



DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA CONVERSIÓN DE UN GRABADOR DIGITAL EN UN ANALIZADOR DE ESPECTRO

Carmelo Villa Prado¹, Rafael Sánchez Sánchez², Juan Pedro Bolívar Raya³

Radiation Physics and Environment Group, Research Center in Natural Resources, Health and Environment,
University of Huelva

¹ villapc@dcu.uhu.es

² rafael.sanchez@dimme.uhu.es

³ bolivar@uhu.es

Resumen

Los sonómetros y analizadores de espectro son dispositivos costosos, con baja autonomía y gran tamaño, especialmente recomendados para su uso en laboratorios. De esta manera, en el caso de estudios de bioacústica, que requieren de la instalación de numerosos dispositivos, esto puede ser inviable. Es común encontrar en la literatura algunas metodologías para el uso de equipos económicos, como grabadoras o teléfonos móviles, para la realización de estudios bioacústicos mediante evaluación de espectrogramas, pero en general no son válidos para medir niveles de presión sonora, especialmente si se requiere una precisión de Clase 1. Por tanto, este estudio tiene como objetivo principal desarrollar una metodología para la conversión de una grabadora digital en un analizador de espectros, alcanzando precisiones compatibles con las obtenidas mediante un sonómetro de Clase 1.

Para llevar a cabo este objetivo ha sido necesario desarrollar un software en lenguaje Java, llamado Tulin, que extrae el sonido digital registrado por la grabadora y, aplicando los procesos necesarios mediante el filtrado digital, obtener el espectro en dB y el nivel de presión sonora total, SPL. Mediante la aplicación de esta herramienta a la señal acústica es posible adaptar el nivel de sensibilidad del micrófono de la grabadora a la sensibilidad del sonómetro. Finalmente, Tulin proporciona, entre otros, el nivel de presión sonora continua equivalente en varias ponderaciones frecuenciales y un filtrado en bandas de tercios de octava de acuerdo con los estándares de los analizadores acústicos de clase 1.

Palabras clave: Sonómetro, analizador de espectro, bandas de tercios de octava

Abstract

Acoustic spectrum analyzers and sound level meters are expensive devices, with low autonomy and large size, especially recommended for laboratory use. Thus, for bioacoustics studies that require the installation of numerous devices doing these studies unfeasible. It is common to find in the literature some methodologies for the use of cheap devices, such as recorders or mobile phones, to be used in bioacoustics studies for spectrograms evaluation, but in general they are not valid to measure sound pressure levels, especially if Class 1 is required. For that, this study has as central objective to develop a methodology for converting digital recorders into spectrum analyzers, achieving precisions compatible with those of a Class 1 sound level meter.

To carry out this objective, it has been needed to develop a software tool in Java language, called Tulin, which extracts the digital sound signal stored in the recorder and by applying it the necessary processes through digital filtering obtains the spectrum in dB and total SPL. By applying these tools to the digital acoustic signal, it is possible to adapt the sensitivity level of the recorder's microphone to the sensitivity of the sound level meter. Finally, Tulin provides, among others, the equivalent continuous sound

pressure level in various frequency weightings and filtering in third-octave bands according to the standard for Class 1 acoustic analyzers.

Keywords: Sound level meter, spectrum analyzer, third-octave bands

PACS no. 43.38.Md, 43.58.Kr, 43.60.-c, 43.60.+d

1. Introducción

La caracterización del sonido ambiental ha tenido un auge muy importante en los últimos años en gran parte debido al desarrollo de nuevas metodologías basadas en el empleo de dispositivos de bajo coste como teléfonos móviles o grabadoras. Estos estudios acústicos ambientales [1][2] requerían en el pasado de costosos equipamientos como analizadores de espectro sonoro y sonómetros, equipos que además de no ser muy apropiados para cubrir amplias extensiones, debido al número de dispositivos necesarios, tienen otras limitaciones como su reducida autonomía, así como su elevado peso y volumen[3]. Con el reciente crecimiento de la investigación en el campo de la industria electrónica y el desarrollo de dispositivos de pequeño tamaño y reducido coste, la mayor parte de estos inconvenientes se han solventado, siendo posible la realización de estos estudios acústicos ambientales en amplias extensiones, con infraestructuras reducidas y con un coste asumible por la mayor parte de los equipos de investigación[4][5].

Uno de los dispositivos que más se están empleando para la realización de estudios acústicos son las grabadoras, equipos de muy reducido tamaño y peso que pueden ser colocados sin dificultad en cualquier elemento urbano, con una gran autonomía, monitorizando el sonido durante semanas gracias a su bajo consumo y gran capacidad de almacenaje. Algunas de las metodologías desarrolladas para estos equipos acústicos se fundamentan en el conteo de especímenes animales a partir de las grabaciones o determinación de presencia animal en determinados hábitats. Otras investigaciones, sin embargo, van enfocadas al empleo de estas grabadoras para determinación de niveles de presión sonora (SPL por sus siglas en inglés) y caracterización de paisajes sonoros mediante estudios comparativos, aunque también son empleadas para estudios de ruido y contaminación acústica.

El propósito de esta metodología es desarrollar un método que permita emplear una grabadora como sonómetro y analizador de espectro sonoro. Para llevar a cabo este método se ha programado un software específico, denominado Tulin, que a partir de los archivos de audio de la grabadora y mediante un tratamiento apropiado de la señal de audio proporciona valores de SPL en varias ponderaciones frecuenciales y temporales, así como la realización un análisis en bandas tercios de octava de dicho sonido, con una precisión compatible con la obtenida por un dispositivo acústico categorizado como clase 1.

2. Materiales y Métodos

2.1 Materiales

Para el desarrollo de esta metodología se han empleado los siguientes equipos:

- Grabadora AudioMoth de la empresa Open Accoustic Devices[6]. Son grabadoras de reducidas dimensiones (58 x 48 x 15 mm), bajo consumo (3 pilas AA), amplia capacidad de almacenaje y que permiten grabaciones con frecuencias de muestreo que van desde los 8 Hz hasta los 384 kHz y que son programables. Registro en archivos de audio con formato WAV de 16 bits.

- Instalación acústica formada por una Interfaz de Audio USB Scarlett Solo de 3ª Generación de la empresa Focusrite10, un monitor de audio JVC y un portátil HP.
- Sonómetro de clase 1 modelo SC420 de la empresa CESVA[7], nombrado como SLM por sus siglas en inglés (Sound Level Meter).

2.2 Herramienta Tulin

Para poder extraer las presiones sonoras almacenadas en los archivos de audio en formato WAV de 16 bits registrados por la grabadora y poder manipularlos para obtener la información acústica, se ha desarrollado un software específico denominado Tulin programado en lenguaje JAVA.

Tulin hace la extracción de las presiones brutas P_{Brutas} almacenadas de manera digital en el archivo WAV generado por la grabadora en formato de 16 bit. Estas presiones quedan almacenadas en el archivo WAV con las ganancias y sensibilidad proporcionadas por el micrófono instalado en la grabadora, de tipo MEMS, y con el ruido inherente de la electrónica del dispositivo. Estas presiones, por tanto, no tienen por qué ser compatibles con las que se obtengan del sonómetro patrón, y al extraerse consisten en una serie de datos discretos, con una separación entre datos igual a la inversa de la frecuencia de muestreo. El software Tulin adapta estas P_{Brutas} discretas, extraídas directamente de la grabadora, para que los parámetros acústicos obtenidos de dichas presiones sean compatibles con los obtenidos por el SLM. La respuesta en frecuencia de la grabadora varía con la frecuencia, como también lo hace la respuesta del sonómetro, por tanto, el tratamiento que Tulin le debe aplicar a la señal acústica obtenida de las grabaciones del Audiomoth también variará con la frecuencia para que sean compatibles con las del SLM Cesva.

El método empleado por Tulin para la adaptación de las presiones se basa en la creación de un filtro digital, tipo IIR (Infinite Impulse Response)[8] y su aplicación se lleva a cabo mediante la Transformación Bilineal o Método de Tustin[9], que actuando en el dominio de la frecuencia filtra y adapta las presiones en el dominio discreto Z , permitiendo obtener los parámetros acústicos compatibles con el SLM. Este proceso requiere de una caracterización de la grabadora y diseño del filtro, pues cada dispositivo tiene sus propias características.

Una vez adaptadas las presiones, Tulin proporciona valores de SPL con ponderaciones frecuenciales A, C y Z y un filtrado en bandas de tercios de octava, empleando en todos los casos filtros digitales. Igualmente, Tulin también proporciona valores de SPL con ponderaciones temporales fast y slow y un espectrograma en frecuencias del sonido.

3. Resultados

3.1 Adaptación de la sensibilidad entre grabadora y SLM

Como se ha visto anteriormente la respuesta en frecuencia de las grabadoras y del SLM no son iguales, por lo que mediante un filtrado digital de la señal bruta ésta se modifica y adapta para que sea compatible con aquella que se obtiene con el SLM.

El software de extracción del SLM patrón no permite la obtención de las presiones acústicas directamente, extrayendo solamente el nivel de presión sonora equivalente (con ponderaciones en frecuencia A, C y Z) con un periodo de 1 s y 125 ms. Teniendo esto en cuenta, si se quiere conocer el tratamiento que es necesario aplicar a los archivos de audio WAV de la grabadora, la única posibilidad es comparar los niveles de presión sonora SPL de ambos dispositivos.

Con el propósito de hacer una comparativa entre los dos equipos, grabadora y SLM, se genera un sonido senoidal de amplitud constante y frecuencia linealmente variable desde los 10 Hz hasta los 20 kHz. Este

sonido tiene una duración de 40 segundos, por lo que en cada instante se conoce la frecuencia del sonido. Este sonido es reproducido en laboratorio y es registrado por ambos dispositivos al mismo tiempo y posteriormente se analizan y comparan sus niveles de SPL. En el caso de la grabadora estos niveles se calculan con el sonido tal y como se extrae, y en el caso del sonómetro con ponderación Z (sin ponderar), y en ambos casos con un promedio de 125 ms y en el caso de la grabadora, una frecuencia de muestreo de 48 kHz.

En la Figura 1, en amarillo, se encuentra representado el valor de L_{125ms} obtenido por Tulin a partir de las P_{Brutas} del archivo procedente de la grabadora. Por su parte, en azul, se muestra el valor de L_{125ms} obtenido del SLM en ponderación Z.

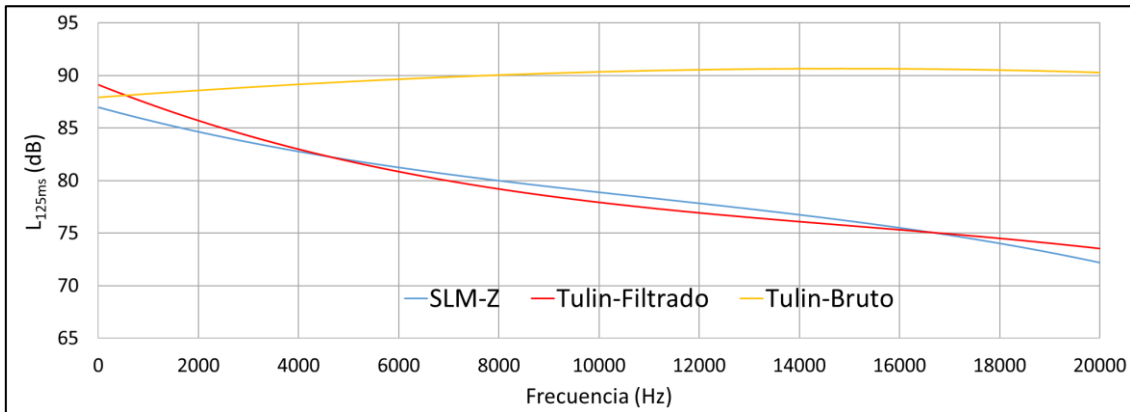


Figura 1 - Comparativa de L_{125ms} entre grabadora y SLM antes y después del filtrado digital

En la Figura 1 se puede ver que, al aumentar la frecuencia del sonido, los valores de SPL de la grabadora y del SLM van divergiendo, es decir, la respuesta en frecuencia de ambos equipos es completamente diferente, incrementándose esta diferencia a altas frecuencias. En dicha Figura 1 también se muestra, en rojo, el valor de SPL de la grabadora una vez filtrada por Tulin, donde se observa que los nuevos niveles obtenidos si son similares a los del SLM.

Para evaluar la similitud entre niveles de presión sonora, en la Figura 2 se muestra un diagrama de dispersión en el que se muestra la significación estadística entre las señales del SLM y las grabadoras antes (bruta) y después del filtrado mediante un análisis de regresión. En dicha grafica se muestra asimismo las líneas de regresión con sus respectivas incertidumbres a un nivel de confianza del 95%.

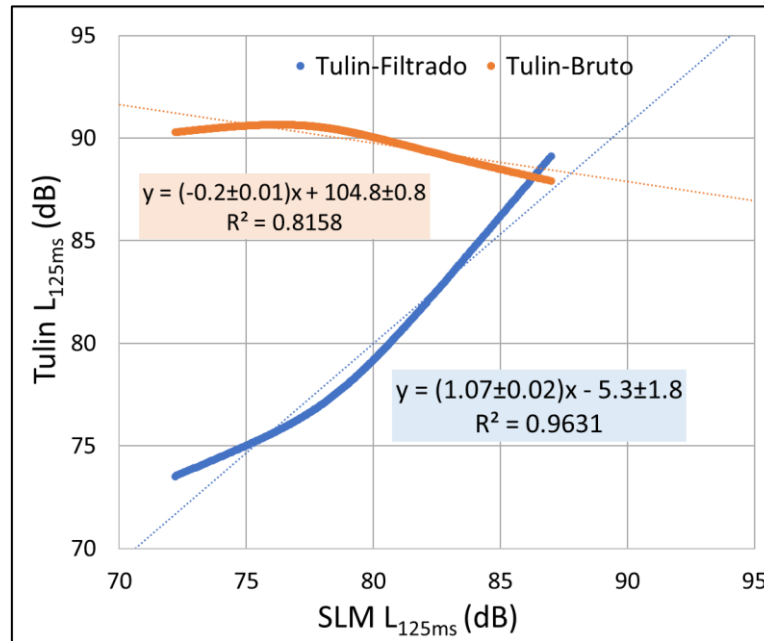


Figura 2 - Gráfico de dispersión entre el SLM y Tulin con valores brutos y filtrados

En la Figura 2 puede verse que antes del filtrado los niveles de SPL de ambos equipos no tienen ningún tipo de correlación entre sí. Sin embargo, después del filtrado los valores de SPL entre la grabadora y el SLM presentan una correlación muy próxima a la unidad en pendiente y valores acotados en la ordenada en el origen. También cabe destacar que esta correlación empeora en las áreas de bajas y altas frecuencias.

El filtro empleado para adaptar o modificar las P_{Brutas} procedente de la grabadora está definido mediante una función de transferencia en el dominio de Laplace (s). Esta función de transferencia $H(s)$ tiene la forma de un cociente de dos funciones polinómicas, tal y como se indica en la Ecuación 1.

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}, \quad (1)$$

Esta función de transferencia se ha diseñado de manera que maximice la correlación mostrada en la Figura 2 pero minimizando el grado de los polinomios $Y(s)$ y $X(s)$. Cuanto mayor es el grado de los polinomios mejor resultados ofrece el filtrado y por tanto la correlación es mayor. Por otro lado, al aumentar el grado de los polinomios se reduce la eficiencia computacional. De este modo, es necesario alcanzar una solución de compromiso entre el desempeño de la función de transferencia y el tiempo de computación que Tulin necesita para realizar el filtrado. La función de transferencia $H(s)$ diseñada para el filtrado de sensibilidad de las grabadoras está compuesta por el cociente de polinomios de orden 2. Como se ha mencionado anteriormente el filtro $H(s)$ está definido en el dominio de Laplace, sin embargo, esto equivale a estar definido en el dominio de la frecuencia ω sin más que aplicar la transformación $s \rightarrow j\omega$.

Sin embargo, las presiones brutas obtenidas por Tulin del archivo de audio WAV está definido en el dominio discreto Z , por lo que es necesario hacer uso de la transformada bilineal o método de Tustin para poder filtrar la señal. Mediante este método, que consiste en aplicar a la función de transferencia $H(s)$ la transformación de la Ecuación 2, se puede filtrar la señal en el dominio de la frecuencia y obtener la señal filtrada en el dominio discreto Z .

$$s \rightarrow \frac{2}{T} \left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right), \quad (2)$$

Donde T es la inversa de la frecuencia de muestreo.

Una vez aplicado el filtro de sensibilidad, las presiones ya están filtradas, $P_{\text{Filtradas}}$ y según la Figura 2 estas presiones están adaptadas y correlacionadas con las del sonómetro, de tal manera que los valores de SPL obtenidos por Tulin son compatibles con los SLM.

3.2 Obtención del Nivel de Presión SPL

En el subapartado anterior se generó un sonido sintético para determinar el filtrado que era necesario aplicar en Tulin a las P_{Brutas} extraídas del archivo WAV y obtener $P_{\text{Filtradas}}$ para adaptar o equiparar la señal de la grabadora a la del SLM. Una vez la señal ha pasado por el filtro se tienen las presiones filtradas que, al no tener ningún tipo de ponderación frecuencial, equivalen a ponderación Z. El propósito de este subapartado es verificar que los valores de SPL obtenidos para sonidos reales, no generados sintéticamente, también son compatibles con los obtenidos por el SLM.

La regulación Europea IEC 61672-1:2013[10] establece las funciones de transferencia $H_A(s)$ y $H_C(s)$ para los filtrados en ponderación frecuencial A y C. Estas funciones vuelven a ser aplicadas a las presiones filtradas mediante el método de la transformada bilineal.

Para hacer la comparativa entre los niveles de SPL del SLM y Tulin se realizó dos grabaciones distintas, registrando con ambos equipos de manera simultánea. Para ambas grabaciones se ha empleado ponderación frecuencial A y con un periodo de estudio de 125 ms. La grabadora registró con una frecuencia de muestreo de 48 kHz.

La primera de las grabaciones se corresponde con sonido de tráfico, teniendo una duración de 90 segundos. Los valores de SPL en ponderación frecuencial A obtenidos por ambos dispositivos se pueden observar en la Figura 3. En la Figura 3 se encuentran representados los valores de L_{A125ms} en dBA frente al tiempo tanto para el SLM, en azul, como para los valores proporcionados por Tulin, en rojo.

Las gráficas de la Figura 3 prácticamente son coincidentes entre los dos equipos a lo largo de toda la grabación, solo observándose ciertas discrepancias en torno a los 40s de grabación. Igualmente se puede observar que la grabadora proporciona valores idénticos tanto en el caso de bajos niveles de SPL (en torno a 65 dBA) como en las zonas de mayor SPL (valores por encima de 80 dBA).

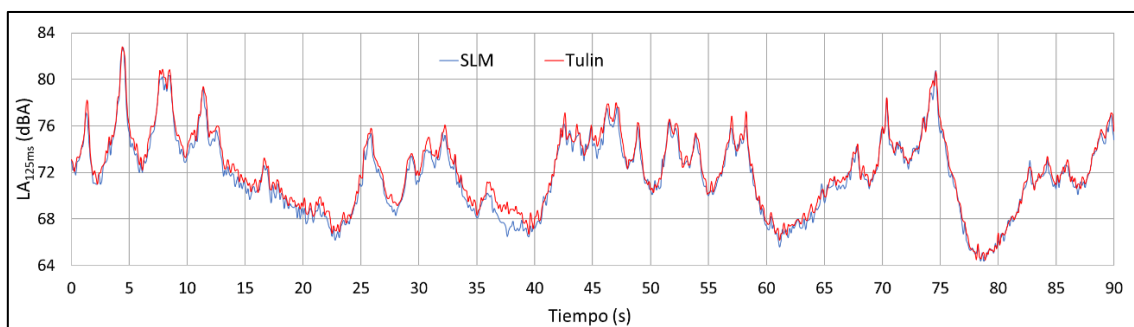


Figura 3 - Comparativa de L_{A125ms} entre SLM y Tulin para sonido de tráfico.

Si se representan los valores de L_{A125ms} de la grabadora, obtenidos con Tulin, frente a los obtenidos por el SLM, el resultado se muestra en el diagrama de dispersión de la Figura 4. Igualmente está representada en la Figura 4 la recta de regresión con sus incertidumbres y un nivel de confianza del 95%.

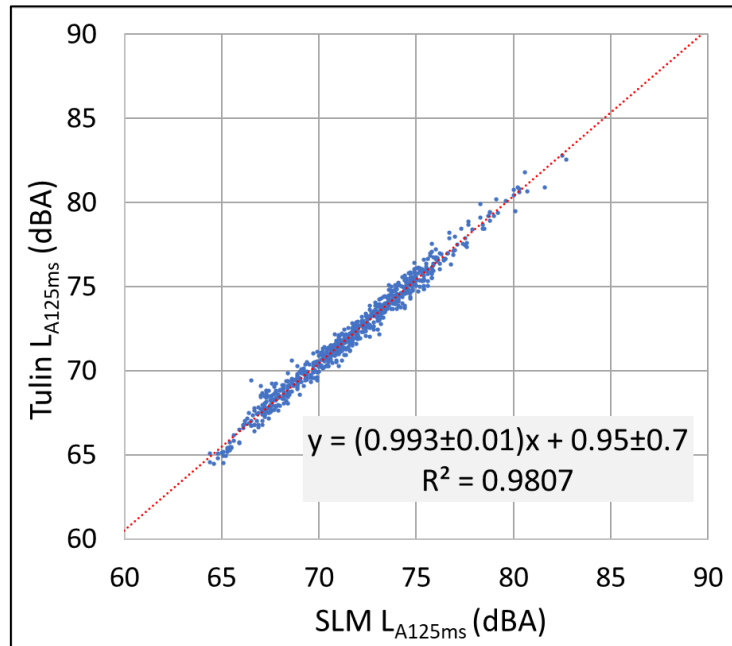


Figura 4 - Diagrama de dispersión de los valores L_{A125ms} de SLM y Tulin en el caso de ruido de tráfico.

En la figura 4 se observa que ambas señales están perfectamente correlacionadas, por lo que se puede afirmar que los valores de SPL obtenidos con Tulin son compatibles con los obtenidos con el SLM calificado como Clase 1.

De la misma manera se ha calculado el $L_{eq,90s}$ de ambos dispositivos durante los 90 s de grabación para determinar si los valores son equivalentes. Los valores se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 - Valores de SPL equivalente con SLM y Tulin en el caso de ruido de tráfico

| Dispositivo | $L_{Eq,90s}$ (dB) |
|-------------|-------------------|
| SLM | 73.03 |
| Tulin | 73.48 |

El error relativo entre ambos valores de $L_{Eq,90s}$ a partir de la Tabla 1 es tan solo del 0.62%.

El segundo ensayo para comparativa de valores de SPL se corresponde con el sonido generado por música sinfónica. Este sonido tiene mayor contenido espectral que el de tráfico, más rico en bajas frecuencias.

Al igual que en el caso del ruido de tráfico, la comparativa se hace en base a los valores de L_{A125ms} de ambos dispositivos, registrando un total de 90 s y nuevamente la grabadora trabajando con una frecuencia de muestreo de 48 kHz. Los resultados del análisis comparativo se pueden consultar en la Figura 5.

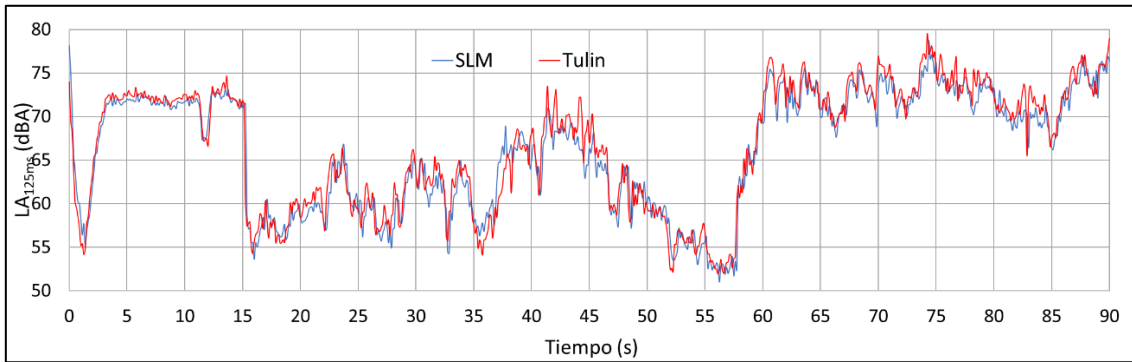


Figura 5 - Comparativa de L_{A125ms} entre SLM y Tulin para música sinfónica

Si bien en la Figura 5 los valores de SPL medidos por el SLM y Tulin son muy similares, sí que se observan más diferencias o discrepancias entre ambos equipos de las que había en el caso del ruido de tráfico. Si al igual que el ensayo anterior se representan los valores de L_{A125ms} de Tulin frente a los del SLM en un gráfico de dispersión junto con su recta de regresión, el resultado es el que se acompaña en la Figura 6.

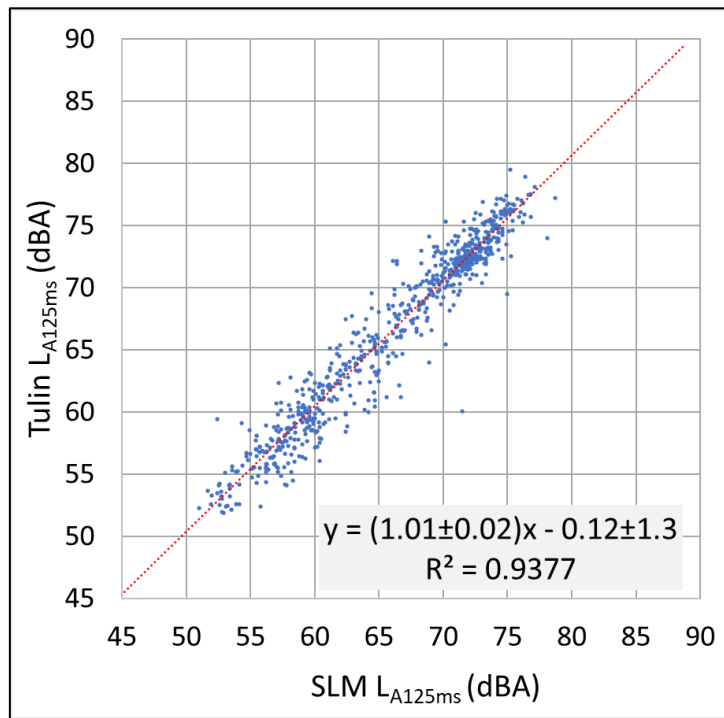


Figura 6 - Diagrama de dispersión de los valores L_{A125ms} de SLM y Tulin en el caso de música sinfónica.

En la figura 6 se puede observar que, efectivamente, la dispersión es mayor que en el caso anterior, pues los valores no están tan agrupados junto a la recta de regresión, sin embargo, aun así, el ajuste de la pendiente es bastante próximo a la unidad y por tanto ambas señales están correlacionadas.

Repitiendo el análisis del SPL equivalente durante los 90 segundos de grabación, los valores para este caso se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de SPL equivalente con SLM y Tulin en el caso de música sinfónica

| Dispositivo | $L_{Eq,90s}$ (dBA) |
|-------------|--------------------|
| SLM | 69.88 |
| Tulin | 70.67 |

En este caso el error relativo obtenido al comparar ambos valores de $L_{Eq,90s}$ obtenidos en la Tabla 2 es del 1.12 %, que sigue siendo muy acotado, por tanto, en este caso también se puede afirmar que los valores obtenidos con Tulin son compatibles con los obtenidos por el sonómetro Clase 1.

3.3 Filtrado en bandas de Tercios de Octava

La normativa europea IEC61260-41:2014[11] es la que establece el adecuado cálculo de las bandas de tercios de Octava. Por un lado, define las fórmulas para el cálculo de las frecuencias centrales y los extremos de las bandas de octava y sus fracciones (tercios, mitades...) y por otro lado también acota los límites superiores e inferiores (de subidas y bajadas de los filtros pasa-banda) que deben tener los filtros para poder hacer un adecuado filtrado, acorde con la clasificación de Clase 1 y Clase 2.

Los filtros pasa-banda que se han diseñado para Tulin son de tipo Butterworth, empleando los criterios definidos en dicha norma para filtros de tercios de octava con clasificación Clase 1. Estos filtros tienen una función de transferencia de tipo Butterworth que, con la transformación de la Ecuación 3, permite caracterizar los filtros de todas las bandas de tercios de octava, siendo necesario diseñar un filtro por cada banda a analizar.

$$s \rightarrow \frac{s^2 + \Omega_0^2}{Bs} \quad (3)$$

Donde Ω_0 es la frecuencia central de cada banda de tercio de octava y B es el ancho de banda de cada tercio, estando ambos valores definidos en la normativa IEC61260-1:2014. En el caso de Tulin se han empleado un total de 28 bandas de tercios de octava, las que cubren las frecuencias centrales de banda que van desde los 40 Hz hasta los 20 kHz.

Tulin, partiendo de la función de transferencia resultante de aplicar la transformación propuesta en la Ecuación 3 y haciendo uso nuevamente del método de Tustin sobre las presiones ya filtradas, $P_{Filtradas}$, calcula secuencialmente las 28 bandas de tercios de octava mediante un filtrado digital, filtros que, una vez más, están definidos en el dominio de la frecuencia y tienen su efecto en el dominio discreto Z.

Siguiendo el análisis del sonido llevado a cabo en la sección 3.2, en primer lugar se estudiará el caso de ruido de tráfico mediante una comparativa de L_z en dB de los tercios de octava obtenidos por SLM y por Tulin durante los 90 s de duración de la grabación entre las 28 bandas de tercios de octava cuyas frecuencias centrales están contenidas entre los 40 Hz y los 20 kHz. Los resultados obtenidos en esta comparativa se pueden ver en la Figura 7.

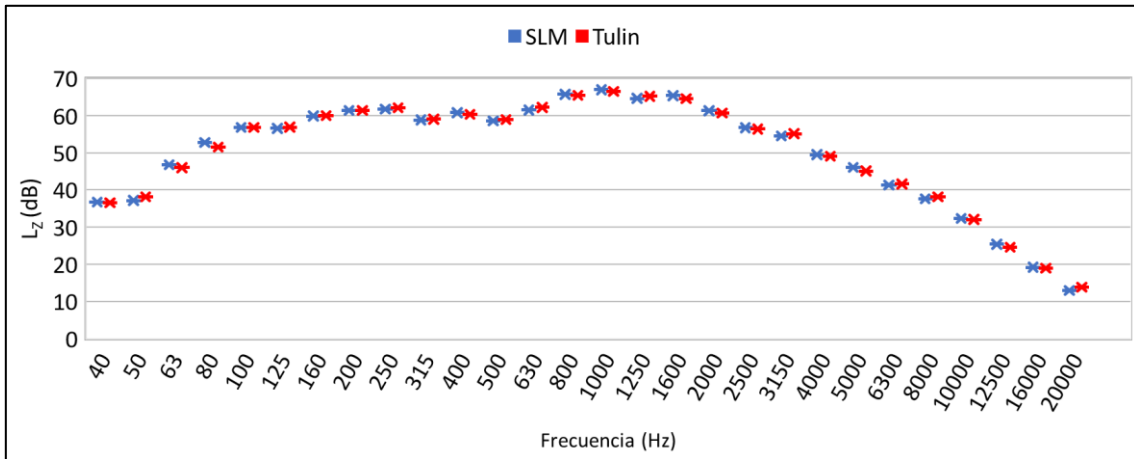


Figura 7 - Comparativa de L_z en bandas de Tercios de Octava de SLM y Tulin en el caso de ruido de tráfico.

En la figura 7 se puede comprobar que ambos los valores de ambos equipos presentan grandes similitudes, observándose las mayores diferencias en las bajas y altas frecuencias. Si esos valores de LZ correspondientes a las bandas de Tercios de Octava se muestran en un diagrama de dispersión y se le calcula su recta de regresión, el resultado es el de la Figura 8.

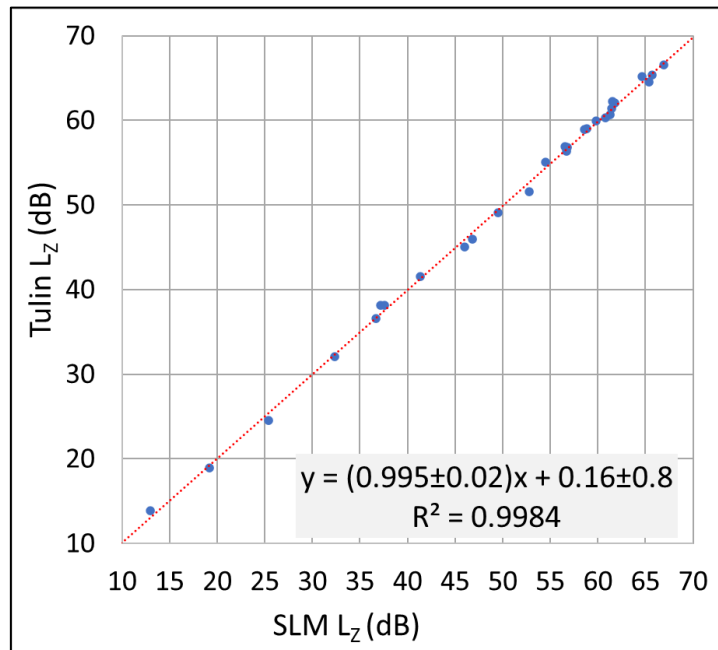


Figura 8 - Diagrama de dispersión de L_z en bandas de Tercios de Octava de SLM y Tulin para ruido de tráfico.

En la Figura 8 se puede observar que ambas medidas son prácticamente idénticas presentando una gran correlación, por lo que se puede decir que los valores obtenidos por Tulin en el análisis espectral son compatibles con los del SLM de Clase1.

Hay que indicar que en el análisis de bandas de tercios de octava que se muestra en la Figura 7, el mayor contenido espectral del ruido de tráfico se encuentra por debajo de los 1000 Hz, es decir en las bajas frecuencias, siendo casi inexistente en las altas frecuencias.

Siguiendo el mismo orden de la sección anterior a continuación se analizará el sonido de música sinfónica, haciendo para ello la misma comparativa que se pueden ver en las Figuras 9 y 10.

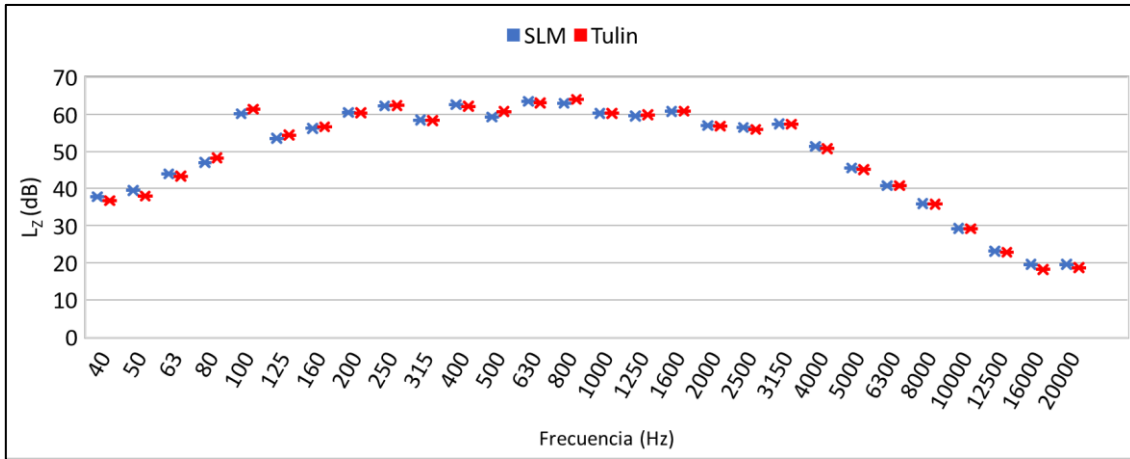


Figura 9 - Comparativa de L_z en bandas de Tercios de Octava de SLM y Tulin en el caso de música sinfónica

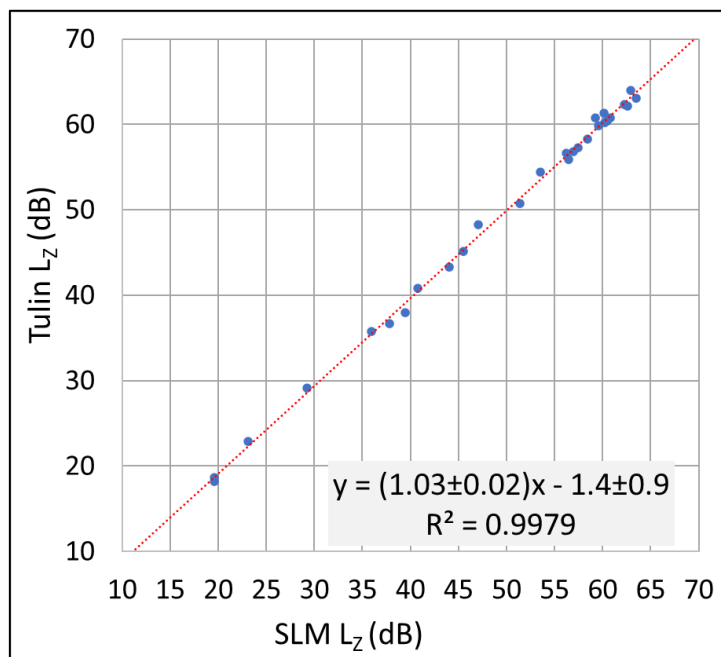


Figura 10 - Diagrama de dispersión de L_z en bandas de Tercios de Octava de SLM y Tulin para música sinfónica

En las Figuras 9 y 10 se vuelve a poner de manifiesto que ambas medidas son prácticamente idénticas, si bien en el caso de la música sinfónica los valores de tercios de octava difieren algo más que en el caso del ruido de tráfico, lo que puede verse en la Figura 10 como una mayor dispersión.

Es importante reseñar que en la Figura 9 el contenido espectral en la banda de tercios de octava con frecuencia central 100 Hz es uno de los más representativos, con un valor superior a 60dB, al igual que otras presencias importantes en frecuencias comprendidas entre los 1000 y 2000 Hz, asociado a los distintos instrumentos presentes en el sonido.

Al igual que en los casos anteriores, los valores de ambos dispositivos son compatibles, y por tanto, Tulin obtiene la misma precisión que el SLM.

4. Conclusiones

En esta metodología se trata de mostrar que mediante el empleo de una grabadora y un software específico, diseñado y programado para tal efecto, se pueden conseguir valores y precisiones comparables o compatibles con los que se obtienen mediante un sonómetro de Clase 1.

Para ello se ha realizado una comparativa entre los valores de nivel de presión sonora (SPL) obtenidos mediante ambos sistemas, con un periodo de 125 ms y con ponderación frecuencial A. Esta comparativa se ha realizado con dos sonidos distintos, el primero de ruido de tráfico y en segundo lugar música sinfónica. Asimismo, se ha realizado un análisis espectral en bandas de tercios de octava, en este caso sin ponderación frecuencial, para el mismo tipo de sonido que en el caso del nivel de presión sonora, es decir, ruido de tráfico y sonido de música sinfónica. Las conclusiones sobre estos análisis de SPL y de bandas de Tercios de Octava son:

- Los valores obtenidos con Tulin son compatibles con los obtenidos mediante el sonómetro de Clase 1 tanto en SPL como en Tercios de Octava.
- Los resultados empeoran en las zonas de bajas frecuencias (por debajo de 100 Hz) y de altas frecuencias (por encima de 16 kHz), aun así, siguen dentro de tolerancias y correlacionados con los del sonómetro, tanto en el caso de SPL como de Tercios de Octava.
- En el caso de sonidos por debajo de 34 dB el uso de la grabadora para medir valores de SPL o de Tercios de Octava no es apropiado, debido a que el sonido real puede estar enmascarado por el ruido inherente del propio dispositivo, evaluado en dicho valor por el propio fabricante.
- Cada grabadora requiere de un estudio previo y un análisis de diseño del filtrado adecuado para obtener valores compatibles con el patrón.

En cualquier caso, la precisión y fiabilidad de los datos proporcionados mediante el uso de un sonómetro de Clase 1 nunca podrá ser sustituida por los resultados obtenidos a través de una grabadora y un software asociado, pero en determinados casos estos dispositivos pueden proporcionar valores compatibles y equivalentes.

Referencias

- [1] Jörg Müller, Oliver Mitesser, H. Martin Schaefer, Sebastian Seibold, Annika Busse, Peter Kriegel, Dominik Rabl, Rudy Gelis, Alejandro Arteaga, Juan Freile9, Gabriel Augusto Leite, Tomaz Nascimento de Melo, JackLeBien, Marconi Campos-Cerqueira, Nico Blüthgen, Constance J. Tremlett, Dennis Böttger, Heike Feldhaar, Nina Grella , Ana Falconí-López, David A. Donoso, Jerome Moriniere & Zuzana Buřivalová. Soundscapes and deep learning enable tracking biodiversity recovery in tropical forests *Nature Communications* (2023) 14:6191
- [2] Andrew P. Hill, Peter Prince, Jake L. Snaddon , C. Patrick Doncaster, Alex Rogers. AudioMoth: A low-cost acoustic device for monitoring biodiversity and the environment. *HardwareX* Volume 6 (2019) e00073
- [3] Sajeev C. Rajan, K. Athira, R. Jaishanker, N. P. Sooraj, V. Sarojkumar (2018). Rapid assessment of biodiversity using acoustic indices. *Biodiversity and conservation* (2019)

- [4] Saurabh Garg, Kian Meng Lim, Heow Pueh Lee (2018). An averaging method for accurately calibrating smartphone microphones for environmental noise measurement. *Applied Acoustics* Volume 143, 1 January 2019, Pages 222-228
- [5] Pierre Aumond, Arnaud Can, Guillermo Rey Gozalo, Nicolas Fortin, Enrique Suárez (2020). Method for in situ acoustic calibration of smartphone-based sound measurement applications. *Applied Acoustics*. Volume 166, September 2020, 107337
- [6] <https://www.openacousticdevices.info/>
- [7] <https://www.cesva.com/es/productos/sonometros/sc420/>
- [8] Shapna Rani Sutradhar, Nazmus Sayadat, Ashfiqur Rahman, Sirajum Munira, A.K.M. Fazlul Haque, Syed Nazmus Sakib (2017). IIR Based Digital Filter Design and Performance Analysis. 2017 2nd International Conference on Telecommunication and Networks (TEL-NET 2017). Department of Electronics and Telecommunication Engineering. Daffodil International University.
- [9] Kheira Hamdaoui, Abdelfatah Sharef (2007). A new discretization method for fractional order diferenciators via the bilinear transformation. *Proc. of the 2007 15th Intl. Conf. on Digital Signal Processing (DSP 2007)*
- [10] IEC 61672-1:2013 Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications
- [11] UNE-EN 61260-1:2014 (Ratificada) Electroacoustics - Octave-band and fractional-octave-band filters - Part 1: Specifications (Endorsed by AENOR in August of 2014.)