



1.2

FENÓMENOS ACÚSTICOS RELACIONADOS CON LA AUDIENCIA

REFLECTORES Y DIFUSORES ACÚSTICOS

Ivana Rossell Turull

Directora del Máster de Acústica Arquitectónica y Medioambiental
Gerente de Ivana Rossell - Acústica
ivana@salleurl.edu/ acustica@ivanarossell.com

FENÓMENOS ACÚSTICOS ASOCIADOS A LA AUDIENCIA

Absorción del público y los asientos

En un teatro o en un auditorio **la superficie ocupada por el público constituye el área de absorción más importante de la sala**. Los valores del coeficiente de absorción de la audiencia son conocidos pero su variabilidad es tan elevada que constituyen uno de los principales interrogantes en los cálculos de predicción acústica. **No solamente es difícil poder cuantificar la absorción si no que deberían tenerse en cuenta otros fenómenos** como la difracción, el efecto contorno, la influencia de la distribución y disposición del público, el tipo de butacas, el efecto *seat dip*...etc.

Todos estos factores provocan desviaciones en las simulaciones teóricas respecto el comportamiento real.

La absorción producida por el público, se debe principalmente al tipo de ropa utilizada y a su grado de porosidad. Esta variabilidad obliga a trabajar con valores promediados, y es uno de los motivos de falta de precisión en los cálculos teóricos.

Según la distribución del público, se cuantificará la absorción de formas distintas:

- Cuantificación por “objetos” (publico disperso)
- Cuantificación por superficie (público agrupado)

Público disperso:

Cuando el público no está agrupado en una zona de audiencia, ej: estación ferrocarril, polideportivo... Suele utilizarse la absorción por persona, en sabinios. La absorción total se calcula multiplicando el número de personas por el valor de absorción de una persona:

Datos de la absorción por persona (expresados en m² o sabinios):

<i>F(Hz)</i>	<i>125</i>	<i>250</i>	<i>500</i>	<i>1K</i>	<i>2K</i>	<i>4K</i>
<i>Standing person with coat</i>	0.17	0.41	0.91	1.30	1.43	1.47
<i>Standing person without coat</i>	0.12	0.24	0.59	0.98	1.13	1.12
<i>Seated musician with instrument</i>	0.60	0.95	1.06	1.08	1.08	1.08

Tabla I Absorption values (in Sabines) calculated by Kath and Kuhl for “dispersed people” case

Cuantificación de la absorción: $A = N \cdot A_{pp}$

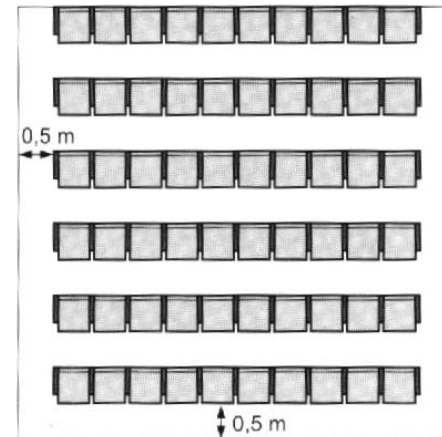
Público agrupado:

Para el caso de público sentado en sillas se usan los coeficientes de absorción unitarios (energéticos). La absorción de la audiencia se calcula multiplicando su coeficiente asignado por el área ocupada. [Según *Kosten* y *Beranek* este procedimiento es válido cuando el asiento ocupa entre 0.45 y 0.79m²]

Se asignan coeficientes para el caso de sillas vacías o sillas ocupadas y se diferencia según el tipo de asiento (tapizado).

La superficie que se contabiliza no es la superficie real ocupada por la audiencia sino la superficie acústica efectiva (S_A), que tiene en cuenta el **efecto contorno** y añade, en las bandas perimetrales libres, 0.5m de longitud.

$$A = S_A \cdot \alpha$$



	<i>f</i> (Hz)	125	250	500	1K	2K	4K
Beranek-1996	Audience-seats heavily upholstered	0.76	0.83	0.88	0.91	0.91	0.89
	Audience-seats medium upholstered	0.68	0.75	0.82	0.85	0.86	0.86
	Audience-seats lightly upholstered	0.56	0.68	0.79	0.83	0.86	0.86
	Seats, unoccupied-heavily upholstered	0.72	0.79	0.83	0.84	0.83	0.79
	Seats, unoccupied-medium upholstered	0.56	0.64	0.70	0.72	0.68	0.62
	Seats, unoccupied-lightly upholstered	0.35	0.45	0.57	0.61	0.59	0.55
Barron-1998	Upholstered seats, unoccupied	0.32	0.50	0.73	0.87	0.85	
Arau-1999	Audience-seats heavily upholstered	0.52	0.68	0.85	0.97	0.93	0.85
	Seats, unoccupied-heavily upholstered	0.49	0.66	0.80	0.88	0.82	0.70

Efectos de difracción asociados a la audiencia:

La audiencia puede tratarse como un material absorbente, pero al no ser una superficie plana, si no un elemento tridimensional que presenta cavidades, provoca, a la vez, efectos de difracción acústica.

Sombra acústica:

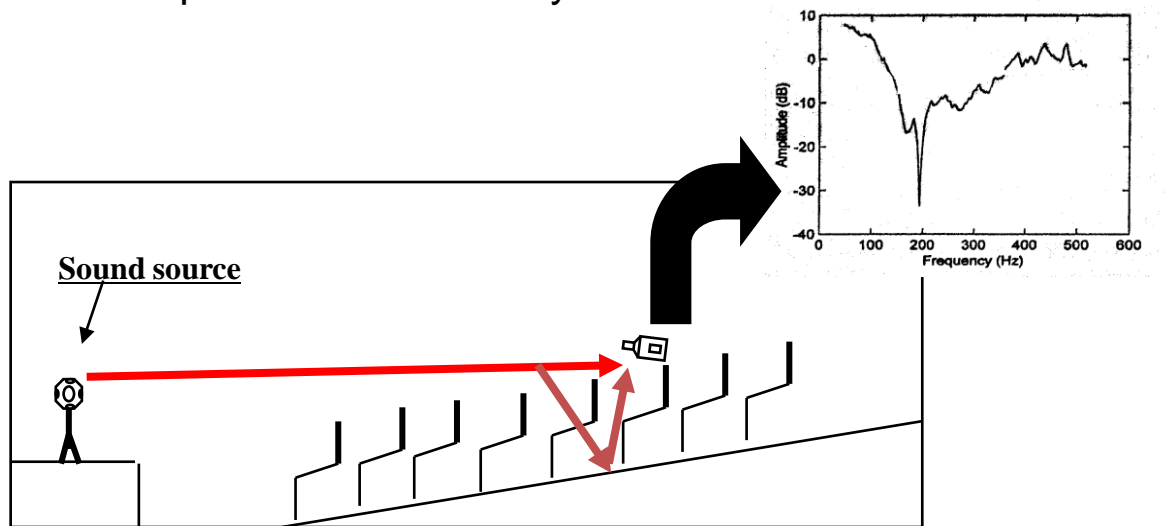
Uno de estos efectos es la sombra acústica. Existe una pérdida energética por difracción (doblamiento de la onda frente un obstáculo). De este modo, las primeras filas “roban” energía a las filas más alejadas, aunque éstas tengan visión directa con la fuente. Este efecto se minimiza aumentando el ángulo de incidencia fuente-receptor; es decir: aumentando la altura de la fuente o inclinando la superficie de la audiencia.

El efecto *seat dip*:

Definición:

Seat dip es la atenuación selectiva experimentada por el sonido cuando se propaga por encima del área altamente absorbente ocupada por las sillas (con o sin público) y el ángulo de incidencia es pequeño (incidencia rasante).

Se caracteriza por una fuerte absorción de entre 10 y 20 dB a una frecuencia concreta en la banda comprendida entre 100 y 300 Hz.



La atenuación *Seat Dip* fue descubierta en 1962 cuando se hacía un estudio sobre la pobreza acústica de la New York Philharmonic Hall. Este fenómeno fue cuantificado en primer lugar por Sessler y West y por Schultz y Watters en 1964 cuando observaron que existía una importante atenuación del sonido (alrededor de los 20 dB), próxima a la frecuencia de 150 Hz.

Causas:

La causa primaria es la **interferencia entre el sonido directo procedente del escenario y las múltiples reflexiones en el suelo y los asientos**. Esta atenuación se pone de manifiesto cuando el sonido se ha propagado por encima de las primeras filas, y se mantiene constante con independencia del número de filas existentes en la sala. Se debe, por lo tanto, a la existencia de resonancias horizontales y verticales consecutivas producidas por los huecos entre fila y fila de asientos, que producen un efecto de cancelación por interferencia destructiva.

Desde 1964 se hicieron más mediciones objetivas del fenómeno en salas de conciertos (Iida y Ando, 1986; Bradley 1991) y en modelos a escala reducida (Ishida et al., 1989), dos modelos teóricos aparecieron en la literatura (Ando et al., 1982; Kawai y Terai, 1991), **se comprobó también que la atenuación variaba considerablemente de una sala a otra y de un tipo de asiento a otro**.

Percepción subjetiva del efecto:

-¿Cuando se percibe el efecto?

La atenuación afecta en una banda frecuencial muy estrecha, según medidas obtenidas a partir de simulaciones realistas del campo sonoro, se determinó que el **umbral subjetivo de percepción** se daba cuando la disminución de energía **provocaba una caída de -3.8 ± 0.2 dB en la banda de los 200 Hz desde los 0 a los 80ms.**

En este caso la atenuación era audible, aunque ello no implicase necesariamente que fuera desastroso para un auditorio

Las butacas:

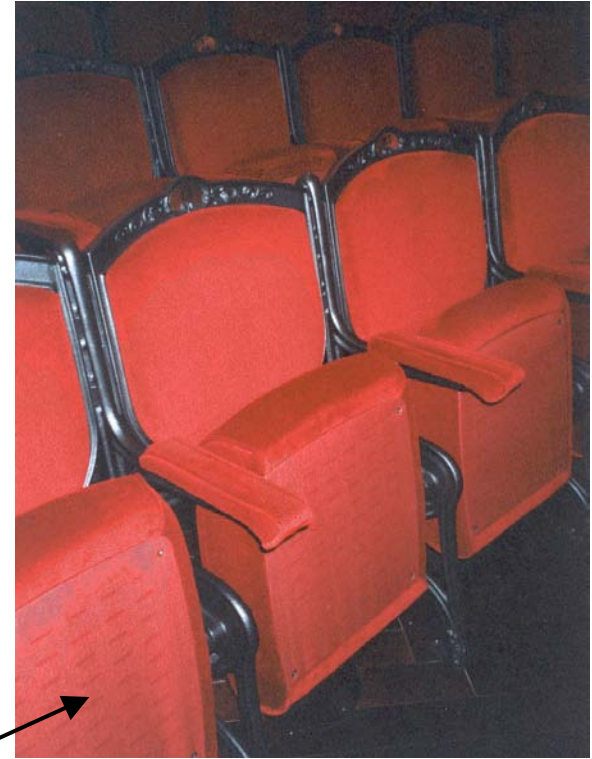
Las butacas, según su grado de tapizado, serán de gran importancia para determinar la absorción de la sala, y sobretodo, la diferencia entre sala vacía y llena. Es importante que la sala no tenga variaciones significativas de absorción, cuando no esté al 100%, en cuanto a valor de absorción y a respuesta frecuencial.

Tres tipos de butacas con tres niveles de tapizado:

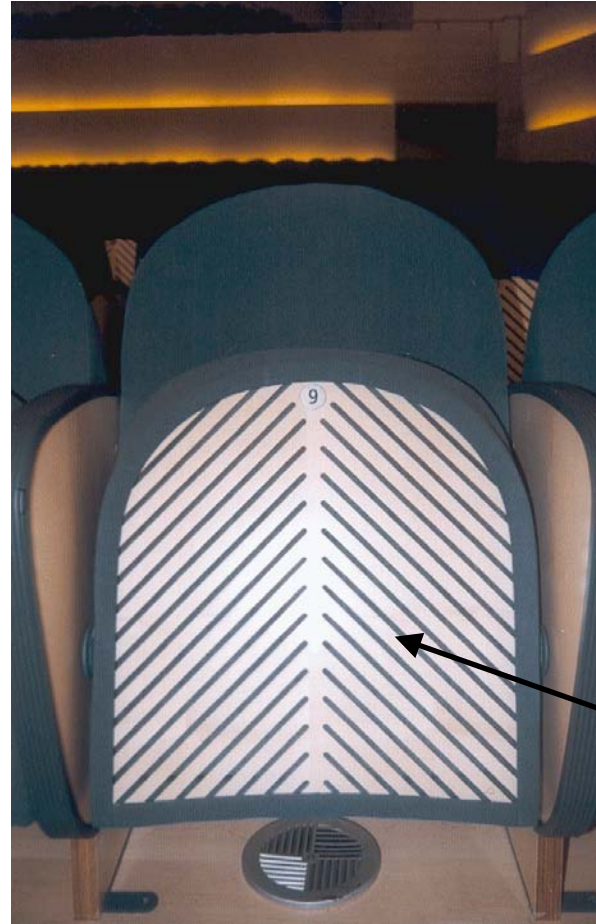




Fotografía de las butacas del Liceu de Barcelona con resonador lineal en la parte inferior, tapado con una tela



resonador de panel ranurada con máxima absorción a 1KHz. La butaca desocupada (plegada) presenta una curva de absorción similar a la de una persona sentada.

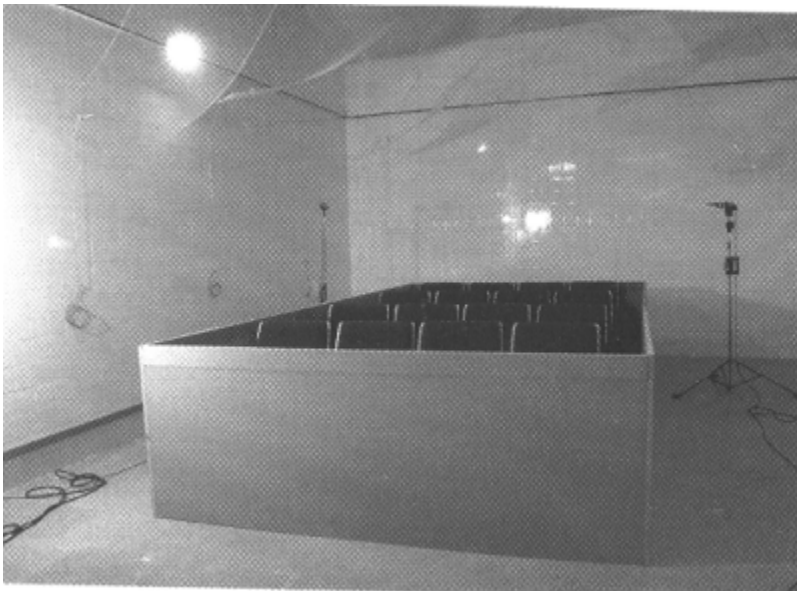


Butacas de
*l'Auditori de
Barcelona*, con
resonador
lineal en la
parte inferior,
sintonizado a
1000Hz.

resonador lineal
en forma espina

Medida de la absorción de butacas en cámara reverberante, evitando el efecto contorno. Los laterales de las butacas están cubiertos por unas maderas reflectantes. De esta forma se evita el efecto de absorción lateral. Se mide sin que afecte la absorción de los laterales.

Después se contabilizará este efecto a partir de la superficie acústica efectiva (aumentando la superficie real 0.5m por lado libre).



MATERIALES ACÚSTICOS NO DEDICADOS A LA ABSORCIÓN:

REFLECTORES

DIFUSORES

REFLECTORES

Encargados de procurar reflexiones útiles a los receptores. Son materiales lisos, rígidos, de coeficiente de absorción muy bajo.

Suelen usarse en espacios en los que se precisa de una calidad acústica elevada, en cuanto a inteligibilidad y control de las reflexiones: teatros, salas de conferencias y auditorios.

Reflexiones útiles:

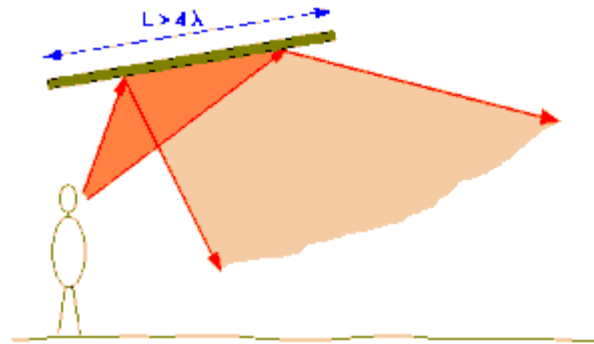
Salas para voz: reflexiones antes de los primeros 50 ms. (El límite de integración del oído humano (antes de detectar eco) es de 50 ms. Estas reflexiones se denominan *primeras reflexiones* (*Early reflections*).

Salas para música: reflexiones dentro de los primeros 80 ms. En este caso la inteligibilidad no es primordial y si la reverberación y la sonoridad.

Cuando una superficie actuará como reflector acústico?

Cuando la superficie reflectora es lisa y tiene unas dimensiones grandes (de 3 a 4 veces) comparadas con la longitud de onda del sonido considerado.

Todas las frecuencias que tengan una longitud de onda comparables o menores a las del receptor, sufrirán el efecto de la difracción: la onda envolverá el reflector sin desviar su trayectoria.

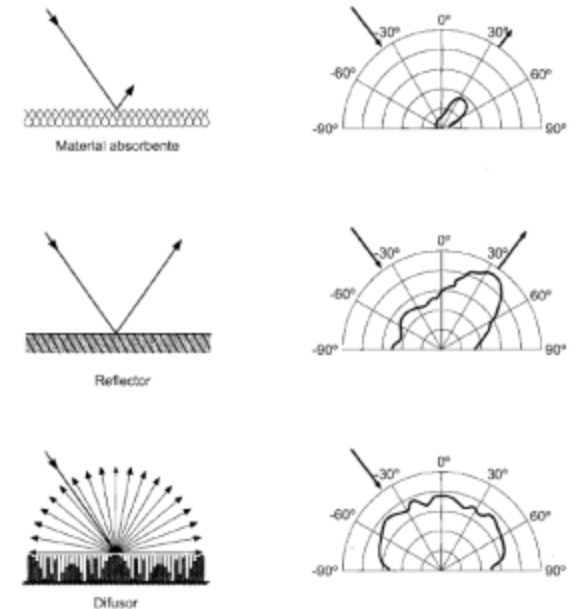
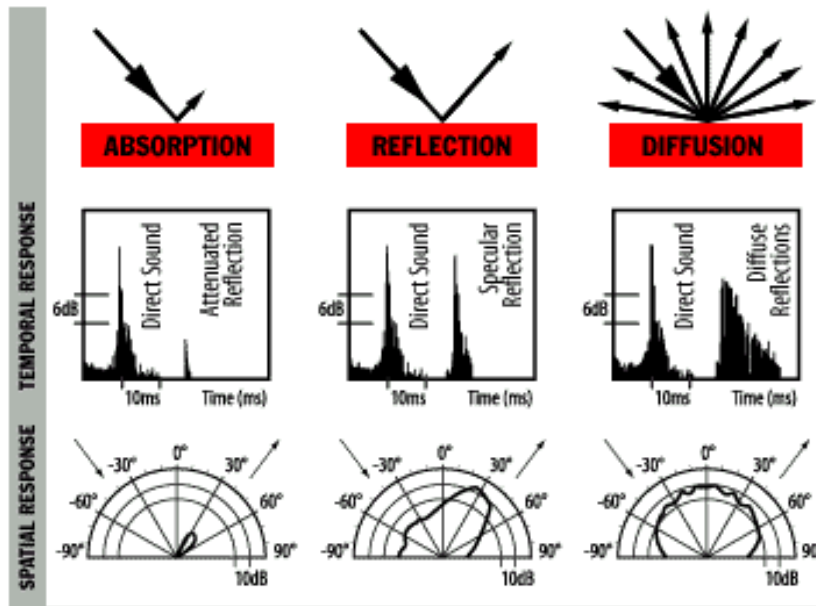


Podemos encontrar reflectores planos y curvos. Estos últimos pueden provocar problemas de focalización. (Este tema se tratará en la teoría geométrica).

DIFUSORES ACÚSTICOS:

La función de un difusor es la de repartir la energía acústica que en él incide a todas las direcciones del espacio.

Los difusores, en función de sus dimensiones, tienen una frecuencia de diseño y crearán difusión a partir de esa frecuencia y hasta una frecuencia máxima.



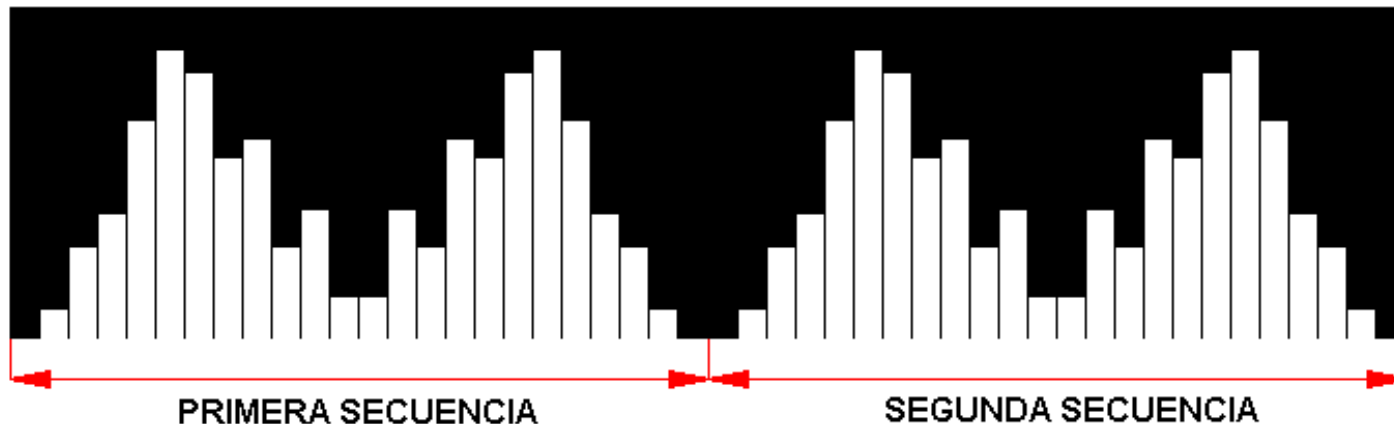
Cualquier superficie que presente irregularidades, relieves o rugosidades, puede provocar difusión acústica, siempre y cuando estos relieves sean de dimensiones comparables a la longitud de onda.

De este modo, los teatros antiguos llenos de esculturas y relieves, presentan una difusión muy bueno, mientras que la arquitectura moderna, sumamente minimalista y de materiales lisos, no la favorece.

Existen muchos tipos de superficies difusoras. Algunas de ellas se consiguen a base de crear estructuras con relieves o hendiduras que siguen un orden establecido por una secuencia matemática. Algunos de estos difusores fueron patentados desde hace ya algunas décadas, son los llamados **RPG: Reflection Phase Grating**.

DIFUSORES RPG

Un difusor RPG (Reflection Phase Grating) está formado por diversas hendiduras con distintas profundidades. Estas hendiduras o pozos son de una profundidad determinada por una secuencia matemática que se repite las veces que se requiera (según la superficie que deba tener el difusor) y deben estar separadas entre ellas por divisiones delgadas y rígidas.



Existen diferentes procedimientos para generar la secuencia matemática que proporciona un repartimiento uniforme del sonido dando lugar a diferentes tipos de difusor: difusor RP y difusor QR.

Diseño de un difusor RPG:

DIFUSOR RPG tipo QR: *Quadratic Roote*. Los valores de la secuencia matemática, proporcionales a la profundidad de las hendiduras, vienen establecidos por la ecuación:

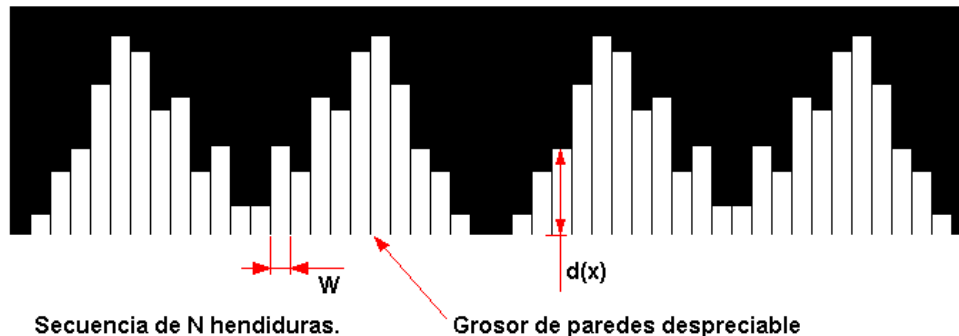
$$S(x) = n^2 \cdot \text{mod } N$$

$n = \text{Entero}; N = n^{\circ} \text{ de hendiduras de 1 secuencia.}$
 $\text{mod: resto de la división entera}$

DIFUSOR RPG tipo PR: *Primary Roote*. Los valores de la secuencia matemática, proporcionales a la profundidad de las hendiduras, vienen establecidos por la ecuación:

$$S(x) = g^n \cdot \text{mod } N$$

$g = \text{raiz primitiva menor}; N = n^{\circ} \text{ de hendiduras de 1 secuencia}$
 $\text{mod: resto de la división entera}$



La profundidad de las hendiduras se establece según la ecuación:

$$d(x)|_n = dn = \frac{S_n \cdot \lambda_0}{2 \cdot N} = \frac{S_n \cdot c}{2 \cdot N \cdot f_0}$$

Por lo tanto, antes de encontrar las dimensiones de los relieves de nuestro difusor debemos fijar la frecuencia de diseño.

Frecuencia máxima de trabajo: $\frac{f_{\max}}{f_0} \leq 8$

Determinación de la anchura de las ranuras:

T : espesor de los divisores (habitualmente entre 1,5 y 5 mm)

$$W = \frac{c}{2 \cdot f_{\max}} - T$$

DISEÑO DE UN DIFUSOR QR

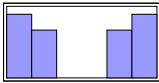
$$S(x) = n^2 \cdot \text{mod } N$$

Ejemplo para una secuencia $N = 7$. N es el orden del difusor o de la secuencia. Estas secuencias son presentan una simetría par.

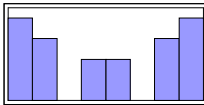
n	mod 7	Residuo
0	0	0
1	$1*1 = 1 < 7$	1
2	$2*2 = 4 < 7$	4
3	$3*3 = 9 > 7$	Res $9/7 = 2$
4	$4*4 = 16 > 7$	Res $16/7 = 2$
5	$5*5 = 25 > 7$	Res $25/7 = 4$
6	$6*6 = 36 > 7$	Res $36/7 = 1$
7	$7*7 = 49 > 7$	Res $49/7 = 0$

DIFUSORES QR

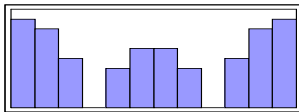
N = 5



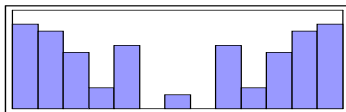
N = 7



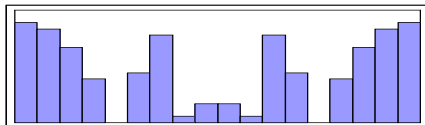
N = 11



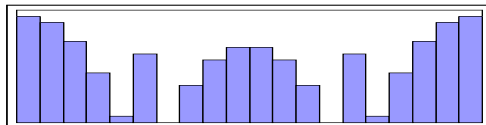
N = 13



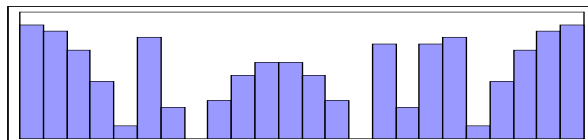
N = 17



N = 19



N = 23



<i>n</i>	5	7	11	13	17	19	23
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1
2	4	4	4	4	4	4	4
3	4	2	9	9	9	9	9
4	1	2	5	3	16	16	16
5	0	4	3	12	8	6	2
6		1	3	10	2	17	13
7		0	5	12	15	11	18
8			9	3	13	7	12
9			4	9	13	5	8
10			1	4	15	5	6
11			0	1	2	7	6
12				0	8	11	8
13					16	17	12
14					9	6	18
15					4	16	3
16					1	9	13
17					0	4	3
18						1	2
19						0	16
20							9
21							4
22							1
23							0

DISEÑO DE UN DIFUSOR PR

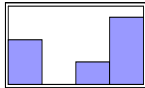
$$S(x) = g^n \cdot \text{mod } N$$

Ejemplo para una secuencia $N = 11$ y $g = 2$

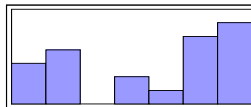
n	2^n	Residuo
1	$2^1 = 2 < 11$	2
2	$2^2 = 4 < 11$	4
3	$2^3 = 8 < 11$	8
4	$2^4 = 16 > 11$	Res 16/11 = 5
5	$2^5 = 32 > 11$	Res 32/11 = 10
6	$2^6 = 64 > 11$	Res 64/11 = 9
7	$2^7 = 128 > 11$	Res 128/11 = 7
8	$2^8 = 256 > 11$	Res 256/11 = 3
9	$2^9 = 512 > 11$	Res 512/11 = 6
10	$2^{10} = 1024 > 11$	Res 1024/11 = 1

DIFUSORES PR

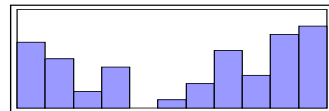
$N = 5$



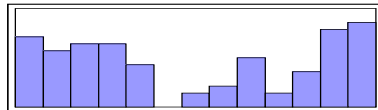
$N = 7$



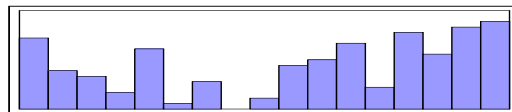
$N = 11$



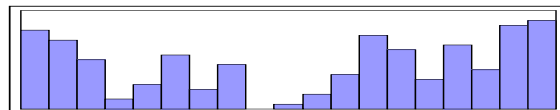
$N = 13$



$N = 17$



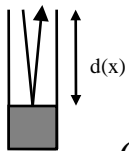
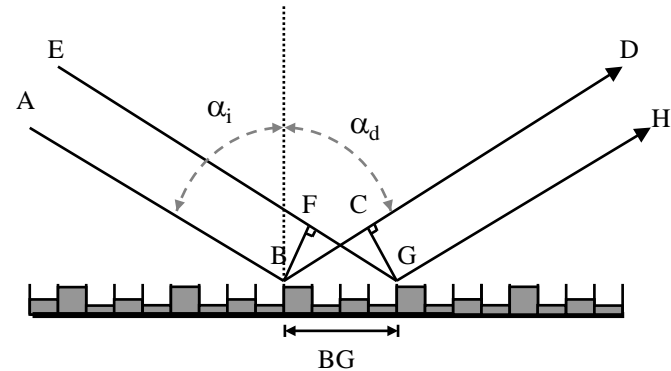
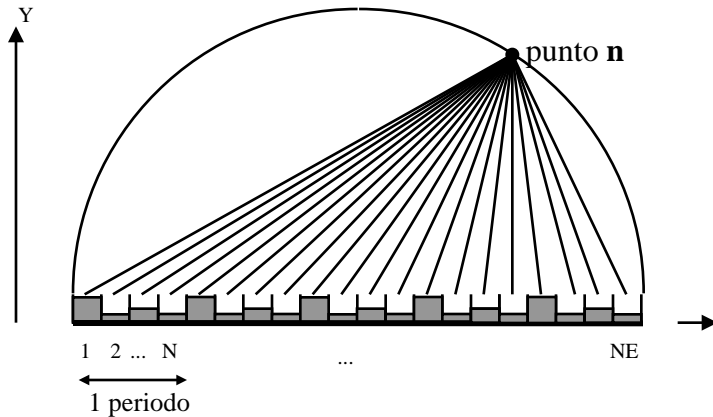
$N = 19$



	5	7	11	13	17	19
n	$g = 2$	$g = 3$	$g = 2$	$g = 2$	$g = 3$	$g = 2$
1	2	3	2	2	3	2
2	4	2	4	4	9	4
3	3	6	8	3	10	8
4	1	4	5	3	13	16
5		5	10	6	5	13
6		1	9	12	15	7
7			7	10	11	14
8			3	9	16	9
9			6	5	14	18
10			1	10	8	17
11				7	7	15
12				1	4	11
13					12	3
14					2	6
15					6	12
16					1	5
17						10
18						1

TEORÍA DE LA DIFUSIÓN

Teoría de Fraunhofer (limitación para campo lejano)



$$d(x)|_n = dn = \frac{S_n \cdot \lambda_0}{2 \cdot N}$$

Profundidad de las ranuras

$$r(x) = e^{j2\pi \cdot \frac{2 \cdot d(x)}{\lambda}}$$

Retardo que introduce cada ranura

$$s = \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \alpha_d - \sin \alpha_i)$$

Vector de dispersión

$$a(s) = \frac{1}{L} \int_0^L r(x) \cdot e^{j \cdot s \cdot x} \cdot dx$$

Amplitud de la dispersión

$$a(s) = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L e^{jsx - 4\pi \cdot j \frac{d(x)}{\lambda}} \cdot dx$$

$$|a(s)| = \frac{1}{NX} \sqrt{\left[\sum_{k=1}^{NX} \cos\left(sx - 4\pi \frac{d_k(x)}{\lambda}\right) \right]^2 + \left[\sum_{k=1}^{NX} \sin\left(sx - 4\pi \frac{d_k(x)}{\lambda}\right) \right]^2}$$

Fórmula para
representar el diagrama
de difusión

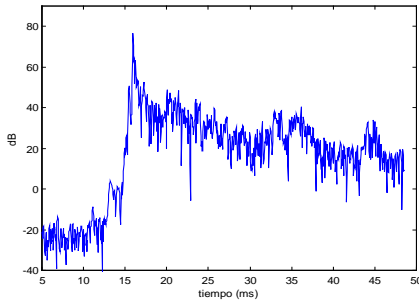
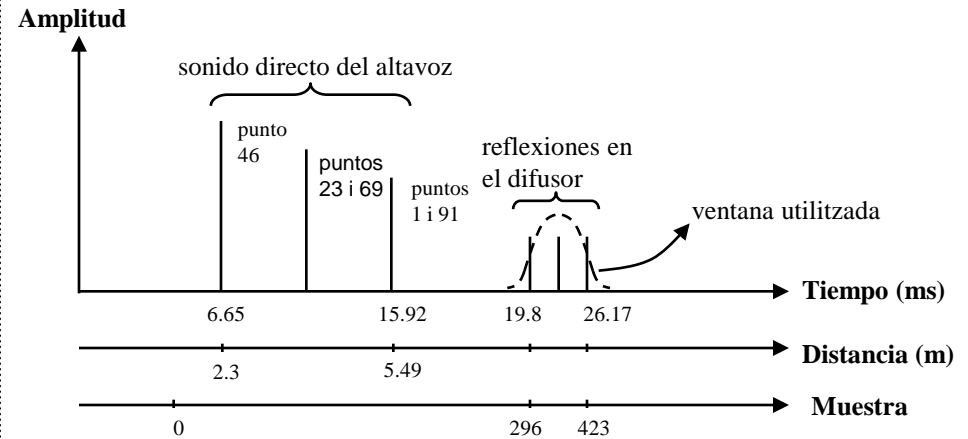
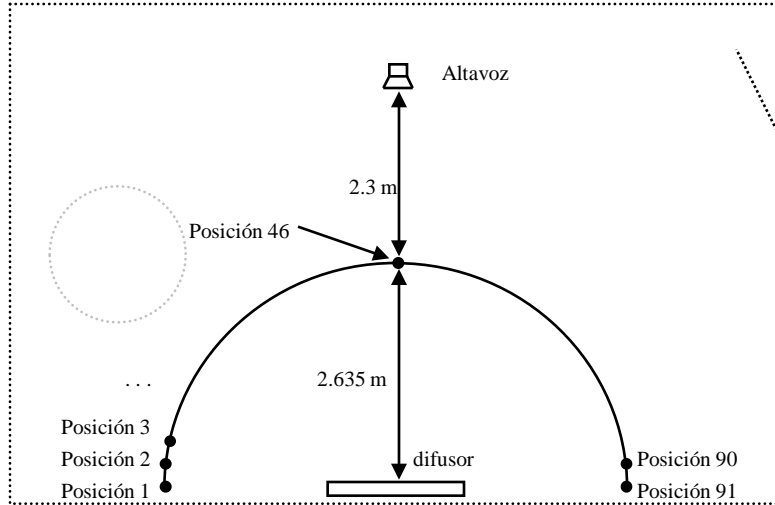
$$I(s) = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{|a(s)|^2 10^5}{|a(s)|_{max}^2} \right]$$

Patrones de
intensidad
normalizados

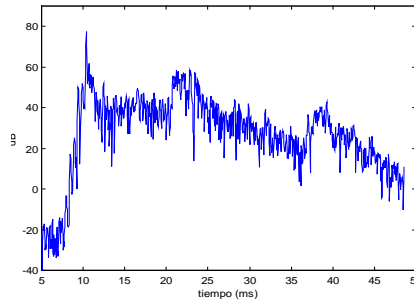
Si se calcula la energía que llega en cada punto que rodea el difusor se obtienen resultados muy similares para cualquier posición, gracias a los retardos debidamente calculados proporcionados por los relieves del difusor matemático. De esta forma, se obtiene un campo difuso alrededor del elemento difusor, evitando la reflexión especular.

MEDIDA DE LA DIFUSIÓN

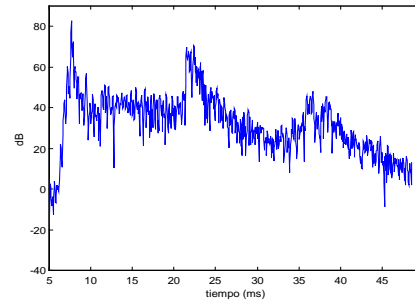
Medida de la difusión de un RPG en cámara anecoica:



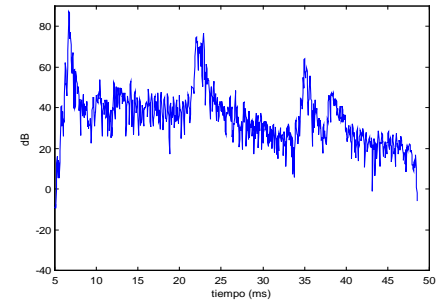
Punto 1



Punto 23



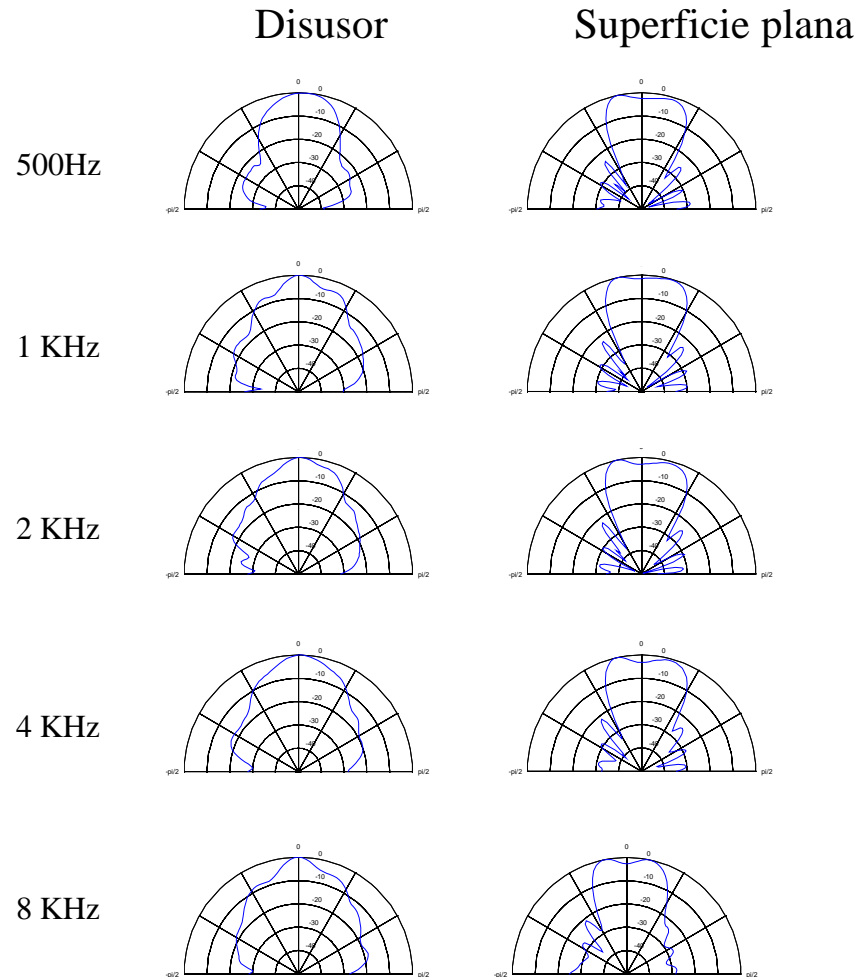
Punto 35



Punto 46

Medidas reales: superficie plana-superficie difusora

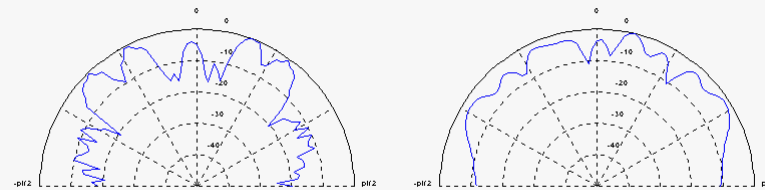
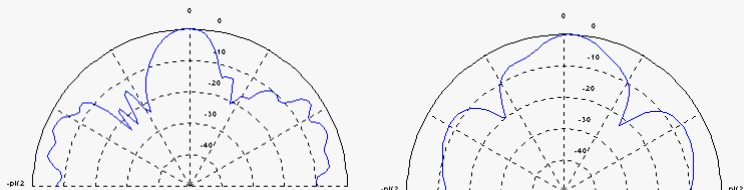
Mostramos a continuación los resultados obtenidos de la medida de la energía que rodea al difusor y la energía que rodea una tabla de madera lisa, en el segundo caso a partir de una energía incidente perpendicular a los planos difusores o reflectates.



medida (real) – simulación (teórica)

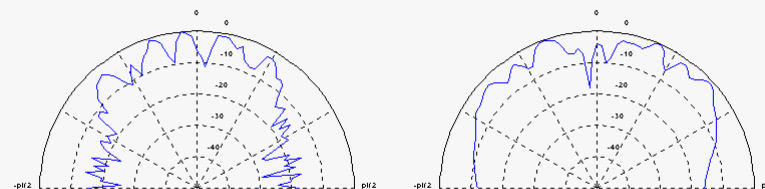
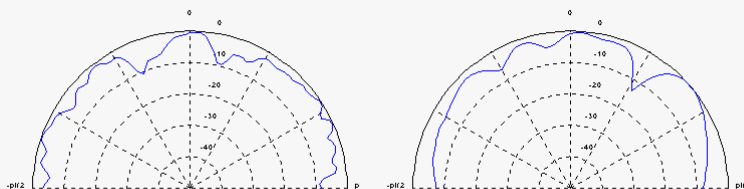
medida (real) – simulación (teórica)

630 Hz



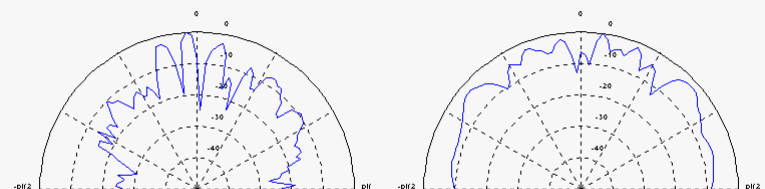
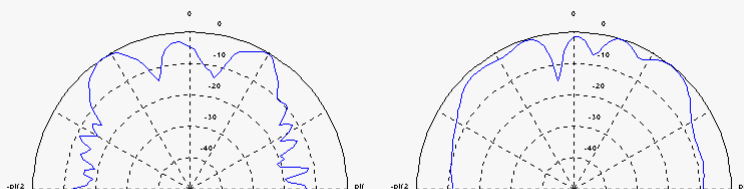
1600 Hz

800 Hz



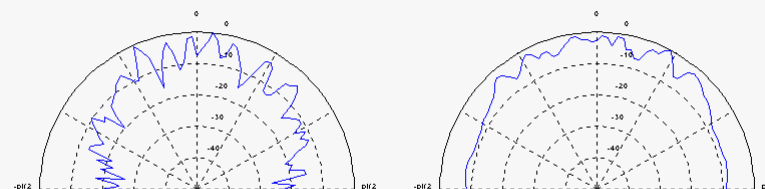
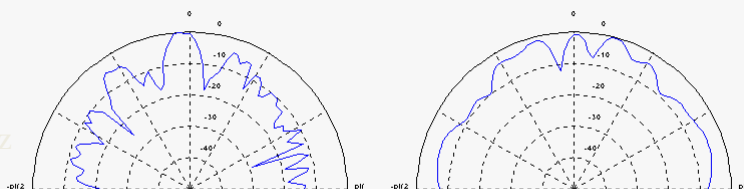
2KHz

1KHz



2500 Hz

1250 Hz



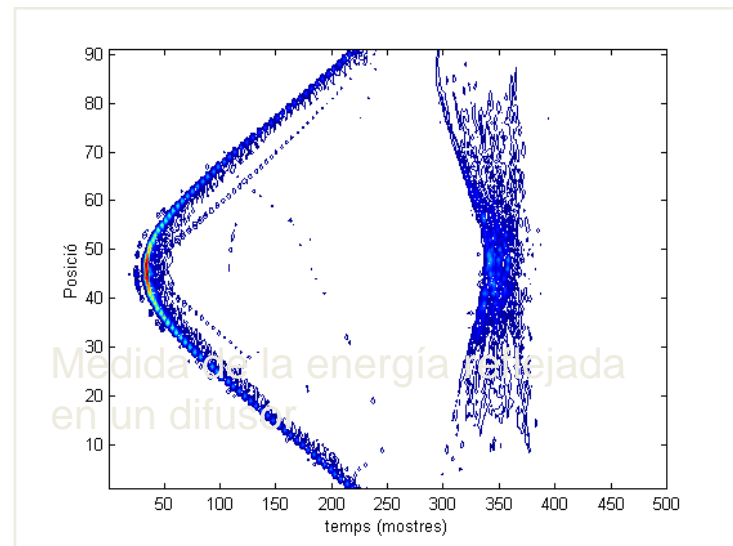
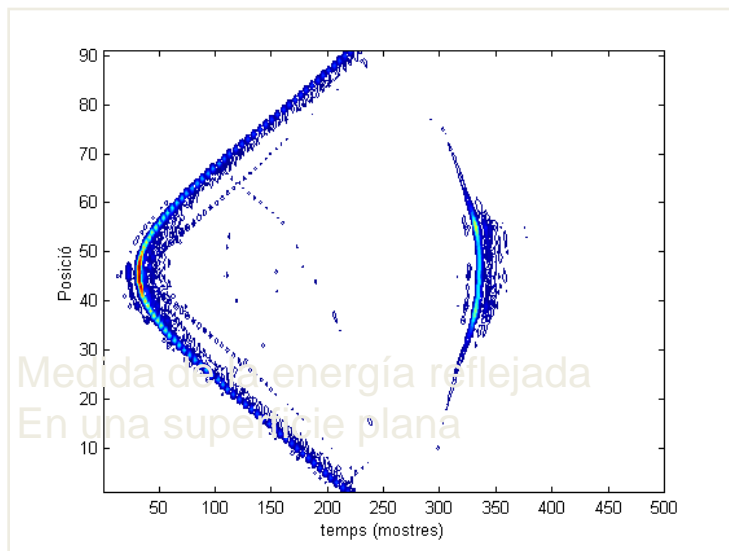
3150 Hz

MEDIDA DE LA DIFUSIÓN: Gráficas de contorno

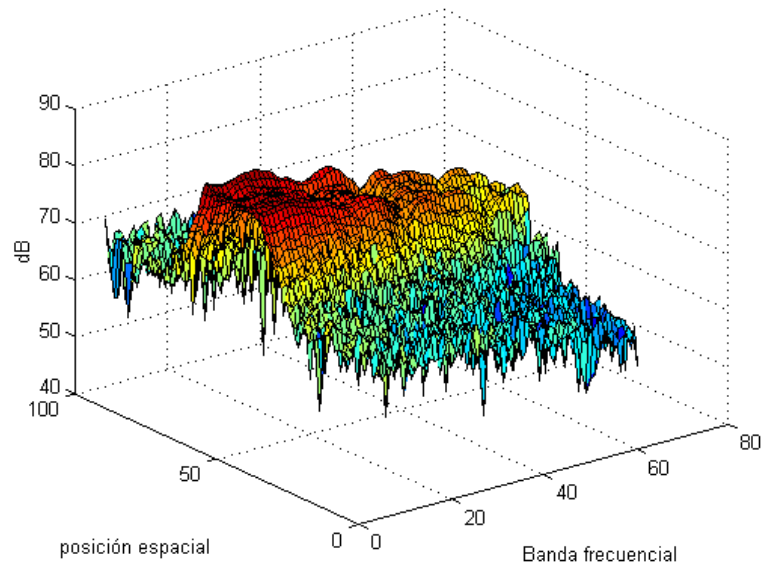
Representación de cómo llega la energía a unos micrófonos alrededor de una tabla lisa (gráfico izquierda) y difusor RPG (gráfico derecha).

El primer gráfico es la llegada del sonido directo desde la fuente al micrófono, el segundo, es la energía que procede del elemento reflector o difusor. Los micrófonos rodean el plano de reflexión cada 10° .

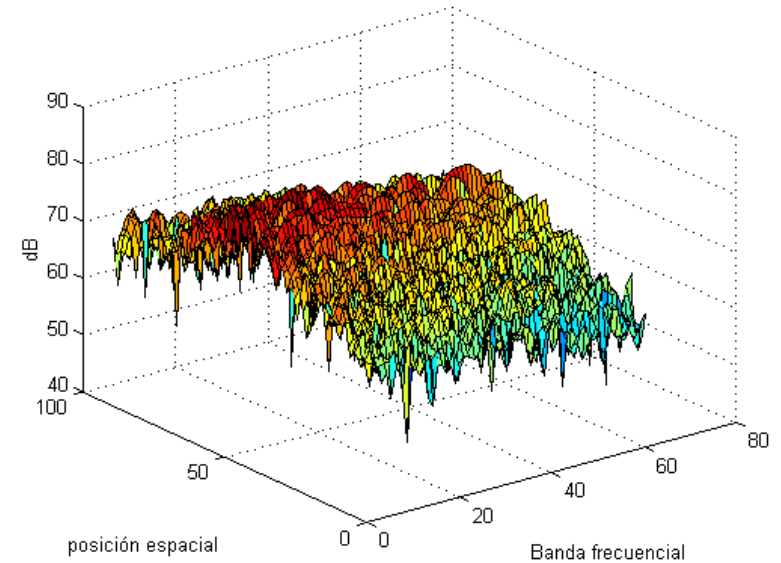
Medidas realizadas en cámara anecoica.



EFFECTO FRECUENCIAL DE LA DIFUSIÓN



- Medida de una superficie plana



- Medida de un difusor

Qué efectos puede provocar una superficie difusora?

- A parte de la difusión del sonido, según el tipo de superficie, **puede ser que se genere una absorción acústica importante:**

Para el caso de los difusores RPG, por ejemplo, las cavidades o pozos son generalmente de madera y huecos por dentro. Este tipo de construcción puede suponer un coeficiente de absorción significativo a frecuencias medias (depende del diseño y tipo de difusor). Siempre, debemos tener en cuenta las características de absorción de estos elementos, aunque no sean el objetivo de su uso, pues pueden causar problemas imprevistos.

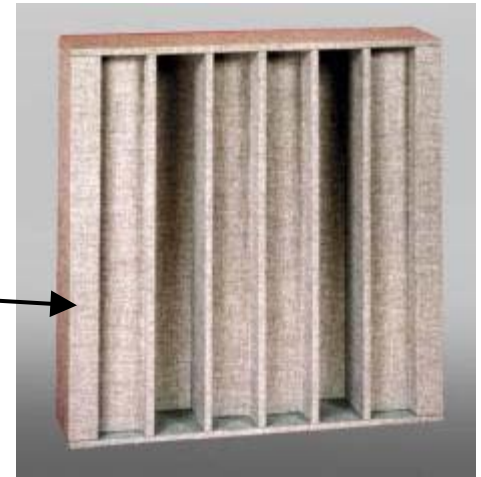
- En algunos casos, cuando existe un exceso de difusión, se priva la sala de reflexiones especulares útiles, rompiendo sobremanera la energía y provocando una falta energética de primeras reflexiones importantes. Algunas de las fotografías que se muestran a continuación pueden presentar casos de exceso de difusión:

EJEMPLOS DE DIFUSORES



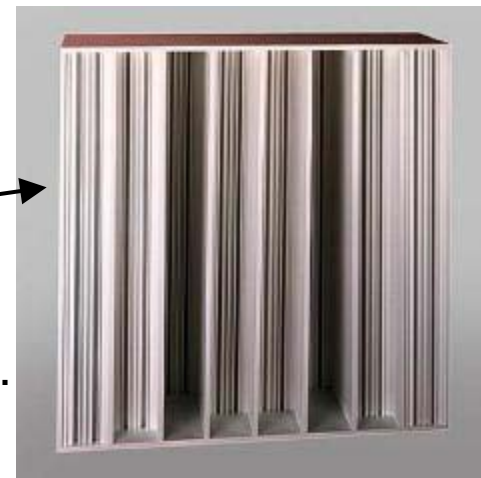
Difusor de madera

Difusor recubierto de absorbente alta frecuencia (Abfusor)



Trifusor: Elementos móviles con una cara absorbente, una difusora y una reflectante

Difusor fractal:
El difusor de media frecuencia incluye un difusor de alta frecuencia.



EJEMPLOS DE DIFUSORES

