

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN CIENCIAS E INGENIERÍA**



**"VISUALIZACIÓN DE FUENTES DE SONIDO
MEDIANTE
HOLOGRAFÍA ACÚSTICA"**

TESIS

**QUE PRESENTA PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA**

CÉSAR AMARO HERNÁNDEZ

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. MIGUEL BRAVO ZANOQUERA**

Mexicali, B.C.

Octubre de 2009

RESUMEN de la tesis de César Amaro Hernández, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de DOCTOR EN INGENIERÍA, ÁREA ELÉCTRICA. Mexicali, Baja California, México. Octubre de 2009.

VISUALIZACIÓN DE FUENTES DE SONIDO MEDIANTE HOLOGRAFÍA ACÚSTICA

Resumen aprobado por:

Dr. Miguel Enrique Bravo Zanoguera

Director de tesis

Actualmente en la industria automotriz, así como en otras industrias, se necesita el análisis de los campos acústicos para obtener una representación completa de las fuentes de sonido de los productos manufacturados con el objetivo de realizar cambios en su diseño y disminuir o eliminar sus emisiones de ruido. Como una alternativa a la representación de campos acústicos, en este trabajo se utiliza la holografía acústica de campo cercano (NAH) de ondas planas y arreglos de micrófonos para la visualización de fuentes de sonido en estructuras vibrantes de forma irregular. Primero se visualiza la radiación acústica de bocinas excitadas a frecuencia única, posteriormente, y como aportación de este trabajo de investigación se aplica NAH al estudio de los campos acústicos complejos producidos por máquinas eléctricas rotatorias. Mediante la reconstrucción holográfica se ubican las principales partes móviles de un motor de jaula de ardilla y un abanico eléctrico. Una interfaz gráfica es desarrollada en Matlab para automatizar las mediciones y facilitar el análisis espectral para establecer la relación entre la componente de frecuencia de una fuente de ruido en la máquina y la parte de la estructura que lo produce. Ello implica que el arreglo de micrófonos diseñado y construido como parte de este trabajo de investigación puede ser utilizado como una herramienta de diagnóstico para la detección de fuentes de ruido en máquinas dentro del rango audible de un operador.

Palabras clave: holografía acústica, visualización de fuentes de sonido, arreglo de micrófonos, detección de ruido en maquinaria.

ABSTRACT of the thesis of César Amaro Hernández, as partial requirement for obtaining the degree of DOCTOR IN ENGINEERING. Mexicali, Baja California, México, October 2009.

**VISUALIZATION OF SOUND SOURCES
BY MEANS OF ACOUSTIC HOLOGRAPHY**

Summary approved by:

Dr. Miguel Enrique Bravo Zanoguera
Thesis director

Currently in the automotive industry, as well as in other industries, it is necessary to do an acoustic field analysis to obtain a description of the sound sources of the manufactured products in order to achieve the reduction of noise emissions or the diagnosis of failures, then this will determine changes in the designs of the product. As an alternative, in this work planar NAH and a microphone array are used for the visualization of sound sources of vibrating structures with irregular form. The acoustics radiation of speakers excited with single-frequency and the complex acoustic fields produced by two rotary electrical machines are visualized. Through the holographic reconstruction, the main moving parts of a squirrel cage engine and an electric fan are located. A graphical user interface is developed in Matlab to automate the measurements and facilitate the spectral analysis to establish the relationship between the frequency component of a machine's noise source and the part of the structure that produces it. This implies that the microphone array designed and built as part of this research work can be used as a diagnostic tool for the detection of noise sources in machines within the audible range of an operator.

Keywords: acoustic holography, visualization of sound sources, microphones array, detection of noise in machinery.

Dedicada a:

Araceli, Juan Pablo y Karolina

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma de Baja California

Al Dr. Miguel Enrique Bravo Zanoguera por su apreciable participación como director de esta tesis y sobre todo sus consejos y amistad.

A los miembros del comité de tesis: Dr. David Isaías Rosas Almeida, Dr. Ángel Andrade Reátiga, Dr. Oleg Sergiyenko, Dr. Pedro Mayorga Ortiz, por su disponibilidad y sus valiosas recomendaciones.

ÍNDICE	PÁGINA
1. Introducción	1
2. Bases teóricas de acústica	17
2.1 Ondas acústicas	17
2.2 Propagación de ondas planas	20
2.3 Ondas complejas	20
2.4 Ecuación de onda	22
3. Arreglo de micrófonos	27
3.1 Micrófonos	27
3.1.1 Tipos de micrófonos	28
3.2 Arreglo de micrófonos	31
3.2.1 Patrón de directividad	35
4. Holografía Acústica	39
4.1 Estado estable	40
4.2 Intensidad acústica	41
4.3 Ondas planas y el espacio k	41
4.4 Ondas evanescentes	46
4.5 Espectro angular	47
4.6 Holografía acústica de campo cercano NAH	49
4.7 Filtro en el espacio k	51
4.9 Efectos de la DFT y la FFT	54
5. Diseño de la instrumentación del sistema de medición	55
5.1 Antecedentes	55
5.2 Arreglo lineal	56
5.2.1 Calibración de micrófonos	57
5.2.2 Adquisición de datos	59
5.2.3 Patrón de directividad	59
5.3 Automatización de mediciones	70
5.4 Barrido con arreglo lineal	77
5.4.1 Circuito amplificador	80
5.5 Arreglo bidimensional	82
5.5.1 Circuito multiplexor	83
5.5.2 Calibración de micrófonos	85
5.5.3 Integración del sistema	86
5.5.4 Barrido con arreglo bidimensional	87

ÍNDICE	PÁGINA
6. Resultados	89
6.1 Barrido con arreglo lineal de micrófonos	89
6.2 Barrido con arreglo bidimensional de micrófonos	99
6.2.1 Barrido con una y dos bocinas	100
6.2.2 Mediciones dentro de cámara anecoica	104
6.3 Visualización de fuentes de sonido en máquinas eléctricas rotatorias	106
7. Conclusiones	116
8. Referencias	119

Índice de figuras

FIGURA	PÁGINA
1.- Gráfica de la función seno	18
2.- Plano vibrante describiendo la compresión y rarefacción de las moléculas.	19
3.- Onda compleja descompuesta en su fundamental y su segunda armónica.	21
4.- Elemento infinitesimal de fluido experimentando fuerzas debido a la presión p .	23
5.- Vista en corte de un micrófono tipo electrore.	29
6.- Principales elementos de un micrófono tipo condensador.	30
7.- Arreglo continuo de sensores.	36
8.- Arreglo discreto de sensores.	37
9.- Experimento realizado por Dennis Gabor con luz monocromática.	39
10.- Representación de una onda plana mostrando las trazas de longitud de onda λ_x y λ_z .	43
11.- Representación en el dominio del número de onda de una onda plana con componentes k_x y k_z .	44
12.- Onda plana que viaja perpendicular al eje x .	45
13.- Onda plana viajando paralela al eje x con una longitud de onda infinita en la dirección z .	45
14.- Ilustración de una onda evanescente viajando paralela al eje x .	47
15.- Espectro angular del campo de velocidad $w(x) = \text{sen}(3.5\pi x)$.	52
16.- Respuesta del filtro exponencial en una dimensión para diferentes valores de α .	53
17.- Respuesta del filtro exponencial como función de k_x para diferentes valores de α .	53
18.- Respuesta del filtro exponencial para diferentes valores de la frecuencia de corte k_c .	54
19.- Estructura de soporte del arreglo lineal de micrófonos. Micrófonos incrustados en cilindros de plástico soportados por alambres acerados.	56
20.- Micrófono omnidireccional Panasonic WM-61.	57
21.- Caja anecoica utilizada para calibración de micrófonos.	58
22.- Circuito de polarización y adquisición de datos.	59
23.- Patrón de directividad para arreglos de 7, 5 y 3 micrófonos separados 5 cm entre si.	60
24.- Patrón de directividad para arreglos de 3 micrófonos con distancia entre micrófonos de 5 y 10 cm.	61
25.- Esquema general del proceso experimental para la generación del patrón de directividad.	62
26.- Patrón de directividad horizontal teórico y medido para un arreglo de 7 micrófonos separados 5 cm entre si.	63
27.- Patrón de directividad teórico y medido para un arreglo de 5 micrófonos separados entre si 5 cm.	63
28.- Patrón de directividad teórico y medido para un arreglo de 3 micrófonos separados 10 cm.	64

FIGURA	PÁGINA
29.- Patrón de directividad teórico y medido para un arreglo de 3 micrófonos separados 15 cm.	64
30.- Diagrama de flujo para la captura de datos.	71
31.- Diagrama de flujo para la lectura y procesamiento de datos.	72
32.- Diagrama de flujo para realizar una reconstrucción holográfica.	73
33.- Menú principal de la interfaz gráfica “soundaq”.	74
34.- Ventana para seleccionar el archivo a procesar.	75
35.- Ventana de opciones de reporte de resultados.	75
36.- Mapa de la interfaz gráfica “soundaq”	76
37.- Esquema general para el barrido con los diferentes componentes del sistema de medición.	77
38.-Señales filtradas de cada canal en un disparo.	79
39.- Reporte de distribución de presiones acústicas.	79
40.- Reporte que muestra las variaciones de fase.	80
41.- Configuración del circuito amplificador para cada canal del arreglo de micrófonos.	81
42.- Tarjeta que contiene los ocho circuitos que amplifican las señales adquiridas.	81
43.- Estructura de soporte para el arreglo bidimensional de micrófonos.	83
44.- Micrófonos de 6 mm de diámetro alojados en cilindros de plástico.	83
45.- Diagrama funcional del multiplexor y configuración de pins.	84
46.- Circuito multiplexor.	85
47.- Calibrador marca Quest utilizado para la calibración de los micrófonos.	86
48.- Montaje en plataforma metálica de las tarjetas de polarización, multiplexeo, amplificación y block de terminales.	87
49.- Esquema general del experimento con un arreglo bidimensional de micrófonos.	87
50.- Representación en gráfica de contorno representando la radiación acústica medida por un arreglo lineal de 7 micrófonos.	91
51.- Distribución de presiones acústicas en el plano de la bocina resultado del proceso de reconstrucción holográfica.	92
52.- Intensidad acústica en el plano de una bocina.	93
53.- Distribución de presiones en el plano de medición de dos bocinas separadas 12 cm.	93
54.- Distribución de presiones sobre el plano de las bocinas.	94
55.- Intensidad acústica en el plano de dos bocinas separadas 12 cm.	95
56.- Distribución de presiones en el plano holográfico de dos bocinas separadas 9 cm.	95
57.- Retropropagación al plano de las bocinas separadas 9 cm.	96
58.- Intensidad acústica en el plano de dos bocinas separadas 9 cm.	97
59.- Distribución de presiones acústicas en el plano de medición de dos bocinas separadas 8.5 cm.	98
60.- Retropropagación sobre el plano de las bocinas separadas 8.5 cm.	98
61.-Distribución de presiones de una bocina en el plano de medición de un arreglo de 8 x 8 micrófonos.	100

FIGURA	PÁGINA
62.- Distribución de presiones sobre el plano de la bocina.	101
63.- Distribución de presiones sobre el plano de dos bocinas separadas 14 cm.	102
64.- Distribución de presiones sobre el plano de dos bocinas separadas 12 cm.	102
65.- Distribución de presiones en el plano de dos bocinas separadas 8.5 cm.	103
66.- Vista interna de la cámara forrada con tapetes fonoabsorbentes.	104
67.- Retropropagación de datos medidos dentro de cámara anecoica hacia el plano de bocinas separadas 20 cm.	105
68.- Retropropagación de datos medidos dentro de cámara anecoica hacia el plano de bocinas separadas 8.5 cm.	105
69.- Motor de inducción de jaula de ardilla y ventilador de oficina de 3 aspas	106
70.- Espectros de frecuencia de 8 canales de adquisición con datos medidos a un motor de inducción de jaula de ardilla.	108
71.- Distribución de presiones en el plano de medición de un motor de inducción según la componente de 1100 Hz.	109
72.- Contorno de la máquina sobrepuesto en la distribución de presiones sobre el plano del motor.	109
73.- Retropropagaciones en planos paralelos entre el motor y el arreglo de micrófonos.	110
74.- Esquema del experimento definiendo varios planos al motor eléctrico.	111
75.- Retropropagaciones de datos medidos al motor definiéndole diferentes planos.	112
76.- Distribución de presiones en el plano de medición de un ventilador de tres aspas.	113
77.- Distribución de presiones acústicas sobre el plano de un ventilador de tres aspas.	113
78.- Distribución de presiones de un ventilador en el plano de medición según la componente de 2.4 Khz.	114
79.- Retropropagación de los datos medidos hacia el plano del ventilador para una frecuencia de 2.4 Khz.	115

Índice de tablas

TABLA	PÁGINA
1.- Voltajes de salida y factores de calibración tomando al micrófono uno como referencia.	58
2.- Datos teóricos y medidos utilizados para generar el patrón de directividad horizontal de un arreglo lineal de 7 micrófonos separados 5 cm.	66
3.- Datos teóricos y medidos utilizados para generar el patrón de directividad horizontal de un arreglo lineal de 5 micrófonos separados 5 cm.	67
4.- Datos teóricos y medidos utilizados para generar el patrón de directividad horizontal de un arreglo lineal de 3 micrófonos separados 10 cm.	67
5.- Datos teóricos y medidos utilizados para generar el patrón de directividad horizontal de un arreglo lineal de 3 micrófonos separados 15 cm.	68
6.- Error relativo promediado para diversas aperturas calculado para los datos de las tablas 5.1 a 5.4.	69
7.- Error medio cuadrático calculado para los datos de las tablas 5.1 a 5.5	69

Capítulo 1

Introducción

Una imagen acústica es el agrupamiento ordenado de mediciones acústicas adquiridas en diferentes puntos de una superficie. Al asignarle una escala de colores a la variación del parámetro acústico medido, por ejemplo su amplitud, se genera una imagen acústica. El procesamiento de imágenes acústicas para la visualización de sonido se ha convertido en una herramienta invaluable en una variedad de disciplinas. En ingeniería, la localización de fuentes emisoras de ruido permite medir el desempeño de los productos. Por otro lado en medicina la detección de ecos de pulsos de ultrasonido, es una herramienta no invasiva de uso común para visualizar las estructuras internas del cuerpo humano.

En 1928, Sergei Y. Sokolov propuso una técnica basada en imágenes acústicas para la detección de grietas en los metales [1]. Él demostró que las ondas de sonido podían ser utilizadas como una nueva forma de microscopio basado en el principio de reflexión. En esta técnica una onda de sonido es transmitida hacia un lado de la muestra, al ser reflejada es captada por un receptor localizado en el punto de partida. Cuando una de estas ondas toca una grieta del material, la señal reflejada regresa con cierto retardo de tiempo, diferente al de una señal que toca la superficie en buenas condiciones. El retardo de tiempo se convierte en una medida para la localización de fisuras. Esta misma técnica, con el empleo de ultrasonido, es ahora utilizada en la obtención de imágenes médicas de alta resolución para la caracterización de órganos y tejidos de seres humanos [2-4].

Otra de las aplicaciones de los métodos para la generación de imágenes acústicas se encuentra en el diagnóstico de ruido mecánico, donde se busca la raíz que causa la vibración en una estructura. Tradicionalmente los diagnósticos se realizan utilizando un micrófono para medir el nivel de presión del sonido y conocer su contenido espectral de frecuencias, o bien mediante un escaneo con una sonda para medir la intensidad del sonido y buscar los “puntos calientes” que indiquen la presencia de una fuente de ruido y la dirección del flujo de energía acústica [5-6]. La ventaja de estos métodos es que proveen mediciones directas de alguna cantidad acústica, ya sea nivel de ruido o intensidad acústica. Entre sus desventajas destaca la imposibilidad de distinguir una fuente de ruido en la presencia de otras fuentes de sonido o superficies reflejantes.

Las limitaciones señaladas anteriormente pueden ser superadas si se utilizan métodos para reconstruir cantidades acústicas sobre la superficie de fuentes de sonido dadas las presiones acústicas medidas en el campo cercano. La ventaja de estos métodos es que se reconstruyen todas las cantidades acústicas tales como presión, intensidad y velocidad de las partículas en un espacio tridimensional. Uno de estos métodos que ha recibido la mayor atención en los últimos treinta años es la holografía acústica de campo cercano, NAH [7].

En este sentido, en esta tesis se utilizan arreglos de micrófonos para la visualización de fuentes de sonido en estructuras vibrantes, específicamente, máquinas eléctricas mediante el uso de la holografía acústica plana de campo cercano. Los resultados muestran imágenes de la radiación acústica de los principales componentes en movimiento de un motor de inducción y un ventilador.

1.1 Antecedentes de la holografía acústica

La holografía acústica aparece por primera vez a mediados de los años sesenta. Esta se refiere al cálculo de cantidades acústicas en tres dimensiones basadas en la medición de presión acústica en un plano. Las primeras mediciones en holografía acústica fueron hechas a distancias de las fuentes de sonido mayores a una longitud de onda, esto es, en el campo lejano. Con esto, la resolución espacial en la reconstrucción de un campo de sonido estaba limitada por la longitud de onda. Esto quiere decir, que dos fuentes puntuales no pueden ser resueltas si ellas están separadas por distancias menores a una longitud de onda. Esta limitante impide el análisis de estructuras vibrantes (maquinaria, instrumentos musicales, etc.) que en muchos casos son considerablemente más pequeñas que la longitud de onda que radian. Por lo tanto, la holografía acústica convencional es solamente una aproximación al problema inverso de la reconstrucción de campos de sonido [1].

En 1980, Earl G. Williams y J.D. Maynard desarrollaron una técnica llamada holografía acústica de campo cercano (NAH). Ellos demostraron teóricamente que la resolución era independiente de la longitud de onda [8]. Posteriormente, en trabajos como [9] y [10] muestran su desarrollo e implementación. Este método destaca por incluir o medir las ondas que decaen exponencialmente a medida que se propagan desde la fuente

de sonido y con esto poder reconstruir completamente el campo de sonido [11]. NAH es una metodología que permite la reconstrucción de las componentes de velocidad normal sobre una superficie de un objeto vibrante en un espacio tridimensional, basado en las mediciones de presión acústica sobre un plano en el campo cercano [9]. En el campo cercano de una fuente de sonido, el campo acústico está formado por dos clases de ondas: las que se propagan desde la fuente hacia el campo lejano y las ondas evanescentes que decaen exponencialmente en el campo cercano. Haciendo mediciones en el campo cercano, y por lo tanto capturando las ondas evanescentes antes que estas decaigan completamente, es posible obtener información de la localización de fuentes de ruido en estructuras vibrantes las cuales estén separadas por distancias menores a una longitud de onda. Debido a la amplia información que se obtiene, la técnica NAH se ha convertido en una herramienta costeable que ha llamado mucho la atención en el diagnóstico de ruido y vibración en estructuras.

Algunos trabajos como [12-13] solo se han enfocado en la utilización de estructuras planas como paneles o placas vibrantes conformes con el tipo de arreglo de sensores que utilizan. Además, estos estudios más allá de estar interesados en la visualización de fuentes de sonido, están dedicados a proponer nuevos métodos para la reconstrucción de campos acústicos basados no solo en la medición de presión acústica sino que utilizan también sensores no-acústicos para medir la velocidad de las partículas. Otros trabajos, como la presente tesis, se han dedicado a utilizar la holografía plana en la visualización de fuentes de sonidos de estructuras de geometría irregular como lo son las máquinas. En [14] se describe un método utilizando NAH para estimar la distribución de la velocidad normal de las partículas, basado en las mediciones de presión acústica bajo la condición de que la distancia entre la máquina y el arreglo de micrófonos es de una longitud de onda. Esta restricción es debido a que la geometría y operación de una máquina pueden condicionar la ubicación del instrumento de medición. Tomando en cuenta estas dificultades para llevar a cabo mediciones in situ, investigadores del Laboratorio de Precisión e Inteligencia del Instituto Tecnológico de Tokio [15-17] se han dedicado a desarrollar un arreglo bidimensional de micrófonos portátil que consiste de una matriz de 8 x 8 sensores cubriendo un área de 400 mm². Sin embargo, esto les ha

traído como consecuencia la introducción de errores de truncamiento en el proceso de aplicación de NAH por lo que el modelo óptimo de un filtro espacial es investigado.

NAH tiene características intrínsecas que limitan su uso para cierto tipo de aplicaciones. Al requerir de mediciones en campo cercano hechas en superficies conformes que encierren la fuente, se necesita utilizar también un arreglo de micrófonos conforme, es decir, la geometría del arreglo de micrófonos depende de la forma de la fuente de sonido. Aunque la versión original de NAH utiliza la expansión de ondas planas para representar un campo acústico, su teoría ha sido extendida a los sistemas de coordenadas esféricas y cilíndricas. En [18-23] se utiliza un método conocido como HELS (Helmholtz equation least squares) que no impone restricciones sobre la forma del arreglo de sensores su localización y la cantidad de mediciones. A diferencia de la holografía de campo cercano, HELS no busca una solución exacta para un campo acústico generado por una estructura de geometría irregular, sino que la presión acústica radiada es expresada como una expansión de funciones base. Los coeficientes asociados a estas funciones son determinados haciendo coincidir la solución supuesta con las mediciones de presión acústica. Los errores en el proceso son minimizados utilizando el método numérico de mínimos cuadrados.

Otro acercamiento al problema de la reconstrucción de campos acústicos generados por estructuras de forma irregular esta dado por un procedimiento conocido como IBEM (inverse boundary element method)[24]. Este método es un complemento a la técnica NAH, en donde la función de transferencia (propagador) entre la superficie de medición y la superficie a reconstruir es una matriz generada al resolver numéricamente las ecuaciones integrales de Helmholtz. Este procedimiento también es utilizado por [25-26] como complemento a una técnica basada también en mediciones en campo cercano denominada IFRF (inverse frequency response function). Aquí utiliza la matriz de transferencia para relacionar la velocidad medida con la velocidad normal sobre la superficie de una fuente de sonido. La desventaja en términos económicos de estos métodos es la utilización de un software especializado BEMSYS que es el encargado de generar la matriz de transferencia dividiendo a la estructura bajo estudio en un número suficiente de elementos para representar de forma precisa las ondas evanescentes.

1.2 Estado del arte en arreglos de sensores acústicos

Se realizó una búsqueda en base de datos de artículos científicos para conocer el estado actual de estudios relacionados con dos temas esenciales de esta tesis: la visualización acústica y el arreglo de micrófonos. Se encontró una variedad de trabajos que se aproximan pero que no coinciden plenamente con los métodos manejados en esta investigación: el empleo de NAH para la visualización de fuentes de ruido en máquinas eléctricas, empleando un arreglo cuadrado de micrófonos para la medición de sonido, determinando relativamente a la estructura de la máquina la posición de las principales contribuciones de ruido. Existen soluciones muy interesantes de visualización acústica, que aunque el objetivo sea diferente al de este trabajo, en algunos casos se usan las mismas técnicas, en otros casos puede ser un complemento, y en otros más puede ser algo completamente distinto. A continuación se describen brevemente algunos de los casos encontrados.

Cuando se pretende reducir el ruido acústico en algún punto, comúnmente se mide la presión en ese lugar para estimar su espectro y conocer sus características de frecuencia. Ahora cuando existen múltiples fuentes de ruido con la misma banda de frecuencias, se hace necesario conocer la contribución de cada una de éstas al espectro. Sin embargo el espectro de frecuencias no da información acerca de la contribución de cada una de las fuentes de ruido. En [27] se propone estimar las contribuciones de diversas fuentes incoherentes sin información a priori de su posición. Para ello utilizan la información espacial de un holograma y su campo reconstruido sobre la superficie de las fuentes utilizando la holografía acústica de campo cercano. Se asume que las fuentes son incoherentes una a otra, es decir que las funciones de coherencia entre fuentes son cero. Este supuesto puede ser aplicado a fuentes independientes las cuales no tienen una relación causal tal como el abanico y el disco duro de una computadora. Los resultados presentados en este trabajo son a nivel de simulación y estos, solo presentan gráficos cuya información pudiera ser utilizada para fines de control de ruido y no para visualizar y ubicar las diferentes fuentes de sonido de que se compone una estructura vibrante.

Por otro lado, en [28-29] desarrollan un sistema de medición de NAH en base al escaneo de un solo micrófono. El sistema se usa para determinar la directividad de una fuente plana de ruido a una frecuencia única. Aunque la presión (amplitud y fase) en una

plano cerca de la fuente se mide sobre una retícula de puntos con espaciado equidistante, sólo se busca superar problemas asociados a la medición en campo lejano, mas que aprovechar las ventajas teóricas de campo cercano; pues calculan la características de campo lejano de la fuente de ruido en base a las mediciones de campo cercano. En otro caso, un campo de presiones acústicas es regenerado en conformidad con una superficie compleja alrededor de una fuente de ruido y se le considera la entrada a un modelado numérico para la reconstrucción de campos vibro acústicos utilizando NAH [30]. Ya que la entrada de datos es de presiones regenerados y no medidas, en este tipo de investigaciones se busca mejorar la eficiencia en la reconstrucción.

Se han realizado investigaciones para estudiar fuentes aeroacústicas como de rotores de aeronave y turbinas de viento. Por ejemplo en el estudio [31], utilizan un arreglo de micrófonos para estudiar el rotor de un helicóptero. Doce micrófonos forman el arreglo a manera de compensar los requisitos que en la adquisición de datos y procesamiento impone la resolución deseada. Cada uno de los 12 micrófonos se extiende a partir de un cuadro tubular tal que quedan en un plano cuya perpendicular está en línea con el rotor (fuente de ruido). Este diseño particular del arreglo resulta valioso en las pruebas de flujo de aire en túnel abierto, y analiza casos de campo lejano. En un estudio sobre la cuantificación de fuentes de ruido de una turbina de viento para la generación de energía eléctrica [32], aunque utilizan métodos de acústica en campo lejano, presentan un esquema de hardware de medición y procesamiento semejante al que se ha utilizado en esta tesis. En dicha investigación, el arreglo de medición acústica consistió de 148 micrófonos Panasonic WM-61, montados sobre la horizontal de una plataforma de madera de 15 x 18 m², y la medición se realizaba a 58 m de la turbina. Los datos acústicos provenientes del arreglo de micrófonos se median en sincronía a una frecuencia de muestreo de 51.2 KHz, resultando un tiempo de medición de 30 s. Los datos se procesaban en bloques de 2048 muestras. Antes de las mediciones, se determinaba la sensibilidad a un 1 KHz del arreglo de micrófonos utilizando un pistón para calibrar. La retícula del arreglo, con un tamaño del mallado de 1m por ambos lados, se rotaba de acuerdo a la orientación de la turbina. Se buscaba encontrar las fuentes dominantes de ruido, ya que el ruido en las turbinas de viento es uno de los factores principales que inhiben el uso extendido de la energía eólica.

Los trabajos más cercanos al método implementado en esta tesis son los presentados en [9] y [33]. Es un arreglo cuadrado de micrófonos que miden la presión en un plano cerca de la fuente de ruido, y en donde desarrollan la teoría de NAH. El arreglo consta de 256 micrófonos para estudiar bajas frecuencias con un muestreo simultáneo para no perder la información de fase. Se estudian fuentes estacionarias puntuales tanto como placas rectangulares, en donde el arreglo de medición está cerca y conforme a la superficie del vibrador. No presentan datos acerca de la plataforma de software y la velocidad de análisis, principalmente se abocan a estudiar el efecto del muestreo sobre una apertura finita, para compararlo frente a la función continua que se supone al derivar la teoría básica.

Existen patentes que presentan una solución no-invasiva a la determinación de vibraciones en máquinas, que aunque involucran el escaneo de presión acústica in-situ mientras se opera en condiciones naturales de trabajo, se enfocan mas bien a tratar problemas muy específicos de configuración de la máquina o mecanismos, y no presentan en la medición un arreglo plano de sensores hacia el uso en motores eléctricos y su detección de partes giratorias. Por ejemplo, la patente [34] es un método que cuantifica la contribución relativa de los modos vibroacústico en la superficie de una estructura, pero resulta en una técnica costosa por que requiere de un vibrómetro láser de barrido para adquirir la velocidad normal a la superficie. Y estas velocidades superficiales se complementan con la medición de presión usando un arreglo de micrófonos colocados muy cercano a la máquina bajo observación para capturar los efectos del campo-cercano que son críticos en la reconstrucción de respuestas de la vibración en la superficie de una fuente. Además, el arreglo de sensores se conforma a la estructura explorada, lo que resulta más complicado de montar. Por otro lado, en la patente [35] se presenta un sistema para diagnostico rápido durante la manufactura de productos en línea, donde se extrae la presión de sonido y el espectro de una fuente cuya ubicación es conocida. Utiliza un arreglo de micrófonos que rodea en círculo al objeto analizado, por lo que se puede eliminar efectivamente el ruido de fondo que proviene de todas las direcciones. El principio asume que el campo de sonido se puede describir utilizando dos juegos de funciones de expansión, uno para la radiación que proviene de la fuente objetivo y el otro para los sonidos ambientales que viajan en dirección opuesta al

de la fuente objetivo. Esta suposición se adapta perfectamente al modelo acústico empleado en este invento, que aunque muy robusto en ambientes no-ideales demanda que el anillo de micrófonos este fijo alrededor de la fuente de sonido, resultando en poca flexibilidad para emplearse a diversos ambientes de prueba. La clave en los métodos y sistemas presentados en las patentes es el uso de algún algoritmo que se ajuste a condiciones especiales de exploración de máquinas objetivos; pero, no presentan una descripción del procesamiento digital de la señal, ni como la computadora controla la captura de datos, ni se presentan resultados, por lo que llega a ser imposible de reproducir experimentalmente para comparar resultados.

1.3 Motivación para la aplicación de arreglos de micrófonos

Muchas de las aplicaciones potenciales de la técnica NAH se encuentran a nivel industrial. Un considerable número de procesos y máquinas industriales generan altos niveles de ruido que pueden causar estrés físico y psicológico así como la pérdida gradual del oído. Esto en la industria va en detrimento de la salud de los trabajadores, además que bajo estas condiciones se reduce su desempeño. En la industria automotriz, en donde por regulaciones gubernamentales o por la creciente demanda de confort por parte de los clientes, el análisis de campos acústicos es utilizado para obtener una representación completa de las fuentes de sonido con una alta resolución, visualizando la forma de la radiación acústica a través de la cabina del vehículo y con ello poder detectar fallas tales como fugas de aire debido a la mala colocación de empaques en las puertas, fallas en el sistema de rotación de las llantas, etc. Diversas técnicas de arreglos acústicos son utilizadas en la identificación de fuentes de ruido para la evaluación y reducción de niveles de ruido. Las técnicas más comunes son: holografía acústica de campo lejano, holografía acústica de campo cercano (NAH), técnicas de arreglo temporal, y función de respuesta en frecuencia inversa (IFRF por sus siglas en inglés). Al parecer no hay un método único que sea fácil, rápido y exacto para todas las aplicaciones [36]. Pero aun así, los arreglos acústicos son una alternativa costeable a los métodos antiguos de identificación de fuentes de ruido, en donde se utilizaba el barrido de una sonda de intensidad sobre el objeto a probar para medir su intensidad y potencia del sonido. Con un arreglo de micrófonos el tiempo de prueba puede reducirse a un costo comparable al

de medición secuencial de intensidad, obteniendo una gran cantidad de información espacial.

Cada técnica de arreglo tiene ventajas y limitaciones que mejor se acomodan a una aplicación particular. Ninguna de las técnicas es la mejor para todas las condiciones de prueba y cada método puede modificarse o desarrollarse aun más [36].

En esta tesis se decidió utilizar la técnica NAH porque originalmente se desarrolló para localizar fuentes acústicas, y como está basada en la teoría de propagación de onda es aplicable a cualquier tipo de fuente que pueda radiar ondas; como el caso de holografía óptica. NAH calculará las fuentes que se encuentren sobre una superficie regular 2-D que hayan producido las presiones medidas en el plano holográfico. Su eficiencia computacional esta sujeta a campos de sonido generados por fuentes con geometrías simples, como placas, cilindros y fuentes puntuales. Si se violara la condición de que la fuente sea una superficie 2-D, aun así las cantidades acústicas en el plano de medición son válidas. Y estas cantidades pueden proyectarse exactamente en el campo lejano; mientras que su proyección hacia la superficie de la fuente puede ser inexacta para su identificación. Lo anterior se debe a que la difracción debido a las irregularidades en la superficie no ha sido considerada en el modelo de superficies simples y puede producir resultados espurios en la identificación de la fuente. Métodos que sean más exactos en superficies irregulares pueden formularse, pero con una considerable desventaja computacional. En este trabajo de investigación exploramos, además de fuentes de sonido simple, fuentes complejas provenientes de maquinas eléctricas conocidas, tal que se pueda observar el desempeño de la técnica NAH bajo estas situaciones.

1.4 Visualización de fuentes de sonido en máquinas eléctricas

La identificación de fuentes de ruido y su cancelación en máquinas eléctricas data desde los años 1940's debido a la introducción de nuevos materiales que sirvieron en el rediseño de motores de inducción y síncronos con rotores devanados, rotores de imán permanente o rotores de polos salientes[37]. En reportes que datan de los años sesenta [6], [38], por parte de la General Electric y la Standard Oil Company se dan algunas recomendaciones a nivel de diseño para disminuir las emisiones de ruido en motores

eléctricos. En estos estudios las fuentes de ruido en motores eléctricos las dividen en cuatro grandes categorías: magnético, mecánico, aerodinámico y electrónico.

Las fuentes de ruido magnético son debidas principalmente a fuerzas radiales presentes en el entrehierro, y fuerzas que se presentan en las ranuras del rotor. Una de las principales fuentes de ruido mecánico se encuentra en la estructura del estator. El estator de la máquina tiene una frecuencia natural, cuando la frecuencia de las fuerzas existentes se iguala a esta frecuencia, el estator entra en resonancia y emite ruido acústico. Otra causa de este tipo de fuente es debido a la carga inducida al motor, la cual incluye el ruido debido al acoplamiento de la máquina con la carga y el debido a su montaje en el piso. Por último, los accesorios auxiliares tales como baleros y escobillas de conmutación contribuyen a la emisión de ruido de origen mecánico. Los sistemas de enfriamiento (abanicos) de los motores constituyen fuentes de ruido aerodinámico. Algunas máquinas de inducción utilizan sistemas inversores de estado sólido donde los voltajes suministrados están lejos de representar una senoide debido al alto contenido de armónicas. Las armónicas más importantes son la quinta, séptima y la undécima. Las fuerzas generadas a estas frecuencias son algunas veces lo suficientemente altas como para producir ruido acústico considerable, en particular si las frecuencias están cerca de la frecuencia natural del estator[39].

Algunos métodos para la detección de las fuentes de ruido acústico descritas anteriormente están basados únicamente en el análisis espectral, tal como los presentados por [5] y [40]. En estos trabajos los resultados que se presentan constan de gráficos espectrales cuya interpretación se dificulta aún para aquellos que conozcan de los componentes básicos y la operación de una máquina eléctrica rotatoria. Lo anterior es debido a que con estos métodos no se establece o nos es posible observar una relación entre una componente espectral de una fuente de ruido y la parte de la estructura vibrante que lo produce.

Es por ello que en esta tesis se propone la holografía acústica de campo cercano como una herramienta para ser utilizada como un medio para visualizar y ubicar las fuentes de ruido acústico de los principales componentes de un motor eléctrico y con esto monitorear el estado que guarda la máquina. La utilización de esta herramienta sería un complemento a otros métodos de diagnóstico de fallas en máquinas rotatorias como el

desarrollado en la Facultad de Ingeniería campus Mexicali de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), donde se hace un estudio sobre el comportamiento térmico de un motor de inducción de jaula de ardilla localizando los puntos más calientes en la máquina [41]. Del resultado de este estudio se desprende una propuesta para determinar la temperatura máxima que alcanzará la máquina basado solo en una medición de temperatura sobre la carcasa del motor. Sin embargo, se piensa que la utilización de NAH pudiera adelantarse en su diagnóstico evitando que la máquina llegue a alcanzar altas temperaturas lo que va en detrimento de su vida útil.

1.5 Objetivo General

El objetivo general de esta investigación es el diseñar y construir un arreglo de sensores para investigar y validar experimentalmente la holografía acústica de campo cercano como medio para la visualización de fuentes de ruido en estado estacionario de estructuras vibrantes de forma irregular, en particular, las máquinas eléctricas rotatorias.

1.6 Justificación

Muchas de las aplicaciones potenciales de la técnica NAH se encuentran a nivel industrial, sin embargo, en la región no existen laboratorios equipados y capacitados para ofrecer un servicio de diagnóstico de campos acústicos en maquinaria. A nivel mundial existen compañías como la Brüel Kaejer y la SenSound que se especializan en estudios de campos acústicos, en particular, la transformación espacial de campos de sonido (STSF). Además de ofrecer los componentes y equipo especializado para el procesamiento y visualización de los datos. Sin embargo, su alto costo los hace inviables para efectos de investigación a nivel académico.

En este sentido, en la Facultad de Ingeniería de la UABC se realizan trabajos de investigación en donde se involucra el procesamiento de imágenes. Como se mencionó en la sección anterior, se realizó un estudio acerca del comportamiento térmico de un motor eléctrico en el que se procesan imágenes térmicas. Un estudio acerca del comportamiento acústico de máquinas eléctricas rotatorias viene a complementar y reforzar esta área de investigación y en un futuro integrar la instrumentación y el equipo humano especializado para aumentar la oferta de servicios externo a la Universidad.

1.7 Hipótesis

Es posible tener una herramienta que utilice el sonido de una máquina eléctrica rotatoria para monitorear el estado que guarda y utilizarlo como un medio alternativo a otros métodos de diagnóstico.

1.8 Metodología de investigación

Este trabajo inicia con la recopilación bibliográfica buscando temas acerca de visualización de sonido, holografía acústica, arreglos de micrófonos y sus aplicaciones. La búsqueda se enfocó principalmente en la holografía acústica de campo cercano, ya que este trabajo inicia con la colaboración del Dr. Shun Ichi Oshima investigador del Instituto Tecnológico de Japón quien llevaba al menos diez años trabajando en el tema.

De forma paralela al estudio de la teoría de la holografía acústica, se llevaban a cabo simulaciones en computadora para tener una idea más clara de lo que se esperaba en las pruebas experimentales. Después le siguió la parte instrumental, iniciando con pruebas de captura de señales acústicas con algunos micrófonos de uso común. Luego de hacer algunas pruebas se decidió por utilizar micrófonos de electreto marca Panasonic WM-61 de 6 mm de diámetro, los cuales presentan buenas características operativas como bajo ruido y por otro lado su bajo costo. Con estos sensores se inicia la construcción de un arreglo lineal de 7 micrófonos. Nuevamente se hacen pruebas de adquisición de señal utilizando para ello como fuente de sonido un altavoz de 30 watts. A manera de probar el desempeño del arreglo lineal se decide realizar mediciones para obtener el patrón de directividad horizontal y compararlo con el patrón teórico.

Por otro lado se iba desarrollando una interfaz gráfica en Matlab para aplicar la técnica NAH. Con una primera versión de esta interfaz se realizaron pruebas mediante el barrido manual del arreglo utilizando como fuente de sonido bocinas de 2 cm de diámetro y 0.2 watts. En estas mediciones se usó un octavo micrófono que era colocado junto con la fuente de sonido y era utilizado como micrófono de referencia para determinar posteriormente la fase de cada una de las señales del arreglo lineal. Los escaneos mecánicos llevaban demasiado tiempo, aproximadamente 30 minutos, por lo que se decidió automatizar las mediciones a través de un arreglo bidimensional de micrófonos

en donde el barrido se efectuó mediante multiplexores. Contando ya con este nuevo instrumento y junto con la nueva versión de la interfaz gráfica adaptada a la matriz de sensores se procede dentro de una cámara anecoica a repetir los experimentos que anteriormente se habían efectuado con una y dos bocinas. El tiempo de cada experimento se redujo considerablemente, de 30 minutos a 24 segundos.

La última etapa de este trabajo y la más trascendental fue la de aplicar la holografía acústica de campo cercano a la visualización de fuentes de sonido a estructuras vibrantes de forma irregular y cuyos campos acústicos son complejos y ubicación de las partes móviles de una máquina eléctrica rotatoria. Para esto se hicieron experimentos con un motor de inducción de jaula de ardilla de 1 HP y un pequeño ventilador de oficina, cuya estructura principal consta de un motor eléctrico y tres aspas. Con estos experimentos se pretendía visualizar la radiación acústica y ubicar las principales partes móviles de estas máquinas. En el caso del motor de inducción se hicieron pruebas adicionales con el objetivo de introducirnos dentro de la máquina, esto es, dar un acercamiento de cómo los patrones de radiación acústica van cambiando a través de su estructura.

1.9 Aportaciones

Las contribuciones de este trabajo de investigación han sido clasificadas en cuanto a:

LA TESIS:

- Empleo combinado de un método establecido de acústica de Fourier, el diseño de un arreglo bidimensional de sensores, la programación con software matemático y ambiente interactivo para la visualización de campos acústicos.

EL USO DE NAH:

- Se extiende la aplicación del modelo NAH, del uso de fuentes puntual de sonido a fuentes con geometrías irregulares.
- NAH se utiliza como una herramienta de diagnóstico en máquinas eléctricas.
- Se utiliza NAH para reconstruir planos de un campo acústico en el interior de un objeto heterogéneo (compuesto con partes de diversa densidad).

LA METODOLOGÍA:

- Determinación de la fase con respecto a un micrófono externo, filtrando una armónica de interés y tomado el pico máximo de la señal de referencia como tiempo de inicio.
- La presión acústica promediada espacialmente al inventanar un número de muestras de toda la secuencia capturada y realizar la FFT.

EL MÉTODO EXPERIMENTAL Y MATERIALES:

- La automatización y multiplexión de lecturas reduce considerablemente el tiempo de la reconstrucción de un campo de sonido a solo 24 segundos; en consecuencia se puede dedicar más tiempo al análisis de datos.
- Al utilizar una estructura mallada de soporte para el arreglo de micrófonos se facilita la reconfiguración precisa de la distancia entre micrófonos, a la vez que se simplifica la calibración. Con una conexión estructural de secciones de malla se puede cubrir un área mayor, creciendo la apertura de medición y permitiendo examinar fuentes multi-direccionales sin perder información.
- Algoritmo de retropropagación 3D incorporado a una interfaz gráfica genera un archivo de fotogramas a intervalos predefinidos que permite la visualización de fuentes de sonido en estado estacionario de estructuras vibrantes, lo cual es útil para discernir rasgos 3D sobresalientes de campos acústicos complejos en tiempo real.

LAS HERRAMIENTAS DE REDES DE INVESTIGACIÓN

- Se establecieron vínculos académicos con investigadores el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) de la Universidad Nacional Autónoma de México y del Laboratorio de Precisión e Inteligencia del Instituto Tecnológico de Tokio, Japón.

LOS RESULTADOS (uso en diagnóstico)

- Con un diseño propio de un arreglo de micrófonos se logra alcanzar la resolución práctica de media longitud de onda.
- Se diseña y construye un instrumento para el diagnóstico de máquinas eléctricas rotatorias a través de la visualización de la radiación acústica de sus partes en movimiento. La utilización de esta herramienta es un complemento a otros métodos de diagnóstico de fallas en máquinas rotatorias, por ejemplo, al método de comportamiento térmico.

- Se da una aproximación del comportamiento de la radiación acústica hacia el interior de una máquina eléctrica rotatoria.
- La interfaz gráfica facilita establecer la importancia relativa de las fuentes predominantes de ruido acústico para diferentes componentes de frecuencia en una máquina rotatoria. Además de que es posible observar una relación entre una componente espectral de una fuente de ruido y la parte de la estructura vibrante que lo produce.

LAS VENTAJAS DE PORTABILIDAD DEL ARREGLO

- El arreglo es adecuado para emplearse en el lugar mismo (*in-situ*) donde la máquina es operada, siendo muy robusto en ambientes no ideales.
- Por la velocidad de lectura, el sistema es útil para diagnóstico rápido del ruido en maquinaria *in-situ*.
- La estructura del arreglo de micrófonos en un plano se puede dirigir fácilmente al objeto de prueba y no está sujeto a la forma del objeto que se analiza.

EL ENRIQUECIMIENTO DE LAS DISCIPLINAS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA.

- Herramienta para el diagnóstico de máquinas eléctricas que viene a complementar los métodos tradicionales basados en el análisis espectral o térmico, desarrollados en la Facultad de Ingeniería, donde se hace un estudio sobre el comportamiento térmico-mecánico de motores de inducción de jaula de ardilla.

1.10 Organización de la tesis

Este trabajo se ha organizado de la siguiente forma:

En el capítulo dos, se exponen algunas bases teóricas sobre acústica, desde la definición de una onda acústica hasta la ecuación que representa su comportamiento así como algunos términos utilizados en holografía acústica. En el tercer capítulo, se aborda desde el punto de vista teórico, los arreglos de micrófonos. Se trata acerca de las principales características y tipos de micrófonos así como su principio de operación. Posteriormente, se presenta la teoría acerca del patrón de directividad de un arreglo lineal, utilizado en esta investigación para valorar su desempeño. El capítulo cuatro contiene la teoría básica de la holografía acústica de campo cercano. Aquí se tratan conceptos importantes para entender la aplicación de la técnica NAH, como lo son el espacio del número de onda y el espectro angular. Se establece también la relación que existe entre las variables presión acústica y velocidad normal de las partículas, haciendo también referencia a la relación que existe con la intensidad acústica. En el quinto capítulo, se dan los detalles del diseño y desarrollo instrumental de los prototipos utilizados para la medición, adquisición y procesamiento de datos. En esta parte se trabajó con un arreglo lineal y un arreglo en dos dimensiones de micrófonos. En el sexto capítulo se presentan los resultados obtenidos mostrando la capacidad del instrumento para distinguir entre dos fuentes de sonido separadas al menos media longitud de onda, así como los principales componentes móviles de una máquina eléctrica rotatoria. Como última parte de este documento se presentan las conclusiones de este trabajo de investigación.

Capítulo 2

Bases teóricas de acústica

La ciencia de la acústica trata con la creación, transmisión y efectos del sonido en materiales vivientes e inertes. Como un efecto mecánico, el sonido es esencialmente el paso de fluctuaciones de presión a través de la materia como resultado de fuerzas vibratorias actuando en el medio. El sonido posee los atributos del fenómeno de onda, así como las señales de luz y de radio. Pero a diferencia de las ondas electromagnéticas, el sonido no puede viajar en el vacío.

El dominio de la acústica moderna va más allá del rango audible, sus alcances abarcan el ultrasonido ($>20\text{kHz}$) y el infrasonido ($< 20\text{ Hz}$). Como resultado se pueden encontrar aplicaciones en la ciencia de los materiales, medicina, oceanología, navegación marina, comunicaciones, procesos industriales, música, bioacústica animal, cancelación de ruido y control de ruido ambiental, [42].

Este capítulo tiene como intención presentar algunas variables involucradas en el estudio de la acústica como lo son la frecuencia y la longitud de onda, así como la relación que existe entre ambas. Además se definen los conceptos de ondas planas y complejas que es el tipo de ondas que se consideran bajo estudio en este trabajo. En la parte experimental de esta tesis se hacen mediciones de presiones acústicas que junto con la técnica NAH es posible determinar la velocidad normal de las partículas, es por ello que como parte final de este capítulo se establece una relación entre la presión acústica y la velocidad normal de las partículas (ecuación de Euler); aprovechando esta relación se muestra el carácter ondulatorio del sonido mediante un desarrollo que concluye con la ecuación de onda.

2.1 Ondas acústicas

El sonido es un disturbio mecánico que viaja con una velocidad característica del medio elástico en el que se propaga. Debido a su naturaleza ondulatoria, el sonido puede contener una sola frecuencia, como es el caso de una onda senoidal en estado estable, o muchas componentes de frecuencia, como el generado por maquinaria. Una onda de sonido pura puede representarse por una función seno, como se muestra en la figura 2.1,

donde la abscisa representa el tiempo y la ordenada puede representar el desplazamiento de las partículas, la presión, densidad o la velocidad de las partículas que se propagan en el medio.

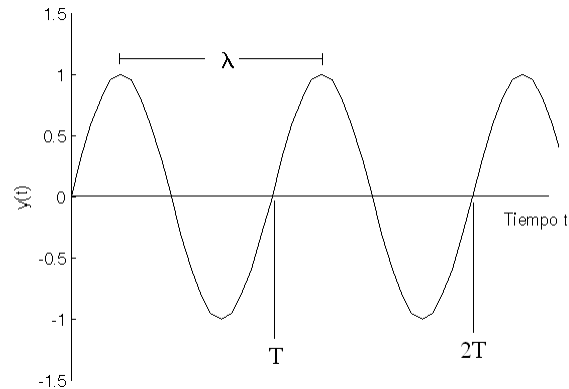


Figura 2.1. Gráfica de la función seno.

Cuando la ordenada representa la presión acústica, el semiciclo positivo corresponde a la fase de compresión y el semiciclo negativo a la fase de rarefacción. El número de veces que la presión de sonido varía desde su punto de equilibrio a través de un ciclo completo por unidad de tiempo se le conoce como frecuencia y es denotada por la letra f y su unidad es el hertz (Hz) que equivale a 1 ciclo/segundo.

La frecuencia en hertz se puede expresar también en términos de la frecuencia angular dada en radianes por segundo

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}, \quad (2.1)$$

donde T representa el periodo. De la ecuación (2.1) se puede deducir que el recíproco del periodo es simplemente la frecuencia f . La distancia espacial desde un punto de un ciclo hasta el correspondiente punto de otro ciclo se le denomina longitud de onda λ . La longitud de onda y la frecuencia de un tono puro están relacionados por:

$$\lambda = \frac{v_p}{f} \quad (2.2)$$

donde v_p representa la velocidad de propagación.

El rango audible para los seres humanos se encuentra entre los 20 Hz y 20 KHz. Las señales acústicas por arriba de los 20 kHz se denominan ultrasónicas y las que se encuentran por debajo de los 20 Hz, infrasónicas.

Considere el sonido generado por una superficie vibratoria localizada en el plano $x = 0$ tal y como se muestra en la figura 2.2. El desplazamiento de la superficie hacia la derecha, en la dirección $+x$, produce una compresión sobre la capa de aire adyacente a la superficie causando un incremento en la densidad de aire en esta capa. Debido a que la presión en esta capa es mayor que la de la atmósfera no perturbada las moléculas de aire en esta capa tienden a moverse también en la dirección $+x$ y comprimen una segunda capa, la cual a su vez, transmite el impulso de presión a una tercera, y así sucesivamente. Pero cuando el plano de la superficie vibrante se mueve ahora en la dirección $-x$, un efecto opuesto ocurre, el de rarefacción. Esta rarefacción decrementa la presión a un valor por debajo de la atmósfera no perturbada. Ahora las moléculas de aire contenidas en las capas adyacentes a la superficie se mueven en la dirección $-x$. Esta sucesión de compresiones y rarefacciones constituye un movimiento ondulatorio. Las moléculas vibrantes que transmiten las ondas, en promedio no cambian su posición, es decir, solo tienen un movimiento hacia adelante y hacia atrás. La distancia que estas partículas se mueven a partir de su punto de equilibrio se conoce como amplitud de desplazamiento y la velocidad a la cual estas se mueven hacia delante o hacia atrás se denomina velocidad de las partículas. Por lo que no hay que confundir la velocidad característica con que se propaga la onda de sonido en el medio con la velocidad de las partículas.

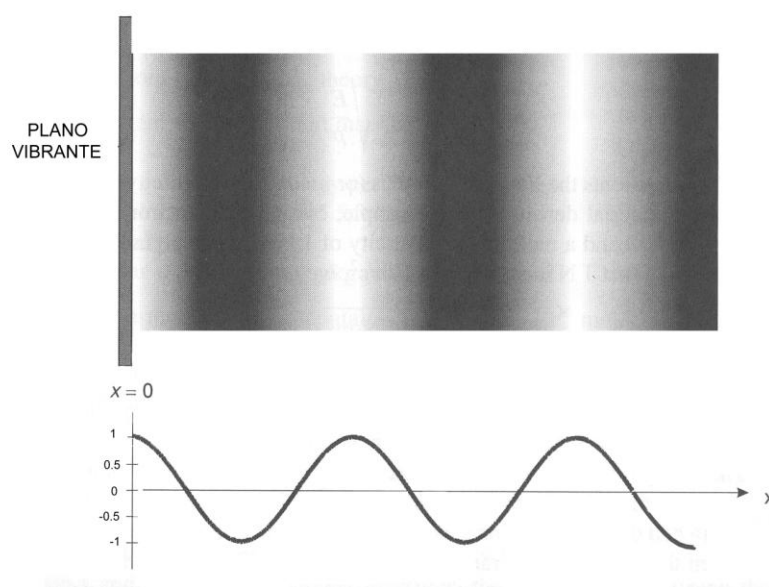


Figura 2.2. Plano vibrante describiendo la compresión y rarefacción de las moléculas. El grado de oscuridad es proporcional a la densidad de las partículas.

El sonido viaja más rápido en sólidos que en gases. A una temperatura de 20°C el sonido se mueve a razón de 340 m/s a través del aire en condiciones normales de presión atmosférica de 101 kPa (760 mmHg). La velocidad del sonido es aún mayor en líquidos que en los gases, pero menor que en los sólidos.

2.2 Propagación de ondas planas

Las ondas audibles se originan en cuerdas vibrantes, columnas de aire vibrantes, placas y membranas vibrantes. Todos estos elementos vibrantes comprimen al aire que los rodea en un movimiento hacia delante y lo rarifica en un movimiento hacia atrás. El aire transmite estas perturbaciones como una onda a partir de la fuente. Cuando esta onda avanza, un pequeño elemento de volumen de fluido (i.e. aire) oscila alrededor de su posición de equilibrio. Sea y el desplazamiento de este elemento de volumen a partir de su posición de equilibrio en x . Entonces, la ecuación de esta onda longitudinal viajando hacia la derecha se escribe como

$$y = f(x - v_p t) \quad (2.3)$$

En el caso particular de una oscilación armónica simple, se tiene

$$y = y_m \cos \frac{2\pi(x - v_p t)}{\lambda} = y_m \cos k(x - v_p t) \quad (2.4)$$

donde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, es el número de onda.

Entonces, al referirse a la propagación de ondas planas, debe pensarse en aquellas ondas que se propagan en una sola dirección ya que también existen las ondas esféricas las cuales se propagan en todas direcciones.

2.3 Ondas Complejas

Las ondas de presión generadas por bombas, engranes y otros tipos de maquinaria rotatoria son usualmente complejas y periódicas. Una onda compleja puede ser representada como la sumatoria de ondas sinusoidales simples con diferentes frecuencias denominadas armónicas. En la figura 2.3 se muestra un ejemplo de una onda compleja y

sus armónicas. En este ejemplo, la relación entre las armónicas es tal que la frecuencia de una de ellas es el doble de la otra. La senoide de menor frecuencia recibe el nombre de fundamental, la siguiente, segunda armónica y así sucesivamente.

En el análisis de ruido emanado de máquinas rotatorias, existen frecuentemente de 8 a 10 armónicas presentes con frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental [42].

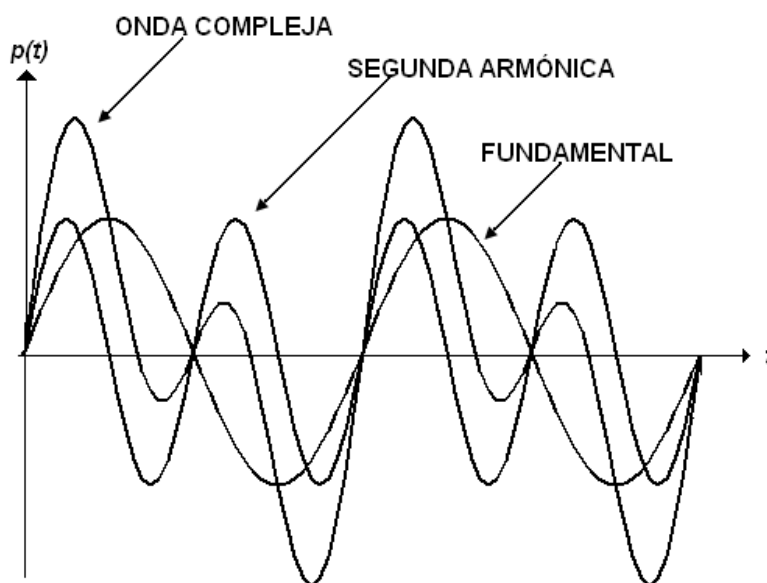


Figura 2.3. Onda compleja descompuesta en su fundamental y su segunda armónica.

Una ecuación general que incorpore los elementos de presión acústica asociados con una fuente de sonido compleja puede ser escrita como

$$p(t) = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + A_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (2.5)$$

donde A_n es la amplitud y ϕ_n es el ángulo de fase de la n -ésima armónica. La ecuación (2.5) constituye una forma de la serie de Fourier, una herramienta analítica desarrollada por el físico francés Jean Baptiste Joseph Fourier. El concepto de Fourier es una de las herramientas analíticas más poderosas de que se dispone actualmente dentro de la acústica.

2.4 Ecuación de onda

Una onda es una magnitud física que se propaga en el espacio y en el tiempo. Matemáticamente se expresa como una función del espacio y el tiempo, pudiendo corresponder a magnitudes tan dispares como la altura de una ola de agua, los impulsos eléctricos que rigen los latidos del corazón, o incluso la probabilidad de encontrar una partícula en mecánica cuántica.

Centrando la atención en las ondas sonoras, estas se representan como una función de las variaciones de presión que se propagan en el espacio y el tiempo formando lo que se conoce como campo acústico. La propagación de las ondas sonoras en cualquier medio es el resultado de la acción combinada de tres factores. Refiriéndose al caso de la propagación en gases, siendo en líquidos y sólidos exactamente lo mismo, los tres fenómenos son los siguientes:

- 1.- El gas se mueve y varía la densidad.
- 2.- La variación de densidad provoca variaciones de presión.
- 3.- Las variaciones de presión generan movimientos en el gas, volviendo al punto uno.

Es importante mencionar que la presión p es una cantidad escalar, es decir, no hay una dirección asociada con ella. Sus unidades están dadas en N/m^2 o pascales. Lo siguiente es la convención que se toma para la presión:

$p > 0 \rightarrow$ Compresión

$p < 0 \rightarrow$ Rarefacción.

Considérese un elemento de volumen infinitesimal de un fluido tal como se muestra en la figura 2.4. Todas las caras de este volumen experimentan fuerzas debidas a la presión p .

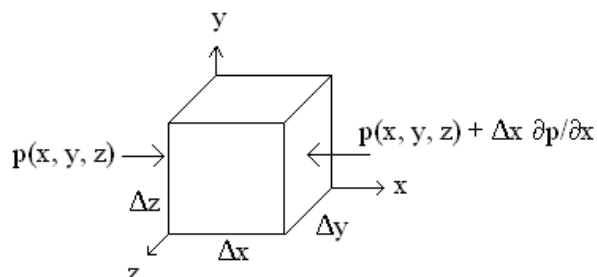


Figura 2.4. Elemento infinitesimal de fluido experimentando fuerzas debido a la presión p .

En un punto del fluido, una presión positiva indica que un volumen infinitesimal alrededor de este punto está bajo compresión, dando lugar a fuerzas saliendo de este volumen. Se sigue entonces que si una presión en la cara izquierda del volumen de la figura 2.4 es positiva, entonces existe una fuerza en la dirección positiva del eje x con magnitud $p(x, y, z) \Delta y \Delta z$. Ahora en la cara opuesta, una presión $p(x + \Delta x, y, z)$ da lugar a una fuerza en la dirección negativa del eje x . Dadas las direcciones de las presiones mostradas en la figura 2.4, la sumatoria de las fuerzas debidas a ellas en la dirección x está dada por:

$$\sum F_x = p(x, y, z) \Delta y \Delta z - p(x + \Delta x, y, z) \Delta y \Delta z \quad (2.6)$$

expandiendo $p(x + \Delta x, y, z)$ con la serie de Taylor y conservando el término de primer orden se tiene que

$$p(x + \Delta x, y, z) \approx p(x, y, z) + \Delta x \frac{\partial p}{\partial x},$$

quedando la ecuación (2.6) como

$$\sum F_x = -\Delta x \Delta y \Delta z \frac{\partial p}{\partial x}. \quad (2.7)$$

De la segunda ley de Newton se tiene que,

$$f = ma = m \frac{\partial \dot{u}}{\partial t},$$

donde f es la fuerza, $m = \rho_0 \Delta x \Delta y \Delta z$ es la masa, ρ_0 es la densidad volumétrica del fluido y \dot{u} es la componente en x del vector velocidad $\mathbf{v} = \dot{u}\hat{i} + \dot{v}\hat{j} + \dot{w}\hat{k}$; \dot{v} y \dot{w} son las componentes de la velocidad en las direcciones y y z , respectivamente. Tomando en cuenta lo anterior, la ecuación (2.7) toma la forma

$$\rho_0 \frac{\partial \dot{u}}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x}. \quad (2.8)$$

Haciendo el mismo análisis en las direcciones x y y se llega a las siguientes dos expresiones

$$\rho_0 \frac{\partial \dot{v}}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial y} \quad (2.9)$$

$$\rho_0 \frac{\partial \dot{w}}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial z}. \quad (2.10)$$

Combinando las tres últimas expresiones en una sola y utilizando notación vectorial se da lugar a una ecuación conocida como ecuación de Euler

$$\rho_0 \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\vec{\nabla} p \quad (2.11)$$

donde $\vec{\nabla} \equiv \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k}$

Ahora considérese el principio de conservación de la masa calculando la masa del fluido en el elemento de volumen antes y después de la compresión,

$$\rho_0 v_p t \Delta y \Delta z = \rho_0 + \rho v_p t - ut \Delta y \Delta z \quad (2.12)$$

donde v_p es la velocidad de propagación de la onda. El incremento de densidad ρ es muy pequeño comparado a ρ_0 . También, la velocidad de las partículas es muy pequeña comparada con la velocidad de propagación de la onda. Por lo anterior el producto $\rho \dot{u}$ que resulta al desarrollar el lado derecho de la ecuación (2.12) se desprecia dando lugar a lo siguiente

$$\dot{u} = \frac{\rho v_p}{\rho_0} \quad (2.13)$$

además se tiene que la fuerza neta aplicada al elemento de volumen puede ser escrita como

$$p\Delta y\Delta z = \frac{d}{dt} (\rho_0 v_p t \Delta y\Delta z \dot{u}) \quad (2.14)$$

de donde se desprende que

$$p = \rho_0 v_p \dot{u} \quad (2.15)$$

Combinado las ecuaciones (2.13) y (2.15) se muestra que

$$p = v_p^2 \rho \quad (2.16)$$

Ahora bien, continuando con la aplicación del principio de conservación de la masa, el flujo a través del volumen está dado por

$$\rho_T \dot{u} \Delta y \Delta z - \left[\rho_T \dot{u} + \frac{\partial \rho_T \dot{u}}{\partial x} \Delta x \right] \Delta y \Delta z = - \frac{\partial \rho_T \dot{u}}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.17)$$

donde $\rho_T = \rho_0 + \rho$. El principio de conservación de la masa requiere que este flujo sea balanceado con un incremento en la masa del elemento. La razón de incremento de la masa dentro del volumen está dado por $\frac{\partial \rho_T}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z$. Si igualamos la razón de masa fluyendo a través del volumen con la razón de incremento de masa tendremos

$$\frac{\partial \rho_T}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_T \dot{u})}{\partial x} = 0 \quad (2.18)$$

Considerando el producto $\rho_T \dot{u} = (\rho_0 + \rho) \dot{u}$, vuelve a aparecer la pequeña cantidad dada por el producto $\rho \dot{u}$, el cual se desprecia. Además ρ_0 no es una función de x ni de t , por lo que la ecuación (2.18) se reduce a

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial \dot{u}}{\partial x} = 0 \quad (2.19)$$

Diferenciando con respecto al tiempo la ecuación (2.19) y diferenciando la ecuación (2.8) respecto a x y combinando los resultados se llega a la relación

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} = 0 \quad (2.20)$$

y de la ecuación (2.16) tenemos que $\rho = p/v_p^2$, entonces la ecuación anterior toma la forma

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{1}{v_p^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0. \quad (2.21)$$

La ecuación anterior representa la ecuación de onda en una dimensión y su versión en tres dimensiones está dada por

$$\nabla^2 p - \frac{1}{v_p^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0. \quad (2.22)$$

Capítulo 3

Arreglo de micrófonos

El estudio y aplicación de arreglo de micrófonos se originó hace más de dos décadas. Debido a la investigación y desarrollos experimentales obtenidos hasta la fecha, este campo ha madurado hasta un punto en que la tecnología basada en arreglo de micrófonos tiene una aplicabilidad inmediata con un amplio potencial para la implementación en productos existentes y el desarrollo de nuevos dispositivos [43]. A continuación se da una descripción de los tipos de sensores electroacústicos que pueden ser utilizados en arreglos de micrófonos. Se dan algunas referencias con aplicaciones en la localización y seguimiento de fuentes de sonido en movimiento y el reconocimiento de voz. Así también algunos dispositivos que se han desarrollado con estas aplicaciones.

Por último se expone la teoría básica del patrón de directividad de un arreglo de micrófonos. Se hace un breve desarrollo para mostrar la función que representa el patrón de directividad horizontal de un arreglo lineal de micrófonos, la cual es utilizada en el capítulo 5 para comparar los patrones teóricos y medidos de un arreglo lineal de 7 micrófonos.

3.1 Micrófonos

El tipo más común de transductor acústico es el micrófono. Dispositivo diseñado para producir una señal eléctrica que refleja la presión acústica presente en el aire inmediatamente frente al micrófono. Se pueden encontrar muchos tipos de micrófonos comercialmente disponibles para diferentes aplicaciones como, comunicaciones, grabación de voz y música, de uso general y micrófonos para mediciones.

Cinco tipos de propiedades determinan la conveniencia de utilizar un micrófono en alguna aplicación específica, [44]:

Desempeño electroacústico: habilidad de un micrófono para desempeñar una tarea para el cual fue diseñado, generalmente medido en términos de su sensibilidad, directividad, respuesta en frecuencia, respuesta transitoria, linealidad, relación señal a ruido y el rango dinámico.

Características eléctricas: la impedancia de salida de un micrófono determina el método conveniente para amplificar su señal.

Sensibilidad a influencias externas: la habilidad de un micrófono para operar independientemente de la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento.

Costo. Factor muy importante en casos en donde el presupuesto es bajo (investigación académica) y alguna de las propiedades anteriores se tienen que sacrificar, como por ejemplo, los arreglos de micrófonos, donde se requieren varios de estos dispositivos.

La importancia relativa de cada una de las propiedades depende de la aplicación que se le pretende dar al micrófono, por ejemplo, si deseamos un transductor para uso general, la sensibilidad a influencias externas no será un factor importante para su selección.

3.1.1 Tipos de micrófonos

Los micrófonos son transductores que reciben y sensan fluctuaciones de presión y las convierte en señales eléctricas. La calidad de un micrófono determina la precisión de un sistema de medición. Cuatro tipos de micrófonos son los más utilizados en procesos de medición:

- Dinámico
- Cerámico
- Electreto
- Tipo condensador

Los tipos dinámico producen una señal eléctrica a través del movimiento de una bobina conectada al diafragma en un campo magnético. Estos son en realidad bocinas operando en sentido inverso, recibiendo una señal acústica y convirtiéndola en pulsaciones eléctricas. Debido a su baja impedancia, pueden ser usados en aplicaciones que se necesiten largos cables para la conexión a instrumentos auxiliares. Pero no pueden ser usados cerca de campos magnéticos emitidos por motores o transformadores.

Los micrófonos tipo cerámico, consisten en un elemento piezoeléctrico unido a la parte trasera del diafragma. La presión acústica hace que el diafragma vibre produciendo una fuerza variable sobre el elemento cerámico y este a su vez genera una señal eléctrica. Estos micrófonos son relativamente baratos, tienen una alta capacitancia y un buen rango dinámico y no requieren de un voltaje de polarización externa como los del tipo condensador.

Los de electreto o electreto-condensador, ilustrado en la figura 3.1, tienen un diafragma con una capa delgada autopolarizada de electreto. La presión del sonido ocasiona que el diafragma tenga un movimiento relativo respecto al plato metálico trasero del micrófono, haciendo variar su capacitancia, produciendo una señal eléctrica. Estos micrófonos son más baratos que los de tipo condensador y pueden ser utilizados en ambientes húmedos sin presentar arqueos.

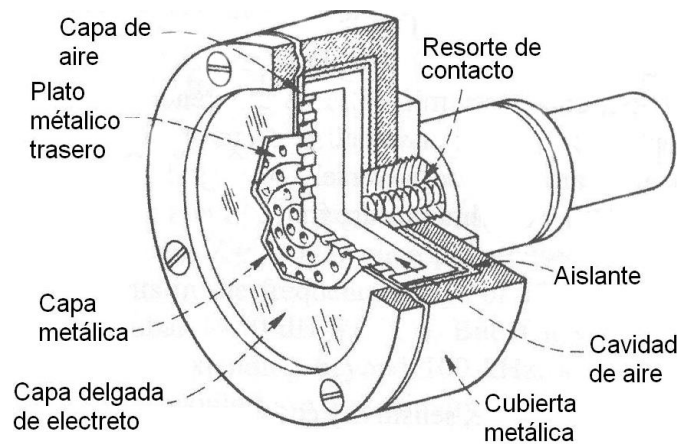


Figura 3.1. Vista en corte de un micrófono tipo electreto.

Los micrófonos tipo condensador son dispositivos de capacitancia variable; estos consisten de dos placas cargadas eléctricamente separadas por una capa de aire. El diafragma sirve como una placa que se defleja bajo la influencia de presiones de sonido, ocasionando que la distancia entre las dos placas varíe. La variación resultante en capacitancia es traducida en una señal eléctrica. La figura 3.2 ilustra los principales componentes de un micrófono tipo condensador. Estos dispositivos tienen relativamente una baja capacitancia, pero a diferencia de los tipo electreto, requieren de un voltaje de polarización externo así como una etapa de preamplificación que provee la impedancia

apropiada para que el micrófono sea conectado al sistema de medición. Debido a su estabilidad de largo plazo, su alta respuesta en frecuencia, insensibilidad a excitación por vibración, estos micrófonos son generalmente utilizados para mediciones de precisión. Tienen la desventaja que son afectados por las condiciones de humedad, la cual causa fugas eléctricas.

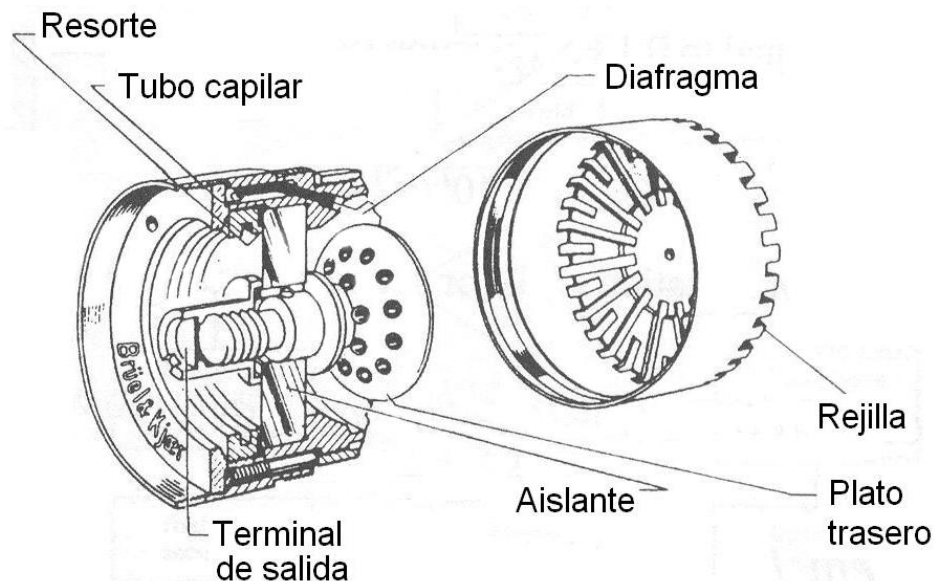


Figura 3.2. Principales elementos de un micrófono tipo condensador.

Sin importar el tipo de micrófono de que se trate, su desempeño acústico está determinado por sus dimensiones físicas, tales como el área del diafragma, la distancia entre el diafragma y el plato trasero, la rigidez y la masa del diafragma, y el volumen interno del micrófono. Estos factores determinan la respuesta en frecuencia del micrófono, su sensibilidad y el rango dinámico.

La respuesta en frecuencia se caracteriza por la intensidad de la señal eléctrica producida por el micrófono para una amplitud determinada de presión acústica a diferentes frecuencias. La respuesta ideal sería una gráfica completamente plana. En el caso real, para bajas frecuencias, la respuesta está limitada por la frecuencia de resonancia de la vibración mecánica del diafragma, y para frecuencias muy altas decrece rápidamente cuando la longitud de onda de la onda sonora es menor que el tamaño del diafragma.

Además de la respuesta en frecuencia, la sensibilidad constituye uno de las principales características de un transductor. En general, existe una “negociación” entre sensibilidad y respuesta en frecuencia. La sensibilidad de un micrófono está definida como la relación de la salida eléctrica a la entrada mecánica. El nivel de sensibilidad L_s , o simplemente sensibilidad está dado por

$$L_s = 10 \log \left(\frac{E_o / p}{E_r} \right)^2 = 20 \log \left(\frac{E_o}{p} \right) \text{ dB V}/\mu\text{bar}$$

donde

E_o = voltaje de salida del dispositivo.

E_r = voltaje de referencia (1V para una presión de 1 μ bar).

p = la presión rms en el micrófono.

El rango dinámico se refiere al rango de niveles sonoros en los que la señal eléctrica producida por el micrófono es lo suficientemente grande para ser utilizada. Por ejemplo, un medidor de nivel de ruido, el cual puede medir un mínimo de 10 dB y un máximo de 150 dB, cubre un rango dinámico de 140 dB [42].

3.2 Arreglo de micrófonos

Un arreglo de micrófonos consiste de un número determinado de sensores electroacústicos dispuestos en diferentes posiciones. Construidos bajo los principios de la propagación del sonido, las múltiples entradas de un arreglo pueden ser manipuladas para mejorar o para atenuar las señales emanadas de alguna dirección en particular. En este sentido, los arreglos de micrófonos tienen una vasta aplicación en el procesamiento y reconocimiento de voz [45]. El estudio e implementación de arreglo de micrófonos se originó hace más de veinte años. Gracias a la investigación y desarrollos experimentales logrados hasta hoy en día, este campo ha madurado al punto en que la tecnología basada en arreglo de sensores tiene ahora una inmediata aplicabilidad a un número de sistemas y un vasto potencial para la implementación de productos existentes y la creación de futuros dispositivos.

Una de las aplicaciones de los arreglos de micrófonos es la localización y seguimiento de fuentes de sonido. En [46] se utiliza un método para la localización y seguimiento de fuentes de sonido utilizando un arreglo de ocho micrófonos. Aquí las fuentes de sonido representan a seres humanos expresando verbalmente un mensaje dentro de una sala de videoconferencias. El método utiliza un formador de haz “beamformer” giratorio para la ubicación y seguimiento hasta de tres expositores en movimiento dentro de la sala. Uno de los problemas en este tipo de aplicaciones es la reverberación en las aulas, cuartos o auditorios donde se lleva a cabo la videoconferencia. En [47] y [48] se proponen métodos para la localización y seguimiento de fuentes de sonido en ambientes reverberantes. Uno utilizando la técnica conocida como TDOA, que mide la diferencia de tiempo de arribo de las señales acústicas y el otro basado en la identificación iterativa de los canales que ligan a la fuente y los micrófonos a través del método LMS (least mean square).

Dentro de la misma aplicación está la integración de un arreglo de micrófonos a una habitación y a un robot para el seguimiento de fuente de sonidos como una función en la operación diaria de un robot [49-50], ya que este debe reconocer el origen de eventos de sonido como voz, música y otros sonidos relacionados a su medio ambiente. El arreglo de micrófonos instalado en el cuarto consta de 64 micrófonos situados en las paredes formando con esto un arreglo bidimensional (2D). A su vez el robot tiene ocho micrófonos instalados en su cabeza para la localización azimutal de múltiples fuentes de sonido.

Otras aplicaciones solo se enfocan en la ubicación de fuentes de sonido. En [51] se propone la localización de un vehículo en movimiento. El método utiliza una bocina montada en el vehículo y un arreglo de 24 micrófonos distribuidos en el medio en que se mueve. Aquí el seguimiento del objeto bajo estudio se hace por medios ópticos. En [52] utilizan la estimación de la dirección de arribo (DOA, direction of arrival) de las señales de voz en la dirección horizontal mediante la información generada por cada par de micrófonos de un arreglo en forma de triángulo equilátero con un sensor en cada vértice. El método es extendido para estimar el ángulo de elevación utilizando cuatro micrófonos localizados en los vértices de un tetraedro regular. En [53] y [54] utilizan arreglos circulares para la localización de fuentes de sonido. En contraste con otras técnicas, aquí

se descompone el campo de sonido en armónicas cilíndricas como funciones base para un arreglo circular.

La detección y localización de oradores con arreglos de micrófonos es una tarea difícil debido a la naturaleza de las señales de voz, los traslapes entre conversaciones y la presencia de fuentes de ruido [55]. Algunos trabajos han utilizado arreglos de micrófonos para el reconocimiento y separación de voz en salas de reuniones. Las reuniones consisten de varias personas hablando al mismo tiempo dentro de un pequeño espacio, generalmente alrededor de una mesa. En [56] y [57] se proponen alternativas para el problema de separar las señales de voz de individuos que hablan simultáneamente mientras están siendo grabados por un arreglo de micrófonos. Basados en la observación de que la matriz de transferencia de señales entre los oradores y micrófonos se simplifica significativamente si se asegura que durante ciertos periodos de la conversación solo uno de los parlantes está activo mientras los demás permanecen en silencio, se proponen métodos para determinar tales periodos así como un procedimiento para la estimación de la matriz de transferencia. En [58] y [59] se investiga la separación de fuentes de sonido simultáneas en ambientes reverberantes empleando filtrado espacial basado en arreglo de micrófonos para mejorar las señales producidas por la separación de fuentes simultáneas.

Los arreglos de micrófonos ha permitido el desarrollo de nuevos dispositivos para el confort, seguridad y ayuda de seres humanos. En la telefonía móvil, se desarrollan sistemas para monitorear la voz en un ambiente ruidoso. En [60] se propone un método para el procesamiento de las señales y mejorar la recepción utilizando un arreglo de cuatro micrófonos considerando que la fuente de sonido se encuentra adyacente a este. Como un dispositivo auxiliar en la telefonía móvil, en [61] se propone el uso de un arreglo de ocho micrófonos dentro de la cabina de un automóvil para la reducción del ruido y el reconocimiento de voz. Esto como medida para evitar distracciones del conductor y mantener su atención en el tránsito vehicular.

En [62] se utiliza un arreglo de micrófonos como dispositivo para el sensado del tránsito en una calle. Las ondas de sonido generadas por los vehículos son detectadas, digitalizadas y procesadas mediante un algoritmo basado en la correlación que extrae datos clave que reflejan las condiciones del tránsito. Este sistema tiene la capacidad para

detectar la cantidad de vehículos, su velocidad y potencialmente la clase de vehículo en cada carril.

Otro dispositivo [63], consiste de un arreglo de tres micrófonos montados sobre unos lentes para la localización de fuentes de sonido como ayuda para personas con deficiencias auditivas, sordas o con ceguera. El artefacto se complementa de cuatro sensores vibro táctiles como medio para indicar la presencia de una fuente de sonido hasta en ocho diferentes direcciones. Otro dispositivo de ayuda para personas con deficiencia auditiva es propuesto en [64] y consiste de un arreglo de dos o más micrófonos montados sobre una estructura en forma de collar. El sistema de procesamiento recibe y combina las señales de tal manera que proporciona una señal de salida amplificada que representa a una fuente de interés que se encuentre frente al usuario. Esta señal produce un campo magnético alrededor del collar. Este campo magnético es capturado por un transductor electroacústico dispuesto en el oído del usuario generando la señal acústica representativa de la fuente de sonido de interés.

Actualmente se producen arreglos de micrófonos digitales embebidos [65] para ser instalados en computadoras personales. A su vez la compañía Microsoft [66] promociona una nueva tecnología basada en arreglo de micrófonos. Esta compañía desarrollo un software para computadoras equipadas con arreglos de dos o cuatro micrófonos para procesar las señales de audio y cancelar el ruido causado por la interferencia eléctrica propia de la computadora así como el ruido acústico ambiental.

3.2.1 Patrón de directividad de un arreglo lineal de micrófonos

La respuesta de un arreglo de transductores electroacústicos es inherentemente direccional, ya que la cantidad de señal “vista” por el arreglo varía con la dirección de arribo de la señal [45]. Dicha respuesta puede ser ilustrada mediante un patrón de directividad.

El patrón de directividad dá la respuesta del arreglo como función de la frecuencia y la dirección de arribo de la señal. Si A_R es la función de sensibilidad del arreglo, que define la respuesta en frecuencia como una función de la posición espacial a lo largo del arreglo, entonces, su patrón de directividad en campo lejano está dado por

$$D_R(\mathbf{k}, \omega) = \mathfrak{F}_r \left\{ A_R(\mathbf{r}, \omega) \right\} = \int_{-\infty}^{\infty} A_R(\mathbf{r}, \omega) e^{j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} d\mathbf{r} \quad (3.1)$$

donde \mathfrak{F}_r denota la transformada de Fourier en tres dimensiones, aquí \mathbf{k} representa a un vector de dirección de la onda,

$$\mathbf{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \begin{bmatrix} \sin\theta \cos\phi \\ \sin\theta \sin\phi \\ \cos\theta \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

en donde está implícito que $\lambda = v_p / f$; v_p es la velocidad de propagación y f la frecuencia de la onda. En la figura 3.3 se pueden apreciar los ángulos θ y ϕ así como la distancia r . El vector \mathbf{r} es un vector que da la localización espacial de un punto a lo largo del arreglo y esta dado por

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

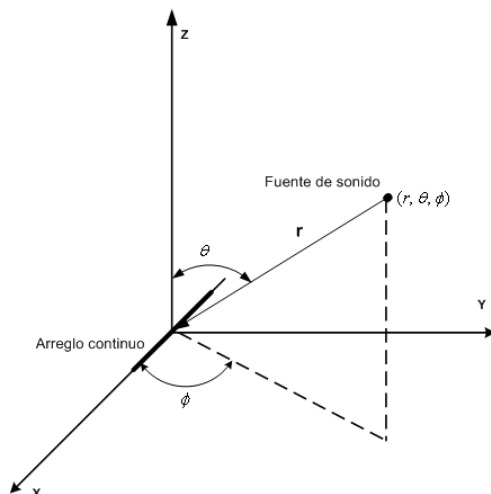


Figura 3.3. Arreglo continuo de sensores

Considerando un arreglo lineal de micrófonos de longitud L y dispuestos a lo largo del eje x , como también se puede ver en la figura 3.3, se tiene que

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} x_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

y la expresión que da el patrón de directividad toma la forma

$$D_R(\mathbf{f}, k_x) \cong \int_{-L/2}^{L/2} A_R(\mathbf{f}, x_a) e^{j \frac{2\pi \text{sen} \theta \cos \phi x_a}{\lambda}} dx_a \quad (3.5)$$

La ecuación (3.5) es válida solo para ondas planas, que provienen del campo lejano. Se considera que una onda proviene del campo lejano respecto al arreglo si se cumple que

$$|\mathbf{r}| > \frac{2L^2}{\lambda} \quad (3.6)$$

Considérese ahora un arreglo de N micrófonos que es una versión muestreada de una apertura continua, como la que se presenta en la figura 3.2. Considerando un número impar de micrófonos formando un arreglo a lo largo del eje x , y que cada uno de estos tiene una respuesta en frecuencia $e_n(f, x_n)$, la respuesta en frecuencia del arreglo está dada por la expresión

$$A(f, x_a) = \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \omega_n(f) e_n(f, x_a - x_n) \quad (3.7)$$

donde $\omega_n(f)$ es una función de peso (ponderación) para el n -ésimo elemento, y x_n es su posición espacial sobre el eje x .

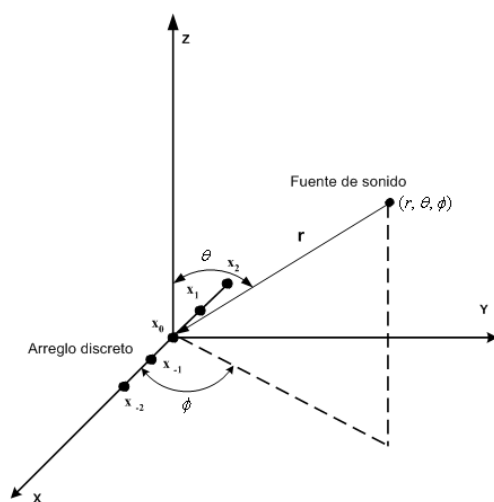


Figura 3.4. Arreglo discreto de sensores

Suponiendo que todos los micrófonos tienen una respuesta en frecuencia idéntica, y sustituyendo la función de sensibilidad del arreglo dada en (3.7) en la ecuación (3.5), se obtiene el patrón de directividad horizontal ($\theta = 90^\circ$) para campo lejano

$$D(\theta, \phi) = \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \omega_n e^{j2\pi \frac{x_n \cos \phi}{\lambda}} \quad (3.8)$$

Dado que los micrófonos estarán igualmente espaciados d metros entre si, la expresión que da el patrón de directividad queda finalmente como

$$D(\theta, \phi) = \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \omega_n e^{j2\pi \frac{nd \cos \phi}{\lambda}} \quad (3.9)$$

Se puede ver en la ecuación (3.9) que el patrón de directividad depende del número N de micrófonos que contenga el arreglo, del espaciamiento d entre micrófonos y de la longitud de onda λ de la señal.

Algunas simulaciones de la ecuación (3.9) son presentadas en el capítulo cinco y desplegadas en gráficas polares que se comparan con las obtenidas de forma experimental con un arreglo lineal de micrófonos.

Capítulo 4

Holografía acústica

La holografía es una técnica de formación de imágenes resultado del cálculo de cantidades en tres dimensiones basadas en los datos medidos en un plano. La holografía fue un invento del ingeniero eléctrico Dennis Gabor. En 1947 realizó un experimento que consistió en iluminar una rendija con luz monocromática, ver figura 4.1, proyectando con ello una figura de franjas. Gabor dedujo la forma y dimensiones de la rendija a partir de las franjas proyectadas. Esta fue la primera descripción de holografía.

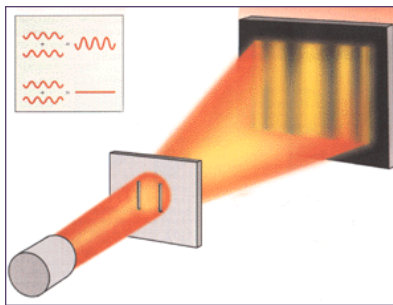


Figura 4.1. Experimento realizado por Dennis Gabor con luz monocromática.

De igual manera, desde su concepción, la holografía acústica se ha venido desarrollando como una herramienta dentro de la investigación de campos acústicos. Con la holografía acústica es posible obtener más información que la obtenida comúnmente con instrumentos dedicados a medir los niveles de sonido, esto es, es posible determinar no solo la presión acústica, sino también, el vector de intensidad acústica, el campo de velocidad de las partículas, la intensidad y velocidad de una superficie vibrante.

Fundamentalmente, la utilidad de la holografía surge a partir de su alto contenido de información, es decir, los datos que se generan con las mediciones en un plano bidimensional (holograma) pueden ser usados para reconstruir totalmente un campo de sonido tridimensional [9]. Más aún, con la información contenida en un holograma y llevando a cabo un proceso inverso (retropropagación) es posible hacer una reconstrucción holográfica en un plano diferente al holográfico. Este proceso también es conocido como transformación espacial de campos acústicos y la herramienta matemática

para llevar a cabo esto es la transformada de Fourier. Actualmente, una técnica que se está usando con este fin es la holografía acústica de campo cercano mejor conocida por sus siglas en inglés como NAH. Algunas de las aplicaciones de esta técnica fueron ya referidas en la parte introductoria de esta tesis.

En las secciones que siguen se estudian algunos conceptos importantes dentro del campo de la holografía acústica de campo cercano. El lector interesado en un estudio más extenso puede consultar [67].

4.1 Estado estable

Para el análisis de un fenómeno en el dominio de la frecuencia, se obtiene una solución en estado estable del modelo dinámico que representa a este fenómeno a través de la transformada de Fourier. En particular para el caso de campos acústicos la presión en el dominio del tiempo $p(t)$ se representa por

$$p(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{p}(t) e^{-i\omega t} dt \quad (4.1)$$

donde la presión en el dominio de la frecuencia $\tilde{p}(\omega)$ es la solución en estado estable y se escribe como

$$\tilde{p}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} p(t) e^{i\omega t} dt. \quad (4.2)$$

Una importante relación resulta al diferenciar con respecto al tiempo la ecuación (4.1)

$$\frac{\partial p(\omega)}{\partial t} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} -i\omega \tilde{p}(t) e^{-i\omega t} dt,$$

tal que

$$\mathfrak{F}\left(\frac{\partial p(t)}{\partial t}\right) = -i\omega \tilde{p}(\omega), \quad (4.3)$$

donde \mathfrak{F} representa la transformada de Fourier definida por la ecuación (4.2). La ecuación (4.3) puede ser utilizada para determinar la transformada de Fourier de la ecuación de onda (ec. 2.22), dando como resultado lo que se conoce como ecuación de Helmholtz

$$\nabla^2 \tilde{p} + k^2 \tilde{p} = 0, \quad (4.4)$$

donde el número de onda $k = \omega / v_p$, y \vec{p} es la función $\vec{p}(x, y, z, \omega)$. Así también obteniendo la transformada de Fourier de la ecuación de Euler (ec. 2.11), esta queda representada en el dominio de la frecuencia como

$$i\omega\rho_0\vec{v} = \nabla\vec{p}. \quad (4.5)$$

4.2 Intensidad acústica

En el estudio de la acústica es de importancia entender ciertas relaciones de energía. De la más importante es el vector de intensidad acústica. En el dominio del tiempo es llamada intensidad acústica instantánea y está definida como

$$\vec{I} = p\vec{v}(t), \quad (4.6)$$

con unidades de energía por unidad de tiempo (potencia) por unidad de área, medida en J/s/m² o bien w/m².

Considérese ahora la relación de intensidad para un campo en estado estable. Esta es definida como el promedio de la intensidad instantánea sobre un periodo T , donde $T = 1/f$ y f es la frecuencia de excitación

$$\vec{I} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t)\vec{v}(t)dt. \quad (4.7)$$

Utilizando notación de variable compleja esta relación toma la forma

$$\vec{I} = \frac{1}{2} \text{Re}(\omega\vec{p}(\omega)^*), \quad (4.8)$$

donde (*) representa el complejo conjugado y Re la parte real.

4.3 Ondas planas y espacio k

Considérese la solución general de la ecuación de Helmholtz (ec. 4.4) en tres dimensiones

$$p(\vec{r}) = A e^{i(k_x x + k_y y + k_z z)}, \quad (4.9)$$

donde A es una constante arbitraria, k_x , k_y y k_z representan los números de onda en las direcciones x , y y z , respectivamente. Además se tiene que esta solución satisface la ecuación de Helmholtz si

$$k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2. \quad (4.10)$$

Dado que k es una constante, los tres números de onda no son independientes uno de otro. Se escoge a dos de ellos como variables independientes y el tercero como variable dependiente, es decir

$$k_z^2 = k^2 - k_x^2 - k_y^2. \quad (4.11)$$

Hay que mencionar que no hay restricción en los valores de k_x y k_y ; estos pueden tomar cualquier valor dentro del conjunto de los números reales.

La ecuación (4.9) representa una solución a la ecuación de onda, aunque la dependencia del tiempo no este indicada. Para mostrar esta dependencia, hagamos que la constante arbitraria tome la forma

$$A = 2\pi B e^{-i(\omega_0 t - k_x x - k_y y - k_z z)},$$

entonces

$$p = 2\pi B e^{-i(\omega_0 t - k_x x - k_y y - k_z z)}. \quad (4.12)$$

Al obtener la transformada inversa de Fourier de la ecuación (4.12) se tiene la representación de una onda plana con una frecuencia ω_0 , esto es,

$$p = A e^{i(k_x x + k_y y + k_z z - \omega_0 t)}. \quad (4.13)$$

Considérese la presión en el plano infinito $y = 0$, para $y = 0$. El término de la fase incluyendo la parte dependiente del tiempo queda dada por

$$\phi = k_x x + k_z z - \omega t. \quad (4.14)$$

A lo largo del eje x ($\omega = 0$), la expresión de la fase es $k_x x - \omega t$ y la longitud de onda en la dirección x es $\lambda_x = \frac{2\pi}{k_x}$. λ_x es llamada la traza de la longitud de onda en la dirección x y k_x la traza del número de onda en la misma dirección.

A medida que la onda plana viaja a través del espacio, existe la traza de una onda moviéndose con una velocidad de fase de $c_x = \omega / k_x$. De forma similar a lo largo del eje z la velocidad de fase de la traza de una onda es $c_z = \omega / k_z$. Para ilustrar la dirección de propagación de la onda en el plano (x, z) obsérvese la figura 4.2.

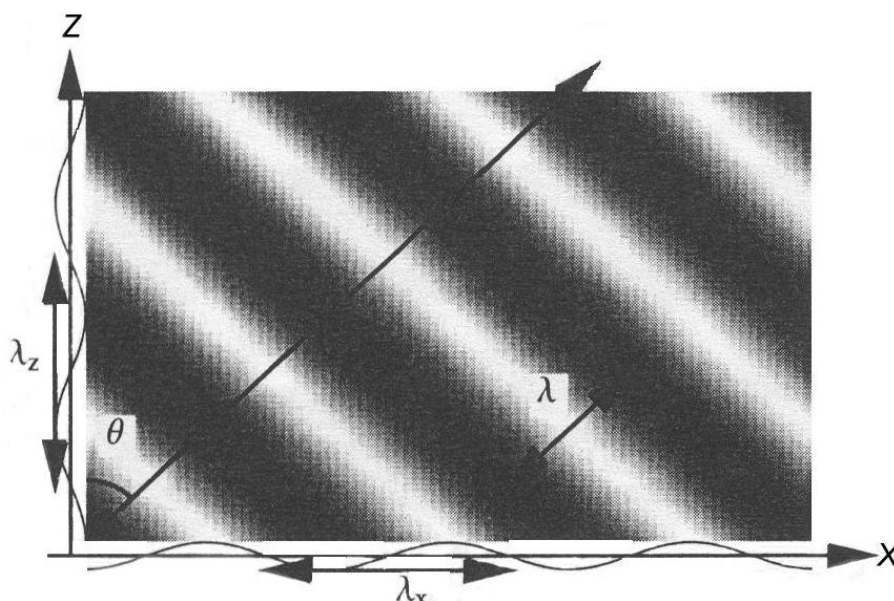


Figura 4.2. Representación de una onda plana mostrando las trazas de longitud de onda λ_x y λ_z .

En la representación anterior se asume que $k_y = 0$, es decir, que no existe variación de presión en la dirección y . La variación sinusoidal de la presión a lo largo de los dos ejes se representa en escala de grises, en donde los tonos más blancos representan presiones positivas y los más oscuros las presiones negativas. Dado que la presión debe ser continua a través del espacio, las regiones adyacentes a los dos ejes deben tener la misma presión. Estas regiones están separadas por líneas diagonales de escala de gris constante denominadas frentes de onda.

La onda plana de la figura 4.2 puede ser representada en el espacio del número de onda k , o simplemente espacio k . Esta representación se muestra en la figura 4.3 con un diagrama conocido como círculo de radiación. En este círculo de radio k se muestran las componentes de los números de onda que existen en el plano (x, y) . En el ejemplo que se trata solo un número de onda existe $(k_x, 0)$.

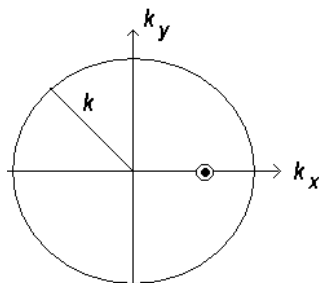


Figura 4.3. Representación en el dominio del número de onda de una onda plana con componentes k_x y k_z .

Si formamos el vector $\vec{k} = k_x \hat{i} + k_z \hat{k}$, donde $|\vec{k}| = k$, entonces \vec{k} representará un vector que apunta en la dirección de propagación de la onda. En forma general la dirección de cualquier onda plana puede ser representada por $\vec{k} = k_x \hat{i} + k_y \hat{j} + k_z \hat{k}$.

Retomando la figura 4.2, se puede observar que a medida que el ángulo θ que forma la dirección de la onda y el eje z decrece, la traza de la longitud de onda $\lambda_x \rightarrow \infty$ y el número de onda $k_z \rightarrow k$, por lo que la propagación de la onda cuando $\theta = 0$ será perpendicular al plano (x, y) . Esto se puede observar en la ilustración de la figura 4.4, en donde además se adjunta la correspondiente representación en el espacio k .

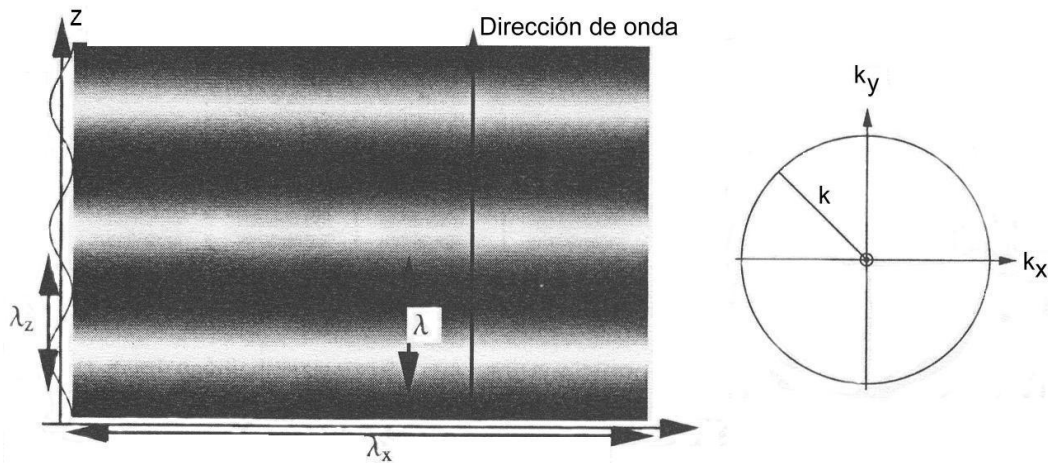


Figura 4.4. Onda plana que viaja perpendicular al eje x . a su derecha la representación de esta onda en el círculo de radiación.

De forma semejante, cuando $\lambda_z \rightarrow \infty$, y $k_z \rightarrow k$ se puede representar una onda viajera propagándose de forma paralela al plano (x, y) . La figura 4.5 ilustra esta situación junto con su representación en el espacio del número de onda k .

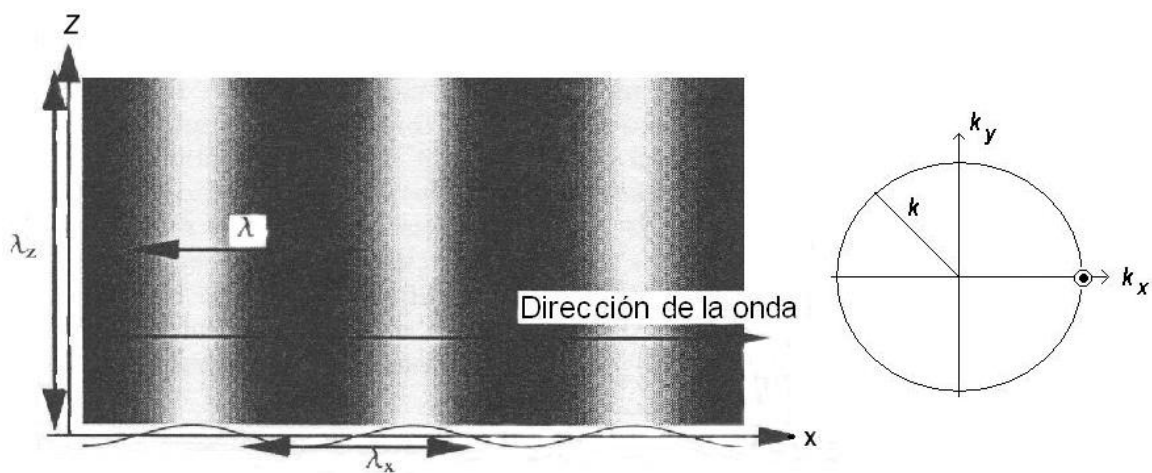


Figura 4.5. Onda plana viajando paralela al eje x con una longitud de onda infinita en la dirección z . A su derecha, su representación mediante un punto sobre el círculo de radiación.

4.4 Ondas evanescentes

Como se verá en la siguiente sección, las ondas evanescentes son fundamentales en la localización de fuentes de sonido ya que tienen una característica particular, no se propagan al campo lejano, sino que decaen exponencialmente cerca de la fuente de sonido. Retomando la ecuación 4.10 se tiene que

$$k_z = \pm \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}. \quad (4.15)$$

Cuando k_x o $k_y > k$, la ecuación 4.15 toma la forma

$$k_z = \pm i \sqrt{k_x^2 + k_y^2 - k^2} = \pm i k'_z \quad (4.16)$$

donde k'_z es real y la onda plana queda representada por

$$p = A e^{\mp k'_z z} e^{i(k_x x + k_y y)}. \quad (4.17)$$

Si la fuente de sonido existe en el semiespacio $z < 0$, entonces la solución a la ecuación de onda $e^{+k'_z z}$ no tiene un significado físico ya que crece sin límite hacia $+\infty$. Entonces la ecuación 4.17 queda representada por una onda decayendo en amplitud en la dirección z

$$p = A e^{-k'_z z} e^{i(k_x x + k_y y)}. \quad (4.18)$$

En la figura 4.6 se muestra una representación de una onda evanescente que viaja paralela al eje x ; a su derecha en el espacio k , esta onda se representa mediante un punto localizado fuera del círculo de radiación.

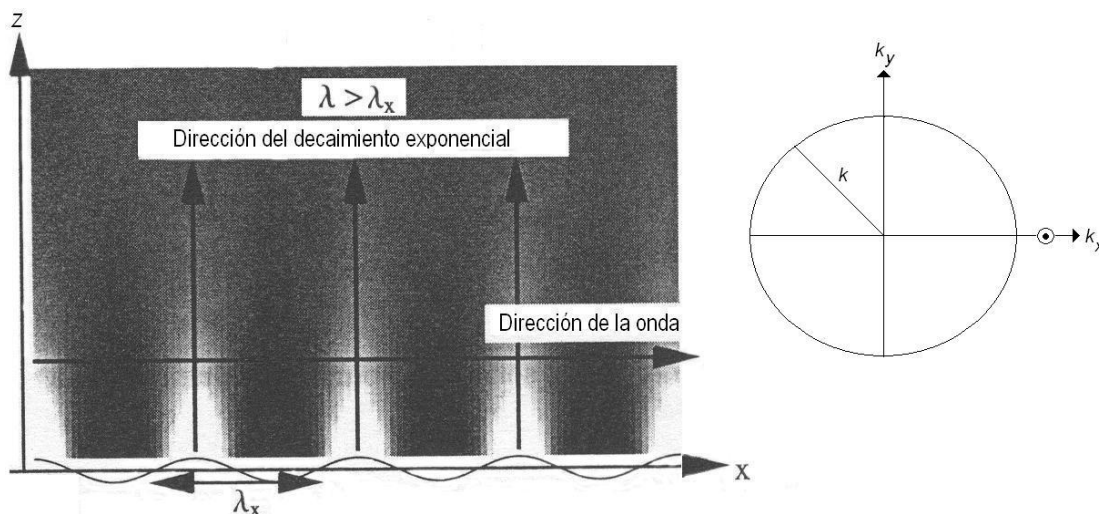


Figura 4.6. Ilustración de una onda evanescente viajando paralela al eje x . En el espacio k se representa con un punto fuera del círculo de radiación.

4.5 Espectro Angular

Considérese una distribución de presión en estado estable $p(\mathbf{r}, y, z)$ de una fuente en el semiespacio $z > 0$. Esta presión puede expresarse únicamente y completamente por una suma de ondas planas y evanescentes. Cada una de estas ondas hace que p tenga diferentes amplitudes y fases que tomaremos en cuenta utilizando el término $P(k_x, k_y)$ que depende de dos números de onda k_x y k_y . Entonces cualquier distribución de presión de una fuente en el espacio libre queda expresada como,

$$p(\mathbf{r}, y, z) = \sum_{k_x} \sum_{k_y} P(k_x, k_y) e^{i(k_x x + k_y y + k_z z)} \quad (4.19)$$

Para un problema general, debido a la extensión infinita en las direcciones x y y la suma dada por la ecuación (4.19) se representa de manera continua,

$$p(\mathbf{r}, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(k_x, k_y) e^{i(k_x x + k_y y + k_z z)} dk_x dk_y \quad (4.20)$$

Ahora considérese la interpretación de la cantidad compleja $P(k_x, k_y)$ de la ecuación (4.20). Si $z = 0$ en esta ecuación se tiene que

$$p(\mathbf{r}, y, 0) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(\mathbf{r}, k_x, k_y) e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad (4.21)$$

La expresión (4.21) determina la presión en el plano infinito $z = 0$. Además las integrales revelan que se trata de dos transformadas inversas de Fourier, en k_x y k_y respectivamente. Así la cantidad compleja $P(\mathbf{r}, k_x, k_y)$ está dada por la transformada de Fourier en dos dimensiones

$$P(\mathbf{r}, k_x, k_y) = \iint_{-\infty-\infty}^{\infty\infty} p(\mathbf{r}, y, 0) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy. \quad (4.22)$$

La transformada de Fourier garantiza que cualquier distribución de presión $p(\mathbf{r}, y, 0)$ puede expresarse por la ecuación (4.21). La cantidad $P(\mathbf{r}, k_x, k_y)$ es llamada *espectro angular*.

Una vez que $P(\mathbf{r}, k_x, k_y)$ es conocido entonces la ecuación (4.20) puede ser utilizada para determinar el campo de presión sobre un volumen tridimensional desde $z = 0$ hasta infinito. Esta propiedad de extrapolar campos de un plano a otro es una herramienta utilizada en aplicaciones numéricas y experimentales, y es parte fundamental de la holografía acústica de campo cercano [67].

Otra forma de expresar esta extrapolación es notar que la transformada de Fourier de la presión en un plano $z = \text{constante}$ está relacionada con la transformada de Fourier de la presión en el plano $z = 0$ por

$$\mathcal{F}_x \mathcal{F}_y [p(\mathbf{r}, y, z)] = P(\mathbf{r}, k_x, k_y, z) = P(\mathbf{r}, k_x, k_y) e^{ik_z z} \quad (4.23)$$

tal que las amplitudes de las ondas planas solo sufren un cambio de fase (para k_z real) desde un plano horizontal a otro. Entonces la expresión general para extrapolar el espectro angular en un plano $z = z'$ al plano $z = z$ está dado por

$$P(\mathbf{r}, k_x, k_y, z) = P(\mathbf{r}, k_x, k_y, z') e^{ik_z (z - z')} \quad (4.24)$$

De la ecuación (4.15) se observa que si $k_x^2 + k_y^2 > k^2$ entonces k_z es puramente imaginario, entonces la ecuación (4.24) queda como

$$P(k_x, k_y, z) = P(k_x, k_y, z') e^{-|k_z|(z-z')} \quad (4.25)$$

que representa las ondas evanescentes que decaen exponencialmente en el campo cercano y que son fundamentales para la localización de fuentes de sonido.

4.6 Holografía acústica de campo cercano (NAH)

En la sección anterior se definió el espectro angular, con el cual, dada la presión medida en un plano se puede determinar la presión en cualquier otro plano paralelo a este. En otras palabras, si las fuentes acústicas son confinadas al semiespacio $z \leq z_s$, y la presión es conocida sobre un plano $z = z_h \geq z_s$ entonces la presión sobre cualquier otro plano está dado por

$$P(k_x, k_y, z) = P(k_x, k_y, z_h) e^{ik_z(z-z_h)} \quad (4.26)$$

donde z_h representa al plano de medición o también conocido como plano holográfico y z_s el plano de la fuente de sonido. El proceso anteriormente descrito se le conoce como reconstrucción de campos acústicos. Se puede encontrar también el uso del término retropropagación para indicar la acción de reconstrucción de un campo.

Con la técnica NAH se reconstruye no solo la presión sino también los vectores de velocidad e intensidad acústica.

El vector velocidad puede determinarse por la ecuación de Euler vista en el capítulo II. La transformada de Fourier de la velocidad normal está definida como

$$W(k_x, k_y, z) = \mathcal{F}_x \mathcal{F}_y [v(k, y, z)] \quad (4.27)$$

De la ecuación (4.5) se deduce que $\frac{\partial p}{\partial z} = i\omega\rho_0\dot{w}$, entonces de la ecuación (4.27) se sigue que

$$\mathfrak{F}_x \mathfrak{F}_y \left[\frac{\partial p(\mathbf{r}, y, z)}{\partial z} \right] = \frac{\partial P(\mathbf{r}_x, k_y, z)}{\partial z} = ik_z P(\mathbf{r}_x, k_y, z_h) \underline{e}^{ik_z(z-z_h)}, \quad (4.28)$$

así la velocidad queda expresada a través del espectro angular como

$$\dot{W}(\mathbf{r}_x, k_y, z) = \frac{k_z}{\rho_0\omega} P(\mathbf{r}_x, k_y, z_h) \underline{e}^{ik_z(z-z_h)}, \quad (4.29)$$

donde el término $\frac{k_z}{\rho_0\omega} e^{ik_z(z-z_h)}$ es llamado propagador de velocidad y está definido por la función

$$G(\mathbf{r}_x, k_y, z - z_h) = \frac{k_z}{\rho_0\omega} e^{ik_z(z-z_h)}. \quad (4.30)$$

De forma similar se puede utilizar la expresión (4.8) para determinar la intensidad acústica.

Determinada la velocidad en el espacio k mediante el espectro angular se calcula la velocidad en el espacio (\mathbf{r}, y, z) aplicando la transformada inversa de Fourier, es decir

$$\dot{w}(\mathbf{r}, y, z) = \mathfrak{F}_x^{-1} \mathfrak{F}_y^{-1} \left[\dot{W}(\mathbf{r}_x, k_y, z) \right]. \quad (4.31)$$

En resumen, el proceso lo podemos dividir en los siguientes pasos:

- Medición de la presión $p(\mathbf{r}, y, z_h)$.
- Cálculo del espectro angular $P(\mathbf{r}_x, k_y)$.
- Multiplicar por el propagador $G(\mathbf{r}_x, k_y, z - z_h)$.
- Cálculo de la transformada inversa.

4.7 Filtro en el espacio k

El uso de la transformada de Fourier para la reconstrucción de un campo acústico en un plano paralelo al de medición debería ser un proceso exacto. Sin embargo, en la práctica el plano de medición no es continuo sino discreto y finito, con sensores y sistemas de medición que introducen ruido y distorsión en las imágenes acústicas a desplegar. Estos factores provocan la aparición de componentes de frecuencia mayores al número de onda k que se encuentran fuera del círculo de radiación mencionado en la sección 4.3 y que no están correlacionadas con los datos adquiridos.

Teóricamente, se asume que la presión se mide sobre todo el plano infinito $z = z_h$, esto en la práctica es imposible. El área rectangular donde se realiza la medición de presión es llamada apertura de medición. Esta apertura de dimensiones finitas tiene el efecto de un ventaneo. Para una explicación más clara al respecto considérese el siguiente ejemplo.

Supóngase el campo de velocidad normal dado por la expresión

$$w(x) = \text{sen}(3.5\pi x)$$

definida para $-1 \leq x \leq 1$. El espectro angular asociado con este campo de velocidad estará dado por

$$W = \mathfrak{F}_x \left[\text{sen}(3.5\pi x) \right]$$

y representado por la gráfica de la figura 4.7. Nótese que los picos de la gráfica para $k_x = 3.5\pi$ representan el número de onda dominante para el campo de velocidad dado los cuales tienen lóbulos adyacentes como una función sinc. Entonces la ventana rectangular aplicada al campo de velocidad dio como resultado la aparición de componentes de frecuencia más altas del número de onda $k_x = 3.5\pi$. Son estas componentes fuentes de error al momento de realizar una reconstrucción holográfica.

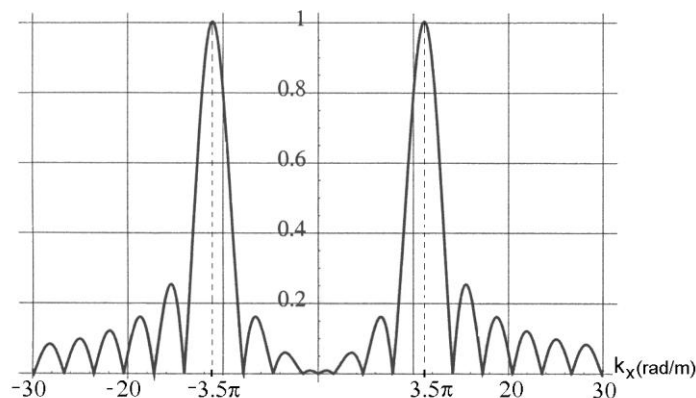


Figura 4.7. Espectro angular del campo de velocidad $w(x) = \text{sen}(3.5\pi x)$.

Para corregir este problema, la técnica NAH impone un filtro pasa-bajas en el dominio espacial sobre el espectro angular medido. Este filtro tiene la tarea de limitar los datos que serán aceptados y que se encuentren fuera del círculo de radiación. La frecuencia de corte de este filtro debe ser tal que los efectos del ruido sean reducidos sin que los datos de interés sean removidos.

El filtro digital que aquí se utiliza a través de software y es propuesto por Veronesi y Maynard [10], es un filtro exponencial definido por

$$W(k_x, k_y) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{2} e^{-(k_r/k_c - 1)\alpha} & k_r \leq k_c \\ \frac{1}{2} e^{-(k_r/k_c)\alpha} & k_r > k_c \end{cases}$$

donde $k_r = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$, k_c y α son parámetros ajustables del filtro. El parámetro α controla la razón de decaimiento exponencial de la ventana. La gráfica 4.8 muestra simulaciones en Matlab que dan la respuesta del filtro exponencial para diferentes valores de α . A medida que $\alpha \rightarrow 0$ la respuesta del filtro tiende a comportarse como una ventana rectangular respecto a la componente k_x o k_y . Para observar esto más claro se muestra las gráficas para diferentes valores de α de la figura 4.9 tomando solo en cuenta

la componente k_x . Así también se ilustra mediante la figura 4.10 la respuesta del filtro para diferentes valores de la frecuencia de corte k_c .

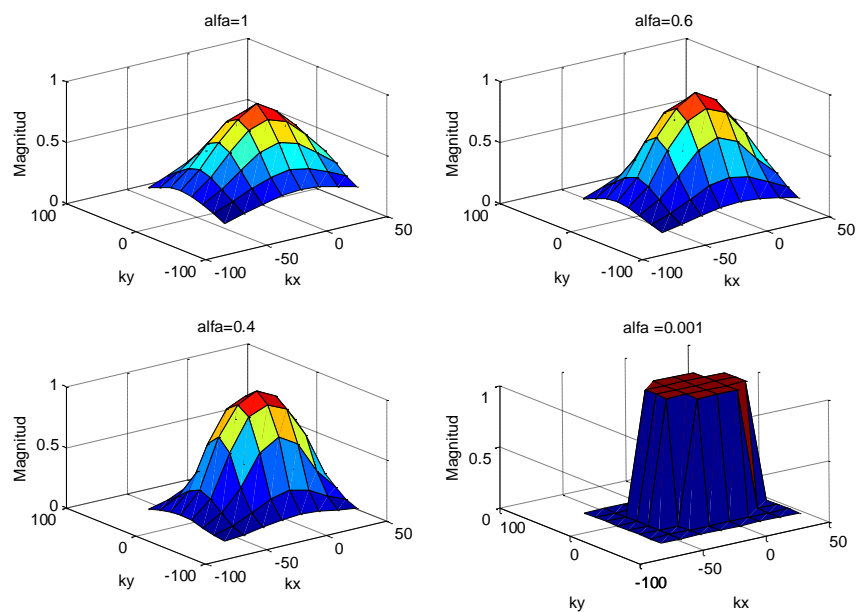


Figura 4.8. Respuesta del filtro exponencial para diferentes valores de α .

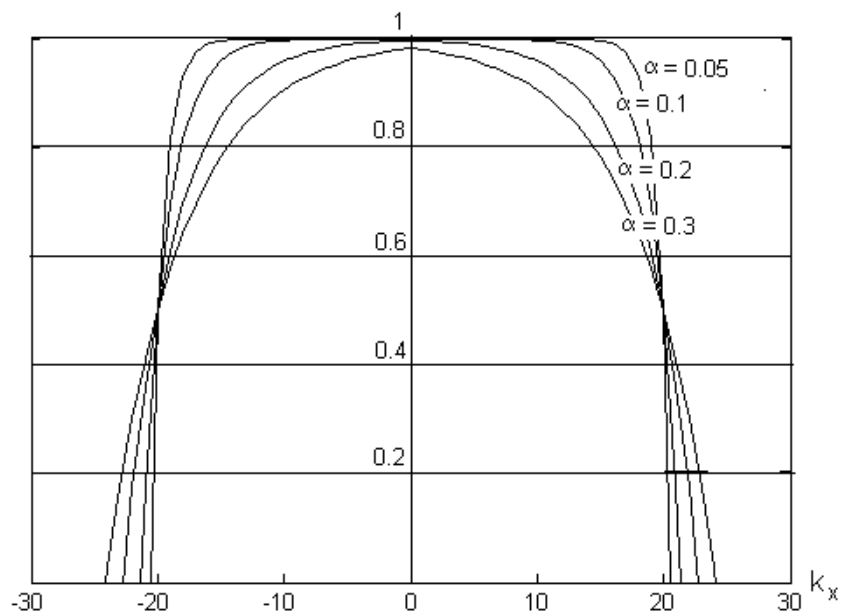


Figura 4.9. Respuesta del filtro exponencial como función de k_x para diferentes valores de α .

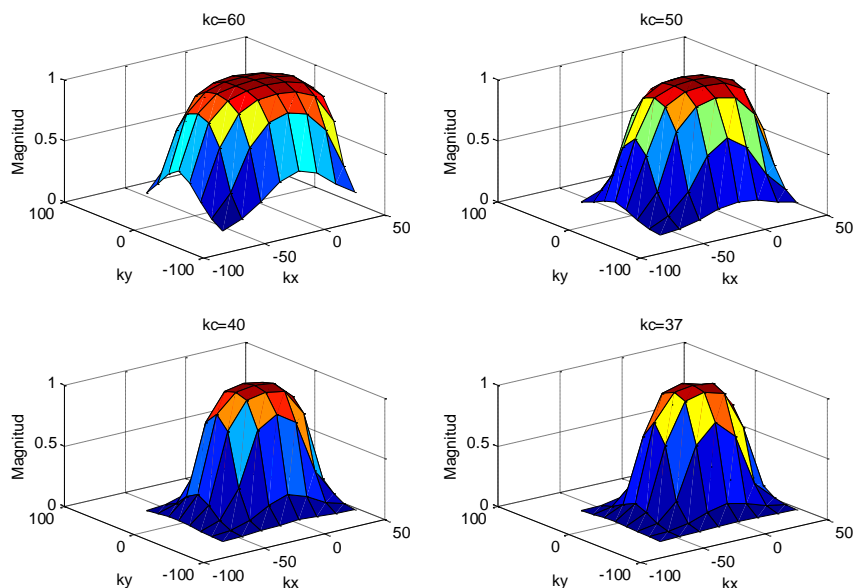


Figura 4.9. Respuesta del filtro exponencial para diferentes valores de la frecuencia de corte k_c .

4.8 Efectos del uso de la DFT y la FFT.

Como se mencionó en la parte introductoria de este capítulo, la herramienta matemática utilizada en holografía acústica de campo cercano es la transformada de Fourier. El hecho de que en la práctica solo se tiene una versión muestreada de la presión acústica que existe en la apertura de medición hace necesaria el uso de la transformada discreta de Fourier (DFT). Además de esto, el uso de un algoritmo para el cálculo de la DFT como la transformada rápida de Fourier (FFT), aumenta la rapidez con la que NAH reconstruye un campo acústico. Al efectuar la convolución de esta versión muestreada de la presión acústica con el propagador se tiene como resultado la aparición de replicas de la apertura de medición. Los errores que introducen estas replicas se van incrementando a medida que la distancia entre los planos de medición y la fuente $z_h - z_s$, aumenta.

Una técnica para reducir los errores debido a las replicas producidas al aplicar la DFT es agregar un “parche” de ceros lo suficientemente grande tal que doble la longitud y ancho de la apertura de medición [67].

Capítulo 5

Diseño de la instrumentación del sistema de medición

A continuación se describe el desarrollo instrumental llevado a cabo para la aplicación de la técnica NAH como medio para la visualización y localización de fuentes de sonido.

Se hace una descripción de los arreglos en una y dos dimensiones, diseñados y construidos como parte de este trabajo de investigación. Se presenta además los resultados de las mediciones llevadas a cabo para obtener el patrón de directividad horizontal del arreglo lineal y se compara con el patrón teórico.

Por último se muestran los detalles de una interfaz gráfica desarrollada en Matlab, la cual dio lugar a la automatización de las mediciones y agilizar el procesamiento de datos.

5.1 Antecedentes

En la holografía acústica de campo cercano como en la convencional, la medición del campo de sonido se hace usualmente con un micrófono o con un arreglo unidimensional de micrófonos haciendo un barrido sobre un plano de interés. Sin embargo, estas mediciones están restringidas a campos estacionarios. Para mediciones que tengan la finalidad de detectar y localizar fuentes de ruido en campos no estacionarios, como por ejemplo en máquinas, es recomendable utilizar un arreglo bidimensional de micrófonos con adquisición simultánea de las señales. Esto último, resulta muy costoso y a veces impráctico si se piensa en un sistema de medición portátil. Por ejemplo, las tarjetas de adquisición de datos para computadoras personales que se pueden disponer en el mercado están limitadas a 16 canales simples y 8 diferenciales; esto limita el tamaño del arreglo.

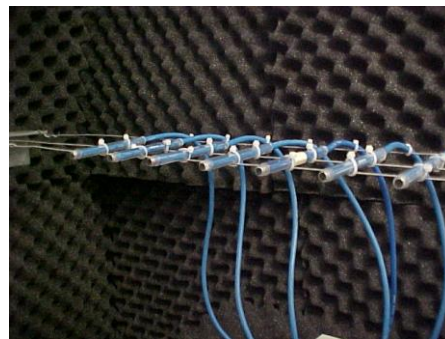
5.2 Arreglo lineal

En esta primera etapa experimental, se cuenta con un arreglo lineal de 7 micrófonos separados entre sí 8 centímetros, y un octavo micrófono que tiene la función de referencia para fines del cálculo de la fase de cada una de las señales del arreglo. El procedimiento consistió de un barrido manual en un área de aproximadamente 48 x 48 centímetros, área cubierta al realizar 7 mediciones a cada 8 centímetros sobre el eje vertical. Con esto se emula una matriz de sensores con una misma separación en ambos ejes. Se asume que la fuente de sonido utilizada es estable y se tiene control total sobre ella.

La imagen de la figura 5.1(a) muestra una estructura metálica de 1.22 metros de alto por 1.11 metros de ancho que soporta el arreglo de micrófonos, mismos que a su vez son sostenidos por alambres acerados unidos a un par de ángulos metálicos y que mediante tensores se logra mantener la horizontal de los alambres. En cada lado de la estructura se colocó una cinta graduada en centímetros como una ayuda visual al momento de mover el arreglo en forma vertical y con ello lograr que los micrófonos estén a la misma distancia de la base. En la figura 5.1 (b) se observa a cada uno de los micrófonos dentro pequeños cilindros de plástico que sirven de soporte mecánico. Estos a su vez son sujetados a unos alambres acerados mediante amarres de plástico.



(a)



(b)

Figura 5.1. (a) Estructura de soporte del arreglo lineal de micrófonos; (b) Micrófonos incrustados en cilindros de plástico soportados por alambres acerados.

Los micrófonos utilizados en el arreglo son omnidireccionales tipo condensador marca Panasonic de la serie WM-61A. Son pequeños micrófonos de 6 mm de diámetro de uso general y según especificaciones del fabricante están diseñados con una alta resistencia a las vibraciones, alta relación señal a ruido y una alta sensibilidad. La imagen de la figura 5.2 muestra uno de ellos con su respectivo cable coaxial.



Figura 5.2. Micrófono omnidireccional Panasonic WM-61.

Algunas especificaciones de este tipo de micrófonos es la siguiente:

Sensitividad:	-35 \pm 4 dB (0dB = 1V/Pa, 1 Khz.)
Impedancia:	menor a 2.2 K Ω
Frecuencia:	20-20000 Hz
Voltaje máximo:	10V
Corriente:	Máximo 0.5 mA
Relación S/N	62 dB

5.2.1 Calibración de micrófonos

No obstante que los micrófonos son iguales, presentan diferencias en la amplitud de su voltaje de salida. Con el fin de que estas amplitudes sean iguales cada uno de los micrófonos se calibró dentro de una cámara anecoica hecha de mica forrada internamente con material fonoabsorbente. En una de sus caras interiores se encuentra instalada una pequeña bocina y opuesta a ella se encuentra el orificio por el cual es introducido el micrófono. La figura 5.3 presenta dicha caja con uno de los micrófonos dentro de ella.



Figura 5.3. Caja anecoica utilizada para calibración de micrófonos.

El procedimiento consistió en aplicar una señal senoidal de 5 V de pico a pico y de 1KHz de frecuencia. Se tomaron lecturas de salida de cada uno de los micrófonos y eligió a una de ellas como referencia. Cada uno de los voltajes de salida de los micrófonos se divide por el valor de referencia obteniéndose con ello factores de calibración (ver tabla 5.1), tales que al multiplicar cada señal por su factor correspondiente todas las salidas de voltaje de los sensores serán iguales. Estos factores son aplicados posteriormente a las señales que serán medidas en la parte experimental de este trabajo por cada uno de los micrófonos del arreglo.

Tabla. 5.1. Voltajes de salida y factores de calibración tomando al micrófono 1 como referencia.

Micrófono	Voltaje de salida (mV)	Factores de calibración V_{sal}/V_{ref}
1 (ref.)	247.3	1
2	192.5	0.7784
3	216.7	0.8762
4	206.6	0.8354
5	211.8	0.8564
6	204.1	0.8253
7	216.9	0.8770

5.2.2 Adquisición de datos

Para la adquisición de las señales se cuenta con una tarjeta National Instruments multifunción DAQCard-6024E con 16 canales de entrada simples, 8 canales en modo diferencial y con una capacidad de muestreo de 200kS/s.

La salida de cada uno de los micrófonos se conecta a un circuito que consta de dos etapas, una de polarización y la otra para bloquear la componente de directa. La tierra analógica de la tarjeta (AIGND) se conecta a la tierra física de la fuente de voltaje utilizada. Todo lo anterior se muestra en el circuito de la figura 5.4. Para fines de acondicionamiento de la señal se utilizan los canales en modo diferencial para reducir el ruido que en esta etapa del trabajo se presentaba en cada uno de los canales. La amplificación de las señales se hizo con la tarjeta de adquisición a través de software.

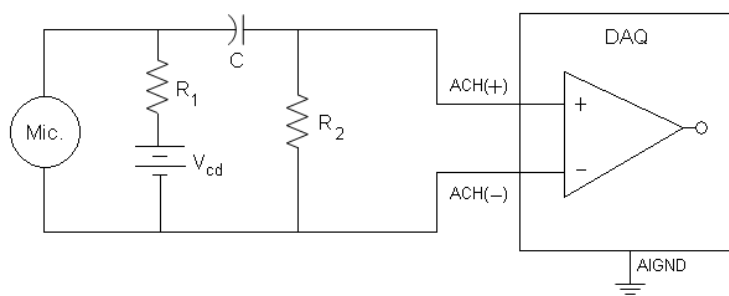


Figura 5.4. Circuito de polarización y adquisición de datos.

5.2.3 Patrón de directividad del arreglo lineal

Se desarrolló una rutina en Matlab para realizar simulaciones numéricas basadas en la ecuación (3.9) del capítulo III, haciendo variar la cantidad N de micrófonos y el espaciamiento entre ellos. Con la finalidad de presentar de manera sencilla las propiedades que presenta el arreglo de sensores se ponderó de igual forma a cada micrófono, es decir, la función de peso $\omega_n \left(\omega \right) = 1/N$.

Los patrones de directividad simulados fueron generados tomando en cuenta una señal de arribo de 1KHz, con una velocidad de propagación de 340 m/s, con lo que se obtiene una señal con una longitud de onda de 34cm.

La figura 5.5 muestra en una gráfica polar el patrón de directividad para 7, 5, y 3 micrófonos con una distancia entre ellos de 5 cm. De estos patrones se puede ver que a medida que la fuente de sonido se mueve alrededor del arreglo, la cantidad de señal “vista” por éste varía. La cantidad de señal es mínima cuando la fuente se encuentra alineada con el arreglo y va aumentando hasta alcanzar su valor máximo cuando la fuente de sonido se encuentra frente al arreglo de micrófonos, es decir, perpendicular a este. Además, se aprecia que a medida que el número de micrófonos aumenta, el arreglo de sensores tiende a ser más directivo.

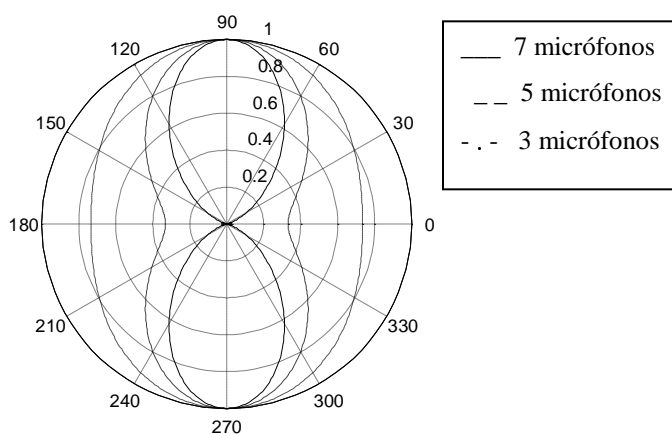


Figura 5.5. Patrón de directividad para arreglos de 7, 5 y 3 micrófonos separados 5 cm entre sí.

Ahora se presenta en la figura 5.6 el patrón de directividad horizontal para dos arreglos, uno con una distancia entre micrófonos de 5 cm. y el otro con 10 cm. El comportamiento de estos patrones es semejante a los presentados en la figura 5.5, sin embargo, a medida que la distancia entre micrófonos aumenta la frecuencia de muestreo espacial se ve reducida y al caer por debajo de la frecuencia de Nyquist el fenómeno de aliasing se hace presente. Los pequeños lóbulos adyacentes que se observan en el patrón mostrado en la figura 5.6 son manifestaciones de este fenómeno.

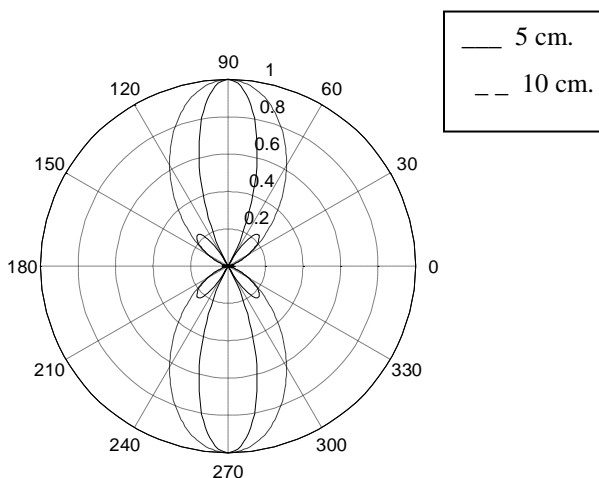


Figura 5.6. Patrón de directividad para arreglos de 3 micrófonos con distancia entre micrófonos de 5 y 10 cm.

Experimentalmente la obtención del patrón de directividad consistió en mover un altavoz de 8Ω , 30W, alrededor de un arreglo lineal de 7 micrófonos omnidireccionales tipo condensador WM-61 de Panasonic. Tomando en cuenta un intervalo de 0 a 180 grados, se procedió a la captura de las señales de voltaje del arreglo de micrófonos para diferentes posiciones mediante una tarjeta de adquisición de datos National Instruments DAQCard-6024E. Los datos adquiridos fueron procesados en computadora a través de rutinas desarrolladas en Matlab. Al igual que en la simulación, aquí se trabajó con señales de 1KHz, mismas que fueron producidas por un generador de funciones Agilent 33250. En la figura 5.7 se presenta un esquema general de este procedimiento.

Durante el proceso de medición y procesamiento de datos, el acondicionamiento de la señal (amplificación y filtrado), jugó un papel muy importante ya que los voltajes en terminales de cada micrófono eran menores a 0.5 mV y el ruido electromagnético presente en algunos canales era comparable a la amplitud de la señal de interés. Se buscó además que las condiciones físicas en donde se desarrollaban estas mediciones fueran las más propicias, es decir, condiciones de espacio libre. Para ello se dispuso de hojas de material fonoabsorbente para cubrir el lugar donde se llevaban a cabo las mediciones.

De forma empírica se tomaron 11 mediciones para posiciones de la fuente de sonido que van de los 20 a los 160 grados. Cada medición adquirida y grabada en un

archivo “daq”, que contiene los datos de las señales de cada uno de los micrófonos del arreglo lineal. De esta manera es posible manejar estos archivos desde Matlab para generar diferentes patrones de directividad con solo cancelar o no invocar en el programa los canales correspondientes.

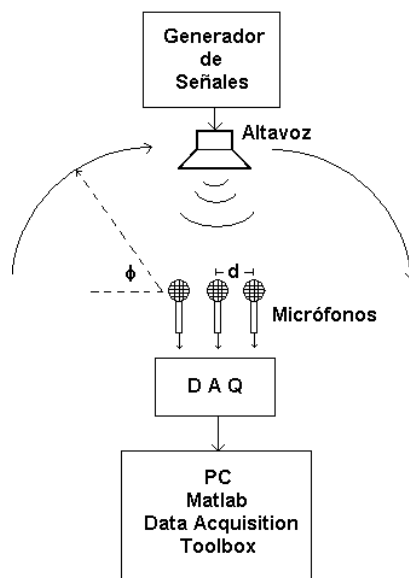


Figura 5.7. Esquema general del proceso experimental para la generación del patrón de directividad.

En la figura 5.8 se muestra un comparativo entre el patrón de directividad horizontal teórico de un arreglo de 7 micrófonos separados entre si una distancia de 5 cm, y el patrón generado a través de las mediciones obtenidas. En un recuadro se señala el valor de la medición que no tiende a seguir el patrón teórico. Con los valores medidos se estiman nuevos valores mediante interpolación obteniéndose una representación más clara del desempeño del arreglo de micrófonos que como ya se había mencionado, la máxima cantidad de señal “vista” por el arreglo se da cuando la fuente de sonido se encuentra perpendicular a este, es decir, a 90 grados, tal y como está representado en la grafica polar de la figura 5.8.

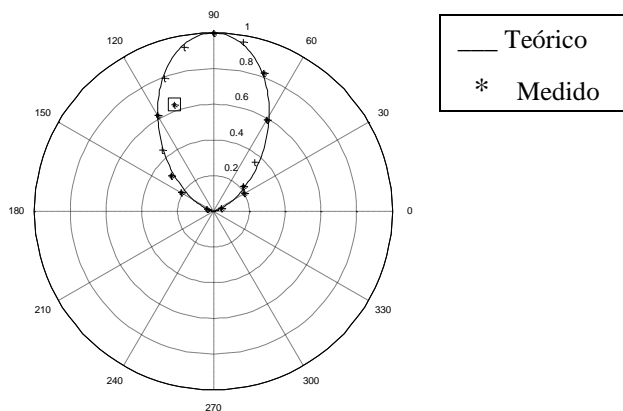


Figura 5.8. Patrón de directividad horizontal teórico y medido para un arreglo de 7 micrófonos separados 5 cm entre sí.

En la grafica polar de la figura 5.9 se observa el patrón de directividad teórico (-) y medido (*) para un arreglo de 5 micrófonos separados entre si una distancia de 5 cm. Aquí se observa un mayor número de mediciones que se encuentran fuera de la trayectoria que marcan los valores teóricos. Sin embargo, con las mediciones que se encuentran cerca de esta y con las estimadas, se observa como el lóbulo del patrón de directividad medido tiende a hacerse mas ancho, lo cual pudiera indicar que las regiones en donde se tiene la mayor cantidad de señal son mayores que con 7 micrófonos.

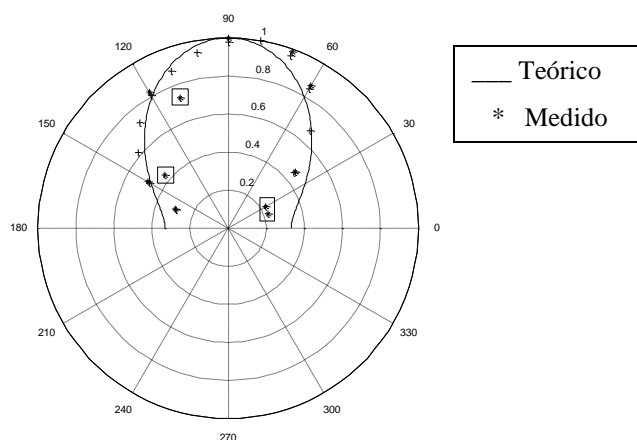


Figura 5.9. Patrón de directividad teórico y medido para un arreglo de 5 micrófonos separados entre si 5 cm.

Ahora se muestran los resultados obtenidos al hacer variar la distancia entre micrófonos. La grafica polar de la figura 5.10 muestra el comparativo de los patrones para un arreglo de 3 micrófonos separados una distancia de 10 cm. De nueva cuenta se puede hablar del buen desempeño del arreglo de micrófonos al observar como los datos medidos tienden a seguir el patrón teórico. Por último en la figura 5.11 se muestran los patrones de directividad horizontal para un arreglo de 3 micrófonos separados una distancia de 15 cm. En esta figura se observa la aparición de lóbulos adyacentes al principal, que indica que el fenómeno de aliasing se está haciendo presente.

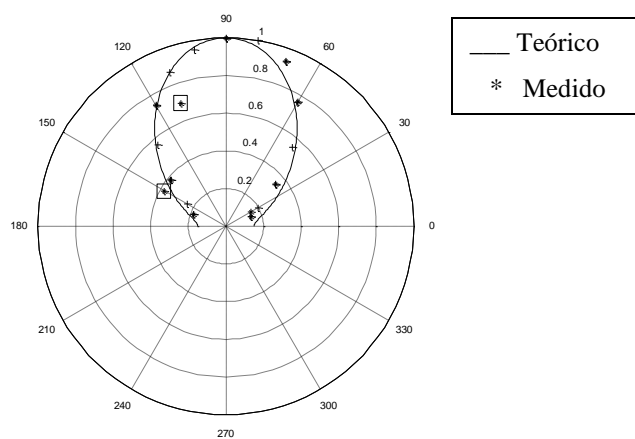


Figura 5.10. Patrón de directividad teórico y medido para un arreglo de 3 micrófonos separados 10 cm.

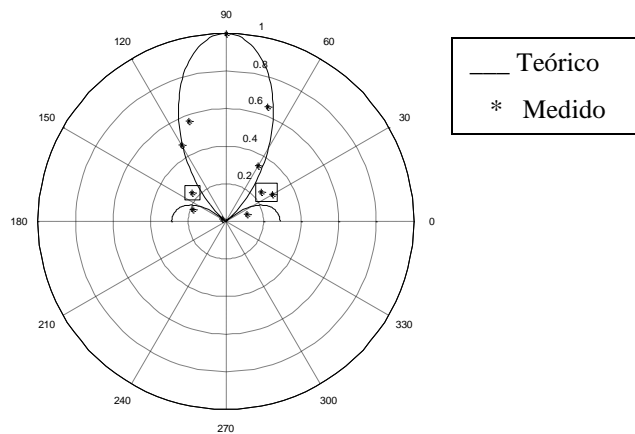


Figura 5.11. Patrón de directividad teórico y medido para un arreglo de 3 micrófonos separados 15 cm.

Se considera que una forma de evaluar el desempeño de un arreglo de micrófonos que cuenta con simetría lineal, es a través de trazar el patrón direccional del haz de sonido sobre el plano en que se asientan los micrófonos (plano horizontal), mediante la medición de la señal recibida de una fuente de sonido de intensidad constante en función de la dirección angular y comparar la uniformidad del patrón con su valor teórico (en las Fig. 5.5 y 5.6 se grafican algunos de los posibles patrones de directividad teóricos). La fuente de sonido se va posicionando con respecto al centro del arreglo lineal en puntos equi-espaciados angularmente sobre un círculo de radio tal que encierra al arreglo de micrófonos asegurando condiciones de campo lejano (ver figura 5.7). La exactitud con la que se establecen estos puntos y su alineación con el arreglo de micrófonos son determinantes en el error de medición, situación que se tuvo presente en los experimentos al tener limitaciones de espacio físico al realizar los mismos. Por otro lado, no obstante que las mediciones se hicieron sin una cámara anecoica, complicando las condiciones de espacio libre, los datos obtenidos muestran la tendencia a seguir el patrón teórico. En las tablas 5.2 a 5.5 se presentan los datos medidos y teóricos utilizados para representar el patrón de directividad horizontal, bajo diversas condiciones de número de micrófonos y distancia entre micrófonos. En dichas tablas se podrán observar omisiones para algunas posiciones angulares, esto debido a que las mediciones en estas posiciones se desecharon por considerarse erróneas al no seguir el mismo comportamiento que las demás y alejarse considerablemente de los valores teóricos. Por otro lado, como no podemos medir la potencia acústica, para cálculos prácticos suponemos que la intensidad de la fuente en $\phi = 90^\circ$, $\theta = 0^\circ$ y a una distancia r dada (figura 3.4), es igual a la potencia acústica de una fuente similar pero omnidireccional, y en esa posición la directividad $D(90^\circ, 0^\circ) = 1$. Por lo que los datos medidos se normalizan respecto a la medición hecha a un ángulo de 90 grados, posición en la cual la alineación del arreglo se encuentra perpendicular a la dirección del frente de onda; y con esto se hace coincidir el máximo de intensidad teórico con la máxima cantidad de señal capturada por los micrófonos.

Se calcula en porcentaje el error relativo que resulta de la diferencia entre el valor medido y el valor teórico, es decir

$$\%error\text{ relativo} = \left| \frac{\text{valor te\u00f3rico} - \text{valor medido}}{\text{valor te\u00f3rico}} \right| \times 100$$

Hay que tener en cuenta que el error relativo pierde sentido al dividirse por cero, que ser\u00eda el caso cuando el valor te\u00f3rico normalizado tiende a cero. En las tablas 5.2 a 5.5 se agrega el error relativo obtenido al comparar con el patr\u00f3n de directividad te\u00f3rico.

Tabla 5.2. Datos te\u00f3ricos y medidos utilizados para generar el patr\u00f3n de directividad horizontal de un arreglo lineal de 7 micr\u00f3fonos separados 5 cm.

\u00c1ngulo en grados	Valor te\u00f3rico normalizado	Valor medido en volts	Valor medido normalizado	% Error relativo
20	0.0348	0.1135	0.0477	37.1
30	0.1226	0.4750	0.1995	62.7
40	0.2541	0.5226	0.2195	13.6
50	0.4266	0.8564	0.3597	15.7
60	0.6233	1.4136	0.5937	4.7
70	0.8116	1.9617	0.8239	1.5
80	0.9493	2.2981	0.9652	1.7
90	1	2.3810	1	0.0
100	0.9493	2.2226	0.9335	1.7
110	0.8116	1.8936	0.7953	2.0
120	0.6233	1.4778	0.6207	0.4
130	0.4266	1.0607	0.4455	4.4
140	0.2541	0.7295	0.3064	20.6
150	0.1226	0.5004	0.2102	71.5
160	0.0348	0.0933	0.0392	12.6

Tabla 5.3. Datos teóricos y medidos utilizados para generar el patrón de directividad horizontal de un arreglo lineal de 5 micrófonos separados 5 cm.

Ángulo en grados	Valor teórico normalizado	Valor medido en volts	Valor medido normalizado	% Error relativo
40	0.5657	0.9056	0.4661	17.6
50	0.681	1.3414	0.6904	1.4
60	0.7991	1.6700	0.8595	7.6
70	0.9029	1.8725	0.9639	6.8
80	0.9744	1.9428	0.9999	2.6
90	1	1.9430	1	0.0
110	0.9029	1.7263	0.8885	1.6
120	0.7991	1.6074	0.8273	3.5
130	0.681	1.4251	0.7335	7.7
140	0.5657	1.2217	0.6288	11.2
150	0.4668	0.9505	0.4892	4.8
160	0.3925	0.5850	0.3011	23.3

Tabla 5.4. Datos teóricos y medidos utilizados para generar el patrón de directividad horizontal de un arreglo lineal de 3 micrófonos separados 10 cm.

Ángulo en grados	Valor teórico normalizado	Valor medido en volts	Valor medido normalizado	% Error relativo
20	0.2233	0.1579	0.1444	35.3
30	0.3136	0.1704	0.1558	50.3
40	0.4364	0.3780	0.3456	20.8
50	0.5824	0.6001	0.5486	5.8
60	0.7351	0.8315	0.7601	3.4
70	0.8712	1.01163	0.9290	6.6
80	0.966	1.0938	0.9999	3.5
90	1	1.0940	1	0.0
100	0.966	0.9315	0.8515	11.9
110	0.8712	0.9499	0.8683	0.3
120	0.7351	0.8079	0.7385	0.5
130	0.5824	0.6163	0.5634	3.3
140	0.4364	0.4168	0.3810	12.7
150	0.3136	0.4122	0.3768	20.2
160	0.2233	0.1997	0.1826	18.2

Tabla 5.5. Datos teóricos y medidos utilizados para generar el patrón de directividad horizontal de un arreglo lineal de 3 micrófonos separados 15 cm.

Ángulo en grados	Valor teórico normalizado	Valor medido en volts	Valor medido normalizado	% Error relativo
20	0.2396	0.1285	0.1175	51.0
30	0.1585	0.3148	0.2878	81.6
40	0.0166	0.2666	0.2437	1368.1
60	0.4558	0.3761	0.3438	24.6
70	0.7222	0.7101	0.6491	10.1
90	1	1.094	1	0.0
110	0.7222	0.6237	0.5702	21.0
120	0.4558	0.5124	0.4684	2.8
140	0.0166	0.2570	0.2350	1315.7
150	0.1585	0.2053	0.1877	18.4
160	0.2396	0.0249	0.0228	90.5

De las tablas 5.2 a 5.5 se puede observar que el error relativo disminuye a medida que el ángulo tiende a 90 grados, posición en la cual el arreglo de micrófonos se encuentra frente a la fuente de sonido y que representa la posición de referencia. En la tabla 5.5 se puede observar mayor discrepancia entre el modelo y las mediciones de señal, debido a que la disminución en el número de micrófonos y en la frecuencia espacial da lugar a la presencia del fenómeno aliasing generando lóbulos en el patrón de directividad que representa una singularidad difícil de medir (ver Fig 5.11). Estas dificultades se pueden observar en la tabla 5.5, en donde se aprecian omisiones para varias posiciones angulares y una gran diferencia entre los valores medidos y teóricos como los obtenidos para las posiciones de 40 y 140 grados.

Ahora bien, si consideramos aquella apertura angular en la cual los valores teóricos son significativos, aproximadamente una apertura de $\pm 40^\circ$ respecto al eje perpendicular al arreglo, y calculamos el error relativo promedio pero sin incluir la posición de referencia ideal, obtendríamos un error relativo promedio que describe el desempeño del arreglo de micrófonos. Los resultados de estos porcentajes de error se muestran en la tabla 5.6, junto con lo de otras aperturas menos representativas del desempeño real. En general, se observa un error relativo menor a 5% para aperturas $\pm 40^\circ$.

Tabla 5.6. Error relativo promediado para diversas aperturas, calculado para los datos de las tablas 5.1 a 5.4

Cantidad y distancia entre micrófonos	Error relativo Apertura de $\pm 40^\circ$	Error relativo Apertura de $\pm 50^\circ$
7 micrófonos separados 5 cm.	4%	6.6 %
5 micrófonos separados 5 cm.	4.4 %	6.6%
3 micrófonos separados 10 cm.	4.4%	6.8%

Con los datos teóricos y medidos se calcula también el error medio cuadrático utilizando la expresión:

$$EMC = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n e_k^2}{n}}$$

donde e_k es la k-ésima diferencia entre el valor teórico y el valor medido. Los valores calculados se muestran en la tabla 5.6. El EMC da una idea de la dispersión de los datos medidos respecto a la curva teórica. Debido a que no se cuenta con un valor de tolerancia del arreglo de micrófonos no se puede decir si estos errores se encuentran dentro de los límites aceptables, pero pueden servir de base para fijar un valor inicial de tolerancia para el instrumento.

Tabla 5.6. Error medio cuadrático calculado para los datos de las tablas 5.1 a 5.5.

Cantidad y distancia entre micrófonos	Error medio cuadrático
7 micrófonos separados 5 cm.	0.04
5 micrófonos separados 5 cm.	0.05
3 micrófonos separados 10 cm.	0.06
3 micrófonos separados 15 cm.	0.14

Con los errores calculados y mostrados en la tabla 5.6 se puede observar que a medida que la cantidad de micrófonos disminuye el ECM aumenta, así también al aumentar la separación entre micrófonos el error se eleva. Lo anterior coincide con el criterio que se utilizó para normalizar las mediciones tomando como referencia la medición hecha a 90° grados y la simetría que debe existir en el patrón de directividad. Es decir, a mayor cantidad de micrófonos, mayor será la cantidad de información capturada por el arreglo disminuyendo con esto el error en la medición. Por otro lado, a medida que la cantidad de micrófonos disminuye y la distancia entre ellos crece, la cantidad de información obtenida por el arreglo se ve disminuida y ello se refleja en el aumento del error. Las mediciones muestran un patrón de directividad significativamente simétrico, por lo tanto de uso práctico para evaluar el desempeño del arreglo de micrófonos. Los resultados del error relativo y del ECM indican una aproximación aceptable al modelo del patrón con un error menor al 10%.

5.3 Automatización de las mediciones

Debido a que uno de los objetivos es hacer un barrido sobre un plano con el arreglo unidimensional de micrófonos, esto sin duda representaría un trabajo todavía más arduo que el anterior y la automatización de las mediciones y su procesamiento era necesario. Basado en el algoritmo que se había desarrollado inicialmente para la obtención del patrón de directividad, se procedió a modificarlo y mejorarlo utilizando además la interfaz gráfica GUIDE (graphical user interfaz development environment) contenida en Matlab. El programa desarrollado tiene como objetivo desplegar las representaciones de la distribución de las presiones acústicas en un plano así como la fase de las señales de cada uno de los micrófonos en sus diferentes posiciones en el plano de medición. El algoritmo del programa antes mencionado es explicado mediante los siguientes diagramas de flujo. El primero de ellos, figura 5.12, son los pasos llevados a cabo para la adquisición de datos los cuales son guardados en archivos “daq”. Los archivos que aparecen como .omg solo contienen información de los números de disparo y de las posiciones del arreglo.

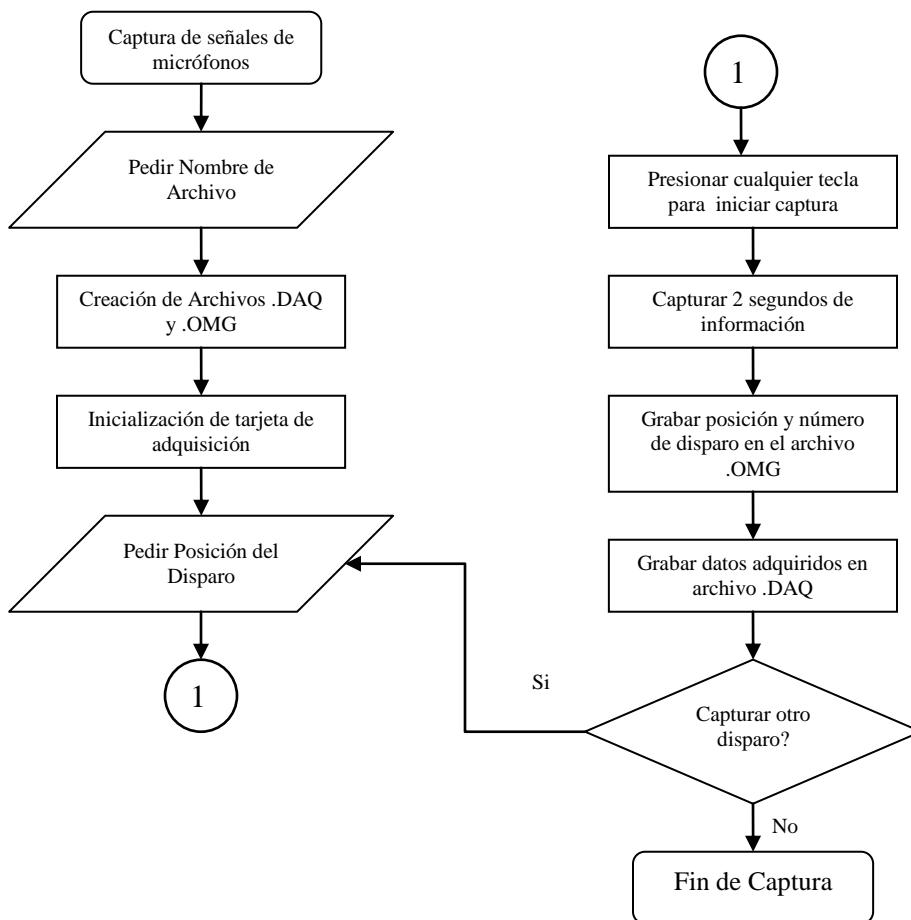


Figura 5.12. Diagrama de flujo para la captura de datos.

En seguida, la figura 5.13 presenta la secuencia de eventos para el procesamiento de datos y el despliegue de resultados. En este se muestra un bloque que se refiere a la obtención de los ángulos de fase. El procedimiento llevado a cabo para determinar la fase de cada una de las señales está basado en la localización de los valores máximos de la señal de interés y la de referencia. Detectados estos valores es posible conocer el tiempo en que se dan estos, y mediante la diferencia de tiempos y la frecuencia establecida se calcula la fase de la señal de interés respecto a la señal de referencia. Este procedimiento se repite para todas las señales capturadas en cada canal del arreglo de micrófonos.

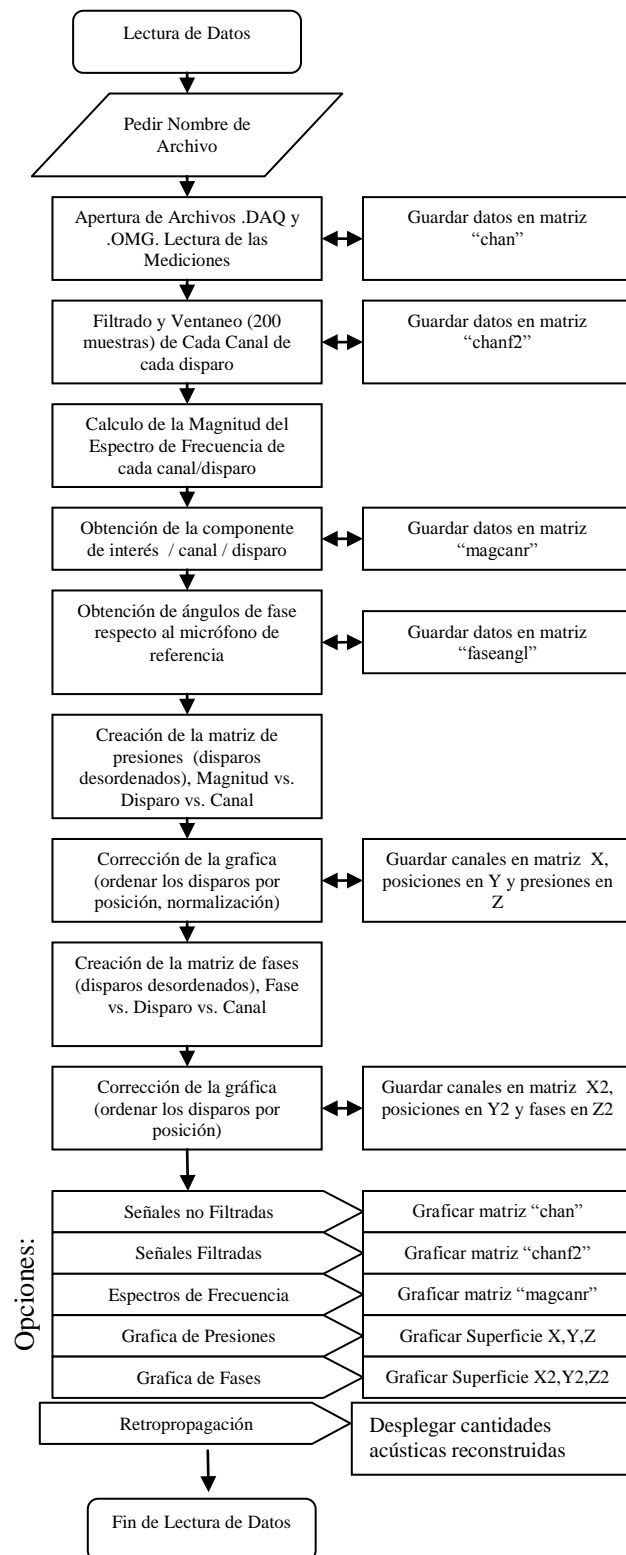


Figura 5.13. Diagrama de flujo para la lectura y procesamiento de datos.

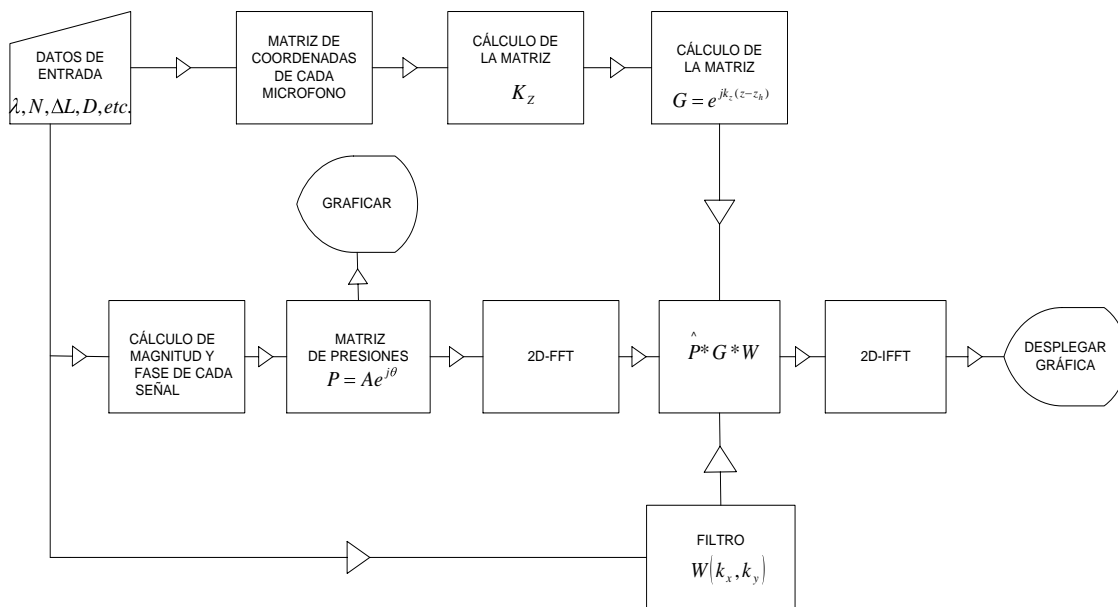


Figura 5.14. Diagrama de flujo para realizar una reconstrucción holográfica.

El proceso de retropropagación incluido en la interfaz gráfica puede ser descrito mediante el diagrama de flujo de la figura 5.14. A grandes rasgos, el procedimiento consiste en formar la matriz de presiones acústicas, para ello se determinaron las magnitudes y fase de cada una de las señales adquiridas. Enseguida se procede a obtener el espectro angular a través de la transformada de Fourier en dos dimensiones. Por otro lado se forma la matriz G que representa el propagador, es aquí donde se define la distancia a la cual se retropropagarán los datos medidos. Además, para generar esta matriz se definen sus parámetros como lo es la componente del número de onda k_z , que a su vez involucra la longitud de onda λ , las componentes k_x y k_y las cuales dependen del número de micrófonos y la separación de estos. Al mismo tiempo la matriz W que representa el filtro espacial tipo exponencial es generada. Ya con estas tres matrices se procede a efectuar su multiplicación. Como parte final, a este producto se le aplica la transformada inversa de Fourier en dos dimensiones con lo cual es posible desplegar gráficamente la distribución de presiones en un nuevo plano.

Para entrar a la interfaz gráfica se introduce desde la ventana de comandos de Matlab el nombre “soundaq”. En ese momento aparecerá una primer pantalla como la que aparece en la figura 5.15.

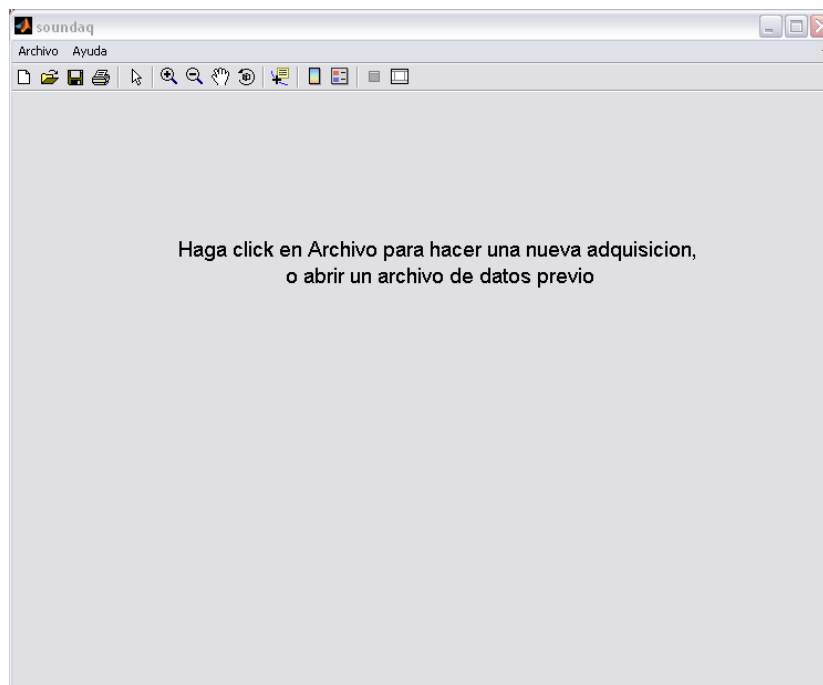


Figura 5.15. Menú principal de la interfaz gráfica “sondaq”.

En esta ventana se indica si lo que se requiere es hacer una nueva adquisición (medición) o leer un archivo previamente creado. Si la opción “nueva adquisición”, es decir tomar mediciones, se despliega inmediatamente un mensaje en el que solicita dar un nombre al archivo. Después de esto se da un número de disparo o bien, una distancia en centímetros. Ya terminada la medición, aparece un mensaje indicando si desea hacer otra medición, si la respuesta es afirmativa se repite el ciclo, en caso contrario significará que el proceso de medición terminó y se estará de regreso al menú principal. Si se desea en ese momento desplegar resultados se procede a elegir la opción “abrir un archivo” de datos. Inmediatamente después aparecerá una ventana como la que se muestra en la figura 5.16 con los archivos creados en mediciones anteriores así como el de reciente creación.

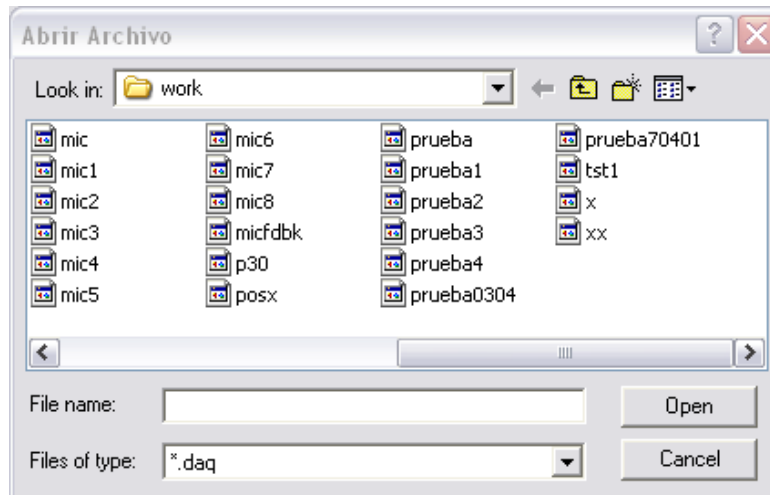


Figura 5.16. Ventana para seleccionar el archivo a procesar.

Al seleccionar algún archivo los datos se procesarán en unos cuantos segundos apareciendo después una ventana como la mostrada en la figura 5.17 con las opciones para desplegar los diferentes resultados que el algoritmo es capaz de dar y que pueden ser de utilidad para el usuario.

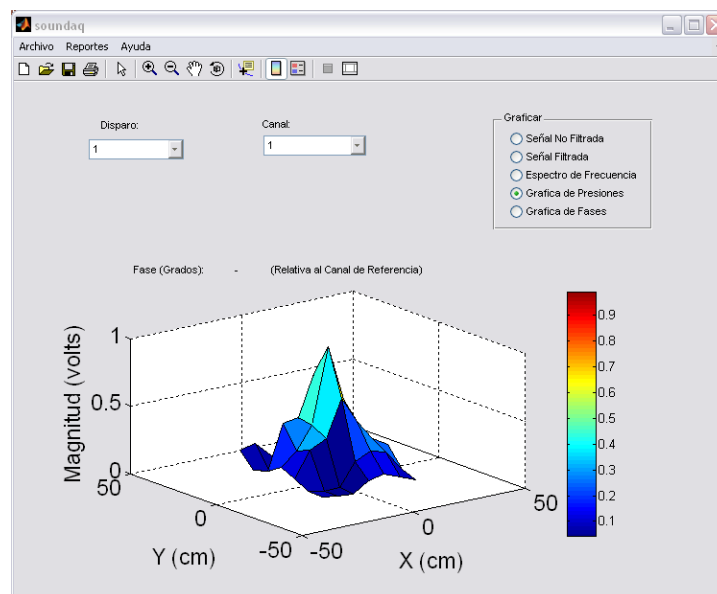


Figura 5.17. Ventana de opciones de reporte de resultados.

El resto de las ventanas que la interfaz gráfica es capaz de mostrar serán presentadas en secciones posteriores. A continuación la figura 5.18 presenta un diagrama a bloques a manera de un mapa con el que se explica y se da detalle de las diferentes opciones que presenta la interfaz gráfica.

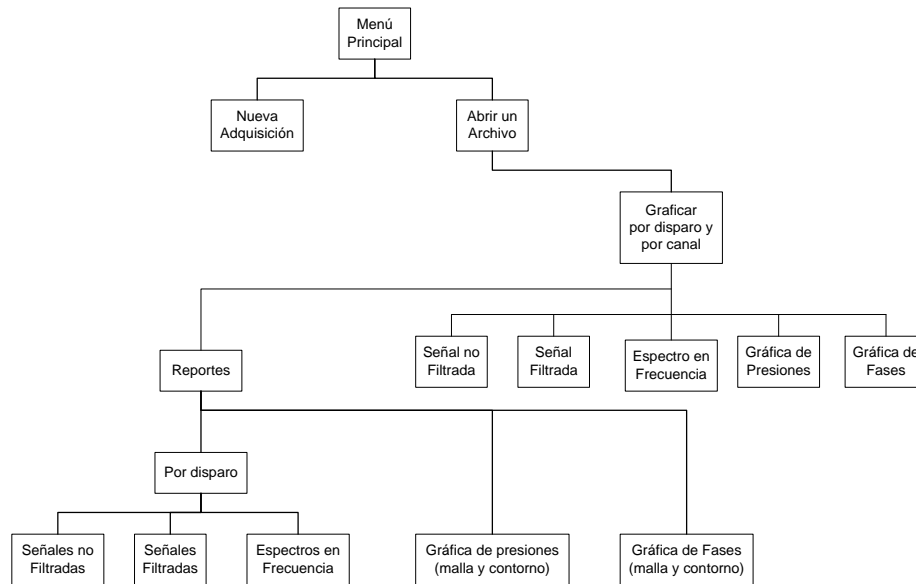


Figura 5.18. Mapa de la interfaz gráfica “soundaq”.

En la figura 5.18 se pueden apreciar dos secciones muy semejantes que despliegan gráficas de señales no filtradas, señales filtradas y espectros. La diferencia en estas secciones es que en una despliega información por canal y por disparo seleccionado. La otra sección (reportes) presenta las señales y espectros de todos los canales por disparo, pudiendo con esto observar al mismo tiempo todas las señales no filtradas o filtradas así como sus espectros. En cuanto a las gráficas de presiones y de fases, la diferencia es que en la sección de reportes se pueden observar los resultados en diferentes presentaciones, gráfica en malla con o sin color y gráfica de contornos en colores.

5.4 Barrido con arreglo lineal

A continuación se dan los detalles de las primeras mediciones de prueba realizadas para conocer la distribución de presiones acústicas y de fase en un plano mediante el barrido de un arreglo lineal de micrófonos. Debido a la limitación hasta el momento en la cantidad de micrófonos y canales disponibles en la tarjeta de adquisición, se decidió llevar a cabo mediciones con un arreglo de 7 micrófonos separados 8 centímetros entre si. Con esta separación y de acuerdo a la frecuencia de muestreo espacial de Nyquist, el arreglo es capaz de resolver para ondas acústicas de hasta 2125 Hz. Un octavo micrófono más colocado en la fuente de sonido servirá como referencia para determinar la fase de los otros siete. Cabe mencionar que las condiciones en las que se llevó a cabo el experimento no eran las de espacio libre, es decir, se hicieron en un ambiente reflectivo.

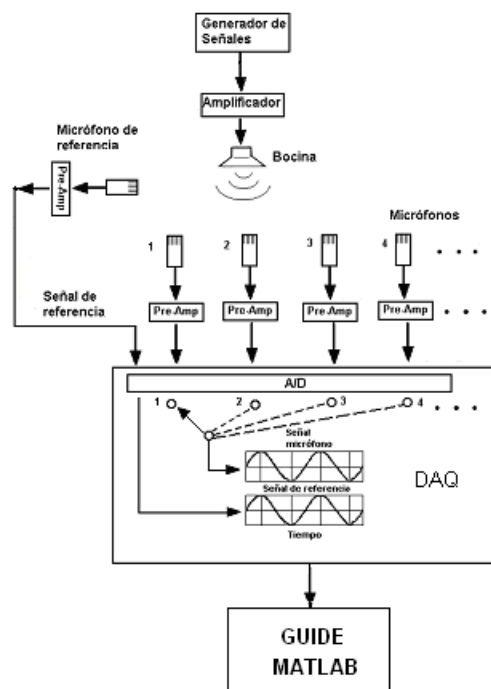


Figura 5.19. Esquema general para el barrido con los diferentes componentes del sistema de medición.

La figura 5.19 representa un diagrama general del experimento donde se observan los componentes del mismo, como son: generador de señales, fuente de sonido, micrófonos, tarjeta de adquisición e interfaz gráfica GUIDE de Matlab.

La fuente de sonido fue excitada con una señal senoidal de 2kHz con 2 volts de pico a pico. A esta frecuencia le corresponde una longitud de onda de 17 cm considerando la velocidad del sonido de aproximadamente 340m/s. Dado que la longitud del arreglo lineal debe ser de al menos una longitud de onda y considerando que las dimensiones de la fuente de sonido utilizada son de 20 cm x 12 cm se determinó abarcar un área de 2.5 veces la dimensión más grande de la fuente dando una distancia entre micrófonos de 8 cm. Se consideró también barrer un área de $48 \times 48 \text{ cm}^2$ que equivale a realizar 7 mediciones sobre el eje vertical.

Como se mencionó en la sección anterior, se muestran otras de las ventanas de la interfaz gráfica con algunas de las gráficas con los resultados preliminares. Por ejemplo, la figura 5.20 muestra las señales filtradas del cuarto disparo de todos los canales incluyendo el de referencia (canal 8). Este disparo corresponde a una posición en donde el micrófono correspondiente al canal 4 está justo frente a la fuente de sonido; este punto es el que se toma como el origen (0,0) del plano medido. La siguiente gráfica, figura 5.21, presenta la distribución de presiones acústicas normalizadas en el plano medido, tanto en forma de malla como de contorno. Con la escala de colores dada se puede apreciar la variación de presión de sus valores mínimos a su máximo que se localiza justo frente a la fuente de sonido, el punto (0,0). Los resultados aquí observados corresponden cualitativamente a los que se obtendrían teóricamente.

La distribución de fases es mostrada en la gráfica de la figura 5.22. En ella se puede observar la variación de la fase respecto a la posición del micrófono. Se puede apreciar en ésta tres valores mínimos. En la gráfica de contornos se alcanza a ver que uno de estos valores se encuentra en el origen y los otros dos a una distancia de aproximadamente una longitud de onda, esto corresponde a lo que se puede deducir analíticamente.

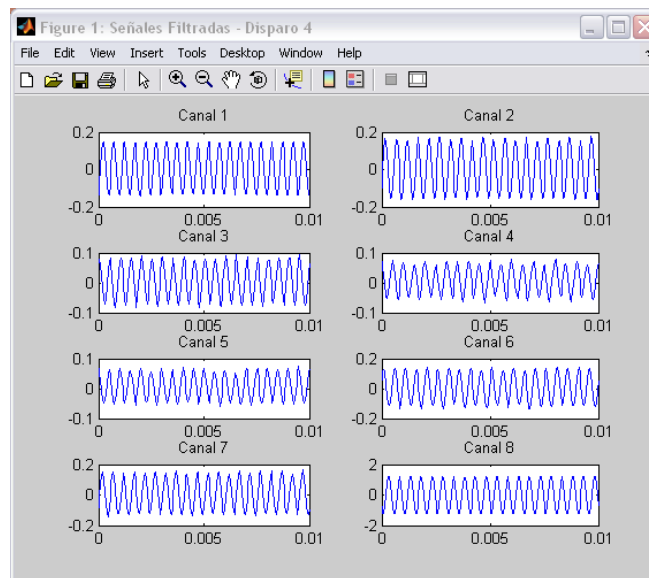


Figura 5.20. Señales filtradas de cada canal en un disparo.

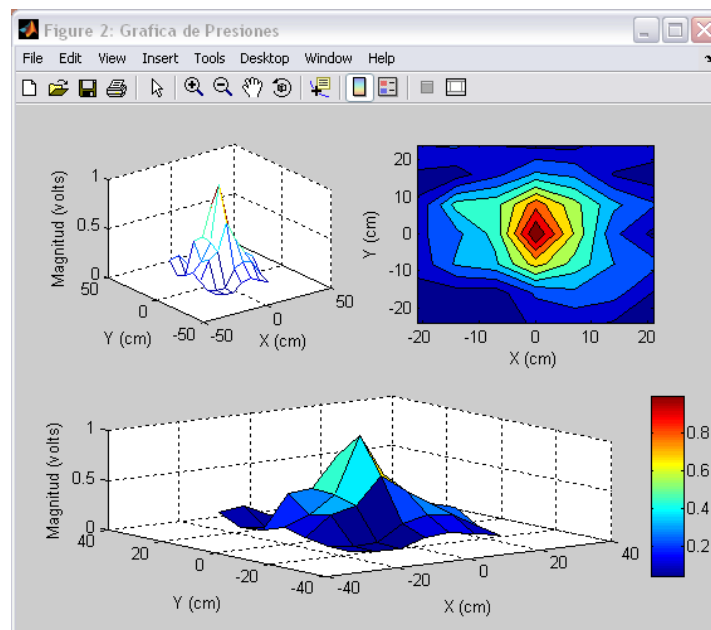


Figura 5.21. Reporte de distribución de presiones acústicas.

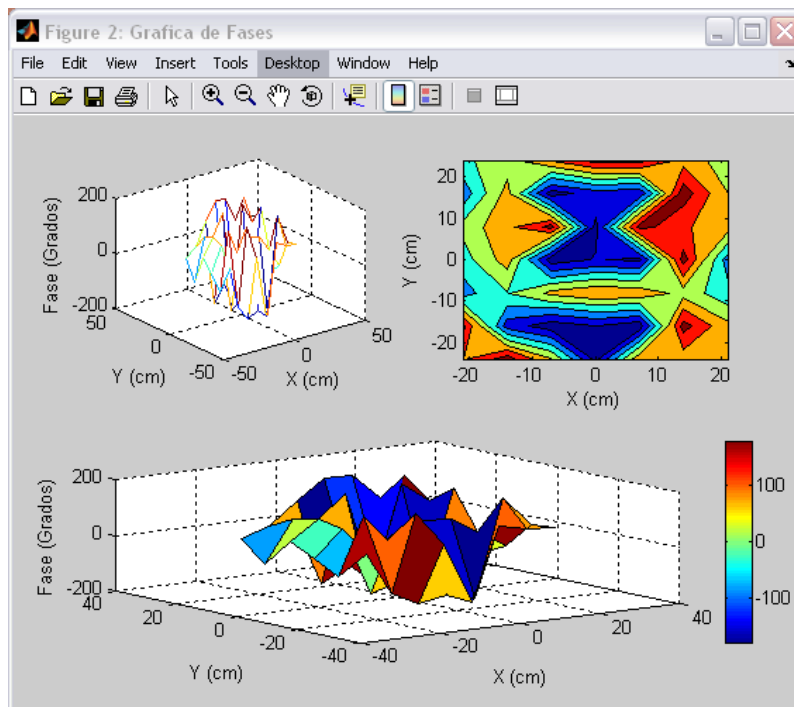


Figura 5.22. Reporte que muestra las variaciones de fase.

Aunque hasta el momento los resultados vistos corresponden en cierta manera a los esperados y estudiados en la parte teórica todavía pueden mejorarse. Al respecto, falta por hacer en cuanto al acondicionamiento de la señal y las condiciones de ambiente en las que se está llevando el experimento. Sin embargo, las gráficas de distribución de presión y fase han sido las esperadas, ya que aun sin contar con las condiciones de espacio libre que pudieran darse en un cuarto anecoico, los resultados mostrados hasta el momento dan muestra de la radiación acústica de una fuente de sonido así como de su localización. Pudiera pensarse en una aplicación del instrumento al menos para obtener información de la localización de una fuente de sonido en un ambiente altamente reflectivo.

5.4.1 Circuito amplificador

Como parte del acondicionamiento de las señales se construyó una tarjeta conteniendo ocho circuitos de amplificación. En cada circuito se utilizaron amplificadores operacionales OP275. La configuración utilizada en cada circuito amplificador se puede observar en la figura 5.23.

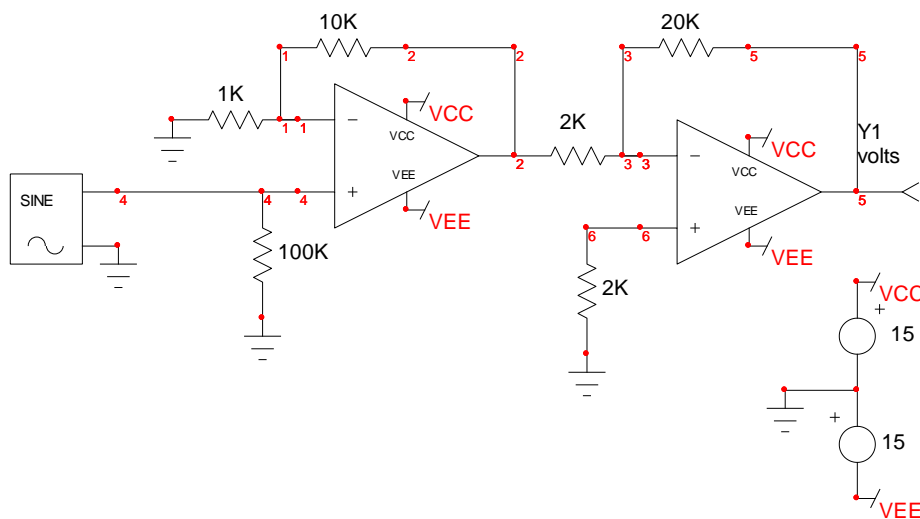


Figura 5.23. Configuración del circuito amplificador para cada canal del arreglo de micrófonos.

Con esta configuración se logra reducir el ruido electromagnético que en algunos casos, es del orden de las señales sin amplificar. Con el uso de la tarjeta de amplificación (ver figura 5.24), se podrá amplificar en cien veces las señales adquiridas; ganancia suficiente para medir las señales de interés sin llegar a saturar la tarjeta de adquisición. En estas condiciones, se puede tener acceso a más canales de la tarjeta de adquisición al conectar cada uno de ellos en modo simple.

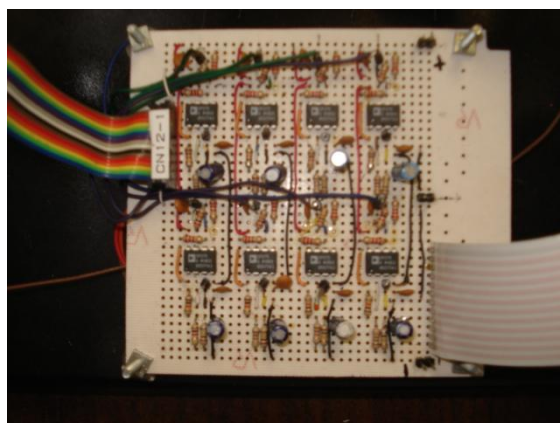


Figura 5.24. Tarjeta que contiene los ocho circuitos que amplifican las señales adquiridas.

5.5 Arreglo bidimensional

. Para un barrido manual con el arreglo lineal se llevaba aproximadamente treinta minutos, ello sin tomar en cuenta la disposición de equipo y verificación de canales. Además, del error que seguramente se introducía en las mediciones cada vez que el arreglo era trasladado manualmente en el barrido; los micrófonos se movían y perdían su alineamiento respecto a la horizontal. Para resolver lo anterior, se procedió al diseño y construcción de un arreglo bidimensional de micrófonos.

El arreglo constaría de una matriz cuadrada de sensores los cuales deberían estar sujetos a una estructura que garantizara su alineación y la distancia entre ellos. Se pensó también en la posibilidad de realizar una adquisición simultánea de canales, pero esta resultaba demasiado costosa, sin embargo, la idea era reducir el tiempo de adquisición. Por lo que se decidió diseñar y construir un sistema de medición automático basado en multiplexores.

Tomando en cuenta la cantidad de canales disponibles en la tarjeta de adquisición de datos para computadora personal con que se cuenta, y la tarjeta previamente elaborada con ocho circuitos amplificadores, se determinó realizar una matriz de 8 x 8 micrófonos. Estos sensores fueron montados sobre una rejilla cuadrada de acrílico enmarcada con ángulos de aluminio, tal y como se puede observar en la figura 5.25. Esta rejilla permite disponer los micrófonos a diferentes distancias entre ellos garantizando su correcta separación. La distancia entre micrófonos que se eligió fue de 5 centímetros; con esta separación se tiene λ_{\min} de 10 cm. De la ecuación 2.2 se determina que el arreglo es capaz de muestrear espacialmente señales acústicas hasta de 3400 Hz considerando una velocidad de propagación de 340 m/s.

Respecto a este último punto, el criterio de diseño estuvo basado en frecuencias de 1 a 2 Khz. que se estuvieron manejando con el arreglo lineal, además de tener en mente un arreglo portátil, es decir, que no fuera demasiado grande y que se pudiera transportar fácilmente. Por otro lado, si se desea cubrir un área mayor, es decir, aumentar la apertura de medición, es posible realizar una conexión estructural con varias secciones de malla acrílica como la mostrada en la figura 5.25.



Figura 5.25. Estructura de soporte para el arreglo bidimensional de micrófonos.

Cada uno de los micrófonos fue unido a cables coaxiales 2 x 24 AWG (american wire gauge) e introducidos en cilindros de plástico para su soporte, esto se puede ver en la figura 5.26. Estos cilindros cuentan con un par de muescas en donde se ensamblan a la rejilla acrílica lo que les impide moverse y así estar bien alineados.



Figura 5.26. Micrófonos de 6 milímetros de diámetro alojados en cilindros de plástico.

5.5.1 Circuito multiplexor

Con el fin de automatizar las mediciones y con ello reducir en gran medida el tiempo de adquisición se construyó un circuito multiplexor.

Se utilizaron multiplexores analógicos CMOS de alto desempeño ADG407 que “switchean” una de las ocho entradas diferenciales a una salida común diferencial determinada por tres líneas de dirección binarias A0, A1 y A2, ver figura 5.27(a). Una entrada EN es utilizada para habilitar o deshabilitar el dispositivo. Cuando la entrada EN se encuentra deshabilitada todos los canales estarán apagados. La figura 5.27 (b) muestra la configuración de los pins de este multiplexor. Con esta configuración solo se requieren

de cuatro dispositivos para multiplexar ocho canales, es decir, se tienen dos multiplexores en un solo circuito integrado.

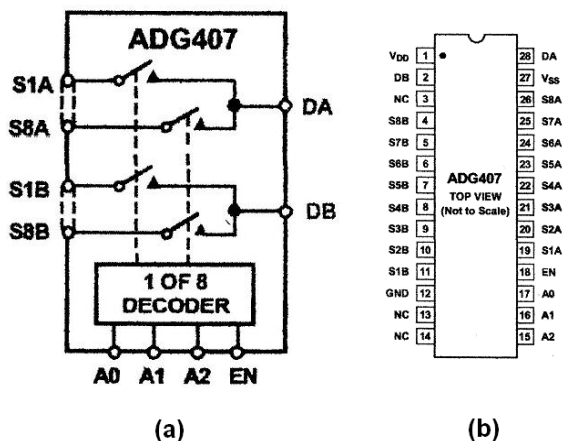


Figura 5.27. (a) Diagrama funcional del multiplexor; (b) configuración de pins del dispositivo.

Unas de las características importantes de este dispositivo son sus tiempos de apertura y cierre de 160 y 150 nanosegundos, respectivamente. Dentro de sus aplicaciones se pueden mencionar la prueba de equipo automático, sistemas de adquisición de datos y sistemas de comunicación.

La fotografía de la figura 5.28 muestra la tarjeta impresa con los cuatro dispositivos multiplexores. A su lado izquierdo se pueden observar dos conectores los cuales contienen las líneas de los 64 canales a multiplexar. Al lado derecho se aprecia dos conectores, uno para la polarización (cables rojo, negro y blanco) y el otro con 8 pins de salida y 3 pins para los bits de control. La entrada EN en cada multiplexor siempre está habilitada.

El control de adquisición de los canales de la matriz de sensores fue hecho por columnas. Al mandar los bits de control a las entradas A0, A1 y A2 de cada uno de los dispositivos se estará adquiriendo las señales de canales de columnas diferentes pero del mismo renglón. Por ejemplo, al mandar la combinación 0 0 0, un primer multiplexor da lugar al paso de la señal del primer micrófono de la primera y segunda columna, un segundo multiplexor dará paso a la del primer micrófono de la tercera y cuarta columna, y así hasta el último dispositivo que da paso al primer micrófono de la séptima y octava

columna. Con este procedimiento se realiza un barrido renglón por renglón con el arreglo bidimensional de micrófonos.

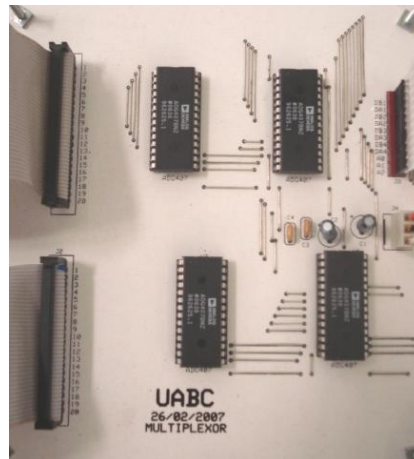


Figura 5.28. Circuito multiplexor.

5.5.2 Calibración de micrófonos

La metodología para la calibración de los micrófonos se hizo de manera semejante a la del arreglo lineal. Solo que ahora se contó con un calibrador marca Quest que da un tono de 1kHz a 110 dB. Cada sensor fue introducido en el calibrador (ver figura 5.29) tomando lectura de la amplitud de la señal. Al final se selecciona un canal como referencia y en base a este se generan los factores que se aplicarán al resto de los canales. Para hacer más ágil el procedimiento de calibración, se realizó una pequeña rutina en Matlab que al final genera una matriz con los factores de calibración. Esta matriz de calibración es invocada desde la interfaz gráfica “soundaq2d”, que adquiere, procesa y despliega resultados. La interfaz “soundaq2d” es la versión en dos dimensiones de la interfaz “soundaq” utilizada con el arreglo unidimensional.



Figura 5.29. Calibrador marca Quest utilizado para la calibración de los micrófonos.

5.5.3 Integración del sistema

Una vez terminadas y probadas las etapas de polarización, multiplexeo y amplificación se procedió a su integración. Ésta se hizo sobre una plataforma metálica. Cada una de las tarjetas fue sujeta mediante tornillos y alambreada por debajo de la plataforma. Para la polarización de los componentes se dispusieron de dos secciones de conectores hembra para la conexión de una fuente de poder. Una sección de ± 12 volts para amplificadores y multiplexores y otra de +5 volts para los micrófonos. En la figura 5.30 se pueden observar cada uno de los componentes antes mencionados los cuales son señalados de la siguiente manera:

- 1.- Terminales para la fuente de poder.
- 2.- Tarjetas de polarización para los micrófonos.
- 3.- Circuito de polarización y amplificación para micrófono de referencia.
- 4.- Circuito multiplexor.
- 5.- Tarjeta con circuitos amplificadores.
- 6.- Block de terminales de la tarjeta de adquisición.
- 7.- Cable plano conectado a la tarjeta de adquisición.

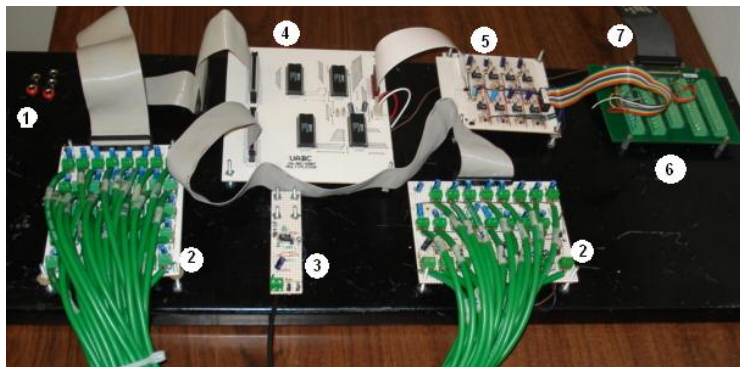


Figura 5.30. Montaje en plataforma metálica de las tarjetas de polarización, multiplexeo, amplificación y block de terminales.

5.5.4 Barrido con el arreglo bidimensional

Para las mediciones con la matriz de micrófonos se utilizaron las mismas fuentes de sonido utilizadas con el arreglo lineal. Se trata de bocinas de 2 centímetros de diámetro y 0.2 watts de potencia.

Antes de iniciar cualquier sesión de medición se verifica que cada canal este adquiriendo señal adecuadamente. Posteriormente, se ubica la fuente de sonido en una determinada posición, que por lo general fue al centro del arreglo. Así también se dispone el micrófono de referencia justo en el plano de la fuente. La figura 5.31 muestra un esquema general del experimento llevado a cabo con esta matriz de sensores.

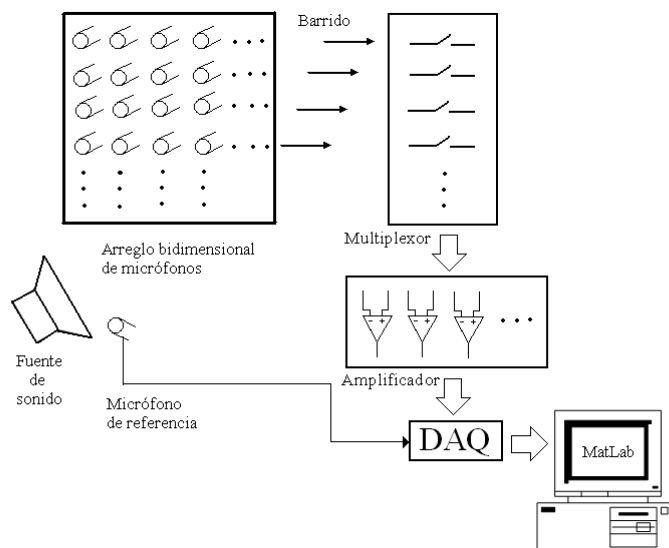


Figura 5.31. Esquema general del experimento con un arreglo bidimensional de micrófonos.

Con este nuevo instrumento de medición se redujo considerablemente el tiempo de adquisición. Por cada barrido con el arreglo lineal se llevaba 30 minutos, ahora solo toma aproximadamente 24 segundos. Esto da lugar a realizar una mayor cantidad de mediciones en una sola sesión.

Los resultados obtenidos de estas y otras mediciones se reservan para el siguiente capítulo, en donde además de trabajar con las ya mencionadas bocinas operando a una sola frecuencia, se mostrarán los resultados obtenidos con máquinas que producen campos acústicos complejos.

Capítulo 6

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las diversas mediciones de prueba como de aplicación que se realizaron con los arreglos lineal y bidimensional de micrófonos.

Para determinar la resolución del arreglo de micrófonos se utilizó como fuente de sonido dos bocinas. Estas bocinas eran de 2 centímetros de diámetro, 0.2 watts de potencia y fueron operadas a una frecuencia única de 2 kHz. La resolución está dada por la distancia mínima de separación entre las dos bocinas a la cual el sistema es capaz de distinguirlas.

Por otro lado y como parte medular de este trabajo se utilizó NAH en dos máquinas eléctricas rotatorias con el objetivo de distinguir sus principales partes móviles a través de la visualización de su radiación acústica para algunas componentes predominantes de frecuencias contenidas dentro de sus campos acústicos complejos. Para esto se hicieron reconstrucciones holográficas sobre el plano de cada una de las máquinas. Finalmente, se presenta la forma en que varía la radiación acústica de una máquina desde el plano de medición hasta planos paralelos contenidos dentro de ella. Esto último es solo una aproximación de lo que ocurre al interior de las máquinas. Actualmente es un tema bajo investigación [7] y representa un área oportunidad para desarrollar futuros trabajos que impliquen la exploración no invasiva de objetos e inclusive el cuerpo humano.

6.1 Barrido con arreglo lineal de micrófonos

En una primera etapa experimental se propuso a manera de prueba visualizar la radiación acústica y distinguir a una sola fuente de sonido. La frecuencia de excitación para la bocina utilizada como fuente de sonido fue de 2 kHz, que corresponde a una longitud de onda de 17 cm. Con esta frecuencia la distancia entre micrófonos debe ser menor a media longitud de onda, 8.5 cm. Se elige entonces una separación de 8 cm. Considerando esta distancia, se hace un barrido manual en forma vertical a cada 8cm cubriendo un área de 48 x 48 cm. La distancia entre la fuente de sonido y el arreglo de micrófonos fue de 9 cm. Esto siguiendo una recomendación de carácter técnico dada por [68] y [69], la cual se refiere a que la distancia entre la fuente de sonido y el plano de

medición deberá estar en el intervalo $\lambda/2 < Z_h < \lambda$. Con ello el arreglo actuará como un filtro pasa bajas natural, es decir, rechazará componentes de frecuencia espacial mayores a las de interés.

Se utilizó un octavo micrófono dispuesto sobre la superficie de la bocina, con la finalidad de que éste sirviera como sensor de referencia y con ello hacer el cálculo de la fase de cada una de las señales adquiridas por el arreglo.

Las variables acústicas como presión, intensidad y velocidad son representadas con valores normalizados. El uso de valores normalizados permite que dos o más conjuntos de datos sean comparables. Además, no es la intención de este trabajo establecer la medida absoluta de alguna variable acústica, sino utilizar la información que da esta de manera cualitativa para la visualización de fuentes de sonido, o su comparación cuantitativa entre las fuentes existentes en el plano. Por ejemplo en fonocardiografía [70] la normalización de los sonidos del corazón es el primer paso en el procesamiento de datos. Haciendo esto, los sonidos del corazón que se obtienen de diferentes instrumentos y mediciones pueden ser comparados. Con la normalización se logra la independencia entre la técnica de medición y el instrumento de medida.

La bocina fue puesta en la parte central respecto al arreglo de sensores, en término de coordenadas cartesianas, en la coordenada (0,0). Esto es posible observarlo en la figura 6.1 en donde se muestra la radiación acústica de una bocina en el plano holográfico, es decir, en el plano de medición del sonido producido por la bocina. Se puede ver que las mayores presiones acústicas se concentran en la parte central de la fuente y van disminuyendo conforme se alejan de ésta.

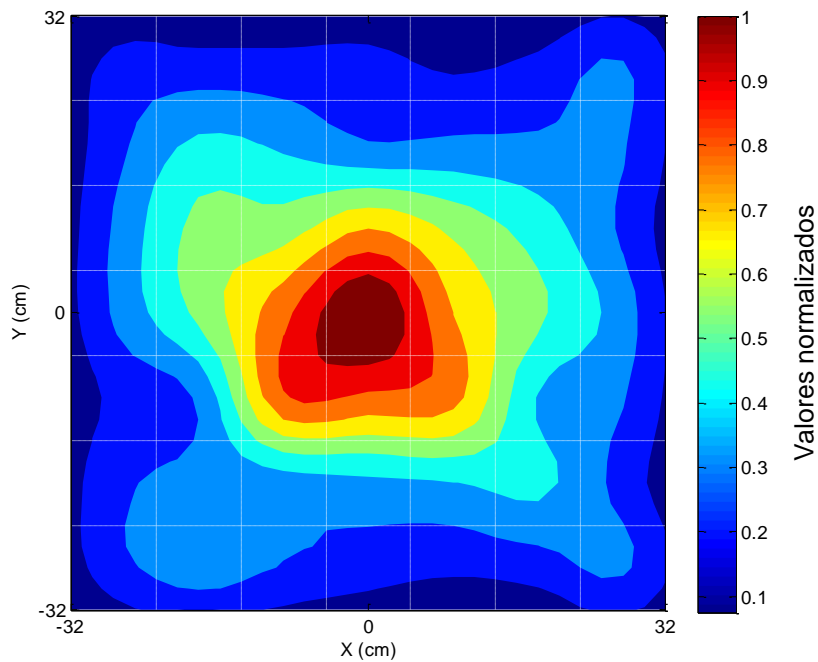


Figura 6.1. Representación en gráfica de contorno representando la radiación acústica medida por un arreglo lineal de 7 micrófonos.

La gráfica 6.2 corresponde a la reconstrucción del campo acústico en el plano de la bocina, en otras palabras, representa la retropropagación de los datos medidos hacia el plano de la fuente de sonido. En ella se observa una representación de la radiación mediante contornos concéntricos con una geometría más regular que los representados en la figura 6.1, asemejándose a lo que en teoría hubiera producido la bocina.

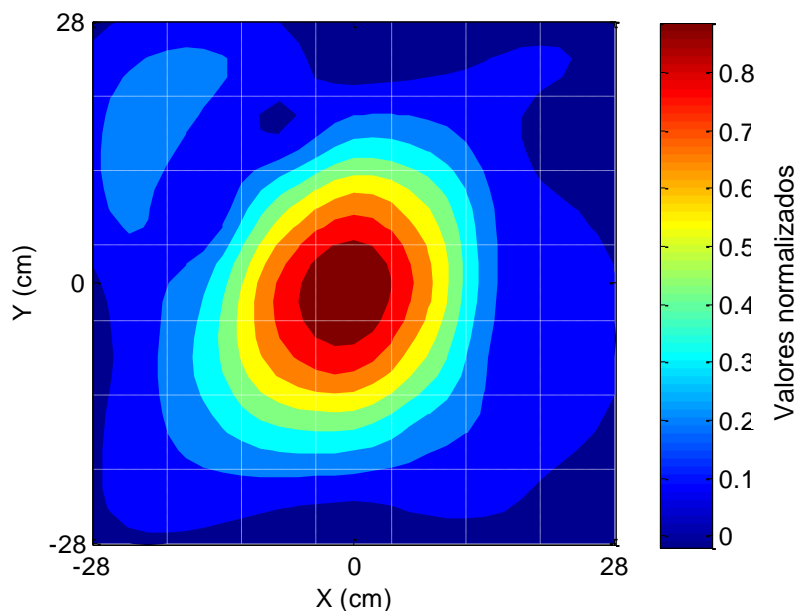


Figura 6.2. Distribución de presiones acústicas en el plano de la bocina resultado del proceso de reconstrucción holográfica.

Se mencionó en la parte teórica, que con la holografía acústica no solo se obtiene información acerca de la presión, sino también de la velocidad de las partículas y la intensidad acústica. Basados en la ecuación (4.8) que involucra a la presión y a la velocidad para determinar la intensidad acústica, se genera la gráfica en tres dimensiones mostrada en la figura 6.3. Aquí se observa una correspondencia con la información dada por la figura 6.2, la mayor intensidad representada por el pico de la gráfica corresponde con la ubicación de la fuente de sonido y esta intensidad disminuye conforme se aleja de ésta. Este tipo de representación es una alternativa más para la ubicación de fuentes de sonido.

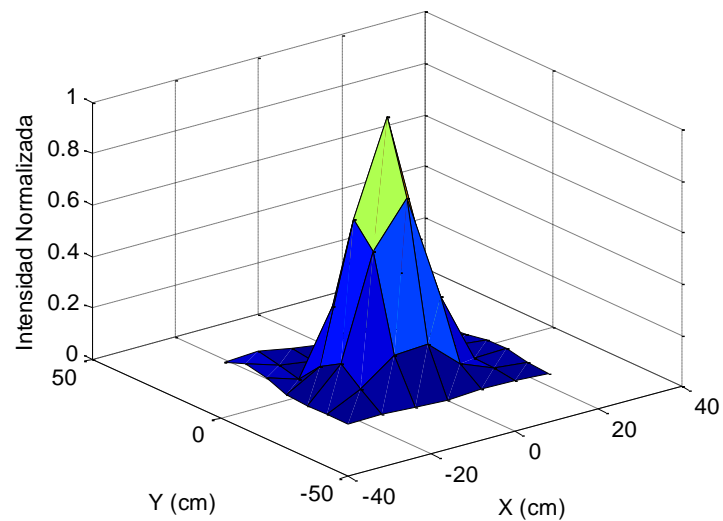


Figura 6.3 Intensidad acústica en el plano de una bocina.

El siguiente experimento se realizó ahora con dos bocinas conectadas en paralelo y excitadas a 2 kHz, mediante un generador de señales y separadas una distancia de 12 centímetros. La distancia entre éstas y el arreglo se mantuvo a 9 centímetros. La distribución de presiones sobre el plano de medición es ilustrada en la figura 6.4.

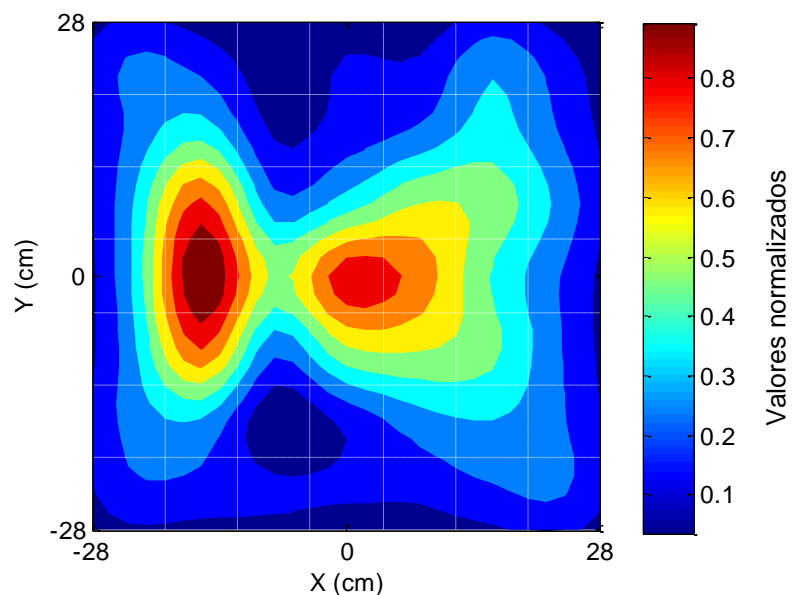


Figura 6.4. Distribución de presiones en el plano de medición de dos bocinas separadas 12 cm.

La retropropagación sobre el plano de las bocinas da como resultado la gráfica de la figura 6.5, en donde se puede observar claramente las dos fuentes de sonido, dando con esto las primeras muestras acerca de la resolución del sistema.

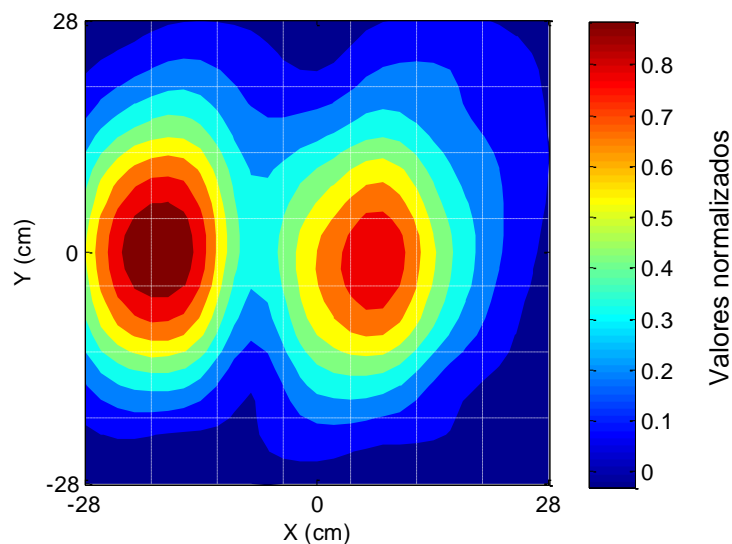


Figura 6.5. Distribución de presiones sobre el plano de las bocinas.

La figura 6.6 es una ilustración del cálculo de la intensidad acústica sobre el plano de las bocinas y que dan una muestra clara de la existencia de dos fuentes de sonido; resultados que no se pudieran desplegar si se utilizará la holografía convencional, es decir, no tener información de las ondas evanescentes que decaen exponencialmente en el campo cercano.

Cabe mencionar aquí, que este trabajo no pretende establecer una medida de la separación de fuentes de sonido a través de la reconstrucción holográfica, sino establecer su existencia y distinguir su ubicación.

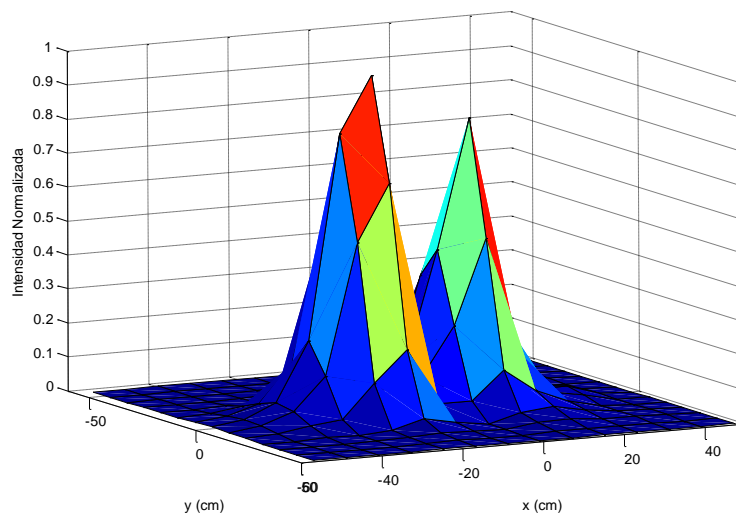


Figura 6.6. Intensidad acústica en el plano de dos bocinas separadas 12 cm.

Con el fin de probar la capacidad del sistema de medición para resolver dos o más fuentes de sonido, es decir, su resolución, se decidió acercar aún más las bocinas. La distancia entre ellas ahora fue de 9 centímetros. Las demás condiciones se mantuvieron. En la gráfica de la figura 6.7 se presenta la gráfica de la distribución de presiones en el plano holográfico.

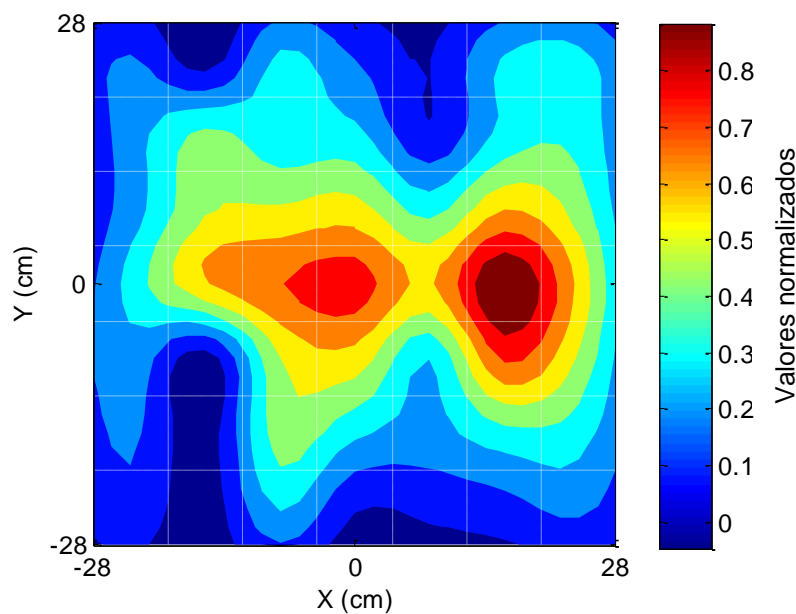


Figura 6.7. Distribución de presiones en el plano holográfico de dos bocinas separadas 9 cm.

Aplicando el proceso de reconstrucción se obtiene la gráfica 6.8 que representa la distribución de presiones sobre el plano de las bocinas. Al comparar las figuras 6.5 y 6.8 se observa que existe separación de las fuentes en ambas gráficas, pero en la última, la fuente de sonido del lado izquierdo queda representada por una región de menor intensidad. Esto debido a que a medida que se acercan las fuentes de sonido se va perdiendo la capacidad para distinguirlos hasta llegar el momento en que solo reconozca la existencia de solo una.

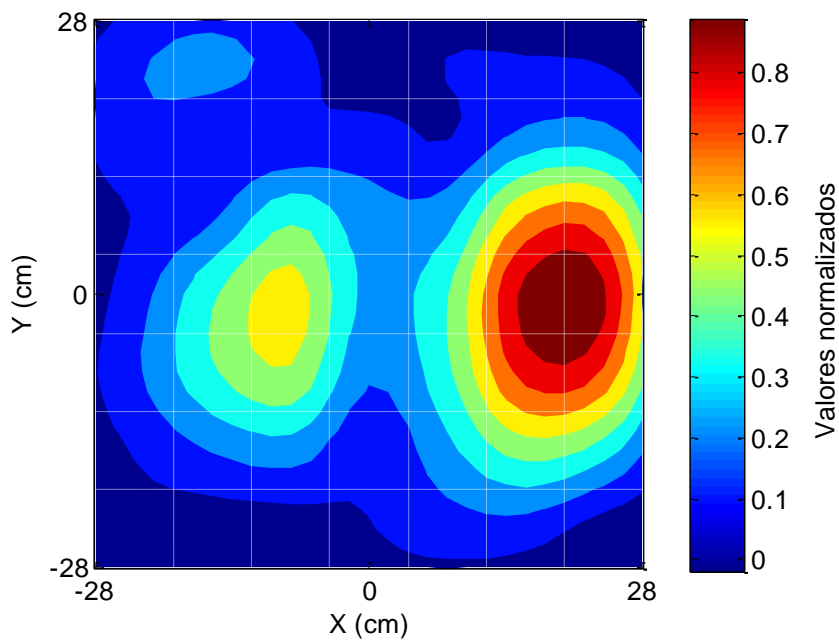


Figura 6.8. Retropropagación al plano de las bocinas separadas 9 cm.

La ubicación de estas dos fuentes se puede hacer evidente también si observamos la gráfica de intensidad acústica que se presenta en la figura 6.9. Aquí también aparece la bocina del lado izquierdo representada por un pico de menor intensidad.

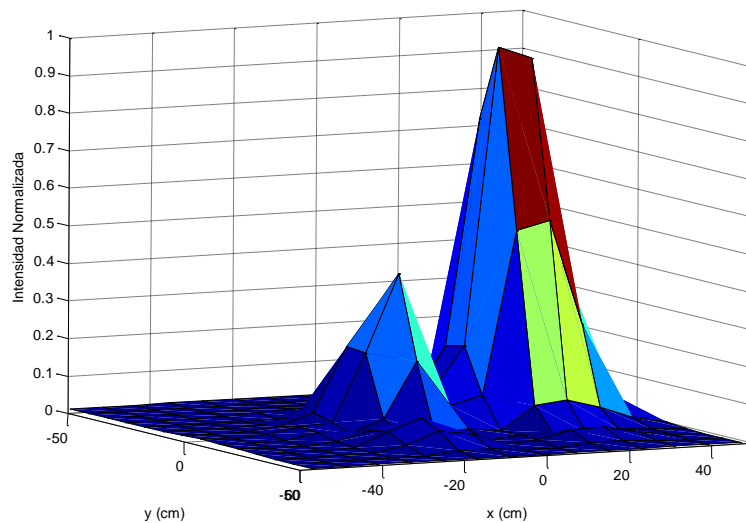


Figura 6.9. Intensidad acústica en el plano de dos bocinas separadas 9 cm.

Según los datos teóricos presentados por Williams y Maynard, la resolución es independiente de la longitud de onda. Por otro lado, desde el punto de vista técnico, la resolución está limitada por condiciones experimentales como el rango dinámico del instrumento. Así pues, a medida que las fuentes de sonido se van acercando, la capacidad del sistema de medición para separar o reconocer a las fuentes se va perdiendo.

Lo anterior se va apreciar en el resultado obtenido del siguiente experimento en el cual las dos bocinas se acercaron hasta alcanzar una distancia de 8.5 centímetros que corresponde a media longitud de onda según la frecuencia de excitación de 2 KHz.

Para empezar, la figura 6.10 muestra la distribución de presiones en el plano de medición, se puede observar que ya no se reconocen las dos fuentes de sonido. En la retropropagación hecha sobre el plano de las bocinas y que se ilustra en la figura 6.11, se puede observar la dificultad para reconocer visualmente una de las fuentes de sonido.

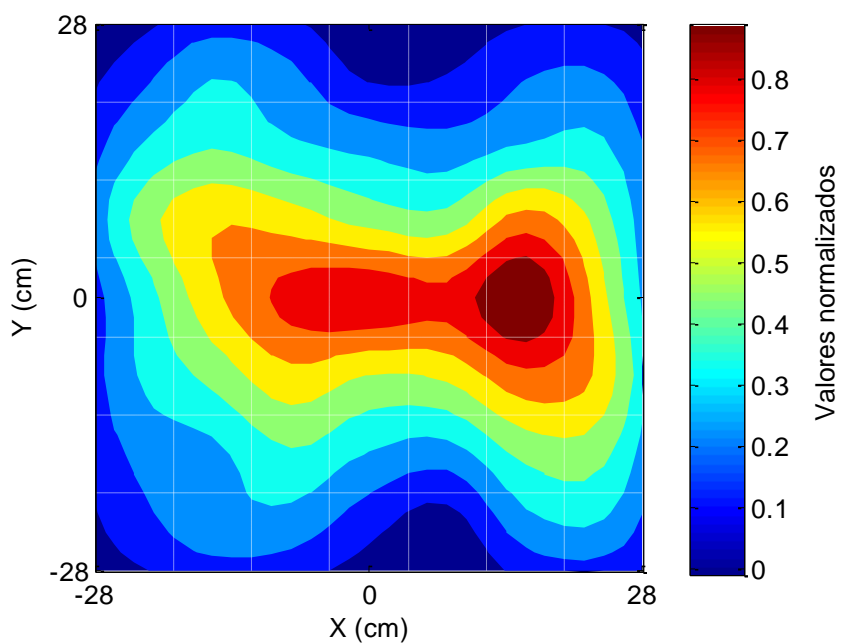


Figura 6.10. Distribución de presiones acústicas en el plano de medición de dos bocinas separadas 8.5 cm.

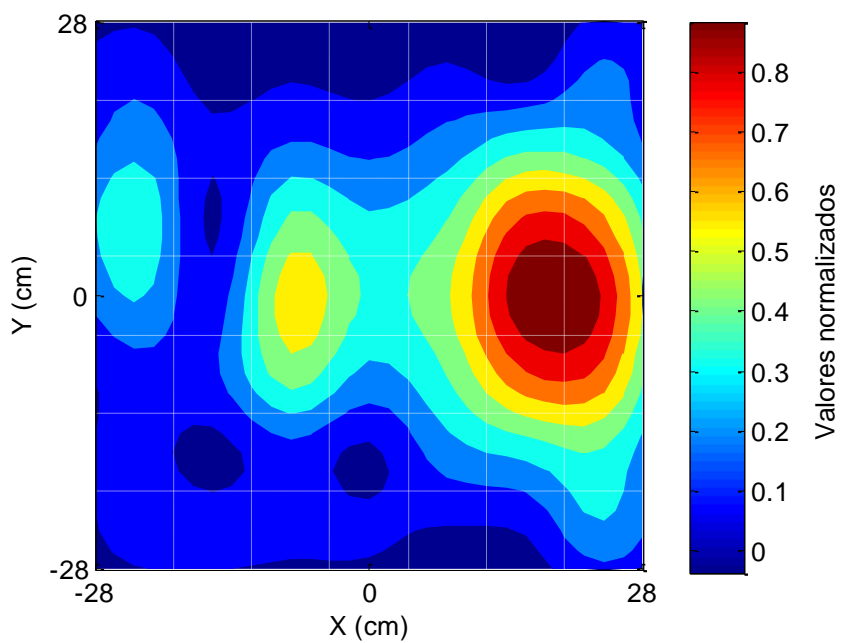


Figura 6.11. Retropropagación sobre el plano las bocinas separadas 8.5 cm.

Hasta aquí el arreglo lineal de micrófonos ha mostrado la capacidad para distinguir dos fuentes de sonido, observando un límite en su resolución de aproximadamente media longitud de onda, 8.5 cm. Esta capacidad se hará evidente cuando el sistema de medición distinga a 3 o más fuentes de sonido provenientes de los principales componentes rotatorios de dos máquinas eléctricas.

En lo que respecta a la localización de las fuentes de sonido, ésta no es muy precisa cuando la separación entre fuentes es menor a media longitud de onda. Observando las gráficas correspondientes a la retropropagación sobre el plano de las bocinas se podrá ver que la distancia a la que aparecen representadas las fuentes no corresponde con la localización física de éstas. Algunos de los factores que pueden contribuir a lo anterior son: calibración de los sensores, falta de alineación de sensores y fuentes de sonido, cálculo de la fase, acondicionamiento de la señal, el medio donde se llevan a cabo los experimentos y el uso de la teoría simplificada de ondas planas. Sin embargo, el alcance de esta tesis es el de visualizar la radiación acústica y distinguir la ubicación de dos o más fuentes en una estructura vibrante de forma irregular. Así la solución al problema de establecer la medida de la distancia entre fuentes de sonido será tema de estudio para trabajos posteriores los cuales involucren herramientas utilizadas en otras áreas del conocimiento, como la óptica, y que contribuyan a la solución de dicho problema.

6.2 Barrido con arreglo bidimensional de micrófonos

Debido a las dificultades que presenta el realizar los barridos de forma manual con el arreglo lineal construido, se decidió construir una matriz de sensores que garantizara la buena alineación y separación entre micrófonos, además de reducir el tiempo de adquisición.

Las características del sistema de medición basado en una matriz de 8 x 8 micrófonos ya fue descrita en el capítulo anterior. A continuación se presentan los resultados obtenidos con este sistema y se muestran algunas comparaciones con los resultados obtenidos con el arreglo en una dimensión. Así también se debe mencionar que hasta el momento las condiciones en las que se llevaron a cabo las mediciones no son de espacio libre. Para atender esto, se construyó una cámara anecoica. Como parte final de

los experimentos con bocinas, se presentarán los resultados obtenidos dentro de esta cámara.

6.2.1 Barridos con una y dos bocinas

El orden en que se fueron desarrollando las mediciones fue semejante al llevado a cabo con el arreglo en una dimensión. En primer lugar se muestra el resultado obtenido de la medición con una sola bocina. Su localización fue tal que coincidiera con el origen del arreglo, es decir, en la coordenada (0,0). Para efecto de comparar resultados, algunas de las condiciones en el desarrollo experimental siguen siendo las mismas, por ejemplo, frecuencia de excitación 2 Khz., distancia entre arreglo de micrófonos y fuentes de sonido de 9 centímetros.

La figura 6.12 representa la distribución de presiones en el plano de medición de una bocina. Si comparamos esta gráfica con el de la figura 6.1, podemos observar que la obtenida con el arreglo lineal presenta contornos con más simetría respecto a los ejes x y y . Una de las razones de esto, es el uso de 64 micrófonos que en teoría son iguales, pero en la práctica llegan a tener respuestas diferentes tanto en magnitud como en fase. Estas diferencias son fuentes de error en las mediciones que se hacen más evidentes al aumentar la cantidad de sensores.

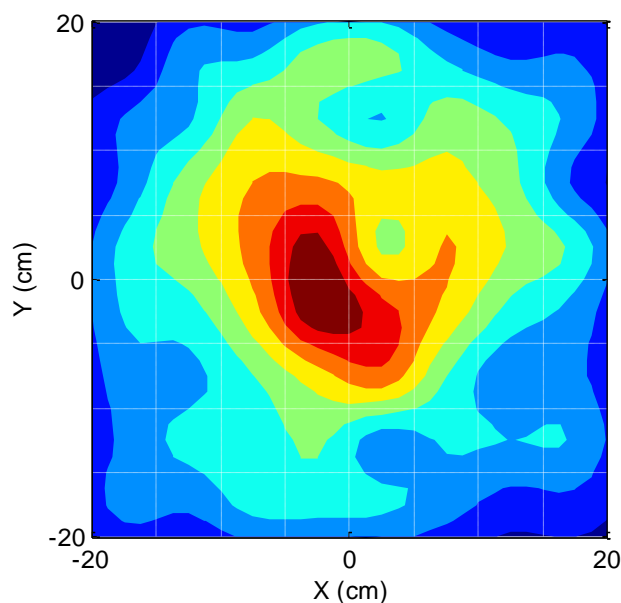


Figura 6.12. Distribución de presiones de una bocina en el plano de medición de un arreglo de 8x8 micrófonos.

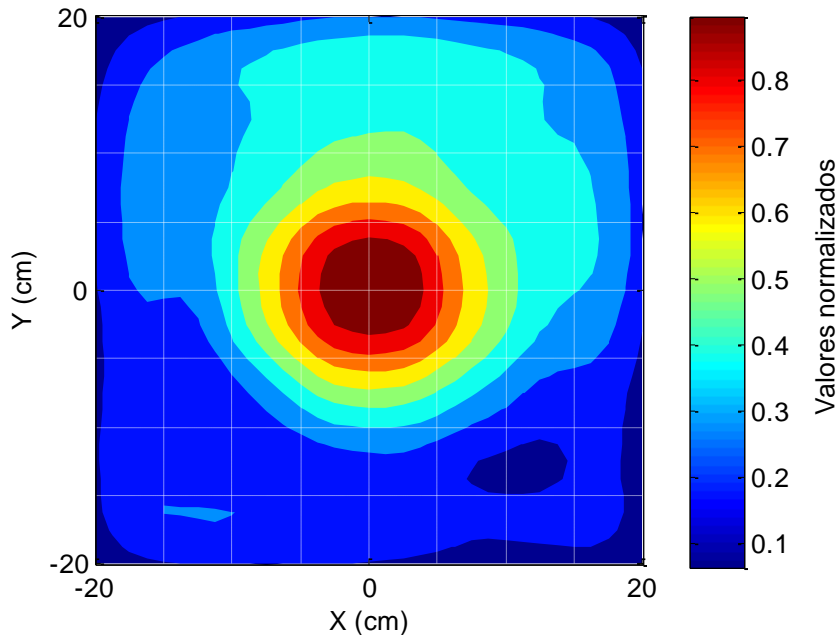


Figura 6.13. Distribución de presiones sobre el plano de la bocina.

Al retropropagar los datos medidos hacia el plano de la fuente de sonido se obtiene la distribución de presiones que se muestra en la figura 6.13. En ella se visualiza la forma en que se propaga la radiación acústica de la fuente de sonido, además de su ubicación en el origen de la retícula.

Los siguientes resultados que se despliegan son los obtenidos con dos bocinas iguales conectadas en paralelo. Para efectos comparativos se presentarán directamente las retropropagaciones hechas al plano de estas fuentes, omitiendo las distribuciones de presión en el plano holográfico.

En primer lugar tenemos la distribución de presiones acústicas en el plano de las dos bocinas a una distancia entre ellas de 14 centímetros, ver figura 6.14. Enseguida la figura 6.15 presenta la distribución de presiones de las mismas bocinas, pero ahora separadas una distancia de 12 centímetros. Y por último, las bocinas son separadas 8.5 centímetros presentando la distribución de presiones ilustrada en la gráfica de la figura 6.16, resultado del proceso de reconstrucción holográfica.

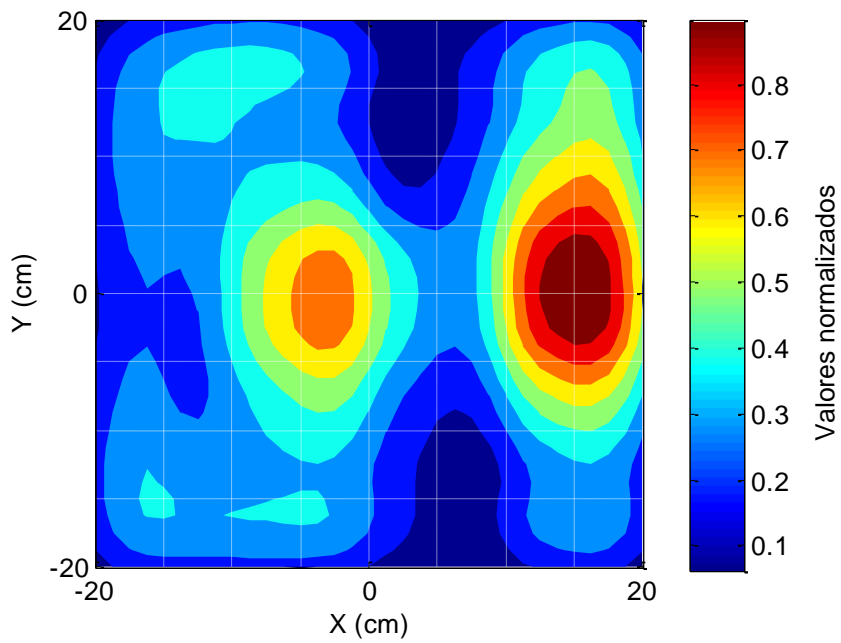


Figura 6.14. Distribución de presiones sobre el plano de dos bocinas separadas 14 cm.

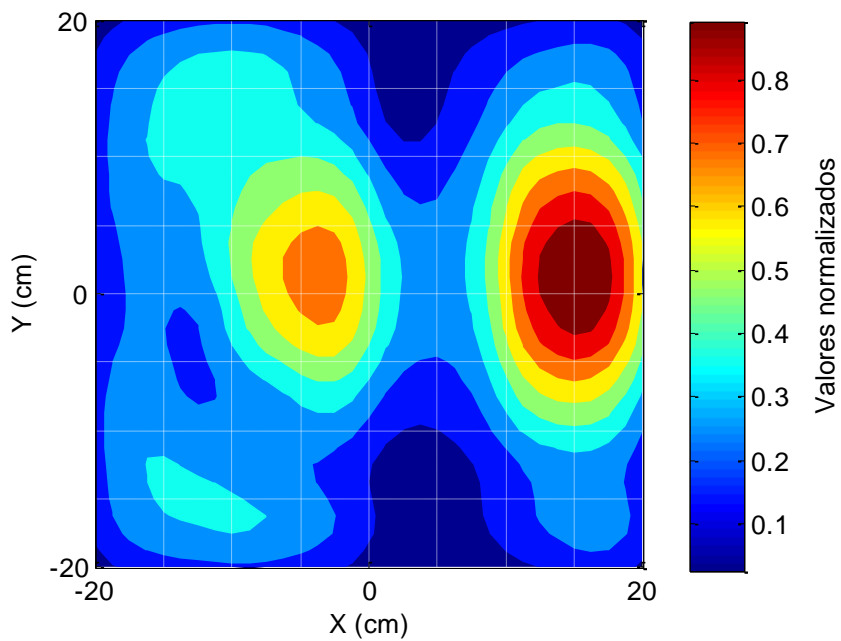


Figura 6.15. Distribución de presiones sobre el plano de dos bocinas separadas 12 cm.

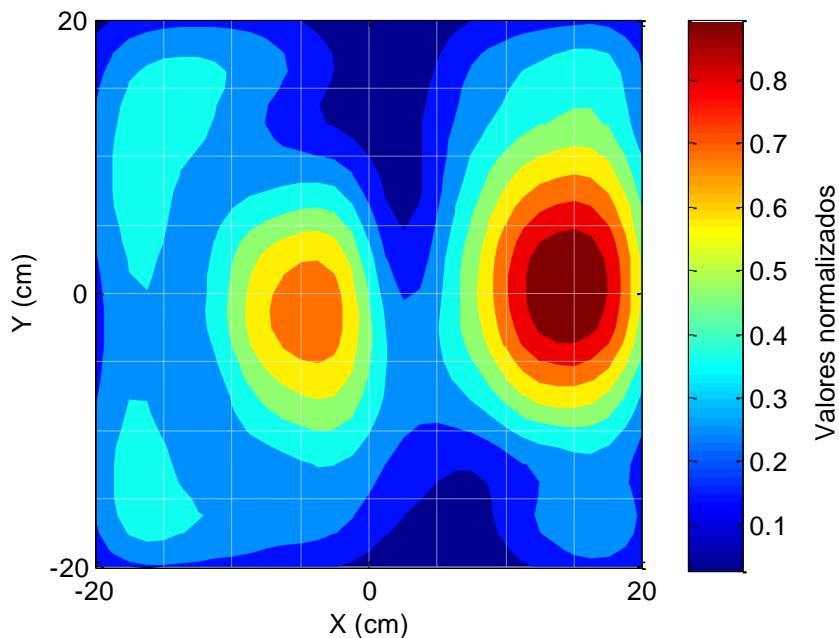


Figura 6.16. Distribución de presiones en el plano de dos bocinas separadas 8.5 cm.

De las figuras 6.14, 6.15 y 6.16 se puede concluir parcialmente que las distribuciones de presión presentan el mismo patrón de radiación y el sistema visualiza ambas fuentes hasta una distancia entre ellas de 8.5 cm. Estos mismos resultados fueron observados al utilizar el arreglo lineal, sin embargo, el arreglo bidimensional tiene como ventajas: no contiene accesorios de ajuste mecánico, mejor alineación de sensores, mayor versatilidad para cambiar con precisión la distancia entre micrófonos, manejo portátil para realizar pruebas en el lugar donde se encuentre el objeto bajo estudio. Con estas ventajas y la reducción del 98% del tiempo de adquisición respecto al arreglo lineal lo hacen un instrumento práctico para realizar diferentes mediciones y realizar un diagnóstico a una máquina instalada en su lugar de trabajo sin interrumpir por un tiempo prolongado su actividad.

6.2.2 Mediciones dentro de cámara anecoica

Para cumplir con las condiciones de espacio libre se efectuaron mediciones con el arreglo bidimensional dentro de una cámara en forma de cubo con 2.4 metros de arista forrada en paredes y techo con tapetes fonoabsorbentes. La fotografía de la figura 6.17 muestra una toma de esta cámara en donde también se alcanza apreciar en su parte interna el sistema de medición.

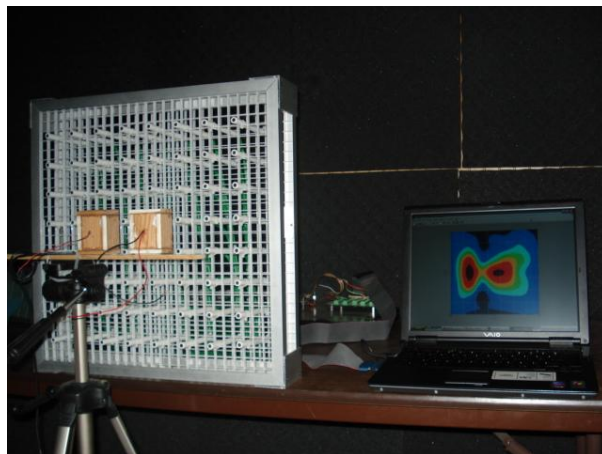


Figura 6.17. Vista interna de la cámara forrada con tapetes fonoabsorbentes.

En las figura 6.18 y 6.19 se muestra el resultado de la retropropagación de los datos medidos hacia el plano de dos bocinas separadas 20 y 8.5 centímetros respectivamente. Al comparar las mediciones fuera y dentro de la cámara anecoica se encontró que la relación señal a ruido mejoró de 35 dB a 48 dB, esto dio como resultado imágenes con menor distorsión. Pero lo más importante es que los patrones que representan la radiación acústica se repiten y la ubicación relativa de cada una de las fuentes de sonido se sigue apreciando.

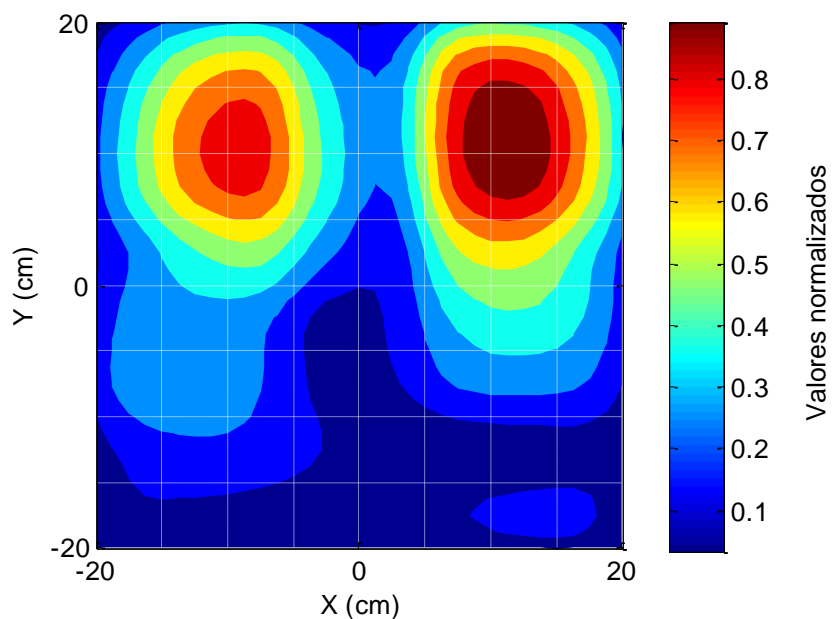


Figura 6.18. Retropropagación de datos medidos dentro de cámara anecoica hacia el plano de bocinas separadas 20 cm.

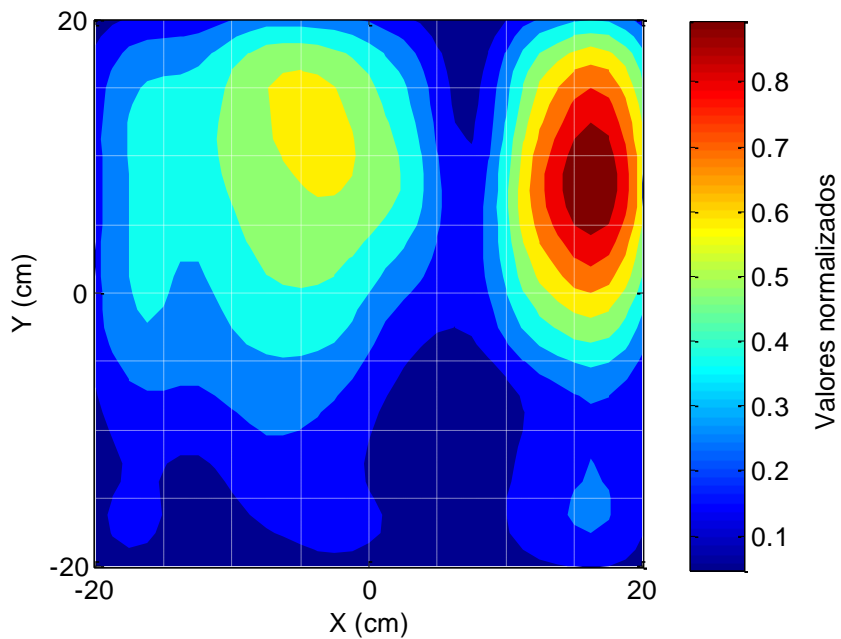


Figura 6.19. Retropropagación de datos medidos dentro de cámara anecoica hacia el plano de bocinas separadas 8.5 cm.

Se puede concluir hasta aquí, que con este instrumento se tiene la posibilidad de visualizar la radiación acústica de dos fuentes de sonido separadas hasta media longitud de onda y ubicar su posición relativa. Además de que para estos experimentos con bocinas excitadas a una frecuencia única la cámara anecoica no fue un factor preponderante en su visualización.

6.3 Visualización de fuentes de sonido en máquinas eléctricas rotatorias.

En las secciones 6.1 y 6.2 se muestra la capacidad de un arreglo 2D de 8 x 8 micrófonos para visualizar a dos fuentes de sonido operando a frecuencia única y separadas al menos media longitud de onda. Lo que se presenta a continuación es el resultado de los experimentos con los campos acústicos complejos de dos máquinas eléctricas rotatorias.

El objetivo en esta etapa experimental fue probar la capacidad del arreglo 2D para distinguir las principales fuentes de sonido de un motor de inducción y un ventilador de tres aspas. La figura 6.20 muestra las imágenes de estas dos máquinas señalando la ubicación de sus principales partes en movimiento.

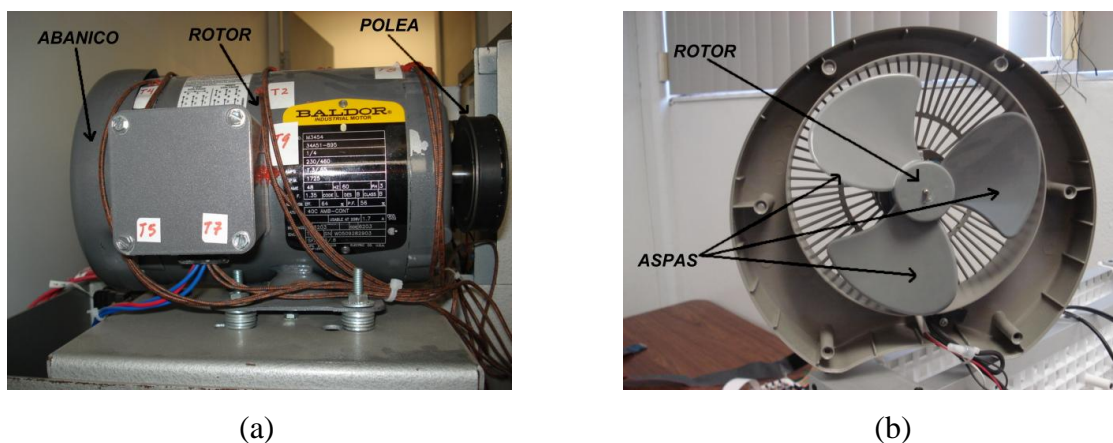


Figura 6.20. (a) Motor de inducción de jaula de ardilla de 1hp.
(b) Ventilador de oficina de 3 aspas.

La visualización de fuentes de sonido en máquinas es un trabajo más complicado ya que se trata con campos de sonido representados por la sumatoria de ondas sinusoidales simples con diferentes frecuencias denominadas armónicas.

A diferencia del trabajo con las bocinas excitadas a frecuencia única, aquí se debe observar el espectro de frecuencias de los diferentes canales que contienen los datos adquiridos de la máquina bajo estudio. De ahí se selecciona alguna componente de frecuencia predominante para la cual se desea visualizar la radiación acústica medida por el arreglo de micrófonos, así como la reconstrucción del campo acústico en un plano paralelo a este.

En este estudio el análisis de las máquinas rotatorias queda restringido para frecuencias de hasta 3.4 kHz frecuencia que se definió y explicó en la sección 5.5. Sin embargo, la rejilla sobre la cual están montados los sensores hacen posible la reubicación de los micrófonos quedando una distancia de 2.5 cm entre ellos. Con esto la máxima frecuencia que sería capaz de muestrear el arreglo es de 6.4 kHz. Se aclara lo anterior, dado que en la figura 6.21 se muestran los espectros de frecuencia de 8 canales adquiridos de un motor de inducción en donde se pueden observar componentes de frecuencia de hasta 5 kHz., esto no significa que por arriba de este valor el motor no pudiera llegar a tener otras componentes significativas. Si así lo fuera, quedan fuera del interés de este estudio, limitándose el análisis para aquellas fuentes de sonido que produzcan señales que estén dentro del rango de operación de la matriz de sensores.

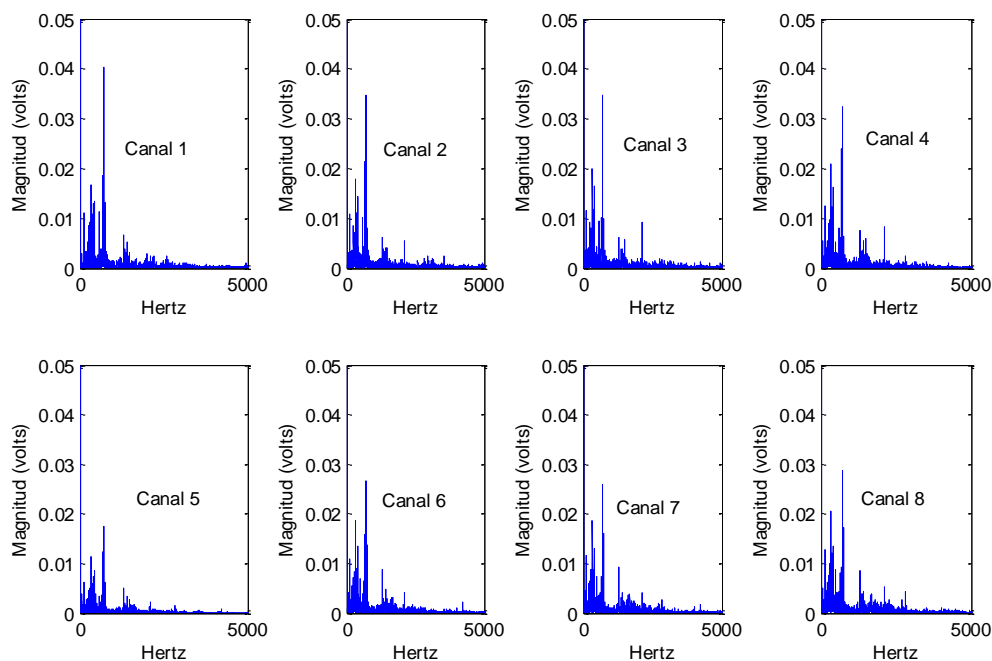


Figura 6.21. Espectros de frecuencia de 8 canales de adquisición con datos medidos a un motor de inducción de jaula de ardilla.

Como primera prueba se realizó un barrido al motor de inducción que se encuentra fijado a una mesa junto a un generador de corriente directa que emula una carga para el motor. Debido a esto el espacio para colocar el arreglo de micrófonos quedo reducido y se logro acercarlo al motor a una distancia de 13 centímetros. Esta distancia es medida tomando como referencia el inicio de la carcasa del motor.

Con los datos medidos se consulta en la interfaz gráfica los espectros de frecuencia de algunos canales y se selecciona una de las componentes predominantes. La figura 6.22 muestra la distribución de presiones según la componente de frecuencia de 1100 Hz. Se pueden apreciar tres zonas de más alta intensidad acústica que corresponden al abanico, rotor y polea del motor. El objetivo es lograr separar mediante NAH a estas tres fuentes de sonido.

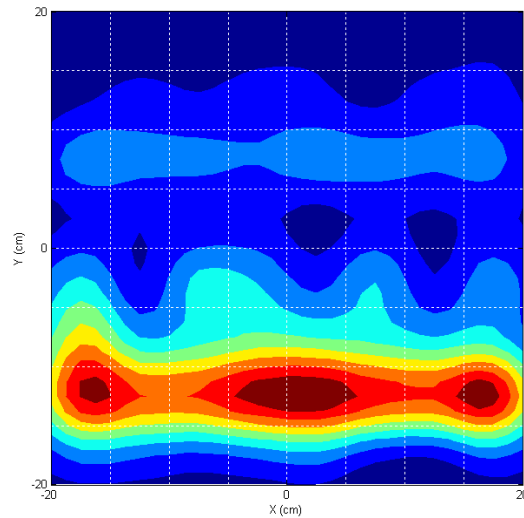


Figura 6.22. Distribución de presiones en el plano de medición de un motor de inducción según la componente de 1100 Hz.

Al aplicar la técnica NAH se obtuvo la gráfica de la figura 6.23 que corresponde a la reconstrucción del campo acústico en el plano del motor. Para una mejor interpretación de esta gráfica se montó sobre la figura el contorno del motor. Se puede ver que se definen mejor las tres fuentes que se mencionaron con anterioridad y que una persona con antecedentes en motores eléctricos las puede relacionar con radiación acústica emitida por las principales partes en movimiento de la máquina.

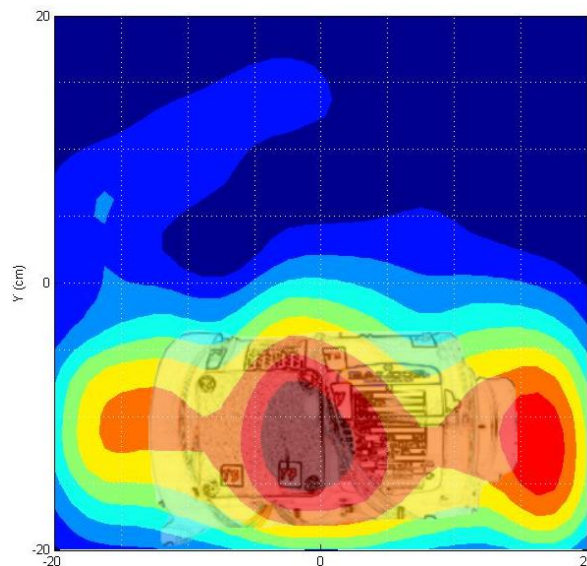


Figura 6.23. Contorno de la máquina sobre puesto en la distribución de presiones sobre el plano del motor.

Se repitieron al menos diez mediciones más con el motor para verificar que las distribuciones de presión medidas siguieran el mismo patrón. Con una de estas mediciones se hizo la reconstrucción holográfica para diferentes planos entre el motor y el plano de medición, tomando como distancia entre el motor y el arreglo de micrófonos el punto donde inicia la carcasa de la máquina, es decir, el primer plano del motor a 13 centímetros. Los resultados de esto son ilustrados en la gráfica 6.24, en la que se puede ver que en el plano de medición solo se distinguen dos fuentes predominantes, pero a medida que se acerca al plano del motor se van definiendo las tres fuentes predominantes de sonido, abanico, rotor y polea.

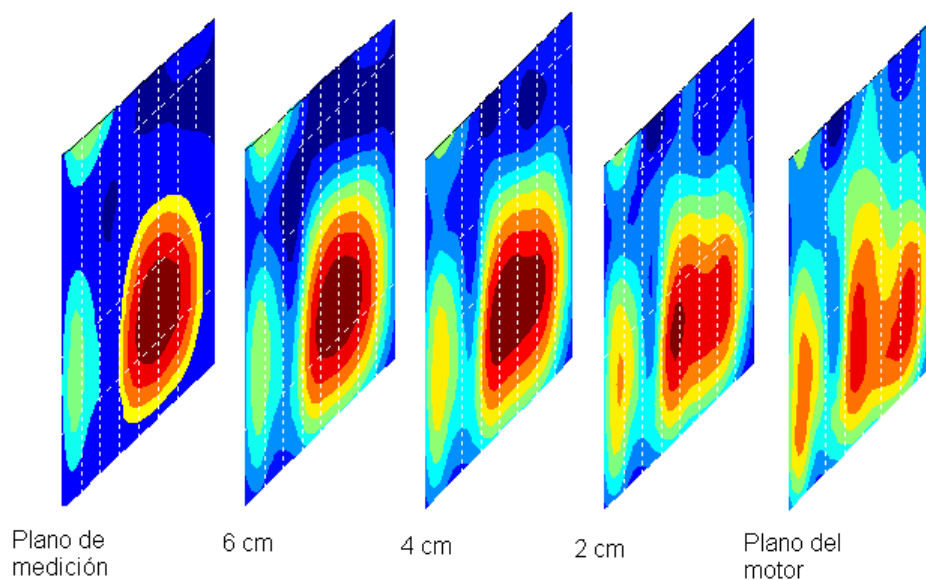


Figura 6.24. Retropropagaciones en planos paralelos entre el motor y el arreglo de micrófonos.

Debido a limitaciones propias de la instalación de la máquina rotatoria, la distancia entre el motor y la matriz de micrófonos se mantuvo en 13 centímetros. Al retropropagar los datos, esta es la distancia que se toma como la del plano del motor, surgiendo la siguiente pregunta: ¿por qué no declarar al momento de retropropagar diferentes planos?, es decir, dividir al motor en planos paralelos y así al momento de procesar los datos adquiridos declarar que el plano se encuentra por ejemplo a 17, o 21 centímetros.

Lo anterior significaría ir hacia el interior de la máquina y dar una aproximación de la variación de la radiación acústica de las partes en movimiento y cómo se va distribuyendo a través de la carcaza. En la figura 6.25 se muestra un esquema del experimento que se llevó a cabo.

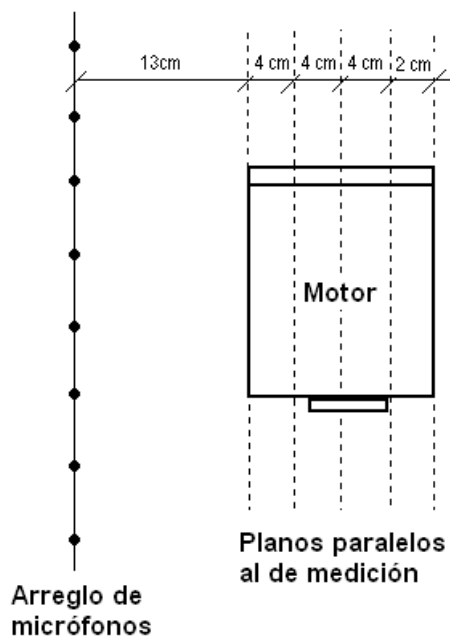


Figura 6.25. Esquema del experimento definiendo varios planos al motor eléctrico.

Se realizaron cinco mediciones definiendo planos a 13, 17, 21, 25 y 27 centímetros. Los resultados que arroja sus respectivas retropropagaciones son dispuestas en una sola figura restringiendo la gráfica a la zona donde se encuentra el motor, esto con el fin de no desviar la atención. En la figura 6.26 se pueden ver estas distribuciones de presión en donde se puede dar cuenta que a medida que el plano que se declaró para el motor se aleja del plano de medición, la capacidad para resolver para diferentes fuentes de sonido va decreciendo. Esto es, en los tres primeros planos, 13, 17 y 21 centímetros, se distinguen tres fuentes de sonido (polea, rotor y abanico) y en los últimos dos, los más alejados del plano de medición, solo se pueden observar dos fuentes de sonido predominantes.

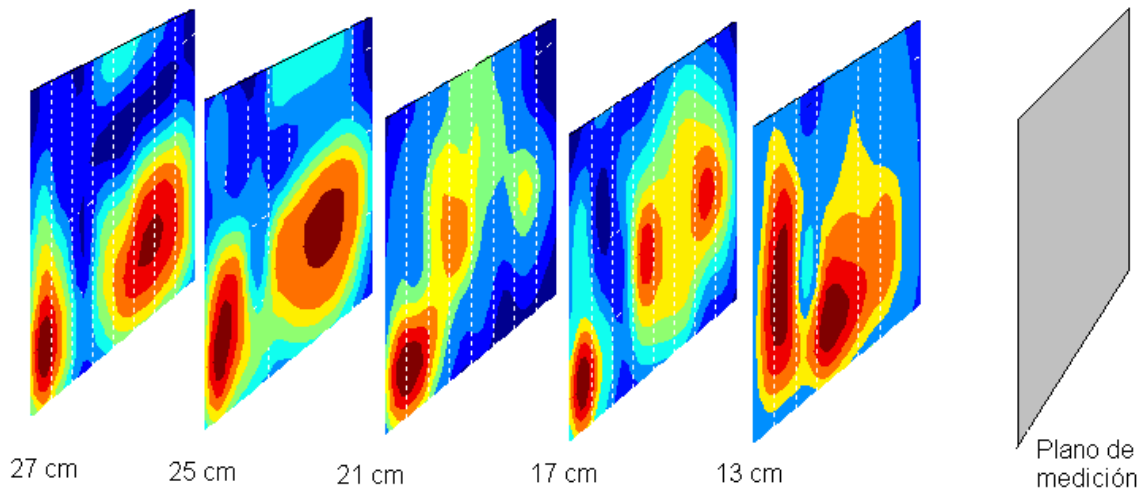


Figura 6.26. Retropropagaciones de datos medidos definiendo diferentes planos al motor.

Como parte final de la etapa experimental de este trabajo de investigación, se buscó una segunda estructura vibrante con sus partes bien definidas. Se escogió un pequeño ventilador de oficina de tres aspas. Por su tamaño y voltaje de operación las mediciones llevadas a cabo con esta máquina se pudieron realizar dentro de la cámara anecoica.

Del procesamiento de los datos adquiridos con el ventilador se encontró que ciertas componentes de frecuencia como la de 1kHz se concentran en las aspas del ventilador. Al aflojar la tuerca que soporta a las aspas da lugar a que la máquina empiece a vibrar dando lugar a que predominen otras componentes de frecuencia. En la gráfica de la figura 6.27 se muestra la distribución de presiones en el plano holográfico según las componentes de 1kHz. En ella se ven tres fuentes predominantes de sonido correspondiente a cada una de las aspas. Esta situación se confirma al retropropagar los datos medidos al plano del ventilador. En la figura 6.28 se presenta un fotomontaje del contorno de la máquina rotatoria y la distribución de presiones sobre el plano del ventilador.

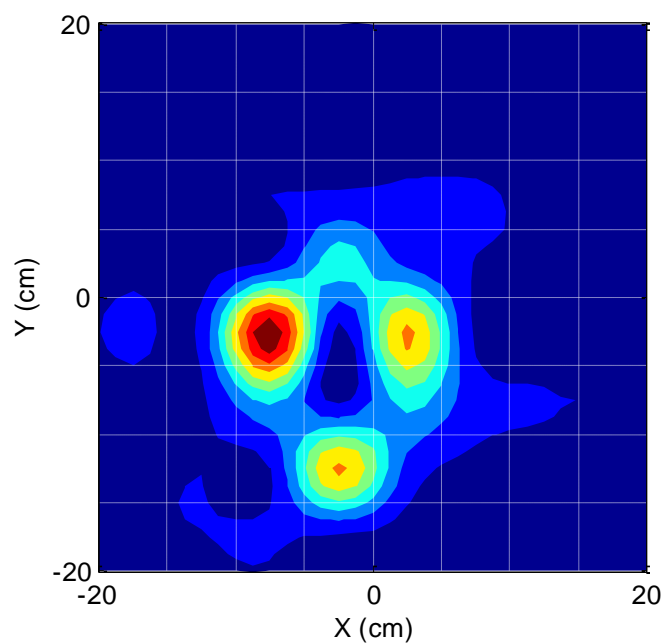


Figura 6.27. Distribución de presiones en el plano de medición de un ventilador de tres aspas para una frecuencia de 1kHz.

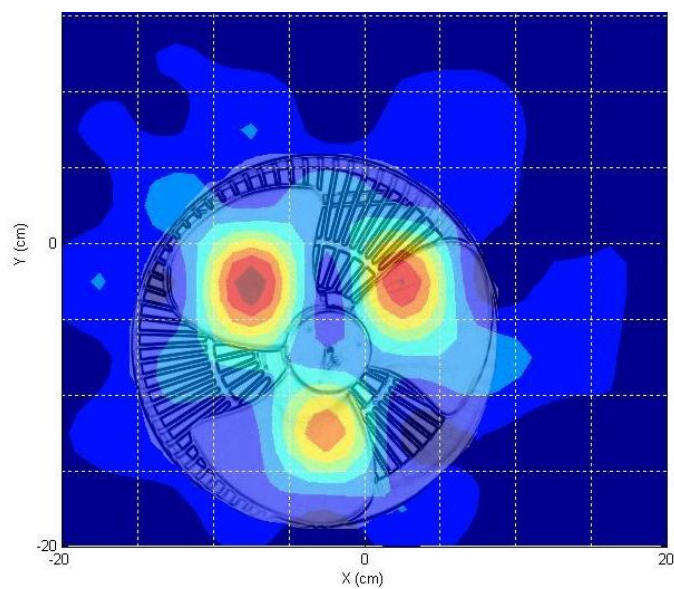


Figura 6.28. Distribución de presiones acústica sobre el plano de un ventilador de tres aspas para una frecuencia de 1kHz.

Al procesar los datos medidos del ventilador para una frecuencia de 2.4 Khz. se encontró que en la distribución de presiones medidas se alcanzan a identificar tres fuentes predominantes, es decir, esta componente de frecuencia también se encuentra localizada en las aspas, ver figura 6.29. Sin embargo al retropropagar los datos medidos hacia el plano del ventilador encontramos una sola fuente predominante de sonido. Esto lo podemos observar en la gráfica de la figura 6.30, en donde se aprecia como la radiación acústica se propaga desde la parte central del ventilador (rotor) hacia las aspas. Lo cual significa que el origen de estas componentes de frecuencia en las aspas es la vibración producida desde el rotor.

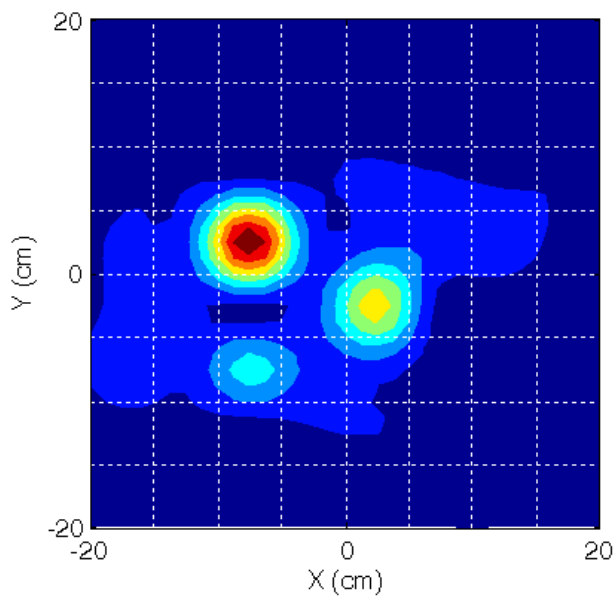


Figura 6.29. Distribución de presiones de un ventilador en el plano de medición según la componente de 2.4kHz.

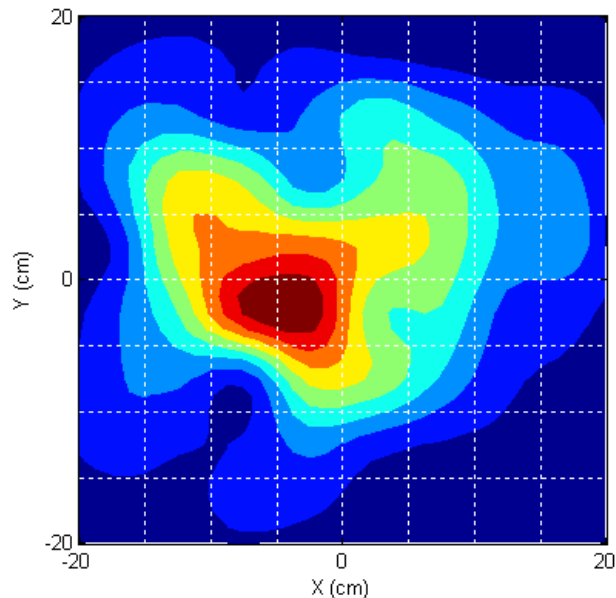


Figura 6.30. Retropropagación de los datos medidos hacia el plano del ventilador para una frecuencia de 2.4 KHz.

Con esto último, si el objetivo del análisis de campos sonido en máquinas es el de reducir sus emisiones de ruido acústico mediante cambios en su diseño se deberá considerar antes su contenido espectral, la localización de las fuentes predominantes de sonido y la importancia relativa de estas fuentes predominantes. Tal como el caso del ventilador, si la decisión de hacer un cambio en el diseño de esta máquina se basará en los datos medidos para una frecuencia de 2.4 kHz, se pensaría que el problema se encuentra en las aspas, siendo que el origen de esta componente es el rotor.

Capítulo 7

7.1 Conclusiones

Se diseñaron y construyeron dos arreglos de micrófonos, uno unidimensional de 7 micrófonos y el otro bidimensional formando una matriz de 8 x 8 sensores. Los dos tipos de arreglos fueron utilizados junto con una interfaz gráfica y el método establecido de acústica de Fourier conocido como NAH para la visualización de campos acústicos.

La resolución de los arreglos desarrollados fue de media longitud de onda; que en términos de la frecuencia utilizada de 2 kHz, la capacidad para distinguir entre dos fuentes de sonido fue de 8.5 cm.

Se demostró experimentalmente que el modelo de holografía acústica de campo cercano NAH puede ser extendido a fuentes de sonido con geometrías irregulares, además de las fuentes de sonido puntuales. Los resultados obtenidos muestran que el arreglo puede ser utilizado como herramienta de diagnóstico en máquinas eléctricas.

Al utilizar una y dos bocinas como fuentes de sonido, tanto el arreglo en una dimensión como el arreglo bidimensional generan patrones similares de distribución de presión acústica. Sin embargo, en las representaciones de contornos con el arreglo 2D se observa una mejoría en la simetría de las distribuciones de presión acústica respecto a los ejes x y y . Por otro lado, el uso del arreglo 2D y la interfaz gráfica desarrollada en Matlab junto con la multiplexión de lecturas vino a disminuir a 24 segundos el tiempo de adquisición de datos, que representa una reducción del 98% respecto al tiempo del arreglo lineal; se logra la adquisición de un campo acústico en tiempo real. Como consecuencia de esto se puede dedicar más tiempo al análisis y procesamiento de gráficos para discernir rasgos 3D sobresalientes de campos acústicos complejos.

Con el uso del arreglo 2D de micrófonos y NAH en campos acústicos complejos, se logró identificar, las principales partes móviles (rotor, polea y abanico) de un motor de inducción de jaula de ardilla. Mediante la retropropagación, o reconstrucción holográfica de los datos medidos para planos paralelos entre el arreglo y el motor, se logra observar como los patrones de radiación acústica varían: desde distinguir a una sola fuente de sonido en el plano de medición, hasta visualizar las tres principales fuentes de sonido del motor sobre el primer plano del motor. Más aún, se logra dar una aproximación del

comportamiento de la radiación acústica hacia la parte interna del motor al realizar retropropagaciones hacia planos internos de la máquina.

Con los experimentos realizados con el arreglo 2D y un abanico eléctrico de tres aspas se logra identificar las principales partes móviles de esta máquina (rotor y aspas). Las reconstrucciones holográficas obtenidas al provocar una falla en la parte que sujeta las aspas con el rotor muestran la visualización de tres fuentes de sonido predominantes (aspas) para una componente de frecuencia de 1 kHz y una sola fuente predominante (rotor) para una frecuencia de 2.4 kHz.

Lo anterior hace concluir que el uso de NAH, la interfaz gráfica y la automatización de las lecturas permiten establecer en el lugar donde opera la máquina la importancia relativa de las fuentes predominantes de ruido acústico y su relación entre la componente espectral de la fuente de ruido y la parte de la estructura vibrante que lo produce.

Por último, los experimentos con bocinas y máquinas eléctricas se llevaron a cabo dentro y fuera de una cámara anecoica. En ambos casos fue posible distinguir y ubicar las diferentes fuentes de sonido. Con ello se puede afirmar que el arreglo es adecuado para emplearse en ambientes no ideales como un instrumento de diagnóstico rápido del ruido acústico producido por una máquina y que puede ser percibido por un individuo.

7.2 Trabajos a futuro

Del presente trabajo de investigación se desprenden los siguientes trabajos a futuro:

- Relación entre la concentración de energía acústica y energía térmica en un motor de inducción de jaula de ardilla.
- Método de calibración in situ de una matriz de micrófonos.
- Método para la visualización de múltiples fuentes de sonido basada en la contribución individual de cada una al campo acústico.
- Desarrollo de un propagador para la visualización de la radiación acústica dentro de superficies sólidas.

7.3 Publicaciones como resultado de este trabajo de investigación.

Producto de este trabajo de investigación se elaboraron y presentaron los siguientes artículos:

- C. Amaro, M. Bravo, “Patrón de Directividad para Evaluar el Desempeño de un Arreglo Lineal de Micrófonos”, memoria del XX Congreso de Instrumentación de la Sociedad Mexicana de Instrumentación SOMI, ISBN 970-32-2673-6.
- C. Amaro, O. Montaña, M. Bravo, “Arreglo de Micrófonos para la visualización de fuentes de sonido mediante holografía acústica”, memoria del Congreso de Instrumentación SOMI XXII ISBN 970-32-2673-6.
- C. Amaro, M. Vera, M. Bravo, “ Arreglo Bidimensional de Micrófonos para la Localización de Fuentes de Sonido Basados en la Holografía Acústica de Campo Cercano”, memoria de la Semana Nacional de Ingeniería Electrónica, SENIE07, pp. 18-23.
- C. Amaro, M. Bravo, “Arreglo 2D de Micrófonos para la Visualización de Fuentes de Sonido” en la memoria del Segundo Coloquio de Posgrado del Instituto de Ingeniería de la UABC. ISBN 978-970-735-098-4 , pp. 403-409.
- M. Bravo, C. Amaro, “On Some Aspects of a Microphone Array Prototype for Visualization of Sound”, 19th International Conference on Electronics Communications and Computers, CONIELECOMP 2009, published by IEEE Computer Society, ISBN 978-0-7695-3587-6, pp 178-182.

Referencias

- [1] Michael C. Harris, "Development of an energy based NAH system", Brigham Young University, Master of Science Thesis, August 2005.
- [2] D. Nicholas, A.W. Nicholas, "Two-dimensional diffraction scanning of both fresh and fixed normal and cancerous human hepatic tissue", *Acoustical Imaging*, vol 12, Plenum Press, pp.469-478, 1982.
- [3] P.R. Mesdag, D. de Vries, "An approach to tissue characterization based on wave theory using a new velocity analysis technique", *Acoustical Imaging*, vol. 12, Plenum Press, pp. 479-491, 1982.
- [4] D.A. Sinclair, I.R. Smith, "Tissue characterization using acoustic microscopy", *Acoustical Imaging*, Plenum Press, vol.12, pp. 505-516, 1982.
- [5] N.A. Barkova, "The current state of vibroacoustical machine diagnostics", *VibroAcoustical System and Technologies*, VAST, Inc. Russia.
- [6] J.H. Stanley, J.A. Spence, "Noise control for electric motors", *American Industrial Hygiene Association Journal*, pp. 588-595, 1968.
- [7] Sean F. Wu, "Methods for reconstructing acoustic quantities based on acoustic pressure measurements", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 124, pp. 2680-2697, 2008.
- [8] Earl G. Williams and J.D. Maynard, "Holographic imaging without the wavelength resolution limit", *Physical review letters*, The American Physical Society, vol 45, No. 7, 1980.
- [9] J. D. Maynard, E.G. Williams, Y. Lee, "Nearfield acoustic holography I: Theory of generalized holography and the development of NAH", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol 78, No. 4, 1985.
- [10] W.A. Veronesi, J.D. Maynard, "Nearfield acoustic holography (NAH) II. Holographic reconstruction algorithms and computer implementation", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol 81, No. 5, 1986.
- [11] Yang-Hann Kim, "Can we hear the shape of a noise source?", 18th International Congress on Acoustics, Japan, 2004.
- [12] F. Jacobsen, V. Jaud, "Statistically optimized near field acoustic holography using an array of pressure-velocity probes", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 121, pp.1550-1558, 2007.
- [13] F. Jacobsen, Yang Liu, "Near field acoustic holography based on an array of particle velocity sensors", *Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, Rio de Janeiro, Brasil, Inter-noise 2005.
- [14] H. Houjoh, S. Ohshima, K. Umezawa, "Sound field assessment by measurement of sound pressure distribution close to machine noise source. JSME International Journal Series C, vol. 40 No. 4, 607-615, 1997.
- [15] Haruo Houjoh and Shun-ichi Ohshima, "Some problems of nearfield holographic measurement with a limit sized handy 2-D array for an on-site machine noise assessment", *International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering*, Netherlands, 2001.

- [16] Shun-ichi Ohshima, "A study of utilizing a handy 2-D microphone array for noise source localization base on NAH", Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology.
- [17] S. Oshima, H. Houjoh, K. Umezawa, "A real-time 2-D holographic acoustic measurement system for locating machinery noise sources", Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology.
- [18] N. Rayess, S.F. Wu, " Experimental validation of the HELS method for reconstructing acoustic radiation from a complex vibrating structure", Journal of the Acoustical Society of America, vol. 107, pp. 2955-2964, 2000.
- [19] S.F. Wu, N.E. Rayess, " Visualizing sound radiation from a vehicle front end using the HELS method", Journal of Sound and Vibration, vol. 248, pp. 963-974, 2001.
- [20] N.E. Rayees, "An investigation in acoustic holography using Helmholtz equation-least squares method", Collection for Wayne State Universtity, paper AAI3009861, 2001.
- [21] S.F. Wu, N.E. Rayess, X. Zhao, " Visualization of acoustic radiation from a vibrating bowling ball", Journal of the Acoustical Society of America, vol. 109, pp. 2771-2779, 2001.
- [22] V. Isakov, S.F. Wu, " On theory and application of the Helmholtz equation least squares method in inverse acoustics", Institute of Physics Publishing, Inverse problems, vol. 18, pp. 1147-1159, 2002.
- [23] S.F. Wu, "Hybrid near-field acoustic holography", Journal of the Acoustical Society of America, vol. 115, pp. 207-217, 2004.
- [24] E.G. Williams, "Fourier acoustics: uncovering the origins of sound", 11th International Congress of Sound and Vibration, pp.75-82, 2004.
- [25] R. Visser, "Inverse source identification based on acoustic particle velocity measurements", International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Inter-noise 2002.
- [26] R. Visser, "Acoustic source localization based on pressure and particle velocity measurements", International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Inter-noise 2003.
- [27] R.J. Ruhala, C.B. Burroughs, "Separation of partially coherent noise sources for application to near-field acoustical holography", Noise Control Engineering Journal, vol. 56, pp. 386-395, 2008.
- [28] M.A. Rowell, D.J. Oldham, "Determination of the directivity of a planar noise source by means of near-field acoustical holography: measurements on homogeneous, profiled and composite panels", Journal of Sound and Vibration, vol. 180, pp.99-118, 1995.
- [29] M.A. Rowell, D.J. Oldham, "Determination of the directivity of a planar noise source by means of near-field acoustical holography: theoretical background", Journal of Sound and Vibration, vol. 189, pp.369-398, 1996.
- [30] X. Zhao, S.F. Wu, "Reconstruction of vibro-acoustics fields using hybrid near-field acoustic holography", Journal of Sound and Vibration, vol. 282, pp.1183-1199, 2005.

- [31] T. Brooks, M. Marcolini, D. Pope, "A directional array approach for the measurement of rotor noise source distributions with controlled spatial resolution", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 112, pp. 192-197, 1987.
- [32] S. Oerlemans, P. Sijtsma, B. Mendez, "Location and quantification of noise sources on a wind turbine", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 299, pp. 869-883, 2007.
- [33] E.G. Williams, J.D. Maynard, E. Skudrzyk, "Sound source reconstructions using a microphone array", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 68, pp. 340-344, 1980.
- [34] S.F. Wu, "Non-invasive vibro-acoustic analysis", International Application Published Under the Patent Cooperation Treaty, WO2007/0664806 A2, 2007.
- [35] S.F. Wu, "Snapshot of noise and acoustic propagation", International Application Published Under the Patent Cooperation Treaty, WO2007/008990 A2, 2007.
- [36] S. Dumbacher, J. Blough, "Source identification using acoustic array techniques", *SAE Noise and Vibration Conference*, vol. 2, pp. 1023-1035, 1995.
- [37] P. Vijayraghavan, R. Krishnan, "Noise in electric machines", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35, pp. 1007-1013, 1999.
- [38] B.L. Goss, "Electric motor Noise: control of Noise at the source", *American Industrial Hygiene Association Journal*, pp. 16-21, 1969.
- [39] S.J. Yang, "Effects of voltage/current harmonics on noise emission from induction motors", *Vibrations and Audible Noise in Alternating Current Machines*, Eds. Dordrecht, Netherlands, pp. 457-468, 1988.
- [40] W. Li, C.K. Mechefske, "Detection of induction motor faults: a comparison of stator current, vibration and acoustic methods", *Journal of Vibration and Control*, vol. 12, SAGE publications, pp. 165-188, 2006.
- [41] V. Mata, "Análisis del comportamiento térmico de un motor de inducción de jaula de ardilla, trifásico, tipo TEFC, operando en condiciones de temperatura ambiente elevadas", tesis de maestría en ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, México, 2007.
- [42] Daniel R. Raichel, "The Science and Applications of Acoustics", Springer, USA, 2006.
- [43] Michael Brandstein and Darren Ward, "Microphone Arrays, Signal Processing Techniques and Applications", Springer, 2001.
- [44] Ilene J. Busch, E.L. Hixson I, "Types of Microphone", *Handbook of Acoustics*, Wiley & Sons, pp. 1411-1422, 1998.
- [45] I. A. Mc Cowan, "*Robust Speech Recognition using Microphone Arrays*", PhD Thesis, Queensland University of Technology, Australia, (2001).
- [46] J.M. Valin, F. Michaud, "Robust 3D localization and tracking of sound sources using beamforming and particle filtering", *IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing*, vol. 6, 2006.
- [47] Ba-Ngu Vo, Wing-Kin Ma, S. Singh, "Localizing an unknown time-varying number of speakers: a Bayesian random finite set approach", *IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing*, vol. 4, pp. 1073-1076 2005.

- [48] F. Antonacci, et al. "Efficient source localization and Tracking in reverberant environments using microphone arrays", IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing, vol. 4, pp. 1061-1064, 2005.
- [49] K. Nakadai, et. al., "Robust tracking on multiple sound sources by spatial integration of room and robot microphone arrays", IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing, vol. 4, 2006.
- [50] J. M. Valin, F. Michaud, J. Rouat, "Robust sound source localization using a microphone array on a mobile robot", IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing, vol.2, pp.1228-1233, 2003.
- [51] P. Aarabi, Q.H.Wang, "Integrated displacement Tracking and sound localization", IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing, vol.5, pp.937-940, 2004.
- [52] Y. Hioka, N. Hamada, "Separate estimation of azimuth and elevation DOA using microphones located at apices of regular tetrahedron", IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing, vol.2, pp.137-140, 2004.
- [53] Y. Rui, D. Florencio, "Sound source localization for circular arrays of directional microphones", IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing, vol.5, pp. 93-96, 2005.
- [54] H. Teutsch, W. Kellermann, "EB-SPIRIT: 2D localization of multiple wideband acoustic sources using eigenbeams", IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing, vol.3, pp.89-92, 2005.
- [55] G. Lathoud, M. Magimai-Doss, "A sector-based, frequency domain approach to detection and localization of multiple speakers", IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing, vol.3, pp. 265-268, 2005.
- [56] R.M. Nickel, A.N. Iyer, "A novel approach to automated source separation in multispeaker environments", IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing, vol.5, 2006.
- [57] D.C. Moore, I.A. McCowan, "Microphone array speech recognition: experiments on overlapping speech in meetings", IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing, vol.3, pp.497-500, 2003.
- [58] J.M. Valin, J. Rouat, F. Michaud, "Microphone array post-filter for separation of simultaneous non-stationary sources", IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing, vol.1, pp. 221-224, 2004.
- [59] H. Attias, "New EM algorithms for source separation and deconvolution with a microphone array", IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing, vol.5, pp. 297-300, 2003.
- [60] S. Choi, W. Moon, "A new microphone system for near whispering", Journal of the Acoustical Society of America, vol. 114, pp. 801-812, 2003.
- [61] S. Noniebo, S. Nordholm, "Noise reduction using an adaptive microphone array in a car: a speech recognition evaluation", IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, pp. 16-18, 1993.
- [62] S. Chen, Z. Sun, B. Bridge, "Traffic monitoring using digital sound field mapping", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.50, pp. 1582-1589, 2001.

- [63] E. Borg, L. Neovius, "A three-microphone system for real time directional analysis: toward a device for environmental monitoring in deaf-blind", *Journal of Rehabilitation Research and Development*, vol. 38, pp. 265-272, 2001.
- [64] B. Widrow, "A microphone array for hearing aids", *IEEE, Circuits and Systems Magazine*, vol1, pp. 26-32, 2001.
- [65] M. DePaul, "Sound Innovation" *Akustica Sensory Silicon*, vol. 1, No.4, 2005.
- [66] N. White, "Using microphone array to enhance sound capture", *Windows Vista Team Blog*, 2007.
- [67] Earl G. Williams, "Fourier Acoustics, Sound Radiation and Nearfield Acoustic Holography", *Academic Press*, (1999).
- [68] S.M. Dumbacher, D.L. Brown, "Practical aspects of making NAH measurements", *Society of Automotive Engineers, Inc*, 1998.
- [69] Joachim Bös, Lothar Kurtze, "Design and application of a low-cost microphone array for nearfield acoustical holography", *Department of mechatronics and machine acoustics, Darmstadt University of Technology*, 2007.
- [70] V. kudriavtsev, V. Polyshchuk, D.L. Roy, "Heart energy signature spectrogram for cardiovascular diagnosis", *Biomedical Engineering Online*, 6:16, <http://www.biomedical-engineering-online.com>, 2007.