

# Tratamiento Digital de Señales (TDSÑ 95000028) Grupo G34

Laboratorio: Trabajo Final

Curso 2021-2022

## Metodología

### Grupos

El trabajo final se elaborará preferiblemente por parejas aunque también se admiten trabajos individuales a discreción de los alumnos.

### Entregables

El trabajo estará compuesto por:

- una memoria, que debe incluir la descripción del problema y de la solución, así como las pruebas y resultados obtenidos. La memoria puede incluir también cualquier otra información que se considere conveniente o interesante, pruebas alternativas a las indicadas, etc. Una extensión de diez páginas se considera razonable. Debe entregarse en formato PDF.
- el código MATLAB que constituya la solución: un *script* principal y, si acaso, los ficheros con funciones auxiliares. No deben entregarse ninguno de los ficheros proporcionados (señales de prueba, funciones...) ni funciones de las cajas de herramientas de MATLAB o de las prácticas.

Los trabajos deben entregarse en la página de entregas habilitada en la plataforma edX siguiendo las instrucciones que allí se detallan.

### Evaluación

La evaluación de este trabajo se basará exclusivamente en la memoria, según los criterios que se indican en la última sección de este documento. La evaluación aporta un 20 % de la nota final de la asignatura.

### Calendario

La fecha límite de entrega del trabajo es el viernes 30 de enero de 2022 a las 23:55 CET.

## Descripción del Trabajo: Ecualizador Paramétrico de Audio

### Introducción

Una sala, sea de concierto, de estudio o de audición, contiene elementos arquitectónicos (paredes, suelo, techo, puertas, ventanas...), electrónicos y electromecánicos cuyas características acústicas se combinan para dar como resultado una función de transferencia acústica generalmente no uniforme en el rango de frecuencias de audio [20 Hz, 20 kHz]. Esta respuesta no uniforme debe considerarse como una distorsión ya que es, en general, indeseada. La forma habitual de contrarrestar este problema es usar un **ecualizador** en la cadena de reproducción de audio que predistorsione la señal de forma que al ser reproducida se obtenga una función de transferencia combinada lo más constante posible. Por tanto, en este contexto, la función del ecualizador es compensar en la medida de lo posible las deficiencias de la cadena de reproducción de sonido desde la fuente al oído de un oyente incluyendo la sala. Nótese que un ecualizador también puede usarse de forma más creativa para alterar el contenido armónico de un sonido; sin embargo, este no es el objetivo del trabajo.

En el capítulo 3 del temario de la asignatura se describe la técnica de compensación mediante la cual se puede recuperar exactamente el módulo de la transformada de Fourier de una señal distorsionada, siempre y cuando el sistema distorsionador  $H_d(z)$  sea LTI, causal, estable y no contenga ceros en el círculo unidad. El filtro resultante  $H_c(z)$  resulta también LTI, causal y estable, y ha de disponerse en cascada con el sistema distorsionador. Este procedimiento puede acomodarse al escenario acústico del trabajo del siguiente modo: la señal de la fuente  $x[n]$  se aplica al ecualizador  $H_c(z)$  y la salida de éste se aplica al sistema distorsionador  $H_d(z)$  dando como resultado la señal compensada  $x_c[n]$ . El cambio de orden de los sistemas compensador (ecualizador) y distorsionador es posible porque ambos sistemas son LTI.

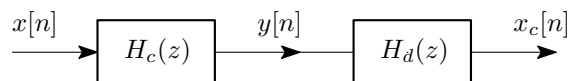


Figura 1:  $H_d(z)$  distorsión de la sala,  $H_c(z)$  ecualizador

En este trabajo se considera que toda la distorsión de la señal es debida a la sala o, si se prefiere, que la función de transferencia asociada a la sala  $H_d(z)$  incluye cualquier otro tipo de distorsión indeseada. Esta función no suele estar disponible en la vida real, pero existen técnicas de identificación que permiten estimar la respuesta en frecuencia de la sala y de ella extrapolar una función de transferencia  $H_d(z)$ .

En el caso de una cadena de audio no se dispone de un sistema de cálculo para implementar la función de compensación ideal. Los equipos ecualizadores intentan aproximar el módulo de su función de transferencia de la forma mejor posible. El ecualizador del trabajo está limitado a 5 filtros: 2 filtros tipo repisa (*shelf* o *shelving*) paso bajo y paso alto y 3 filtros pico (*peak*) paso banda. Si ya han leído el artículo de la wikipedia tendrán una idea de cómo se emplean estos filtros; si no lo han leído, háganlo ahora.

En este trabajo, los filtros repisa deben poderse especificar mediante su *tipo* (paso bajo o paso alto), *ganancia*, *frecuencia de corte* (frecuencia de ganancia mitad a la especificada) y *ancho de banda*; los filtros pico deben especificarse con su *frecuencia central*, *ganancia* (a la frecuencia central) y *ancho de banda*. Los valores admitidos de estos parámetros se detallan más adelante. Deberán elegir los parámetros de diseño para aproximar lo mejor posible la función de compensación ideal. Como ocurre en la realidad, la selección de los parámetros del ecualizador no responde a ningún procedimiento matemático o algorítmico sino a una estrategia de prueba y error; aunque la información disponible de la sala permite hacer alguna conjetura.

### Objetivo

El objetivo de este trabajo práctico es el análisis e implementación de un ecualizador paramétrico de audio y su aplicación a la compensación acústica de una determinada sala. En concreto:

- se analizará la función de transferencia  $H_d(z)$  de una sala dada y se determinará la función  $H_c(z)$  que compense perfectamente la amplitud de la transformada de Fourier de cualquier señal  $x[n]$ ,

- se diseñará un ecualizador paramétrico  $H_e(z)$  formado por 2 filtros repisa (*shelf*) uno paso alto  $H_h(z)$  y otro paso bajo  $H_l(z)$  y 3 filtros pico (*peak*) paso banda  $H_{b1}(z)$ ,  $H_{b2}(z)$  y  $H_{b3}(z)$ , todos ellos dispuestos en serie, que aproxime lo más fielmente posible la respuesta en frecuencia del ecualizador perfecto, es decir  $|H_e(\omega)| \approx |H_c(\omega)|$
- se aplicará el ecualizador paramétrico para ecualizar la sala  $H_{eq}(z) = H_e(z)H_d(z)$ , y
- se comprobará el correcto funcionamiento del sistema con una señal de prueba.

## Función distorsionadora

La función de transferencia de la sala (función distorsionadora,  $H_d(z)$ ) se debe calcular con la función MATLAB proporcionada en el fichero `room.p` cuya sintaxis es

```
[Z, P, K] = room(u1, u2)
```

con parámetros de entrada `u1` y `u2` cadenas de caracteres con los correos electrónicos de los miembros del grupo y con salidas `Z` y `P` vectores columna de ceros y polos, respectivamente, y `K` la ganancia de la función de transferencia. Si el trabajo es individual use la misma cadena de caracteres para `u1` y `u2`.

La salida de la función puede usarse directamente en la función `zp2tf` de MATLAB. Un ejemplo de uso es el siguiente:

```
[Z, P, K] = room('alumno1@alumnos.upm.es', 'alumno2@alumnos.upm.es');
[B, A] = zp2tf(Z, P, K);
```

La función `room` se proporciona ofuscada: puede usarse pero no puede verse su contenido que, en cualquier caso, es irrelevante. Asegúrese de que la función se descarga; si se abriera el enlace en una página del navegador y copiara su contenido en un fichero la función NO funcionaría.

## Ecualizador

El ecualizador debe implementarse como una cascada de filtros:  $H_e(z) = H_l(z)H_{b1}(z)H_{b2}(z)H_{b3}(z)H_h(z)$ , cada uno de ellos de orden 2. Existen multitud de fuentes que describen cómo calcular los coeficientes de cada uno de los filtros; pueden usar, por ejemplo, la siguiente: [Audio EQ Cookbook](#). Nótese que las diversas fuentes pueden indicar ligeras diferencias en los coeficientes que dan como resultado filtros ligeramente distintos. Los valores posibles de los parámetros de diseño de cada uno de los filtros son:

- frecuencias (de corte o centrales): perteneciente a la serie de 1/3 de octava de la norma ISO 266: 16, 20, 25, 31.5, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000, 6300, 8000, 10000, 12500, 16000 y 20000, todas en Hz.
- ganancia: en el rango  $[-15, +15]$  dB.
- ancho de banda: en el rango  $[0.1, 10]$  octavas.

La frecuencia de trabajo del ecualizador debe ser de 48 kHz.

El diseño del ecualizador consiste en amoldar lo mejor posible el módulo de su respuesta en frecuencia  $|H_e(\omega)|$  al módulo de la respuesta en frecuencia del compensador ideal  $|H_c(\omega)|$  calculado previamente. Para procesar una señal de entrada puede usarse la función `filter` de MATLAB; no es necesario implementar el código del filtrado.

## Señal de prueba

Como señal de prueba se usará la señal conocida como *chirp* consistente en un coseno de frecuencia variable que barre un intervalo de frecuencias en un determinado tiempo. Para simular la respuesta auditiva el barrido será logarítmico en el el rango de frecuencias de audio  $[20 \text{ Hz}, 20 \text{ kHz}]$ . Una duración de 10 segundos es razonable. Para generar la señal use los siguientes comandos MATLAB:

```
fs = 48e3;      % frecuencia de muestreo
f0 = 20;        % frecuencia inicial
f1 = 20e3;      % frecuencia final
t1 = 10;        % tiempo final
```

```
t = 0:1/fs:t1;% vector de tiempos  
x = chirp(t, f0, t1, f1, 'logarithmic');
```

Puede escuchar esta señal con:

```
soundsc(x, fs);
```

## Restricciones

- el código sólo puede usar las funciones MATLAB básicas y las contenidas en la caja de herramientas de procesamiento de señales (*Signal Processing Toolbox*); es decir, aquellas funciones que se han usado en las prácticas de laboratorio de la asignatura. En particular **no** se puede usar ninguna función de la caja de herramientas de sistemas de procesamiento de señales (*DSP System Toolbox*). En caso de duda, asegúrese en el navegador de ayuda de MATLAB que la función está entre las permitidas, aunque pueda existir una función con el mismo nombre en otras cajas de herramientas.

## Recomendaciones

- el oído humano responde a las frecuencias y las intensidades de forma aproximadamente logarítmica; por este motivo las representaciones de espectros de audio suelen hacerse en decibelios (amplitud) y con el eje de frecuencias logarítmico; para este tipo de representación pueden usar función MATLAB `semilogx` en lugar de `plot`.
- el código se escribe, se depura y se corrige mucho más fácilmente cuando está formado por módulos o secciones. Se recomienda dividir el programa (*script*) en secciones separadas por `%%` y/o usar funciones auxiliares.

## Criterios de evaluación

### Generalidades

- Cada criterio de evaluación se valora con la escala: 0 - mal, 1 - regular, 2 - bien, 3 - excelente.
- La nota del trabajo se calculará como la suma de las notas asignadas a todos los criterios. La nota resultante se ajustará linealmente a los 2 puntos de la nota de la asignatura.

### Criterios

#### Memoria

- M1. *estructura del documento*: el documento está bien estructurado en secciones y contiene una introducción, una descripción y análisis del problema, una descripción de la solución adoptada y de los resultados obtenidos.
- M2. *uso de figuras y tablas*: el uso de figuras y tablas es adecuado para facilitar la comprensión del texto o para ejemplificar alguna cuestión del mismo y no se incluyen como mero relleno.
- M3. *uso del lenguaje*: la redacción es correcta, sin faltas de ortografía ni errores gramaticales y usando el vocabulario técnico preciso.

#### Código

- C1. *ejecución correcta*: el código se ejecuta correcta y completamente en un entorno MATLAB versión  $\geq$  2018a sin más cajas de herramientas (*toolboxes*) instaladas que la de procesamiento de señales (*Signal Processing Toolbox*) asegurándose de que no exista ninguna variable definida en el espacio de trabajo (*workspace*).
- C2. *estructura del código*: el código está bien estructurado en secciones y/o funciones y hace un uso adecuado de las funciones MATLAB.
- C3. *uso del lenguaje de programación*: el código está bien construido y comentado en lo que se refiere a constantes, variables, expresiones y estructuras de control.

**Sistemas distorsionador y compensador perfecto**

- DC1. *análisis del sistema distorsionador*: el sistema distorsionador está bien analizado usando las herramientas matemáticas y/o gráficas adecuadas.
- DC2. *cálculo del sistema compensador*: el sistema compensador perfecto está bien calculado y se describe correctamente su aplicación al problema.

**Filtros compensadores repisa y pico**

- FC1. *cálculo de coeficientes*: los coeficientes de los filtros compensadores están bien calculados de acuerdo con las fórmulas de referencia.
- FC2. *análisis*: los filtros compensadores están bien analizados usando las herramientas matemáticas y/o gráficas adecuadas para comprender su acción y aplicación al problema.

**Ecualizador**

- EQ1. *cálculo de coeficientes*: los filtros del ecualizador están bien calculados de acuerdo con los parámetros de diseño y la respuesta en frecuencia requerida en el problema.
- EQ2. *análisis*: el filtro ecualizador diseñado está bien analizado usando las herramientas matemáticas y/o gráficas adecuadas para mostrar su parecido con el filtro compensador perfecto.
- EQ3. *implementación*: el filtro ecualizador completo está bien implementado de forma que pueda usarse para procesar señales de entrada.

**Señal de prueba**

- SG1. *procesado*: la señal de prueba se procesa correctamente según el esquema de la figura [1](#).