

### Respuesta de campo libre del altavoz

Este apunte de aplicación describe un método simple para estimar la respuesta de campo libre del altavoz a partir de una serie de mediciones realizadas en salas reverberantes normales.

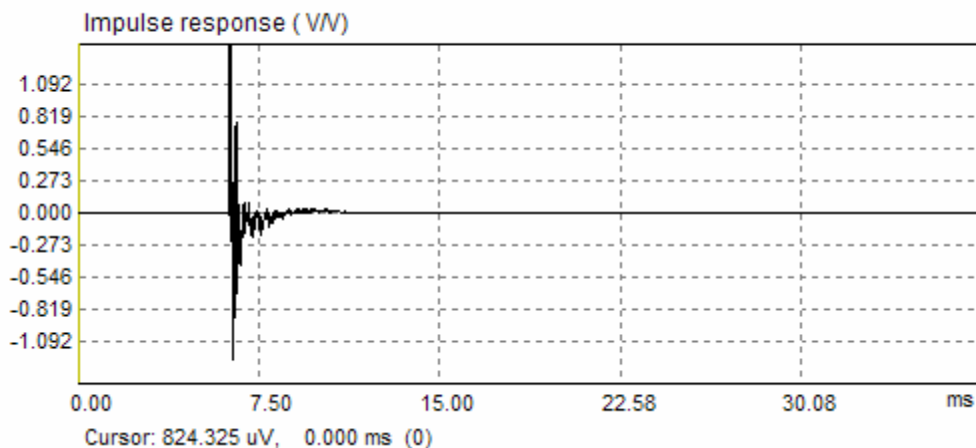
#### Contenidos

1. Campo cercano, campo lejano, campo libre y campo reverberante.....	1
2. Transición de campo cercano a campo lejano en media esfera.....	3
3. Estimación de la respuesta de frecuencia del altavoz en campo libre, de media esfera a espacio completo.....	5
4. Estimación de la respuesta en campo abierto en frecuencias bajas.....	7
5. Estimación de la respuesta en campo abierto en banda ancha .....	9
6. Debate .....	11
7. Bibliografía .....	12

### 1. Campo cercano, campo lejano, campo libre y campo reverberante

Cuando medimos la respuesta del altavoz normalmente nos referimos a las condiciones de medición como: *Campo cercano, campo lejano, campo libre o campo reverberante* ¿Qué quiere decir esto?

Para obtener una respuesta hemos de echar un vistazo a algunas mediciones reales de impulso y respuesta de frecuencia.



a)

**Ilustración 1.** Respuesta de impulso de una caja acústica pequeña, medida en una sala de estar, a unos mm del centro de la membrana del altavoz.

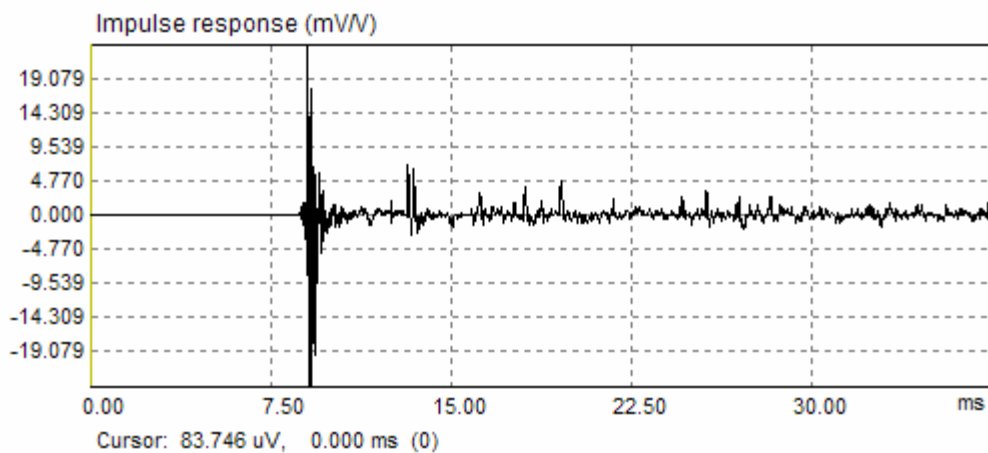


## APUNTES DE APLICACIÓN - ARTA

### Nº 4: Respuesta de campo libre del altavoz

La Ilustración 1 muestra la respuesta de impulso en el **campo cercano** para ese altavoz. Se obtuvo colocando el micrófono cerca del centro de la membrana del altavoz. Vemos un fuerte impulso seguido del deterioro de las resonancias del altavoz que duran unos milisegundos.

La Ilustración 2 muestra la respuesta de impulso en el **campo lejano** para ese altavoz. Se obtiene colocando el micrófono a unos 96 cm del centro de la membrana del altavoz. Vemos un fuerte impulso seguido del deterioro de las resonancias del altavoz. Después de un par de milisegundos le siguen un montón de impulsos de menor tamaño—también con sus propios patrones de deterioro. Estos impulsos provienen del reflejo sobre la pared, y se llaman **reflexiones tempranas**. El primer impulso se denomina la **onda directa**. En la cola de la respuesta de impulso hay un suave patrón de deterioro sin fuertes impulsos. Esto representa la respuesta del **campo de reverberación** difuso en el que un montón de ondas chocan contra el micrófono desde diferentes direcciones.

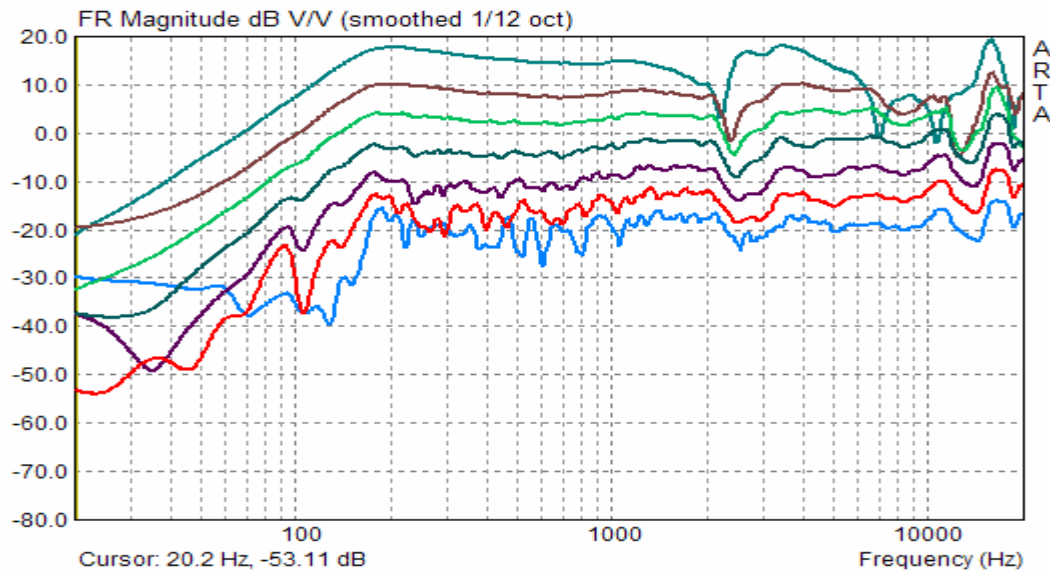


b)

**Ilustración 2.** Respuesta de impulso de una caja acústica pequeña, medida en una sala de estar, a 96 cm frente a la membrana del altavoz.

Si hacemos las mediciones en el espacio abierto o en una cámara anecóica, a una distancia suficiente del altavoz, se dice que las mediciones se hacen en el **campo libre**.

Podremos obtener mediciones de una respuesta de impulso en **campo cuasi-libre**, es decir medidas en una sala de estar normal, si eliminamos la cola de la respuesta de impulso que comienza con la primera reflexión temprana. El resto de la respuesta de impulso, lo que queda para el análisis, es lo que llamamos **respuesta de impulso limitada**.



**Ilustración 3.** Respuesta de frecuencia de una caja acústica pequeña, medida en una sala de estar. Las distancias de medición son: 0 cm, 3 cm, 6 cm, 12 cm, 24 cm, 48 cm, 96 cm (desde la curva superior a la inferior).

La Ilustración 3 muestra una respuesta de frecuencia medida en una sala de estar normal a las siguientes distancias del altavoz: 0 cm, 3 cm, 6 cm, 12 cm, 24 cm, 48 cm y 96 cm. La respuesta de frecuencia en el campo cercano tiene el patrón más suave, pero con varias muescas en las altas frecuencias. En las distancias de medición más grandes, la respuesta de frecuencia tiene un montón de ondulaciones. Es totalmente normal que las ondulaciones en un campo reverberante sean mayores de  $\pm 5\text{dB}$

## 2. Transición de campo cercano a campo lejano en media esfera

Para comprender por qué hay muescas en la respuesta de campo cercano echaremos un vistazo al análisis teórico de la respuesta de un altavoz montado en una caja infinita y que irradia a la media esfera (ángulo de espacio de  $2\pi$ )

La Ilustración 4 muestra la presión de sonido normalizada a la distancia  $r$  sobre el eje de una membrana circular, con una velocidad  $v$ . Se obtiene al resolver la integral de Rayleigh para la radiación de un disco circular:

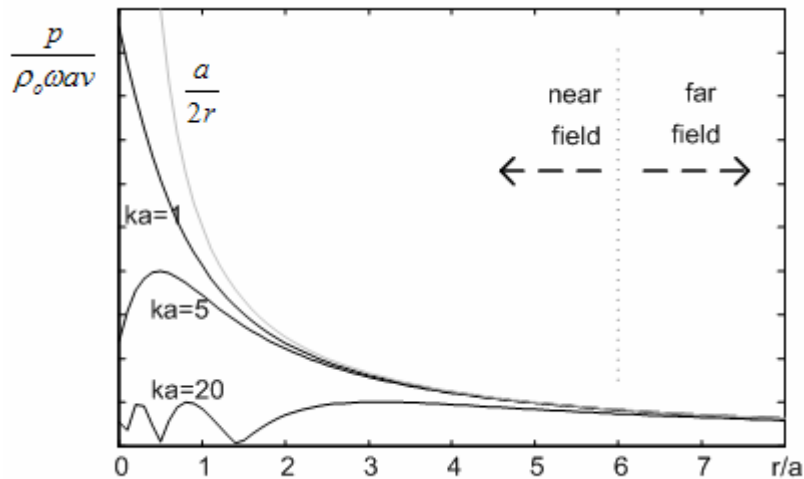
$$|p(r)| = 2\rho_0cv \sin\left(ka \frac{(r^2/a^2 + 1)^{1/2} - r/a}{2}\right)$$

$a$  = radio de la membrana,  $k$  = constante de onda =  $\omega/c = 2\pi/\lambda$ ,  $\omega$  = frecuencia =  $2\pi f$ ,  
 $c$  = velocidad del sonido,  $\rho_0$  = densidad del aire

Observamos que en la región en la que la distancia  $r$  es 6 veces menor que el radio de la membrana la presión del sonido depende enormemente del factor direccional  $ka = 2\pi a/\lambda$ . Para algunos valores de  $ka$  y  $r$  la presión sonora puede ser cero. Para las distancias en las que  $r > 6a$ , la presión sonora es

independiente del factor direccional, y obtenemos la respuesta en el campo lejano en media esfera ( $p_{2\pi}$ ):

$$|p_{2\pi}(r)| = \frac{\rho_0 \omega a^2 \pi v}{2\pi r}, \text{ Respuesta de campo lejano en media esfera } (r > 6a)$$



**Ilustración 4.** Respuesta normalizada del altavoz a diferentes frecuencias ( $ka = 1, 5, 10$ ) en la región de transición del campo cercano al campo lejano.

En la cercanía de la membrana ( $r \ll a$ ) tenemos una respuesta de campo cercano  $p_N$ :

$$|p_N| = \rho_0 \omega a v \frac{\sin(ka/2)}{ka/2} \text{ (respuesta de campo cercano en eje)}$$

Una respuesta de campo cercano tendrá valles en frecuencias en las que  $ka/2 = \pi/2, 3\pi/2, \dots$  es decir, que  $f_n = (2n+1) c/4a$ .

En nuestro ejemplo, un altavoz con un radio de membrana  $a=3,2$  cm debería tener valles en la respuesta de frecuencia a 2687 Hz, 8062 Hz y 13437 Hz, casi como lo que aparece en la Ilustración 2.

La relación de presiones acústicas a la distancia  $r$  en el campo lejano con las presiones acústicas en el campo cercano es:

$$\left| \frac{p_{2\pi}(r)}{p_N} \right| = \frac{a}{2r} \frac{ka/2}{\sin(ka/2)}$$

En las frecuencias bajas, en las que  $ka \ll 1$ ,  $\sin(ka/2) \cong ka/2$ , podremos usar una ecuación simplificada:

$$\left| \frac{p_{2\pi}(r)}{p_{NF}} \right| = \frac{a}{2r}$$

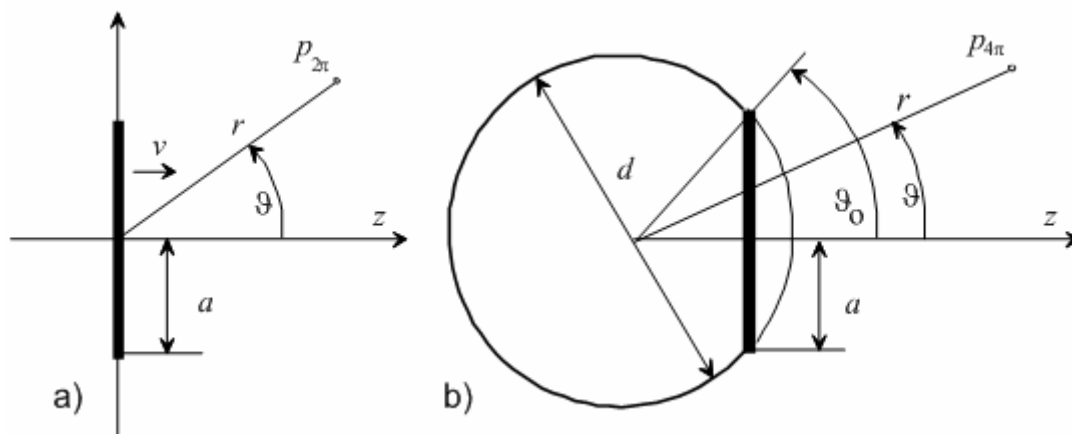
Esta expresión es importante puesto que es la que se usa normalmente para la transición de la respuesta medida en campo cercano a la respuesta en campo lejano en media esfera. Esta expresión da un error muy pequeño en la gama de frecuencias inferior a 200 Hz para casi cualquier tamaño de membranas de altavoz reales.

El procedimiento de medición es el siguiente:

1. Coloque el micrófono de medición a unos milímetros frente al centro de la membrana del altavoz / tapa guardapolvos y mida la respuesta de impulso del campo cercano.
2. Escale la medición de la respuesta de impulso con el factor  $a/2r$  para obtener la respuesta de campo lejano en media esfera a la distancia  $r$ . (Ventana de Respuesta de Impulso de ARTA – comando de menú 'Edit > Scale' [Editar > Escalar])
3. Guarde la respuesta de impulso con el nombre apropiado.

### 3. Estimación de la respuesta de frecuencia del altavoz en campo libre, de media esfera a espacio completo

Un caso más real es aquel en el que el altavoz está montado en una caja pequeña e irradia al espacio completo ( $4\pi$ ). Para saber más sobre como la caja acústica de pequeño tamaño difracta las ondas acústicas, compararemos la respuesta de un altavoz montado en una caja infinita ( $p_{2\pi}$ ) con la respuesta de un altavoz montado en una caja esférica ( $p_{4\pi}$ ).



**Ilustración 5.** a) Altavoz con radio  $a$ , montado en una caja infinita  
b) Altavoz montado en una caja esférica de diámetro  $d$ .

Una solución analítica conocida para la radiación de una caja acústica esférica nos da la relación entre la respuesta en el campo libre ( $p_{2\pi}$ ) y la respuesta en la media esfera ( $p_{4\pi}$ ):



# APUNTES DE APLICACIÓN - ARTA

## Nº 4: Respuesta de campo libre del altavoz

$$\frac{P_{4\pi}}{P_{2\pi}} = \frac{e^{-jkd/2}}{\left(\frac{kd}{2} \sin \vartheta_0\right)^2} \sum_{n=0}^{\infty} C_n \frac{e^{j(\delta_n + n\pi/2)}}{B_n(ka)}$$

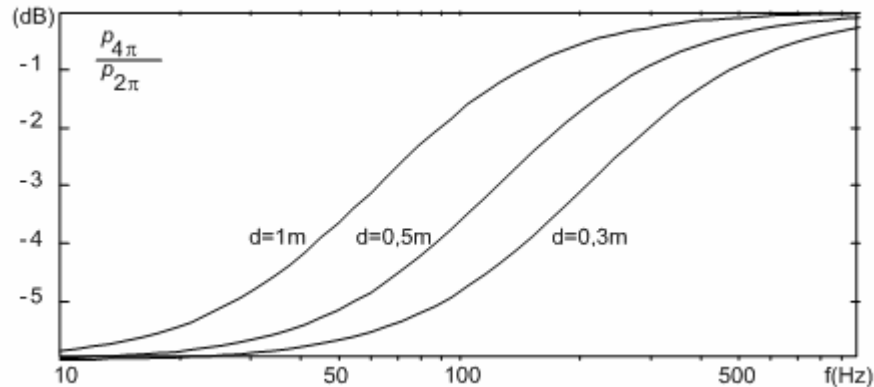
donde  $C_n$  son polinomios de Legendre,  $B_n$  y  $\delta_n$  son la magnitud y la fase de las funciones Bessel esféricas. Esta solución será válida para una radiación en eje ( $\vartheta=0$ ).

La evaluación de esta expresión requiere una gran potencia de computación, así que definimos una solución aproximada. Es de interés práctico el analizar el caso en el que la membrana ocupa entre 1/40 a 1/10 de la superficie esférica (es decir, para los ángulos  $\vartheta_0$  de 5° a 20°). En ese caso la respuesta en eje ( $\vartheta=0$ ) del altavoz plano que está montado sobre una caja esférica, se podrá aproximar, con un error inferior a 0,5 dB, con la expresión:

$$\frac{P_{4\pi}}{P_{2\pi}} = \frac{1 + jf/f_0}{2 + jf/f_0}$$

con  $f_0 = 42.70 / d$  para una caja esférica de un diámetro  $d$  o con  $f_0 = 34.16 / d$  para una caja cuadrada con un ancho  $d$ .

Esta ecuación define un "ecualizador de la etapa de la caja". La Ilustración 6 presenta ejemplos de respuestas.



**Ilustración 6.** Respuesta de frecuencia de un ecualizador de etapa de la caja para tres cajas esféricas con diámetros de 0,3 m, 0,5 m y 1,0 m.

La Ilustración 6 muestra que a frecuencias muy bajas la respuesta en campo libre es la mitad (-6dB) que la respuesta en la media esfera, pero tiende a ser igual en las frecuencias más altas.

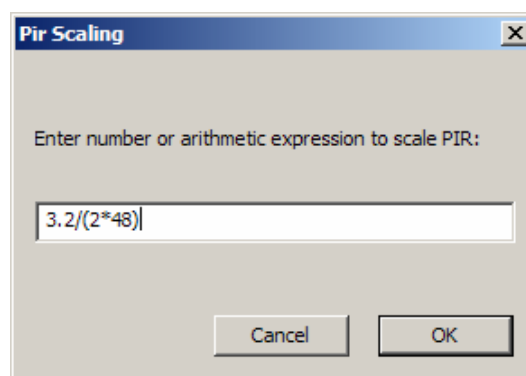
**Nota:** ARTA y STEPS usan la expresión anterior para estimar la difracción en las cajas esféricas o rectangulares. Algunos programas de CAD y de simulación usan un modelo geométrico de alta frecuencia para estimar la difracción de la caja en las frecuencias bajas. Estos modelos pueden producir errores más grandes en las bajas frecuencias que el modelo simple que se presenta aquí.



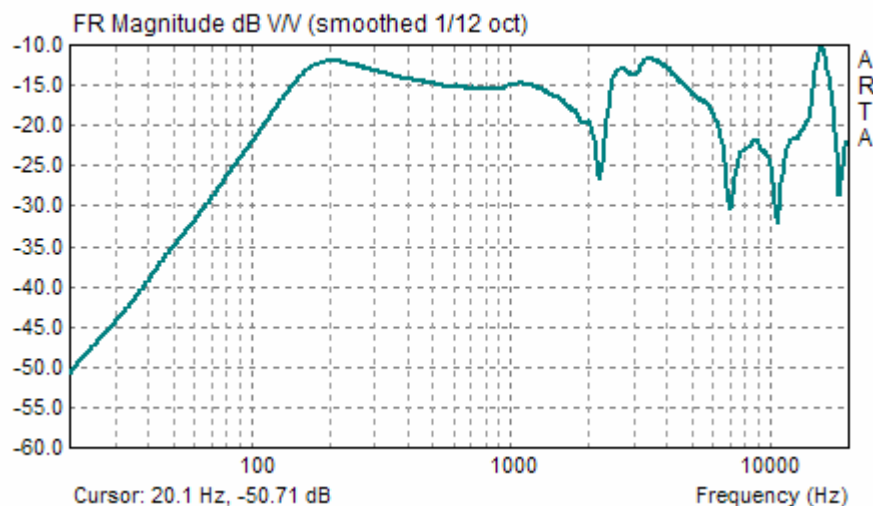
### 4. Estimación de la respuesta en campo abierto en frecuencias bajas

Ahora explicaremos el procedimiento para estimar la respuesta del altavoz en campo abierto y bajas frecuencias:

1. Mida la respuesta en campo cercano y estime la respuesta en media esfera tal como se explicó en la sección anterior, es decir, para nuestro altavoz con radio de 3,2 cm, escalamos una respuesta de campo cercano en media esfera, a una respuesta en media esfera de campo lejano sobre 48 cm, con el comando de menú '**Edit > Scale**' [**Editar > Escalar**] e introduciendo el factor de escala  $a/2r$  en el cuadro de diálogo '**Pir Scaling**' [**Escalado Pir**].



2. Ejecute el comando '**Analysis->Smoothed Frequency response**' [**Análisis > Respuesta de frecuencia suavizada**]. Active el comando '**Overlay > Set as overlay**' [**Superposición > Establecer superposición**] en la ventana de respuesta de frecuencia suavizada. Obtendrá la siguiente ilustración:

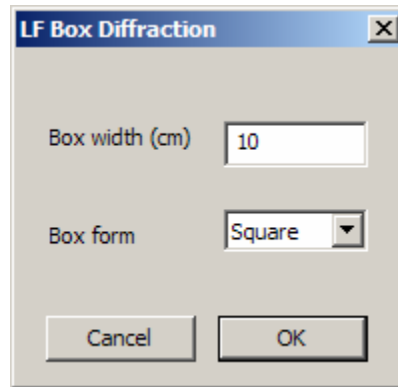


3. Ejecute el comando de menú '**Edit → LF box diffraction**' [**Editar → Difracción de caja en bajas frecuencias**], para obtener el siguiente cuadro de diálogo:

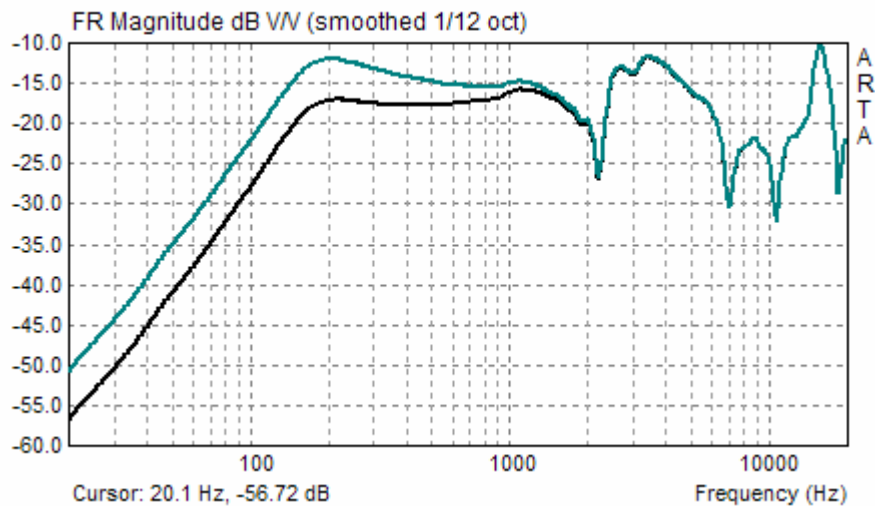


# APUNTES DE APLICACIÓN - ARTA

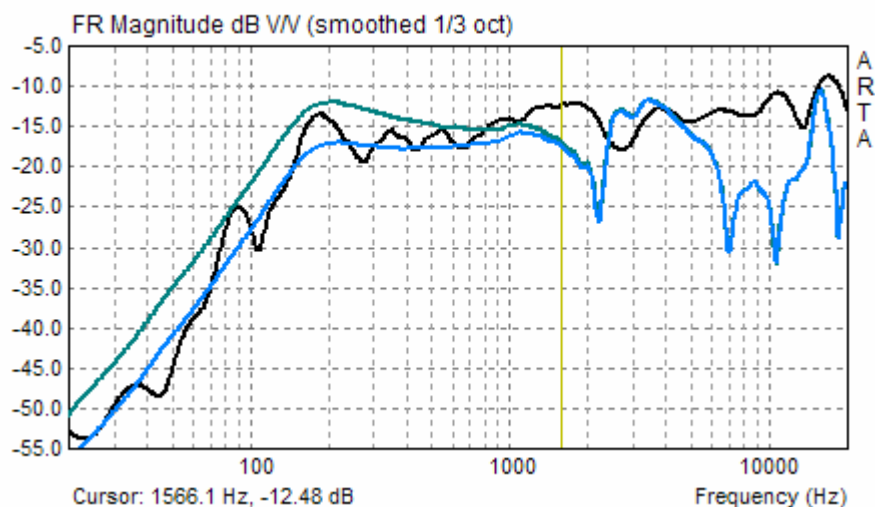
## Nº 4: Respuesta de campo libre del altavoz



Aquí habrá de introducir el ancho y el tipo de caja (esfera o cuadrada). Obtendrá el siguiente gráfico:



4. Guarde esta curva como superposición.
5. Vuelva a la ventana PIR y cargue la respuesta del altavoz que se ha medido a la distancia de 48 cm. Fije el cursor y ejecute el comando '**Analyze->Smoothed Frequency response**' [Análisis > **Respuesta de frecuencia suavizada**]. Finalmente, obtendrá el siguiente gráfico:





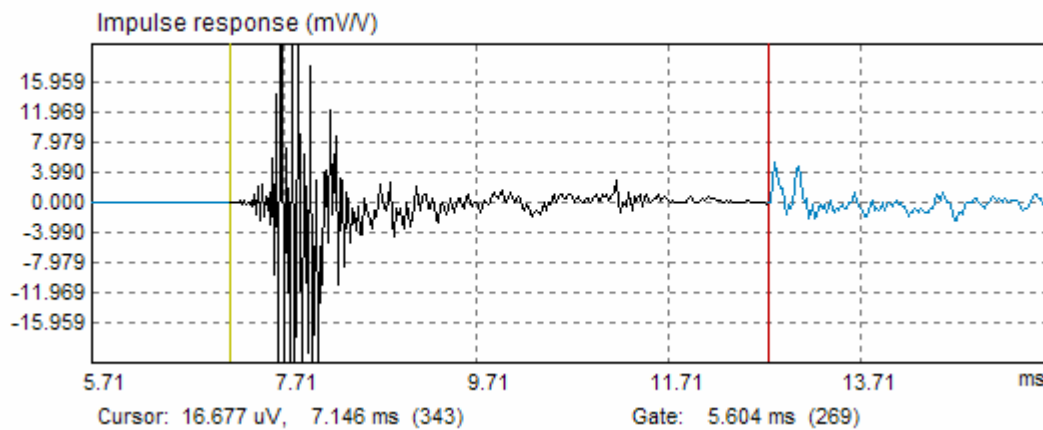


Vemos que la respuesta de frecuencia medida a 48 cm (negra) tiene una ondulación, causada por las resonancias de la sala, pero generalmente está muy cerca de la respuesta en campo libre estimada (azul).

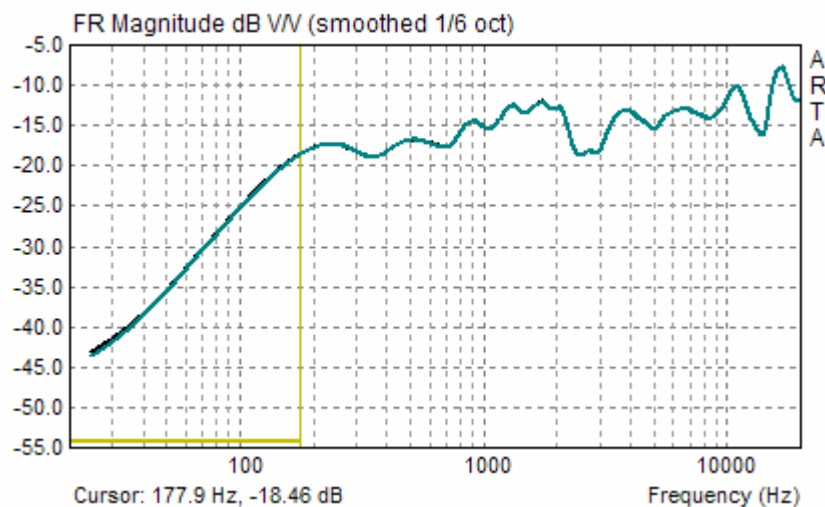
### 5. Estimación de la respuesta en campo abierto en banda ancha

Podremos hacer una buena estimación de la respuesta en campo libre si combinamos la respuesta de campo cercano y baja frecuencia y la respuesta en banda ancha de campo cuasi-libre limitada.

Comenzamos analizando la respuesta de impulso en banda ancha, tal como se indica en la Ilustración 1. Llegamos a la conclusión de que se puede obtener una estimación de la respuesta en campo libre si eliminamos el primer reflejo, que se encuentra a 5,6 ms del inicio de la respuesta de impulso. Hacemos una "limitación" en la ventana PIR de ARTA colocando un marcador de limitación (línea roja) justo antes de la primera reflexión, según se indica en la siguiente ilustración:



Después de ejecutar el comando '**Analysis->Smoothed Frequency response**' [Análisis > **Respuesta de frecuencia suavizada**], obtendremos la siguiente respuesta de frecuencia:



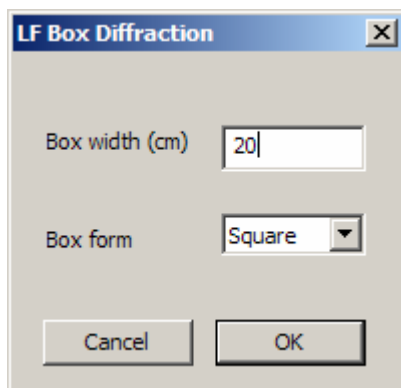
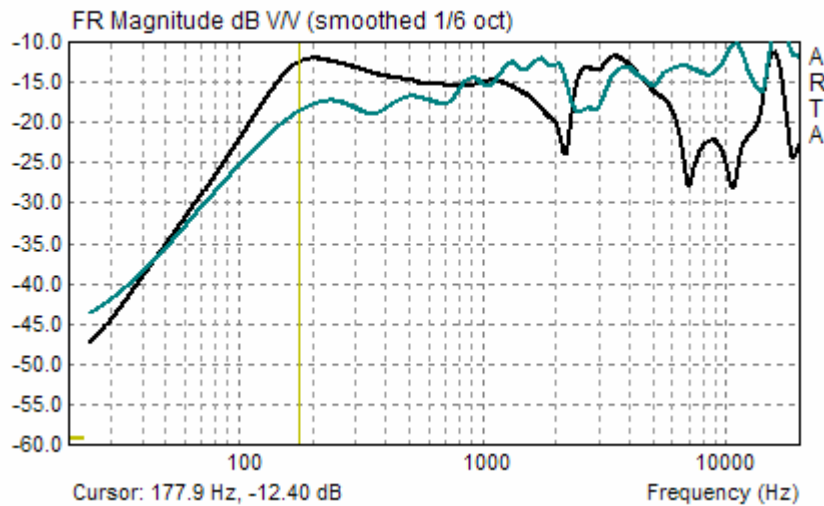


# APUNTES DE APLICACIÓN - ARTA

## Nº 4: Respuesta de campo libre del altavoz

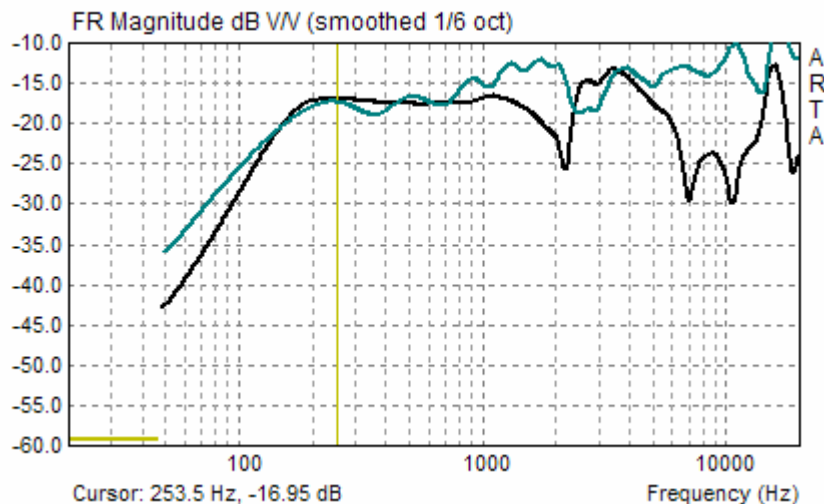
Guardamos esta curva como superposición. El cursor y la línea amarilla en el fondo del gráfico denotan que el requisito de tiempo-ancho de banda se satisface para las frecuencias por encima de 177,9 Hz. (Nota:  $1/\text{limitación} = 1000/5.604 = 178.4$ )

Ahora cargaremos la respuesta en campo cercano, la escalamos con el factor  $a/2r = 3.2 / (2*48)$  y calculamos la respuesta de frecuencia como se ha explicado en la sección anterior. Obtenemos:



Ahora aplicamos la corrección de la difracción LF con el comando 'Edit->LF box diffraction' ['Editar->Difracción de caja en bajas frecuencias'] y el siguiente cuadro de diálogo.

En este diálogo introducimos el ancho de la caja y el tipo de forma de la caja (cuadrada o rectangular). La respuesta corregida y la respuesta limitada están ahora muy relacionadas entre sí.





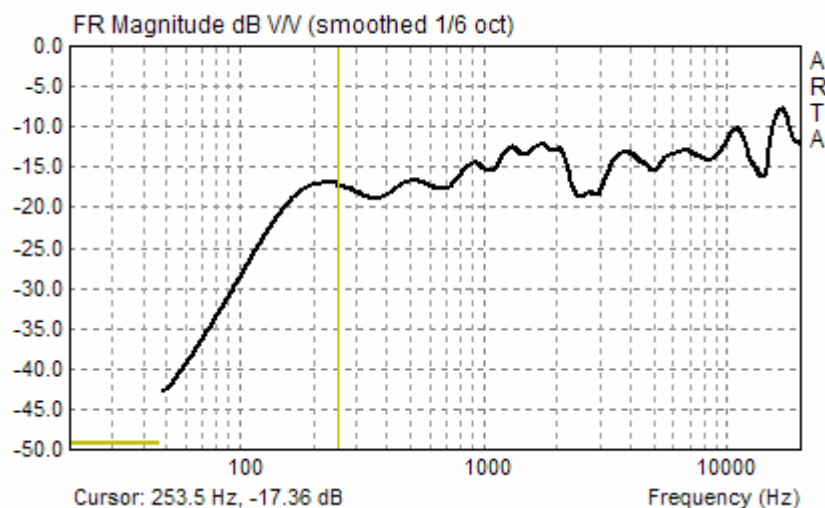
# APUNTES DE APLICACIÓN - ARTA

## Nº 4: Respuesta de campo libre del altavoz

A 235 Hz ambas respuestas tienen el mismo nivel así que elegiremos esta frecuencia como punto de unión de ambas curvas. Ejecutamos ahora dos comandos

- 1) **Edit -> Merge overlay above cursor** [Editar > Fusionar la superposición sobre el cursor]
- 2) **Edit -> Delete all overlay** [Editar > Borrar toda la superposición]

Y obtenemos finalmente la estimación de la respuesta de campo libre:



*Nota: Usualmente las dos curvas no concuerdan muy bien, y suele ser necesario un nuevo escalado de 1-2 dB.*

Podemos guardar los valores de esta curva con el comando **'File->Export ASCII'** [Archivo > Exportar a ASCII].

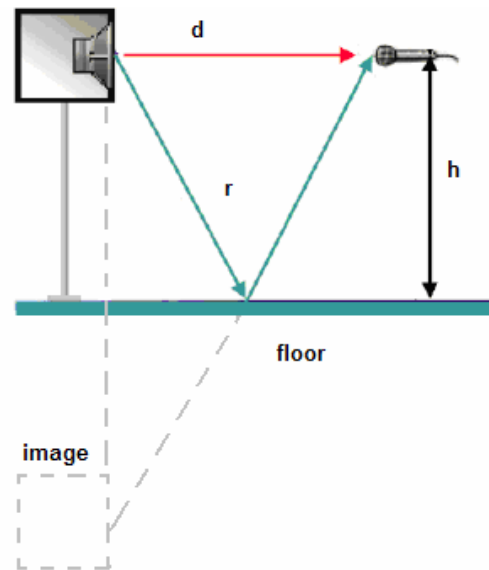
## 6. Debate

Para estimar la respuesta de campo abierto de un altavoz a partir de mediciones que se han hecho en una sala de estar normal, necesitaremos los siguientes datos:

- 1) Radio efectivo de la membrana  $a$  (el radio de la membrana más 1/3 del ancho del borde)
- 2) Respuesta de campo cercano medida a una distancia del centro de la membrana inferior a  $d < a/20$ .
- 3) Respuesta de campo lejano limitada medida a una distancia de la membrana  $d > 6a$ .

Obtendremos la mejor estimación si la respuesta de impulso limitada no tiene reflexiones en la pared. Se recomienda que la longitud de la limitación sea de unos 5ms o más (dependiendo del requisito tiempo-ancho de banda para una correcta estimación de la respuesta de frecuencia sobre los 200Hz). Esto quiere decir en la práctica que para una correcta preparación de la medición hemos de colocar el micrófono a una distancia  $h$  de la pared más cercana o del suelo de forma que el retardo en tiempo de la primera reflexión sea superior a 5ms.

El siguiente dibujo ilustra el método de imágenes que nos ayuda a hallar el camino de la reflexión de la onda desde el suelo. Asumiremos que el suelo es la superficie reflejante más cercana.



Con la distancia  $d$  del camino de la onda directa y la distancia  $h$  desde el suelo obtenemos la longitud del camino de la primera reflexión.

$$r = 2\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + h^2}$$

y el retardo de esta primera reflexión.

$$\Delta t = \frac{r-d}{c} = \frac{2\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + h^2} - d}{c}$$

Ahora podremos expresar el requisito de la distancia del altavoz desde el suelo ( $h$ ) con la siguiente ecuación.

$$h = \sqrt{\left(\frac{d + c\Delta t}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

En nuestro caso, para un retardo de 5ms y  $d=48$  cm, obtenemos  $h = 1,08$ m. Esto quiere decir que hemos de colocar el altavoz y el micrófono a 1,08 m sobre el suelo, para que la primera reflexión tarde más de 5ms. Por supuesto, el altavoz habrá de colocarse lejos del resto de paredes también.

## 7. Bibliografía

Mateljan I., Models for the Estimation of the Loudspeaker In-Room Response, *Int. Journal for Engineering Modeling*, vol. 6., No.1-4, 1993, ISSN 1330-1365

Kinsler, Frey, Coppens, Sanders: *Fundamental of Acoustics*, J. Wiley, New York, 2000.