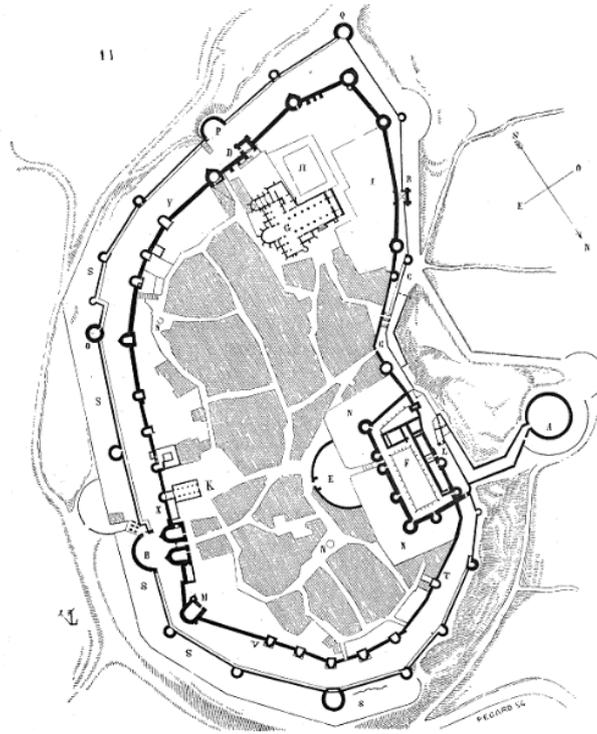


Figura 1. Planta de la ciudad amurallada de estilo medieval, Carcassonne, en el siglo XIII (Viollet-le-Duc, 1868)

El final de la Edad Media llega con la crisis del siglo XIV y el surgimiento de nuevas ideas durante el siglo XV, dejando atrás el feudalismo para dar paso al capitalismo, y con todo ello, las ciudades entran en una nueva era, a la que se ha denominado la Edad Moderna.

La Edad Moderna engloba tres tipos de ciudad en ella. Las ciudades renacentistas, las ciudades barrocas y la ciudad industrial. Con el resurgir de un pensamiento más racional, las ideas sobre las ciudades de la Edad Antigua vuelven a resurgir, y la ciudad vuelve a ser el centro de la cultura y el pensamiento, una ciudad en la que el arte toma un papel protagonista en ellas a través de la arquitectura y del diseño de sus calles. En estas ciudades los habitantes salen a la calle no solo a comerciar, si no que empiezan a disfrutar de la ciudad paseando por sus calles o admirando el arte que se ha ido introduciendo en ellas y en la cultura de la época.



Figura 2. Joseph Heintz, *Pianta de Venezia*.



Figura 3. Pintura de Carl Gustav Carus, *Blick auf Florenz*

Se le empieza a dar importancia al espacio público como parte importante y necesaria de las ciudades, y será objeto de estudio y desarrollo por arquitectos y artistas de la época, buscando un equilibrio entre la composición del paisaje, sus proporciones geométricas y axialidad en su arquitectura. El diseño del espacio urbano, de las plazas y calles es empezado a tener en cuenta y a ser explotado.

Más adelante, en la época del barroco, la ciudad es entendida y caracterizada más por el interés de ella como elemento integrador, a nivel urbano y paisajístico. La arquitectura de las ciudades cambia, buscando un orden en ellas, usando para ello la arquitectura monumental como con plazas, fuentes y jardines entre otros. Todo esto buscaba también expresar el poder que el Estado y la Iglesia tenían durante aquella época. La ciudad representaba el centro de control y de poder, en la cual estaba el gobernante u otro representante del pueblo.



Figura 4. Vista de Dresden a final del siglo 19. Photochrom print.

Con la llegada del siglo XIX, la economía mundial empezó a cambiar, y eso empezó a reflejarse en las ciudades de la época, sobre todo en las ciudades europeas. Los modelos económicos cambian, al haber otro nuevo continente desarrollándose, ampliándose también los mercados económicos de Europa y con nuevas técnicas en el sector de la industria. Empiezan a aparecer nuevos modelos en los cuales las zonas industriales se concentran, surgiendo así la necesidad de reducir gastos y aumentar productividad. El transporte empieza a cambiar y eso genera la necesidad de tener en cuenta este requisito para el diseño de las ciudades. El aumento del volumen de actividades comerciales y financieras protagonizan el auge y el crecimiento de la época. La revolución industrial aportó mucho al desarrollo de las ciudades, ya que éstas empezarán a desarrollarse de manera anular. La población empieza a distribuirse formando arcos en torno al núcleo

II. EL PROBLEMA DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA EN LAS CIUDADES ACTUALES 49

urbano, situándose en los arcos más exteriores las zonas más residenciales, alimentadas sobre todo por la mano de obra inmigrante que empieza a surgir con el movimiento más acrecentado de personas y del auge de la industria. En esta periferia también se encuentran las zonas industriales, dando así lugar a zonas de baja calidad de servicios y malas condiciones de habitabilidad. En los Estados Unidos, desde finales del siglo XIX y comenzando el siglo XX, la introducción del ferrocarril ayudó a bajar los costes de transporte, y así grandes zonas industriales empezaron a surgir, dando lugar a un movimiento migratorio desde las zonas rurales a las ciudades.

Uno de los problemas más grandes que existían en las ciudades durante este periodo era sin duda la existencia de un sistema adecuado de gestión de los residuos, y esto generaba infinidad de problemas de salud en la población, proveniente tanto del aire como de las aguas, así como enfermedades contagiosas, que unido a la masificación de las urbes, se extendían con rapidez. La ordenación urbana se convirtió en una preocupación más grande, y se empezó a trabajar en ello desde los poderes públicos.

La morfología actual de las ciudades empezó a generarse desde el siglo XIX, con las grandes capitales y un crecimiento de éstas muy rápido. Londres llegó a ser la mayor ciudad del mundo desde 1825 hasta 1925. En Alemania, por ejemplo, la rápida industrialización del país ayudó al crecimiento urbano en gran manera.

Durante el siglo XX, en Europa se viven dos extremos opuestos debidos principalmente a las grandes guerras. La Segunda Guerra Mundial destruyó casi por completo las grandes ciudades alemanas, debido a bombardeos y asaltos, así como en el bando aliado también sus ciudades sufrieron grandes daños, como por ejemplo los incesantes bombardeos a Londres por parte de la aviación alemana. Al término de la guerra, todas las zonas implicadas sufrieron un acelerado desarrollo en contraposición a la desolación de la guerra. En España, el éxodo rural, generalmente de adolescentes y adultos jóvenes, se aceleró con la revolución industrial y a partir de la segunda mitad del siglo XX. La ampliación de las grandes ciudades absorbió a pequeñas poblaciones cercanas, ampliando así los límites de las ciudades.

Desde entonces, la población mundial ha ido tendiendo a su aglomeración en grandes ciudades. Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), en su informe *Perspectivas de la población mundial* (ONU, 2015), de los aproximadamente 7000 millones de habitantes que hay en el mundo, alrededor de un 54% vive en ciudades y para el año 2050 se prevé que este porcentaje alcance hasta el 66% de la población mundial. En ese mismo informe se califica al desarrollo urbanístico como uno de los retos más importantes del siglo XXI, que engloba distintas prioridades de planificación, como la infraestructura, el transporte, la vivienda o la gestión energética y de contaminación, entre otros.

En países en vías de desarrollo, como la mayoría del continente africano, esta tarea será especialmente complicada, debido a la escasez de recursos que sufren estos países y la gran demanda de empleos y sanidad que enfrentan.

A diferencia del mundo de finales del siglo XX, en el cual existían 10 ciudades con una población mayor a 10 millones de habitantes, actualmente ese número ha aumentado hasta 38, contabilizado hasta 2016 (Tabla 1). La mayoría de estas ciudades se encuentran en el continente asiático y americano.

Posición	Ciudad	País	Población (en miles)
1	Tokio	Japón	38.140
2	Delhi	India	26.454
3	Shanghái	China	24.484
4	Mumbai	India	21.357
5	Sao Paulo	Brasil	21.297
6	Beijing	China	21.240
7	Ciudad de México	Méjico	21.157
8	Kinki (Osaka)	Japón	20.337
9	El Cairo	Egipto	19.128
10	Nueva York	Estados Unidos	18.604
11	Dhaka	Bangladesh	18.237
12	Karachi	Pakistán	17.121
13	Buenos Aires	Argentina	15.334
14	Calcuta	India	14.980

II. EL PROBLEMA DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA EN LAS CIUDADES ACTUALES 51

15	Estambul	Turquía	14.365
16	Chongqing	China	13.744
17	Lagos	Nigeria	13.661
18	Manila	Filipinas	13.131
19	Guangzhou	China	13.070
20	Río de Janeiro	Brasil	12.981
21	Los Ángeles	Estados Unidos	12.317
22	Moscú	Rusia	12.260
23	Kinshasa	República Democrática del Congo	12.071
24	Tianjin	China	11.558
25	París	Francia	10.925
26	Shenzhen	China	10.828
27	Jakarta	Indonesia	10.483
28	Bangalore	India	10.456
29	Londres	Reino Unido	10.434
30	Chennai	India	10.163
31	Lima	Perú	10.072
Tabla 1. Lista de las ciudades en 2016 con más de 10 millones de habitantes.			

Esta visión del crecimiento de la población en las ciudades es sólo un ejemplo de la importancia que la ciudad ha cobrado y va a ir teniendo en la sociedad en los próximos años. En este último siglo, se ha cuestionado si las ciudades desaparecerán o si el mundo entero se convertirá en un futuro en una urbe gigante (Mumford, 1961).

2.3 LOS NUEVOS RETOS DE LAS CIUDADES CONTEMPORÁNEAS

2.3.1. Introducción

La evolución en las ciudades y su crecimiento en infraestructuras, servicios, población, etc., no es un costo que éstas asuman de manera gratuita. Cada vez más existe un mayor movimiento de personas hacia las ciudades crecientes, que están necesitadas de estas personas para sobrevivir y crecer.

En los últimos años, la población mundial se ha ido incrementando significativamente. Este crecimiento está ocurriendo sobre todo en áreas urbanas y en las ciudades. Este fenómeno ha traído nuevas necesidades a las ciudades y a los planificadores urbanísticos. Los nuevos requisitos para el control del bienestar de los ciudadanos incluyen entre otros la monitorización de las ciudades, incluyendo variables como los niveles de dióxido de carbono (CO₂) (Dekoninck & Botteldooren, 2015), la calidad del agua (O'Flynn, y otros, 2007) o los niveles de contaminación acústica (Santini, Ostermaier, & Vitaletti, 2008), entre otros.

Sin embargo, esto hace que surjan problemas tales como que exista desigualdad de oportunidades, pero enmarcadas en unas normas sociales. Uno de los grandes objetivos a los cuales aspira cualquier ciudad en crecimiento es mejorar la calidad de vida de las personas que en ella habitan, así como el sentimiento de pertenencia a una comunidad. Para ello, uno de los retos es que a estos ciudadanos se les debe proveer de igualdad de oportunidades sin ninguna discriminación. El hecho de que el crecimiento de las ciudades esté ligado a la inmigración hace que éste sea un tema que las administraciones de cada urbe deben tener en cuenta y legislar para que exista esta igualdad de oportunidades.

Una ciudad debe ser capaz de atraer el talento de fuera, así como de proveer a nivel educativo a la población que crece en ellas. También la investigación debe ser un tema de especial importancia a la hora de avanzar en el desarrollo de éstas. La cultura tiene que tener su lugar en todas las ciudades, en forma de museos, universidades y galerías artísticas, por ejemplo.

Cuanta más gente se muda a las ciudades en busca de nuevas oportunidades tanto sociales como económicas, el reto de cómo absorber a estos nuevos ciudadanos en ellas surge. Las ciudades de hoy en día tienen como protagonista a

los vehículos en sus calles, y eso se puede observar en cuanto a que, la mayoría de las veces, la planificación urbanística gira alrededor del tráfico. La sociedad del siglo XXI está empezando a generar conciencia en cuanto a la necesidad de tener que reducir el uso del transporte privado, a favor del uso del transporte público (Thornton, 2009).

El transporte es uno de los grandes retos a los que se enfrentan las urbes actuales (Tolley & Turton, 2014). Hoy día, la calidad de vida de los habitantes de una ciudad está ligada al modo en el que éstos pueden desplazarse de un punto a otro en ellas. La planificación de éstas debería hacerse la pregunta de cómo se puede mejorar la movilidad de sus ciudadanos de una manera segura, eficiente y rápida. La ciudad del futuro debe responderse a esta pregunta antes de comenzar nuevas planificaciones urbanísticas para mejorar el futuro de los que ahí habiten en el futuro. Los desplazamientos entre los lugares de trabajo y de residencia generan altas concentraciones de tráfico y malgasto de tiempo para las personas, así como incremento de la contaminación ambiental en la gran mayoría de los casos. La capacidad de que una persona sea capaz de salir a dar un paseo, montar en bicicleta por su ciudad o ir a su tienda preferida o trabajo en el otro extremo de la ciudad sin ser esto un foco de estrés o ansiedad genera un gran impacto en el nivel general de satisfacción de las personas para con su ciudad. El hecho de que una ciudad esté hecha para el ciudadano y no para un medio de transporte es uno de los primeros pasos para la generación de ciudades sostenibles en todos los sentidos.

Otro punto crítico es la necesidad de financiación y la inversión que se hace en las urbes (Wrenn & Irwin, 2015). Hace falta dinero para realizar proyectos que hagan crecer a las ciudades, y los ciudadanos necesitan dinero para gastar en ellos y sus familias. El balance económico en las ciudades es un tema crítico y mantenerlo no es tarea gratuita. La facilidad de, por ejemplo, abrir y regentar un nuevo negocio en una ciudad es un factor clave en el crecimiento de las ciudades, ya que las empresas decidirán si invertir en uno u otro sitio. Esto, en consecuencia, afectará a los niveles de empleabilidad y paro de las ciudades también, y por tanto a la economía global de ésta. En España, por ejemplo, la comunidad de Madrid registró un balance positivo entre las empresas que llegan contra las que salen de la comunidad, mientras que, por el contrario, Cataluña fue la que más perdió durante

el año 2016 (Gutiérrez, 2017). Este movimiento empresarial entrante y saliente afecta de manera directa a las capitales de estas comunidades, dando así lugar a un crecimiento mayor en unos casos, como el de Madrid en el ejemplo, contra a un crecimiento más lento, o decrecimiento en un peor caso, en el ejemplo de Barcelona, como capital de la comunidad autónoma de Cataluña.

Para que la evolución de una gran ciudad se realice de una manera exitosa y fructífera, es necesaria la correcta y adecuada planificación de su crecimiento. De nada sirve la ampliación de una ciudad sin planificación, haciendo imposible predecir y mejorar la calidad de vida pública (Handy, 2002) (Campbell, 1996). De igual manera, una planificación correcta sirve para el ahorro de costes a largo plazo, reduciendo costes operacionales y logísticos (Naess, 2001). Los principales aspectos para la planificación de cualquier ciudad pasan desde el diseño de zonas verdes y espacios en los cuales la gente pueda dedicarse a ocio y placer, hasta el correcto diseño de los medios sanitarios (Ong, 2003), (Takano, 2002). La planificación a la hora de la distribución de manera homogénea de los ciudadanos es importante, ya que, de esta manera, con la construcción de zonas urbanas para personas de diferentes trasfondos sociales, culturales o económicos a través de toda la ciudad, ayudará a evitar la sobrepoblación, así como para evitar la formación de barrios marginales y guetos (Balbo, 1993), (García-Ramón, 2004). La planificación urbana es una herramienta de gran importancia para una ciudad a la hora de proyectarla y ampliarla, teniendo en cuenta las necesidades y servicios de la población para los siguientes años (Steinberg, 2005).

Muchos de los problemas que más abordan a las ciudades hoy día y a las que éstas tienen que hacer frente son difíciles de ver y son los que se han abordado más tardíamente (Crenson, 1971). Uno de los retos de las ciudades del siglo XXI es sin duda la lucha contra la contaminación ambiental (Franco, 2012). Este tipo de contaminación es uno de los factores más importantes que afectan a la salud de la población de las ciudades (Vargas, 2005), (Ballester, 2005), (Hardoy, 1992).

En 1997, fue redactado el protocolo de Kioto (Naciones Unidas, 1998) sobre el cambio climático, el cual entró en vigor en el año 2005. Este protocolo fue un acuerdo internacional con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero para frenar el calentamiento global. Los miembros participantes fueron 37 países industrializados junto con la Unión Europea, siendo esto porque

II. EL PROBLEMA DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA EN LAS CIUDADES ACTUALES 55

se reconocieron como los máximos responsables de los niveles elevados de emisiones contaminantes que existen en la atmósfera. La mayoría de estos gases provienen de la quema de combustibles fósiles durante los últimos 150 años. A lo largo de los años se han ido haciendo reuniones de seguimiento para ir comprobando el cumplimiento del protocolo y analizar su impacto. Actualmente se encuentra vigente el segundo periodo del protocolo de Kioto, el cual estará activo hasta el 31 de diciembre de 2020. A pesar de la primera reunión, algunos miembros abandonaron el protocolo como fue el caso de Estados Unidos en 2001 y de Canadá en 2011.

Otra importante cumbre realizada sobre el cambio climático fue la XV Conferencia sobre el Cambio Climático de la ONU en 2009 (Naciones Unidas, 2009). Ésta fue celebrada del 7 al 18 de diciembre de 2009 en la ciudad de Copenhague, en Dinamarca. Esta conferencia tiene como objetivo la creación de nuevos objetivos para reemplazar los previos del protocolo de Kioto, el cual acabará su segunda fase a finales de 2020. A pesar de que se realizó un importante acuerdo entre Estados Unidos, China, India, Brasil y Sudáfrica, esta cumbre no estuvo ausente de críticas ya que el texto no fue vinculante, no tenía objetivos cuantitativos y finalmente no tuvo plazos o fechas límite. Por ello, esta cumbre y acuerdo fue duramente criticado por varios gobiernos y diferentes organizaciones. Se acordó un objetivo importante que fue que la temperatura del planeta no subiese más de dos grados centígrados en su media, y sobre las emisiones, sólo se especificó que se debían reducir *“lo antes posible”*.

Para este siglo, las ciudades se enfrentan a varios retos para los que deben estar preparadas y poder dar soluciones. Los ciudadanos ya no deben ser una parte pasiva en las ciudades si no que deben de tener voz en los avances y desarrollos de las urbes, de esta manera se deberá reducir la distancia que existe entre los representantes políticos y los ciudadanos. Las nuevas tecnologías, las redes sociales y medios de comunicación electrónicos serán de gran utilidad como herramienta de comunicación entre ambas partes, ayudando así a reducir las esperas a las que unos se tienen que enfrentar para hacerse oír, y las otras partes para escuchar. Las demandas reales de los ciudadanos deberán ser las primeras críticas a escuchar por parte de los gobernantes, atendiendo a necesidades reales y democráticas, y no tanto simplemente políticas.

El aspecto económico de las ciudades deberá ser muy tenido en mente, en cuanto a que la creación de trabajo y la prosperidad de una ciudad van íntimamente ligadas. Sin una capacidad de estimular el crecimiento de la ciudad con el fomento de la empleabilidad, la facilidad para la creación de pequeñas y medianas empresas o la incentivación de ideas innovadoras, el crecimiento de estas ciudades se verá frenado, reduciéndose además el desarrollo social de éstas. Para crecer en esta línea, los gobernantes locales deberán buscar fondos no sólo por parte de gobiernos nacionales, sino también por parte de empresas y fundaciones privadas, que inviertan en el desarrollo económico y social de sus ciudades. Las alianzas con empresas nacionales e internacionales con acuerdos que beneficien a ambas partes serán la herramienta clave para estos propósitos. Para que todo esto se cumpla, no sólo hay que centrarse en el simple hecho del crecimiento puro y duro, sino que se debe procurar que este crecimiento se mueva en unas líneas sostenibles, tanto desde el punto de vista económico, social o medioambiental. Convertir una ciudad en un nicho de empresas energéticas, por ejemplo, podría aparentar ser una buena baza para incentivar la economía y el crecimiento de una ciudad, pero si estas empresas no cumplieren con una ética medioambiental, o no fomentasen el empleo para la ciudad, si no que importan trabajadores de otras regiones, esta idea de crecimiento se vería rápidamente frenada y sabotada.

La tecnología debe de ser una herramienta para el desarrollo y el autoconocimiento de las ciudades. El tener la información sobre una ciudad, y en tiempo real, es una necesidad que hoy día está creciendo. En un mundo donde la población aumenta constantemente y por tanto el consumo de recursos con los posibles efectos que esto puede causar, como el cambio climático, se hacen necesarias soluciones innovadoras para estos problemas. La sensorización de las ciudades es una realidad hoy en día. En los próximos años, esta tendencia se extenderá a más ciudades y con un mayor despliegue en el número y diversidad de sensores. Esto proporciona y proporcionará una mayor información constante que, tanto los gobernantes como los propios ciudadanos, así como investigadores y empresas, podrán consultar y utilizar para el autoconocimiento, el aporte de soluciones y la creación de soluciones innovadoras para solventar los problemas actuales en la ciudad del futuro.

II. EL PROBLEMA DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA EN LAS CIUDADES ACTUALES 57

Cuando se piensa en la ciudad del futuro se visualizan ciudades flotantes con coches voladores, pero la realidad será muy distinta, y es que, en su apariencia, la mayoría de las ciudades serán muy parecidas a las de la actualidad, pero es en su funcionamiento, estructuración y desarrollo donde debe de estar la innovación, los cambios y el futuro.

2.3.2 El reto de la contaminación ambiental en las ciudades

Environmental pollution is an incurable disease. It can only be prevented.

(La contaminación ambiental es una enfermedad incurable. Sólo puede ser prevenida.)

Barry Commoner

El problema ya no tan invisible de la contaminación en las ciudades abarca muchos tipos de contaminación. Existen numerosos agentes contaminantes y éstos afectan a las ciudades y a las personas que en ellas habitan de maneras diversas. Se pueden clasificar según el tipo de contaminación. A continuación, se exponen algunos tipos.

2.3.2.1 Contaminación atmosférica

Este tipo de contaminación es la que más preocupaciones y problemas, pero a la vez más planes para su tratamiento ha traído en la última década. En las ciudades, este tipo de contaminación las afecta de manera importante y a su vez a la salud de las personas de manera directa (Dockery, 1993), (Blake, 1995), (Nielsen, 1996) (Hirsch, 1999). La liberación de sustancias químicas y partículas en la atmósfera cambiando la composición de ésta, es lo que genera la contaminación del aire. Un ejemplo de gases contaminantes para el aire que principalmente se pueden encontrar en las ciudades son por ejemplo el dióxido de carbono (CO_2), el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO_x) (Agencia para Sustancia Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2016), dióxidos de azufre... Estos gases son producidos en gran medida por los gases resultantes de la combustión en vehículos y la industria. Este tipo de contaminación se puede mantener en el espacio y al interactuar con fenómenos meteorológicos, aparecen otros nuevos como el smog (Stone, 2002) y la lluvia ácida (Wang, 2000). En numerosas ciudades, los niveles de contaminación han superado los umbrales de seguridad y se han empezado a tomar medidas para reducir estos niveles (Ayuntamiento de Madrid, 2017), como por ejemplo la restricción del tráfico privado en las ciudades y fomentando el uso del transporte público, vehículos eléctricos y bicicleta. Aunque las zonas

industriales se sitúan alejadas de los centros urbanos, este tipo de contaminación puede desplazarse muchos kilómetros a través de la atmósfera (Lin, 2014).

2.3.2.2 *Contaminación hídrica*

Este tipo de contaminación afecta principalmente a los recursos hídricos de una zona, como ríos, embalses, pantanos, lagos o el mar. El agua se vuelve impropia o peligrosa para el consumo humano o animal, así como para la agricultura, pesca e industria (Consejo de Europa, 1967). La mayor parte de esta contaminación proviene de actividades humanas. Puede darse el caso de que la fuente sea natural, como en el caso de un volcán, pero suelen ser muy poco frecuentes. Los contaminantes en muchos casos se dan por la liberación de residuos y contaminantes que son drenados y transportados hacia ríos, lagos o desembocando en el mar. En las ciudades, las aguas domésticas contienen sustancias que favorecen la contaminación del agua, proveniente por ejemplo del uso de agua en jardines y limpieza pública diaria, así como con origen pluvial, que en las ciudades el agua de lluvia arrastra diferentes contaminantes que se encuentran en la atmósfera y el suelo de la ciudad.

2.3.2.3 *Contaminación del suelo*

Ésta ocurre cuando existe una degradación de la calidad del suelo y está asociada a la presencia de sustancias químicas, principalmente de origen humano. Estos químicos pueden ser liberados sobre y bajo la tierra. En las ciudades, una fuente común de contaminación del suelo suelen ser los vertederos y cinturones ecológicos en los cuales se entierran grandes cantidades de desechos provenientes de los núcleos urbanos. Este tipo de contaminación es peligrosa en ciertos casos ya que puede llegar a afectar a la salud de manera directa, como siendo focos de enfermedades, por ejemplo, o al entrar en contacto con fuentes de agua potable.

2.3.2.4 *Contaminación por basura*

Muy ligada a veces a la contaminación del suelo (Belabed, Lotmani, & Romane, 2014), la contaminación por basura suele venir dada por la acumulación de basura y residuos sólidos, y es muy recurrente en conjuntos de población de ciudades industrializadas o en proceso de urbanización. Los desechos suelen ser centralizados en sitios como vertederos, pero a veces la falta de control o el exceso

de basura frente al terreno disponible hace que ésta pueda ser dispersada por el viento hasta ríos o mares, o hasta otras zonas de tierra.

2.3.2.5 *Contaminación radiactiva*

Este tipo de contaminación es una de las más graves, pero afortunadamente es de las menos comunes debido a sus altos niveles de seguridad (Holt, 2009). Puede ser resultado de desperfectos o accidentes en centrales nucleares o por el uso de armas nucleares. El uso y manufacturación de materiales radioactivos también pueden dar lugar a esta contaminación si no se tratan y desechan adecuadamente.

2.3.2.6 *Contaminación electromagnética*

Este tipo de contaminación es referida a la creencia que una exposición excesiva a las radiaciones de espectro electromagnético generadas por equipos electrónicos u otros elementos producidos por humanos. Este tipo de contaminación es muy polémica ya que no se ha terminado de demostrar su veracidad y que de verdad afecten a los seres humanos a los niveles a los que estas radiaciones son emitidas. La Organización Mundial de la Salud estima que para los niveles promedio que una persona adulta recibe en un país desarrollado, no existe ningún efecto nocivo para la salud (Repacholi, 1998), (World Health Organization, 2002). Recientemente, una revisión de estudios ha descartado efectos nocivos de las radiofrecuencias sobre la salud (Dömötör, 2016), aunque siempre seguirá habiendo polémica por el desconocimiento de la población general (Ansedo, 2017).

2.3.2.7 *Contaminación térmica*

Se produce cuando existe un proceso que altera la temperatura del medio de una forma no deseada o siendo perjudicial para este (Nordell, 2003). Normalmente, el medio suele ser el agua. Al ser ésta usada en refrigeración en industrias o centrales térmicas o plantas nucleares, la temperatura cambia y al ser devuelta al medio produce un shock térmico cambiando las condiciones del medio original (Krenkel, 1968).

2.3.2.8 *Contaminación lumínica*

Esta contaminación se refiere a la introducción de luz artificial produciendo una modificación negativa en el estado natural del ecosistema (Longcore, 2004). Ésta está originada en el uso de sistemas de alumbrado no eficientes y con un mal diseño, enviando la luz en direcciones e intensidades innecesarias (Falchi, 2011).

2.3.2.9 *Contaminación visual*

Es un tipo de contaminación considerada tal cual en tanto que se refiere a perjudicar la capacidad de disfrutar de una vista o paisaje, perturbando las áreas visuales de la gente al crear cambios nocivos en el medio ambiente natural (Portella, 2016).

2.3.2.10 *Contaminación acústica*

Este tipo de contaminación es denominada así cuando un exceso de sonido no deseado, ruido, altera las condiciones normales del ambiente en una zona determinada. La naturaleza del sonido hace que este no se acumule o se desplace en el espacio o el tiempo, pero aun así puede causar daños en la calidad de vida de las personas sin un control adecuado y prevención. Esta forma de contaminación se transmite de manera aérea, aunque puede producirse por vibraciones debido a la naturaleza de la transmisión del sonido (Goines, 2007). Es una de las contaminaciones ambientales más invisibles. En el apartado 2.4 y sus subapartados, se revisará en profundidad este tipo de contaminación, fuentes, sus efectos y control.

2.4 LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA Y LA ACÚSTICA MEDIOAMBIENTAL

Antes de describir el problema de la contaminación acústica sus causas y efectos, es necesario introducir los fundamentos básicos del sonido. El sonido es generado a partir de una alteración propagada a través de un medio elástico o fluido, en el cual las partículas del medio son alteradas por una presión o desplazamiento en el material, y además puede ser detectado por los humanos o a través de instrumentos de medición (Beranek, 1954). El sonido que el ser humano puede percibir a través del sentido del oído consiste en la detección de las ondas producidas cuando las oscilaciones de la presión del aire se transforman en ondas mecánicas en el oído humano e interpretadas por el cerebro.

La propagación del sonido transporta la energía a través del medio, pero no transporta materia. Los medios más comunes en los que se transmite el sonido son en el aire y en el agua. Las ondas sonoras tienen distintas propiedades que serán definidas a continuación:

- *Frecuencia (f)*: es la magnitud por la cual se mide el número de repeticiones (n) por unidad de tiempo (T) de un fenómeno periódico. En el caso del sonido, el número de veces que un ciclo se repite en un segundo. La unidad en la que se mide es el hercio (Hz) (un ciclo por segundo). Un sonido de alta frecuencia será percibido por los seres humanos como un sonido agudo, y otro de baja frecuencia como un sonido grave. La audición humana, en individuos sanos, va desde los 20 hercios hasta los 20.000 hercios aproximadamente.

$$f = \frac{n}{T} \quad (1)$$

$$1 \text{ Hz} = \frac{1}{s} \quad (2)$$

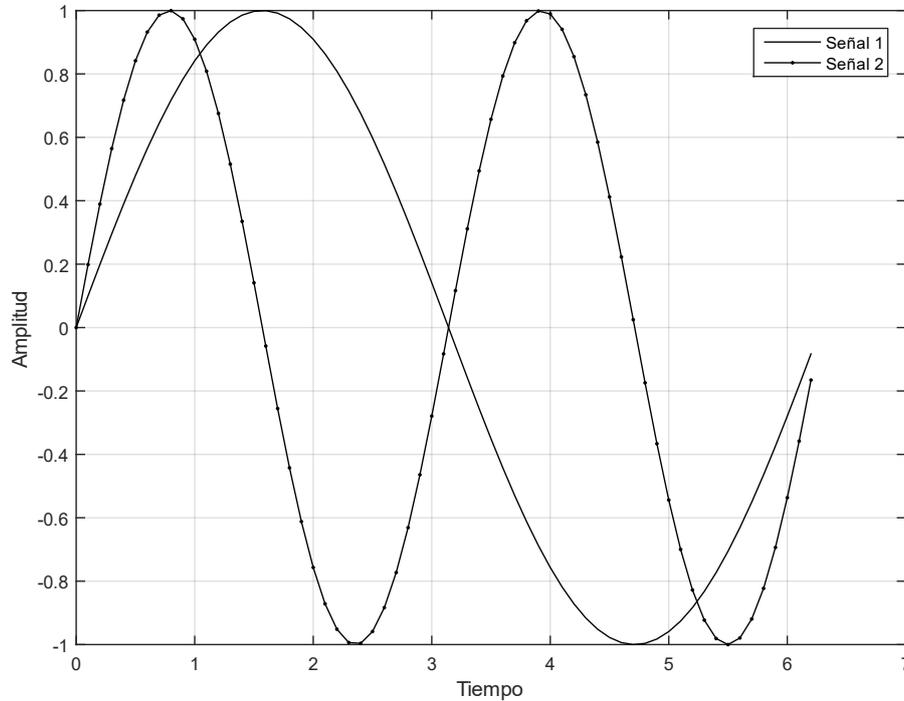


Figura 5. La señal senoidal 2 tiene una frecuencia del doble a la señal 1, ya que realiza dos ciclos donde la azul realiza uno.

- *Longitud de onda (λ):* es la unidad inversa a la frecuencia. A mayor frecuencia, la longitud de onda es menor y viceversa. La longitud de onda es la distancia real que recorre una onda en un determinado intervalo de tiempo. Para una onda senoidal, la longitud de onda se define como la relación entre la velocidad de propagación de la onda en el medio y su frecuencia. En el caso del sonido en el aire, v equivale a 343,2 m/s a 20°C de temperatura y con una humedad relativa del 50% y con una presión de 101.325 Pascales:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (3)$$

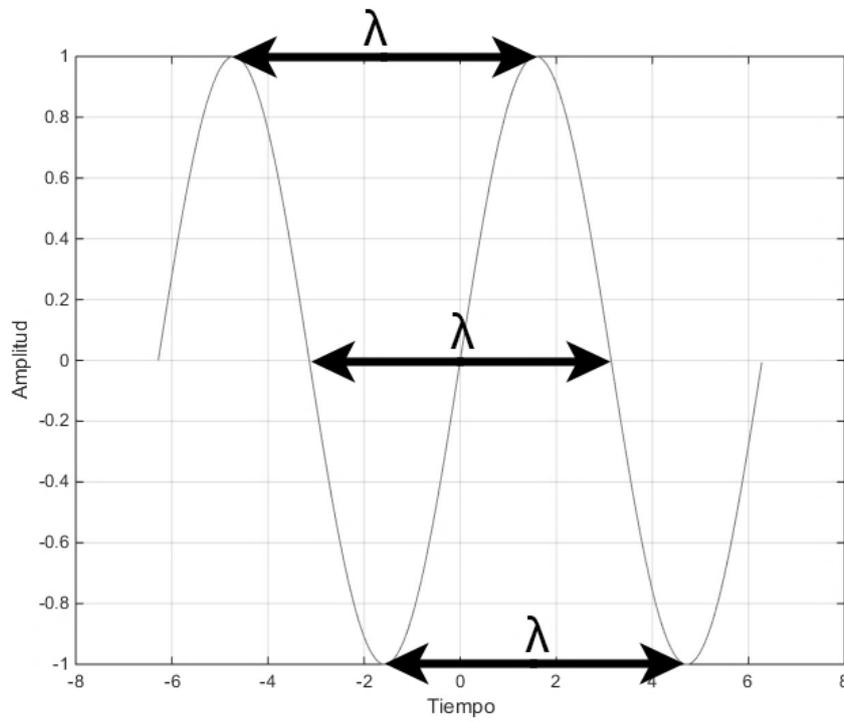


Figura 6. Representación gráfica de una señal senoidal en la que se muestra que la longitud de onda.

- *Amplitud*: es la distancia entre el punto más alto y el más bajo de una onda. Cuanta mayor sea esa distancia, la amplitud de ese sonido será mayor. Los seres humanos percibimos esa amplitud alta como sonidos de alto volumen, y las amplitudes bajas como sonidos débiles. Existe un umbral de audición que es el que marca la intensidad mínima de sonido capaz de ser detectada por el ser humano. Este umbral varía entre seres humanos, por género y edad.

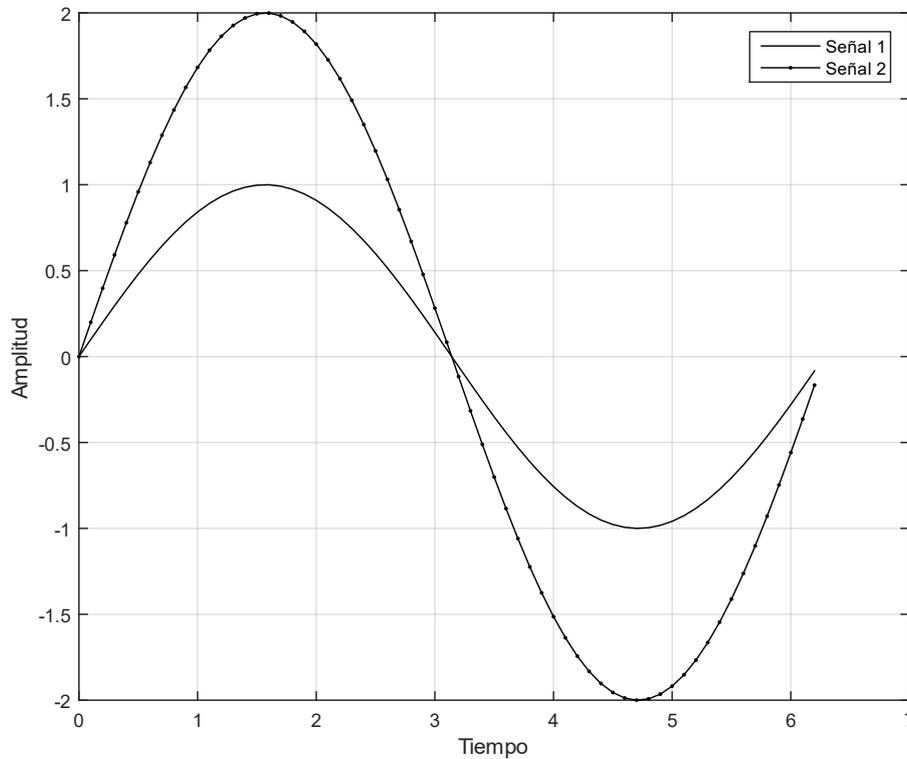


Figura 7. Representación gráfica de dos señales senoidales con distinta amplitud.

La amplitud de un sonido se puede cuantificar según varios factores que se suelen integrar en el dominio del tiempo:

- Nivel de potencia acústica (L_w): es el parámetro que mide la manera en la que los seres humanos perciben la potencia acústica, que es la cantidad de energía por unidad de tiempo que emite una fuente determinada. En la ecuación 4, W_1 es la potencia a analizar y W_0 es la potencia correspondiente al umbral de audición, la cual es constante a 10^{-12} vatios. El resultado se expresa en decibelios (dB).

$$L_w(t) = 10 \log \frac{W_1(t)}{W_0} \text{ (dB)} \quad (4)$$

- Nivel de presión sonora (L_p): este parámetro determina la intensidad de sonido que una onda sonora, es decir, una presión, es capaz de generar. Este parámetro varía entre los 0 dB, que corresponden al umbral de audición, y los 120 dB, que es el umbral de dolor, correspondiente a aquella intensidad mínima que es capaz de producir dolor en el oído humano. Al igual que en el nivel de potencia acústica, se usa una escala logarítmica, ya que los niveles de presión en Pascales son muy pequeños, y, por tanto, su unidad es el decibelio (dB). En la ecuación 5, $P_1(t)$ es la presión sonora eficaz a analizar y P_0 es la presión de referencia, correspondiente al umbral de audición, que es una constante de valor 20 μ Pa. Este es el parámetro más usado en mediciones acústicas.

$$L_p(t) = 20 \log \frac{P_1(t)}{P_0} \text{ (dB)} \quad (5)$$

- El espectro de frecuencias: un sonido complejo distribuye su energía de diferente manera para cada frecuencia. En el sonido, suele analizar en octavas o tercios de octava, cuando se busca más precisión (Tabla 2). También se puede analizar en media octava, pero es una práctica poco común. Un sonido complejo se puede analizar midiendo su nivel de presión sonora en cada octava o tercio de octava para así conocer sus componentes frecuenciales.

Frecuencia (Hz)	Octava			Frecuencia (Hz)	Octava			Frecuencia (Hz)	Octava		
	1	1/2	1/3		1	1/2	1/3		1	1/2	1/3
16	X	X	X	160			X	1600			X
18				180		X		1800			
20			X	200			X	2000	X	X	X
22.4		X		224				2240			
25			X	250	X	X	X	2500			X
28				280				2800		X	

II. EL PROBLEMA DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA EN LAS CIUDADES ACTUALES 67

31.5	X	X	X	315			X	3150			X
35.5				355		X		3550			
40			X	400			X	4000	X	X	X
45		X		450				4500			
50			X	500	X	X	X	5000			X
56				560				5600		X	
63	X	X	X	630			X	6300			X
71				710		X		7100			
80			X	800			X	8000	X	X	X
90		X		900				9000			
100			X	1000	X	X	X	10000			X
112				1120				11200		X	
125	X	X	X	1250			X	12500			X
140				1400		X		14000			
160			X	1600			X	16000	X	X	X

Tabla 2. Vista de frecuencias por octava, tercios y medios de octava

L_{eq} , nivel de presión sonora equivalente. Este parámetro expresa el ruido ambiental en un único valor de presión sonora durante un período determinado. Este parámetro también se correlaciona con los efectos del ruido en las personas. El parámetro L_{eq} se calcula en base a la siguiente fórmula:

$$L_{eq} = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{1}{T_M} \cdot \int_0^{T_M} \left(\frac{P(t)}{P_0} \right)^2 \cdot dt \right] \quad (6)$$

donde L_{eq} es el nivel de presión sonora equivalente determinado por un intervalo de tiempo T_M en segundos. Para la integración de distintos valores de nivel equivalente, de n , se usa la siguiente fórmula:

$$Total L_{eq} = 10 \cdot \log \left(\frac{10^{\frac{L_{eq,1}}{10}} + 10^{\frac{L_{eq,2}}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_{eq,n}}{10}}}{n} \right) \quad (7)$$

El parámetro L_{den} es el nivel sonoro para los periodos de día, tarde y noche. Corresponde al nivel de L_{eq} medido sobre un período de 24 horas con una penalización de 10 decibelios para el período nocturno, desde las 23:00 hasta las 7:00, y con una penalización de 5 decibelios para los niveles entre las 19:00 y las 23:00. Estas horas pueden variar según las ordenanzas de algunas regiones o municipios. Este parámetro y las penalizaciones de decibelios impuestas están destinados para reflejar la sensibilidad de las personas al ruido durante esos períodos. Al igual que el L_{eq} se correlaciona con los efectos del ruido en la gente, el parámetro L_{den} extrapola esto a un valor diario y, para mediciones de larga duración, esto puede ser extrapolable para períodos de semanas, meses o años, pudiendo ser estos resultados usados para la realización de estudios más complejos.

$$L_{den} = 10 \cdot \log \left(\frac{12 \cdot 10^{\frac{L_{day}}{10}} + 4 \cdot 10^{\frac{L_{evening}+5}{10}} + 8 \cdot 10^{\frac{L_{night}+10}{10}}}{24} \right) \quad (8)$$

donde L_{day} es el nivel para el período de día, entre las 07:00 y las 19:00, $L_{evening}$ es el nivel para el período de la tarde, entre las 19:00 y las 23:00, y L_{night} es el nivel para el período nocturno, comprendido entre las 23:00 y las 07:00.

L_{90} describe el nivel que ha sido excedido durante el 90% del tiempo de medición; L_{10} ilustra el nivel excedido durante el 10% del tiempo y L_{50} es un indicador para el nivel medio. Estos parámetros describen el comportamiento del ruido en mediciones de larga duración y ayudan en el estudio de la estadística de estos intervalos. El nivel L_{90} es normalmente utilizado como una aproximación para determinar el nivel de ruido de fondo. De igual manera, L_{10} es una aproximación para los niveles de pico. Por ejemplo, una medición de 10 minutos, con un $L_{90} = 80$ dB(A) y un $L_{10} = 90$ dB(A). Esto se interpretaría que, durante 9 minutos, el nivel había sido mayor de 80 dB(A) y que, durante un minuto, los niveles superaron 90 dB(A). Con estos datos se puede concluir que el medio acústico analizado sería muy alto, con altos niveles de presión sonora y por tanto riesgos para la salud en exposiciones prolongadas.

Existe también un fenómeno de las ondas de presión sonoras, el cual representa el nivel de presión sonora en función del ángulo de radiación. Esto es,

la directividad. Por definición, la directividad de una fuente sonora es la relación entre la densidad de la potencia acústica radiada en una dirección y a una distancia determinada. Esta relación se suele dar normalizada y en decibelios. La directividad es dependiente de la frecuencia del sonido, por lo que suelen darse distintas curvas para distintas frecuencias. En el sonido transmitido a través del aire, las ondas sonoras de baja frecuencia suelen tener poca directividad, pero a frecuencias medias y sobre todo altas, la directividad suele ser muy acusada, debido a que la longitud de onda de los sonidos de alta frecuencia es pequeña en comparación con el tamaño de la fuente que emite.

Con los parámetros anteriormente descritos se puede analizar el ambiente acústico de una manera objetiva, pero para adecuar las mediciones y los resultados dados a la respuesta de los seres humanos, se tienen que aplicar una serie de ponderaciones. La respuesta del oído humano no es plana. A bajos niveles de intensidad, las frecuencias bajas no se detectan bien, así como las más altas. Las frecuencias medias son con las que mejor trabaja el oído humano. Conforme va subiendo el nivel de la señal, las diferencias entre las frecuencias se van igualando. Existen unas curvas calculadas por Fletcher y Munson (Fletcher & Munson, 1933), denominadas curvas isofónicas, que representan la relación entre la frecuencia y la intensidad de sonidos para ser percibidos de igual manera por el oído. Estas curvas fueron calculadas de manera empírica en 1933 pero actualmente existen otras gráficas que proporcionan más precisión (Figura 8). Existe una norma, la ISO 226 y sus actualizaciones (ISO226, 2003), que proporcionan unos contornos estandarizados. La unidad que se usa para medir estos volúmenes percibidos es el fon (phon). 0 fon, la cual es la referencia, equivale a una sonoridad de un sonido con frecuencia 1 kHz a una intensidad de 0 dB.

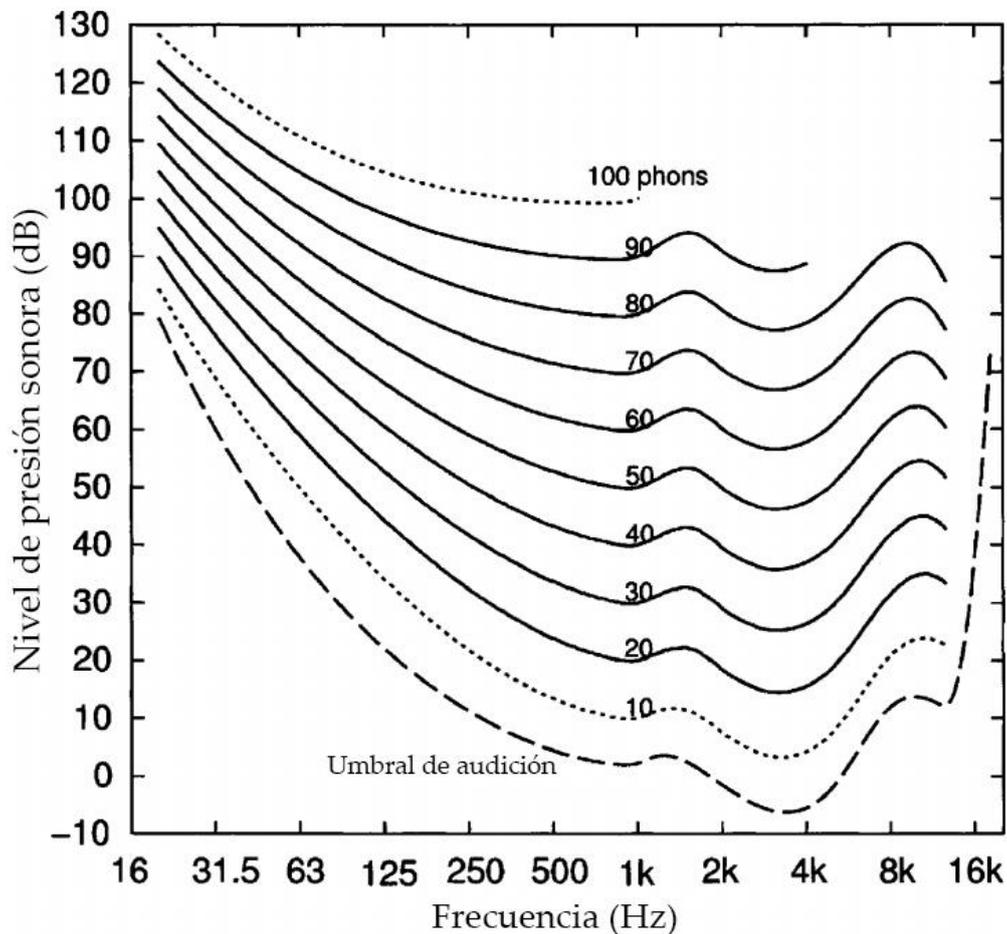


Figura 8. Curvas de igual sonoridad para tonos puros, adaptada de (Suzuki & Takeshima, 2004).

En curvas como las de Fletcher y Munson se basan las distintas ponderaciones A, B y C que se usan en mediciones acústicas. Para aproximar las mediciones acústicas a la respuesta real del oído humano se usan estas ponderaciones: A y C principalmente. Existen otras ponderaciones como la B y Z, pero son menos utilizadas. Para niveles de presión sonora bajos o moderados se usa la ponderación A, medida en decibelios A, dB(A) (Figura 9). Esta curva atenúa en gran medida las bajas frecuencias y en menor medida las altas frecuencias. Es la

II. EL PROBLEMA DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA EN LAS CIUDADES ACTUALES 71

más utilizada para mediciones de acústica ambiental y de ruido. La ponderación C fue creada para la evaluación de ruidos de alto nivel. Es la ponderación más utilizada para medición de ruido de aeronaves o cerca de aeropuertos. La curva no aporta casi atenuación en las bajas frecuencias.

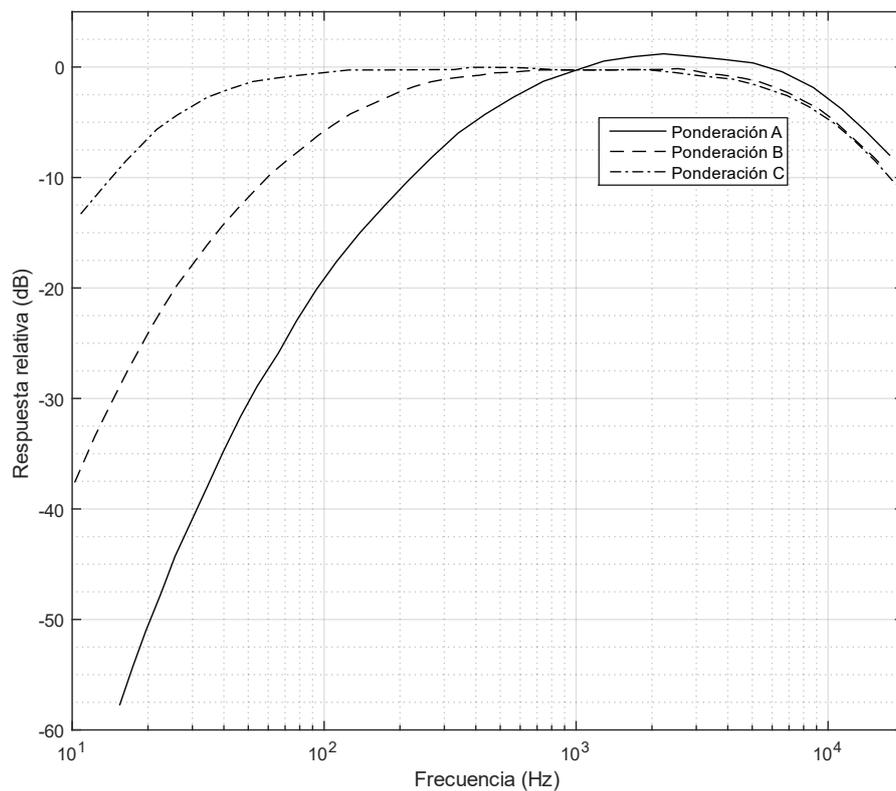


Figura 9. Curvas de ponderación A, B y C según la norma IEC 61672-1:2002

Los habitantes de las ciudades de hoy día están expuestos a múltiples agentes externos de contaminación que pueden mermar su calidad de vida y confort, así como también ocasionar problemas de salud (Vida, 2006). Cuando el agente contaminante es el ruido, el tipo de contaminación es denominada contaminación acústica. Esta se da cuando existen un exceso de ruido pudiendo llegar a ser perjudicial para la salud (De Esteban Alonso, 2003). Esta contaminación acústica es ruido que causa una falta de confort y un tipo de daño, físico o psicológico, a las

personas de una zona concreta. También los animales pueden sentirse afectados por este tipo de contaminación (Francis, 2009), (Kight, 2011).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) considera un nivel de 85 decibelios (A) durante un máximo de 8 horas al día como el límite superior deseable para las personas en su lugar de trabajo. En lugares residenciales el límite es mucho menor y no está condicionado a una jornada laboral. Alrededor del mundo, la mayoría de la población de países desarrollados y en desarrollo están expuestos a niveles de ruido superiores a los que la OMS aconseja (Berglund, 1999). Además, en horario nocturno los niveles son más restrictivos y aun así en muchos casos son superados (Hurtley, 2009). Según la Agencia Medioambiental Europea (EEA), la contaminación acústica es un problema de salud ambiental muy grande en todo el continente europeo, estando millones de ciudadanos europeos sufriendo niveles no aceptables de ruido (European Environment Agency, 2017).

Los niveles de ruido fluctúan entre los periodos diurno y nocturno por norma general. En áreas residenciales, los límites aceptados son aquellos que no exceden los 65 dB(A) durante el día y los 55 dB(A) durante el periodo nocturno (UNE-ISO-1996-1:2005, 2005). Los estándares que tratan sobre el nivel medio de ruido continuo en el tiempo y que es permisible, indican que por cada aumento de 3 dB(A) sobre 85 dB(A), el tiempo de exposición permisible se reduce a la mitad. Por ejemplo, un nivel de 85 dB(A) está asociado a un tiempo máximo de 8 horas de exposición, por lo tanto, un nivel de 88 dB(A) vería reducido su tiempo a la mitad, 4 horas, y un nivel de 91 dB(A) a 2 horas (Passchier-Vermeer & Passchier, 2000). El uso de percentiles en el análisis acústico ayuda en el estudio de las fluctuaciones del ruido a lo largo del tiempo. Estos parámetros se usan ampliamente en la monitorización de ruido ambiental, como por ejemplo en el análisis de ruido de tráfico o en estudios de ruidos comunitarios. Gracias al uso de mediciones de larga duración, se pueden observar cambios en los datos a lo largo de más tiempo, y por tanto se pueden estudiar de manera más avanzada para la evaluación de molestia de ruido. Los niveles extraídos de cada día pueden ser usados para estudios de larga duración con grandes cantidades de datos, de días, semanas o meses de medición.

La rama encargada del estudio de la contaminación acústica es la acústica ambiental. Ésta se encarga de la gestión integral de los problemas de contaminación

II. EL PROBLEMA DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA EN LAS CIUDADES ACTUALES 73

acústica, aplicando los métodos y procedimientos de la ingeniería acústica para solventar los problemas, bien en el origen, en su propagación o sobre las personas afectadas. Existe un procedimiento estándar para la gestión de los problemas de contaminación acústica desde la visión y aplicación de la acústica ambiental.

Se realiza un estudio de impacto. Éstos se llevan a cabo a partir de los datos extraídos de informes y mapas de ruido de la zona en la que se va a actuar, o bien a partir de la realización de mediciones acústicas que se encargan de caracterizar el problema. También se usan programas informáticos con modelos de ruido y propagación para el estudio de éste en infraestructuras y áreas. En los nuevos informes creados, se examinan los valores medidos o simulados que la nueva infraestructura o área genera o está afectada para detectar aquellos valores que sobrepasen los valores límite. Se debe de crear un proyecto acústico que se encargue de proveer de soluciones técnicas para el cumplimiento de la directiva o norma vigente. Finalmente se lleva a cabo una auditoria acústica. Cuando los proyectos han sido validados y las modificaciones del nuevo área o infraestructura han finalizado, se deben certificar los valores planificados con los valores reales, por medio de pruebas in situ de ingeniería acústica.

En este apartado se examinarán las principales causas de la contaminación acústicas y también cuáles son las fuentes más comunes en las ciudades. Además, se hará una revisión de los efectos del ruido y la contaminación acústica en las personas, su salud y calidad de vida, sobre todo en el ámbito de las ciudades. Finalmente, se revisarán métodos de control del ruido, su evaluación, así como métodos de prevención y planificación.

2.4.1 Fuentes

Existen multitud de posibles fuentes emisoras de ruido en el mundo (Singh, 2004). Las fuentes de ruido siempre son generadas por actividades humanas. Las principales fuentes de ruido en las ciudades son el transporte, la industria, las obras públicas y construcciones o las mismas personas tanto dentro como fuera de sus hogares.

El ruido de tráfico es el principal causante de molestias por ruido en entornos urbanos, con una estimación de unos 120 millones de personas afectadas por niveles dañinos (European Environment Agency, 2017). En la tabla 3 y en la figura 10 se pueden observar el número de personas en la Unión Europea expuestas a niveles de ruido mayores a 55 dB, en el nivel de presión sonora para el periodo de día, tarde y noche (L_{den}). El ruido de tráfico puede diferenciarse entre ruido de tráfico de vías férreas, de aeronaves o de carreteras, siendo este el más común y el que más afecta. Éstos ponen en peligro la salud de miles de personas sin que éstas siquiera lo perciban (Bluhm, 2004), (Morillas, 2002). También el ruido proveniente de trenes, aeropuertos y la industria forman importantes fuentes de ruido.

Fuente sonora	Interior de áreas urbanas	Exterior de áreas urbanas
Carreteras	86.423.300	
Vías férreas	8.904.500	
Aeropuertos	3.503.900	
Industria	1.369.000	
Grandes carreteras		35.015.600
Grandes vías férreas		3.818.500
Grandes aeropuertos		1.243.600

Tabla 3. Número de personas en la Unión Europea expuestas a niveles de ruido mayores de L_{den} 55 dB. Los datos están basados en los informes oficiales de los países para la Unión Europea bajo la directiva de ruido medioambiental 2002/49/EC

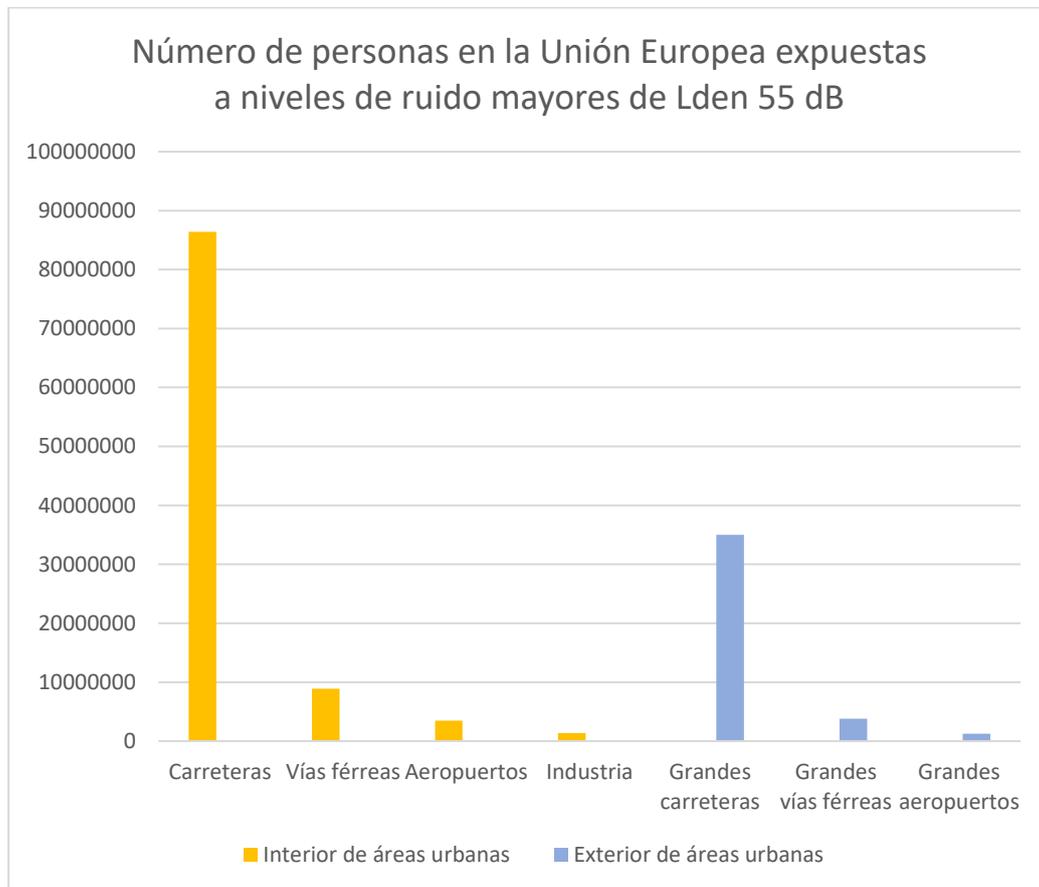


Figura 10. Representación gráfica del número de personas en la Unión Europea expuestas a niveles de ruido mayores de L_{den} 55 dB. Los datos están basados en los informes oficiales de los países para la Unión Europea bajo la directiva de ruido medioambiental 2002/49/EC

El rápido crecimiento de las ciudades, el aumento de su población y por tanto su necesidad de transporte, han hecho que el parque de vehículos se haya incrementado por igual, y por consecuencia, los efectos que ello conlleva. Existen numerosos estudios que relacionan de manera directa el ruido de tráfico rodado con la molestia producida por éste en las personas, incluyendo zonas residenciales y de ocio (Langdon F. J., Noise nuisance caused by road traffic in residential areas: Part I, 1976), (Langdon F. J., Noise nuisance caused by road traffic in residential areas: Part II, 1976), (Langdon F. J., Noise nuisance caused by road traffic in residential areas: Part III, 1976), (Williams I. D., 1995), (Griffiths, 1968), (Lee, 2014).

La contaminación acústica puede propagarse de dos formas principales, por vía aérea y por medio de vibraciones. Por ejemplo, el ruido de transportes en una ciudad puede afectar a las zonas residenciales circundantes a grandes vías de comunicación o viviendas cerca de aeropuertos, por la vía de transmisión aérea, es decir, el sonido se transmite de manera directa desde la fuente hasta los humanos a través del aire, y la fuente del ruido es identificada por las personas directamente.

Sin embargo, el ruido y sus problemas producidos por vibraciones también son una gran fuente de contaminación. En una ciudad, un ejemplo es el de las vías de metro subterráneo (Kurzweil, 1979). En estos casos, no hay vía aérea directa entre las viviendas y las vías de metro, pero, sin embargo, son fuente de contaminación. Los vehículos pesados que circulen por vías urbanas producen por su peso unas vibraciones que pueden afectar a las construcciones que rodeen esas vías y, por tanto, afectar a sus habitantes (Arnberg, Bennerhult, & Eberhardt, 1990). Otro tipo de contaminación por vibración son los problemas que se producen por el choque de las ondas sonoras contra elementos que puedan entrar en resonancia con las frecuencias de estas ondas (Paulsen & Kastka, 1995), produciendo así que estos materiales comiencen a vibrar y, de manera parecida a como se comportaría la membrana de un altavoz, a producir ruido.

Existen métodos para estudiar las fuentes sonoras y sus características. Actualmente se usan modelos para caracterizar las fuentes (Bobrovnitskii & Pavic, 2003), (Moorhouse & Seiffert, 2006), (Pavić, 2010), con la finalidad de hacer predicciones de ruido que pueden usarse en distintos casos, como mapas de ruido o estudios de propagación en interiores. Estos modelos de predicción de ruido se usan mucho para el estudio de ruido de tráfico en ciudades (Barry & Reagan, 1978), (Li, Tao, Dawson, Cao, & Lam, 2002). Estos modelos tienen en cuenta múltiples variables (Cho & Mun, 2008), en el caso del tráfico, el ruido de los vehículos tendría cuatro orígenes distintos: ruido del motor, ruido del escape, ruido de rodadura y ruido aerodinámico (Figura 11).

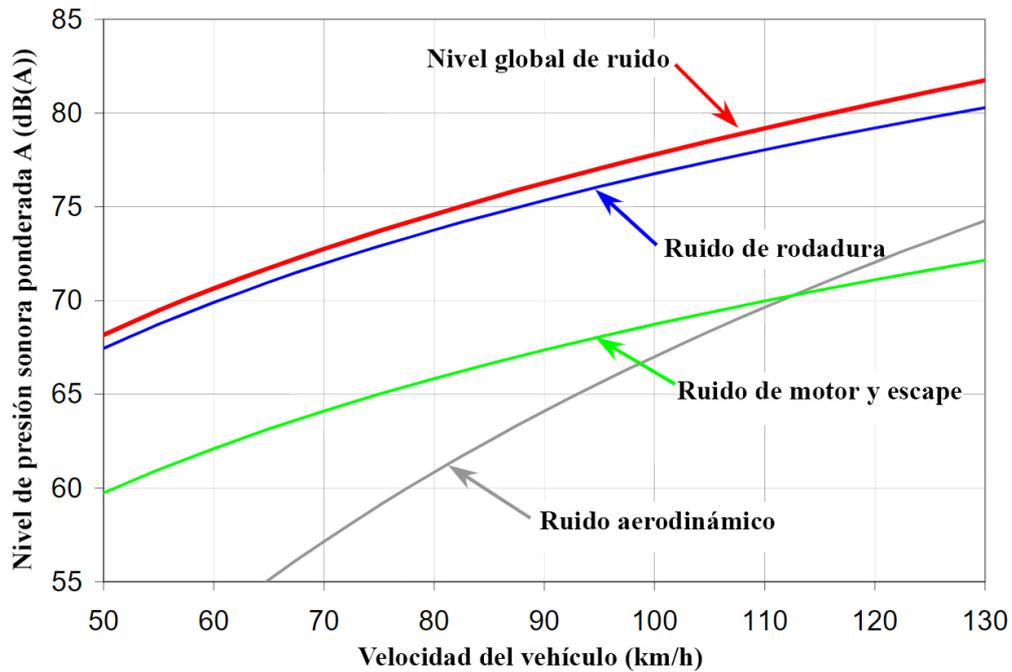


Figura 11. Contribuciones de varias fuentes del ruido de tráfico. Figura extraída de (Bernhard, y otros, 2005). En ella se muestra la evolución del nivel de presión sonora, ponderado en decibelios A, en función de la velocidad, para distintas fuentes sonoras del vehículo.

Teniendo en cuenta estos datos, se puede observar que la fuente más crítica en el ruido de tráfico es el ruido de rodadura. Este ruido se crea a partir del contacto entre los neumáticos y el asfalto, y por tanto tiene dos frentes que se pueden tocar para la reducción del ruido global: neumáticos y pavimento.

2.4.2 Efectos

Debido a su naturaleza, el ruido no se acumula en el espacio, ni se traslada o se mantiene en el tiempo, a diferencia de otro tipo de contaminaciones, como por ejemplo la contaminación del aire. Aun a pesar de estas características particulares, éste puede afectar a la salud de las personas, perjudicando su calidad de vida. Estos efectos en las personas sí que se mantienen y además acumulan en el tiempo (Dalton, y otros, 2001). Un correcto control del ruido ayudará a mejorar la calidad de vida y reducir los efectos negativos de la contaminación acústica en las personas.

Existe una degradación natural de la capacidad auditiva en los seres humanos, principalmente debida a la edad y la progresiva pérdida de facultades auditivas (Trinidad-Ramos, Jaudenes-Casabón, Núñez-Batalla, & Sequí-Canet, 2010). También de manera excepcional estas pérdidas se producen debido a infecciones, cirugías o por el uso de ciertos fármacos.

La pérdida de audición relacionada con la edad es denominada presbiacusia. Esta pérdida progresiva afecta sobre todo a la capacidad del oído de percibir las altas frecuencias que hace que los sonidos o el habla se escuchen de manera atenuada, sorda, y en el habla, especialmente de niños y mujeres, la comprensión se torne más dificultosa. Además, se pierde la capacidad de percibir la direccionalidad del sonido, característica más notable en sonidos de alta frecuencia que ya no son tan fácilmente percibidos. La presbiacusia es la causa más común de pérdida de audición, y afecta a una de cada tres personas de más de 65 años, y hasta una de cada dos a partir de los 75 años. En la figura 12, se puede observar la curva de audición en función de la edad para sujetos tipo. Este fenómeno es fácilmente tratable con el uso de prótesis auditivas que, bien configurados y calibrados según cada paciente, solventan en gran medida los efectos de esta degeneración (Flynn, Sadeghi, & Halvarsson, 2009), (Papsin & Gordon, 2007).

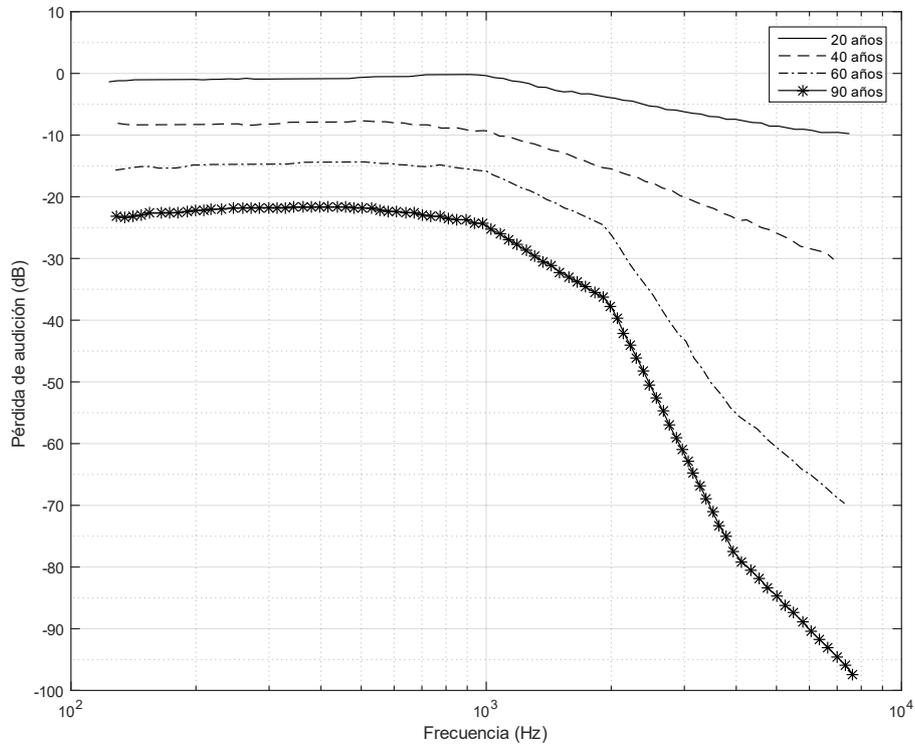


Figura 12. Curva de audición en función de la edad de un sujeto tipo. Datos para sujetos tipo de 20, 40, 60 y 90 años.

Ahora bien, cuando la pérdida de audición se da de una manera no natural en las personas, el problema viene normalmente de una exposición a niveles de ruido no adecuados, exposiciones durante muy largo plazo, o ambas condiciones a la vez (Sliwinska-Kowalska, 2012). Este problema se puede dar en personas de cualquier edad (Gifford, 2009). Las causas ya no son la degradación natural de sistema auditivo si no que empiezan a aparecer factores externos como pueden ser la exposición a ruido durante el tiempo libre (Dalton D. S., 2001). En muchos casos, una de las causas de pérdida de audición más comunes es la exposición a niveles de ruido inadecuados en ambientes recreacionales y ocupacionales, que además pueden ser completamente evitables con medidas de prevención (Rabinowitz, 2000).

Debido a exposiciones a fuentes sonoras de alto nivel y además durante un tiempo prolongado, se puede dar el caso de una pérdida de la capacidad auditiva parcial, denominada hipoacusia, o una pérdida total, denominada cofosis. Además, también pueden darse de manera bilateral o unilateral. Ciertas ocupaciones laborales pueden ser más propensas a estos problemas (May J. J., 2000), como, por ejemplo, en personas que desarrollen su actividad laboral en clubes de ocio con niveles de música muy altos (Gunderson, 1997), (Bray, 2004). Trabajadores en fábricas e industrias son muy propensos a problemas auditivos debido a los altos niveles de ruido a los que están expuestos durante sus jornadas laborales (Daniell, 2002), (Landon, 2005). Debido a estos altos riesgos que sufren las personas en estos ambientes, los controles que se llevan a cabo en estos ambientes son bastante estrictos (Groenewold, 2014), (Davies, 2008), (Masterson, 2015). Actualmente, no sólo adultos en edad de trabajar se encuentran expuestos a niveles altos de ruido y por tanto peligrosos para su audición, si no que de manera bastante usual, jóvenes, niños y adolescentes, están expuestos a niveles sonoros altos en su día a día (Chung, 2005), por ejemplo, usando reproductores de música a niveles no saludables durante mucho tiempo (Vogel I. B., 2008), (Vogel I. V., 2009), (Keppler, 2010).

Si una persona se encuentra en un ambiente muy ruidoso, como por ejemplo un concierto de música o una calle con mucho tráfico en hora punta, el umbral de audición, es decir, la intensidad mínima de sonido capaz de detectar el oído humano aumenta (Salvi, 1983). Este umbral no es igual para todas las frecuencias (Fletcher H. &, 1933) En ciertas frecuencias el umbral es más alto y en otras más bajo. Ante estímulos puntuales de alto nivel, este umbral varía, pero transcurrido un tiempo, dependiendo éste de la intensidad y el tiempo de exposición del estímulo, el umbral de audición vuelve a su estado original. Este efecto es denominado como desplazamiento temporal del umbral de audición. Sin embargo, si la exposición es lo suficientemente intensa o prolongada, el cambio del umbral de audición puede tornarse permanente, siendo imposible recuperar los niveles de audición originales (Nordmann, 2000), (Nixon, 1961), (Hamernik, 1989). A este cambio se le denomina desplazamiento permanente del umbral de audición.

Por desgracia, el ruido acompaña al ser humano prácticamente a lo largo de todo el día, siendo además las ciudades los lugares con mayores niveles de este tipo de contaminación. El problema es que no sólo afecta la contaminación acústica en

II. EL PROBLEMA DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA EN LAS CIUDADES ACTUALES 81

los medios de transporte o lugares de trabajo, sino que además ésta afecta al interior de los hogares, estando en ciertos casos expuestos a excesos de ruido de manera permanente, condicionando también al descanso nocturno. Tanta exposición hace que aparezcan además otro gran grupo de efectos en la salud de las personas producidos por el ruido que no afectan directamente al sistema auditivo, si no que afectan de otras formas, apareciendo otras dolencias y patologías, tanto a nivel fisiológico como psicológico (Stansfeld, 2003), (Basner, 2014), (Van Dijk, 1987), (Smith, 1991), (Cohen S. W., 1981).

Los efectos que el ruido puede producir en las personas pueden ser distintos dependiendo de los niveles de presión sonora a los que se encuentren éstas afectadas. La evidencia de efectos causados por la contaminación acústica en la salud es alta en niños y adultos en cuanto a molestia, trastornos del sueño y rendimiento cognitivo (Stansfeld, 2003). También hay evidencias que demuestran el incremento de la presión arterial y problemas cardiovasculares debido a exposiciones a niveles de contaminación sonora durante tiempo prolongado o niveles no recomendables, sobre todo con fuentes de tráfico rodado pero también en ciertos casos de tráfico aéreo (Foraster, 2014), (Sørensen, 2014), (Münzel, 2014), (Floud, 2013).

Existen pruebas objetivas y subjetivas de que el ruido crea alteraciones en el sueño (Öhrström E, 1988). Durante el sueño, la exposición al ruido afecta a éste de manera proporcional a la cantidad de ruido que se reciba durante en el periodo de descanso, en base a la cantidad de interrupciones del sueño y de cambio en sus etapas (Muzet, 2007). Sin embargo, tras una presentación prolongada aparece una habituación a lo largo de varias noches. De manera más objetiva, las alteraciones del sueño producidas por el ruido pueden aparecer si se dan más de 50 eventos de ruido por noche, con un nivel de presión sonora de 50 dB(A) o más en el interior de la vivienda. Los niveles externos de ruido afectan menos que los interiores (Öhrström, 1990).

La exposición al ruido durante el sueño puede incrementar la presión arterial y la frecuencia cardíaca, así como incrementar el número de movimientos y cambios de posición durante la noche, bajando así la calidad del sueño (Langdon F. J., 1977). Además de los mencionados efectos y problemas, existen otro tipo de consecuencias que pueden aparecer a lo largo del día posterior al período de

descanso afectado por contaminación acústica. Éstos pueden ir desde la percepción de una calidad de sueño mermada, cambios en el humor y bajada del rendimiento en tiempos de reacción (Ouis, 1999). Al disminuir los niveles de presión sonora en el interior de las viviendas de personas afectadas por ruido en periodo nocturno, se observó que la cantidad de sueño REM y de sueño profundo podían incrementarse, pero que a pesar de las adaptaciones que podrían producirse, la deshabitación completa no se daba, siendo especialmente visible a nivel de frecuencia cardíaca (Vallet, 1983), (Münzel, 2014).

Otros efectos que se pueden presentar en los seres humanos a causa de la exposición al ruido son los relacionados con los problemas cardiovasculares (Babisch, 2003). La exposición al ruido causa también una respuesta del sistema nervioso neurovegetativo, que es la parte del sistema nervioso que controla las acciones involuntarias. Estas consecuencias pueden ser desde el aumento de la frecuencia cardíaca hasta por el aumento de presión arterial entre otras (Welch, 1970). La exposición al ruido puede afectar de manera negativa en las comunidades, aumentando las patologías cardiovasculares e incluso aumentando los índices de mortalidad debidos a éstas (Halonen, 2015).

Existen unos efectos psicológicos más que fisiológicos producidos por el ruido (Gloag, 1980). Estudios llevados a cabo en trabajadores de industrias afectadas por altos niveles de ruido (Melamed, 1988) mostraron que éstos argumentaban con frecuencia dolores de cabeza, cambios de humor y ansiedad, entre otros. Fuera de espacios de trabajo se ha observado también el aumento de los índices de trastornos depresivos tras años de exposición a niveles inadecuados de ruido de tráfico (Orban, 2016), (Okokon, 2015). A través de encuestas realizadas a comunidades, se han observado un gran número de personas aquejándose de dolores de cabeza, sentirse tensos, irritabilidad y la sensación de la falta de descanso durante el periodo nocturno, todo esto en áreas de alta concentración de contaminación acústica (Jones, 1981), (Finke, 1975), (Barker, 1978). También se ha estudiado el efecto del ruido en los niños, en su desarrollo cognitivo y en el aprendizaje (Cohen S. E., 1980), (Evans G. W., 1993), mostrando una repercusión de manera negativa sobre éstos. En las escuelas, los niveles de ruido tienen un efecto en el rendimiento de los niños, siendo los más pequeños los más afectados

II. EL PROBLEMA DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA EN LAS CIUDADES ACTUALES 83

por los inadecuados niveles de ruido presentes en las aulas (Shield, 2003). La molestia percibida por los niños también perjudica a la capacidad de atención.

De manera indudable, existen numerosos estudios y pruebas de que la contaminación por ruido afecta de manera negativa a las personas tanto en su salud como en su calidad de vida. Las evidencias de efectos producidos por ruido ambiental son más fuertes para la sensación de molestia acústica, las alteraciones del sueño y alteraciones en el rendimiento de niños y adultos. A nivel industrial y de ruido ocupacional, la exposición a niveles de ruido elevados y durante periodos prolongados afecta de manera más fisiológica al cuerpo humano, como el aumento de la frecuencia cardíaca o la tensión arterial. La relación entre la exposición al ruido y el ser humano es bastante compleja. Las personas tendemos a adaptarnos al entorno que nos rodea, y en el caso de la contaminación acústica, se buscarían estrategias para reducir el impacto de la exposición al ruido, simplemente huyendo del área contaminada o evitando ambientes ruidosos. La comunidad científica de diferentes ámbitos de estudio siempre está en constante investigación para dar mejores aclaraciones a este tema tan complejo, tales como mejorar las técnicas de medición o mejora en el análisis de los resultados de salud probablemente relacionados con la exposición al ruido (Stansfeld, 2003).

El nivel de confort subjetivo de las personas es uno de los factores más importantes para el nivel de bienestar de una ciudad, y los niveles de contaminación acústica juegan un papel clave en este ranking. La contaminación acústica tiene varios efectos en la salud de las personas, fisiológica y psicológicamente (Ising & Kruppa, 2004). Las principales fuentes de contaminación por ruido en las ciudades son los altos volúmenes de tráfico, ruido producido por áreas en construcción y otros ruidos artificiales producidos por humanos, como por ejemplo ruido de ocio nocturno (Goines, 2007), (Singh, 2004). La monitorización de estas fuentes de contaminación acústica es una tarea importante para la comprensión de cómo estos sonidos evolucionan con el tiempo, para poder estudiarlos y comprenderlos, para así controlarlos y prevenir los no deseados.

2.4.3 Métodos de evaluación, control y prevención

A la hora de tratar con el ruido como contaminante y para reducirlo o eliminarlo, hay distintos puntos a tener en cuenta. Para conseguir el objetivo final de prevenir el exceso de ruido y la contaminación acústica, se hace necesaria una primera fase de evaluación de esta contaminación para poder controlarlo de manera efectiva.

Para la evaluación y control del ruido existen dos rutas principales. La contaminación acústica puede erradicarse o controlarse directamente en el origen, o bien se puede reducir la exposición a ésta por parte de las personas usando medios como aislamiento, medidas que eviten la propagación de esta contaminación, etc. Para poder llevar a cabo esta tarea, se debe conocer en detalle las características de la fuente sonora a controlar, estudiar cómo se produce la propagación de sus emisiones acústicas, a quién y a qué niveles pueden afectar, analizar si se pueden reducir los niveles de la fuente y, por último, crear un plan de medidas para proteger a los afectados por esta contaminación.

Desde 2012, en Europa y según el reglamento CE 1222/2009 (Unión Europea, 2009), existe un etiquetado en los neumáticos en los cuales se especifica la eficiencia energética, la eficacia de frenado en suelo mojado y un etiquetado específico para el ruido de rodadura exterior (Figura 13). Este último criterio se tomó debido a la concienciación sobre el ruido en los últimos años y su impacto en las personas (Freitas, Mendonça, Santos, Murteira, & Ferreira, 2012). Se representa con un altavoz y un neumático, y el valor se representa en decibelios (dB). El número de ondas coloreadas, de una a tres, que aparezcan saliendo del altavoz, representan la calificación, siendo una la mejor, hasta 68 dB (3 dB menos que el límite europeo o un nivel inferior), dos, moderado (3 dB menor o igual al límite europeo) y tres (supera el límite europeo) la peor, produciendo 74 dB como máximo. Esta medida fue tomada para ayudar a reducir los niveles de contaminación acústica desde el origen.



Figura 13. Etiqueta europea de neumáticos.

A nivel de pavimento, existen materiales fonoabsorbentes que se están usando para reducir el impacto acústico del tráfico rodado en las ciudades (Meiarashi, Ishida, Fujiwara, Hasebe, & Nakatsuji, 1996), (Bendtsen & Andersen, 2005). Las mezclas que se usan para crear estos nuevos pavimentos suelen caracterizarse por tener más porosidad y una mezcla menos densa (Iwase, 2000). Esto les proporciona a estos materiales gran capacidad de ser absorbentes acústicos.

Existen medidas para reducir el tráfico en las zonas residenciales y el centro de las ciudades con las cuales se busca reducir los niveles de contaminación atmosférica. Esto afecta también a la reducción del ruido, ya que las medidas más usuales que se suelen tomar en estos casos es la restricción del tráfico en ciertas zonas o a ciertas horas (Cairns, y otros, 2008).

Una vez controlado el origen del ruido, se puede tratar de reducir aún más los niveles en la propagación de éste. En las carreteras que circunvalan las ciudades

u otros núcleos urbanos, a menudo se usan las denominadas barreras acústicas desde hace años (Hothersall, Chandler-Wilde, & Hajmirzae, 1991), (Watts, Crombie, & Hothersall, 1994). Existen numerosos diseños y distintos materiales usados para la creación de estas barreras que normalmente están construidas y diseñadas para absorber unos sonidos, en concreto para la atenuación del ruido de tráfico (Jean, Defrance, & Gabillet, 1999), (Fujiwara, Hothersall, & Kim, 1998), (May & Osman, 1980).

Una herramienta de mucha utilidad para determinar la exposición de la gente al ruido en una ciudad es el mapa de ruido. Según la directiva 2002/49/CE (Unión Europea, 2002) del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de junio de 2002 sobre evaluación y gestión del ruido ambiental, se define mapa de ruido como: *“la presentación de datos sobre una situación acústica existente o pronosticada en función de un indicador de ruido, en la que se indicará 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”*.

Existe otro término denominado mapa estratégico de ruido (MER), el cual es un caso particular de los mapas de ruido. Los MER incluyen información más detallada para poder centrar más el estudio en áreas afectadas de una zona, con el objetivo de realizar planes de acción para mejorar su condición. Estos MER son una herramienta que sirve para la evaluación de la exposición al ruido, no sólo para la medición de niveles. Los MER recopilan la información no sólo sobre los niveles medidos, sino también sobre la población expuesta, períodos más intensos y demás información recogida en la normativa.

Dentro de los mapas estratégicos de ruido existen cuatro modelos:

- a) Mapas estratégicos de ruido para aglomeraciones: prestan especial atención al ruido procedente del tráfico rodado, tráfico ferroviario, aeropuertos y lugares de actividad industrial. Se realizarán en zonas con densidad de población considerada como área urbanizada y se analizará, entre otros, el número total estimado de personas cuyas viviendas estén expuestas a ciertos valores. Este tipo de mapas son elaborados por los ayuntamientos de los municipios o por las Comunidades Autónomas.

II. EL PROBLEMA DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA EN LAS CIUDADES ACTUALES 87

- b) Grandes ejes viarios: se refieren al estudio de carreteras del territorio, bien sean nacionales o internacionales, que tengan un volumen de tráfico mayor a tres millones de vehículos al año. La competencia de elaboración de estos mapas la tiene, en España, para la red de carreteras del Estado, el Ministerio de Fomento, y para las redes autonómicas y regionales, las Comunidades Autónomas y las Diputaciones.
- c) Grandes ejes ferroviarios: trata sobre cualquier vía férrea con un volumen de tráfico mayor a 30.000 trenes al año. La competencia de este tipo de MER se divide entre el Ministerio de Fomento para la red estatal y las Comunidades autónomas para las redes autonómicas.
- d) Grandes aeropuertos: se refiere a los aeropuertos civiles que tengan más de 50.000 movimientos al año, refiriéndose a éstos tanto aterrizajes como despegues. La competencia de la elaboración de estos MER recae únicamente en el Ministerio de Fomento.

A pesar de que la elaboración de los mapas estratégicos de ruido la realizan instituciones distintas, en España, el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente requiere todos los informes para su recopilación y envío de éstos a la Comisión Europea.

Los parámetros acústicos que se usan en la realización de mapas de ruido estratégicos según la directiva 2002/49/CE son:

- a) L_{eq} : es el nivel de presión sonora equivalente. Definido en ecuación 6.
- b) L_{den} : este parámetro es el nivel sonoro para el periodo día-tarde-noche. Definido en ecuación 8.
- c) L_{day} : corresponde al nivel sonoro equivalente del periodo diurno. Normalmente ésta comprendido entre las 7:00 y las 19:00, aunque estos valores pueden variar según las distintas normativas municipales o regionales.
- d) $L_{evening}$: corresponde al nivel sonoro equivalente del periodo de la tarde, desde las 19:00 hasta las 23:00, también puede variar según la normativa específica municipal o regional. Este periodo está penalizado con 5 decibelios.

- e) L_{night} : es el nivel sonoro equivalente del periodo noche. Va desde las 23:00 hasta las 7:00. Puede variar según la normativa específica municipal o regional. Este periodo se penaliza con 10 decibelios.

También existen otros parámetros acústicos que se usan para caracterizar de manera estadística el ruido, para describir el ruido de tráfico o para calcular exposiciones a ruido durante determinados periodos. Estos últimos son más utilizados a la hora de cuantificar el ruido al que están expuestos trabajadores durante su jornada laboral, como por ejemplo el nivel diario equivalente (NDE), donde N_i es el nivel sonoro por hora y t_i el tiempo en horas:

$$NDE = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{8} \cdot \sum t_i \cdot 10^{N_i \cdot 0.1}\right) (dB) \quad (9)$$

A la hora de hacer los mapas estratégicos de ruidos, se elaboran distintas fases de aplicación de la directiva europea 2002/49/CE. La primera fase en España fue llevada a cabo en 2007, con fecha límite el 30 de junio de ese año. Lo exigido fue la realización de MER para aglomeraciones con más de 250.000 habitantes y para los grandes ejes viarios cuyo tráfico superase los 6 millones de vehículos al año, los grandes ejes ferroviarios con tráfico mayor a los 60.000 trenes al año y para todos los grandes aeropuertos existentes en el territorio. Estas condiciones se han de cumplir en la nueva elaboración de MER cada cinco años, siendo la segunda fase el 30 de junio de 2012 y la tercera fase para el 30 de junio de 2017.

En la primera fase se elaboraron MER en 19 aglomeraciones, en 393 tramos de carreteras con una longitud total de 7896,32 kilómetros, 20 tramos de vías férreas con una longitud total de 742,15 kilómetros y 10 aeropuertos. En la figura 14, se presentan de manera resumida los niveles sonoros de las aglomeraciones, según los indicadores L_{den} y L_{noche} , para la población expuesta a distintos tipos de fuentes y a los distintos niveles.

II. EL PROBLEMA DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA EN LAS CIUDADES ACTUALES 89



Figura 14. Mapa de aglomeraciones de la primera fase de aplicación de la directiva 2002/49/CE.

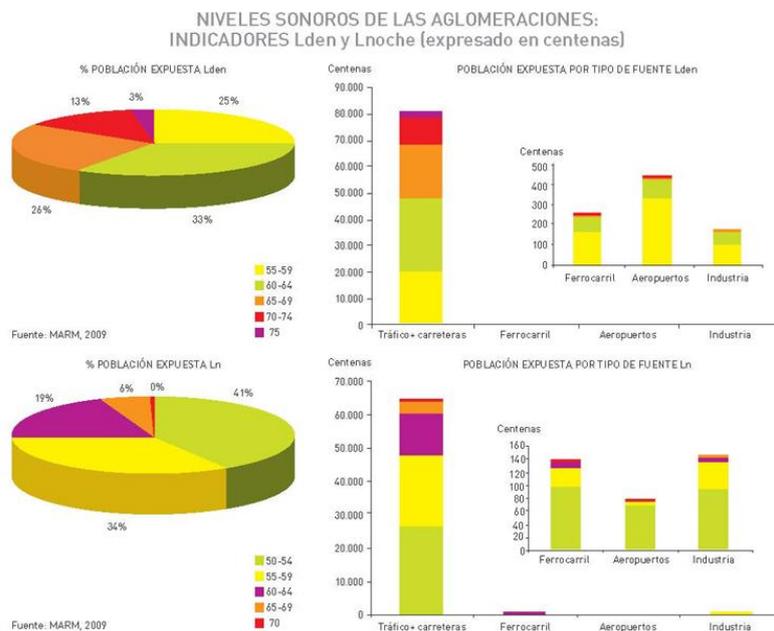


Figura 15. Resultados de la primera fase de aplicación para aglomeraciones.

Los resultados de la segunda fase pueden ser consultados en la web del Sistema de Información sobre Contaminación Acústica (SICA) del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente del Gobierno de España. Los datos anteriormente expuestos relativos a la primera fase han sido consultados y extraídos de la base de datos disponible del SICA (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2017).

La Directiva 2002/49/CE, además de exigir a los estados miembros la realización de Mapas de Ruido Estratégicos cada 5 años desde 2007, también exige la elaboración de planes de acción con el objetivo de lidiar con los problemas ligados a la contaminación acústica. En España, se establecieron dos fases de aplicación para la aprobación y entrega de los planes a la Comisión Europea. La primera fase acabó el 18 de julio del año 2008 y la segunda fase el 18 de julio de 2013. La tercera fase estará planeada para el 28 de julio de 2018. Estos planes de acción conllevan el obligado cumplimiento de un número de elementos necesarios para la calidad y utilidad de los planes de acción propuestos. Entre otros, se deben definir las actuaciones que las autoridades competentes prevén para el periodo de los cinco años posteriores a la fecha de la fase; la definición de las estrategias a largo plazo; establecer unos valores límite; evaluar el número estimado de personas expuestas al ruido y la determinación de los problemas y situaciones que deben mejorar, y otros elementos.

En la Región de Murcia, en el documento sobre los planes de acción de la primera fase para las aglomeraciones (Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, 2006), se definieron unos programas de lucha contra el ruido en varios ámbitos como en el urbanismo y la edificación o planes de movilidad. En el ámbito del urbanismo y la edificación, según el Decreto regional 48/1998 de protección del medio ambiente contra el ruido, se impusieron exigencias de obras de aislamiento acústico supletorio para nuevos edificios en zonas donde se superasen los niveles de ruido según la Ordenanza municipal para cumplir las normativas. También se impulsó el inicio de subvenciones para incrementar el aislamiento acústico en edificios ya construidos en zonas con niveles altos y se decretaron Zonas de Especial Protección Medioambiental en Murcia. El impulso en el uso del transporte público, soterramiento de vías con alto nivel de tráfico o el fomento del uso de la bicicleta son ejemplos de actuaciones, dispuestas en los planes de acción, que

II. EL PROBLEMA DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA EN LAS CIUDADES ACTUALES 91

buscan la mejora de la calidad de vida frente al ruido y la reducción de los niveles de contaminación acústica. En la tabla 4 se muestra un ejemplo extraído de (Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, 2006) en donde se muestran los datos relativos a la población expuesta a distintos niveles de L_{den} para distintos tipos de tráfico.

	Tráfico rodado	Tráfico ferroviario	Contribución Grande Ejes
< 55 dB	714	1798	1490
55 – 59 dB	511	2	193
60 – 64 dB	359	0	80
65 – 69 dB	157	0	31
70 – 74 dB	22	0	6
> 75 dB	1	0	0

Tabla 4. Población expuesta a los distintos niveles de L_{den} para los distintos tipos de tráfico en el municipio de Murcia.

2.5 RESUMEN

En este capítulo se ha puesto en contexto el problema de la contaminación acústica en las ciudades actuales a través de un breve repaso a la historia de las ciudades, su desarrollo y la aparición de nuevos retos a solventar para un crecimiento sostenible. Se ha estudiado la evolución de las ciudades a lo largo de la historia, desde la aparición de las primeras polis griegas. Desde la Grecia antigua, pasando por la Edad Media, se ha ofrecido una visión sobre el crecimiento de las ciudades y los nuevos desafíos a los que se han ido enfrentando, hasta llegar al surgimiento de las megaciudades con millones de personas viviendo en ellas.

Esta nueva tipología de ciudades, con millones de personas viviendo en ellas, han dado lugar a nuevas problemáticas que han de ser tenidas en cuenta para asegurar el futuro sostenible de las ciudades, así como asegurar también la calidad de vida de las personas que residen y trabajan en ellas. Es por ello que se han presentado los distintos tipos de contaminación presentes en las ciudades para, a continuación, enfocar el ámbito de estudio en la contaminación acústica, el ruido y sus consecuencias.

La contaminación acústica en las ciudades actuales es un tema de gran preocupación tanto por parte del conjunto de la sociedad como por parte de administraciones e instituciones. La contaminación acústica en las ciudades tiene como principal protagonista al transporte, sobre todo a los medios de transporte por carretera. El ruido de tráfico es la fuente de ruido que más contaminación acústica aporta a las ciudades y por consecuencia a sus habitantes. Los efectos que la contaminación acústica produce en las personas pueden manifestarse tanto de manera física o fisiológica como en forma de trastornos psicológicos o cognitivos. La acumulación del ruido no es física, debido a la naturaleza del ruido como sonido, sino más bien se acumulan sus efectos en las personas. Es por ello que existen ciertos métodos de evaluación del ruido en las ciudades, tales como los mapas de ruido estratégicos. Éstos sirven para poder evaluar el ruido con el objetivo de llevar a cabo planes de acción que permitan el control del ruido en las ciudades, así como su prevención.

**III - TECNOLOGÍAS
APLICADAS EN LAS
CIUDADES INTELIGENTES
PARA LA EVALUACIÓN DE
LA CONTAMINACIÓN
ACÚSTICA**

III - TECNOLOGÍAS APLICADAS EN LAS CIUDADES INTELIGENTES PARA LA EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA

Actualmente existen ciertas tecnologías que se pueden aplicar a las ciudades existentes y las emergentes para mejorar su desarrollo, siendo este más óptimo y sostenible. El crecimiento en el desarrollo de los sensores, su miniaturización, reducción de costes y aumento de potencia de cálculo han ayudado a acelerar este proceso. El tratamiento de audio ha sido tradicionalmente una tarea computacionalmente costosa, pero los nuevos dispositivos pueden lidiar con análisis de audio para diferentes tareas. El estudio de la molestia acústica es un tema de creciente preocupación debido al rápido desarrollo que experimentan las ciudades, no por ello exento de problemas.

El propósito de este capítulo es el de mostrar las aplicaciones de estas nuevas tecnologías en el ámbito de las ciudades y su desarrollo, profundizando en una revisión del Internet de las Cosas, revisar el caso específico de las redes de sensores acústicos y analizar estudio de la molestia acústica. Finalmente se propondrán una serie de contribuciones y mejoras en esta temática que serán abarcadas dentro de este trabajo de investigación.

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se habla en una primera parte sobre el Internet de las Cosas (Internet of Things, IoT) y su aplicación en las ciudades inteligentes. En esa sección se repasa el modelo de ciudad inteligente y qué la conforman, se habla sobre los dispositivos de sensores y como se interconectan entre ellos y las aplicaciones implementables a partir de los datos de la sensorización de las ciudades. En un segundo apartado se presentan las redes de sensores acústicos, se definen sus partes y se realiza una revisión del estado del arte de la tecnología y sus aplicaciones. A continuación, se repasan la molestia acústica y sus métodos de evaluación. Finalmente, una discusión sobre las redes de sensores acústicos y sobre la evaluación de la molestia es llevada a cabo.

3.2 LA APLICACIÓN DEL INTERNET DE LAS COSAS EN LAS CIUDADES INTELIGENTES

El concepto de Internet de las Cosas, o IoT, se refiere a la interconexión a través de redes de comunicaciones de objetos de uso diario, los cuales usualmente están provistos de algún tipo de “inteligencia” (Xia, Yang, Wang, & Vinel, 2012). Gracias a los rápidos avances en la tecnología, el IoT está abriendo numerosas oportunidades para la creación de nuevas aplicaciones destinadas a mejorar el estilo de vida de las personas. De manera más técnica, el concepto de IoT se refiere a la conexión de diversos dispositivos entre sí, usando distintos protocolos de comunicaciones y abarcando una amplia variedad de aplicaciones (Holler, y otros, 2014). Al ser un concepto relativamente novedoso la literatura científica referente al tema aún está en pleno etapa inicial de crecimiento y aún hay mucho campo de desarrollo.

La posibilidad de embeber un microprocesador en prácticamente cualquier objeto hace que cualquiera de ellos tenga el potencial de ser un objeto inteligente. Si a esto le añadimos la miniaturización de sistemas de telecomunicación, como antenas WiFi, bluetooth u otros protocolos, las capacidades de estos objetos se amplia, al poder ser éstos conectados a Internet, informando de su estado, de las lecturas de sus sensores o para ser controlados remotamente (Zouganeli & Svinnset, 2009). El IoT es una capa adicional de información, interacción o ejecución que se añade al conjunto de Internet gracias a los dispositivos equipados con estas capacidades.

La mayoría de las definiciones de Internet of Things que existen tienen en común diferentes aspectos que los hace converger en una serie de elementos comunes. La conectividad sería uno de los pilares en los cuales se basa este concepto. Ligado a IoT aparece el planteamiento de una red, bien ya sea de objetos, de dispositivos más complejos o de sencillos sensores o actuadores. Esta red es comúnmente la red de Internet, pero en casos más particulares las redes pueden ser de otro tipo y otra dimensión. En el caso de una red de sensores agrícolas, la idea de que sus nodos estén conectados a Internet puede no ser tan atractiva como que esos nodos estén conectados entre ellos a través de una red privada y a su vez a un servidor desde el cual controlarlos y monitorizarlos.

Las “cosas” son otra de las partes principales del concepto de Internet de las Cosas. Éstas con referidas normalmente a dispositivos, objetos físicos, sensores, electrodomésticos, y la lista puede abrirse a una infinidad de más cosas. En términos generales, todos ellos son una parte esencial de una red de “cosas”, ya que son los nodos de ésta (Gubbi, Buyya, Marusic, & Palaniswami, 2013). La facultad de estos objetos de convertirse en inteligentes reside en la capacidad de hacer alguna acción, bien ya sea al darse una condición concreta o bien a raíz de una orden concreta por parte de un usuario.

Cada uno de todos estos componentes producen una determinada información que es o bien almacenada o bien transmitida. Estos datos son una de las partes más importantes del conjunto del IoT, porque de la calidad, y a veces de la cantidad, de éstos dependerá el tipo de información analizada que se pueda obtener. El Internet of Things puede definirse por sus partes y características, pero también debe de ser descrito por su propósito. Los datos son una parte crucial en este conjunto, ya que no hay Internet of Things sin datos, no se puede contemplar una red vacía (Li, Da Xu, & Wang, 2013).

Los datos obtenidos no pueden tener un gran valor si simplemente se quedan almacenados o si no pueden ser usados con un propósito, ser interpretados para más adelante realizar alguna acción o estudio. Los datos recopilados por las “cosas” de la red del Internet de las cosas necesitan ser comunicadas, para así poder convertir esa información recopilada en información que pueda ser útil. Para ello se utilizan distintos protocolos de telecomunicaciones (Aijaz & Aghvami, 2015), (Zorzi, Gluhak, Lange, & Bassi, 2010). Éstos pueden ser de distintos tipos como inalámbricas de corto, medio o largo alcance o bien cableadas (Want, Schilit, & Jenson, 2015), (Al-Fuqaha, Guizani, Mohammadi, Aledhari, & Ayyash, 2015). Ejemplos de redes inalámbricas de corto alcance serían por ejemplo Bluetooth de baja energía (BLE), Light-Fidelity, identificación por radiofrecuencia (RFID), comunicación de campo cercano (NFC), WiFi, ZigBee, entre otros. Las comunicaciones de medio alcance inalámbricas suelen servirse de redes de telefonía, como LTE. Para largo alcance se usan protocolos de conexión vía satélite o de protocolos específicos para redes de largas distancias. Las redes cableadas suelen ser a través de ethernet, coaxiales o mediante tecnologías que usan las líneas de transmisión de la corriente eléctrica para transmitir información.

La inteligencia de los objetos conectados viene atribuida a su vinculación a redes y a estar conectados. Esta inteligencia puede entenderse de maneras distintas. Por ejemplo, en las tecnologías de redes inteligentes, se pueden tener una serie de objetos conectados, éstos con una cierta capacidad de acción. En otros casos, la inteligencia de la red reside en el análisis de los datos y de la aplicación “inteligente” que se les dé a éstos, bien ya sea para solucionar un reto, mejorar algo o para la automatización de procesos.

Esta automatización es otra de las grandes partes de una red de dispositivos IoT. Siempre existe algún grado de automatización, independientemente del objetivo del proyecto o del tipo de aplicación, siendo una característica común para casi todas las aplicaciones de IoT.

Esta conectividad masiva de tantos dispositivos y el auge del Internet de las cosas ha hecho que en la tecnología necesaria se haya avanzado notablemente, pero esto no es lo único en lo que tiene que enfocarse el concepto de IoT. El conjunto de información y desarrollo en el que se mueve y moverá todo proveerá con innumerables aplicaciones que conformen todo el nuevo ecosistema de Internet of Things.

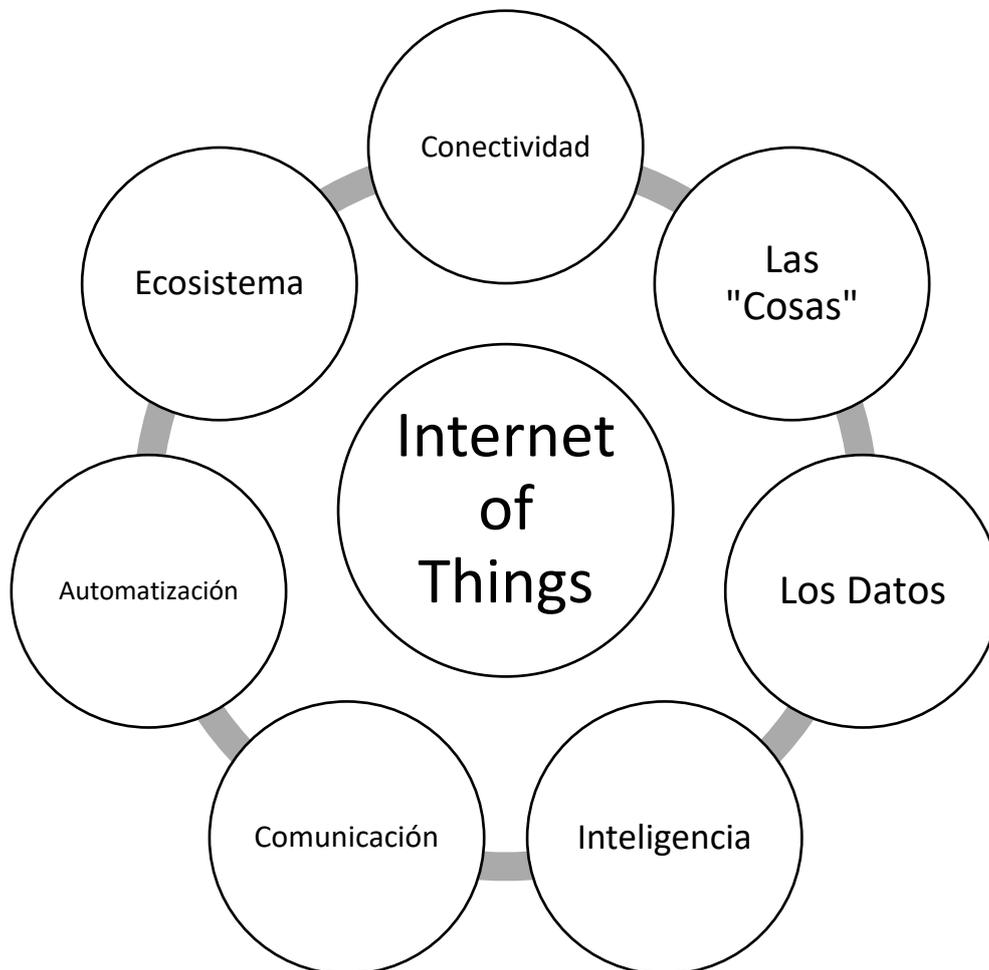


Figura 15. Esquema con las partes principales de la estructura IoT.

En los próximos años, se espera un incremento muy importante en el número de dispositivos conectados (Figura 16). Se espera que el crecimiento de estos dispositivos siga la Ley de Moore que se aplicó anteriormente para el incremento en el número de transistores en un microprocesador (McKinney, 2015). Al igual que en el número de dispositivos conectados, el número de aplicaciones que se benefician de los datos de estos dispositivos, o bien de los dispositivos mismos, igualmente está creciendo. El número de aplicaciones hoy en día es inmenso, y se espera un crecimiento muy grande de éstas en el futuro. Los ámbitos en los que pueden desarrollarse aplicaciones IoT son muy extensos: publicidad, gestión de infraestructuras, en la industria, control de energía, salud, hogar digital y automatización doméstica, transporte... Y aun nuevos campos en los que las

tecnologías de IoT no han sido aplicadas, podrán ser beneficiarias de esta tecnología.

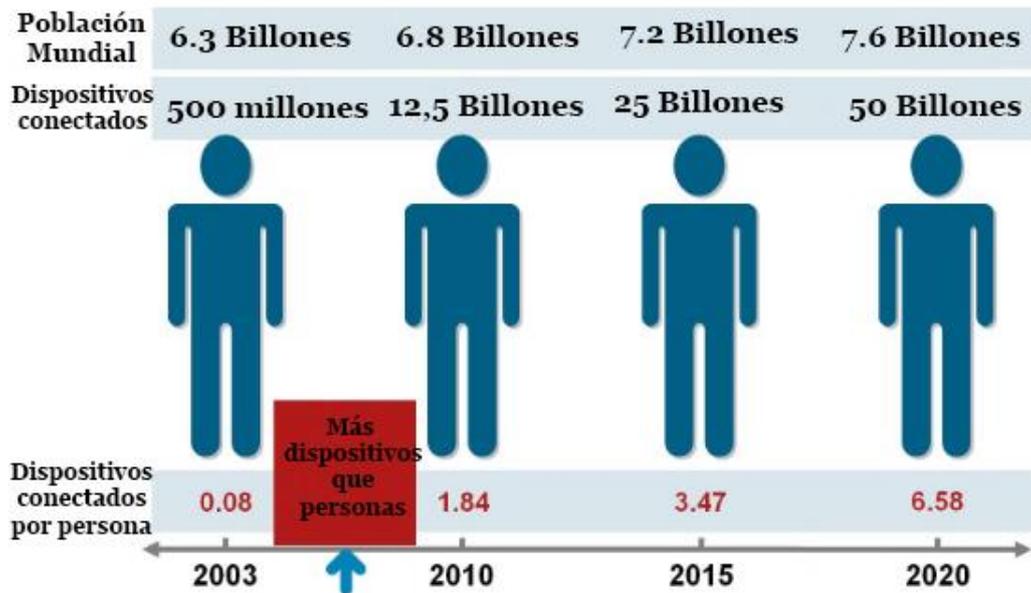


Figura 16. El crecimiento de los dispositivos conectados ya superó al número de personas a nivel mundial, y se espera que el número siga creciendo. Original extraído de (Evans D. , 2011).

En las ciudades, las aplicaciones de IoT destinadas al transporte, gestión de la energía o monitorización ambiental tienen un papel muy importante en el desarrollo de éstas, su transformación a un nuevo modelo, más inteligente, más *Smart*, dando así lugar a un nuevo concepto en el que la ciudad se torna inteligente. El Internet of Things y sus aplicaciones en las ciudades crean las ciudades inteligentes, las Smart Cities.

3.2.1 Modelo de ciudad inteligente

Una ciudad inteligente, traducción al español del término en inglés, *Smart City*, es un concepto surgido en la última década, en el cual las ciudades se aprovechan del uso de las tecnologías de la información y las comunicaciones para su desarrollo más eficiente y sostenible, con el objetivo final de mejorar la calidad de vida de sus ciudadanos. Con el paso de los años, se acrecenta el número de personas viviendo en las ciudades, y eso hace que se deban afrontar nuevos retos para manejar este crecimiento y su resultante de ciudades más grandes y mucho más complejas. En la práctica, el concepto teórico de ciudad inteligente dista mucho de la realidad. Se hace necesaria una buena gestión de los recursos de una ciudad para poder mantener la calidad de los servicios de ésta. En la ciudad inteligente, la tecnología se pone al servicio del ciudadano, buscando un equilibrio sobre la identidad de la ciudad, lo que la hace única, y la inclusión y aprovechamiento de las nuevas tecnologías en ella.

El modelo de una ciudad inteligente está basado en distintas capas que conforman el conjunto de la *Smart City*: la capa de sensorización, la capa de comunicación, la capa de datos y la de servicios y aplicaciones (Figura 17).



Figura 17. Capas de la arquitectura de las tecnologías de la información y las comunicaciones de una Smart City.

La arquitectura de las tecnologías de la información y las comunicaciones de una ciudad inteligente tiene cuatro capas:

- I) Capa de sensorización: a esta capa pertenecen las distintas variedades de sensores y dispositivos IoT conectados que son distribuidos a través del espacio urbano, recopilando datos e información sobre distintas actividades presentes en el medio físico.
- II) Capa de comunicación: conforme se incrementa el número de nodos, dispositivos de Internet of Things, distribuidos a través de una ciudad, esta instalación requiere de unas tecnologías de comunicación lo suficientemente robustas que sean capaces de cubrir grandes áreas geográficas y que además sean capaces de poder manejar grandes cantidades de información y de tráfico de datos. En esta capa pueden convivir distintas tecnologías de comunicación, cableadas o inalámbricas y a través de diversos protocolos.

- III) Capa de datos: una ciudad inteligente solamente puede trabajar de manera óptima y efectiva, sólo si el volumen de datos recopilado es organizado de manera sistemática y tratado de manera adecuada. Para ello existen nuevas tendencias de análisis de datos, como Big Data, especializados en el tratamiento de grandes cantidades de información, como las recopiladas por la capa de sensorización de una Smart City.
- IV) Capa de servicio o de aplicación: esta capa se sirve de los datos recopilados por la capa de sensorización, enviados por la capa de comunicaciones y analizados y gestionados por la capa de datos, para finalmente servir en la creación de herramientas útiles al servicio de los servicios públicos, administraciones, así como para ser accesible para el público en general, los ciudadanos, con el objetivo de crear servicios que permitan mejorar las funciones de la ciudad, con el propósito final de mejorar la calidad de vida de los ciudadanos viviendo en ella.

3.2.2 Dispositivos de sensores y actuadores

La capa de sensorización incluye numerosos dispositivos IoT que son desplegados a través de un área urbana. Estos nodos pueden ser de distinto tipo y con diferentes características, pero una función común es la de recopilar información sobre el entorno físico en los que están desplegados. Un nodo IoT es un conjunto que se compone de sensores, microchips, un suministro de energía y unos elementos de conectividad. Estos nodos IoT se pueden separar en dos categorías diferentes, diferenciadas según sus condiciones de funcionamiento (Bormann, 2014):

- I) **Nodo limitado:** estos nodos operan en medios en los que el suministro de energía es bajo, muy bajo, o incluso nulo. Para que su coste energético sea bajo, sus características en cuanto a potencia de procesamiento suelen ser limitadas y la velocidad de transferencia de datos en la que trabajan son de tasas bajas.
- II) **Nodos no limitados, o libres:** estos nodos no tienen ningún límite en cuanto a su coste operacional en términos de consumo energético, tasas de procesamiento o velocidades de transferencia en sus comunicaciones.

Aun a pesar de esta diferenciación, un nodo puede trabajar siguiendo cualquiera de las dos categorías mencionadas, dependiendo de las condiciones de trabajo y del medio en el que se encuentre operando. Un ejemplo sería el caso de un sensor de proximidad que trabaje en un parking de un complejo de oficinas pequeño, que en ese caso trabajaría como un nodo limitado, pero si este mismo sensor se encontrase operando en un gran parking de un centro comercial o un aeropuerto, éste podría trabajar como un nodo sin limitación.

Ejemplos de uso de sensorización para ciudades inteligentes son muy variados, pero los usos más destacados quizás sean los enfocados en energía y medio ambiente. Ejemplos más concretos de este tipo de aplicaciones son el uso de sensores para monitorizar edificios con el propósito de mejorar su eficiencia energética, para la gestión inteligente del alumbrado público, sistemas de control de la contaminación atmosférica, sistemas de monitorización de la contaminación

acústica, riego inteligente o para la gestión de otros servicios básicos en una ciudad (AENOR, 2015).

Dentro del campo de los nodos IoT también se puede destacar la existencia de unos dispositivos denominados actuadores. Un actuador se define como un dispositivo con la capacidad de transformar energía en una acción o movimiento. Es el mecanismo mediante el cual un sistema de control actúa sobre un entorno. El sistema de control puede ser de distinto tipo, bien simple, siendo un sistema fijo electrónico o mecánico, bien basado en software o con relación humana. Dentro de los actuadores, se pueden diferenciar ciertas categorías en función de la fuente de energía que necesiten para crear esa acción o movimiento: neumáticos, hidráulicos, eléctricos, termal o magnéticos y mecánicos. Los actuadores neumáticos son aquellos que usan aire a presión para generar un movimiento. Los hidráulicos en cambio, usan un líquido. Los actuadores eléctricos crean el movimiento o la acción a partir de una fuente de alimentación externa, como una batería. Los actuadores termal o magnéticos son activados por una fuente de energía termal o magnética y los mecánicos son aquellos que funcionan ejecutando un movimiento a partir de otro movimiento (como por ejemplo una cremallera y un piñón). En el campo de Internet of Things, los actuadores, independientemente de qué tipo sean, tienen la función de al recibir una señal, realizar una acción de conjunto.

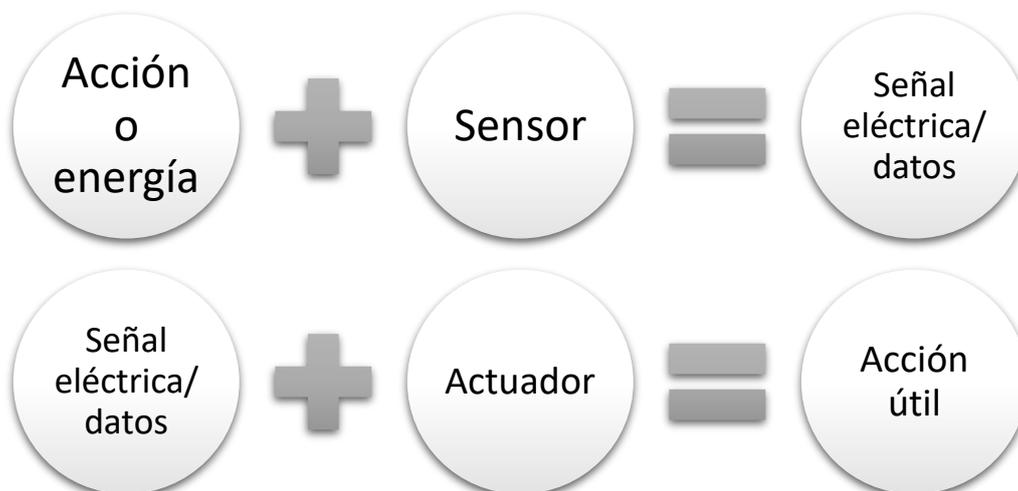


Figura 18. Esquema simplificado de funcionamiento de sensores y actuadores.

Usando los ejemplos anteriormente descritos para la sensorización en ciudades, se puede mostrar también la aplicación de actuadores en esos casos. En

un caso en el que se quieran usar para tomar medidas de eficiencia energética en edificios u otros recintos cerrados, la parte de sensorización sería por ejemplo un sensor de temperatura y los actuadores se encargarían de llevar a cabo el accionamiento o desconexión de los sistemas de climatización del edificio, para así ahorrar en su consumo energético (Kyriazis, Varvarigou, White, Rossi, & Cooper, 2013). En el caso del alumbrado público se usarían fotoresistencias como sensores para detectar el nivel de iluminación ambiental y encender el alumbrado en función de cuando sea necesario. Éstos son sólo algunos ejemplos, y más casos pueden verse en el apartado 3.2.5 de la capa de aplicaciones.

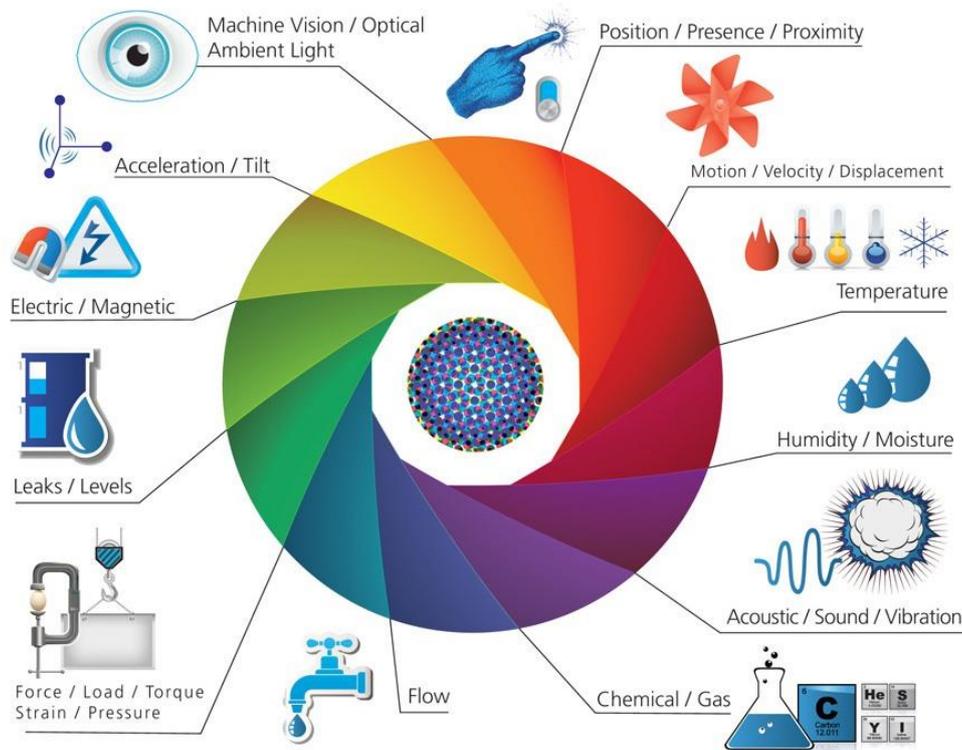


Figura 19. Infografía sobre sensores y actuadores. Extraída de Postscapes (Postscapes, 2017).

3.2.3 Redes de telecomunicación

Los dispositivos conectados han trabajado tradicionalmente en las mismas redes y usando los mismos protocolos de comunicación que usan Internet y las comunicaciones móviles, como por ejemplo las redes de telefonía móvil, WiFi o Bluetooth, entre otros. Sin embargo, las peculiaridades características de los dispositivos IoT, sensores y demás, hacen que los requisitos que necesitan para su interconexión sean diferentes y que sus requisitos de red serán igualmente diferentes. No se puede pretender que se trabajen de la misma manera que los ordenadores tradicionales, teléfonos móviles u otros dispositivos similares. Los dispositivos que usualmente sirven para la interacción con personas, como un ordenador o un smartphone, y cómo los usamos, hacen que éstos requieran acceder a grandes cantidades de datos y de manera irregular. No obstante, los sensores y otros dispositivos inteligentes no acceden a la red ni envían datos de la misma manera. Normalmente suelen enviar pequeños paquetes de datos y con una frecuencia más estable, con intervalos de tiempo regulares. Además, éstos dispositivos necesitan conectarse en áreas remotas que no tienen la infraestructura de las redes que se pueden encontrar normalmente disponibles, y también es posible que el acceso a una fuente de alimentación estable sea inviable. Para ello existen diversas tecnologías que trabajan de manera más óptima para estos dispositivos específicos.

Cada día van aumentando el número de ciudades que se están tornando “inteligentes”, y con ello, el aumento aun mayor del número de dispositivos conectados. Éstos requieren tener una instalación y una red lo suficientemente robusta, que se pueda extender por grandes áreas y que además pueda manejar grandes cantidades de información y tráfico de datos. Desafortunadamente, un solo tipo de tecnología de comunicación de datos no es compatible con los dos tipos de dispositivos IoT que hay, para los nodos limitados y los no limitados, o libres.

Los nodos libres pueden servirse de las tecnologías de comunicación más tradicionales como LAN, MAN o WAN, tales como WiFi, comunicaciones por fibra óptica, Ethernet o a través de tecnologías de comunicaciones móviles como UMTS y LTE. La ventaja de este tipo de tecnologías de comunicación son que tienen una alta fiabilidad, altas tasas de transferencia de datos y una baja latencia. Sin embargo, no son adecuadas para los nodos más limitados en sus recursos. Para los

nodos limitados, suelen trabajar con tasas de transferencia bajas, menores de 1 Mbit/segundo. Existen ciertas tecnologías de comunicación que son frecuentemente usadas para este tipo de nodos, y fiables en su desempeño. Éstas son IEEE 802.11 de baja energía (Low Energy), Bluetooth de baja energía (BLE), RFID o NFC entre otras.

Para los casos en que se deban cubrir áreas muy extensas, existen ciertas tecnologías de comunicación energéticamente eficientes que se pueden usar para estos nodos limitados. Sigfox, LoRaWAN y Neul son ejemplos de este tipo de tecnologías de comunicación. Son una alternativa de amplio rango, entre Wifi y redes móviles, que usa bandas de comunicación ISM para transmitir datos a través de un espectro muy estrecho desde y hacia dispositivos conectados IoT.

Sigfox es utilizado en aplicaciones tipo M2M (máquina a máquina) en las que los nodos tienen una capacidad de alimentación eléctrica limitada y a la hora de transmitir información, requieren bajas tasas de transferencia. El uso de otras tecnologías como Wifi o redes móviles hacen que los consumos energéticos sean más altos y, por tanto, la vida útil de los nodos quedaría más limitada. Sigfox utiliza protocolos de transmisión de banda ultra estrecha con velocidades de transferencia de entre 10 y 1000 bits por segundo. El consumo energético aproximado son 50 micro vatios y el alcance que se obtiene es de 30 y 50 kilómetros en entornos abiertos y de entre 3 y 10 para su uso en entornos urbanos.

Neul es similar en concepto a Sigfox, y trabaja también en la banda inferior a 1 gigahercio. Permite entregar una buena escalabilidad en la red, cubriendo amplias zonas con un bajo consumo energético y aplicable a redes de bajo coste. Usa la tecnología de comunicación denominada Weightless, la cual es una tecnología de redes inalámbrica de amplia cobertura designada específicamente para el Internet of Things. Las tasas de transferencia de datos van desde unos pocos bits por segundo hasta 100. El consumo energético es bajo, de entre 20 y 30 mA.

LoRaWan es muy similar en varios aspectos a Sigfox y a Neul. Se centra en las redes de área amplia (WAN) y sus aplicaciones y está diseñada para tener un consumo energético bajo para poder soportar aplicaciones de bajo coste, pero proveyendo comunicación bidireccional segura en dispositivos IoT y aplicaciones para Smart Cities o la industria. Esta tecnología soporta redes de hasta millones de

dispositivos y sus tasas de transferencia varían entre 0,3 kbps y 50 kbps. En entornos urbanos su alcance varía entre los 2 y 5 kilómetros.

3.2.4 Plataforma de ciudad. Gestión y análisis de la información

Las capas anteriores del modelo de ciudad inteligente se han encargado de la tarea de recopilar los datos y de comunicarla bien a un servidor o bien a una base de datos. Ahora bien, este volumen de información obtenida no sirve de nada sin una correcta gestión y análisis de estos datos para poder llevar a cabo acciones o actuaciones acorde a estos datos obtenidos. Es por ello que existe una capa en el modelo de ciudad inteligente encargada de gestionar y analizar esta información.

Esta capa es la que proporciona la inteligencia a la arquitectura de una ciudad inteligente. Una ciudad inteligente tan solo puede funcionar de manera correcta y eficiente si los datos sobre ella que recogen sus sensores y demás dispositivos IoT es organizada de manera adecuada. Para ello se crean distintas bases de datos para la información de la ciudad:

- a) Para la información proveniente de los nodos IoT.
- b) Los distintos departamentos que controlan cada conjunto de nodos.
- c) Los datos correspondientes a cada uno de estos departamentos.

En esta capa existen servidores de datos donde se almacena la información y también se procesa. Para su procesamiento se suelen aplicar distintos modelos estadísticos. Estos modelos incluyen modelos predictivos, modelos descriptivos y modelos de decisión. Los modelos predictivos son un tipo de tecnología surgida de la tecnología de la minería de datos (*data mining*). Funcionan analizando los datos actuales y los pasados para poder ayudar en predicciones futuras. Los modelos descriptivos tratan sobre la relación que existe entre los eventos del mundo real y los factores que hacen que éstos se den, y para los cuales son responsables. Por último, los modelos de decisión sirven para hacer una predicción sobre la salida que tendría una decisión, estableciendo una relación entre los elementos de la decisión y los resultados predichos. Estos tipos de modelos son de gran utilidad para las administraciones y organismos de control y gestión de las ciudades, ya que ayudan a la toma de decisiones basándose en datos objetivos.

Con el incremento en el número de dispositivos generando y comunicando cada vez más y más datos a servidores, cuando se procede al análisis de estos datos a través de vías tradicionales, éstos resultan poco eficientes para trabajar con ellos. Esto ha dado lugar a un nuevo enfoque en la manera en que se gestionan los datos y se hacen los procesos de la toma de decisiones. Si se quieren describir grandes cantidades de datos, esto mediante la forma tradicional llevaría mucho tiempo y sería muy costoso computacionalmente. Es por ello que surgió el llamado análisis de Big data. Big data se refiere al concepto que lidia con conjuntos de datos tan grandes que las aplicaciones normalmente usadas para el procesamiento de estos datos resultan insuficientes, y los procesos utilizados para la detección de patrones en estos conjuntos de datos resulta tremendamente ineficaz usando estos medios. Cabe destacar que el concepto de “datos grandes” varía con el tiempo, creciendo con los años. En el año 2012 se estimaba su tamaño entre 12 terabytes y varios petabytes de información en un conjunto de datos. Actualmente se ha superado esa cifra ya que la cantidad de información que se crea y la que se está pudiendo tratar cada vez es más alta por ambas partes.

Además de la inmensa cantidad de datos que se deben tratar, también es destacable que existe una gran variedad en los tipos de datos que pueden estar representados. Existen numerosas variables de distinto tipo que se pueden analizar, como posiciones GPS, lecturas de sensores como temperatura, luminosidad, acústicos, etc., acelerómetros, información audiovisual, etc. Para analizar todos estos tipos de variables y de datos distintos se necesita una velocidad de respuesta alta para que el análisis sea lo más corto posible. El Big data tiene un amplio campo de desarrollo también en el campo de la velocidad de respuesta, y ya no tan solo en el análisis de grandes cantidades de datos. Los modelos estadísticos necesitan de una base de datos previa, y es ahí donde el concepto de Big data se encargaría de proveer a los modelos.

El problema que se debe analizar a la hora de gestionar la información y los datos que una ciudad inteligente puede proveer a través de sus capas de sensorización no es tanto de qué manera se deben tratar esos datos, sino más bien cuál es el problema que se trata de resolver, pudiendo hacer uso de esos datos para su resolución (Soares, 2012).

Existe una amplia variedad de datos en el mundo digital actual. Es por ello que incluso el concepto de Big data puede clasificarse en distintos tipos de datos (Figura 20).

El uso de Big Data para la gestión de las ingentes cantidades de datos que una ciudad inteligente puede dar lugar a través de su capa de sensorización, es una herramienta de utilidad para dar solución a preguntas que buscan responderse con la creación de aplicaciones en la siguiente y última capa del modelo de Smart City.

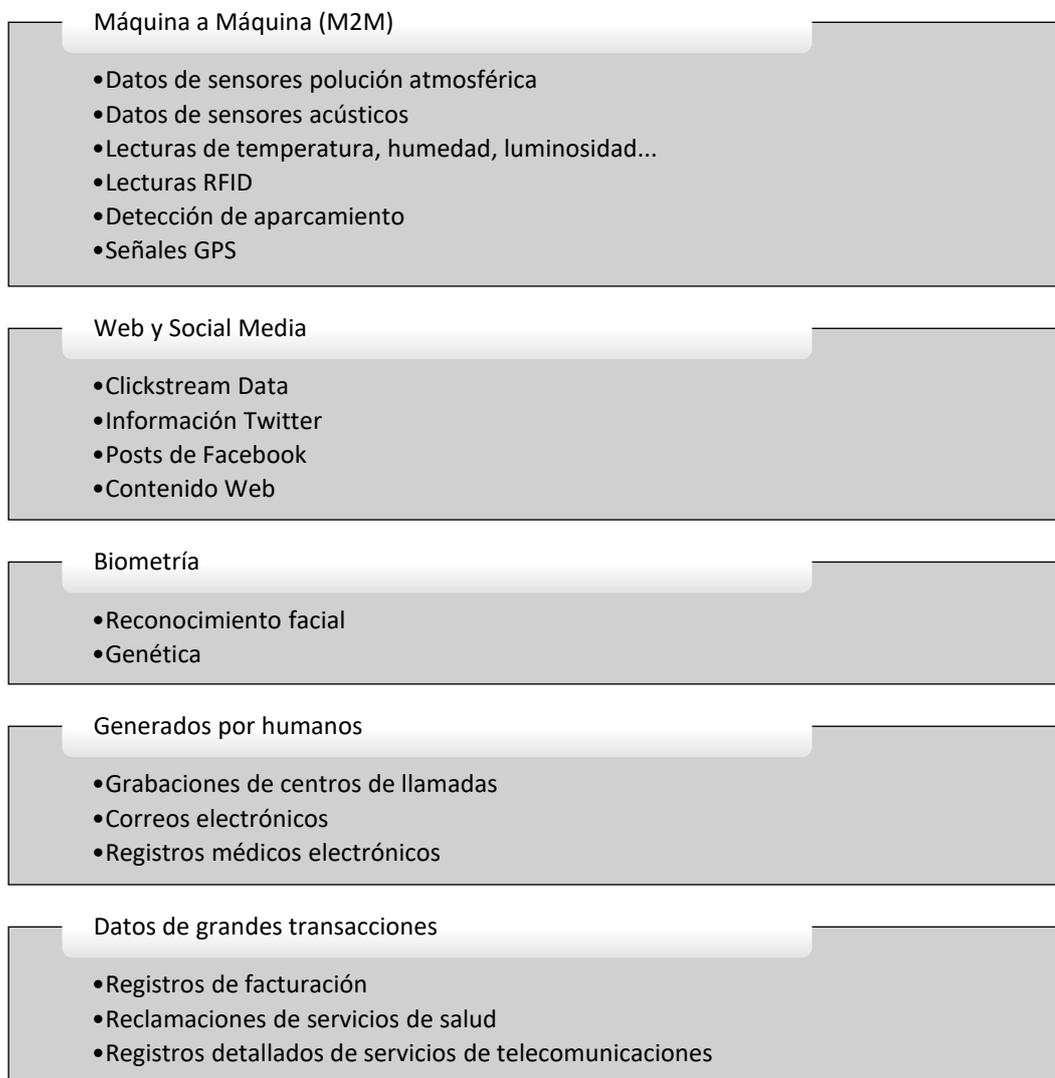


Figura 20. Tipos de datos de Big Data. Figura original extraída de (Soares, 2012).

3.2.5 Capa de aplicaciones

La última capa del modelo de ciudad inteligente sería la capa de aplicaciones. También se le denomina en ciertas ocasiones capa de servicio.

Existen numerosos campos de aplicación en los que las redes de sensores pueden ser de utilidad. A finales de la primera década de los años 2000, el desarrollo del hogar digital y la domótica estaba en auge, y la aplicación de pequeñas redes de sensores en el hogar eran una opción muy atractiva para sensorizar el hogar, usando a su vez estos nodos no sólo como sensores de lectura, sino también como actuadores para realizar ciertas acciones, por ejemplo, sensores de temperatura y actuadores encargados de controlar la climatización en el hogar. En el campo de control de tráfico las redes de sensores han ayudado a aumentar los datos de las redes de carreteras, en aquellos puntos donde o bien no se pueden instalar cámaras de tráfico o bien para rebajar los costes de la instalación de nodos, ya que estos sensores suelen ser de menor coste que las cámaras, así como sus protocolos de comunicación transfieren menos datos, por lo que el coste operacional es igualmente menor. En la industria está bastante extendido su uso, como por ejemplo en el control de líneas de producción o agricultura (Kwong, y otros, 2009). Incluso se están probando las redes de sensores en aplicaciones de salud, para monitorizar el cuerpo humano de manera constante y dando avisos en las condiciones necesarias (Otto, Milenkovic, Sanders, & Jovanov, 2006).

Las redes de sensores tienen ciertas características que las diferencian de otro tipo de redes. Su topología no tiene una forma fija, ya que los nodos tienen que adaptarse al tipo de datos que son enviados, por lo tanto, el tipo de topología es dinámica. Así mismo, las redes inalámbricas de sensores, al ser el canal de comunicación el aire, tienen que estar preparadas para las distintas condiciones que se pueden dar en este medio, con protocolos que contemplen los posibles errores en los datos. Al no usarse una infraestructura de red, todos los nodos son emisores y receptores, aunque también existen los nodos recolectores que se ocupan de recopilar la información para su envío a un servidor central, que es el que se encarga de transmitir los datos o su procesado. Una de las características más importantes de una red de sensores autónoma e inalámbrica es el factor del gasto energético. El diseño de los dispositivos tiene que ser eficiente ya que normalmente

cada nodo tiene el acceso a una fuente de alimentación limitada, y los procesadores y sensores que usen deben ser de bajo consumo, para que la autonomía de la red pueda ser extensa. Esto hace que los dispositivos estén limitados en cuanto a su hardware, su potencia de procesamiento computacional, sus posibilidades de comunicación, etc. Sin embargo, con unos dispositivos con recursos más limitados, aunque acordes a la aplicación que deben desempeñar, también se pueden reducir los costes de cada uno, para así poder tener redes con un mayor número de nodos y por tanto mayor resolución espacial.

En el ámbito de las ciudades inteligentes, la implantación de redes de sensores ha servido en gran medida en el desarrollo de éstas. El tipo de redes de sensores que se suelen usar en las ciudades son los sensores ambientales, que sirven para medir distintos parámetros del medio. Sensores para monitorizar los niveles de contaminación y de ciertas partículas nocivas en el aire, monitorización de niveles de ruido, sensores sísmicos, de humedad, temperatura o contaminación lumínica entre otros, son ejemplos de los diferentes tipos de aplicaciones que pueden desarrollarse usando redes de sensores en el ámbito de las Smart Cities (Hernández-Muñoz & Pettersson, 2011).

Existen varios proyectos de ciudades inteligentes en los que se han implantado distintas medidas para alcanzar la característica de inteligencia, y el uso de redes de sensores ha sido una de las herramientas que les ha ayudado en el impulso para la consecución de este propósito (Schaffers, y otros, 2011). Ejemplos de ellas son los casos de la ciudad de Santander, España, con su proyecto Smart Santander (Smart Santander, 2017), en el cual se proponía el uso de la ciudad como un campo de experimentación práctico en el cual se pudiesen implementar las aplicaciones y servicios típicos que una ciudad inteligente debe tener. Estas nuevas aplicaciones incluían el uso de tecnologías de Internet of Things, como las redes de sensores inalámbricas, para la recopilación de información y creación de aplicaciones usando estos datos. Otros ejemplos de aplicación de las redes de sensores en aplicaciones para ciudades inteligentes son el caso de Barcelona, (Bakıcı, Almirall, & Wareham, 2013), Singapur (Mahizhnan, 1999) u otras varias ciudades europeas (Caragliu, Del Bo, & Nijkamp, 2011). Las redes de sensores en estos casos se han usado principalmente para la monitorización de las condiciones ambientales de la ciudad, para llevar a cabo planes de acción o medidas

anticontaminación, así como para la monitorización de los niveles de ruido en las ciudades (Bertrand, 2011).

3.3 REDES DE SENSORES ACÚSTICOS

Una red de sensores es una red de nodos, los cuales están equipados con sensores de distintos tipos y cuyo propósito es común para todos los elementos de la red. El concepto de las redes de sensores es relativamente reciente y una de sus características principales es que permite la recopilación masiva de información en distintos puntos del espacio y de manera simultánea en el tiempo. La miniaturización cada vez más eficiente de los dispositivos, aumentando a su vez su potencia computacional y mejorando su consumo energético, además de ir reduciendo a su vez su coste económico, han ayudado a la rápida expansión de este tipo de dispositivos en distintas aplicaciones, normalmente trabajando en redes de varios dispositivos de manera alámbrica o inalámbrica. A pesar de poder trabajar en redes cableadas, la facilidad de implementación de tecnologías inalámbricas en su hardware y la aparición de estándares y protocolos de comunicación enfocados a aplicaciones que necesiten una baja tasa de transferencia y velocidades inferiores por el tipo de información que generaban, han hecho que la tipología más común de conexión sea la inalámbrica. La facilidad de despliegue y la gestión de la energía de una manera eficiente hacen que este tipo de redes puedan operar durante mucho tiempo de manera autónoma.

Existe un tipo de red de sensores acústicos en la cual los nodos usan un tipo en concreto de sensor. Es el caso de las redes de sensores acústicos. Los campos en los que las redes de sensores pueden aplicarse, como en las ciudades inteligentes, edificios u otros, han demostrado mucho interés en aplicaciones en las que se busquen soluciones basadas en la acústica. Estas redes están basadas en una serie de nodos cuyos sensores son micrófonos, y son denominadas redes de sensores inalámbricos acústicos, o Wireless Acoustic Sensor Networks (WASN) en inglés. Los avances que han traído las plataformas de Internet of Things y el aumento de la potencia de computación en las placas computadoras reducidas (Single Board Computer, SBC) han incrementado substancialmente las capacidades de este tipo de redes de sensores. Estos nodos están normalmente equipados con procesadores potentes, los cuales abren nuevas posibilidades para el diseño de algoritmos para

el tratamiento de la señal de audio, usualmente pesada, y para la implementación de sistemas de comunicación en ellos. Además, los dispositivos móviles de hoy en día incorporan micrófonos y altavoces que pueden ser usados como nodos en redes o para procesar los datos que recogen.

Existen numerosos campos de aplicación para las redes de sensores acústicos inalámbricos y actualmente el campo de investigación está en auge y desarrollo. Diseño e implementación de redes, procesamiento de señal de múltiples nodos acústicos, detección de eventos acústicos mediante redes de varios nodos, clasificación de señales acústicas, métodos de aprendizaje automático para análisis de datos acústicos, procesamiento de datos acústicos para aplicaciones de Internet of Things, monitorización acústica ambiental, uso de arrays de micrófonos en los nodos, localización de fuentes... El número de aplicaciones y campo de desarrollo es muy grande a día de hoy y en constante desarrollo. En los siguientes subapartados se va a presentar el esquema frecuente de un sensor acústico en profundidad, sus partes generales y características. También se hará un estudio del estado del arte de los usos de las redes de sensores acústicos inalámbricos en detalle.

3.3.1 Sensor acústico

En este subapartado se va a presentar el esquema de un nodo de una red de sensores acústicos, sus partes generales y características. En el apartado 4.2 se explica el diseño de un sensor acústico para una red de sensores acústicos en profundidad.

Un sensor acústico, o, mejor dicho, el dispositivo acústico que incluye en una de sus partes la sensorización, está compuesto principalmente por una placa computadora reducida que es la que se encarga del procesamiento de la señal de audio, así como del proceso de comunicación con el envío de los datos resultantes y un sensor acústico, que normalmente es un micrófono (Eargle, *The Microphone Book: From mono to stereo to surround-a guide to microphone design and application*, 2012). El sensor acústico es un sensor que se usa para transformar una señal de presión, la señal acústica, en una señal eléctrica. Los más comunes son los micrófonos, aunque existen otros sensores acústicos diseñados para otros medios que no son el aire, como por ejemplo el agua, con los hidrófonos (Staudenraus &

Eisenmenger, 1993). En la figura 21 se presenta un diagrama de bloques representando la arquitectura típica de un nodo acústico en una red de sensores.

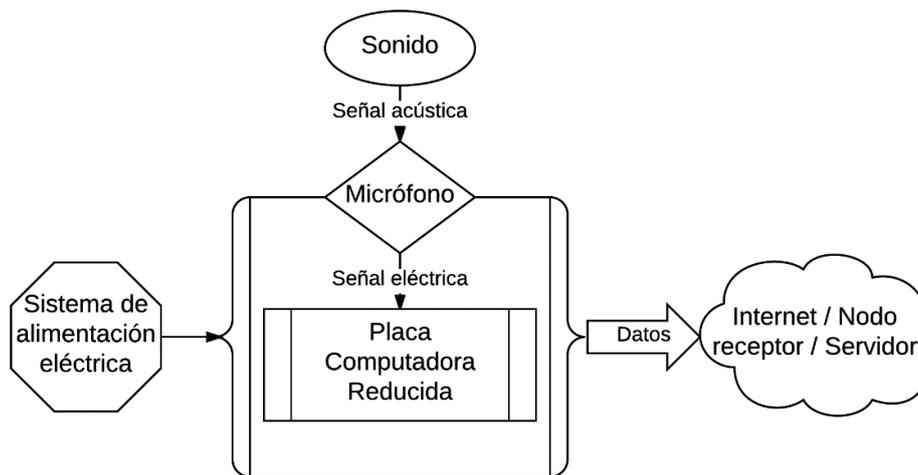


Figura 21. Diagrama de bloques representando las principales partes de un dispositivo acústico para su uso en redes de sensores

Existen distintos tipos de micrófono con distintas propiedades (Eargle, The Microphone Handbook, 1981), aunque los más comunes en las aplicaciones en exterior, como las que serían objeto de redes de monitorización ambiental de sonido, por ejemplo, serían los micrófonos dinámicos. Los micrófonos dinámicos convierten la señal de presión en eléctrica a partir de la inducción electromagnética. Suelen ser muy robustos y de precio asequible, así como resistentes a la humedad. Esto los hace muy atractivos para su uso en instalaciones en exterior. Los micrófonos dinámicos más simples usan sólo una membrana dinámica, por lo que la respuesta en frecuencia de estos micrófonos no es totalmente lineal. Otros de los tipos de micrófonos más usados son los micrófonos de condensador. Éstos tienen como diafragma la placa de un condensador y las vibraciones producen variaciones en la distancia entre las dos placas del condensador. Este tipo de micrófonos necesitan de una tensión constante, que suele ser de 48 voltios, para que el micrófono funcione correctamente. Estos micrófonos tienen una respuesta en frecuencia muy buena, llegando a cubrir todo el espectro de sonido audible que abarca desde 20 hercios hasta 20.000 hercios. Está considerado como uno de los

tipos de micrófonos con más calidad. Es más sensible a las condiciones atmosféricas y a la humedad, por lo que es menos común su uso en exteriores, además de la necesidad de una tensión constante alimentando el micrófono.

Existen otro tipo de micrófonos denominados micrófonos MEMS, sistemas microelectromecánicos. Este tipo de micrófonos MEMS también están denominados como chip de micrófono debido a su tamaño y construcción. Un diafragma sensible a la presión es grabado en una placa de silicio, y normalmente es acompañado de un preamplificador integrado en la placa. Son de tamaño muy reducido, de unos pocos milímetros. La mayoría de los micrófonos MEMS son variantes del diseño de micrófonos de condensador tradicionales, por lo que la respuesta en frecuencia también es muy buena para los rangos de audición humana. Su pequeño tamaño hace también que su consumo energético sea muy bajo y su uso en dispositivos acústicos para redes de sensores está muy extendido.

Además del micrófono, otra de las partes principales de un dispositivo para Internet of Things con aplicaciones acústicas, es la placa computadora reducida (en inglés: Single Board Computer, SBC) (Estados Unidos Patente nº 5.852.725, 1998), (Estados Unidos Patente nº 6.898.580, 2005) tienen unos tamaños muy pequeños frente a ordenadores convencionales y su coste es notablemente inferior y por lo tanto son mucho más asequibles. Este nuevo tipo de ordenadores ha demostrado su potencia de computación junto con su amplia escalabilidad para proyectos grandes y complejos (Tso, White, Jouet, Singer, & Pezaros, 2013). Existen diferentes modelos de SBC en el mercado, cada uno con distintas características o posibilidades de conectividad, potencia de computación, tamaño o consumos energéticos.

Estos dispositivos son un ordenador construido sobre una sola placa de circuitos, en la cual se integran el microprocesador o microprocesadores, la memoria, los puertos de entrada y salida o cualquier otra funcionalidad, como las antenas de comunicación, módulos bluetooth, etc. Este tipo de dispositivos se crearon en un principio como una herramienta didáctica para colegios, pero su potencia, bajo coste tamaño y consumo energético, entre otros, han hecho que estos dispositivos se estén usando en muy diversas aplicaciones. En una red de sensores, los nodos pueden estar compuestos por este tipo de placas computadoras reducidas como núcleo de procesamiento de cada nodo. Estos dispositivos sirven

en los nodos de las redes de sensores para el procesamiento de los datos de entradas, así como también para ejecutar acciones a través de actuadores que pueden estar conectados a ellos. Para los sensores acústicos, este tipo de placas tienen mucha utilidad debido a la potencia de cálculo, llegando a poder tener una cantidad suficiente de memoria y velocidad de procesador suficiente para analizar la señal de audio en tiempo real.

Existe una amplia selección disponible de este tipo de placas computadoras reducidas en el mercado actual, y cada vez existen más modelos con más amplias características para su uso en distintas aplicaciones, que requieran más o menos potencia, memoria o posibilidades de conexión. Ejemplos de este tipo de placas computadoras reducidas son Raspberry Pi, Arduino, BeagleBone, Orange Pi o HummingBoard entre otros. Por citar como ejemplo las especificaciones técnicas de una de las placas, se presentan en la tabla 5 las de la placa Raspberry Pi 3 Modelo B.

SoC (System on a Chip)	Broadcom BCM2837
CPU	4x ARM Cortex-A53, 1,2 GHz
GPU	Broadcom VideoCore IV
RAM	1 GB LPDDR2 (900 MHz)
Conectividad	10/100 Ethernet, 2.4GHz 802.11n wireless
Bluetooth	Bluetooth 4.1 Clásico, Bluetooth Low Energy
Almacenamiento	microSD
GPIO	40 pins
Puertos	HDMI, jack analógico de 3,5 mm, 4x USB 2.0, Ethernet, Camera Serial Interface, Display Serial Interface

Tabla 5. Especificaciones técnicas del SBC Raspberry Pi 3 Modelo B.

Como se puede observar en la tabla 5, las especificaciones técnicas de este SBC son lo suficientemente potentes para llevar a cabo tareas complejas en él. Además, pueden instalarse sistemas operativos avanzados en los que es posible

implementar lenguajes de programación de alto nivel para la programación de algoritmos y códigos complejos.

La conectividad de los nodos es otro de las partes importantes de estos dispositivos. En un principio, existen dos modelos básicos por los que puede comunicarse un nodo, y es de manera cableada o de manera inalámbrica. Normalmente la conectividad es inalámbrica debido a las ventajas que ofrece, los menores costes en la instalación y menos limitaciones en el despliegue de muchos nodos. Las comunicaciones se realizan de manera inalámbrica a través del aire, usando por norma frecuencias de comunicaciones con licencia libre. El módulo de comunicación suele hacer las funciones de emisor y receptor, por lo que este dispositivo es denominado transceptor. Existen muchos protocolos de comunicación usados en las redes de sensores inalámbricas (Jang, Pyeon, Kim, & Yoon, 2013), pero lo que más suele usarse son los protocolos multisalto, que en este tipo de aplicaciones resulta de mucha utilidad al enviar un mensaje a todos los nodos de una misma red. Se suele usar también para las tareas de mantenimiento en una red. Existe también otro tipo de protocolos, de salto único, en los cuales los nodos mandan un mensaje a un vecino. WiFi (IEEE 802.11), ZigBee (IEEE 802.15.4) o Bluetooth (IEEE 802.15.1) son tecnologías de comunicación que se suelen usar en la comunicación inalámbrica de los nodos dentro de una red inalámbrica de sensores.

Una red de sensores inalámbricos es una solución tremendamente útil cuando la aplicación de destino no dispone de una fuente de alimentación que pueda alimentar al sensor. Sin embargo, esto presenta algunos inconvenientes, sobre todo cuando los nodos de la red se sitúan en localizaciones difíciles de acceder, ya que el cambiar la batería a estos dispositivos o recargarla regularmente puede ser muy costoso logística y económicamente. Por lo tanto, el asegurar la correcta alimentación de los nodos de la red es un requisito muy importante a la hora de la planificación de una red de sensores inalámbricos. Las distintas partes del nodo consumen energía: los sensores, el procesado de los datos y la comunicación. La energía es almacenada en baterías o condensadores normalmente, aunque lo más usado son las baterías, bien sean recargables o de un solo uso. También existen las posibilidades de recarga de estas baterías a través de placas solares, diferencias de temperatura o incluso por vibraciones. A menudo, si

la aplicación lo permite, los nodos se desconectan por intervalos para fomentar el ahorro de energía de las baterías.

3.3.2 Aplicaciones de las redes de sensores acústicos

En este apartado se va a revisar el estado del arte en las aplicaciones de las redes de sensores en el campo de la acústica.

Los niveles de ruido excesivos perjudican la salud humana e interfieren con las actividades diarias de las personas en sus ambientes de trabajo, las escuelas y durante su tiempo personal. Además, puede interrumpir y alterar el sueño y descanso nocturno, causar problemas cardiovasculares y otros efectos fisiológicos, reduce el rendimiento mental y produce molestia y cambios en el comportamiento (World Health Organisation, 2017). Esto tan solo refleja de manera muy concisa cómo el ruido afecta a las personas, cuyos efectos están descritos con más detalle en el apartado 2.4.2.

Con el auge de las Smart Cities, las soluciones en las ciudades que requerían sensores acústicos han tomado la herramienta de las redes de sensores. Dejando de lado las aplicaciones de redes de sensores acústicos que no trabajan en el medio del aire, sino que sirven para la monitorización acústica submarina como (Akyildiz, Pompili, & Melodia, 2005), (Vasilescu, Kotay, Rus, Dunbabin, & Corke, 2005) o (Cui, Kong, Gerla, & Zhou, 2006), la mayoría de las redes de sensores acústicos inalámbricos trabajan en el medio aéreo.

El papel de la investigación acústica en las Smart Cities ha dado lugar a una serie de aplicaciones y beneficios como tener más control sobre los niveles de emisión sonoros a través de estaciones permanentes y en tiempo real, detectar nuevas fuentes de ruido o el uso de estos sistemas como una plataforma para poder informar a los ciudadanos, entre otros. Desde el punto de vista de las administraciones públicas, esta información ayuda para poder anticiparse ante las quejas de los ciudadanos, y para complementar y actualizar la información dada por los mapas de ruido y en el diseño de planes de actuación. La inversión y los costes de mantenimiento en este tipo de dispositivos es más económico que la realización constante de mapas estratégicos de ruido para mantener unos datos actualizados. Estos resultados acaban en menos carga de trabajo administrativo e

intervenciones por parte de la administración pública. En el campo de investigación acústico, la monitorización del ruido usando redes de sensores inalámbricos ha ayudado a profundizar en el conocimiento que los ciudadanos y las instituciones tienen de sus propias ciudades (Segura-García, Felici-Castell, Pérez-Solano, Cobos, & Navarro, 2015), (Farrés, 2015), (Hakala, 2015).

El estudio del ruido en las comunidades, basado en datos cuantitativos y cualitativos se ha visto beneficiado por los sistemas de información geográfica que permiten una mejor interpretación espacio-temporal de los ambientes acústicos urbanos (Engel & Trombetta, 2016). En este mismo contexto, actualmente hay una nueva aproximación cuyo objetivo es la monitorización constante del ambiente sonoro de las ciudades (Marsal-Llacuna, Colomer-Llinàs, & Meléndez-Frigola, 2015), (Panagiotou, y otros, 2016), permitiendo la recopilación de grandes cantidades de información sobre éstas y dando así lugar a un nuevo enfoque y perspectiva en su estudio.

Se ha estudiado el uso de micrófonos de electrónica de consumo para la monitorización del ruido ambiental (Van Renterghem, y otros, 2011), ya que la producción masiva de micrófonos para usos no profesionales ha hecho que estos dispositivos se puedan adquirir de manera más económica, teniendo una relación calidad precio que les permitiría poder desplegar amplias redes de monitorización ambiental usando este tipo de micrófonos.

Desplegar redes de micrófonos también ha servido para aplicaciones con propósitos ecológicos, como en la recolección de sonidos de ciertas especies de pájaros en medios protegidos (Bardeli, y otros, 2010), siendo esta manera una forma no invasiva de poder monitorizar y recopilar información en estos ambientes (Dawson & Efford, 2009).

El uso de redes de sensores fuera del ámbito de la monitorización ambiental también ha sido estudiado y aplicado. Un campo de aplicación en crecimiento es el uso de redes de sensores acústicos con aplicaciones biomédicas (Sezen, y otros, 2005), desplegando redes de nodos miniaturizados con propósitos como controlar ronquidos y apneas, las cuales tienen características acústicas particulares (Whitelaw, 1993) o para la realización de consultas en teleasistencia (Barakah & Ammad-uddin, 2012), (Yan, Huo, Xu, & Gidlund, 2010).

Otro tipo de aplicaciones en las que las redes de sensores acústicos han sido utilizadas es en la localización de fuentes sonoras (Tiete, y otros, 2014), (Deng, y otros, 2017). En estas aplicaciones, se despliegan redes de varios nodos, los cuales tienen como objetivo evaluar el ángulo y la distancia a una fuente sonora (Tuma, Janecka, Vala, & Richter, 2012). Esto es de utilidad en proyectos en los cuales se deban de identificar fuentes de ruido concretas para diversos propósitos, como por ejemplo la localización de un grito de ayuda o disparos de armas de fuego (Valenzise, Gerosa, Tagliasacchi, Antonacci, & Sarti, 2007).

3.4 MOLESTIA

En las personas, el ruido produce una serie de efectos físicos y psicológicos diversos, revisados en el apartado 2.4.2. En el aspecto psicológico de los efectos del ruido en las personas, éste puede producir desde trastornos en el sueño hasta cambios en el comportamiento. Uno de los mayores problemas es que la exposición a niveles de presión sonora no adecuados en las personas que habitan en las ciudades, sobre todo en zonas céntricas y en las ciudades más grandes, se pueden dar durante prácticamente todas las horas del día. Al no ser la contaminación acústica una contaminación que se acumule en el espacio o en el tiempo, los efectos son acumulativos en forma de afecciones psicológicas en las personas, lo cual es más difícil de detectar y aún más si cabe la relación con la contaminación acústica.

Ansiedad (Sullivan, 1969), depresión (Stansfeld, 2003), problemas en el desarrollo cognitivo o de aprendizaje en niños (Cohen S. E., 1980), son sólo algunos de los efectos psicológicos que el ruido puede provocar en las personas. Sin embargo, si los niveles de presión sonora no superan ciertos umbrales, pero sí se presentan de manera constante ante las personas en su lugar de trabajo, escuelas, lugares de ocio y en sus lugares de residencia, durante todo el día, la sensación de molestia que estas personas reciben o sienten sí es notable. La molestia acústica es la sensación desagradable o de falta de confort que se siente como consecuencia de la exposición a niveles de sonido o sonidos desagradables.

En los próximos subapartados se van a presentar los métodos para la evaluación de la molestia acústica en los seres humanos, bien a través de entrevistas, encuestas u otro tipo de procedimientos involucrando toma de datos de personas. También se presentan los parámetros psicoacústicos y su uso para la

evaluación más medible de sensaciones auditivas humanas para, a continuación, centrarse en el análisis de los modelos de uno de esos parámetros psicoacústicos, el parámetro loudness, o sonoridad. Finalmente, se analizan en un último apartado los distintos modelos de loudness

3.4.1 Métodos de evaluación de la molestia

La cuantificación objetiva de la molestia acústica no es sino una tarea tremendamente compleja, ya que en cuanto entra la variable del ser humano, el proceso de evaluación a través de métodos numéricos se torna mucho más difícil de evaluar.

Las encuestas a personas son un método ampliamente utilizado ya que se puede saber de primera mano la opinión de las personas afectadas o posiblemente afectadas y para un lugar concreto (Brown & Lam, 1987). Las encuestas permiten conocer las actitudes de los residentes en un lugar concreto al ruido ambiental o fuentes de ruido que les rodea, y encontrar la relación entre los niveles medidos y la molestia acústica percibida por estas personas.

Existen numerosos estudios en los que se han llevado a cabo los métodos de encuestas para saber la percepción de las personas sobre el ruido en ese lugar (Arana & García, 1998), (Fidell, 1978). Además de intentar evaluar la molestia acústica general, también se han llevado a cabo estudios en los cuales se incidía en una fuente en concreto, como en el ruido de tráfico (García & Fajari, 1983). También se han utilizado este tipo de métodos de la evaluación de la molestia en otros ambientes, ya no sólo en ciudades, como en unidades de cuidados intensivos de hospitales (Williams, van Drongelen, & Lasky, 2007), o en la industria (Karplus & Bonvallet, 1953), (Atmaca, Peker, & Altin, 2005). No obstante, a pesar de que el uso de encuestas es muy útil para conocer la opinión y respuestas de primera mano de las personas afectadas y para los estudios cualitativos (Kearney, 2004), el inconveniente de la dificultad en el proceso de toma de datos hace que la realización de estas encuestas a suficientes personas sea una tarea muy costosa en términos de tiempo y recursos humanos.

Otro método que se usa como alternativa para expresar las sensaciones de las personas a estímulos acústicos son los parámetros psicoacústicos. Existen muchos

tipos distintos de parámetros, algunos mejor definidos que otros. Sólo unos pocos han sido convertidos en estándares y la utilidad de cada uno de ellos suele ser dependiente de la naturaleza del sonido que esté siendo analizado. Estos parámetros se usan a menudo en la industria de la fabricación de nuevos productos, su diseño acústico o en la industria automovilística. La elección de qué parámetro elegir para según cada fuente sonora depende de ésta y de la aplicación individual para la que se quiera estudiar la respuesta subjetiva humana a través de estos parámetros.

Existen numerosos parámetros, muchos de los cuales incluso son estándares propios de empresas privadas, los cuales sólo están enfocados a un problema concreto. Sin embargo, existen otros cuyo uso está más extendido y cuyas aplicaciones son más amplias. Uno de los modelos más extendidos es el modelo de molestia de Zwicker (Zwicker & Fastl, *Psychoacoustics: Facts and models*, 1990), y ha sido estudiado su uso en aplicaciones en las que se analizaba el ruido de tráfico en las ciudades (Segura-García, Felici-Castell, Pérez-Solano, Cobos, & Navarro, 2015). Este modelo integra distintos parámetros psicoacústicos como lo son la sonoridad o loudness, agudeza o sharpness, roughness y fluctuation strenght. Algunos de estos parámetros no tienen traducción al castellano y es por ello que se usarán sus nombres originales en inglés. Con estos parámetros se pueden realizar medidas psicoacústicas con el objetivo de establecer criterios comparativos para comparar la calidad acústica de un ambiente sonoro (Segura, y otros, 2012).

El parámetro de loudness representa en un valor, la sensación de la percepción del ser humano ante el volumen de un sonido. Con este parámetro se intenta representar cómo la sensación de la intensidad de un sonido, es decir, su volumen, es percibido por las personas en una escala lineal. Su unidad es el sono. Un loudness de un sono es producido por un tono senoidal de frecuencia 1 kHz con un nivel de presión sonora de 40 decibelios. Este parámetro está especificado en la norma ISO 532 B (ISO532, 1975) para señales estacionarias. Este parámetro se ha estudiado para el análisis de la molestia para ruido de tráfico (Kuwano & Namba, *On the loudness of road traffic noise of longer duration (20 min.) in relation to instantaneous judgment*, 1978), (Fastl, 1989), (Kuwano, Namba, & Fastl, *On the judgment of loudness, noisiness and annoyance with actual and artificial noises*, 1988). Existen distintos modelos para el cálculo de loudness y estos serán

presentados en los siguientes subapartados. En la tabla 6 se muestra una comparativa para distintas fuentes sonoras, niveles de presión sonora y sonos.

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

Tabla 6. Loudness de distintas fuentes sonoras.

Sharpness, es un parámetro psicoacústico que trata de dar un valor a la sensación subjetiva producida por las componentes de alta frecuencia de un sonido

en las personas. Su unidad es el acum. Un sonido de valor 1 acum es para un ruido de banda estrecha con frecuencia 1 kilohercio, un valor de 60 decibelios y cuyo ancho de banda sea menor de 150 hercios. Es un valor de importancia en campos donde la fuente sonora contenga componentes de alta frecuencia que se sospechen molestas. Según el modelo (Zwicker & Fastl, Psychoacoustics: Facts and models, 1990), se calcula de la siguiente manera:

$$S = 0.11 \frac{\int_0^{24 \text{ Bark}} N' g(z) z dz}{\int_0^{24 \text{ Bark}} N' dz} \text{ acum} \quad (10)$$

Siendo S el sharpness, y N el loudness total, para el cual se muestra su cálculo en el apartado 3.4.2. $g(z)$ es un factor adicional que es la dependencia de la ratio de banda crítica. La escala de Barks es explicada en detalle en el apartado 3.4.2.

Con el parámetro roughness. Unos valores altos de este parámetro indican una mayor percepción de los sonidos y más molestos. Existen modelos de este parámetro (Daniel & Weber, 1997) que se usan para la evaluación subjetiva de impresiones sonoras y a menudo en el proceso del diseño de sonidos (Lyon, 2003). Su unidad es el asper. Un asper, por definición, es el valor de roughness provocado por un tono de 1 kilohercio modulado en amplitud a 60 decibelios con una modulación de 70 hercios (Zwicker & Fastl, Psychoacoustics: Facts and models, 1990). Este parámetro es dependiente de la frecuencia central, la de modulación y el nivel de ésta.

$$R = 0.0003 \sum_0^{24 \text{ Bark}} f_{mod}(z) \cdot \Delta L_E(z) \cdot \Delta z \text{ asper} \quad (11)$$

$$\Delta L_E(z) = 20 \cdot \log \left(\frac{L'_{max}(z)}{L'_{min}(z)} \right) \quad (12)$$

Siendo R el roughness, f_{mod} la frecuencia de modulación y L'_{max} y L'_{min} los valores máximos y mínimos de $L'(z)$.

Los sonidos modulados pueden provocar dos tipos diferentes de sensaciones auditivas. Fluctuation strength se denomina a la sensación auditiva en la que existe una modulación en frecuencia de unos 20 hercios y además se produce en bajas frecuencias (Zwicker & Fastl, Psychoacoustics: Facts and models, 1990). Su unidad

es el vacil, que está definido por un tono de 1 kilohercio a 60 decibelios modulado en amplitud a 4 hercios.

Todos estos parámetros se usan en diversos campos de la acústica, como en el diseño de nuevos sonidos, estudios de confort acústico, estudio de calidad acústica en productos... Sin embargo, para el estudio subjetivo de molestia acústica en ambientes donde las fuentes han sido las más características de ambientes urbanos, como el ruido de tráfico, se ha usado loudness (Kuwano & Namba, *On the loudness of road traffic noise of longer duration (20 min.) in relation to instantaneous judgment*, 1978), (Fastl, 1989), (Kuwano, Namba, & Fastl, *On the judgment of loudness, noisiness and annoyance with actual and artificial noises*, 1988). En los siguientes apartados se hará un estudio más en profundidad de los distintos modelos de loudness, así como de los modelos binaurales de este parámetro.

3.4.2 Modelo de loudness

Por definición, un loudness de un sono es producido por un tono senoidal de frecuencia 1 kHz con un nivel de presión sonora de 40 decibelios, y para aumentar o disminuir su nivel de loudness, esto corresponde con un incremento o reducción de 10 decibelios en su nivel de presión sonora. En una situación de escucha diótica, las señales en ambos canales auditivos tienden a contribuir de igual manera en el loudness total. Las principales fases que se usan para el cálculo del loudness para un solo canal se presentan en la figura 22. El modelo de loudness monoaural escogido es el definido por (Zwicker & Fastl, 1990).

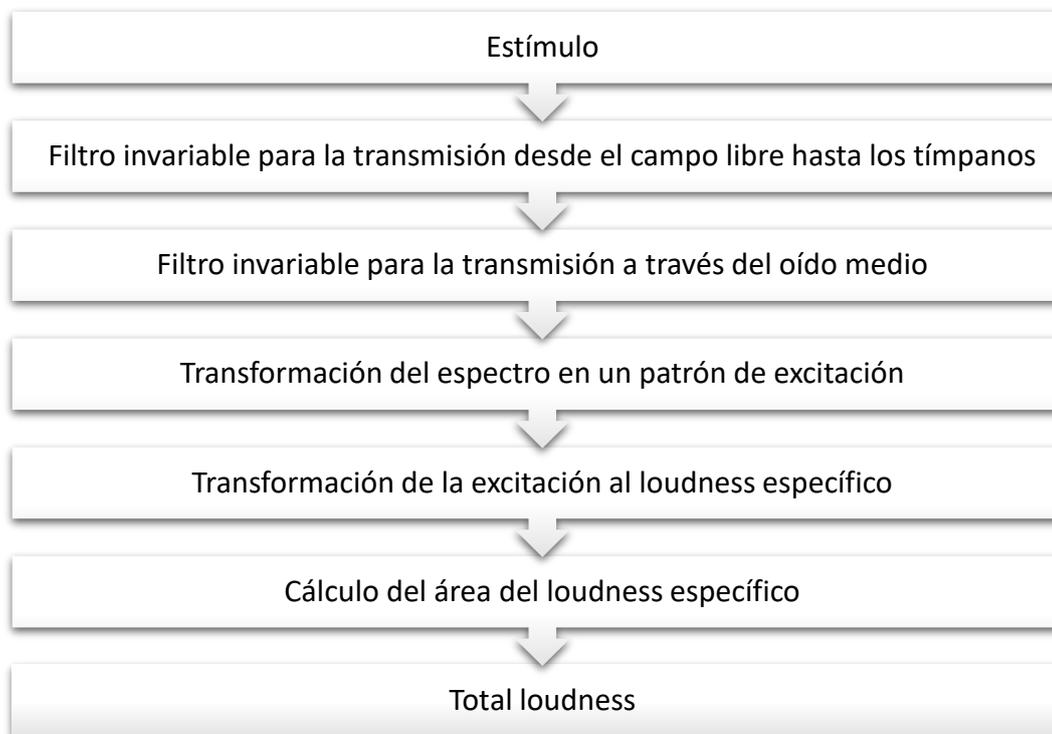


Figura 22. Principales etapas del cálculo monoaural de loudness.

En las dos primeras etapas del cálculo del loudness monoaural, se puede observar que corresponden a las transferencias que sufre un sonido a través del oído externo y el oído medio, que es representado por unos filtros en frecuencia. En la figura 23, extraída de (Moore, Glasberg, & Baer, 1997), se muestra la

transformación desde el campo libre hasta el tímpano, para un sonido presentado en campo abierto con una dirección frontal de incidencia.

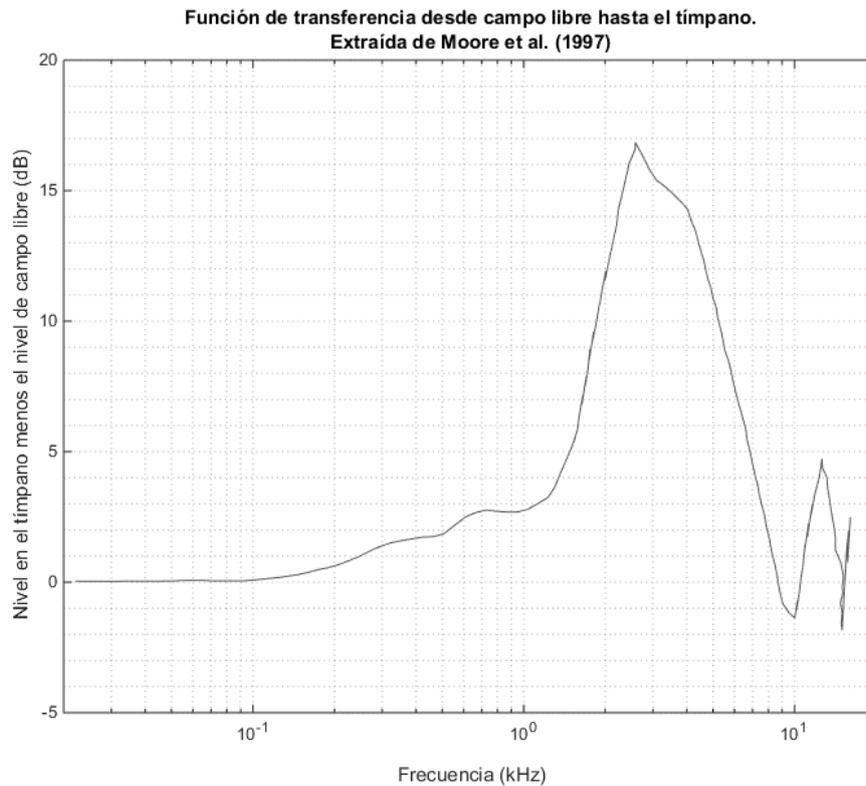


Figura 23. Función de transferencia desde el nivel de campo libre hasta el nivel en el tímpano. Extraída de Moore et al., 1997.

En la figura 24, se muestra la función de transmisión del oído medio, que en el modelo asume una caída en las bajas frecuencias y ciertas irregularidades en el rango de frecuencias desde 1,5 hasta 12 kilohercios. Esto es debido al supuesto de que la excitación en el umbral absoluto es constante a partir de los 500 hercios.

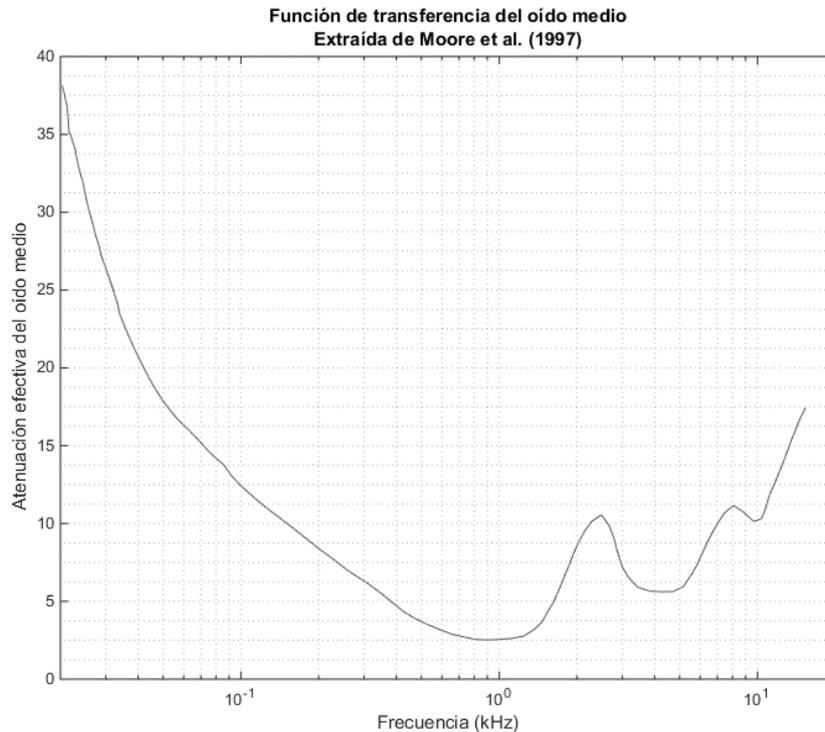


Figura 24. Función de transferencia del oído medio, representada como la atenuación efectiva en función de la frecuencia. Extraída de Moore et al., 1997.

A continuación, las características espectrales de la señal son analizadas para ser transformadas a un patrón de excitación. El patrón de excitación de un sonido es extraído a partir del espectro que se encuentra al nivel de la cóclea, dentro del oído. Este espectro ha pasado a través de las distintas correcciones que se han llevado a cabo por los filtros del oído externo y del oído medio, y la señal resultante filtrada es el patrón de excitación, en un espectro de frecuencias separadas en bandas críticas. El sistema auditivo humano fusiona en una banda crítica los estímulos sonoros que se encuentran próximos entre sí, desde el punto de vista de las bandas críticas. El conjunto de todas estas bandas críticas es denominado como escala de bandas críticas, y con ellas se crea una graduación en frecuencia que muestra mejor cómo se representa el sonido en el sistema auditivo humano, dando también una aproximación a los anchos de banda de los filtros en el oído humano. Los filtros del modelo siguen el procedimiento descrito en la norma estándar ISO

532B (ISO532, 1975). Su unidad es el Bark y fue definida por (Zwicker & Fastl, 1990) en su modelo de loudness. Esta escala de Bark es una escala frecuencial en la cual distancias iguales en frecuencia corresponden con distancias perceptualmente iguales. Por encima de los 500 hercios esta escala es relativamente igual a un eje frecuencial logarítmico. Por debajo de los 500 hercios esta escala de Bark se vuelve más lineal. Zwicker definió el rango frecuencial audible en 24 bandas crítica, en una escala que va desde 0 hasta 24 Bark.

Una vez definida la excitación sonora a partir de un sonido que alcanza el oído, el siguiente paso es la transformación desde esta excitación en el sistema auditivo a un nivel específico de loudness (N'). La diferencia entre el loudness específico y el loudness total reside en que el específico es referido al nivel de loudness por banda, no para el total del conjunto de ellas. La función que relaciona el patrón de excitación del estímulo E_{sig} y el loudness específico N' en una banda se define como:

$$N' = 0,08 \cdot \left(\frac{E_{THQ}}{E_0}\right)^{0,23} \cdot \left[\left(0,5 + 0,5 \cdot \frac{E_{sig}}{E_{THQ}}\right)^{0,23} - 1 \right] \text{ sono/Bark} \quad (13)$$

siendo E_0 la excitación que corresponde a la intensidad de referencia $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ y E_{THQ} es igual al contorno de nivel de loudness en el umbral de audición (Figura 25). E_{sig} corresponde al patrón de excitación de la señal del estímulo.

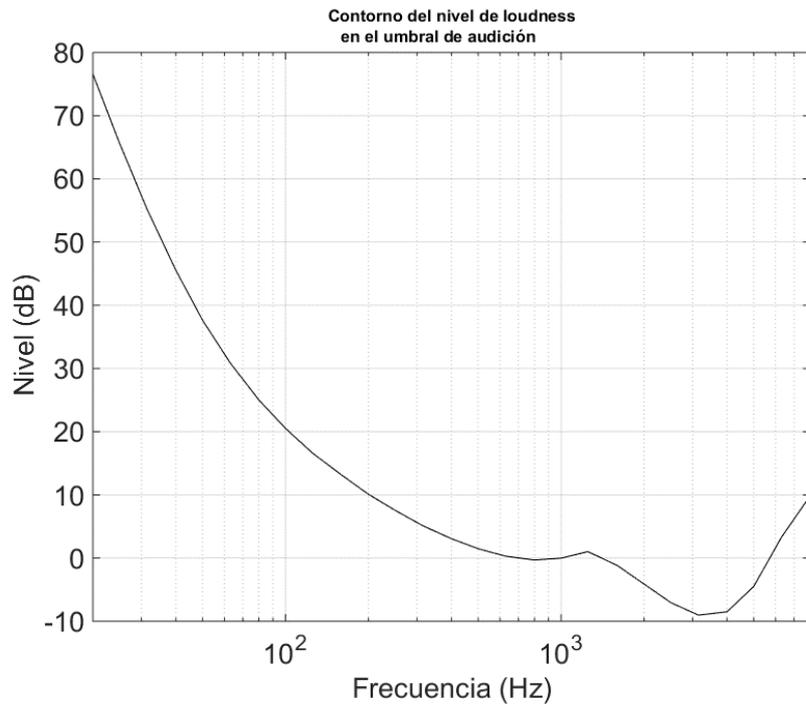


Figura 25. Contorno del nivel de loudness en el umbral de audición en campo libre (ISO226, 2003).

Finalmente, el loudness total monoaural de un sonido que haya llegado al oído es calculado a través de la integración de cada uno de los valores del loudness específico por banda, para todas las contribuciones en frecuencia:

$$N = \int_0^{24 \text{ Bark}} N'(z) \cdot dz \quad (14)$$

3.4.3 Modelo binaural

Una vez sintetizadas la señal binaural a partir de las dos señales monofónicas provenientes del array de dos micrófonos, el siguiente proceso es el del cálculo del loudness. En el desarrollo de este dispositivo, se han usado dos modelos de loudness, el propuesto por Zwicker (Zwicker & Fastl, *Psychoacoustics: Facts and models*, 1990) para el cálculo monoaural y el propuesto por Moore (Moore & Glasberg, *Modeling binaural loudness*, 2007) para el loudness binaural.

En el caso de un sonido presentado monoauralmente, este es percibido más bajo que otro que es presentado a ambos oídos, es decir, binauralmente, aunque se use el mismo nivel de presión sonora. Esto es debido al efecto de la suma binaural (Reynolds & Stevens, 1960). En el caso donde un sonido es presentado de manera diótica, sería percibido como el doble de intenso al incrementar su nivel de presión sonora en aproximadamente unos 10 decibelios, que el mismo sonido presentado monoauralmente (Fletcher & Munson, 1933), (Stevens, *The measurement of loudness*, 1955). En estudios recientes se ha estimado que la equivalencia se encuentra entre los 3 y los 8 decibelios (Sivonen & Ellermeier, *Directional loudness in an anechoic sound field, head-related transfer functions, and binaural summation*, 2006). Por esa razón, el uso del parámetro loudness en su forma binaural puede proveer más información cuando un medio ambiente acústico es analizado.

Cuando se tiene en cuenta una situación diótica, las señales en ambos oídos tienden a ser ponderadas de igual manera en su contribución al nivel de loudness global (Moore, Glasberg, & Baer, *A model for the prediction of thresholds, loudness and partial loudness*, 1997), pero los estudios más recientes sugieren que las contribuciones de ambos oídos no siguen la regla de la suma perfecta (Moore & Glasberg, *Modeling binaural loudness*, 2007), (Sivonen, *Directional loudness perception*, 2006).

Para el cálculo del loudness binaural, en este trabajo de investigación se ha implementado el modelo modificado de (Moore & Glasberg, 2007). En el modelo binaural de loudness de Moore, se llevan a cabo dos cálculos independientes del nivel de loudness para los canales auditivos izquierdo y derecho por separado. A partir de ahí, cada resultado contribuye al nivel global de loudness binaural. En

(Moore & Glasberg, Modeling binaural loudness, 2007) se concluye que una señal presentada de manera diótica es aproximadamente 1,5 veces más fuerte que la misma señal presentada monoauralmente. El valor elegido por Moore es consistente con los resultados arrojados por otros estudios presentados (Edmonds & Culling, 2009), (Whilby, Florentine, Wagner, & Marozeau, 2006), donde la señal diótica es relacionada con una señal monoaural en términos de loudness.

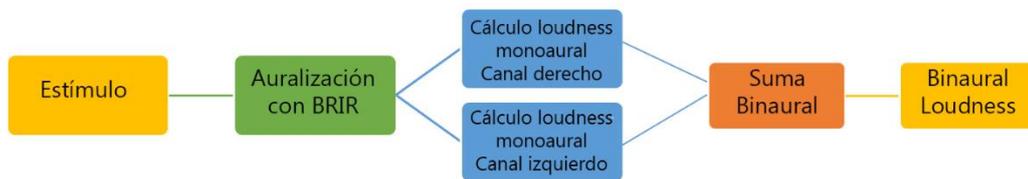


Figura 26. Etapas de cálculo de loudness binaural.

Por lo tanto, la contribución de cada canal auditivo en el loudness binaural global ($N_{binaural}$) se puede expresar como que es 0,75 veces el nivel inhibido, dando un nivel global de 1,5 veces mayor que el loudness monoaural, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$N_{binaural} = 0,75 \cdot N_{right} + 0,75 \cdot N_{left} \quad (15)$$

3.5 DISCUSIÓN

3.5.1 Sobre redes de sensores acústicos

En este capítulo se ha llevado a cabo una presentación del uso de la tecnología del Internet de las cosas en las ciudades, transformando a estas en un nuevo modelo denominado como de ciudad inteligente. Las distintas capas que estos modelos de ciudades tienen abarcan desde la sensorización de éstas para su monitorización hasta la capa de aplicaciones en la cual se desarrollan proyectos que pretenden resolver ciertas problemáticas apoyándose en el uso de estas nuevas tecnologías. El uso de dispositivos equipados con sensores que son desplegados en las ciudades con el objetivo de monitorizarlas en varios ámbitos ha sido estudiado y ha dado paso a la presentación y análisis de las tecnologías de las redes de sensores. El caso particular de la utilización de sensores acústicos da lugar a la generación de redes de sensores acústicos. Se ha analizado el esquema y funcionamiento general de un sensor acústico, así como la presentación de los distintos componentes de los que normalmente está formado. Estos sensores son utilizados en numerosas aplicaciones que pueden abarcar desde redes inmensas de miles de dispositivos desplegados en una ciudad, hasta redes de sensores acústicos que se integran dentro del cuerpo humano para la monitorización de ciertas variables biológicas.

Sin embargo, estos dispositivos acústicos suelen utilizarse para la monitorización de niveles de presión sonora, es decir, suelen medir decibelios. Cuando se trata de evaluar la molestia que una persona recibe ante el ruido, el decibelio no aporta información más allá que los niveles de presión. A través de curvas isofónicas y ponderaciones se aproxima más la respuesta humana a los sonidos, pero todavía la respuesta subjetiva no queda del todo definida. Además, cuando se quiere desplegar una red lo suficientemente amplia de sensores, éstos deben de ser lo suficientemente asequibles para que la red pueda tener un gran número de nodos, y obtener así una mayor resolución. Es por ello que el bajo coste, pero sin faltar a la calidad, es una condición de importancia a la hora del desarrollo del hardware de un dispositivo acústico.

3.5.2 Sobre evaluación de la molestia

En los apartados anteriores se ha llevado a cabo una revisión de los modelos para el cálculo de loudness más usados.

Dentro de los objetivos de este trabajo de investigación, se ha puesto un especial hincapié en el desarrollo de un dispositivo que fuese lo suficientemente preciso para la evaluación del ruido ambiental, a la vez que su coste pudiese ser asequible a la hora de crear muchos de ellos. De igual manera, otra necesidad a cubrir fue la capacidad de estos dispositivos de recrear de una manera más precisa la respuesta que una persona sufriría ante un estímulo acústico, en términos de molestia subjetiva. Para ello, en los siguientes apartados, se desarrolla el diseño de un dispositivo acústico que trata de recrear una señal binaural similar a la que el sistema auditivo humano captaría, para usarla como señal de entrada. Es por eso que se implementa un array de micrófonos para la captación, a través de dos canales, de la señal de audio. A la hora del cálculo de parámetros para cuantificar la molestia, el dispositivo debe de tener suficiente potencia para su cálculo, cuyo coste computacional es más elevado que el de los parámetros tradicionales de evaluación de ruido ambiental. En las ciudades inteligentes, las posibilidades de comunicación es otro requisito que los dispositivos desplegados deben cubrir. La conexión a la nube y la comunicación de datos es otra faceta que se ha pretendido cubrir en el desarrollo de los dispositivos presentados en esta tesis.

**IV - DISEÑO E
IMPLEMENTACIÓN DE
DISPOSITIVO ACÚSTICO
CONECTADO PARA LA
EVALUACIÓN DE LA
MOLESTIA DEL RUIDO**

IV - DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ACÚSTICO CONECTADO PARA LA EVALUACIÓN DE LA MOLESTIA DEL RUIDO

4.1 INTRODUCCIÓN

En los apartados anteriores de este trabajo se ha descrito el contexto de las ciudades de la actualidad y su evolución. Evolución no exenta de nuevas problemáticas que deben de ser tenidas en cuenta para lograr un crecimiento sostenible, aumentando la calidad de vida de las personas y no mermándola. La contaminación acústica es un tema de interés debido a sus efectos en las personas y a la dificultad de su control. También se han descrito una serie de tecnologías y herramientas y su actual implementación en las ciudades con el objetivo de la monitorización de estas en distintos ámbitos. A la finalización del capítulo anterior, se discutían las soluciones y herramientas actuales y se exponían ciertos posibles campos en los que se podrían llevar a cabo nuevas mejoras. En este capítulo se propone una solución que trata de cubrir las carencias que los sistemas actuales no cubren, como es la evaluación de la molestia a través de parámetros psicoacústicos, y la búsqueda del uso de una señal más similar a la captada por el sistema auditivo humano, proponiendo una sintetización de una señal binaural para su posterior análisis.

Este capítulo está organizado de la siguiente forma: primero, en el apartado 4.2, se describe la creación de un dispositivo con un sensor acústico con el propósito de la evaluación del ruido ambiental, mostrándose su diseño y funcionamiento. A continuación, en el apartado 4.3, se muestra un nuevo dispositivo con características avanzadas de sintetización de una señal binaural a través de una entrada de dos señales monofónicas provenientes de un array de micrófonos, con la finalidad del cálculo del parámetro psicoacústico loudness en su forma binaural.

4.2 CREACIÓN DE NODO PARA UNA RED DE SENSORES ACÚSTICOS INALÁMBRICOS PARA LA EVALUACIÓN DE RUIDO

Parte de este apartado ha sido publicado en (Noriega-Linares & Navarro Ruiz, 2016).

En este apartado se describe la creación de un sensor acústico basado en Raspberry Pi con características de conexión a la nube. Con ello, se trata de complementar el campo de desarrollo e investigación en los sensores acústicos a través del análisis y monitoreo de la señal completa de audio en el ancho de banda audible. El análisis de parámetros acústicos ambientales es llevado a cabo en la propia placa del sensor y no en un servidor. El dispositivo comparte los resultados en una plataforma online de IoT. Como resultado de la investigación descrita en este apartado, resulta un prototipo de un sensor acústico avanzado fiable para el cual han sido usados componentes de bajo coste, con el propósito de la monitorización del ruido ambiental.

Este apartado está dividido en las siguientes partes. Se explican los motivos de elección de los materiales para la creación del prototipo basado en unos requisitos de diseño. A continuación, se muestra la construcción del prototipo a la vez que la implementación de los algoritmos y la conexión a la nube. Para finalizar, se muestran las conclusiones y discusión del experimento.

4.2.1 Consideraciones previas

La creación del dispositivo debe cumplir una serie de requisitos de diseño para lograr los objetivos finales propuestos. Estos requisitos deben ser logrados para poder conseguir las premisas de que el diseño final sea de bajo coste, pero a su vez confiable en los resultados dados. Las premisas iniciales de diseño fueron:

- El dispositivo tiene que usar componentes asequibles de bajo coste para que el diseño final sea asequible para crear numerosos dispositivos implementables en una red de sensores con una buena relación coste-calidad.
- El dispositivo tiene que ser fiable para medidas de larga duración.
- El dispositivo debe tener la capacidad de estar conectado a la nube para recibir actualizaciones de software y para compartir los resultados de los datos analizados por internet.
- La calidad de las medidas debe ser suficiente para poder llevar a cabo cálculos de parámetros acústicos de medida más avanzados y complejos.
- Como el procesado de audio es una tarea que demanda gran cantidad de recursos, el dispositivo tiene que tener suficiente potencia de computación para llevar a cabo los cálculos de los parámetros en la misma placa, de manera autónoma sin necesitar de otro ordenador en un servidor.
- El dispositivo tiene que tener la capacidad de conectarse a los periféricos necesarios para el propósito del proyecto, como, por ejemplo, con un micrófono.
- El dispositivo tiene que ser capaz de interpretar y ejecutar distintos lenguajes de programación.
- El flujo de adquisición de sonido tiene que ser lo más limpio posible, sin tener entradas o interferencias de ruido, para evitar añadir fases extra de filtrado.
- El dispositivo final tiene que estar protegido ante agentes ambientales externos, usando para ello una carcasa protectora.
- El dispositivo debe tener distintas posibilidades de conectividad, como por ejemplo, Ethernet o WiFi.

- La distancia entre nodos hasta la fuente de alimentación no debe superar los 100 metros.

El seguir estos requisitos asegura un diseño adecuado y asequible para la creación de un prototipo funcional final.

4.2.2 Componentes

El núcleo del dispositivo será la unidad de procesado, la cual es usada además tanto para la adquisición de datos como para la conectividad. Para conseguir los requisitos previos mencionados, el diseño del dispositivo monitorizador de ruido está basado en una SBC Raspberry Pi 3 Modelo B (Datasheet, 2016). La plataforma Raspberry Pi ofrece un gran número de ventajas que coinciden con los requisitos previamente nombrados, como por ejemplo su potencia de cálculo, su alta versatilidad y la existencia de información en distintos lenguajes de programación, aplicables a ella. El consumo energético y el precio de ésta permiten la construcción de numerosos dispositivos de manera económica basados en esta plataforma, dando lugar a nodos asequibles y robustos. El conjunto de estas cualidades de la plataforma, junto a las actualizaciones de hardware que recibe la plataforma Raspberry Pi con el tiempo en forma de nuevos modelos hacen que ésta sea la opción elegida para el desarrollo de un prototipo funcional de nodo acústico.

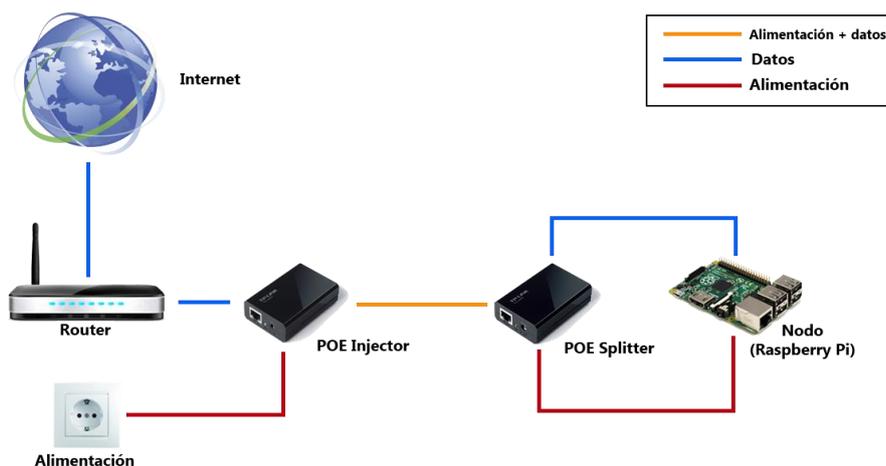


Figura 27. Esquema de funcionamiento para la conectividad de datos y de alimentación a través del sistema Power over Ethernet (POE), IEEE 802.3af.

En la figura 27 se muestra un diagrama de bloques del dispositivo acústico presentado, donde las distintas fases y etapas del sistema son ilustradas. Una de las entradas del sistema es la adquisición del sonido por parte del micrófono, convirtiendo la señal analógica de entrada en formato digital gracias a la tarjeta de sonido integrada en él. Después, la señal es enviada a la Raspberry Pi para el cálculo y extracción de los parámetros acústicos. A continuación, los datos son muestreados de tal manera que puedan ser enviados a la plataforma en la nube para su publicación.

El uso de este tipo de plataforma conlleva sin embargo ciertas limitaciones. En mediciones de larga duración en condiciones de exterior, la temperatura de funcionamiento de la placa debe ser monitorizada para así poder salvaguardar la integridad de la placa y de esa manera evitar averías. En el sistema propuesto, la inclusión de baterías de respaldo o un SAI (Sistema de Alimentación Ininterrumpida) dota al sistema de protección ante cortes de energía temporales. Para incrementar la potencia de cálculo del sistema, una nueva versión de la plataforma de cálculo Raspberry Pi sería necesaria.

Otro requisito de importancia es que existan las menos fases en el proceso de adquisición de audio posibles para, de esa manera, reducir al máximo posible las entradas de ruido que pueda tener el sistema durante la captura de la señal de audio. La segunda parte principal del dispositivo es el hardware de adquisición de sonido, es decir, el micrófono y la tarjeta de sonido. En este proyecto, y gracias a los puertos USB de la Raspberry Pi, se ha usado un micrófono USB que integra una tarjeta capturadora de audio. El modelo de micrófono utilizado es un T-Bone GC 100 USB (TBoneGC100). Este micrófono tiene un patrón de directividad omnidireccional y junto con su respuesta en frecuencia y la conectividad USB hacen a este dispositivo como un candidato idóneo para el prototipo (Figuras 28 y 29).

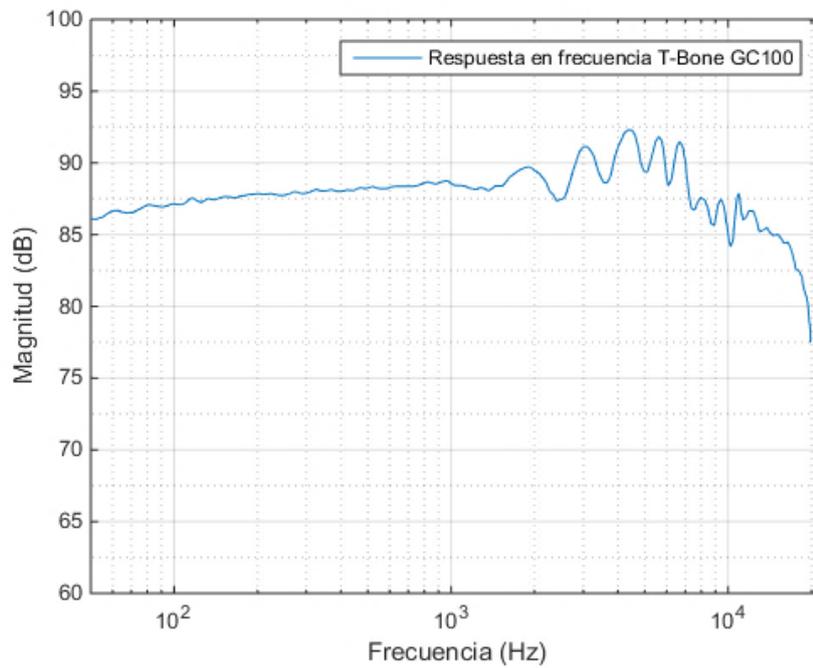


Figura 28. Respuesta en frecuencia del micrófono T Bone GC 100.

Diagrama de directividad TBone GC100, 1 kHz

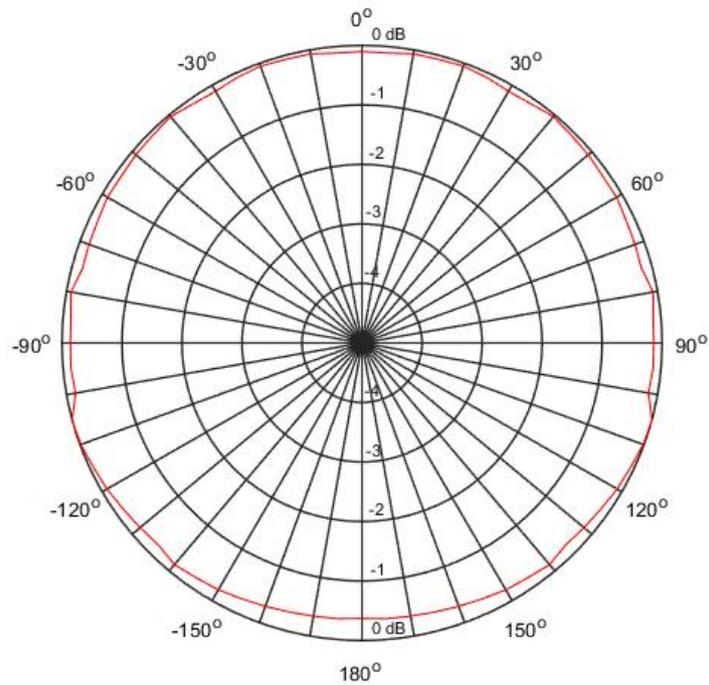


Figura 29. Diagrama polar de directividad del micrófono T Bone GC 100 para 1 kilohercio.

Uno de los beneficios destacables del uso de la Raspberry Pi en el dispositivo es la posibilidad de trabajar bajo un sistema operativo libre y gratuito. En el caso de la Raspberry Pi, una distribución Raspbian ha sido utilizada (Raspbian, s.f.). Esta es una distribución Linux especialmente diseñada para Raspberry Pi. El desarrollo de los algoritmos ha sido llevado a cabo usando MATLAB y compilados en lenguaje C. La conexión a internet del dispositivo permite además la posibilidad de hacer conexiones remotas y trabajar con los dispositivos a distancia, gracias al protocolo SSH (Secure Shell). A través de una terminal de comandos es posible acceder al dispositivo de manera remota y actualizar los algoritmos en el caso de nuevas versiones, además de tareas de mantenimiento del sistema. Para la gestión del audio de una manera optimizada y para el control de las configuraciones de éste, se usa la librería ALSA de Linux para audio (AlsaProject, s.f.).

Basándonos en los requisitos de ancho de banda necesarios para la transmisión de información constante, la placa Raspberry Pi permite distintas opciones: Ethernet, WiFi, ZigBee o una conexión 3G. En el caso del dispositivo y para su uso, se ha elegido la conexión Ethernet. Para localizaciones más distantes donde una conexión Ethernet no es viable, los nodos serían equipados con sistemas de conectividad inalámbrica y el sistema de alimentación provendría de distintas fuentes, como de baterías, paneles solares o conexiones eléctricas, como por ejemplo de una farola donde estuviese instalado el dispositivo. En este caso, el uso de una conexión LAN para el despliegue en lugar de una conexión inalámbrica abarca dos razones principales, evitar interferencias que puedan haber en el espacio radioeléctrico, ya que los cables Ethernet están debidamente protegidos frente a interferencias. De todas formas, los cables Ethernet están sujetos también a degradaciones en la señal, pero este problema es fácilmente solventable debido a la limitación de distancia impuesta en los requisitos previos, de 100 metros, para tener condiciones óptimas para la transmisión de la señal acorde a la calidad de cables y del resto del sistema. Además, aprovechando la oportunidad de poder usar cables de red para la conectividad del sistema, se ha usado un esquema POE (alimentación a través de Ethernet, Power Over Ethernet, en inglés) para la alimentación de corriente de los dispositivos, basado en el estándar IEEE 802.3af (Mendelson, 2004).

En este desarrollo se ha usado un inyector POE (Inyector PoE TL-POE150S, 2017) situado en la entrada del sistema, y un splitter POE (Splitter PoE TL-POE10R, 2017) en el final del circuito, en concreto, dentro de la carcasa protectora del nodo, junto al resto de dispositivos instalados. Usando cables de red de categoría 5, 5e o 6, se puede alcanzar una distancia máxima de 100 metros desde el inyector hasta el splitter. En este experimento, la distancia máxima utilizada ha sido de 10 metros y la categoría del cable utilizado ha sido 5e. El splitter se encarga de separar la señal de corriente de la señal de datos, y de esta manera proveer al dispositivo de alimentación eléctrica y de red, como se puede observar en la figura 30. La tensión de salida puede ser ajustada desde el splitter instalado, y en este caso, el voltaje es seleccionado a 5 voltios, para de esa manera alimentar correctamente a la Raspberry Pi y a sus componentes. De esta manera y usando este modelo de splitter, no es necesario el uso de un transformador adicional para ajustar la tensión adecuada para el dispositivo.

En la figura 30 se muestra un diagrama de bloques del sistema completo. Las entradas del sistema son la fase de adquisición del sonido que es realizada a través del T-Bone GC100, y la alimentación y conectividad a Internet que se conectan al dispositivo a través del inyector TL-POE 150S. En la Raspberry Pi 2 Modelo B hay implementada una etapa de filtrado para eliminar el ruido proveniente de la línea eléctrica. El análisis de la señal y la extracción de los parámetros se lleva a cabo y los resultados son procesados para enviarlos al servicio de presentación en la nube.

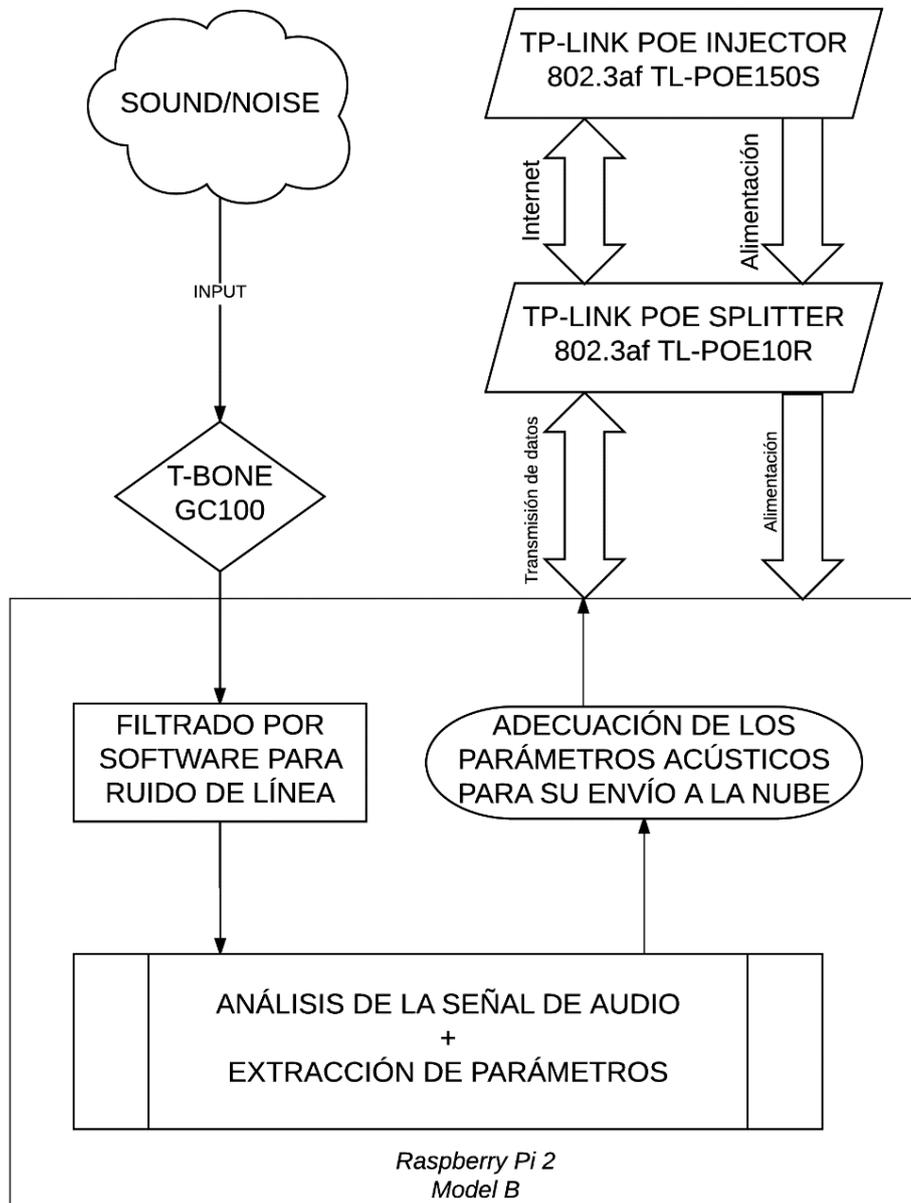


Figura 30. Diagrama de bloques del sistema completo del sensor acústico conectado.

En la tabla 7 se presenta una lista con los materiales utilizados en la versión final del prototipo.

Parte	Nombre comercial	Precio
Placa principal	<i>Raspberry Pi 2 Modelo B</i>	38 €
Micrófono	<i>T-Bone GC 100 USB</i>	15 €
POE Splitter	<i>TP-Link TL-POE10R Splitter Power Over Ethernet</i>	16 €
POE Inyector	<i>TP-LINK TL-POE150S Injector Power Over Ethernet</i>	26 €
Caja protectora	<i>150 mm × 200 mm × 85 mm IP67 Caja</i>	12 €
Fungible	<i>Material vario</i>	10 €
Precio total por nodo		117 €

Tabla 7. Lista de componentes usados en la versión final del prototipo.

4.2.2.1 Etapa de adquisición

La producción masiva de micrófonos para electrónica de consumo ha pavimentado el camino para poder usar estos dispositivos en aplicaciones asequibles de monitorización de ruido. Estas aplicaciones van desde la monitorización del ambiente sonoro hasta para la validación de mapas de ruido. Los micrófonos utilizados son una parte crítica en los dispositivos de medición y monitorización, y es por ello que sus características pueden afectar al resultado final de las mediciones.

En un estudio (Van Renterghem, y otros, 2011), se analizaron distintos micrófonos de bajo coste y se compararon con otros de referencia. En ese estudio se encontró que en un periodo de prueba de seis meses daba una desviación de entorno a 1 dB(A). En mediciones de larga duración y en ambientes exteriores, estos micrófonos tendían a desviarse, en comparación con los micrófonos de referencia. Esta desviación era producida por los agentes ambientales, tales como la humedad o la temperatura. La posibilidad de reemplazar estos micrófonos deteriorados cuando la desviación de una unidad respecto a una referencia fuese de más de 1 dB(A) podría ser viable y fácilmente llevada a cabo debido al bajo coste que supondría. La intervención humana es necesaria para ciertas tareas como la

calibración periódica, por tanto, la sustitución de micrófonos deteriorados podría ser integrada en una rutina de mantenimiento de los dispositivos.

En este diseño se compararon dos esquemas de adquisición de audio (Figura 31):

- a) Una tarjeta de sonido junto con un micrófono dinámico.
- b) Un micrófono USB electrec con tarjeta de sonido integrada.

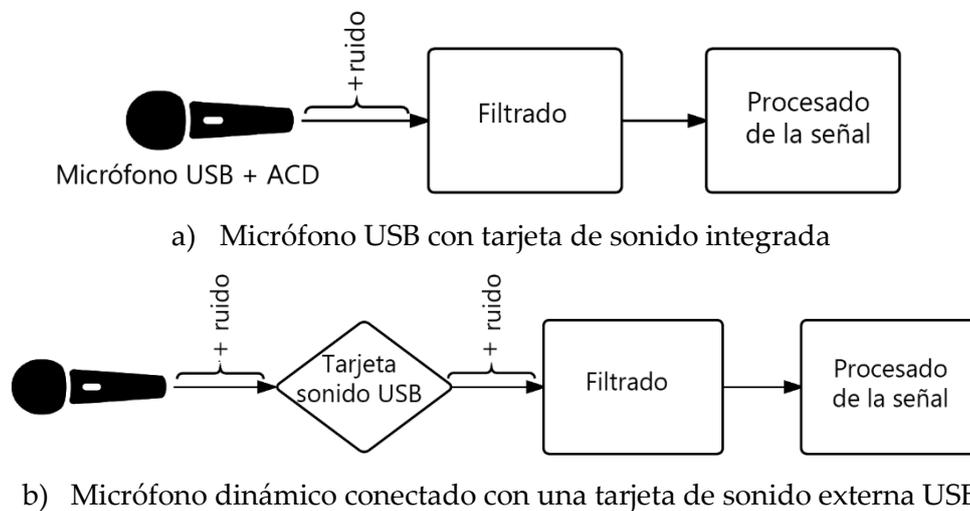


Figura 31. Configuraciones de adquisición de sonido. (a) Un micrófono electrec con ADC (convertor analógico digital) integrado, sin una tarjeta de sonido externa. (b) Tarjeta de sonido USB de bajo coste junto con un micrófono dinámico.

El micrófono dinámico probado junto con la tarjeta de sonido de bajo coste está basado en una cápsula de micrófono Panasonic WM-61A (WM61A Datasheet, 2017), con un patrón de directividad omnidireccional, una relación señal a ruido de 62 decibelios y una respuesta en frecuencia que va desde 20 hercios hasta 16000 hercios. Usando la tarjeta de sonido USB se detectó ruido en el sonido capturado. Este ruido era probablemente originado por interferencias eléctricas provenientes de la fuente de alimentación. La tarjeta de sonido USB en su diseño no estaba

apropiadamente apantallada y por tanto era vulnerable a las interferencias. Por tanto, la selección final fue usar un micrófono con la tarjeta de sonido integrada (TBoneGC100), con conectividad USB.

Las comprobaciones de los niveles de ruido de la opción con el micrófono electrec con el preamplificador y el convertor analógico digital integrados en él ofrecían mejores resultados, por tanto, fue la opción finalmente seleccionada. Un filtro paso alto desde 100 hercios fue implementado para eliminar los ruidos que pudiesen interferir, provenientes de la fuente de alimentación, alrededor de los 50 hercios. Debido a que los niveles de presión sonora son analizados a partir de los 125 hercios, esa frecuencia de corte de 100 hercios fue elegida. Las figuras 28 y 29 muestran la respuesta en frecuencia y diagrama polar de directividad para el micrófono.

Un proceso de calibración es aplicado al dispositivo acústico antes de cada período de medición, para de esta manera obtener resultados precisos y fiables. Primero, usando la respuesta en frecuencia del micrófono, un filtro de ecualización es implementado para compensar sus descompensaciones y dejar una respuesta lo más plana posible. A continuación, una verificación y un ajuste de nivel es realizado, comparando los resultados de salida con un calibrador de presión sonora Rion (NC-74 Datasheet, 2016).

Para el montaje de todos los componentes seleccionados para el dispositivo final se ha usado una caja estanca de 150 mm x 200 mm x 85 mm con grado de protección contra agua y polvo IP67. Todas las partes fueron ensambladas y conectadas en el interior de la carcasa protectora (Figura 31a). La caja fue sellada y un anclaje metálico fue instalado en su parte posterior para su instalación en exteriores. El aspecto final del interior puede verse en la figura 31b.



(a) Aspecto final exterior del dispositivo



(b) Interior del prototipo.

Figura 31. Vistas del interior del prototipo construido. (a) Diseño final del dispositivo acústico. En la imagen, la Raspberry Pi y el resto de componentes están en el interior de la carcasa protectora. En la parte inferior de la caja estanca se puede observar el micrófono. (b) Vista interior de la caja estanca. Los componentes dentro de la caja son la Raspberry Pi junto con el splitter POE, y el micrófono en la parte inferior de la imagen, así como los cables de conexión.

4.2.3 Implementación de los parámetros acústicos

La elección de la plataforma Raspberry Pi como núcleo de procesamiento del dispositivo fue debida a su gran versatilidad y para la facilidad en la implementación y ejecución de algoritmos usando un lenguaje de programación eficiente y accesible, el lenguaje C, pero compilado desde MATLAB a través de Simulink. La adquisición de audio fue llevada a cabo a través de un bloque de procesamiento usando la librería ALSA, componente que provee de funcionalidades de audio a los sistemas Linux. Gracias a ello, es posible configurar las distintas configuraciones de captura de audio necesarias, como, por ejemplo, el tiempo de muestreo o el tamaño de muestra, que es el número de muestras por ventana. Una vez que la adquisición de audio es configurada, se lleva a cabo la etapa de filtrado paso alto con frecuencia de corte a 100 hercios para la eliminación de ruidos proveniente de la red eléctrica.

La señal de audio es adquirida de una manera lineal, es decir, con niveles de presión instantáneos. El paso siguiente es la conversión a una escala logarítmica. También se lleva a cabo una corrección espectral usando la información de la respuesta en frecuencia del sistema adquirida de manera empírica. A través de bloques de procesamiento de Simulink, en MATLAB, las distintas fórmulas matemáticas de los diferentes parámetros acústicos son implementadas. La definición de los parámetros acústicos es presentada en el apartado 2.4.

Para el análisis frecuencial se ha implementado una etapa de filtrado en el software que se encarga de analizar el espectro de la señal de entrada. El procesado consiste en pasar el audio adquirido a través de una serie de filtros paso banda con sus frecuencias centrales coincidentes en tercios de octava, dando lugar a la señal filtrada en distintas bandas para analizar de manera posterior su nivel de presión sonora. El filtrado es llevado a cabo desde la banda de 125 hercios hasta 8000 hercios.

4.2.4 Almacenamiento de los datos en repositorio online

Los principales objetivos planteados para este prototipo ha sido la optimización en el cálculo de los parámetros y su posterior publicación y presentación en una plataforma online de visualización en tiempo real. El potencial de esta red de análisis de audio recae en la capacidad de llevar a cabo los cálculos en distintos nodos, usando un solo dispositivo para cada posición y de manera simultánea, sin necesidad de recurrir a un servidor (Mainetti, Patrono, & Vilei, 2011). Además, gracias a las posibilidades de conectividad de los nodos, se puede llevar a cabo una monitorización del funcionamiento de éstos de manera remota (Luo, Chen, Tang, & Luo, 2009).

El prototipo ha sido equipado con una conexión a Internet a través de Ethernet para, de esta manera, ser capaz no solo de almacenar, sino de publicar los resultados de los parámetros acústicos calculados, enviándolos a través de internet. Esta plataforma de visualización de los datos fue ThingSpeak (Internet of Things—ThingSpeak, 2017). Ésta es una aplicación de IoT open source que ofrece una interfaz para la visualización de los datos recogidos de los dispositivos, usando el protocolo HTTP a través de internet. Además, la plataforma permite la creación de tablas y gráficos de visualización con actualizaciones de estado. A través de MATLAB, la conexión con ThingSpeak se realiza a través de una clave única de identificación proporcionada por la plataforma, con el número de variables a enviar y la dirección URL de actualización.

Los gráficos creados en ThingSpeak muestran en tiempo real los datos enviados desde los dispositivos, los cuales calculan los parámetros acústicos y los envían a través de internet, como se puede observar en la figura 32. Una vez los datos son recopilados, los datos pueden ser compartidos de manera pública o privada, así como ser descargados en distintos formatos para su análisis offline.

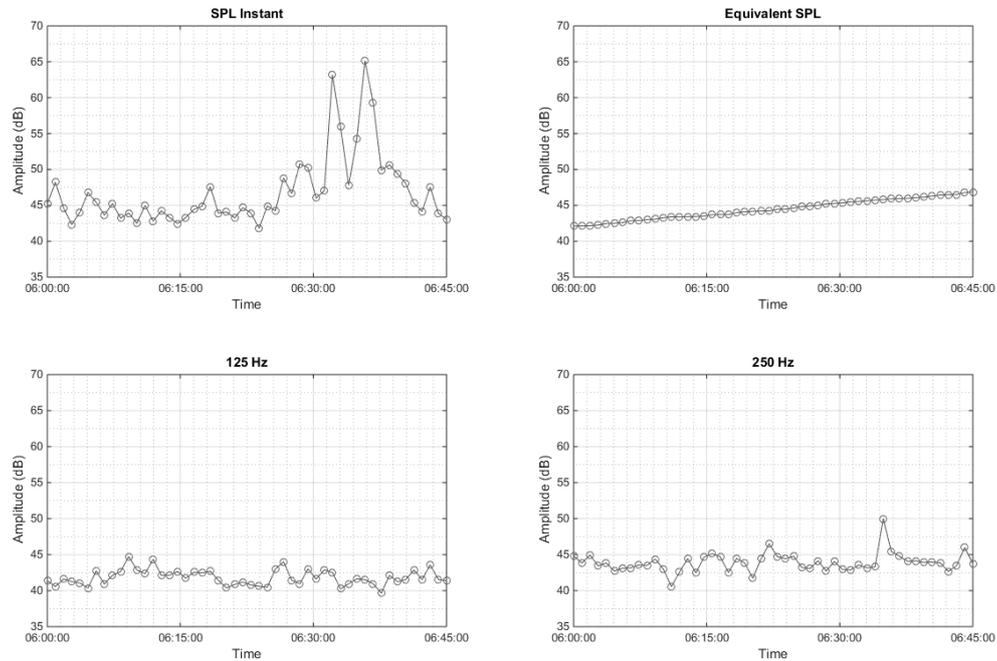


Figura 32. Ejemplos de visualización de la plataforma ThingSpeak mostrando gráficos de distintos parámetros acústicos: nivel de presión sonora instantáneo, nivel de presión sonora equivalente y el análisis del nivel de presión sonora para las bandas de 125 y 250 hercios.

4.2.5 Pruebas y certificación en laboratorio

En este apartado se muestran los tests realizados con el dispositivo para estudiar sus características a nivel acústico. Las pruebas llevadas a cabo fueron para comprobar la precisión del sistema, y para ello se usó un sonómetro integrador RION NL-05 con una cápsula de micrófono UC-52 con una respuesta plana en frecuencia y de patrón de directividad omnidireccional. La fuente sonora fue un altavoz dodecaédrico y un amplificador de audio conectados a un ordenador para la generación por software de las señales para las pruebas. Los tests fueron llevados a cabo en una cámara semianecóica con un ruido de fondo de 20.5 decibelios. Generando un ruido blanco a través del altavoz dodecaédrico y ajustando su ganancia y comparando con la lectura del sonómetro, se fueron comprobando los resultados del dispositivo para los distintos niveles de presión sonora con esta señal. Las lecturas del sonómetro fueron comparadas con las lecturas del dispositivo, y los resultados pueden ser observador en la figura 33 y en la tabla 8.

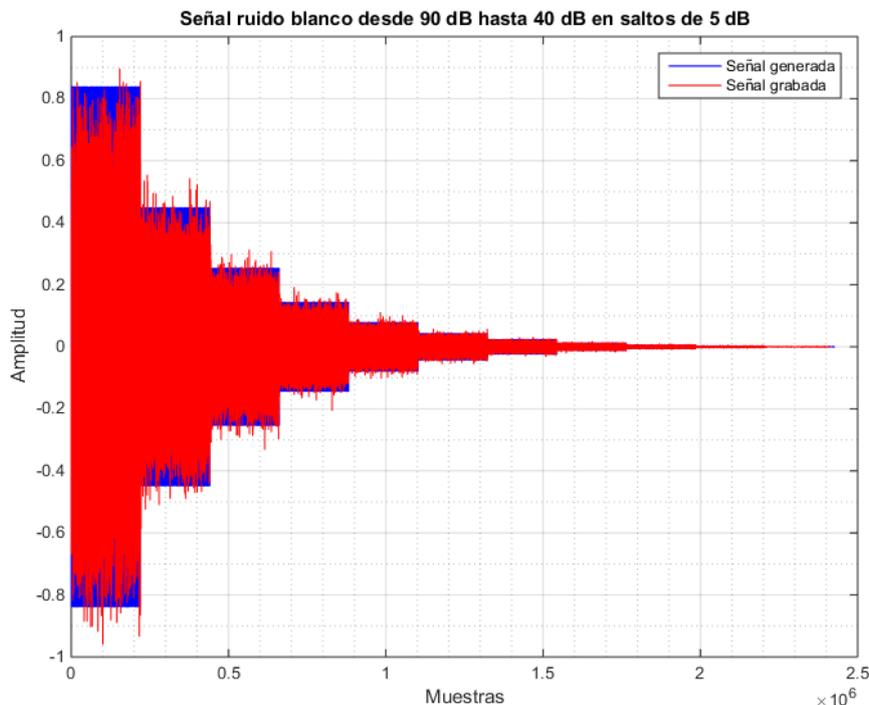


Figura 33. Evolución temporal de la señal generada y de las lecturas por parte del dispositivo acústico.

Rion NL-05	Raspberry Pi Nodo
90	91.1
85	85.1
80	80.3
75	75.45
70	70.39
65	65.27
60	60.20
55	55.21
50	50.18
45	46.15
40	39.85

Tabla 8. Niveles de presión sonora en decibelios leídos desde el dispositivo basado en la Raspberry Pi para 15 segundos de señal generada

También se llevaron a cabo pruebas fuera de laboratorio. Estas pruebas consistieron en llevar a cabo mediciones del parámetro L_{eq} en periodos de un minuto por parte del dispositivo acústico desarrollado y el sonómetro. En total, se llevaron a cabo quince pruebas de un minuto para su comparación. El dispositivo y el sonómetro fueron situados en la fachada de un edificio, a una altura de 4 metros en una zona residencial, en frente de una calle con un flujo reducido de vehículos. Los valores obtenidos por ambos dispositivos se presentan en la figura 34. Existen diferencias entre ambas mediciones, debidas a la mayor precisión del sonómetro en su rango dinámico.

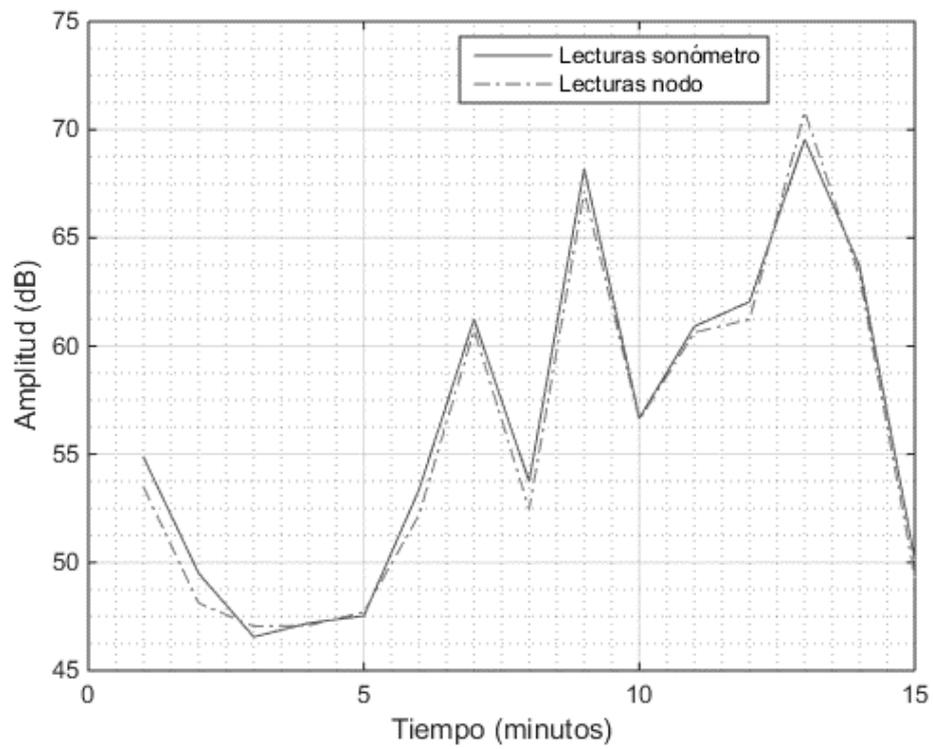


Figura 34. Muestra de los datos obtenido desde el sonómetro (azul) y desde el dispositivo Raspberry Pi (rojo) en las pruebas en la fachada.

Sonómetro	Raspberry Pi Nodo
54,86	53,48
49,50	48,12
46,56	47,05
47,20	47,08
47,53	47,71
53,36	52,19
61,23	60,74
53,74	52,45
68,20	67,16
56,67	56,59
60,91	60,53
62,05	61,23
69,55	70,84
63,66	63,19
50,12	49,33

Tabla 9. Valores de los niveles de presión sonora en decibelios para el sonómetro y el dispositivo Raspberry Pi en las pruebas en la fachada

4.2.6 Conclusiones y discusión del experimento

En este apartado se ha presentado el desarrollo de un sensor acústico de bajo coste. En una primera parte, se ha mostrado el diseño del sensor, sus componentes y la metodología seguida para la programación de los algoritmos y su conexión a la nube en tiempo real, así como su construcción. El dispositivo desarrollado es capaz de realizar cálculos en el mismo nodo, sin la necesidad de un servidor, y en tiempo real, junto con su presentación en una plataforma online. La plataforma y los métodos elegidos para el desarrollo del software han permitido que el coste de cada nodo sea asequible, para poder escalar el dispositivo en una red más grande de sensores. También la capacidad de trabajar con audio de alta calidad hace posible el análisis de resultados de parámetros más avanzados en nuevos desarrollos. En una segunda parte también se ha validado el dispositivo con una instalación en un entorno real en donde se han instalado dos nodos en el interior y exterior de una edificación.

Con el desarrollo de este dispositivo, se puede lograr el análisis del campo sonoro en períodos de medición largos, calculando los parámetros acústicos ambientales en el mismo dispositivo, y el envío de sus resultados a una plataforma de publicación de éstos. La Raspberry Pi ha demostrado ser una plataforma versátil y potente para el análisis de audio en tiempo real en el papel de un sensor autónomo, siendo posible la creación de un prototipo plenamente funcional y desplegado en un entorno real.

Sin embargo, el objetivo propuesto de llegar a evaluar de una manera medible la molestia subjetiva percibida por las personas, hace que la medición únicamente de parámetros de acústica ambiental no sea suficiente. Es por ello que en los siguientes apartados se proponen dispositivos más avanzados en los que se tienen en cuenta parámetros psicoacústicos y, además, se realiza una aproximación a la naturaleza binaural del sistema auditivo humano, con la implementación de algoritmos y síntesis de señales binaurales.

4.3 EVOLUCIÓN A MODELO BINAURAL

Parte de los desarrollos descritos en este apartado están en publicados en (Noriega-Linares, y otros, 2017).

En los apartados anteriores se ha descrito el diseño y construcción de un nodo acústico para su uso en una red de sensores acústicos inalámbricos, con el objetivo de la evaluación del ruido ambiental. Esta evaluación tiene como objetivo monitorizar los niveles de ruido en las personas, para, en última instancia, controlar estos niveles no sean molestos para las personas. Es por ello que surgió la inquietud de evaluar de una manera más directa esta molestia percibida por las personas y se decidió implementar el análisis del sonido a través de un parámetro psicoacústico que pudiese dar una idea del nivel de molestia percibida al ruido. De igual manera, para llegar a una respuesta más fidedigna a la del sistema auditivo humano, que en su naturaleza es binaural, se decidió llevar a cabo la captura del audio a través de dos canales, y a través de un procesado de la señal, obtener la señal sintetizada binaural, para, de esa señal, obtener el parámetro psicoacústico.

En este apartado se muestra el diseño, construcción y evaluación de un sensor acústico adecuado para la evaluación del loudness binaural en un dispositivo autónomo. La señal de audio es capturada por un array de dos micrófonos en forma de dos señales monofónicas para, posteriormente, sintetizar la señal binaural a partir de un algoritmo de detección de la dirección de llegada (Direction Of Arrival, DOA, en inglés) y una función de transferencia HRTF (Head Related Transfer Function). En un subapartado se muestran distintas pruebas en los cuales se compara la señal binaural sintetizada con mediciones en laboratorio usando un simulador de cabeza y torso. La implementación del modelo binaural de loudness se lleva a cabo con la señal binaural sintetizada y, a continuación, se muestran las configuraciones de hardware y la presentación de los algoritmos. También se implementa un mecanismo de envío de resultados a la nube a una plataforma IoT para un posterior procesamiento de los datos. Usando esta plataforma online es posible realizar análisis estadísticos de los datos almacenados, como por ejemplo con técnicas estadísticas espaciales (Segura-García, y otros, 2016).

4.3.1 Síntesis de la señal binaural

En esta sección se describe en detalle los procesos involucrados en la síntesis de la señal binaural a partir de las señales monofónicas. Se muestran también los análisis realizados comparando los resultados de las señales sintetizadas con las señales grabadas reales usando un simulador de cabeza y torso (Head And Torso Simulator, HATS, en inglés). Se describe la aproximación del procesado de señal usada en este apartado para sintetizar una señal binaural a partir de la salida de un array de dos micrófonos.

El proceso consta de dos etapas: primero, las señales de los micrófonos se analizan en el dominio del tiempo y frecuencia y se separan en distintos contenedores, o bin, para así estimar la dirección de llegada (DOA) de cada bin tiempo-frecuencia. Se asume una propagación de onda plana para esta suposición. A continuación, cada punto tiempo-frecuencia es selectivamente filtrado por la función de transferencia HRTF correspondiente a la dirección de azimut estimada para cada bin. Sólo se tiene en cuenta la dirección en azimut debido a que se está usando un array de dos micrófonos. El método desarrollado, el cual está basado en el modelo propuesto por (Cobos, Spors, & Lopez, A Sparsity-Based Approach to 3D Binaural Sound Synthesis, 2010), asume la escasez de fuentes sonoras en el dominio del tiempo-frecuencia, es decir, cada bin de tiempo-frecuencia se asume que pertenece a una sola fuente principal. Como resultado, las señales binaurales sintetizadas codifican las direcciones de las señales de una manera realista. El método asume que existe una fuente principal para cada elemento dado de tiempo-frecuencia. Pueden estar activas varias fuentes de manera simultánea, pero en un intervalo de tiempo determinado, su solapamiento en frecuencia se asume como bajo. Esta suposición es conocida en inglés como W-Disjoint Orthogonality (WDO), y se ha demostrado que las fuentes sonoras en la mayoría de cualquier situación realista pueden ser aproximada para ser WDO (Burred & Sikora, On the use of auditory representations for sparsity-based sound source separation, 2005). Las fuentes secundarias tendrán una dirección diferente siempre y cuando no tengan un solapamiento muy grande en tiempo-frecuencia, es decir, se asume la premisa de la ortogonalidad WDO. Esta suposición ha sido estudiada en el campo de separación de fuentes sonoras, y se ha probado como una buena aproximación para distintos tipos de fuentes (Burred, From sparse models to timbre learning: new

methods for musical source separation, 2008), (Rickard & Yilmaz, 2002), (Bunting, Bouzid, & Karatsovis, 2009). Los algoritmos de separación de fuentes sonoras basados en la premisa de WDO han sido aplicadas con éxito en muchos escenarios acústicos diferentes. En el trabajo de (Bunting, Bouzid, & Karatsovis, 2009), también se usó esta técnica para el reconocimiento de elementos de paisajes sonoros, incluyendo fuentes de ruido.

4.3.1.1 Estimación DOA

Se considera que el array de los dos micrófonos tiene una distancia d entre ellos y se encuentra en un medio con N fuente sonoras presentes. Las señales del micrófono se pueden describir como:

$$x_m(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{l=0}^{L_m-1} h_{mn}(l) s_n(t-l), \quad m = 1, 2 \quad (16)$$

donde $x_m(t)$ es la señal grabada en el micrófono número m , con un tiempo de muestra t , donde $s_n(t)$ es la señal de la fuente número n , $h_{mn}(t)$ es la respuesta al impulso de la ruta de la señal sonora desde la fuente número n hasta el micrófono número m , y L_m es la máxima longitud de todas las respuestas al impulso. El modelo descrito puede expresarse también usando la transformada de Fourier de tiempo reducido (STFT) de la siguiente manera:

$$X_m(k, r) = \sum_{n=1}^N H_{mn}(k) S_n(k, r), \quad m = 1, 2 \quad (17)$$

donde $X_m(k, r)$ se refiere a la STFT de la señal del micrófono m , y k y r son los índices de la frecuencia y el tiempo respectivamente. $S_n(k, r)$ es la STFT de las señales fuente $s_n(t)$ y $H_{mn}(k)$ es la respuesta en frecuencia desde la fuente n al sensor m . Si se asume que las fuentes solamente se solapan en cada punto tiempo frecuencia de manera muy poco habitual, la ecuación 18 puede simplificarse a la siguiente expresión:

$$X_m(k, r) \approx H_{ma}(k) S_a(k, r), \quad m = 1, 2 \quad (18)$$

donde $S_a(k, r)$ es la fuente dominante en el punto tiempo frecuencia (k, r) .

Para simplificar, se asume un modelo anecoico en el cual las fuentes están lo suficientemente distanciadas como para considerar una incidencia de onda plana. Dada la pequeña distancia entre los dos micrófonos, prácticamente cualquier

fente puede considerarse como que está en el campo lejano del array de micrófonos. De hecho, para que una fuente pudiese asumirse como en campo cercano, debería estar a una distancia del array tal que:

$$d < 2c(L^2)/\lambda \quad (19)$$

Siendo d la distancia entre los micrófonos, c la velocidad del sonido, L la distancia entre los micrófonos y la fuente emisora y λ la longitud de onda del sonido de la fuente. Por lo tanto,

$$d < 2c(L^2)f \quad (20)$$

Esto significa que, en el caso peor y más crítico de una señal de frecuencia de 20 hercios, la fuente debería de estar al menos a una distancia mayor a 16 centímetros. Es, por tanto, una suposición que será viable en la mayoría de casos prácticos reales.

Por lo tanto, la respuesta en frecuencia es una función con un retraso de τ_{mn} entre cada fuente y micrófono, es decir, $H_{mn}(k) = e^{j2\pi f_k \tau_{mn}}$, con f_k siendo la frecuencia correspondiente al bin de índice k .

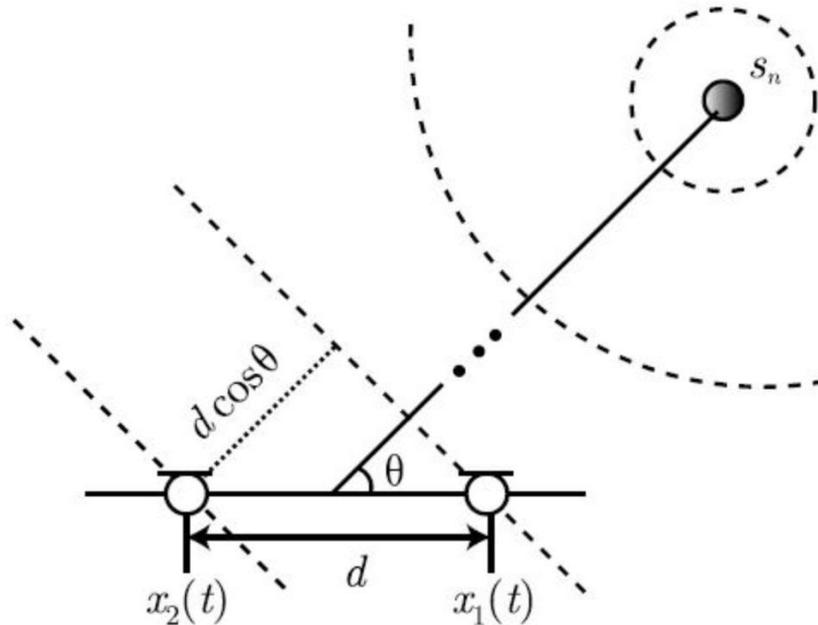


Figura 35. Array de dos micrófonos capturando la señal de una fuente desde la dirección θ .

En la figura 35 se puede observar que si los micrófonos están separados por una distancia d y la onda desde la fuente n incide con un ángulo θ , la diferencia temporal entre las señales en ambos micrófonos será de:

$$(\tau_{1n} - \tau_{2n}) = \frac{d}{c} \cos \theta \quad (21)$$

donde c es la velocidad de propagación del sonido en el aire. La diferencia de fase observada entre los dos micrófonos en un bin dado de tiempo frecuencia será:

$$\Phi_{1,2}(k, r) = \angle \left(\frac{X_1(k, r)}{X_2(k, r)} \right) = 2\pi f_k \frac{d}{c} \cos \theta \quad (22)$$

Como resultado, el ángulo correspondiente a la dirección de llegada para un bin de tiempo frecuencia (k, r) dado podrá ser estimado como:

$$\hat{\theta}(k, r) = \arccos \left(\frac{c}{2\pi f_k d} \Phi_{1,2}(k, r) \right) \quad (23)$$

4.3.1.2 Filtrado HRTF

Asumiendo las condiciones de campo lejano definidas en el apartado anterior, las funciones HRTF son una función de la dirección de llegada de la fuente (θ) y la frecuencia f_k , expresadas como $HRTF(\theta, k)$. Además, existen distintas funciones HRTF para los oídos derecho o izquierdo, por tanto, serían $HRTF_{Left}(\theta, k)$ para el canal auditivo izquierdo y $HRTF_{Right}(\theta, k)$ para el canal auditivo derecho.

El método de sintetización es el siguiente: cualquiera de las señales omnidireccionales del array $X_m(k, r)$ es filtrada según los ángulos estimados de la dirección de llegada $\hat{\theta}(k, r)$ de la siguiente manera:

$$Y_{Left}(k, r) = X_m(k, r)HRTF_{Left}(\hat{\theta}(k, r), k) \quad (24)$$

$$Y_{Right}(k, r) = X_m(k, r)HRTF_{Right}(\hat{\theta}(k, r), k) \quad (25)$$

donde $Y_{Left}(k, r)$ y $Y_{Right}(k, r)$ son las transformada de Fourier de tiempo reducido de las señales binaurales sintetizadas correspondientes a los canales auditivos izquierdo y derecho respectivamente. Estas señales son transformadas al dominio temporal a través de una función STFT inversa, siguiendo un esquema clásico de solapamiento y suma. Dependiendo de la base de datos de funciones de transferencia HRTF utilizada, estas funciones HRTF estarán disponibles para unos ángulos discretos definidos. Es decir, si se usa una base de funciones con más ángulos o menos, se podrán sintetizar más o menos direcciones. Usando la base de datos presente y disponible en (Cobos, Spors, & Lopez, A Sparsity-Based Approach to 3D Binaural Sound Synthesis, 2010), la aproximación generada es suficientemente efectiva. En concreto, el banco de funciones de transferencia utilizado en este diseño ha sido uno con HRTF disponibles en saltos de 5 grados.

4.3.1.3 Comparación con Head and Torso Simulator

En este apartado se describen los experimentos realizados para validar la calidad binaural de la señal sintetizada a partir de dos entradas monofónicas usando el modelo propuesto en los apartados 4.3.1.1 y 4.3.1.2. Se describe la metodología llevada a cabo en la grabación de señales por un array de dos micrófonos y por un sistema de grabación binaural de cabeza y torso.

A la hora de usar una señal binaural sintetizada como entrada para evaluar la molestia acústica usando parámetros psicoacústicos, ésta debe tener la calidad suficiente como señal binaural real para su correcto uso. Para realizar esta evaluación se llevó a cabo un experimento usando el array de dos micrófonos usado en el modelo del dispositivo desarrollado, en concreto, los dos micrófonos centrales del array de cuatro micrófonos de la cámara PS3 Eye, y un simulador de cabeza Soundman John (Soundman, 2011), con unos micrófonos binaurales Soundman OKM II (Soundman, 2011) con un adaptador A3-XLR (Soundman, 2011) conectado a una tarjeta de sonido externa Behringer U-Phoria UMC202HD (Behringer, 2017). En la figura 36 se puede observar uno de los micrófonos binaurales en el simulador de cabeza y en las figuras 37 y 38 una vista del emplazamiento del dispositivo PS3 Eye y el simulador de cabeza.



Figura 36. Detalle de uno de los micrófonos binaurales en el simulador de cabeza.



Figura 37. Vista trasera del simulador de cabeza con el dispositivo PS3 Eye situado encima.



Figura 38. Vista frontal del simulador de cabeza con el dispositivo PS3 Eye situado encima.

En conjunto del sistema estaba situado en medio de un array circular de 64 altavoces con un sistema de reproducción espacial Wave Field Synthesis (WFS) (Boone, Verheijen, & Van Tol, 1995), (Cobos & Lopez, Resynthesis of Sound Scenes on Wave-Field Synthesis from Stereo Mixtures Using Sound Source Separation Algorithms, 2009). En la figura 39 se muestra la instalación de WFS utilizada, estando todos los altavoces del array calibrados para emitir al mismo nivel.



Figura 39. Instalación del sistema de Wave Field Synthesis.

Para llevar a cabo una comparación de ambos sistemas, se generaron diversas señales acústicas que fueron grabadas tanto por el array de dos micrófonos como por el sistema de grabación binaural situado en el simulador de cabeza de manera simultánea. Las señales utilizadas fueron tonos senoidales de frecuencias 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 y 6300 hercios y ruido blanco. La elección de estas frecuencias fue debido a la frecuencia de muestreo utilizada por el dispositivo PS3 Eye, de 16.000 Hz, siendo pues su ancho de banda en frecuencia hasta los 8000 Hz. La duración de estas señales fue de 7 segundos cada una y fueron emitidas a través del array circular de altavoces, en intervalos de 11,25 grados, debido al uso de 32 canales.

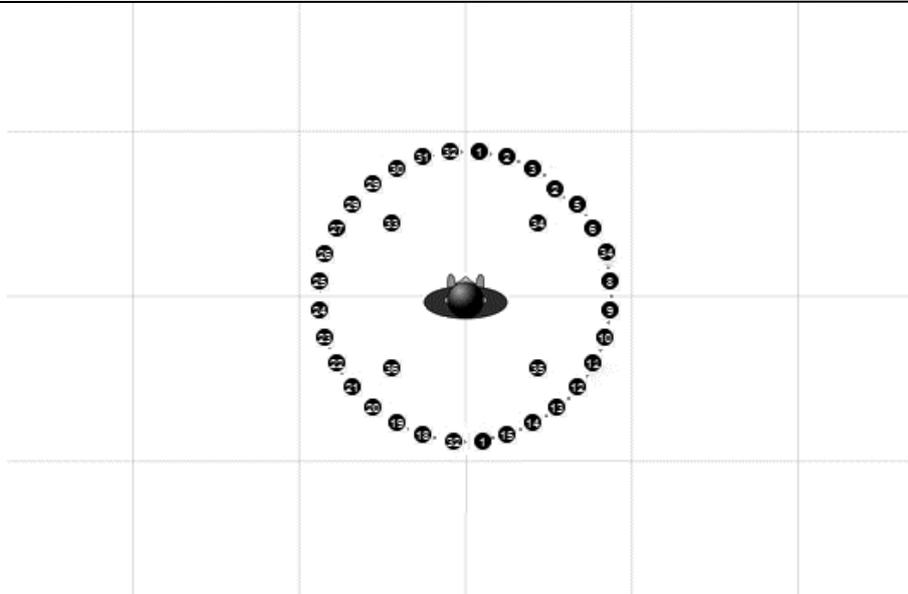


Figura 40. Vista aérea del esquema del array circular de 64 altavoces y 32 canales.

Una vez capturadas las señales grabadas por el array de dos micrófonos, se aplicó el método de los apartados 4.3.1.1 y 4.3.1.2 para la síntesis de la señal binaural. Una vez obtenida la señal sintetizada para cada frecuencia y ruido blanco y para cada ángulo, para intervalos de un segundo por señal, se analiza el nivel de loudness en su modelo binaural según (Moore & Glasberg, Modeling binaural loudness, 2007). El mismo proceso de cálculo del nivel de loudness binaural es llevado a cabo en las señales procedentes de la grabación binaural en el simulador de cabeza con los micrófonos binaurales. Los resultados de estos cálculos se muestran en las figuras 41, 42, 43 y 44. Los diagramas en las figuras representan una vista aérea del array circular de altavoces. Los valores de loudness binaural para cada tono en las figuras están normalizados.

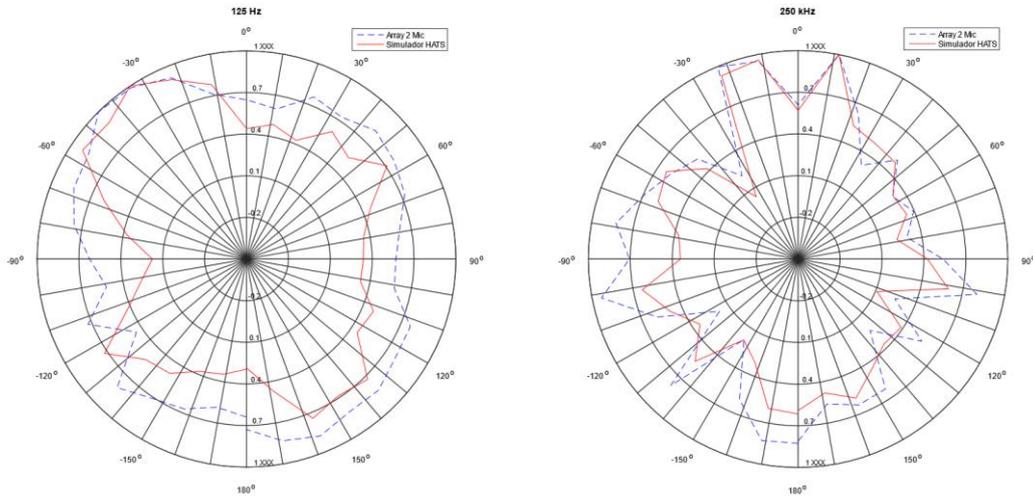


Figura 41. Diagrama de valores de loudness binaural normalizados para los tonos de frecuencia 125 y 250 hercios para la señal binaural generada del array de dos micrófonos de PS3 Eye y para la señal grabada por el HATS.

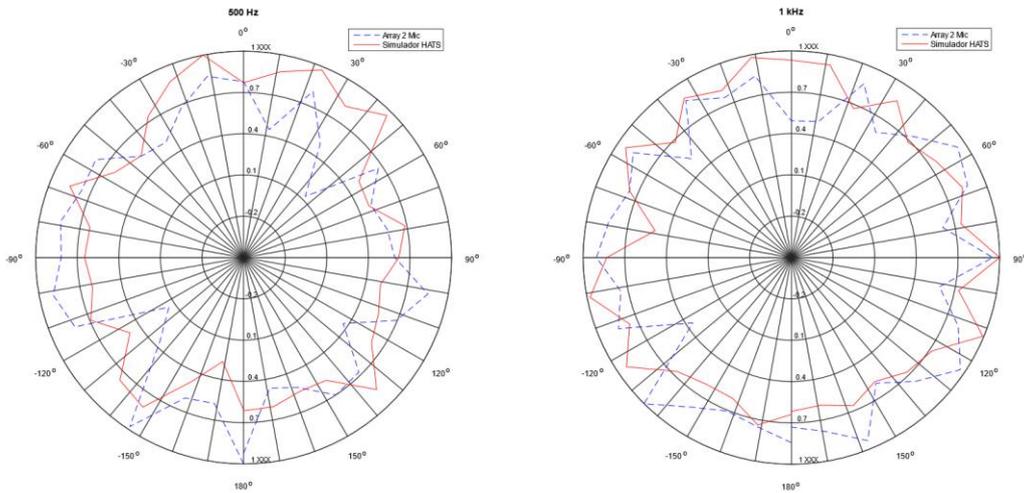


Figura 42. Diagrama de valores de loudness binaural normalizados para los tonos de frecuencia 500 y 1000 hercios para la señal binaural generada del array de dos micrófonos de PS3 Eye y para la señal grabada por el HATS.

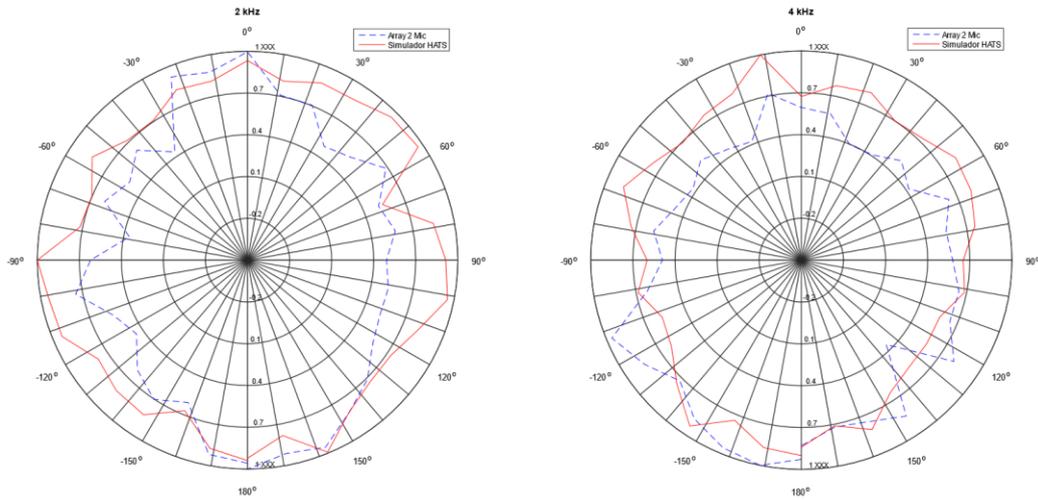


Figura 43. Diagrama de valores de loudness binaural normalizados para los tonos de frecuencia 2000 y 4000 hercios para la señal binaural generada del array de dos micrófonos de PS3 Eye y para la señal grabada por el HATS.

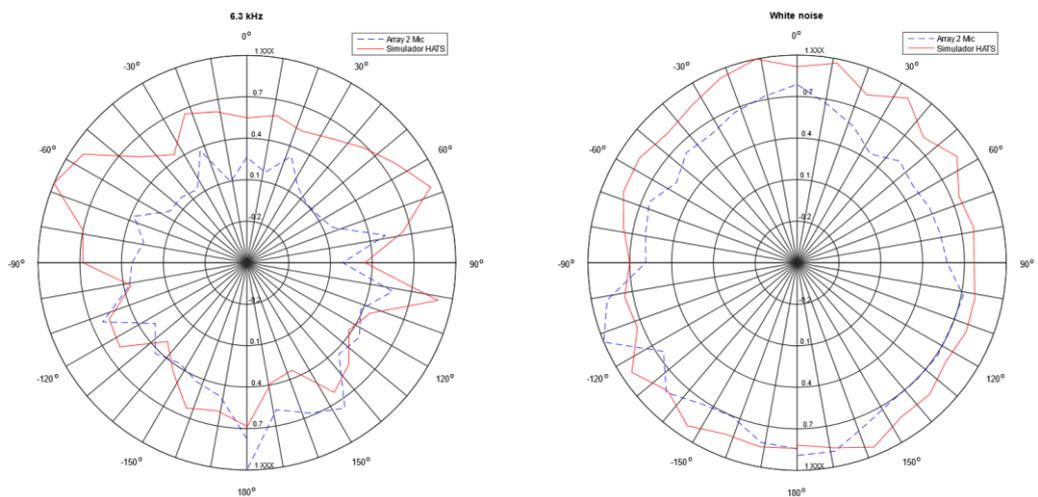


Figura 44. Diagrama de valores de loudness binaural normalizados para el tono de frecuencia 6300 hercios y ruido blanco para la señal binaural generada del array de dos micrófonos de PS3 Eye y para la señal grabada por el HATS.

En las frecuencias más bajas el patrón y los niveles son similares en ambas señales, las grabadas y las sintetizadas y se comportan de manera óptima. A partir de la frecuencia de 4 kilohercios se empieza a notar el efecto de la directividad del array de dos micrófonos del dispositivo PS3 Eye, pero aun así el algoritmo de

sinterización de la señal binaural trabaja de una manera aceptable para situaciones prácticas, como se ha comentado en los apartados anteriores. En las figuras 45 y 46 se muestra la directividad del array de dos micrófonos para las frecuencias de 100, 1000, 2000 y 4000 hercios. Para la señal de ruido blanco, se observa un menor nivel en la señal sintetizada, pero con un patrón similar al del simulador de cabeza. Esto es debido a que los micrófonos binaurales tienen una respuesta en frecuencia hasta 22 kilohercios y el array de dos micrófonos de PS3 Eye hasta 8 kilohercios.

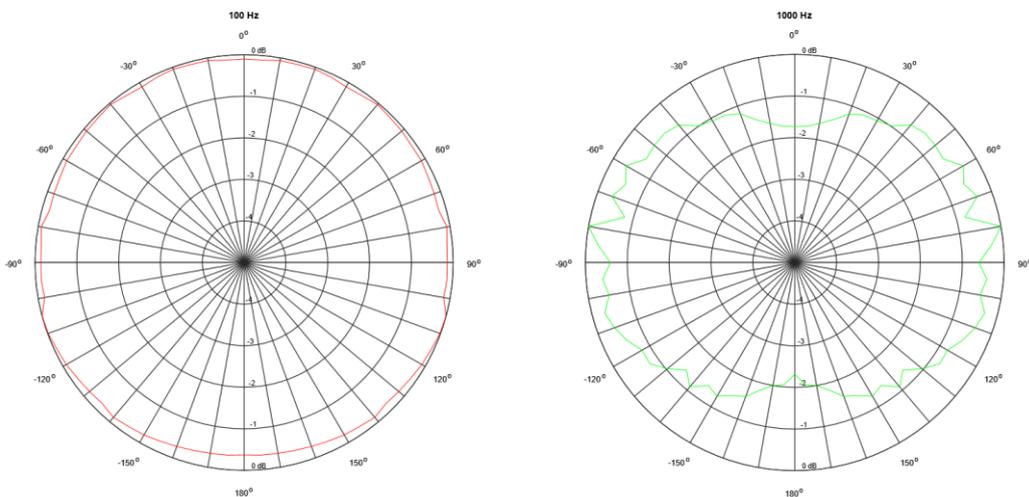


Figura 45. Diagrama de directividad del array de dos micrófonos para las frecuencias de 100 y 1000 hercios.

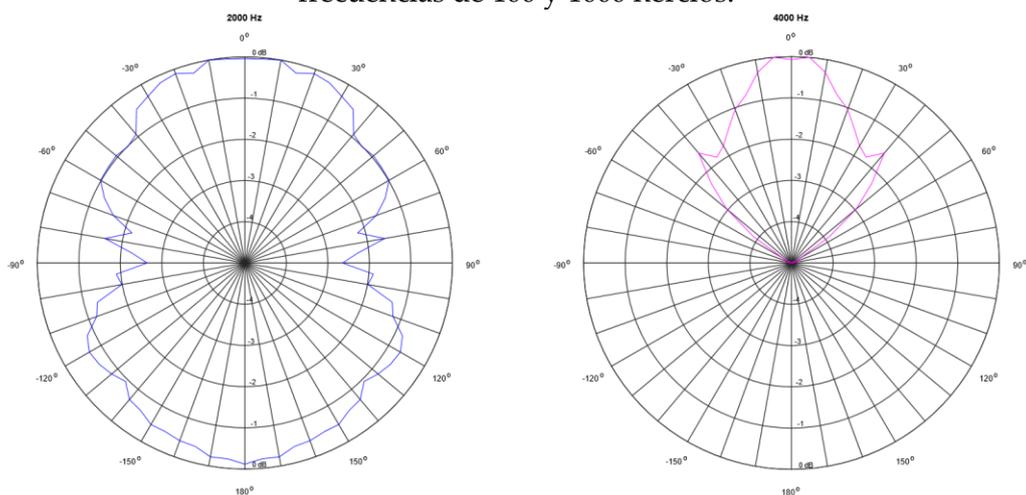


Figura 46. Diagrama de directividad del array de dos micrófonos para las frecuencias de 2000 y 4000 hercios.

A través de estas pruebas se puede concluir que los resultados de ambas señales son comparables y por tanto el método de sintetización de una señal binaural a partir de dos entradas monofónicas provenientes de un array de dos micrófonos es factible para su implementación en un dispositivo autónomo de medida del parámetro loudness binaural.

4.3.2 Diseño del sensor

El diseño del dispositivo fue realizado siguiendo un modelo top-down. Para llevar a cabo este diseño hace falta definir ciertos requisitos previos que deben considerarse: un proceso de instalación en campo sencillo, facilidad de calibración o que el sistema de medición sea fiable, para que la extracción y cálculo de los parámetros sea preciso. Debido a que el procesado de audio es una tarea computacionalmente costosa, la unidad de procesado del dispositivo necesita una potencia de procesado suficiente para llevar a cabo los cálculos en la misma placa, inclusive aquellos que necesiten de un mayor coste computacional. El análisis del loudness binaural general también la necesidad de tener una entrada de audio que use dos canales, para poder, de esa manera, cumplir los requisitos a la hora de generar una señal binaural. El rendimiento de cada uno de los componentes por separado debe, igualmente, de ser lo suficientemente bueno como para que no se desvirtúe el rendimiento general del dispositivo debido a uno de ellos, incluso en mediciones que fuesen desde unas horas hasta meses. Sin embargo, los componentes deben de poder ser lo suficientemente asequibles para que, de esa manera, se puedan crear redes de varios de estos dispositivos, sin que por ello el número de éstos se vea limitado por el alto coste económico. La conectividad y posibilidades de comunicación de los dispositivos también es un factor importante ya que la placa central debe de tener opciones suficientes como para que se puedan enviar y recibir datos de manera estable y eficiente.

4.3.2.1 Hardware

El hardware, es decir, la parte física y de los componentes del dispositivo incluye dos partes principales: el sistema de adquisición de audio y el núcleo de procesado. En este trabajo de investigación el núcleo de procesamiento del dispositivo está basado en la plataforma Raspberry Pi, y el sistema de adquisición

de audio consiste en un array de micrófonos de una cámara Sony PlayStation Eye. En esta sección se realiza la descripción de ambas partes.

- 1) *Adquisición de audio:* en esta etapa se ha utilizado un array de cuatro micrófonos integrado en una cámara Sony PlayStation Eye con el conversor analógico digital multicanal integrado. Este dispositivo opera cada canal con un muestreo de 16 bits y una frecuencia de muestreo de 16 kilohercios, una relación señal a ruido de 90 decibelios y con un consumo energético de 500 mAh, y en mediciones reales, el consumo energético fue de 40 mAh en un periodo de una hora. El menor consumo en comparación es debido a que el sensor de la cámara no se usa en los algoritmos programados, ahorrando así más energía. Este dispositivo ha sido usado con anterioridad en otros estudios debido a las características de su cámara, como en sistemas de seguimiento de visión humana (Huang, Jiang, Kao, & Huang, 2013) o para mejorar sistemas de pantallas multitouch (Roth, Schmidt, & Guldenring, 2010). Sin embargo, en este trabajo se ha sacado ventaja del array de micrófonos, y no utilizando la parte de captura de imagen. La distancia existente entre los dos micrófonos más separados es de aproximadamente 62 milímetros, y los micrófonos situados en el centro están invertidos. Para la adquisición de audio se seleccionó la frecuencia de muestreo de 16 kilohercios y una profundidad de bit de 16 bits. El objetivo del dispositivo está puesto en los ruidos más presentes en las ciudades y más molestos para los ciudadanos, como el ruido de tráfico, el ruido producido por actividades humanas o por construcciones. Normalmente las frecuencias de estos ruidos tienen la parte con más energía en las bajas y medias frecuencias, reduciéndose su energía en frecuencias altas. La respuesta auditiva humana en altas frecuencias es menor que en medias y bajas, y además esta sensibilidad se reduce con la edad (Degeest, 2015). El micrófono usado en este diseño analiza el espectro acústico hasta los 8 kHz.
- 2) Con el objetivo de validar el micrófono antes de su instalación en el dispositivo acústico, se llevaron a cabo una serie de experimentos en los que se comparan las respuestas del array de micrófonos con un dispositivo de referencia, en este caso se usó un sonómetro integrado Rion NL-05 con una cápsula de micrófono de respuesta plana UC-52. Las pruebas fueron llevadas a cabo en una sala semianecoica usando un generador de señal por

software, un amplificador profesional y una fuente sonora dodecaédrica. Las pruebas llevadas a cabo fueron con el objetivo de analizar la linealidad y el rango dinámico del micrófono, así como para también analizar los diagramas de directividad del micrófono para distintas frecuencias. Una verificación del cálculo de niveles fue llevada a cabo antes y después de los experimentos. Las pruebas llevadas a cabo para estudiar la linealidad y el rango dinámico mostraron que el array de micrófonos tenía un rango dinámico de 60 decibelios y una respuesta bastante lineal en el rango desde 35 hasta 95 decibelios. En el estudio de la directividad del micrófono, se obtuvo que en bajas frecuencias el comportamiento es omnidireccional, volviéndose más direccional en cuanto al aumento de la frecuencia, como se puede observar en las figuras 45 y 46. El ajuste del array de dos micrófonos fue llevado a cabo usando el sistema operativo Raspbian y el componente para audio ALSA (Advanced Linux Sound Architecture), integrado. A través de los experimentos llevados a cabo en el laboratorio, el micrófono fue ajustado además en su respuesta en frecuencia y poder trabajar de una manera más lineal.

- 3) *El núcleo de procesamiento:* para el desarrollo del dispositivo acústico, y una vez seleccionado el sistema de adquisición de audio, la siguiente etapa es la de la selección del núcleo de procesamiento de los datos. En este caso, se ha seleccionado la plataforma Raspberry Pi en su modelo 3 B. Las características de esta placa incluyen entre otros, un procesador de 1,2 GHz Quad-Core a 64 bits, ARMv8, una memoria de 1 GB de RAM, 40 pines de entrada y salida de datos GPIO, 4 puertos USB, un puerto HDMI, un puerto Ethernet y de manera integrada un módulo de comunicación 802.11n WiFi, Bluetooth 4.1 y Bluetooth de baja energía (BLE). Todas estas características dan lugar a una plataforma versátil y potente que permiten el desarrollo de un dispositivo acústico real. Los puertos USB y GPIO son una solución que permite la conexión de dispositivos externos a la Raspberry Pi, como antenas WiFi para aumentar su rango, módulos de comunicaciones ZigBee, micrófonos, como el utilizado en este desarrollo, o para la conexión con otros dispositivos, como Arduino, que puede operar como actuador en una red de sensores.

Para la alimentación del dispositivo se ha instalado una batería de 20.000 mAh y un panel LCD de 4 pulgadas para la visualización y programación de los algoritmos, así como para el mantenimiento o actualizaciones del software. Todo el conjunto ha sido emplazado dentro de una caja estanca IP68 para su instalación en exteriores. En la figura 47 se puede observar el dispositivo abierto mostrando sus componentes.

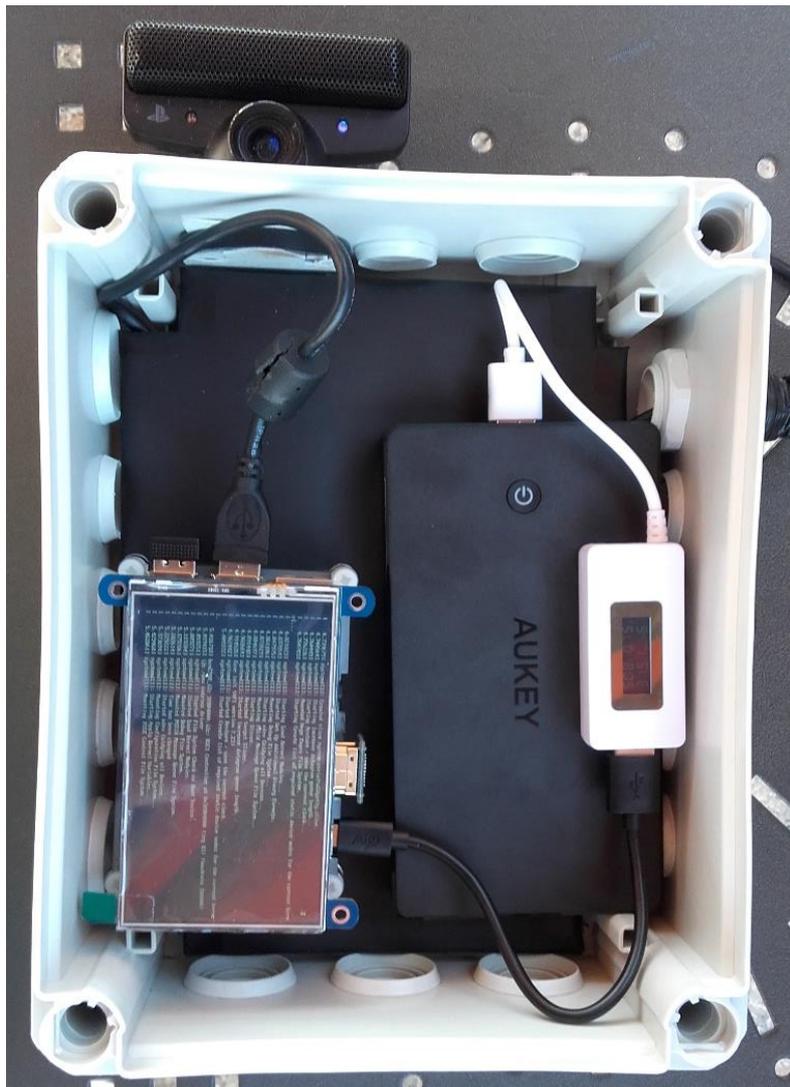


Figura 47. Foto del dispositivo acústico.

4.3.2.2 Software

La implementación de los algoritmos fue llevada a cabo en el lenguaje Python. Los procesos que involucran el programa consisten en cuatro partes: la adquisición de audio, la síntesis binaural y el cálculo de loudness, el cálculo de los parámetros acústicos ambientales y el envío de los resultados. Estos procesos funcionan de manera independiente, pero se comunican entre ellos internamente para asegurar el buen funcionamiento del programa en su conjunto.

El algoritmo consiste en, primero, se lleva a cabo una recopilación de segmentos de audio, de un segundo de duración, de los dos canales de entrada. Esto es realizado cada cinco segundos con una frecuencia de muestreo de 16 kilohercios y con una profundidad de bit de 16 bits. Las muestras de audio tienen una longitud de un segundo, y de ahí se lleva a cabo el cálculo de los parámetros acústicos L_p , L_{eq} y loudness binaural. Llegados a este punto, los trozos de audio toman dos direcciones distintas: en una se lleva a cabo la etapa de la síntesis de la señal binaural, y en la otra, se calculan los parámetros acústicos ambientales. Para el cálculo de los parámetros acústicos, se calcula una sola señal monofónica a partir de las entradas no procesadas de los dos canales de entrada del array de micrófonos. Esta señal resultante es la entrada para la etapa de filtrado y para la extracción de parámetros de toda la banda audible. De manera paralela, se lleva a cabo la síntesis binaural de las señales para, a continuación, proceder al cálculo del parámetro psicoacústico loudness binaural.

Al mirar en profundidad el análisis monofónico, primero, la señal vuelve a tomar dos caminos diferentes: hacia una etapa de filtrado y directamente hacia una etapa de cálculo de parámetros. Por un lado, una etapa de filtrado interna es llevada a cabo en la cual, el espectro de la señal se analiza. El software filtra el audio a través de un conjunto de filtros paso banda de tercio de octava y separa el espectro del sonido para el futuro análisis de los niveles de presión sonora por bandas. El conjunto de filtros abarca desde 25 hercios hasta 8.000 hercios. Por otra parte, el audio también es procesado sin una etapa previa de filtrado para un análisis en el todo el espectro de frecuencias que el dispositivo acústico es capaz de captar. Todos estos cálculos son llevados a cabo en la placa Raspberry Pi, de manera autónoma y sin necesidad de servidores u otros dispositivos, para, finalmente, enviar los

resultados a una plataforma de datos de dispositivos Internet-of-Things (IoT). De manera previa a la realización del cálculo de los parámetros acústicos, una etapa de filtrado usando un filtro de ponderación A se ejecuta, por tanto, todos los resultados salen ponderados en decibelios A. Los parámetros extraídos y calculados son el nivel de presión sonora instantánea L_p , el nivel de presión sonora equivalente L_{eq} , los percentiles L_{90} y L_{10} , los niveles máximos y mínimos L_{max} y L_{min} y los niveles de presión sonora para las bandas de tercio de octava. Con la extracción de estos parámetros, también se calculan los niveles equivalentes por hora y el parámetro L_{den} .

Una vez que se han extraído todos los parámetros, la última etapa es la del salvado de los datos y su envío a una plataforma de IoT. Gracias al uso de una placa computadora Raspberry Pi, existe la posibilidad de usar el chip WiFi integrado o la conectividad Ethernet para crear una red de varios dispositivos conectados a un router central a través del protocolo TCP/IP y, a partir de ahí, enlazarlo con una plataforma IoT. La plataforma IoT puede usar diferentes protocolos para enviar o recibir datos, como HTTP, Websockets, MQTT, CoAP, UDP o TCP. Para el caso del dispositivo desarrollado se ha seleccionado e implementado el protocolo HTTP a través de una API HTTP REST. La plataforma IoT ofrece esta API para crear los enlaces de comunicación entre los dispositivos y ella. La información es enviada usando un formato JSON, donde cada parámetro se describe con una palabra clave y un valor. El servicio en la nube permite además una representación gráfica de los datos almacenados. Se ha usado una librería Python para la implementación de las diferentes funciones necesarias para transmitir la información desde el nodo hasta la plataforma. Además, los datos obtenidos son guardados offline en la memoria interna del dispositivo. Se ha usado una tarjeta de memoria de 16 GB, permitiendo así almacenar suficiente información en caso de una desconexión de internet o en caso de querer usar el dispositivo de manera offline, sirviendo además como copia de seguridad de los datos en la nube.

4.3.3. Conclusiones

En este apartado se ha llevado a cabo la descripción del diseño de un sensor con array acústico para la evaluación del loudness binaural. En el pasado, el interés en el parámetro loudness y la información que podría ofrecer para los estudios de ambientes sonoros ha sido estudiado. Sin embargo, el sistema auditivo humano es binaural, por lo tanto, el estudio del parámetro loudness en su forma binaural parece ser más apropiado que usarlo de manera monoaural. Por esta razón, en este apartado se ha propuesto un sistema de adquisición de sonido a través de un array de dos micrófonos.

A continuación, un proceso de síntesis binaural a partir de las señales de entrada ha sido diseñado e implementado, para obtener una señal binaural. La plataforma Raspberry Pi ha demostrado ser una herramienta de utilidad a la hora de poder gestionar la adquisición del audio y el procesado de los distintos parámetros, así como sus posibilidades de conectividad han permitido la conexión con un servicio en la nube para IoT. Finalmente, un modelo binaural de loudness ha sido implementado para los cálculos. La creación de un dispositivo autónomo y avanzado para el cálculo de un parámetro psicoacústico binauralmente, sintetizando para ello una señal binaural a partir de la entrada de un array de dos micrófonos, ha sido descrito y llevado a la implementación en este apartado. Finalmente, en el capítulo 5 se muestran pruebas llevadas a cabo usando este dispositivo, y la valoración y comparación de sus resultados.

4.4 RESUMEN

En este capítulo se ha descrito la creación de un dispositivo acústico con el propósito de la evaluación de ruido ambiental. A través de los apartados se ha mostrado en una primera parte, un dispositivo monofónico de bajo coste para el cálculo de parámetros de acústica ambiental. En la segunda parte del capítulo, se muestra la una evolución de este dispositivo conectado, a un diseño más avanzado en el cual la captura se lleva a cabo a través de un array de micrófonos para, mediante un algoritmo de síntesis de señal binaural, calcular el parámetro psicoacústico loudness binaural. Esto es planteado e implementado debido a que, dada la naturaleza binaural del sistema auditivo humano, esta manera del cálculo

de loudness parece más razonable al intentar aproximar la respuesta que las personas tienen ante la molestia acústica.

El uso y la evaluación del dispositivo diseñado y creado en este apartado es evaluado en el siguiente capítulo a través de una serie de experimentos. Éstos han sido diseñados para probar el dispositivo en distintos campos de la acústica, además de para la comparación de los niveles de loudness binaural con las respuestas subjetivas de personas reales.

**V - USOS Y EVALUACIÓN
DEL DISPOSITIVO
ACÚSTICO CONECTADO
PARA LA EVALUACIÓN DE
LA MOLESTIA DEL RUIDO**

V - USOS Y EVALUACIÓN DEL DISPOSITIVO ACÚSTICO CONECTADO PARA LA EVALUACIÓN DE LA MOLESTIA DEL RUIDO

5.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se ha propuesto un dispositivo acústico conectado que es capaz de evaluar la molestia de ruido a través de un parámetro psicoacústico, y usando una señal binaural sintetizada a partir de dos señales monofónicas provenientes de un array de dos micrófonos. Este capítulo está enfocado en la realización de experimentos, con el dispositivo desarrollado anteriormente, en entornos reales, los cuales han sido evaluados usando el dispositivo. Se han llevado a cabo la evaluación del aislamiento en un edificio y de manera adicional, se ha realizado una serie de experimentos para valorar cómo estaría afectado el parámetro loudness en su modelo binaural por las características acústicas de una sala a la hora de ser calculado en entornos interiores. Finalmente, se ha usado un dispositivo en un entorno urbano para la evaluación de la molestia acústica, comparando los resultados calculados con respuestas de personas encuestadas sobre ruido y molestia en el área de medición.

El capítulo está organizado de la siguiente manera: en el apartado 5.2 se lleva a cabo un experimento con dos nodos acústicos, uno en el interior de una vivienda y otro en el exterior, con el propósito de la monitorización del aislamiento a ruido aéreo de su fachada, así como para la evaluación de eventos sonoros concretos. El apartado 5.3 estudia la influencia de la difusión en una sala, al variar las características acústicas de los materiales de ésta, en el parámetro loudness, tanto monoaural como binauralmente. Finalmente, en el apartado 5.4 se muestra un experimento en el que se ha usado el dispositivo acústico desarrollado para la evaluación de la molestia acústica en un ambiente sonoro de un entorno urbano, y se comparan los cálculos con las respuestas de una serie de encuestas sobre los niveles de molestia acústica llevadas a cabo en el área del experimento.

5.2 USO DE REDES DE SENSORES ACÚSTICOS INALÁMBRICAS PARA LA MONITORIZACIÓN DEL AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO EN UN EDIFICIO

Parte de los desarrollos descritos en este apartado han sido publicados en las actas del 45º Congreso Español de Acústica, el 8º Congreso Ibérico de Acústica y el Simposio Europeo sobre Ciudades Inteligentes y Acústica Ambiental (Noriega-Linares J. E., Navarro, Felici, & Segura, 2014) y fueron presentados oralmente en dicho congreso.

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

En este estudio, se han usado los equipos descritos en el apartado 4.2 enfocando el objetivo en la medición del ruido, concretamente en el ruido de tráfico. Se propone el uso de esta particularización de las redes de sensores inalámbricas con sensores acústicos, para la creación de un sistema para la captación de la señal de audio y la evaluación, entre otros parámetros, del aislamiento acústico a ruido aéreo de fachadas y la molestia. A través de mediciones paralelas de 24 horas, tanto dentro como fuera del recinto de manera simultánea, es posible realizar análisis estadísticos avanzados de parámetros, tanto de contaminación acústica como de aislamientos.

El objetivo de esta experimentación es evaluar la viabilidad de este método de monitorización del aislamiento y analizar los resultados obtenidos para comprobar si muestran que este método con el uso de redes de sensores inalámbricas puede contribuir a aportar datos complementarios a los conseguidos mediante métodos normalizados. También se lleva a cabo el estudio de un evento particular en términos de molestia acústica, usando para ello parámetros psicoacústicos. Los resultados obtenidos muestran que este método de evaluación

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

Este apartado se estructura comenzando por la presentación de la metodología del experimento realizado para las mediciones, material utilizado, descripción del experimento, un apartado para el análisis de los resultados en el cual se exponen los parámetros a analizar, así como el estudio de un caso particular, y por último se presentan las conclusiones.

5.2.1 Descripción del experimento realizado

La prueba experimental realizada ha consistido en la medición simultánea del ambiente sonoro a través de dos nodos captadores durante un período de 24 horas. Dichos nodos se encontraban uno en el interior de una vivienda y el otro en la fachada de ésta, frente a una avenida transitada con circulación de vehículos en ambos sentidos.

El emplazamiento de las mediciones estuvo localizado en un edificio residencial, en una vivienda en la quinta planta. El edificio está situado frente a una avenida principal de 20 metros de anchura, transitada por vehículos privados y autobuses, con circulación en ambos sentidos y dos paradas de autobuses, una en cada carril. Las mediciones dieron comienzo a las 20:07 del 9 de julio de 2014, y se llevaron a cabo durante un período ininterrumpido de 24 horas.

En el interior de la vivienda, el nodo de captación fue situado a dos metros del cerramiento de la fachada y a dos metros de una de las paredes laterales. El nodo exterior fue situado a una distancia de un metro y medio de la fachada. El cerramiento separador entre ambos nodos tiene tres ventanas.

Los materiales usados para llevar a cabo el experimento consistieron en dos micrófonos Behringer ECM8000, un calibrador acústico Rion NC-74 para la calibración previa del sistema, y una tarjeta de sonido Alesis IO2 conectada a un ordenador portátil para la realización de las grabaciones. El software usado para las grabaciones del audio fue Audacity. Los parámetros para la grabación fueron: una frecuencia de muestreo de 48 kilohercios y una resolución de 16 bits. Las grabaciones fueron realizadas en un solo canal.

Para el análisis de los datos adquiridos se ha utilizado Matlab para la creación de una serie de algoritmos para el cálculo de los parámetros acústicos a analizar a partir del audio grabado. El código creado separa el audio en bloques de 10 segundos para, posteriormente, analizarlo y extraer de él los distintos parámetros acústicos. Para el cálculo del aislamiento de la fachada, se han calculado las diferencias de nivel entre los nodos interior y exterior.

Los parámetros acústicos calculados fueron: nivel de presión sonora equivalente (L_{eq} (dB)), nivel de presión sonora máxima (L_{max} (dB)), nivel de presión sonora instantáneo (L (dB)) y nivel de presión sonora por tercio de octava, desde 25 hercios hasta 12500 hercios. Adicionalmente, se calcularon algunos parámetros psicoacústicos para poder evaluar la molestia de un evento sonoro en los habitantes de la vivienda. Éstos son: entre loudness (sonos), specific loudness (sonos/Bark) y sharpness (acum). Para el cálculo del aislamiento de la fachada, el parámetro fue el de la diferencia de niveles estandarizada ($D_{2m,nT}$) y los términos de adaptación espectral a ruido rosa y ruido de tráfico (C ; C_{tr}).

El parámetro loudness (sonoridad) en sus variantes entre loudness y specific loudness se usa para evaluar la energía acústica contenida en un sonido, y cómo la percibe el sistema auditivo humano. El modelo usado para el cálculo del parámetro loudness en este experimento sigue el modelo de Zwicker (Zwicker & Fastl, Psychoacoustics: Facts and models, 1990), el cual está implementado en la norma estandarizada ISO 532B (ISO532, 1975). Para el cálculo, se calcula el loudness específico para cada banda crítica y posteriormente se integra para conseguir el loudness total.

El segundo parámetro psicoacústico utilizado para la evaluación de la molestia es el parámetro sharpness (agudeza). Este parámetro trata de evaluar la sensación acústica resultante de medir las componentes de alta frecuencia de un sonido. El nivel de sharpness aumenta en cuanto a mayores componentes de alta frecuencia tenga el sonido. La unidad es el acum. 1 acum es resultante a un tono de banda estrecha de frecuencia central de 1 kilohercio con un ancho de banda inferior a 150 hercios y con un nivel de presión sonora de 60 decibelios.

5.2.2 Resultados del experimento

Para el estudio de los datos adquiridos se han realizado dos análisis distintos, uno que abarca la medición del aislamiento de la fachada, y otro para los niveles de presión sonora en distintas frecuencias durante el período de análisis seleccionado. Para ello, se ha analizado el audio capturado, con una calibración previa, y se ha estudiado la evolución temporal del sonido a lo largo de toda la medición para seleccionar de manera manual la franja horaria que proporcione los resultados más óptimos en el cálculo del aislamiento.

En la medición de aislamiento de fachada a ruido aéreo se usa un procedimiento por el cual se usan mediciones de larga duración. En este caso, se ha tenido que tener en cuenta la variabilidad de los niveles de sonido en el nodo interior, ya que, al ser una grabación desatendida, en ciertos momentos en los cuales los habitantes se encontraban en el interior de la vivienda se han podido producir variación en los niveles interiores. Los niveles usados para el cálculo del aislamiento han sido por tanto los niveles detectados más uniformes sin variabilidad en el tiempo, así como los máximos exteriores necesarios para el correcto cálculo del aislamiento, siguiendo las condiciones estándar de medida, frente a ruido de tráfico.

En el caso experimentado, para el análisis del aislamiento de la fachada, se ha escogido el período de tiempo comprendido entre las 10:03:30 y las 13:03:30, teniendo como duración total una muestra de 3 horas. Esta franja temporal ha sido elegida debido a que los niveles presentes en el nodo interior eran los mínimos y más uniformes en el tiempo y el nivel en el nodo exterior era óptimo debido al nivel de tráfico y sus emisiones sonoras. Esto puede ser observado en la figura 1. Los distintos niveles de presión sonora a lo largo de este período han sido promediados para eliminar posibles resultados erróneos, producidos por picos de nivel o períodos de silencio.

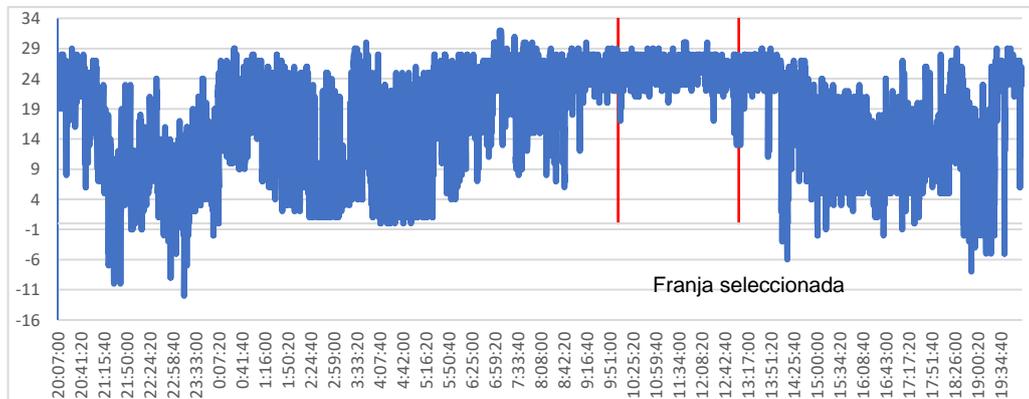


Figura 48. Diferencia de niveles estandarizada en bloques de 10 segundos

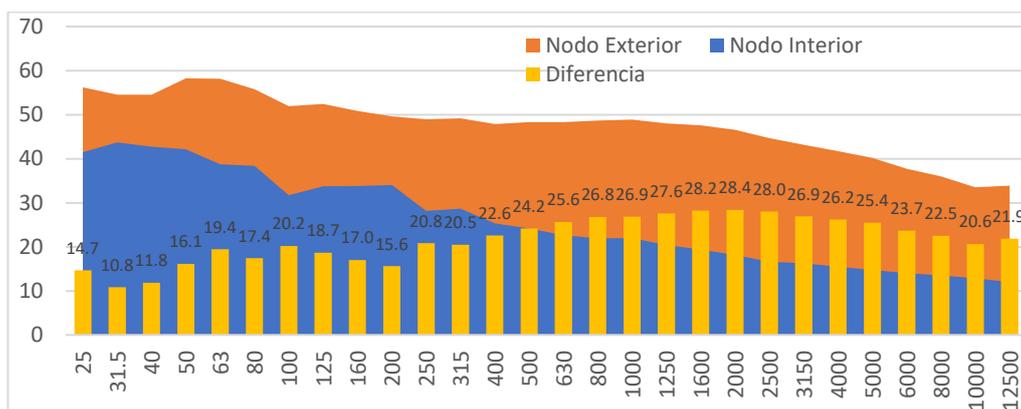


Figura 49. Media de SPL por tercio de octava desde las 10:03:30 a 13:03:30 en el nodo interior y exterior y diferencia media de niveles.

En la figura 48, está representada la evolución temporal de la diferencia de niveles entre los nodos interior y exterior. El período seleccionado está indicado en la figura, en la que se puede observar que es el período de menor variación para esta diferencia de niveles. En un análisis frecuencial del período de tiempo seleccionado, figura 49, se observa que la mayor diferencia de niveles se da a partir de la banda de 250 hercios, y es en las bajas frecuencias donde existe una frecuencia menor, es decir, en donde el aislamiento de la fachada es menos efectivo. Los resultados del parámetro de aislamiento, $D_{2m,nT}$, y de los parámetros de adaptación espectral, C y C_{tr} , para el periodo de tiempo escogido, resultan en: $D_{2m,nT,w}$ (C ; C_{tr}) = 26 (-1; -3) dB.

5.2.3 Estudio de molestia acústica en un evento

En este apartado se describe el análisis de un evento sonoro sucedido durante el periodo nocturno, durante cinco minutos, desde las 03:30 hasta las 03:35. En este periodo nocturno estarían penalizados en 10 decibelios los niveles adquiridos. Para un análisis más subjetivo de este evento se llevan a cabo el cálculo de dos parámetros psicoacústicos: loudness y sharpness. La fuente de ruido en este caso fue el ruido generado por un camión de la flota de recogida de basuras del municipio donde se realizó la medición. En la figura 50 se muestran los niveles de presión sonora para los nodos interior y exterior, así como los picos máximos que se registraron en ese periodo. La diferencia de niveles entre el interior y el exterior de la vivienda es debida al aislamiento de la fachada.

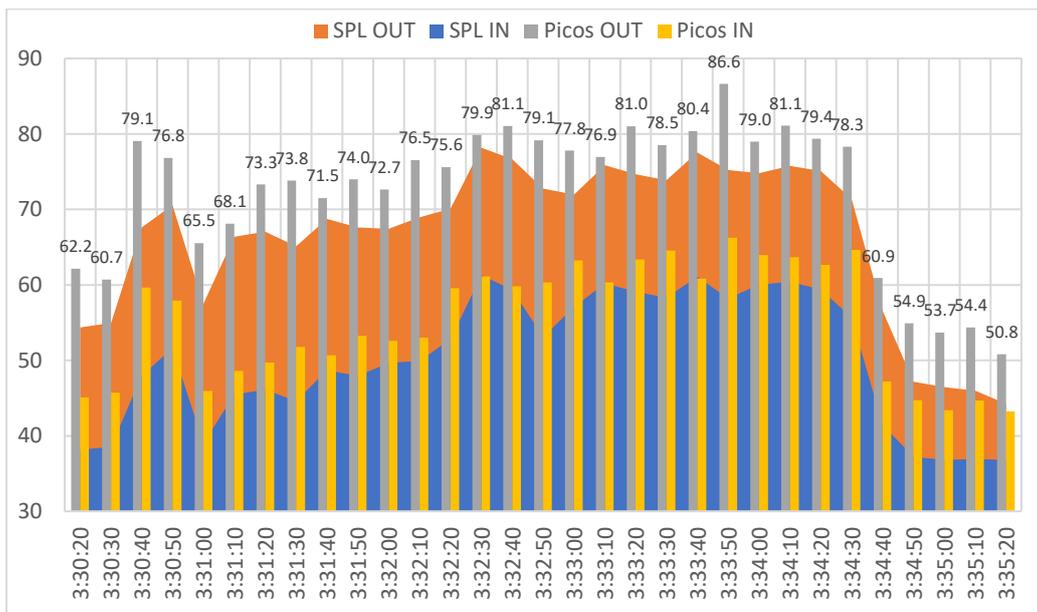


Figura 50. Evolución temporal de los niveles de presión sonora (SPL) en los nodos interior y exterior, así como los picos registrados.

Debido a la naturaleza de la fuente sonora, fundamentalmente ruido de motores, las frecuencias predominantes se encuentran en la zona de bajas frecuencias. En la figura 51 se muestra el espectro para la señal total de los cinco minutos que duró el evento analizado. Los niveles de presión sonora en las bajas y medias frecuencias (hasta la banda de 2500 hercios) predominaron frente a las altas

en el nodo exterior. En el nodo interior hay una atenuación a partir de los 200 hercios debido al efecto de la fachada. El pico en la banda de los 50 hercios es debido probablemente a la frecuencia más dominante generada por el ruido del camión.

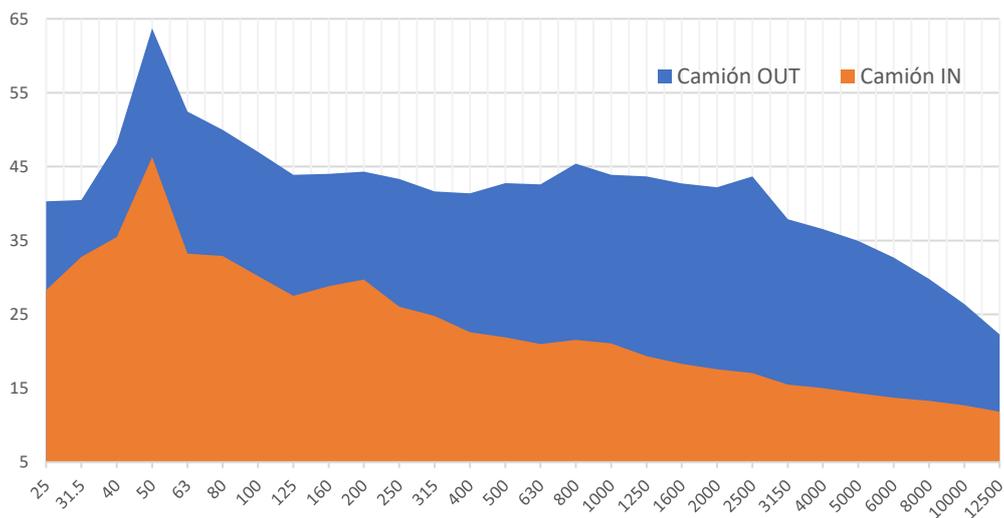


Figura 51. Espectro de la media de los niveles de presión sonora durante la duración del evento del camión en los nodos interior y exterior.

En el aspecto del análisis psicoacústico a través del cálculo de los parámetros loudness y sharpness, en las figuras 51 y 52 se representa la evolución temporal de los parámetros psicoacústicos para el evento. En la figura 51 se puede observar la diferencia entre los niveles interior y exterior de loudness, y esta diferencia es debida principalmente al aislamiento de la fachada. Los niveles interiores de loudness, de 18 sonos, son de un orden casi nueve veces menor en el momento del pico de nivel de presión sonora, que fue de 86.6 decibelios, con respecto a los niveles interiores de loudness, de 3 sonos, con un nivel de presión sonora de 66 decibelios.

Usando como comparativa los niveles aproximados equivalentes de loudness para distintas fuentes sonoras de la tabla 6, se puede observar que los sonos correspondientes a las mediciones del nodo exterior se encontrarían en la misma escala que una carretera principal a 10 metros de distancia. Sin embargo, los niveles interiores no alcanzan picos mayores de 3 sonos, siendo este nivel equivalente al de una conversación normal a un metro de distancia. En la figura 52 se muestran

los valores de sharpness en acum en función del tiempo para la duración del evento.

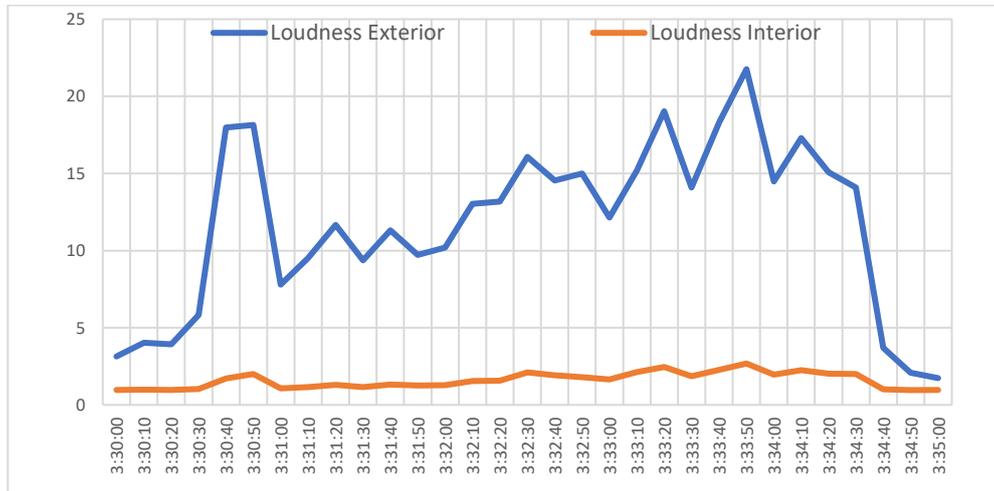


Figura 51. Niveles de loudness en los nodos interior y exterior durante el evento.

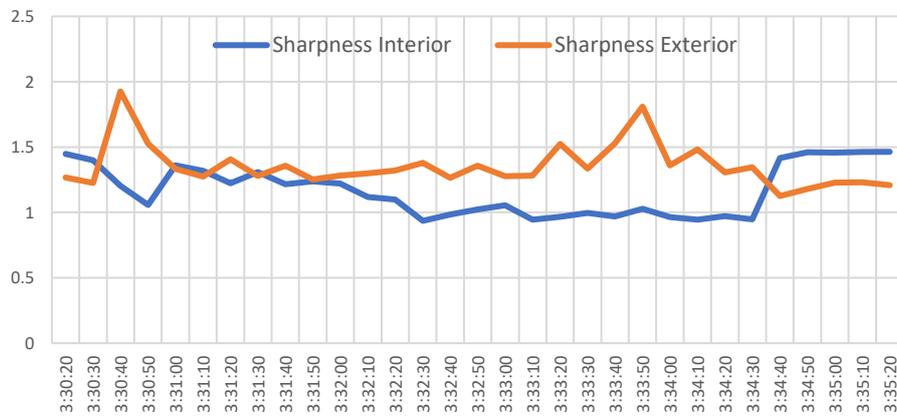


Figura 52. Niveles de sharpness en los nodos interior y exterior durante el evento.

5.2.4 Conclusiones del experimento

En este apartado se ha evaluado la utilización de un dispositivo acústico para la evaluación del ruido. En concreto, se han evaluado el aislamiento de una fachada, la diferencia de niveles estandarizada y los parámetros psicoacústicos loudness y sharpness para un evento acústico concreto.

El experimento realizado ha conestado en una medición de duración 24 horas usando dos nodos acústicos, uno en el interior de una vivienda y otro en el lado exterior de fachada del mismo. Debido a que el ruido en una ciudad ofrece poca estabilidad temporal, el uso de mediciones continuas de larga duración y además desatendidas, se presenta la ventaja del uso de este tipo de sistemas en cuanto a que de esta manera se puede escoger los mejores intervalos temporales para el cálculo de parámetros de aislamiento. Las fluctuaciones del ruido urbano se pueden evitar tomando medias de periodos más estables de los niveles interiores y exteriores para el cálculo del aislamiento.

La captación del audio en alta calidad proporciona la posibilidad de llevar a cabo cálculo de parámetros más avanzados, al no haber pérdidas en su captura, como por ejemplo para el análisis de la molestia acústica usando parámetros psicoacústicos como loudness y sharpness. Con la captura de larga duración se pueden detectar eventos concretos de gran molestia aun a pesar de darse en intervalos de tiempo breves.

5.3 INFLUENCIA DE LA DIFUSIÓN EN EL PARÁMETRO DE MOLESTIA LOUDNESS

Parte del contenido presentado en este apartado fue publicado en las actas del Congreso Internacional EuroRegio 2016, celebrado entre el 13 y el 15 de junio de 2016 en la ciudad de Oporto, Portugal, con el título “On the Relation of Room Acoustic Diffusion over Binaural Loudness” (Noriega-Linares & Navarro, On the Relation of Room Acoustic Diffusion over Binaural Loudness, 2016).

La evaluación de la molestia en interiores es un tema de importancia en la acústica de salas. Las características de los materiales de una sala, la absorción y el scattering, afectan a la sonoridad percibida por un oyente dentro de la sala. En este apartado se estudia la relación entre la difusión de una sala y cómo ésta afecta a la percepción del parámetro loudness de manera binaural.

Para estudiar este tema se han realizado distintos experimentos simulando diferentes salas y modificando sus características acústicas, en concreto, los coeficientes de absorción y scattering, para posteriormente extraer la respuesta binaural de cada receptor y para cada combinación de parámetros. Una vez extraída la respuesta para cada canal auditivo, se calcula el nivel de loudness y se realiza la suma binaural. Los resultados muestran que la difusión de una sala afecta al nivel percibido binaural de loudness, así como también es dependiente de la posición del oyente en la sala, situándose más próximo o más lejos de los cerramientos.

En la psicoacústica, uno de los objetivos fundamentales es el traducir desde la forma de onda de un sonido hacia un dominio que pueda representar la respuesta de la percepción humana para ese sonido. El parámetro loudness es la correlación fisiológica de un nivel de presión sonora, es decir, la intensidad percibida de un sonido (Fletcher & Munson, 1933). Esta transformación entre el nivel de presión sonora en decibelios y su sonoridad percibida, descrita por el loudness, se ha llevado a cabo con varios modelos de loudness (Moore, Glasberg, & Baer, A model for the prediction of thresholds, loudness and partial loudness, 1997), (Zwicker & Fastl, Psychoacoustics: Facts and models, 1990), (Stevens, The measurement of loudness, 1955). Basándose en esos modelos, también existe un estándar ISO (ISO532, 1975).

Estos modelos para calcular el loudness a partir de medidas acústicas se extraen normalmente a partir de una señal monofónica. El modelo estandarizado ISO 532 utiliza una señal monofónica capturada por un micrófono en ausencia de un oyente (Zwicker & Fastl, A portable loudness.meter based on ISO 532 B, 1983). Con el uso de una cabeza artificial y torso con micrófonos binaurales en ambas orejas, se puede caracterizar el efecto del torso y la cabeza alterando el sonido capturado (Sivonen, Directional loudness perception, 2006). La naturaleza binaural del sistema auditivo humano debe ser tomada en consideración a la hora de modelar la percepción de las personas. La comprensión de la percepción binaural del loudness es necesaria para numerosas aplicaciones, como, por ejemplo, para proyectos de audio inmersivo que utilizan la percepción humana del sonido para conseguir inmersión y realidad virtual auditiva (S3A Spatial Audio, 2016).

En los últimos años el auge de la psicoacústica y su relación con la acústica de salas no ha sido ampliamente estudiado. La difusividad de una sala puede verse afectada por las reflexiones en sus cerramientos (Hodgson, 1991) y la percepción del loudness en esos casos ha sido mencionado brevemente en otros trabajos (Damaske, 2008). En el interior de una sala, cuando una fuente sonora emite un sonido, éste se distribuye hasta que alcanza un cerramiento, chocando contra él. En este choque ocurren dos fenómenos: la reflexión del sonido contra esta superficie y la absorción por parte de ella. El mecanismo de reflexión está afectado por dos características principales de la superficie: su coeficiente de absorción y el nivel de scattering. La percepción direccional del parámetro loudness ha sido estudiada con anterioridad, pero no cómo las variaciones de las características acústicas de las superficies afectan a este parámetro. Esto podría ayudar en el diseño de salas para no solo estudiar la distribución del sonido en la sala, sino también para comprender cómo un oyente percibiría el sonido en un punto concreto con unas características particulares de las superficies de la sala.

El objetivo de este apartado es estudiar la relación existente entre el nivel de loudness binaural y la difusión de una sala. Esto se analiza a través de diversos experimentos en los cuales se han simulado salas con distintas topologías y distintas condiciones acústicas para, finalmente, extraer la respuesta binaural de un oyente en un punto concreto de la sala. Una vez obtenida esta respuesta se analizará el nivel de loudness binaural para cada punto, según el modelo de (Moore,

Glasberg, & Baer, A model for the prediction of thresholds, loudness and partial loudness, 1997). El apartado se organizará de la siguiente manera: primero se hará una revisión del modelo de loudness binaural utilizado, mostrando sus distintas fases. A continuación, se explica el proceso de la extracción de la respuesta al impulso binaural de la sala en un punto concreto. Finalmente, se describen los experimentos llevados a cabo se discuten los resultados obtenidos, presentando por último las conclusiones sobre éstos.

5.3.1 Experimentos

En este apartado se muestran los distintos experimentos llevados a cabo para comprobar los efectos de la difusión de una sala en la percepción del loudness binaural. Los experimentos incluyen la simulación de dos salas de distinta geometría, una cúbica y una sala rectangular paralelepípeda, y distintas configuraciones para los parámetros acústicos de sus superficies. Por último, se analiza el loudness binaural en distintas posiciones de escucha en los distintos casos.

Para obtener los sonidos que alcanzarían los oídos de un oyente en un lugar específico de la sala para una fuente sonora dada, se extraen las respuestas al impulso binaurales para cada posición de escucha en todas las combinaciones de los parámetros acústicos para cada sala. Una vez obtenida esta respuesta, se realiza la convolución con un sonido anecoico. Esta respuesta al impulso binaural es la respuesta al impulso que un oyente recibiría en cada oído, con una fuente emitiendo, y dependiendo también de la dirección hacia donde mirase el oyente. Esto se simula usando una función de transferencia de cabeza (Head Related Transfer Function, HRTF), aplicada a la respuesta al impulso calculada en un punto de la sala. Se han calculado las respuestas binaurales para todas las combinaciones de scattering y absorción en todos los puntos de escucha y para cada fuente sonora, y usándolas, se han medido los efectos de la difusión de la sala en su relación con el loudness binaural.

Primero se definen las salas con distintas geometrías. Para ello se ha usado el software Sketch Up y a través de un plugin específico, se han exportado los modelos para su análisis en el software de cálculo acústico Odeon. Usando este software se definen todas las distintas fuentes acústicas y todos los puntos de

recepción o escucha, cada uno con una orientación específica, en elevación y azimut, así como se definen también las distintas características acústicas de los materiales de las superficies de las salas. En este experimento se han modificado los valores de absorción y scattering. Finalmente, usando Odeon, se calculan las distintas respuestas al impulso binaurales de la sala en cada punto calculado para su posterior procesado en Matlab.

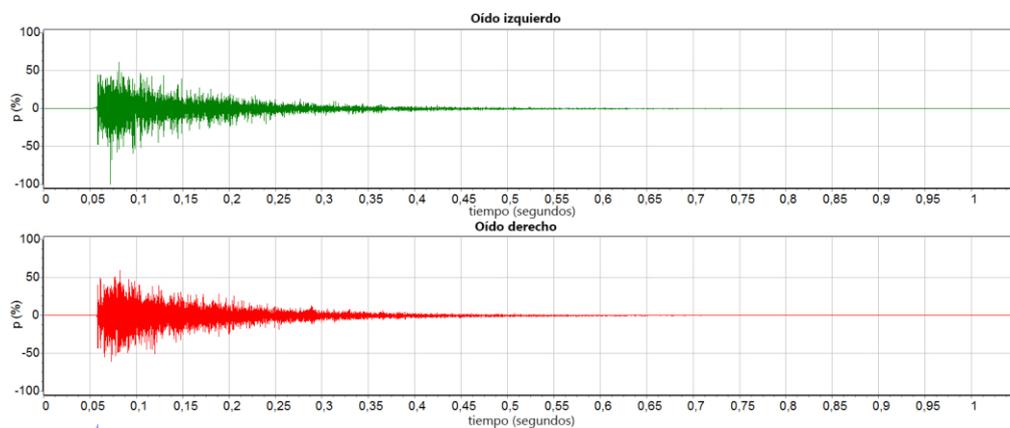


Figura 53. Resultados de las respuestas al impulso binaurales calculadas por el software Odeon.

Una etapa importante en el proceso de cálculo del parámetro loudness es la etapa de calibración. En Matlab, cuando se leen los archivos de audio wav, éstos aparecen normalizados para tener niveles de amplitud entre +1 y -1. La amplitud de la señal puede ser escalada para tener un cierto nivel de presión sonora. En este caso, la señal utilizada para analizar y convolucionar ha sido una señal senoidal de 40 decibelios y de 1 kHz. La elección de esta señal con este nivel de presión sonora se debe a que equivale a 1 sono (Figura 54).

La implementación en Matlab para el cálculo del loudness fue propuesta por (Schoenwiesner, 2002). El modelo auditivo se creó usando el toolbox HUTear (Härmä, 2000) para el cálculo de los patrones de excitación en los umbrales de audición por frecuencia y para la creación del patrón de excitación de la señal estímulo. El número de filtros usados fue de 128.

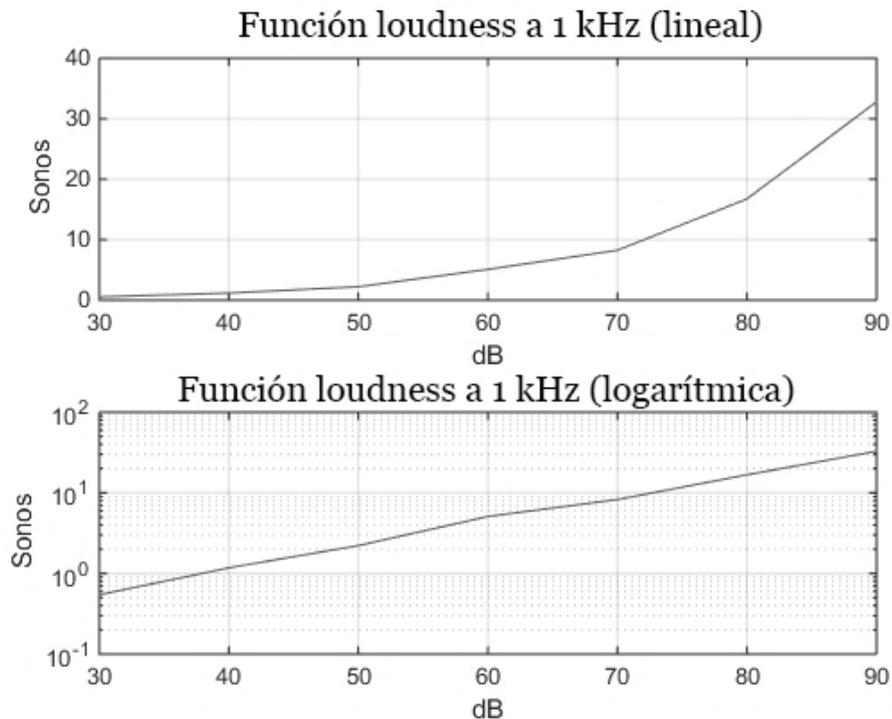


Figura 54. Loudness para un tono senoidal de 1 kHz a 40 dB en escala logarítmica y lineal.

5.3.1.1 Salas

Se definieron dos tipos distintos de sala, una cúbica y otra paralelepípeda, tipo “caja de zapatos”. Para cada una de ellas se definieron distintas fuentes y receptores. Todos los receptores se encontraban mirando en la dirección de la fuente activa en la simulación. Debido a la naturaleza binaural de la audición humana, la dirección a la que se encuentre mirando una cabeza y torso humano afecta a la señal recibida. Se ha usado la misma función HRTF para los distintos experimentos.

La primera sala es una sala paralelepípeda de 10 metros de longitud, por 7 metros de ancho y 3 de altura (Figura 55). Esta sala tiene una fuente en la posición

(.50; 1.50; 1.80) con un patrón de directividad omnidireccional. Se definieron tres receptores:

- a) Receptor 1 (6.50; 9.50; 2.50): equidistante a todas las superficies de la sala, a 0.5 metros, y en uno de los vértices de la habitación. En esta localización se espera que los efectos de las reflexiones sean notorios.
- b) Receptor 2 (3.50; 5.00; 1.50): este receptor está situado en el centro de la sala. Se encuentra cercano a la fuente y puede verse afectado por las reflexiones en superficies del techo y del suelo.
- c) Receptor 3 (1.00; 5.00; 1.25): se encuentra cerca de una pared y aproximadamente en la mitad del eje Z. Sus contribuciones serán principalmente las directas desde la fuente y de las reflexiones desde una de las paredes, el techo y el suelo.

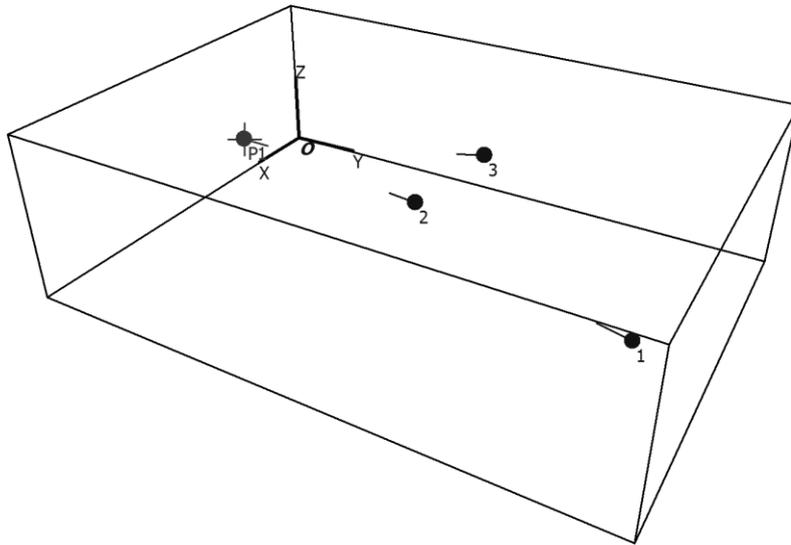


Figura 55. Sala “caja de zapatos”.

La segunda sala es una habitación de forma cúbica (Figura 56). Esta sala tiene todas sus superficies del mismo tamaño. Cada segmento de la sala mide 5 metros. En este caso se han definido dos fuentes sonoras, emitiendo no simultáneamente si no de manera alterna, ambas de ellas con un patrón omnidireccional.

- a) Fuente 1 (2.50; 2.50; 2.50): situada en el centro de la sala.
- b) Fuente 2 (4.00; 4.00; 4.00): situada en una esquina de la sala, próxima a los cerramientos.

Se han definido tres receptores:

- a) Receptor 1 (1.00; 1.00; 1.00): este receptor tiene contribuciones de las reflexiones de las paredes, debido a su posición en una de las esquinas de la sala.
- b) Receptor 2 (0.50; 0.50; 0.50): esta posición se encuentra más cerca de las paredes de la sala que el receptor 1, por tanto, las contribuciones de las reflexiones se espera que sean más altas que en el otro receptor.
- c) Receptor 3 (3.00; 3.00; 3.00): esta posición está casi en el centro de la sala.

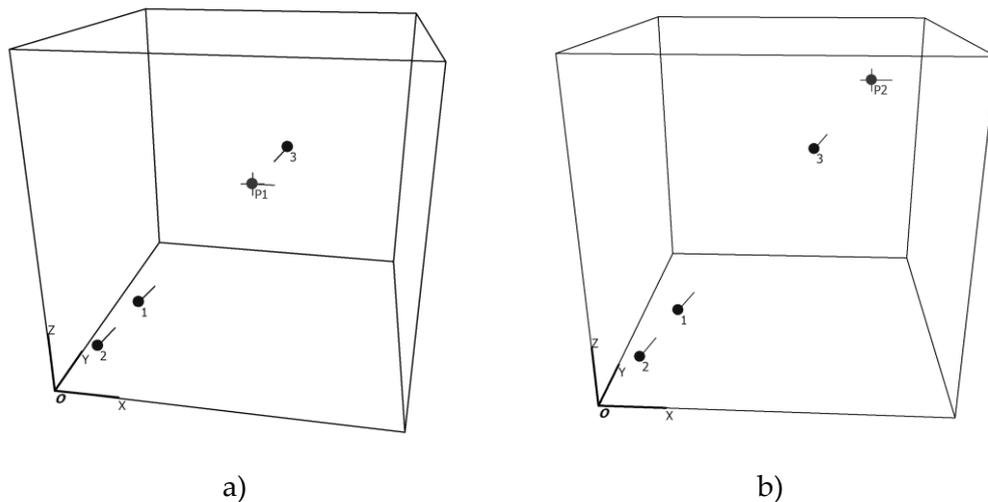


Figura 56. Sala cúbica. (a) Caso con la fuente 1 y los receptores apuntando hacia esa fuente. (b) Caso con la fuente activa 2.

5.3.1.2 Parámetros de acústica de salas

Los parámetros acústicos que se modificaron fueron los coeficientes de absorción y el coeficiente de scattering. Los cambios fueron realizados para todas las superficies y en cada caso ambos coeficientes eran los mismos para todas las superficies.

Los valores utilizados para el coeficiente de absorción fueron: $\alpha = 0,1$ y $\alpha = 0,2$. Para el coeficiente de scattering, los valores fueron desde 0,1 hasta 1 en saltos de 0,1. Además, se estudió el caso del valor 0.01 debido a su proximidad a 0, sin llegar a usar valor nulo ante resultados incoherentes por parte del software.

5.3.2 Resultados y discusión

5.3.2.1 Sala cúbica

Para esta geometría, los resultados monoaurales arrojaron resultados no adecuados para extraer unas conclusiones aceptables (Figuras 57 y 58). Por esta razón, en el caso de la sala cúbica y sus diferentes configuraciones para los parámetros acústicos y la fuente activa, la discusión de los resultados será llevada a cabo sólo para los resultados binaurales.

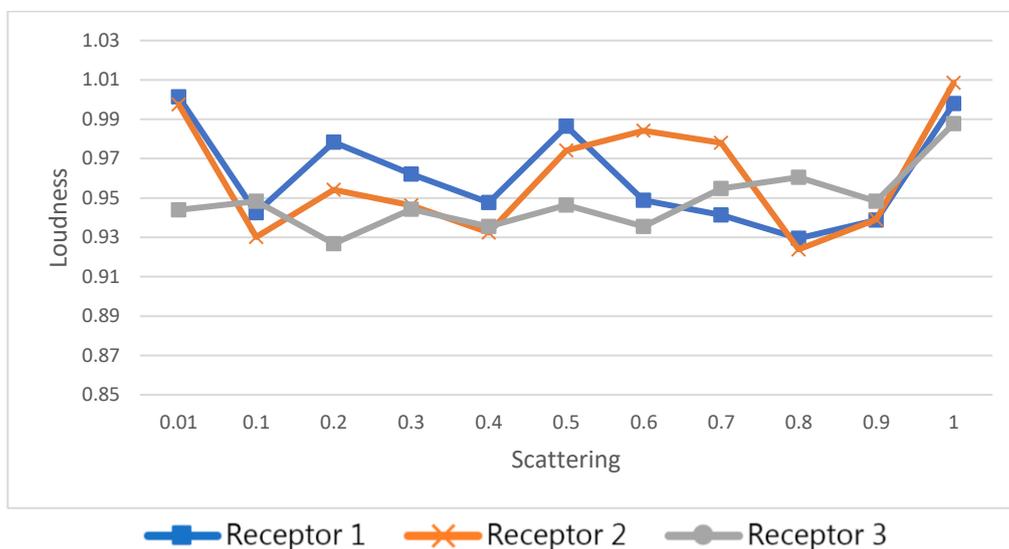


Figura 57. Evolución del loudness monoaural con el scattering para la fuente activa 1 y un coeficiente de absorción $\alpha=0,1$.

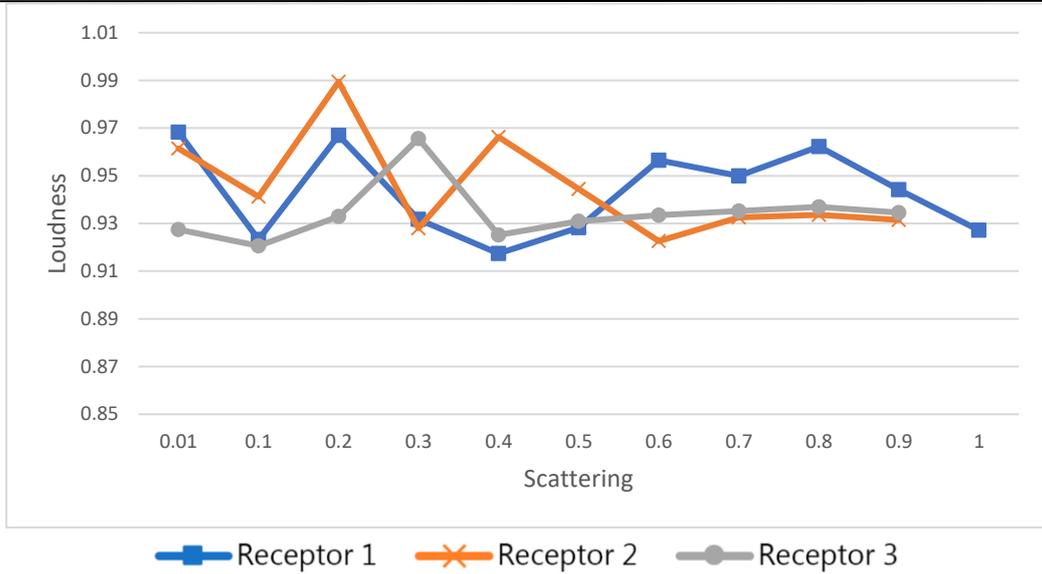


Figura 58. Evolución del loudness monoaural con el scattering para la fuente activa 1 y un coeficiente de absorción $\alpha=0,2$.

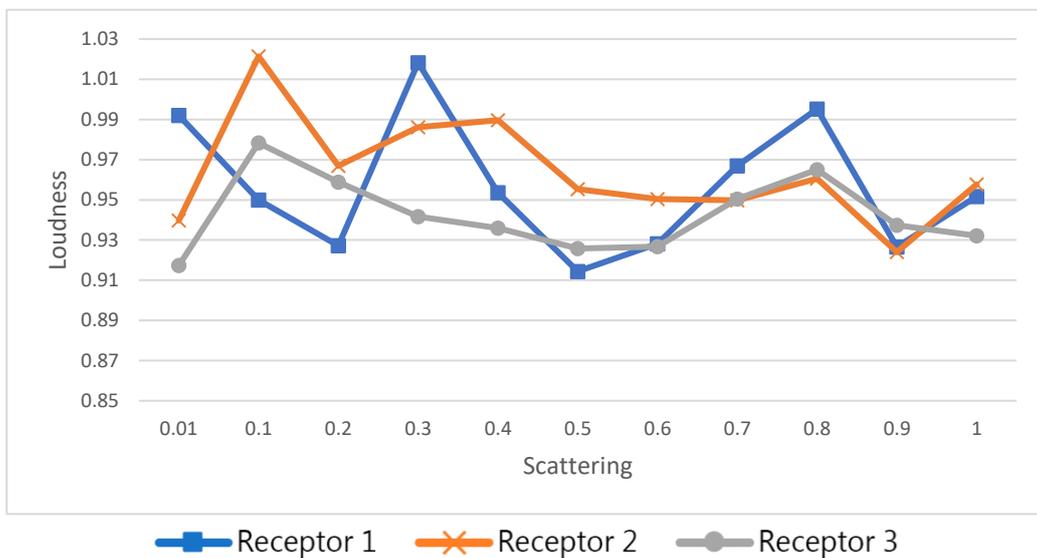


Figura 59. Evolución del loudness monoaural con el scattering para la fuente activa 2 y un coeficiente de absorción $\alpha=0,1$.

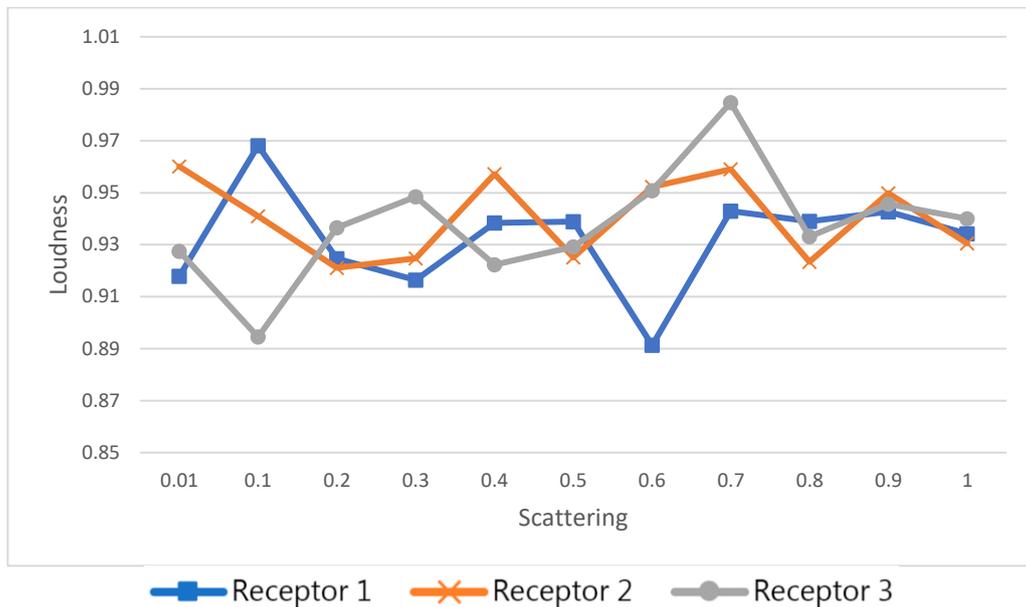


Figura 60. Evolución del loudness monoaural con el scattering para la fuente activa 2 y un coeficiente de absorción $\alpha=0,2$.

En los resultados binaurales (Figuras 59 y 60), la evolución de los niveles de loudness conforme se incrementa el factor de scattering es más notoria. En la figura 61, el receptor 1 y 2 aumentan conforme aumenta el nivel de scattering, pero sin embargo, el receptor 3 se mantiene casi constante para todos los valores de scattering y en los distintos casos de fuentes activas y valores de absorción. Esto es debido a su posición respecto a las paredes de la sala. En este tipo de geometrías, la distribución de la energía acústica en el centro de la sala es casi siempre constante y, por tanto, el nivel de loudness binaural calculado en ese punto se mantiene.

Sin embargo, para los receptores 1 y 2, el efecto de las contribuciones desde las paredes se hace notorio, y con diferencias entre los distintos valores de absorción. Conforme el nivel de scattering aumenta, el nivel de loudness también aumenta para todos los casos. Con un coeficiente de absorción bajo, $\alpha=0,1$, el nivel de loudness para el receptor 1 y 2, y para los casos de las dos fuentes, son muy similares hasta que el factor de scattering sobrepasa el valor de 0.3 (0.4 en el caso de $\alpha=0,1$, debido a la menor absorción de la sala y su campo más difuso), que es cuando el loudness en el receptor 2 aumenta sus valores por encima de los del receptor 1. Esto se debe a la gran proximidad a las paredes, y a sus contribuciones en ese punto. Para el receptor 1 es el mismo comportamiento, pero con menor

intensidad, ya que se encuentra más alejado que el receptor 2. El comportamiento de ambos receptores es muy similar para la fuente 2, con lo que se muestra que en salas con esta geometría, la posición de la fuente no es muy relevante para los niveles de loudness binaural finales.

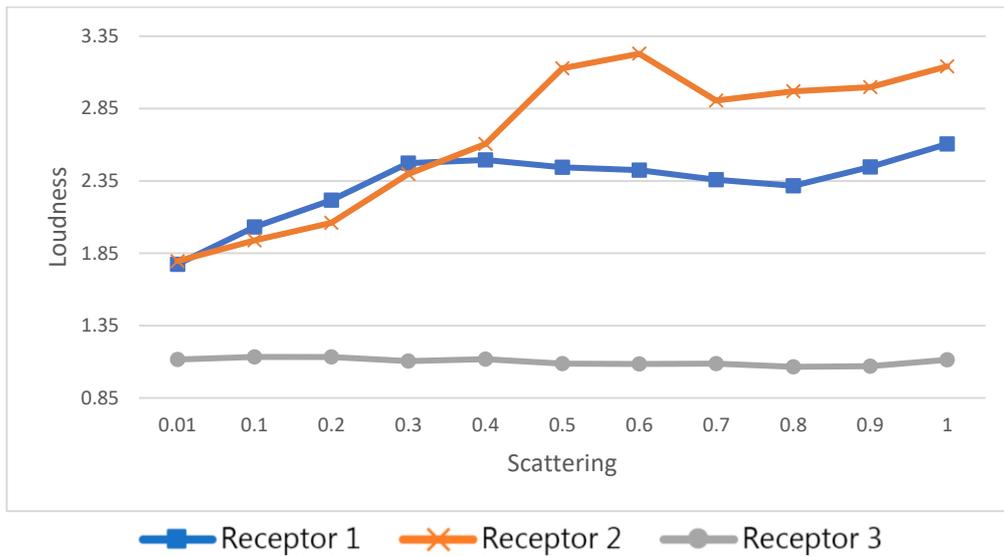


Figura 61. Evolución del loudness binaural con el scattering para la fuente activa 1 y un coeficiente de absorción $\alpha=0,1$.

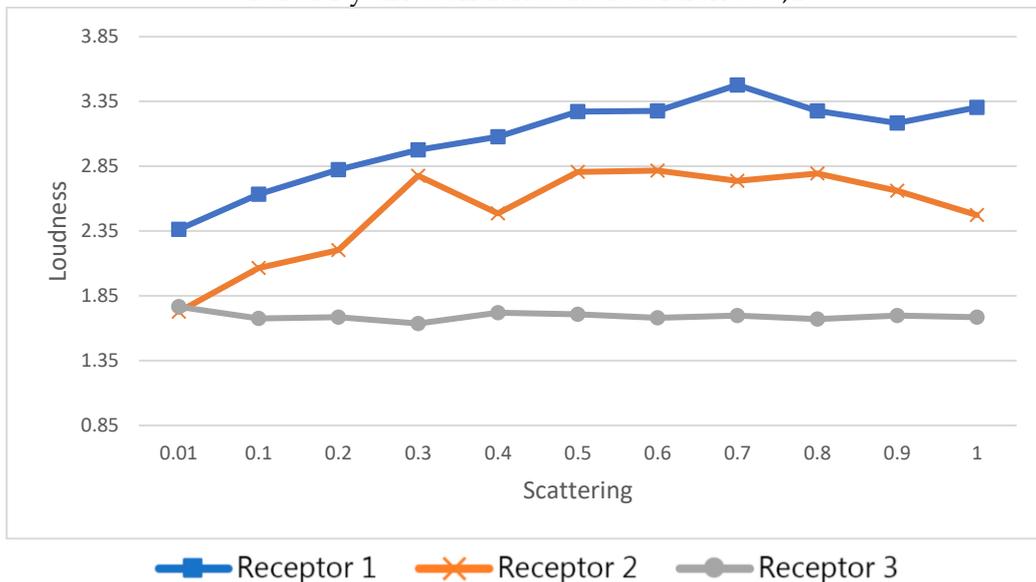


Figura 62. Evolución del loudness binaural con el scattering para la fuente activa 1 y un coeficiente de absorción $\alpha=0,2$.

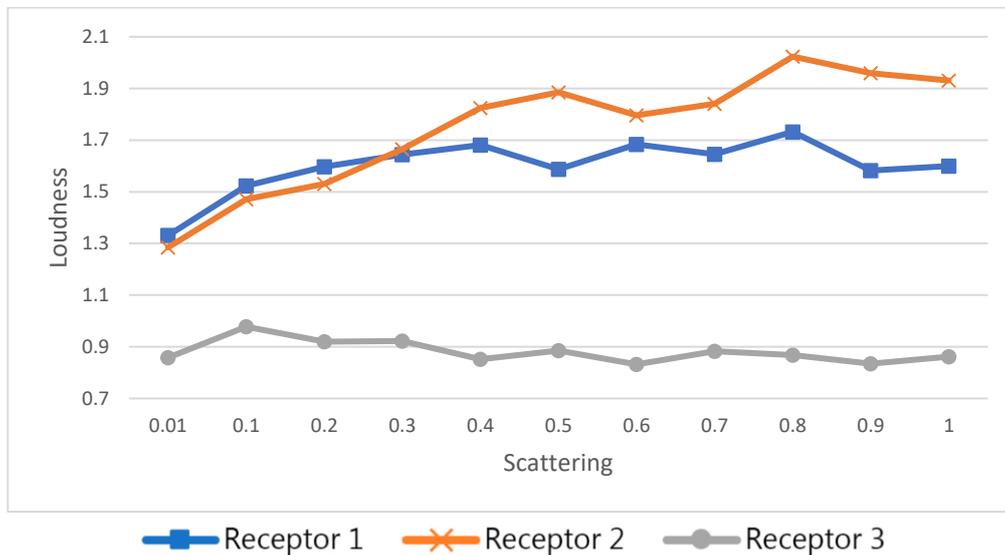


Figura 63. Evolución del loudness binaural con el scattering para la fuente activa 2 y un coeficiente de absorción $\alpha=0,1$.

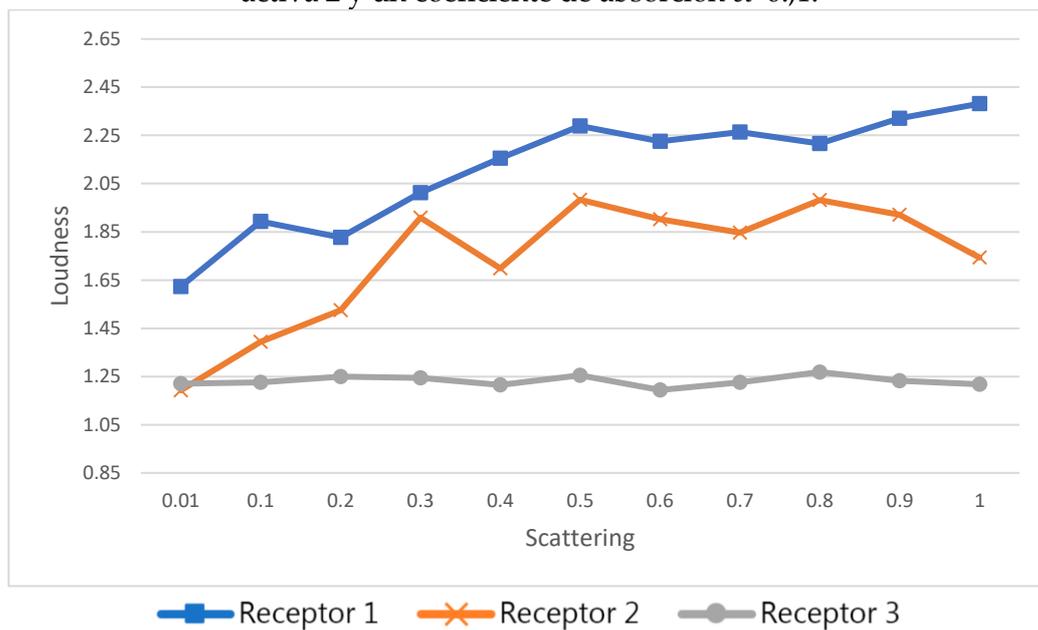


Figura 64 Evolución del loudness binaural con el scattering para la fuente activa 2 y un coeficiente de absorción $\alpha=0,2$.

Sin embargo, la tendencia cambia en los casos de la figura 62 y 64. El comportamiento de crecimiento se mantiene, pero los valores más altos corresponden en este caso al receptor 1. Esto es debido a los niveles más altos de absorción $\alpha=0,2$. En este caso, las contribuciones de las paredes son más bajas, y la

distribución de la energía acústica cerca del centro de la habitación aporta las contribuciones más altas, en vez de que ésta provenga de las paredes. Por tanto, la adición de la densidad de energía acústica del campo difuso con la contribución de las paredes es más alta que sólo en el caso de la contribución de las paredes.

5.3.2.2 Sala paralelepípeda

En un primer caso, se realiza el análisis de esta geometría usando el valor de absorción más bajo, $\alpha=0,1$. La evolución de los valores de loudness monoaural en este caso pueden verse en la figura 65. En esa figura, la tendencia del parámetro loudness en todos los receptores es decreciente.

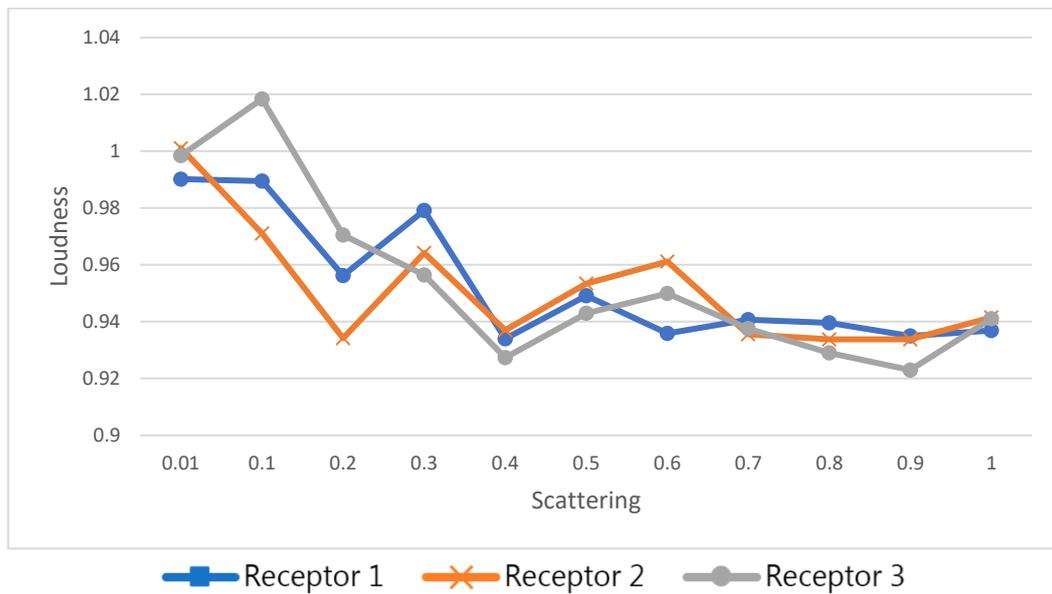


Figura 65. Evolución del loudness monoaural con el scattering para la sala paralelepípeda con el coeficiente de absorción $\alpha=0,1$.

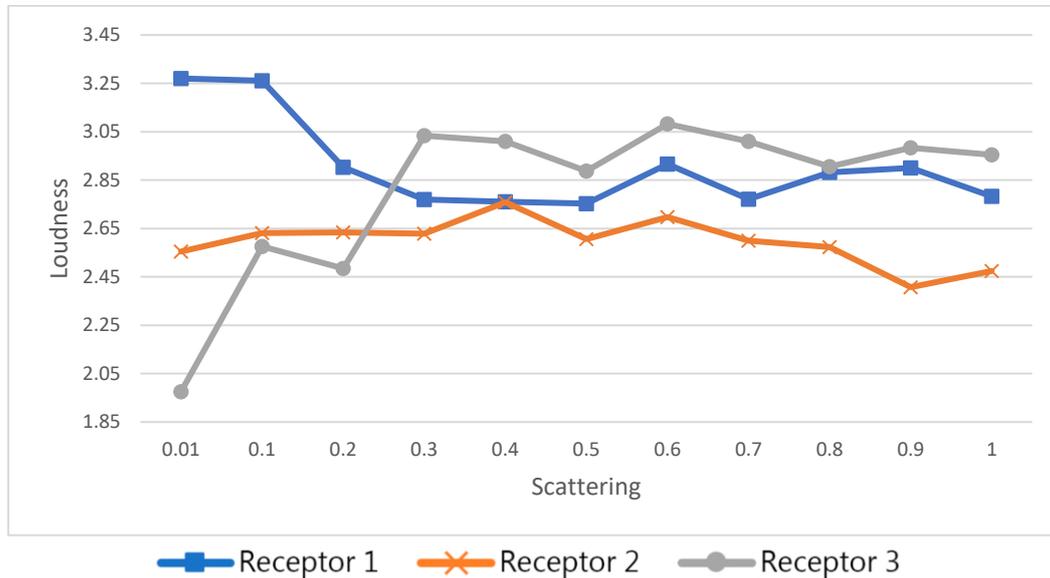


Figura 66. Evolución del loudness binaural con el scattering para la sala paralelepédica con el coeficiente de absorción $\alpha=0,1$.

Para los valores binaurales (Figura 66), la tendencia es de un ligero descenso en los receptores 1 y 2 y de un incremento en el 3 para la parte baja del scattering, llegando a unos niveles estables a partir de 0,3 de scattering. En el caso del valor de scattering de 0,01, es más notable el efecto de la posición del oyente en la sala para el nivel de loudness percibido. El receptor 1 tiene el valor más alto, el receptor 2 se encuentra en un valor intermedio y el 3 el más bajo. Esto es debido a que el receptor 1 se encuentra más cerca de los tres planos (XZ, ZY y XY) en la esquina de la sala, con tan solo 0,5 metros de distancia a cada pared, y por tanto recibe contribuciones más concentradas que los otros receptores. El receptor 2 se encuentra en el centro de la sala, y el sonido directo junto con las contribuciones de las reflexiones de todas las paredes hacen que este punto tenga unos valores intermedios. Sin embargo, el receptor 3 tiene los valores más bajos de loudness binaural. Una posible explicación para este fenómeno es que sólo tiene contribuciones principalmente de dos de las paredes (YZ y XY) debido a su cercanía, y que la distancia entre ese punto y el resto de las paredes hace que la concentración de energía en ese punto sea menor.

Finalmente, conforme el nivel de scattering aumenta y la difusividad de la sala aumenta, el nivel de loudness cambia. Para el receptor 2, el nivel de loudness se mantiene casi constante para todos los valores de scattering, debido a su

posición. Para el receptor 3, los niveles van aumentando en cuanto el grado de scattering es mayor, hasta 0,3, y desde ahí hasta el valor 1, los niveles se mantienen constantes. Esto es debido al aumento de la difusión de la habitación y al reparto más homogéneo de la energía acústica en la sala. En el receptor 1, los niveles de loudness decrecen hasta que el scattering alcanza 0,3, y desde ahí los valores se mantienen estables e intermedios entre los de los receptores 2 y 3. Una explicación para este caso es que las contribuciones de las paredes más cercanas aumentan los niveles de loudness, pero conforme se aumenta la distancia a la fuente, las contribuciones directas no son tan altas como en otros casos, y, por tanto, el nivel de loudness binaural se comporta de esa manera. Si la fuente se encontrase más cercana a este receptor, los niveles de loudness serían los más altos que los del resto de receptores. En la figura 67, se muestran los valores para los canales izquierdo y derecho de loudness para la sala en el caso de absorción $\alpha=0,1$.

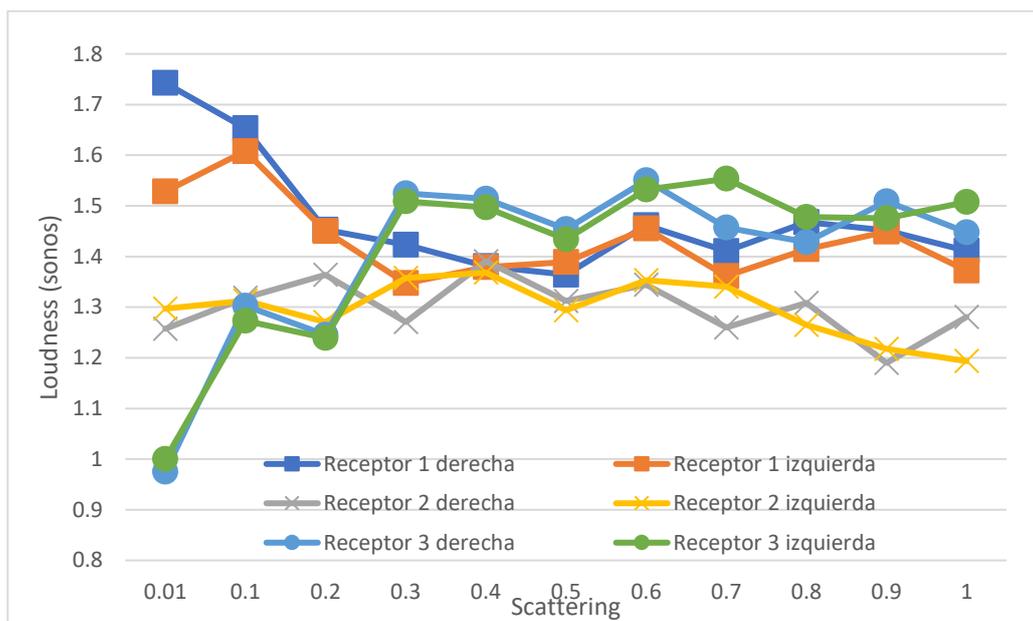


Figura 67. Valores de loudness para los canales izquierdo y derecho en el caso de la sala paralelepípeda con $\alpha=0,1$

En el caso de $\alpha=0,2$, en la figura 68, la evolución del loudness monoaural muestra una tendencia de aproximación de todos los valores de loudness de todos los receptores en los valores altos de scattering. En los valores intermedios, entre 0,2 y 0,5, la diferencia entre los receptores es mayor. Los valores del receptor 2 se

estabilizan antes que los de los otros receptores debido a su localización en el centro de la sala. El receptor 1 tiene unos niveles mayores debido a las contribuciones de las paredes más cercanas a él. Sin embargo, el receptor 3 tiene los valores más bajos, debido a las contribuciones más débiles de las paredes más cercanas a él y de la fuente. En bajos valores de scattering, los receptores 1 y 2 siguen el mismo patrón en la evolución de sus niveles de loudness, con valores altos en bajo scattering y con un descenso y estabilización conforme aumenta. El receptor 3 comienza con un valor inicial de loudness bajo, reduciéndose hasta que el scattering alcanza un valor de 0,6, cuando ya desde ahí empieza a haber una distribución más homogénea de la energía acústica en toda la sala, y por tanto niveles de loudness más estables.

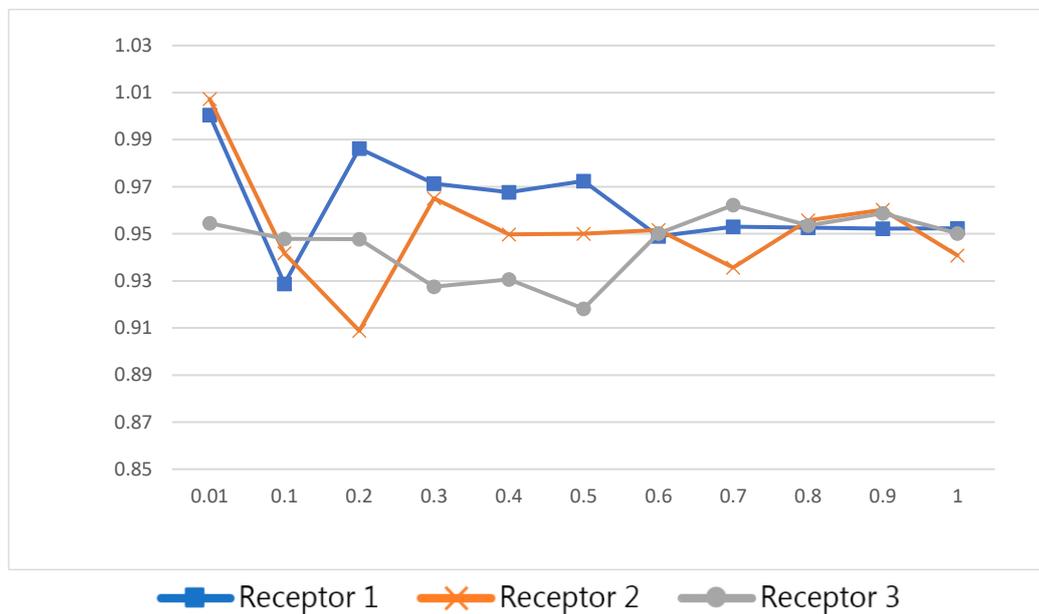


Figura 68. Evolución del loudness monoaural con el scattering para la sala paralelepípeda con el coeficiente de absorción $\alpha=0,2$.

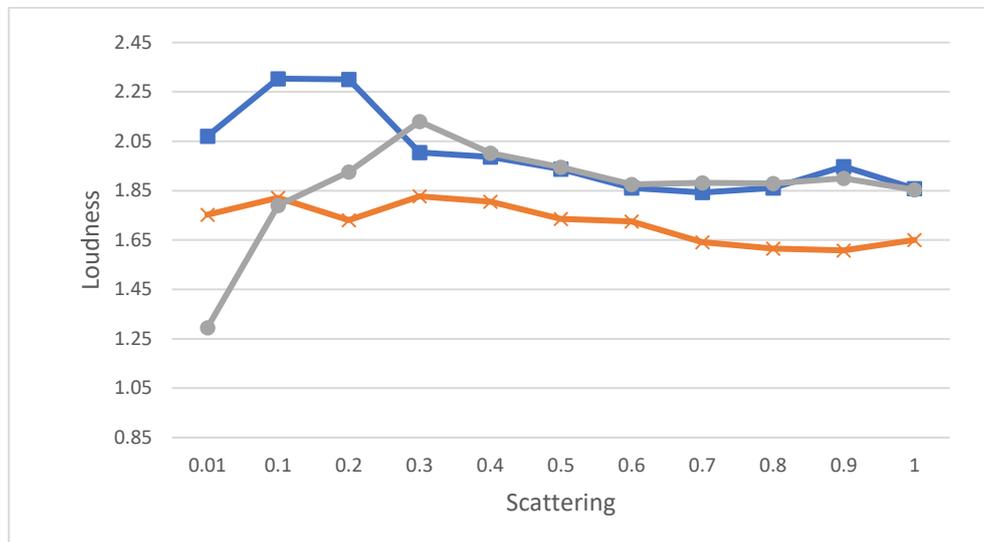


Figura 69. Evolución del loudness binaural con el scattering para la sala paralelepédica con el coeficiente de absorción $\alpha=0,2$.

En el análisis binaural, en la figura 69, el receptor 1 tiene el nivel inicial de loudness más alto, debido a la proximidad a las paredes, y conforme el scattering aumenta, el loudness decrece. El receptor 2 guarda una evolución más estable en los valores de loudness para todos los niveles de scattering, pero con un suave decrecimiento conforme la energía acústica es más difusa. Sin embargo, el receptor 3 tiene una evolución distinta a los otros. Comienza con el nivel más bajo de loudness, debido a que las reflexiones en esa posición son muy débiles, y conforme el nivel de scattering aumenta y la condición de un campo difuso se va cumpliendo, los niveles de loudness aumentan. A partir de 0.3 de scattering, los niveles comienzan a sufrir un ligero descenso hasta continuar en unos valores más estables para el resto de niveles de scattering.

En el caso de $\alpha=0.2$, los resultados son similares en cuanto a la evolución del loudness binaural a los casos de $\alpha=0.1$, pero con la diferencia que los niveles de loudness en general son menores debido al incremento en el coeficiente de absorción de las superficies, reduciendo así la densidad de energía acústica en la sala. En la figura 70, se muestran los valores para los canales izquierdo y derecho de loudness para la sala en el caso de absorción $\alpha=0.2$.

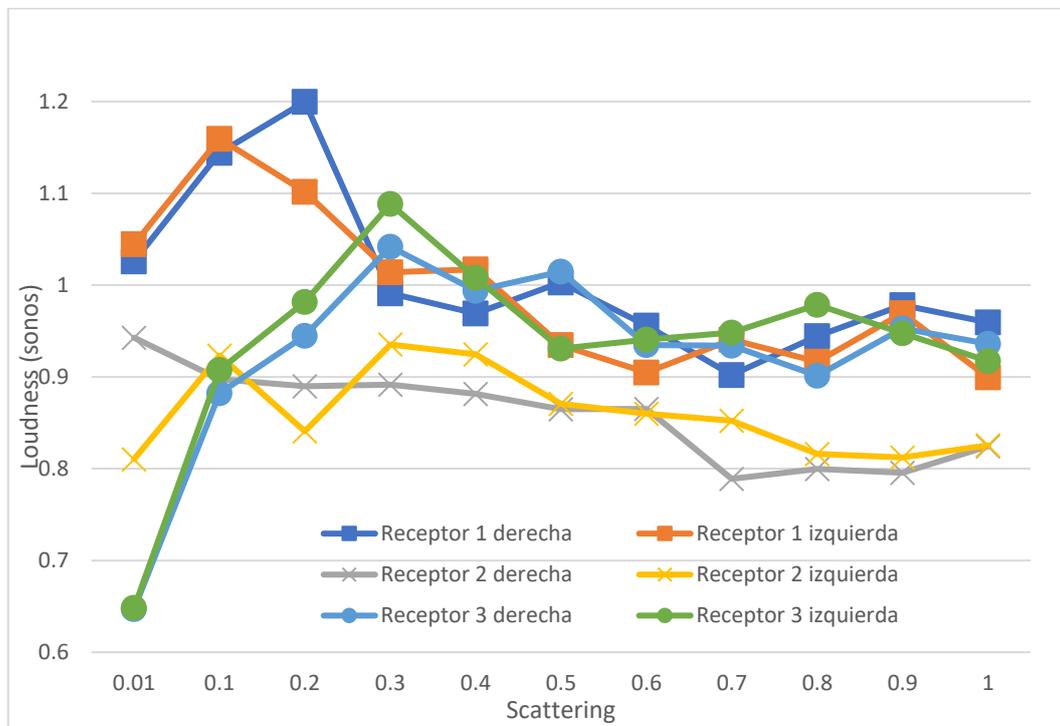


Figura 70. Valores de loudness para los canales izquierdo y derecho en el caso de la sala paralelepípeda con $\alpha=0,2$

5.3.3 Conclusiones

En este apartado se ha llevado a cabo una revisión en la relación del loudness binaural con la difusividad de una sala, y cómo las características de ésta pueden afectar a la sensación acústica de molestia percibida. Se ha hecho una revisión sobre la implementación del modelo de loudness binaural usada para los cálculos y, en la siguiente sección, se han presentado los experimentos realizados y sus resultados, mostrando los casos individuales de cada sala y cada combinación de parámetros.

Los resultados muestran que los niveles de loudness binaural son dependientes de la geometría de la sala y sus características acústicas, así como también de la posición del oyente en ellas. La proximidad del oyente a las paredes incrementa la percepción del loudness recibido, de manera más acusada cuando los niveles de absorción son bajos. En la sala cúbica, donde la condición de campo difuso es más pronunciada, los niveles de loudness se incrementaban considerablemente. En la caja paralelepípeda, el crecimiento de los niveles de scattering hacia que los niveles de loudness dejasen de aumentar llegados a un cierto punto, y a partir de ahí se estabilizaban, teniendo unos niveles similares en las distintas posiciones estudiadas, independientemente de la localización de éstas.

Sin embargo, un resultado común en las salas estudiadas muestra que cuando el receptor se sitúa en el centro de la sala, aproximadamente equidistante de todas las paredes, los niveles de loudness en esa localización son casi siempre los menores, comparando los casos de los otros receptores. Además, el análisis muestra que los niveles de loudness binaural son independientes a la localización de la fuente en la sala.

5.4 EVALUACIÓN DE ENTORNO REAL CON NODO ACÚSTICO BINAURAL

En este apartado se lleva a cabo la evaluación de un entorno real usando un nodo acústico con captación binaural, desarrollado anteriormente en el apartado 4.3, a través de un experimento en el cual se comparan las medidas registradas por el dispositivo con los resultados de unas encuestas de molestia llevadas a cabo a las personas presentes en el área de medición.

Para la evaluación medible de la molestia usando el dispositivo medidor binaural, se calcula el valor del parámetro psicoacústico loudness y el nivel de presión sonora en decibelios con ponderación A, y para la evaluación de la molestia subjetiva a través de encuestas se llevan a cabo preguntas generales sobre concienciación de ruido y se pide a la persona entrevistada que valore el ambiente acústico.

Con estas pruebas se pretende comparar la evaluación de un ambiente sonoro de manera directa a través de opiniones de las personas en un momento y lugar dado, frente a las mediciones extraídas por un nodo analizador de ruido y loudness binaural, mostrando las ventajas y desventajas de cada método. Este apartado se divide en, primero, la descripción del experimento llevado a cabo, y el análisis del uso del sensor y de las encuestas para, a continuación, presentar los resultados de la prueba y la discusión de éstos. Finalmente, se presentan las conclusiones extraídas a raíz de la experiencia de ambos métodos de medición.

5.4.1 Descripción del experimento

La evaluación de un entorno real en cuanto a su molestia acústica es llevada a cabo en este apartado a través de un experimento. Este experimento utiliza dos herramientas para evaluar esta molestia acústica: el uso de encuestas a pie de calle y el uso de un dispositivo analizador de audio con un array de dos micrófonos, como el descrito en el apartado 4.3.

Primero, el dispositivo utilizado es situado en punto estratégico para llevar a cabo las mediciones de manera continua. Con esta herramienta se obtienen mediciones objetivas sobre los niveles de ruido y los niveles de loudness binaural durante todo el periodo de medición. De manera simultánea, se llevan a cabo encuestas a pie de calle en las que se pregunta sobre la molestia acústica en ese instante y preguntas de concienciación sobre el ruido generales. Este método se ha elegido para poder recopilar valoraciones reales subjetivas sobre el ambiente sonoro y la molestia percibida en el lugar de la medición durante el experimento.

El lugar elegido para la instalación del dispositivo analizador acústico ha sido un balcón situado en la esquina de un edificio, a la altura del tercer piso, frente al cual existía un cruce de dos calles de sentido único con un flujo medio de vehículos. Además, existen negocios en funcionamiento por lo que la actividad humana también sería posible fuente de molestia acústica. En la figura 71 se puede observar el edificio en el cual se instaló el dispositivo y su emplazamiento.

El dispositivo fue inicializado a las 18:00 del día 23 de marzo de 2017, y funcionó de manera ininterrumpida durante un periodo de 24 horas, tomando mediciones cada 10 segundos. Las condiciones meteorológicas fueron de entre 17 y 8 grados centígrados y una humedad relativa media de un 60% y no se registraron lluvias.



Figura 71. Vista de la fachada del edificio en el que se instaló el dispositivo.

5.4.1.1 *Uso del sensor*

El uso de sensores acústicos para la monitorización del ambiente sonoro ha sido llevado a cabo en distintas ocasiones (Segura-Garcia, Felici-Castell, Perez-Solano, Cobos, & Navarro, 2015), (Rawat, Singh, Chaouchi, & Bonnin, 2014). Para más detalle sobre el diseño del sensor acústico utilizado en este experimento consultar el apartado 4.3.

En este experimento se ha usado el dispositivo acústico desarrollado, el cual utiliza un array de dos micrófonos para la captación del sonido, y, a través de algoritmos de detección de la dirección de las fuentes y filtrados HRTF, genera una señal binaural para, finalmente, calcular el parámetro psicoacústico loudness binaural.

5.4.1.2 *Uso de encuestas*

La respuesta de la gente a la molestia producida por el ruido se suele analizar a través de la realización de encuestas. Se suele pedir a una persona o grupo de

personas que informen sobre la percepción que tienen del ruido en su lugar de residencia o lugar de trabajo. Los resultados, normalmente, se muestran en forma de porcentaje para expresar la molestia frente al nivel de ruido al que se encuentran expuestos. Normalmente, estas respuestas se comparan con los niveles de presión sonora equivalente en ponderación A, y, normalmente, con los valores diarios, mensuales o anuales.

La Comisión Internacional de los Efectos Biológicos del ruido (International Commission on Biological Effects on Noise, o ICBEN) (Gjestland, 2002), ofrece una serie de recomendaciones para la realización de las encuestas para la evaluación de la molestia producida por el ruido. Esto se hace para tener unas escalas estandarizadas, con al menos, dos preguntas comunes (Fields, y otros, 2001).

En las encuestas diseñadas y realizadas para este experimento, estas dos preguntas estandarizadas recomendadas por el ICBEN se han incluido. De esta manera se podrá extraer información valiosa a partir de las preguntas sobre las reacciones ante la molestia acústica. Además de las dos preguntas estandarizadas, se han incluido diferentes preguntas sobre concienciación sobre el ruido. Las preguntas estandarizadas recomendadas por ICBEN son las siguientes:

Teniendo en cuenta los últimos doce meses, en una escala del uno al diez, ¿cómo percibe el nivel de ruido y/o molestia en su vivienda?

En una escala del uno al diez, ¿cuánto le molesta el ruido del tráfico en su vivienda?

Además, sumadas a las preguntas estandarizadas de la ICBEN y a las preguntas de carácter general sobre la molestia de ruido, se les preguntó a los entrevistados una pregunta para valorar en una escala del uno al diez la molestia acústica al ruido ambiente en el momento de la realización de la encuesta. Los resultados de esta pregunta son de utilidad para llevar a cabo un análisis comparativo en el cual se comparan los niveles de molestia percibida en la escala del uno al diez frente a los niveles de loudness binaural y de nivel de presión sonora capturados y analizados por el dispositivo acústico.

La encuesta al completo está incluida en el capítulo 8, al final de este trabajo.

5.4.2 Resultados

En este apartado se van a presentar los resultados de las mediciones tomadas por el dispositivo acústico durante la medición de 24 horas, así como los resultados de las encuestas y su análisis.

5.4.2.1 Encuestas

Durante el periodo de medición, se llevaron a cabo encuestas a 50 personas, de las cuales 24 fueron mujeres y 26 fueron hombres. Los rangos de edad de los encuestados variaron entre los 18 años y mayores de 65 años. En el grupo de entre 18 y 35 años fueron trece los encuestados, desde 36 hasta 49, quince personas, entre 50 y 65 años, dieciséis personas y mayores de 65 años fueron seis los encuestados.

A continuación, se van a mostrar de manera gráfica los resultados de las encuestas para las preguntas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, y 11. Las respuestas a las preguntas 10 y 12 son analizadas en el apartado 5.4.2.2.



Figura 72. Resultados de la pregunta 1 de la encuesta realizada.

La pregunta correspondiente a la figura 72, es una de las preguntas incluidas en la encuesta siguiendo las recomendaciones de la ICBEN, para evaluar la molestia del ruido en las personas a través de encuestas. Los encuestados valoraron del 1 al 10 su nivel de molestia o ruido percibido en su vivienda y, como se puede observar, los niveles fueron medios y bajos para la mayoría de los encuestados.

En la pregunta 2, cuyos resultados son presentados en la figura 73, se trata sobre las fuentes de ruido más molestas percibidas en los hogares por las personas. En los resultados se puede observar que el ruido comunitario (42%) y el ruido de tráfico (34%) los más citados como fuentes de ruido molestas, mientras que las fuentes restantes se reparten de manera más suave entre el ruido de los locales de ocio y comerciales, de las construcciones y otras fuentes, en concreto, las campanas de la iglesia del municipio.

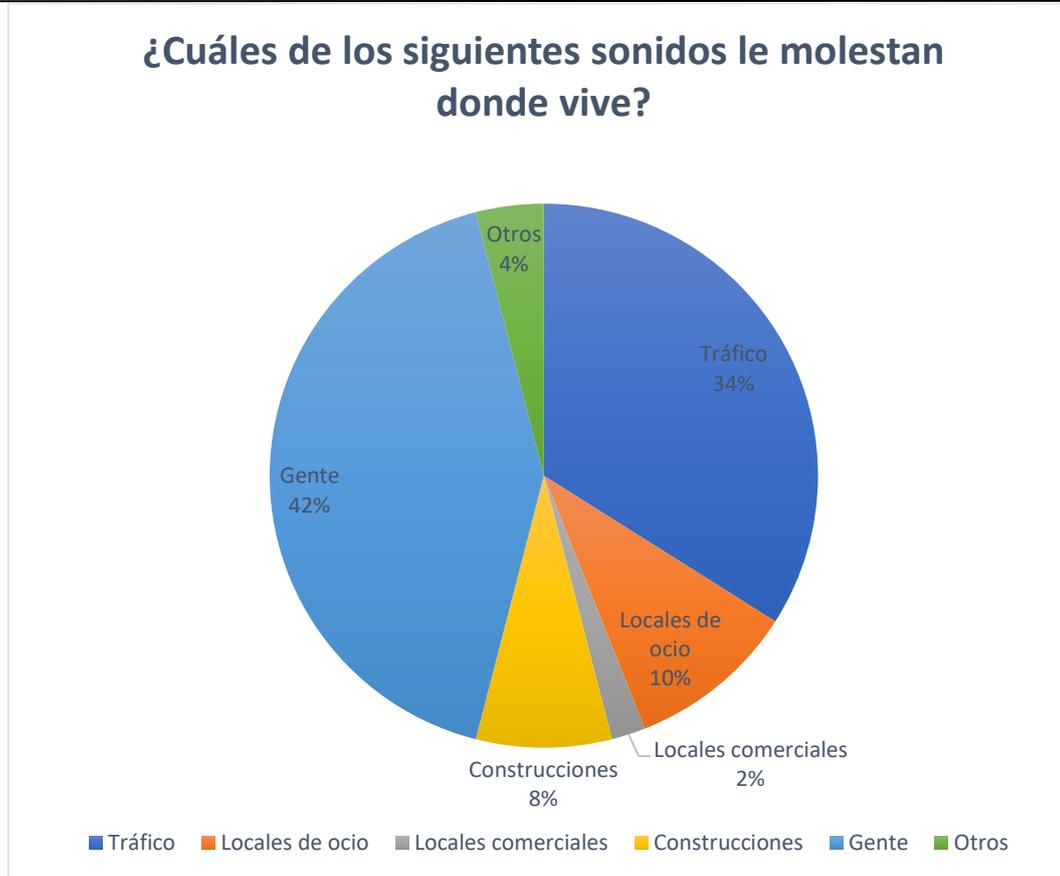


Figura 73. Resultados de la pregunta 2 de la encuesta realizada.

La tercera pregunta está relacionada con si la localización de la vivienda de los encuestados se encuentra, o no, cerca de autovías o carreteras transitadas. El análisis de los resultados mostró que los niveles de molestia en el domicilio no estaban relacionados con que las viviendas se encontrasen cerca de vías de comunicación transitadas, probablemente debido a que este tipo de vías se encuentran lejos del lugar de la medición, y la mayoría de carreteras son urbanas.

La cuarta pregunta hace referencia al ruido de tráfico y a las distintas fuentes dependiendo del tipo de vehículo. En la figura 74, se muestra que el vehículo que mayores niveles de molestia produce a los encuestados es el ruido de motocicletas (40%), seguido por el de automóviles (32%). El producido por el transporte público también es citado como fuente principal de molestia en el ruido de tráfico en algunos casos (18%) y los vehículos pesados no presentan especial protagonismo.



Figura 74. Resultados de la pregunta 4 de la encuesta realizada.

La cuestión quinta de las encuestas realizadas es otra de las preguntas diseñadas en base a las recomendaciones de la ICBEN, centrando la atención en la fuente de ruido del ruido de tráfico. En este experimento, el ruido de tráfico es fuente de molestia, pero no de gravedad. En la figura 75, se muestran los resultados.

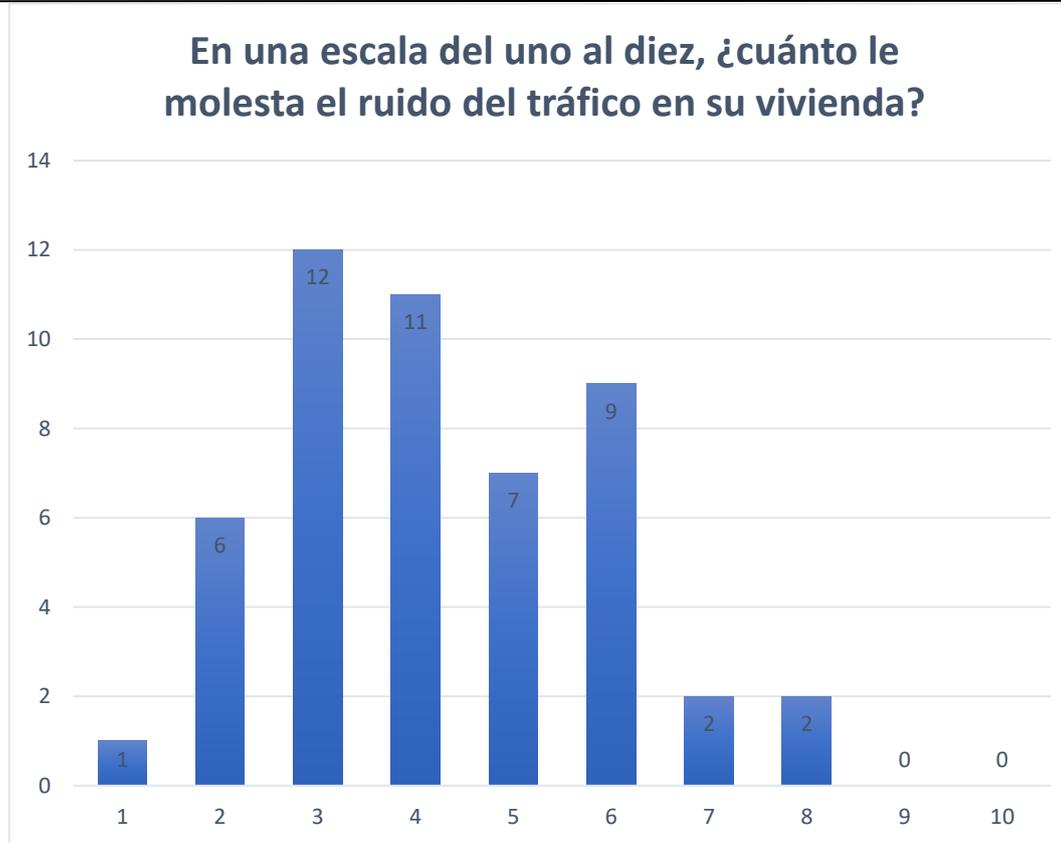


Figura 75. Resultados de la pregunta 5 de la encuesta realizada.

La sexta pregunta trata de nuevo sobre los problemas que el ruido produce en la vida diaria de las personas. En concreto, esta pregunta lidia con los problemas de ruido en el ámbito laboral del encuestado, donde casi tres cuartas partes de los encuestados manifiestan que están afectados en diverso grado por problemas de ruido (Figura 76)

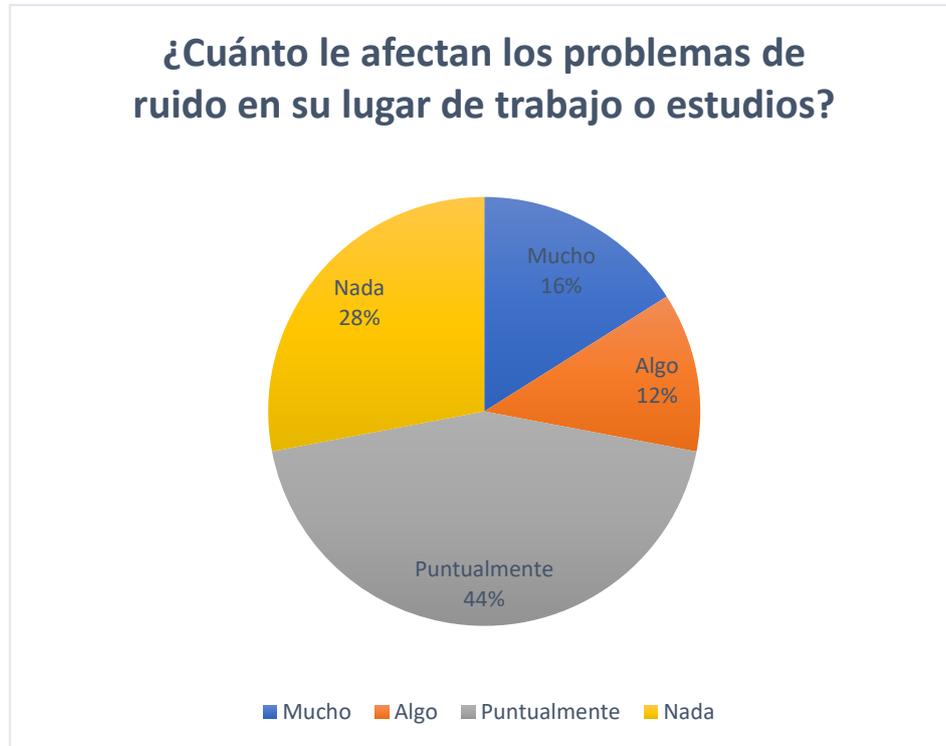


Figura 76. Resultados de la pregunta 6 de la encuesta realizada.

Las preguntas 7, 8 y 9 están enfocadas a conocer información sobre molestia y contaminación acústica de la vía en la cual se llevaron a cabo las mediciones y las encuestas. De nuevo, cerca de las tres cuartas partes de los encuestados manifestaron que existían problemas de ruido en la vía donde se encontraban, siendo los momentos más molestos los días laborables en sus distintos horarios, mañana (52%), tarde (28%) y noche (18%), siendo principalmente por la mañana, debido a la actividad laboral y de los comercios. Los tipos de ruidos más notables en esa vía son los ruidos aéreos artificiales (66%) y el producido por la actividad de las propias personas (26%). En las figuras 77, 78 y 79 se muestran los resultados para estas preguntas.

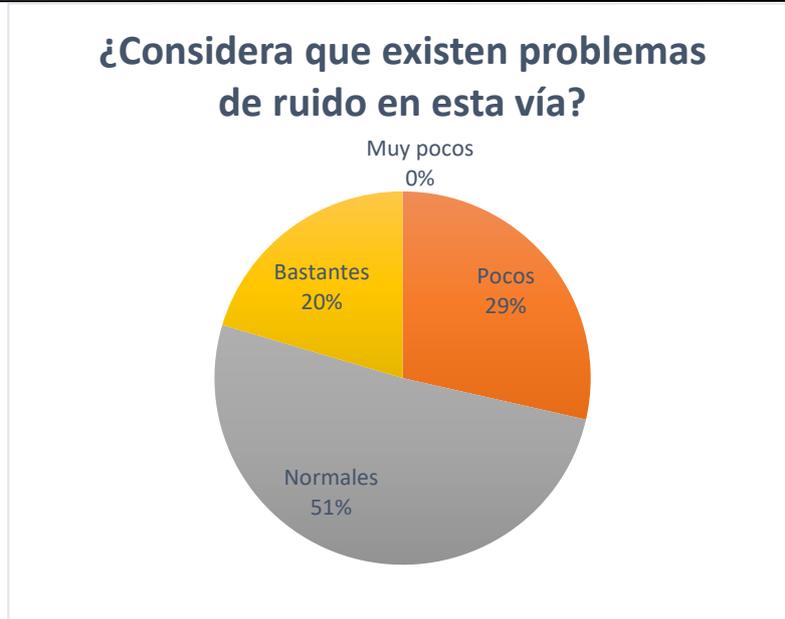


Figura 77. Resultados de la pregunta 7 de la encuesta realizada.



Figura 78. Resultados de la pregunta 8 de la encuesta realizada.

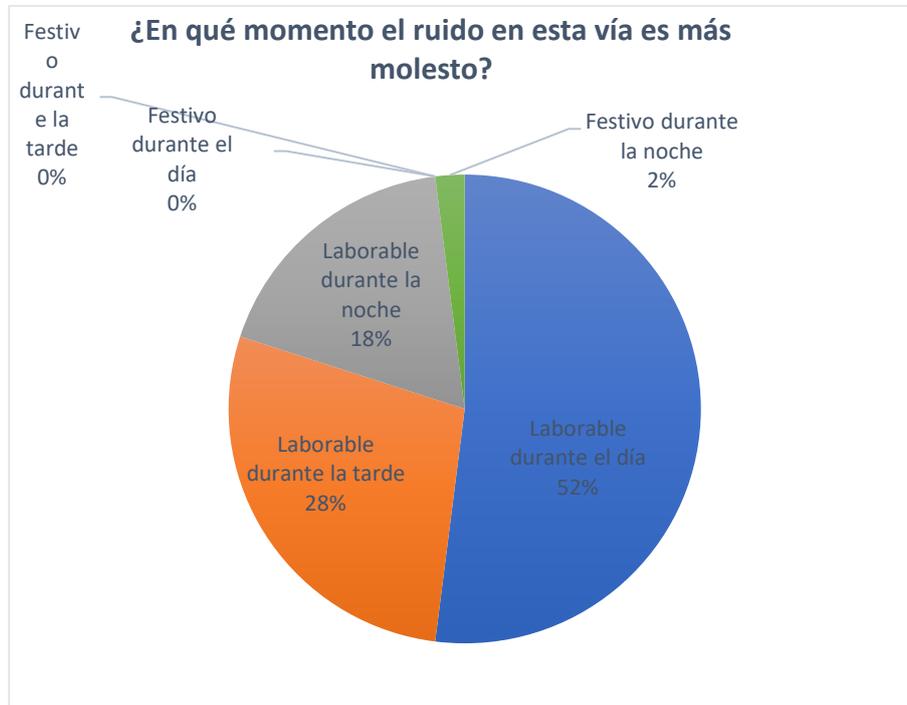


Figura 79. Resultados de la pregunta 9 de la encuesta realizada.

Finalmente, se realizó una pregunta para conocer la opinión de los encuestados en cuanto a las posibles soluciones de mejorar de la calidad acústica de la zona, siendo elegidas casi por la mitad de los encuestados las que no requerían de construcciones nuevas o reformas, como la concienciación de las personas o imponer unos límites de ruido más restrictivos. La figura 80 muestra los resultados.



Figura 80. Resultados de la pregunta 10 de la encuesta realizada.

5.4.2.2 Mediciones

En este apartado se presentan los resultados de los análisis de los datos recogidos por el sensor acústico binaural, cuyo desarrollo ha sido explicado en el apartado 4.3. El dispositivo fue inicializado el 23 de marzo de 2017 a las 18:00 y estuvo funcionando de manera ininterrumpida hasta el 24 de marzo a las 18:00

En la figura 81 se muestra la evolución a lo largo de las 24 horas de medición de los valores de loudness binaural calculados por el dispositivo. En la figura 82 están representados los valores del nivel de presión sonora ponderados en decibelios A para el periodo de medición. En ambas figuras se puede observar la evolución que sufren los niveles, teniendo los valores mínimos entre las 23 horas aproximadamente hasta las 7 de la mañana del día siguiente, coincidiendo con el periodo nocturno que se usa para el cálculo del L_{night} en el L_{den} . Pese a que los niveles de presión sonora en decibelios A fluctúan más durante este periodo nocturno, los de loudness binaural quedan más estables. Esto es debido a que el parámetro psicoacústico pretende expresar el efecto de la molestia, siendo a veces no totalmente dependiente de los niveles de presión sonora, y dependiendo de otros factores como las frecuencias dominantes de los sonidos analizados.

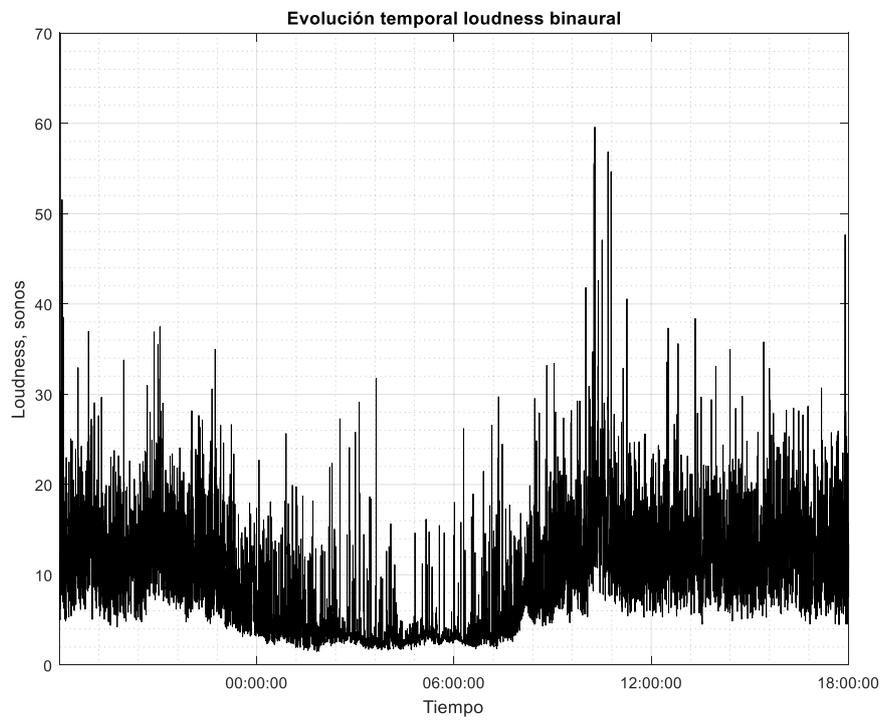


Figura 81. Representación gráfica de los niveles de loudness binaural obtenidos por el dispositivo acústico en el experimento.

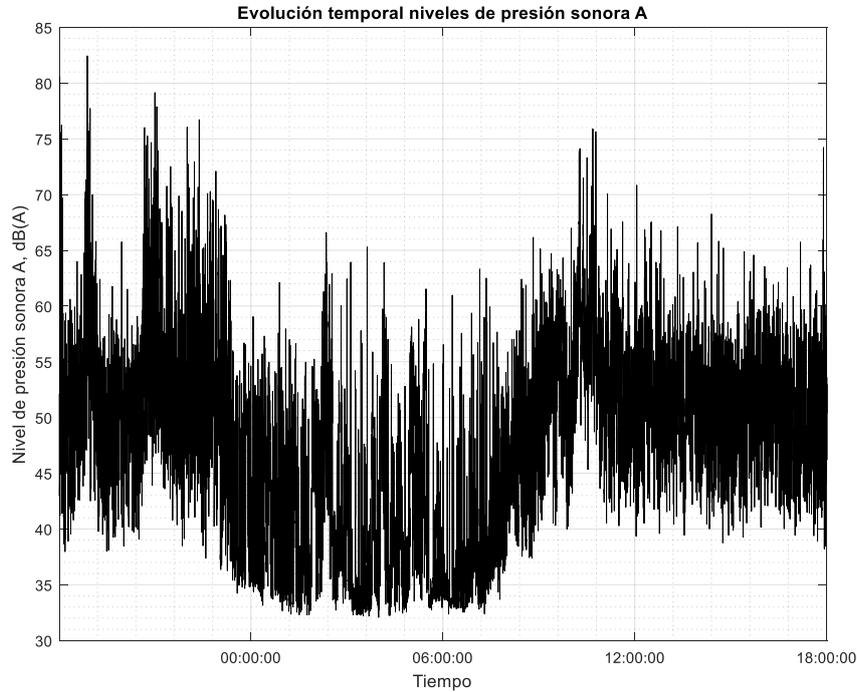


Figura 82. Representación gráfica de la evolución temporal de los niveles de presión sonora en decibelios A.

En la figura 83 se muestran los niveles de presión sonora ponderados A para cada hora y los niveles de loudness binaural promediados por horas. Se puede observar que la tendencia de ambas curvas es similar, teniendo valores mayores y mínimos casi coincidentes. Sin embargo, el parámetro de loudness binaural puede ayudar a comprender que la molestia percibida puede ser no tan dependiente de los niveles de presión sonora, como se puede concluir de la observación del periodo nocturno en la figura 83 al observar que los niveles de loudness en la noche no crean picos como los de los niveles de presión sonora.

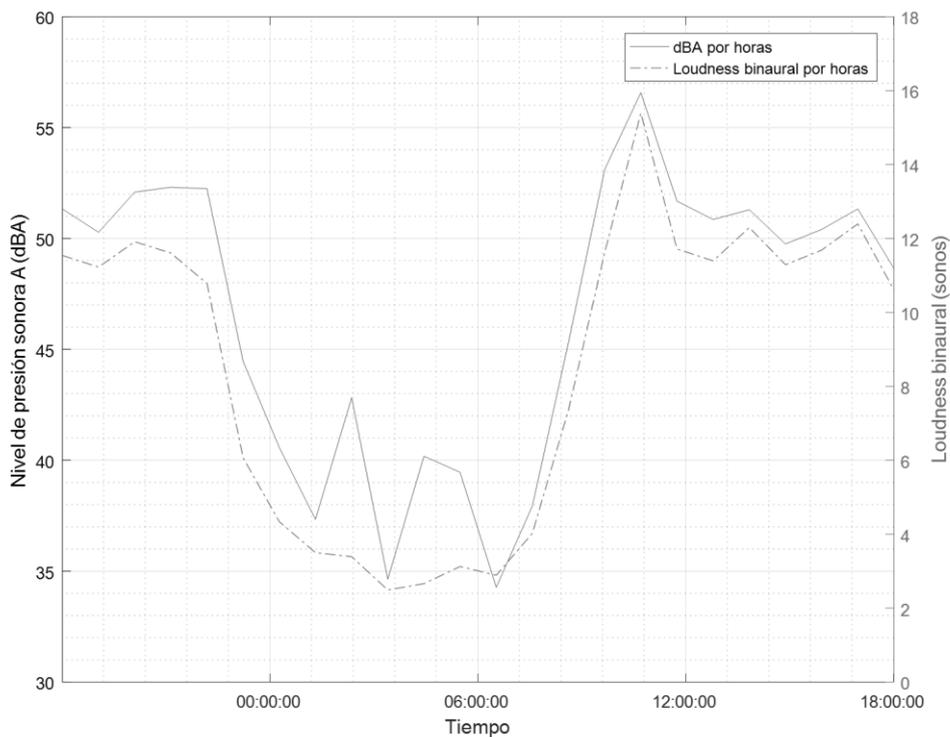


Figura 83. Evolución temporal promediada por horas de los niveles de presión sonora en decibelios A y el loudness binaural.

A continuación, en la siguiente figura, 84 se muestran una comparativa entre los niveles de loudness binaural frente a los resultados de las encuestas. La pregunta utilizada para extraer estos valores ha sido la pregunta número 10. En ella se pedía a los encuestados que valorasen su nivel de molestia acústica en ese instante y lugar en una escala del uno al diez, siendo 1 nada molesto y diez muy molesto o insoportable. En estas figuras se ha intentado mostrar de manera gráfica para su análisis la relación entre los resultados de las personas encuestadas con los resultados de los parámetros obtenidos por el dispositivo acústico. Se ha de explicar el vacío entre las 21 horas y las 10 horas del día siguiente debido a que durante esa franja no se obtuvieron datos de encuestas.

En las figuras se puede observar que los datos de los encuestados se asemejan a la curva del loudness binaural promediado por horas. En la evolución de los niveles de loudness con los resultados de las encuestas se puede observar que existe una coherencia entre las valoraciones subjetivas de las personas y su coincidencia en la hora de las mediciones de loudness binaural calculadas por el dispositivo, bien sea en los periodos de máximo nivel como en los periodos menos molestos y con menos nivel de loudness binaural. Llevando a cabo un análisis a partir de la figura, es posible obtener una relación inicial entre valores concretos de loudness binaural y una escala de molestia acústica percibida en una escala del uno al diez. Esta relación se podría hacer de manera directa usando los resultados obtenidos, pero, para mayor precisión, deberían realizarse un mayor número de encuestas.

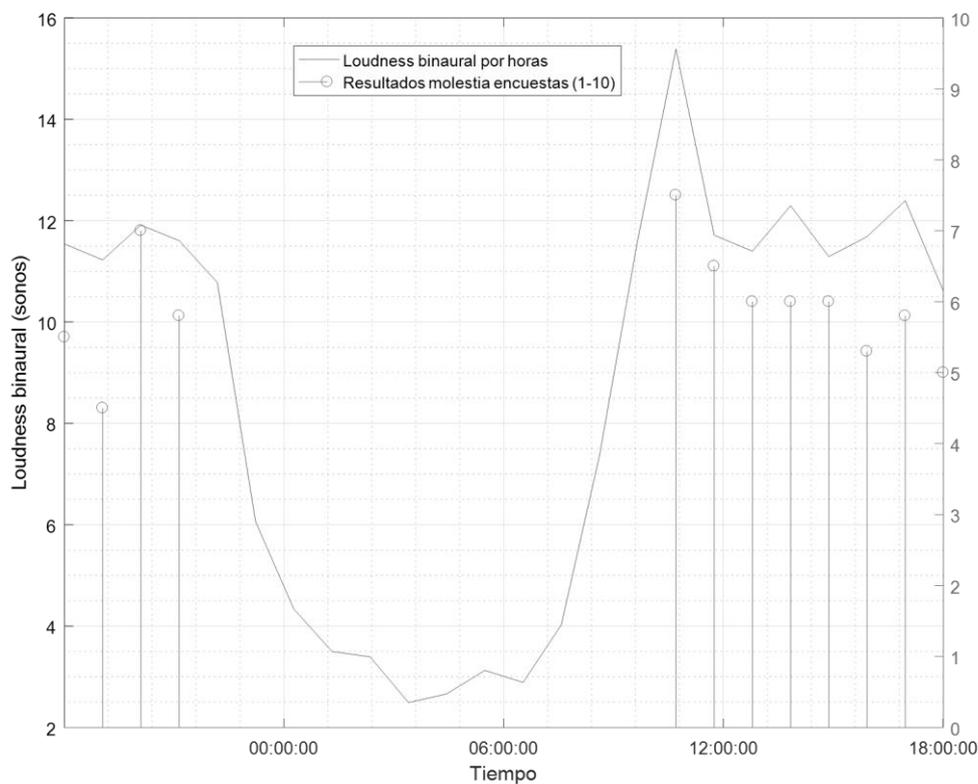
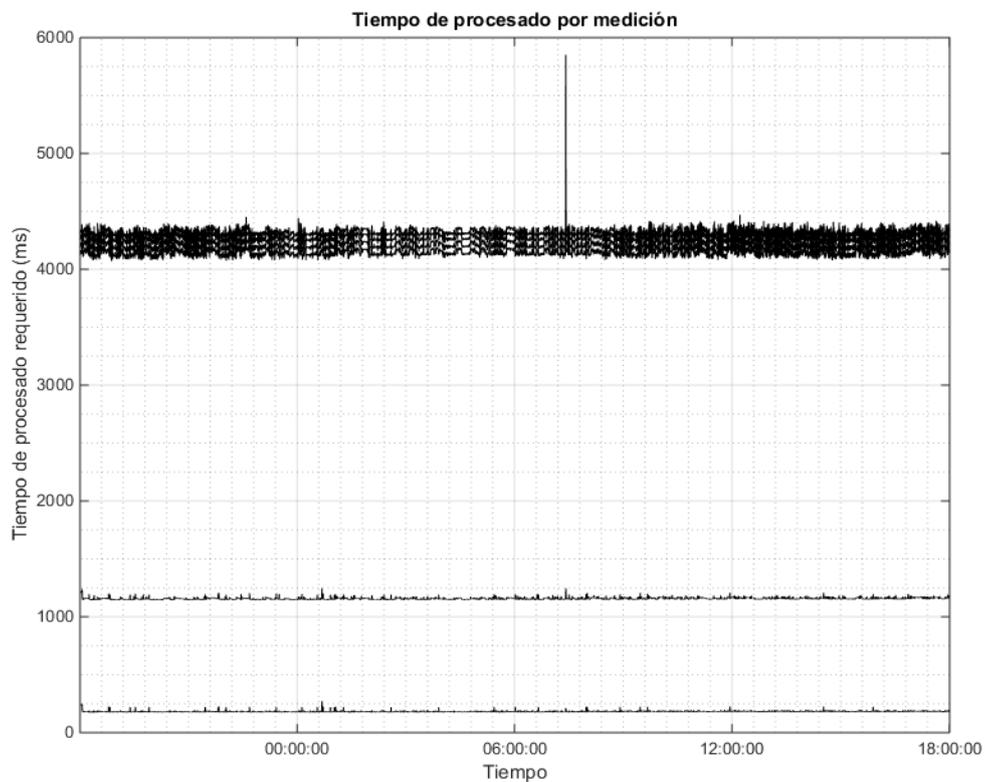


Figura 84. Representación de los valores por hora de loudness binaural y de los resultados de las encuestas con una valoración del uno al diez.

5.4.3 Rendimiento del dispositivo

La eficiencia de la unidad utilizada en términos de tiempos de procesado muestra un buen rendimiento para el propósito del experimento, así como para la resolución de las medidas de parámetros acústicos ambientales y para las del parámetro psicoacústico loudness binaural. En la figura 85 se muestra una representación gráfica de los tiempos de procesado para las mediciones de este test. La primera marca de tiempo corresponde al proceso de adquisición del sonido y la siguiente corresponde con el final de la síntesis de la señal binaural.



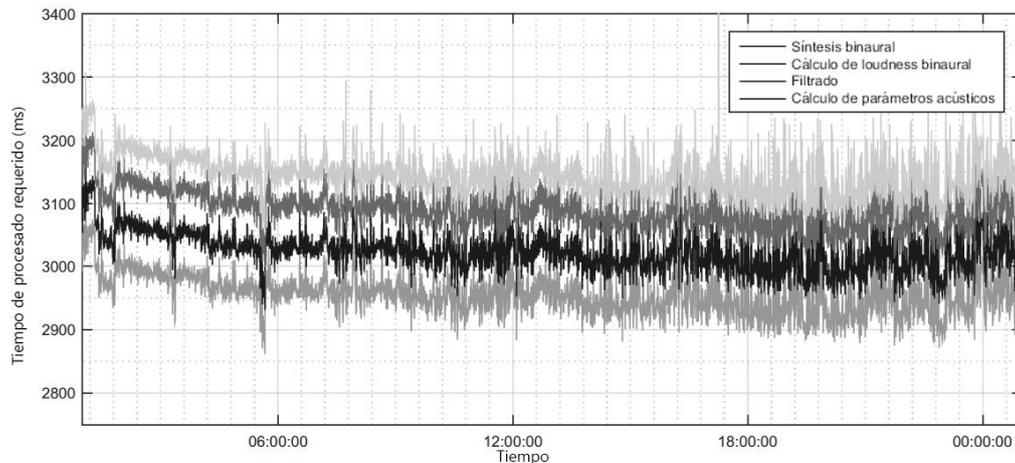


Figura 85. Tiempo de procesamiento de las medidas de esta prueba para los distintos procesos del algoritmo. La gráfica inferior es una ampliación de la figura superior entre los 2800 y los 3400 ms de procesamiento para su mejor visualización.

Tras esas dos marcas de tiempo que se pueden diferenciar de manera visual fácilmente en el gráfico, existen otras marcas distintas, las cuales corresponden con el tiempo de cálculo de los demás parámetros. Como se puede comprobar, la tarea que más tiempo requiere para su procesamiento es la de la sintetización de la señal binaural, con una media de 2.8 segundos de tiempo de procesamiento. Sin embargo, el procesamiento de los parámetros acústicos y la inicialización de la adquisición del audio se realizan en menos de 200 milisegundos.

La sintetización de la señal binaural a partir de las señales monofónicas requiere un gran costo computacional, mayor a cualquiera del resto de las tareas del algoritmo, debido a la necesidad de calcular la estimación de los ángulos de llegada de los sonidos de las distintas fuentes sonoras y el filtrado correspondiente con las funciones HRTE, siendo razonable por tanto que sea la tarea que más tiempo consume. Sin embargo, una vez las señales han sido sintetizadas, la extracción de los parámetros acústicos de ambas señales, incluyendo el parámetro loudness binaural, es computado de manera más rápida.

En términos de eficiencia energética, el consumo del dispositivo fue medido durante todo el período de medición, así como otras mediciones independientes por hora, con todos los componentes conectados, o sólo con los esenciales. Para el

periodo del experimento en el entorno urbano, la energía consumida fue de 10.713 miliamperios, sin el uso de la pantalla de visualización incorporada. La batería utilizada fue de 20.000 miliamperios, por lo que se podría haber llevado a cabo una medición de casi el doble de tiempo de manera ininterrumpida. El consumo por hora del dispositivo es de alrededor de 446 miliamperios por hora. Con el uso de la pantalla LCD, el consumo aumenta y la autonomía decrece, sin embargo, el uso de la pantalla se limita a tareas de inicialización y de mantenimiento del dispositivo, por lo que el consumo más elevado sería sólo temporal.

5.4.4 Conclusiones

En este apartado se ha llevado a cabo un experimento en el que se procedió a la instalación de un dispositivo inalámbrico con un sensor acústico de dos canales, como el desarrollado en la sección 4.3, con el propósito de evaluar su funcionamiento en un entorno real. Además, se ha llevado a cabo la creación de una encuesta para la valoración de la molestia de ruido en las personas con el objetivo de poder comparar los datos de molestia acústica percibida por los encuestados con los resultados del parámetro psicoacústico loudness binaural obtenido por el dispositivo.

El uso de un dispositivo acústico conectado presenta una serie de ventajas frente al uso de encuestas para la valoración de la molestia acústica subjetiva. La posibilidad de una monitorización constante y sin interrupción en un punto concreto hacen que el método de usar dispositivos acústicos independientes cobre ventaja en cuanto a la recogida de datos acústicos, como por ejemplo en los periodos nocturnos. Las comparaciones llevadas a cabo entre los resultados de molestia subjetiva arrojados por las encuestas frente a los resultados de loudness binaural muestran que la evolución tanto ascendente como descendente en los niveles de las encuestas y del parámetro loudness binaural tienen el mismo comportamiento, por lo que se podría obtener con éste una respuesta a la variación de la molestia acústica percibida.

Sin embargo, en el uso de encuestas, para una validación precisa, el número de personas encuestadas debería ser lo suficientemente alto como para eliminar grados de incertidumbre que se pueden presentar al usar un número más limitado de sujetos preguntados. Igualmente, el uso de los dispositivos acústicos puede

presentar ciertas limitaciones como serían las variaciones que pudiesen tener las mediciones debido a la descalibración de los sensores acústicos.

Como valoración global, el uso de dispositivos acústicos independientes monitorizando el ambiente acústico se presentan como una herramienta de gran valor para su análisis, proporcionando datos de manera ininterrumpida. Gracias al desarrollo de un sensor que puede simular una señal semejante a la que captaría el sistema auditivo humano y calcular su nivel de loudness binaural, se pueden monitorizar las variaciones que sufrirían los niveles de molestia acústica subjetiva en un ambiente sonoro concreto, usando uno o más sensores. El uso de encuestas a pie de calle es otra herramienta que añade valor al uso de los dispositivos acústicos proporcionando datos más directos de las opiniones de las personas, dando además un contexto a las mediciones gracias a la formulación de preguntas sobre la molestia de ruido de carácter general.

5.5 RESUMEN

En este capítulo se han llevado a cabo una serie de experimentos y pruebas en las que se ha usado el dispositivo acústico con distintos propósitos. Se ha evaluado el uso de redes de sensores acústicos en el estudio y análisis del aislamiento a ruido aéreo en una fachada con incidencia de ruido de tráfico. La poca estabilidad temporal del ruido hace que el uso de mediciones continuas para el estudio y evaluación de este parámetro del aislamiento de una fachada sea de utilidad debido a que, de manera posterior, se puede seleccionar el intervalo de análisis idóneo. La captación de eventos concretos sonoros es otra posibilidad de análisis usando este método de captura del audio.

Se ha llevado a cabo una serie de experimentos en los cuales se ha investigado en la relación del parámetro psicoacústico loudness binaural con la difusividad de una sala, la cual varía en función de los parámetros acústicos de los materiales de sus cerramientos. Se ha observado que los niveles resultantes de loudness binaural son variables en función de la difusividad de una sala, aunque la posición del oyente influye en la percepción de la molestia, debido a las contribuciones de energía producidas por las reflexiones de los cerramientos.

Finalmente se ha realizado un experimento en un entorno urbano en el cual se ha desplegado un dispositivo avanzado con array de dos micrófonos en el balcón de un edificio con el propósito de evaluar la molestia acústica estudiando el parámetro loudness binaural. Durante las mediciones además se llevaron a cabo encuestas para conocer la opinión subjetiva de las personas presentes durante el experimento sobre su percepción de la molestia acústica y del ruido. Además, se ha evaluado el rendimiento del dispositivo acústico de medición y su consumo energético, importante para determinar su autonomía.

VI – CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

VI – CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

6.1 RESUMEN Y CONCLUSIONES

Las ciudades crecen. Cada día son más y más las personas que viven en ellas, buscando mejores oportunidades laborales y mejores ambientes en donde vivir sus vidas con calidad. Sin embargo, el crecimiento de las ciudades ha traído consigo ciertos factores no tan positivos, como el aumento de los agentes contaminantes y sus niveles en las ciudades.

El problema de la contaminación acústica en las ciudades está a la orden del día en las ciudades actuales, siendo el ruido un agente contaminante muy extendido a lo largo de la jornada de los miles de personas que viven en las ciudades. La contaminación acústica crea efectos negativos en las personas, afectando a su salud física y psicológica, a la vez que mermando su confort debido al aumento de la molestia del ruido en ellas.

Esta molestia producida por el ruido es la sensación subjetiva negativa que el ruido causa en las personas. Los métodos de evaluación de la contaminación acústica en las ciudades, tradicionalmente, se han encargado de la recopilación de parámetros objetivos sobre el ruido que luego las instituciones han interpretado, con la ayuda de expertos, para llevar a cabo medidas. Sin embargo, estos parámetros no se relacionan directamente con la sensación de molestia subjetiva que el ruido produce en las personas. Por ello, existen ciertos parámetros denominados psicoacústicos, cuyo objetivo es representar de manera más cuantificable las sensaciones acústicas que las personas sufrirían ante un estímulo sonoro. De igual manera, los métodos de evaluación acústicos suelen ser tradicionalmente captados a través de un solo canal, obviando en cierta manera la naturaleza binaural del sistema auditivo humano.

En la evolución de las ciudades, el uso de las nuevas tecnologías de las redes de sensores y de los dispositivos del llamado internet de las cosas se han hecho un hueco, llegando a desempeñar un papel importante en estas ciudades, debido a que la posibilidad de obtener información sobre una ciudad ofrece importantes ventajas para las instituciones que las gobiernan, las empresas que trabajan en o para ellas

y para los mismos ciudadanos, pudiéndose mantener informados sobre el lugar donde viven.

La principal motivación de esta tesis ha sido la de contribuir a la evaluación del campo sonoro en las ciudades con un dispositivo autónomo, preciso y asequible y fácilmente escalable en una red, que sea capaz de emular el sistema binaural auditivo humano en la captura de audio para poder analizar la molestia producida por la contaminación acústica en las personas de una manera cuantificable.

Es por ello que, en esta tesis, la aplicación de la tecnología de las redes de sensores y los dispositivos de internet de las cosas se ha usado en conjunción con el análisis acústico para llevar a cabo un dispositivo conectado de bajo coste capaz de evaluar la molestia acústica subjetiva a través de un parámetro psicoacústico de manera binaural.

En el capítulo 4 se han presentado las contribuciones en las que se el diseño de un dispositivo acústico avanzado ha sido propuesto. Este dispositivo es capaz de sintetizar la señal binaural a través de una entrada de dos canales monofónicos, pudiendo así emular la señal de entrada del sistema auditivo humano, con el propósito de ofrecer unos resultados más fidedignos que unos basados en capturas monoaurales. El dispositivo es capaz de evaluar a partir de estas señales el parámetro loudness en su modelo binaural, dando así un parámetro psicoacústico que puede expresar mejor la sensación de molestia por ruido en las personas. Además, el diseño del dispositivo se ha realizado de manera que los componentes fuesen lo suficientemente eficaces, pero, a su vez, que fuesen asequible, con el propósito de crear un dispositivo acústico fácilmente fabricable, siendo otro punto a favor a la hora de crear muchos de ellos para su despliegue en masa en ciudades.

En el capítulo 5 se han presentado unos usos y una evaluación del dispositivo creado para la evaluación de la molestia de ruido. En los experimentos realizados en un entorno urbano se ha llevado a cabo el despliegue del dispositivo y sus resultados han sido complementados con los de unas encuestas realizadas a los habitantes de la zona, con el propósito de evaluar de manera más directa la percepción de la molestia acústica tanto de manera general como en el momento en el que el dispositivo estaba activo en una medición. Este experimento ha mostrado la potencia de este tipo de dispositivos a la hora de la evaluación de la

molestia subjetiva a través del modelo de loudness binaural, aportando las ventajas de usar dispositivos autónomos, los cuales pueden trabajar de manera ininterrumpida durante horas o días, y gracias a ello, obtener datos que de otra manera serían prácticamente imposibles de obtener, por ejemplo, realizar encuestas sobre ruido a las 4 de la mañana.

6.1.2. Conclusions

Cities are always growing. Every day there are more and more people living in them, looking for better professional opportunities and better environments to live with a good quality of life. However, this growth has brought some negative factors, like the increasing of the pollutants and the rise of their levels in the cities.

Noise pollution in cities is a current concern of modern cities. Noise is a pollutant that is spread along the life of the inhabitants of the cities, creating a bunch of negative effects in these people, affecting their physical and mental health while reducing their comfort due to the increase of the noise annoyance in them.

This annoyance produced by the noise is the negative subjective feeling that the noise causes in people. Evaluation methods for the assessing of noise pollution in cities, traditionally, have been responsible for the collection of objective parameters on noise, that institutions have interpreted to perform some plans or solutions. However, these parameters are not directly related with the subjective perception of the noise annoyance in people. Therefore, there are some parameters called psychoacoustic parameters, whose purpose is to represent in a more quantifiable way, the acoustic sensations that people would suffer due to a sound stimulus. Acoustic evaluation methods are traditionally captured through a single channel, not considering the binaural nature of the human auditory system.

In the history of the evolution of the cities, the application of the technology of the sensor networks and of the devices from the so-called Internet of Things are playing an important role in the cities. The possibility of gathering information about a city offers important advantages that can be taken from the public institutions, enterprises or the inhabitants.

The main motivation of this thesis has been the contribution to the evaluation of the urban sound environment with the use of an autonomous, affordable,

accurate and with an easy installation. This device also has to be able to simulate the human binaural hearing system in the audio acquisition process for analysing the annoyance produced by the noise pollution in a quantifiable way.

Therefore, in this thesis, the application of sensor network technology and IoT devices have been used together with an acoustic analysis to carry out a low cost connected device capable of assessing the noise annoyance through a binaural psychoacoustic parameter.

Chapter 4 presents the contributions in which the design of an advanced acoustic device has been proposed. This device can synthesize the binaural signal through an input of two monophonic channels, being able to emulate the input signal of the human auditory system, in order to offer more reliable results than ones based on monoaural captures. The device can evaluate the parameter loudness from these signals in its binaural model, giving a psychoacoustic parameter that can better express the sensation of the acoustic annoyance by noise in people. In addition, the design of the device has been done in such a way that the components are accurate and efficient but, at the same time, being affordable, for creating an acoustic device. This is also helpful in the case of creating many of them for mass deployment in cities.

In Chapter 5, some applications and an evaluation of the device created for the assessment of the noise annoyance have been presented. In the experiments, the deployment of the device has been carried out in an urban environment, and its results have been complemented with some surveys presented to the inhabitants of the area, with the purpose of evaluating the perception of the annoyance with direct data from the people. This experiment has shown the power of this type of devices in the evaluation of subjective discomfort through the binaural loudness model, providing the advantages of using autonomous devices, which can work without interruption for hours or days, and thanks to that, to obtain data that would, otherwise, be practically impossible to obtain, for example, to carry out surveys at 4 o'clock in the morning.

6.2 CONTRIBUCIONES DE ESTA TESIS

En esta tesis, las principales contribuciones son detalladas a continuación:

- Se propone el uso de las redes de sensores para la evaluación del campo acústico en las ciudades, en concreto, centrandos los esfuerzos en la evaluación de la molestia subjetiva percibida por ruido en las personas.
- El dispositivo ha sido desarrollado usando componentes asequibles, robustos y lo suficientemente precisos para el objetivo propuesto, con la intención de poder ser creados en gran número para su despliegue en una red de varios nodos en una ciudad.
- Que todos los procesos de cálculo se realicen de manera autónoma en el dispositivo acústico sin la necesidad de contar con un servidor o plataforma central para el cálculo de los parámetros.
- Se ha diseñado un dispositivo acústico capaz de adecuarse más a la naturaleza binaural del sistema auditivo humano que los dispositivos de medición actuales, con la sintetización de una señal binaural a partir de dos señales monofónicas.
- El dispositivo implementa en sus algoritmos un parámetro psicoacústico con la intención de evaluar de manera cuantificable la sensación subjetiva de las personas al ruido.
- Los resultados arrojados por los experimentos realizados en los cuales se comparan los resultados de encuestas sobre ruido y molestia acústica y los ofrecidos por una medición ininterrumpida usando el dispositivo diseñado muestran que el parámetro psicoacústico binaural puede arrojar luz sobre la molestia acústica percibida por las personas.

Algunas de las partes de este trabajo de investigación han sido presentadas previamente en conferencias y en artículos de revista. Estas publicaciones son listadas a continuación:

- Artículos de revista:
 - Noriega-Linares, J. E., Rodríguez, F. A., Cobos, M., Segura-García, J., Felici-Castell, S. & Navarro, J. M. (2017). A Wireless Acoustic Array System for Binaural Loudness Evaluation in Cities. *IEEE Sensors*.

- Noriega-Linares, J. E., & Navarro Ruiz, J. M. (2016). On the Application of the Raspberry Pi as an Advanced Acoustic Sensor Network for Noise Monitoring. *Electronics*, 5(4), 74.
- Artículos de conferencias:
 - Noriega-Linares, J. E., & Navarro, J. M. (2016). On the Relation of Room Acoustic Diffusion Over Binaural Loudness. *Proceedings of the Euroregio 2016 International Congress*.
 - Noriega-Linares, J. E., & Navarro, J. M. (2015). Creación de un prototipo de sensor acústico conectado de bajo coste para el análisis del campo sonoro. *Proceedings of the Tecniacústica 2015*.
 - Noriega-Linares, J. E., Navarro, J. M., Felici, S., & Segura, J. (2014). Monitorización del Aislamiento a Ruido Aéreo Mediante Redes de Sensores Inalámbricas. *Proceedings of the Tecniacústica 2014*, 351-359.

6.3 LÍNEAS FUTURAS

Los resultados de la investigación y del proyecto de tesis llevado a cabo, sugieren nuevas líneas de investigación futura en distintos ámbitos de la investigación. Tras las distintas fases del proyecto de tesis doctoral, nuevas ideas de estudio surgieron. En la implementación del diseño final el resultado obtenido no tiene por qué ser un prototipo final cerrado. Esta tesis ha permitido la creación de nuevas puertas en investigación para trabajo futuro. Se puede tomar esta tesis como punto de partida para distintos trabajos futuros.

De manera más detallada, se muestran a continuación algunos de los puntos en los que se podrían centrar estos trabajos futuros:

- Mejora del diseño del dispositivo como por ejemplo en la reducción de sus dimensiones, actualización de núcleo de cómputo, mejora de la eficiencia energética del sensor, actualización y mejora de los algoritmos de medida, adición de nuevos parámetros. La creación de una red de múltiples nodos comunicados entre sí de manera inalámbrica y autónomos para medidas a gran escala y largo plazo. Además, el estudio de gran cantidad de datos recogida por el despliegue de numerosos sensores obteniendo datos durante mucho tiempo en varias localizaciones. Se podría profundizar en la investigación en el uso de nuevos arrays de micrófonos, con más unidades, y mejora de los algoritmos de adecuación de la señal de entrada a señales binaurales sintetizadas. Implementar nuevas aplicaciones que usen las redes de sensores para, por ejemplo, detección de eventos sonoros, localización de fuentes o triangulación de fuentes en escenarios complejos con varias fuentes sonoras
- Desde el punto de vista de la información para las ciudades: creación de una plataforma para la ciudadanía accesible y con datos a tiempo real de niveles de presión sonora y niveles de molestia acústica online. Diseño de métodos de recolección de información real sobre molestia acústica a través de encuestas enviadas a través de redes móviles u otras tecnologías inalámbricas. Posibilidad de creación de plataformas web

con encuestas disponibles a través de códigos QR y geolocalización en dispositivos móviles para recopilar información.

- Desde el punto de vista de la evaluación de la molestia: Creación y evaluación de un nuevo modelo de molestia para la evaluación de manera binaural. Diseño de listening tests necesarios para la definición de nuevos parámetros. Creación de un parámetro de molestia acústica binaural total que englobe distintos aspectos del sonido que estudian otros parámetros psicoacústicos. Encontrar una relación entre una escala de molestia acústica subjetiva tanto en entornos urbanos reales, así como en laboratorio usando tonos puros y sonidos reales de tráfico para la creación de un modelo.

VII - BIBLIOGRAFÍA

- AENOR. (2015). *Las Normas para las Ciudades Inteligentes. Informe de Situación*. AENOR.
- Agencia para Sustancia Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (06 de 05 de 2016). *Óxidos de nitrógeno (monóxido de nitrógeno, dióxido de nitrógeno, etc.) (Nitrogen Oxides)*. Obtenido de Agencia para Sustancia Tóxicas y el Registro de Enfermedades: https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts175.html
- Aijaz, A., & Aghvami, A. H. (2015). Cognitive machine-to-machine communications for Internet-of-Things: A protocol stack perspective. *IEEE Internet of Things Journal*, 103-112.
- Akyildiz, I. F., Pompili, D., & Melodia, T. (2005). Underwater acoustic sensor networks: research challenges. *Ad hoc networks*, 3(3), 257-279.
- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347-2376.
- AlsaProject. (s.f.). Recuperado el 5 de Julio de 2016, de http://www.alsa-project.org/main/index.php/Main_Page
- Ansedo, M. (4 de Abril de 2017). Una revisión de 350 estudios descarta efectos nocivos de las radiofrecuencias sobre la salud. *El País*. Obtenido de http://elpais.com/elpais/2017/04/04/ciencia/1491316608_893772.html
- Arana, M., & García, A. (1998). A social survey on the effects of environmental noise on the residents of Pamplona, Spain. *Applied Acoustics*, 53(4), 245-253.
- Arnberg, P. W., Bennerhult, O., & Eberhardt, J. L. (1990). Sleep disturbances caused by vibrations from heavy road traffic. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 88(3), 1486-1493.
- Atmaca, E., Peker, I., & Altin, A. (2005). Industrial noise and its effects on humans. *Polish Journal of Environmental Studies*, 14(6), 721-726.
- Ayuntamiento de Madrid. (13 de 03 de 2017). *Plan A: Plan de Calidad del Aire y Cambio Climático*. Obtenido de Ayuntamiento de Madrid: <http://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/Sostenibilidad/CalidadAire/Ficheros/PlanACalidadAire042017.pdf>
- Babisch, W. (2003). Stress hormones in the research on cardiovascular effects of noise. *Noise and health*, 5(18), 1-11.
- Bakıcı, T., Almirall, E., & Wareham, J. (2013). A smart city initiative: the case of Barcelona. *Journal of the Knowledge Economy*, 4(2), 135-148.

- Balbo, M. (1993). Urban planning and the fragmented city of developing countries. *Third World Planning Review*, 15(1), 23.
- Ballester, F. (2005). Vigilancia de riesgos ambientales en Salud Pública. El caso de la contaminación atmosférica. *Gaceta Sanitaria*, 19(3), 253-257.
- Barakah, D. M., & Ammad-uddin, M. (2012). A survey of challenges and applications of wireless body area network (wban) and role of a virtual doctor server in existing architecture. *2012 Third International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation (ISMS)* (págs. 214-219). Kota Kinabalu: IEEE.
- Bardeli, R., Wolff, D., Kurth, F., Koch, M., Tauchert, K. H., & Frommolt, K. H. (2010). Detecting bird sounds in a complex acoustic environment and application to bioacoustic monitoring. *Pattern Recognition Letters*, 31(12), 1524-1534.
- Barker, S. M. (1978). Assessing bias in surveys of symptoms attributed to noise. *Journal of Sound and Vibration*, 59(3), 349-354.
- Barry, T. M., & Reagan, J. A. (1978). *FHWA highway traffic noise prediction model (No. FHWA-RD-77-108 Final Rpt)*. Washington.
- Baskarada, S., & Koronios, A. (2013). Data, information, knowledge, wisdom (DIKW): a semiotic theoretical and empirical exploration of the hierarchy and its quality dimension. *Australasian Journal of Information Systems*, 18(1).
- Basner, M. B. (2014). Auditory and non-auditory effects of noise on health. *The Lancet*, 383(9925), 1325-1332.
- Behringer. (2017). *Product Information of U-Phoria UMC202HD*. Recuperado el 24 de Abril de 2017, de https://media.music-group.com/media/PLM/data/docs/P0BJZ/Behringer_UMC202HD%20P0BJZ_Product%20Information%20Document.pdf
- Belabed, S., Lotmani, B., & Romane, A. (2014). Assessment of metal pollution in soil and in vegetation near the wild garbage dumps at Mostaganem region. *Journal of Materials and Environmental Science*, 5(5), 1551-1556.
- Bendtsen, H., & Andersen, B. (2005). Noise-Reducing Pavement for Highways and Urban Roads-State of the Art in Denmark (With Discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 74, 1085-1106.
- Beranek, L. L. (1954). *Acoustics*. McGraw Hill.
- Berglund, B. L. (1999). *Guidelines for community noise*. Génova: World Health Organization.

- Bernhard, R., Wayson, R. L., Haddock, J., Neithalath, N., El-Aassar, A., Olek, J., . . . Weiss, W. J. (2005). *An introduction to tire/pavement noise of asphalt pavement*. Institute of Safe, Quiet and Durable Highways, Purdue University.
- Bertrand, A. (2011). Applications and trends in wireless acoustic sensor networks: a signal processing perspective. *2011 18th IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT)* (págs. 1-6). Ghent: IEEE.
- Blake, D. R. (1995). Urban leakage of liquefied petroleum gases and its impact on Mexico City air quality. *Science*, *265*(5226), 953.
- Bluhm, G. N. (2004). Road traffic noise and annoyance: an increasing environmental health problem. *Noise and Health*, *6*(24), 43-49.
- Bobrovnikskii, Y. I., & Pavic, G. (2003). Modelling and characterization of airborne noise sources. *Journal of Sound and Vibration*, *261*(3), 527-555.
- Boone, M. M., Verheijen, E. N., & Van Tol, P. F. (1995). Spatial sound-field reproduction by wave-field synthesis. *Journal of the Audio Engineering Society*, *43*(12), 1003-1012.
- Bormann, C. (Mayo de 2014). *RFC 7228. Terminology for constrained-node networks*. Recuperado el 5 de Mayo de 2017, de <https://tools.ietf.org/html/rfc7228>
- Bray, A. S. (2004). Noise induced hearing loss in dance music disc jockeys and an examination of sound levels in nightclubs. *The Journal of Laryngology & Otology*, *118*(2), 123-128.
- Brown, A. L., & Lam, K. C. (1987). Urban noise surveys. *Applied Acoustics*, *20*(1), 23-39.
- Bunting, O., Bouzid, O., & Karatsovis, C. (2009). Instrument for soundscape recognition, identification and evaluation (ISRIE): technology and practical uses. *Euronoise 2009*. Edimburgo.
- Burred, J. J. (2008). *From sparse models to timbre learning: new methods for musical source separation*. Berlin: TU-Berlin.
- Burred, J. J., & Sikora, T. (2005). On the use of auditory representations for sparsity-based sound source separation. *5th International Conference on Information Communications & Signal Processing* (págs. 1466-1470). Bangkok: IEEE.
- Cairns, S., Sloman, L., Newson, C., Anable, J., Kirkbride, A., & Goodwin, P. (2008). Smarter choices: assessing the potential to achieve traffic reduction using 'soft measures'. *Transport Reviews*, *28*(5), 593-618.

- Campbell, S. (1996). Green cities, growing cities, just cities?: Urban planning and the contradictions of sustainable development. *Journal of the American Planning Association*, 62(3), 296-312.
- Caragliu, A., Del Bo, C., & Nijkamp, P. (2011). Smart cities in Europe. *Journal of urban technology*, 18(2), 65-82.
- Castellani, A. P., Gheda, M., Bui, N., Rossi, M., & Zorzi, M. (2011). Web Services for the Internet of Things through CoAP and EXI. *2011 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)* (págs. 1-6). Kioto: IEEE.
- Chinrungrueng, J., Sunantachaikul, U., & Triamlumlerd, S. (2007). Smart parking: An application of optical wireless. *Proceedings of the International Symposium on Applications and the Internet Workshops*, (pág. 66). Hiroshima.
- Cho, D. S., & Mun, S. (2008). Development of a highway traffic noise prediction model that considers various road surface types. *Applied Acoustics*, 69(11), 1120-1128.
- Chung, J. H. (2005). Evaluation of noise-induced hearing loss in young people using a web-based survey technique. *Pediatrics*, 115(4), 861-867.
- Cobos, M., & Lopez, J. J. (2009). Resynthesis of Sound Scenes on Wave-Field Synthesis from Stereo Mixtures Using Sound Source Separation Algorithms. *Journal of the Audio Engineering Society*, 57(3), 91-110.
- Cobos, M., Spors, S., & Lopez, J. J. (2010). A Sparsity-Based Approach to 3D Binaural Sound Synthesis. *EURASIP Journal in Advances in Signal Processing*, 2010(1).
- Cohen, S. E. (1980). Physiological, motivational, and cognitive effects of aircraft noise on children: Moving from the laboratory to the field. *American psychologist*, 35(3), 231-243.
- Cohen, S. W. (1981). Nonauditory effects of noise on behavior and health. *Journal of Social Issues*, 37(1), 36-70.
- Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. (2006). *Memoria Resumen del Mapa Estratégico de Ruido. Murcia, 2006*. Recuperado el 24 de Abril de 2017, de Sistema de Información sobre Contaminación Acústica: http://sicaweb.cedex.es/docs/planes/Fase1/Aglomeraciones/ES_a_DF7_Agg_Murcia.pdf
- Consejo de Europa. (1967). *Carta Europa del Agua*. Estrasburgo.
- Crenson, M. (1971). *The un-politics of air pollution: A study of non-decision-making in the cities*. Johns Hopkins Press.

- Cui, J. H., Kong, J., Gerla, M., & Zhou, S. (2006). The challenges of building mobile underwater wireless networks for aquatic applications. *IEEE Network*, 20(3), 12-18.
- Curran, M., Diehl, R., Peck, G., & Rahaman, K. (24 de Mayo de 2005). *Estados Unidos Patente nº 6.898.580*.
- Dai, G., & Wang, Y. (2012). XML-based structural representing method for information of things in internet of things. En J. D., & L. S., *Advances in Computer Science and Information Engineering. Advances in Intelligent and Soft Computing* (págs. 9-15). Berlin: Springer.
- Dalton, D. S. (2001). Association of Leisure-Time Noise Exposure and Hearing Loss. *Audiology*, 40(1), 1-9.
- Dalton, D. S., Cruickshanks, K. J., Wiley, T. L., Klein, B. E., Klein, R., & Tweed, T. S. (2001). Association of Leisure-Time Noise Exposure and Hearing Loss. *Audiology*, 40(1), 1-9.
- Damaske, P. (2008). *Acoustics and Hearing*. Springer Science & Business Media.
- Daniel, P., & Weber, R. (1997). Psychoacoustical roughness: Implementation of an optimized model. *Acta Acustica united with Acustica*, 83(1), 113-123.
- Daniell, W. E. (2002). Noise exposure and hearing conservation practices in an industry with high incidence of workers' compensation claims for hearing loss. *American journal of industrial medicine*, 42(4), 309-317.
- Datasheet, R. P. (5 de Julio de 2016). *Raspberry Pi 2 Modelo B Datasheet*. Obtenido de <https://cdn-shop.adafruit.com/pdfs/raspberrypi2modelb.pdf>
- Davies, H. M. (2008). The impact of hearing conservation programs on incidence of noise-Induced hearing loss in Canadian workers. *American journal of industrial medicine*, 51(12), 923-931.
- Dawson, D. K., & Efford, M. G. (2009). Bird population density estimated from acoustic signals. *Journal of Applied Ecology*, 46(6), 1201-1209.
- De Esteban Alonso, A. (2003). Contaminación acústica y salud. *Observatorio medioambiental*(6), 73-95.
- Degeest, S. K. (2015). The effect of age on listening effort. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 58(5), 1592-1600.

- Dekoninck, L., & Botteldooren, D. (2015). Sound sensor network based assessment of traffic noise and air pollution. *Proceedings of the Euronoise 2015*, (págs. 2321-2326). Maastricht.
- Deng, F., Guan, S., Yue, X., Gu, X., Chen, J., Lv, J., & Li, J. (2017). Energy-Based Sound Source Localization with Low Power Consumption in Wireless Sensor Networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(6), 4894-4902.
- Dockery, D. P. (1993). An Association between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities. *New England journal of medicine*, 329(4), 1753-1759.
- Doi, Y., Sato, Y., Ishiyama, M., Ohba, Y., & Teramoto, K. (2012). XML-less EXI with code generation for integration of embedded devices in web based systems. *2012 3rd International Conference on the Internet of Things (IOT)* (págs. 76-83). Wuxi: IEEE.
- Dömötör, Z. D. (2016). Dispositional aspects of body focus and idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields (IEI-EMF). *Scandinavian journal of psychology*, 57(2), 136-143.
- Eargle, J. (1981). *The Microphone Handbook*. Elar Publishing.
- Eargle, J. (2012). *The Microphone Book: From mono to stereo to surround-a guide to microphone design and application*. CRC Press.
- Edmonds, B. A., & Culling, J. F. (2009). Interaural correlation and the binaural summation of loudness. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 125(6), 3865-3870.
- Engel, M., & Trombetta, P. (2016). diagnosis of environmental noise in communities using subjective and objective data aided by geographical information systems - GIS. En H. P., & T. Zannin, *Noise Pollution in Urban and Industrial Environments: Measurements and Noise Mapping*, (págs. 51-68). Paraná: Nova Science Publishers.
- European Environment Agency. (15 de 03 de 2017). *Population exposure to environmental noise*. Obtenido de European Environment Agency: http://www.eea.europa.eu/ds_resolveuid/49d2c8ca33ac4435913d9ce02933d6fe
- European Environment Agency. (31 de 01 de 2017). *Reported data on noise exposure covered by Directive 2002/49/EC*. Obtenido de European Environment Agency: http://www.eea.europa.eu/ds_resolveuid/7e946c8d408c4999a9725aa16ca2f54d
- Evans, D. (2011). *The Internet of Things. How the next evolution of hte internet is changing everything*. Cisco.

- Evans, G. W. (1993). Nonauditory effects of noise on children: A critical review. *Children's environments*, 10(1), 31-51.
- Falchi, F. C. (2011). Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility. *Journal of environmental management*, 92(10), 2714-2722.
- Farrés, J. (2015). Barcelona noise monitoring network. *Proceedings of the Euronoise 2015*, (págs. 218-220). Maastricht.
- Fastl, H. (1989). Average loudness of road traffic noise. *International Conference on Noise Control Engineering*. Newport Beach.
- Fidell, S. (1978). Nationwide urban noise survey. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 64(1), 198-206.
- Fields, J. M., De Jong, R. G., Gjestland, T., Flindell, I. H., Job, R. F., Kurra, S., . . . Schumer, R. (2001). Standardized general-purpose noise reaction questions for community noise surveys: Research and a recommendation. *Journal of sound and vibration*, 242(4), 641-679.
- Finke, H. O.-K. (1975). Effects of aircraft noise on man. *Journal of Sound and Vibration*, 43(2), 335-349.
- Fletcher, H. &. (1933). Loudness, its definition, measurement and calculation. *Bell Labs Technical Journal*, 12(4), 377-430.
- Fletcher, H., & Munson, W. A. (1933). Loudness, its definition, measurement and calculation. *Bell Labs Technical Journal*, 12(4), 377-430.
- Floud, S. B.-T. (2013). Exposure to aircraft and road traffic noise and associations with heart disease and stroke in six European countries: a cross-sectional study. *Environmental Health*, 12(1), 89.
- Flynn, M. C., Sadeghi, A., & Halvarsson, G. (2009). Baha solutions for patients with severe mixed hearing loss. *Cochlear implants international*, 10(1), 43-47.
- Foraster, M. K. (2014). High blood pressure and long-term exposure to indoor noise and air pollution from road traffic. *Environmental health perspectives*, 122(1), 1193-1200.
- Francis, C. D. (2009). Noise pollution changes avian communities and species interactions. *Current biology*, 19(16), 1415-1419.
- Franco, J. (2012). Contaminación atmosférica en centros urbanos. Desafío para lograr su sostenibilidad: caso de estudio Bogotá. *Revista EAN*, 72, 194-204.

- Freitas, E., Mendonça, C., Santos, J. A., Murteira, C., & Ferreira, J. P. (2012). Traffic noise abatement: How different pavements, vehicle speeds and traffic densities affect annoyance levels. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17(4), 321-326.
- Fujiwara, K., Hothersall, D. C., & Kim, C. H. (1998). Noise barriers with reactive surfaces. *Applied acoustics*, 53(4), 255-272.
- Garcia, A., & Fajari, M. (1983). Traffic noise survey in Valencia. *Eleventh International Congress on Acoustics*, 7, págs. 377-380. Paris.
- García-Ramón, M. O. (2004). Urban planning, gender and the use of public space in a peripheral neighbourhood of Barcelona. *Cities*, 21(3), 215-223.
- Gifford, K. A. (2009). Hearing loss in children. *Pediatr Rev*, 30(6), 207-215.
- Gjestland, T. (2002). Current research topics and problems: the role of IC BEN. *Journal of Sound and Vibration*, 250(1), 5-8.
- Gligorić, N., Dejanović, I., & Krčo, S. (2011). Performance evaluation of compact binary XML representation for constrained devices. *2011 International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems and Workshops (DCOSS)* (págs. 1-5). Barcelona: IEEE.
- Gloag, D. (1980). Noise: hearing loss and psychological effects. *British medical journal*, 281(6251), 1325-1327.
- Goines, L. H. (2007). Noise pollution: a modern plague. *Southern Medical Journal - Birmingham Alabama*, 100(3), 287.
- Goodall, B. (1987). *The Penguin dictionary of human geography*. Puffin.
- Griffiths, I. D. (1968). Subjective response to road traffic noise. *Journal of Sound and Vibration*, 8(1), 16-32.
- Groenewold, M. R. (2014). Do hearing protectors protect hearing? *American journal of industrial medicine*, 57(9), 1001-1010.
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future generation computer systems*, 29(7), 1645-1660.
- Gunderson, E. M. (1997). Risks of developing noise-induced hearing loss in employees of urban music clubs. *American journal of industrial medicine*, 31(1), 75-79.
- Gutiérrez, H. (28 de Marzo de 2017). Madrid, la comunidad que más empresas atrajo en 2016 y Cataluña, la que más perdió. *El País*. Obtenido de

- http://economia.elpais.com/economia/2017/03/28/actualidad/1490705209_861643.html
- Hakala, I. (2015). Area-based environmental noise measurements with a wireless sensor network. *Proceedings of the Euronoise 2015*, (págs. 2351-2356). Maastricht.
- Halonen, J. I. (2015). Road traffic noise is associated with increased cardiovascular morbidity and mortality and all-cause mortality in London. *European heart journal*, 36(39), 2653-2661.
- Hamernik, R. P. (1989). The quantitative relation between sensory cell loss and hearing thresholds. *Hearing research*, 38(3), 199-211.
- Handy, S. B. (2002). How the built environment affects physical activity: views from urban planning. *American journal of preventive medicine*, 23(2), 64-73.
- Hardoy, J. M. (1992). *Environmental problems in Third World cities*.
- Härmä, A. (7 de Marzo de 2000). *HUTear Matlab Toolbox version 2.0*. Recuperado el 16 de Abril de 2017, de <http://legacy.spa.aalto.fi/software/HUTear/HUTear.html>
- Healey, P. (2006). *Urban Complexity and Spatial Strategies: Towards a Relational Planning for Our Times*. Abingdon: Routledge.
- Hernández-Muñoz, J. M., & Pettersson, J. (2011). Smart cities at the forefront of the future internet. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 447-462). Berlín: Springer .
- Hirsch, T. W. (1999). Inner city air pollution and respiratory health and atopy in children. *European respiratory journal*, 14(3), 669-677.
- Hodgson, M. (1991). Evidence of diffuse surface reflections in rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 89(2), 765-771.
- Holler, J., Tsiatsis, V., Mulligan, C., Avesand, S., Karnouskos, S., & Boyle, D. (2014). *From Machine-to-machine to the Internet of Things: Introduction to a New Age of Intelligence*. Academic Press.
- Holt, M. (2009). *Nuclear power plant security and vulnerabilities*. DIANE Publishing.
- Hothersall, D. C., Chandler-Wilde, S. N., & Hajmirzae, M. N. (1991). Efficiency of single noise barriers. *Journal of Sound and vibration*, 146(2), 303-322.
- Huang, C. W., Jiang, Z. S., Kao, W. F., & Huang, Y. L. (2013). Low-cost and high-speed eye tracker. *Intelligent Technologies and Engineering Systems*, 421-427.
- Hurtley, C. (2009). *Night noise guidelines for Europe*. WHO Regional Office Europe.

- IEEE. (2017). *IEEE Sensors Journal*. Obtenido de <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=7361>
- Internet of Things—ThingSpeak*. (2017). Recuperado el 5 de Abril de 2017, de <https://thingspeak.com/>
- Inyector PoE TL-POE150S*. (2017). Recuperado el 4 de Abril de 2017, de http://www.tp-link.com/co/products/details/cat-43_TL-POE150S.html
- Ising, H., & Kruppa, B. (2004). Health effects caused by noise: Evidence in the literature from the past 25 years. *Noise Health*, 6, 5-13.
- ISO226. (2003). *Normal Equal-Loudness Level Contours*.
- ISO532. (1975). *Acoustics - Method for calculating loudness level*.
- Iwase, T. (2000). Acoustic properties of porous pavement with double layers and its reduction effects for road traffic noise. *Proceedings of Inter Noise*, (págs. 6-12). Niza.
- Jang, I., Pyeon, D., Kim, S., & Yoon, H. (2013). A Survey on Communication Protocols for Wireless Sensor Networks. *Journal of Computing Science and Engineering*, 7(4), 231-241.
- Jean, P., Defrance, J., & Gabillet, Y. (1999). The importance of source type on the assessment of noise barriers. *Journal of Sound and Vibration*, 226(2), 201-216.
- Jones, D. M. (1981). Noise in the environment: a social perspective. *Journal of Environmental Psychology*, 1(1), 43-59.
- Karplus, H. B., & Bonvallet, G. L. (1953). A noise survey of manufacturing industries. *American Industrial Hygiene Association Quarterly*, 14(4), 235-263.
- Kearney, M. (2004). Walking the walk? Community participation in HIA: A qualitative interview study. *Environmental Impact Assessment Review*, 24(2), 217-229.
- Keppler, H. D. (2010). Short-term auditory effects of listening to an MP3 player. *Archives of Otolaryngology—Head & Neck Surgery*, 136(6), 538-548.
- Kight, C. R. (2011). How and why environmental noise impacts animals: an integrative, mechanistic review. *Ecology letters*, 14(10), 1052-1061.
- Kim, S., Pakzad, S., Culler, D., Demmel, J., Fenves, G., Glaser, S., & Turon, M. (2007). Health Monitoring of Civil Infrastructures Using Wireless Sensor Networks. *Proceedings of the 6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, (págs. 254-263). Cambridge.

- Krenkel, P. A. (1968). Biological aspects of thermal pollution. *National Symposium on Thermal Pollution*. Portland, EEUU: Tenn. Vanderbilt University Press.
- Kuper, A., & Kuper, J. (1996). *The Social Science Encyclopedia*. London: Routledge.
- Kurzweil, L. G. (1979). Ground-borne noise and vibration from underground rail systems. *Journal of Sound and Vibration*, 66(3), 363-370.
- Kuwano, S., & Namba, S. (1978). On the loudness of road traffic noise of longer duration (20 min.) in relation to instantaneous judgment. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 64(1), 127-128.
- Kuwano, S., Namba, S., & Fastl, H. (1988). On the judgment of loudness, noisiness and annoyance with actual and artificial noises. *Journal of sound and vibration*, 127(3), 457-465.
- Kwong, K. H., Sasloglou, K., Goh, H. G., Wu, T. T., Stephen, B., Gilroy, M., . . . Andonovic, I. (2009). Adaptation of wireless sensor network for farming industries. *2009 Sixth International Conference on Networked Sensing Systems (INSS)*. Pittsburgh: IEEE.
- Kyriazis, D., Varvarigou, T., White, D., Rossi, A., & Cooper, J. (2013). Sustainable smart city IoT applications: Heat and electricity management & Eco-conscious cruise control for public transportation. *2013 IEEE 14th International Symposium and Workshops on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*. Madrid: IEEE.
- Landon, P. B. (2005). Noise exposures of rail workers at a North American chemical facility. *American journal of industrial medicine*, 47(4), 364-369.
- Langdon, F. J. (1976). Noise nuisance caused by road traffic in residential areas: Part I. *Journal of Sound and Vibration*, 47(2), 243-263.
- Langdon, F. J. (1976). Noise nuisance caused by road traffic in residential areas: Part II. *Journal of Sound and Vibration*, 47(2), 265-282.
- Langdon, F. J. (1976). Noise nuisance caused by road traffic in residential areas: Part III. *Journal of Sound and Vibration*, 49(2), 241-256.
- Langdon, F. J. (1977). Road traffic noise and disturbance to sleep. *Journal of Sound and Vibration*, 50(1), 13-28.
- Lee, E. Y. (2014). Assessment of traffic-related noise in three cities in the United States. *Environmental research*, 132, 182-189.
- Li, B., Tao, S., Dawson, R. W., Cao, J., & Lam, K. (2002). A GIS based road traffic noise prediction model. *Applied Acoustics*, 63(6), 679-691.

- Li, S., Da Xu, L., & Wang, X. (2013). Compressed sensing signal and data acquisition in wireless sensor networks and internet of things. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(4), 2177-2186.
- Lin, J. P. (2014). China's international trade and air pollution in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(5), 1736-1741.
- Longcore, T. R. (2004). Ecological light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2(4), 191-198.
- Luo, J., Chen, Y., Tang, K., & Luo, J. (2009). Remote monitoring information system and its applications based on the Internet of Things. *Proceedings of the International Conference on Future BioMedical Information Engineering (FBIE 2009)*, (págs. 482-485). Sanya.
- Lyon, R. H. (2003). Product sound quality-From perception to design. *Sound and vibration*, 37(3), 18-23.
- Mahizhnan, A. (1999). Smart cities: The singapore case. *Cities*, 16(1), 13-18.
- Mainetti, L., Patrono, L., & Vilei, A. (2011). Evolution of wireless sensor networks towards the internet of things: A survey. *Proceedings of the 19th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, (págs. 1-6). Split.
- Manvell, D. (2015). Utilising the Strengths of Different Sound Sensor Networks in Smart City Noise Management. *Proceedings of the Euronoise 2015*, (págs. 2303-2308). Maastricht.
- Marsal-Llacuna, M. L., Colomer-Llinàs, J., & Meléndez-Frigola, J. (2015). Lessons in urban monitoring taken from sustainable and livable cities to better address the Smart Cities initiative. *Technological Forecasting and Social Change*, 90, 611-622.
- Masterson, E. A. (2015). Trends in worker hearing loss by industry sector, 1981–2010. *American journal of industrial medicine*, 58(4), 392-401.
- May, D. N., & Osman, N. M. (1980). Highway noise barriers: new shapes. *Journal of Sound and vibration*, 71(1), 73-101.
- May, J. J. (2000). Occupational hearing loss. *American Journal of Industrial Medicine*, 37(1), 112-120.
- McKinney, D. (14 de Septiembre de 2015). *Lessons of Moore's Law Guide Intel Internet of Things*. Recuperado el 25 de Abril de 2017, de <http://blogs.intel.com/iot/2015/09/14/lessons-of-moores-law-guide-intel-internet-of-things/>

- Meiarashi, S., Ishida, M., Fujiwara, T., Hasebe, M., & Nakatsuji, T. (1996). Noise reduction characteristics of porous elastic road surfaces. *Applied Acoustics*, 47(3), 239-250.
- Melamed, S. N. (1988). Noise annoyance, industrial noise exposure and psychological stress symptoms among male and female workers. *Noise*, 88, 315-320.
- Mendelson, G. (2004). *All you need to know about power over Ethernet (PoE) and the IEEE 802.3af Standard*. Recuperado el 15 de Abril de 2017, de https://portal.chippc.com/support/downloads/files/PoE_and_IEEE802_3af.pdf
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2017). *Sistema Básico de Información sobre la Contaminación Acústica*. Recuperado el 24 de Abril de 2017, de <http://sicaweb.cedex.es/>
- Montgomery, C. (2013). *Happy city: transforming our lives through urban design*. Macmillan.
- Moore, B. C., & Glasberg, B. R. (2007). Modeling binaural loudness. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121(3), 1604-1612.
- Moore, B. C., Glasberg, B. R., & Baer, T. (1997). A model for the prediction of thresholds, loudness and partial loudness. *Journal of the Audio Engineering Society*, 45(4), 224-240.
- Moorhouse, A. T., & Seiffert, G. (2006). Characterisation of an airborne sound source for use in a virtual acoustic prototype. *Journal of Sound and Vibration*, 296(1), 334-352.
- Morillas, J. M. (2002). Presentación de una encuesta para la realización de estudios sociales sobre el impacto del ruido urbano. *Revista de acústica*, 33(1), 27-33.
- Mumford, L. (1961). *The city in history: its origins, its transformations and its prospects* (Vol. 67). Houghton Mifflin Harcourt.
- Münzel, T. G. (2014). Cardiovascular effects of environmental noise exposure. *European heart journal*, 35(13), 829-836.
- Muzet, A. (2007). Environmental noise, sleep and health. *Sleep medicine reviews*, 11(2), 135-142.
- Naciones Unidas. (1998). *United Nations - Framework Convention on Climate Change*. Recuperado el 6 de Abril de 2017, de Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>

- Naciones Unidas. (7-18 de Diciembre de 2009). *COP 15*. Recuperado el 6 de Abril de 2017, de http://unfccc.int/meetings/copenhagen_dec_2009/session/6262.php
- Naciones Unidas. (2016). *The World's Cities in 2016*. United Nations. Obtenido de http://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/urbanization/the_worlds_cities_in_2016_data_booklet.pdf
- Naess, P. (2001). Urban planning and sustainable development. *European Planning Studies*, 9(4), 503-524.
- NC-74 Datasheet. (2016). Recuperado el 5 de Abril de 2017, de <http://www.noise-and-vibration.co.uk/files/pdfs/NC-74.pdf>
- Nielsen, T. J. (1996). City air pollution of polycyclic aromatic hydrocarbons and other mutagens: occurrence, sources and health effects. *Science of the Total Environment*, 189, 41-49.
- Nixon, J. C. (1961). Noise-Induced Permanent Threshold Shift at 2000 cps and 4000 cps. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 33(7), 904-908.
- Nordell, B. (2003). Thermal pollution causes global warming. *Global and planetary change*, 38(3), 305-312.
- Nordmann, A. S. (2000). Histopathological differences between temporary and permanent threshold shift. *Hearing research*, 139(1), 13-30.
- Noriega-Linares, J. E., & Navarro Ruiz, J. M. (2016). On the Application of the Raspberry Pi as an Advanced Acoustic Sensor Network for Noise Monitoring. *Electronics*, 5(4), 74.
- Noriega-Linares, J. E., & Navarro, J. M. (2016). On the Relation of Room Acoustic Diffusion over Binaural Loudness. *EuroRegio 2016*. Oporto: Sociedad Española de Acústica y Sociedad Portuguesa de Acústia.
- Noriega-Linares, J. E., Navarro, J. M., Felici, S., & Segura, J. (2014). Monitorización del aislamiento a ruido aéreo mediante redes de sensores inalámbricas . *45º Congreso Español de Acústica, el 8º Congreso Ibérico de Acústica y el Simposio Europeo sobre Ciudades Inteligentes y Acústica Ambiental* (págs. 351-361). Murcia: Sociedad Española de Acústica.
- Noriega-Linares, J., Navarro, J., Felici, S., & Segura, J. (2014). Monitorización del Aislamiento a Ruido Aéreo Mediante Redes de Sensores Inalámbricas. *Proceedings of the Tecniacústica 2014*, (págs. 351-359). Murcia.

- Noriega-Linares, J., Rodríguez, F., Cobos, M., Segura-García, J., Felici-Castell, S., & Navarro, J. (2017). A Wireless Acoustic Array System for Binaural Loudness Evaluation in Cities. *IEEE Sensors*.
- O'Flynn, B., Martinez-Catala, R., Harte, S., O'Mathuna, C., Cleary, J., Slater, C., . . . Diamond, D. (2007). SmartCoast: A wireless sensor network for water quality monitoring. *Proceedings of the 32nd IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN 2007)*, (págs. 815-816). Dublin, Ireland.
- Öhrström E, R. R. (1988). Effects of night time road traffic noise—an overview of laboratory and field studies on noise dose and subjective noise sensitivity. *Journal of Sound and Vibration*, 127(3), 441-448.
- Öhrström, E. R. (1990). Sleep disturbance by road traffic noise—a laboratory study on number of noise events. *Journal of Sound and Vibration*, 143(1), 93-101.
- Okokon, E. O.-L. (2015). Road-traffic noise: annoyance, risk perception, and noise sensitivity in the Finnish adult population. *International journal of environmental research and public health*, 12(6), 5712-5734.
- Ong, B. (2003). Green plot ratio: an ecological measure for architecture and urban planning. *Landscape and urban planning*, 63(4), 197-211.
- ONU. (2015). *World Population 2015*. Recuperado el 6 de Abril de 2017, de https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/World_Population_2015_Wallchart.pdf
- Orban, E. M. (2016). Residential road traffic noise and high depressive symptoms after five years of follow-up: results from the Heinz Nixdorf recall study. *Environmental Health Perspectives*, 124(5), 578.
- Otto, C., Milenkovic, A., Sanders, C., & Jovanov, E. (2006). System architecture of a wireless body area sensor network for ubiquitous health monitoring. *Journal of mobile multimedia*, 1(4), 307-326.
- Ouis, D. (1999). Exposure to nocturnal road traffic noise: Sleep disturbance its after effects. *Noise and health*, 1(4), 11-36.
- Panagiotou, N. Z., Gunopulos, D., Zacheilas, N., Boutsis, I., Kalogeraki, V., Lynch, S., & O'Brien, B. (2016). Intelligent Urban Data Monitoring for Smart Cities. En B. B. al., *Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases* (págs. 177-192). Springer International Publishing.
- Papsin, B. C., & Gordon, K. A. (2007). Cochlear implants for children with severe-to-profound hearing loss. *New England Journal of Medicine*, 357(23), 2380-2387.

- Passchier-Vermeer, W., & Passchier, W. (2000). Noise exposure and public health. *Environmental Health Perspectives, 108*, 123-131.
- Paulsen, R., & Kastka, J. (1995). Effects of combined noise and vibration on annoyance. *Journal of Sound and Vibration, 181*(2), 295-314.
- Pavić, G. (2010). Air-borne sound source characterization by patch impedance coupling approach. *Journal of Sound and Vibration, 329*(23), 4907-4921.
- Portella, A. (2016). *Visual pollution: advertising, signage and environmental quality*. Routledge.
- Postscapes. (2017). *IoT Sensors & Actuators*. Recuperado el 28 de Abril de 2017, de <https://www.postscapes.com/what-exactly-is-the-internet-of-things-infographic/>
- Rabinowitz, P. M. (2000). Noise-induced hearing loss. *American family physician, 61*(9), 2759-2760.
- Raspbian. (s.f.). Recuperado el 5 de Julio de 2016, de <https://www.raspbian.org/>
- Rawat, P., Singh, K. D., Chaouchi, H., & Bonnin, J. M. (2014). Wireless sensor networks: a survey on recent developments and potential synergies. *The Journal of supercomputing, 68*(1), 1-48.
- Repacholi, M. H. (1998). Low-level exposure to radiofrequency electromagnetic fields: Health effects and research needs. *Bioelectromagnetics, 19*(1), 1-19.
- Reynolds, G. S., & Stevens, S. S. (1960). Binaural summation of loudness. *The Journal of the Acoustical Society of America, 32*(10), 1337-1344.
- Rickard, S., & Yilmaz, O. (2002). On the approximate W-disjoint orthogonality of speech. *2002 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*. Orlando: IEEE.
- Roth, V., Schmidt, P., & Guldenring, B. (2010). The IR ring: authenticating users' touches on a multi-touch display. *Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology*, (págs. 259-262). New York.
- S3A Spatial Audio. (2016). Recuperado el 15 de Abril de 2017, de <http://www.s3a-spatialaudio.org/>
- Salvi, R. J. (1983). Response patterns of auditory nerve fibers during temporary threshold shift. *Hearing research, 10*(1), 37-67.
- Santini, S., Ostermaier, B., & Vitaletti, A. (2008). First experiences using wireless sensor networks for noise pollution. *Proceedings of the Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks*, (págs. 61-65). Glasgow, Reino Unido.

- Schaffers, H., Komninos, N., Pallot, M., Trousse, B., Nilsson, M., & Oliveira, A. (2011). *Smart cities and the future internet: Towards cooperation frameworks for open innovation*. Berlín: Springer.
- Schneider, J., Kamiya, T., Peintner, D., & Kyusakov, R. (2011). Efficient XML interchange (EXI) format 1.0. *W3C Proposed Recommendation*, 20.
- Schoenwiesner, M. (11 de Diciembre de 2002). *Auditory.org*. Recuperado el 16 de Abril de 2017, de Specific and total loudness calculation: <http://www.auditory.org/postings/2002/565.html>
- Segura, J., Cerdá, S., Montell, R., Romero, J., Cibrián, R., Barba, A., & Giménez, A. (2012). Los parámetros psicoacústicos como herramienta para la evaluación subjetiva de diferentes entornos y actividades. *VIII Congreso Iberoamericano de Acústica*. Évora: Sociedad Española de Acústica y Sociedad Portuguesa de Acústica.
- Segura-García, J., Felici-Castell, S., Perez-Solano, J., Cobos, M., & Navarro, J. (2015). Low-Cost Alternatives for Urban Noise Nuisance Monitoring Using Wireless Sensor Networks. *IEEE Sensors Journal*, 15, 836-844.
- Segura-García, J., Perez Solano, J., Cobos Serrano, M., Navarro, J. M., Camba, E. A., Felici-Castell, S., . . . Montes-Suay, F. (2016). Spatial Statistical Analysis of Urban Noise Data from a WASN Gathered by an IoT System: Application to a Small City. *Applied Sciences*, 6(12), 380.
- Sezen, A. S., Sivaramakrishnan, S., Hur, S., Rajamani, R., Robbins, W., & Nelson, B. J. (2005). Passive wireless MEMS microphones for biomedical applications. *Journal of biomechanical engineering*, 127(6), 1030-1034.
- Shelby, Z., & Bormann, C. (2011). *6LoWPAN: The wireless embedded Internet*. John Wiley & Sons.
- Shield, B. M. (2003). The effects of noise on children at school: a review. *Building Acoustics*, 10(2), 97-116.
- Singh, N. D. (2004). Noise pollution-sources, effects and control. *Journal of Human Ecology*, 16(3), 181-187.
- Sivonen, V. P. (2006). *Directional loudness perception*.
- Sivonen, V. P., & Ellermeier, W. (2006). Directional loudness in an anechoic sound field, head-related transfer functions, and binaural summation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 119(5), 2965-2980.
- Sliwiska-Kowalska, M. D. (2012). Noise-induced hearing loss. *Noise and Health*, 14(61), 274-280.

- Smart Santander. (2017). <http://www.smartsantander.eu/>. Recuperado el 29 de Abril de 2017, de <http://www.smartsantander.eu/>
- Smith, A. (1991). A review of the non-auditory effects of noise on health. *Work & Stress*, 5(1), 49-62.
- Soares, S. (3 de Junio de 2012). *Not Your Type? Big Data Matchmaker On Five Data Types You Need To Explore Today*. Recuperado el 28 de Abril de 2017, de <http://www.dataversity.net/not-your-type-big-data-matchmaker-on-five-data-types-you-need-to-explore-today/>
- Sørensen, M. L.-N. (2014). Combined effects of road traffic noise and ambient air pollution in relation to risk for stroke? *Environmental research*, 133, 49-55.
- Soundman. (2011). *Dummy Head "John"*. Recuperado el 24 de Abril de 2017, de <http://www.soundman.de/es/kunstkopf-john/>
- Soundman. (2011). *Soundman Products*. Recuperado el 24 de Abril de 2017, de <http://www.soundman.de/es/products/>
- Splitter PoE TL-POE10R*. (2017). Recuperado el 4 de Abril de 2017, de http://www.tp-link.com/pe/products/details/cat-43_TL-POE10R.html
- Stansfeld, S. A. (2003). Noise pollution: non-auditory effects on health. *British medical bulletin*, 68(1), 243-257.
- Staudenraus, J., & Eisenmenger, W. (1993). Fibre-optic probe hydrophone for ultrasonic and shock-wave measurements in water. *Ultrasonics*, 31(4), 267-273.
- Steinberg, F. (2005). Strategic urban planning in Latin America: Experiences of building and managing the future. *Habitat International*, 29(1), 69-93.
- Stevens, S. S. (1955). The measurement of loudness. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 27(5), 815-829.
- Stevens, S. S. (1955). The measurement of loudness. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 27(5), 815-829.
- Stone, R. (2002). Counting the cost of London's killer smog. *Science*, 298(5601), 2106-2107.
- Sullivan, R. (1969). Subjective matching of anxiety to intensities of white noise. *Journal of abnormal psychology*, 74(6), 646-650.
- Suzuki, Y., & Takeshima, H. (2004). Equal-loudness-level contours for pure tones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 116(2), 918-933.

- Takano, T. N. (2002). Urban residential environments and senior citizens' longevity in megacity areas: the importance of walkable green spaces. *Journal of epidemiology and community health*, 56(12), 913-918.
- TBoneGC100. (s.f.). Recuperado el 5 de Julio de 2016, de <http://www.tbone-mics.com/en/product/information/details/-d9d6e87219/>
- Thornton, A. (2009). *Public attitudes and behaviours towards the environment-Tracker Survey: A report to the Department for Environment, Food and Rural Affairs*. Londres: TNS.
- Tiete, J., Domínguez, F., Silva, B. D., Segers, L., Steenhaut, K., & Touhafi, A. (2014). SoundCompass: a distributed MEMS microphone array-based sensor for sound source localization. *Sensors*, 14(2), 1918-1949.
- Tolley, R., & Turton, B. J. (2014). *Transport systems, policy and planning: a geographical approach*. Routledge.
- Trinidad-Ramos, G. d., Jaudenes-Casabón, C., Núñez-Batalla, F., & Sequí-Canet, J. M. (2010). Recomendaciones de la Comisión para la Detección Precoz de la Hipoacusia. *Acta Otorrinolaringológica Española*, 61(1), 69-77.
- Tso, F., White, D., Jouet, S., Singer, J., & Pezaros, D. (2013). The Glasgow Raspberry Pi cloud: A scale model for cloud computing infrastructures. *Proceedings of the International Conference on Distributed Computing Systems*, (págs. 108-112). Philadelphia.
- Tuma, J., Janecka, P., Vala, M., & Richter, L. (2012). Sound source localization. *2012 13th International Carpathian Control Conference (ICCC)* (págs. 740-743). High Tatras: IEEE.
- UNE-ISO-1996-1:2005. (2005). *Acoustics: Description, Measurement and Assessment of Environmental Noise. Part 1: Basic Quantities and Assessment Procedures*. Génova.
- Unión Europea. (2002). *Directiva 2002/49/CE*. Diario Oficial de las Comunidades Europeas.
- Unión Europea. (2009). *Reglamento (CE) nº 1222/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo*. Diario Oficial de la Unión Europea.
- Valenzise, G., Gerosa, L., Tagliasacchi, M., Antonacci, F., & Sarti, A. (2007). Scream and gunshot detection and localization for audio-surveillance systems. *IEEE Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance, 2007. AVSS 2007* (págs. 21-16). Londres: IEEE.

- Vallet, M. G. (1983). Heart rate reactivity to aircraft noise after a long term exposure. *Noise as a Public Health Problem*, 2, 965-971.
- Van Dijk, F. J. (1987). Non-auditory effects of noise in industry. *International archives of occupational and environmental health*, 59(2), 133-145.
- Van Renterghem, T., Thomas, P., Dominguez, F., Dauwe, S., Touhafi, A., Dhoedt, B., & Botteldooren, D. (2011). On the ability of consumer electronics microphones for environmental noise monitoring. *Journal of Environmental Monitoring*, 13(3), 544-552.
- Vargas, M. (2005). La contaminación ambiental como factor determinante de la salud. *Revista española de salud pública*, 79(2), 117-127.
- Vasilescu, I., Kotay, K., Rus, D., Dunbabin, M., & Corke, P. (2005). Data collection, storage, and retrieval with an underwater sensor network. *Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems* (págs. 154-165). San Diego: ACM.
- Vida, J. (2006). Valoración de la molestia por contaminación acústica mediante relaciones dosis-efecto. Madrid.
- Viollet-le-Duc, E. (1868). *Diccionario razonado de la arquitectura francesa*.
- Vogel, I. B. (2008). MP3 players and hearing loss: adolescents' perceptions of loud music and hearing conservation. *The Journal of pediatrics*, 152(3), 400-404.
- Vogel, I. V. (2009). Adolescents and MP3 players: too many risks, too few precautions. *Pediatrics*, 123(6), 953-958.
- Wang, T. J. (2000). A modeling study on acid rain and recommended emission control strategies in China. *Atmospheric Environment*, 34(26), 4467-4477.
- Want, R., Schilit, B. N., & Jenson, S. (2015). Enabling the internet of things. *Computer*, 48(1), 28-35.
- Watts, G. R., Crombie, D. H., & Hothersall, D. C. (1994). Acoustic performance of new designs of traffic noise barriers: full scale tests. *Journal of Sound and Vibration*, 177(3), 289-305.
- Welch, B. L. (1970). *Physiological Effects of Noise*. Springer Science & Business Media.
- Whilby, S., Florentine, M., Wagner, E., & Marozeau, J. (2006). Monaural and binaural loudness of 5- and 200-ms tones in normal and impaired hearing. *Journal of the Acoustical Society of America*, 119(6), 3931-3939.

- Whitelaw, W. (1993). Characteristics of the snoring noise in patients with and without occlusive sleep apnea. *American Review of Respiratory Disease*, 147, 635-644.
- Williams, A. L., van Dronghen, W., & Lasky, R. E. (2007). Noise in contemporary neonatal intensive care. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121(5), 2681-2690.
- Williams, I. D. (1995). Road traffic nuisance in residential and commercial areas. *Science of the total environment*, 169(1-3), 75-82.
- WM61A Datasheet. (2017). Recuperado el 4 de Abril de 2017, de <http://industrial.panasonic.com/cdbs/ww-data/pdf/ABA5000/ABA5000CE22.pdf>
- World Health Organisation. (2017). *WHO - Noise*. Recuperado el 30 de Abril de 2017, de <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise>
- World Health Organization. (2002). *The world health report 2002: reducing risks, promoting healthy life*.
- Wrenn, D. H., & Irwin, E. G. (2015). Time is money: An empirical examination of the effects of regulatory delay on residential subdivision development. *Regional Science and Urban Economics*, 51, 25-36.
- Xia, F., Yang, L. T., Wang, L., & Vinel, A. (2012). Internet of things. *International Journal of Communication Systems*, 25(9), 1101-1104.
- Yan, H., Huo, H., Xu, Y., & Gidlund, M. (2010). Wireless sensor network based E-health system: implementation and experimental results. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 56(4), 2288-2295.
- Yen, J. H. (22 de Diciembre de 1998). *Estados Unidos Patente nº 5.852.725*.
- Zorzi, M., Gluhak, A., Lange, S., & Bassi, A. (2010). From today's intranet of things to a future internet of things: a wireless-and mobility-related view. *IEEE Wireless Communications*, 17(6), 44-51.
- Zouganeli, E., & Svinnet, I. E. (2009). Connected objects and the Internet of things—A paradigm shift. *International Conference on Photonics in Switching, 2009. PS'09*. (págs. 1-4). Pisa: IEEE.
- Zwicker, E., & Fastl, H. (1983). A portable loudness meter based on ISO 532 B. *11th International Congress on Acoustics*, (págs. 135-137).
- Zwicker, E., & Fastl, H. (1990). *Psychoacoustics: Facts and models*. Springer Science & Business Media.

VIII - ANEXOS

ANEXO 1: Encuesta para la evaluación de la molestia acústica y ruido.

DATOS SOBRE EL/LA ENCUESTADO/A

1. Sexo:

a. Hombre

b. Mujer

2. Edad:

a. 18-35

b. 36-49

c. 50-65

d. >65

1. Teniendo en cuenta los últimos doce meses, en una escala del uno al diez, ¿cómo percibe el nivel de ruido y/o molestia en su vivienda?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

2. ¿Cuáles de los siguientes sonidos le molestan donde vive?

a. Tráfico.

b. Locales de ocio.

c. Locales comerciales.

-
- d. Construcciones.
- e. Gente (vecinos).
- f. Otros: _____
3. ¿Su vivienda se encuentra cerca de autovías o carreteras transitadas?
- a. Sí.
- b. No
4. ¿Qué tipo de tráfico motorizado es el más molesto por el ruido generado frente a su vivienda?
- a. Automóviles.
- b. Autobuses.
- c. Camiones.
- d. Motocicletas.
- e. Otros: _____
5. En una escala del uno al diez, ¿cuánto le molesta el ruido del tráfico en su vivienda?
- 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

6. ¿Cuánto le afectan los problemas de ruido en su lugar de trabajo o estudios?
- a. Mucho. El ruido afecta a mi rendimiento laboral y salud.
 - b. Algo. El ruido es una constante en mi trabajo pero en niveles admisibles que no me afectan.
 - c. Sólo hay determinados momentos durante mi jornada en los que hay ruidos molestos.
 - d. Nada. Trabajo en un ambiente libre de ruidos o los ruidos de mi trabajo no son molestos

*_*_*_*_*

7. ¿Considera que existen problemas de ruido en *ESTA VÍA*?



Muy bajo Bajo Normal Elevado Muy elevado

8. ¿Cuál piensa usted que es la mayor fuente de ruidos en *ESTA VÍA*?
- a. Ruidos aéreos artificiales (tráfico, teléfonos...)
 - b. Ruidos por vibraciones de maquinarias (ascensores, AACCC...)
 - c. Locales de ocio.
 - d. Actividades comerciales.
 - e. Construcciones.

f. Gente.

g. Otros: _____

h. Ninguno

9. ¿En qué momento el ruido en *ESTA VÍA* es más molesto?

a. Laborable durante el día.

b. Laborable durante la tarde.

c. Laborable durante la noche.

d. Festivo durante el día.

e. Festivo durante la tarde.

f. Festivo durante la noche

10. En una escala del uno al diez, ¿cuánto le molesta el ruido en este momento?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

11. ¿Cuál de las siguientes le parece mejor solución para mejorar la calidad acústica en *ESTA VÍA*?

a. Reducir los niveles de ruido máximo permitido.

b. Controlar los horarios autorizados de apertura y cierre de los locales.

- c. Reducir el número de licencias para locales de ocio.
- d. Aislamiento al ruido de tráfico mediante barreras acústicas.
- e. Cortar y/o desviar el tráfico a determinadas horas.
- f. Ninguna, todo está bien.
- g. Concienciación de la gente
- h. Otros: _____

12. Valoración del encuestador de la molestia del ruido en este momento.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10