



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**ELECTRICA – INSTRUMENTACIÓN**

DESARROLLO DE MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE DISPERSIÓN DE UN DIFUSOR  
ACÚSTICO EN CÁMARA ANECOICA

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
MACIAS PADILLA VANYER DANAE

TUTOR PRINCIPAL  
SANTIAGO JESUS PEREZ RUIZ  
CCADET-UNAM

MÉXICO, D. F. MARZO 2014



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Orduña Bustamante Felipe  
Secretario: Dr. Pérez Matzumoto Andrés Esteban  
Vocal: Dr. Pérez Ruiz Santiago Jesús  
1<sup>er.</sup> Suplente: Dra. Padilla Ortiz Ana Laura  
2<sup>d o.</sup> Suplente: Dr. Cordourier Mauri Héctor Alfonso

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: NOMBRE DEL LUGAR

**TUTOR DE TESIS:**

SANTIAGO JESUS PEREZ RUIZ

-----  
**FIRMA**

## AGRADECIMIENTOS

A mis padres, hermanos y sobrinos por la confianza y el gran apoyo que siempre me brindan. Por sus consejos, por los buenos momentos que me hicieron desprenderme de los nervios y sobre todo por el impulso que me dan para seguir adelante, haciendo lo mejor posible en mi vida personal y profesional. Gracias por ayudarme y enseñarme a luchar por lo que se quiere.

A ti Rodrigo, gracias por tu comprensión, amor, alegría, apoyo, pero sobre todo por creer en mí y permitirme dar un paso más académicamente. Compartido este logro con la Familia Vázquez Santiago a los cuales también les doy las gracias por los buenos momentos, cariño, apoyo y consejos que me han dado a lo largo de este tiempo.

A mi Tutor Santiago Pérez por su tiempo, ayuda y dedicación para la culminación de este proyecto de tesis.

Al Laboratorio de Acústica del CCADET, que los constituyen doctores, maestros y compañeros, gracias por esas divertidas pláticas en la comida y por el apoyo que siempre me brindaron. Gracias a cada uno de ustedes, me llevo buenos recuerdos y amigos entrañables

Agradezco a la División de Vibraciones y Acústica del Centro Nacional de Metrología, por sus enseñanzas y por su hospitalidad durante mi estancia académica. Ya que fueron parte fundamental y primordial en la realización de mi proyecto experimental.

Por último y no por eso menos importante al CONACyT, por la beca otorgada, la cual ayudo en gastos durante la maestría, en la estancia académica y los viajes al CENAM.

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>CAPITULO I.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	3
1.1.-DIFUSOR ACÚSTICO	5
1.1.1.- DIFUSORES QRD UNIDIMENSIONAL	6
1.2.-RESPUESTA AL IMPULSO	8
1.2.1.-INDICES ACÚSTICOS	9
1.3.-METODOS PARA OBTENER EL COEFICIENTE DE DISPERSIÓN	11
1.3.1.-METODO DE CAMPO LIBRE	11
1.3.1.1.-METODO DE SUSTRACCIÓN	11
1.3.1.2.-METODO DE SUSTRACCIÓN EN DIFUSORES ACÚSTICOS	13
1.3.2.-METODO DE CAMARA REVERBERANTE	15
1.4.-DIFUSIÓN	17
1.4.1.-COEFICIENTE DE DIFUSIÓN	18
<b>CAPITULO II.- INSTRUMENTACIÓN ACÚSTICA</b>	19
2.1.- DISEÑO DEL DIFUSOR ACÚSTICO UNIDIMENSIONAL	20
2.2.- DISEÑO DEL GONIOMETRO ACÚSTICO	23
2.3.- MÉTODO DE CAMPO LIBRE - CÁMARA ANECOICA	25
2.3.1.- INSTRUMENTACION COMPLEMENTARIA	26
<b>CAPITULO III.- RESULTADOS</b>	36
3.1.- RESULTADOS EXPERIMENTALES	38
3.1.1.- FUNCIÓN TIEMPO	38
3.1.2.- FUNCION RESPUESTA AL IMPULSO	40
3.1.3.- FUNCION RELACION SEÑAL A RUIDO	43
3.2.- COMPARACIÓN TEÓRICO-EXPERIMENTAL	43
3.2.1. PATRON DE DIFUSIÓN	43
3.2.2. COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DIRECCIONAL	44
<b>CAPITULO IV.- CONCLUSION</b>	46
<b>REFERENCIAS</b>	49
<b>APENDICES</b>	53
APENDICE A	54
NORMA ISO-354, MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN EN CÁMARA REVERBERANTE	
APENDICE B	54
NORMA ISO 3741, DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE SONIDO DE LA FUENTE POR MÉTODOS DE PRECISIÓN POR EL ANCHO DE BANDA DE LA FUENTE EN UNA CÁMARA REVERBERANTE	
APENDICE C	55
NORMA ISO-18233, APLICACIÓN ACÚSTICA DE NUEVOS MÉTODOS DE MEDICIÓN EN EDIFICIOS Y SALAS ACÚSTICAS	
APENDICE D	55
NORMA ISO 17497, “METODO DE MEDICIÓN PARA CUANTIFICAR LAS PROPIEDADES DE LA DISPERSIÓN DEL SONIDO EN SUPERFICIES”	

APENDICE E.- PROGRAMAS EN MATLAB	57
CALCULOS TEÓRICOS DEL DIFUSOR SCHROEDER QRD UNIDIMENSIONAL	59
PROCESAMIENTO DE DATOS PARA LA FUNCIÓN DE PRESIÓN DEL SOFTWARE/HARDWARE PULSE	60
PROCESAMIENTO DE DATOS PARA LA FUNCIÓN RESPUESTA IMPULSO DEL SOFTWARE/HARDWARE PULSE	62
PROCESAMIENTO DE DATOS PARA LA FUNCIÓN RELACIÓN SEÑAL A RUIDO DEL SOFTWARE/HARDWARE PULSE	69
OBTENCION DE DATOS DEL ARCHIVO BKFILENAMES GENERADO EN PULSE PARA MATLAB	70
FUNCION GETPULSEASCIIFILE PARA BKFILENAMES	72
<b>ANEXOS</b>	75
CONSTANCIA DEL CURSO PULSE	76
CARTA DE INICIO DE ESTANCIA EN CENAM	77
CARTA DE TERMINO DE ESTANCIA EN CENAM	78

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo teórico-experimental tiene como principal objetivo la caracterización de un difusor acústico, el cual tiene como función difundir el sonido de manera homogénea dentro de un recinto. Dado que en México todavía no es muy común la implementación de este elemento en auditorios, salas de conciertos, teatros, etc., es importante impulsar la investigación sobre el comportamiento de este elemento, no sólo para dar a conocer mayor información de sus uso en la acústica arquitectónica, sino también para conocer y poner en práctica sus beneficios principales tales como mejora la calidad de la acústica del recinto, eliminación de ecos “flutter”, sin reducir la reverberación dentro de dicho recinto.

Este trabajo de instrumentación a nivel maestría fue desarrollado en el Laboratorio de Acústica y Vibraciones del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET-UNAM), teniendo una colaboración de vital importancia en la parte experimental, la División de Vibraciones y Acústica del Centro Nacional de Metrología (CENAM-DVA), ubicado en el estado de Querétaro, colaborando con equipo no existente en el Laboratorio de Acústica del CCADET así como con su infraestructura para las mediciones experimentales.

Cabe señalar que gracias al apoyo del CENAM, se acreditó un curso certificado para el uso y manejo del sistema de adquisición de datos multicanal con captación simultánea llamado PULSE; realizando tiempo después una estancia académica durante dos semanas, para conocer a fondo el uso y manejo del sistema.

En esta tesis se explica a detalle la evaluación de un difusor acústico unidimensional, mediante lineamientos de las normas Internacionales, como la norma ISO 17497-2, que se utiliza en campo libre, la norma ISO 17497-1, que se utiliza en cámara reverberante, utilizando para ello, el sistema PULSE, para obtener el coeficiente de difusión, realizando la parte experimental de este trabajo en la Cámara Semi-anecoica del CENAM.

Los parámetros de difusión, se pueden obtener mediante métodos de predicción y el coeficiente de difusión, basados en una respuesta al impulso, que permite obtener parámetros de difusión acústica. Para lo anterior es necesario un ambiente controlado para su análisis. La norma ISO 17497-1, describe un procedimiento en cámara reverberante, sin embargo este fue descartado debido a que su realización lleva un tiempo aproximado de medición de dos meses, que en comparación con el método en campo libre (norma ISO 17497-2), se puede realizar la medición en una semana, por lo cual se procedió con este último método para la experimentación.

Siendo parte esencial del trabajo, la estandarización de la caracterización del difusor acústico, con la norma ISO 17497-2, la cual define la medición del coeficiente direccional de difusión en campo libre, teniendo que medir principalmente la respuesta al impulso del sistema de medición, rotando angularmente el difusor de 0 a 180° a cada 5°, excitando la medición con un barrido senoidal tal como lo dicta la norma. Posteriormente, los datos adquiridos experimentalmente fueron procesados con programas hechos en Matlab.

Este trabajo escrito está dividido en cuatro capítulos, siendo el capítulo I el que explica el sustento teórico e información necesaria para el posterior desarrollo de esta tesis.

En el capítulo II, es expuesto el diseño del difusor acústico de tipo unidimensional a escala, construido de triplay en el taller del CCADET, con un intervalo de frecuencias de 500 a 3500 Hz en su funcionamiento acústico. Con la finalidad de tener un mayor control de movimiento, se diseñó para que fuera ligero y con dimensiones físicas relativamente pequeñas para el traslado a los laboratorios en donde se realizaron los experimentos.

Para la agilización de las mediciones, fue de gran ayuda el empleo de un goniómetro acústico, el cual se diseñó de manera estratégica con una forma semi-circular, para un arreglo de 37 micrófonos, el cual contempla una posición angular de 0 a 180°. Cabe resaltar, que se buscó que la estructura del goniómetro fuera lo más rígida posible para soportar el arreglo de micrófonos en su periferia, pero por otra parte lo suficientemente flexible para poder obtener la forma semi-circular deseada. Resaltando que este ha sido el primer goniómetro acústico que se desarrolla para una medición de este tipo en México y la primera vez que se aplica la norma en el país para la obtención de parámetros de difusión acústica.

La caracterización del difusor acústico unidimensional fue realizada en mayo del año 2013, en el CENAM-DVA, con el sistema PULSE y la Cámara Semi-anecoica para dicho propósito. Para el análisis del difusor acústico unidimensional, es importante destacar que los datos adquiridos de las mediciones fueron obtenidas a partir del método de campo libre para la obtención del coeficiente de difusión, para posteriormente ser procesadas en el Laboratorio de Acústica del CCADET. Dando a conocer también en este capítulo, la instrumentación utilizada para las mediciones necesarias, explicando a detalle la configuración del sistema PULSE, obteniendo en este capítulo los resultados teóricos.

En el capítulo III, se exponen los resultados experimentales, obtenidos mediante el procesamiento de datos con el software PULSE y Matlab. Los resultados experimentales, son comparados con los resultados teóricos obtenidos en el capítulo II.

Por último, esta tesis es finalizada con una conclusión en base a los resultados teóricos-experimentales aplicando el método de campo libre, seguida de una serie de apéndices, donde se encuentran las normas acústicas utilizadas, resumidas y aplicadas en este proyecto. Igualmente se incluye la programación utilizada para el procesamiento de datos en Matlab, cerrando con documentos que sirven avalan la estancia académica y el curso para el manejo del sistema PULSE en el CENAM.

The page features a decorative graphic consisting of three green circles of varying sizes, each containing three concentric white circles. These circles are arranged vertically and are connected by thin, light gray lines that form a V-shape, pointing downwards. The circles are positioned in the upper and lower right areas of the page.

# CAPITULO

## I

“FUNDAMENTOS TEÓRICOS”

El sonido que se escucha en la mayoría de los recintos, como una combinación del sonido que proviene proveniente de las fuentes y sus reflejos provenientes de las superficies de las paredes y otros objetos dentro del recinto. El sonido que incide en una superficie se transmite, se absorbe o se refleja. El sonido reflejado puede ser redirigido por una superficie plana o dispersada por una superficie difusora. Cuando una parte importante del sonido reflejado es espacialmente y temporalmente disperso, se trata de un reflejo difuso, y la superficie que lo genera se denomina difusor acústico. La siguiente figura muestra las características temporales y espaciales de absorber, reflejar especular y la difusión acústica.

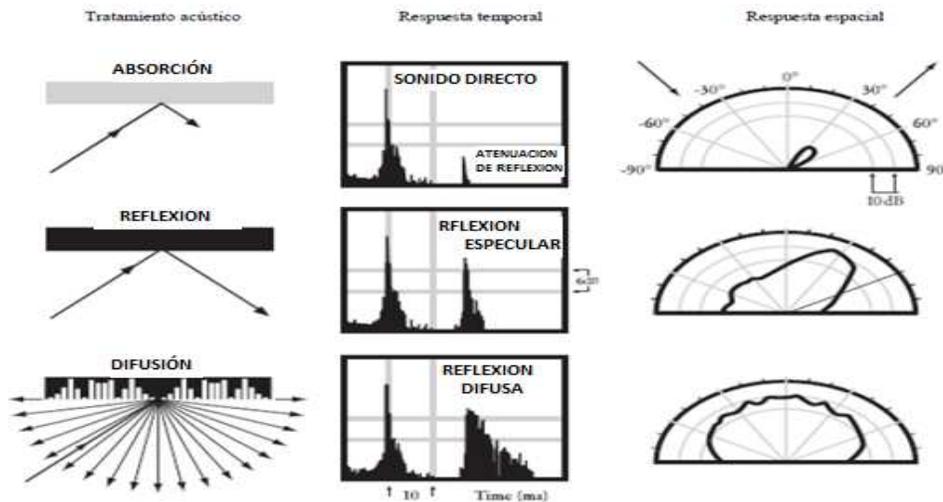


Figura I.1.- Características temporales y espaciales de la absorción, reflexión especular y difusión acústica en superficies <sup>[1]</sup>.

Si se obtiene la respuesta impulso de un recinto, es posible calcular múltiples parámetros acústicos denominados índices acústicos de desempeño, también se puede determinar los parámetros de la paleta acústica. Todos estos índices permiten calificar, en forma rápida y confiable, el campo sonoro dentro de un recinto; con esta información es posible revelar un campo sonoro desfavorable.

Por ejemplo, en algunos recintos se pueden generar modulaciones molestas llamados ecos de aleteo (en inglés llamados eco flutter), ocasionados por reflexiones repetidas producidas por colocar paredes paralelas poco absorbentes. Esta disposición de paredes favorece la reflexión especular, lo que origina un patrón estacionario de ondas que se percibe como modulaciones de alta frecuencia (eco flutter).

Para corregir esta situación se podría recurrir a aumentar exageradamente la absorción sonora, pero al hacerlo se tendría el inconveniente de reducir drásticamente el tiempo de reverberación, por el contrario, los tratamientos acústicos mediante elementos difusores, evitando la reflexión especular, son una mejor alternativa que los tratamientos con materiales absorbentes.

Su principal ventaja frente a los tratamientos mediante materiales absorbentes reside en que no se pierde energía sonora, manteniéndose la sensación acústica envolvente puesto que los difusores no dependen de un ángulo de incidencia particular y tienden a conservar la energía de la onda incidente al momento de difundir el sonido, con lo que la impresión de calidad acústica del recinto mejora. Esto se da porque al dispersar el sonido, se tendrá un campo sonoro difuso, es decir, que en cualquier punto dentro del recinto, se habrá de percibir un mismo nivel de presión sonora en todas las direcciones espaciales.

Tanto los materiales absorbentes como los difusores tienen un papel importante en el diseño acústico. Cumplen funciones complementarias, es decir, que cuando se usan apropiadamente, se puede lograr una mejor acústica en el recinto.

Además, contar con la información del desempeño de los difusores, permite incorporar esta información en los modelos computacionales utilizados en los programas de diseño asistido por computadora de recintos acústicos; permitiendo cerrar la brecha entre lo que predice la teoría y lo que se obtiene realmente. Esto finalmente redundará en un mejor diseño final de recintos como salas de concierto, teatros, etc.

## 1. 1. DIFUSOR ACÚSTICO

En 1975, se creó una nueva familia de difusores acústicos, originada por Manfred R. Schroeder en su teoría de los números <sup>[2,3,4]</sup>. En su primer artículo, Schroeder propuso las secuencias de máxima longitud en una superficie en su primer artículo. En una publicación posterior, las secuencias de residuos cuadráticos fueron su alternativa preferida. El desplazamiento de fase se logra mediante el tallado de ranuras rectangulares en una superficie plana, de manera que las ondas al propagarse en diferentes ranuras, experimentarían una longitud de trayectoria diferente y, por lo tanto se reflejan fuera de fase.

Los difusores más estudiados se denominan genéricamente R.P.G. (abreviatura de los términos en inglés, Reflection Phase Grating). Los difusores R.P.G. son elementos acústicos, que consisten en un conjunto de cavidades de estructura periódica, de igual anchura pero de diferentes profundidades, separadas por paredes rígidas de pequeño espesor. Las profundidades de las rendijas se determinan a partir de secuencias matemáticas que tienen un factor de reflexión constante. El elemento empleado comúnmente para su construcción es la madera como se muestra en la Figura 1.



Figura 1.-Ejemplo de difusores acústicos <sup>[29]</sup>

El difusor se coloca en la pared para dispersar la reflexión y para reducir la distorsión de sonido sin necesidad de reducir la energía dentro del recinto. Por esta razón, en las salas de conciertos, donde la energía acústica debe mantenerse constante en cualquier lugar del recinto, los difusores son preferibles. En salas más pequeñas, por ejemplo una sala de conferencias, donde la inteligibilidad del habla es lo más importante, debe alcanzarse un equilibrio entre la absorción que se utiliza para ajustar el tiempo de reverberación y el nivel de presión sonora; por contraste los difusores se utilizan para asegurarse de que las primeras reflexiones contribuyan a apoyar de manera constructiva el sonido mejorando su inteligibilidad.

Los difusores tienen la ventaja de ser, generalmente más robustos que los materiales absorbentes. La mayoría de las tecnologías de absorción incluyen materiales fibrosos que no soportan bien los efectos del medio ambiente tales como: viento, lluvia etc.; por contraste los difusores son más resistentes a ese tipo de circunstancias.

Aunque existen diversos tipos de difusores, para este proyecto, sólo se caracteriza el difusor acústico de Schroeder tipo QRD unidimensional.

### 1.1.1. DIFUSORES QRD UNIDIMENSIONAL

Los difusores de residuos cuadráticos QRD unidimensionales <sup>[1,5,6]</sup>, son los más utilizados. Consisten en una serie de ranuras paralelas de forma rectangular, de igual anchura y de diferente profundidad. Generalmente, dichas ranuras están separadas por unos divisores delgados y rígidos.

La profundidad de cada ranura se obtiene a partir de una secuencia matemática prefijada dando lugar a estructuras periódicas, que producen un determinado margen de frecuencias, una difusión del sonido incidente en planos perpendiculares a dichas ranuras.

Un difusor QRD unidimensional:

- Genera un campo de difusión en el sentido perpendicular a los canales.
- Su frecuencia mínima de operación está dada por la profundidad de los canales y su frecuencia máxima por la anchura de estos.
- Su construcción suele emplear diversos materiales como: madera maciza, MDF, vidrio, mármol, etc.
- Aplicándose en paredes donde se precise aumentar la difusión como escenarios, cabinas de locución, salas de grabación, etc.

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

Sin embargo, existe un límite en cuanto al valor máximo de dicha relación, ya que las ranuras estrechas y muy profundas producen un exceso de absorción acústica. Dicho límite implica que, en la práctica, el margen útil de frecuencias del difusor quede restringido a tres octavas aproximadamente. Por tanto, para el diseño de este tipo de difusor, se debe cumplir la siguiente condición:

$$\frac{f_{\max}}{f_o} \leq 2^3 \quad (1.1)$$

Siendo  $f_{\max}$ , la frecuencia máxima posible y  $f_o$ , la frecuencia mínima para el diseño de construcción de un difusor acústico.

Por otra parte, el número de lóbulos, correspondiente al número de direcciones para las cuales la energía reflejada tiene el mismo valor, está dado por:

$$\text{No. de lóbulos} = 2m_{\max} + 1 \quad (1.2)$$

Se considera que con 5 lóbulos el elemento dispersa de forma suficiente, se elige el grado de difusión,  $m_{\max}=2$  <sup>[6,32]</sup>.

Se calcula la anchura de las ranuras, a partir de la expresión siguiente:

$$w = \frac{c}{2f_{\max}} - T \text{ [cm]} \quad (1.3)$$

Donde  $c$  es la velocidad de propagación del sonido en mm/s y  $T$  es el espesor de las divisiones en mm, el cual suele variar entre 5 y 1.5 mm.

Con lo que debe cumplirse que el ancho total (ranura + separador) del difusor, debe ser igual a la mitad de la longitud de onda de la máxima frecuencia de acción del difusor. Por otra parte si se requiere difusión para una onda incidente de  $180^\circ$  (onda paralela a la superficie del difusor) el ancho total debe ser la mitad de lo anteriormente mencionado.

Determinándose el número de ranuras por periodo  $p$  mediante:

$$p = \frac{2m_{\max}f_{\max}}{f_o} \quad (1.4)$$

Si el valor de  $p$  no es un número primo, entonces se busca el número primo más cercano y superior a ese valor.

Con lo cual se genera una secuencia a partir de la siguiente expresión:

$$s_n = n^2 \text{ mod } p \quad (1.5)$$

Donde  $p$ , es el número primo (3, 5, 7, 11,...);  $n$ , es el número entero que va desde 0 hasta  $p-1$ ; el modulo, es la operación matemática indicativa de que cada valor de  $s_n$  se obtiene como el residuo del cociente entre  $n^2$  y  $p$  (de donde deriva el nombre de difusor de residuos cuadráticos).

La secuencia resultante es periódica y de periodo  $p$ . La profundidad real de la ranuras se obtiene, en cada caso, multiplicando los valores de la secuencia adimensional por un factor determinado. Obteniendo los valores para cada profundidad mediante:

$$d_n = \frac{s_n c}{2f_o p} \text{ [cm]} \quad (1.6)$$

Con lo cual se obtienen los parámetros para poder construir y conocer características muy específicas en el funcionamiento de un difusor acústico unidimensional.

La distribución de la energía reflejada por el difusor en las diferentes direcciones del espacio dependerá del tipo de interferencia que tenga el lugar, es decir, de los valores de la secuencia referentes a las profundidades de las ranuras del difusor.

Las dispersiones que se generan en un difusor acústico, están contenidas en un radio donde se encuentra la energía total de reflexión del sonido disperso de una forma no especular (véase en la Figura 2). La reflexión no especular es también llamada reflexión difusa, refiriéndose al caso cuando la reflexión es dispersa espacial y temporalmente, es decir, que el sonido debe estar más extendido y distribuido en el espacio con una respuesta al impulso extensa a lo largo del tiempo <sup>[7,8,9]</sup>.

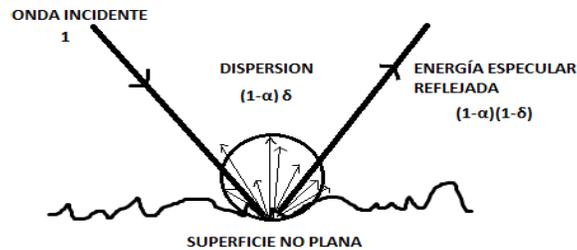


Figura 2.-Representación gráfica de la difusión del sonido <sup>[10]</sup>.

Por lo tanto, un difusor dispersa la reflexión a través de toda su superficie; es decir, que cuando una onda incidente choca en una superficie no plana, el efecto que sufre la onda incidente al encontrarse con este tipo de superficies, es la difusión del frente de onda en diferentes ángulos con la misma energía emitida al momento del choque <sup>[9,10]</sup>.

### 1.2. RESPUESTA AL IMPULSO

El método de obtención de la respuesta al impulso se basa en la excitación del recinto con una fuente de sonido, la grabación de la respuesta del recinto y el análisis de las grabaciones para obtención de la respuesta al impulso. A fin de obtener una buena respuesta al impulso, existen ciertas condiciones referentes a la señal de excitación que se deben cumplir:

- La señal de excitación debe contener la suficiente energía de manera que se tengan altas relaciones de señal a ruido en todas las componentes de frecuencia de interés.
- Deberá abarcar todas las bandas de frecuencia de interés para obtener el espectro deseado. Que para este proyecto van desde 125 Hz a 4000 Hz por tercios de octavas.
- La señal deberá ser repetible a lo largo del tiempo y espacio.
- La fuente de sonido deberá radiar el sonido de manera uniforme y omnidireccional. Conteniendo un rango dinámico adecuado para la medición.
- En cuanto al receptor de la señal de impulso dentro del cuarto; generalmente se emplean micrófonos sensibles a la presión sonora con características omnidireccionales. Los micrófonos deberán tener una respuesta en frecuencia que abarque el ancho de banda de interés para las mediciones.

La respuesta de un sistema discreto lineal e invariante con el tiempo a una secuencia delta  $\delta[n]$  o también llamada muestra unitaria, es denominada respuesta al impulso del sistema <sup>[12]</sup>, indicada como  $h[n]$ . Definiendo un sistema discreto como la señal delta muestreada a lo largo del tiempo convertido de una señal analógica a digital, es decir, en bits.

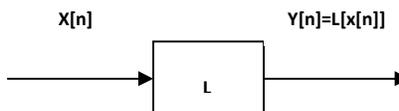


Figura 3.-Diagrama a bloques de un sistema lineal

Entendiendo que este sistema debe ser lineal e invariante en el tiempo, ya que sus propiedades no varían con el tiempo, teniendo como único efecto, un corrimiento en el tiempo de la señal de entrada en el sistema y por consecuencia un corrimiento en el tiempo de la señal de salida. Teniendo como resultado que el sistema es:

$$L(\delta[n]) \equiv h[n] \tag{1.8}$$

Es decir, que una secuencia  $x[n]$ , se puede representar como una suma de secuencias  $\delta[n]$  multiplicada por los valores de la secuencia  $x[n]$ . Por lo tanto por definición de la respuesta  $\delta[n]$  es  $h[n]$ , como también si la respuesta de  $c\delta[n-m]$  es  $ch[n-m]$ , se considera que para un sistema lineal e invariante con el tiempo, basado en lo anterior, se tiene que:

$$\begin{aligned}
 Y[n] &= \{x[n]h[n]\} \\
 &= \mathcal{L}\{\sum_{m=-\infty}^{\infty} x[m] \delta[n-m]\} \\
 &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} x[m] \mathcal{L}\{\delta[n-m]\} \\
 &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} x[m] h[n-m]
 \end{aligned} \tag{1.9}$$

En general para determinar el valor de la salida  $y[n]$  para  $n$  específica, debemos conocer la entrada  $x[n]$  para cada  $n$  pasada o futura y la respuesta al impulso  $h[n]$  es denominada sumatoria de convolución, expresada con la siguiente expresión:

$$Y[n] = x[n] * h[n] \tag{1.10}$$

Concluyendo con la ecuación anterior, que la respuesta al impulso a un sistema de una señal con  $x[n]$  entradas, está dada por la convolución en tiempo discreto.

### 1.2.1. INDICES ACÚSTICOS

Conociendo la respuesta al impulso de un recinto, se pueden determinar parámetros de desempeño acústico, que pueden ser medidos con ambientes controlados, mediante el método de cámara reverberante o por el método de campo libre:

#### Tiempo de Reverberación (TR)

Es un índice fundamental para el diseño, mejoramiento y valoración de recintos acústicos. El tiempo de reverberación se puede definir a partir de la claridad, intensidad y vida del sonido; dependiendo de las dimensiones del recinto a analizar. El tiempo de reverberación en otras palabras es el tiempo que tarda en desaparecer el sonido después de emitirse una señal de excitación. La periodicidad de la señal de excitación debe ser mayor que el tiempo de reverberación estimado en el recinto.

#### Curva de Decaimiento (EDC)

Por medio del método de integración de la respuesta al impulso, se obtiene la curva de decaimiento de energía; mejor conocida en inglés por Energy Decay Curve. Esta curva de decaimiento de energía nos permite estimar mejor los valores para la obtención de los tiempos de reverberación a una caída de -60 dB.

Para obtener la curva de decaimiento previamente se tiene que filtrar la respuesta al impulso en determinadas frecuencias de corte, que para mayor apreciación de los datos, se realiza el procesamiento de dichos datos por tercios de bandas de octava. Una banda de tercios de octava, es un grupo de frecuencias comprendidas entre dos frecuencias, obtenidas de una frecuencia central, estas frecuencias son: 100 Hz, 125 Hz, 160 Hz, 200 Hz, 250 Hz, 315 Hz, 400 Hz, 500 Hz, 630 Hz, 800 Hz, 1.000 Hz, 1.250 Hz, 2.000 Hz, 2.500 Hz, 3.150 Hz, 4.000 Hz y 5.000 Hz, 6300 Hz, 8000 Hz y 10.000 Hz; normalizadas por la ISO 266.

### Absorción (A) y coeficiente de absorción ( $\alpha$ )

Cuando una onda de sonido golpea una superficie, parte de la energía del sonido se refleja y otra parte penetra en la superficie. Parte de la energía de la onda de sonido es absorbida convirtiéndose en energía calorífica en el material, y el resto se transmite alrededor. El nivel de energía convertido en energía calorífica depende de las propiedades absorbentes de sonido del material. Es bien sabido que los materiales suaves, porosos, como los de algunos muebles y la misma gente absorbe una porción considerable de la energía de las ondas sonoras que chocan contra ellos, es decir, son absorbentes de sonido. La eficiencia de absorción de sonido de un material a cierta frecuencia es determinada por el coeficiente de absorción. Por definición, el coeficiente de absorción de una superficie es la fracción de energía sonora absorbida o no reflejada por la superficie. El valor de este coeficiente puede variar entre 0 y 1. A mayor absorción del material su valor tiende a 1.

La reflexión de una superficie también puede ser caracterizada con un coeficiente de difusión y de dispersión. El coeficiente de difusión es una medida de la uniformidad del sonido reflejado. El propósito de este coeficiente es permitir el diseño de los difusores, ya que permite comparar el rendimiento de las superficies para el diseño del recinto y las especificaciones de rendimiento.

Las reflexiones de una superficie pueden ser caracterizadas usando el coeficiente de dispersión ( $\delta$ ), necesario para obtener un patrón de directividad de dichas dispersiones, es decir, es una relación entre la energía de sonido repartido en una forma no especular con el total de la energía reflejada del sonido. El propósito de este coeficiente es la caracterización de la dispersión de superficie para su uso en programas de diseño geométrico de sala.

Las reflexiones de energía no especulares normalizadas con respecto a la reflexión de una superficie plana no absorbente es llamada energía especular ( $E_{spec}$ ) expresada de la siguiente manera:

$$E_{spec} = (1 - \alpha)(1 - \delta) = (1 - a) \quad \text{y} \quad E_{total} = (1 - \alpha) \quad (1.7)$$

Siendo  $\delta$ , el coeficiente de dispersión;  $\alpha$ , el coeficiente de absorción,  $a$ , es el coeficiente de absorción especular y  $E_{total}$ , es la energía total reflejada. Para obtener el coeficiente de dispersión en superficies, existe tanto el método de campo libre y el método de la cámara reverberante, los cuales serán explicados más adelante.

Todos los parámetros mencionados anteriormente y algunos otros se calcularán durante el desarrollo de este trabajo; se obtienen encontrando la respuesta al impulso del recinto de medición, es decir, si se considera una trayectoria de transmisión en un cuarto, extendiéndose desde una fuente sonora a un punto receptor, como un sistema lineal, se observa que todas las técnicas de medición pueden reducirse a la medición de su respuesta al impulso, puesto que desde la respuesta al impulso se evalúan parámetros acústicos importantes para la valoración de recintos o en su caso para la evaluación de un difusor acústico.

### 1.3. METODOS PARA OBTENER EL COEFICIENTE DE DISPERSIÓN

#### 1.3.1.-METODO DE CAMPO LIBRE

La instrumentación para la medición del coeficiente de difusión se basa en la Norma ISO 17497-2, Medición del coeficiente de difusión direccional en campo libre<sup>[28]</sup>.

Este método con la muestra del difusor, se basa en obtener un promedio de varias posiciones en ángulos de medición y rotación de la superficie a prueba<sup>[9, 14, 15]</sup>, mediante el montaje de medición mostrado en la Figura 4.

En campo libre el coeficiente de absorción especular, se obtiene rotando el difusor, mientras se hace una promediación de las fases de las ondas reflejadas, basado y usado por Voländer and Mommertz<sup>[7, 9]</sup>.

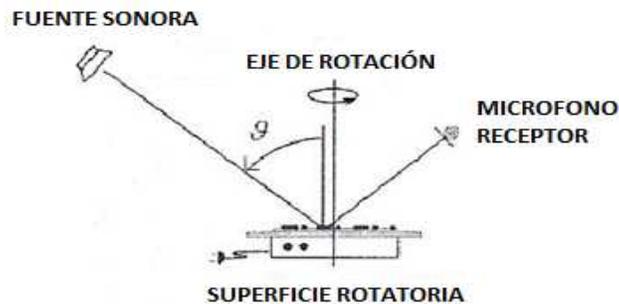


Fig. 4.- Arreglo experimental en campo libre<sup>[7]</sup>.

#### 1.3.1.1.-METODO DE SUSTRACCIÓN

Otra forma de medición en campo libre es por el método de sustracción, que consta de un arreglo de micrófonos en una superficie rígida en forma de círculo o semicírculo, llamado goniómetro acústico<sup>[10]</sup>. El difusor debe girar cada 5°, para la resolución espacial requerida para su evaluación en dos dimensiones, con al menos 10 periodos de la señal de excitación<sup>[1]</sup>.

Para este método el montaje de experimentación se muestra en la figura 5; la respuesta al impulso<sup>[16,17]</sup> obtenida se basa en la propagación de la onda incidente a la superficie bajo prueba.

La técnica de sustracción descrita por Mommertz<sup>[12,13]</sup> deduce el factor de reflexión (R) usado para calcular el coeficiente de absorción  $\alpha_{90^\circ}$  de una incidencia normal. Para esta técnica se utiliza una ventana de tiempo para eliminar las reflexiones parasitas de las respuestas impulso, si fuese necesario.

Con el tiempo de la ventana y la sustracción, el tiempo de la señal del sonido reflejado es extraído y usado para calcular el factor de reflexión y el coeficiente de absorción  $\alpha$  basado en el ángulo de incidencia ( $\theta$ )<sup>[18]</sup>.

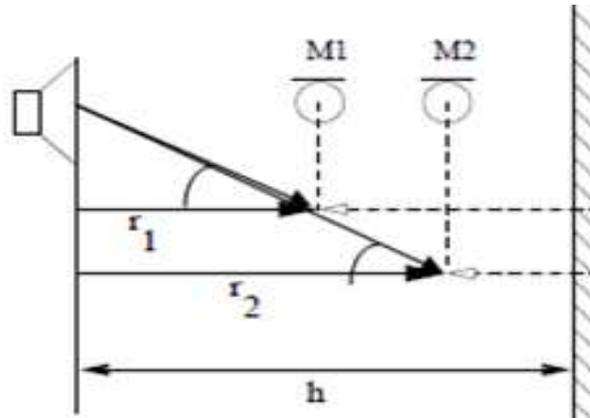


Figura 5.- Medición de la respuesta al impulso usando dos micrófonos con el método de sustracción<sup>[17]</sup>.

Para lo cual, se necesita obtener durante las mediciones el sonido directo y las posibles reflexiones, sirviendo éstas para este método. El método de sustracción en campo libre<sup>[18]</sup> se muestra en la figura 6 y obtiene con la siguiente expresión:

$$h(t) = h_r(t) - h_d(t) \quad (1.11)$$

Donde  $h_d(t)$ , es la respuesta al impulso de la señal incidente captada por el micrófono 1 y  $h_r(t)$  es la respuesta al impulso de las reflexiones captadas con el micrófono 2. Por eso es sumamente necesario hacer diferentes mediciones en muchas posiciones espaciales, haciendo lo mismo con la obtención del coeficiente de difusión.

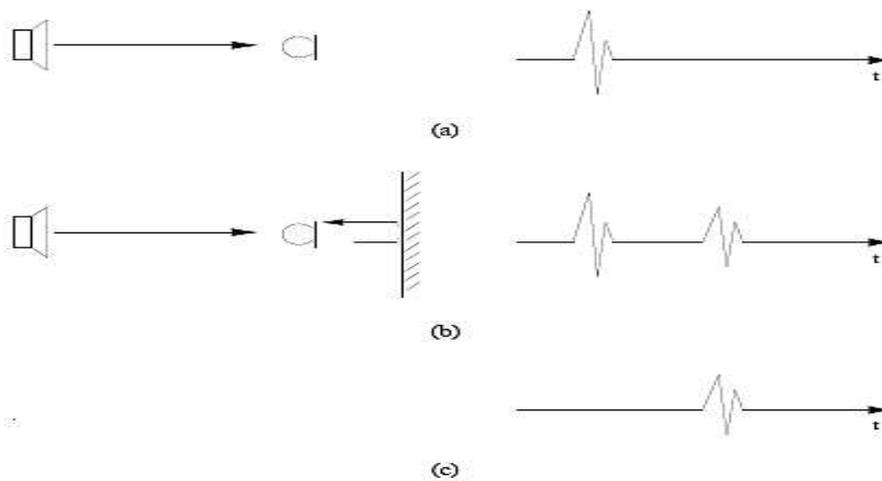


Figura 6.- Medición de la respuesta al impulso usando el método de sustracción de las respuestas impulso sistemáticas. (a) Medición de referencia de la respuesta al impulso incidente  $h_d(t)$ . (b) Medición de la respuesta al impulso frente al material  $h_r(t)$ . (c) Respuesta al impulso después de la sustracción<sup>[17]</sup>.

### 1.3.1.2.-METODO DE SUSTRACCIÓN EN DIFUSORES ACÚSTICOS

Para obtener la respuesta al impulso de un difusor, las condiciones respecto a las distancias ( $r$ ) de la fuente y del receptor al punto de referencia, necesitan los siguientes requisitos<sup>[19]</sup>:

- 1)  $r \gg D_{max}$
  - 2)  $r/D_{max} \gg D_{max}/\lambda$
  - 3)  $r=2r_1r_2 / (r_1+r_2)$
- (1.12)

Siendo  $D_{max}$ , la dimensión más larga del difusor;  $\lambda$ , la longitud de onda;  $r$ , el radio del goniómetro;  $r_1$ , la distancia de la fuente al punto de referencia;  $r_2$ , la distancia del receptor al punto de referencia.

Si el sistema tiene más de un micrófono o fuente, la respuesta de la fuente- micrófono debe ser deconvolucionada de la sustracción de la respuesta al impulso de la siguiente manera:

$$h(t) = IFFT \left[ \frac{FFT[h_1(t) - h_2(t)]}{FFT[h_3(t)]} \right] \quad (1.13)$$

- a) respuesta al impulso con el difusor a prueba presente,  $h_1(t)$ ;
- b) respuesta al impulso sin el difusor a prueba presente,  $h_2(t)$ ;
- c) si hay más de un micrófono o fuente en la medición, se adquiere la respuesta al impulso de la fuente sonora con el punto de referencia frente a la posición del receptor,  $h_3(t)$ .

Una respuesta al impulso se mide, adquiriendo la respuesta al impulso incidente y reflejada. A partir de este se calcula el coeficiente de reflexión. Para lograr esto, sin embargo, se requiere una distancia considerable entre el micrófono y la superficie, lo que significa que a menudo surgen problemas a causa de los reflejos por el borde de la superficie de prueba y los reflejos no deseados de otras superficies<sup>[18]</sup>.

Después de obtener la respuesta al impulso con el método de sustracción adecuado, el coeficiente de reflexión puede ser calculado de la siguiente manera:

$$R = \frac{H(f)}{H_d(f)} \quad (1.14)$$

Siendo

$$H(f) = FFT[h(t)] \quad \text{y} \quad H_d(f) = FFT[h_d(t)] \quad (1.15)$$

Con este método se determina el coeficiente de absorción, logrado por la suma cuadrática de los resultados independientes (dependientes del ángulo):

$$\alpha(f) = 1 - |R|^2 = 1 - R \quad (1.16)$$

El coeficiente de reflexión, también puede definirse, como la relación entre las presiones de incidencia ( $P_i$ ) y las presiones reflejadas ( $P_r$ ) de una superficie, donde se refleja la magnitud como la fase de las reflexiones, expresándose de la siguiente manera:

$$R = \frac{P_r}{P_i} \quad (1.17)$$

Para calcular la presión difusa <sup>[1,9]</sup> en la superficie (Ps), que está dada por:

$$P_s(\varphi, \theta) \approx A \sum_{p=1}^{Np} \sum_{n=1}^N e^{-2jkd_n} e^{jk(n+NpN)w[\sin(\theta)+\sin(\varphi)]} \quad [\text{Pa}] \quad (1.18)$$

Donde  $\theta$ , es el ángulo de incidencia;  $\varphi$ , es el ángulo de reflexión;  $Np$ , es el número de períodos del difusor;  $N$ , es el número de huecos por período del difusor;  $w$ , es el ancho de las divisiones del difusor;  $k$ , es el número de onda;  $d_n$ , es la profundidad de los huecos y  $A$ , es una constante referente a la amplitud, con un valor de 1.

Para encontrar el coeficiente de dispersión se utiliza la Norma ISO 17497, "Método de medición para cuantificar las propiedades de la dispersión del sonido en superficies". El coeficiente de dispersión representa la proporción de energía que se refleja de manera especular, por la superficie, por lo que, en un difusor, el coeficiente de dispersión se puede evaluar con facilidad, también de la siguiente manera <sup>[1]</sup>:

$$\delta = 1 - \left| \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N e^{-2jkd_n} \right| \quad (1.19)$$

Donde  $d_n$ , son las profundidades de huecos en el difusor;  $N$ , número de huecos por periodo del difusor;  $K$ , número de onda.

El coeficiente de dispersión es independiente del ángulo de incidencia, por lo que un promedio de múltiples ángulos de incidencia no es necesario. En consecuencia, la aplicación de la formulación de la ecuación anterior, daría un coeficiente de incidencia aleatoria numéricamente idéntico que en el caso de campo libre.

E. Mommertz presentó un método para evaluar el coeficiente de dispersión a partir de la respuesta polar <sup>[1, 9, 10, 13]</sup>. Es una correlación de la respuesta polar de presión de la dispersión de la superficie a prueba y una de referencia (superficie plana); llamado como coeficiente de correlación de dispersión ( $\delta_c$ ) expresado de la siguiente manera:

$$\delta_c = 1 - \frac{\left| \sum_{i=1}^n P_{1(\theta_i)} P_0^*(\theta_i) \right|^2}{\sum_{i=1}^n |P_1(\theta_i)|^2 \sum_{i=1}^n |P_0(\theta_i)|^2} \quad (1.20)$$

Donde  $P_1$ , es la presión dispersa de la superficie a prueba;  $P_0$ , es la presión dispersa de la superficie plana;  $*$ , es un complejo conjugado;  $\theta_i$ , es el ángulo receptor de  $i^{\text{th}}$  las posiciones medidas;  $n$ , es el número de mediciones.

### 1.3.2. METODO DE CAMARA REVERBERANTE

La cámara de reverberación está diseñada para producir un campo sonoro difuso. Éste campo sonoro tiene la misma densidad de energía reflejada en toda la habitación y la energía propagada de manera uniforme en todas direcciones dentro de la cámara. La cámara de reverberación debe tener estos requerimientos necesarios, ya que es una referencia para pruebas y resultados repetibles que pueden ser interpretados en diversos laboratorios.

Para lograr esto, las cámaras de reverberación a menudo utilizan difusores en el volumen de la cámara, y las paredes de la cámara son a menudo inclinadas. Además, esta cámara reverberante debe ser de ciertas dimensiones físicas para reducir la influencia de los modos de este recinto.

Los requisitos de medición para este método son indicados en la norma ISO 354, Medición del coeficiente de absorción en cámara reverberante <sup>[25]</sup>, la Norma ISO 3741, Determinación del nivel de sonido de la fuente por métodos de precisión por el ancho de banda de la fuente en una cámara reverberante <sup>[26]</sup> y la Norma ISO 17497-1, "Medición del coeficiente de dispersión en incidencia aleatoria en cámara reverberante".

Para ambos métodos se utiliza la norma ISO 354 para adquirir el coeficiente de absorción, expresado de la siguiente manera:

$$\alpha = 55.3 \frac{V}{cS} \left( \frac{1}{T2} - \frac{1}{T1} \right) - \frac{4V}{S} (m2 - m1) \quad (1.21)$$

Donde  $\alpha$ , es el coeficiente de absorción; V: es el volumen del recinto donde se llevará a cabo la medición en [m<sup>3</sup>]; S: es el área del material a prueba [m<sup>2</sup>]; T1: es el tiempo de reverberación del recinto vacío en [s]; T2: es el tiempo de reverberación con el difusor dentro del recinto en [s]; m2, m1: es el coeficiente de atenuación de energía durante la medición de los tiempos de reverberación respectivos en [1/m] y C: es la velocidad del sonido en [m/s<sup>2</sup>], que puede calcularse de ésta forma:

$$c = 331 + (t * 0.6) , \text{ donde } t \text{ la temperatura del recinto en } [^{\circ}\text{C}]$$

Con este método el coeficiente de dispersión se calcula con la siguiente expresión matemática <sup>[1,7,8,9]</sup>.

$$\delta = 1 - \frac{E_{spec}}{E_{total}} = \frac{\alpha_{spec} - \alpha_s}{1 - \alpha_s} \quad \text{pero cuando } \alpha_s = 0 \quad \delta = \alpha \quad (1.22)$$

Siendo

$$\alpha_{spec} = 55.3 \frac{V}{cS} \left( \frac{1}{T4} - \frac{1}{T3} \right) - \frac{4V}{S} (m4 - m3) \quad (1.23)$$

Siendo T3, es el tiempo de reverberación cuando la muestra de ensayo no está presente y la plataforma giratoria está girando en [s]; T4, es el tiempo de reverberación cuando la muestra de ensayo está presente y el plato giratorio está girando en [s]; m4 y m3, es el coeficiente de atenuación de energía durante la medición de los tiempos de reverberación respectivos en [m<sup>-1</sup>].

Para obtener los tiempos de reverberación, se obtienen a través de una relación con la ecuación de Sabine, de la siguiente manera:

$$T_R = \frac{V}{S\alpha} \quad (1.24)$$

Siendo  $\alpha$ , el coeficiente de absorción;  $V$ , el volumen del recinto donde se llevará a cabo la medición en  $[m^3]$  y  $S$ , el área del material a prueba  $[m^2]$ .

Los tiempos de reverberación se obtiene mediante el ajuste de la curva de decaimiento, que debe estar entre -5 y -35 dB para una medición adecuada. Para obtener la pendiente de la curva de decaimiento de energía del recinto, se necesita aplicar a la respuesta al impulso la integral de Schroeder, de la siguiente forma:

$$EDC = 10 \log \left[ \int_t^{\infty} h^2(t) dt \right] \quad (1.25)$$

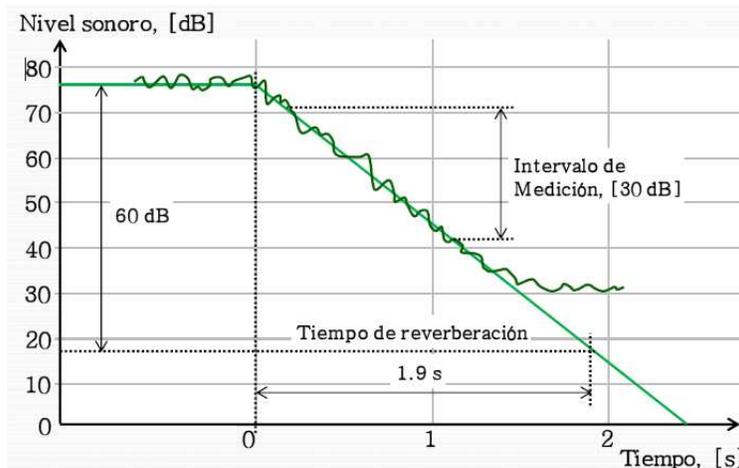


Figura 7.-Representación de la curva de decaimiento para la obtención del tiempo de reverberación <sup>[30]</sup>.

Esta curva de decaimiento de energía nos permite estimar mejor los valores para la obtención de los tiempos de reverberación a una caída de -60 dB. Permitiendo como mínimo que la curva decaiga -30 dB, para interpolar los valores hasta el requerimiento de caída en decibeles necesarios.

El coeficiente de atenuación de energía, debe ser calculado de la siguiente forma:

$$m = 5.5 \times 10^{-4} \frac{50}{h} \left( \frac{f}{1000} \right)^{1.7} \quad (1.26)$$

Donde  $h$  es la humedad relativa como porcentaje y  $f$  es la frecuencia. Esta formulación es aplicable para  $20 < h < 70$  por ciento y  $1,5 < f < 10$  kHz.

#### 1.4. DIFUSIÓN

El coeficiente de dispersión da un cálculo rápido y aproximado del proceso de dispersión. No se debe utilizar para evaluar el diseño o la especificación de los difusores. El coeficiente de dispersión sólo se refiere a la cantidad de energía que se mueve en la dirección especular, pero no mide la calidad de la dispersión. Por esta razón, la difusión de las superficies debe ser evaluada utilizando el coeficiente de difusión cuando la calidad de la dispersión es importante.

Con la difusión podemos obtener la respuesta polar con el fin de caracterizar el rendimiento de un difusor, es necesario tener la capacidad para medir y / o predecir cómo el difusor difunde el sonido. En la actualidad, esto se hace con frecuencia para ver cómo la energía se difunde y es espacialmente distribuida.

La caracterización del coeficiente de difusión del sonido reflejado de una superficie se da en términos de uniformidad y representado por una distribución polar. La representación polar suele ser de las siguientes formas: Esta distribución espacial se describe convencionalmente con las respuestas polares en tercios de octavas, para un determinado ángulo de incidencia.

Un difusor ideal produce una respuesta polar que es invariante en el ángulo de incidencia, el ángulo de observación y la frecuencia (dentro de su ancho de banda de funcionamiento). La dispersión de una superficie es cuantificada en términos del coeficiente de difusión. El coeficiente de difusión es una medición para la calidad del diseño a ser usado, producido o usado en superficies, que generen la difusión del sonido<sup>[19]</sup>.

Respuesta Polar semicircular: el nivel de presión sonora creado por la energía de dispersión de una superficie en función del ángulo de medición conforme a una referencia, bajo condiciones de un campo libre o pseudo campo libre. Siendo el centro del semi-hemisferio el punto de referencia en una distancia radial.

Respuesta hemisférica polar: El nivel de presión disperso de una superficie en función de mediciones coordinadas esféricamente conforme a la referencia. Siendo el centro del hemisferio la referencia.

Para las mediciones espaciales, la relación señal a ruido de las señales, debe ser de 40 dB, que se obtienen calculando lo siguiente:

$$S / N = 10 \log \left\{ \frac{\int_T [h_1(t) - h_2(t)]^2 dt}{\int_T h_2^2(t)} \right\} \quad (1.27)$$

Siendo T la ventana rectangular, que se utilice en el procesamiento de las señales.

Los niveles de presión sonora, deberán corregirse para permitir la difusión esférica correcta, teniendo en cuenta que la normalización estándar de las distancias son  $r_1=10$  m y  $r_2=5$  m. Por lo que deben normalizarse los niveles de presión medidos conforme a la siguiente ecuación:

$$L_i = L_i + \epsilon 10 \log \left( \frac{r}{6.67} \right) \quad (1.28)$$

Siendo la constante  $\epsilon=2$  para este modelo de medición en dos dimensiones con propagación esférica y r es la calculada con la ecuación 1.12.

### 1.4.1. COEFICIENTE DE DIFUSION

Un parámetro a evaluar dentro de la difusión, es el llamado coeficiente direccional de difusión ( $d_\theta$ )<sup>[1,9, 10, 19]</sup>; es decir, es la medición de la uniformidad de difusión producida por una superficie para una posición de la fuente de sonido. El valor de este coeficiente debe ser entre 0 y 1, porque cuando la difusión de una superficie es completa, el coeficiente de difusión es 1. Pero si no se reciben difusiones, el coeficiente de difusión es 0. Este valor se obtiene con la siguiente fórmula matemática:

$$d_\theta = \frac{\left( \sum_{i=1}^n 10^{\frac{Li}{10}} \right)^2 - \sum_{i=1}^n \left( 10^{\frac{Li}{10}} \right)^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n \left( 10^{\frac{Li}{10}} \right)^2} \quad (1.29)$$

Donde  $d_\theta$ , es el coeficiente direccional de difusión en base al ángulo de incidencia ( $\theta$ );  $L_i$ , es el nivel de presión sonora en base a la respuesta polar;  $n$ , es el número de micrófonos utilizados en la medición.

Por tanto el coeficiente de difusión direccional normalizado<sup>[1]</sup> es calculado por la siguiente fórmula:

$$d_{\psi,n} = \frac{d_\psi - d_{\psi,r}}{1 - d_{\psi,r}} \quad (1.30)$$

Donde  $d_\psi$  es el coeficiente de difusión del difusor acústico y  $d_{\psi,r}$  es el coeficiente de difusión de superficie plana, llamada en este trabajo como "difusión de referencia"; ambos calculados con la ecuación anterior.

Para ambos métodos de adquisición del coeficiente de difusión, se puede presentar el fenómeno de difracción del sonido, en las mediciones.

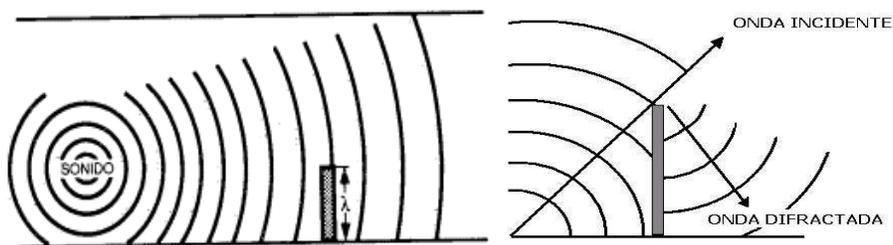


Figura 8.-Difracción del sonido<sup>[31]</sup>.

Este fenómeno acústico se da, cuando la longitud de onda ( $\lambda$ ) es mayor que el tamaño del obstáculo. Entonces, el sonido es transmitido por difracción, en caso contrario se producen sombras detrás del obstáculo.

Si la ranura es grande comparada con la longitud de onda del sonido, los frentes de onda pasan al otro lado del obstáculo casi sin distorsionarse. Entre más pequeña sea la abertura en relación con  $\lambda$ , más pronunciada es la difracción de las ondas; es decir, que si el obstáculo es menor a la longitud de onda, la onda pasa sin ningún problema, como a través de una transparencia acústica.



# CAPITULO

## II

“INSTRUMENTACIÓN ACÚSTICA”

El método de medición escogido para obtener el coeficiente de difusión acústica, será el método de campo libre, por las siguientes razones:

- La toma de adquisición de datos en comparación con la cámara reverberante, es más rápido.
- Al diseñar el difusor acústico, se puede omitir la medición para la obtención de la respuesta al impulso de una superficie reflejante, es decir, de  $h_3(t)$  (ecuación 1.13). Porque al tener mi patrón polar teórico de mi difusor, sólo tendría que comparar al final mi resultado teórico con el práctico, restando más tiempo aun para la adquisición de datos.
- El laboratorio de vibraciones y acústica del Centro Nacional de Metrología, CENAM, cuenta con una cámara semi-anecoica y equipo de medición necesario para dicho propósito.
- Al escoger este método, se implementa un goniómetro acústico, que facilitará aun más la técnica de medición, haciendo que el tiempo total para dichas mediciones sea poco.

Dicho lo anterior, en este capítulo se desarrollará el diseño del difusor y el goniómetro acústico que serán utilizados para el desarrollo de medición del difusor acústico, también se dará la información necesaria del montaje experimental en la cámara semi-anecoica, bajo lineamientos de normas específicas, así como información de la instrumentación que se utilizó para la caracterización.

## 2.1. DISEÑO DEL DIFUSOR ACÚSTICO UNIDIMENSIONAL

La norma ISO-17497-1, menciona que se puede realizar un difusor a escala, para mayor practicidad en su elaboración y también para el montaje de medición.

Para la elaboración del difusor, se empleará triplay sin recubrimiento y sin barnizar de 6mm y 9 mm para su fabricación. El triplay de pino presenta un sin fin de ventajas, de las cuales podemos mencionar las siguientes: Baja resistencia a la abrasión en el corte, excelente comportamiento al maquinado como perforado y ranurado, así como poseer una gran disposición al pintado. Su peso por panel es aproximadamente de 8.89 Kg, con dimensiones por panel de 2.44 x 1.22 m; siendo un material de bajo costo.

En la elección del material para construir el difusor, se eligió un material con un coeficiente de absorción <sup>[24]</sup> bajo, con el fin de evitar pérdidas de energía acústica en el difusor.

Coeficiente de absorción por banda de frecuencias en [Hz]						
Material	125	250	500	1K	2K	4K
Triplay 6mm	0.60	0.30	0.10	0.09	0.09	0.09
Madera de pino	0.1	0.32	0.55	0.66	0.79	0.77
MDF	0.1	0.09	0.08	0.09	0.1	0.1

Tabla 1.- Coeficientes de absorción de materiales

De acuerdo con las propiedades mencionadas, se procedió a la elección de triplay para la construcción del difusor. Se tuvo en cuenta la relación costo beneficio que brinda este material, y su propiedad acústica de absorción sonora.



Teóricamente cuenta con un coeficiente de dispersión de 0.4842, obtenida con la ecuación 1.19 con un ángulo de incidencia de la fuente de  $30^\circ$ , es decir con un ángulo de abertura de  $30^\circ$  con respecto a un ángulo de  $90^\circ$  y la representación polar de este diseño ya construido, teóricamente a cada  $5^\circ$ , queda de la siguiente manera:

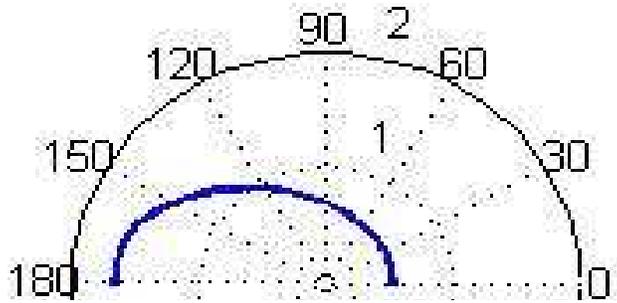


Figura 10.-Respuesta Polar de difusión teórica

Como se mencionó anteriormente, es opcional utilizar también un material reflejante para normalizar las mediciones. Este material tendrá que ser de triplay, con las mismas dimensiones que el difusor unidimensional, con la diferencia que tendría que tener una cubierta plana en su parte frontal, es decir, totalmente cerrado por todos sus lados, de dimensiones 82.4 cm de largo x 82.4 cm de ancho y con una altura de 17.4 cm, como se observa en la siguiente figura.

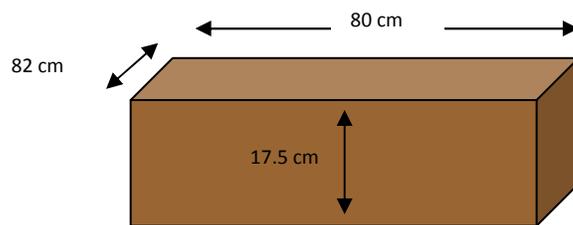


Figura 11.-Representación gráfica del material de referencia, en triplay

Una vez terminada la parte del diseño del difusor acústico unidimensional, se definió que la parte posterior plana del difusor, se utilizaría como referencia para las mediciones, es decir, se utilizaría el difusor colocado de tal forma que la parte que no tiene las ranuras esté hacia arriba. El difusor acústico construido tiene un peso de 18.120 Kg., con las dimensiones y profundidades descritas anteriormente.



Figura 12.- Imagen del difusor y la referencia

## 2.2. DISEÑO DEL GONIOMETRO ACÚSTICO

El goniómetro <sup>[10, 19]</sup> se define como un instrumento que ayuda a medir en ángulos la presión acústica en una estructura de semicírculo; por lo tanto, es un sistema que mide la dirección de llegada de las ondas acústicas. Se compone de una estructura rígida pero un tanto flexible para darle la forma, compuesta por varios micrófonos, ubicados en una geometría particular.

Las implementaciones de los micrófonos son diseñadas en un marco común, es decir, en un semicírculo, basándose en un proceso espacio-temporal. El proceso temporal aborda el problema de la estimación de retardo en tiempo a lo largo de las líneas de base, mientras que la segunda etapa introduce la geometría de la recepción acústica, con el fin de estimar la dirección de llegada del sonido.

Conociendo las dimensiones del difusor, se aplica las condiciones en distancia basados en la norma ISO-17497-2; donde se menciona cómo debe ser la distancia entre el punto de referencia a la fuente de sonido ( $r_1$ ) y como debe ser la distancia del punto de referencia al micrófono ( $r_2$ ).

Las condiciones para obtener la respuesta al impulso para un difusor, como se menciona en el tema 1.3.1.2 y la norma ISO-17497-2, son  $r_1 = 2$  m,  $r_2 = 1$  m y el punto de referencia, sea el centro del difusor para el diseño del goniómetro.

Las distancias de la fuente y del receptor al punto de referencia del difusor, deben cumplir los siguientes requisitos:

- |   |   |   |
|---|---|---|
| 1) $r \gg D_{\max}$<br>1.4 m $\gg$ 0.82 m | 2) $r/D_{\max} \gg D_{\max}/\lambda$<br>1.71 $\gg$ $1.19 \lambda_{\min}$ & $0.002 \lambda_{\max}$ | 3) $r = 2r_1r_2 / (r_1+r_2)$<br>$r = 1.4$ m |
|---|---|---|

En el arreglo de un semicírculo, se implementan 37 micrófonos en su periferia, para cumplir con la norma que a cada  $5^\circ$  registre el retardo en tiempo de 0 a  $180^\circ$ , dando un diámetro de 2.8 m, con una periferia de 4.4 metros, obteniendo que la distancia entre cada micrófono es de 11.9 cm.

Quedando gráficamente un montaje previo del difusor con el goniómetro, de la siguiente forma:

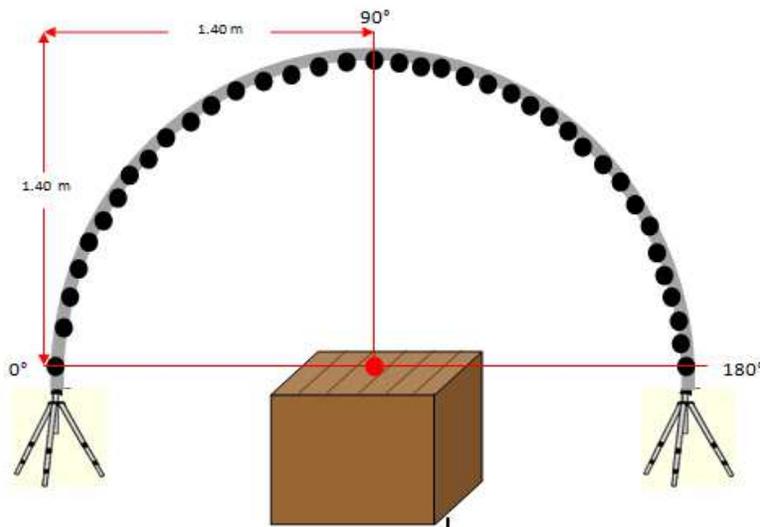


Figura 13.- Diseño del montaje de medición experimental

La estructura del goniómetro, es de una barra circular de aluminio de  $\frac{1}{2}$ ”; éste material fue seleccionado porque tiene una rigidez aceptable para darle la forma semicircular y por su dureza, que no se deformaría al colocar los micrófonos con sus respectivos sujetadores; la barra de aluminio, será sostenida con unos hilos dentro de la cámara semi-anecoica, para que no se venza ni se deforme la periferia semicircular.

Para suspender los micrófonos en el contorno de la estructura, se utilizaron 37 soportes para micrófonos B&K con modelo 4958, diseñados a medida debidamente sujetos al goniómetro, se diseñó un acoplador para empatar los dos trozos de aluminio y también se diseñó un sujetador de la estructura del goniómetro a los tripies.

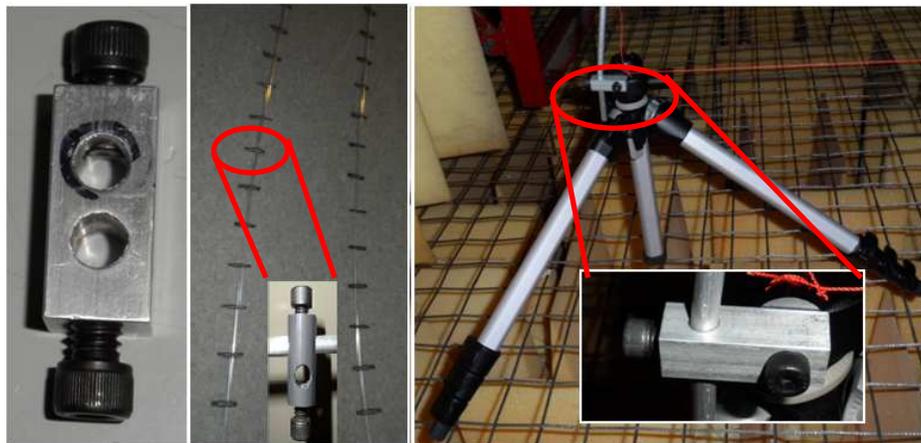


Figura 14.- Soportes de micrófono, acoplador y sujetador para tripies.

El micrófono B&K, modelo 4958, es un micrófono pre-polarizado de  $\frac{1}{4}$  de pulgada adecuado para su uso en sistemas que requieren un gran número de micrófonos. Estos micrófonos tienen excelente amplitud y fase de igualación en amplios intervalos de temperatura y humedad, contando también con un intervalo amplio de frecuencias para su captación, al igual que el rango dinámico en el que opera <sup>[20]</sup>. También fue diseñado un semicírculo como patrón polar y referencia para la rotación del difusor a cada  $5^\circ$ .



Figura 15.-Semicírculo de referencia para la rotación del difusor

### 2.3. MÉTODO DE CAMPO LIBRE - CÁMARA ANECOICA

Una cámara anecoica es una sala especialmente diseñada para absorber el sonido que incide sobre las paredes, el suelo y el techo de la misma cámara, anulando los efectos de eco, la reverberación del sonido y los ruidos procedentes del exterior. También es conocida como cuarto sordo o local de campo libre.

Las cámaras se pueden clasificar en anecoicas, semianecoicas y parcialmente cubiertas. En las cámaras anecoicas se desea que no exista ningún tipo de reflejo en el área de medición. En las semianecoicas se desea simular un espacio abierto sobre un plano de tierra metálico. En las cámaras parcialmente cubiertas el absorbente se usa para reducir las resonancias de la cámara.

Las mediciones se realizaron en la cámara semi-anecoica del laboratorio perteneciente al Centro Nacional de Metrología (DVA-CENAM)<sup>[21]</sup>, en la división de vibraciones y acústica; que cuenta con un volumen de  $84 \text{ m}^3$ , distribuidos en 7 m de largo x 4 m de ancho x 3 m de alto.



Figura 16.-Cámara semi-anecoica DVA-CENAM

Por lo tanto, el arreglo de micrófonos direccionados hacia el difusor, sólo captarán la presión sonora que este emita al momento de chocar las ondas sonoras en las superficies del difusor, ya que el comportamiento de la respuesta de los micrófonos no es afectado por la cámara.

La distribución del equipo dentro de la cámara semi-anecoica y el montaje en cuanto a las dimensiones geométricas de la cámara, fue de la siguiente manera:



Figura 17.- Montaje de medición dentro de la cámara anecoica

El equipo implementado en la medición fue el siguiente:

- 1 Sistema de adquisición de datos PULSE.
- 1 Fuente omnidireccional marca B&K, modelo 4292.
- 1 Amplificador de potencia marca B&K, modelo 2716.
- 37 Micrófonos marca B&K, modelo 4958.
- 1 Goniómetro acústico con 37 soportes para micrófono.
- 1 Difusor acústico unidimensional.
- 1 Termómetro marca Cole-Parmer, modelo 37950-03.

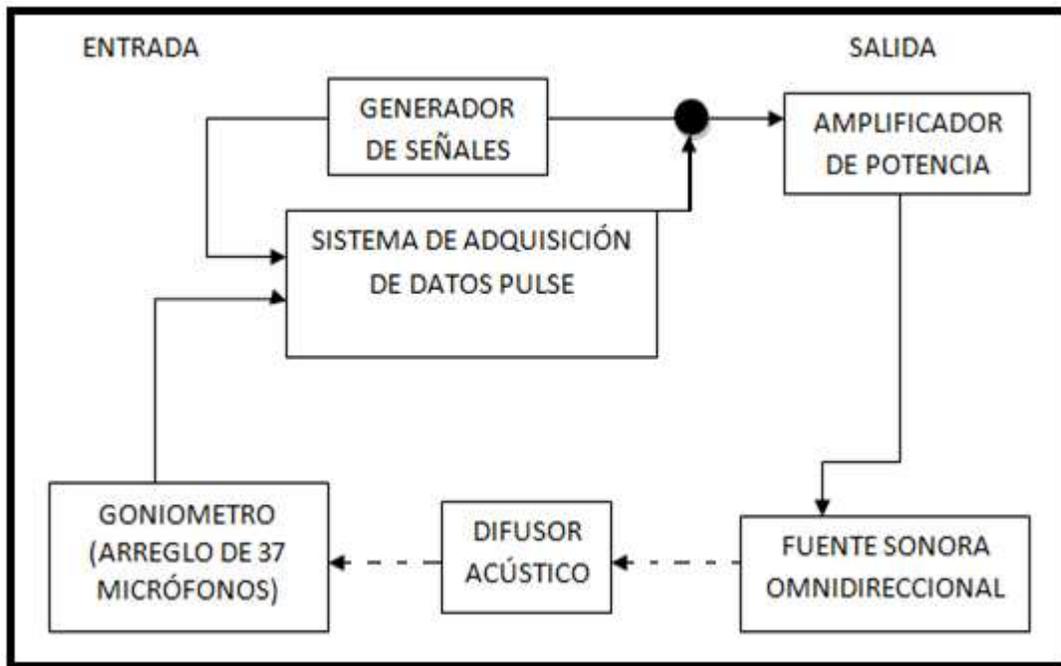


Figura 18.-Diagrama a bloques de la medición del difusor acústico

### 2.3.1. INSTRUMENTACION COMPLEMENTARIA

Para la adquisición de datos, se utilizará un software con hardware llamado PULSE, prestado por el Centro Nacional de Metrología (CENAM).

Este sistema como parte del hardware del PULSE, cuenta con 10 módulos, los cuales son para conectar los micrófonos, teniendo cada módulo 6 entradas; otro módulo cuenta con 4 entradas más de micrófonos y 2 salidas, que son los generadores de señal con que cuenta este hardware, entre otros aditamentos que se pueden consultar directamente en la página del fabricante B&K [23].

Cuenta con un software capaz de mostrar en tiempo real el monitoreo de las señales captadas y realiza algunos procesamientos de estas señales.

La configuración del PULSE para la adquisición de señal y el procesamiento de la misma, serán explicados a detalle a continuación.

En primer lugar, se configura el generador de señales, como un canal de salida, que manda un barrido senoidal de 200 a 6kHz, como señal de excitación a una fuente omnidireccional con su respectivo amplificador <sup>[22]</sup>.



Figura 19.-Montaje de medición en la cámara anecoica.

La configuración del generador en el software PULSE, se puede observar en la figura 20, quedando configurada con un barrido senoidal, en el intervalo de 200 a 6 kHz, sin desfaseamiento, emitiéndose de manera unidireccional y lineal; con una velocidad en el barrido de 1 kHz/s, repitiendo este barrido 10 veces, para que el sistema pueda hacer la promediación de los barridos; obteniendo un resultado más certero al final de cada medición. Cada barrido de la señal se emite en 6 segundos, por lo tanto, cada medición durará 1 minuto.

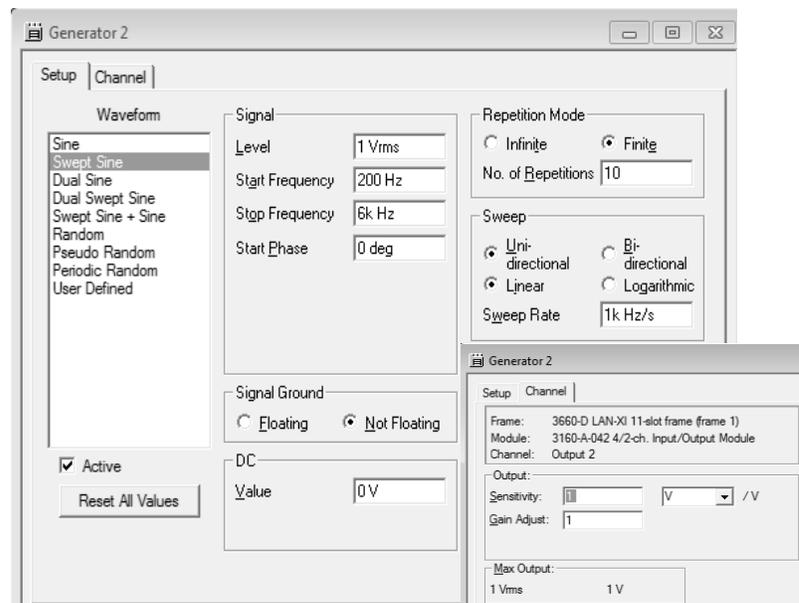


Figura 20.- Configuración del generador de señales del PULSE

El disparo (trigger), es decir, la señal se emitirá en cuanto se le indique manualmente (start); el programa empezará a emitir la señal y al mismo tiempo empezará a recabar los datos de la medición; al terminar con las 10 señales emitidas consecutivamente, se parará el programa de forma automática en el tiempo definido anteriormente y mostrará los resultados en gráficas, para posteriormente guardar los datos.

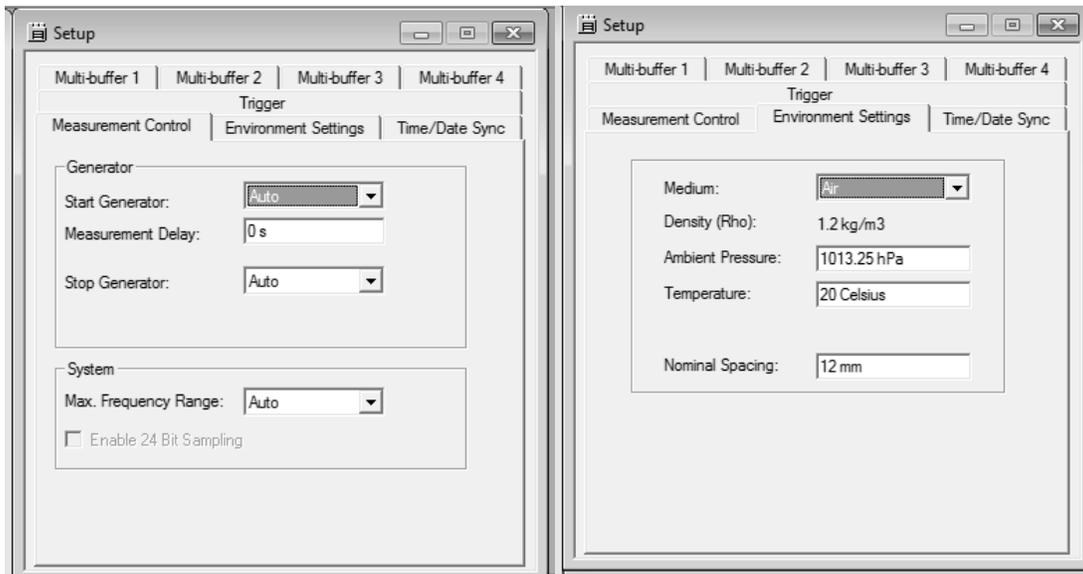


Figura 21.-Configuración del trigger y la toma de datos.

Como siguiente paso, se configuran los 37 micrófonos, siendo habilitados cómo canales de entrada (Véase en la figura 22). Es importante mencionar, que el PULSE calibra de manera automática los micrófonos cada vez que se corre el programa.

Para poder seleccionar y habilitar los 37 canales de entrada, se debe crear un analizador de señales en frecuencia, para que el software permita seleccionar cálculos de procesamiento específicos que se requiere como datos.

El analizador en frecuencia, debe contener todas las señales de entrada y la señal de referencia, que en este caso será la señal del generador, por lo que la señal de salida del generador se configuró como otra señal de entrada para seleccionarla como referencia, y el software me permita realizar procesamiento de datos y monitorear a su vez la señal de salida; trasladando los datos como siguiente paso para la configuración del analizador FFT.

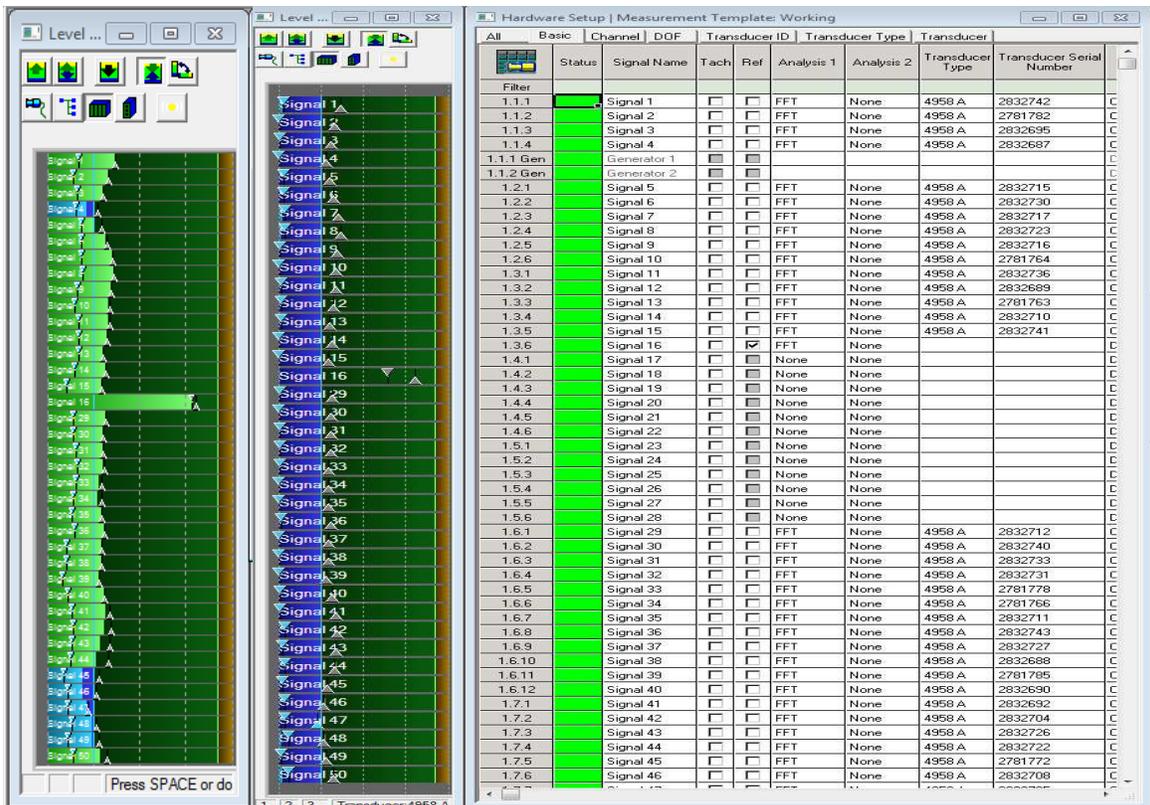


Figura 22.- Configuración para la habilitación de los canales de entrada

Se pueden modificar parámetros del analizador en frecuencia, como la resolución o número de líneas utilizadas para el análisis de señales, la amplitud de análisis en frecuencia, el tipo de promedio utilizado y factores desencadenantes, como se observa en la figura 23.

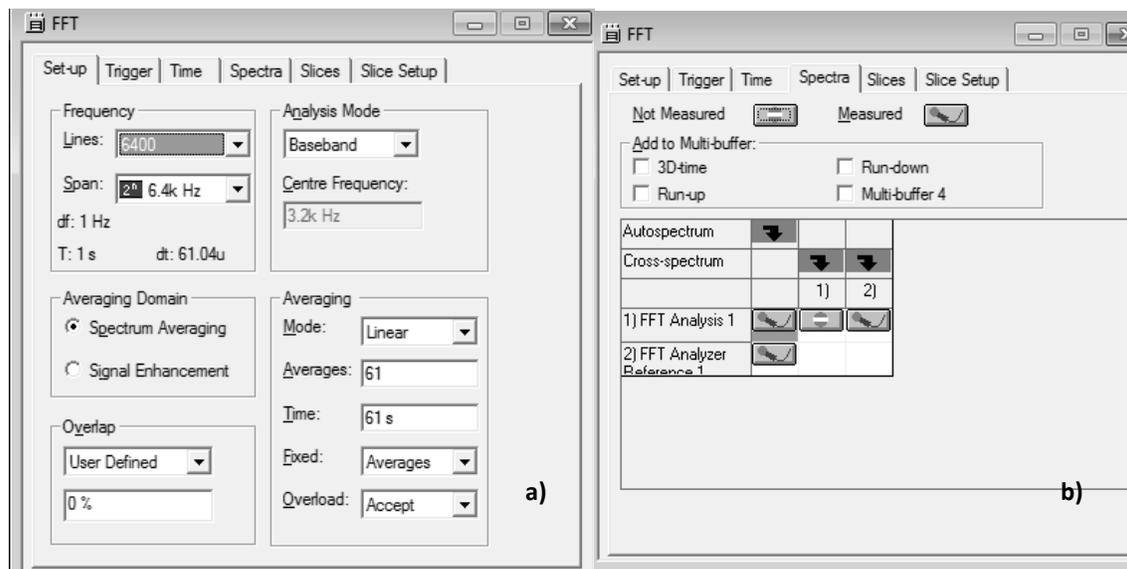


Figura 23.- Configuración del analizador en frecuencia del PULSE

El análisis que se usará aquí sólo verá frecuencias de hasta 6 kHz con 6400 líneas, es decir, una resolución de 1 Hz. Para esta medición 10 repeticiones de la señal serán suficientes y el resultado será el promedio de las mismas, por lo que el promedio se realizará en modo lineal después de los 61 segundos al comenzar la medición, sin traslape en la señal (véase en la figura 23-a).

En la pestaña de Spectra (véase en la figura 23-b), se elige análisis FFT con la función medir seleccionada. Esto habilita a la función de análisis en frecuencia y por otra parte habilita otros tipos de procesamiento de señal, que son necesarios.

El PULSE, da parámetros para cálculos posteriores, por lo que se deben crear grupos de funciones (véase en la figura 24), cómo: niveles de presión sonora, la respuesta al impulso, la relación señal a ruido con la señal filtrada en tercios de octava si así se requiere, siendo este grupo de funciones suficientes para el propósito experimental, además, el sistema PULSE crea la función de auto-espectro y correlación de espectro automáticamente.

Cabe mencionar que los datos que se obtienen de PULSE son una pequeña muestra del procesamiento de señales que este sistema puede realizar, ya que brinda más funciones de procesamiento, aunque para este proyecto no sean necesarias.

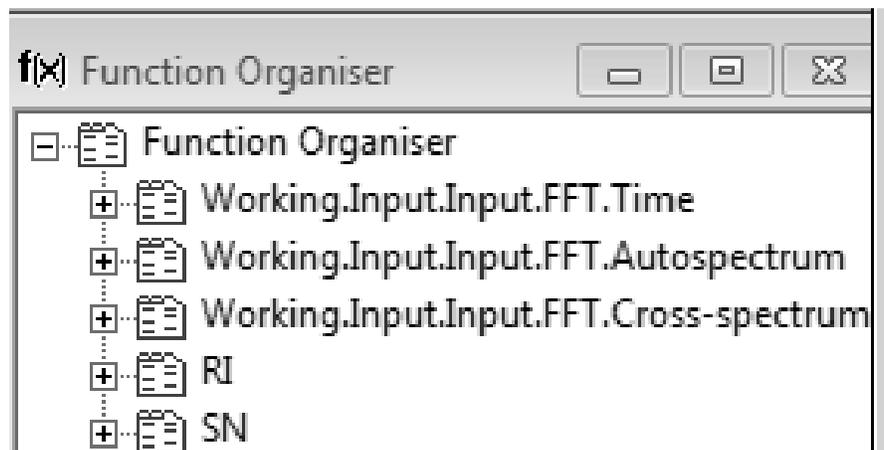


Figura 24.-Grupos de funciones para el procesamiento de la señal

La función Working.Input.Input.FFT.Time, mide los niveles de presión sonora, como se muestra en la figura siguiente en la parte superior derecha. En la opción "señal", se configura cada señal de entrada, es decir, los 37 micrófonos del goniómetro y la salida del generador que se configuró como entrada. En total, se tienen 38 entradas configuradas para ser visualizadas, medidas y registradas.

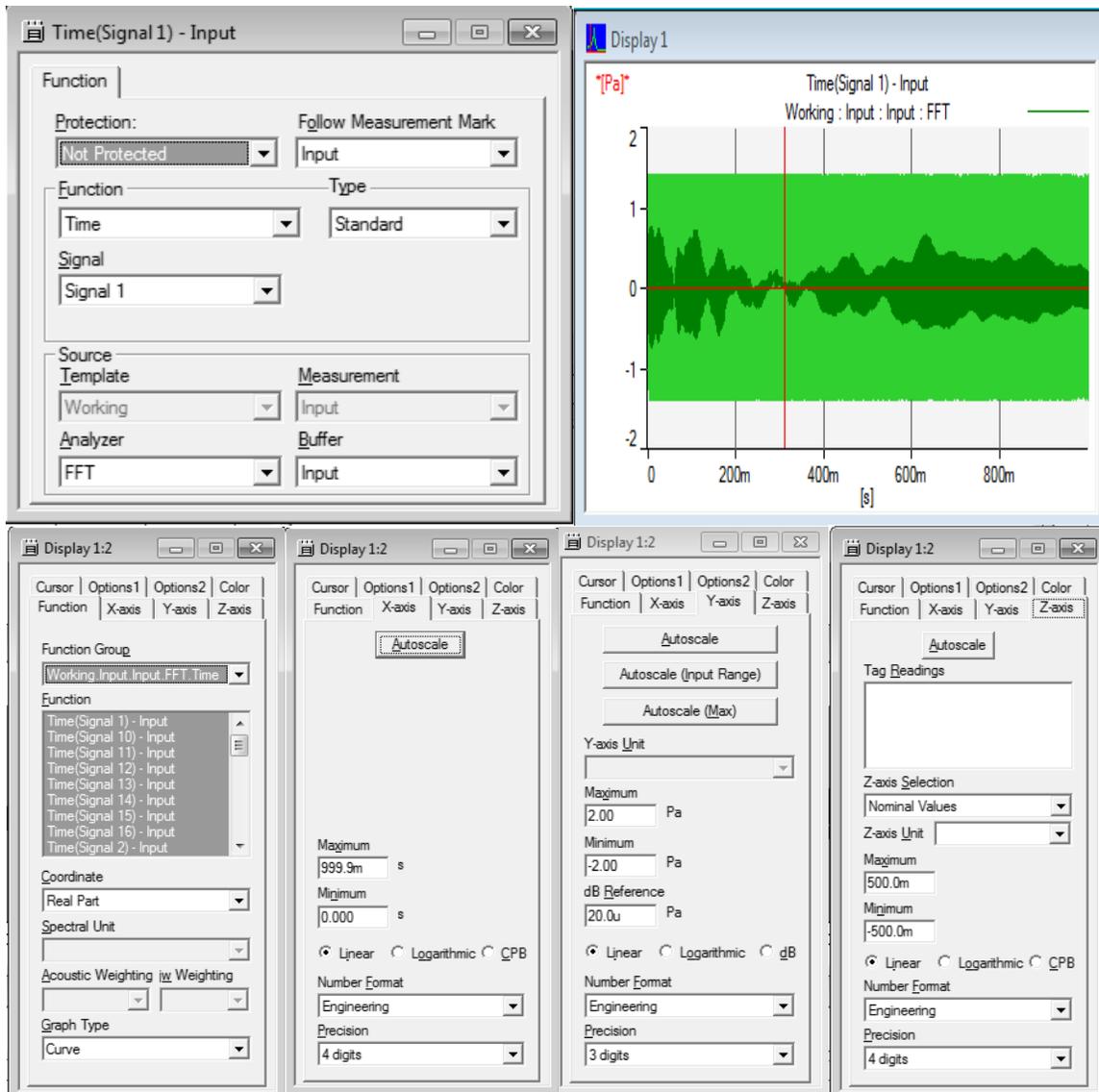


Figura 25.- Configuración de la función Working.Input.Input.FFT.Time

Como información adicional, el PULSE muestra las propiedades de los parámetros gráficos, como se observa en la figura anterior. Para el manejo de los datos es necesario que los niveles de presión sonora (NPS) sean registrados en Pascales [Pa].

La función RI (véase en la figura 26), que es la respuesta al impulso, se configura igualmente por cada señal de entrada se configura, seleccionando la señal de referencia, que en este caso es la señal 16, con el barrido senoidal del generador.

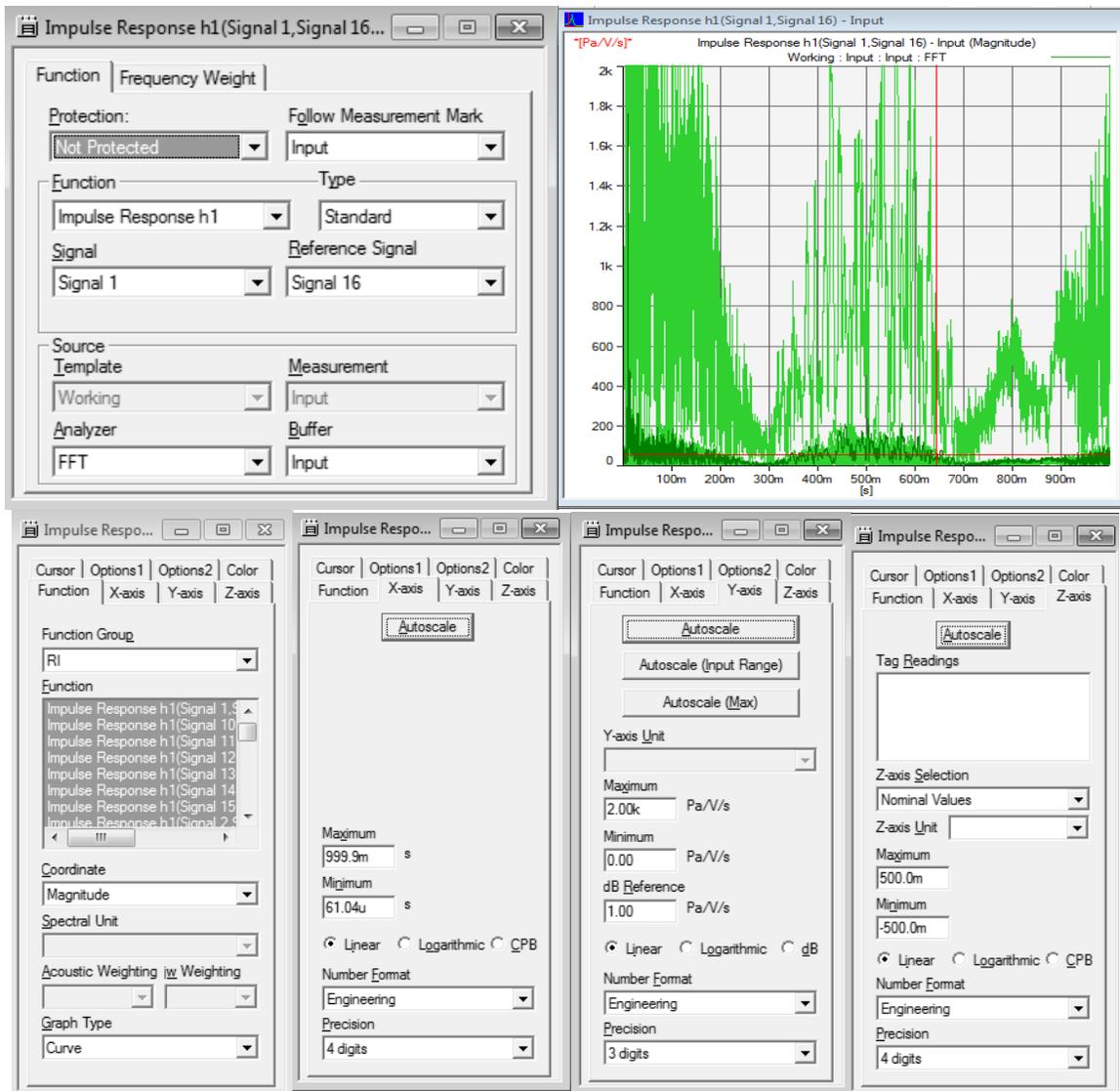


Figura 26.- Configuración de la función Respuesta al impulso.

En la respuesta al impulso, como se observa de la figura anterior, en la primera figura de la parte inferior derecha, los valores se obtienen en magnitud, linealmente y en unidades [Pa/V/s] por medición, también como parte de la visualización gráfica.

Para la configuración de la función SN (véase en la figura 27), que es la función que obtiene la relación señal a ruido, cada señal de entrada se configura, con referencia al barrido senoidal del generador de señales.

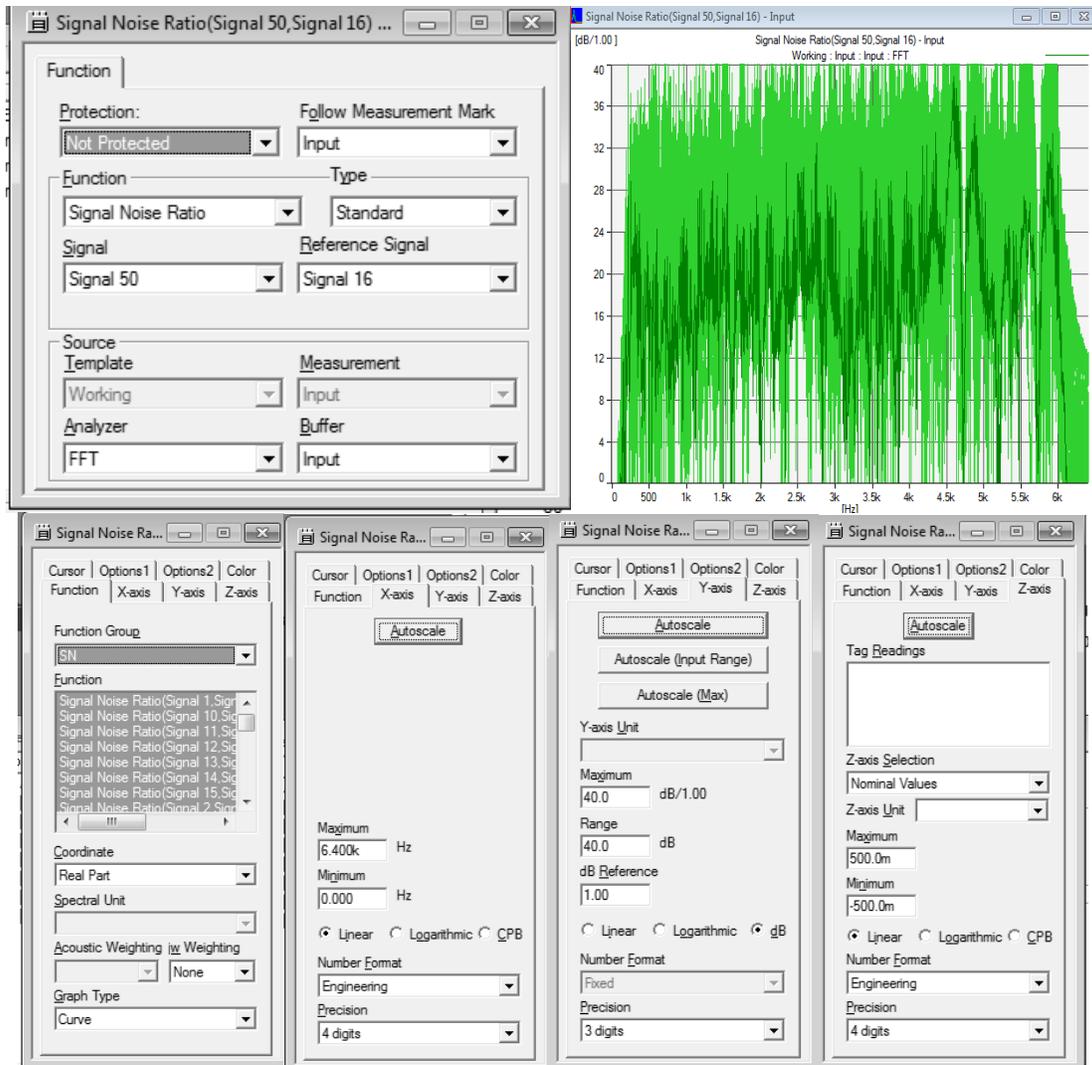


Figura 27.- Configuración de la función relación a ruido.

Observando la figura anterior, la función SN, mide la parte real y en decibeles [dB]. Una vez configurado todo el proceso de cálculo de PULSE, se activa el template (el programa creado), para que PULSE haga un chequeo, para que si existen errores en la configuración, éstos sean corregidos y si no, empezará a medir.

Cuando el PULSE termina la medición, los resultados son visualizados en la pantalla de la computadora, para posteriormente ser guardados.

Para guardar los datos obtenidos del grupo de funciones (véase en la fig. 28), en el organizador de componentes, con la opción vínculo a Matlab (Bridge to MATLAB), abre una ventana, en la cual se indica la dirección donde se desea guardar los datos y se le da la opción que no haga nada cuando genere los archivos guardados. Se seleccionan los archivos de las funciones requeridas, para que se guarden como archivos de texto, con la extensión (.txt); creando el archivo de nombre BKFiles.m, el cual contiene la información de las funciones con sus respectivos datos, para ser leídos y procesados en matlab.

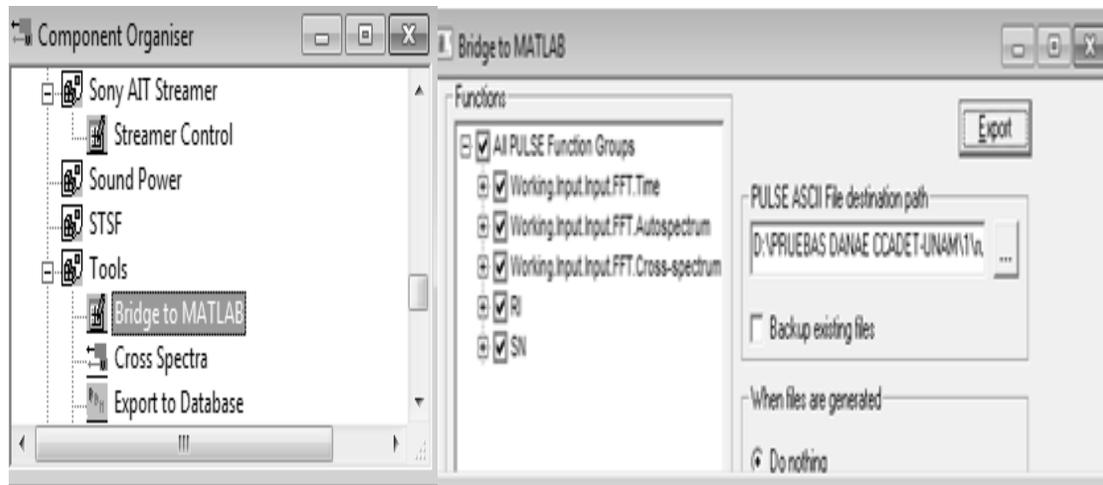


Figura 28.-Función para guardar los datos

Se visualizan los archivos de tipo texto (.txt), primeramente con un encabezado, donde despliega información sobre cada señal guardada (véase en la figura 29); como el nombre de la función de medición, las unidades de medición de los ejes x-y; el número de la señal donde se obtienen los datos, etc.

```

Data Type:          Complex
Slice:              False
Z-Axis type:       Linear
Z-Axis size:       1
Z-Axis unit:
Z-Axis first value: 0.00E+00
Z-Axis delta:      1.00E+00
X-Axis type:       Linear
X-Axis size:       16384
X-Axis unit:       s
X-Axis first value: 0.00E+00
X-Axis delta:      6.10E-05
AmplitudeUnit:    Pa/V/s
Analyzer:          FFT_Spectrum_Averaging
AnalyzerName:     FFT
CenterFrequency:  3.20E+03
dBReference:      1.00E+00
Domain:           0
Function:          Impulse Response
InputRange:       1.00E+01
MultiBufferName:  Input
NBW:              3.77E+00
OverlapFailed:    False
Overrun:          False
Power:            False
Ratio:            True
RecordLength:     1.00E+00
Ref_signal:       signal 16
RefSignalUnit:    V
Signal:           signal 1
SignalUnit:       Pa
Title:            "Impulse Response h1(signal 1,signal 16) - Input"
Title: working : Input : Input : FFT
ZoomOn:           False
TemplateName:    working
MeasurementName:  Input
MeasurementSlice: False
EnvelopeOn:       False
Z-index:         1
Date:             08/05/2013
Time:             10:45:24:250
Relative time:    0.00E+00
  
```

Figura 29.-Visualización de los archivos de texto guardados

Los valores que se despliegan consecutivamente después de cada encabezado (y que es la forma como serán visualizados en Matlab), están en formato de 3 columnas para la información de los niveles de presión sonora y la relación señal a ruido; pero para la función de la respuesta al impulso será de 4 columnas. El archivo contiene la siguiente distribución de los datos guardados:

Número de dato	Valor del eje x	Valor real del eje y	Valor complejo del eje y
1	0.00E+00	-3.19E+01	-3.39E+01
2	6.10E-05	-1.08E+01	-6.40E+00
3	1.22E-04	-3.54E+01	-3.47E+01
4	1.83E-04	-6.24E+00	-6.99E+00
5	2.44E-04	-3.99E+01	-3.37E+01
6	3.05E-04	-1.34E+00	-9.90E+00
7	3.66E-04	-4.41E+01	-3.02E+01
8	4.27E-04	2.31E+00	-1.52E+01
9	4.88E-04	-4.63E+01	-2.49E+01
10	5.49E-04	3.48E+00	-2.19E+01
11	6.10E-04	-4.56E+01	-1.95E+01
12	6.71E-04	2.59E+00	-2.77E+01
13	7.32E-04	-4.34E+01	-1.47E+01
14	7.93E-04	2.05E-01	-3.26E+01
15	8.54E-04	-4.00E+01	-1.10E+01
16	9.16E-04	-3.29E+00	-3.63E+01
17	9.77E-04	-3.58E+01	-8.40E+00
18	1.04E-03	-7.81E+00	-3.87E+01

Figura 30.-Visualización de los datos guardados.

The page features a decorative design with three green circles of varying sizes, each containing three concentric white circles. These circles are arranged vertically and are partially enclosed by two light gray diagonal lines that intersect at the top center. The largest circle is at the top, a smaller one in the middle, and the largest of the three is at the bottom right.

# CAPITULO

## III

RESULTADOS

En el capítulo anterior, se dio la información sobre la instrumentación que se ocupó para la medición; dando pie a que en este capítulo se haga un análisis de los resultados obtenidos, de la colocación y descripción del equipo requerido para la medición del difusor acústico.

La norma ISO 17497-2 reglamenta que, para las mediciones hechas con el método de campo libre, se debe realizar un promedio de los niveles de presión sonora, la respuesta al impulso y la relación señal a ruido. Con el promedio de las mediciones, se procesan los datos de este proyecto experimental con programación hecha en MATLAB.

Las mediciones se realizaron del 6 al 10 de Mayo del 2013, con una variación de temperatura de 20.4 °C a 21.2 °C y de humedad relativa de 26.5% al 31.8%. Teniendo con ello una diferencia de 0.8°C y 5.3% de variación respectivamente durante las mediciones, considerando estas variaciones dentro de los parámetros que la norma ISO 17497-2 estipula.

En el capítulo anterior, se menciona que el difusor es construido a una escala de 1: 1/2. Conforme a esta escala de construcción, la norma menciona que un difusor construido de esa manera, debe evaluarse con un intervalo de frecuencias de 50 Hz a 2500 Hz; pero cómo la cámara semi-anechoica de la DVA-CENAM tiene una frecuencia de corte de 630 Hz, el intervalo de frecuencia utilizado para este proyecto fue de 200 a 6 kHz.

La norma ISO 17497-2, estipula que para las mediciones en dos dimensiones, la fuente sonora puede ser colocada a un ángulo de 0°, ±30°, ±60° del punto de referencia, siendo este, el centro del difusor acústico. Conforme a lo anterior, coloque mi fuente a 30° del punto de referencia y con respecto a la normal (90°), puesto que para mis cálculos teóricos éste será el ángulo de incidencia.

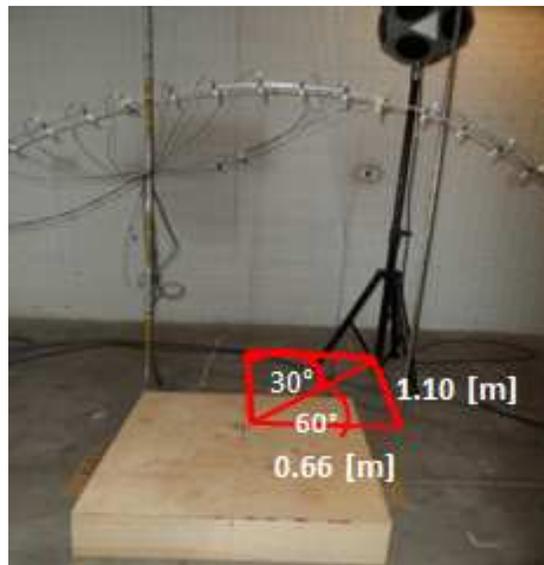


Figura 31.-Fuente sonora a 30° de incidencia

Se mencionó en el capítulo anterior, que se realizaron 10 mediciones en total por cada movimiento rotatorio de 5° del difusor. Los resultados obtenidos son descritos a continuación.

### 3.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES

#### 3.1.1 FUNCIÓN TIEMPO

Esta función nos entrega los niveles de presión sonora (NPS) en pascales, de la rotación de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  del difusor en función del tiempo. El resultado promedio de las mediciones tomadas con el goniómetro acústico en el PULSE, con el difusor ( $h_1(t)$ ), sin difusor ( $h_2(t)$ ) y de la referencia ( $h_3(t)$ ), se obtuvo lo siguiente:

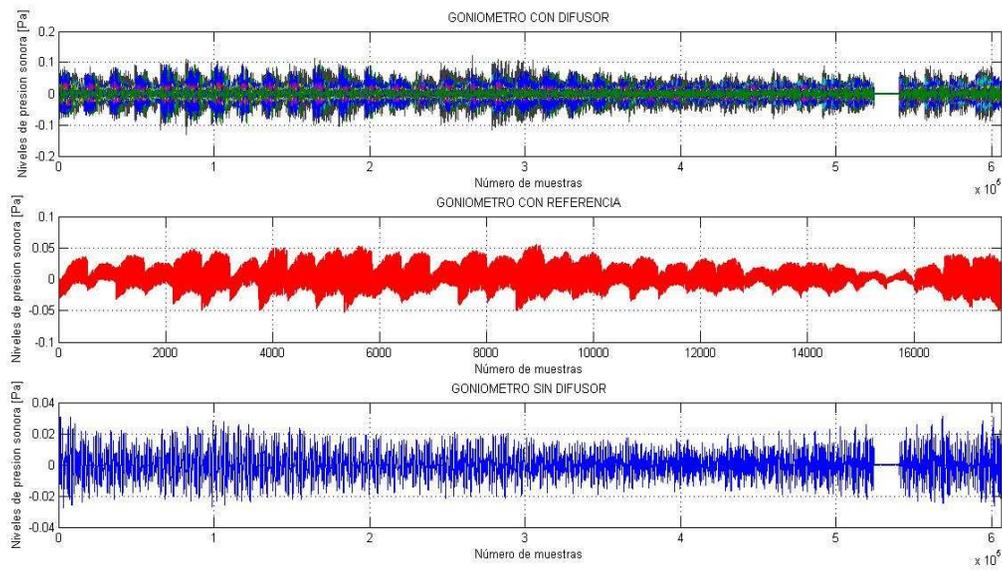


Figura 32.- Medición de los niveles de presión sonora (NPS)

Para mejor apreciación de los datos, se mostraran figuras en este capítulo, sólo de la señal en  $30^\circ$  respecto a la normal de  $90^\circ$ .

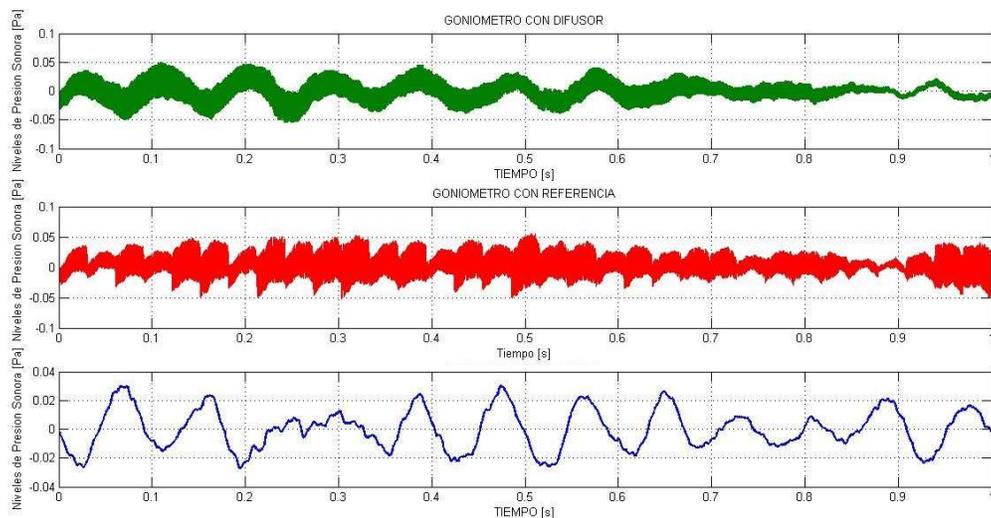


Figura 33.- Medición de los niveles de presión sonora (NPS) en la posición de  $30^\circ$  de medición.

Esta función permitió monitorear los niveles de presión sonora, que recibía el arreglo de micrófonos del goniómetro en tiempo real al momento de la medición experimental, dando una promediación al final de cada medición, como se observa en las figuras anteriores.

Pero para cuestiones de ilustrar el nivel de presión sonora utilizado durante las mediciones, se convirtieron las unidades de los niveles de presión sonora de pascales a decibeles, utilizando la siguiente formula:

$$NPS = 20 \log_{10} \left( \frac{P}{P_{ref}} \right) \quad [dB] \quad (3.1)$$

Siendo NPS, los niveles de presión sonora en [dB]; P, la presión sonora medida en [Pa] y la Pref, es la presión de referencia de  $20 \times 10^{-6}$  [Pa].

Obteniendo de la ecuación anterior, los siguientes resultados:

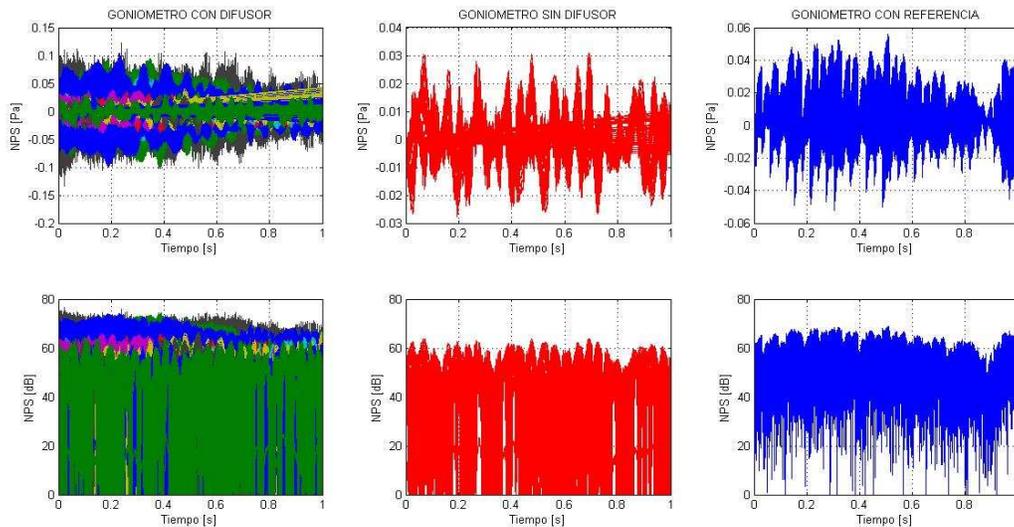


Figura 34.-Conversion de unidades en los niveles de presión sonora

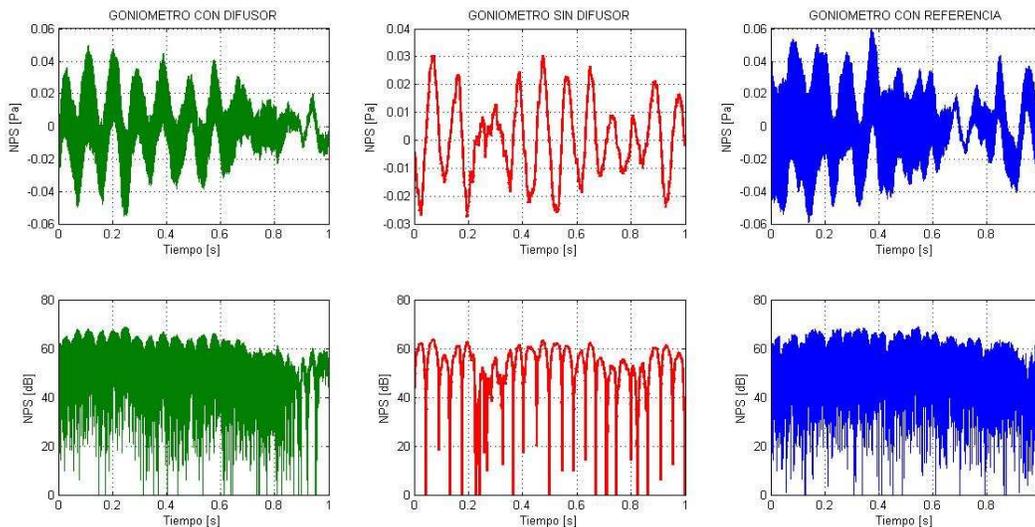


Figura 35.-Conversion de unidades en la posición de 30° de medición.

Observando de las dos figuras anteriores, que el nivel de presión durante las mediciones experimentales, fueron de aproximadamente entre 65 a 70 dB, comparando este intervalo del nivel de presión, con el ruido de tránsito ligero, el ruido de una aspiradora, impidiendo tener una conversación.

### 3.1.2. FUNCIÓN RESPUESTA AL IMPULSO

Teniendo las mediciones de la respuesta al impulso del difusor  $h_1(t)$ , sin difusor  $h_2(t)$  y de la referencia  $h_3(t)$  conteniendo la información del arreglo de micrófonos en el goniómetro.

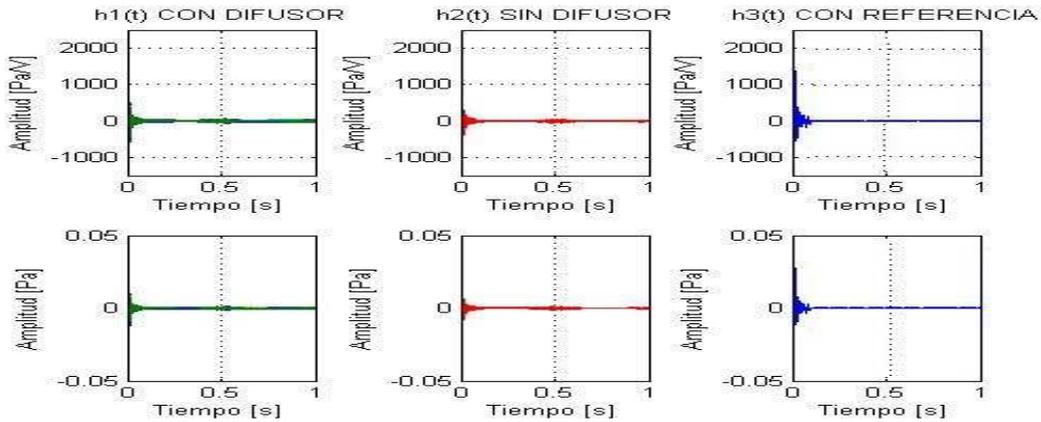


Figura 36.- Respuesta al impulso de  $h_1(t)$ ,  $h_2(t)$  y  $h_3(t)$

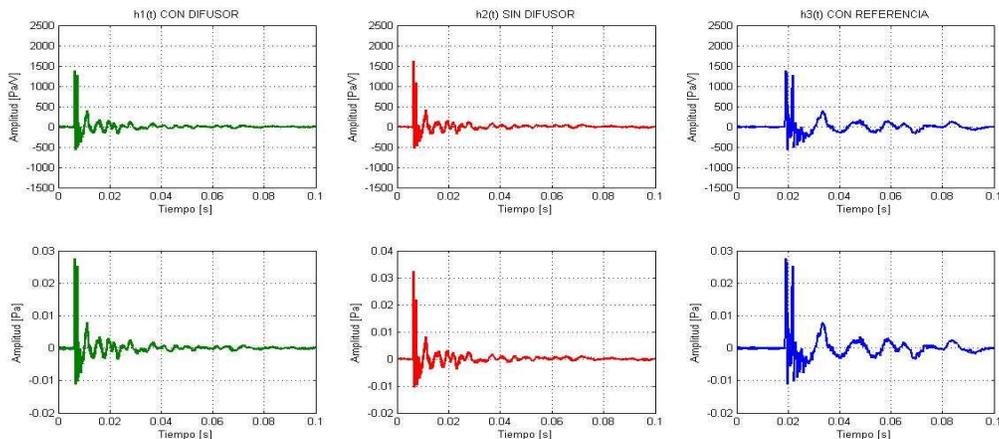


Figura 37.- Respuesta al impulso de  $h_1(t)$ ,  $h_2(t)$  y  $h_3(t)$  en la posición de  $30^\circ$ .

Para realizar el procesamiento con los datos de las respuestas impulso  $h_1(t)$ ,  $h_2(t)$  y  $h_3(t)$ , se inicializa este procesamiento, con la conversión de unidades de [Pa/V] a [dB], aplicando la siguiente fórmula:

$$h(t)_{dB} = 20 \log_{10} \left( \frac{h_n(t)}{h_{ref}(t)} \right) \quad [dB] \quad (3.2)$$

Siendo  $h(t)_{dB}$ , la respuesta al impulso en [dB];  $h_n(t)$  la respuesta al impulso en [Pa/V] obtenidas del PULSE y  $h_{ref}$ , es la referencia para la conversión de 1 [Pa/V].

Para después convertir esas unidades logarítmicas a lineales, es decir, de las unidades en decibeles a pascales, con el fin de procesar los datos, utilizando la siguiente ecuación:

$$NPS = 10^{\frac{Li}{20}} * P_{ref} \quad (3.3)$$

Siendo  $P$ , los niveles de presión sonora;  $L_i$ , los niveles de presión en [dB] y  $P_{ref}$ , es la presión de referencia de  $20\mu Pa$ .

Para obtener la respuesta al Impulso del sistema normalizada  $h(t)$ , es necesario que la respuesta impulso  $h_1(t)$  y  $h_2(t)$ , se aplica una ventana de tiempo, tomando sólo los datos que contengan la señal reflejada y para  $h_3(t)$ , del mismo modo, se aplica una ventana de tiempo del mismo tamaño que la anterior, para tomar únicamente los datos que contengan la señal incidente de la respuesta al impulso, como se muestra en la siguiente figura:

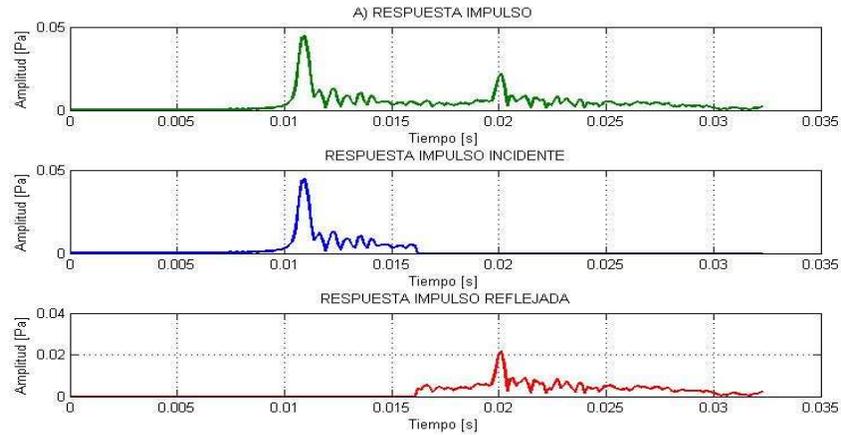


Figura 38.- Ventanas de tiempo para la respuesta al impulso

Seleccionando la señal reflejada de las respuestas al impulso con y sin difusor y la señal incidente para la respuesta al impulso con referencia, aplicando la ecuación 1.13, nos da la respuesta al Impulso del sistema normalizada  $h(t)$ .

Dando como resultado, la concatenación de las respuestas al impulso de todo el sistema de medición experimental normalizada y no normalizada en función del tiempo, es la siguiente:

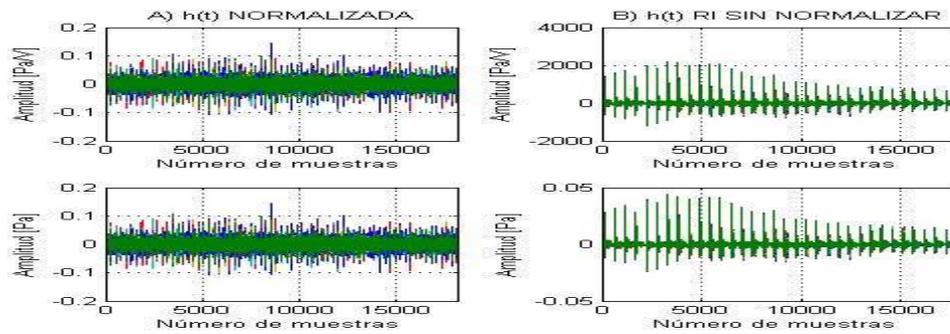


Figura 39.- Respuesta al impulso del sistema A)  $h(t)$  normalizado y B) sin normalizar

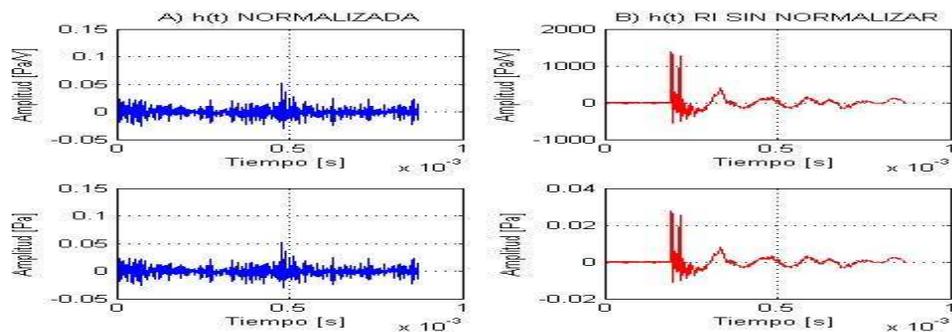


Figura 40.- Respuesta al impulso del sistema A)  $h(t)$  normalizado y B) sin normalizar en  $30^\circ$

Con la respuesta al Impulso del sistema normalizada  $h(t)$  y no normalizada  $h_1(t)$ , es posible obtener la respuesta polar de difusión del sonido para ambos casos. Para ello se obtiene la respuesta en frecuencia de las respuestas al impulso en cuestión, es decir, pasando del dominio del tiempo a la frecuencia los datos, que mediante un filtro de bandas en tercios de octava es graficado polarmente la difusión, obteniendo finalmente el coeficiente de difusión; este proceso se ve simplificado en la siguiente figura.

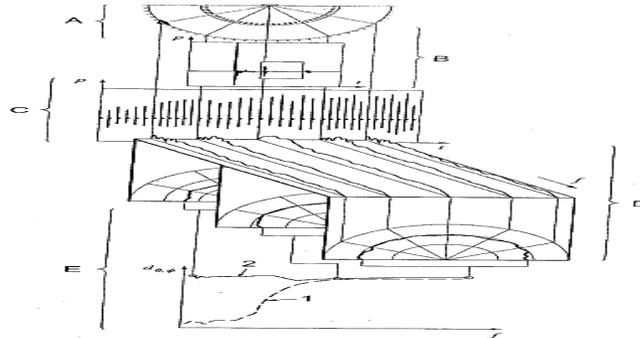


Figura 41.- Proceso de extracción del coeficiente de difusión de la respuesta al impulso  $h(t)$   
 A) Medición geométrica; B) Respuesta en tiempo,  $h_1(t)$ ; C) Concatenamiento de las respuestas impulso; D) Respuesta Polar; E) Coeficiente de difusión en frecuencia sin normalizar(1) y normalizado (2) <sup>[18]</sup>.

Con las señales de la respuesta al impulso del sistema experimental normalizada y no normalizada en función del tiempo, se obtiene la respuesta en frecuencia de ambas señales, para después aplicar un filtro en bandas de tercios de octava, para la respuesta en frecuencia de la respuesta al impulso normalizada y no normalizada, conteniendo la presión cuadrática en cada banda de interés, resultando un patrón polar de difusión para ambos casos, con la aplicación en la presión cuadrática obtenida la raíz cuadrada de su valor para obtener la presión difusa.

La presión cuadrática difusa por bandas de tercios de octava en función de la frecuencia, se adquirió con la siguiente ecuación:

$$P_B^2 = \frac{1}{Nf} \sum_{f=f1}^{f2} |P_s|^2 \quad (3.4)$$

Donde  $P_B$ , es la presión cuadrática en la banda de frecuencia de interés;  $Nf$ , es el número de frecuencias;  $f_1$  y  $f_2$ , es la frecuencia mínima y máxima respectivamente a partir de una frecuencia central dada y  $P_s$ , presión difusa en base a la frecuencia. De la misma forma se obtiene la presión difusa en la parte experimental. Dando los siguientes resultados:

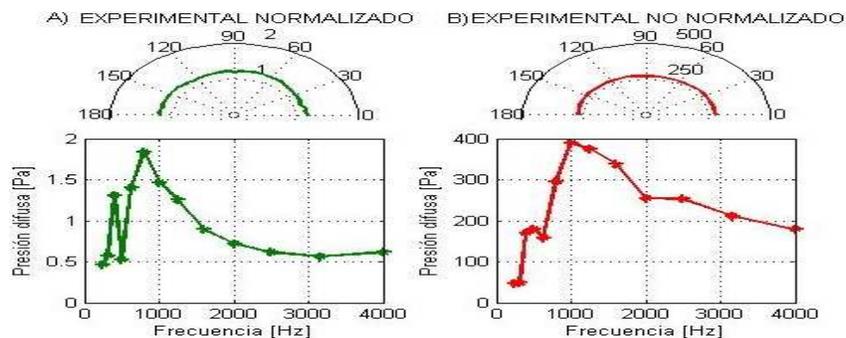


Figura 42.- Patrón de difusión del difusor acústico unidimensional, a partir de la respuesta al impulso a) normalizada y B) sin normalizar

### 3.1.3. FUNCIÓN RELACION SEÑAL A RUIDO

La función SN, que contiene la información de la relación señal a ruido de las mediciones, deben de cumplir por norma, que indica que la superficie totalmente reflectante deberá ser lo suficientemente grande para asegurar que el borde de difracción a partir de esta superficie es al menos 40 dB por debajo de la señal. Es decir, que espacialmente la medición deberá exhibir una relación señal a ruido de al menos 40 dB dentro de la ventana rectangular. Teniendo como resultado promediado los 40 dB, como se observa en la siguiente figura.

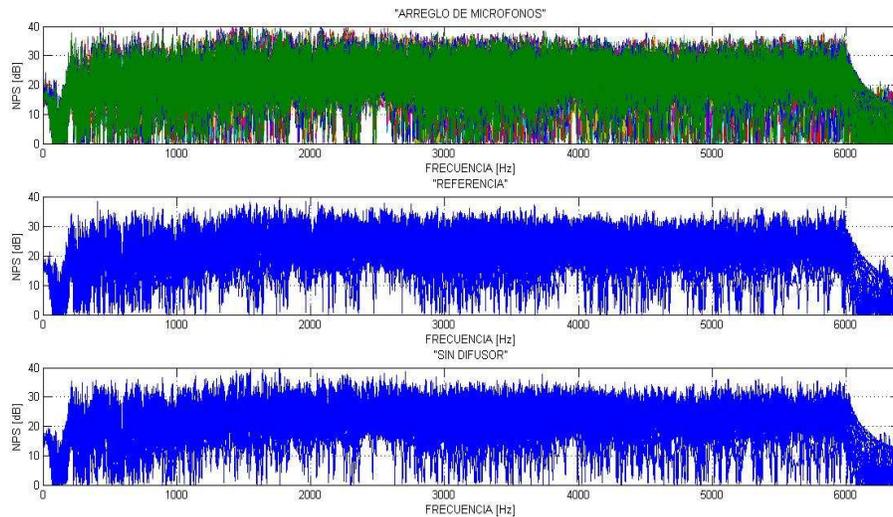


Figura 43.- Relación señal a ruido de las mediciones.

## 3.2. COMPARACIÓN TEÓRICO-EXPERIMENTAL

### 3.2.1. PATRON DE DIFUSIÓN

Para obtener el patrón polar de difusión teórica, a partir de los niveles de presión difusa obtenidos de la ecuación 1.18, mediante el diseño del difusor acústico unidimensional, estas presiones se filtran por tercios de octava para ser graficadas polarmente y en términos de frecuencia.

Obteniendo teóricamente en el patrón polar una cobertura homogénea (véase en la figura 44-A), teniendo un descenso de la presión difusa al aumentar la frecuencia, observando en la bandas de 1 kHz a 1.25 kHz un pequeño sobre paso de la presión.

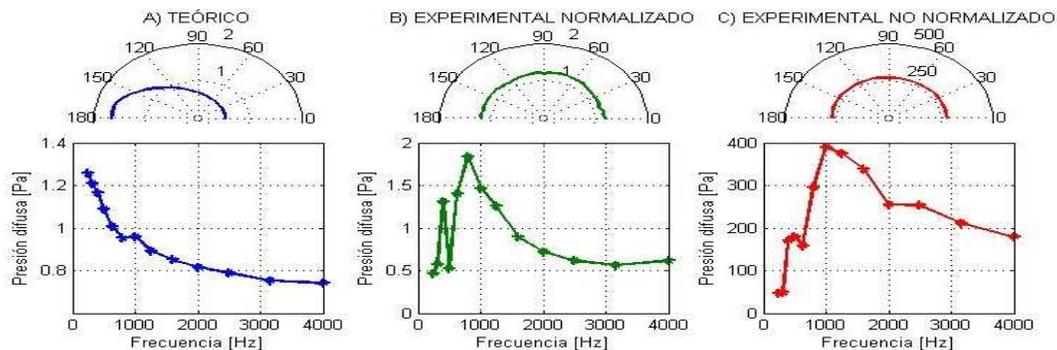


Figura 44.- Patrón de difusión del difusor acústico unidimensional  
 A) Teórico, B) Experimental normalizado y C) Experimental no normalizado

Mientras que en el patrón polar de difusión experimental, obtenido en la sección 3.1.2, mediante la respuesta al impulso normalizada (figura 44-B) y no normalizada (figura 44-C), se observa en estas gráficas que la presión difusa en función de la frecuencia, decae al aumentar la frecuencia.

Para comparar mejor los patrones de difusión teórico-experimental con los datos normalizados, patrones de mayor interés en base a la norma 17497-2, se observa en la figura 45, que la difusión experimental es más homogénea angularmente, ya que en la difusión teórica, se aprecia que de 0 a 90°, la presión de difusión es menor que el resto de los ángulos.

También en esta figura se observa, que del mismo modo la presión difusa obtenida en lo experimental y lo teórico, al aumentar la frecuencia la presión difusa va disminuyendo, pero con la diferencia que el experimental tiene este comportamiento más marcado, a partir de 800 Hz en adelante, esto es porque la cámara semi-anechoica tiene una frecuencia de corte de 630 Hz para su funcionamiento, por esa razón se tiene variaciones de presión en bajas frecuencias; pero en ambos casos, a partir de la banda de 1600 Hz la presión difusa se comporta de manera muy similar en ambos casos.

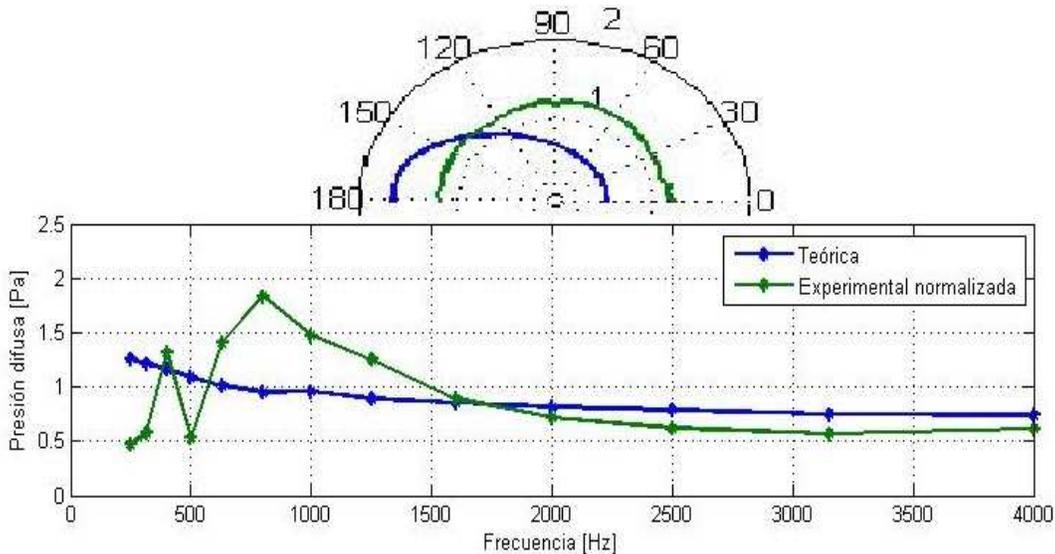


Figura 45.- Patrón de difusión del difusor acústico teórico-experimental normalizado

### 3.2.2. COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DIRECCIONAL

El coeficiente de difusión teórico, primeramente, se obtiene de la ecuación 1.18, a partir de las presiones de difusión, mediante diseño del difusor unidimensional explicado en el capítulo II, haciendo la conversión de unidades de las presiones en pascales a decibeles con ayuda de la ecuación 3.1, definiendo después la normalización de los niveles de presión sonora de los datos anteriores, con la ecuación 1.28, adquiriendo con lo anterior el valor del coeficiente de difusión direccional con la ecuación 1.29.

Obteniendo teóricamente el 0.48, como coeficiente de difusión direccional, consiguiendo el 48% en difusividad teórica, a partir del diseño del difusor acústico unidimensional a escala.

Mientras que el coeficiente de difusión direccional experimental de 0.92, es decir, el 92% en difusividad experimental. Adquirido este valor a partir de las presiones difusas en base a la respuesta al impulso normalizada en función de la frecuencia, obtenidas de la ecuación 3.4, convirtiendo las unidades lineales a logarítmicas, es decir, de unidades en  $[\text{Pa}^2]$  a  $[\text{dB}]$ , para después normalizar los niveles de presión sonora dados en decibeles con la ecuación 1.28, con la finalidad de aplicar la ecuación 1.29, con la que se adquiere el coeficiente de difusión direccional.

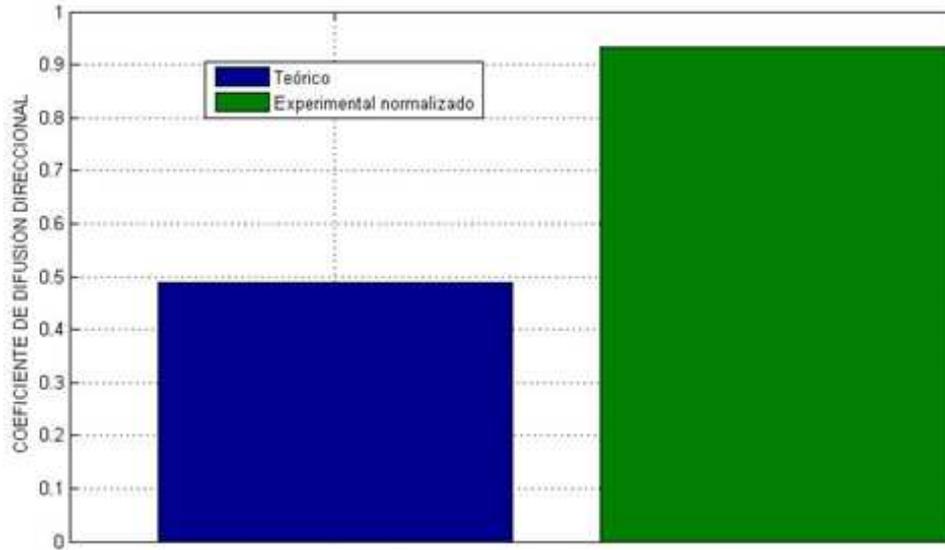


Figura 46.- Coeficiente de difusión direccional

Resultado un coeficiente de difusión direccional experimental mayor al teórico, teniendo una diferencia teórico-experimental del 34% entre ambos resultados, resultado este valor en base al patrón de difusión obtenido. Constatando que el coeficiente de difusión teórico es menor al experimental, porque en base al patrón de difusividad uniforme angularmente, era de esperarse que el coeficiente de difusión experimental fuera más grande ya que su forma de difusión es más uniforme y homogénea en cuestión de la presión difusa angular que lo obtenido teóricamente.



# CAPITULO

## IV

“CONCLUSIÓN”

Para la realización experimental, se tuvo un entrenamiento y aprendizaje del sistema de adquisición de datos multicanal simultáneo, llamado PULSE, obteniendo una constancia de capacitación por parte de la compañía B&K, adquiriendo después conocimiento más detallado durante 15 días durante una estancia académica, con el apoyo de metrologos del CENAM en el estado de Querétaro.

Para cumplir con la caracterización de un difusor acústico, se diseñó un difusor unidimensional a escala, puesto que en el mercado, este tipo de elemento acústico es muy caro y poco empleado en México; se tomó la decisión de diseñarlo, para tener información de su comportamiento y desempeño acústico. Se caracterizó en la Cámara Semi-anechoica de la División de Vibraciones y Acústica del CENAM, con lineamientos de la norma ISO 17497-2, que cuantifica las propiedades de la dispersión del sonido en superficies en campo libre. Agilizando el proceso de medición con el diseño y construcción de un goniómetro acústico semicircular, empleado por primera vez en México para la medición de la dispersión acústica; siendo una aplicación experimental innovadora en el país.

Las mediciones experimentales se llevaron a cabo en 5 días hábiles, de los cuales los primeros dos días fueron para montar el goniómetro con el respectivo arreglo de micrófonos; conectando los micrófonos con mucha precaución al hardware del PULSE, para no dañar los micrófonos y sus líneas de conexión; ya que este cable es muy delgado y frágil para su manejo. Teniendo que fijar la posición de los micrófonos y por consecuencia, también el goniómetro para la medición, rotando sólo el difusor unidimensional durante las mediciones.

Durante el tercer y cuarto día se realizaron las mediciones experimentales sin tener mucha variación de humedad y temperatura, validando así las mediciones experimentales realizadas. Finalizando el quinto día con el desmontaje del equipo del implementado.

Los resultados comparativos en el patrón de difusión experimental en contra parte de los teóricos, se aprecia que no es uniforme la difusión teórica como en el caso de la parte experimental, el patrón de difusión teórico, tiene un mayor nivel de presión entre los 90 y 180°, que por otra parte, la difusión experimental es homogénea y uniforme en todos los ángulos. Y en cuando al análisis en frecuencia en ambos casos, se tiene que a lo largo del eje x, el valor disminuye al aumentar la frecuencia, teniendo un comportamiento de las presiones difusas similares en altas frecuencias.

Con respecto al coeficiente de difusión teórico, este tiene menor valor que el experimental, sin embargo como el coeficiente de difusión en la teoría es de 0.48 y el experimental casi el doble del coeficiente de difusión teórico, con un valor de 0.92; consiguiendo una diferencia entre ambos del 34%. Esta diferencia se basa en la presión difusa que en ambos casos se obtuvo, corroborando que el coeficiente de difusión teórico es mayor que el experimental, por que se tiene una presión angular mayor y uniforme de 0 a 180 que en lo teórico, donde se tiene un presión mayor de 90° en adelante.

Concluyendo de lo anterior, que el difusor acústico unidimensional hecho físicamente mediante un diseño teórico, difunde el sonido directo mejor experimentalmente que lo esperado teóricamente; que con ayuda del goniómetro acústico diseñado, la adquisición de datos se es más fácil y rápida, innovando en México con este aparato de instrumentación, que permite la agilidad de dicha medición. Aplicándose satisfactoriamente por primera vez en el país, la técnica de campo libre para medir la dispersión acústica de la norma ISO 17497-2.

Por lo tanto la utilización de difusores en recintos, difundirá el sonido en zonas que necesiten un mejoramiento de difusión acústica, creando el campo difuso deseado en base a las necesidades del recinto acústico.

Deduciendo con esto, que el método de medición, la instrumentación utilizada y las mediciones obtenidas del difusor, son buenas y estiman muy bien el rendimiento y comportamiento de este elemento acústico. Dando información técnica explícita del difusor, para saber si es adecuado implementar este elemento en algún recinto, sin reducir el tiempo de reverberación y eliminando ecos en el recinto, si es que los tuviera.

# REFERENCIAS



- [1] Cox and Peter D'Antonio. Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application. New York: Spon Press, 2006.
- [2] M. R. Schroeder. Diffuse Sound Reflections by Maximum-Length Sequences. J. Acoust. Soc. Am. , 57(1975), 149-150
- [3] Trevor J. Cox and Peter D'Antonio. "Acoustic Phase Gratings for Reduced Specular Reflection," Applied Acoustics 60, 167-186 (2000).
- [4] T. J. Cox and Y. W. Lam, "Prediction and Evaluation of the Scattering From Quadratic Residue Diffusers," J. Acoust. Soc. Am., 95(1), 297-305 (1994).
- [5] Antoni Carrión Isbert. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. España-Barcelona 1998.
- [6] Servín. I. Difusores acústicos. 4to Congreso de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas. ECA 340, 230-236 (2005).
- [7] Vorländer M. Mommertz E. Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients. Applied Acoustics 2000; 60(2):187-99
- [8] T. Kamisinski, J. Rubacha and A. Pilch. The study of sound scattering structures for the purposes of room acoustic enhancement. Acoustic and Biomedical Engineering; 118(2010):83-86.
- [9] T.J. Cox, L. Dalenback, P. D'Antonio, J. J. Embrechts, J. Y. Jeon, E. Mommertz, M. Vorländer. A tutorial on Scattering and Diffusion Coefficients for Room Acoustics Surfaces. Acta Acústica united with Acústica; 92(2006):1-15.
- [10] Peter D'Antonio and Brian Rife. The state of the art in the measurement of acoustical coefficients. RPG Diffusor Systems, 651-C Commerce Drive, Upper Marlboro, MD 20774; 1-19.
- [11] E. Mommertz & S. Müller. Measuring Impulse Response with Digitally Pre-emphasized Pseudorandom Noise Derived from Maximum-Length Sequences. Applied Acoustics; 44(1995):195-214
- [12] Eckard Mommertz. Determination of scattering coefficients from the reflection directivity of architectural surfaces. Applied Acoustics 2000; 60(2):201-203
- [13] Embrechts Jean- Jacques. Practical aspects of the ISO procedures for measuring the scattering coefficient in a real-scale experiment.
- [14] Jin Yong Jeon, Sung Chan Lee, Michael Vorländer. Development of scattering surfaces for concert halls. Applied Acoustics; 65(2004):341-355
- [15] Volker Mellert, Christian Nocke. Applications of in-situ measurement techniques of absorption. Oldenburg University, Institute for Physics, 26111 Oldenburg University, Institute for Physics, Germany.

- [16]M. Garai, M. Bérengier, P. Guidorzi, Ph. L' Hermite. Procedure for measuring the sound absorption of road surfaces in situ. Euro Noise Conference, München, October 1998.
- [17]Miikka Tikander. Model-Based curvefitting for in-situ impedance measurements. Master of Science in Technology, Espoo 2002.
- [18]Audio Engineering Society, Inc. AES information document for room acoustics and sound reinforcement systems- Characterization and measurement of surface scattering uniformity. Audio Eng. Soc., Vol. 49, No. 3, 2001 March.
- [19]Xiao, L, Cox, TJ and Avis. Active diffusers: some prototypes and 2D measurements. Journal of Sound and Vibration; 285 (1-2) , pp. 321-339.
- [20]Especificaciones de los micrófonos B&K 4958  
<http://www.bksv.com/Products/transducers/acoustic/microphones/microphone-preamplifier-combinations/4958.aspx?tab=overview>  
Fecha de consulta: Octubre 2012
- [21]Cámara semi-anecoica del Centro Nacional de Metrología (DVA-CENAM)  
<http://www.cenam.mx/DVA/Index.aspx>
- [22]Fuente omnidireccional y amplificador de potencia  
<http://www.bksv.es/Products/transducers/acoustic/sound-sources/omni-power-light-4292.aspx?tab=descriptions>  
<http://www.acoustics-engineering.com/pyrite/pyrite%20datasheet.pdf>  
<http://www.bksv.es/Products/transducers/acoustic/sound-sources/power-amplifier-2716.aspx?tab=overview>  
<http://www.ee.bgu.ac.il/~acl/Equip/PA2716.pdf>  
Fecha de consulta: Mayo 2013
- [23]Software y hardware PULSE  
<http://www.bksv.com/products/pulse-analyzer.aspx>  
Fecha de consulta: Octubre 2012
- [24]Tabla de coeficientes de absorción  
[http://www.inifed.gob.mx/doc/NORMAS\\_TECNICAS/VOLUMEN\\_3/Volumen\\_3\\_Tomo\\_IV\\_Acondicionamiento\\_Acustico.pdf](http://www.inifed.gob.mx/doc/NORMAS_TECNICAS/VOLUMEN_3/Volumen_3_Tomo_IV_Acondicionamiento_Acustico.pdf)  
Fecha de consulta: Enero 2013
- [25]Norma ISO-354: Measurement of sound absorption in a reverberation room, 1985.
- [26]Norma ISO-3741: Determination of sound power levels of noise sources-Precision methods for broad-band sources in reverberation rooms; second edition, 1988.
- [27]Norma ISO-18233: Acoustics Application of new measurement methods in buildings and room acoustics; first edition, 2006.
- [28]Norma ISO-17497-2: Measurement of the directional diffusion coefficient in a free Field; first edition, 2012.

- [29] Imágenes de difusores acústicos:  
[www.archiexpo.es](http://www.archiexpo.es)  
[www.directindustry.es](http://www.directindustry.es)
- [30] Fernández García F., Razo Razo J.N. Integración de un sistema para medición de tiempo de reverberación en recintos basados en ISO 3382-1:2009. Simposio de metrología 2012.
- [31] Imágenes de difracción del sonido:  
[www.mailxmail.com](http://www.mailxmail.com)  
[autoaudio.blog.com.es](http://autoaudio.blog.com.es)
- [32] Juan Antonio Martínez Mora, Antonio Uris Martínez, Jaime Ramis Soriano, Jesús Alba Fernández. Curso Experimental de Acústica en Salas. Universidad Politecnica de Valencia

# APENDICES



## APENDICE A

### **NORMA ISO-354, "MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN EN CÁMARA REVERBERANTE"**

A continuación se mencionarán los lineamientos y parámetros básicos para este método:

El análisis en frecuencia para la cámara de reverberación del laboratorio de acústica del CCADET que tiene un poco más de los 200 m<sup>3</sup> corresponde a poder medir como mínimo a 100 Hz permisible en tercios de octava y 125 Hz en bandas de octava.

Los espacios absorbentes deben estar a 1m de cualquier mueble o difusor para su colocación de medición.

Los micrófonos deben colocarse a 1m de distancia de la muestra, a 1m de las paredes del cuarto y a 2m de la fuente de sonido.

Número de mediciones dependiendo del rango de frecuencia mínimo de interés será de 12 mediciones ya que se cumple con el rango 100 a 250 Hz.

Los tiempos de reverberación en promedio por cada banda de frecuencia se calculan y se expresa en al menos dos números decimales.

El área de absorción equivalente del sonido en [m<sup>2</sup>] se obtendrá de la siguiente manera:

$$A = \frac{55.3 \cdot V}{c} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

A: es el área de absorción equivalente del sonido

V: es el volumen del recinto donde se llevará a cabo la medición en [m<sup>3</sup>]

C: es la velocidad del sonido en [m/s<sup>2</sup>]

C= 331 + (0.6\*t) siendo t la temperatura del recinto en [°C]

T1: es el tiempo de reverberación del recinto vacío en [s]

T2: es el tiempo de reverberación con el material de absorción a prueba dentro de la cámara en [s]

El coeficiente de absorción se evaluará de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{A}{S}$$

Donde  $\alpha$ , es el coeficiente de absorción y S, es el área de absorción a prueba [m<sup>2</sup>]

## APENDICE B

### **NORMA ISO 3741, "DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE SONIDO DE LA FUENTE POR MÉTODOS DE PRECISIÓN POR EL ANCHO DE BANDA DE LA FUENTE EN UNA CÁMARA REVERBERANTE"**

El análisis en frecuencia para la cámara de reverberación del laboratorio de acústica del CCADET que tiene un poco más de los 200 m<sup>3</sup> corresponde a poder medir como mínimo a 100 Hz permisible en tercios de octava y 125 Hz en bandas de octava.

El tiempo de reverberación en segundos, debe ser mayor que V/S. Siendo V el volumen de la cámara de reverberación y S la superficie del material a prueba.

La temperatura y humedad de la cámara no debe inferir más que  $\pm 10\%$  del valor durante el comienzo y el final de la medición.

En la calibración de los micrófonos se debe cumplir con el  $\pm 0.2$  dB de rango permisible.

La fuente estar a 1.5 metros de distancia de cualquier pared.

## APENDICE C

### **NORMA ISO-18233, “APLICACIÓN ACÚSTICA DE NUEVOS MÉTODOS DE MEDICIÓN EN EDIFICIOS Y SALAS ACÚSTICAS”**

Para obtener el nivel de sonido de una respuesta impulso, se utiliza la llamada ecuación de Schroeder, expresada de la siguiente manera:

$$L_p = 10 \log_{10} \left( \int_0^{\infty} h^2(t) dt \right) \text{ [dB]}$$

Donde  $L_p$ , es el nivel de sonido;  $h$ , es la respuesta impulso en pascales.

## APENDICE D

### **NORMA ISO 17497, “MÉTODO DE MEDICIÓN PARA CUANTIFICAR LAS PROPIEDADES DE LA DISPERSIÓN DEL SONIDO EN SUPERFICIES”**

#### *ISO 17497-1, “MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE DISPERSIÓN EN INCIDENCIA ALEATORIA EN CÁMARA REVERBERANTE”*

La superficie a prueba deberá ser montada sobre una superficie giratoria de preferencia.

El tamaño recomendado para el difusor como mínimo debe ser de son 3.5 metros de diámetro.

Deberá colocarse a 1 metro de distancia de cualquier pared excepto del suelo.

La muestra puede ser rotada a 360° durante el procedimiento con pequeños ángulos de rotación para su evaluación.

Las mediciones deben tener una resolución angular de 5° como máximo y para obtener el coeficiente de difusión con incidencia aleatoria, la separación de las mediciones deben ser de 10° máximo, para cubrir el semicírculo o hemisferio en referencia a la referencia normal.

La señal de excitación recomendada debe ser invariante en el tiempo tales como MLS para desarrollar la respuesta impulso.

El número de mediciones deben ser como mínimo 6 y promediarlas con el proceso de amarrado de fase.

#### *ISO 17497-2, “MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DIRECCIONAL EN CAMPO LIBRE”*

La medición debe ser analizada en tercios de octava, cubriendo el intervalo de frecuencias de 100 Hz a 5000 Hz en escala 1: 1. Pero si tiene un factor de escala 1:N, debe cubrir el intervalo de (N x 100) Hz a (N x 5000) Hz.

El difusor deberá rotarse continuamente varias veces de 0° hasta los 180° o 360° cada 5° y puede ser construido a escala.

En la medición para obtener el coeficiente direccional de difusión debe obtenerse de 0°, ±30°, ±60° como ángulos de incidencia.

Para obtener la respuesta polar, es usando la técnica de función de transferencia. La señal de excitación puede ser un barrido senoidal o señales MLS usadas para obtener la respuesta impulso.

Este método es menos propenso a ser afectado por el movimiento y los cambios ambientales.

Las mediciones realizadas deben ser promediadas con un amarrado de fase para el procesamiento de la señales.

La fuente sonora debe ser un dodecaedro que contenga múltiples altavoces para maximizar la difusión en campo libre.

El radio de presión sonora que debe emitir dicha fuente es de 1m, bajo condiciones de campo libre.

Para garantizar la medición, esta condición se hace utilizando los elementos de medición más allá de  $\lambda/4$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda, desde una superficie totalmente reflectante.

Ambos tomos de esta Norma se deben complementar con la hora de inicio y término de la medición experimental; así como también, con la toma de la humedad y la temperatura respectivamente. Se debe tener un control de la humedad y temperatura del recinto de medición. La humedad debe ser cumplir un 50% de estabilidad y en la incertidumbre durante la medición.

La señal de excitación debe cumplir el ancho de banda por tercios de octava de interés para su evaluación.

La fuente debe ser omnidireccional con  $\pm 2$  dB en magnitud y  $\pm 20^\circ$  en fase, tomando como referencia una superficie plana. Los micrófonos deben ser sensibles para captar las reflexiones de la directividad difusa, teniendo  $\pm 1$  dB en magnitud y  $\pm 10^\circ$  en fase.

**APENDICE E**  
**PROGRAMAS EN MATLAB**

**CALCULOS TEÓRICOS DEL DIFUSOR SCHROEDER QRD UNIDIMENSIONAL**

```
clc
clear all
close all
%%Guardado variables en pdift
fmax=3500;
fmin=500;
lmax=343/3500;
lmin=343/500;
co=fmax/fmin;
mmax=2;
c=34300;%en [cm]
T=0.6;%espesor de las divisiones en [cm]
n_lobulos=((2*mmax)+1);
aw=(round(((c/(2*fmax))-T)).)/2;%anchura_ranuras a escala en [cm]
p_ranuras_por_periodo=(2*mmax*fmax)/fmin;
p=29;%numero primo superior inmediato de p_ranuras_por_periodo
w=2*pi*fmin;
wl=c/fmin;
ai=30;%ángulo de incidencia
ar=(-90:5:90)*pi/180;%ángulo de reflexión
ar=ar.';
Np=1;%número de periodos
N=p;%número de huecos
for K=1:N
    n(K)=K-1;
    s(K)=mod((n(K).^2),p); %unidimensional
end
sn=s;%secuencia de residuo cuadrático unidimensional
dn=round((sn*c)/(2*fmin*p))./2;%profundidades de huecos teoricas
dnn=max(dn);
dn=dn.';
k=(2*pi*fmin)/c;%número de onda
z=-(2*i*k*dn);
e1=exp(z);
fc=4000;%cambiar la frecuencia central
f1=(fc/(2^(1/6)));
f2=(fc*(2^(1/6)));
pb2=0;
Nf=f2-f1;
f=linspace(f1,f2,Nf);
%CICLO PARA OBTENER LA DIFUSION
for nf=1:length(f)
    k=(2*pi*f(nf))/c;%número de onda
    for m=1:length(ar)
        anr=ar(m,1);
    sT=0;
        for np=1:Np
            for n=1:N
                nn=[(np-1)*N+(n-(1/2))-(Np*N)/2];
                z2(:,n)=i*k*nn*aw*(sin(anr)+sin(ai));
                e2=exp(z2);
```

```

        end
        e2=e2.';
        eT=e1.*e2;
        s1=sum(eT);
        sT=sT+s1;
    end
    Ps(m,1)=sT; %PRESION POR ANGULO
end
pb2=pb2+(abs(Ps)).^2;
end
pb4000=pb2/Nf;
pb20=[pb250 pb315 pb400 pb500 pb630 pb800 pb1000 pb1250 pb1600 pb2000
pb2500 pb3150 pb4000];
pb2p=sqrt(mean(pb20));%frecuencia
pb2pa=sqrt(mean(pb20,2));%angulo
FF=[250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600 2000 2500 3150 4000];

figure(1)
subplot(2,1,1),polar((pi/2)+ar,(pb2pa./10)),grid on;
subplot(2,1,2),plot(FF,abs((pb2p./10)),'*-'),grid on;
xlabel('Frecuencia [Hz]')
ylabel('Presión difusa [Pa]')
ylim([0 2.5])
title('PATRON DE DIFUSION 30° DE INCIDENCIA')

%*****CONVERSION DE PASCALES A DECIBELES guardado en decibeles
db=[];
for n=1:13
    l=10.*log10(pb20(:,n)./((20e-6)^2));
    db=[db l];%guarda los resultados en columna
end
Li=[];
for n=1:13
    l=db(:,n)+(20*log10((1.4*100)/(6.67*100)));
    Li=[Li l];%guarda los resultados en columna
end
D1=(sum(10.^(db(:,:)./10))).^2;
D2=sum((10.^(db(:,:)./10)).^2);
D3=(D1-D2)./(36*D2);%por bandas de frecuencia
D4=mean(D3. ');%0.4862 gral cn

```

## PROCESAMIENTO DE DATOS PARA LA FUNCIÓN DE PRESIÓN DEL SOFTWARE/HARDWARE PULSE

```
p0=(1/10).*(p1+p2+p3+p4+p5+p6+p7+p8+p9+p10);%promedio archivos de pulse
%archivo guardado en variable penpav
p=[p0 p5 p10 p15 p20 p25 p30 p35 p40 p45 p50 p55 p60 p65 p70 p75 p80 p85
p90 p95 p100 p105 p110 p115 p120 p125 p130 p135 p140 p145 p150 p155 p160
p165 p170 p175 p180]; %guardo por columna los datos por posición angular
p1=p(1:606245,:);%presion en [Pa]
pref1=pref(1:606245,:);%presion referencia en [Pa]
psdif1=psdif(1:606245,:);%presion sin difusor en [Pa]
t=t1(1:606245,1); %guarda el vector de tiempo del pulse
t4=(linspace(0,1,606245)).'; %guarda el vector de numero de datos
%*****GRAFICAS
load('coedif')
figure(1)
subplot(2,3,1),plot(t(2:16385,1),p1(2:16385,13),'g');grid on;%pascales
xlabel('Tiempo [s]');grid on
ylabel('NPS [Pa]'); grid on
title('GONIOMETRO CON DIFUSOR');
subplot(2,3,2),plot(t(2:16385,1),psdif1(2:16385,1),'r');
xlabel('Tiempo [s]');grid on
ylabel('NPS [Pa]'); grid on
title('GONIOMETRO SIN DIFUSOR');
subplot(2,3,3),plot(t(2:16385,1),pref1(2:16385,1));
xlabel('Tiempo [s]');grid on
ylabel('NPS [Pa]'); grid on
title('GONIOMETRO CON REFERENCIA');
subplot(2,3,4),plot(t(2:16385,1),pdB(2:16385,13),'g');grid on%decibeles
xlabel('Tiempo [s]');grid on
ylabel('NPS [dB]'); grid on
ylim([0 80]);
subplot(2,3,5),plot(t(2:16385,1),pdBsdif(2:16385,1),'r');
xlabel('Tiempo [s]');grid on
ylabel('NPS [dB]'); grid on
ylim([0 max(pdBsdif(2:16385,1))]);
subplot(2,3,6),plot(t(2:16385,1),pdBref(2:16385,1));
xlabel('Tiempo [s]');grid on
ylabel('NPS [dB]'); grid on
ylim([0 80]);
load('coedif')
figure(2)
subplot(3,1,1),plot(t,p1);%decibeles
xlabel('Número de muestras');grid on
xlim([1 606245])
ylabel('NPS [Pa]'); grid on
title('GONIOMETRO CON DIFUSOR');
subplot(3,1,2),plot(t,psdif1,'r');
xlabel('Número de muestras');grid on
xlim([1 606245])
ylabel('NPS [Pa]'); grid on
title('GONIOMETRO SIN DIFUSOR');
subplot(3,1,3),plot(t,pref1);
xlabel('Número de muestras');grid on
xlim([1 606245])
ylabel('NPS [Pa]'); grid on
title('GONIOMETRO CON REFERENCIA');
```

## PROCESAMIENTO DE DATOS PARA LA FUNCIÓN RESPUESTA IMPULSO DEL SOFTWARE/HARDWARE PULSE

```

h21=(1/10).*(h1(:,1)+h2(:,1)+h3(:,1)+h4(:,1)+h5(:,1)+h6(:,1)+h7(:,1)+h8(:,1)+h9(:,1)+h10(:,1));
h22=(1/10).*(h1(:,1)+h2(:,2)+h3(:,2)+h4(:,2)+h5(:,2)+h6(:,2)+h7(:,2)+h8(:,2)+h9(:,2)+h10(:,2));
href=[h21 h22];

h1=[h0(:,1) h5g(:,1) h10g(:,1) h15(:,1) h20(:,1) h25(:,1) h30(:,1)
h35(:,1) h40(:,1) h45(:,1) h50(:,1) h55(:,1) h60(:,1) h65(:,1) h70(:,1)
h75(:,1) h80(:,1) h85(:,1) h90(:,1) h95(:,1) h100(:,1) h105(:,1)
h110(:,1) h115(:,1) h120(:,1) h125(:,1) h130(:,1) h135(:,1) h140(:,1)
h145(:,1) h150(:,1) h155(:,1) h160(:,1) h165(:,1) h170(:,1) h175(:,1)
h180(:,1)];%respuesta impulso
h2=[h0(:,2) h5g(:,2) h10g(:,2) h15(:,2) h20(:,2) h25(:,2) h30(:,2)
h35(:,2) h40(:,2) h45(:,2) h50(:,2) h55(:,2) h60(:,2) h65(:,2) h70(:,2)
h75(:,2) h80(:,2) h85(:,2) h90(:,2) h95(:,2) h100(:,2) h105(:,2)
h110(:,2) h115(:,2) h120(:,2) h125(:,2) h130(:,2) h135(:,2) h140(:,2)
h145(:,2) h150(:,2) h155(:,2) h160(:,2) h165(:,2) h170(:,2) h175(:,2)
h180(:,2)];%respuesta impulso
h=h1+(h2*i);
href=href(:,1)+(href(:,2)*i);
hsdif=hsdif(:,1)+(hsdif(:,2)*i);
t1=(linspace(0,60,16384)).';
t2=(linspace(0,1,16384));

%cambio de unidades a dB con referencia de 1 [Pa/V] de archivo ri a
archivo
%conver
cab=h;
href=[cab(2:535,:);cab(16387:16920,:);cab(32772:33305,:);cab(49157:49690,
:);cab(65542:66075,:);cab(81927:82460,:);cab(98312:98845,:);cab(114697:11
5230,:);cab(131082:131615,:);cab(147467:148000,:);cab(163852:164385,:);ca
b(180237:180770,:);cab(196622:197155,:);cab(213007:213540,:);cab(229392:2
29325,:);cab(245777:246309,:);cab(262162:262695,:);cab(278547:279080,:);c
ab(294932:295465,:);cab(311317:311850,:);cab(327702:328235,:);cab(344087:
344620,:);cab(360472:361005,:);cab(376857:377390,:);cab(393242:393775,:);
cab(409627:410160,:);cab(426012:426545,:);cab(442397:442929,:);cab(458782
:459315,:);cab(475167:475700,:);cab(491552:492085,:);cab(507937:508470,
);cab(524322:524855,:);cab(540707:541240,:);cab(557092:557625,:);cab(57347
7:574010,:);cab(589862:585395,)]);
href=href(:,13);
hdb=(20.*log10(h./1));%CONVERSION A dB
hsdifdb=(20.*log10(hsdif./1));%CONVERSION A dB
hrefdb=(20.*log10(href./1));%CONVERSION A dB
htdb=(20.*log10(ht./1));%CONVERSION A dB
hpa=(10.^(hdb/20)).*20e-6;%CONVERSION de dB A Pa
hsdifpa=(10.^(hsdifdb/20)).*20e-6;%CONVERSION de dB A Pa
hrefpa=(10.^(hrefdb/20)).*20e-6;%CONVERSION de dB A Pa
htpa=(10.^(htdb/20)).*20e-6;%CONVERSION de dB A Pa
clear all
close all
clc
load('conver')
t1=(linspace(0,1,5460)).';

```

```

figure(1)
subplot(2,3,1),plot(t,(h));grid on;
xlabel('Tiempo [s]');
xlim([0 1]);
ylabel('Amplitud [Pa/V]');
ylim([-1500 2500]);
title('h1(t) CON DIFUSOR');
subplot(2,3,2),plot(t,(hsdif),'r');grid on;
xlabel('Tiempo [s]');
xlim([0 1]);
ylabel('Amplitud [Pa/V]');
ylim([-1500 2500]);
title('h2(t) SIN DIFUSOR');
subplot(2,3,3),plot(t1,(href(1:5460,1)));grid on;
xlabel('Tiempo [s]');
xlim([0 1]);
ylabel('Amplitud [Pa/V]');
ylim([-1500 2500]);
title('h3(t) CON REFERENCIA');
subplot(2,3,4),plot(t,(hpa));grid on;
xlabel('Tiempo [s]');
xlim([0 1]);
ylabel('Amplitud [Pa]');
subplot(2,3,5),plot(t,(hsdifpa),'r');grid on;
xlabel('Tiempo [s]');
xlim([0 1]);
ylabel('Amplitud [Pa]');
subplot(2,3,6),plot(t1,(hrefpa(1:5460,1)));grid on;
xlabel('Tiempo [s]');
xlim([0 1]);%xlim([-0.01 1.01]);
ylabel('Amplitud [Pa]');

clear all
close all
clc
load('conver1')
figure(2)
subplot(3,1,1),plot(t,(ht));grid on;
xlabel('Tiempo [s]');
xlim([-0.01 1.01]);
ylabel('Amplitud [Pa/V]');
ylim([-0.5 0.4])
title('A) h(t) NORMALIZADA');
subplot(3,1,2),plot(t,(htdB));grid on;
xlabel('Tiempo [s]');
xlim([-0.01 1.01]);
ylabel('Amplitud [dB]');
ylim([-130 0])
subplot(3,1,3),plot(t,(htpa));grid on;
xlabel('Tiempo [s]');
xlim([-0.01 1.01]);
ylabel('Amplitud [Pa]');
figure(3)
subplot(3,1,1),plot(t,(h));grid on;
xlabel('Tiempo [s]');
xlim([-0.01 1.01]);
ylabel('Amplitud [Pa/V]');

```

```

ylim([-2500 2500])
title('B) h(t) SIN NORMALIZAR')
subplot(3,1,2),plot(t,(hdB));grid on;
xlabel('Tiempo [s]');
xlim([-0.01 1.01]);
ylabel('Amplitud [dB]');
subplot(3,1,3),plot(t,(hpa));grid on;
xlabel('Tiempo [s]');
xlim([-0.01 1.01]);
ylabel('Amplitud [Pa]');

% GUARDADOS EN ri2 y ri3
cab=h;
htt=[cab(2:535,:);cab(16387:16920,:);cab(32772:33305,:);cab(49157:49690,
);cab(65542:66075,:);cab(81927:82460,:);cab(98312:98845,:);cab(114697:115
230,:);cab(131082:131615,:);cab(147467:148000,:);cab(163852:164385,:);cab
(180237:180770,:);cab(196622:197155,:);cab(213007:213540,:);cab(229392:22
9325,:);cab(245777:246309,:);cab(262162:262695,:);cab(278547:279080,:);ca
b(294932:295465,:);cab(311317:311850,:);cab(327702:328235,:);cab(344087:3
44620,:);cab(360472:361005,:);cab(376857:377390,:);cab(393242:393775,:);c
ab(409627:410160,:);cab(426012:426545,:);cab(442397:442929,:);cab(458782:
459315,:);cab(475167:475700,:);cab(491552:492085,:);cab(507937:508470,:);
cab(524322:524855,:);cab(540707:541240,:);cab(557092:557625,:);cab(573477
:574010,:);cab(589862:585395,)]);
hit=[cab(2:268,:);cab(16387:16653,:);cab(32772:33038,:);cab(49157:49423,
);cab(65542:65808,:);cab(81927:82193,:);cab(98312:98578,:);cab(114697:114
963,:);cab(131082:131348,:);cab(147467:147733,:);cab(163852:164118,:);cab
(180237:180503,:);cab(196622:196888,:);cab(213007:213273,:);cab(229392:22
9658,:);cab(245777:246043,:);cab(262162:262428,:);cab(278547:278813,:);ca
b(294932:295198,:);cab(311317:311583,:);cab(327702:327968,:);cab(344087:3
44353,:);cab(360472:360738,:);cab(376857:377123,:);cab(393242:393508,:);c
ab(409627:409893,:);cab(426012:426278,:);cab(442397:442663,:);cab(458782:
459048,:);cab(475167:475433,:);cab(491552:491818,:);cab(507937:508203,:);
cab(524322:524588,:);cab(540707:540973,:);cab(557092:557358,:);cab(573477
:573743,:);cab(589862:585128,)]);
hrt=[cab(269:535,:);cab(16654:16920,:);cab(33039:33305,:);cab(49424:49690
,:);cab(65809:66075,:);cab(82194:82460,:);cab(98579:98845,:);cab(114964:1
15230,:);cab(131349:131615,:);cab(147734:148000,:);cab(164119:164385,:);c
ab(180504:180770,:);cab(196889:197155,:);cab(213274:213540,:);cab(229659:
229325,:);cab(246044:246309,:);cab(262429:262695,:);cab(278814:279080,:);
cab(295199:295465,:);cab(311584:311850,:);cab(327969:328235,:);cab(344354
:344620,:);cab(360739:361005,:);cab(377124:377390,:);cab(393509:393775,:);
cab(409894:410160,:);cab(426279:426545,:);cab(442664:442929,:);cab(45904
9:459315,:);cab(475434:475700,:);cab(491819:492085,:);cab(508204:508470,
);cab(524589:524855,:);cab(540974:541240,:);cab(557359:557625,:);cab(5737
44:574010,:);cab(585129:585395,)]);
cab=hsdif;
hsd=[cab(2:535,:);cab(16387:16920,:);cab(32772:33305,:);cab(49157:49690,
);cab(65542:66075,:);cab(81927:82460,:);cab(98312:98845,:);cab(114697:115
230,:);cab(131082:131615,:);cab(147467:148000,:);cab(163852:164385,:);cab
(180237:180770,:);cab(196622:197155,:);cab(213007:213540,:);cab(229392:22
9325,:);cab(245777:246309,:);cab(262162:262695,:);cab(278547:279080,:);ca
b(294932:295465,:);cab(311317:311850,:);cab(327702:328235,:);cab(344087:3
44620,:);cab(360472:361005,:);cab(376857:377390,:);cab(393242:393775,:);c
ab(409627:410160,:);cab(426012:426545,:);cab(442397:442929,:);cab(458782:
459315,:);cab(475167:475700,:);cab(491552:492085,:);cab(507937:508470,);

```

```

cab(524322:524855,:);cab(540707:541240,:);cab(557092:557625,:);cab(573477
:574010,:);cab(589862:585395,:)];
hisd=[cab(2:268,:);cab(16387:16653,:);cab(32772:33038,:);cab(49157:49423,
:);cab(65542:65808,:);cab(81927:82193,:);cab(98312:98578,:);cab(114697:11
4963,:);cab(131082:131348,:);cab(147467:147733,:);cab(163852:164118,:);ca
b(180237:180503,:);cab(196622:196888,:);cab(213007:213273,:);cab(229392:2
29658,:);cab(245777:246043,:);cab(262162:262428,:);cab(278547:278813,:);c
ab(294932:295198,:);cab(311317:311583,:);cab(327702:327968,:);cab(344087:
344353,:);cab(360472:360738,:);cab(376857:377123,:);cab(393242:393508,:);
cab(409627:409893,:);cab(426012:426278,:);cab(442397:442663,:);cab(458782
:459048,:);cab(475167:475433,:);cab(491552:491818,:);cab(507937:508203,:);
cab(524322:524588,:);cab(540707:540973,:);cab(557092:557358,:);cab(57347
7:573743,:);cab(589862:585128,:)];
hrsd=[cab(269:535,:);cab(16654:16920,:);cab(33039:33305,:);cab(49424:4969
0,:);cab(65809:66075,:);cab(82194:82460,:);cab(98579:98845,:);cab(114964:
115230,:);cab(131349:131615,:);cab(147734:148000,:);cab(164119:164385,:);
cab(180504:180770,:);cab(196889:197155,:);cab(213274:213540,:);cab(229659
:229325,:);cab(246044:246309,:);cab(262429:262695,:);cab(278814:279080,:);
cab(295199:295465,:);cab(311584:311850,:);cab(327969:328235,:);cab(34435
4:344620,:);cab(360739:361005,:);cab(377124:377390,:);cab(393509:393775,:
);cab(409894:410160,:);cab(426279:426545,:);cab(442664:442929,:);cab(4590
49:459315,:);cab(475434:475700,:);cab(491819:492085,:);cab(508204:508470,
:);cab(524589:524855,:);cab(540974:541240,:);cab(557359:557625,:);cab(573
744:574010,:);cab(585129:585395,:)];

```

```

N=9076;
cer=zeros(N,1);
h=[];
for n=1:37
    s=[cer;hrt(:,n)];
    h=[h s];
end
hsdif=[cer;hrsd];
href=href(:,1);
N=18035;
cer=zeros(N,1);
href=[hit(1:117,13);cer];
plot(1:18152,href)

```

```

h0=ifft(fft(h(:,1))-hsdif(:,1))./fft(href));
h5=ifft(fft(h(:,2))-hsdif(:,1))./fft(href));
h10=ifft(fft(h(:,3))-hsdif(:,1))./fft(href));
h15=ifft(fft(h(:,4))-hsdif(:,1))./fft(href));
h20=ifft(fft(h(:,5))-hsdif(:,1))./fft(href));
h25=ifft(fft(h(:,6))-hsdif(:,1))./fft(href));
h30=ifft(fft(h(:,7))-hsdif(:,1))./fft(href));
h35=ifft(fft(h(:,8))-hsdif(:,1))./fft(href));
h40=ifft(fft(h(:,9))-hsdif(:,1))./fft(href));
h45=ifft(fft(h(:,10))-hsdif(:,1))./fft(href));
h50=ifft(fft(h(:,11))-hsdif(:,1))./fft(href));
h55=ifft(fft(h(:,12))-hsdif(:,1))./fft(href));
h60=ifft(fft(h(:,13))-hsdif(:,1))./fft(href));
h65=ifft(fft(h(:,14))-hsdif(:,1))./fft(href));
h70=ifft(fft(h(:,15))-hsdif(:,1))./fft(href));
h75=ifft(fft(h(:,16))-hsdif(:,1))./fft(href));
h80=ifft(fft(h(:,17))-hsdif(:,1))./fft(href));
h85=ifft(fft(h(:,18))-hsdif(:,1))./fft(href));

```

```

h90=ifft(fft(h(:,19)-hsdif(:,1))./fft(href));
h95=ifft(fft(h(:,20)-hsdif(:,1))./fft(href));
h100=ifft(fft(h(:,21)-hsdif(:,1))./fft(href));
h105=ifft(fft(h(:,22)-hsdif(:,1))./fft(href));
h110=ifft(fft(h(:,23)-hsdif(:,1))./fft(href));
h115=ifft(fft(h(:,24)-hsdif(:,1))./fft(href));
h120=ifft(fft(h(:,25)-hsdif(:,1))./fft(href));
h125=ifft(fft(h(:,26)-hsdif(:,1))./fft(href));
h130=ifft(fft(h(:,27)-hsdif(:,1))./fft(href));
h135=ifft(fft(h(:,28)-hsdif(:,1))./fft(href));
h140=ifft(fft(h(:,29)-hsdif(:,1))./fft(href));
h145=ifft(fft(h(:,30)-hsdif(:,1))./fft(href));
h150=ifft(fft(h(:,31)-hsdif(:,1))./fft(href));
h155=ifft(fft(h(:,32)-hsdif(:,1))./fft(href));
h160=ifft(fft(h(:,33)-hsdif(:,1))./fft(href));
h165=ifft(fft(h(:,34)-hsdif(:,1))./fft(href));
h170=ifft(fft(h(:,35)-hsdif(:,1))./fft(href));
h175=ifft(fft(h(:,36)-hsdif(:,1))./fft(href));
h180=ifft(fft(h(:,37)-hsdif(:,1))./fft(href));
ht=[h0 h5 h10 h15 h20 h25 h30 h35 h40 h45 h50 h55 h60 h65 h70 h75 h80 h85
h90 h95 h100 h105 h110 h115 h120 h125 h130 h135 h140 h145 h150 h155 h160
h165 h170 h175 h180];%respuesta impulso de norma

hdB=(20.*log10(h./1));%CONVERSION A dB
hsdifdB=(20.*log10(hsdif./1));%CONVERSION A dB
hrefdB=(20.*log10(href./1));%CONVERSION A dB
hpa=(10.^(hdB/20)).*20e-6;%CONVERSION de dB A Pa
hsdifpa=(10.^(hsdifdB/20)).*20e-6;%CONVERSION de dB A Pa
hrefpa=(10.^(hrefdB/20)).*20e-6;%CONVERSION de dB A Pa
t1=(linspace(0,0.0323,18152)).';
figure(1)
subplot(3,1,1),plot(t1,hpa(:,1),'g'),grid on;
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('RI [Pa]')
title('h1(t)CON DIFUSOR');
subplot(3,1,2),plot(t1,hsdifpa(:,1),'r'),grid on;
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('RI [Pa]')
title('h2(t) SIN DIFUSOR');
subplot(3,1,3),plot(t1,hrefpa),grid on;
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('RI [Pa]')
title('h3(t) CON REFERENCIA');
GRAFICAR %ARCHIVO ri=[h ht t href hsdif];
t1=(linspace(1,18152,18152)).';
t2=(linspace(1,17620,17620)).';
t1=(linspace(0,0.0323,18152)).';
t2=(linspace(0,0.0323,17620)).';
httdB=(20.*log10(htt./1));%CONVERSION A dB
httpa=(10.^(httdB/20)).*20e-6;%CONVERSION de dB A Pa
htdB=(20.*log10(ht./1));%CONVERSION A dB
htpa=(10.^(htdB/20)).*20e-6;%CONVERSION de dB A Pa

figure(1)
subplot(2,2,1),plot(t1,(ht));grid on;
xlabel('Número de muestras');
xlim([0 max(t1)]);

```

```

ylabel('Amplitud [Pa/V]');
title('A) h(t) NORMALIZADA');
subplot(2,2,2),plot(t2,htt);grid on;
xlabel('Número de muestras');
xlim([0 max(t2)]);
ylabel('Amplitud [Pa/V]');
title('B) h(t) RI SIN NORMALIZAR');
subplot(2,2,3),plot(t1,(ht));grid on;
xlabel('Número de muestras');
xlim([0 max(t1)]);
ylabel('Amplitud [Pa]');
subplot(2,2,4),plot(t2,httpa);grid on;
xlabel('Número de muestras');
xlim([0 max(t2)]);
ylabel('Amplitud [Pa]');

figure(1)
subplot(2,2,1),plot(t1(1:491),(ht(1:491,13)));grid on;
xlabel('Tiempo [s]');
xlim([0 0.001]);
ylabel('Amplitud [Pa/V]');
title('A) h(t) NORMALIZADA');
subplot(2,2,2),plot(t2(1:476),htt(1:476,13),'r');grid on;
xlabel('Tiempo [s]');
xlim([0 0.001]);
ylabel('Amplitud [Pa/V]');
title('B) h(t) RI SIN NORMALIZAR');
subplot(2,2,3),plot(t1(1:491),(ht(1:491,13)));grid on;
xlabel('Tiempo [s]');
xlim([0 0.001]);
ylabel('Amplitud [Pa]');
subplot(2,2,4),plot(t2(1:476),httpa(1:476,13),'r');grid on;
xlabel('Tiempo [s]');
xlim([0 0.001]);
ylabel('Amplitud [Pa]');

h0=(fft(h(:,1))-hsdif(:,1))./fft(href));
h5=(fft(h(:,2))-hsdif(:,1))./fft(href));
h10=(fft(h(:,3))-hsdif(:,1))./fft(href));
h15=(fft(h(:,4))-hsdif(:,1))./fft(href));
h20=(fft(h(:,5))-hsdif(:,1))./fft(href));
h25=(fft(h(:,6))-hsdif(:,1))./fft(href));
h30=(fft(h(:,7))-hsdif(:,1))./fft(href));
h35=(fft(h(:,8))-hsdif(:,1))./fft(href));
h40=(fft(h(:,9))-hsdif(:,1))./fft(href));
h45=(fft(h(:,10))-hsdif(:,1))./fft(href));
h50=(fft(h(:,11))-hsdif(:,1))./fft(href));
h55=(fft(h(:,12))-hsdif(:,1))./fft(href));
h60=(fft(h(:,13))-hsdif(:,1))./fft(href));
h65=(fft(h(:,14))-hsdif(:,1))./fft(href));
h70=(fft(h(:,15))-hsdif(:,1))./fft(href));
h75=(fft(h(:,16))-hsdif(:,1))./fft(href));
h80=(fft(h(:,17))-hsdif(:,1))./fft(href));
h85=(fft(h(:,18))-hsdif(:,1))./fft(href));
h90=(fft(h(:,19))-hsdif(:,1))./fft(href));
h95=(fft(h(:,20))-hsdif(:,1))./fft(href));
h100=(fft(h(:,21))-hsdif(:,1))./fft(href));

```

```

h105=(fft(h(:,22)-hsdif(:,1))./fft(href));
h110=(fft(h(:,23)-hsdif(:,1))./fft(href));
h115=(fft(h(:,24)-hsdif(:,1))./fft(href));
h120=(fft(h(:,25)-hsdif(:,1))./fft(href));
h125=(fft(h(:,26)-hsdif(:,1))./fft(href));
h130=(fft(h(:,27)-hsdif(:,1))./fft(href));
h135=(fft(h(:,28)-hsdif(:,1))./fft(href));
h140=(fft(h(:,29)-hsdif(:,1))./fft(href));
h145=(fft(h(:,30)-hsdif(:,1))./fft(href));
h150=(fft(h(:,31)-hsdif(:,1))./fft(href));
h155=(fft(h(:,32)-hsdif(:,1))./fft(href));
h160=(fft(h(:,33)-hsdif(:,1))./fft(href));
h165=(fft(h(:,34)-hsdif(:,1))./fft(href));
h170=(fft(h(:,35)-hsdif(:,1))./fft(href));
h175=(fft(h(:,36)-hsdif(:,1))./fft(href));
h180=(fft(h(:,37)-hsdif(:,1))./fft(href));
hw=[h0 h5 h10 h15 h20 h25 h30 h35 h40 h45 h50 h55 h60 h65 h70 h75 h80 h85
h90 h95 h100 h105 h110 h115 h120 h125 h130 h135 h140 h145 h150 h155 h160
h165 h170 h175 h180];%respuesta impulso de norma

N=length(hw);
fs=51200;
f=(0:N-1).*fs/N;
fc=4000;
f1=(fc/(2^(1/6)));
f2=(fc*(2^(1/6)));
[temp,n1]=max(f>f1);
[temp,n2]=max(f>f2);
pb2=[];
h=hw;
pb2=[];
for n=1:37
    H=(h(:,n));
    pb2=[pb2 mean(abs(H(n1:n2-1)).^2)];
end
pb4000=pb2;
pb20n=[pb250.' pb315.' pb400.' pb500.' pb630.' pb800.' pb1000.' pb1250.'
pb1600.' pb2000.' pb2500.' pb3150.' pb4000.'];
pb2n1=sqrt(mean(pb20n,2));
pb2nn1=sqrt(mean(pb20nn,2));
ar=(-90:5:90)*pi/180; %ángulo de reflexión
ar=ar.';
% % FF=[250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600 2000 2500 3150 4000];
figure(1)
subplot(2,2,1),polar((pi/2)+ar,sqrt(pb2n1),'g'),grid on;
title('A) PATRON DE DIFUSIÓN NORMALIZADO');
subplot(2,2,3),plot(FF,sqrt(pb2n),'g'),grid on;
xlabel('Frecuencia [Hz]')
ylabel('Presión difusa [Pa]')
subplot(2,2,2),polar((pi/2)+ar,sqrt(pb2nn1),'r'),grid on;
title('B) PATRON DE DIFUSIÓN NO NORMALIZADO');
subplot(2,2,4),plot(FF,sqrt(pb2nn),'r'),grid on;
xlabel('Frecuencia [Hz]')
ylabel('Presión difusa [Pa]')

```

```

%*****CONVERSION DE PASCALES A DECIBELES ri2
hi3=(10.*log10(pb20n./1));%CONVERSION A dB normalizada
hr3=(10.*log10(pb20nn./1));%CONVERSION A dB no normalizada
hrefdb=10.*log10((pb20ref)./1);
%*****NORMALIZACION DE LOS NPS
Lin=[];
for n=1:13
    l=hi3(:,n)+(20*log10((1.4*100)/(6.67*100)));
    Lin=[Lin l];%guarda los resultados en columna
end
Li=[];
for n=1:13
    l=hr3(:,n)+(20*log10((1.4*100)/(6.67*100)));
    Li=[Li l];%guarda los resultados en columna
end
Lir=(hrefdb(:,:)+(20*log10((1.4*100)/(6.67*100))));%referencia

%*****COEFICIENTE DIRECCIONAL DE DIFUSIÓN
clear all
clc
close all
load('dbcmri2')
d1=(sum(10.^((Li(:,:))./10))).^2;
d2=sum((10.^((Li(:,:))./10)).^2);
di=((d1-d2)./(36*d2));%varia 13
dil=10*log10((1/13)*sum(10.^(0.1.*abs(di.'))));%=0.97
% referencia
d6=(sum(10.^((Lir(:,:))./10))).^2;
d7=sum((10.^((Lir(:,:))./10)).^2);
dr=((d6-d7)./(36*d7));%
DNN=((di-dr)./(1-dr));%
%
% %*****COEFICIENTE DIRECCIONAL DE DIFUSIÓN guardado en archivo dbcmri
D1=(sum(10.^(Lin(:,:))./10)).^2;
D2=sum((10.^(Lin(:,:))./10)).^2);
Di=((D1-D2)./(36*D2));%varia 13 valores
Dil=10*log10((1/13)*sum(10.^(0.1.*abs(Di.'))));%=0.92
%referencia
D6=(sum(10.^(Lir(:,:))./10)).^2;
D7=sum((10.^(Lir(:,:))./10)).^2);
Dr=((D6-D7)./(36*D7));
DN=abs((Di-Dr)/(1-Dr));%
DN1=mean(DN.');%

%COMPARACIÓN DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DIRECCIONAL Y NO NORMALIZADO
%ARCHIVO compa
figure(1)
subplot(2,3,1),polar((pi/2)+ar,(pb2pa./10)),grid on;
title('A) TEÓRICO');
subplot(2,3,4),plot(FF,abs((pb2p./10)), '*-'),grid on;
ylim([0 2.5])
xlabel('Frecuencia [Hz]')
ylabel('Presión difusa [Pa]')
subplot(2,3,2),polar((pi/2)+ar,sqrt(pb2n1),'g'),grid on;
title('B) EXPERIMENTAL NORMALIZADO');
subplot(2,3,5),plot(FF,sqrt(pb2n),'*-g'),grid on;
xlabel('Frecuencia [Hz]')

```

```

ylabel('Presión difusa [Pa]')
%ylim([0 2.5])
subplot(2,3,3),polar((pi/2)+ar,sqrt(pb2nn1),'r'),grid on;
title('C) EXPERIMENTAL NO NORMALIZADO');
subplot(2,3,6),plot(FF,sqrt(pb2nn),'*-r'),grid on;
xlabel('Frecuencia [Hz]')
ylabel('Presión difusa [Pa]')
%
%
% %%COMPARACIÓN DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN TEÓRICO, NORMALIZADO Y NO
NORMALIZADO
DT=0.4862;%teorico
x=[1 2];
y=[DT Dil];
figure (3)
bar(x(:,1),DT);grid on;
hold on
bar(x(:,2),Dil,'g');grid on;
ylabel('COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DIRECCIONAL')
legend('Teórico','Experimental normalizado');
%
figure(4)
ar1=(linspace(-90,90,13))*pi/180); %ángulo de reflexión
subplot(2,1,1),polar((pi/2)+ar,(pb2pa./10)),grid on;
hold on
polar((pi/2)+ar,sqrt(pb2n1),'g'),grid on;
subplot(2,1,2),plot(FF,abs((pb2p./10)),'*-'),grid on;
hold on
plot(FF,sqrt(pb2n),'*-g'),grid on;
xlabel('Frecuencia [Hz]')
ylabel('Presión difusa [Pa]')
legend('Teórica', 'Experimental normalizada')

```

## PROCESAMIENTO DE DATOS PARA LA FUNCIÓN RELACIÓN SEÑAL A RUIDO DEL SOFTWARE/HARDWARE PULSE

```

psdif=(1/10).*(r1+r2+r3+r4+r5+r6+r7+r8+r9+r10);%datos promedio del pulso
rsn=[p0 p5g p10g p15 p20 p25 p30 p35 p40 p45 p50 p55 p60 p65 p70 p75 p80
p85 p90 p95 p100 p105 p110 p115 p120 p125 p130 p135 p140 p145 p150 p155
p160 p165 p170 p175 p180]; );%vector por posición angular de las
promediaciones anteriores
f=f1(:,1); );%eje de frecuencias dado por el pulso
ARCHIVO GUARDADO EN rsnpa
figure (1)
subplot(3,1,1),plot(f,rsn);%para presion
xlabel('FRECUENCIA [Hz]');grid on;
xlim([0 6400]);
ylabel('Niveles de Presion Sonora en [Pa]'); grid on;
title('GONIOMETRO CON DIFUSOR');
subplot(3,1,2),plot(f,rsnref);%para voltajes
xlabel('FRECUENCIA [Hz]');grid on;
xlim([0 6400]);
ylabel('Niveles de Presion Sonora en [Pa]'); grid on;
title('GONIOMETRO CON REFERENCIA');
subplot(3,1,3),plot(f,rsnsdif);%para presion
xlabel('FRECUENCIA [Hz]');grid on;
xlim([0 6400]);
ylabel('Niveles de Presion Sonora en [Pa]'); grid on;
title('GONIOMETRO SIN DIFUSOR');

% %CONVERSION DE Pa A dB referenciado a 1 dB = 2.24e-5 Pa =20e-6 Pa
clear all
clc
load('rsnpa')
rsndB=(20.*log10(abs(rsn)./20e-6));
rsnrefdB=(20.*log10(abs(rsnref)./20e-6));
rsnsdifdB=(20.*log10(abs(rsnsdif)./20e-6));

figure(2)
subplot(3,1,1),plot(f1,abs(rsndB));%rsn de las posiciones angulares
xlabel('FRECUENCIA [Hz]');grid on;
xlim([0 6400]);
ylabel('Niveles de Presion Sonora en [dB]'); grid on;
%ylim([0 40]);
title('GONIOMETRO CON DIFUSOR');
subplot(3,1,2),plot(f,abs(rsnrefdB));%rsn de la referencia
xlabel('FRECUENCIA [Hz]');grid on;
xlim([0 6400]);
ylabel('Niveles de Presion Sonora en [dB]'); grid on
%ylim([0 40]);
title('GONIOMETRO CON REFERENCIA');
subplot(3,1,3),plot(f,abs(rsnsdifdB));%rsn sin difusor
xlabel('FRECUENCIA [Hz]');grid on;
xlim([0 6400]);
ylabel('Niveles de Presion Sonora en [dB]'); grid on
%ylim([0 40]);
title('GONIOMETRO SIN DIFUSOR');

```

## OBTENCION DE DATOS DEL ARCHIVO BKFILENAMES GENERADO EN PULSE PARA MATLAB

```
BKFileNames =
{
'D:\PRUEBAS          DANAЕ          CCADET-UNAM\1\CON
DIFUSOR\0\Working.Input.Input.FFT.Time.txt'
'Group1'
'D:\PRUEBAS DANAЕ CCADET-UNAM\1\CON DIFUSOR\0\RI.txt'
'Group4'
'D:\PRUEBAS DANAЕ CCADET-UNAM\1\CON DIFUSOR\0\SN.txt'
'Group5'
};
for (BKIndex=1:2:length(BKFileNames))
assignin('base',char(BKFileNames(BKIndex+1)),GetPulseAsciiFile(char(BKFileNames(BKIndex))))
end
for i = 1:length(BKFileNames)/2;
a = struct2array(eval(char(BKFileNames(i*2))));
if length(a)<2;
n = a('Name');
eval(['name' num2str(i) '=n;']);
b = a('DatasetSection');
c1 = b('Data')(1:end);
c2 = b('X_axis')(1:end);
eval(['data' num2str(i) '=c1;']);
eval(['x_axis' num2str(i) '=c2;']);
end
end
p1=[0;Group1.Function1.DatasetSection.Data(1:16384,3);0;Group1.Function2.
DatasetSection.Data(1:16384,3);0;Group1.Function3.DatasetSection.Data(1:1
6384,3);0;Group1.Function4.DatasetSection.Data(1:16384,3);0;Group1.Functi
on5.DatasetSection.Data(1:16384,3);0;Group1.Function6.DatasetSection.Data
(1:16384,3);0;Group1.Function7.DatasetSection.Data(1:16384,3);0;Group1.Fu
nction8.DatasetSection.Data(1:16384,3);0;Group1.Function9.DatasetSection.
Data(1:16384,3);0;Group1.Function10.DatasetSection.Data(1:16384,3);0;Grou
p1.Function11.DatasetSection.Data(1:16384,3);0;Group1.Function12.DatasetS
ection.Data(1:16384,3);0;Group1.Function13.DatasetSection.Data(1:16384,3)
;0;Group1.Function14.DatasetSection.Data(1:16384,3);0;Group1.Function15.D
atasetSection.Data(1:16384,3);0;Group1.Function16.DatasetSection.Data(1:1
6384,3);0;Group1.Function17.DatasetSection.Data(1:16384,3);0;Group1.Funct
ion18.DatasetSection.Data(1:16384,3);0;Group1.Function19.DatasetSection.D
ata(1:16384,3);0;Group1.Function20.DatasetSection.Data(1:16384,3);0;Grou
p1.Function21.DatasetSection.Data(1:16384,3);0;Group1.Function22.DatasetS
ection.Data(1:16384,3);0;Group1.Function23.DatasetSection.Data(1:16384,3)
;0;Group1.Function24.DatasetSection.Data(1:16384,3);0;Group1.Function25.Da
tasetSection.Data(1:16384,3);0;Group1.Function26.DatasetSection.Data(1:16
384,3);0;Group1.Function27.DatasetSection.Data(1:16384,3);0;Group1.Functi
on28.DatasetSection.Data(1:16384,3);0;Group1.Function29.DatasetSection.Da
ta(1:16384,3);0;Group1.Function30.DatasetSection.Data(1:16384,3);0;Group1
.Function31.DatasetSection.Data(1:16384,3);0;Group1.Function32.DatasetSec
tion.Data(1:16384,3);0;Group1.Function33.DatasetSection.Data(1:16384,3);0
;Group1.Function34.DatasetSection.Data(1:16384,3);0;Group1.Function35.Dat
asetSection.Data(1:16384,3);0;Group1.Function36.DatasetSection.Data(1:163
84,3);0;Group1.Function37.DatasetSection.Data(1:16384,3);0;Group1.Functio
n38.DatasetSection.Data(1:16384,3)]; ;%PRESION [Pa]
t=[0;Group1.Function1.DatasetSection.Data(1:16384,2)] ;%Tiempo [s]
```

```

h=[0;Group4.Function1.DatasetSection.Data(1:16384,3);0;Group4.Function2.D
atasetSection.Data(1:16384,3);0;Group4.Function3.DatasetSection.Data(1:16
384,3);0;Group4.Function4.DatasetSection.Data(1:16384,3);0;Group4.Functio
n5.DatasetSection.Data(1:16384,3:4);0;Group4.Function6.DatasetSection.Dat
a(1:16384,3:4);0;Group4.Function7.DatasetSection.Data(1:16384,3:4);0;Grou
p4.Function8.DatasetSection.Data(1:16384,3:4);0;Group4.Function9.DatasetS
ection.Data(1:16384,3:4);0;Group4.Function10.DatasetSection.Data(1:16384,
3:4);0;Group4.Function11.DatasetSection.Data(1:16384,3:4);0;Group4.Functi
on12.DatasetSection.Data(1:16384,3:4);0;Group4.Function13.DatasetSection.
Data(1:16384,3:4);0;Group4.Function14.DatasetSection.Data(1:16384,3:4);0;
Group4.Function15.DatasetSection.Data(1:16384,3:4);0;Group4.Function16.Da
tasetSection.Data(1:16384,3:4);0;Group4.Function17.DatasetSection.Data(1:
16384,3:4);0;Group4.Function18.DatasetSection.Data(1:16384,3:4);0;Group4.
Function19.DatasetSection.Data(1:16384,3:4);0;Group4.Function20.DatasetSe
ction.Data(1:16384,3:4);0;Group4.Function21.DatasetSection.Data(1:16384,3
:4);0;Group4.Function22.DatasetSection.Data(1:16384,3:4);0;Group4.Functio
n23.DatasetSection.Data(1:16384,3:4);0;Group4.Function24.DatasetSection.D
ata(1:16384,3:4);0;Group4.Function25.DatasetSection.Data(1:16384,3);0;Gro
up4.Function26.DatasetSection.Data(1:16384,3:4);0;Group4.Function27.Datas
etSection.Data(1:16384,3:4);0;Group4.Function28.DatasetSection.Data(1:163
84,3:4);0;Group4.Function29.DatasetSection.Data(1:16384,3:4);0;Group4.Fun
ction30.DatasetSection.Data(1:16384,3:4);0;Group4.Function31.DatasetSecti
on.Data(1:16384,3:4);0;Group4.Function32.DatasetSection.Data(1:16384,3:4)
;0;Group4.Function33.DatasetSection.Data(1:16384,3:4);0;Group4.Function34
.DatasetSection.Data(1:16384,3:4);0;Group4.Function35.DatasetSection.Data
(1:16384,3:4);0;Group4.Function36.DatasetSection.Data(1:16384,3:4);0;Grou
p4.Function37.DatasetSection.Data(1:16384,3:4)];
h1=h(:,1)+(i*h(:,2)); %RESPUESTA IMPULSO [RI=h=real+imaginario]

```

```

rsn1=[0;Group5.Function1.DatasetSection.Data(1:6401,3);0;Group5.Function2
.DatasetSection.Data(1:6401,3);0;Group5.Function3.DatasetSection.Data(1:6
401,3);0;Group5.Function4.DatasetSection.Data(1:6401,3);0;Group5.Function
5.DatasetSection.Data(1:6401,3);0;Group5.Function6.DatasetSection.Data(1:
6401,3);0;Group5.Function7.DatasetSection.Data(1:6401,3);0;Group5.Functio
n8.DatasetSection.Data(1:6401,3);0;Group5.Function9.DatasetSection.Data(1
:6401,3);0;Group5.Function10.DatasetSection.Data(1:6401,3);0;Group5.Funct
ion11.DatasetSection.Data(1:6401,3);0;Group5.Function12.DatasetSection.Da
ta(1:6401,3);0;Group5.Function13.DatasetSection.Data(1:6401,3);0;Group5.F
unction14.DatasetSection.Data(1:6401,3);0;Group5.Function15.DatasetSectio
n.Data(1:6401,3);0;Group5.Function16.DatasetSection.Data(1:6401,3);0;Grou
p5.Function17.DatasetSection.Data(1:6401,3);0;Group5.Function18.DatasetSe
ction.Data(1:6401,3);0;Group5.Function19.DatasetSection.Data(1:6401,3);0;
Group5.Function20.DatasetSection.Data(1:6401,3);0;Group5.Function21.Datas
etSection.Data(1:6401,3);0;Group5.Function22.DatasetSection.Data(1:6401,3
);0;Group5.Function23.DatasetSection.Data(1:6401,3);0;Group5.Function24.D
atasetSection.Data(1:6401,3);0;Group5.Function25.DatasetSection.Data(1:64
01,3);0;Group5.Function26.DatasetSection.Data(1:6401,3);0;Group5.Function
27.DatasetSection.Data(1:6401,3);0;Group5.Function28.DatasetSection.Data(
1:6401,3);0;Group5.Function29.DatasetSection.Data(1:6401,3);0;Group5.Fun
ction30.DatasetSection.Data(1:6401,3);0;Group5.Function31.DatasetSection.D
ata(1:6401,3);0;Group5.Function32.DatasetSection.Data(1:6401,3);0;Group5.
Function33.DatasetSection.Data(1:6401,3);0;Group5.Function34.DatasetSecti
on.Data(1:6401,3);0;Group5.Function35.DatasetSection.Data(1:6401,3);0;Gro
up5.Function36.DatasetSection.Data(1:6401,3);0;Group5.Function37.DatasetS
ection.Data(1:6401,3)]; % RELACION SEÑAL A RUIDO [Pa]
f=[0;Group5.Function1.DatasetSection.Data(1:6401,2)];%Frecuencia [Hz]

```

## FUNCION GETPULSEASCIIFILE PARA BKFILENAMES

```
function kk = GetPulseAsciiFile(BKFileNames1)% function input is the file
name
for i = length(BKFileNames1):-1:1 % loop through and remove any leading
file directories from the file name
if BKFileNames1(i) == '\\'
break
end
BKFileNames(i) = BKFileNames1(i);
end
BKFileNames = nonzeros(BKFileNames)';
fid = fopen(BKFileNames,'rt');% open file
line = fgetl(fid);% get first line of file
d3 = sscanf(line, '%s');% print lines of file to d3 variable
while isempty(d3) % loop through until a line with text is found
line = fgetl(fid);
d3 = sscanf(line, '%s');
end
z3 = 0;
while line ~= -1;% loop through until final line of file ie. line=-1
clear d3;
d3 = sscanf(line, '%s');% print non empty elements to d3 variable
c = str2double(d3(end-1:end)); % grab header line number from first line
of header section in file
d1 = d3;
for j = 2:length(d1);
field(j-1) = d1(j-1);
if field(j-1) == '-';
field(j-1) = '_';
end
if d1(j) == ':';
break
end
end
value = d1(j+1:end);
Attributes.(eval('field')) = value;
ii = 0;
for i = 1:c-1
line = fgetl(fid);
clear d3;
d3 = sscanf(line, '%s');% print non empty elements to d3 variable
if ~isempty(d3)
for j = 2:length(d3);
field(j-1) = d3(j-1);
if field(j-1) == '-';
field(j-1) = '_';
end
if d3(j) == ':';
break
end
end
value = d3(j+1:end);
if length(field) == 10;
if field == 'X_Axisize';
s1 = str2double(value);
end
```

```

end
if length(field) == 5;
if field == 'Title';
y3.Name = value;
end
end
Attributes.(eval('field')) = value;
clear field;
clear value;
end
end
data = [];
z = 0;
while isempty(data)|| (nxtindex==1)
z = z+1;
line = fgetl(fid);
f1 = sscanf(line, '%f');
f = sscanf(line, '%s');% print non empty elements to f variable;
if isempty(f1)
if ~isempty(f)
for j = 2:length(f);
field(j-1) = f(j-1);
if field(j-1) == '-';
field(j-1) = '_';
end
if f(j) == ':';
break
end
end
value = f(j+1:end);
DatasetSection.(eval('field')) = value;
clear field;
clear value;
end
end
[data, ncols, errmsg, nxtindex] = sscanf(line, '%f');
end
data = [data; fscanf(fid, '%f')];
line = fgetl(fid);
z1 = 0;
TagScale1 = [];
if line(1:9) == 'Tagsbegin';
for i = 1:length(line);
field(i) = line(i);
if line(i) == ':';
break
end
end
while isempty(TagScale1)
z1 = z1+1;
f = cellstr(line);
line = fgetl(fid);
if length(line)>14;
if line(1:14) == 'TagScalesBegin';
TagScale1 = line;
end
end
end

```

```

end
end
z2 = 0;
k = [];
while isempty(k)
z2 = z2+1;
f = cellstr(line);
m(z2,:) = f;
line = fgetl(fid);
if line(1:12) == 'TagScalesEnd';
k = line;
end
end
m(z2+1,:) = cellstr(k);
SpecialSection = m;
line = fgetl(fid);
eval('data = reshape(data, ncols, length(data)/ncols)'';', '');
DatasetSection.Data = data;
while isempty(line)
line = fgetl(fid);
end
z3 = z3+1;
y3.Attributes = Attributes;
y3.DatasetSection = DatasetSection;
y3.SpecialSection = SpecialSection;
eval(['Function', num2str(z3), '=y3;']);
end
for i = 1:z3;
kk.(['Function' num2str(i)]) = eval(['Function' num2str(i)]);
end
fclose(fid);
end

```

# ANEXOS



# Brüel & Kjær Certificate

## **Vanyer Danae Macias Padilla** del CCADET

Ha asistido y completado con éxito el curso  
de Brüel & Kjær educación continua:

Uso y manejo del Sistema PULSE  
marca Bruel & Kjaer  
con software Beamforming

11 y 12 de octubre de 2012



Martin Gerold  
Vice President of Americas



Tony Frazer - Course Instructor

Brüel & Kjær North America Inc. - 2815 E. Colonnade Court - Weymouth, MA - 01978-1198  
Telephone: 781 369 8902 - Fax: 781 448 3198 - [www.bkna.com](http://www.bkna.com) - [info@bkna.com](mailto:info@bkna.com)

HEADQUARTERS: Brüel & Kjær A/S - Viborgvej 59 - 8260 Århus N - Denmark  
Telephone: +45 7141 2600 - Fax: +45 40 40 14 95 - [www.bk.com](http://www.bk.com) - [info@bkc.com](mailto:info@bkc.com)  
In U.S. representation and service: bkna.com

Brüel & Kjær 

**ANEXO 2.- CARTA DE INICIO DE ESTANCIA EN CENAM**



DIRECCIÓN DE METROLOGÍA FÍSICA  
División de Vibraciones y Acústica



Los Cués, Querétaro; 08 de enero de 2013.

Referencia: **DVA.510.001/2013.**

A quien corresponda:

---

<b>Asunto:</b>	Estancia de la C. Ing. Vanyer Danae Macias Padilla (No. de cuenta UNAM: 512005601) en la División de Vibraciones y Acústica del Centro Nacional de Metrología.
<b>Justificación:</b>	<p>La Ing. Vanyer Danae Macias Padilla es estudiante de 4to semestre en la Maestría en Ingeniería en el área de instrumentación dentro del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) perteneciente a la UNAM.</p> <p>En apoyo a su trabajo de tesis, Vanyer Danae requiere manejar la instrumentación para la medición del coeficiente de difusión direccional en campo libre (ISO 17497-2:2012). La estancia tiene como objetivo el que Vanyer Danae aprenda a utilizar un arreglo de micrófonos (32 y/o 64 canales) y realizar mediciones preliminares.</p>
<b>Periodo:</b>	Del 4 de Febrero de 2013 al 15 de febrero de 2013 (dos semanas), en el horario normal de trabajo: de las 09h00 a las 17h00.
<b>Entregables a CENAM</b>	<p>El viernes 15 de febrero de las 16h00 a las 16h30, Vanyer Danae Macias Padilla realizará una presentación sobre el desarrollo de su estancia y resultados obtenidos.</p> <p>El viernes 22 de febrero debe entregar un breve informe escrito (PDF) de su estancia con un mínimo de 5 hojas, incluyendo carátula, aprobado por su tutor en la maestría.</p>

---

Sin otro particular, quedo de usted.

ATENTAMENTE,

Dr. Andrés E. Pérez Matzumoto  
COORDINADOR CIENTÍFICO A, DVA

c.c.p. Interesada  
Tutor  
Archivo.  
Dr. Andrés Esteban Pérez Matzumoto – Coordinador Científico A de la División de Vibraciones y Acústica.

**ANEXO 3.- CARTA DE TERMINO DE ESTANCIA EN CENAM**



**DIRECCIÓN GENERAL DE METROLOGÍA FÍSICA**  
Dirección de Vibraciones y Acústica



Los Cués, Querétaro; 27 de febrero de 2013.

Referencia: **DVA.510.010/2013.**

A quien corresponda:

<b>Asunto:</b>	Terminación de la estancia de la C. Ing. Vanyer Danae Macias Padilla (No. de cuenta UNAM: 512005601) en la División de Vibraciones y Acústica del Centro Nacional de Metrología.
<b>Justificación:</b>	<p>La Ing. Vanyer Danae Macias Padilla es estudiante de 4to semestre en la Maestría en Ingeniería en el área de instrumentación dentro del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) perteneciente a la UNAM.</p> <p>La Ing. Vanyer Danae Macías cumplió con los principales objetivos de la estancia. Definió el método de medición que mejor le convenía. También aprendió a utilizar un arreglo de micrófonos para el diseño de un goniómetro. Cumplió con los entregables de la estancia en tiempo y forma.</p>
<b>Periodo:</b>	Del 4 de Febrero de 2013 al 15 de febrero de 2013 (dos semanas), en el horario normal de trabajo: de las 09h00 a las 17h00.
<b>Entregables a CENAM</b>	<p>El viernes 15 de febrero de las 16h00 a las 16h30, Vanyer Danae Macias Padilla realizó una presentación sobre el desarrollo de su estancia y resultados obtenidos.</p> <p>El viernes 22 de febrero entregó un breve informe escrito (PDF) de su estancia con un mínimo de 5 hojas, incluyendo carátula, aprobado por su tutor en la maestría.</p>

Sin otro particular, quedo de usted.

ATENTAMENTE,

Dr. Andrés E. Pérez Matsumoto  
COORDINADOR CIENTÍFICO A, GRUPO DE ACÚSTICA

c.c.p. Interesada  
Tutor  
Archivo.  
Dr. Andrés Esteban Pérez Matsumoto – Coordinador Científico A, Grupo de Acústica.