

# ANÁLISIS Y DISEÑO DE DIFUSORES ACÚSTICOS

BONGIOVANNI PABLO<sup>1</sup>, CASCINO MARCELO<sup>1</sup> y SANSONO MARCO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Estudiante de Ingeniería Electrónica. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba (UTN. FRC).  
Maestro López esq. Cruz Roja Argentina, CP X5016ZAA, Córdoba, Argentina  
pabloabongiovanni@gmail.com; marcelosaul@hotmail.com; sansomarco@gmail.com

**Resumen** – La finalidad de acondicionar acústicamente un determinado recinto (cerrado o semicerrado) es lograr que el sonido proveniente de una o múltiples fuentes sea irradiado homogéneamente en todas direcciones logrando un campo sonoro difuso ideal. Esta uniformidad no siempre se consigue y se recurre a la acústica arquitectónica para intentar aproximarse al máximo a este ideal a través de ciertas técnicas que aprovechan las cualidades de absorción, reflexión y difusión de diversos materiales constructivos empleados en techos, paredes, suelos y de determinados objetos u otros elementos presentes en el recinto que pueden cambiar las condiciones acústicas del mismo. Como se mencionó anteriormente uno de los materiales utilizados en el acondicionamiento acústico de recintos son los difusores, es decir, elementos diseñados específicamente para dispersar en múltiples direcciones y de manera uniforme la onda sonora dentro de un recinto, minimizando el rebote, disminuyendo la reverberación, y generando así un sonido envolvente.

El objetivo de este trabajo es que se desarrollen los conceptos que permiten lograr la mejor percepción del sonido dentro de un recinto. Para ello, se estudiarán las características físicas del sonido y se profundizarán los conocimientos sobre difusores acústicos hasta poder lograr el diseño eficiente de los mismos.

## 1. INTRODUCCIÓN

El diseño acústico de cualquier tipo de recinto, una vez fijado su volumen y definidas sus formas, radica en primer lugar en la elección de los materiales más adecuados para utilizar como revestimientos del mismo con objeto de obtener tiempos de reverberación óptimos.

Además, dependiendo de qué tipo de espacios, resulta necesario potenciar la aparición de primeras reflexiones (es el caso de teatros y salas de conciertos) y/o conseguir una buena difusión del sonido (exclusivamente en el caso de salas de conciertos).

Cada uno de los diferentes tipos de materiales y elementos utilizados, produce principalmente uno de los siguientes efectos sobre la energía sonora [1]:

- ✓ **Absorción del sonido:** debida a la presencia de materiales absorbentes en el recinto, como elementos resonadores, el público y las sillas.
- ✓ **Reflexión del sonido:** debida a la existencia de elementos reflectores utilizados para la generación de reflexiones útiles hacia el área de audición.
- ✓ **Difusión del sonido:** debida a la presencia de elementos difusores utilizados para dispersar, de forma uniforme y en múltiples direcciones, la energía sonora incidente.

## 2. DIFUSIÓN DEL SONIDO

La difusión de sonido en un recinto se consigue mediante la colocación de elementos expresamente diseñados para dispersar, uniformemente y en múltiples direcciones, la energía sonora que incide sobre los mismos. El efecto producido por una onda sonora incidente sobre un material difusor es el mostrado en la figura 1:

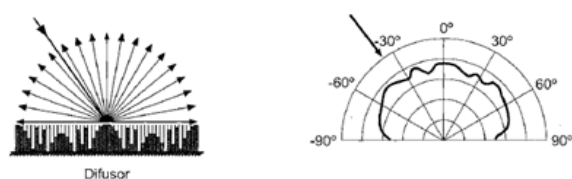


Figura 1: Difusión del sonido [1].

Podemos observar que hay elevada energía reflejada y está repartida en forma uniforme en todas las direcciones de reflexión.

La existencia de difusión de sonido en los recintos significa que la energía del campo reverberante llegará a los oídos de los espectadores por igual desde todas las direcciones del espacio. Ello contribuirá a crear un sonido altamente envolvente, y por lo tanto, a aumentar el grado de impresión espacial existente. Cuanto mayor sea el grado de impresión espacial, mejor será la calidad acústica del recinto en cuestión [1].

En ocasiones, la difusión también es utilizada para eliminar algunas de las anomalías que pueden aparecer en determinados recintos. Dichas anomalías

pueden aparecer de forma de coloraciones, desplazamiento de la fuente sonora, ecos, o focalizaciones del sonido.

Si bien cualquier superficie produce un cierto grado de difusión, la existencia de ornamentación, irregularidades y relieves en la superficie de una sala provoca un notable incremento de la difusión. Existen diferentes tipos de difusores contruidos a base de superficies irregulares, de acuerdo con secuencias matemáticas previamente fijadas. De todas formas, hay que tener presente que solo existe una optima difusión en una banda de frecuencias limitada, y que dicha banda depende de las dimensiones del difusor [1].

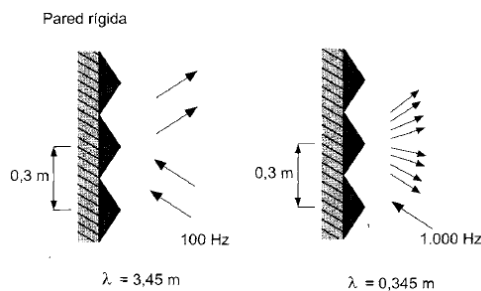


Figura 2: Difusión del sonido producida por un conjunto de pirámides contruidas a base de un material reflectante sobre una pared rígida

Se puede observar, en la Figura 2, que a la frecuencia de 100 Hz, las reflexiones generadas son especulares, es decir, a efectos de la onda sonora incidente es como si las pirámides no existiesen. Ello es debido a que la longitud de onda asociada es mucho mayor que la máxima dimensión de cada pirámide. A la frecuencia de 1000 Hz, el grado de difusión es manifiesto, ya que la máxima dimensión de cada pirámide es del mismo orden de magnitud que la longitud de onda [1].

### 3. HUYGENS

La construcción de Huygens en óptica, es una manera de explicar aproximadamente la dispersión del sonido en las superficies de difusión, en acústica. Si consideramos una superficie plana, como se ilustra figura 3 (a), cuando está sometida una fuente de sonido, un conjunto de fuentes secundarias se genera en la superficie. Cada una de estas fuentes secundarias, a su vez, irradian ondas. Al conectar los puntos en que estas ondas están en fase unas con otras, es posible visualizar las ondas que se reflejan desde la superficie. En esta situación, se genera una onda plana paralela la superficie. La superficie plana actúa como un espejo acústico, y la onda no se altera en la reflexión (excepto en su dirección). La figura 3 (b) muestra el caso de una superficie curva. En este caso, las ondas reflejadas son de forma semicircular. El frente de onda ha sido alterada por la superficie produciendo una dispersión de tal manera que el sonido se refleja en todas las direcciones, una característica deseable en un difusor [2].

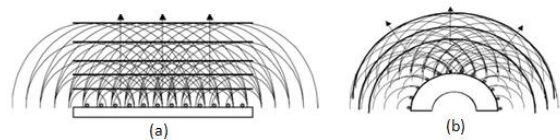
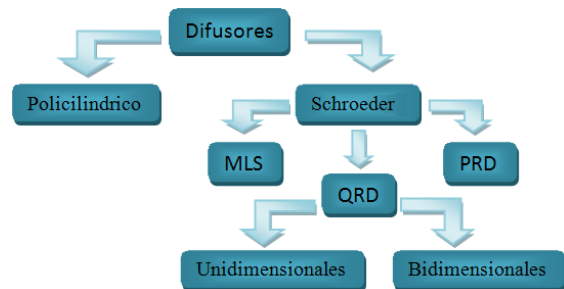


Figura 3: Construcciones Huygens para una onda plana reflejada sobre superficie plana (a) y una curva (b).

## 4. ELEMENTOS DIFUSORES

Los tipos más representativos de elementos difusores son:



### 4.1. Difusores policilindricos

Consisten en un conjunto de superficies lisas de forma convexa dispuestas secuencialmente y con un radio de curvatura inferior, a los 5 m, habitualmente, contruidos con madera. Las superficies convexas con un radio de curvatura superior a unos 5 m actúan como reflectores del sonido, es decir como si fuesen superficies planas. Al reducir el radio de curvatura por debajo de los 5 m, la zona de cobertura aumenta, y por la tanto, el nivel asociado a cada reflexión es menor [1].

El reflector se convierte en un difusor.

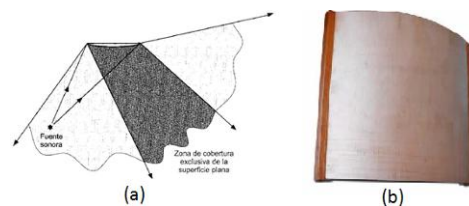


Figura 4: (a) Zonas de coberturas asociadas a un reflector plano y a una superficie convexa de un difusor policilindricos; (b) elemento difusor

### 4.2. Difusor de Schroeder

Aparte de las superficies irregulares y de los difusores policilindricos, existen una serie de elementos específicamente diseñados para actuar como superficies difusoras del sonido, en un margen de frecuencia determinado. Todos ellos se basan en distintas secuencias matemáticas previamente fijadas. Los difusores de este tipo, se denominan genéricamente RPG (Reflection Phase Grating). El elemento básico empleado en la construcción de los RPG es la madera [1]. Los tipos de difusores RPG más relevantes son:

#### 4.2.1. Difusores MLS

Los difusores MLS (Maximun Length Sequence) están basados en unas secuencias pseudoaleatorias periódicas, denominadas de longitud máxima, que solo pueden adquirir dos valores diferentes: -1 y +1.

El elemento difusor consiste en una superficie dentada. Se crea partiendo de una superficie lisa y reflectante, subdividiéndola en tramos de igual anchura, creando ranuras de igual profundidad. A cada tramo se le asigna un valor de la secuencia pseudoaleatoria, de acuerdo con el siguiente procedimiento (el proceso inverso es igualmente correcto) [1]:

- ✓ Si el valor es -1, el correspondiente tramo de la superficie queda inalterado
- ✓ Si el valor es +1, se crea una ranura en el espacio ocupado por el correspondiente tramo.

La anchura  $W$  de cada tramo y la profundidad  $d$  de cada ranura deben valer:

$$W = \lambda/2 \quad (1)$$

$$d = \lambda/4 \quad (2)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda correspondiente a la frecuencia de diseño del difusor.

A continuación se muestra el perfil de un difusor con la indicación de la dirección de la onda incidente y de las direcciones en las que la energía reflejada es máxima, y un diagrama de difusión de la frecuencia de diseño, es decir, la representación de la energía reflejada por el difusor en cada dirección del espacio y a cada frecuencia de interés.

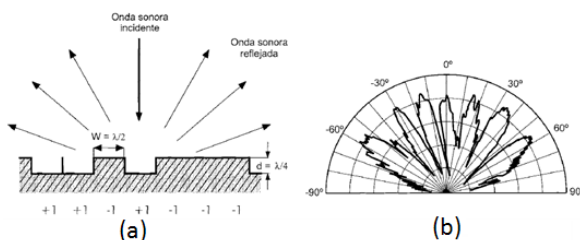


Figura 5: Difusores MLS (a) perfil de un difusor; (b) diagrama de difusión de la frecuencia de diseño [1].

El margen de frecuencias para el cual la difusión es óptima es únicamente del orden de una octava [1]. Tal circunstancia se puede comprobar observando el diagrama de difusión correspondiente a una frecuencia doble de la anterior:

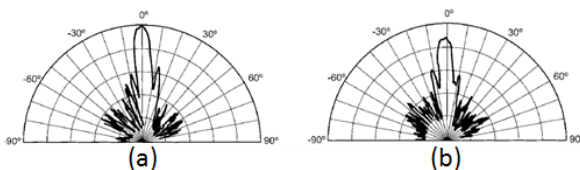


Figura 6: Diagrama de difusión, (a) difusor MLS a una frecuencia doble de la de diseño; (b) superficie plana y lisa [1]

Como se ve en la Figura 6 (a), la reflexión especular es claramente dominante y, por lo tanto, deja de existir difusión. De hecho, el diagrama obtenido es muy parecido al de la Figura 6 (b), correspondiente a una superficie lisa y plana [1].

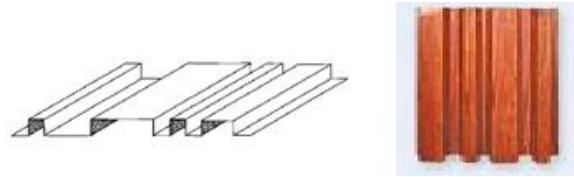


Figura 7: Difusores MLS en módulos.

#### 4.2.2. Difusores QRD

Existen dos tipos de difusores de residuos cuadráticos QRD (Quadratic-Residue Duffusor):

1. Unidimensionales
2. Bidimensionales

##### 4.2.2.1. Difusores unidimensionales QRD

Son los mas utilizados a nivel práctico, tanto en salas de conciertos como en estudios de grabacion. Consisten en una serie de ranuras paralelas de forma rectangular, de igual anchura y diferente profundidad. Generalmente, dichas ranuras estan separadas por unos divisores delgados y rigidos [1].

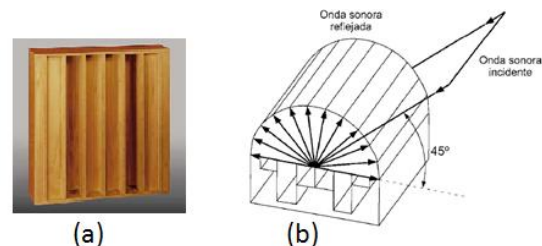


Figura 8: (a) Difusores unidimensionales QRD; (b) difusión de una onda sonora incidente con un ángulo de 45° respecto de su superficie [1]

La profundidad de cada ranura se obtiene a partir de una secuencia matemática prefijada dando lugar a estructuras repetitivas (periodicas) que producen, en un determinado margen de frecuencias, una dispersión o difusión del sonido incidente en planos perpendiculares a dichas ranuras [1]

La mencionada secuencia se obtiene a partir de la siguiente expresión generadora:

$$s_n = n^2 \text{ mod } p \quad (3)$$

Donde:

$p$  = numero primo (3, 7, 11, ...)

$n$  = numero entero que va desde 0 hasta  $p - 1$ .

$\text{mod}$  = operación matemática modulo, indicativa de que cada valor de  $s_n$  se obtiene como resto o residuo del cociente entre  $n^2$  y  $p$  (de ahí el nombre de difusor de residuos cuadráticos) [1].

La secuencia resultante es periodica de periodo  $p$ . A modo de ejemplo, en la tabla 1, se observan los

valores de un periodo  $p$  de la secuencia unidimensional de residuos cuadráticos  $s_n$  que se obtiene para  $p = 7$ .

$n$	0	1	2	3	4	5	6
$n^2$	0	1	4	9	16	25	36
$S_n = n^2 \bmod 7$	0	1	4	2	2	4	1

Tabla 1: Secuencia de residuos cuadráticos  $s_n$  para  $p = 7$

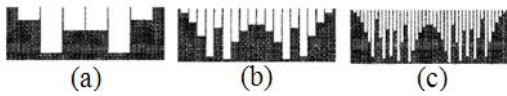


Figura 9: Perfiles correspondientes a un periodo de tres difusores unidimensionales QRD para: a)  $p = 7$ ; b)  $p = 19$ ; c)  $p = 43$

Se puede ver, que existe simetría dentro de cada periodo. La profundidad real de las ranuras se obtiene, en cada caso, multiplicando los valores de la secuencia adimensional por un determinado factor.

El diseño de este tipo de difusores se centra en la elección de un cierto número primo, una máxima profundidad de ranuras y una determinada anchura de las mismas. Con ello se logra una óptima difusión del sonido dentro de un determinado margen de frecuencias, que depende de la relación de ambas dimensiones. En efecto, la frecuencia más elevada, para la cual se produce difusión del sonido aumenta a medida que la anchura de las ranuras disminuye, en tanto la frecuencia más baja disminuye a medida que aumenta la máxima profundidad [1].

De todas formas existe un límite en cuanto al valor máximo de dicha relación, puesto que se ha podido comprobar que las ranuras estrechas y muy profundas producen un exceso de absorción acústica. Dicho límite lleva a que, en la práctica, el margen útil de frecuencias del difusor quede restringido a, aproximadamente, tres octavas. Fuera de dicho margen, el difusor tiende a comportarse como una superficie plana, dando lugar a reflexiones prácticamente especulares [1].

A modo de ejemplo del grado de difusión que se puede conseguir, se muestra la Figura 10:

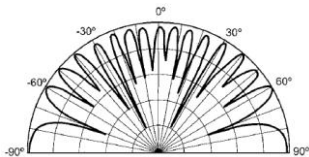


Figura 10: Diagrama de difusión de un difusor unidimensional QRD de un periodo con  $p = 23$

#### 4.2.2.2. Difusores bidimensionales QRD

Los difusores bidimensionales QRD aparecen como una generalización de los unidimensionales con el objetivo de obtener una óptima difusión del sonido incidente en todas las direcciones del espacio.

En este tipo de difusores, las ranuras son sustituidas por pozos dispuestos en paralelo, de

profundidad variable y de forma habitualmente cuadrada.

Los ángulos de difusión dejan de señalar direcciones de máxima energía reflejada en un mismo plano para indicar direcciones de máxima energía localizadas sobre una semisuperficie esférica.

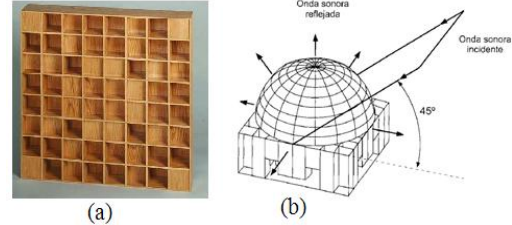


Figura 11: (a) Difusor bidimensional QRD; (b) difusión de una onda sonora incidente con un ángulo de  $45^\circ$  respecto de su superficie

La secuencia adimensional de profundidades de los pozos, correspondientes a los difusores bidimensionales, se obtiene a partir de la siguiente expresión generadora:

$$S_{m,n} = (m^2 + n^2) \bmod p \quad (4)$$

Donde:

$p$  = número primo (3, 7, 11, ...)

$m$  y  $n$  = números enteros que van desde 0 hasta  $p - 1$

A modo de ejemplo, se muestra la secuencia de la Tabla 2:

$m/n$	0	1	2	3	4	5	6
0	0	1	4	2	2	4	1
1	1	2	5	3	3	5	2
2	4	5	1	6	6	1	5
3	2	3	6	4	4	6	3
4	2	3	6	4	4	6	3
5	4	5	1	6	6	1	5
6	1	2	5	3	3	5	2

Tabla 2: Secuencia bidimensional, en 1 periodo, de los residuos cuadráticos  $S_{m,n}$  correspondientes para  $p = 7$  [1]

La profundidad real de las ranuras se obtiene multiplicando los valores de la secuencia adimensional por el mismo factor que en el caso de los difusores unidimensionales [1].

En la práctica este tipo de difusores QRD son relativamente poco utilizados.

#### 4.2.3. Difusores PRD

Los difusores de raíces primitivas PRD (Primitive-Root Diffusor) son análogos a los difusores unidimensionales QRD, con la única diferencia de que la profundidad de cada ranura se obtiene a partir de una secuencia generadora distinta, dicha secuencia se obtiene a partir de la siguiente expresión generadora:

$$S_n = g^n \bmod p \quad (5)$$

Donde:



$p$  = número primo (3, 7, 11, ...)  
 $g$  = raíz primitiva de  $p$   
 $n$  = número que va desde 1 hasta  $p - 1$   
 $mod$  = operación matemática modulo, que devuelve el residuo de la división de  $g$  entre  $p$ .

Para que  $g$  sea una raíz primitiva de  $p$  es preciso que el número de residuos distintos generados a través de la operación matemática anterior sea igual a  $p - 1$ .

La secuencia resultante es periódica y de periodo  $p - 1$ . A modo de ejemplo, se muestra la Tabla 3.

$n$	1	2	3	4	5	6
$g^n$	3	9	27	81	243	729
$S_n = g^n \bmod 7$	3	2	6	4	5	1

Tabla 3: Secuencia  $S_n$  correspondiente a un periodo para  $g = 3$  y  $p = 7$  [1]

En la Figura 12 observamos: (a) el perfil correspondiente a 2 periodos de un difusor PRD con  $g = 2$  y  $p = 11$ ; (b) un ejemplo, de un diagrama de difusión de un difusor PRD correspondiente al caso de incidencia normal (dirección de la onda sonora incidente perpendicular a la superficie del difusor).

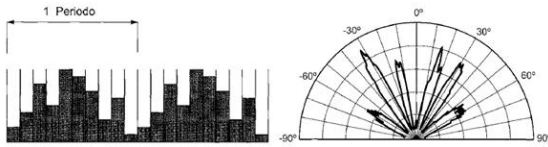


Figura 12: (a) Perfil de un difusor PRD con  $g = 2$  y  $p = 11$  (2 periodos) (b) Diagrama de difusión de un difusor PRD (incidencia normal) [1]

Analizando la Figura 12 (a) notamos que, a diferencia de lo que sucede con los difusores QRD, no existe simetría dentro de cada periodo.

Las propiedades de este tipo de difusores son muy parecidas a las de los difusores unidimensionales QRD, salvo por el hecho de que la energía asociada a la reflexión especular es muy baja, esto puede observarse en (b), donde la reflexión especular es, en efecto, prácticamente nula. Por ello se los hace aconsejables para ser utilizados como canceladores de ecos. Sin embargo, al igual que sucede con los difusores MLS y con los difusores bidimensionales QRD, los difusores PRD son escasamente utilizados en la práctica [1].

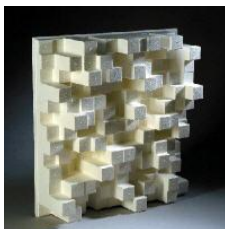


Figura 13: Imagen de un difusor PRD

Una vez analizados los tipos más representativos de los elementos difusores, en la Figura 14 se muestra a través de una construcción de Huygens, el efecto

causado por un difusor Schroeder; en esta situación, las fuentes secundarias tienen diferentes retardos (fases) a causa de las profundidades diferentes, y esto altera la onda reflejada, generando dispersión [2].

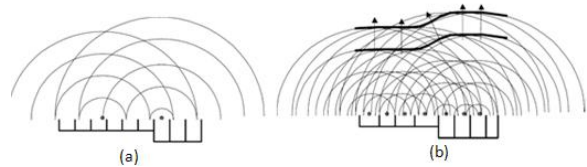


Figura 14: Construcciones Huygens para una onda plana reflejada por un difusor de Schroeder: (a) muestra los frentes de onda de dos ranuras, (b) frentes de onda de dos ranuras

En acústica, el diseñador tiene el control sobre las fases de las ondas sonoras. Para diseñar un difusor, se requiere de un método para determinar una secuencia apropiada, la profundidad y anchura de la ranura, para que genere una distribución de fase adecuada en la superficie del difusor.

## 5. FRENTE DE ONDA Y REFLEXIÓN DIFUSA

Aquí trataremos la forma de dispersar las reflexiones de los difusores. La Figura 15 (a) muestra una onda cilíndrica reflejada por una superficie plana y dura, (la longitud de onda es mucho menor que el ancho de la superficie). Se ha generado un impulso, y así un solo frente de onda cilíndrica se ve en el primer cuadro, que se desplaza de derecha a izquierda en dirección a la superficie. La onda se limita a cambiar de dirección en la reflexión, el viaje de vuelta es en dirección de reflexión especular, donde el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión (en este caso especial la onda regresa hacia la fuente). El frente de onda es reflejado sin modificaciones respecto del sonido incidente. En consecuencia, el sonido de la fuente se refleja hacia atrás, no se modifica, ni dispersa [2].

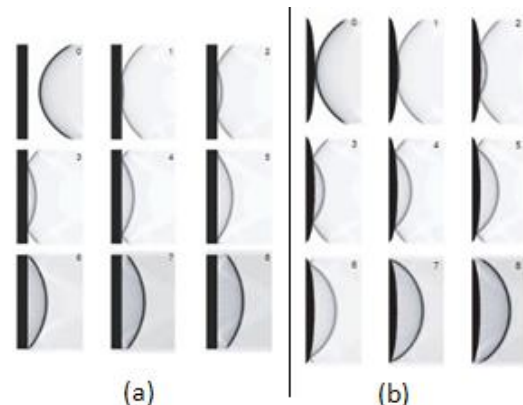


Figura 15: (a) Onda cilíndrica reflejada por una superficie plana, los números indican el orden de las reflexiones instantáneas; (b) Onda cilíndrica reflejada por una superficie curva.

La Figura 15 (b) muestra el efecto de cambiar la superficie para ayudar a dispersar las reflexiones. En este caso, se utiliza parte de una elipse. Se puede observar que el frente de onda reflejada es más

inclinado. El cambio no es grande, porque la curva de la elipse es muy suave, pero aun así, en el campo lejano el sonido será más espacialmente disperso. El frente de onda generado es todavía muy ordenado. Sin embargo, pese a que los semicilindros o elipses son buenos en la dispersión espacial, no son los mejores difusores, porque la dispersión temporal no se consigue [2].

En la Figura 16 se muestra el efecto de utilizar un difusor de Schroeder, el frente de onda reflejada es mucho más complejo que los ejemplos anteriores. El sonido puede ser analizado en el tiempo para ver el efecto de su dispersión dentro y fuera de las ranuras, lo que provoca que parte del frente de onda que se refleja se retrase. Las diferentes profundidades de las ranuras causan diferentes tiempos de retardo y la interferencia resultante entre las ondas reflejadas forma un patrón complejo [2].

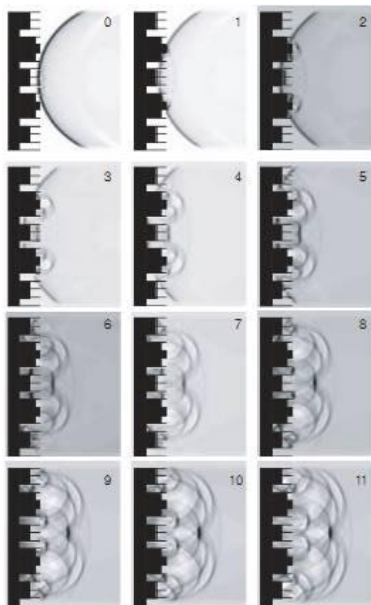


Figura 16: Onda cilíndrica reflejada por un difusor de Schroeder

Puede observarse que con la aplicación de los difusores Schroeder no solo se genera una dispersión espacial, sino también una dispersión temporal.

Cuando el sonido directo y el reflejo especular se combinan, forman un filtro de peine cuyo efecto se debe evitar en determinados recintos. El Filtro de Peine es la principal causa de coloración o modificación del sonido que percibimos cuando éste sufre reflexiones. La adición acústica de dos señales similares pero separadas ligeramente en tiempo produce una señal combinada que exhibe evidentes efectos de cancelación y refuerzo en bandas de frecuencias. Cuando el resultado de esta interacción acústica es mostrado en la pantalla de un analizador de espectro de alta resolución, el arreglo resultante de picos y valles tiene la apariencia de un peine, de ahí su nombre [8].

## 6. ESTUDIO Y DISEÑO DE DIFUSORES UNIDIMENSIONALES QRD

El principio de funcionamiento de este tipo de difusores está basado en el fenómeno de la interferencia entre ondas sonoras. Cuando dos ondas se superponen, las presiones sonoras instantáneas respectivas se suman. Si las ondas son iguales, es decir, tienen la misma amplitud y están en el mismo estado de vibración en cada instante de tiempo, la presión sonora total se dobla. Se dice que tiene lugar un fenómeno de interferencia constructiva. En cambio, si ambas ondas tienen la misma amplitud, pero signo opuesto, la presión resultante es nula, dando lugar a una interferencia destructiva [1].

La diferencia entre ambos casos extremos se explica por la denominada fase de las ondas sonoras. De forma simple, la fase indica el estado de vibración de una onda sonora en un instante cualquiera. En el primer caso, ambas ondas están en fase (diferencia de fase =  $0^\circ$ ), mientras que en el segundo están en oposición de fase (diferencia de fase =  $180^\circ$ ). En general, la diferencia de fase entre dos señales de igual frecuencia puede tener cualquier valor situado entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ . En cada caso, la presión sonora resultante tendrá un valor comprendido entre el doble de la correspondiente a una única onda sonora y cero.

En el caso del difusor unidimensional QRD, cuando una onda sonora con una dirección cualquiera incide sobre una de sus ranuras, ésta se propaga por su interior siguiendo un camino paralelo a las paredes de la ranura hasta alcanzar el fondo de la misma. En dicho instante, la onda se refleja y viaja en sentido contrario hasta alcanzar nuevamente el extremo superior de la ranura. La fase de dicha onda depende del camino total recorrido por la misma en el interior de la ranura, es decir de la profundidad de la ranura. Debido a que las ranuras tienen distintas profundidades, la fase de la señal asociada a cada una en el instante de la reflexión de la onda sonora incidente también será diferente, lo cual dará lugar a un fenómeno de interferencia entre todas las ondas que intervienen, como se muestra en la Figura 17:

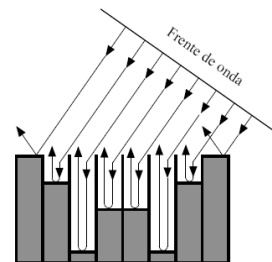


Figura 17: Caminos recorridos por una onda sonora en el interior de las ranuras de un difusor unidimensional QRD

La distribución de la energía reflejada por el difusor en las diferentes direcciones del espacio depende del tipo de interferencia que tenga lugar, es decir, de la secuencia de valores de las profundidades de las ranuras, bien sea en términos absolutos (en cm), o bien en términos relativos (secuencia adimensional) [1].

La secuencia adimensional de profundidades necesaria para conseguir que dicha distribución de energía reflejada sea lo más uniforme posible en

todas las direcciones del espacio y, por lo tanto, que el difusor unidimensional QRD actúe efectivamente como tal, se obtiene a partir de la expresión generadora (3).

En Tabla 4, se presenta el listado de valores de  $S_n$  correspondientes a los números primos comprendidos entre  $p = 3$  y  $p = 23$  (1 periodo).

$p \backslash n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
3	0	1	1																				
5	0	1	4	4	1																		
7	0	1	4	2	2	4	1																
11	0	1	4	9	5	3	3	5	9	4	1												
13	0	1	4	9	3	12	10	10	12	3	9	4	1										
17	0	1	4	9	16	8	2	15	13	13	15	2	8	16	9	4	1						
19	0	1	4	9	16	6	17	11	7	5	5	7	11	17	6	16	9	4	1				
23	0	1	4	9	16	2	13	3	18	12	8	6	6	8	12	18	3	13	2	16	9	4	1

Tabla 4: Secuencias de residuo cuadrático  $S_n$  correspondientes a los números primos comprendidos entre  $p = 3$  y  $p = 23$  (1 periodo)

En la figura 18, se muestran los perfiles correspondientes a las secuencias de la Tabla 4, poniéndose de manifiesto una de las propiedades más relevantes de este tipo de difusores: la simetría. Las líneas delgadas indican la existencia de elementos divisores entre ranuras.

A continuación se plantean dos posibles procedimientos de diseño de un difusor unidimensional QRD y se indican los pasos a seguir en cada caso.

Todas las expresiones presentadas a continuación están basadas en la hipótesis inicial de campo lejano, es decir, en que las distancias fuente sonora-difusor y difusor-receptor son grandes en comparación con la longitud de onda de la frecuencia de trabajo considerada. Esta hipótesis de partida se da en muchas situaciones reales y permite simplificar enormemente el complejo análisis matemático de la difusión.

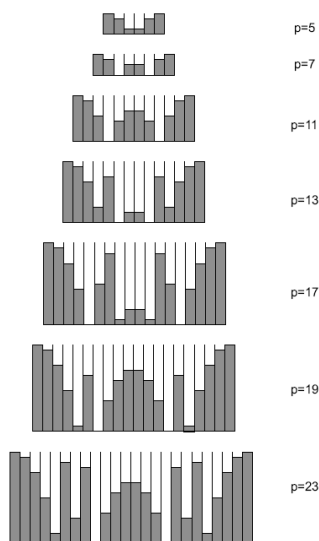


Figura 18: Perfiles asociados a las secuencias de residuo cuadrático  $S_n$  correspondientes a los números primos comprendidos entre  $p = 5$  y  $p = 23$  (1 periodo)

## 6.1. Procedimiento de diseño nº1

Objetivos de diseño:

- ✓  $f_{max}$  = frecuencia máxima para la cual se desea una óptima difusión.
- ✓  $f_o$  = frecuencia de diseño (frecuencia mínima para la cual se desea una óptima difusión).
- ✓  $m_{max}$  = orden o grado de difusión a la frecuencia  $f_o$  (número entero).

En relación con  $m_{max}$ , al fijar su valor se fija el número de direcciones ( $2m_{max} + 1$ ) para las cuales la energía reflejada tiene el mismo valor. Además, resulta que dicho valor es máximo debido a que se trata de direcciones para las que se produce una interferencia constructiva.

Los ángulos asociados a tales direcciones reciben el nombre de ángulos de difusión. Por otra parte, en todas aquellas direcciones próximas a las anteriores también existe radiación de energía. Sin duda, ello contribuye a una mayor difusión del sonido [1].

A modo de ejemplo, se muestra la Figura 19:

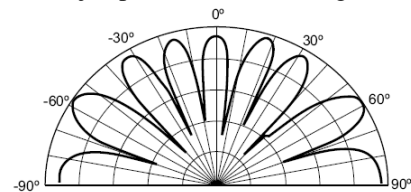


Figura 19: Diagrama de difusión, a la frecuencia de diseño  $f_o$ , correspondiente a un difusor unidimensional QRD de 1 periodo con  $p = 13$  y  $m_{max} = 4$

### 6.1.1. Determinación de la anchura de las ranuras W

La anchura de las ranuras está ligada exclusivamente a la  $f_{max}$  a través de la siguiente expresión:

$$W = \frac{c}{2f_{max}} - T \quad (6)$$

donde:

W = anchura de las ranuras (en mm).

c = velocidad de propagación del sonido (en mm/s).

T = espesor de los divisores (en mm)

Según se puede observar, cuanto mayor sea el valor elegido de la frecuencia  $f_{max}$ , más estrechas deberán hacerse las ranuras.

En cuanto al valor de T, éste debe ser lo menor posible a fin de producir una mínima alteración de las propiedades difusoras del elemento, si bien ello no significa que se pueda prescindir de los divisores.

En efecto, los divisores son imprescindibles con objeto de obligar a que cada onda sonora recorra la profundidad total de la correspondiente ranura, quedando así asegurada la validez de la teoría expuesta anteriormente. Sólo en el caso de incidencia perpendicular a la superficie del difusor (ángulo de

incidencia =  $0^\circ$ ), resulta innecesaria la existencia de divisores.

En la práctica  $T$  debe ser, como mínimo, 15 veces menor que  $W$ , si bien esta proporción debe ser incrementada a medida que  $p$  aumenta. Ello es lógico si se tiene en cuenta que  $p$  coincide con el número de ranuras por periodo: cuanto mayor sea  $p$ , más separadores existirán por periodo y mayor influencia tendrán en las características de difusión. Por ejemplo, para  $p = 53$  es preciso que  $T$  sea del orden de 30 veces menor que  $W$  para conseguir una óptima difusión. Los valores habituales de  $T$  se hallan comprendidos entre 1,5 y 5 mm. Los materiales utilizados para su construcción son el aluminio, en el caso de separadores delgados, y la madera cuando se trata de separadores más gruesos. Cuanto más delgados sean los separadores, mayor será la absorción a baja frecuencia [1].

Por otra parte, la expresión anterior se puede reescribir de la siguiente forma:

$$W + T = \frac{c}{2f_{max}} = \frac{\lambda_{min}}{2} \quad (7)$$

De su observación se desprende que la anchura total (ranura + separador) debe ser igual a la mitad de la longitud de onda correspondiente a la máxima frecuencia de difusión. De todas formas, si se pretende que la difusión también sea óptima para una incidencia rasante (dirección de la onda sonora prácticamente paralela a la superficie del difusor), dicha anchura total deberá ser la mitad de la anterior, es decir:

$$W + T = \frac{\lambda_{min}}{4} \quad (8)$$

### 6.1.2. Determinación del número de ranuras por periodo $p$

Una vez fijados los valores de  $f_{max}$ ,  $f_0$  y  $m_{max}$ , el valor de  $p$  se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$p = \frac{2f_{max} \cdot m_{max}}{f_0} \quad (9)$$

Según se puede ver, cuanto mayor sea el grado de difusión  $m_{max}$  deseado y/o el margen de frecuencias útiles requerido, mayor deberá ser el número de ranuras por periodo  $p$ . Otra interpretación es la siguiente: para un determinado margen útil de frecuencias, el hecho de aumentar  $p$  produce un aumento del grado de difusión  $m_{max}$  [1].

A modo de ejemplo, se muestra la Figura 20:

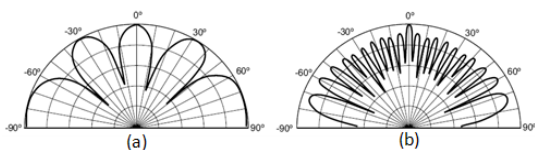


Figura 20: Diagramas de difusión, a la frecuencia de diseño  $f_0$ , correspondientes a 2 periodos de un difusor unidimensional QRD, con: a)  $p = 17$ ; b)  $p = 89$

Comparando ambos diagramas, se observa claramente el significativo aumento del número de lóbulos y, por tanto, de ángulos de difusión al pasar de  $p = 17$  a  $p = 89$ .

### 6.1.3. Determinación de la profundidad de las ranuras $d_n$

Una vez fijada la frecuencia de diseño  $f_0$  y determinado el valor de  $p$ , es posible calcular la profundidad real de cada ranura a partir de la siguiente expresión:

$$d_n = \frac{S_n \cdot c}{2pf_0} \quad (\text{en cm}) \quad (10)$$

Donde  $c$  se expresa en  $\text{cm/s}$ , y  $S_n$  es la secuencia generadora adimensional definida anteriormente.

Por lo tanto, el factor por el cual se debe multiplicar cada valor  $S_n$  para obtener el correspondiente valor de  $d_n$  es:

$$\frac{c}{2pf_0} \quad (11)$$

Además, al ser  $S_n$  periódica y de periodo  $p$ , también lo es la secuencia de profundidades  $d_n$ .

Por otra parte, la expresión correspondiente a la máxima profundidad  $d_n(\text{max})$  es la siguiente:

$$d_n(\text{max}) = \frac{S_n(\text{max}) \cdot c}{2pf_0} \quad (\text{en cm}) \quad (12)$$

Siendo  $S_n(\text{max})$  el número mayor de la secuencia generadora  $S_n$ .

En este punto conviene señalar que, de acuerdo con la expresión anterior, una vez fijado  $p$  y por tanto  $S_n(\text{max})$ , siempre que se pretenda disminuir la frecuencia  $f_0$  será preciso aumentar la máxima profundidad  $d_n(\text{max})$  de las ranuras [1].

## 6.2. Procedimiento de diseño nº2

Objetivos de diseño:

- ✓  $f_{max}$  = frecuencia máxima para la cual se desea una óptima difusión.
- ✓ Obtención de la mínima frecuencia de diseño  $f_0$  posible.

Además, se parte de un valor prefijado de la máxima profundidad de las ranuras  $d_n(\text{max})$  [1].

### 6.2.1. Determinación de la anchura de las ranuras $W$

Se sigue el mismo procedimiento anterior.

### 6.2.2. Determinación del número de ranuras por periodo $p$



El número de ranuras por periodo será, preferentemente, uno de los dos siguientes:

$$\begin{aligned} p &= 7 \\ p &= 23 \end{aligned}$$

Seguidamente se expone el motivo de dicha elección.

La expresión correspondiente a la frecuencia  $f_0$ , obtenida de la ecuación (12), es la siguiente:

$$f_0 = \frac{S_n(max)}{p} \frac{c}{2d_n(max)} \quad (13)$$

Por lo tanto, dado que el valor de  $d_n(max)$  está prefijado, se trata de ver para qué valor de  $p$  el cociente  $S_n(max)/p$  es mínimo, ya que entonces  $f_0$  también será mínima.

Como cuestión previa, es preciso comentar que, para cada secuencia considerada,  $S_n(max)$  aumenta con  $p$ . Para comprobar la veracidad de dicha afirmación basta con observar los valores de las secuencias de la Tabla 4. Por ejemplo, para:

$$\begin{aligned} p &= 3 \rightarrow S_n(max) = 1 \\ p &= 13 \rightarrow S_n(max) = 12 \\ p &= 23 \rightarrow S_n(max) = 18 \end{aligned}$$

En cuanto a  $S_n(max)/p$ , en la Figura 21 se muestran los valores de dicho cociente para valores de  $p$  comprendidos entre 5 y 43.

Según se observará, el valor buscado es  $p = 7$ , ya que para dicho valor,  $S_n(max)/p$  es mínimo y, por tanto, la frecuencia  $f_0$  también lo es.

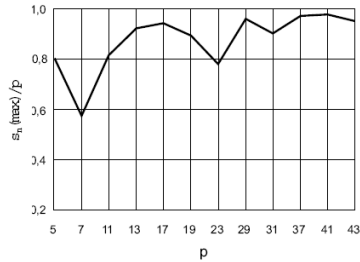


Figura 21: Gráfica de valores de  $S_n(max)/p$  para valores de  $p$  comprendidos entre 5 y 43

Sin embargo, el hecho de que tanto  $p$  como  $f_0$  tengan valores bajos implica que el grado de difusión no será óptimo. Ello se puede verificar recordando que:

$$p = \frac{2f_{max} \cdot m_{max}}{f_0} \quad (14)$$

El valor de  $m_{max}$  (orden o grado de difusión) calculado a partir de dicha expresión es, en efecto, relativamente bajo.

Si se pretende conseguir una mayor difusión, es preciso elegir un valor de  $p$  más elevado.

Ahora bien, si al mismo tiempo se establece como objetivo no incrementar de forma excesiva la frecuencia  $f_0$ , resulta necesario escoger el valor

$p = 23$ , ya que para dicho valor la curva  $S_n(max)/p$  presenta un mínimo relativo.

Por consiguiente, el valor  $p = 7$  se escogerá en el caso de que sea prioritaria la obtención de una frecuencia  $f_0$  mínima, mientras que el valor  $p = 23$  se reservará para aquellos casos en que prevalezca el objetivo de conseguir una máxima difusión del sonido, sin incrementar excesivamente el valor de  $f_0$  [1].

## 7. PROPIEDADES DE LOS DIFUSORES UNIDIMENSIONALES QRD

### 7.1. Influencia del número de periodos en el grado de difusión del sonido

Como se ha comentado anteriormente, en las direcciones próximas a las de máxima radiación también existe una cierta radiación de energía. Ahora bien, se puede demostrar que cuanto mayor sea el número de periodos considerado, mayor será la concentración de energía alrededor de los ángulos de difusión o de máxima radiación y, por lo tanto, menor el grado de difusión obtenido. En el caso teórico límite de un difusor con un número infinito de periodos, solamente existiría energía reflejada en las direcciones correspondientes a los ángulos de difusión.

A modo de ejemplo ilustrativo, se muestra la Figura 22:

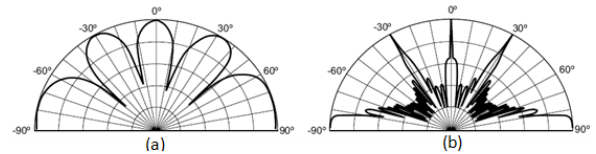


Figura 22: Diagramas de difusión, a la frecuencia de diseño  $f_0$ , correspondientes a un difusor unidimensional QRD con  $p = 17$ , de longitud: a) 2 periodos; b) 25 periodos

Se observa que, efectivamente, al pasar de 2 a 25 periodos tiene lugar un estrechamiento de los lóbulos de radiación alrededor de los ángulos de difusión y, por consiguiente, la difusión es menor.

De lo anterior se desprende que, para un cierto valor de  $p$ , cuanta mayor superficie se precise para proporcionar difusión del sonido en una determinada sala, más periodos serán necesarios y, por lo tanto, menor difusión se podrá conseguir [1].

### 7.2. Comportamiento de los difusores en función de la frecuencia

El grado de difusión  $m_{max}$  proporcionado por los difusores a la frecuencia de diseño  $f_0$  se va incrementando a todas las frecuencias múltiplos de  $f_0$  situadas por debajo de la frecuencia  $f_{max}$ .

El correspondiente incremento es el siguiente:

Para:

$$f = nf_0 \text{ (con } f \leq f_{max}) \rightarrow m'_{max} = nm_{max}$$

Donde  $n$  es un número entero (1, 2, 3...).

Por ejemplo, si  $m_{max} = 2$ , el número de ángulos de difusión a la frecuencia  $f_0$  es:

$$(2m_{max} + 1) = 5$$

A la frecuencia  $2f_0$ , dicho número pasará a ser:

$$f = 2f_0 \rightarrow m'_{max} = 2m_{max} = 4 \rightarrow (2m'_{max} + 1) = 9$$

Mientras que a la frecuencia  $4f_0$ :

$$f = 4f_0 \rightarrow m'_{max} = 4m_{max} = 8 \rightarrow (2m'_{max} + 1) = 17$$

En la figura 23 se muestran los diagramas de difusión correspondientes a las frecuencias  $f_0$ ,  $2f_0$  y  $4f_0$  de un difusor de 2 periodos y  $p = 23$ .

Se observa que, efectivamente, tiene lugar el mencionado incremento de difusión con la frecuencia.

Afortunadamente, en la práctica, las propiedades de difusión también se mantienen para el resto de frecuencias comprendidas entre  $f_0$  y  $f_{max}$ , aunque no sean múltiplos de  $f_0$ . Tal circunstancia permite garantizar una correcta difusión en todo el margen útil de frecuencias comprendido entre  $f_0$  y  $f_{max}$  [1].

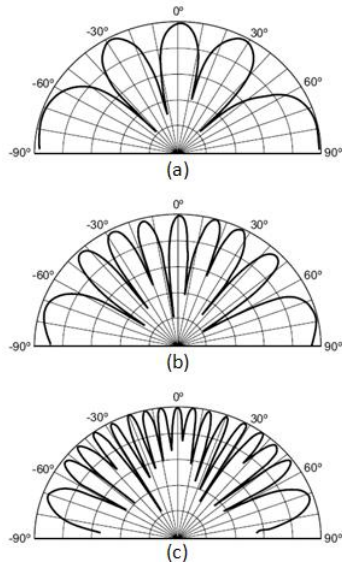


Figura 23: Diagramas de difusión correspondientes a 2 periodos de un difusor unidimensional QRD con  $p = 23$ , a las frecuencias: a)  $f_0$ ; b)  $2f_0$ ; c)  $4f_0$

Por otra parte, si bien los diagramas de difusión se pueden obtener para cualquier frecuencia comprendida dentro de dicho margen útil, en ocasiones resulta conveniente disponer de los diagramas asociados a las bandas de frecuencias de octava situadas dentro del mencionado margen, de la misma manera que se dispone de los coeficientes de absorción de los materiales absorbentes por bandas de octava.

En general, los diagramas así calculados resultan más regulares que los correspondientes a frecuencias individuales, ya que se obtienen como promedio energético de los asociados a las frecuencias comprendidas dentro de cada banda.

A modo de ejemplo, se muestran las Figuras 24 y 25. La banda útil del difusor está comprendida entre 1000 y 5750 Hz.

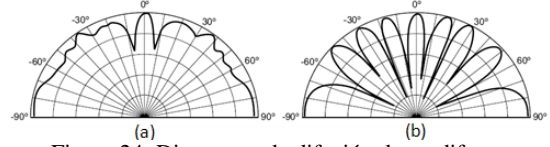


Figura 24: Diagramas de difusión de un difusor unidimensional QRD de 2 periodos y  $p = 23$ , correspondientes a: a) banda de frecuencias de octava centrada en 2 kHz; b) frecuencia de 2 kHz

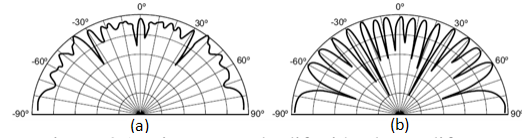


Figura 25: Diagramas de difusión de un difusor unidimensional QRD de 2 periodos y  $p = 23$ , correspondientes a: a) banda de octava centrada en 4 kHz; b) frecuencia de 4 kHz

En ambos casos resulta evidente la suavización de los diagramas asociados a las dos bandas de octava en comparación con los correspondientes exclusivamente a las frecuencias centrales de cada banda [4].

### 5.3 Margen útil de frecuencias

De lo expuesto hasta ahora es posible concluir que el margen de frecuencias dentro del cual la difusión es óptima (entre  $f_0$  y  $f_{max}$ ) viene determinado por la relación entre la máxima profundidad  $d_n(max)$  de las ranuras y la anchura  $W$  de las mismas:

$$\text{margen útil de frecuencias} \propto \frac{d_n(max)}{W}$$

En efecto, la frecuencia más elevada  $f_{max}$  para la cual se produce difusión del sonido aumenta a medida que la anchura  $W$  de las ranuras disminuye, en tanto que la más baja  $f_0$  disminuye a medida que aumenta la máxima profundidad  $d_n(max)$ .

De todas formas, existe un límite en cuanto al valor máximo de dicha relación, puesto que se ha podido comprobar que las ranuras estrechas y muy profundas producen un exceso de absorción acústica. Dicho límite lleva a que, en la práctica, el margen útil de frecuencias del difusor quede restringido a, aproximadamente, tres octavas, es decir:

$$\frac{f_{max}}{f_0} \leq 8$$

Fuera de dicho margen el difusor tiende a comportarse como una superficie plana, dando lugar a reflexiones prácticamente especulares [1].

## 8. DIFUSORES HIBRIDOS

Otra manera de formar un difusor es combinar la reflexión y absorción. Al construir los fondos de las ranuras de material absorbente, no habrá reflejos en estas partes de la superficie difusora, y la dispersión que se genera se muestra en Figura 26. Sin embargo, la dispersión temporal no es tan grande como la generada por difusores Schroeder. Este enfoque forma una superficie híbrida, que en parte absorbe y en parte difunde la energía sonora. Estos tipos de superficies híbridas causan absorción parcial y al mismo tiempo una dispersión, por lo que necesitan para ser utilizadas en el control de la reverberación [2].

La construcción de una superficie híbrida se muestra en la Figura 27. Consiste en un trozo de absorbentes acústicos cubierto con una máscara perforada, a continuación, la máscara se oculta a la vista por una fina pieza de tela acústicamente transparente. Donde hay agujeros en la máscara, la absorción se genera, donde el sonido llega a una parte sólida de la máscara, se produce la reflexión. Se forma, entonces, una superficie que absorbe parcialmente, y cualquier energía reflejada se difunde por la disposición al azar de los agujeros. La clave para una buena dispersión es la disposición de los agujeros, que se realiza por una secuencia aleatoria [3].

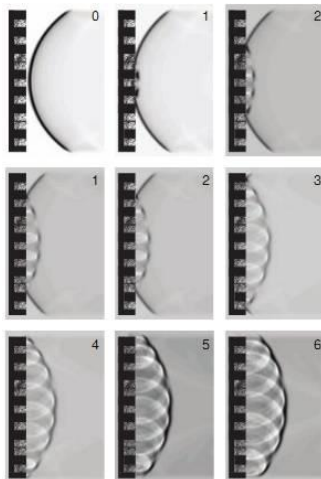


Figura 26: Onda cilíndrica reflejada en una superficie cuyas ranuras contienen material absorbente.

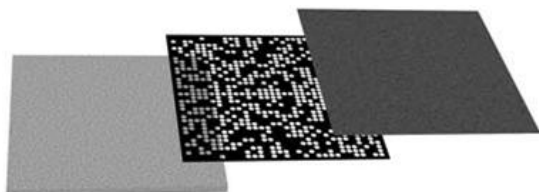


Figura 27: La construcción de una superficie híbrida: poroso absorbente (la izquierda), la máscara (centro), y el paño transparente (derecha)

## 9. CONCLUSIÓN

Los difusores acústicos son una herramienta muy importante en los tratamientos ó acondicionamientos

acústicos de recintos, pues permiten redistribuir la energía acústica homogéneamente dentro del recinto previniendo focalizaciones, dispersando los rayos sonoros tempranos en múltiples direcciones, incrementa la inteligibilidad de la palabra, enriquece al máximo el material sonoro, minimiza la distorsión acústica que pueden introducir los recintos sobre el sonido, etc.

Si bien en este estudio se analizan los difusores acústicos, también se presentan características y funcionamiento de otros elementos acústicos, como materiales absorbentes y superficies reflectantes. Cabe destacar que los difusores acústicos tienen cierta ventaja sobre los otros materiales mencionados: no se pierde energía sonora, por el contrario se re-irradia en diferentes direcciones. Además, existe una gran variedad de difusores, los cuales proveen diferentes resultados, no siendo mejor uno que otro, sino que cada uno es apropiado para fines determinados.

Por último se mencionan algunos beneficios que se obtienen al utilizar difusores acústicos, a partir del análisis subjetivo considerando dos actores diferentes:

- ✓ *Ejecutantes o locutores:* estos podrán expresarse apropiadamente debido a que el sonido estará correctamente distribuido dentro del recinto y se minimizará el estrés o cansancio de tener que hablar, principalmente por no tener que esforzarse para utilizar altos niveles sonoros.
- ✓ *Oyentes o Audiencia:* Percibirán una imagen sonora de mayor espacialidad y envolvimiento debido a que los recintos aportarán una mejora al sonido reproducido en ellos, significando esto un mayor aprovechamiento y enriqueciendo percepción sonora.

## 10. REFERENCIAS

- [1] Antoni Carrión Isbert. “*Diseño acústico de espacios arquitectónicos*”. Primera edición 1998.
- [2] Cox, T.J., and D’Antonio. “*Acoustic absorbers and diffusers: theory, design, and application*”. Segunda edición. Taylor & Francis Editorial, 2009.
- [3] Angus J.A.S., “*Sound diffusers using reactive absorption grating*”, Proceedings of the 98<sup>th</sup> Convention Audio Engineering Society, 1995.
- [4] Schroeder M.R.: “*Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls: More lateral sound diffusion*”, J. Acoustical Society of America 65 (4), Apr. 1979.
- [5]<http://es.scribd.com/doc/17846889/RPGs-QRDs-Acoustic-Diffusers>
- [6]<http://www.ingenieriadesonido.com/upload/Probemas de los Difusores Acústicos Numericos.pdf>
- [7] Wikipedia, Online enciclopedia. <http://es.wikipedia.org/wiki/Difusor>.
- [8]<http://www.difusoresacusticos.com.ar/index.html>

## 11. DATOS BIOGRÁFICOS

**Pablo Ariel Bongiovanni**, nacido en Las Varillas el 11/11/1985. Estudiante de ingeniería en electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Argentina. Actualmente trabaja en Policía de la Provincia de Córdoba, perteneciente al cuerpo técnico de la misma. Sus intereses son: Electroacústica y acústica de recintos. E-mail: pabloabongiovanni@gmail.com.

**Marcelo Saúl Cascino**, nacido en Realicó (La Pampa) 23/03/1983. Estudiante de ingeniería en electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Argentina. Sus intereses son: Electroacústica y acústica de recintos. E-mail: marcelosaul@hotmail.com.

**Marco Sansó**, nacido en Córdoba el 03/04/1984. Estudiante de ingeniería en electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Argentina. De Junio del 2008 a diciembre del 2008 fue becario de investigación y desarrollo en el Centro Universitario de Desarrollo en Automación y Robótica (CUDAR), Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Actualmente trabaja en forma independiente en Reparación de PC y Redes Informáticas. Sus intereses son: Electroacústica y acústica de recintos. E-mail: sansomarco@gmail.com