

## IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO MODIFICADO DE LA MOLESTIA PSICOACÚSTICA EN NODOS IoT Y DE COMPUTACIÓN EDGE DE NUEVA GENERACIÓN PARA LA MONITORIZACIÓN DEL PAISAJE SONORO EN SMART CITIES

PACS: 43.66.-x, 43.66.+y

Segura Garcia, Jaume; López Ballester, Jesús; Felici Castell, Santiago; Pérez Solano, Juan J.; Navarro Ruiz, Juan M.; Cobos Serrano, Máximo.

1 ETSE - Universitat de València, Burjassot, España, email: [jaume.segura@uv.es](mailto:jaume.segura@uv.es)

2 UCAM – Universidad Católica San Antonio de Murcia, Guadalupe, España, email: [jmnavarro@ucam.edu](mailto:jmnavarro@ucam.edu)

**Palabras Clave:** psicoacústica, tonalidad, IoT, EDGE, Matlab

### ABSTRACT.

The environmental psycho-acoustic annoyance is an important metric in the Smart City with Next Generation technologies. The use of such technologies can help to rapidly deploy large quantity of elements, which can dynamically be used for different applications. Also, the psycho-acoustic annoyance is usually based on the Zwicker's model, but this model does not consider tonality of sounds to weight the subjective nuisance produced.

In this work, we show a on-going work for the implementation of the nodes and EDGE/Fog to determine a modified version of the Zwicker's model, to consider sound tonality (based on Aures' method). This implementation has been designed to consider two options for offloading, one with sampling and computation on the EDGE and another with sampling in 5G-nodes and computation on the EDGE.

### RESUMEN.

La molestia psicoacústica puede considerarse un parámetro importante en las Smart Cities con tecnologías de Nueva Generación. El uso de estas tecnologías ayuda a desarrollar y desplegar rápidamente una gran cantidad de elementos, los cuales pueden ser usados para diferentes aplicaciones. Además, la molestia psicoacústica suele estar basada en el modelo de Zwicker, sin embargo, este modelo no considera la tonalidad de los sonidos para ponderar cuán molesto resulta un sonido.

En este trabajo, mostramos la implementación de un nodo y un EDGE, y algunas medidas de prueba, para determinar una versión modificada del modelo de Zwicker para incluir la tonalidad sonora (cuya obtención se basa en el método de Aures). Esta implementación ha sido diseñada para considerar dos opciones de "offloading", una con muestreo y cálculo de parámetros en el EDGE y otra con muestreo en nodos 5G y cálculo en el EDGE.

## 1. INTRODUCCIÓN

El concepto de paisaje sonoro dentro de la Smart City ha tomado un papel principal en el entorno urbano. Según la norma ISO 12931-1:2014, se refiere al "entorno acústico tal como lo percibe o experimenta y/o entiende una persona o personas, en su contexto" [7, 8]. De este modo, el paisaje sonoro supone un cambio de paradigma desde las políticas de control del ruido hacia un nuevo enfoque multidisciplinar, ya que implica no sólo las mediciones físicas, sino también la evaluación subjetiva procedente de los ciudadanos y las ciencias sociales que establecen el enfoque de cómo las personas realmente experimentan un entorno acústico en contexto. De hecho, la taxonomía de sonidos en la descripción del paisaje sonoro, definida en la norma ISO

12931-2:2018 [8], es de gran ayuda cuando se plantea la clasificación automática con enfoques de Deep Learning [11].

Diferentes autores han desarrollado enfoques para la monitorización del paisaje sonoro e incluso de la molestia psicoacústica desde diferentes perspectivas [12, 19]. Estos enfoques consideraban el uso de parámetros basados en diferentes modelos psicoacústico, principalmente el publicado por Zwicker [6], considerando Loudness [9] como el parámetro más relevante y otros como Sharpness [5], Roughness y Fluctuation Strength [16]. Además, también se usan otras variaciones del nivel de presión sonora equivalente [1, 3] para describir el paisaje sonoro.

En la visión tradicional, la descripción del paisaje sonoro se centra en las mediciones para los mapeos que suelen basarse en el Nivel Sonoro Equivalente (denominado *Leq*). Sin embargo, *Leq* no es suficiente para esta descripción a la hora de evaluar la molestia o el agrado subjetivo, ya que valores similares de *Leq* pueden dar lugar a diferentes sensaciones del ruido, percibidas por diferentes personas, no proporcionando información relacionada con la molestia del ruido ambiental y sus propiedades psicoacústicas. Esto se debe a la información de *Leq* relativa a las características de la frecuencia.

Además, hay muchas fuentes de ruido con niveles bajos de *Leq* que producen una molestia incómoda e incluso peor que las que tienen valores altos de *Leq*, por ejemplo, una vibración mecánica con un tono aislado. Para definir métricas basadas en el sistema auditivo humano, se han realizado diferentes estudios y técnicas y se han presentado distintos métodos para estimar la molestia subjetiva (como el modelo de Zwicker [6] o el modelo de Moore [13]). Sin embargo, todos ellos requieren un alto coste computacional debido a la complejidad del análisis y el procesamiento de la señal requerido.

En el caso de los parámetros psicoacústicos, la respuesta subjetiva producida por el sonido tonal es más molesta [20] y algunos autores propusieron parámetros de penalización. En [4], los autores propusieron una modificación del modelo de molestia psicoacústica de Zwicker's para ponderar el efecto de los sonidos tonales en la evaluación subjetiva. Nuestro propósito en este trabajo es modificar nuestra implementación establecida en [16] añadiendo la Tonalidad como parámetro de ponderación.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera. Tras la introducción en la que centramos la motivación y el objetivo de este trabajo, describimos la metodología y los materiales utilizados en nuestro sistema de configuración en la sección 2. También describimos el modelo de Zwicker utilizado y las modificaciones introducidas. En la sección 3 se explica la implementación en dos opciones diferentes (es decir, el uso de un dispositivo Fipy para el muestreo de audio y el EDGE para el cálculo de parámetros a partir del audio recibido y la segunda, el EDGE muestreando el audio y calculando los parámetros del paisaje sonoro). En la sección 4, se estudia el uso de estas opciones, discutiendo los resultados obtenidos. La última sección, concluye el estudio resumiendo la discusión y enfocando futuros trabajos a partir de este estudio.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo de los algoritmos involucrados en el modelo de Molestia Psicoacústica (*PA*), basado en el modelo de Zwicker, se desarrolló principalmente en [16]. En este trabajo, nos centramos en una modificación de la implementación de este modelo para introducir la tonalidad como un parámetro vinculado con una mayor molestia.

### 2.1. Modelo de Zwicker y Tonalidad

El modelo de molestia de Zwicker [6], como ya se ha mencionado, que se centra tradicionalmente en la evaluación de cuatro parámetros (es decir, *N*, *S*, *R* y *F*) para determinar la *PA*, como una combinación no lineal de los parámetros anteriores.

1) Loudness (*N*): Esta magnitud describe el valor perceptual de la intensidad sonora percibida por el oído humano. Se mide en *Sones* en una escala lineal y representa la intensidad subjetiva

de un sonido. No tiene en cuenta ninguna distinción perceptiva entre sonidos "agradables" o "molestos". El procedimiento de cálculo está normalizado en la norma ISO 532-1:2017 [9].

2) Sharpness ( $S$ ): Es el valor de la métrica que evalúa la percepción sensorial humana de lo desagradable en los sonidos y que tiene en cuenta las componentes de alta frecuencia y se puede considerar como un centro del espectro. Se mide en *acums* en una escala lineal y está estandarizado por la norma DIN 45692 [5].

Nuestro modelo utiliza el método definido por Zwicker y Fastl que es en el que se basa la norma y se basa principalmente en la implementación realizada en [16].

3) Roughness ( $R$ ): Esta métrica describe como se percibe la fluctuación sonora incluso cuando  $L$  o  $Leq,T$  permanecen inalterados. Analiza cómo afecta los diferentes grados de modulación de frecuencia (alrededor de 70 Hz) en cada banda crítica (CB). La unidad básica de  $R$  es *Asper*. El modelo utilizado para  $R$  es el definido por Jourdes [10] basado en el modelo optimizado de Daniel [14].

4) Fluctuation Strength ( $F$ ): Muestra cuan intensamente o débilmente fluctúan los sonidos. Depende de la frecuencia y la profundidad de las fluctuaciones de sonoridad, alrededor de 4 Hz en cada ancho de banda rectangular equivalente (ERB). Se mide en *Vacils*. El modelo tradicional de Zwicker tiene en cuenta la contribución de  $S$  siempre que sea mayor que 1.75 *acums*. Las ecuaciones (1) describen la determinación de la molestia psicoacústica de acuerdo con este modelo. En caso que la ecuación (1b) tenga un  $S$  menor que 1.75 *acums*, tendremos que  $w_S = 0$ . También, en el caso de  $N$ , tiene en cuenta la contribución del percentil 5 ( $N_5$ ), que indica, una vez ordenados los datos de menor a mayor, el valor de  $N$  por debajo del cual se encuentra el 5% de observaciones de la sonoridad.

$$PA = N_5(1 + \sqrt{w_S^2 + w_{FR}^2}). \quad (1a)$$

donde

$$w_S = \frac{(S-1.75)}{4} \log(N_5 + 10). \quad (1b)$$

$$w_{FR} = \frac{2.18}{N_5^{0.4}} (0.4F + 0.6R). \quad (1b)$$

El modelo modificado de Zwicker, que muestra [4], introduce un nuevo término en la ecuación (1a) que tiene en cuenta la componente tonal de los sonidos evaluados. Este término se aprecia en la ecuación (2), donde el término  $w_T$  de la ecuación (2b) contempla la tonalidad ( $T$ ), cuya extracción de componentes ha sido implementada usando el modelo de tonalidad de Aures [2], a partir del algoritmo de Terhardt [18] para la extracción del *pitch* de señales tonales complejas.

$$PA = N_5(1 + \sqrt{w_S^2 + w_{FR}^2 + w_T^2}). \quad (2a)$$

donde

$$w_S = \frac{6.41}{N_5^{0.52}} T. \quad (2b)$$

Según [21], para la aplicación del modelo de tonalidad de Aures, tras el análisis del espectro, los cálculos se dividen en dos vías. Una es la del cálculo basado en las componentes tonales que implica el cálculo del exceso de nivel de presión sonora (SPL) para cada componente tonal y su función de ponderación tonal. El otro es el cálculo de la sonoridad total de todo el espectro y la sonoridad del espectro de ruido y, por último, se obtiene la ponderación de la sonoridad tonal (por espectro de ruido se entiende el espectro que elimina los componentes tonales o componentes de banda estrecha). La ponderación tonal se calcula para todos los componentes con niveles de exceso de SPL positivos. El modelo de tonalidad de Aures tiene en cuenta la dependencia del nivel del sistema auditivo humano mediante la sonoridad o  $N$ . También muestra una forma de extraer un valor único para la tonalidad ( $T$ ).

### 3. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

La metodología usada en este artículo ha seguido una estrategia doble: la realización del muestreo del audio en el propio EDGE, donde también se realiza el cálculo de las métricas psicoacústicas, y su implementación en un nodo Fipy, enviando a continuación el audio al EDGE mediante el protocolo MQTT.

Los diferentes algoritmos de las métricas psicoacústicas  $N$ ,  $S$ ,  $R$ ,  $FS$  y  $T$  han sido implementados en Matlab, a partir de [15, 17]. De igual manera, se ha integrado estos algoritmos en modelos Simulink que permiten su conversión a código C/C++ mediante la herramienta "coder" de Matlab y su instalación directa en plataformas tipo Single Board Computer (SBC). El código se recoge en [https://github.com/jausegar/urbauramon/tree/master/URPAA\\_Rasp\\_simulink](https://github.com/jausegar/urbauramon/tree/master/URPAA_Rasp_simulink). Primero, se ha de cargar el fichero de constantes al workspace y después ejecutar el modelo Simulink, subiéndolo a la Raspberry Pi (seguir el procedimiento descrito en el link del Github que lo especifica). En nuestro caso, se ha implementado en una Raspberry Pi 4B+ con 4GB de memoria RAM (Rpi4). Esta plataforma actúa como EDGE del sistema, que permite el cálculo de las métricas psicoacústicas a partir de los audios registrados.

Las figuras 1 y 2 recogen el esquema en Simulink del algoritmo completo que determina las diferentes métricas psicoacústicas, así como la molestia psicoacústica modificada [4], se han implementado ambas opciones teniendo en cuenta estas dos estrategias, i.e. el muestreo en el nodo y el muestreo en el EDGE.

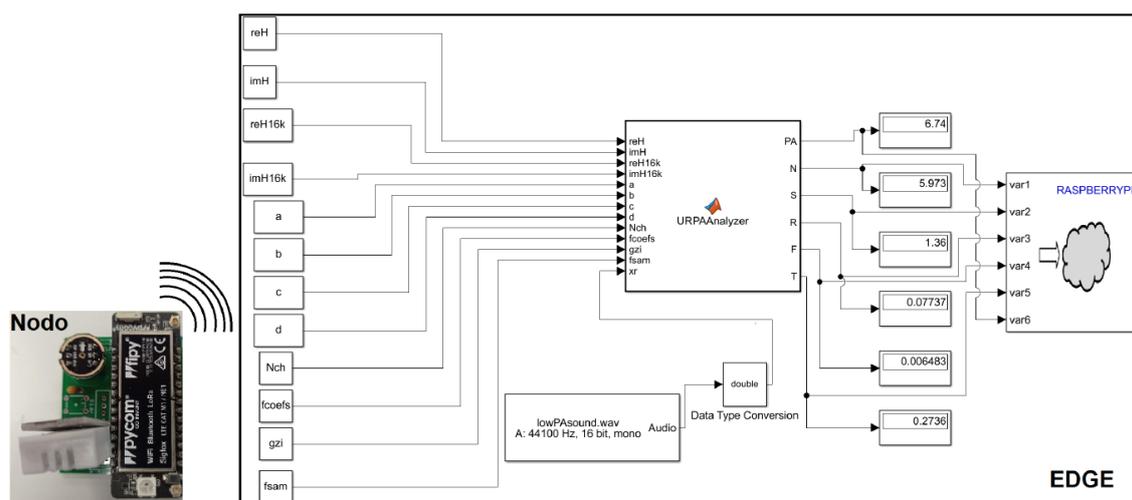


Figura 1 – Modelo Simulink para el cálculo de la molestia psicoacústica a partir de un audio en el EDGE (muestra el nodo Fipy).

En la figura 1, se recoge la opción en la que un nodo con procesador basado en ESP32 con diversas opciones de conectividad inalámbrica (i.e. Wifi, BLE, Lora, Sigfox y LTE-M/NB-IoT), llamado Fipy de Pycom, con un micrófono MEMS INMP441, muestrea audio, envienta y manda el audio a la Rpi4, la cual permite el cálculo de las diferentes métricas. En la figura 2, se recoge la opción en la que la propia Rpi4, que actúa como EDGE, tiene conectado un micrófono USB Tonor y muestrea el audio que después servirá para calcular las métricas psicoacústicas.

En ambas opciones, la salida, que es un array con las diferentes métricas, se envía a un Cloud online. En nuestro caso, hemos optado por usar Thingspeak, por su rápida integración en Matlab.

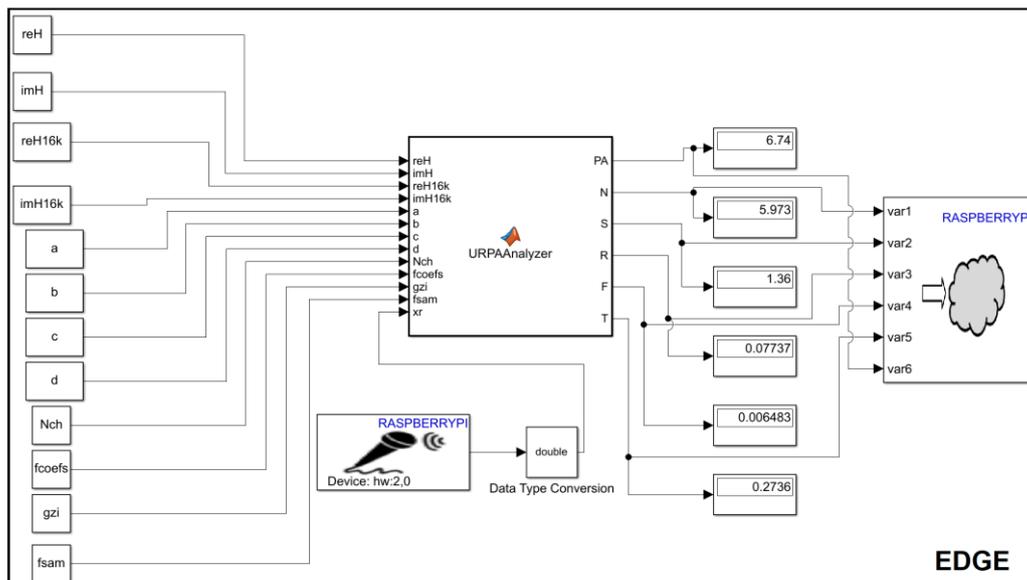


Figura 2 – Modelo Simulink para el cálculo de la molestia psicoacústica a partir de un micrófono en el EDGE (muestra el EDGE).

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de un proceso de calibrado, hemos medido desde las 17:01 a las 17:51 del 29/11/2021 valores de parámetros psicoacústicos de un martillo neumático a partir de una grabación digital<sup>1</sup> renderizado mediante un altavoz Behringer MS16, tomando valores cada 25s aproximadamente.

Se ha calculado la molestia psicoacústica producida mediante el modelo de Zwicker y mediante el modelo modificado con la tonalidad. La figura 3 muestra los valores calculados con los dos modelos evidenciando que la aparición de sonidos tonales en un ambiente ruidoso produce mayor molestia subjetiva. El cálculo del modelo de molestia con la tonalidad se lanzaba a partir de valores de tonalidad a partir de 0.3, lo cual se observa en la figura con valores incrementados. También se observa que este ruido, aunque molesto a ciertos niveles, no es muy tonal, por lo que un gran porcentaje de las medidas de los dos modelos coinciden.

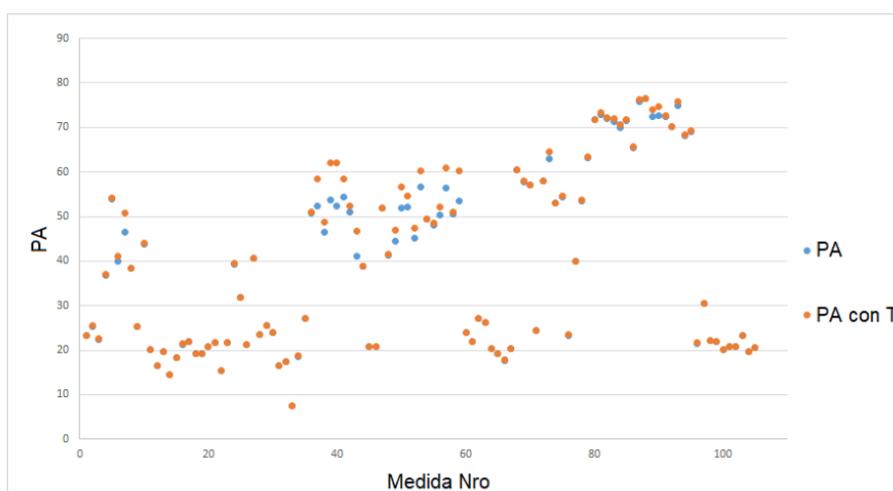


Figura 3 – Registro de medidas de molestia psicoacústica (PA) con el modelo de Zwicker (azul) y con el modificado (naranja).

<sup>1</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=4VGPLW04dsA&t=1960s> (registro martillo neumático)

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan diferentes opciones de implementación de un algoritmo modificado de la molestia psicoacústica, introduciendo un término que pondera la tonalidad de los sonidos. También se ha aplicado el modelo a la medida del ruido generado por un martillo neumático. Se ha observado que, a partir los valores calculados con los dos modelos, la aparición de sonidos tonales en un ambiente ruidoso produce mayor molestia subjetiva. Para trabajos futuros, se pretende extender este estudio a un mayor número de tipologías de entornos ruidosos.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido parcialmente financiada por el Ministerio de Innovación y Economía (ref.: BIA2016-76957-C3-1-R, cofinanciado con fondos FEDER). También por la Universitat de València, con la ayuda a acciones especiales UV-INV-AE-1544281 y la ayuda para estancias UV-INV\_EPDI-1993235

## REFERENCIAS

- [1] Arce, P.; Salvo, D.; Piñero, G. and Gonzalez, A. FIWARE based low-cost wireless acoustic sensor network for monitoring and classification of urban soundscape. *Computer Networks*, 196, 2021, 108199
- [2] Aures. W. Procedure for Calculating the Sensory Euphony of Arbitrary Sound Signals. *Acustica*, 59, 1985, 130–141
- [3] Chen, Ch. Y. Monitoring time-varying noise levels and perceived noisiness in hospital lobbies. *Building Acoustics* 28(1), 2021, 35–55. <https://doi.org/10.1177/1351010X20919868>
- [4] Di, G.-Q. Chen, X.-W.; Song, K.; Zhou, B.; and Pei, Ch.-M. Improvement of Zwicker's psychoacoustic annoyance model aiming at tonal noises. *Applied Acoustics* 105 (2016), 164–170. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.12.006>
- [5] DIN45692/A1:2009. *Measurement technique for the simulation of the auditory sensation of sharpness*. Standard. Deutsches Institut Fur Normung E.V. (German National Standard), Beuth Verlag GmbH, D., 2009
- [6] Fastl, H.; Zwicker, E. *Psychoacoustics: Facts and Models*. Springer, Berlin, Heidelberg., 2007.
- [7] ISO 12913-1:2014. *Acoustics — Soundscape — Part 1: Definition and Conceptual Framework*, 2014.
- [8] ISO 12913-2:2018. *Acoustics — Soundscape — Part 2: Data collection and reporting requirements*, 2018.
- [9] ISO 532:2017. *Acoustics — Methods for Calculating Loudness — Part 1: Zwicker Method; Part 2: Moore-Glasberg Method*, 2017.
- [10] V.J.P Jourdes. Estimation of Perceived Roughness. Student Thesis: Master, 2004. <https://research.tue.nl/en/studentTheses/estimation-of-perceived-roughness>
- [11] Lopez-Ballester, J.; Pastor-Aparicio, A.; Felici-Castell, S.; Segura-Garcia, J.; Cobos, M. Enabling Real-Time Computation of Psycho-Acoustic Parameters in Acoustic Sensors Using Convolutional Neural Networks. *IEEE Sensors Journal* 20(19), 2020, 11429–11438. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2995779>

- [12] Montoya-Belmonte, J.; Navarro, J.M. Long-Term Temporal Analysis of Psychoacoustic Parameters of the Acoustic Environment in a University Campus Using a Wireless Acoustic Sensor Network. *Sustainability* 12 (18), 2020, 7406. <https://doi.org/10.3390/su12187406>
- [13] Moore, Br.C.J.; Glasberg, Br.R.; Baer, Th. A Model for the Prediction of Thresholds, Loudness, and Partial Loudness. *J. Audio Eng. Soc* 45(4), 1997, 224–240. <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=10272>
- [14] Weber, R.; Daniel, P. Psychoacoustical Roughness: Implementation of an Optimized Model. *Acustica* 83(1), 1997, 113–123.
- [15] Pastor-Aparicio, A.; Lopez-Ballester, J.; Segura-Garcia, J.; Felici-Castell, S.; Cobos-Serrano, M.; Fayos-Jordán, R.; Pérez-Solano, J.J. Zwicker’s Annoyance model implementation in a WASN node. In *INTERNOISE 2019, 48th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering*. Spanish Acoustical Society (SEA), Madrid, Spain, 2019.
- [16] Pastor-Aparicio, A.; Segura-Garcia, J.; Lopez-Ballester, J.; Felici-Castell, S.; García-Pineda, M.; Pérez-Solano, J.J. Psychoacoustic Annoyance Implementation with Wireless Acoustic Sensor Networks for Monitoring in Smart Cities. *IEEE Internet of Things Journal* 7(1), 2020, 128–136. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2946971>
- [17] Segura-Garcia, J.; Lopez-Ballester, J.; Pastor-Aparicio, A.; Felici-Castell, S.; Cobos-Serrano, M.; Pérez-Solano, J.J.; Soriano-Asensi, A.; Garcia-Pineda, M. Visualization of nuisance information in acoustic environments using an IoT system. In *INTERNOISE 2019, 48th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering*. Spanish Acoustical Society (SEA), Madrid, Spain, 2019.
- [18] Terhardt, E.; Stoll, G.; Seewann, M. 1982. Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals. *The Journal of the Acoustical Society of America* 71 (3), 1982, 679–688. <https://doi.org/10.1121/1.387544>
- [19] Yang, X.; Wang, Y.; Zhang, R.; Zhang, Y. Physical and Psychoacoustic Characteristics of Typical Noise on Construction Site: “How Does Noise Impact Construction Workers’ Experience?”. *Frontiers in Psychology* 12, 2021, 3143. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.707868>
- [20] Yonemura, M.; Lee, H.; Sakamoto, Sh. 2021. Subjective Evaluation on the Annoyance of Environmental Noise Containing Low-Frequency Tonal Components. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18 (13), 2021, 7127. <https://doi.org/10.3390/ijerph18137127>
- [21] Merina Shrestha Zhong Zhang. 2003. Sound Quality User-defined Cursor Reading Control -Tonality Metric. Student Thesis: Master, IMM, DTU Brüel & Kjær. <https://www2.imm.dtu.dk/pubdb/edoc/imm2385.pdf>