

[Introducción: filtros digitales](#)

[FIR fase mínima vs FIR fase lineal](#)

[Fase mínima, exceso de fase](#)

[Etapas de ecualización en FIRtro](#)

[Ejemplo práctico](#)

[La caja y su ubicación](#)

[Confección de los filtros de XOVER y EQ de cada vía](#)

[Medición de la FR anecoica de los altavoces](#)

[La importancia de la medida de la FR de altavoz](#)

[Ejemplo de medición con ARTA](#)

[Woofer](#)

[wo_ff.pir](#)

[wo_nf.pir](#)

[Tweeter](#)

[La polaridad](#)

[Posibles mejoras](#)

[Elección de la frecuencia de cruce de vías](#)

[Mejoras](#)

[Filtrado del woofer](#)

[Configuración de los parámetros de filtrado: archivo wo.xof](#)

[Ejecución en DSD](#)

[La sobreecualización](#)

[Filtrado del tweeter](#)

[Configuración de los parámetros de filtrado: archivo tw.xof](#)

[Revisión](#)

[Estimación del resultado](#)

[Filtros lp:](#)

[Filtros mp:](#)

[Confección de los filtros DRC](#)

Introducción: filtros digitales

El diseñador de altavoces dispone de poderosas herramientas si emplea filtros digitales.

Solo los filtros digitales FIR permiten eludir alteraciones de fase si son de fase lineal. Los filtros digitales FIR de fase mínima siguen el comportamiento de los tradicionales en los que los cambios de magnitud conllevan cambios de fase.

Para filtrar una señal con filtros FIR se precisa un convolver, por ejemplo Brutefir. Se requiere un consumo de CPU considerable.

Los filtros digitales IIR emulan filtros analógicos y no se implementan en un convolver. El consumo de CPU es muy bajo.

FIR fase mínima vs FIR fase lineal

Los filtros LP linear phase no introducen cambios o distorsión de fase, eso permite cortes entre vías con pendientes muy altas. Por contra, tienen un retardo intrínseco considerable e ineludible de $\frac{1}{2} \text{ taps_lp} / F_s$, típicamente alcanza un centenar de ms o más si es un FIR largo de alta resolución en graves.

Los filtros MP minimum phase al igual que los filtros tradicionales IIR no tienen retardo intrínseco. Por contra introducen variaciones de fase en las bandas de paso, en un pasabajos por debajo de la F_c , en un pasaaltos por encima de la F_c .

Por tanto no deben mezclarse filtros LP y MP en diferentes vías de una misma caja acústica.

La distorsión de fase de los filtros pasabajos no es importante. Los filtros pasabajos son bastante más benignos que los pasaaltos, producen un GD bastante constante (especialmente los Bessel) dentro de la banda. No son un problema, si ese GD se tiene en cuenta.

Respecto del retado intrínseco a LP, en un sistema de filtrado activo basado en convolución de FIRs como FIRtro, podemos disponer de un juego de filtros MP equivalente al juego LP para poder eludir el alto retardo de los filtros de LP que puede ser molesta con material audiovisual, a cambio de renunciar a las prestaciones del filtrado LP.

Normalmente generaremos parejas de filtros lp con sus equivalentes mp que podremos conmutar al vuelo comodamente con FIRtro.

Fase mínima, exceso de fase

Solo los filtros de cruce de 1er orden y los de fase lineal producen una combinación en la zona de cruce sin exceso de fase.

En teoría en el solape acústico entre dos vías usando Linkwitz-Riley se compensan las variaciones de fase y magnitud, pero en la práctica es difícil de conseguir.

Al tener que usar diferentes altavoces para reproducir toda la banda audible, ocurren fenómenos de exceso de fase por haber más de una fuente radiando en cierta banda de frecuencias. Sucede también con la influencia de la sala en medidas no anecoicas, y también con la difracción de los

bordes del baffle, es decir siempre que ‘escuchemos’ mas de una fuente radiando la misma banda de frecuencias.

Para poder diseñar el filtrado óptimo, debemos conseguir unas medidas de la respuesta en frecuencia del altavoz que no tengan las componentes de exceso de fase comentadas, ya que las zonas de la respuesta en frecuencia que contienen exceso de fase no son ecualizables (no son reversibles).

Un altavoz en una caja dentro de la banda óptima de trabajo tiene comportamiento de fase mínima: las variaciones de fase se corresponden con las variaciones de magnitud. En la práctica hay que contar con fenómenos como el break-up del cono, o como la difracción en los bordes que no son de fase mínima.

En general, si aplicamos correcciones MP para dejar la magnitud plana, la fase quedará corregida solidariamente.

Etapas de ecualización en FIRtro

En FIRtro se aplica EQ en tres etapas de convolución en serie:

- Etapa 1: EQ general: Room Curves, Loudness, Tonos
- Etapa 2: DRC (digital room correction)
- Etapa 3: XOVER + EQ de cada vía

Para la etapa de EQ general no se precisa una aportación de filtros confeccionados por el usuario. Las curvas se calculan internamente en Brutefir.

Así pues, el usuario deberá confeccionar los filtros FIR de cada vía (comunes para ambas cajas) y opcionalmente un filtros FIR DRC para cada canal.

Ejemplo práctico

La caja y su ubicación

En este ejemplo práctico trabajaremos con una caja cerrada de poca profundidad (unos 10cm) y de baffle ancho (60 x 80 cm), montada mural en una pared de la sala. Por tanto el efecto BS ‘baffle step’ es mínimo y no lo consideramos en esta práctica.

Los altavoces consisten en un sistema coaxial SEAS PRESTIGE H1333 con un woofer de 5” que sirve de WG para el tweeter.

Confección de los filtros de XOVER y EQ de cada vía

Medición de la FR anecoica de los altavoces

El primer paso consiste en obtener la respuesta en frecuencia anecoica de los altavoces montados en la caja acústica.

La importancia de la medida de la FR de altavoz

La correcta medida de la FR (respuesta en frecuencia) del altavoz es de suma importancia para la validez del filtro calculado a partir de dicha FR.

Un altavoz en una caja dentro de la banda óptima de trabajo tiene comportamiento de fase mínima: las variaciones de fase se corresponden con las variaciones de magnitud. La naturaleza de fase mínima de estas irregularidades garantiza la viabilidad de su ecualización.

En la práctica hay que contar con diversos fenómenos como break-up en el cono, la difracción por los bordes, posible sobreexcursión, etc que no son de fase mínima.

Con mediciones complementarias como las curvas de impedancia o de distorsión se pueden descubrir irregularidades que pueden pasar desapercibidas en medidas FR derivadas de la respuesta a impulso.

Ejemplo de medición con ARTA

Existen diversas herramientas para estimar la FR de un altavoz en condiciones típicamente no anecoicas.

En este ejemplo práctico elegimos **ARTA** <http://www.artalabs.hr/>

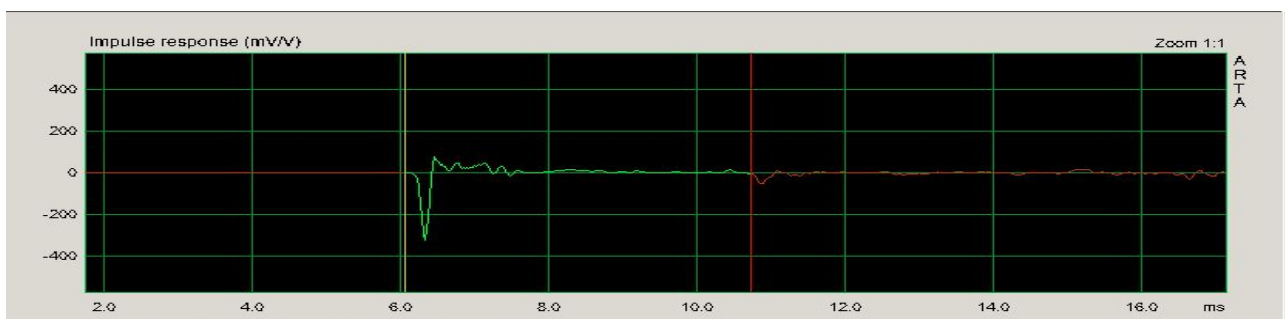
<http://www.artalabs.hr/AppNotes/ARTA%20Handbook%20Version%202.4%20English.pdf>

En esta práctica, haremos una medida para cada vía con el micro en el eje de escucha previsto.

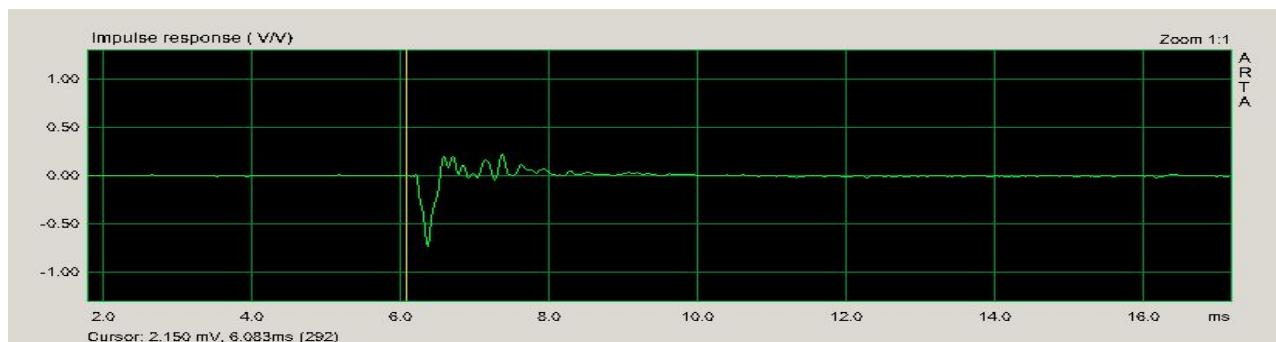
Woofers

Como la medida far field (~1m) solo es aprovechable hasta la aparición de la primera reflexión causada por la sala, la FR calculada carece de valores fiables en graves. Entonces completaremos la estimación de FR gracias a una medida near field (micro pegado al dustcap).

wo_ff.pir



wo_nf.pir



Para hacer la composición:

Se abre el archivo *wo_ff.pir* que se ha medido en far field, se estima la FR eludiendo la primera reflexión con el marker rojo. Se aplica un suavizado razonable por ej 1/9 oct (es lo que se ecualizará por inversión) y la guardamos en una overlay.

Se abre el *wo_nf.pir* medido en near field y se estima la FR sin necesidad de recortar la cola del impulso con el marker rojo ya que las reflexiones interferentes tienen un nivel relativo despreciable.

IMPORTANTE: antes de darle al botón [Smoothed FR] para estimar las FR, se coloca el cursor amarillo en la zona plana de impulso justo antes de que empiece a subir. Hay técnicas más precisas para alinear la fase de ambas medidas que se explican en la pág 181 del [Handbook de ARTA](#)

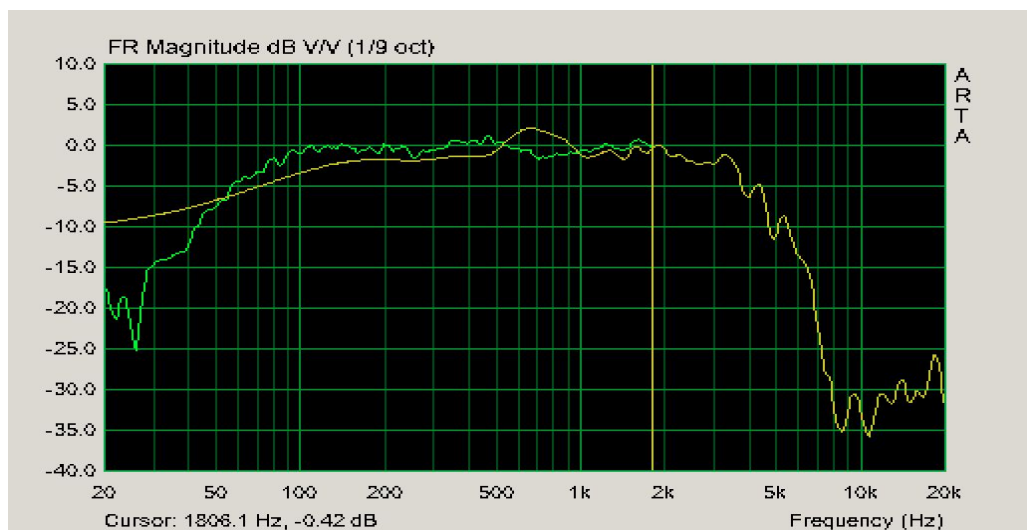
Se decide el punto adecuado para unir las curvas, en este caso se ha elegido 1086 Hz. Para que sean coincidentes se deberá escalar -10.9 dB (a ojo) la curva nerafiled que tenemos cargada (verde). La teoría es más complicada, esta es una aproximación práctica.

En realidad la medida near field es válida hasta cierta frecuencia, ver más detalles en la docu de ARTA http://www.artalabs.hr/AppNotes/AP4_FreeField-Rev03eng.pdf

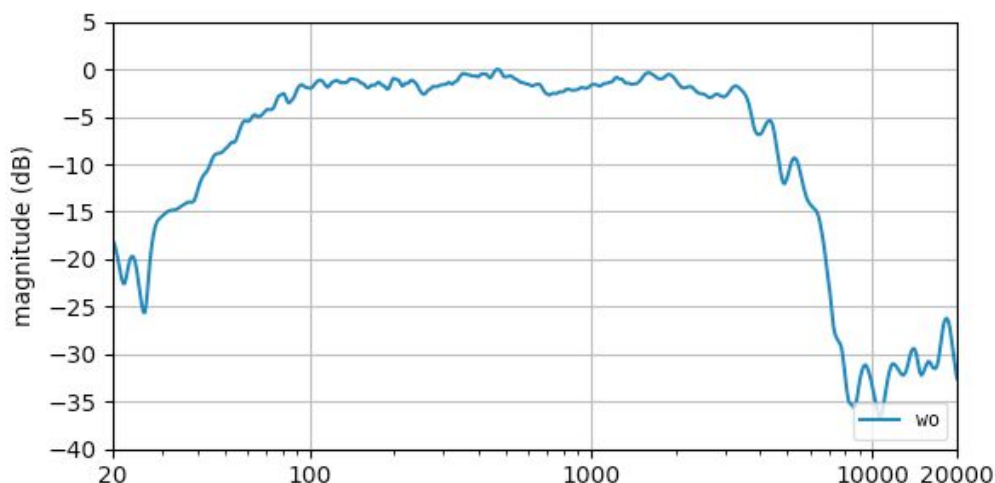
Por ejemplo: a driver of diameter approximately 6.4cm will have a usable nearfield response up to about 900Hz (<http://www.artalabs.hr/AppNotes/ARTA%20Handbook%20Version%202.4%20English.pdf>)

En este momento podríamos considerar además las pérdidas en graves por BS baffle step, pero en este ejemplo no hace falta.

Ya podemos ejecutar la unión de los dos tramos de curvas. Se coloca el cursor en punto de unión elegido (1806 Hz) y se ordena **Edit->Merge overlay above cursor** para obtener la curva compuesta, que sería la verde por debajo del cursor y la amarilla por arriba.



Las exportamos en formato de texto con el nombre de archivo **wo.frd**. Podemos verificar que la curva obtenida está bien compuesta con un visor de archivos .frd:

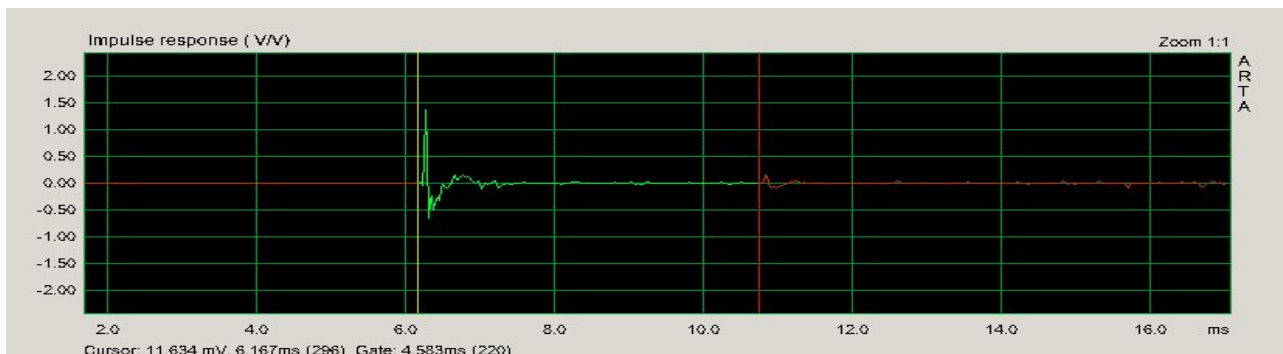


Tweeter

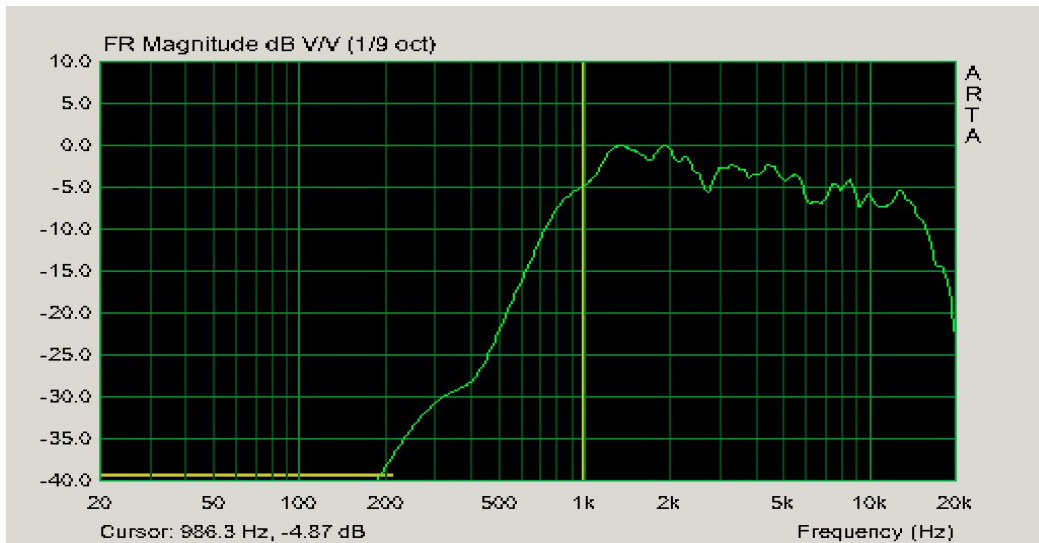
Se habrá medido en far field con el micro en el mismo lugar que medimos al woofer al ser un sistema coaxial. En el tweeter podemos ver la primera reflexión mejor definida que en el impulso del woofer, aparecerá con el mismo retardo ya que es causada por las paredes, suelo o techo, y los dos altavoces son coincidentes.

(!) IMPORTANTE: no conviene excitar un tweeter con frecuencias inferiores a las recomendadas, para esto podemos usar el ajuste *[Pink cutoff]* disponible en la ventana de medidas *[Periodic Noise]* de ARTA.

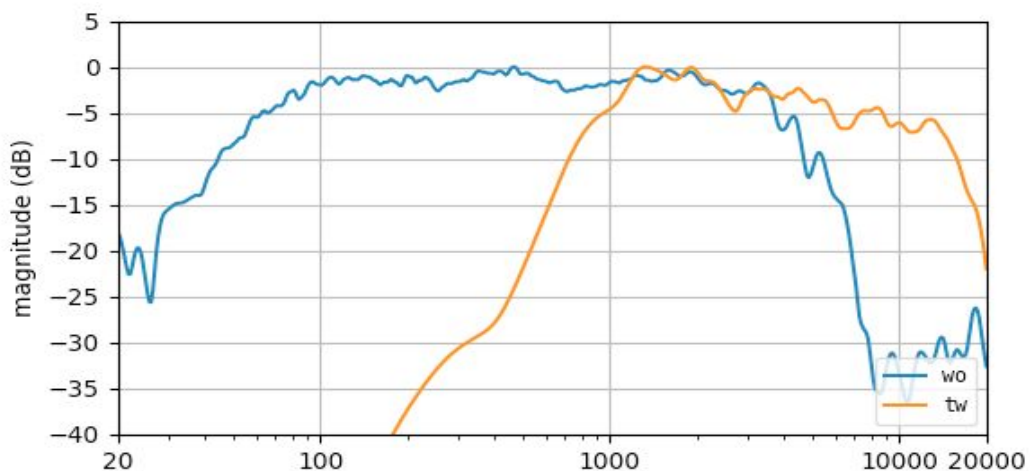
Podemos tomar unos 4.5 ms limpios de reflexiones para considerar que es una medida semianecoica. Esto no es problema para calcular una buena FR en las frecuencias de medios y agudos.



Se estima la FR y se suaviza al gusto, en este caso prefiero $\frac{1}{9}$ oct.



Se exporta en modo texto **tw.frd**. Veamos las dos curvas, las hemos nivelado en un visor de archivos .frd:



Parece que la curva de respuesta del altavoz sin ecualizar responde al nombre de la serie y al prestigio de la marca ;-)

En este punto ya disponemos de las respuestas **wo.frd** y **tw.frd** (*) con las que podremos confeccionar los FIR de xover con nuestra herramienta favorita, en este caso elegimos **DSD :-)**

* NOTA: debemos editar manualmente los archivos .frd de ARTA y comentar las líneas de texto informativas con '%' al inicio de dichas líneas, para que los scripts Octave de DSD puedan leer bien los archivos.

La polaridad

La polaridad del impulso del tweeter se ve invertida hay que tenerlo en cuenta para el cruce acústico, quizás sea por el amplificador o el cableado al altavoz.

Posibles mejoras

La curva de FR es la que usaremos para ecualizar cada driver. Podría ser interesante que la curva FR sea el resultado de promediar varias curvas para varios ejes off-axis cercanos al eje de escucha previsto, esto será más sensible en el tweeter ya que en este caso va encajado en una WG.

Elección de la frecuencia de cruce de vías

La elección del punto de cruce depende de las prestaciones de los drivers y de criterios del diseñador:

- El rango de uso recomendado por el fabricante
- La respuesta polar de cada driver en la zona de solape
- etc ...

SEAS H1333 COAXIAL

	Woofers	Tweeter
Nominal Impedance	8 Ohms	6 Ohms
Recommended Frequency Range	30-3000 Hz	2000-25000
Short Term Power Handling *	250 W	220 W
Long Term Power Handling *	80 W	90 W
Characteristic Sensitivity (2.83V, 1m)	87 dB	88.5

En este proyecto sencillo nos limitamos a buscar un punto dentro del solape de rangos de uso de cada driver.

También podemos considerar que, al ser un coaxial, la dispersión del tweeter está controlada por la WG que forma el cono de medios-graves. A falta de hacer un estudio de directividad, parece conveniente que el corte sea en un rango del mid-woofer de la menor dispersión posible para que se aproxime a la poca dispersión que tiene el tweeter por estar en una WG. Además eso viene bien para eludir distorsiones en la banda inferior de trabajo del tweeter.

Vamos por tanto a elegir un XO a 3000Hz, que es límite recomendado por el fabricante del woofer y que se aprecia adecuado en las curvas FR de respuesta de los dos altavoces.

Mejoras

Un estudio más profundo sería ensayar la respuesta polar para ver si es acertado este punto de cruce... El objetivo sería que la respuesta radiada a la sala fuera de eje de escucha no estuviera muy descompensada en la zona del cruce de uso de los drivers.

Filtrado del woofer

Como de ha dicho, **usaremos DSD para confeccionar nuestros filtros**.

En función de las limitaciones físicas eligiremos los valores objetivo, por ejemplo, vamos a extender un poco la respuesta en graves del pequeño woofer de 5". Esto es a costa de sobreecualizar en graves, pero como el uso previsto de esta caja es una escucha a SPLs moderados, nos lo podemos permitir.

Configuración de los parámetros de filtrado: archivo wo.xof

```
FSInputFile = "wo.frd";
GSLExp = 15; % 32K taps
GSFs = 44100;

CFClass = 'mp';

% CORTE SUBSONICO (woofer pequeño 5")
CFLowF = [40];
CFLowType = {'Butterworth'};
CFLowOrder = [3];
CFLowAsMP = true;

% CORTE DE CRUCE
CFHighF = 3000;
CFHighType = 'LinkwitzRiley';
CFHighOrder = 4;

% ECUALIZACION: alcances genericos
TWFlatInterval = 2; % oct despues del xo en que se ecualiza plano
TWTransitionInterval = 2; % oct adicionales para ir dejando de ecualizar

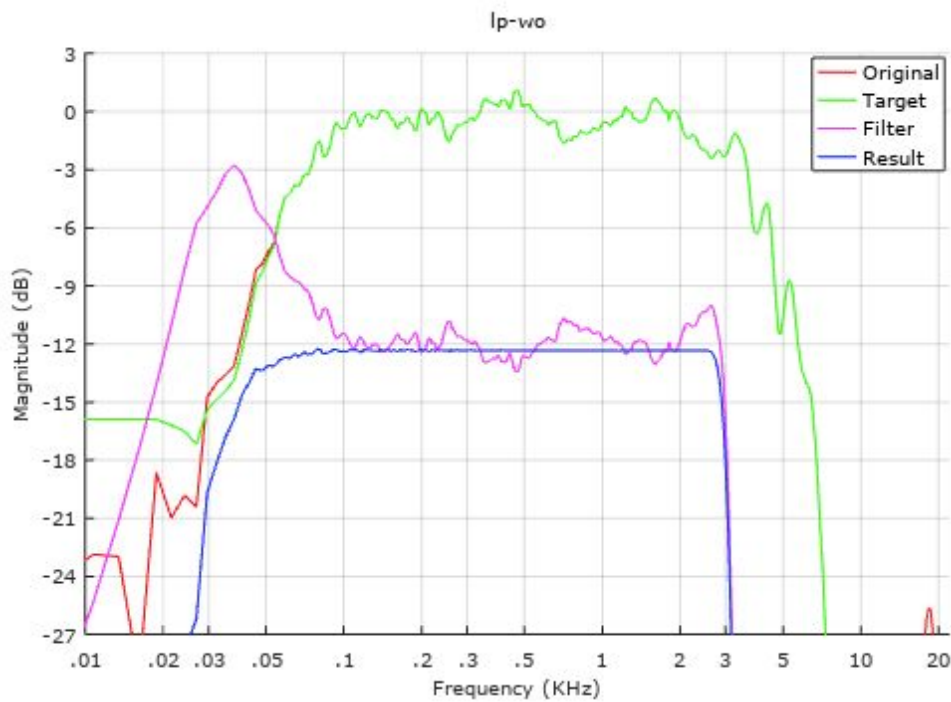
% ECUALIZACION: límites sobre los alcances genericos %
TWLimitLowF1 = 05; % Lím. absoluto de la ecualización (Low)
TWLimitLowF2 = 60; % Lím. absoluto a ecualizar plano (Low)
TWLimitHighF1 = 15000; % Lím. absoluto a ecualizar plano (High)
TWLimitHighF2 = 20000; % Lím. absoluto de la ecualización (High), se
% recomienda menor que la frec. max del .frd
```

Ejecución en DSD

```
octave: > RRxof wo 44100 lp
```

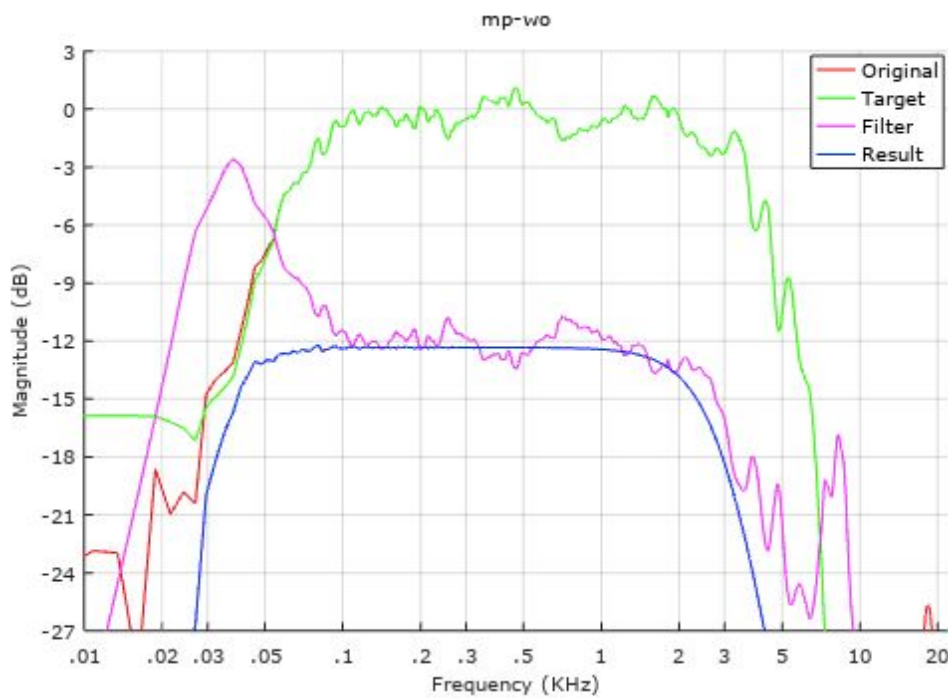
```
RRxof
RR Loudspeaker Crossover and Equalizer designer
(C) 2012 Roberto Ripio
Running from /Users/rafaelsanchez/DSD
```

GSFs = 44100
FSOutPrefix = lp-wo
Calculado en:0.88877 s



Repetimos para mp

octave: > RRxof wo 44100 mp



La sobreecualización

Podemos extender la respuesta en graves del woofer jugando con los parámetros `TWLimitLow` que limitan el target de EQ en graves. Además, para evitar ganancias altísimas en el FIR, se aplica una protección a modo de “subsonic filter”, pero en este caso sin los efectos secundarios de alteración del GD en graves de los filtros tradicionales. Más info en el la documentación de DSD.

Filtrado del tweeter

Configuración de los parámetros de filtrado: archivo `tw.xof`

```
FSInputFile = "tw.frd";
GSLExp = 15; % 32K taps
GSFs = 44100;

CFClass = 'mp';

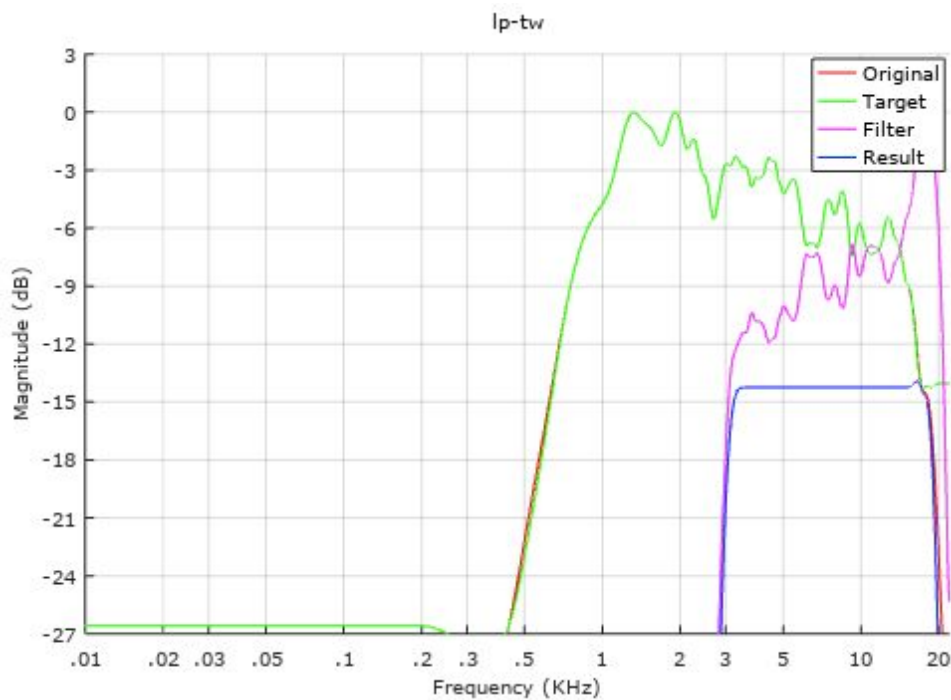
% CORTE DE CRUCE (en cascda con el CFlow del woofer)
CFlowF = [3000, 40];
CFlowType = {'LinkwitzRiley', 'Butterworth'};
CFlowOrder = [4, 3];

% CORTE SUPERSONICO
CFHighF = 20000;
CFHighType = 'LinkwitzRiley';
CFHighOrder = 4;

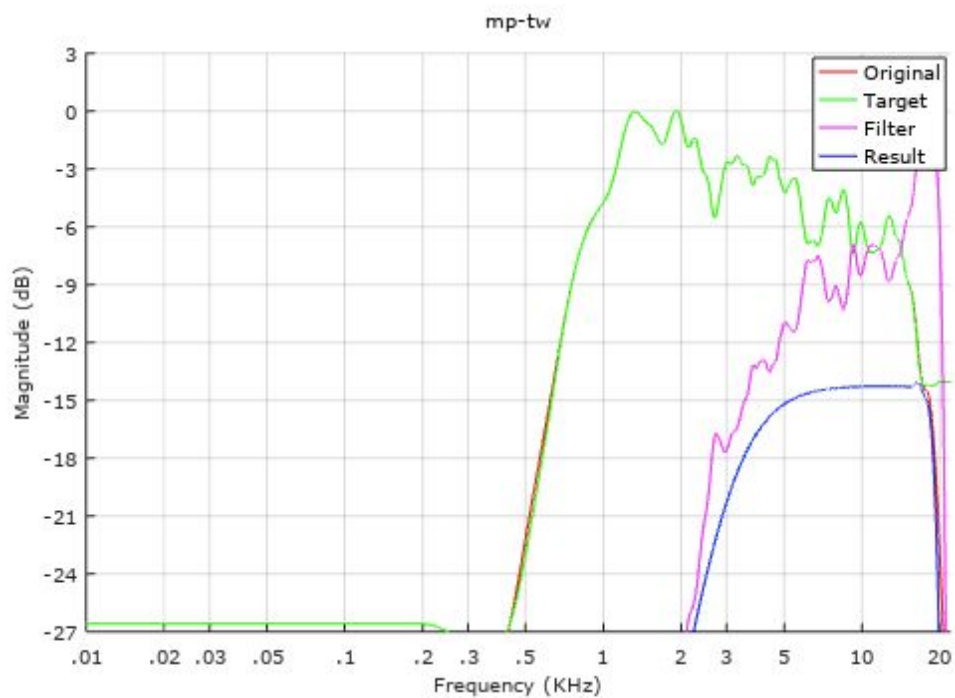
% ECUALIZACION: alcances genericos
TWFlatInterval = 2; % oct despues del xo en que se ecualiza plano
TWTransitionInterval = 2; % oct adicionales para ir dejando de ecualizar

% ECUALIZACION: límites sobre los alcances genericos %
TWLimitLowF1 = 10; % Lím. absoluto de la ecualización (Low)
TWLimitLowF2 = 40; % Lím. absoluto a ecualizar plano (Low)
TWLimitHighF1 = 15000; % Lím. absoluto a ecualizar plano (High)
TWLimitHighF2 = 20000; % Lím. absoluto de la ecualización (High), se
% recomienda menor que la frec. max del .frd

octave: > RRxof tw 44100 lp
```



octave: > RRxof tw 44100 mp



Revisión

Se observa una sobreecualización en agudos de dudosa conveniencia que convendría limitar ajustando los parámetros `TWLimitHighxx`.

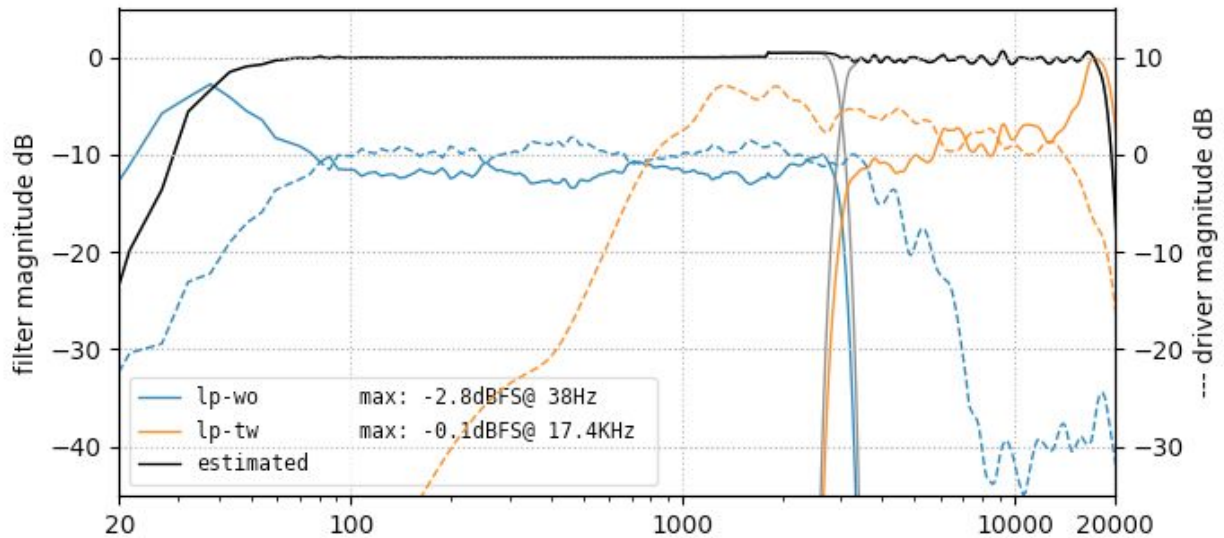
Estimación del resultado

Usamos un visualizador de FIRtros para ver el resultado estimado.

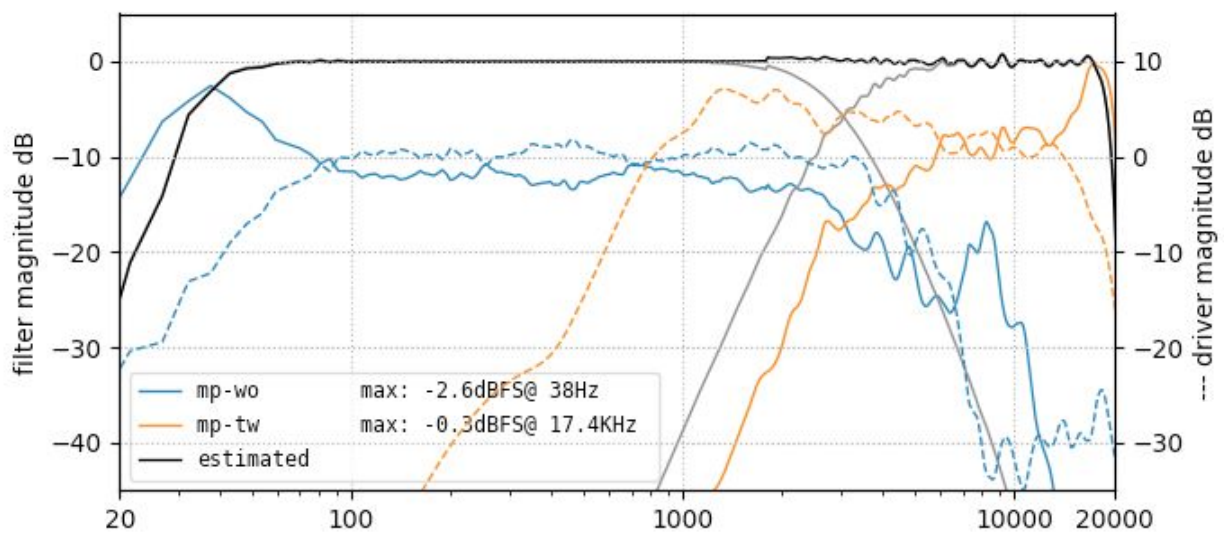
Las líneas sólidas son los FIR generados por DSD, las líneas punteadas son las FR de cada altavoz, las líneas sólidas grises son las respuestas estimadas tras filtrar. La línea sólida negra es la respuesta acústica estimada (*)

* Se asume que el usuario nivelará acústicamente las vías y comprobará la puesta en fase (polaridad) entre los drivers.

Filtros lp:



Filtros mp:



El visor de FIRtros `fir_viewer.py` está disponible en el paquete FIRtro.

Confección de los filtros DRC

TO DO

