

# Trabajo Práctico

## Diseño de filtros Ecualizador de audio digital

### 1. Introducción

#### 1.1. Motivación

La respuesta en frecuencia que ofrece una sala o recinto desde el punto de vista acústico varía dependiendo del mobiliario y su disposición, la geometría del lugar, los materiales presentes, etc., provocando la absorción o reflexión de la señal acústica. Por ejemplo, si el nivel de presión sonora (SPL, *Sound Pressure Level*) absorbida por las paredes es pequeña, existirán modos de vibración que hacen que ciertas longitudes de onda se refuercen y otras se cancelen en diferentes puntos del espacio. Cabe destacar que una consecuencia muy importante que deriva de este hecho es que la respuesta en frecuencia tomada desde distintos lugares de la sala podría ser diferente. Por otra parte, existen otros factores en medio de la cadena *electroacústica* que pueden alterar el espectro de la fuente de audio, entre los que podemos mencionar: la respuesta en frecuencia del micrófono, amplificadores, filtro antialiasing previo a la digitalización o cualquier otro factor intermedio. Denominemos a todas estas etapas atravesadas por la señal desde su emisión hasta su digitalización como *sistema electroacústico* (EA). Por todas estas razones es de vital importancia contar con un sistema capaz de compensar dichos efectos antes que la señal alcance su destino, sea éste la reproducción directa (en tiempo real) o bien la grabación. Para realizar esta tarea existen los denominados *ecualizadores*, en los que basaremos el trabajo práctico.

#### 1.2. Objetivos

Bajo el contexto mencionado previamente, el presente trabajo práctico tiene como objetivo el diseño de *ecualizadores* digitales que permitan corregir las modificaciones que un cierto sistema EA introduce en la respuesta en frecuencia de la fuente original de sonido, como se indica en la Figura 1. Para ello *el ecualizador deberá corregir estas variaciones de amplitud realizando la acción inversa a la respuesta en frecuencia del sistema EA a compensar*, buscando que la ganancia de la respuesta final sea lo más plana posible en el espectro de interés. Desde el punto de vista de la percepción acústica, puede considerarse como respuesta plana cuando la *desviación máxima es de 2 dB sobre la línea ideal en el rango del espectro audible*, ya que estas desviaciones serán mínimamente perceptibles para el oído humano. De esta manera, el ecualizador tiene como función realizar una corrección objetiva sobre la señal, más allá de otras aplicaciones en donde se utilizan ecualizadores para realzar o atenuar ciertas bandas de frecuencias basándose más bien en criterios que dependen de la apreciación subjetiva del oyente.

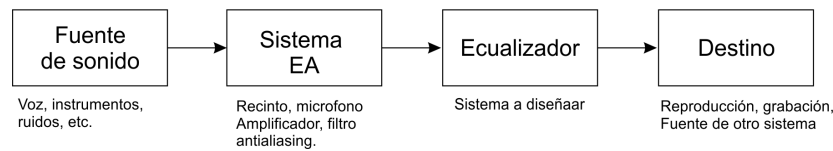


Figura 1: Cadena *electroacústica* total, incluyendo ecualizador.

### 1.3. Datos suministrados

#### 1.3.1. Señal Fuente

- Si bien puede utilizarse cualquier fuente de audio, el alumno podrá encontrar en el campus de la materia un conjunto de archivos de audio disponibles nombrados como `pista.1.wav`, `pista.2.wav`, etc., para el testeo subjetivo del sonido antes y después del ecualizador.
- Cada pista son segmentos de audio de corta duración muestreadas a una frecuencia de  $f_s = 44100 \text{ Hz}$ .

#### 1.3.2. Sistema a compensar

En el campus también se encuentra disponible el archivo `SEA.mat`. Este archivo se corresponde con la respuesta impulsiva  $h[n]$  obtenida para un determinado sistema EA (suponer que ésta fue extraída a partir de mediciones previas en la caracterización del sistema EA [1]) y cuya respuesta en frecuencia se desea compensar.

### 1.4. Requerimientos

El ecualizador deberá cumplir con ciertos requerimientos para lograr la adecuada compensación del sistema, debiendo cumplirse las siguientes pautas:

- Considere que la ganancia de la respuesta en frecuencia total (sistema EA y ecualizador) debe garantizar una respuesta lo más plana posible con un apartamiento no superior a 2 dB.
- Considere que la compensación debe abarcar el rango de frecuencias audible. Idealmente, se supone que el rango audible por el ser humano es de 20 Hz - 20 kHz. Sin embargo, a los efectos prácticos, el promedio no suele alcanzar este rango en su totalidad. Por lo tanto, considere que la ecualización cumpla con los requerimientos de ganancia al menos en el rango de 20Hz - 16kHz.
- En base a los ítems anteriores, se deberán definir las especificaciones del ecualizador según crea conveniente y dependiendo del método utilizado en el diseño del filtro: cantidad de bandas, ganancias, tolerancias y frecuencias límites de cada banda.

*Recuerde que el mejor diseño es aquel que cumple las especificaciones utilizando la menor cantidad de recursos.*

## 2. Desarrollo del trabajo práctico

### 2.1. Parte I: Ecualización mediante filtros de fase lineal

Se desea implementar el ecualizador mediante un filtro multibanda que no agregue distorsión de fase. Considere para ello la utilización tanto del método de ventanas como de filtros óptimos (justifique su uso) de acuerdo a las siguientes consignas.

2.1.1 A partir de la respuesta impulsiva del sistema  $h[n]$  suministrada, se propone el diseño de un ecualizador  $H_{EQ}(e^{j\omega})$  mediante un filtro multibanda cuyas especificaciones ( $\omega_p$ ,  $\omega_s$ ,  $\delta_p$  y  $\delta_s$  para todas las bandas) deben ser definidas a partir de la ganancia inversa del sistema, (es decir, en este caso  $1/|H(e^{j\omega})|$ , considerando que  $H(e^{j\omega})$  es siempre positivo).

- Defina la función amplitud del ecualizador,  $A_{EQ}(\omega)$ , con sus correspondientes bandas, amplitudes, tolerancias (ripple) adecuadas para cumplir los requerimientos, frecuencias de corte, paso y supresión.
- Implemente el filtro multibanda que cumpla con las especificaciones definidas previamente. Si es necesario reajuste el orden  $M$  y las frecuencias de corte hasta que lo considere necesario. Indique el tipo de filtro resultante y la ventana utilizada. Sugerencia: se recomienda hacer una función genérica con la siguiente forma:

`multibanda(a, f, M, win),`

donde  $a$  son las amplitudes de cada banda,  $f$  son las frecuencias de corte,  $M$  es el orden del filtro y  $win$  es un flag para indicarle a la función el tipo de ventana a utilizar. De todas formas queda a criterio del alumno la elección que crea más conveniente en el código a utilizar.

- Compute y grafique el módulo de la respuesta en frecuencia del ecualizador resultante y de transferencia total  $H_T(e^{j\omega}) = H(e^{j\omega})H_{EQ}(e^{j\omega})$ , ¿se cumple el requerimiento estipulado inicialmente?. También grafique el retardo de fase que introduce el filtro ecualizador, el del sistema EA y el total [2].
- Utilizando alguna de las señales de prueba disponibles, escuche mediante la función de matlab `sound(pista, fs)`:
  - Audio original.
  - Audio a la salida del sistema EA.
  - Audio final ecualizado.

Verifique los resultados de acuerdo a su apreciación subjetiva. ¿Es coherente con los resultados del ítem anterior?

- 2.1.2 (a) Implementar el filtro multibanda siguiendo las especificaciones ya definidas en el punto anterior utilizando alguno de los métodos de filtros óptimos. Comente el porqué de su elección. Determine el orden del filtro  $M$  que cumple con las especificaciones.
- (b) Realice los mismos gráficos pedidos en el punto 2.1.1(c). Para el método elegido, ¿cuáles son las ventajas y desventajas que presenta respecto del método de diseño realizado en el punto 2.1.1?.
- (c) Compruebe los resultados mediante los audios de igual modo que en el punto 2.1.1(d).

## 2.2. Parte II: Ecualización mediante filtros de fase no lineal

El diseño de la primer parte se basó en filtros del tipo FIR y particularmente FLG. Sin embargo, es también posible utilizar filtros IIR para este propósito. En esta parte se pretende el diseño de un ecualizador mediante dos técnicas distintas basadas en filtros IIR.

2.2.1 A partir de la respuesta impulsiva del sistema  $h[n]$  suministrada, se pide obtener un ecualizador  $H_{EQ}(e^{j\omega})$  mediante un filtro que compense la respuesta en frecuencia en módulo del sistema EA implementando su sistema inverso, pero al mismo tiempo garantizando las condiciones de estabilidad. ¿Qué tipo de sistemas resultarían de utilidad para este fin? Dado que en este caso el filtro se obtiene directamente en función del sistema a compensar, no es necesario definir tolerancias ni especificaciones del mismo.

- Determine la transferencia del ecualizador a partir de la transferencia del sistema EA (sugerencia: exprese las transferencias de manera genérica como productos de polos y ceros).
- Grafique el diagrama de polos y ceros del sistema EA, del filtro ecualizador y del sistema total.
- Grafique la respuesta en frecuencia (en dB) del sistema EA, el filtro ecualizador y el sistema total. Comente los resultados observados.
- Grafique el retardo de fase del sistema EA, del filtro ecualizador y del sistema total. ¿Qué puede decir acerca de estos resultados en comparación con la parte I de trabajo práctico?
- Compruebe subjetivamente los resultados siguiendo la misma consigna del ítem 2.1.1(d). Comente su apreciación y relaciónelo con los resultados objetivos.

2.2.2 (Opcional) En general son muy comunes los ecualizadores digitales paramétricos basados en filtros IIR, cuyo diseño se puede realizar en el dominio de la transformada de Laplace y mapeo bilineal. En este caso, a diferencia del punto anterior, éste tipo de ecualizadores es ajustable por el usuario y no automático, pudiendo tener múltiples usos y aplicaciones. Una estructura muy utilizada es la conocida como filtros de tipo *shelving* [3], basados en respuestas de ganancia unitaria (0 dB) que abarca una combinación de múltiples filtros que refuerzan (*boost*) o atenúan (*cut*) determinadas bandas.

Se propone como último método para este trabajo práctico la implementación de un filtro IIR tipo *shelving* con una selección de bandas que permitan ecualizar la respuesta en frecuencia del sistema EA. Sin embargo, dado que la compensación usando este ecualizador esta sujeta a un proceso de prueba y error, en este ítem se valorará al menos la implementación del mismo aunque no se logre compensar el sistema EA de manera aceptable. Debe tenerse en cuenta que ésta no es la única forma de implementar el ecualizador IIR paramétrico, pero a los fines de este trabajo práctico se sugiere:

- Utilización de filtros *Butterworth* (pasa bajos, pasa altos y pasa banda) de orden 1.
- Transferencia total del filtro como la cascada o el paralelo de los filtros independientes que la componen.
- Tener en cuenta que para tener ganancia unitaria donde no se aplican los filtros, debe sumarse un pasa todo (es decir, la suma de la señal en paralelo a los filtros).
- El factor de ganancia de cada filtro, llamémoslo  $H_0$ , debe ser tal que para  $1 \leq H_0 < \infty$  acentúa la banda (*boost*) y para  $0 \leq H_0 < 1$  la atenúa.

### 3. Herramientas de utilidad

A continuación se describen una lista de las funciones brindadas por el *software* que resultarán útiles para la realización de este trabajo práctico. Explore cada una de ellas.

- `hEA = load('SEA.mat')`
- `audio = wavread('pista_1.wav')`
- `sound(audio, fs)`
- `clear playsnd`
- `[H,w] = freqz(b,a,nfft)`
- `y = filter(b,a,x)`
- `w = window(@hamming,M+1)`
- `zplane(b,a,'z')`
- `h = firls(N,f,a,W)`
- `h = firpm(N,f,a,W)`
- `r = roots(c)`
- `c = poly(r)`
- `[b,a] = butter(N,f,'type')`
- `grpdelay(b,a,nfft)`

## Normas y material entregable

- Realizar los diseños requeridos y entregar un informe con los comentarios y/o resultados solicitados en cada ítem.
- Se sugiere que el informe sea conciso y cumpla específicamente los puntos solicitados (no deben incluirse desarrollos teóricos que no hayan sido pedidos explícitamente).
- Incluir scripts relevantes organizados según su conveniencia o criterio y que sean lo más claro posibles y con los comentarios necesarios.
- Como conclusiones, elabore un breve resumen sobre las ventajas y desventajas de cada método propuesto en este trabajo. Considere aspectos como: linealidad de fase, complejidad de diseño, recursos requeridos, costo computacional, etc., o cualquier otro criterio que considere importante.
- Se implementarán los algoritmos (construcción de ventanas y todo tipo de filtrado requerido), aplicando los conceptos obtenidos del curso y la bibliografía asociada [4].
- El punto opcional (2.2.2) se recomienda como incentivo para lograr una mejor calificación, pero su no realización no impide la aprobación del trabajo práctico.
- El trabajo podrá realizarse en grupos de dos personas.
- Cada miembro del grupo deberá poder explicar el funcionamiento de la totalidad de los algoritmos implementados.
- La fecha tentativa de entrega del TP, es el día lunes 21 de mayo del corriente año.

## Referencias

- [1] Stan, Guy-Bart and Embrechts, Jean Jacques and Archambeau, Dominique. (2002). Comparison of different impulse response measurement techniques. *Journal of the Audio Engineering Society*. 50. 249-262.
- [2] Apuntes de cátedra: Ejemplos de simulación y distorsión de fase.
- [3] U. Zölzer, *Digital Audio Signal Processing*, New York; Wiley, 1997.
- [4] A.V. Oppenheim, R.W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*. Prentice Hall, 3rd. ed., 2009.