



Cátedra

Fundamentos de Acústica y Electroacústica

(Año 2018)

Docente: Ing. Sebastián P. Ferreyra (Prof. Adjunto)

Trabajo Práctico Nro: 1 (individual)

Tema: Caracterización de Fuente Sonora

Objetivo: Caracterizar una fuente sonora (FS). Configurar y calibrar un sistema de medición acústico utilizando micrófono, placa de adquisición de datos (DAQ: Data Acquisition) de sonido y software libre de medición acústica. Medir niveles sonoros estandarizados aplicando diferentes constates de tiempo (Slow, Fast y Peak) y redes de ponderación espectral (A, C y Z). Análisis de descriptores sonoros. Análisis de frecuencia por FFT del sonido medido en tiempo real.

1 Materiales e Instrumental necesarios.

- Micrófono (bobina móvil, electrostático ó piezoeléctrico)
- Computador personal (PC)
- Placa de adquisición de datos DAQ (sonido): (on board, o externa, resolución: 16 bits, frecuencia de muestreo: 44100 Hz)
- Software libre de medición acústica (REW 5.1)
- Cableado: para pequeña señal analógica (micrófono)
para señal digital (USB ó Fireware IEEE 1394) para DAQ externa

2 Marco Teórico

2.1 Fuente sonora

Podemos definir a una *fente* como cualquier objeto capaz de producir vibraciones mecánicas en un medio elástico, sea este último sólido, liquido o gaseoso. La fuente podrá clasificarse como “sonora”, “ultrasónica” e “infrasónica” en función del espectro de frecuencias audible del ser humano.

2.2 Características.

Una *fente sonora ó acústica* se caracteriza por la *potencia (energía por unidad de tiempo que radia)*, pero también con otros aspectos como *directividad y tipo de sonido que produce (continuo, impulsivo, armónico, inarmónico)*, entre otras características.

La fuente sonora puede emitir igual nivel de energía en todas direcciones (omnidireccional ó isotrópica). Sin embargo, en la práctica, esto último sucede bajo determinadas condiciones.



2.3 Directividad de una fuente sonora.

La *directividad de una fuente* se define como la capacidad de concentrar energía en una dirección determinada. Por lo cual, existe la posibilidad de representarla matemática y gráficamente, a través de *índices*, *coeficientes* y *diagramas* (Davis, 1983).

En acústica, generalmente se utilizan los llamados *diagramas de directividad*, que utilizan coordenadas polares para su representación. Para caracterizar en forma básica la directividad de una fuente sonora, se trazan por separado generalmente el *plano vertical* y el *plano horizontal* dentro del espectro de frecuencias bajo estudio. En la figura 1 se presentan diagramas de directividad del plano horizontal de un altavoz montado en una caja acústica.

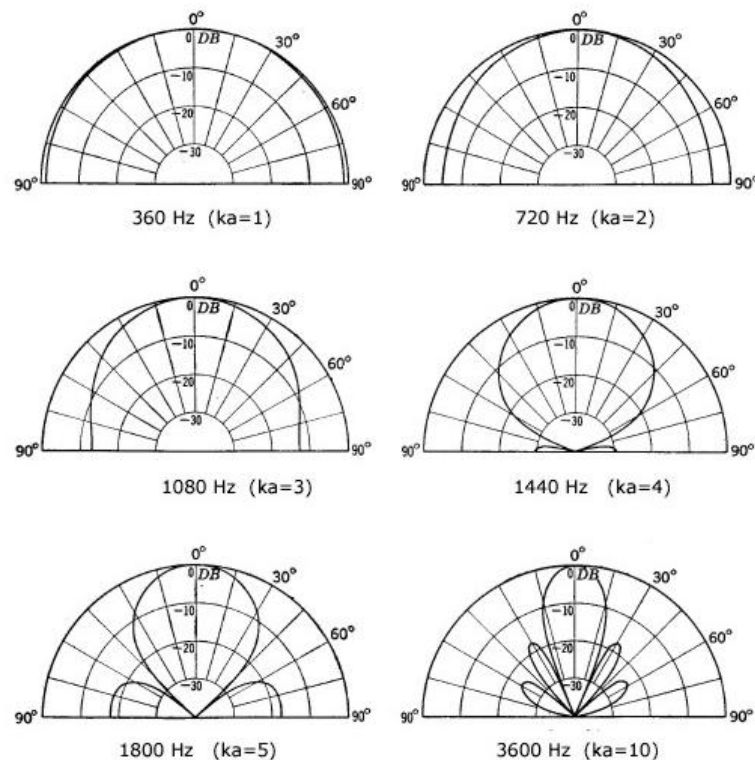


Figura 1. Diagrama de directividad del plano horizontal de un altavoz montado en una caja acústica, k : número de onda y a : diámetro del diafragma del altavoz (Davis, 1983).

En este caso se observa que la *directividad de la fuente* es diferente para una u otra frecuencia, pudiéndose inferir que con el aumento de la frecuencia, la radiación del sonido se vuelve cada vez más directiva, es decir, la energía sonora se concentra cada vez más en una determinada dirección.



2.4 El decibel

En la actualidad el sistema de notación con decibel (dB) se encuentra frecuentemente en diferentes disciplinas científicas como la acústica, la electrónica, las comunicaciones, la física, la economía, etc. Por definición, el *decibel* es la decima parte del *Bel* (B), denominación adoptada en honor de Alexander Graham Bell (Davis, 1983).

Con el transcurso de los años el sistema fue adoptado universalmente, el mismo está basado en las propiedades de la función logaritmo, y permite realizar expansiones y compresiones de escalas en la forma necesaria, simplificando mucho los cálculos con grandes cantidades. Principalmente permite expresar *relaciones de magnitud* de parámetros como potencia, tensión, corriente, presión sonora, intensidad sonora, velocidad, aceleración, etc., y también puede utilizarse como una *magnitud de medida* cuando a uno de los parámetros de referencia se le asigna un valor unitario ó constante. Se recuerda a los lectores que una *magnitud* es todo aquello capaz de experimentar un aumento ó disminución.

Una de las claves de su gran aceptación es que todos los sentidos humanos, tacto, vista, audición, sensación de peso, etc., funcionan logarítmicamente. Es decir, que en presencia de un estímulo, la variación mínima perceptible es proporcional al estímulo ya existente (Ley Weber-Fechner).

El sistema fue originado en los laboratorios de la *Bell Telephone Company*, particularmente el *bel* y el *decibel* surgieron debido a la necesidad de definir una unidad que exprese la reducción ó atenuación de la potencia a las salida de una línea telefónica con respecto a la entrada. Mientras que el *neper*, antecesor al decibel, se utilizó inicialmente para medir la atenuación de una milla de cable patrón.

En el campo de la acústica tanto el *decibel* como el *neper* fueron y son ampliamente utilizados, por lo cual, se presenta a continuación un conjunto de definiciones en referencia al tema proporcionadas por el *American National Standard Institute (ANSI)* y la *Acoustical Society of America (ASA)*, en la norma *ANSI S.1.1-1994 (ASA 111-1994)*.

2.5 Nivel (Level) — L

En acústica, es el logaritmo de la razón de una cantidad a una cantidad de referencia de la misma naturaleza. La base del logaritmo, la cantidad de referencia y la naturaleza del nivel deben ser especificadas. Ejemplos de tipos de niveles son el nivel de potencia eléctrica, el nivel de presión sonora, el nivel de intensidad sonora, el nivel de velocidad de partículas, etc.

Para logaritmos decimales (en base 10) la nomenclatura es *log* ó *lg*. Para logaritmos naturales ó neperianos (en base e) la nomenclatura es *Ln* (ANSI,1994). La expresión matemática es



$$L = \log_r (q / q_0) \quad (1)$$

donde:

- L nivel de especie determinada por la clase de la cantidad bajo consideración
- r base de los logaritmos y proporción de referencia
- q cantidad bajo consideración
- q_0 cantidad de referencia de la misma naturaleza ó tipo

2.6 Bel (B)

Unidad de nivel cuando la base del logaritmo es 10 y las cantidades afectadas son proporcionales a la potencia (ANSI,1994). Símbolo de la unidad, B,

$$L = \log_{10} (W / W_0) [B] \quad (2)$$

2.7 Decibel (dB)

Unidad de nivel cuando la base del logaritmo es la raíz décima de diez, lo que es igual a diez veces el logaritmo en base diez, y las cantidades afectadas son proporcionales a la potencia (ANSI,1994). Símbolo de la unidad, dB

$$L = 10 \log_{10} (W / W_0) [dB] \quad (3)$$

2.8 Neper (Np)

Unidad de nivel cuando la base del logaritmo es el numero $e = 2,71828...$ (logaritmos naturales ó neperianos). Asimismo, es unidad de nivel de una cantidad de energía, cuando la base del logaritmo es $e^2 = 7,389$. Símbolo de la unidad, Np (ANSI,1994). Como unidad de nivel de energía $1 \text{ Np} = 8,686 \text{ dB}$ y $1 \text{ dB} = 0,1151 \text{ Np}$.

2.9 Nivel de presión sonora — L_p

Se define como diez veces el logaritmo de base diez de la razón de la presión sonora eficaz de un sonido a la presión sonora eficaz de referencia, la cual para gases es de 20 micro Pascales (20 μPa) (ANSI,1994). Unidad, dB. Abreviatura NPS (SPL: sound pressure level). Símbolo, L_p

$$L_p = 10 \log_{10} (p^2 / p_{ref}^2) = 20 \log_{10} (p / p_{ref}) \quad [dB] \quad (4)$$

Comparado con la presión estática del aire (1013 HPa), las variaciones de presión sonora son muy pequeñas, en un margen que puede ir desde los 20 μPa ($20 \times 10^{-6} \text{ Pa}$)



hasta 100 Pa. El valor de 20 μPa corresponde al umbral auditivo típico de una persona sin pérdidas de audición. Por lo tanto, es llamado *umbral auditivo*. Una presión sonora de aproximadamente 100 Pa, es tan alta que causa *dolor* y por lo tanto es denominado *umbral del dolor*. La relación entre estos dos extremos es mayor que un millón a uno.

Aplicar de forma directa escalas lineales (en Pa) a la medida de la presión sonora nos lleva a cifras enormes e inmanejables. Ya que el oído responde a los estímulos de forma logarítmica, es más práctico expresar los parámetros acústicos como una relación logarítmica entre el valor medido respecto a un valor de referencia. La ventaja de usar decibelios se observa en la *figura 2*. Aquí, la escala lineal con sus grandes cifras se convierte en una escala manejable, desde 0 dB en el umbral auditivo (20 μPa), hasta 130 dB, en el umbral del dolor (~ 100 Pa).

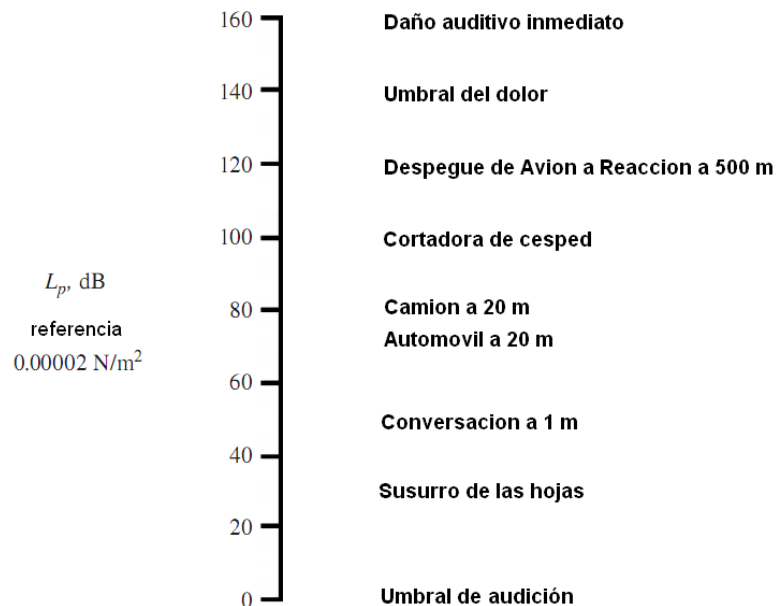


Figura 2. Algunos niveles de presión sonora típicos.

2.10 Nivel de intensidad sonora — L_i

Se define como diez veces el logaritmo de base diez de la razón de la intensidad de un sonido dado en una dirección indicada a la intensidad sonora de referencia, la cual es de 1 pico watt / m² (1 pW/m²) (ANSI, 1994). Unidad, decibel (dB). Abreviatura, IL. Símbolo, L_i

$$L_i = 10 \log_{10} (I / I_{ref}) \quad [dB] \quad (5)$$



2.11 Nivel de potencia sonora o acústica — L_W

Se define como diez veces el logaritmo en base diez de la razón de una potencia sonora dada a la potencia de referencia, la cual es de un pico watt (1 pW) (ANSI,1994). Unidad, decibel (dB). Abreviatura, PWL. Símbolo, L_W ó L_P

$$L_W = 10 \log_{10} (W / W_{ref}) \quad [dB] \quad (6)$$

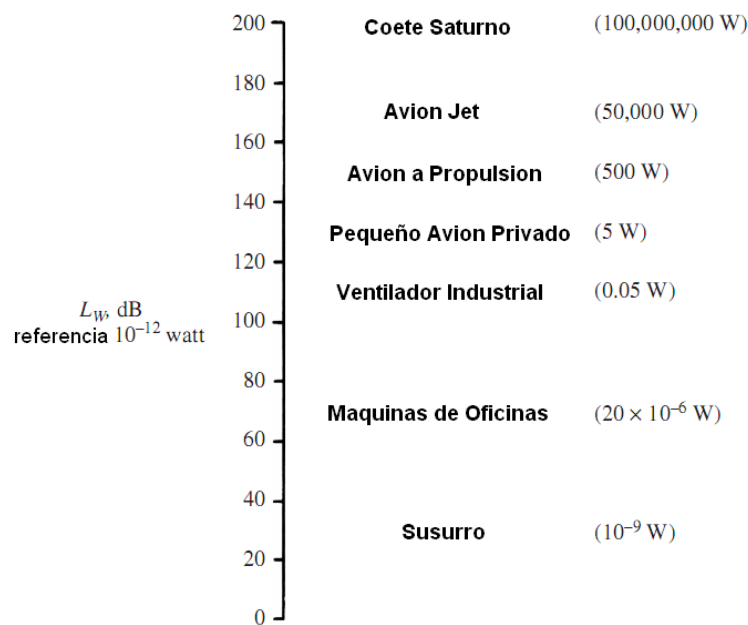


Figura 3. Algunos niveles de potencia sonora típicos

2.12 Nivel sonoro continuo equivalente — L_{eq}

Se define como diez veces el logaritmo de base diez de la razón de la presión sonora eficaz durante un determinado intervalo de tiempo T de un sonido dado, a la presión sonora eficaz de referencia, la cual es de 20 micro Pascales (20 μ Pa). Unidad, decibel (dB) (ANSI,1994). Abreviatura, L_{eq} ó L_{AT} .

$$L_{eq} = 10 \log [(1/T) \int_0^T (p^2 / p_{ref}^2) dt] \quad [dB] \quad (7)$$

donde:

- L_{eq} Nivel sonoro continuo equivalente (equivalent sound level) (dB)
- T Periodo de tiempo (time period) (s)
- p Presión sonora (sound pressure) (Pa, N/m²)
- p_{ref} Presión sonora de Referencia (reference sound pressure) (20 x 10⁻⁶Pa, N/m²)



El *nivel sonoro continuo equivalente* (NSCE ó Leq) es un descriptor teórico que cuantifica el nivel medio de energía sonora para un periodo de tiempo determinado, calculado a partir de la presión sonora instantánea que produce una fuente.

Este descriptor, se correlaciona en buena medida con los efectos del ruido sobre el hombre, permitiendo cuantificar a través de un único valor el nivel sonoro producido por una fuente que varía su intensidad a medida que transcurre el tiempo. El L_{eq} también es denominado en algunas ocasiones en la bibliografía como “nivel sonoro promedio” (Average Sound Level – L_{AT}).

2.13 Nivel de velocidad de partículas — L_v

Se define como diez veces el logaritmo de base diez de la razón de la velocidad eficaz de las partículas de un sonido ó vibración dada a la velocidad eficaz de las partículas de referencia, la cual es de 10 nanometros (10 nm) según norma ANSI S1.8-1969 y 1 nm según norma ISO 1683-1983. Unidad, decibel (dB). Simbolo, L_v .

$$L_v = 10 \log_{10} (u / u_{ref}) \quad (8)$$

Suma de niveles sonoros.

Si se miden de forma separada los niveles sonoros de dos o más fuentes de sonido y se desea conocer el nivel de presión sonora combinado de dichas fuentes acústicas, entonces deben sumarse los correspondientes niveles sonoros. Sin embargo, debido al hecho de que los decibeles son valores logarítmicos, esta suma no puede realizarse de forma directa. (Bruel & Kjaer, 2000)

Una forma de sumar dB es convertir cada valor de dB en su valor lineal, sumar esos valores lineales y convertir el resultado de nuevo en dB, usando la siguiente ecuación

$$L_{result} = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} + 10^{\frac{L_{p3}}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_{pn}}{10}} \right) \quad (9)$$

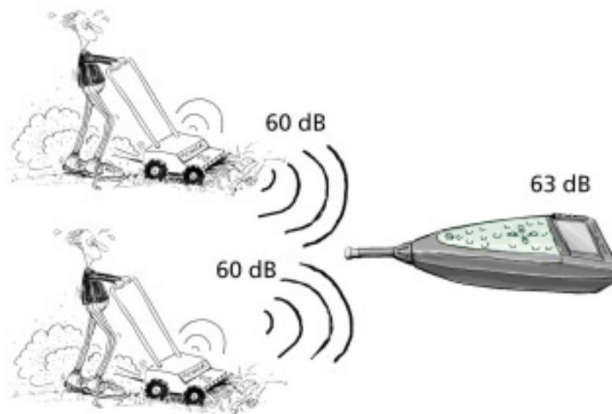




Figura. 4. Suma de niveles de múltiples fuentes acústicas

Un método más fácil es usar el ábaco de la figura 5 y el procedimiento siguiente

1. Medir el nivel de presión sonora (SPL) de cada fuente de ruido separadamente (L_{p1} , L_{p2}).
2. Ingresar al ábaco, por el eje de abscisas con el valor correspondiente a la diferencia (DL) de los niveles ($L_{p2} - L_{p1}$).
3. Trasladarse hasta interceptar la curva, y después tomar lectura del valor en el eje de ordenadas
4. Adicionar el valor indicado (L_+) del eje vertical al nivel de la fuente de ruido más ruidosa (L_{p2}). Esto da la suma de los SPL de las dos fuentes de ruido.
5. Si hay presentes tres o más fuentes de ruido, los pasos 1 a 4 deberán ser repetidos, usando la suma obtenida para las primeras dos fuentes y el SPL de cada fuente adicional

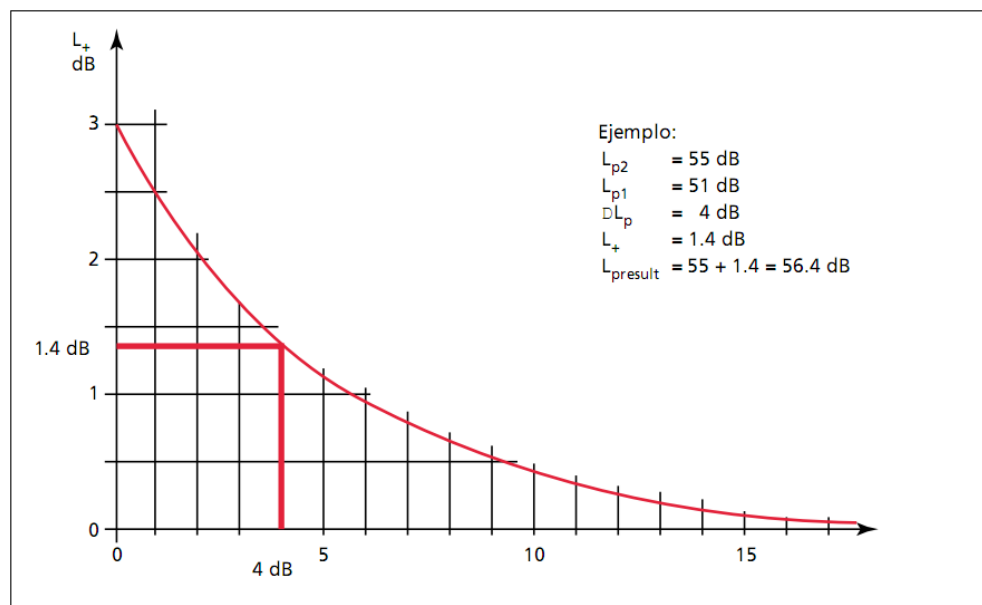


Figura 5. Ábaco para realizar sumas de niveles en dB. (Brüel & Kjaer, 2000)

Tenga en cuenta que una diferencia de $DL_p = 0$ corresponde a la situación mostrada en la ilustración anterior, donde se añadieron 3 dB al nivel causado por una sola fuente

Resta de niveles sonoros.

Algunas veces es necesario restar el ruido de fondo del NPS total. La corrección para el ruido de fondo puede hacerse restando el ruido de fondo medido ($L_{p \text{ fondo}}$) del nivel de presión sonora total ($L_{p \text{ tot}}$) usando la siguiente ecuación



$$L_{presult} = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{L_{ptot}}{10}} - 10^{\frac{L_{pbackground}}{10}} \right) \quad (10)$$

Un método más fácil es usar el ábaco de la *figura 6* y el procedimiento siguiente

1. Medir el nivel de presión sonora total ($L_{p \text{ tot}}$).
2. Medir el nivel de ruido de fondo
3. Ingresar al ábaco, por el eje de abscisas con el valor correspondiente a la diferencia (D_L) de los niveles ($L_{p \text{ tot}} - L_{p \text{ fondo}}$).
4. Trasladarse hasta interceptar la curva, y tomar lectura del valor en el eje de ordenadas
5. Restar el valor indicado (L_-) del eje vertical al nivel de de presión sonora total ($L_{p \text{ tot}}$). El resultado, es la resta del nivel de ruido de fondo medido respecto del nivel de presión sonora total medido.

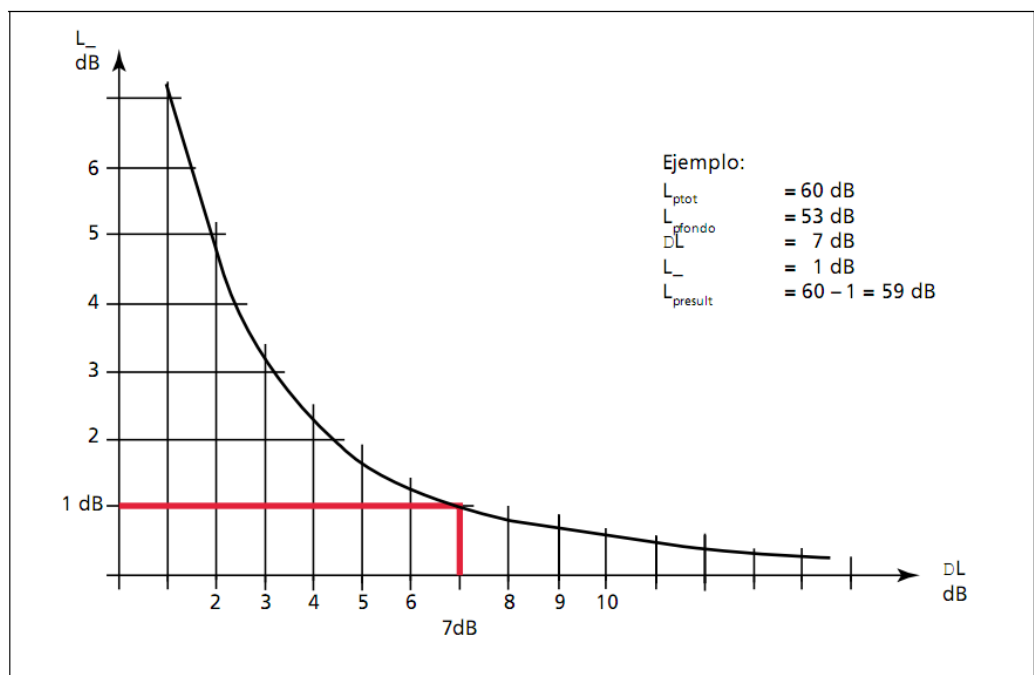


Figura 6. Ábaco para realizar restas de niveles en dB. (Brüel & Kjaer, 2000)

Si la D_L es inferior a 3 dB, el ruido de fondo es demasiado alto para una medida de precisión y el nivel de ruido correcto no se puede hallar hasta que el ruido de fondo haya sido reducido. Si por otra parte, la diferencia es superior a 10 dB, el ruido de fondo puede ser ignorado.



3 Desarrollo del TP:

Pasos a seguir para el desarrollo del TP1:

- 1) Sistema de medición: seleccionar y controlar el cableado necesario para conectar el micrófono con la placa de sonido y esta última con el ordenador (en caso de ser externa). Verificar si el micrófono posee salida balanceada (señal diferencial) ó desbalanceada (señal modo común), generalmente utiliza conector XLR macho (3 pin: 1 Tierra, 2 Positivo, 3 Negativo).
- 2) Software: instalar en el ordenador la última versión libre del programa de aplicación REW (versión 5.15 de 08/05/2016, para Linux/McOS/Windows) disponible en:
(<http://www.roomeqwizard.com/>)
- 3) Software: estudiar el “Help” del programa, el cual introduce al usuario de manera amigable y sencilla. Analizar detalladamente el uso del instrumento virtual “medidor de nivel de presión sonora” (Sound Pressure Level Meter) y el procedimiento de “calibración” (calibrating SPL). Los resultados de la adquisición de datos (data logger) pueden exportarse a un archivo de texto, detallando nivel, frecuencia y fase.
- 4) Prueba del sistema de medición: poner en funcionamiento el sistema de medición y realizar *mediciones de prueba* para verificar el *piso de ruido* del sistema eléctrico (micrófono apagado o desconectado, según corresponda) y acústico (con micrófono encendido).
- 5) Calibración del sistema de medición: calibrar el sistema de medición utilizando un “calibrador acústico” ó un “medidor de nivel sonoro calibrado” (esta tarea se realizará con el docente en el aula).
- 6) Fuente sonora: seleccionar la Fuente Sonora a caracterizar y describir el entorno de la misma (también si existen otras FS próximas que interfieren la medición), el proceso a evaluar, identificando tiempos y eventos sonoros asociados.
- 7) Posiciones: seleccionar ocho (8) posiciones (puntos de medición) alrededor de la fuente, cuatro (4) para un radio R_1 y cuatro (4) restantes para un radio $R_2=2.R_1$ en caso de poder rodear la FS.
- 8) Parámetros atmosféricos: Medir ó averiguar de fuentes oficiales (servicio meteorológico nacional, SMN) las condiciones atmosféricas (presión estática,



humedad relativa porcentual, temperatura ambiente y velocidad de viento) en el lugar donde se ubica la FS seleccionada.

9) Niveles sonoros: Definir conceptualmente y medir los siguientes descriptores sonoros (en cada punto de medición):

1. $L_{ASmáx}$,
2. $L_{ASmín}$,
3. $L_{AFmáx}$,
4. $L_{AFmín}$

5. $L_{CSmáx}$,
6. $L_{CSmín}$,
7. $L_{CFmáx}$,
8. $L_{CFmín}$,

9. $L_{Zmáx}$,
10. $L_{Zmín}$,
11. L_{Zpeak} ,

12. L_{Aeq} ,
13. L_{Ceq} ,
14. L_{Zeq} ,

Nota: analizar qué tiempo de integración debe aplicarse para caracterizar el proceso de la fuente sonora, para los descriptores 12, 13 y 14 (niveles sonoros continuos equivalentes).

10) Situación acústica de la FS: graficar en vista de planta la situación acústica (posición de la fuente, y puntos de medición seleccionados) e informar en Tablas independientes los resultados de las mediciones acústicas y atmosféricas correspondientes.

11) Mediciones acústicas: medir en cada punto el espectro de frecuencias producido por la FS utilizando el instrumento virtual “analyzer de espectro de tiempo real” (RTA), al cual calcula el espectro de frecuencias mediante FFT. Realizar el análisis aplicando filtros normalizados de 1/1 octava, 1/3 de octava, y análisis de Fourier para 65536 muestras, ventana temporal: Hanning, máximo solapamiento: 50%, pudiendo promediarse (average) el resultado entre “nada” e “infinito”.

12) Resultados: presentar en gráficos “Nivel de Presión Sonora” (dB) en función de la “Frecuencia” (Hz) los resultados del análisis espectral.



4 Formato:

El TP, será presentado en un Informe Técnico individual (A4) en el formato propuesto por el Departamento de Ingeniería Electrónica para la confección de Trabajos Prácticos.

5 Metodología de Evaluación:

La evaluación contemplará: 1) la capacidad del alumno de realizar, analizar e informar los resultados de la medición. 2) la organización de la información presentada; 3) la calidad de las conclusiones obtenidas.

6 Referencias

- ANSI (1994), *“Acoustical Terminology”*. Editorial American National Standard Institute. New York.
- Beranek, L. L. (1961), *“Acústica”*. MIT, USA, Edición en castellano Editorial Panamericana. Bs As.
- Brigham, E. (1974), *The Fast Fourier Transform*, Prentice Hall.
- Brüel & Kjær (2000), *“Ruido Ambiental”*, Primera Edición, B&K. Dinamarca.
- John Mulcahy (2004-2016), Room Equalizer Wizard (REW). Fecha último acceso: 11/05/2016. <http://www.roomeqwizard.com/>
- Ferreira Sebastián Pablo (2013), *Física Acústica*. Pp 1 – 34. Revisión 1.3. Publicación Interna Cátedra Fundamentos de Acústica y Electroacústica. Departamento Ingeniería Electrónica, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional.
- Davis, Don & Caroline (1983), *“Ingeniería de Sistemas de Sonido”*, Editorial Marcombo.
- Everest F. A. (2001), *“The Master Handbook Of Acoustics”*, (4th Edition), McGraw-Hill, Los Angeles.