

ANÁLISIS PRELIMINAR DE LA MOLESTIA ACÚSTICA RECIBIDA POR LOS CIUDADANOS EN SUS DESPLAZAMIENTOS IN-ITINERE EN VEHÍCULO

PACS: 43.50.Yw, 43.50.Lj, 43.50.Rq, 43.50.Qp

Montoya Belmonte, José¹; Noriega Linares, Juan Emilio¹; Navarro Ruiz, Juan Miguel¹
1 Escuela Politécnica Superior, Universidad Católica San Antonio de Murcia (UCAM)
Avda. de los Jerónimos, s/n, 30.107 Guadalupe (Murcia), España
jmontoya3@alu.ucam.edu, jenoriega@ucam.edu, jmnavarro@ucam.edu

Palabras Clave: loudness, molestia, sonoridad, ruido interior vehículo, prevención de riesgos laborales, contaminación acústica, Internet de las cosas (IoT), ciudades inteligentes.

ABSTRACT

In this research, a preliminary study is carried out on the affection to noise received by citizens on their commuting to workplace. By means of the use of an autonomous measurement device, a campaign has been carried through to measure basic acoustic parameters and psychoacoustic parameters to assess the annoyance. This paper presents and discusses results obtained by comparing basic acoustic with psychoacoustic parameters, observing a good correlation between them. However, it has been noticed that loudness gives extended information about annoyance that basic parameters can capture.

RESUMEN

En esta investigación se realiza un estudio preliminar sobre la afeción al ruido recibida por los ciudadanos en sus desplazamientos en vehículo a su lugar de trabajo. Mediante el uso de un dispositivo de medición autónomo instalado en un vehículo, se ha realizado una campaña de mediciones de parámetros de acústica ambientales básicos y parámetros psicoacústicos para evaluar la molestia. Se presentan y discuten resultados obtenidos comparando parámetros básicos con psicoacústicos observando una buena correlación existen entre ellos. Sin embargo, se resalta que el parámetro sonoridad ofrece información adicional sobre la molestia que no puede capturarse con los parámetros básicos.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la población urbana actual se encuentra expuesta a una compleja mezcla de contaminantes medio ambientales [1]. Uno de ellos es la contaminación acústica, que representa un grave problema en los entornos sociales, sobre todo en las grandes ciudades. En estos últimos años, la creación de ciudades inteligentes, mediante el uso de tecnología de internet de las cosas (IoT) [2], está aumentando, lo que proporciona una nueva herramienta para la gestión y evaluación de la contaminación acústica.

En los seres humanos, el ruido es percibido por nuestro sistema auditivo. Al ser un fenómeno percibido y evaluado subjetivamente por todos los seres humanos, la exposición al ruido se trata de una de las quejas más frecuentes de las poblaciones que viven en las grandes ciudades [3]. El aumento de los niveles de contaminación acústica ha generado que se ponga más atención en el ruido y sus efectos en las personas. La exposición constante a ruido, aunque no sobrepase los límites de niveles regulados, 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 a lo largo del tiempo. [4]

Centrándose en el mundo laboral, esta contaminación acústica afecta tanto a los trabajadores que realizan su vida laboral en el interior de un vehículo, como pueden ser taxistas, chóferes, transportistas, comerciales y un largo etcétera, como a los desplazamientos in itinere. Se denomina in itinere a "aquel desplazamiento que tiene lugar a consecuencia del desplazamiento que el trabajador realiza para ir o volver del trabajo. Se exige que se haya seguido el trayecto habitual, utilizando medios ordinarios de transporte y que no se haya producido una ruptura de la relación de causalidad. [5]

De las diferentes fuentes de ruido presentes en las ciudades, la más importante es la del tráfico rodado [6,7] debido a la superficie que ocupa, siendo al que más expuesto se encuentra la población, a excepción de las zonas cercanas a líneas ferroviarias y aeropuertos [6]. La Directiva Europea de Ruido Ambiental [8] propone métodos de cálculo y métodos de mapeado para creación de mapas estratégicos de ruido, estimación de la población afectada, planes de acción frente al ruido y la divulgación de los resultados del mapa de ruido al público. Actualmente existen diferentes métodos de cálculo cuya función es estudiar la fuente sonora y sus características [9,10,11], y cuyo fin es realizar 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 son muy usados para el estudio del ruido de tráfico en ciudades [12,13]. Por otro lado, para la evaluación de la contaminación acústica en ciudades también se utilizan métodos de medición directa o mapeado, ya sea mediante estaciones fijas [14], como estaciones móviles [15]. Los dispositivos conectados IoT también se están empezando a utilizar para la creación de mapas de ruido en tiempo real y dinámicos [16].

Nuestra investigación se plantea desde el punto de vista del ciudadano trabajador que pasa mucho tiempo en el interior de su vehículo u otro medio de transporte público. Por lo tanto, el presente trabajo tiene como objetivo estudiar y evaluar las molestias y afecciones debidas a la contaminación acústica recibidas por las personas, en los periodos in itinere que pasan en el interior de los vehículos, tanto por la exposición a ruido de tráfico y como del entorno.

METODOLOGÍA

Experimento

El estudio se desarrolla en un entorno cerrado, y más concretamente en el vehículo que el trabajador utiliza en su desplazamiento in itinere, Al ser un entorno cerrado se determina

que no existan influencias meteorológicas o ambientales que puedan distorsionar los datos recogidos por el dispositivo. El proceso de medición se ha realizado entre dos puntos intermedios, en el trayecto in itinere que realiza el sujeto a su lugar de trabajo tal y como muestra la Figura 1. Estos dos puntos abarcan desde el campus de Murcia de la Universidad Católica San Antonio de Murcia (UCAM) hasta el inicio de Nacional 340-a, la cual coincide con el comienzo de la población de Alhama de Murcia. La distancia entre ambos puntos es de 28,6 kilómetros de distancia. Ambos puntos serán considerados como punto de inicio de la ruta y punto final del trayecto. De los 28,6 km, los primeros 1,6 km de carretera discurren por población, ver Figura 1, que como se puede observar cuenta con 3 rotondas. Los 27 km restantes son de autovía, perteneciendo a la autovía del Mediterráneo A-7 a partir del km 571 y hasta el km 598.

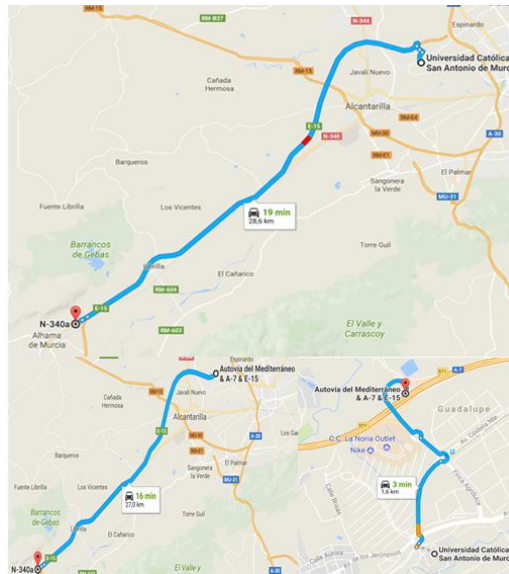


Figura1. Recorrido con detalles del inicio y final del trayecto.

El aparcamiento del campus es, por tanto, punto de partida a primera hora de la mañana, en torno las 7:10h- 7:20h a.m., y punto de llegada alrededor de las 18:30h- 18:40h. De igual manera, la entrada a la población de Alhama de Murcia es punto de llegada en el primer trayecto in itinere, siendo la hora de llegada entre las 7:30h-7:40h a.m. También es punto de salida en la vuelta del trabajador a su casa alrededor de las 18:10h-18:20 h.

Este estudio preliminar consta de una semana completa de mediciones, con dos mediciones cada día, que representan un desplazamiento in itinere con una duración de 15 min por medición y una velocidad de 103 ± 10 km/h. El vehículo con el que se ha realizado el estudio corresponde a un Seat Ibiza del año 2012, con Motor Diésel 1.6 TDI y 66 kW, lo que corresponde a 90 cv, cuya cilindrada es de 1598 cc. Y un nivel sonoro en parado de aproximadamente unos 73 dB(A).

Parámetros a analizar

Acciones preventivas R.D.286/2006	Nivel diario equivalente LAeqd		
	> 80 dB (A) y/o >135 dB (C) de Lpico	> 85 dB (A) y/o >137 dB (C) de Lpico	> 87 dB (A) y/o >140dB (C) de Lpico
Información y formación a los trabajadores y/o sus representantes	Si	Si	Si
Evaluación de la exposición al ruido	Cada 2 años	Anual	Anual
Protectores auditivos	Poner a disposición de toda el personal expuesto	Uso obligatorio para todo el personal expuesto	Uso obligatorio para todo el personal expuesto

En materia legislativa de riesgos laborales el Real Decreto 286/2006, en su artículo 5 expone los valores límite de exposición y los valores de exposición que dan lugar a una acción, referidos a los niveles de exposición diaria y a los niveles de pico. [17]

Tabla 1. Valores límites referidos a los niveles de exposición diaria y a los niveles de pico del R.D. 286/2006.

De acuerdo con esta normativa, los métodos e instrumentos utilizados para la realización del estudio tienen que permitir la determinación del nivel de exposición diario equivalente ($L_{Aeq,d}$), del nivel de pico (L_{pico}) y del nivel de exposición semanal equivalente ($L_{Aeq,s}$).

En primer lugar, el nivel diario equivalente es el nivel de presión acústica equivalente ponderado A, cuando el tiempo de exposición se refiere a una jornada de trabajo de 8 horas, en el caso de que el tiempo de exposición (T) sea inferior al tiempo de referencia, el nivel equivalente diario también es menor y viene definido por la siguiente ecuación:

$$L_{Aeq,d} = L_{Aeq,T} + 10 \cdot \log \frac{T}{8}$$

Siendo $L_{Aeq,T}$ es el nivel de presión acústica continuo equivalente ponderado A en un periodo de tiempo T, cuya ecuación se presenta a continuación:

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{P_A(t)}{P_0} \right)^2 dt \right]$$

Donde T es el tiempo de exposición del trabajador al ruido. $P_A(t)$ presión acústica instantánea ponderada en A, y P_0 presión acústica de referencia.

Cuando la exposición diaria al ruido varíe considerablemente de una jornada laboral a otra, se puede utilizar el nivel semanal equivalente calculado por la suma logarítmica de los niveles correspondientes a cada uno de los 5 días de trabajo para evaluar los niveles de ruido a los que los trabajadores están expuestos, a condición de que: el nivel de exposición semanal al ruido, no sea superior al valor límite de exposición de 87 dB(A)

De acuerdo con el anexo I del R.D. 286/2006 [17], el nivel de exposición semanal equivalente, $L_{Aeq,s}$, en decibelios A, viene dado por la expresión:

$$L_{Aeq,s} = 10 \log \frac{1}{5} \sum_{i=1}^m 10^{0,1 L_{Aeq,di}}$$

Donde m es el número de días a la semana en que el trabajador está expuesto al ruido y $L_{Aeq,i}$ es el nivel de exposición diario equivalente correspondiente al día i.

El nivel pico es el valor máximo de la presión acústica instantánea. Este valor pico sirve para evaluar la exposición cuando hay ruidos de impulso. En el caso concreto de este estudio, no es necesario tener en cuenta el valor de L_{pico} , ya que se supone que no estamos expuestos

a fuentes de ruido impulsivas, como pueden ser martillos, picos, cortadoras, etc... El estudio de este proyecto se centra en el ruido de tráfico, que es más estacionario.

Además de estos parámetros, para completar el estudio se analizarán parámetros utilizados para evaluar la contaminación acústica por ruido de tráfico como los niveles percentiles de ruido L_{10} y L_{90} , y otros más específicos como:

El índice de ruido de tráfico TNI usado para medir las molestias teniendo en cuenta el flujo de tráfico [18]

$$TNI = 4(L_{10} - L_{90}) + L_{90} - 30$$

El clima sonoro NC que representa el intervalo de niveles sonoros registrados durante el 80% del tiempo total de la medida

$$NC = L_{10} - L_{90}$$

Índice de contaminación acústica L_{NP} Este índice se basa en el principio de que el nivel de molestia que produce un determinado ruido está relacionado con el valor del nivel continuo equivalente y con la dinámica del ruido, es decir, la amplitud de sus fluctuaciones.[19]

$$L_{NP} = L_{Aeq,T} + K\sigma$$

Donde $L_{Aeq,T}$ en dB (A), es el promedio del nivel de energía equivalente del ruido sobre un periodo específico, K es una constante que habitualmente toma el valor 2,56, y σ es la desviación estándar de los niveles instantáneos en el tiempo de medida T.

Como objetivo específico de este estudio, se propone además la evaluación de parámetros psicoacústicos como la molestia del ruido en las personas. Para ello, se calcularán los valores de sonoridad o loudness tanto en modo monaural y binaural. Para el caso de la escucha diótica, las señales recibidas en los dos canales auditivos tienden a contribuir de igual manera en el loudness total. Zwicker & Fastl [20] construyeron el modelo más usado para el cálculo de la molestia junto con el modelo más extendido del loudness monaural. Mientras que para el loudness binaural, se utilizará la medida global propuesta por Moore [21].

Sistema de medición

Para la adquisición de los parámetros enunciados en el apartado anterior se utilizará un dispositivo portátil y autónomo, que permite la captación del sonido a través de varios micrófonos, para posteriormente sintetizar la respuesta binaural del humano y calcular, además de parámetros acústicos básicos, un parámetro psicoacústico que permite valorar la molestia binaural. Este dispositivo bisensorial acústico de bajo coste ha sido diseñado y testado por el grupo de telecomunicaciones avanzadas de la Universidad Católica de Murcia [22].

Este sistema de adquisición y procesado de sonido está compuesto por la cámara PSEye de Sony formada por un array de micrófonos, una tarjeta de captura del sonido y un procesador basado en la plataforma Raspberry Pi 3 modelo B. El dispositivo además cuenta con una fuente

de alimentación portátil 20.000 mAh que le permite ser usado sin tener que estar conectado a la corriente eléctrica. Como se puede observar en la Figura 2.a, para el montaje de todos los componentes seleccionados en el dispositivo final, se ha usado una caja estanca de 240 mm x 190 mm x 95 mm con grado de protección contra agua y polvo IP66.

El dispositivo, para poder medir de manera fiel la presión sonora que el sujeto recibiría, fue colocado a la misma altura de los conductos auditivos del trabajador, pero en el asiento del

copiloto, ver Figura 2.b. De esta manera se pretende evaluar el mismo nivel de ruido que un pasajero o el conductor puede recibir.



Figura 2. (a) Detalle del interior y exterior del dispositivo. (b) Instalación del dispositivo en interior del vehículo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer lugar, se presentan los datos obtenidos de un día concreto (viernes). Como se observa en el gráfico 1, los valores del minuto 1 al 17 representan la ida del desplazamiento en itinere, mientras que la vuelta se corresponde con los valores entre el minuto 18 y el 33.

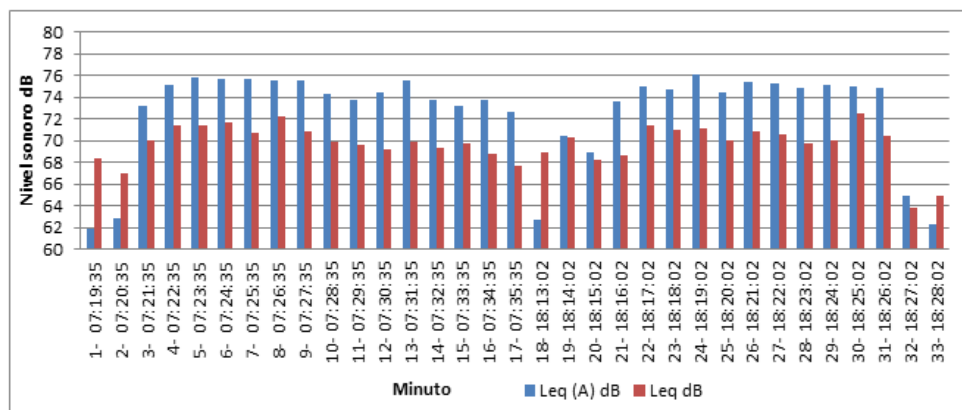


Gráfico 1. Comparativa Leq, 1 minuto, en dB y dB (A) en cada minuto del trayecto de un día concreto.

Tal y como se observa en el gráfico 1, en general no se superan los valores establecidos en la tabla 1, y se observa que en los minutos 1, 2, 32 y 33, que corresponde con el vehículo en la zona de población, se reducen considerablemente los niveles sonoros. Además, se observa que los niveles equivalentes se mantienen casi constantes a lo largo del trayecto por la Autovía A-7, siendo valores tanto en la ida como en la vuelta muy similares.

Los valores de los parámetros y valores estadísticos para este día elegido son:

Media dB(A)	Desviación Típica	Mediana dB(A)	Varianza	Máximo dB(A)	Mínimo dB(A)	L90 dB(A)	L10 dB(A)	NC dB(A)	TNI dB(A)	LNP dB(A)
72,34	4,87	74,31	23,74	78,26	54,10	62,73	76,26	13,54	86,87	84,44

Tabla 2: Valores estadísticos obtenidos en el desplazamiento in itinere de un día concreto

A continuación, se muestran los valores para el caso del loudness mono y binaural comparados con el nivel sonoro en dBA:

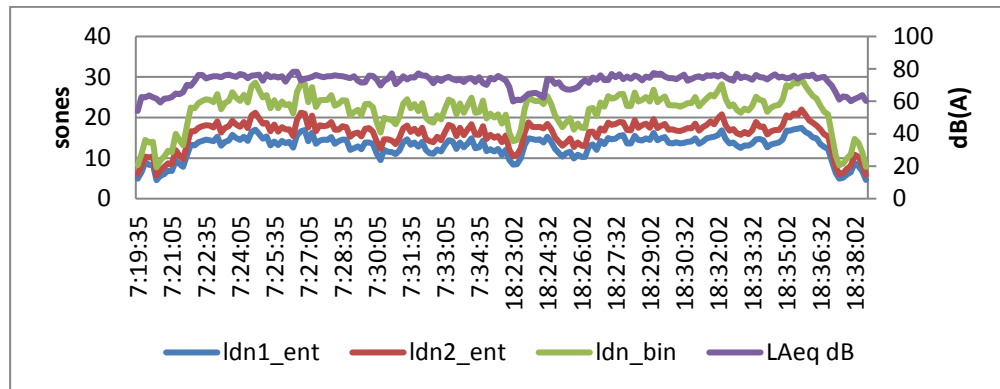


Gráfico 2. Comparativa Loudness derecho, izquierdo, binaural y Leq, en dB (A) cada 10 segundos.

También es necesario explorar que ocurre con los diferentes días de la semana:

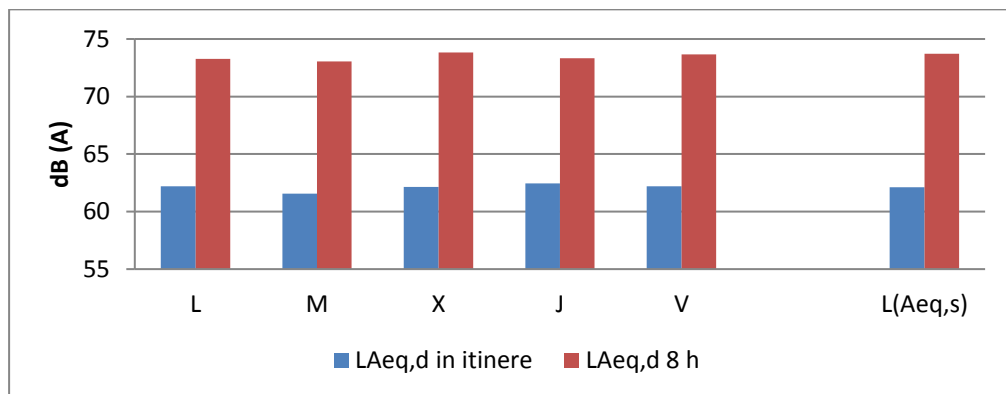


Gráfico 3. Representación Leq,d in itinere y Leq,d 8h en (A) durante una semana y el valor $L_{Aeq,s}$

$L_{eq,d 8h}$ representa el nivel equivalente, considerando que la persona conduce durante una jornada laboral completa (8 horas), mientras que $L_{eq,d in itinere}$ representa únicamente la conducción durante su desplazamiento in itinere, siendo la exposición sonora durante el resto de la jornada inferior a la producida durante el desplazamiento. Los valores de exposición diaria al ruido, durante la semana de medición, muestran cierta similitud entre ellos, incluso con el nivel semanal equivalente. Según el R.D. 286/2006, el valor de exposición semanal equivalente no sería necesario calcularlo, ya que los resultados día a día presentan esa similitud.

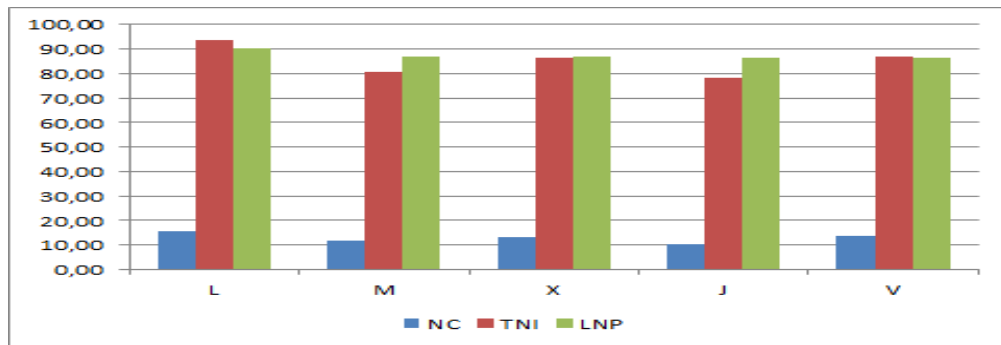


Gráfico 4. Representación de los valores NC, TNI y LNP durante una semana.

CONCLUSIONES

En este estudio se describe una evaluación preliminar sobre las molestias que causa el ruido en los desplazamientos in itinere de los trabajadores. Para ello, se ha realizado una campaña de mediciones a lo largo de una semana en el interior de un coche durante los trayectos de ida y vuelta al lugar de trabajo. Mediante un dispositivo autónomo de adquisición y procesado de sonido, se han obtenido los valores de niveles de ruido, así como el parámetro subjetivo relacionado con la molestia, el loudness, tanto monoaural como binaural. Los resultados obtenidos indican que, en general, el trabajador en su desplazamiento in itinere se encuentra a niveles inferiores a los marcados por la normativa competente en materia de Prevención de Riesgos Labores, ya que se encuentra siempre por debajo de 87 dB (A). Si dicho desplazamiento se trasladara a la jornada laboral de una persona que se encuentra 8 horas dentro de su vehículo, también se cumple la normativa, por lo que no es necesario el uso de dispositivos que atenúen el ruido, como son equipos de protección individual en materia sonora. Sin embargo, los niveles subjetivos de molestia ocasionada por el ruido indican una posible pérdida de confort y de calidad acústica en aquellos trabajos en los que los desplazamientos se vean afectados por niveles de ruido. En estudios posteriores, este trabajo será ampliado con un mayor número de mediciones y trayectos, así como mediante la utilización de herramientas como encuestas y simulaciones virtuales, con el fin de obtener conclusiones que ayuden a mejorar el confort de los trabajadores.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Tang, U. & Wang, Z.(2007) Influences of urban forms on traffic-induced noise and air pollution: Results from a modelling system. *Environmental Modelling & Software*,22(12):1750-1764.
- [2] Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). Internet of Things for Smart Cities. *IEEE Internet Of Things Journal*, 1(1), 22-32.
- [3] Muzet, A. (2007). Environmental noise, sleep and health. *Sleep medicine reviews*, 11(2), 135-142.
- [4] 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
- [5] Real Decreto Legislativo 8/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley General de la Seguridad Social.
- [6] Nedeff, V., Mosnegutu, E., Tomozei, C., Pal, A. & Samoila, F.(2012) Design and implementation of a fixed system for video-acoustic monitoring of urban noise pollution.. *Annals Of DAAAM & Proceedings 2012, Jan*), 23(1): 0835-0840.
- [7] World Health Organization. 2000. Guidelines for community noise. <http://www.who.int/docstore/peh/noise/guidelines2.html> (Consultado 30 Agosto.2017).
- [8] Huang, H., Li, R., Yang, M., Lim, T., & Ding, W. (2017). Evaluation of vehicle interior sound quality using a continuous restricted Boltzmann machine-based DBN. *Mechanical Systems And Signal Processing*, 84, 245-267
- [9] Bobrovnikii, Y. I., & Pavic, G. (2003). Modelling and characterization of airborne noise sources. *Journal of Sound and Vibration*, 261(3), 527-555.,
- [10] 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.

- [11] Pavić, G. (2010). Air-borne sound source characterization by patch impedance coupling approach. *Journal of Sound and Vibration*, 329(23), 4907-4921.
- [12] Barry, T. M., & Reagan, J. A. (1978). FHWA highway traffic noise prediction model (No. FHWA-RD-77-108 Final Rpt). Washington.
- [13] 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. (Cho & Mun, 2008).
- [14] Valentin, N., Claudia, T., Mirela, P., BOGDAN, M., Emilian, M., & GABRIEL, L. (2011). Noise monitoring in a high traffic are of Bacau, Romania. *Journal of Engineering Studies and Research*, 17(1).
- [15] Zannin, P., Ferreira, A., & Szeremetta, B. (2006). Evaluation of Noise Pollution in Urban Parks. *Environmental Monitoring And Assessment*, 118(1-3), 423-433.
- [16] Choudhary, S.K., Sathe, R.B. & Kachare, A. E. (2017) Smart Cities Based on Internet of Things (IoT) -A Review, *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, V48(8), 434-439.
- [17] REAL DECRETO 286/2006, de 10 de marzo, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido.
- [18] Langdon, F. J., & Scholes, W. E. (1968). *The Traffic Noise Index: A Method of Controlling Noise Nuisance*.
- [19] Robinson, D. W. (1971). Towards a unified system of noise assessment. *Journal of Sound and Vibration*, 14(3), 279-298.
- [20] Zwicker, E., & Fastl, H. (1990). *Psychoacoustics: Facts and models*. Springer Science & Business Media.
- [21] Moore, B. C., & Glasberg, B. R. (2007). Modeling binaural loudness. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121(3), 1604-1612.
- [22] 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.