

UNTREF

UNIVERSIDAD NACIONAL
DE TRES DE FEBRERO

Trabajo Práctico

*“Desarrollo de software para el cálculo de
parámetros acústicos ISO 3382”*

Asignatura: Señales y Sistemas

Desarrollo de software para el cálculo de parámetros acústicos ISO 3382

Objetivo general

El siguiente trabajo propone realizar un software modular que permita el cálculo de parámetros acústicos propuestos en la normativa ISO 3382 (UNE-EN ISO 3382, 2010). Un sistema íntegro que contemple todos los elementos necesarios para una medición in-situ.

Objetivos particulares

Los alumnos adquirirán las siguientes habilidades:

- Desarrollo de funciones para:
 - Generación y reproducción de ruido rosa.
 - Generación y reproducción de sine sweep.
 - Adquisición de la RI.
 - Procesamiento de las RI.
- Adquirir las capacidades de interpretar los lineamientos de una normativa.
- Autonomía en la lectura del material dispuesto por los docentes.
- Presentación de avances de producción.
- Documentar¹ el procedimiento de medición y diseño de scripts.

Tiempo de reverberación (TR)

El desarrollo teórico del parámetro acústico “Tiempo de reverberación” ha sido profundamente estudiado por numerosos autores, entre ellos pueden destacarse W.C. Sabine, Eyring, Millington, Fitzroy y Kuttruff (Sabine, W.C. 1964) (Kuttruff, 2009). Una presentación clara sobre el modelo de Millington puede encontrarse en el trabajo de L. E. Kinsler (Kinsler L. E. 1982). Para interpretar el modelo propuesto por Fitzroy puede estudiarse el análisis planteado por M. Rettinger (Rettinger M. 1977). El Tiempo de Reverberación está definido en la Norma ISO 354 de la siguiente manera: “Es el tiempo necesario para que el nivel de presión sonora disminuya 60 dB después del cese de la fuente”.

En la actualidad la mayoría de los equipos usualmente empleados para cuantificar el mencionado descriptor, entregan el parámetro T30, definido en la Norma ISO 3382 según: “Es el tiempo, expresado en segundos, que se requiere para que el nivel de presión sonora disminuya en 60 dB, calculado sobre una recta obtenida de la regresión lineal por mínimos cuadrados de una curva de caída medida desde un nivel 5 dB por debajo del nivel inicial, hasta un nivel de 35 dB inferior a dicho nivel” (UNE-EN ISO 3382, 2010). En este trabajo se desarrollan algunos de los descriptores que permiten caracterizar un recinto cerrado.

¹ La documentación se debe realizar en LaTeX.

Consignas

Realizar un trabajo práctico que cumpla con las cuatro etapas de entrega resumidas en la siguiente tabla, en **grupos reducidos de 3 a 4 integrantes (excluyente)**. Las entregas se realizan en el día y horario de las prácticas de la asignatura:

N° de entrega	Función	Uso	Test	Fecha
1er entrega	Sintetización de ruido rosa	Se utiliza para ajustar el nivel de la fuente al menos a 45 dB por encima del nivel de ruido de fondo en la banda de frecuencia correspondiente.	Corroborar que ambas funciones (Ruido rosa - Sine sweep logarítmico + Filtro inverso) se comportan adecuadamente utilizando, por ejemplo el software Audacity, para ver sus respectivos espectros.	17/09
	Generación de sine sweep logarítmico + filtro inverso	Se utiliza para obtener la respuesta al impulso a partir del sine sweep logarítmico.	Convolucionar un sine sweep logarítmico generado y su respectivo filtro inverso y estudiar resultados.	
	Adquisición y reproducción	Se utiliza para adquirir y reproducir las señales durante una medición in-situ.	Reproducir y grabar de manera simultánea.	
2da entrega	Función de carga de archivos de audio (dataset)	Se utiliza para administrar información al software y evaluar los parámetros acústicos ISO 3382 de dichos audio.	Verificar el espectro de los filtros generados, utilizando fvtool().	08/10
	Función de sintetización de respuesta al impulso	Se utiliza para probar el módulo de cálculo de parámetros acústicos.	Obtener respuesta al impulso a partir de los sine sweep y el filtro inverso descargados (dataset).	
	Función filtros norma IEC 61260	La función filtros norma IEC 61260 es	Evaluar las respuestas al impulso sintetizadas, las respuesta al impulso generadas y las respuestas al impulso generadas con algún programa comercial.	

		útil para filtrar la respuesta al impulso y calcular los parámetros acústicos por frecuencia.		
	Informe preliminar	Realizar informe de avance usando LaTeX y respetando el formato dado.		
3er entrega	Función conversión a escala logarítmica normalizada	Se utiliza para visualizar la señal en una escala más acorde al fenómeno que se estudia.	<p>Graficar en escala logarítmica la señales de interés.</p> <p>Probar con las respuestas al impulso sintetizadas y las muestras descargadas.</p> <p>En caso de utilizar más de una toma por recinto, calcular el valor medio y la desviación estándar. Graficar los resultados.</p> <p>Establecer la integración de todas las funciones usando un archivo de programa "main".</p> <p>Compara los resultados con software específico para el análisis de señales o plugins del mercado.</p>	29/10
	Función suavizado de señal	Se utiliza para las fluctuaciones producto del ruido intrínseco en la respuesta al impulso.		
	Función integral de Schroeder	La función integral de Schroeder representa la curva de decaimiento de la energía acústica.		
	Función regresión lineal por mínimos cuadrados	La función regresión lineal por mínimos cuadrados permite evaluar el tiempo de reverberación.		
	Función cálculo de parámetros acústicos	Se utiliza para determinar las características acústicas de recintos cerrados		
4ta entrega	Función Lundebay	Se utiliza para encontrar los extremos de integración más precisos.	Probar con las respuestas muestras descargadas nuevamente y cuantificar la diferencia respecto a no utilizar Lundebay.	19/11

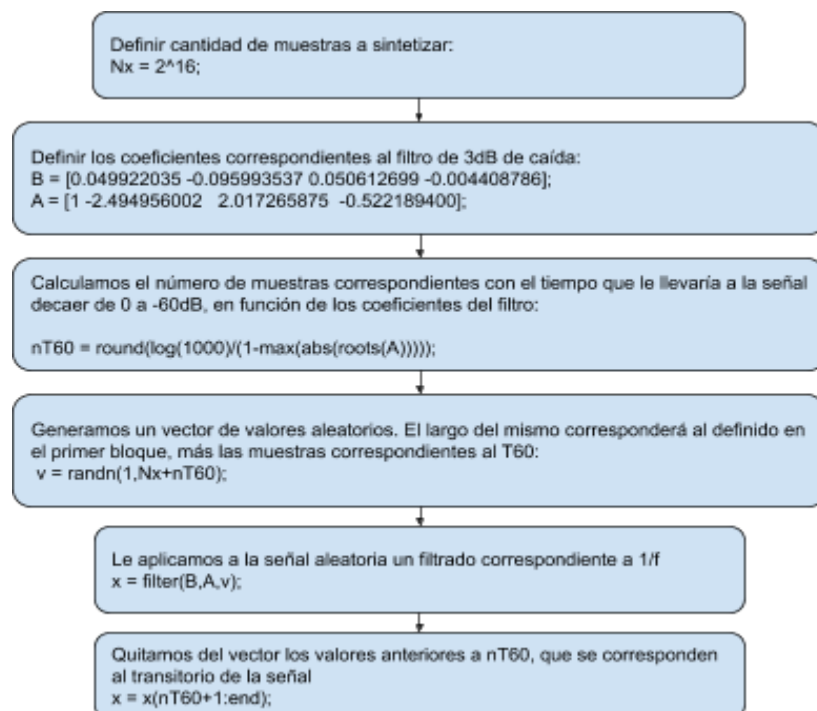
	Función interfaz gráfica	Se utiliza para integrar todas las funciones y permitir una interacción con usuarios.	Evaluar la experiencia de usuario de la interfaz planteada.	
	Informe final	Realizar informe final usando LaTeX y respetando el formato dado.		
Recuperatorio				26/11

Los informes y/o scripts entregados fuera de fecha no serán evaluados y pasarán directo a recuperatorio. Todos los trabajos deben cumplir como mínimo con la entrega de la funciones de cada etapa y además superar los testing propuestos.

Descripción detallada de las entregas

● PRIMER ENTREGA:

- Función de sintetización de ruido rosa:** el ruido rosa o ruido $1/\sqrt{f}$, donde f denota frecuencia en Hz, es un ruido con una distribución de frecuencias tal que su densidad espectral de potencia es proporcional a la inversa de la frecuencia. Esto implica que su nivel, por bandas de tercio de octava, es constante. El nivel del ruido rosa por intervalo fijo de frecuencias va decayendo a razón de 3 dB/octava, de forma no lineal aunque las frecuencias se representan en un eje lineal (Ver fig. 1). Utilizar el siguiente diagrama de flujo para generar una función que sintetice ruido rosa de un tiempo determinado:



No existe un filtro exacto (racional, de orden finito) que puede producir ruido blanco (del cual deriva el ruido rosa). Esto se debe a que la respuesta de amplitud ideal del

filtro debe ser proporcional a la función irracional $1/\sqrt{f}$. Sin embargo, es bastante fácil generar ruido rosa a cualquier grado de aproximación deseado, incluso perceptualmente exacto.

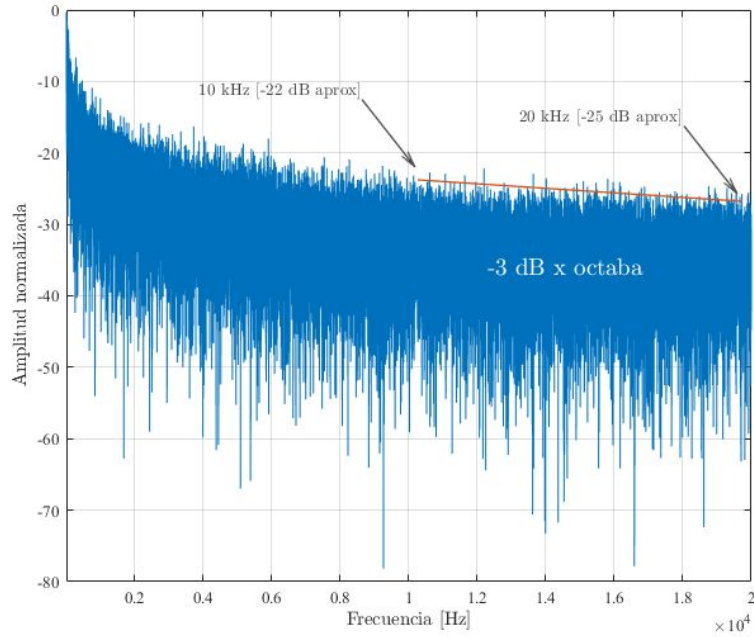


Fig. 1. Espectro del ruido rosa.

- b. **Función generación de sine sweep logarítmico + filtro inverso:** el sine sweep es el método más indicado para generar el impulso por medio de la convolución (Nikolić, I., and O. H. Bjor, 2003). Dado que métodos tales como: explosión de globo, aplauso, disparo con pistola se salva, paper gun (Paper Popper, https://en.wikipedia.org/wiki/Paper_popper), golpe entre maderas, petardos, entre otros, carecen de reproducibilidad. Esto es debido a su nivel sonoro, duración y características espectrales, además de una muy baja relación señal ruido, la cual difícilmente se solucione filtrando o promediando con muchas mediciones. Comencemos por ver cómo generar el **sine sweep logarítmico** $x(t)$ que posee la siguiente forma:

$$x(t) = \sin[\theta(t)] = \sin[K.(e^{\frac{t}{L}} - 1)] \quad (1)$$

Donde:

$$K = \frac{T w_1}{\ln(\frac{w_2}{w_1})}, \quad L = \frac{T}{\ln(\frac{w_2}{w_1})} \quad (2)$$

Con w_1 y w_2 , las frecuencias angulares inferior y superior respectivamente, T es el tiempo de duración del sine sweep en segundos (Meng, Q., 2008). Si estudiamos el espectro de la señal de la ecuación (1), se observa que no es plano, sino que disminuye a razón de -3 dB/octava, como el ruido rosa (Ver fig. 2, sup). De modo que el espectro de $x(t)$ debe ser ajustado, aumentando en 3 dB/octava, de modo que cuando realizamos el cálculo se restaure la plenitud perfecta de la respuesta de impulso medida $h(t)$ (Farina A., 2000) (Ver fig. 2, inf).

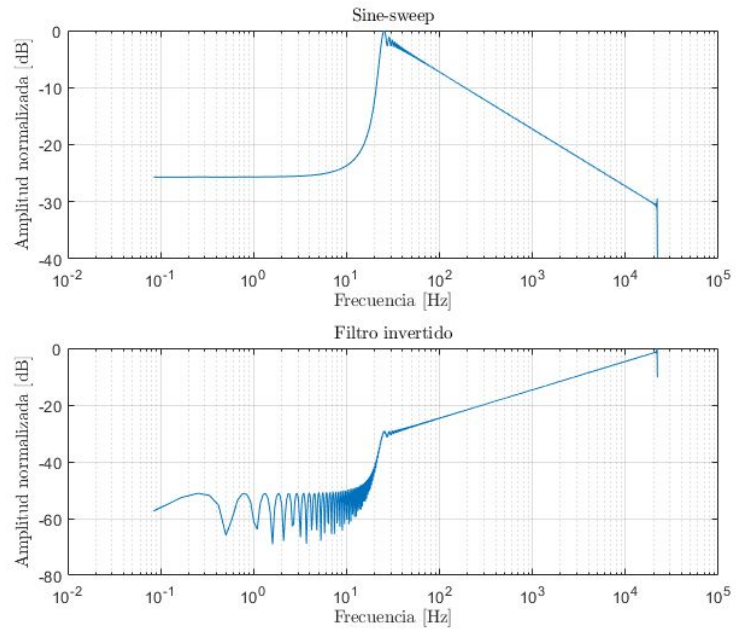


Fig. 2. Espectro del sine sweep. Sine sweep logarítmico (sup). Filtro invertido (inf).

En el dominio temporal las señales del sine sweep logarítmico y el filtro inverso se comportan de la siguiente manera (Ver fig. 3).

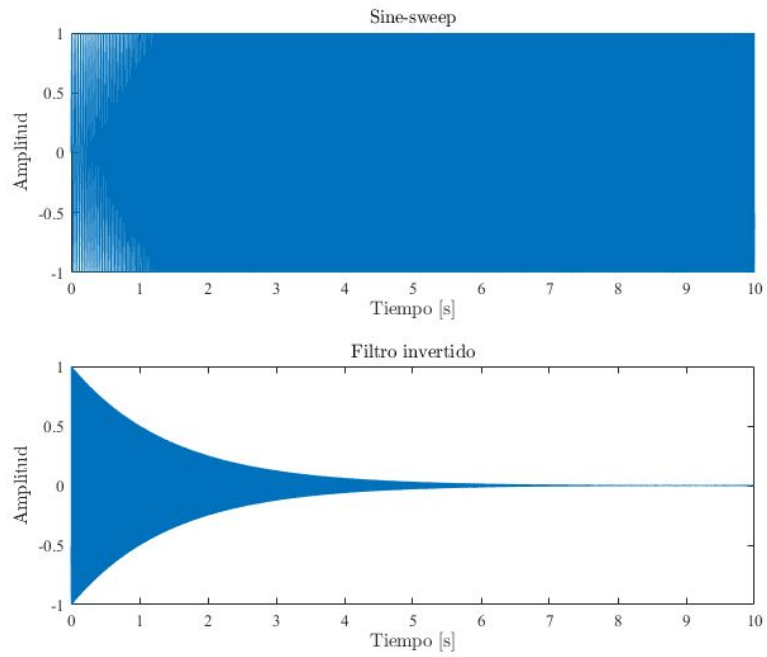


Fig. 3. Magnitud del sine sweep. Sine sweep logarítmico (sup). Filtro invertido (inf).

Para generar el **filtro inverso** $k(t)$ del sine sweep logarítmico $x(t)$ se requiere de una modulación $m(t)$ definida por la siguiente expresión:

$$m(t) = \frac{w_1}{2\pi w(t)} \quad (3)$$

Obtenida de la frecuencia instantánea (dado que la amplitud cambia en función de la frecuencia), calculada a partir de la ecuación (1):

$$w(t) = \frac{d[\theta(t)]}{dt} = \frac{K}{L} e^t \quad (4)$$

Entonces el **filtro inverso** $k(t)$ queda definido como:

$$k(t) = m(t) x(-t) \quad (5)$$

- c. **Función de adquisición y reproducción:** para la adquisición y la reproducción de señales de audio se recomienda utilizar el material expuesto en la asignatura y en caso de usar MATLAB hacer uso de *Audio System Toolbox™*. La función tiene que permitir la reproducción y la adquisición de manera simultánea para un tiempo determinado por el usuario. Es importante evaluar y constatar dicha simultaneidad. El módulo debería permitir seleccionar el hardware a utilizar.

SEGUNDA ENTREGA:

- d. **Función de carga de archivos de audio (dataset):** realizar una función que permita cargar archivos de audio, en lo posible *.wav, que contenga, ya sea una respuesta al impulso o bien un sine sweep logarítmico grabado y su respectivo filtro inverso. Contemplar el ingreso de más de un archivo de audio, por tipo.
- i. **Respuestas al impulso:** elegir uno de los recinto que figuran en el siguiente link (<http://isophonics.net/content/room-impulse-response-data-set>) y descargar las mediciones y toda la información relevante. También se puede usar los archivos dispuestos en el Drive de la asignatura
 - ii. **Sine sweep logarítmico + filtro inverso:** usar los archivos dispuestos en el Drive de la asignatura.
- e. **Función de sintetización de respuesta al impulso:** realizar una función para sintetizar una respuesta al impulso, considerando las frecuencias centrales banda de octava y tercio de octava como establece la norma IEC 61260 (IEC 61260, 1995). Las siguiente ecuación define una RI, para una frecuencia central f_i :

$$y_i = A_i e^{\pi_i t} \cos(2\pi f_i t) \quad (6)$$

$$\pi_i = \frac{-\ln(10^{-3})}{T_{60}} \quad (7)$$

Donde π_i define el decaimiento exponencial en función de T_{60} (tiempo de reverberación), para una frecuencia f_i . La suma de varias frecuencias centrales se define como:

$$y = \sum_{i=1}^n y_i \quad (8)$$

Con n la cantidad de frecuencias centrales (f_i) del filtro.

- f. **Función obtener respuesta al impulso:** realizar una función que permita obtener la respuesta al impulso a partir del sine sweep logarítmico grabado y el filtro inverso utilizando el siguiente método:

Supongamos que un recinto es excitado por una señal sine sweep logarítmica $x(t)$ y captada por un micrófono $y(t)$ y buscamos la RI del recinto $h(t)$, lo anterior se expresa de la siguiente manera:

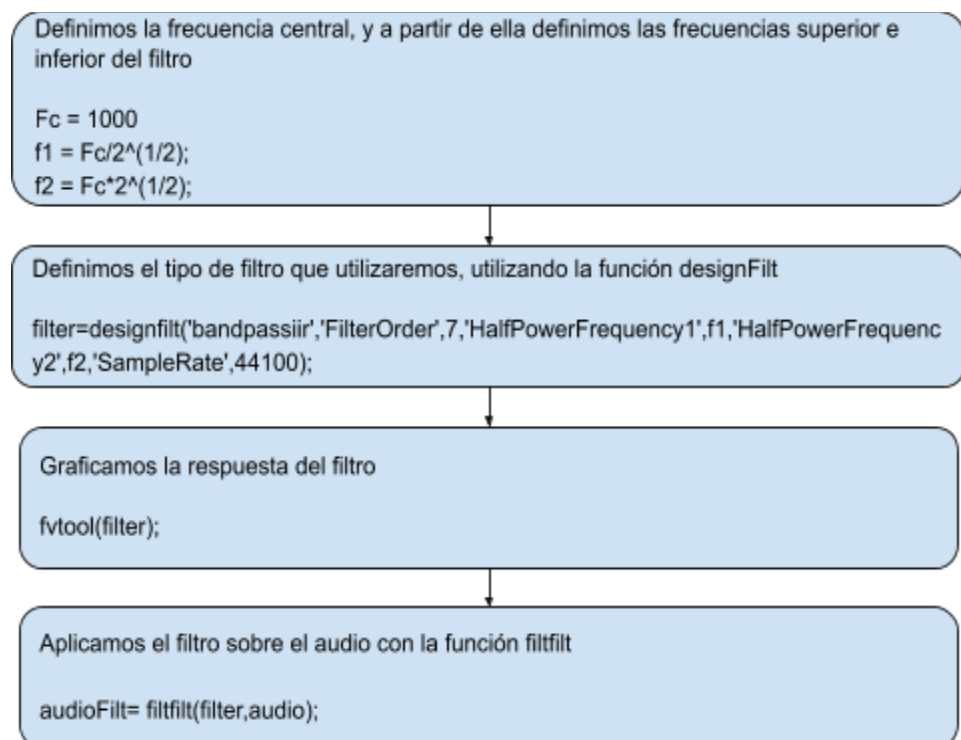
$$y(t) = x(t) * h(t) \quad (9)$$

Para un Sine sweep lineal (que no es nuestro caso) el problema es sencillo, pero en nuestro caso requiere trabajar un poco respecto $x(t)$ para obtener la siguiente expresión:

$$h(t) = F^{-1}[H(j\omega)] = F^{-1}[Y(j\omega)K(j\omega)] \quad (10)$$

De esta manera se obtiene la respuesta al impulso buscada. La demostración para obtener dicha expresión se encuentra en el Anexo I - Obtener la respuesta al impulso a partir de un sine sweep.

- g. **Función filtros norma IEC 61260:** realizar una función que filtre todas las señales en octavas y tercio de octava según la norma IEC 61260 (IEC 61260, 1995), con el objetivo de calcular los parámetros acústicos discriminando las frecuencias. Para lo cual utilizar las funciones de MATLAB de filtrado (Para más detalle de su uso: [web oficial - MathWorks - filter](#)). Un posible ejemplo de aplicación de una función del filtro de octava se presenta en el siguiente diagrama de flujo:



- h. **Informe preliminar:** realizar un informe preliminar en formato UNTREF para memorias cuatrimestrales (disponible en el Drive de la asignatura), utilizando la plataforma de

edición de documentos LaTeX (<https://es.wikipedia.org/wiki/LaTeX>). Respetar las siguientes consignas:

- i. Mencionar los detalles en el diseño de los scripts (con ayuda de diagramas de flujo o pseudocódigo) **sin agregar código propiamente dicho**.
- ii. Describir el dataset seleccionado para probar el software.
- iii. El informe debe reflejar la arquitectura del software desarrollado y los avances en la producción del mismo. Los datos que se informan tiene que ser relevantes y garantizar la reproducibilidad de los mismos. No ahondar en muchos detalles teóricos y definiciones (hacer uso de referencias), hacer más bien foco en la producción del software, su evaluación y su validación.
- iv. El informe preliminar **no debe exceder las 3 páginas**. Respetar fecha de entrega.
- v. Respetar los siguientes porcentajes de contenido por sección (también determinan los grados de importancia):

Resumen (5%)	Introducción (10%)	Marco teórico (10%)	Propuesta original (25%)	Resultados (30%)	Conclusiones (20%)
-----------------	-----------------------	------------------------	-----------------------------	---------------------	-----------------------

TERCER ENTREGA:

- i. **Función conversión a escala logarítmica normalizada:** para visualizar correctamente la señal es necesario realizar una función que convierta el impulso en escala logarítmica, utilizando la siguiente expresión:

$$R(t) = 20 \log_{10} \frac{A(t)}{\max A(t)} \quad (11)$$

Donde $A(t)$ es la señal que deseamos transformar de escala.

- j. **Función suavizado de señal:** Investigar e implementar en una única función alguna o todas las técnicas que se mencionan a continuación:

- i. **Transformada de Hilbert:** Se trata de un operador lineal definido por la convolución de la señal que deseamos transformar $s(t)$ y función $1/(\pi t)$. Se utiliza con la función original para obtener la llamada función analítica, de la cual se puede obtener fácilmente la envolvente de la señal, conservando tan solo el modulo de dicha transformación. Otra interpretación es que la transformada de Hilbert de $s(t)$ es la salida de un sistema LTI con entrada $s(t)$ y respuesta al impulso $1/(\pi t)$.

- ii. **Filtro de promedio móvil:** Se trata de una técnica de filtrado, la cual devuelve un valor de salida igual al promedio de L muestras, dando una lista de números los cuales cada uno es el promedio de un subconjunto de los datos originales. Permite filtrar las altas frecuencias (pasa bajo), devolviendo una versión suavizada de la señal.

- k. **Función integral de Schroeder:** o también conocido como transformada de Schroeder permite aproximar el impulso a una señal más adecuada para calcular parámetros acústicos. Realizar una función que aplique la siguiente expresión a las señales suavizadas:

$$E(t) = \int_t^{\infty} p^2(\tau) d\tau = \int_0^{\infty} p^2(\tau) d\tau - \int_0^t p^2(\tau) d\tau \quad (12)$$

Siendo $p(\tau)$ la respuesta al impulso y t variando de $t \rightarrow \infty$ hasta el principio de $p(\tau)$. Con objetivo de minimizar la influencia del ruido de fondo es conveniente definir el extremo superior de la integral, en lugar de llevarla hasta el final del audio.

- I. **Función regresión lineal por mínimos cuadrados:** aplicar la aproximación por una recta obtenida de la regresión lineal por cuadrados mínimos de la respuesta al impulso, con algoritmo propio y no utilizando funciones predefinidas. Se puede utilizar funciones propias de MATLAB para comparar (por ejemplo, `polyfit()`), con la función desarrollada. En el anexo C de ISO 3382 del año 2008, figura como implementar la regresión lineal en su modo clásico, en la asignatura se utiliza el método matricial. Elegir un método y aplicarlo.
- m. **Función cálculo de parámetros acústicos:** desarrollar una función que permita calcular los siguientes parámetros acústicos definidos en la ISO 3382 (UNE-EN ISO 3382, 2010), a partir de la recta aproximada o directamente de la respuesta al impulso, según corresponda. Buscar en la normativa la definición de los siguiente parámetros:
 - i. EDT.
 - ii. T60 a partir del T10, T20 y T30.
 - iii. D50.
 - iv. C80.

CUARTA ENTREGA:

- n. **Función Lundeby:** investigar método (Y. Hirata, 1982), para encontrar el extremo superior de integración de la ecuación (12). El método de Lundeby está basado en un algoritmo iterativo que selecciona el intervalo temporal más adecuado para el cual se calcula la regresión lineal, buscando eliminar contribuciones no deseadas. A continuación se describe el algoritmo. (Y. Hirata, 1982).
 - i. Se calcula la media cuadrática (RMS) de la respuesta al impulso en intervalos de tiempo (10-50 ms)
 - ii. Estimamos el nivel de ruido de fondo a partir de la cola reverberante (último 10% de la señal)
 - iii. Estimamos la pendiente de decaimiento desde 0 dB hasta el nivel del ruido (el punto "izquierdo" es el correspondiente a 0 dB. Buscamos el punto "derecho" 5 - 10 dB por sobre el nivel del ruido).
 - iv. Encontrar el punto de cruce entre la regresión lineal y el nivel de ruido
 - v. Encontrar nuevos intervalos locales basándose en la pendiente actual (usar entre 3-10 intervalos cada 10 dB de decaimiento)
 - vi. Calcular la media cuadrática (RMS) de la respuesta al impulso en los nuevos intervalos locales
 - vii. Estimar ruido de fondo (comenzando por un punto de tiempo correspondiente a un decaimiento de 5-10 dB basándose en la pendiente actual luego del punto de cruce actual, tomando como longitud mínima el 10% de la RI)

- viii. Estimar la nueva pendiente de decaimiento (se debería evaluar un rango dinámico de 10-20 dB, comenzando en 5-10 dB sobre el nivel de ruido)
 - ix. Encontrar un nuevo punto de cruce.
 - x. Repetir vii,viii y ix hasta alcanzar un punto de convergencia
- o. **Función interfaz gráfica:** integrar y agrupar todas las funciones anteriormente definidas en una interfaz de usuario utilizando las herramientas vistas en la asignatura. Evitar utilizar el asistente "GUIDE" de MATLAB para generar código automático.
- p. **Informe final:** realizar un informe final, con el mismo formato establecido en el informe preliminar, pero en este caso **no debe exceder las 5 páginas**. Además se recuerda remitir solamente a detalles relevante, algunos puntos importantes son:
- i. Contemplar las correcciones de la primera entrega.
 - ii. En el informe debe figurar claramente cómo se unen todas las funciones definidas y la interacción entre ellas. Utilizar algún diagrama para visualizar dicha relación.
 - iii. Mencionar detalladamente el procedimiento.
 - iv. Mostrar curvas de filtros, plot del procesamiento de la señal.
 - v. Validación del algoritmo con software comercial.
 - vi. **Los informes finales entregados fuera de fecha no serán evaluados.**

Evaluación

El TP será puntuado con valores 0 a 100 y es necesario contar con 60 puntos para aprobar el TP. El mismo está determinado por un promedio ponderado que consta de 3 etapas:

$$\text{Nota final del TP} = 0.3 (\text{NIT}) + 0.5 (\text{NC}) + 0.2 (\text{NDO})$$

NIT: nota de informe técnico.

NC: nota de código.

NDO: nota de defensa oral.

SE RECUERDA QUE PARA APROBAR LA ASIGNATURA ES NECESARIO TENER UNA NOTA SUPERIOR A 6 EN EL TP. AQUEL GRUPO QUE CON NOTA INFERIOR TIENE UNA INSTANCIA MÁS DE CORRECCIÓN.

Referencias

- UNE-EN ISO 3382 (2010), "Medición del tiempo de reverberación de recintos con referencia a otros parámetros acústicos", basado en ISO 3382:1997, AENOR, Madrid, España.
- IEC 61260 (1995). "Electroacoustics—Octave-Band and Fractional-Octave-Band Filters". International Electrotechnical Commission.
- Kinsler L.E. (1995), "Fundamentos de Acústica". Cuarta reimpresión D. F., México, Editorial Limusa, S.A. de C.V. 591 páginas.
- Kuttruff H. (2009), "Room Acoustics". Quinta edición., Spoon Press, Oxon.

- Rettinger M. (1977), "Acoustic Design and Noise Control". Volume 1. Nueva York, Chemical Publishing Co.
- Sabine W. (1964) "Collected Papers on acoustics". Nueva York: Dove Publications, Inc. 279 páginas. Library of Congress Catalog Card Number: 64-18864.
- Nikolić, I., and O. H. Bjor (2003). "Building and Room Acoustics Measurements with Sine-Sweep Technique." Proceedings of the Institute of Acoustics 25.Pt 5.
- Farina A. (2000), "Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique." Audio Engineering Society Convention 108. Audio Engineering Society.
- Meng, Q., et al.(2008), "Impulse response measurement with sine sweeps and amplitude modulation schemes." Signal Processing and Communication Systems, 2008. ICSPCS 2008. 2nd International Conference on. IEEE.
- W. T. Chu (1978), "Comparison of Reverberation Measurements Using Schröder's Impulse Method and Decay-Curve Averaging Method" J. Acoust. Soc. Am. ,vol. 63, pp. 1444–1450 (1978 May).
- A. Lundeby, et al. (1995), "Uncertainties of Measurements in Room Acoustics," Acustica,vol. 81, pp. 344–355.
- Y. Hirata (1982), "A Method of Eliminating Noise in Power Responses," J. Sound Vib.,vol. 82, pp. 593–595.

Anexo I - Obtener la respuesta al impulso a partir de un sine sweep.

Un Sine sweep lineal logaritmo posee bajas frecuencias que requieren mayor tiempo que las altas frecuencias en su reproducción (relación logarítmica). Por lo tanto esto requiere trabajar un poco sobre la expresión (9). A partir de la propiedad de convolución de la Transformada de Fourier obtenemos que (9) se puede expresar como:

$$x(t) * h(t) = X(j\omega)H(j\omega) \quad (13)$$

$$Y(j\omega)/X(j\omega) = H(j\omega) \quad (14)$$

$$F^{-1}[H(j\omega)] = h(t) \quad (15)$$

La ecuación (14) es válida si $X(j\omega)$ es distinta de cero dentro del rango de frecuencia de interés, si $x(t)$ tiene un espectro conocido $X(j\omega)$ se calcula una sola vez y se aplica a todas las mediciones.

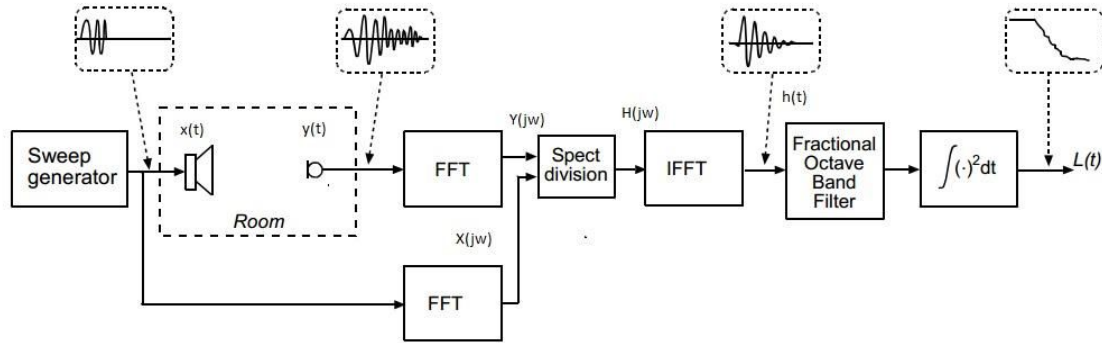


Fig. 4. Diagrama en bloque para obtener la RI de un recinto, por medio de la convolución (Nikolić, I., and O. H. Bjor, 2003).

En vista que la fuente generadora del Sine-sweep no es lineal el objetivo es obtener un $h(t)$ independiente de la no linealidad de la fuente. Para lo cual se debe trabajar un poco más la ecuación (14) (Farina A.,2000):

$$Y(j\omega)X(j\omega)^{-1} = H(j\omega) \quad (16)$$

$$X(j\omega)^{-1} \in C \rightarrow \text{por la fórmula de Euler} \Rightarrow X(j\omega)^{-1} = (e^{i\theta(j\omega)})^{-1} = \overline{X(j\omega)} \quad (17)$$

$$Y(j\omega)\overline{X(j\omega)} = H(j\omega) \quad (18)$$

$$y(t) * x(-t) = h(t) \quad (19)$$

Es importante observar que la ecuación (6) es válida si el módulo de la transformada en el rango de estudio (de 22 a 22 kHz) es 1, pero como veremos a continuación para asumir esta igualdad es necesario una compensación. La ecuación (8) surge de la antitransformada de $\overline{X(j\omega)}$. De esta manera el problema se limita a obtener $y(t)$ del recinto (Sine sweep, grabado) y realizar la convolución con $x(-t)$ (Sine sweep, original invertido en tiempo, también conocido como filtro inverso).