



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

**DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA EL MAPEO DE FUENTES SONORAS POR  
INTENSIDAD ACÚSTICA**

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

PRESENTA:  
JESÚS ALEJANDRO ONOFRE JIMÉNEZ

TUTOR (ES) PRINCIPAL(ES)  
DR. SANTIAGO JESÚS PÉREZ RUIZ, CCADET, UNAM  
DR. ANDRÉS ESTEBAN PÉREZ MATZUMOTO, CCADET, UNAM  
COMITÉ TUTOR (DE EXISTIR)

MÉXICO, D. F.

JURADO ASIGNADO:

**Presidente:** Dr. Rendón Garrido Pablo Luis

**Secretario:** Dr. Torres Zúñiga Vicente

**Vocal:** Dr. Pérez Ruiz Santiago Jesús

**1 er. Suplente:** Dr. Pérez Matsumoto Andrés Esteban

**2 do. Suplente:** M. en I. Pérez López Antonio

**Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Centro Nacional de metrología CENAM**

TUTOR DE TESIS:

DR. SANTIAGO PÉREZ RUIZ

-----  
FIRMA

## Agradecimientos

Deseo agradecer a la Universidad Autónoma de México y en particular al Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico CCADET por brindarme las facilidades para iniciar este posgrado

Al Dr. Andrés E. Pérez Matsumoto, al Dr. Santiago Jesús Pérez Ruiz, al M. en C. Adolfo Esquivel y a la Dra. Rosalba por sus invaluable enseñanzas, sus consejos, su tiempo incondicional y su paciencia para mejorar siempre este trabajo.

Al proyecto CONACYT PDCPN2013-01, No. 213883 y al proyecto: PAPIIT-UNAM, No. IG100314

Al CENAM y en especial a la Dirección de Vibraciones y acústica por las facilidades otorgadas.

A CONACYT, ya que este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo económico otorgado.

A mis padres y a todos mis compañeros, no solo los que cursaron la maestría conmigo, sino también a los que formaron parte de mi convivencia diaria en el CENAM y fuera de este.

## ÍNDICE

ÍNDICE.....	ii
Objetivos y Justificación .....	7
Introducción.....	8
Capítulo I Fundamentos Teóricos.....	11
1.1 Potencia sonora e intensidad sonora .....	11
1.2 Principio de medición de intensidad acústica/sonora .....	12
1.3 Errores y limitaciones asociadas a sondas p-p.....	15
1.4 Sondas de intensidad acústica 1D.....	17
1.5 Sondas de intensidad acústica 3D.....	17
1.6 Arreglo de micrófonos .....	18
1.7 Teorema del muestreo.....	19
1.8 <i>Aliasing espacial</i> .....	20
Capítulo II Desarrollo.....	23
2.1 Espaciamiento y orientación de los micrófonos .....	23
2.1.1 Configuración <i>back-to-back</i> .....	25
2.1.2 Configuración <i>side-by-side</i> y <i>tándem</i> .....	26
2.1.3 Configuración <i>face-to-face</i> .....	27
2.2 Diseño del separador.....	28
2.3 Diseño de la sonda y la estructura.....	31
2.4 Criterios para la estructura y el cambio de dimensiones.....	36
2.5 Instrumentación .....	41
2.5.1 Sistema de adquisición.....	41
Capítulo III Resultados.....	43
3.1 Montaje .....	44
3.4 Mediciones realizadas.....	45
Conclusiones y trabajo futuro.....	54
Bibliografía.....	56

Apéndices.....	59
Apéndice A.- cálculo de intensidad acústica en 3D por Suzuki. ....	59
Apéndice B.- cálculo de intensidad acústica en 3D propuesto basado en el cálculo de intensidad en los vértices del tetraedro. ....	62
Apéndice C.- Programas utilizados .....	64
E1.-Función conversión .....	64
E2.-Función para leer los datos adquiridos mediante el PULSE en un archivo de Excel .....	64
E3.-Programa para crear el vector de frecuencias en documentos de texto.....	65
E4.-Programa para crear el cálculo de intensidad y guardar los resultados en un documento de texto .....	66
E5.- Programa para adquirir datos de la sonda uniaxial B&K y compararlos con los obtenidos en la sonda tetraedrica .....	68
Anexo A    Separador sólido .....	70
A-1 Separador sólido ensamble .....	70
A-2 Separador sólido 12 mm y 8.5 mm.....	71
Anexo B Sonda de Intensidad Acústica 3D .....	72
B-1 Componentes de la sonda de intensidad acústica del prototipo 1 <i>PISA-I</i> .....	72
Anexo C Estructura del arreglo de micrófonos.....	77
Índice de tablas	
Tabla 1.- Deformaciones mínimas y máximas en los ejes de la estructura .....	40
Tabla 2.- Equivalencia entre espectros medidos y los necesarios para utilizar el método de Suzuki. ....	48
Tabla 3.-Índice de presión residual por tonos en la sonda uniaxial B&K y la sonda tetraédrica .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 4.- Índice de capacidad dinámica por tonos en la sonda uniaxial B&K y la sonda tetraédrica .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Índice de figuras	
Figura 1.- Fuerza y velocidad a través del elemento superficial de un fluido.....	11
Figura 2.- Configuraciones de micrófonos en sondas de intensidad p-p.....	12
Figura 3.- Aproximación de la presión promedio en el centro de acústico entre los dos micrófonos.....	13

Figura 4.- Demostración del error de desfaseamiento en forma fasorial. ....	16
Figura 5.- Error estimado mediante aproximación de diferencias finitas.....	16
Figura 6.- (a) Sonda de intensidad 3D de 6 micrófonos B&K Type (5356), (b) Sonda de intensidad 3D de 6 micrófonos GRAS 3D. ....	17
Figura 7.- Distribución tándem de micrófonos en una arreglo tetraédrico ( <i>OnoSokki</i> ). ....	18
Figura 8.- Descripción de algunos arreglos de micrófonos comerciales.....	19
Figura 9.- <i>Aliasing</i> espacial en diagrama polar.....	21
Figura 10.- Espaciado aleatorio en un arreglo de microfños para disminuir el efecto de aliasing.....	21
Figura 11.- Comparación entre un arreglo de micrófonos fijos y una arreglo de micrófonos móviles [13]......	22
Otra de las alternativas para realizar mediciones de fuentes sonoras sin presentar el efecto de aliasing. Involucra el proceso de <i>beamforming</i> mediante métodos óptico-acústicos [14].	
Figura 12.- <i>Beamforming</i> mediante arreglo de micrófonos y comparación de mediante métodos óptico-acústicos sin <i>aliasing</i> . ....	22
Figura 13.- Separación <i>back-to-back</i> , <i>side-by-side</i> y <i>face-to-face</i> en una configuración tetraedrica. ....	23
Figura 14.- Apotema de un tetraedro regular. ....	24
Figura 15.- Altura de un tetraedro regular.....	25
Figura 16.- Configuración tetraédrica <i>back-to-back</i> .....	25
Figura 17.- Configuración tetraédrica <i>side-to-side</i> .....	26
Figura 18.- Configuración tetraédrica <i>side-by-side</i> y tándem. ....	26
Figura 19.- Configuración tetraédrica <i>face-to-face</i> . ....	27
Figura 20.- Tetraedro inscrito.....	28
Figura 21.- Intervalos de frecuencia para una exactitud en la medición de 1 dB, como función del índice presión-intensidad, espaciamiento entre micrófonos y desfaseamiento, Imagen corregida p.22 [4]. ....	29
Figura 22.- Separadores sólidos para sondas de intensidad acústica en 1D y 3D con configuración <i>face-to-face</i> . ....	29
Figura 23.- Micrófonos en configuración tetraédrica con separador sólido en el centro. ....	30
Figura 24.- a) Separador sólido con cilindros, b) Separador sólido mediante ensambles....	30
Figura 25.- Elementos del separador maquinado en el taller de desarrollo de prototipos del CCADET, UNAM. ....	31
Figura 26.- Prototipos de sonda de intensidad acústica 3D de configuración tetraédrica orientada verticalmente, vista superior e isométrica. ....	33
Figura 27.- Prototipo de sonda de intensidad acústica 3D 1 (PSIAI) de configuración tetraédrica orientada invertida, vista superior e isométrica. ....	34
Figura 28.- Prototipo 2 (PSIAv), sonda de intensidad acústica 3D de configuración tetraédrica.....	35

Figura 29.-Análisis de elementos finitos para la sonda de intensidad acústica.....	36
Figura 30.- Esquema de cuadriláteros formados por barras en estructuras desplegadas [25]. .....	37
Figura 31.- Cuadrilátero formado por barras dispuestas en “X” también conocido como sistema de tijeras o pantógrafo. ....	38
Figura 32.- Estructura base del mecanismo desplegable con un grado de libertad. ....	38
Figura 33.- Mecanismo con separación entre nodos de 15 cm, 10 cm y 5 cm.....	39
Figura 34.- Simulación de esfuerzos en el plano xz realizada con el software Autodesk Inventor.....	40
Figura 35.-Vista frontal de con separacion de 5cm entre centros acusticos de las sondas de intensidad acustica 3D y separador sólido de 12 mm, Anexo A. ....	41
Figura 36.-Sistema de adquisición y software PULSE. ....	42
Figura 37.- Micrófono de precisión tipo <i>Array-4958 B&amp;K</i> .....	42
Figura 38.- Separador sólido tetraédrico ( <i>Sc_PAM_12</i> ) fabricado con <i>Veroclear RGD810</i> . .....	43
Figura 39.- Elementos fabricados con tecnología <i>Veroclear</i> en el taller mecánico de desarrollo de prototipos del CCADET, UNAM.....	44
Figura 40 FIGURA.- Sonda de intensidad acústica conformada por 4 Micrófonos de precisión tipo <i>Array-4958 B&amp;K</i> , distanciados mediante un separador sólido de 12mm de configuración tetraédrica. ....	44
Figura 41.- Ubicación espacial dentro de la cámara acústicamente acondicionada del laboratorio primario de acústica, a) vista superior, b) vista lateral.....	45
Figura 42.- Diagrama de flujo de la interfaz del sistema de adquisición y el software que contempla el PULSE. ....	46
Figura 43.- Medición de una fuente monopólica de banda ancha desarrollada en el CENAM.....	46
Figura 44.- Ubicación de los micrófonos en la sonda de intensidad. ....	47
Figura 45.-Medición de una fuente monopólica de banda ancha desarrollada en el CENAM mediante una sonda de intensidad acústica uniaxial <i>B&amp;K</i> . ....	49
Figura 46.- Calculo y comparación de la intensidad acústica medida mediante el barrido en tercios de octava medida mediante los métodos desarrollados en la dirección x. --*-- método desarrollado por Suzuki, --o-- método propuesto y --o-- sonda de intensidad acústica uniaxial <i>B&amp;K</i> .....	50
Figura 47.- Calculo y comparación de la intensidad acústica medida mediante el barrido en tercios de octava medida mediante los métodos desarrollados en la dirección x. --*-- método desarrollado por Suzuki, --o-- método propuesto y --o-- sonda de intensidad acústica uniaxial <i>B&amp;K</i> .....	51
Figura 48.- Calculo y comparación de la intensidad acústica medida mediante el barrido en tercios de octava medida mediante los métodos desarrollados en la dirección x. --*--	

método desarrollado por Suzuki, --o-- método propuesto y --o-- sonda de intensidad acústica uniaxial B&K.....	52
Figura 49.- Ruido de fondo promedio medido en el recinto acústicamente acondicionado con paneles Sonex. ....	53

---

---

## Objetivos y Justificación

### Objetivo

El objetivo del proyecto es realizar un arreglo de micrófonos, para cuantificar campos sonoros generados por fuentes sonoras, mediante la aplicación de una alternativa al problema de *aliasing* espacial y apertura presentado en muchos de los arreglos de micrófonos comerciales, mediante sondas de intensidad acústica 3D con distribución tetraédrica, Utilizando normas, lineamientos y características que cumplan con puntos establecidos en la literatura, y así poder realizar el mapeo de fuentes sonoras.

### Justificación

En la dirección de Vibraciones y Acústica del Centro Nacional de Metrología (DVA-CENAM) se han estado desarrollando servicios y proyectos relacionados con la caracterización de fuentes sonoras industriales para su control y/o rediseño, y para algunos clientes ha existido la necesidad de utilizar arreglos de 32 y 64 micrófonos para obtener mayor información del campo sonoro generado por sus fuentes. Actualmente existe un gran número de configuraciones en arreglos de micrófonos, y uno de los problemas que se presenta en la mayoría de estos es el *aliasing* espacial, esto debido a que en un arreglo la separación entre micrófonos no puede ser demasiado grande (comparado con la longitud de onda incidente), ya que se presentaría *aliasing*, y por otro lado no puede ser demasiado pequeña ya que no tendría la apertura suficiente para recuperar la señal de interés [1], por esto se pretende desarrollar un innovador mecanismo que pueda soportar 16 sondas de intensidad acústica 3D donde cada sonda utilice 4 micrófonos en una configuración tetraédrica, ubicadas en un arreglo de 4x4, permitiendo establecer distancias de separación de 15cm, 10cm y 5cm, entre nodos que coincidan con los centros acústicos de cada sonda, para cubrir un espectro de frecuencias de 100 Hz a 6.3 kHz, con una transparencia acústica de hasta 6.3 KHz.

---

---

## Introducción

En la industria y en la comunidad científica existe un gran interés en conocer información de los campos sonoros para detectar y reducir el ruido proveniente de los elementos de maquinarias y equipos, así como también para saber la forma en que se propaga en el medio. Para esto se realizan mediciones de potencia e intensidad acústica utilizando una gran diversidad de métodos, arreglos de micrófonos y sondas de intensidad acústica. La geometría de los arreglos de micrófonos juega un factor importante, existiendo un gran número de configuraciones y dispositivos, siendo algunos de ellos lineales, planares y cilíndricos. Sin embargo, en todos ellos se presenta un problema común, que es el *aliasing* (solapamiento) espacial y la apertura, esto debido a que en un arreglo la separación entre micrófonos no puede ser demasiado grande (comparado con la longitud de onda incidente), ya que se presentaría el efecto de *aliasing* espacial, y tampoco puede ser demasiado pequeño ya que no tendría la apertura suficiente para recuperar la señal de interés [1], una forma de evitar el problema de *aliasing* espacial y tener una apertura grande sería considerar un gran número de micrófonos siendo una solución impráctica [2]. Otra forma de realizar el mapeo de las fuentes sonoras es aplicar sondas de intensidad acústica, ya que en estas sondas este efecto es imperceptible. Para realizar estas mediciones se utilizan sondas con diversas configuraciones en 1D o en 3D. Las sondas 1D están conformadas por dos transductores de presión normalmente colocados lo suficientemente cerca uno del otro en diferentes configuraciones (*face-to-face*, *side-by-side*, *tandem* y *back-to-back*), con este tipo de sondas se puede realizar mediciones en 3D desplazando la sonda en cada uno de los componentes  $x$ ,  $y$  y  $z$ . Sin embargo, el método es complicado y laborioso. Otras sondas son las 3D en donde unas de las primeras configuraciones que se desarrollaron comercialmente contemplan 3 pares de micrófonos en una distribución ortogonal con configuraciones *face-to-face* [3], una de las desventajas de este tipo de sondas es que requiere 6 micrófonos con lo cual el costo aplicado a un arreglo de micrófonos y las dimensiones que se generarían serían mayores. En la actualidad algunas de las configuraciones más comunes, fabricadas por empresas para sondas de intensidad acústica utilizan 4 micrófonos en direcciones horizontales o verticales ubicando siempre los centros acústicos de cada transductor en los vértices de un tetraedro, existiendo algunas que integran transductores de velocidad de partícula, reduciendo el número de transductores de presión que se utilizan y reduciendo las dimensiones de la estructura que conforma la sonda, una ventaja en sondas que emplean 4 micrófonos es que reducen el número de transductores empleados y las dimensiones de la misma, en comparación con las desarrolladas por B&K que utilizan 6, por otro lado una desventaja en estas sondas es la dificultad de obtener sistemas mecánicos capaces de posicionar los micrófonos de tal forma que se mantengan estables [4], es decir que tengan la capacidad de posicionar y sujetar

micrófonos en direcciones formadas por un tetraedro o en algunos casos direcciones que parten de los vértices al ortocentro del tetraedro que forman.

Para intentar resolver los problemas de aliasing espacial, apertura y estabilidad se contempla el diseño de un arreglo de micrófonos mediante un mecanismo que soporte 16 sondas de intensidad acústica 3D en una distribución de 4x4 con un peso máximo de 5 kg, permitiendo establecer distancias de 15 cm, 10 cm y 5 cm entre nodos que coincidan con los centros acústicos de cada sonda y cubrir un espectro de frecuencias establecido por la norma ISO 9614 [5], que comprende de 100 Hz a 6.3 kHz. Cada sonda diseñada emplea 4 micrófonos ubicados en los vértices de un tetraedro orientados hacia su orto-centro mediante una estructura capaz de mantener a los transductores en esta posición, distanciando los centros acústicos de cada micrófono mediante separadores sólidos de 12 mm y 8.5 mm, con el objetivo de mantener constante la distancia de separación y minimizar errores de medición debidas a la difracción [4]. Formando una sonda con una estructura ligera, acústicamente transparente y capaz de mantener a los micrófonos aislados eléctricamente, por lo que con 16 de estas sondas 3D y una estructura que cambia sus dimensiones conformar un arreglo de 64 micrófonos para llevar a cabo el mapeo de fuentes sonoras para su control y/o rediseño.

Tomando en cuenta estos puntos a continuación se menciona una breve descripción de cada capítulo, siendo el Capítulo I la sección donde se describen los fundamentos básicos e información necesaria que posteriormente ayudara para el desarrollo del tema de tesis.

En el capítulo II se describen las consideraciones realizadas para el diseño de un arreglo de 64 micrófonos el cual está integrado por 16 sondas de intensidad acústica, en la que cada sonda sujetará, posicionará y aislará eléctricamente a 4 micrófonos (micrófonos de precisión B&K tipo *Array 4958* de ¼") en una configuración *face-to-face* distribuidos tetraédricamente, estableciendo una distancia entre micrófonos mediante separadores sólidos de 12 mm y 8.5 mm con un peso estimado de 80g en cada sonda. Obteniendo un arreglo que presenta un peso aproximado de 5kg.

En el Capítulo 3 se exponen los resultados mecánicos y experimentales, los cuales involucran:

- Los elementos diseñados que conforman la sonda de intensidad acústica 3D y los separadores sólidos construidos mediante el método de impresión *polyjet* 3D que emplea una impresora *objet connex 500*.
- Adquisición de datos mediante una sonda de intensidad acústica 3D, un sistema de medición de la compañía B&K denominado PULSE y así obtener mediciones en tonos y ruido generados por una fuente monopólica de banda ancha desarrollada en el CENAM, en un recinto condicionado acústicamente con paneles Sonex,

- Mediciones de intensidad acústica mediante una sonda uniaxial B&K utilizando el mismo equipo de medición, características y condiciones ambientales para comprobar el funcionamiento de la sonda desarrollada.
- Discusión de los resultados obtenidos mediante las sondas de intensidad.

Por último, este trabajo es finalizado con conclusiones en base a los resultados obtenidos en el Capítulo II donde se encuentran las mediciones realizadas, utilizando un sistema que involucra la sonda de intensidad acústica de configuración tetraédrica 3D y la sonda de intensidad uniaxial B&K, seguido de apéndices donde se incluye el método y la programación utilizada para realizar las mediciones y cálculos utilizados, continuando con los planos utilizados para desarrollar la sonda y la estructura que conformara el arreglo de 64 micrófonos.

# Capítulo I

## Fundamentos Teóricos

### 1.1 Potencia sonora e intensidad sonora

La potencia sonora instantánea  $W$  está definida como el producto entre la fuerza  $F$  que actúa sobre la partícula de un fluido y la velocidad  $\bar{u}$  que esta adquiere, en otras palabras, el trabajo que se realiza sobre la superficie imaginaria que secciona a un fluido está dada por el producto escalar del vector de fuerza que actúa sobre esa superficie y la velocidad de partícula que adquiere al pasar por la misma.

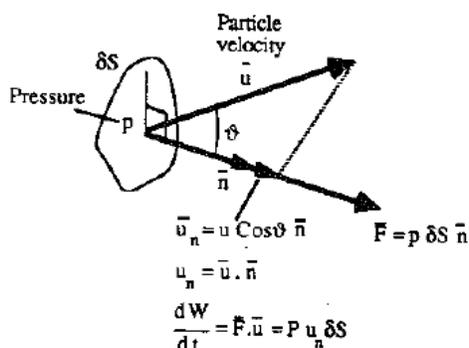


Figura 1.- Fuerza y velocidad a través del elemento superficial de un fluido.

Matemáticamente la razón de trabajo esta expresada como [5]:

$$dW / dt = \bar{F} \cdot \bar{u} = p \delta S \cdot u \cdot \cos \theta$$

Donde  $\delta S$  es el vector elemental de área el cual puede ser escrito como  $\delta S n$ , donde  $n$  es el vector unitario perpendicular a la superficie, dirigido hacia el fluido que recibe el trabajo.

Evaluando esta potencia  $W$  por unidad de área  $A$  se obtiene la Intensidad Acústica Instantánea eq. (1.1) de una onda que refleja la variación de flujo de energía a través de un área perpendicular a la dirección de propagación [6].

$$\bar{I} = \frac{W}{A} = \frac{F \cdot \bar{u}}{A} = \frac{F}{A} \cdot \bar{u} = p \cdot \bar{u}$$

$$\bar{I}(\bar{r}, t) = p(\bar{r}, t) \cdot \bar{u}(\bar{r}, t) \tag{1.1}$$

Donde  $\bar{I}$  es la intensidad acústica,  $p$  es la presión y  $\bar{u}$  es la velocidad de partícula. Por lo tanto, se necesita al menos dos transductores para determinar la intensidad acústica. En la práctica las sondas más comúnmente usadas son: la sonda que utiliza dos transductores de presión idénticos (p-p), la que combina un transductor de presión con una unidad de velocidad de partícula (p-u) y actualmente también se proponen sondas (u-u).

## 1.2 Principio de medición de intensidad acústica/sonora

Actualmente existen sistemas comerciales para realizar mediciones de intensidad acústica basados en el principio de dos micrófonos (principio p- p), que hace uso de dos transductores de presión idénticos espaciados mediante separadores sólidos y basados en la aproximación de diferencias finitas mediante el gradiente de presión sonora. Otros sistemas se basan en el principio (p-u), el cual combina un transductor de presión con transductor de velocidad de partícula y actualmente también se proponen sondas (u-u). Sin embargo, en el CENAM solo se cuenta con transductores acústicos de presión, por lo tanto se trabajara con el principio **p-p** para realizar mediciones de intensidad acústica. Para aplicar el principio de medición p-p, dos transductores de presión deben ser colocados lo suficientemente cerca uno del otro para minimizar la difracción del sonido incidente, los micrófonos pueden ser colocados en distintas configuraciones como: *face-to-face*, *sid-by-side*, *tándem*, y *back-to-back*, ver

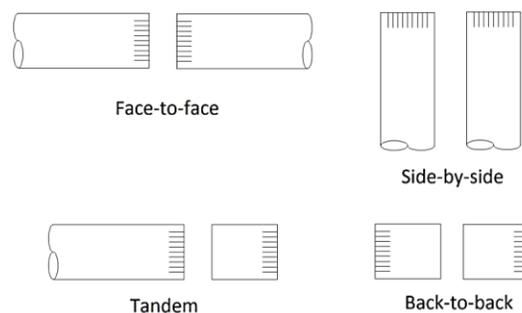


Figura 2 [5].

Figura 2.- Configuraciones de micrófonos en sondas de intensidad p-p.

La método de estimación de la intensidad acústica está basado en la relación que existe entre la presión acústica de dos micrófonos y la velocidad de partícula. Una señal proporcional al componente de velocidad de partícula el cual es co-lienal con el eje de la sonda es obtenido

empleando la aproximación de diferencias finitas al gradiente espacial de la presión sonora local. Donde la ecuación de momento de Euler muestra que, el componente del gradiente de presión en cualquier dirección  $n$  (en el centro acústico de la sonda), es proporcional a la componente de la aceleración de la partícula en esa dirección.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (1.2)$$

La componente correspondiente de la velocidad de partícula en una dirección, está dada al integrar el gradiente de la presión en función del tiempo.

$$u_n = -\frac{1}{\rho} \int_{-\infty}^t \frac{\partial p(\tau)}{\partial n} d\tau$$

Para evaluar el gradiente de presión se emplea la aproximación de diferencias finitas, que consisten en colocar dos micrófonos A y B lo suficientemente cerca uno del otro, para que en el centro acústico (centro geométrico de los micrófonos) se pueda estimar la derivada parcial como el cociente de la diferencia de la presión entre dos transductores y la distancia  $\Delta r$  que los separa. Por lo tanto la expresión para la componente de velocidad de partícula en la dirección de propagación esta dada por:

$$\frac{\partial p(\tau)}{\partial n} = \frac{(p_B(\tau) - p_A(\tau))}{\Delta r}$$

$$u_n = -\frac{1}{\Delta r \rho} \int_{-\infty}^t (p_B(\tau) - p_A(\tau)) dt \quad (1.3)$$

Esta aproximación de diferencias finitas es válida siempre y cuando la distancia de separación entre los micrófonos es pequeña en comparación con la longitud de onda de trabajo. La velocidad de partícula se ha estimado en el centro acústico de la sonda, por lo que la presión también deberá estimarse en dicho punto. Esto se realiza calculando el valor medio entre las presiones captadas por ambos micrófonos:

$$p(t) = \frac{1}{2} [p_1(t) + p_2(t)] \quad (1.4)$$

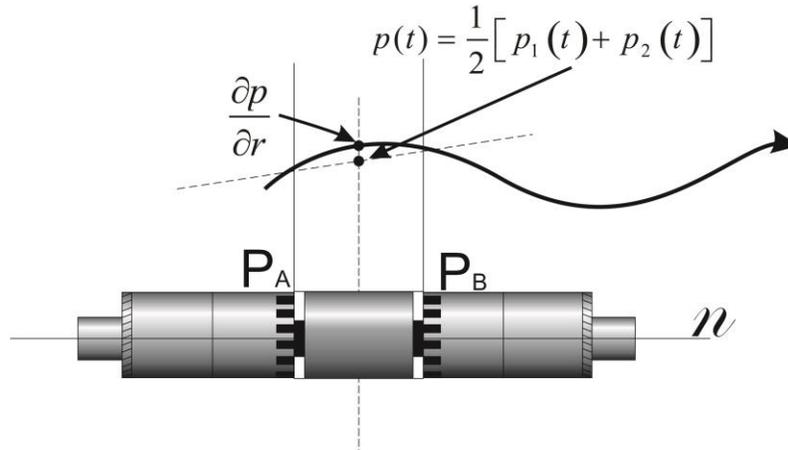


Figura 3.- Aproximación de la presión promedio en el centro de acústico entre los dos micrófonos.

Por lo tanto la estimación de la Intensidad en el centro acústico de la sonda está dada al sustituir las ecuaciones 1.3 y 1.4 en 1.1 obteniendo:

$$\bar{I}(t) = p(t) \cdot \bar{u}(t) = - \left( \frac{1}{2 \cdot \Delta r \cdot \rho_0} \right) [(p_A(t) + p_B(t))] \int_{-\infty}^t (p_B(\tau) - p_A(\tau)) d\tau \quad (1.5)$$

Por definición, la componente del vector de intensidad media en cualquier dirección es igual al producto de la presión media y la componente de la velocidad de partícula en esa dirección. En el caso de una sonda p-p, la distribución en frecuencia se puede determinar haciendo pasar las dos señales a través de filtros idénticos, ya sea antes o después de realizar las operaciones de suma, diferencia e integración. La elección de la etapa de filtrado que se aplica es dictada en gran medida por la necesidad de optimizar el rendimiento del hardware. Las aplicaciones de estos procedimientos pueden denominarse análisis de frecuencia directa

El análisis indirecto de intensidad acústica en el dominio de frecuencia utilizando el principio p-p, se basa en un análisis de Fourier (análisis espectral) de las señales de dos transductores, que es implementado a través de la función de correlación. Este método se calcula a partir de la parte imaginaria del espectro cruzado de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) de las señales de ambos micrófonos, que se obtiene mediante la densidad del espectro cruzado  $G_{p_1 p_2}(\omega)$  siendo una función límite de la transformada de Fourier de la velocidad de partícula  $u(\omega)$  y el complejo conjugado de la presión  $P^*(\omega)$  [5];

$$G_{p_1 p_2}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left( \frac{2}{T} \right) [P^*(\omega) U(\omega)] \quad (1.5)$$

La transformada de Fourier de la ecuación linearizada de Euler (1.2) entrega:

$$F \left\{ \frac{\partial p}{\partial r} \right\} = -i\omega\rho_0 U_r(\omega) \quad (1.6)$$

Y mediante la aproximación de diferencias finitas la expresión para la componente de velocidad de partícula partiendo de la ecuación de movimiento de Euler se puede aproximar como:

$$\frac{[P_1(\omega) - P_2(\omega)]}{d} = i\omega\rho_0 U_r(\omega)$$

$$u_r(\omega) = \frac{[P_1(\omega) - P_2(\omega)]}{i\omega\rho_0 d} \quad (1.7)$$

Estimando la presión como el valor promedio medido entre dos micrófonos en una misma dirección se obtiene:

$$P(\omega) \approx \frac{1}{2} [P_1(\omega) + P_2(\omega)] \quad (1.8)$$

Sustituyendo las ecuaciones (1.7) y (1.8) en (1.5)

$$G_{pu}(\omega) = -(i/2\rho_0\omega d) \lim_{T \rightarrow \infty} (2/T) \{ [P_1^*(\omega) + P_2^*(\omega)] [P_1(\omega) - P_2(\omega)] \}$$

$$G_{pu}(\omega) = -(i/2\rho_0\omega d) \lim_{T \rightarrow \infty} (2/T) \{ |P_1(\omega)|^2 - |P_2(\omega)|^2 + P_2^*(\omega)P_1(\omega) - P_1^*(\omega)P_2(\omega) \}$$

$$G_{pu}(\omega) = -(i/2\rho_0\omega d) [G_{p_1p_1}(\omega) - G_{p_2p_2}(\omega) - G_{p_1p_2}(\omega) + G_{p_2p_1}(\omega)]$$

Tomando en cuenta que el producto de términos  $P_i(\omega)P_i^*(\omega)$  es real y no contribuyen al cálculo de intensidad, se pueden despreciar, obteniendo una ecuación para obtener la intensidad acústica en frecuencia, en una dirección entre dos micrófonos [7].

$$I_{12}(\omega) = -\frac{\text{Im}(G_{p_1p_2}(\omega))}{\rho\Delta r\omega} \quad (1.9)$$

Donde  $G_{p_1p_2}$  corresponde al espectro cruzado entre P1 y P2 en una dirección n,  $\rho$  es la densidad del aire y  $\Delta r$  es la separación entre los centros acústicos de los micrófonos.

### 1.3 Errores y limitaciones asociadas a sondas p-p

Las dos diferentes técnicas comúnmente utilizadas para realizar mediciones de intensidad presentan algún tipo de limitación, esto también afecta a las mediciones mediante técnicas FFT de espectro cruzado. Estas técnicas de mediciones emplean aproximaciones como

diferencias finitas y la transformada rápida de Fourier FFT, una clasificación de los tipos de errores que aparecen en las mediciones de intensidad acústica son [7]:

#### 1.- Errores sistemáticos

- Error de desfaseamiento (limitante en bajas frecuencias)
- Error por aproximación de diferencias finitas (limitante en altas frecuencias)
- Efectos de difracción por dimensiones de la estructura de las sondas
- Errores de calibración

#### 2.- Errores aleatorios

- Error de muestreo espacial
- Errores de estimación espectral

Las ondas sonoras se propagan, y es por eso que una diferencia de fases ocurre entre dos puntos cercanos en dirección de la propagación de la onda sonora. Este cambio de fase también es equivalente al tiempo que tarda la onda para propagarse una distancia  $d$  entre dos puntos. La separación en tiempo debe ser preservada para tener una buena medición de intensidad. Sin embargo en todos los sistemas de análisis existirá un pequeño retardo de tiempo entre los canales que introducirá un pequeño desfaseamiento, este desfaseamiento se conoce como *phase mismatch error* [8], figura 4.

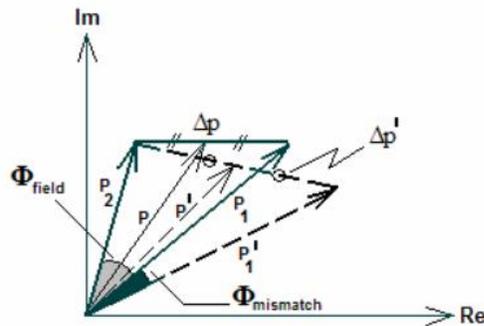


Figura 4.- Demostración del error de desfaseamiento en forma fasorial.

El método de diferencias finitas en una sonda de dos dimensiones es usado para aproximar el gradiente de la presión sonora por debajo del a curva de la separación entre micrófonos en el centro acústico formado por estos dos, si se selecciona una separación demasiado grande las mediciones en altas frecuencias será erróneas, Figura 5.

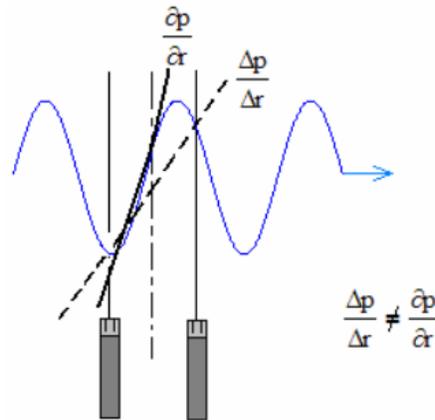


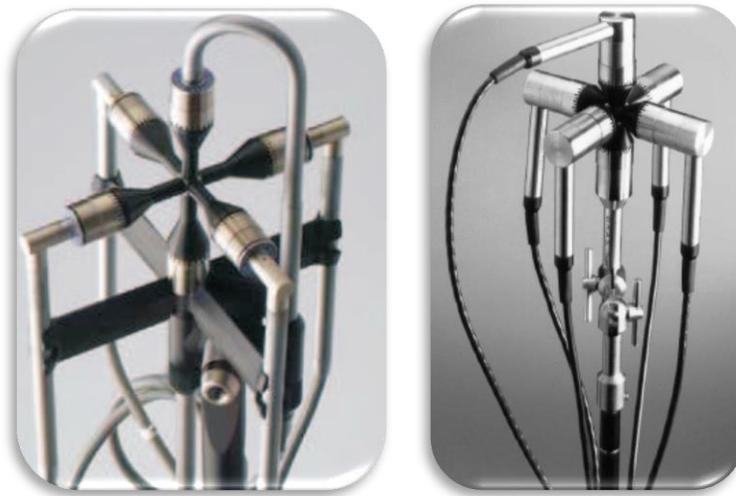
Figura 5.- Error estimado mediante aproximación de diferencias finitas

#### 1.4 Sondas de intensidad acústica 1D

Las sondas de intensidad acústica de dos micrófonos han existido desde hace algunas décadas, y han sido muy utilizadas para realizar mediciones de los vectores de intensidad acústica de los campos sonoros. Estas sondas utilizan el principio p-p para realizar las mediciones de intensidad acústica. Uno de los principales inconvenientes en estas sondas de intensidad es la limitante en caracterizar campos sonoros en un espacio tridimensional, ya que un sistema de dos micrófonos es capaz de realizar mediciones de intensidad acústica en una sola dirección y se necesita posicionar o rotar la sonda en el punto de referencia a lo largo de las tres direcciones para poder encontrar el vector de intensidad acústica en  $x$  y  $y$  y  $z$ , este proceso de *scanning* requiere *software* y *hardware* adicional y no siempre es muy confiables.

#### 1.5 Sondas de intensidad acústica 3D

Las sondas de intensidad acústica que emplean dos micrófonos entregan un vector que cuantifica la magnitud y la dirección de las fuentes sonoras en una dirección. Las sondas de intensidad acústica 3D son capaces de obtener un vector en tres dimensiones el cual no solo entrega la magnitud y la dirección si no también puede otorgar mayor información sobre la dirección de la cual se está generando ruido o el campo sonoro. Desde la aparición de la sonda de intensidad en una dirección se ha estado desarrollando sondas 3D las cuales varían en geometrías, configuraciones en las que se coloquen los transductores y métodos para el cálculo de la intensidad acústica. Una de las primeras configuraciones comerciales fueron las desarrolladas por GRAS y Brüel & Kjaer, en las que se utilizan 6 micrófonos [3], Figura 6.



(a)

(b)

Figura 6.- (a) Sonda de intensidad 3D de 6 micrófonos B&K Type (5356), (b) Sonda de intensidad 3D de 6 micrófonos GRAS 3D.

Estas sondas de intensidad utilizan 6 micrófonos en una configuración ortogonal y los micrófonos son colocados uno enfrente del otro mediante separadores sólidos, para minimizar errores en las mediciones debidas a la difracción del sonido. Otra implementación de una sonda 3D es la desarrollada por la compañía Japonesa OnoSokki [9], ver Figura 7, la cual está diseñada para propósitos generales, estableciendo un micrófono en el centro y tres más en los extremos para conformar una configuración tetraédrica *side-by-side*, utilizando separadores sólidos en forma de barras, debido a su configuración con estos separadores puede cubrir frecuencias de 40 Hz a 1.2 kHz (separador de 60 mm), o de 120 Hz a 3.6 kHz (separador 20 mm), y con un error de 2 dB puede cubrir hasta 5 kHz.

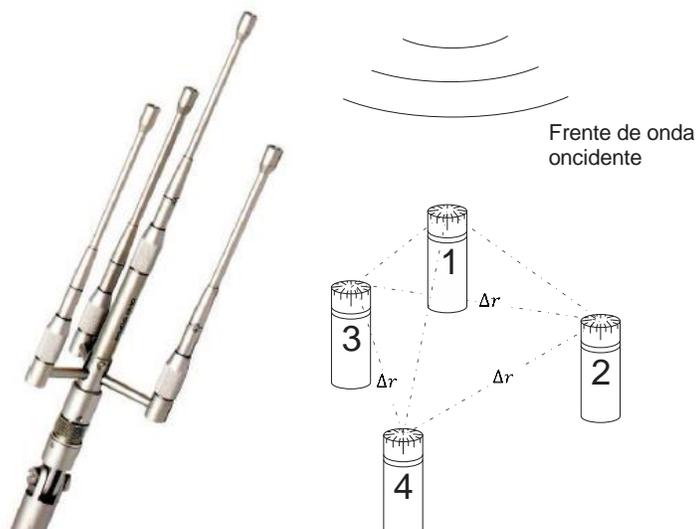


Figura 7.- Distribución tándem de micrófonos en una arreglo tetraédrico (*OnoSokki*).

Una de las ventajas de utilizar una configuración tetraédrica es la de emplear el mínimo número de micrófonos para realizar mediciones de intensidad acústica en 3 direcciones presentando mayor facilidad de manejo y costos. La desventaja de configuraciones de este estilo es la de necesitar una forma compleja de ajustar la separación y orientación entre los micrófonos que la conforman.

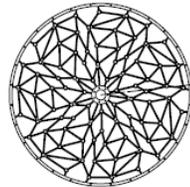
### 1.6 Arreglo de micrófonos

Un arreglo de micrófonos es un instrumento de medición acústica para el análisis de diferentes tipos de entornos, para reducir el ruido proveniente de diversas fuentes y para obtener información sobre la forma en que se distribuye el sonido. Para realizar estas mediciones se utilizan diferentes métodos y arreglos de micrófonos. Brüel&Kjær [9] cuenta con un gran número de arreglos de micrófonos 2-D y 3D los cuales están diseñados para diferentes propósitos como interiores, exteriores, mediciones en campo cercano o campo lejano, en la figura 8 se muestran algunos de los arreglos comerciales más comunes de empresas como: GRAS [10], ONNOSOKKI [11] y *LMS SOUNDBRUS* [12].



Grid array for  
acoustical holography

*Grid Array-B&K*  
Max. Freq. 6 kHz  
No. de canales: 6  
Tamaño: 0.125m x  
0.125 m



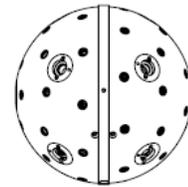
Slice-wheel array for Beamforming  
and acoustical holography

*Slice Wheel Array- B&K*  
Propósito general  
Máxima frecuencia: 36-ch.: 6.0 kHz  
60-ch.: 8.0 kHz  
Tamaño: 0.35 m a 2.0 m Diámetro



Hand-held array  
with position detection system

*Hand-held Array B&K*  
Propósito: Componentes,  
interiores, exteriores, etc.  
Frecuencia máxima: 6 kHz



Spherical Array  
for Beamforming

*Spherical Array B&K*  
Propósito: interior de  
vehículos y aeronaves  
Frecuencia máxima:  
8 kHz Tamaño 0.20 cm



*B&K Type 5356 six-  
microphone 3D Intensity  
probe*



*Vector Intensity Probe Type-  
50VI- G.R.A.S*  
Sonda de intensidad 3D



*OnoSokki 3D Sound Intensity  
Measuring Probe MI-6420*



*SoundBrush probe  
3D intensity*  
Intervalo de frecuencia

Separadores sólidos de 25 mm y 50 mm 1.5	Rango de frecuencia de 120kHz a 5.0 kHz Configuración tetraedrica	De 100 – 4000 Hz Configuración tetraedrica
---	---	--

Figura 8.- Descripción de algunos arreglos de micrófonos comerciales

### 1.7 Teorema del muestreo

El teorema de muestreo de Nyquist-Shannon, también conocido como teorema de muestreo de Whittaker-Nyquist-Kotelnikov-Shannon o simplemente criterio de Nyquist, es un teorema fundamental de la teoría de la información, que relaciona a señales continuas y discretas. H. Nyquist lo postula de la siguiente manera:

"No es necesario observar todo el tiempo una señal analógica o continua en el tiempo para poder decir cuál es su valor en cualquier momento, aunque la señal no haya sido observada en ese instante. Es suficiente observar sus valores en instantes suficientemente cercanos entre sí, para poder reconstruir la señal de la misma manera que si no se hubiera dejado de observar la señal en ningún instante. La restricción que el tiempo entre las observaciones (técnicamente estas se conocen como las "muestras" de la señal) debe ser lo suficientemente pequeño para poder captar aun las variaciones más rápidas". [10].

Nyquist mostro que, para que se pueda distinguir sin ambigüedad las componentes frecuenciales de una señal, es necesario que se lleve a cabo el muestreo al menos al doble de la frecuencia máxima contenida en la misma, para evitar los efectos del *aliasing* ( $F_m \geq 2F_{\max}$ ). La máxima frecuencia permitida en una señal para una frecuencia de muestreo dada se denomina frecuencia de Nyquist, donde se demuestra que la reconstrucción exacta de una señal periódica continua en banda base es matemáticamente posible si la señal está limitada en banda y la tasa de muestreo es superior al doble de su ancho de banda [11].

### 1.8 Aliasing espacial

Un principio familiar en muestreo temporal es la frecuencia de muestreo de Nyquist, que es la frecuencia de muestreo mínima requerida para evitar *aliasing* (solapamiento) en las señales muestreadas [12]. El teorema de muestreo temporal indica que una señal debe ser muestreada a una tasa  $f_s$  (de periodo  $T_s$ ) de tal manera que:

$$f_s = \frac{1}{T_s} \geq 2f_{\max}.$$

Donde  $f_{\max}$  es el componente de frecuencia máxima en el espectro de frecuencia de la señal. Del mismo modo, para el muestreo espacial tenemos el requisito de que:

$$f_{x_s} = \frac{1}{d} \geq 2f_{\max}$$

Donde  $f_{xs}$  es la frecuencia de muestreo espacial en muestras por metro, siendo  $f_{max}$  la componente más alta de frecuencia espacial en el espectro angular de la señal. La frecuencia de muestreo espacial a lo largo del eje x está dada por:

$$f_{xs} = \frac{\sin \theta \cos \phi}{\lambda}$$

Donde  $\theta$  y  $\phi$  son ángulos de la localización, siendo esta la dirección del vector de onda a lo largo de la dirección x. El valor máximo de esta relación se produce naturalmente cuando el numerador es máximo y el denominador es mínimo. Esto conduce a la relación:

$$f_{X_{max}} = \frac{1}{\lambda_{min}}$$

Y en consecuencia el requisito de que

$$d < \frac{\lambda_{min}}{2} \tag{1.10}$$

Donde  $\lambda_{min}$  es la longitud de onda mínima en la señal de interés. La ecuación 1.10 se conoce como el teorema de muestreo espacial, y debe ser adherido a fin de prevenir la aparición de *aliasing* espacial en el patrón de directividad de un arreglo de sensores. La Figura 9 ilustra el efecto de *aliasing* espacial en un diagrama polar del patrón de directividad horizontal de una señal, mostrando que si la distancia de separación en un arreglo de micrófonos no cumple con el mínimo requerido se producen glóbulos que interfieren con la señal de interés provocando *aliasing* en las mediciones.

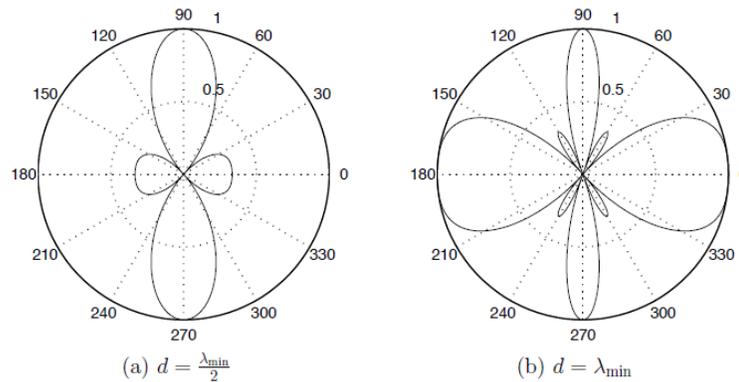


Figura 9.- *Aliasing* espacial en diagrama polar

Para disminuir este efecto se utilizan métodos alternativos de muestreo y procesamiento de las señales, algunos de los métodos para evitar *aliasing* están basados en métodos gráficos como es el súper muestreo, muestreo estocástico y algunos otros involucran arreglos móviles, esféricos y también métodos ópticos. El súper muestreo implica aumentar la frecuencia de

muestreo, y realizando *blurring* (difuminado) o *smoothing* (suavizado) mediante programas de procesamiento de imágenes. El muestreo estocástico es una distribución aleatoria de los micrófonos con opción de combinar el súper muestreo con una distribución aleatoria.

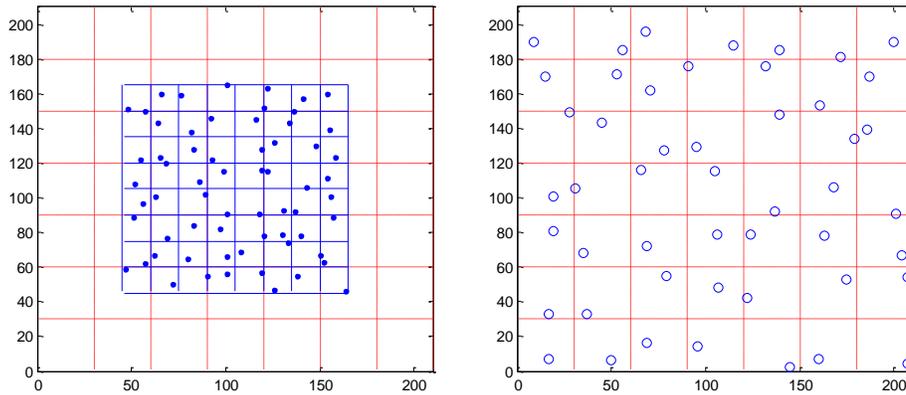


Figura 10.- Espaciado aleatorio en un arreglo de micrófonos para disminuir el efecto de aliasing.

Otras de las soluciones mencionadas anteriormente involucran arreglos de micrófonos móviles [13], donde un arreglo de micrófonos es rotado para obtener más puntos de muestreo y evitar los efectos de aliasing.

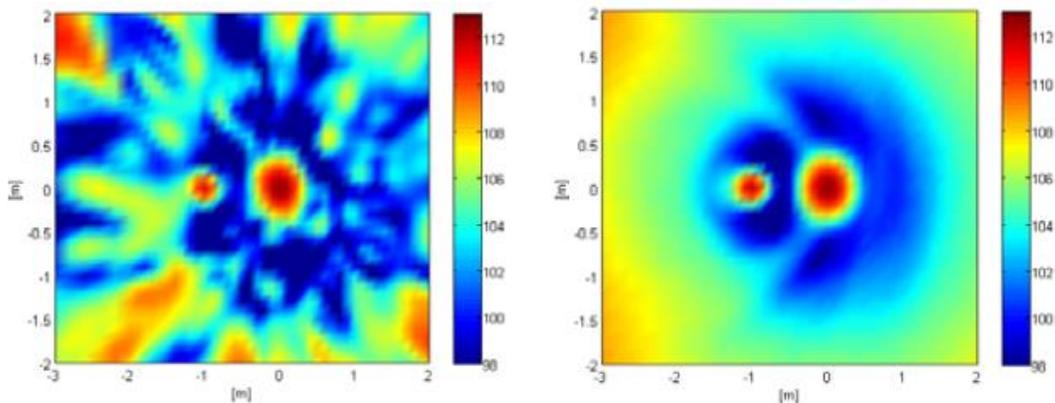


Figura 11.- Comparación entre un arreglo de micrófonos fijos y una arreglo de micrófonos móviles [13].

Otra de las alternativas para realizar mediciones de fuentes sonoras sin presentar el efecto de aliasing. Involucra el proceso de *beamforming* mediante métodos óptico-acústicos [14].

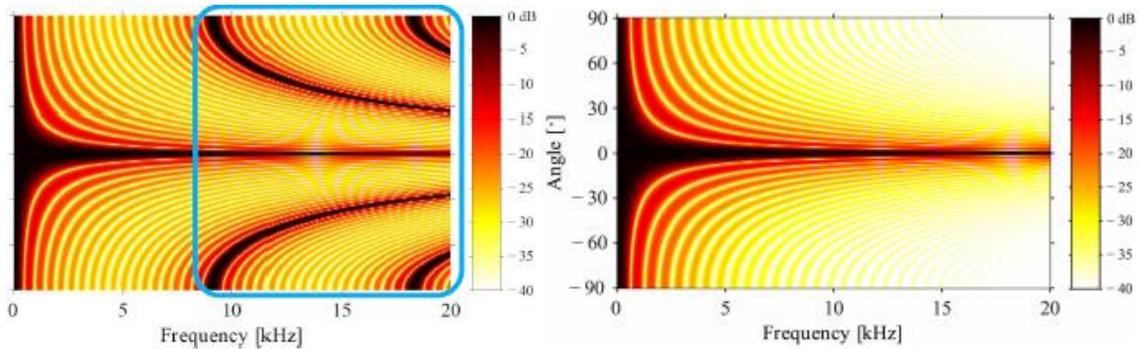


Figura 12.- *Beamforming* mediante arreglo de micrófonos y comparación de mediante métodos óptico-acústicos sin *aliasing*.

## Capítulo II

### Desarrollo

#### 2.1 Espaciamiento y orientación de los micrófonos

Actualmente existen múltiples tipos de distribuciones e intervalos de trabajo para arreglos de micrófonos comerciales [15] [16]. Para la sonda de intensidad en una dimensión existen dos principios comúnmente usados. Uno es la combinación de un transductor de presión con una unidad de velocidad de partícula (sondas p-u) y el otro principio utiliza dos transductores de presión idénticos (sondas p-p), normalmente colocados lo suficientemente cerca uno del otro en diferentes configuraciones (*face-to-face*, *side-by-side*, *tandem* y *back-to-back*), para así minimizar la difracción del sonido incidente [5]. En el CENAM se cuenta con transductores de presión por lo que se trabajara con el principio p-p.

Tomando en cuenta algunas de las orientaciones desarrolladas y planteadas por B&K, GRAS, OnoSokki y Rasmussen. Se consideraron las configuraciones existentes para separaciones entre micrófonos (*face-to-face*, *side-by-side*, *tandem* y *back-to-back*) en una configuración

tetraédrica, realizando un análisis con las distintas configuraciones para seleccionar la que mejor se adapte a los requerimientos necesarios de espaciamiento y distribución.

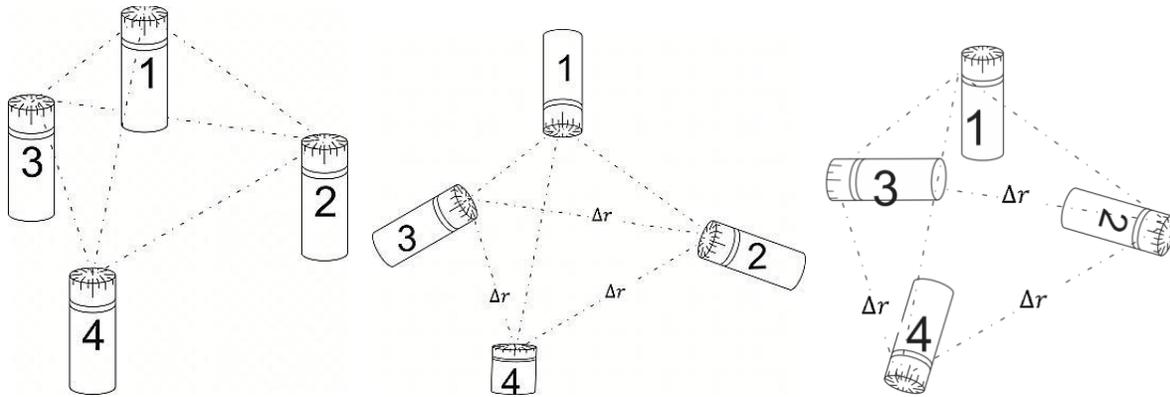


Figura 13. - Separación *back-to-back*, *side-by-side* y *face-to-face* en una configuración tetraédrica.

Para definir la configuración de la sonda de intensidad acústica 3D, previamente se toman en cuenta las configuraciones de separación entre los micrófonos en una estructura tetraédrica, el tamaño de los micrófonos, las dimensiones de los cables y conectores, para de esta manera calcular la distancia de separación entre los centros acústicos de los micrófonos.

En la distribución de los micrófonos en una sonda tetraédrica, se debe mantener al menos una separación mínima entre el cuerpo de cada micrófono para que no se presente contacto físico y, de esta manera evitar que se generen señales de ruido en las mediciones o difracción por las nuevas dimensiones que se generarían. A partir del análisis de la configuración del tetraedro, se definirá el arreglo de los micrófonos y el intervalo de frecuencia del sistema de medición.

Para conocer la separación que existe entre los centros acústicos de los micrófonos, se deben encontrar las dimensiones de las componentes del tetraedro que se forma, esto debido a las diferentes configuraciones y orientación, ver Figura 13. Para esto se necesita conocer el apotema  $H$  de cualquiera de las caras, la altura  $A$  y las distancias que existen desde cada uno de los vértices hacia el orto-centro del tetraedro. Para obtener estas dimensiones se toma una de las caras del tetraedro para formar un triángulo equilátero conformado por dos triángulos rectángulos y mediante el teorema de Pitágoras obtener la apotema de esta cara. Además se sabe que el baricentro  $O$  de un triángulo es  $2/3$  del apotema  $H$  ( $2/3$  de la altura de un triángulo equilátero) como se muestra en la Figura 14.

$$a^2 = \left(\frac{a}{2}\right)^2 + H^2$$

$$H^2 = a^2 - \frac{a^2}{4} = \frac{3}{4}a^2$$

$$H = \frac{\sqrt{3}}{2}a \quad (2.1)$$

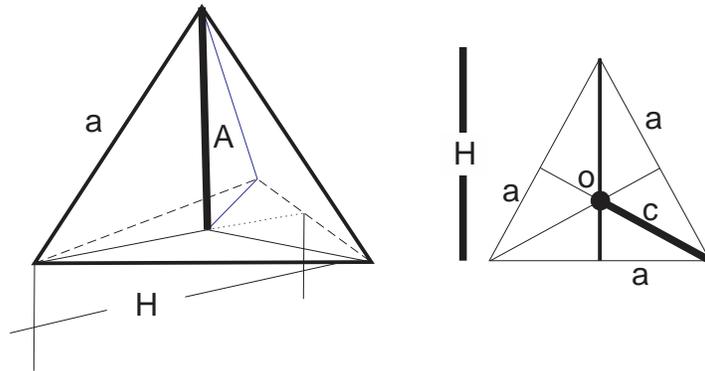


Figura 14.- Apothema de un tetraedro regular.

Donde  $a$  es la distancia de cada una de las aristas del tetraedro,  $H$  el apotema del triángulo de unas de las caras y  $A$  es la altura del tetraedro. Al saber la distancia de la apotema  $H$  de una de las caras se puede obtener mediante el teorema de Pitágoras la altura  $A$  del tetraedro.

$$a^2 = A^2 + \left(\frac{2}{3}H\right)^2 \rightarrow a^2 = A^2 + \frac{4}{9}H^2$$

$$A^2 = a^2 - \frac{4}{9}\left(\frac{3}{4}a^2\right) = \frac{6}{9}a^2$$

$$A = \frac{\sqrt{6}}{3}a \quad (2.2)$$

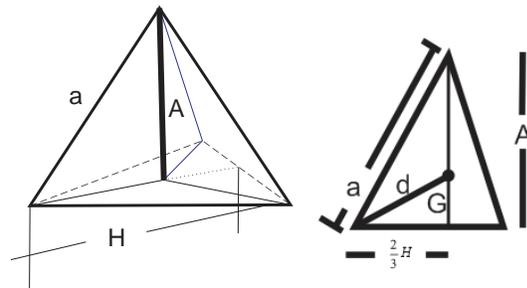


Figura 15.- Altura de un tetraedro regular.

Donde  $a$  es la distancia de cada una de las aristas,  $H$  es el apotema del triángulo de unas de las caras y  $A$  es la altura del tetraedro. Con estas consideraciones se pueden obtener las dimensiones de la separación de los micrófonos en cada una de las configuraciones.

### 2.1.1 Configuración *back-to-back*

En esta configuración los micrófonos tienen una dirección orientada desde el baricentro  $G$ , hacia los vértices del tetraedro formado por los centros acústicos de los micrófonos, Figura 16, considerando que el micrófono y sus conexiones eléctricas tienen una distancia aproximada de 6 cm, con esto se puede obtener la distancia mínima de separación que existe en esta configuración.

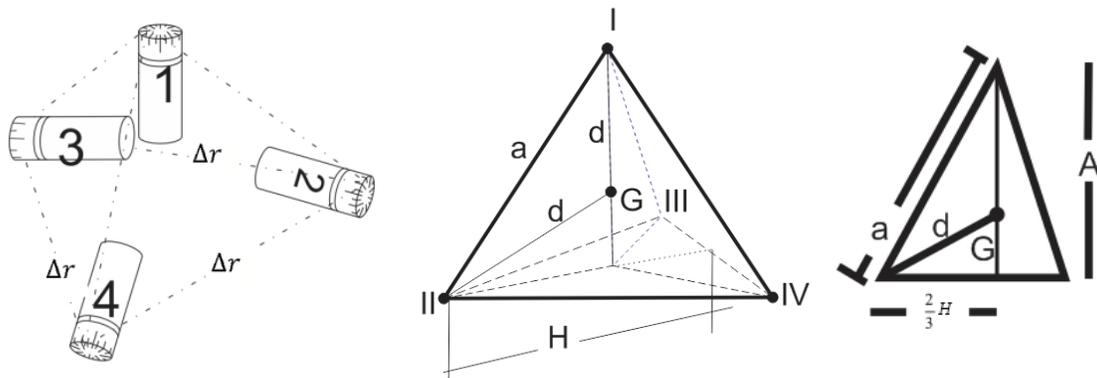


Figura 16.- Configuración tetraédrica *back-to-back*.

Para encontrar la distancia  $a$  se utiliza la ecuación 2.2, por lo que se requiere conocer la altura del tetraedro. Para conocer la altura se parte de la distancia que existe del baricentro  $G$  hacia el vértice superior, esta distancia  $GI$  es  $\frac{3}{4}$  de la altura  $A$  del tetraedro.

$$GI = \frac{3}{4} A \tag{2.3}$$

Sustituyendo la Ec. (2.3) en (2.2) se obtiene la Ec. (2.4) la cual se utilizara para calcular la distancia de separación entre los centros acústicos en una configuración *back-to-back* en distribución tetraédrica.

$$GI = \frac{\sqrt{6}}{4} a \quad \Rightarrow \quad a = \frac{4}{\sqrt{6}} GI \tag{2.4}$$

Sustituyendo valores  $GI = d = 6$  cm. La distancia de separación entre los centros acústicos es de 97.9 mm.

### 2.1.2 Configuración side-by-side y tándem

Debido a la distribución tetraédrica en una vista superior se puede considerar una distribución *side-to-side* y en una vista lateral se puede considerar una configuración *tandem* por lo que la separación entre los centros de micrófonos para ambas configuraciones se puede determinar utilizando la distancia que existe de uno de los vértices al baricentro ( $\frac{2}{3} H$ ) de uno de los triángulos formados por las caras del tetraedro, ver Figura 18.

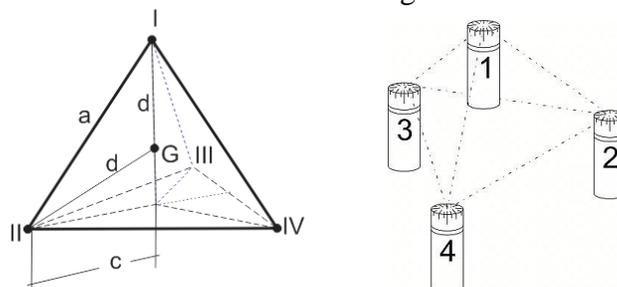
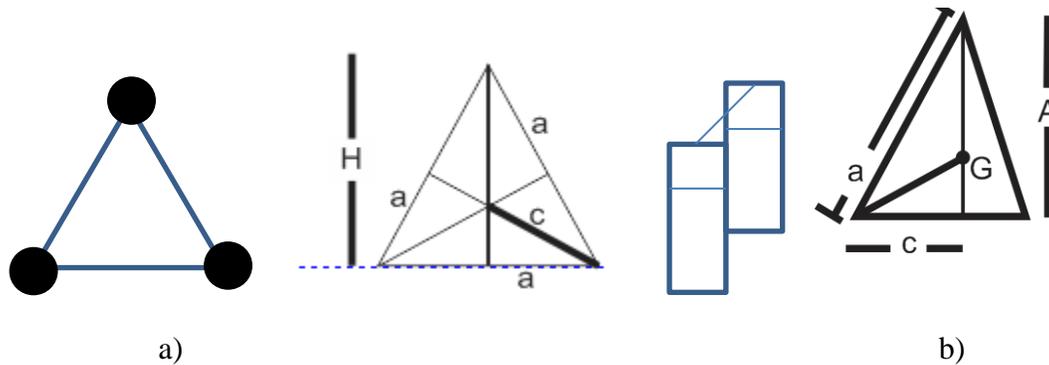


Figura 17.- Configuración tetraédrica *side-to-side*.Figura 18.- Configuración tetraédrica *side-by-side* y tándem.

Utilizando la ecuación  $H = \frac{\sqrt{3}}{2}a$  y sustituyendo el valor del diámetro  $c$  de los micrófonos o la distancia que existe de uno de los vértices al baricentro ( $2/3H$ ) se puede obtener la distancia de separación  $a$  que existen entre los centros acústicos que es de 15.57 mm.

### 2.1.3 Configuración *face-to-face*

En esta configuración los centros acústicos de los micrófonos están dirigidos hacia el orto-centro del tetraedro formando un nuevo tetraedro inscrito y uno tetraedro circunscrito mayor, donde la distancia de sus aristas están dadas por  $a_1 = \frac{2H}{\sqrt{3}}$  donde  $H$  es  $3R$  (tres veces el radio de los micrófonos), ver Figura 20.

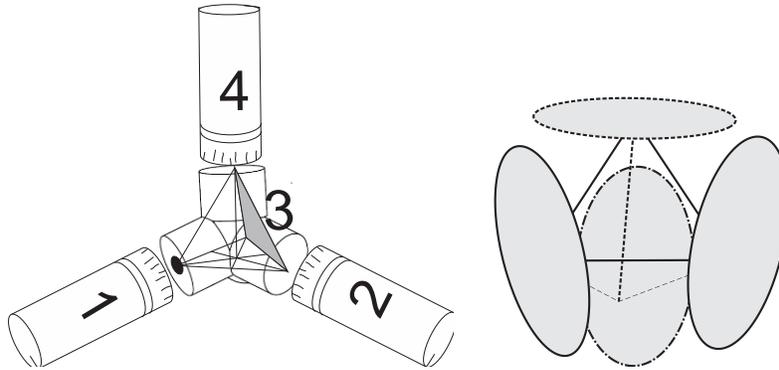


Figura 19.- Configuración tetraédrica *face-to-face*.

Por lo que la distancia de separación mínima entre los centros acústicos de los transductores en esta configuración se obtiene a partir la distancia de las aristas del tetraedro inscrito que se forma por las caras de los micrófonos, el cual se calcula de la siguiente manera:

La distancia  $a_2$  del tetraedro inscrito, Figura 20, se puede obtener de la distancia  $Gf$ , que es la distancia de uno de los vértices al orto-centro  $G$  de éste, la cual es el radio de la esfera inscrita en el tetraedro mayor formado por las caras de los micrófonos. Por lo que mediante el radio de los micrófonos  $R$  y con la ecuación (2.5) [17] y la Ec. (2.4) se obtiene que:

$$\begin{aligned}
 H &= 3R; & a_1 &= \frac{2H}{\sqrt{3}} \\
 a_1 &= \frac{6R}{\sqrt{3}} \\
 r = Gf &= \frac{a_1}{\sqrt{24}} & (2.5) \\
 a_2 &= \frac{4Gf}{\sqrt{6}}
 \end{aligned}$$

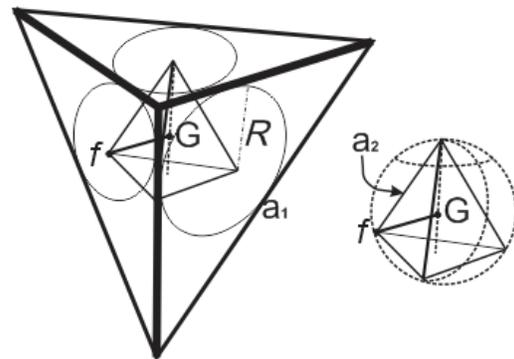


Figura 20.- Tetraedro inscrito.

Donde  $a_1$  y  $a_2$  son las distancias de las aristas del tetraedro mayor y menor,  $R$  es el radio de los micrófonos y  $r$  es el radio de la esfera inscrita en el tetraedro mayor.

Tomando en cuenta que el diámetro de los micrófonos es de 7 mm y añadiendo 2 mm para evitar contacto físico entre ellos, la distancia mínima de separación en esta configuración es de 6.35 mm. Considerando el tamaño de los micrófonos y los cables con conexiones se

obtiene la tabla 1 donde se muestra la distancia mínima de separación que pueden tener los centros acústicos de los micrófonos en cada una de las configuraciones, y el probable intervalo en frecuencia al que pudiera trabajar la sonda considerando un índice de presión-intensidad de 3 dB y un desfaseamiento de la cadena de medición (sonda y analizador) de 0.3°, ver figura 21 [Ref. 4 pág. 22].

Configuración	Distancia mínima de separación [mm]	Probable intervalo en frecuencia
<i>Face-to-face</i>	6.35	300 Hz a 10 kHz
<i>Side-to-side</i>	12.74	125 Hz a 5 kHz
<i>Back-to-back</i>	92	10 Hz a 1.25Hz
<i>Tandem</i>	12.74	125 Hz a 5kHz

Tabla 1.- Separación mínima entre micrófonos.

## 2.2 Diseño del separador

Tomando en cuenta la tabla 1 y la Figura 21, se observa que solo la combinación de dos separadores entre micrófonos, en una de las configuraciones cubren el intervalo de frecuencia de 100 Hz a 6.3 kHz con el cual se pretende trabajar, por lo que se utilizará la configuración *face-to-face* y mediante la Figura 21 se seleccionara el separador sólido de 8.5 mm y 12 mm, con el cual además de establecer el intervalo de frecuencia también ayudara a disminuir los problemas de difracción al momento de realizar mediciones.

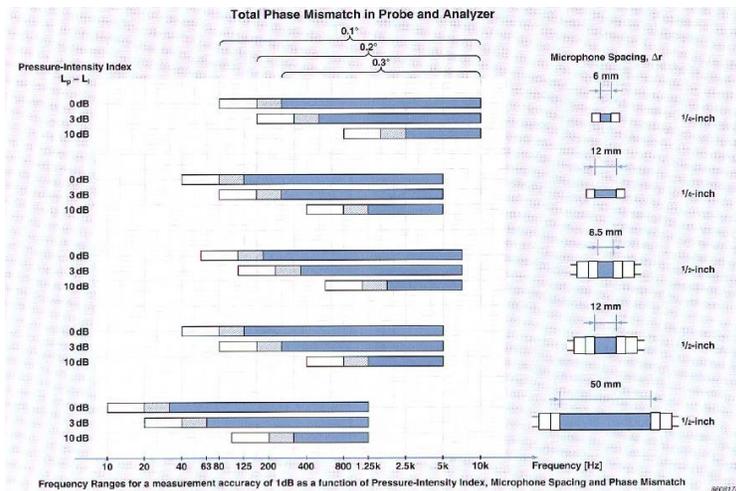


Figura 21.- Intervalos de frecuencia para una exactitud en la medición de 1 dB, como función del índice presión-intensidad, espaciamiento entre micrófonos y desfaseamiento, Imagen corregida p.22 [4].

El prototipo de sonda de intensidad acústica 3D presenta una configuración tetraédrica, donde la parte frontal de los micrófonos están orientados hacia el orto-centro del tetraedro formado por estos. Tomando en cuenta separadores de algunas sondas de intensidad en 1D y 3D donde los micrófonos tienen configuración *face-to-face* (

Figura 22) [3], [9], [18], se plantea el uso de un separador sólido para minimizar los errores de medición. Se observa que un separador ideal para esta configuración sería unir cilindros en una configuración tetraédrica para mantener la separación por medio de las caras de éste, Figura 23.

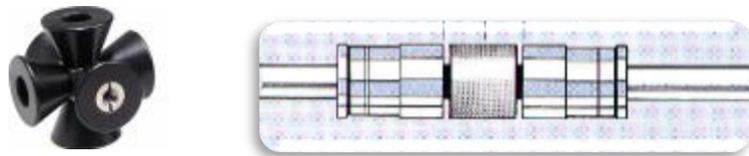


Figura 22.- Separadores sólidos para sondas de intensidad acústica en 1D y 3D con configuración *face-to-face*.

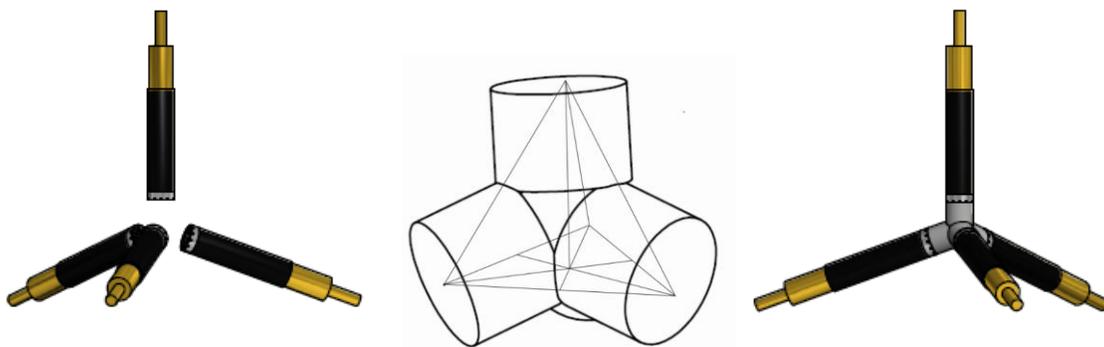


Figura 23.- Micrófonos en configuración tetraédrica con separador sólido en el centro.

Un elemento con esta geometría es complicado de manufacturar en un taller de maquinado convencional, debido a las dimensiones de cada cilindro y por la forma geométrica que tiene,

dificultando que sea una sola pieza o que se pudiera realizar un ensamble de varias piezas, ya que cada componente debería tener dimensiones pequeñas dificultando su manipulación. Una propuesta para el separador sólido se desarrolló en el taller mecánico de desarrollo de prototipos del CCADET, UNAM, comprobando que un dispositivo conformado por ensambles presenta características poco funcionales para mantener la misma distancia entre los vértices que forman cada cara del tetraedro ver Figura 24-b.

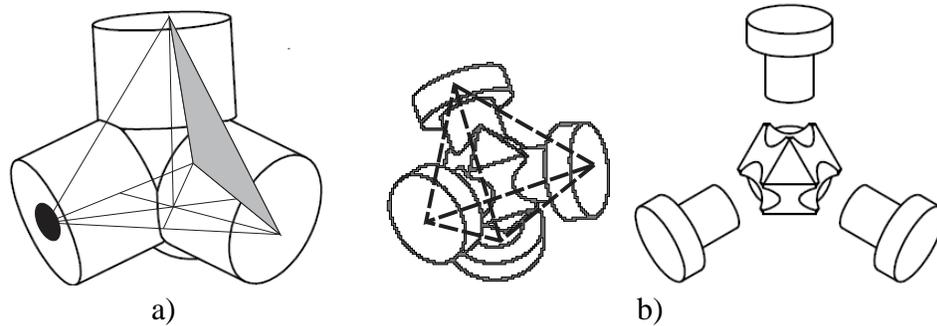


Figura 24.- a) Separador sólido con cilindros, b) Separador sólido mediante ensambles.

Los componentes necesarios para que exista una separación de 8.5 mm y 12 mm entre los centros acústicos de los micrófonos es difícil de manipular por sus dimensiones, ver Figura 24, [Anexo A-1]. Por lo que este dispositivo no cumpliría con el objetivo necesario.

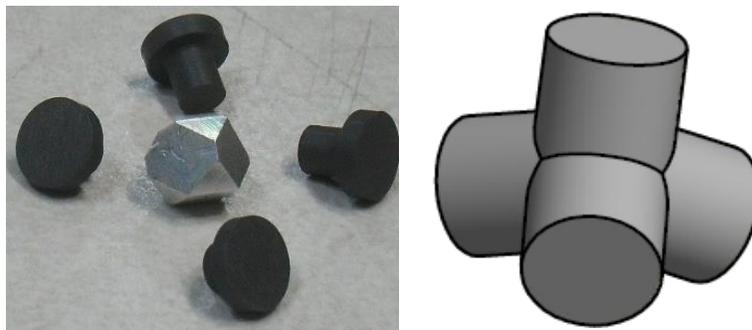


Figura 25.- Elementos del separador maquinado en el taller de desarrollo de prototipos del CCADET, UNAM.

Una de las características para que este dispositivo funcione, es que no debe ser conductor eléctrico y debe ser fabricado en una sola pieza, ya que para mantener la distancia de separación entre los centros acústicos de los micrófonos es necesario que tenga las mismas dimensiones entre cada superficie que se presente en los vértices del tetraedro inscrito en el separador y que mantenga la dirección hacia el orto-centro del tetraedro que se forma,

Tomando en cuenta estas características en el Anexo A-2, se muestra las dimensiones del dispositivo que se diseñó para ser fabricado en una sola pieza.

### 2.3 Diseño de la sonda y la estructura

Para el diseño de los elementos de la sonda de intensidad acústica y el mecanismo que soportara un arreglo de 4x4 sondas se debe considerar las dimensiones, ya que si no son lo suficientemente pequeñas (comparado con la longitud de onda incidente) se producirá un efecto de difracción [19], para disminuir este efecto se debe considerar que los elementos que formaran la estructura deben ser acústicamente transparentes a la longitud de onda mínima con la que se trabajara ( $\lambda_{\min}$ ), para lograr esto se debe utilizar la regla de  $\lambda/4$  donde el espesor de los elementos de la estructura no deben ser mayor a un cuarto de la longitud de onda mínima incidente ( $\lambda_{\min}/4$ ), [19] [20].

Considerando lo anterior el espesor máximo que pueden tener los elementos que conformen la sonda de intensidad acústica y la estructura que las soportara se deben estimar considerando la frecuencia máxima de trabajo, que para este caso será de 6.3 kHz.

Para obtener la longitud de onda correspondiente a la frecuencia establecida se utiliza la ecuación 2.6

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.6)$$

Siendo  $c$  la velocidad del sonido en metros y  $f$  la frecuencia de trabajo en Hz. Para obtener la velocidad del sonido se utiliza la ecuación:

$$C \cong 331.4 + 0.6 * t_c \quad (2.7)$$

Donde  $t_c$  es la temperatura en grados centígrados [21], para este caso se considera una temperatura de 23°C, siendo la velocidad del sonido de 345.3 m/s.

Utilizando estas ecuaciones se obtiene que la longitud de onda a esta frecuencia es de 5.48 cm y para que la estructura se considere transparentemente acústica ( $\lambda_{\min}/4$ ), el espesor de los elementos de la estructura no debe ser mayor a 1.37 cm. Con estas consideraciones se diseñó la estructura de los elementos que conformaran la sonda de intensidad acústica y la estructura que soportara estas sondas.

Para el diseño de la sonda de intensidad acústica 3D se tomó en cuenta también que la orientación de los micrófonos en la sonda puede tener varias configuraciones como se mencionó anteriormente. En la sonda propuesta se colocaran los micrófonos en una distribución tetraédrica orientándolos hacia el orto-centro del tetraedro que se forma por los

micrófonos, asemejando una configuración *face-to-face*. El tetraedro formado por los micrófonos también puede tomar más de una orientación, esta configuración presenta una dificultad para controlar la orientación y los centros acústicos de los transductores [22], por lo que se diseñaron elementos para soportar a los micrófonos en dos orientaciones posibles.

El primer diseño se compone de los elementos PAM\_01, PAM3D1\_01, PAM3D\_01 y PAM3D1\_02 con una orientación tetraédrica orientada de la base formada por el tetraedro hacia uno de los vértices superiores, en este diseño se requieren sujetar uno de los micrófonos en la parte superior, complicando la estabilidad, generando dimensiones que podrían afectar las mediciones provocando difracción y requiriendo de más componentes para su armado, ver Figura 26.

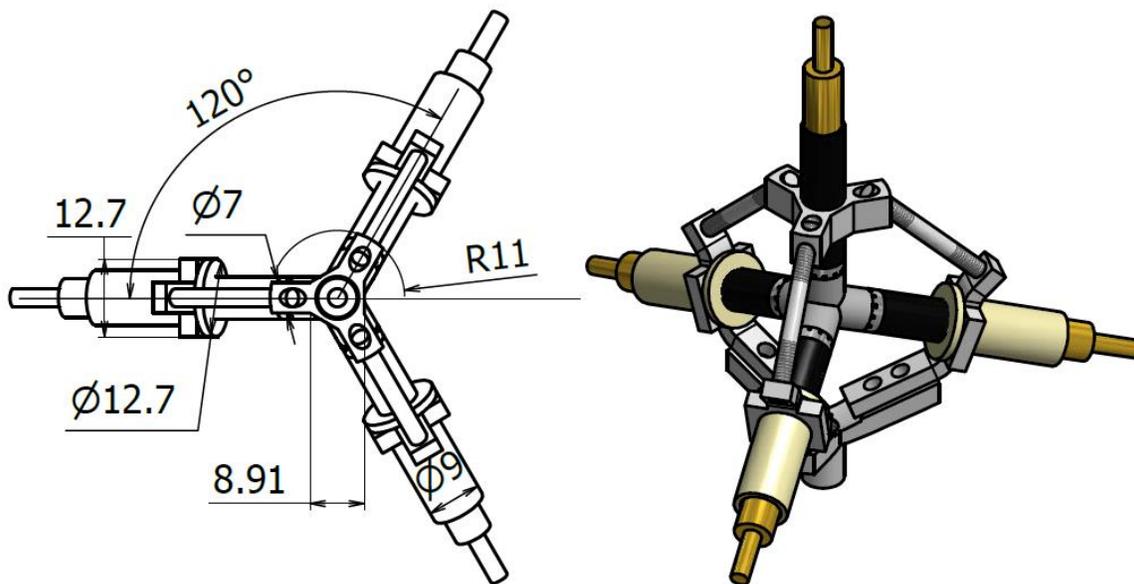


Figura 26.- Prototipos de sonda de intensidad acústica 3D de configuración tetraédrica orientada verticalmente, vista superior e isométrica.

En esta configuración se muestra como la distribución tetraédrica resulta difícil de manipular como lo menciona Rasmussen [22]. Por lo que se propone una nueva configuración en la que se retoma la orientación hacia el orto-centro. En esta configuración la orientación del tetraedro es invertida reduciendo el número de elementos para la sujeción, por lo que en la parte superior del tetraedro formado existen elementos de ensamble que pudieran generar difracción del campo sonoro, solo se encuentra el separador sólido y se utilizan menos

componentes para la formación de la sonda de intensidad acústica, reduciendo el peso de esta y el costo de manufactura y material [Anexo B].

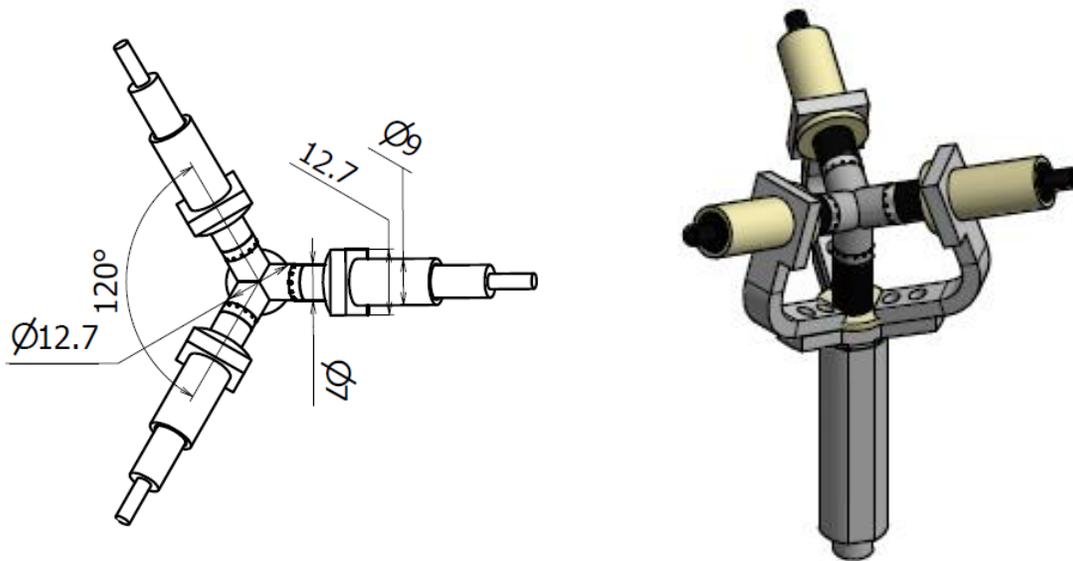


Figura 27.- Prototipo de sonda de intensidad acústica 3D 1 (PSIA) de configuración tetraédrica orientada invertida, vista superior e isométrica.

Los elementos de esta sonda de intensidad se manufacturaron en el taller mecánico de desarrollo de prototipos del CCADET, UNAM, este dispositivo se mostrarán en el Capítulo 3, con estos elementos construidos se comparó que el proceso de manufactura que consiste en el desbaste de material contra el proceso de impresión 3D. También se observó que la exactitud para direccionar los micrófonos hacia el orto-centro del tetraedro no era muy confiable debido a los métodos utilizados en su manufactura, por lo que se contempló el mismo método de fabricación utilizado para realizar el separador sólido, este método de impresión 3D es capaz de realizar elementos con geometrías más complejas permitiendo rediseñar el prototipo de sonda de intensidad acústica 3D. Para realizar la fabricación de los elementos que conformaran la nueva sonda, se realizaron cambios significativos en el diseño, ver Figura 28. Uno de los cambios sugeridos fue el realizar toda la estructura en una sola pieza para reducir tiempos y evitar problemas de ensamble. Sin embargo al realizar la cotización de un solo elemento con las dimensiones requeridas involucra una cantidad significativa de material a utilizar elevando los costos de fabricación, estos costos se elevaban mucho en comparación con la cotización de elementos que de forma separada utilicen menos material, por lo que se rediseñó la estructura para que pudiera ser conformada por dos elementos principales que son los que sostendrán a los transductores de presión, estos elementos y el separador sólido se muestran en la

Figura 28, señalados como PAM2\_02, PAM2\_3 y el separador sólido, [Anexo B-2], cabe mencionar que los elementos del Anexo B-2 son solo de referencia ya que el formato requerido para realizar la manufactura en la impresora 3D es en un archivo digital con extensión *stl*.

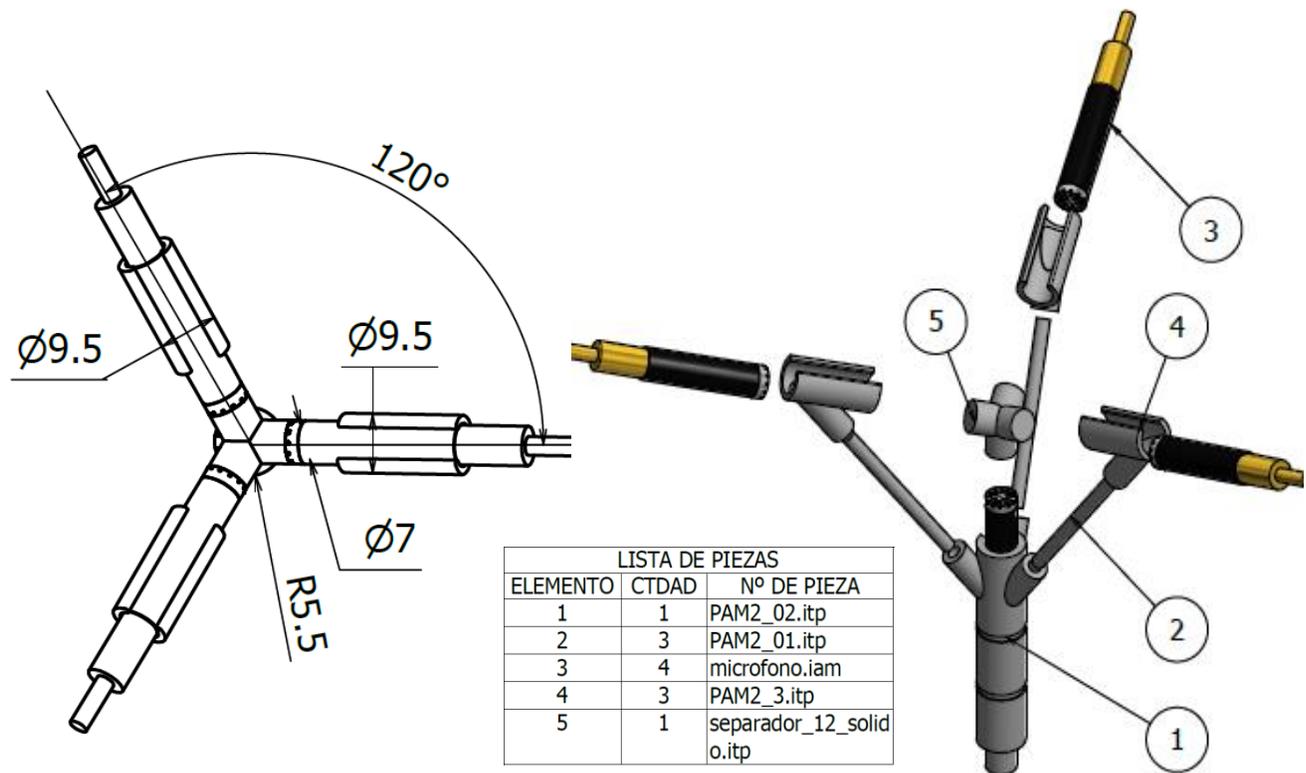


Figura 28.- Prototipo 2 (PSIAv), sonda de intensidad acústica 3D de configuración tetraédrica

La sonda de intensidad acústica 3D se diseñó con la ayuda del programa *Autodesk Inventor* el cual además de ser una herramienta de dibujo también cuenta con la característica de realizar simulaciones de esfuerzos mecánicos [23]. Para el diseño del prototipo de sonda de intensidad acústica se consideró a *Veroclear RGD810* como material para los elementos encargados de sujetar y posicionar a los micrófonos en dirección de los vértices al otro-centro

del tetraedro, este material simula al plástico convencional ya que presenta propiedades mecánicas como resistencia y límite de elasticidad similares a las del polipropileno o *Poly(methyl methacrylate)* (PMMA), además de ser rígido, no conductor eléctrico, y proporcionar estabilidad en dispositivos para propósitos generales, detalles finos y es capaz de ser transparente para tener visualización a través de él [24]. A la estructura que conforma la PSIAv se le realizó un análisis de esfuerzos estático en donde se muestra que los esfuerzos generados por los elementos que la conforman (cables, micrófonos y los elementos fabricados) no afectaran el dispositivo ni provocaran deformaciones. La simulación mediante el elemento de elemento finito se realizó considerando un empotramiento en la base de la sonda, simulando la posición en la que se encontrarán al conformar el arreglo de 4x4. Mediante esta simulación se comprobó que el peso aproximado de cada sonda es de 80 gr, y al considerar que la fuerza ejercida por el peso de los cables, los micrófonos, la misma estructura y un peso adicional se genera una fuerza perpendicular al eje de la sonda y se obtiene un factor de seguridad mayor a 3, generando desplazamientos de 0.020 mm sin provocar deformaciones que alteren su funcionamiento figura 29.

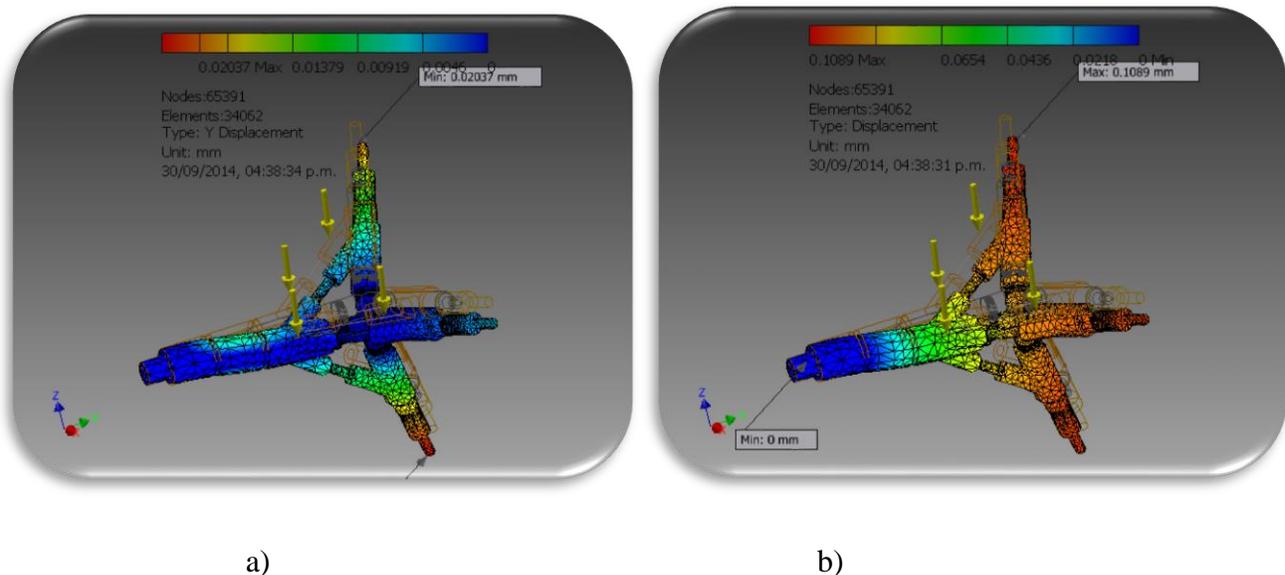


Figura 29.-Análisis de elementos finitos para la sonda de intensidad acústica

#### 2.4 Criterios para la estructura y el cambio de dimensiones.

La estructura de algunos arreglos de micrófonos es basada en materiales ligeros y rígidos de alto costo como la fibra de carbono, para conformar la estructura que soporte a los transductores que utilizan. Sin embargo estas estructuras son fijas, debido a que la estructura propuesta para soportar a las sondas de intensidad acústica en un arreglo de 4x4 contempla

que cambie sus dimensiones en un plano, se consideraron al aluminio 6061T4 para conformar los elementos que formaran una estructura y un mecanismo desplegable (mecanismo de barras articuladas). Al igual que la sonda de intensidad esta estructura debe ser acústicamente transparente hasta 6.3 kHz, obligando a que los espesores de sus elementos no excedan 1.37 cm,

Para diseñar un mecanismo que se va a transformar en estructura de barras articuladas, interesa llegar a diseños con un solo grado de libertad, esto debido a que son más controlables desde el punto de vista de funcionamiento ya que existe un movimiento posible obligado para todas las barras (es decir que se mueven a la vez), también desde el punto de vista de su transformación en estructura debido a que con un solo grado de libertad no hace falta controlar la existencia de mecanismos parciales [25].

En las estructuras desplegables es común que estén conformadas por barras dispuestas en “X” enlazadas formando cuadriláteros, sistema de tijeras o pantógrafo, el cual se basa en un nodo intermedio pivotante y otros dos ubicados en los extremos, estos puntos pivotantes tienen total grado de libertad entre dos barras en el eje perpendicular del plano [26], ver Figura 30. En la fase de movimiento (plegado- desplegado) tiene que ser un mecanismo que se mueva con todas las barras que lo hacen estructura.

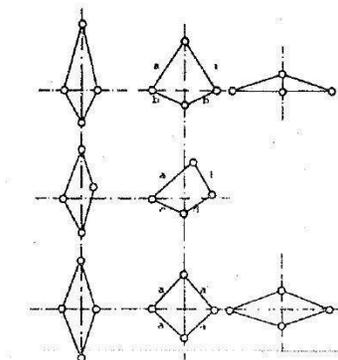


Figura 30.- Esquema de cuadriláteros formados por barras en estructuras desplegables [25].

La unidad móvil más pequeña de estos mecanismos está formada por el cuadrilátero resultante de unir dos “X”, Figura 31, con enlaces que en el plano imponen dos movimientos y permiten una libertad de giro o movilidad. En un mecanismo con un grado de libertad, se puede cuantificar su movilidad aplicando la expresión del criterio de movilidad en el plano [27]:

$$G = 3(L - 1) - 2J$$

Donde

$G$  = grados de libertad del mecanismo (o movilidad)

$L$  = Numero de barras

$J$  = Numero de enlaces entre barras (o juntas)

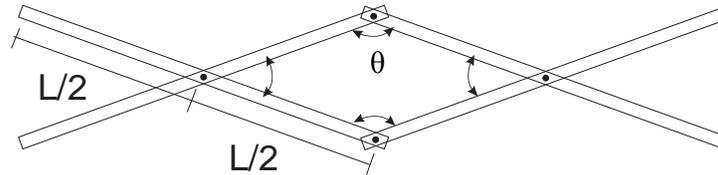


Figura 31.- Cuadrilátero formado por barras dispuestas en “X” también conocido como sistema de tijeras o pantógrafo.

La unidad móvil más simple es plana y está compuesta por cuatro barras y cuatro articulaciones, en cada enlace el movimiento es un giro (theta) y las coacciones son dos desplazamientos por lo que para un cuadrilátero o estructura base se tiene un grado de libertad de 1,  $G=1$ .

$$L = 4$$

$$J = 4$$

$$G = 3(L-1) - 2J \rightarrow G = 3(4-1) - 2(4)$$

$$G = 1$$

Con esto se puede observar que las unidades elementales móviles en una estructura desplegable son rombos (cuatro lados iguales), por lo que se pueden encadenar varios cuadriláteros para que el movimiento inicial de uno obligue a los demás a seguir este movimiento.

La conexión de varias unidades en el plano siguen siendo un mecanismo de un grado de libertad; es decir, solo hay un movimiento posible permitido, debido a que las barras forman parte de enlaces distintos y propagan la forma de movimiento en una. Si las piezas de varias cadenas en un plano se cruzan ortogonalmente, enlazadas en todos los nodos existentes, siempre se cruzan o terminan cuatro barras por nodo, conservando un solo grado de libertad, por lo que existe un movimiento obligado para todas las barras, Figura 32.

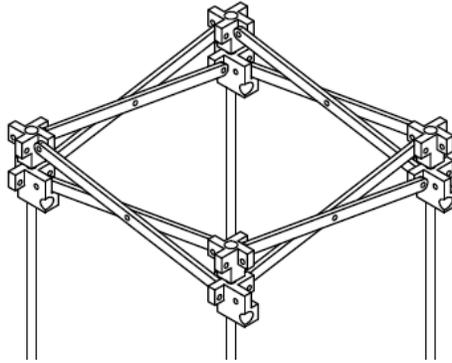
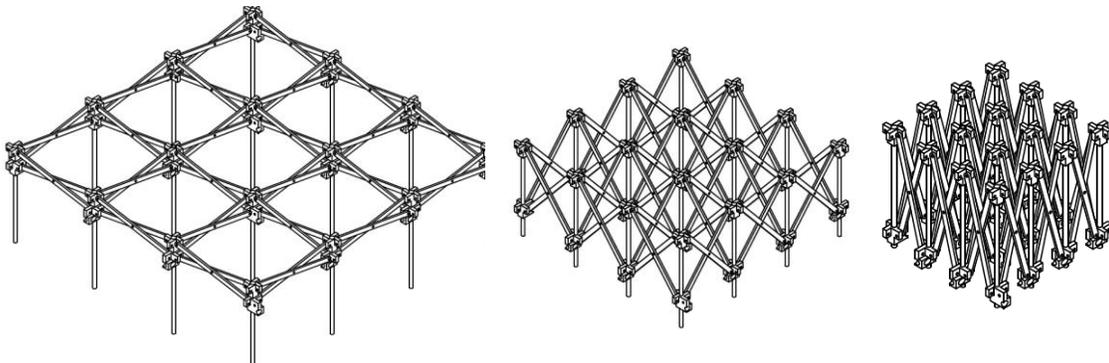


Figura 32.- Estructura base del mecanismo desplegable con un grado de libertad.

Con las consideraciones realizadas en esta configuración, el movimiento generado en un plano se proyecta a las direcciones que forman la estructura, haciendo posible que se pueda desplegar y cambiar las dimensiones mediante un movimiento en la estructura base, obligando a cambiar las dimensiones de todas las estructura que lo conforman y conservando un grado de libertad, Figura 33. Por lo que la estructura propuesta está conformada por barras y nodos, como se muestra en el Anexo C, Estos elementos están diseñados en aluminio 6061 T4, [28] [29]. Al igual que los elementos que conforma la sonda de intensidad acústica, los elementos de esta estructura también se diseñaron en el programa de dibujo mecánico *Autodesk inventor*, realizando los dibujos de los componentes del apéndice C, al ensamblar estos elementos se pudo comprobar mediante *Drive Constraint (simulación de movimiento)* que no existen riesgo de colisión y que el mecanismo se despliega y plegara correctamente trabajando bajo el movimiento único obligado de despliegue , Figura 33.



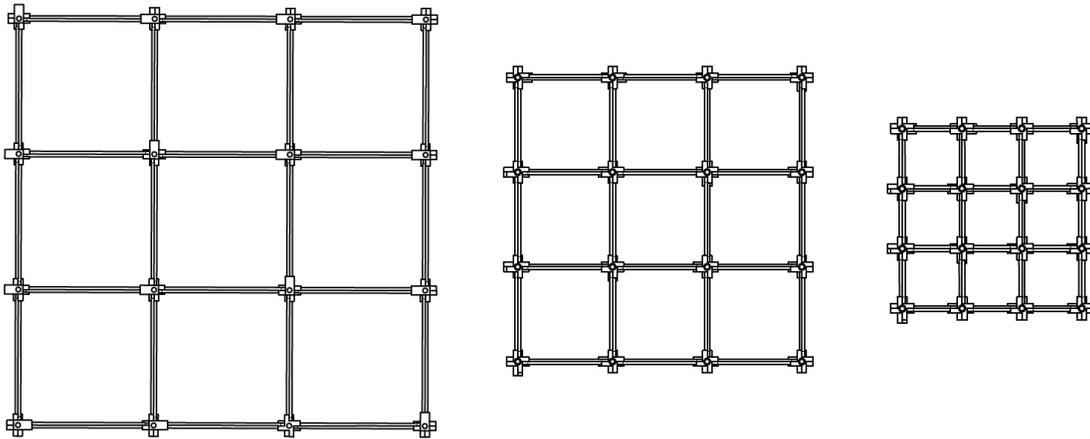


Figura 33.- Mecanismo con separación entre nodos de 15 cm, 10 cm y 5 cm

La simulación de movimientos de la estructura realizada con *Autodesk Inventor* solo comprueba que los movimientos obligados son los correctos, además de comprobar que no existen colisiones entre barras o nodos. Por lo que el análisis de esfuerzos mecánicos basado en el método de elemento finito comprueba que los esfuerzos generados por el peso del material, el peso de las sondas y el peso adicional de los micrófonos y cables considerando un factor de seguridad de 4, arroja los datos de desplazamiento como se muestra en la tabla 2. Las tensiones que se generan son pequeñas por lo que los desplazamientos también lo son, creando un elemento que funcionara como mecanismo y como estructura.

Desplazamiento	Min	Max
Desplazamiento X	0.00401791 mm	0.00337581 mm
Desplazamiento Y	0.00150136 mm	0.000772659 mm
Desplazamiento Z	0.00149843 mm	0.00160916 mm

Tabla 2.- Deformaciones mínimas y máximas en los ejes de la estructura

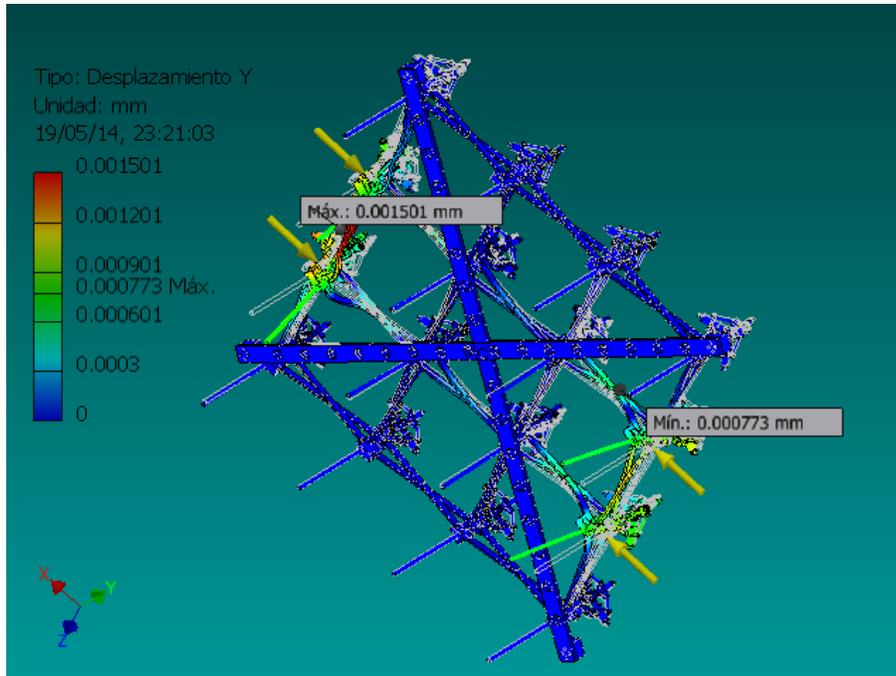


Figura 34.- Simulación de esfuerzos en el plano xz realizada con el software Autodesk Inventor.

Todos los elementos que conforman las sondas de intensidad acústica y el mecanismo desplegable se diseñaron de tal forma que cumplieran con una transparencia acústica de hasta 6.3 kHz, utilizando la regla de  $\lambda/4$  [19] [20], con esto se garantiza que en el momento que la estructura presente una separación entre nodos de 5 cm continúe siendo transparente acústicamente, esto se muestra en la figura 35, donde se observa que en una vista superior y en la separación mínima aún se puede considerar acústicamente transparente

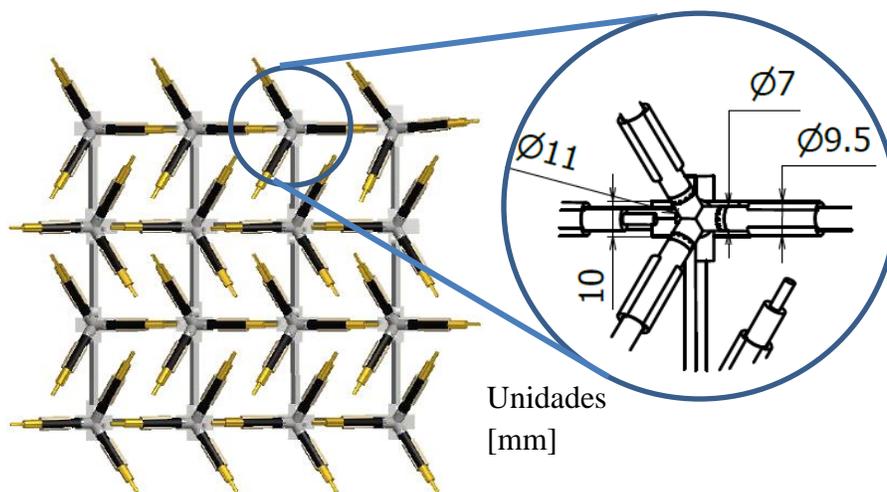


Figura 35.-Vista frontal de con separacion de 5cm entre centros acusticos de las sondas de intensidad acustica 3D y separador sólido de 12 mm, Anexo A.

## **2.5 Instrumentación**

Las mediciones que se realizaran con las sondas de intensidad acústica PSIAv se ejecutaran dentro de un recinto acondicionado acústicamente con paneles de absorción *Sonex*, en las instalaciones del Centro Nacional de Metrología CENAM, implementando los siguientes dispositivos:

- 1 Sistema de adquisición y procesamiento de datos PULSE.
- 1 Fuente Q monopólica de banda ancha, desarrollada en el CENAM
- 1 Amplificador de potencia marca B&K, modelo 2706.
- 64 Micrófonos de precisión tipo Array, marca B&K, modelo 4958.
- 1 Estructura para soportar los micrófonos en una distribución tetraédrica
- 1 Sonda de intensidad en 1D marca, B&k
- 1 Termómetro
- 1 Barómetro

### **2.5.1 Sistema de adquisición**

Para la adquisición de datos, se utilizará el software llamado PULSE, el cual es propiedad de la Dirección de Vibraciones y acústica del Centro Nacional de Metrología (DVA- CENAM). Este sistema es capaz de mostrar en tiempo real el monitoreo de las señales captadas y realiza procesamiento de estas señales. Este sistema como parte del hardware del PULSE, cuenta con varios módulos de entradas y salidas el módulo a utilizar es un módulo B&K tipo 3160-A042 que cuenta con 4 canales de entrada y 2 canales de salida generadoras de señales, entre otros aditamentos que se pueden consultar en la página del fabricante B&K [30]. Además de utilizar un amplificador de potencia B&K modelo 2706, con una rango de respuesta de 10Hz a 20 kHz.



Figura 36.-Sistema de adquisición y software PULSE.

### 2.5.2 Micrófono tipo Array B&K

La sonda de intensidad acústica 3D desarrollada en este trabajo utiliza 4 transductores de presión los cuales son propiedad del CENAM, cada micrófono está sujeto por el elemento PAM2\_03 [Anexo B-2], orientado hacia el orto-centro del tetraedro formado por los mismos micrófonos. Los transductores son micrófonos de precisión B&K tipo Array (*Precision Array Microphone Type 4958*), con una sensibilidad de  $11.2 \text{ mV/pa}$  ( $-39\text{dB re } 1\text{V/Pa}$ ), los cuales trabajan en un rango de frecuencia de 10Hz a 20 kHz. Cada micrófono tiene dimensiones de 34mm de longitud, 7 mm de diámetro [31].

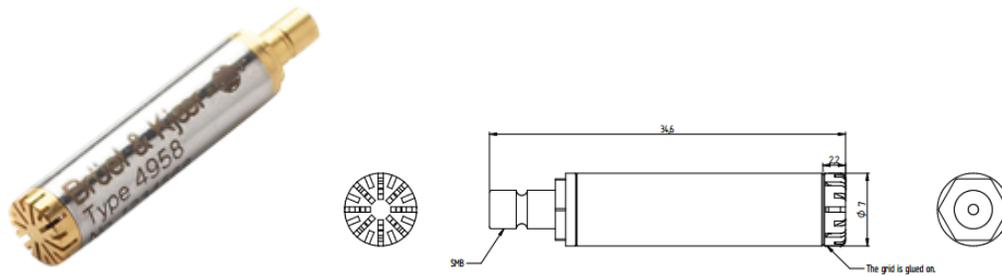


Figura 37.- Micrófono de precisión tipo Array-4958 B&K

---

---

# Capítulo III

## Resultados

El método de impresión *polyjet* 3D emplea una impresora *objet connex 500* la cual presenta un importante método de manufactura patentado por *Stratasys*, esta tecnología crea capas de 16  $\mu\text{m}$  en paredes y geometrías complejas, soportando una gran cantidad de materiales con diferentes características y propiedades mecánicas. Capaz de utilizar múltiples materiales simultáneamente en un modelo o elemento [32]. El material utilizado fue *Veroclear RGD810* el cual es un material que simula al plástico convencional parecido al polipropileno o *Poly(methyl methacrylate)* (PMMA), este material es rígido transparente u opaco, y proporciona estabilidad en dispositivos para propósitos generales, detalles finos y es capaz de ser transparente para tener visualización a través de él [24].

Las piezas que conforman la estructura de la sonda de intensidad acústica 3D (PSIAI y PSIAv) fueron manufacturadas en el taller de desarrollo de prototipos del CCADET, UNAM, mediante un proceso de desbaste en el taller mecánico se construyó la PSIAI y con un proceso de impresión 3D empleando tecnología *polyjet* [32] se realizaron los elementos PAM2\_01, PAM2\_03 y Sc\_PAM\_12.

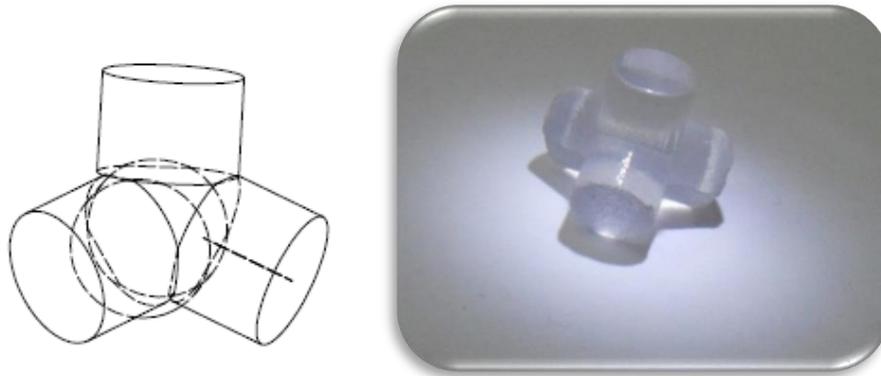


Figura 38.- Separador sólido tetraédrico (Sc\_PAM\_12) fabricado con *Veroclear RGD810*.

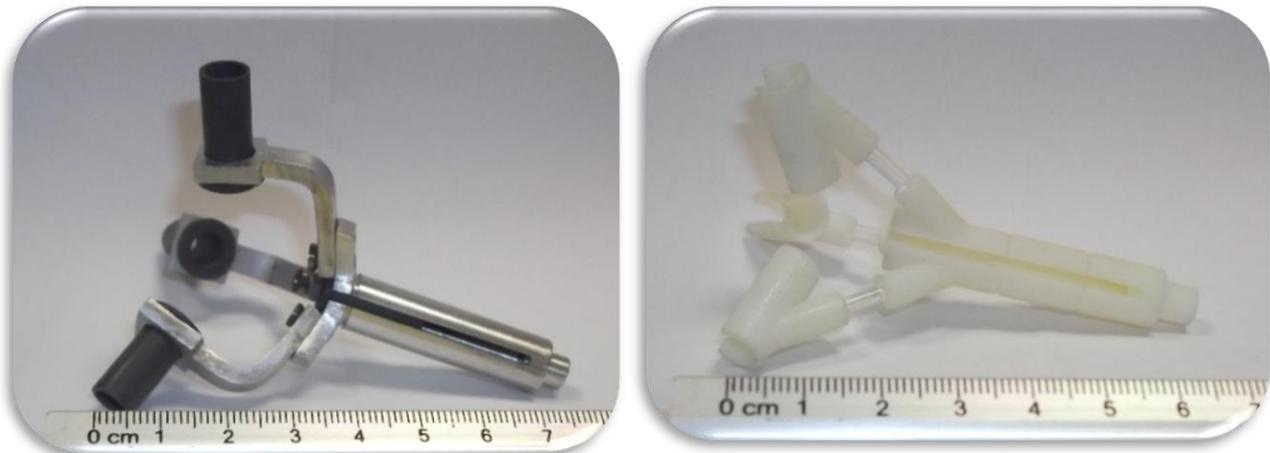


Figura 39.- Elementos fabricados con tecnología *Veroclear* en el taller mecánico de desarrollo de prototipos del CCADET, UNAM

### 3.1 Montaje

Con los elementos que conforma la sonda de intensidad construida se realizó el montaje de las sodas para comprobar su funcionamiento y cualquier defecto mecánico o de ensamble. El armado de la sonda se realizó dentro de un recinto acondicionado acústicamente con paneles de absorción *Sonex* en del laboratorio primario de acústica de la DVA del CENAM que cuenta con un volumen de  $28.8 \text{ m}^3$ , distribuidos en 3 m de largo x 4 m de ancho x 2.4 m de altura, colocando la sonda en el centro de la cámara junto con una fuente monopólica de banda ancha, cabe mencionar que para colocar los micrófonos en dispositivo fabricado y que no exista peligro de fractura en los elementos que soportaran a los micrófonos es necesario deslizarlo de un extremo al otro o viceversa a lo largo del eje del cilindro que lo sostendra.

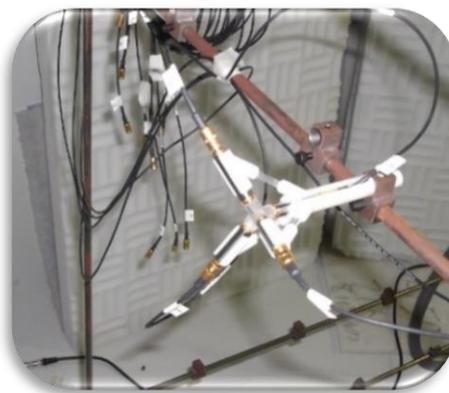


Figura 40 FIGURA.- Sonda de intensidad acústica conformada por 4 Micrófonos de precisión tipo *Array-4958 B&K*, distanciados mediante un separador sólido de 12mm de configuración tetraédrica.

Como se mencionó anteriormente, se verificó que el armado mecánico de la sonda de intensidad acústica fuera correcto, verificando que los micrófonos se mantenían en una posición fija y que no presentaba desplazamientos, y que los elementos ensamblaran sin problemas, a este proceso también se incluyó la verificación del equipo medición junto con el elemento mecánico, el equipo de adquisición de datos llamado PULSE. Este sistema es capaz de mostrar en tiempo real el monitoreo de las señales captadas y realiza procesamiento de estas señales.

La distribución del equipo dentro de recinto y el montaje en cuanto a las dimensiones geométricas, se muestran en la Figura 41.

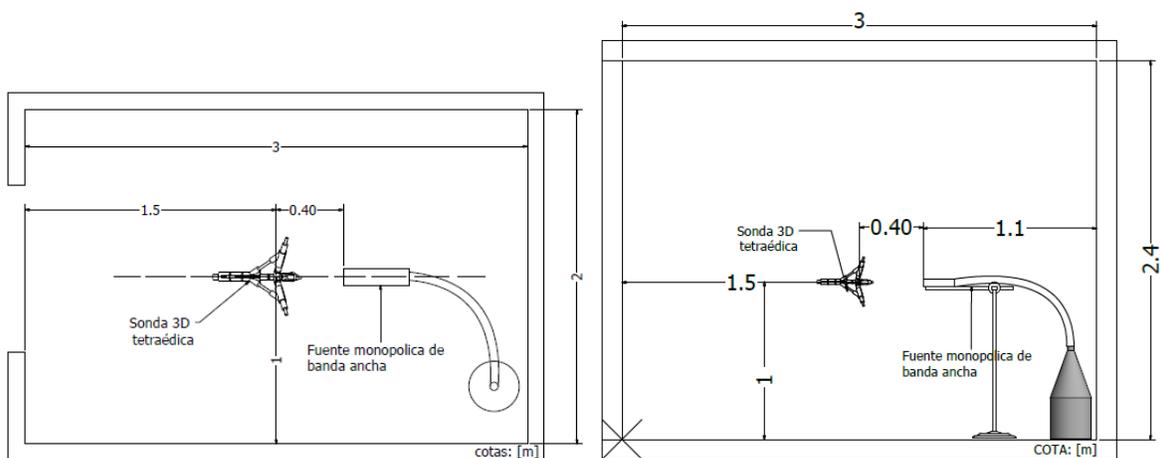


Figura 41.- Ubicación espacial dentro de la cámara acústicamente acondicionada del laboratorio primario de acústica, a) vista superior, b) vista lateral.

### 3.4 Mediciones realizadas

Para iniciar con el proceso de mediciones se realizó la configuración del sistema de adquisición, este sistema involucra el software PULSE, en el cual se realizó un proyecto interno en el que se incluyeron 4 señales de entrada correspondientes a las señales captadas por los 4 transductores, configurando cada señal captada por los micrófonos como CPB (*Constant Percentage Bandwidth*) para establecer un análisis en tercios de octavas. Con este software y el módulo B&K tipo 3160-A042, se generaron tonos y ruido en un intervalo en frecuencia de 500 Hz a 6.3 kHz, la señal generada se acoplo a un amplificador de potencia para ser reproducida por la fuente monopólica de banda ancha desarrollada en el CENAM, ver Figura 41 y 42.

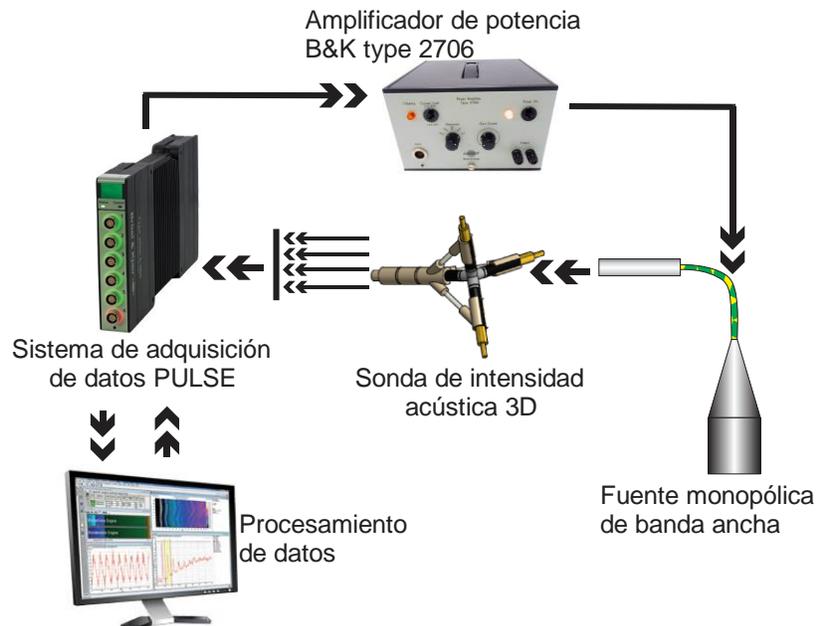


Figura 42.- Diagrama de flujo de la interfaz del sistema de adquisición y el software que contempla el PULSE.

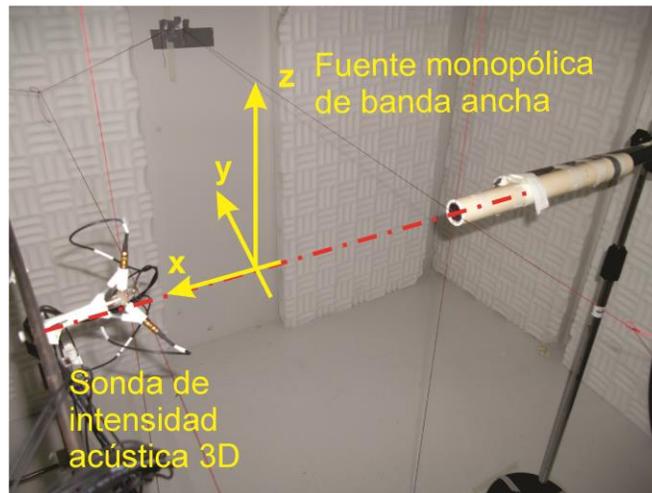


Figura 43.- Medición de una fuente monopólica de banda ancha desarrollada en el CENAM.

Con la sonda ubicada a 40 cm de la fuente monopólica se realizaron mediciones directas de los espectros cruzados: G14, G24, G34, G31, G23 y G31. Tomando la parte imaginaria de cada medición para realizar el cálculo de intensidad acústica en los tres ejes mediante dos métodos uno es el desarrollado por Suzuki el cual se basa en la descomposición de los vectores de velocidad de partícula en dirección de los vértices al orto-centro del tetraedro

para obtener los componentes de intensidad acústica correspondientes a los ejes  $x$ ,  $y$  y  $z$  [Apéndice A]. El otro método que se propone para el cálculo de intensidad se basa en la descomposición directa de los vectores de intensidad acústica de las aristas del tetraedro obteniendo los componentes de intensidad en las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$ .

La ubicación de los canales de medición de los micrófonos en la sonda de intensidad se realizó considerando la configuración del método propuesto ver Figura 44.

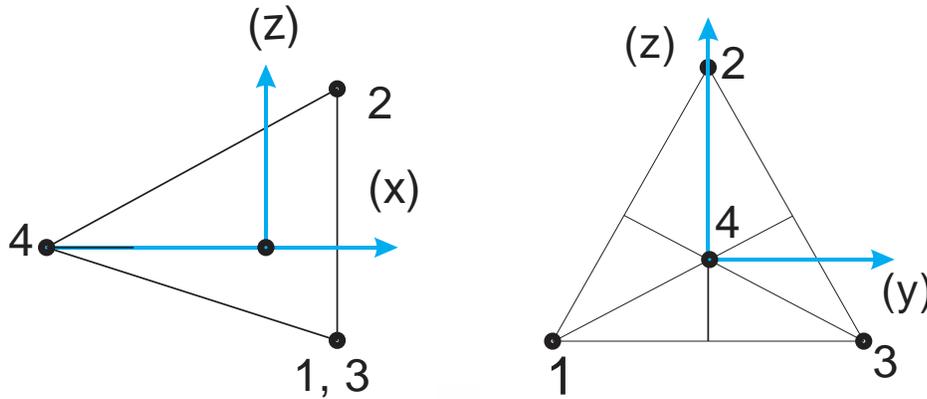


Figura 44.- Ubicación de los micrófonos en la sonda de intensidad.

Utilizando las ecuaciones A7, A8 y A9 y la equivalencia entre las direcciones de los espectros utilizados del método desarrollado por Suzuki y la configuración de la Figura 44, (ver tabla 2) se obtuvo la intensidad acústica en los ejes  $x$ ,  $y$  y  $z$  obteniendo:

$$I_x = -\frac{3}{\omega \rho d} \frac{\sqrt{2}}{6\sqrt{3}} \text{Im}(-G_{34} - G_{24} - G_{14}) \quad (3.1)$$

$$I_y = -\frac{3}{\omega \rho d} \frac{1}{12} \text{Im}(G_{34} - G_{24} - 2G_{23} + G_{12} - G_{13}) \quad (3.2)$$

$$I_z = -\frac{3}{\omega \rho d} \frac{\sqrt{3}}{36} \text{Im}(G_{34} - G_{24} - 2G_{14} - 3G_{12} - 3G_{13}) \quad (3.3)$$

Espectro cruzado utilizado por Suzuki	Espectro cruzado medido en la sonda tetraédrica
G43	-G41
G24	-G43
G14	-G42
G12	-G32
G13	-G12
G23	-G13

Tabla 1- Equivalencia entre espectros medidos y los necesarios para utilizar el método de Suzuki.

También se evaluó la intensidad acústica mediante el método propuesto basado en la descomposición de los vectores de intensidad acústica de las aristas del tetraedro en las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$ , empleando ecuaciones que reducen el número de variables a utilizar, mediante la parte imaginaria de los espectros cruzados  $G_{41}$ ,  $G_{42}$  y  $G_{43}$  [Apéndice C]. Con este método se obtuvieron las siguientes ecuaciones para calcular los correspondientes componentes de intensidad acústica en las tres direcciones.

$$I_x(\omega) = -\frac{1}{\sqrt{6}} \frac{1}{\omega \rho_0 d} \text{Im}(G_{41} + G_{42} + G_{43}) \quad (\text{B7})$$

$$I_y(\omega) = \frac{1}{\omega \rho_0 d} \text{Im}(G_{43} - G_{41}) \quad (\text{B8})$$

$$I_z(\omega) = \frac{1}{\sqrt{3}} \text{Im}(2G_{42} - G_{41} - G_{43}) \quad (\text{B9})$$

Adicional a estos dos métodos se empleó una sonda de intensidad acústica uniaxial de marca *B&K*, la cual se utilizó de referencia para comprobar el funcionamiento de la sonda de intensidad acústica tetraédrica en las tres direcciones, el centro acústico de esta sonda se colocó aproximadamente al mismo punto que comprende al centro acústico de la sonda tetraédrica desarrollada, realizando mediciones de intensidad en cada una de las direcciones cambiando la orientación de la sonda en cada uno de los ejes para obtener la intensidad en las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$ , ver figura 45.

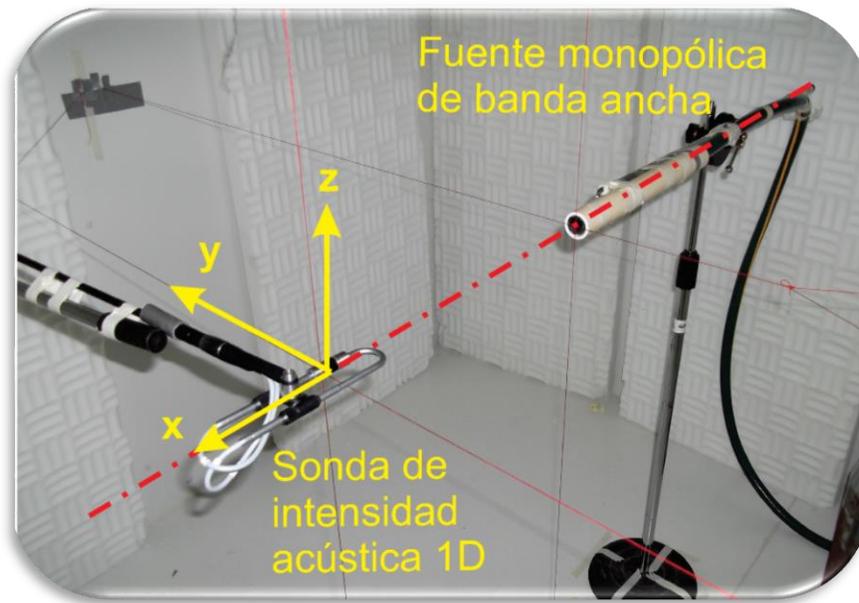


Figura 45.-Medición de una fuente monopólica de banda ancha desarrollada en el CENAM mediante una sonda de intensidad acústica uniaxial *B&K*.

Mediante la sonda de configuración tetraédrica se evaluaron dos métodos el desarrollado por Suzuki y el método propuesto ambos para realizar el mediciones de intensidad acústica generado por una fuente monopólica de banda ancha, esta sonda es capaz de realizar la medición en los tres ejes de referencia, por lo que para comprobar el correcto funcionamiento se compararon estos resultados con los datos obtenidos mediante la sonda de intensidad acústica uniaxial.

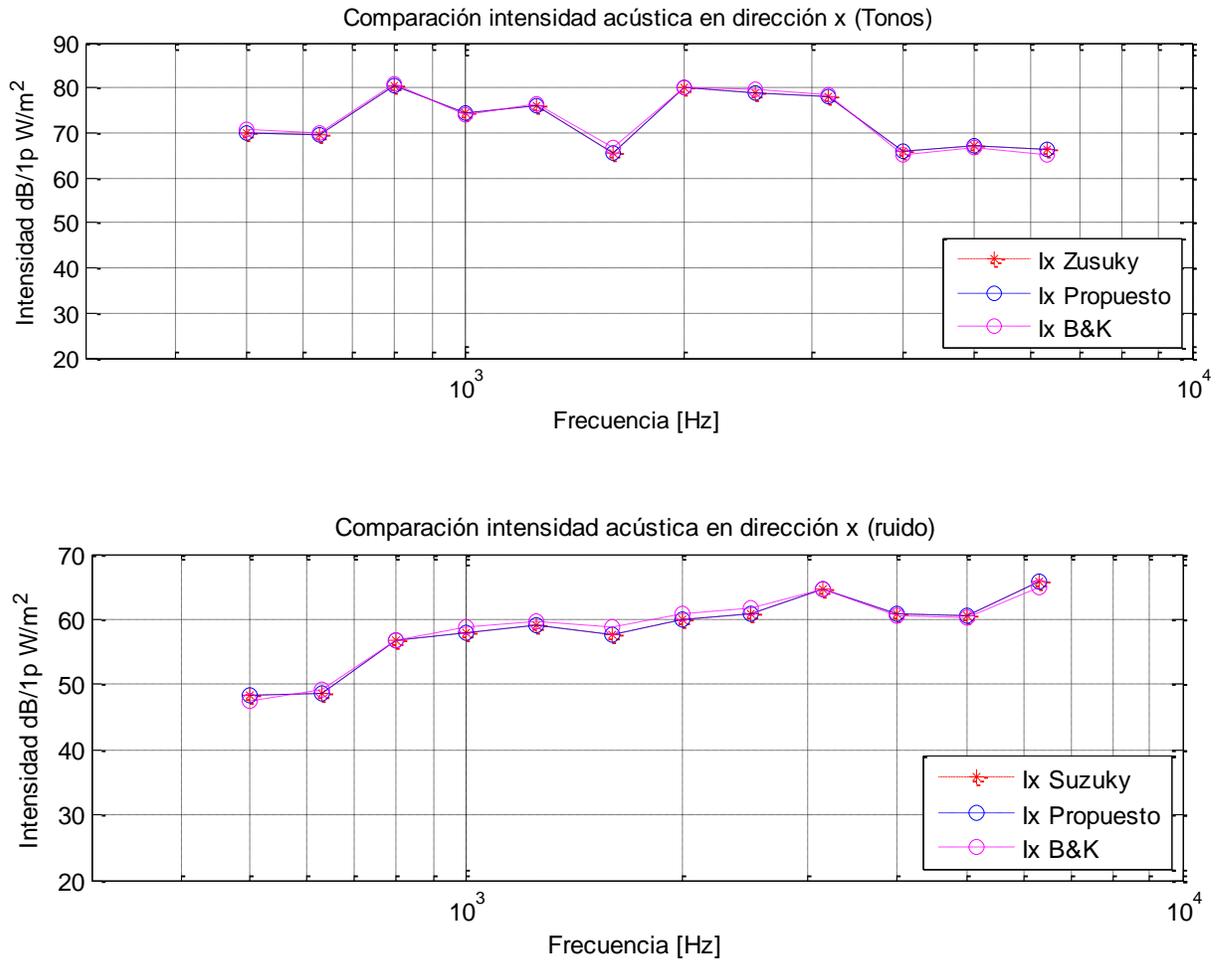


Figura 46.- Cálculo y comparación de la intensidad acústica medida mediante el barrido en tercios de octava medida mediante los métodos desarrollados en la dirección x. --\*-- método desarrollado por Suzuki, --o-- método propuesto y --o-- sonda de intensidad acústica uniaxial B&K.

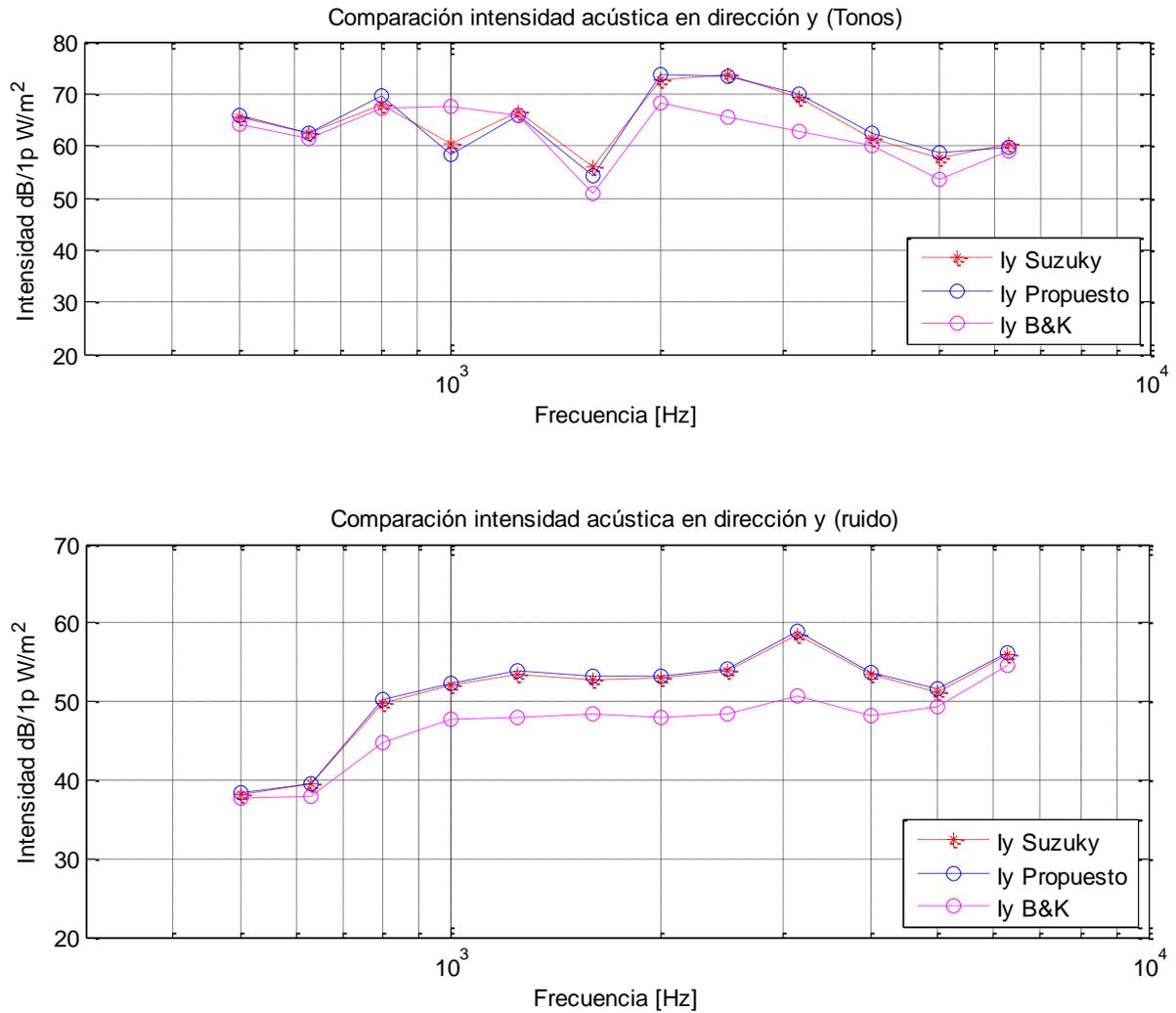


Figura 47.- Cálculo y comparación de la intensidad acústica medida mediante el barrido en tercios de octava medida mediante los métodos desarrollados en la dirección x. --\*-- método desarrollado por Suzuki, --o-- método propuesto y --o-- sonda de intensidad acústica uniaxial B&K.

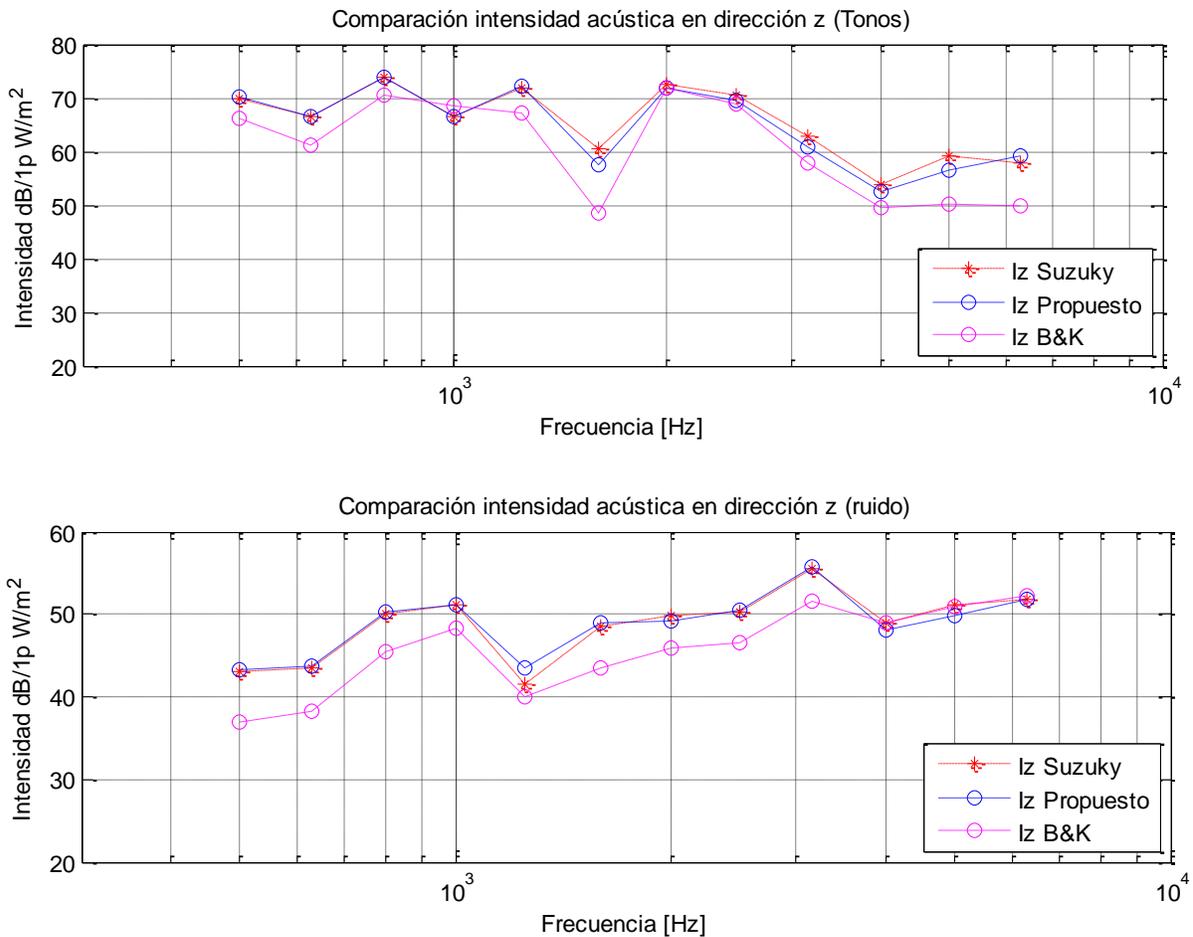


Figura 48.- Cálculo y comparación de la intensidad acústica medida mediante el barrido en tercios de octava medida mediante los métodos desarrollados en la dirección x. ---\*--- método desarrollado por Suzuki, --o-- método propuesto y --o-- sonda de intensidad acústica uniaxial B&K.

Las gráficas mostradas en las Figuras 46, 47 y 48, son los resultados obtenidos de las mediciones realizadas con la sonda de intensidad acústica desarrollada y la sonda de intensidad acústica uniaxial *B&K*, todas las mediciones se realizaron considerando condiciones ambientales de 21.6° Celsius, 46.8% humedad relativa y presión atmosférica de 811 hPa. El recinto donde fueron realizadas las mediciones se acondiciono con paneles

absorbentes Sonex, para disminuir reflexiones del recinto. La figura 49 muestra el ruido de fondo promedio medido en el recinto.

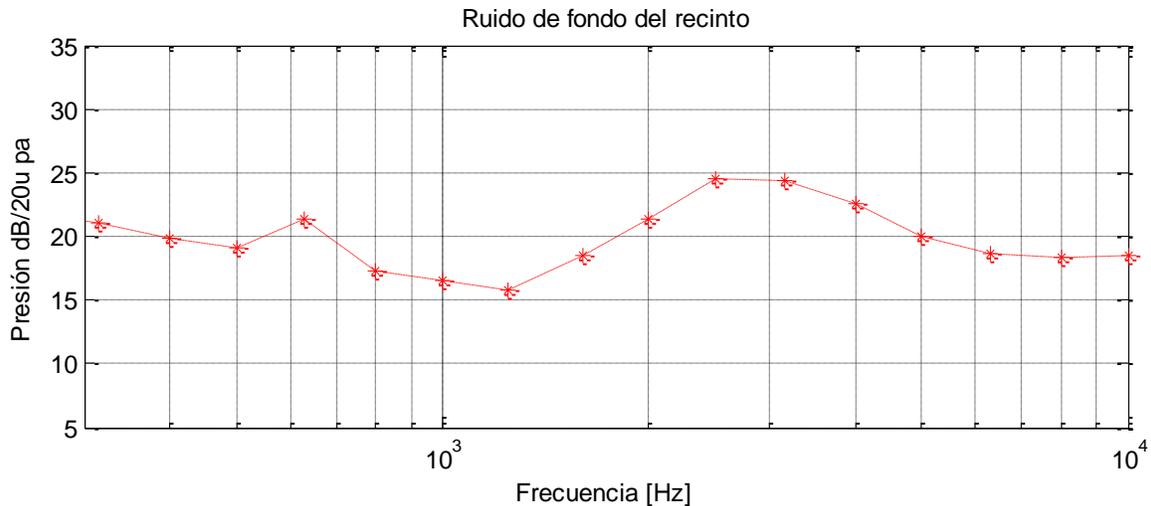


Figura 49.- Ruido de fondo promedio medido en el recinto acústicamente acondicionado con paneles Sonex.

El centro de ambas sondas de intensidad se colocó aproximadamente en el mismo punto espacial, de manera que las mediciones se realizaran bajo las mismas condiciones. Estas mediciones se realizaron mediante un barrido en frecuencias de tercios de octavas desde 500 Hz hasta 6.3 kHz, y mediante ruido generado con un ancho de banda de 62.5 kHz. Estos resultados presentan desviación estándar máxima en cada medición de intensidad acústica 0.7 dB, 1.1 dB y 1.3 dB en los componentes  $x$ ,  $y$  y  $z$  respectivamente para la sonda de intensidad desarrollada y de 0.6 dB, 0.6 dB y 1.4 dB para la sonda de intensidad acústica uniaxial B&K en los ejes  $x$ ,  $y$  y  $z$ .

En el eje  $x$  es donde se espera obtener una mayor componente de intensidad esto debido a que la fuente se encuentra orientada en esta dirección, observando como los resultados obtenidos de ambas sondas y ambos métodos mediante tonos y ruido, coinciden con el valor de intensidad acústica con un error absoluto máximo entre los datos obtenidos por la sonda uniaxial y la sonda tetraédrica de 1.2 dB.

En la dirección  $y$  y  $z$  a en tonos se obtiene un error absoluto máximo de 7.8 dB y 9.5 dB respectivamente, en estas direcciones considerando una fuente de ruido se obtuvieron valores de errores absolutos máximos de 7.5dB y 5.9dB, los valores resultantes en estas direcciones pueden ser influidos por el recinto propio ya que no se encuentra totalmente acondicionado para realizar mediciones de este tipo, también podría afectar el tiempo de promediación. Con estos resultados se observa que se tiene que seguir trabajando en los componentes  $y$  y  $z$  para

caracterizar por completo la sonda tetraédrica desarrollada, realizando más mediciones de la fuente monopólica en diferentes posiciones, la discrepancia entre algunas mediciones se debe al recinto o al método empleado para el cálculo de intensidad acústica. Con estos resultados y mediante la norma ISO 9614 se obtuvieron los índices de capacidad dinámica y los índices de presión residual para así obtener el grado de precisión de cada sonda, contemplando un factor de error (k) de 10 dB.

### **Conclusiones y trabajo futuro**

Mediante las diferentes configuraciones que existen para arreglos de micrófonos se diseñó un arreglo basado en una estructura desplegable, capaz de cambiar la distancia de separación entre nodos en un arreglo de 4x4, estos nodos coincidirán a su vez con el centro acústico de 16 sondas de intensidad acústica 3D, las cuales se diseñaron en base a las diferentes configuraciones que existen en separación de micrófonos para sondas de intensidad acústica, seleccionando la configuración *face-to-face*, ya que esta configuración es la que mejor se adapta para cubrir un intervalo de frecuencia de 100 Hz a 6.3 kHz, esta sonda no solo depende de la orientación de los micrófonos sino también de separadores sólidos los cuales además de mantener la distancia entre ellos constante ayuda a minimizar los errores de medición debidas a la difracción, por lo que se diseñaron dos separadores sólidos de 12 mm y 8.5 mm.

Estas sondas y los separadores sólidos han sido construidos con ayuda del taller mecánico de desarrollo de prototipos del CCADET, UNAM. Los elementos mecánicos de la estructura que soportara a las sondas de intensidad están diseñados de tal forma que sean fabricados en su mayoría con Aluminio 6061-T4 obteniendo un peso simulado de 3 kg, mediante el proceso convencional de maquinado (desbastado). Las sondas de intensidad acústica y los separadores sólidos se fabricaron con tecnología *poliyet*, en una impresora *objet connex 500* utilizando *Veroclear RGD810*, material que simula al plástico convencional, con características mecánicas similares al polipropileno o *Poly(methyl methacrylate)* (PMMA), este material es rígido, aislante eléctrico, transparente u opaco, y proporciona estabilidad en dispositivos para propósitos generales y detalles finos. Obteniendo una estructura para conformar una sonda de intensidad de 80 gramos cada una contemplando los micrófonos y los cables de conexión.

En el proceso de mediciones comenzó con la configuración del sistema de adquisición, el cual involucro el software PULSE, en el cual se incluyeron 4 señales de entrada correspondientes a las señales captadas por los 4 transductores, configurando cada señal captada por los micrófonos como CPB (*Constant Percentage Bandwidth*) para establecer un análisis en tercios de octavas. Con este software y el módulo B&K tipo 3160-A042 se generaron tonos senoidales en un intervalo de frecuencias desde 500 Hz hasta 6.3 Khz,

además de generar una señal de ruido, las señales generadas se acoplaron a un amplificador de potencia para ser reproducida por la fuente monopólica de banda ancha desarrollada en el CENAM. Con este sistema se realizaron mediciones directas de los espectros cruzados entre los micrófonos 14, 24, 34, 12, 23 y 31 de la sonda de intensidad acústica la cual se ubicó a 40 cm de la fuente sonora. Tomando los datos obtenidos mediante el PULSE se realizó el cálculo de intensidad acústica en las tres direcciones mediante dos métodos. Uno de ellos es el método desarrollado por Suzuki el cual requiere la combinación entre los 4 micrófonos para obtener los 6 espectros cruzados correspondientes. El otro método propuesto se basa en la descomponían de los vectores de intensidad acústica en sus componentes  $x$ ,  $y$  y  $z$ , utilizando solo 3 espectros cruzados.

Además de realizar las mediciones con una sonda de intensidad acústica uniaxial de la compañía B&K, para comprobar el correcto funcionamiento de la sonda desarrollada, esta sonda se ubicó en el mismo punto dentro del recinto de tal manera que coincidiera con el centro acústico de la sonda desarrollada y posicionándola en los tres ejes para obtener los valores en  $x$ ,  $y$  y  $z$ .

Mediante estas mediciones se puede concluir que el método utilizado por Suzuki para el cálculo de intensidad acústica, es similar en cuanto a resultados obtenidos por el método propuesto utilizando menos información de entrada, también se encontró que las mediciones realizadas por la sonda son comparables en la dirección  $x$ , y son parecidas en las direcciones  $y$  y  $z$ , esto debido a reflexiones y tiempos de promediación, dando lugar al reconocimiento de fuentes sonoras mediante el vector de intensidad en 3D.

Para el trabajo futuro se planean realizar mejoras en la parte mecánica mejorando el diseño de la sonda de intensidad acústica para obtener una transparencia acústica mayor y también realizar mejoras y fabricar el mecanismo encargado de soportar y manipular las sondas para establecer distancias de separación entre ellas de una manera más óptima considerando nuevos materiales y así poder realizar el mapeo de fuentes sonoras mediante el arreglo completo de las 16 sondas de intensidad acústica. En cuestiones de caracterización se planean realizar numerosas mediciones contemplando diferentes posiciones y recintos, para estimar mejor la intensidad acústica en las tres direcciones de una fuente simple y de una fuente compleja, mejorando los programas de procesamiento de datos y las características de ubicación espacial.

## Bibliografía

- [1] B. Jacob, C. jindong y H. yiteng, "Microphone array signal processing", vol. 1, Springer, 2008.
- [2] J.-G. J. B. Mingsian R. Bai," Acoustic Array System,Theory, Implementationm and Application", 1 ed., Singapore: IEEE PRESS, 2013.
- [3] Gras, "Vector intensity probe type 50VI-1", [Último acceso: octubre 2014]. [http://www.gras.dk/media/docs/files/items/m/a/man\\_50VI-1.pdf](http://www.gras.dk/media/docs/files/items/m/a/man_50VI-1.pdf).
- [4] Brüel&Kjær, "Sound intensity," September 1993.
- [5] F. Fahy, Sound Intensity, 2nd ed., UK: E & FN SPON, 1995.
- [6] P. H. Co., "Aplication note 1230 : Sound Power Measurements, 5091-4426 ", Singapore, 1992.
- [7] m. ínapolat, Determinaion of vibroacoustical behavior of plates by intensit methods", school of natural and applied sciences of middle east thcenical universit, junio 2004.
- [8] Bruel&Jkaer, "Sound intensity", Tecnical review, 1986.
- [9] OnoSokki, "Sonda de Intensidad Acustica 3D", [Último acceso: octubre 2014],[http://www.onosokki.co.jp/English/hp\\_e/products/keisoku/s\\_v/mi6420.html](http://www.onosokki.co.jp/English/hp_e/products/keisoku/s_v/mi6420.html).
- [10] H. Nyquist, "Certain topics in telegraph transmission theory", 1983.
- [11] E. d. G. Alicia Espinosa, 1994. [Último acceso: octubre 2014]. <http://roble.pntic.mec.es/aesc0024/Thesis.pdf>.
- [12] I. McCowan, "Microphone Arrays: A Tutorial2, April 2001.
- [13] S. & V. M. Brüel&Kjær, "Catalogo PULSE Array-based Noise Source Identifiacion Solution: Beamforming -Tyoe 8608, Acosutic Holography-Type 8607, and Spherical Beamforming-Type 8606".

- [14] G. tech, "Acoustic Camera", [Último acceso: octubre 2014].  
[http://www.acoustic-camera.com/fileadmin/acoustic-camera/support/downloads/AC\\_brochure\\_2014\\_EN.pdf](http://www.acoustic-camera.com/fileadmin/acoustic-camera/support/downloads/AC_brochure_2014_EN.pdf).
- [15] MacDonald, Coxeter Harold Scott, "Regular Polytopes", 1948.
- [16] B&K measurement, "Sound intensity probe kit - tipo 3595".
- [17] F. Fahy, "Foundations of engineering acoustics", UK: Academic Press, 2001.
- [18] Control de absorcion acustica, [Último acceso: octubre 2014].  
[http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/1/paginas%20proyecto%20def/\(9\)%20Control%20por%20absorcion/absorcion%20acustica.htm](http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/1/paginas%20proyecto%20def/(9)%20Control%20por%20absorcion/absorcion%20acustica.htm).
- [19] Speed of sound in air, «<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>,» 2013.  
[Último acceso: octubre 2014].
- [20] G. Rasmussen, "Measurement of vector fields", 2nd International Congress on Acoustic Intensity, pp. 53-58, septiembre 1985.
- [21] TEDCD, "TEDCD Publishing Master 3D-CAD, Autodesk inventor 2012 training tutorial", TDCF publishing, 2013. [Último acceso: octubre 2014].  
[http://www.trainingtutorial.com/Inventor\\_2012\\_Training\\_Tutorial\\_Lessons.htm](http://www.trainingtutorial.com/Inventor_2012_Training_Tutorial_Lessons.htm) .
- [22] Worl, Stratasys for a 3D, "Polyjet materials data sheet",  
[http://www.stratasys.com/~media/Main/Secure/Material%20Specs%20MS/PolyJet-Material-Specs/PolyJet\\_Materials\\_Data\\_Sheet.pdf](http://www.stratasys.com/~media/Main/Secure/Material%20Specs%20MS/PolyJet-Material-Specs/PolyJet_Materials_Data_Sheet.pdf). [Último acceso: octubre 2014].
- [23] Escring Felix, Valcarcel J. P., "Estructuras espaciales desmontables y despleables", E.T.S. de Arquitectura, vol. 42, nº 409, septiembre/octubre 1990.
- [24] Escring Felix, Valcarcel J. P. [Último acceso: octubre 2014].  
<http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/1606/1798>.
- [25] R. L. Norton, Diseño de maquinaria y analisis de maquinas y mecanismos, cuarta ed., Mexico D.F: Mc Graw Hil, 2009.
- [26] Alu-Stock, 2013. "Catalogo de aluminios" [Último acceso: octubre 2014].  
<http://www.alu-stock.es/catalogo/pdf/libro/Alu-Stock-LA4-11-Aleaciones.pdf>.

- [27] 3D-CAD, TEDCD PUBLISHING MASTER, "Inventor 2012", 2013. [Último acceso: octubre 2014].  
[http://www.trainingtutorial.com/Inventor\\_2012\\_Training\\_Tutorial\\_Lessons.htm](http://www.trainingtutorial.com/Inventor_2012_Training_Tutorial_Lessons.htm).
- [28] B&K, "Software and. Hardware", «<http://www.bksv.com/products/pulse-analyzer.aspx>,» revisado por ultima vez en octubre del 2014. [Último acceso: octubre 2014].
- [29] B&K, "Información tecnica " , [Último acceso: octubre 2014].  
<http://www.bksv.com/Products/transducers/acoustic/microphones/microphone-preamplifier-combinations/4958?tab=specifications>, [Último acceso: octubre 2014].
- [30] stratasy, «stratasy,» 2014. [Último acceso: octubre 2014], <http://www.stratasy.com/>.
- [31] S. O. M. A. a. T. O. Hideo Suzuki, «Performance evaluation of a three dimensional,» Journal of the Acoustical Society of Japan, vol. 16, n° 4, pp. 233-238, 1995.
- [32] H. T. H. M. a. H. S. Takeshi Iino, «Numerical evaluation of three-dimensional sound intensity measurement,» Acoust. Sci. & Tech., vol. 1, n° 34, 2013.
- [33] C. R. a. L. B. L. M. S. Santos, «Measuring the three-dimensional acoustic,» Inter-Noise, n° 89, pp. 965-968, 1989.
- [34] D. D. W. & F. B. Karl Janssens, «LMS SoundBrush: a new source identification,» n° [www.lmsintl.com/lmsworldwide](http://www.lmsintl.com/lmsworldwide). [Último acceso: octubre 2014]

---

---

# Apéndices

## Apéndice A.- cálculo de intensidad acústica en 3D por Suzuki.

Para comprobar el funcionamiento de las sondas de intensidad acústica se pretende utilizar el método desarrollado por *Hideo Suzuki* [31] [32], el cual se describe como:

1.- La presión en el centro de gravedad del tetraedro esta dado al promediar las 4 presiones en los vértices del tetraedro

$$P_o = (P_1 + P_2 + P_3 + P_4)/4 \quad (1)$$

2.- La componente de velocidad de partícula en dirección del orto-centro a cada uno de los vértices se obtiene usando  $P_i$  y  $P_o$

$$V_i = -(P_i - P_o)j2\pi f\rho d \quad (i = 1, 2, 3 \text{ y } 4) \quad (2)$$

Donde  $P_i$  es el espectro de presión (amplitud rms como función de la frecuencia) en el  $i$ -ésimo vértice,  $f$  es la frecuencia,  $\rho$  es la densidad del aire y  $d$  la distancia que existe del orto-centro a cada vértice del tetraedro.

De la relación de cada una de las velocidades  $V_i$  con la geometría del tetraedro se obtienen las componentes en las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$ :

$$V_x = -\frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}(V_1 - V_3) \quad (3)$$

$$V_y = -\frac{1}{2\sqrt{2}}(2V_1 - V_2 - V_3) \quad (4)$$

$$V_z = -\frac{1}{4}(V_1 + V_2 + V_3 + V_4) \quad (5)$$

La parte activa de la intensidad acústica en la cualquier dirección  $n$  está dada por

$$I_n = \text{Re}(P^*V_n) \quad (6)$$

Reescribiendo (6) usando Ec. (1) y Ec. (3, 4 y 5) obteniendo:

$$Ix = -\frac{3}{\omega \rho d} \frac{1}{12} \text{Im}(G_{34} - G_{24} - 2G_{23} + G_{12} - G_{13}) \quad (7)$$

$$Iy = -\frac{3}{\omega \rho d} \frac{\sqrt{3}}{36} \text{Im}(G_{34} - G_{24} - 2G_{14} - 3G_{12} - 3G_{13}) \quad (8)$$

$$Iz = -\frac{3}{\omega \rho d} \frac{\sqrt{2}}{6\sqrt{3}} \text{Im}(-G_{34} - G_{24} - G_{14}) \quad (9)$$

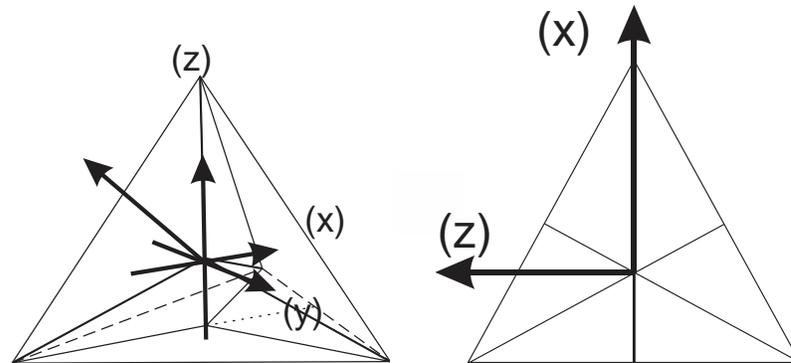


Figura A-1.-Arreglo de 4 micrófonos distribuidos en un tetraedro propuesto por Suzuki.

Donde  $AI_x$ ,  $AI_y$  y  $AI_z$ , representan la intensidad acústica en cada una de los ejes y  $G_{ij}$  es el espectro cruzado entre la presión  $i$  y  $j$  de cada vértice del tetraedro.

Apéndice B.- cálculo de intensidad acústica en 3D por Rasmussen y Santos

El propuesto por Rasmussen [20] y desarrollado por Santos [33], y que actualmente utiliza *LMS SoundBrush* [34], en donde se parte del tetraedro inscrito en un cubo asemejando la distribución de la sonda de intensidad de 6 micrófonos de B&K en donde los micrófonos están colocados ortogonalmente en la dirección x, y y z

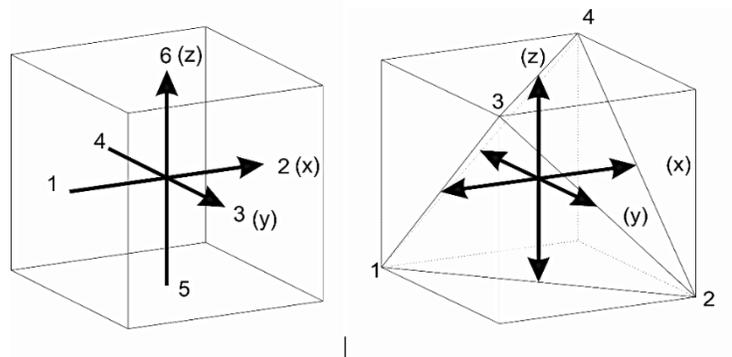


Figura B-1.- Arreglo de 6 microfones para una sonda 3D, sonda propuesta por P rasmussen

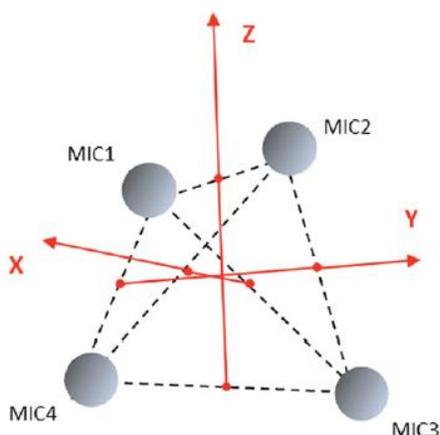


Figura B-2.- Arreglo de micrófonos en distribución tetraédrica

Donde se obtiene la presión acústica en el centro del tetraedro promediando las 4 presiones en los vértices del tetraedro. Para obtener la componente de velocidad en el centro del tetraedro se parte de la presión promedio entre dos micrófonos obteniendo un punto virtual de presión en el centro de cada vértice y así obtener la componente de velocidad en el eje correspondiente a x, y y z.

$$P(\omega, T) \approx \frac{P_1(\omega, T) + P_2(\omega, T) + P_3(\omega, T) + P_4(\omega, T)}{4},$$

$$V_x(\omega, T) \approx \frac{1}{\sqrt{2}\rho h j \omega} \cdot \left( \frac{P_1(\omega, T) + P_3(\omega, T)}{2} - \frac{P_2(\omega, T) + P_4(\omega, T)}{2} \right)$$

$$V_y(\omega, T) \approx \frac{1}{\sqrt{2}\rho h j \omega} \cdot \left( \frac{P_1(\omega, T) + P_4(\omega, T)}{2} - \frac{P_2(\omega, T) + P_3(\omega, T)}{2} \right)$$

$$V_z(\omega, T) \approx \frac{1}{\sqrt{2}\rho h j \omega} \cdot \left( \frac{P_1(\omega, T) + P_2(\omega, T)}{2} - \frac{P_3(\omega, T) + P_4(\omega, T)}{2} \right)$$

Figura B-3.- componentes de presión y velocidad de partícula en el centro del tetraedro **Fuente especificada no válida.**

**Apéndice B.- cálculo de intensidad acústica en 3D propuesto basado en el cálculo de intensidad en los vértices del tetraedro.**

El diseño de la estructura de la sonda de intensidad acústica emplea el uso de 4 micrófonos colocados en los vértices de un tetraedro regular, orientados hacia el orto-centro de este, Figura C-1. Para establecer los ejes  $x$ ,  $y$  y  $z$  se parte de consideraciones establecidas en el método empleado por Suzuki, en el cual se establece al eje  $x$  como la línea que conecta al micrófono 4 al baricentro del triángulo opuesto, la dirección  $y$  se toma de la línea paralela a los micrófonos I y III, y la dirección  $z$  en dirección del apotema formado por el micrófono II en el triángulo formado por I, II y III.

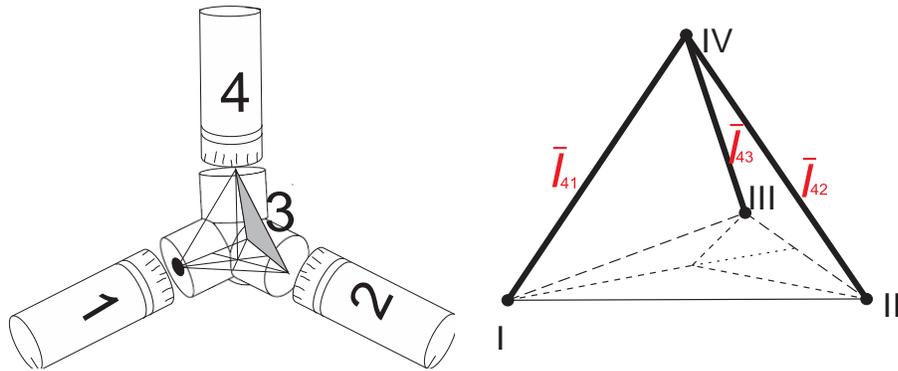


Figura C-1.- representación de la intensidad acústica entre las aristas del tetraedro regular.

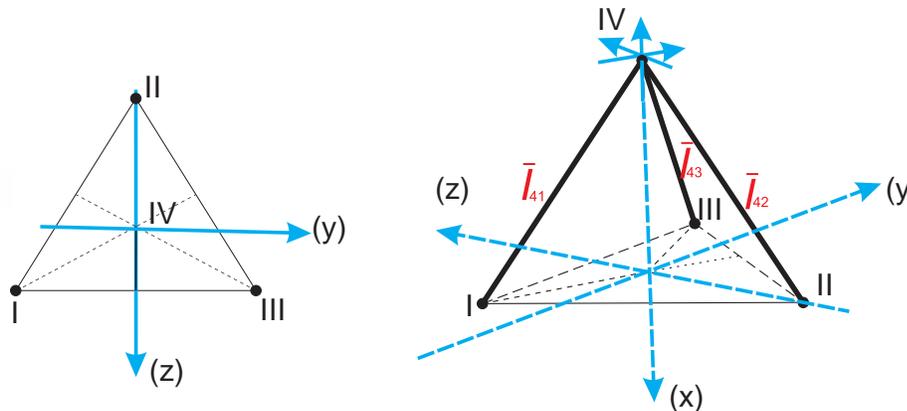


Figura C-2.- sistema cartesiano de referencia de la sonda de intensidad propuesta

Para realizar los cálculos de intensidad en cada uno de los ejes se parte de micrófono 4 el cual es tomado como referencia y obteniendo la intensidad acústica en las direcciones  $I_{41}$ ,  $I_{42}$  e  $I_{43}$

$$I_1(\omega) = -\frac{1}{\omega\rho_0d}Im(G_{41}(\omega)) \quad (1)$$

$$I_2(\omega) = -\frac{1}{\omega\rho_0d}Im(G_{42}(\omega)) \quad (2)$$

$$I_3(\omega) = -\frac{1}{\omega\rho_0d}Im(G_{43}(\omega)) \quad (3)$$

Donde  $d$  es la distancia de separación entre micrófonos (la distancia de cada uno de las aristas del tetraedro regular),  $\rho_0$  la densidad del aire y  $G_{ij}$  es el espectro cruzado entre las presiones del micrófono 4 y cada una de las presiones en los vértices. La intensidad medida a lo largo de cada arista se puede representar como la suma de las intensidades en las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$  utilizando la geometría del tetraedro, donde las componentes  $I_x$ ,  $I_y$  e  $I_z$  que forman la intensidad medida en cada arista son:

$$I_1(\omega) = \frac{\sqrt{6}}{3}I_x(\omega) - \frac{I_y(\omega)}{2} + \frac{\sqrt{3}}{6}I_z(\omega) \quad (4)$$

$$I_2(\omega) = \frac{\sqrt{6}}{3}I_x(\omega) - \frac{\sqrt{3}}{3}I_z(\omega) \quad (5)$$

$$I_3(\omega) = \frac{\sqrt{6}}{3}I_x(\omega) + \frac{I_y(\omega)}{2} + \frac{\sqrt{3}}{6}I_z(\omega) \quad (6)$$

Donde  $I_x$ ,  $I_y$  e  $I_z$  son las componentes de la intensidad acústica en cada uno de los ejes  $x$ ,  $y$  y  $z$  respectivamente. Resolviendo estas ecuaciones para  $I_x$ ,  $I_y$  e  $I_z$  se obtiene:

$$I_x(\omega) = \frac{1}{\sqrt{6}}(I_1(\omega) + I_2(\omega) + I_3(\omega)) \quad (7)$$

$$I_y(\omega) = (I_3(\omega) - I_1(\omega)) \quad (8)$$

$$I_z(\omega) = \frac{1}{3}(I_1(\omega) + I_3(\omega) - 2I_2(\omega)) \quad (9)$$

Sustituyendo (1), (2) y (3) en (7), (8) y (9) se obtiene:

$$I_x(\omega) = -\frac{1}{\sqrt{6}}\frac{1}{\omega\rho_0d}Im(G_{41}(\omega) + G_{42}(\omega) + G_{43}(\omega)) \quad (7)$$

$$I_y(\omega) = \frac{1}{\omega\rho_0d}Im(G_{41}(\omega) - G_{43}(\omega)) \quad (8)$$

$$I_z(\omega) = \frac{1}{\sqrt{3}}Im(2G_{42}(\omega) - G_{41}(\omega) - G_{43}(\omega)) \quad (9)$$

## Apéndice C.- Programas utilizados

### E1.-Función conversión

```

%Conversión de presión a decibeles y de decibeles a presión
%Op=1 conversión de presión a dB
%Op=2 conversión de dB a presión
%Op=3 conversión de Pa a dB/W/m^2 (intensidad)
%VAL= valor a convertir
%x=conversion(1,valores)
function x=conversion(Op,Val);
pref=.00002;
Iref=10^-12;
if Op==1
    x=20*log10(Val./pref);
end;
if Op==2
    x=sqrt(10^(Val/10))*pref;
end;
if Op==3
    x=10*log10(Val./Iref);% valor de intensidad conversión de Pa a dB
end;

```

### E2.-Función para leer los datos adquiridos mediante el PULSE en un archivo de Excel

```

%Adquirir datos de un archivo de Excel generado por PULSE
%nombre= nombre del archivo 'nombre'
%hoja=número de hoja de donde se extraerán los datos
%bloques= número de bloques o canales de medición
%imput=1; cross-espectrum 38,48,83
%imput=2; autoespectrum 39,46,81
%imput=3; Intensisty 39,46,81
function x=load_exel(nombre,hoja,bloques,imput);
extension='.xlsx';
nombre=[nombre extension];%se crea el nombre con extensión

if imput==1
in_b1=48;%línea de inicio de los datos
l_fin=0;
R2=39;%línea de etiqueta
ffr2=0;
for k=1:1:bloques
rango=['C',num2str(in_b1+l_fin),':','C',num2str(in_b1+31+l_fin)];%celdas
donde se encuentras los datos (rango de los datos)
rango2=['B',num2str(R2+ffr2)];%etiqueta
x(k,:)= xlsread(nombre, hoja, rango);
[n, texto] = xlsread(nombre, hoja,rango2);
cargado=texto
l_fin=l_fin+83;
ffr2=ffr2+83;
end
end
if imput==2
in_b1=46;%línea de inicio de los datos

```

```

l_fin=0;
R2=39;%línea de etiqueta
ffr2=0;
for k=1:1:bloques
rango=['C',num2str(in_b1+l_fin),':','C',num2str(in_b1+31+l_fin)];%rango de
los datos
rango2=['B',num2str(R2+ffr2)];%etiqueta
x(k,:)= xlsread(nombre, hoja, rango);
[n, texto] = xlsread(nombre, hoja,rango2);
cargado=texto
l_fin=l_fin+81;
ffr2=ffr2+81;
end
end
if imput==3
in_b1=50;%línea de inicio de los datos
l_fin=0;
R2=41;%línea de etiqueta
ffr2=0;
for k=1:1:bloques
rango=['C',num2str(in_b1+l_fin),':','C',num2str(in_b1+31+l_fin)];%rango de
los datos
rango2=['B',num2str(R2+ffr2)];%etiqueta
x(k,:)= xlsread(nombre, hoja, rango);
[n, texto] = xlsread(nombre, hoja,rango2);
cargado=texto
l_fin=l_fin+85;
ffr2=ffr2+85;
end
end;

```

### E3.-Programa para crear el vector de frecuencias en documentos de texto.

```

clc
clear all
W=[2.00E+01,2.50E+01,3.15E+01,4.00E+01,5.00E+01,6.30E+01,8.00E+01,1.00E+02,1.
25E+02,1.60E+02,2.00E+02,2.50E+02,3.15E+02,4.00E+02,5.00E+02,6.30E+02,8.00E+0
2,1.00E+03,1.25E+03,1.60E+03,2.00E+03,2.50E+03,3.15E+03,4.00E+03,5.00E+03,6.3
0E+03,8.00E+03,1.00E+04,1.25E+04,1.60E+04,2.00E+04];%frecuencia central
tercios de octava
for cn=1:13
    lx=load_exel('jaonj_sonda_yo_1',cn,3,1);
    li=load_exel('jaonj_sonda_yo_si_1',cn,2,3);
    G42=lx(3,:);%cross-spectrum img
    I42=li(2,:);%Intensidad acústica en una dirección w/m^2
    l=length(G42);
    d=0.012;%mm
    rho=0.951; %kg/m^3
    for k=1:l
        ff(k)=abs((G42(:,k)')/(2*pi*I42(:,k)*rho*d)); %vector de
        frecuencias CPB
    end
    datos=ff';
    nombre=['f_' num2str(W(14+cn)) '.dat']
    save(nombre,'datos','-ascii')
end

```

### E4.-Programa para crear el cálculo de intensidad y guardar los resultados en un documento de texto

```

clc
clear all
W=[2.00E+01,2.50E+01,3.15E+01,4.00E+01,5.00E+01,6.30E+01,8.00E+01,1.00E+02,1.
25E+02,1.60E+02,2.00E+02,2.50E+02,3.15E+02,4.00E+02,5.00E+02,6.30E+02,8.00E+0
2,1.00E+03,1.25E+03,1.60E+03,2.00E+03,2.50E+03,3.15E+03,4.00E+03,5.00E+03,6.3
0E+03,8.00E+03,1.00E+04,1.25E+04,1.60E+04,2.00E+04];
archivo='jaonj_sonda_yo_3'; %%nombre del archivo contenedor de datos

for cn=1:12
    nombre=['f_' num2str(W(14+cn)) '.dat']
    lx=load_exel(archivo,cn,6,1);
    G41_im=lx(4,:);
    G42_im=lx(3,:);
    G43_im=lx(5,:);
    % %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    G34_im=-G41_im;%pa4
    G24_im=-G43_im;%pa5
    G14_im=-G42_im;%pa3
    G12_im=-lx(1,:);%pa
    G13_im=-lx(2,:);%pa
    G23_im=-lx(6,:);%pa
    ff=load(nombre)';
    l=length(G41_im);
    d=0.012;%mm
    rho=0.951; %kg/m^3

        for k=1:l:l
            L(k)=2*pi*(ff(:,k))*rho*d;
        end
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%yo
    Ix=-(1/sqrt(6))*(1./L).*(G41_im+G42_im+G43_im);
    Iy=(1./L).*(G41_im-G43_im);
    Iz=(1/sqrt(3)).*(1./L).*((2.*G42_im)-G41_im-G43_im);
    Yo=[Ix;Iy;Iz];
    %conversion
    Ixdb=conversion(4,abs(Ix));
    Iydb=conversion(4,abs(Iy));
    Izdb=conversion(4,abs(Iz));
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Suzuki
    Ixx=-((3*sqrt(2))/(6*sqrt(3))).*(1./L).*(-G34_im-G24_im-G14_im);
    Iyy=-(3/12)*(1./L).*(G34_im-G24_im-(2*G23_im)+G12_im-G13_im);
    Izz=(3*sqrt(3)/36)*(1./L).*(G34_im+G24_im-(2*G14_im)-(3*G12_im)-
    (3*G13_im));
    Ixxdb=conversion(4,abs(Ixx));
    Iyydb=conversion(4,abs(Iyy));
    Izzdb=conversion(4,abs(Izz));
    Ix(cn,:)=[Ixdb(14+cn) Ixxdb(14+cn)];
    Iiy(cn,:)=[Iydb(14+cn) Iyydb(14+cn)];
    Iiz(cn,:)=[Izdb(14+cn) Izzdb(14+cn)];
    datosx=IIx;
    datosy=IIy;
    datosz=IIz;
    nombre1=[archivo 'x' '.dat'];

```

```

    nombre2=[archivo 'y' '.dat'];
    nombre3=[archivo 'z' '.dat'];
    save(nombre1,'datosx','-ascii')
    save(nombre2,'datosy','-ascii')
    save(nombre3,'datosz','-ascii')
end
%Ruido
cn=13
nombre=['f_' num2str(W(14+cn)) '.dat']
lx=load_exel(archivo,cn,6,1);
G41_im=lx(4,:);
G42_im=lx(3,:);
G43_im=lx(5,:);
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
G34_im=-G41_im;%pa
G24_im=-G43_im;%pa
G14_im=-G42_im;%pa
G12_im=-lx(1,:);%pa
G13_im=-lx(2,:);%pa
G23_im=-lx(6,:);%pa
ff=load(nombre)';
l=length(G41_im);
d=0.012;%mm
rho=0.951; %kg/m^3
for k=1:l:1
L(k)=2*pi*(ff(:,k))*rho*d;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%yo
Ix=-(1/sqrt(6))*(1./L).*(G41_im+G42_im+G43_im);
Iy=(1./L).*(G41_im-G43_im);
Iz=(1/sqrt(3)).*(1./L).*(2.*G42_im)-G41_im-G43_im);
Yo=[Ix;Iy;Iz];
%conversion
Ixdb=conversion(4,abs(Ix));
Iydb=conversion(4,abs(Iy));
Izdb=conversion(4,abs(Iz));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Suzuki
Ixx=-((3*sqrt(2))/(6*sqrt(3))).*(1./L).*(-G34_im-G24_im-G14_im);
Iyy=-(3/12)*(1./L).*(G34_im-G24_im-(2*G23_im)+G12_im-G13_im);
Izz=(3*sqrt(3)/36)*(1./L).*(G34_im+G24_im-(2*G14_im)-(3*G12_im)-(3*G13_im));
Ixxdb=conversion(4,abs(Ixx));
Iyydb=conversion(4,abs(Iyy));
Izzdb=conversion(4,abs(Izz));
%%5datos
IIx=[Ixxdb(15:26) ' Ixdb(15:26) '];
IIy=[Iyydb(15:26) ' Iydb(15:26) '];
IIz=[Izzdb(15:26) ' Izdb(15:26) '];
datosx=IIx;
datosy=IIy;
datosz=IIz;
nombre1=[archivo 'rx' '.dat'];
nombre2=[archivo 'ry' '.dat'];
nombre3=[archivo 'rz' '.dat'];
save(nombre1,'datosx','-ascii')
save(nombre2,'datosy','-ascii')
save(nombre3,'datosz','-ascii')

```

### E5.- Programa para adquirir datos de la sonda uniaxial B&K y compararlos con los obtenidos en la sonda tetraedrica

```

clc
clear all
W=[2.00E+01,2.50E+01,3.15E+01,4.00E+01,5.00E+01,6.30E+01,8.00E+01,1.00E+02,1.
25E+02,1.60E+02,2.00E+02,2.50E+02,3.15E+02,4.00E+02,5.00E+02,6.30E+02,8.00E+0
2,1.00E+03,1.25E+03,1.60E+03,2.00E+03,2.50E+03,3.15E+03,4.00E+03,5.00E+03,6.3
0E+03,8.00E+03,1.00E+04,1.25E+04,1.60E+04,2.00E+04];
archivo='jaonj_sonda_yo_2'
nombre1=[archivo 'x' '.dat'];
nombre2=[archivo 'y' '.dat'];
nombre3=[archivo 'z' '.dat'];
nombre4=[archivo 'rx' '.dat'];
nombre5=[archivo 'ry' '.dat'];
nombre6=[archivo 'rz' '.dat'];

IIx=load(nombre1);
IIy=load(nombre2);
IIz=load(nombre3);
IIRx=load(nombre4);
IIRy=load(nombre5);
IIRz=load(nombre6);

Isx= xlsread('sonda_de_intensidad 2',1,'B2:B13');%
Isy= xlsread('sonda_de_intensidad 2',2,'B2:B13');
Isz= xlsread('sonda_de_intensidad 2',3,'F2:F13');

Irx= xlsread('sonda_de_intensidad 2',1,'B15:B26');%
Iry= xlsread('sonda_de_intensidad 2',2,'B15:B26');
Irz= xlsread('sonda_de_intensidad 2',3,'B15:B26');
W=W(15:26); %vector de frecuencias desde 500Hz hasta 6.3 kHz(12 datsos).
figure(1)
semilogx(W,IIRx(:,2),'-.*r',W,IIRx(:,1),'--o',W,Isx,'--mo')
axis([300,10000,20,90])
legend('Ix Suzuki','Ix Propuesto', 'Ix B&K','Location','SouthEast')
ylabel('Intensidad dB/1p W/m^2')
xlabel('Frecuencia [Hz]')
title('Comparación intensidad acústica en dirección x (Tonos)'); %
grid

figure(2)
semilogx(W,IIRy(:,2),'-.*r',W,IIRy(:,1),'--o',W,Isy,'--mo')
axis([300,10000,20,80])
legend('Iy Suzuki','Iy Propuesto', 'Iy B&K','Location','SouthEast')
ylabel('Intensidad dB/1p W/m^2')
xlabel('Frecuencia [Hz]')
title('Comparación intensidad acústica en dirección y (Tonos)'); %
grid

%
figure(3)
semilogx(W,IIRz(:,2),'-.*r',W,IIRz(:,1),'--o',W,Isz,'--mo')
axis([300,10000,20,80])

```

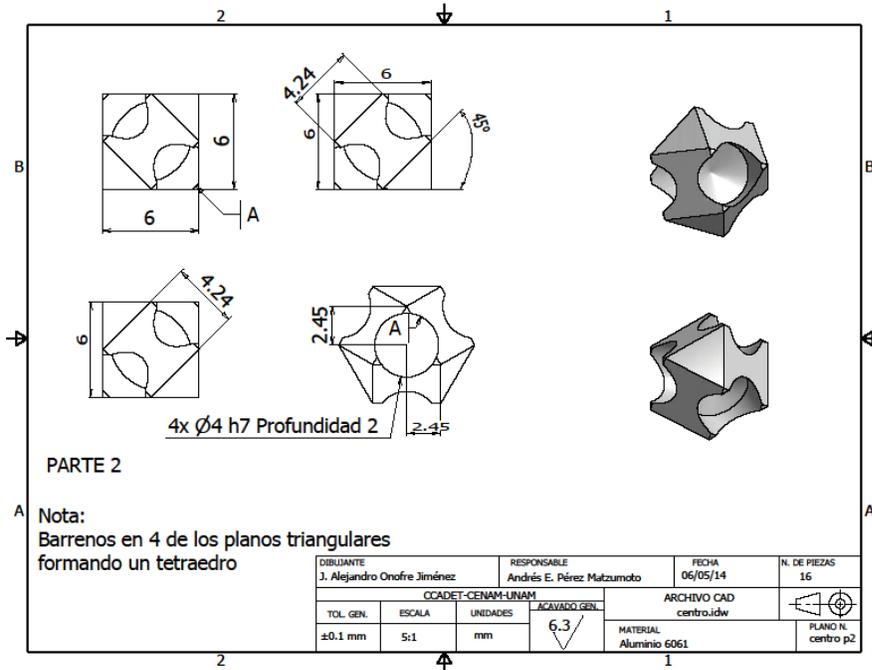
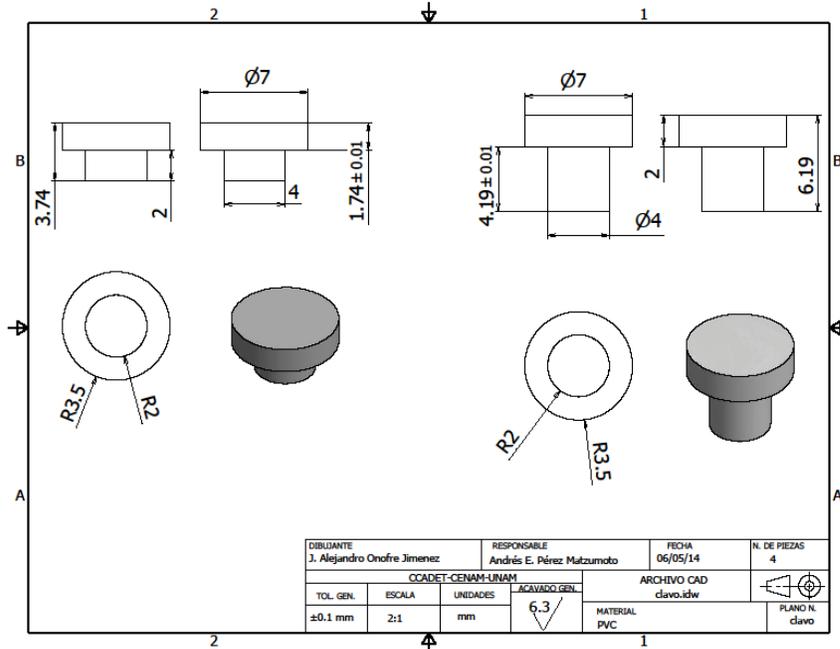
```
legend('Iz Suzuki','Iz Propuesto','Iz B&K','Location','SouthEast')
ylabel('Intensidad dB/1p W/m^2')
xlabel('Frecuencia [Hz]')
title('Comparación intensidad acústica en dirección z (Tonos)'); %
grid

%Mediciones de ruido
figure(4)
semilogx(W,IIRx(:,1),'-.*r',W,IIRx(:,2),'--o',W,Irx,'--mo')
axis([300,10000,20,70])
legend('Ix Suzuki','Ix Propuesto','Ix B&K','Location','SouthEast')
ylabel('Intensidad dB/1p W/m^2')
xlabel('Frecuencia [Hz]')
title('Comparación intensidad acústica en dirección x (ruido)'); %
grid
figure(5)
semilogx(W,IIRy(:,1),'-.*r',W,IIRy(:,2),'--o',W,Iry,'--mo')
axis([300,10000,20,70])
legend('Iy Suzuki','Iy Propuesto','Iy B&K','Location','SouthEast')
ylabel('Intensidad dB/1p W/m^2')
xlabel('Frecuencia [Hz]')
title('Comparación intensidad acústica en dirección y (ruido)'); %
grid
figure(6)
semilogx(W,IIRz(:,1),'-.*r',W,IIRz(:,2),'--o',W,Irz,'--mo')
axis([300,10000,20,60])
legend('Iz Suzuki','Iz Propuesto','Iz B&K','Location','SouthEast')
ylabel('Intensidad dB/1p W/m^2')
xlabel('Frecuencia [Hz]')
title('Comparación intensidad acústica en dirección z (ruido)'); %
grid
```

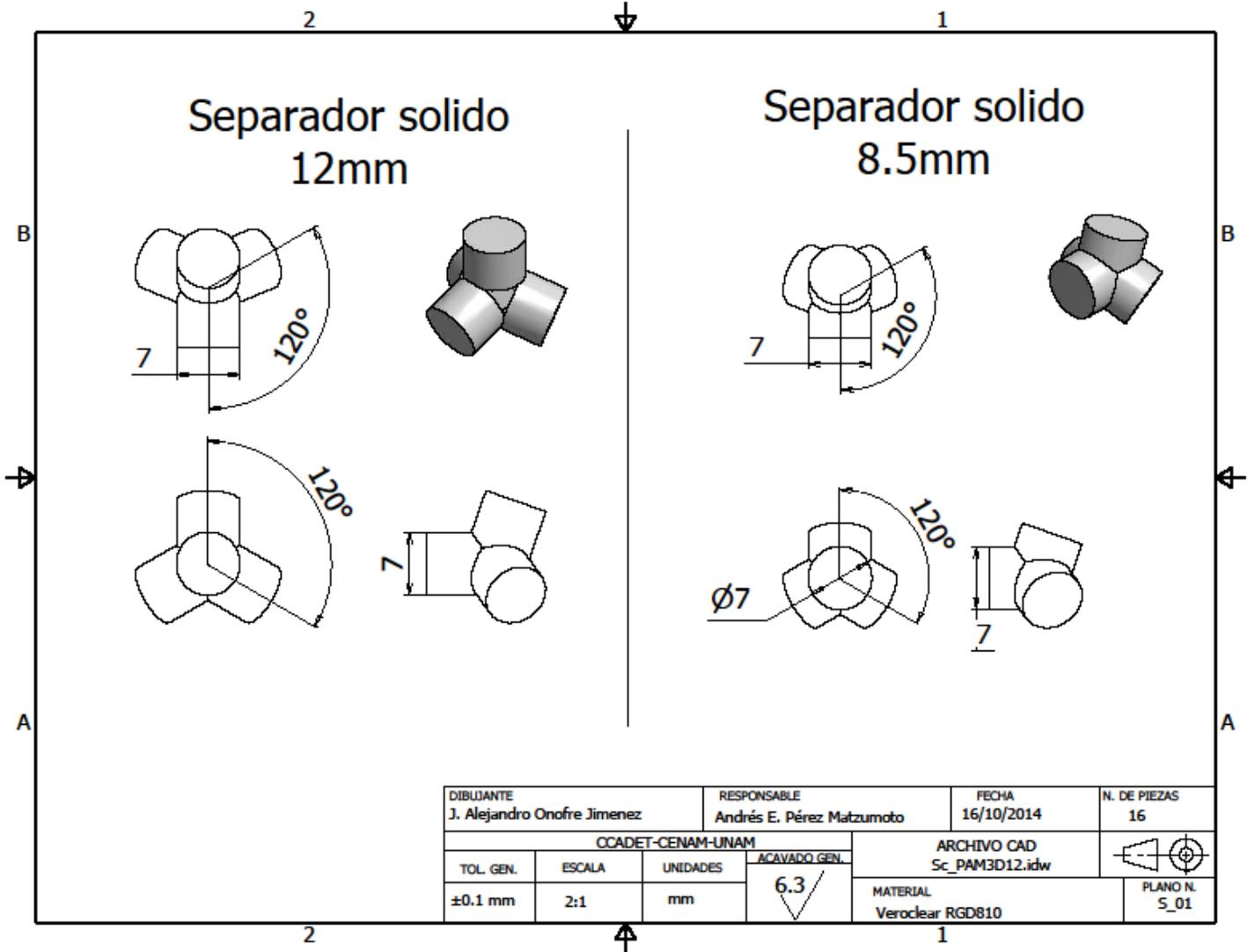
# Anexo A

## Separador sólido

### A-1 Separador sólido ensamble



A-2 Separador sólido 12 mm y 8.5 mm

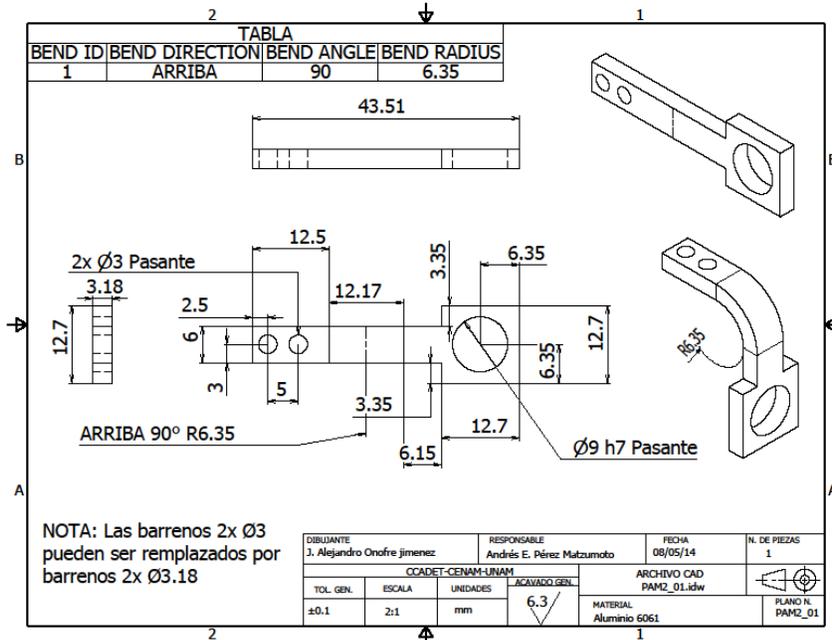
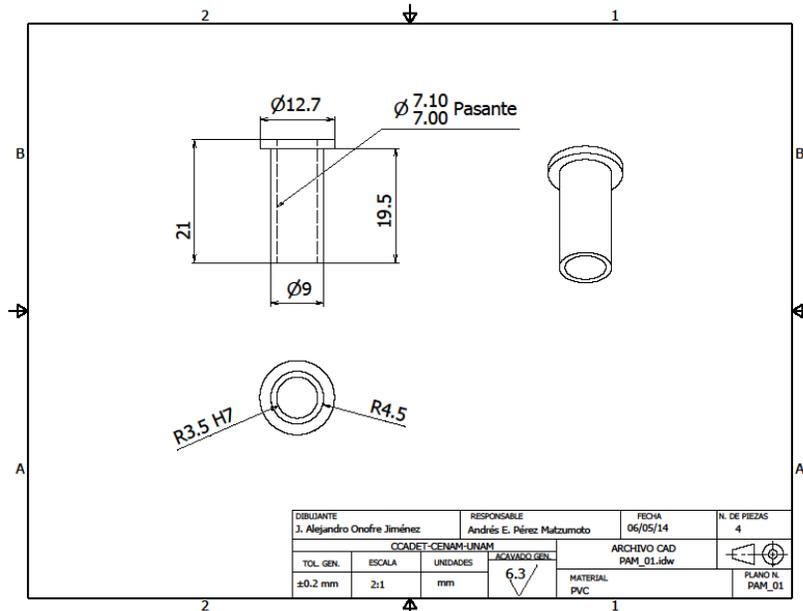


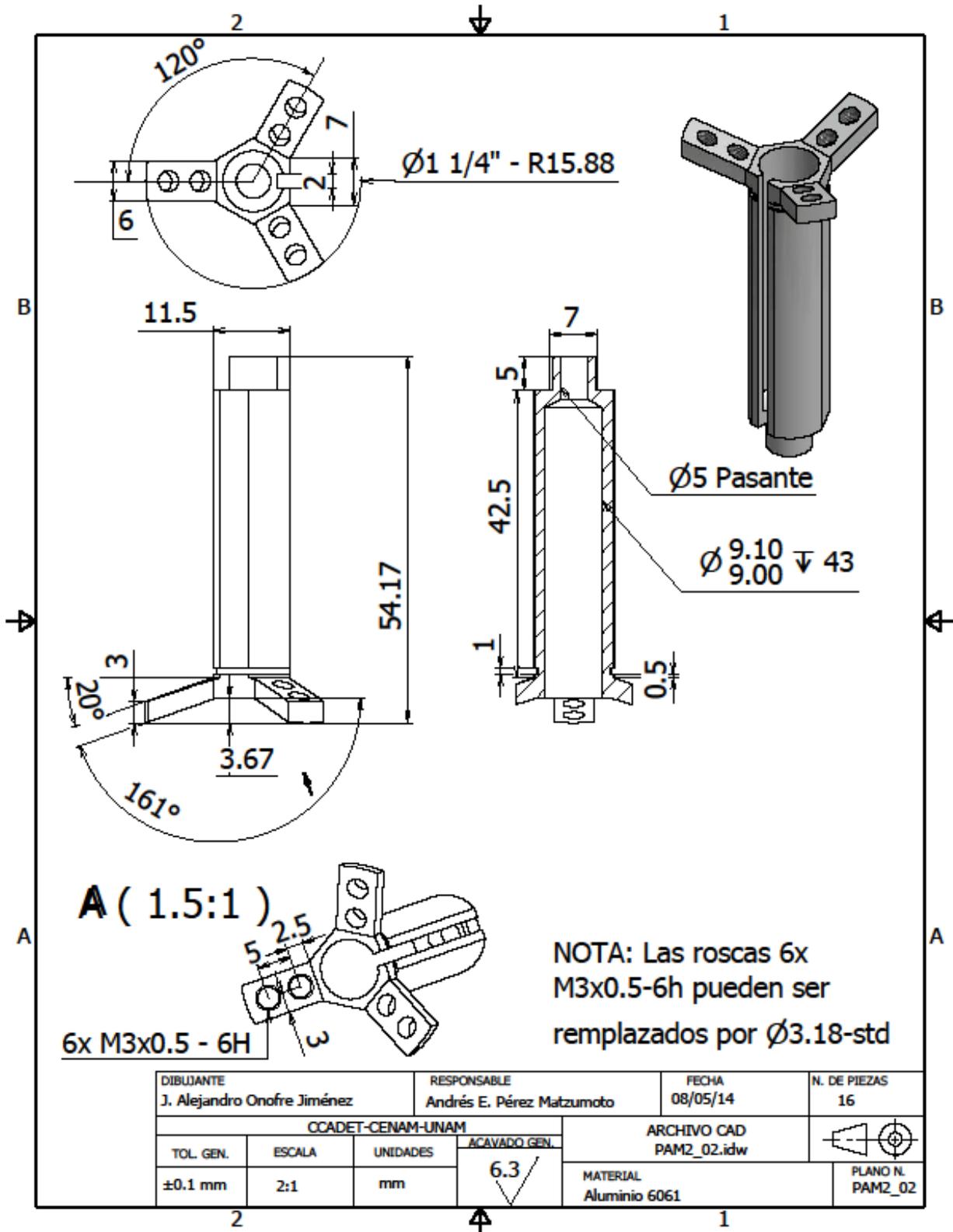
DIBUJANTE J. Alejandro Onofre Jimenez		RESPONSABLE Andrés E. Pérez Matzumoto		FECHA 16/10/2014	N. DE PIEZAS 16
CCADET-CENAM-UNAM				ARCHIVO CAD Sc_PAM3D12.idw	
TOL. GEN. ±0.1 mm	ESCALA 2:1	UNIDADES mm	ACABADO GEN. 6.3	MATERIAL Veroclear RGD810	
				PLANO N. S_01	

# Anexo B

## Sonda de Intensidad Acústica 3D

### B-1 Componentes de la sonda de intensidad acústica del prototipo 1 PISA-I

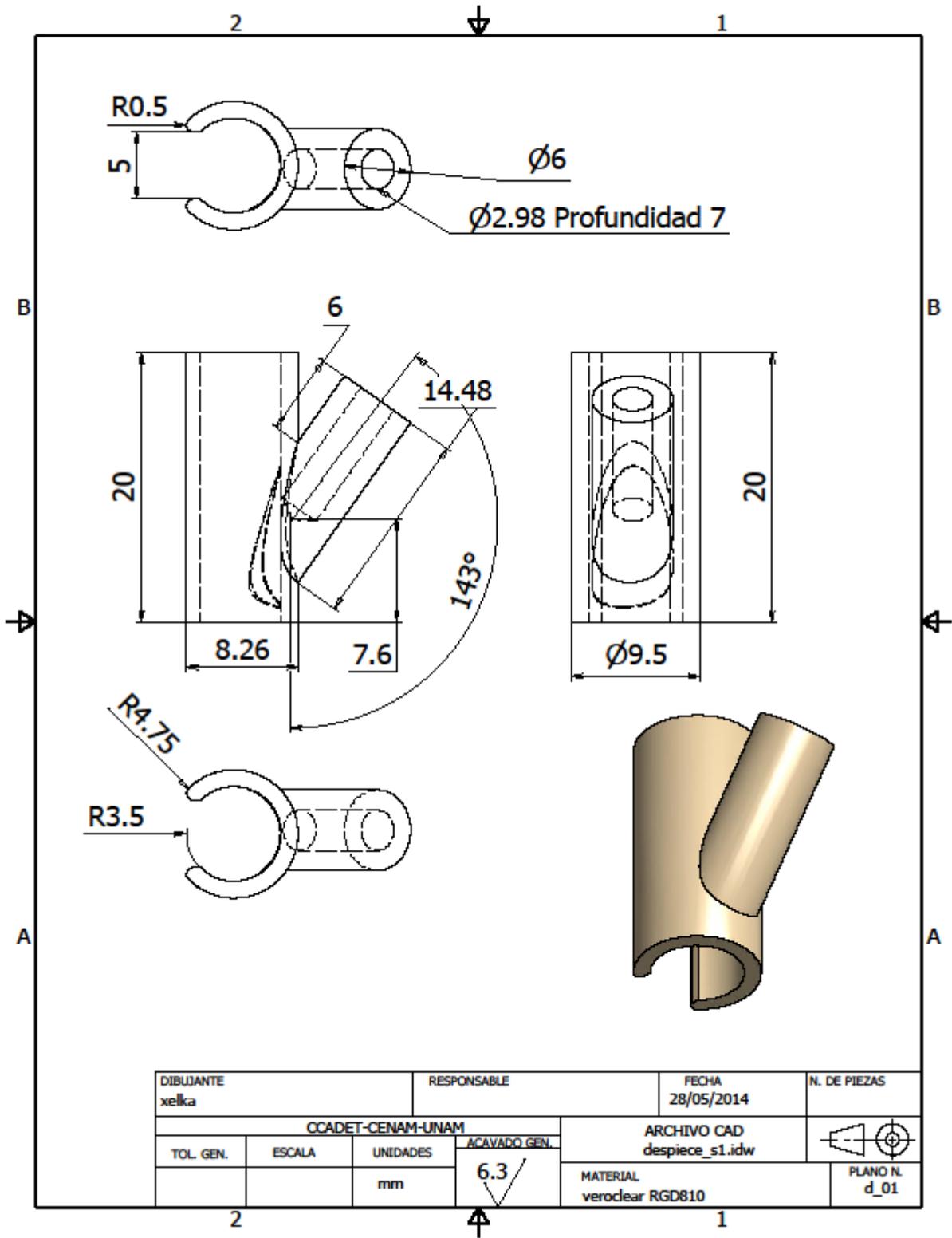




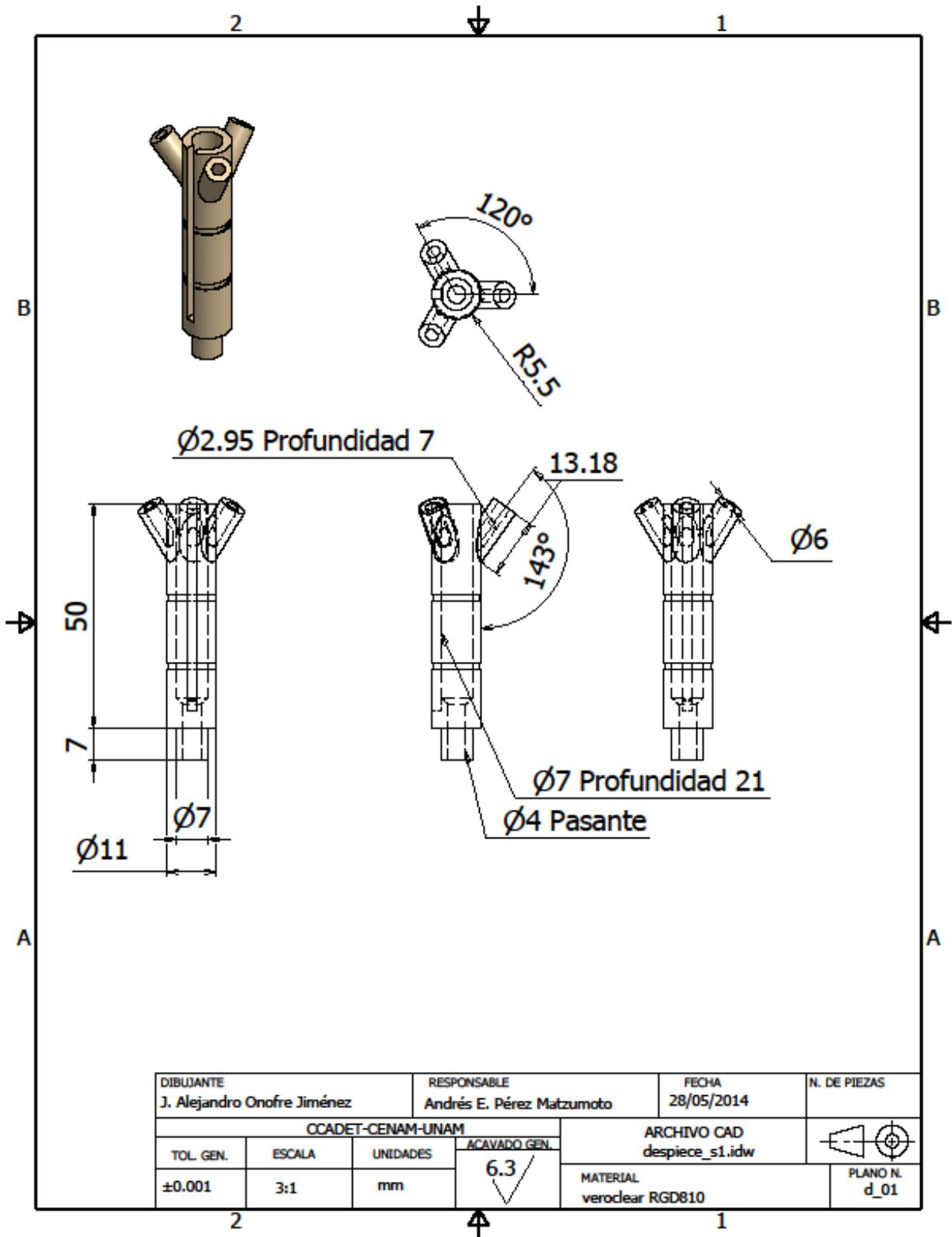
B-1 Componentes de la sonda de intensidad acústica del prototipo 2 PSIAv

LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	PAM2_02.itp
2	3	PAM2_01.itp
3	4	microfono.iam
4	3	PAM2_3.itp
5	1	separador_12_solid o.itp

DIBUJANTE J. Alejandro Onofre Jiménez		RESPONSABLE Andrés E. Pérez Matsumoto		FECHA 28/05/2014	N. DE PIEZAS
CCADET-CENAM-UNAM				ARCHIVO CAD despiece_s1.idw	
TOL. GEN.	ESCALA	UNIDADES	ACAVADO GEN.	 PLANO N. d_01	
		mm			



DIBUJANTE xelka		RESPONSABLE		FECHA 28/05/2014	N. DE PIEZAS
CCADET-CENAM-UNAM				ARCHIVO CAD despiece_s1.idw	
TOL. GEN.	ESCALA	UNIDADES mm	ACAVADO GEN. 6.3	MATERIAL veroclear RGD810	
				PLANO N. d_01	



# Anexo C

## Estructura del arreglo de micrófonos

