



### Una pequeña cámara para calibrar los micrófonos por debajo de los 500 Hz

Un artículo de Alex Khenkin, de Earthworks [1], fabricante de micrófonos de alta calidad, le hace a uno preguntarse si existe un método para calibrar los micrófonos omnidireccionales por debajo de 500 Hz.

En dicho artículo – que merecerá la pena leer si eres un aficionado que desea saber algo más sobre la calibración de micrófonos – podremos encontrar el siguiente párrafo:

"La medición en frecuencias muy bajas con el método de la sustitución es problemática puesto que dichas pruebas requieren un espacio anecoico muy grande. Para medir en la gama de frecuencias de cero a 500 Hz, usamos una cámara de presión pequeña accionada con un pistón. Este método es realmente una forma de calibración de la respuesta de frecuencia, puesto que la presión en una cámara de un tamaño determinado a una temperatura determinada dependerá sólo del volumen desplazado por el pistón accionador. La limitación en las altas frecuencias está definida por el tamaño de la cámara, que debería ser inferior a 1/6 de la longitud de onda en cualquier dirección. Por supuesto, esto sólo funciona para micrófonos de presión (omnidireccionales)."

En los rangos por encima de 500 Hz, Earthworks usa un método de sustitución en el que el objeto a prueba se mide sobre una caja infinita comparándolo con un micrófono de referencia. Cuanto más baja sea la frecuencia de prueba, más problemático será hallar una cámara anecoica del tamaño apropiado y mantener la medición sin ningún efecto del exterior. Para evitar esto, Earthworks usa una pequeña cámara de presión para llevar a cabo las tareas de calibración en la gama de frecuencias bajas.

La cámara de presión también es interesante para el aficionado. Con la premisa de que la cámara se haya calibrado una vez con un micrófono de referencia, no habrá problema, debido a sus reducidas dimensiones, en emplear la cámara para calibrar cualquier micrófono, tanto en respuesta de frecuencia como en nivel.

### Funcionalidad y construcción de la cámara de medición

Si la dimensión más larga de la cámara de medición es menor de 1/6 a 1/8 de la longitud de onda de la frecuencia de corte superior, la cámara con un volumen  $V$  se comporta como una capacidad acústica.

$$C_K = V / (\rho_0 c^2) \quad (1)$$

siendo  $\rho_0 = 1,18 \text{ Kg./m}^3$  y  $c = 344 \text{ m/s}$ . Si la membrana de un altavoz con área  $S$  y velocidad  $v$  excita un volumen de caja con la velocidad de volumen  $U = v S$  el volumen total será aproximadamente a la presión acústica de

$$p_k = v S / j \omega C_K \quad (2)$$

La velocidad de la membrana y el desplazamiento se relacionan de la siguiente manera.

$$v = j \omega x \quad (3)$$

Aplicando la ecuación (3) a la ecuación (2) obtendremos que la presión del sonido en la caja es proporcional al desplazamiento de la membrana.

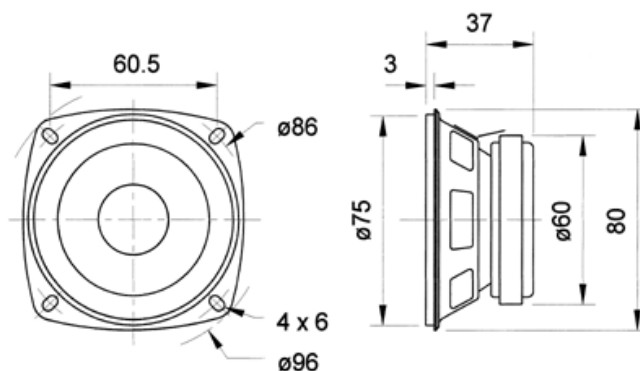
$$p_k = x ( S / C_K ) \quad (4)$$

Esta propiedad será de importancia capital como se verá más tarde puesto que en una caja cerrada el desplazamiento de la membrana y la presión dentro de la caja son constantes a bajas frecuencias.

Las dimensiones de la cámara de medición se calculan fácilmente a partir del requisito de que la dimensión más larga ha de estar entre 1/6 y 1/8 de la longitud de onda de la frecuencia máxima. A 500 Hz será

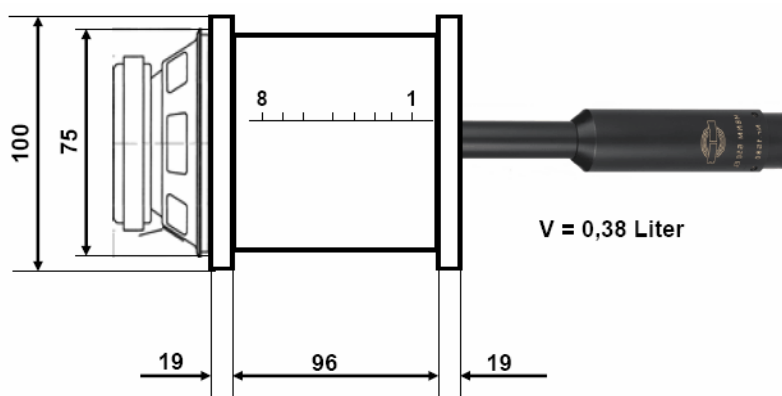
$$\lambda = c / f = 344 / 500 = 0,67 \text{ m} \Rightarrow 1/6\lambda \text{ a } 1/8\lambda = 11,5 \text{ cm a } 8,4 \text{ cm}$$

Las dimensiones de la cámara son bastantes manejables.



**Ilustración 1** Altavoces de medios Visaton FRS 8

Al principio, utilizamos una construcción con dos chapas de conglomerado de densidad media, un trozo de tubería de 75 mm y un altavoz FR88 de Visaton. Las dimensiones principales de la cámara de medición se muestran en la Ilustración 2, el resto de dimensiones son las resultantes de las piezas empleadas y se determinarán al reproducir la construcción.



**Ilustración 2:** Construcción de la cámara de medición

Cantidad	Descripción
2	Conglomerado de 19 mm, 10 x 10 cm
1	Tubería, calibre 75, longitud 110 mm
4	Barras roscadas M4 x 150 mm de longitud
8	Tuercas M4
1	Pasador, haya, calibre 25 mm

**Tabla 1** Lista de piezas de la cámara de medición

Al insertar la tubería 75 mm en cada plancha de conglomerado por cada lado, obtendremos una longitud efectiva del tubo de 93 mm, lo que nos da un volumen de 0,38 litros. En la ilustración 3 aparecen más datos relativos a la construcción. Con la información que se proporciona y las imágenes, no debería haber problemas con el procedimiento de construcción de la caja.



**Ilustración 3.1.** Vista lateral de la cámara finalizada.



**Ilustración 3.2.** Vista posterior de la cámara finalizada con altavoces.



**Ilustración 3.3.** Vista frontal de la cámara finalizada con DUT.



**Ilustración 3.4** Vista frontal (interior) con carril para acoplar la tubería.



**Ilustración 3.5** Vista frontal (micrófono) con un orificio para el adaptador del pasador de 25 mm para los micrófonos.



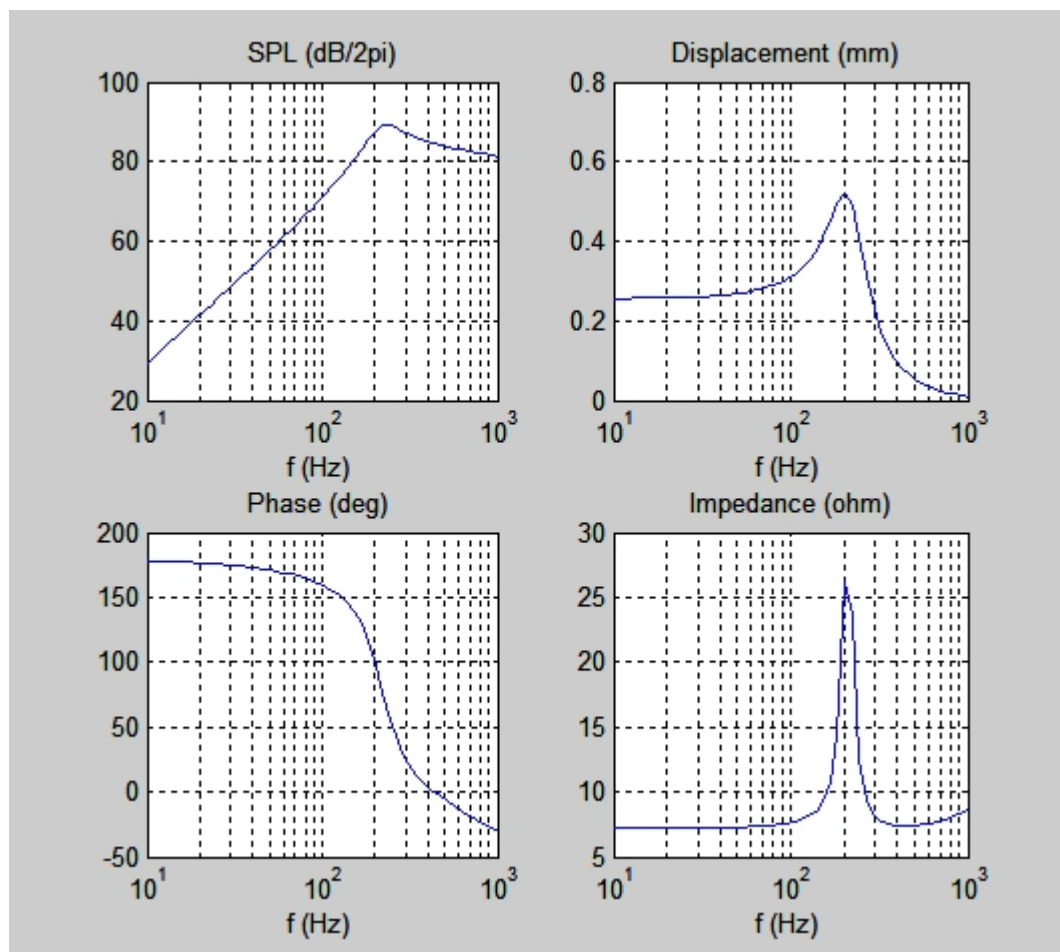
**Ilustración 3.6** Panel posterior (lado del altavoz), vista exterior con la tuerca insertando el altavoz.

### Propiedades de la cámara de presión

El montaje de la cámara de presión se toma de las ilustraciones 3.1 a 3.6. El micrófono sometido a prueba se insertará en la cámara con el adaptador precintado. La inserción del micrófono en la cámara tiene la ventaja de que la medición se hace independientemente del entorno y se evitan las interferencias adicionales. Si se silencia la parte posterior del altavoz, se incrementará este efecto.

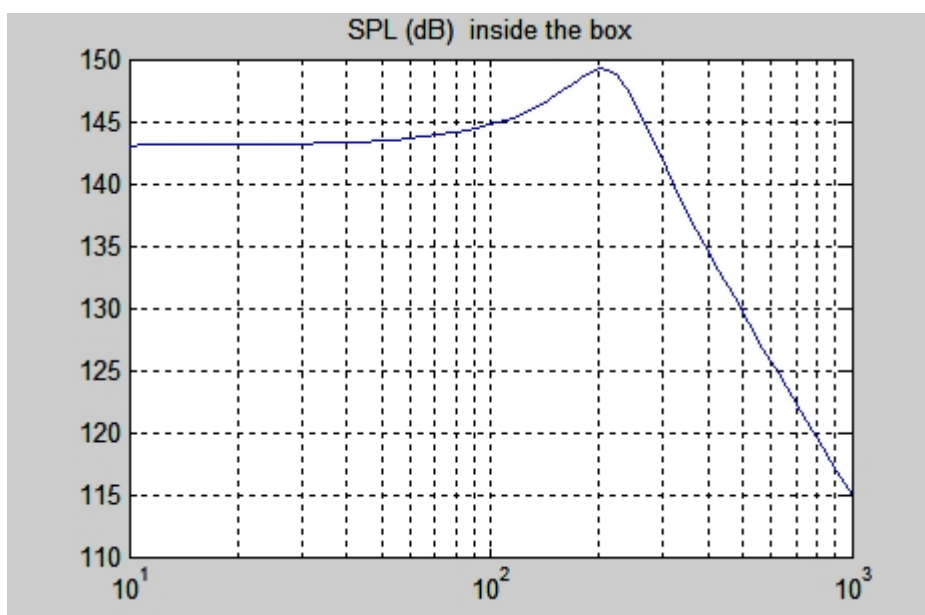
Para prepararse para la medición real, son necesarias ciertas pruebas preliminares y análisis que expliquen el estado de la medición y la sensibilidad a la variación de los parámetros de medición (ubicación del micrófono y precintado).

Primero se realizó una simulación en Matlab usando los parámetros TS del FRS 8 y las dimensiones conocidas de la cámara. La Ilustración 4 muestra las características del nivel de presión acústica (SPL), el desplazamiento de la membrana, la fase y la impedancia.



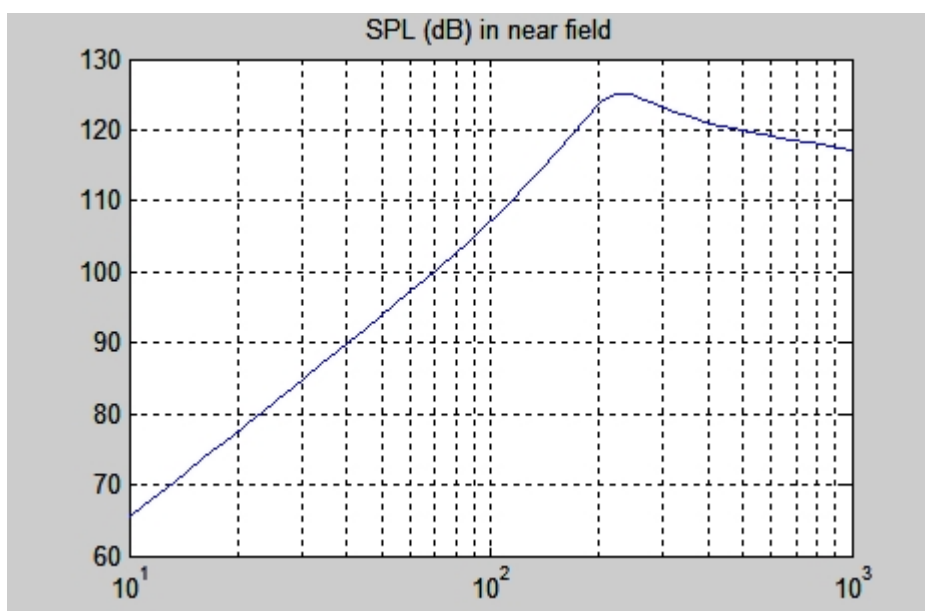
**Ilustración 4** Simulación de Matlab para la respuesta del FRS 8 en un volumen de 0,38 litros

La Ilustración 5 muestra la SPL del FRS 8 dentro de la cámara de presión. La SPL y el desplazamiento muestran unas características muy similares, tal como se predice en la Ecuación (4).



**Ilustración 5** Características de la presión acústica dentro de la cámara de medición para una excitación de 2,83 V (simulación de Matlab).

La presión acústica en la cámara, para una excitación del altavoz con 2,83 V, es sorprendentemente elevada. Por debajo de la frecuencia resonante asciende a unos 145 decibelios, lo que queda muy por encima del margen para una presión acústica máxima de los populares micrófonos electret.

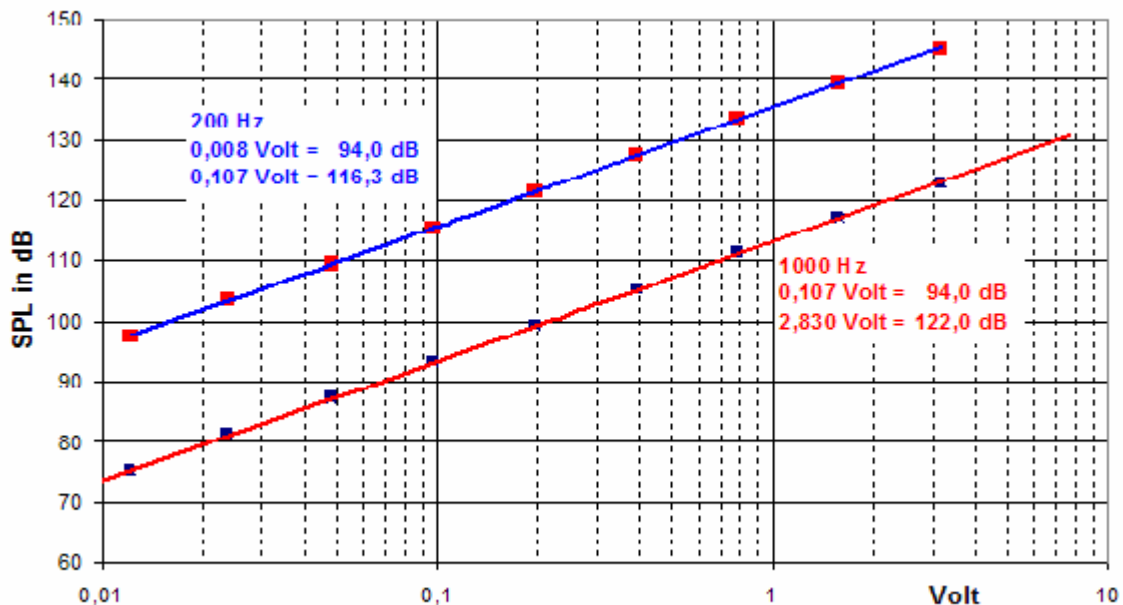


**Ilustración 6** Características de la presión acústica en el campo cercano (Simulación con Matlab)

Las características de la presión acústica también se simularon para el campo cercano exterior para poder comparar las dos mediciones después (Ilustración 6).

Tal como se muestra en la Ilustración 5, también se espera una presión acústica elevada dentro de la cámara. Para conservar los micrófonos sometidos a prueba de los daños se habrá de ajustar el voltaje de excitación del altavoz.

La Ilustración 7 muestra los resultados de la dependencia de la cámara SPL/voltaje de entrada a 100 Hz y 1000 Hz.



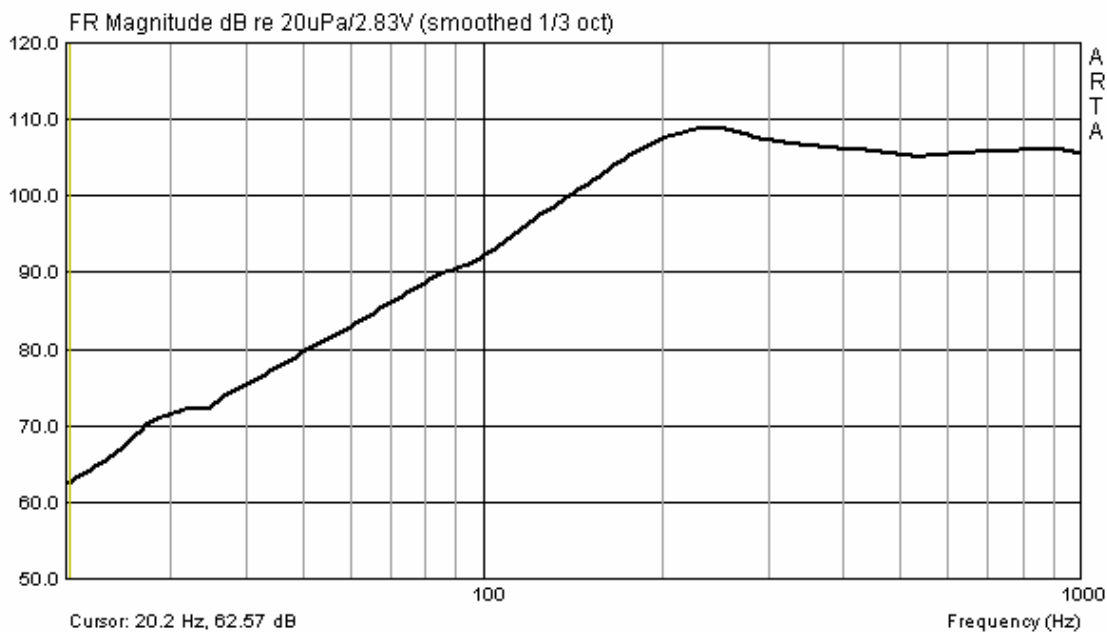
**Ilustración 7** Sensibilidad del nivel de presión de la cámara en relación con el voltaje de entrada.

A 1000 Hz (la frecuencia de prueba normal de los calibradores) la cámara necesita un voltaje de entrada de 0,107 V, para una presión acústica de 94 dB.

En la gama de frecuencias inferior a 200 Hz, se deben evitar los voltajes de entrada superiores a 0,1 V puesto que pueden producir distorsiones graves así como daños en el micrófono. En esta gama de frecuencias el voltaje de entrada aplicable para la calibración es de 0,01 voltios RMS.

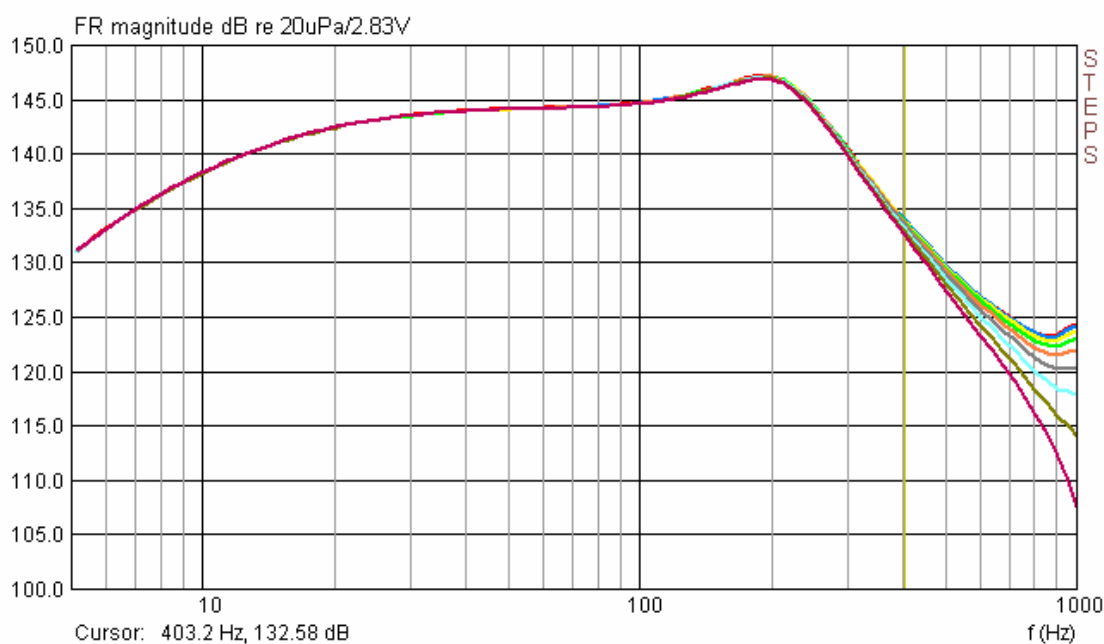
Los datos medidos que se relacionan más arriba se aplicarán sólo a la disposición sometida a prueba. Cumpliendo estrictamente las dimensiones y el volumen de la cámara así como el uso del mismo altavoz, se debería poder reproducir los resultados con unas diferencias muy pequeñas.

En la segunda fase, se determinó la respuesta de frecuencia de campo cercano del FRS 8. Debido al montaje, la presión acústica sólo se podía medir justo detrás del imán (véase la ilustración 8) En comparación con la simulación, le faltaban unos 15dB de presión acústica, que podría ser el resultado de una diferente configuración de medición. Una medición de control con un FRS 8 en una caja abierta confirmó la suposición. La diferencia de presión entre el lado posterior y frontal del campo cercano es de unos 13,9 dB a 200 Hz.



**Ilustración 8** Características de la presión acústica en el campo cercano (micrófono situado justo cerca del centro del imán).

A continuación se midió cuánta influencia tiene la posición del micrófono en la cámara en los resultados. Se midió la respuesta con el micrófono en 8 posiciones diferentes en una gama de frecuencias de 5 Hz a 1000 Hz. La posición 1 se encuentra a 1 cm de la plancha de conglomerado. El resto de posiciones están a 1 cm. Los resultados se muestran en la Ilustración 9 (compárense con la simulación de la Ilustración 5).



**Ilustración 9** Desviaciones de SPL en frecuencia en relación con la posición del micrófono (WM 60)



Primero, es de destacar que la medición por encima de 20 Hz concuerda bastante bien con la simulación. El nivel de presión absoluta así como las características de la respuesta de frecuencia se estiman muy bien con la simulación.

En segundo lugar, se puede ver que la influencia de la posición del micrófono comienza a ser significativa por encima de los 400 Hz. El análisis de los dos puntos de medición más diferenciados se puede ver en la tabla 2.

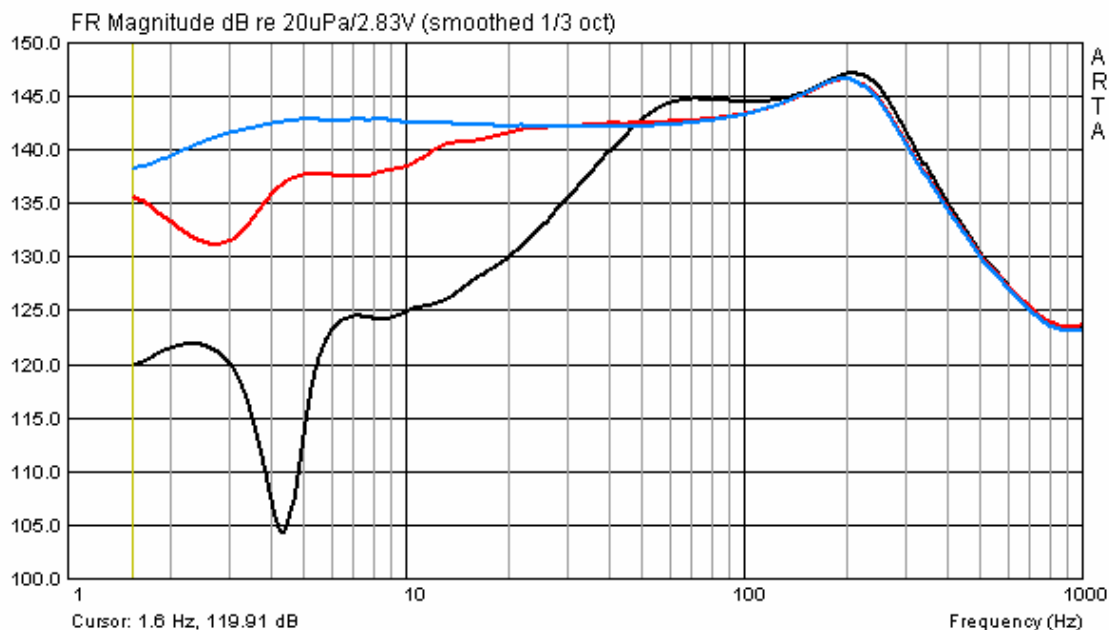
Posición	100 Hz	200 Hz	300 Hz	400 Hz	500 Hz
Pos 1 cm	144,73	147,12	140,25	134,00	129,62
Pos 8 cm	144,65	146,82	139,48	132,58	127,21
Diferencia en SPL (dB)	0,08	0,30	0,77	1,42	2,41

**Tabla 2** Dependencia de la posición de medición

Si la posición del micrófono se mantiene constante ( $\pm 1$  cm) se puede asumir que la diferencia será siempre inferior a 1 dB a 500 Hz.

Se estudió un tercer parámetro, la influencia del precinto de la cámara. Los resultados se muestran en la Ilustración 10.

La curva azul representa una cámara correctamente precintada con arcilla, la curva roja representa la medición con un adaptador para el micrófono, pero con menos precinto (pequeña fisura), y la curva negra representa una medición sin adaptador y sin precinto (separación mayor).



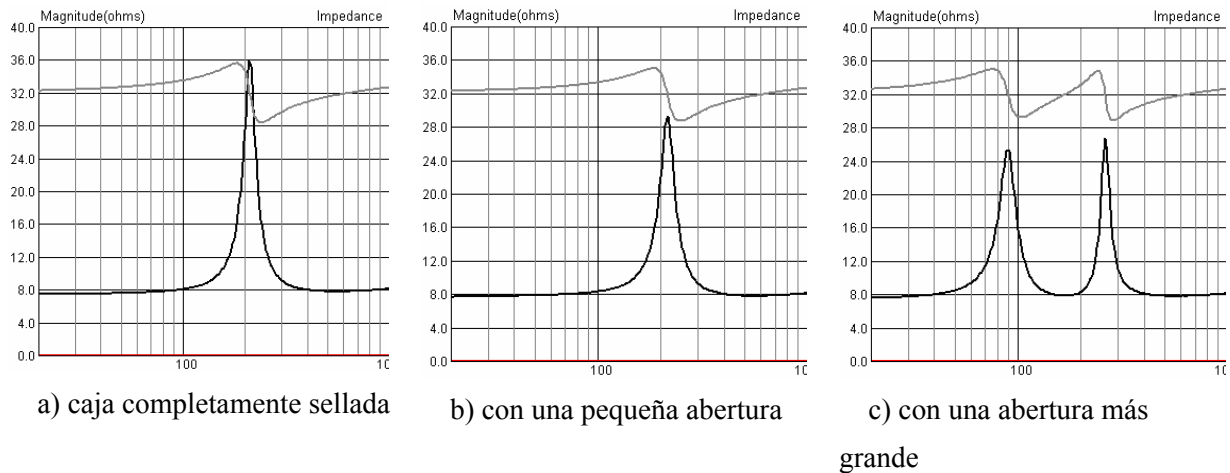
**Ilustración 10** Respuesta de frecuencia dependiendo del precinto de la cámara con el micrófono NK 221.

Lo que se hace obvio inmediatamente es que la cámara ha de estar bien precintada o si no la medición será errónea.

El precinto no debería ser un problema con la arcilla y un poco de experiencia. Las fugas se pueden ver como cambios en la respuesta de frecuencia o en la curva de impedancia del altavoz. La Ilustración 11a muestra la curva de impedancia para una cámara correctamente sellada, la Ilustración 11b muestra la curva de impedancia para una cámara con una pequeña abertura usando un adaptador para el



micrófono y la ilustración 11c muestra la curva de impedancia para la cámara con un adaptador abierto de 13 mm.



**Ilustración 11** Efecto de la abertura de la cámara sobre la curva de impedancia del altavoz

### Medición de la calibración

Para realizar las mediciones de calibración se usó el micrófono MK 221 de Microtech Gefell como referencia.

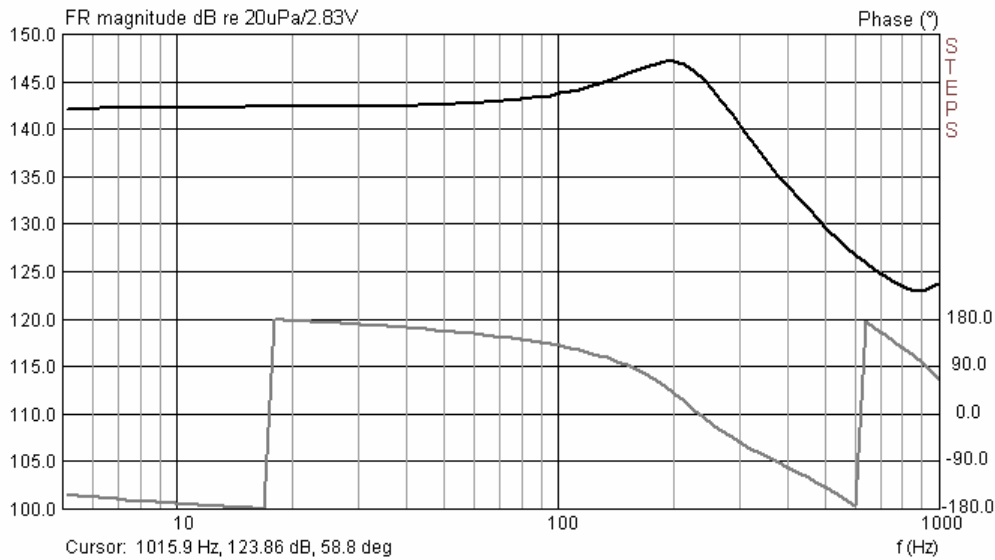
<b>Technische Daten/Specifications MK 221</b>	21.31	PTB-Zulassung-Nr. zur amtlichen Eichung	CE
	92.58		
Wandlertyp Transducer type	Kapazitiver Druckempfänger Capacitive pressure transducer		
*Frequenzbereich des Freifeldübertragungsmaßes *Frequency range free-field response	3,5 Hz ... 20 kHz (± 2 dB)		
*Feld-Leerlauf-Übertragungsfaktor/Sensitivity	50 mV/Pa		
Grenzschalldruckpegel für 3 % Klirrfaktor bei 1 kHz Max. SPL for THD ≤ 3 % at 1 kHz	146 dB		

**Ilustración 12** Extracto de las especificaciones del micrófono de referencia

La gama de frecuencias del micrófono se indican como 3,5 Hz a 20 Hz +/- 2 dB, la presión acústica máxima de 146 dB nos da cierta reserva comparados con los micrófonos habituales electret para aficionados.

La Ilustración 13 muestra los resultados de las mediciones de la respuesta de frecuencia dentro de la cámara con el programa STEPS y el micrófono MK 221. La medición es casi idéntica a la simulación en este caso.

**Teóricamente, para una caja bien sellada, se puede hacer una calibración de una respuesta de frecuencia del micrófono sin la comparación con el micrófono de referencia.**

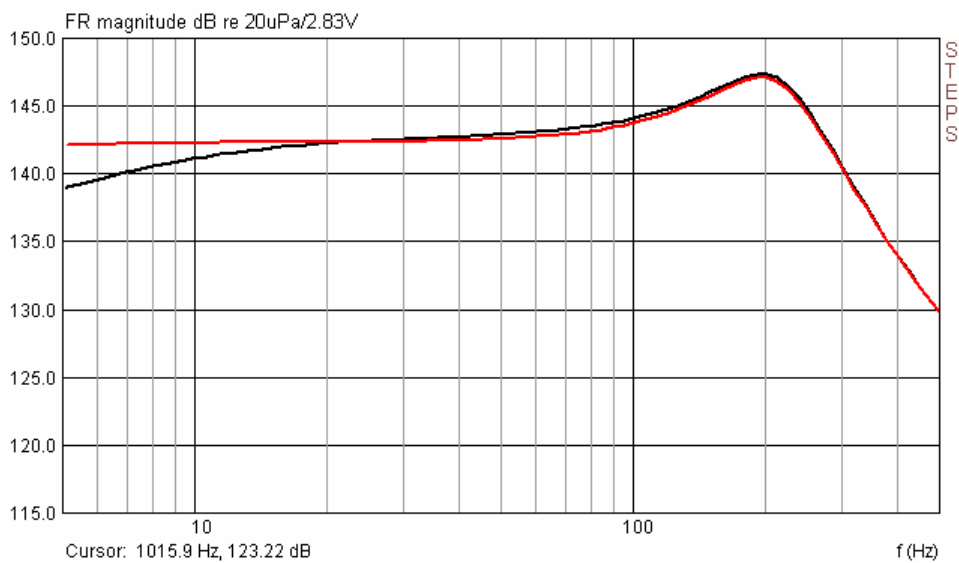


**Ilustración 13** Respuesta de frecuencia de referencia en la cámara de medición

Para realizar la calibración se disponía de los siguientes micrófonos:

- Micrófono de medición MB 550
- 2 Sennheiser KE4-211 (cápsula de diferente tamaño)
- MCE 2000, Monacor
- WM 60, Panasonic

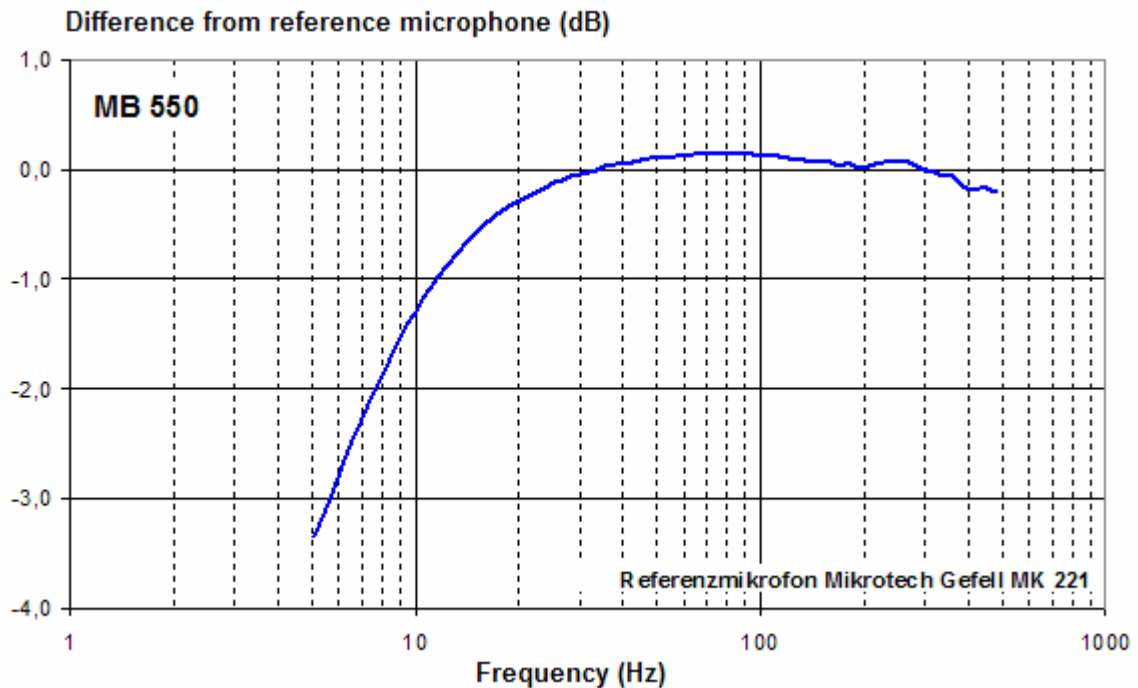
El siguiente ejemplo ilustra cómo se determina la curva de calibración para el micrófono que se está calibrando en base a la curva de referencia y a la curva medida del micrófono calibrado.



**Ilustración 14** Respuesta del micrófono MB 550 (negro) y respuesta de frecuencia de referencia (rojo), después de escalar el nivel de presión

Normalmente, se puede asumir que los micrófonos tienen diferentes sensibilidades. Por tanto, será necesario escalar el nivel de presión. La forma más sencilla de hacerlo es coger una frecuencia de referencia (en este caso 300 Hz) y leer la sensibilidad. La diferencia ha de equilibrarse con 'Scale' [Escalar] (ilustración 14).

Cuando se mide con ARTA, la diferencia se puede crear con 'Edit' -> 'Subtract Overlay' [Editar > Restar superposición]

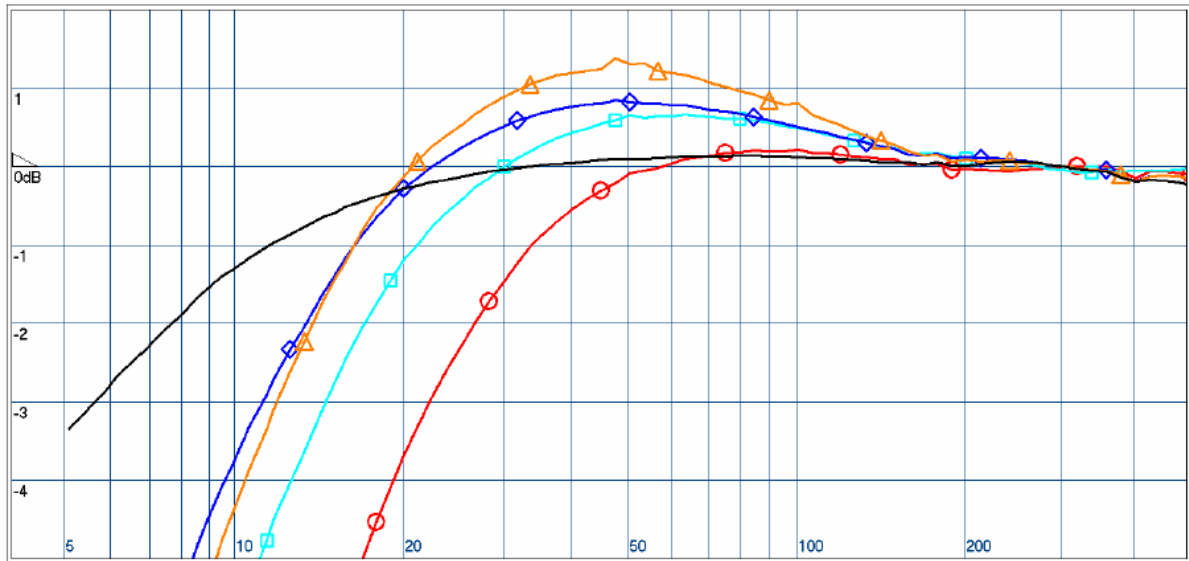


**Ilustración 15** MB 550 – diferencia de la respuesta de frecuencia del micrófono de referencia

Cuando se mide con STEPS (reproducción más sencilla) será necesaria una breve desviación a Excel así como un programa de simulación apropiado (por ejemplo, CALSOD).

La Ilustración 14 muestra los resultados para el micrófono MB 550 determinados con STEPS. Los resultados de los restantes micrófonos se combinan en la ilustración 16.

Es obvio que existen desviaciones evidentes y comunes entre los micrófonos para aficionados por debajo de los 50 Hz. Incluso los micrófonos de una mayor calidad como KAPSELN (KE4-211) no garantizan que las desviaciones respecto de las especificaciones o la difusión sean insignificantes.



**Ilustración 16** Respuesta de frecuencia calibrada para los micrófonos sometidos a prueba: negro (MB 550), rojo (KE4-221, Nr1L), cian (KE4-211, Nr2K), azul (MCE 2000), naranja (Panasonic WM 60).

### Conclusión

Con la cámara de presión descrita será fácil calibrar micrófonos hasta 500 Hz. Será óptima para calibrar la configuración de medición con un micrófono de referencia y guardar los datos como archivo de calibración de STEPS o ARTA. Pero incluso sin un micrófono de referencia, será posible realizar la calibración sobre la base de una simulación, como muestra el ejemplo anterior.

El coste de la construcción de la cámara es menor, así que no hay un motivo importante para no probar este pequeño experimento.

HWE / IM  
01.08.2006

### Bibliografía

[1] Alex Khenkin, How Earthworks Measures Microphones, publicado en [www.earthworks.com](http://www.earthworks.com)



### Apéndice 1 – Registro de Matlab para la respuesta en caja cerrada de un altavoz

```
clear
echo off
j=sqrt(-1);
f = logspace(log10(10), 3, 50);
n = max(size(f));
w = 2*pi*f;
c=344; r0=1.18;
%----- start user Input
%input voltage
e=2.83;

%box volume
Vol = 0.39e-3;

%distance 1m
r=1;

%driver parameters (i.e. FRS 8)
Re = 7.2;
Le= 0.85e-3;
fs=120;
Bl = 3.2;
Sm = 31e-4;
Vas = 0.91e-3;
Qt = 1.04;
Qe = 1.32;
Qm = 4.85;
%----- end user input

Cm = Vas/(r0*c^2*Sm^2);
Mm=1/((2*pi*fs)^2*Cm);
Rm = 1/((2*pi*fs)*Qm*Cm);
a=sqrt(Sm/pi);
ws=2*pi*fs;

pout = ones(1, n);
pin = ones(1, n);
pnf = ones(1, n);
xuk=ones(1, n);
zul=ones(1, n);

%radiation impedance constants
ra1 = 0.1404*r0*c/a^2;
ra2 = r0*c/(pi*a^2);
ma1 = 8*r0/(3*pi^2*a);
ca1 = 5.94*a^3/(r0*c^2);

% box constants
Cb=Vol/(r0*c^2); %box compliance
Mao=0.85*a*r0/Sm; %membrane air mass loading

for k=1:n
    ww = w(k); jw = j*ww;
    % radiation impedance
    z1 = jw*ma1; z2 =1/(jw*ca1);
    z3=z2*ra1/(ra1+z2); z3= z3+ra2;
    Zar=1/(1/z1+1/z3);

    %box analogous circuit
    Ze= Re + jw*Le;
```



# APUNTES DE APLICACIÓN - ARTA

## Nº 5: Cámara ARTA para calibración del micrófono en el extremo inferior

```
Zm= Rm + j w*Mm +1/(j w*Cm);
A11 = Ze*Sm/BI;
A12 = Ze*Zm/(Sm*BI) + BI/Sm;
A21 = Sm/BI;
A22 = Zm/(Sm*BI);
Zak =Zar + j w*Mao + 1/(j w*Cb);
zul(k)= (A11*Zak+A12)/(A21*Zak+A22);
%volume velocity
U1 = e/(A11*Zak+A12);
%displacement
xuk(k) = (U1/Sm)/jw;
%pressure at distance r (infinite baffle mounted)
pout(k) = jw*r0*U1/(2*pi*r);
%pressure inside the box
pin(k) = U1/(jw*Cb);
%near field pressure
kk = ww*a/2/c;
pnf(k)= jw*r0*(U1/(a*pi))*sin(kk)/kk;

end

%level in far filed (db/1m)
pdb= 20*log10(abs(pout)/2e-5);

%level in the box
pudb= 20*log10(abs(pin)/2e-5);

%level in the near field
pnfdb= 20*log10(abs(pnf)/2e-5);

semilogx(f, pudb), title('SPL (dB) inside the box'), grid, pause
semilogx(f, pnfdb), title('SPL (dB) in near field'), grid, pause

subplot(221);
echo off;
semilogx(f, pdb), title('SPL (dB/2pi)'), grid;
xlabel('f (Hz)');
subplot(222);
semilogx(f, abs(xuk)*1000), title('Displacement (mm)'), grid;
xlabel('f (Hz)');
subplot(223);
semilogx(f, angle(pout)*180/pi), title('Phase (deg)'), grid;
xlabel('f (Hz)');
subplot(224);
semilogx(f, abs(zul)), title('Impedance (ohm)'), grid;
xlabel('f (Hz)'), pause;
subplot;
```

### Apéndice 2 – Midiendo distorsión de micrófonos

Micrófonos en una pequeña cámara de presión @ 300 Hz

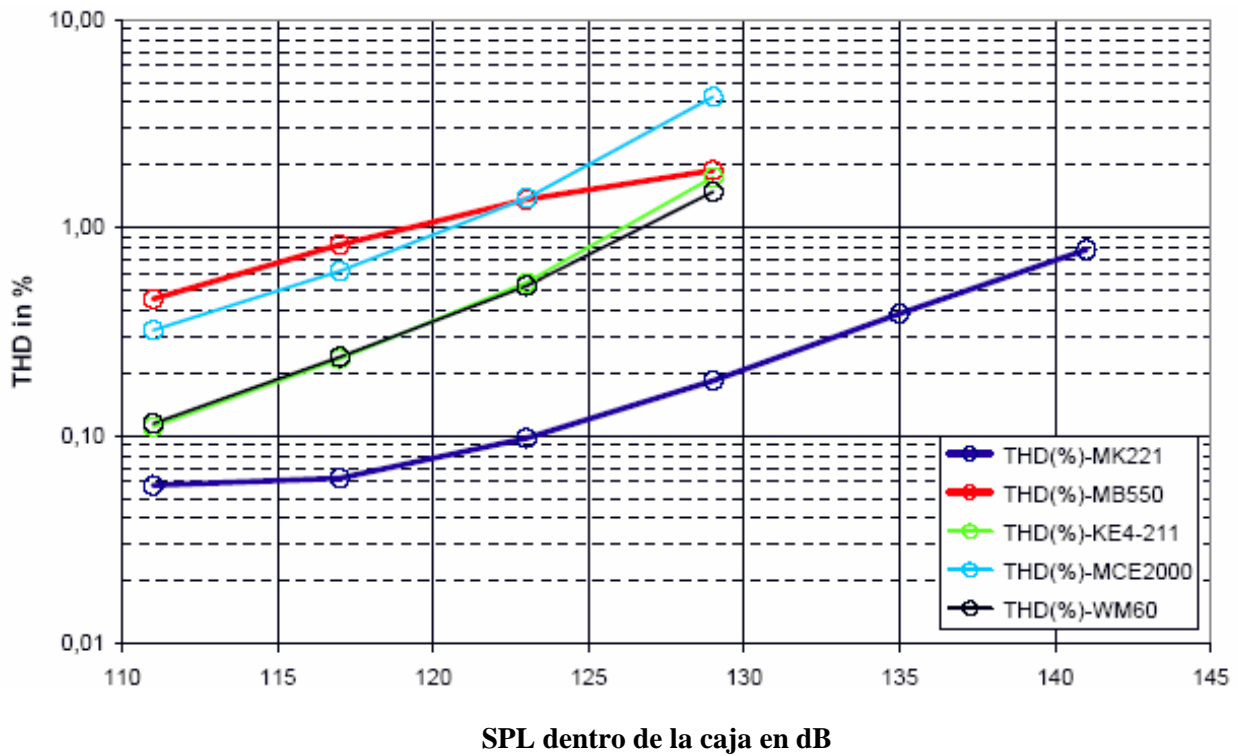


Fig A1: Comparación de distorsiones de micrófonos a 300 Hz